

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Συστηματών Μεταδοσής Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Ανάπτυξη αλγορίθμου σύντηξης ετερογενών δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων για δυναμική παρακολούθηση και αναγνώριση αντικειμένων εντός οδικού περιβάλλοντος

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Νικόλαος Γ. Φλούδας

Αθήνα, Οκτώβριος 2007



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Συστηματών Μεταδοσής Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Ανάπτυξη αλγορίθμου σύντηξης ετερογενών δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων για δυναμική παρακολούθηση και αναγνώριση αντικειμένων εντός οδικού περιβάλλοντος

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Νικόλαος Γ. Φλούδας

Συμβουλευτική Επιτροπή : Νικόλαος Ουζούνογλου

Ηλίας Κουκούτσης

Άγγελος Αμδίτης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 28^η Ιανουαρίου 2008.

..... Νικόλαος Ουζούνογλου Καθηγητής ΕΜΠ Ηλίας Κουκούτσης Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ Δήμητρα-Θεοδώρα Κακλαμάνη Αναπλ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

.... Στέφανος Κόλλιας Καθηγητής ΕΜΠ Γεώργιος Στασινόπουλος Καθηγητής ΕΜΠ Κωνσταντίνος Σπέντζας Καθηγητής ΕΜΠ (ΣΜΜ)

..... Ιωάννης Τίγκελης Επικ. Καθηγητής ΕΚΠΑ

Αθήνα, Οκτώβριος 2007

..... Νικόλαος Γ. Φλούδας

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Νικόλαος Γ. Φλούδας, 2007. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περιληψη

Η χρήση πολλαπλών αισθητήρων, διαφορετικών τύπων, σε ενσωματωμένα συστήματα ασφαλούς οδήγησης εντός οχημάτων επεκτείνεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια. Το πρόβλημα της διαχείρισης αυτής της πολλαπλών πηγών, συμπληρωματικής ή πλεονασματικής πληροφορίας έχει αναγνωριστεί ως κύριος παράγων στην επέκταση και βελτίωση των παραπάνω συστημάτων. Η σύντηξη δεδομένων (data fusion) πολλαπλών αισθητήρων με την ορθολογική χρήση της ποικίλης αυτής πληροφορίας έχει πλέον καθοριστεί ως η λύση για την λειτουργική και χρηστική επέκταση των προχωρημένων εφαρμογών οδικής ασφάλειας.

Η εργασία αυτή συνεισφέρει στην κατεύθυνση αυτή με την σχεδίαση και ανάπτυξη ενός γενικού αλγορίθμου σύντηξης δεδομένων που αποσκοπεί στην επιτυχή δυναμική αναγνώριση και παρακολούθηση των γειτονικών κινούμενων οχημάτων ενός εξοπλισμένου με αισθητήρες επίσης κινούμενου οχήματος. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στις εν λόγω εφαρμογές είναι τα μικροκυματικά ραντάρ, σαρωτές λέιζερ και διάφοροι τύποι παθητικών αισθητήρων όρασης. Επίσης χρησιμοποιούνται στις εν λόγω εφαρμογές είναι τα μικροκυματικά ραντάρ, σαρωτές λέιζερ και διάφοροι τύποι παθητικών αισθητήρων όρασης. Επίσης χρησιμοποιούνται αδρανειακοί αισθητήρες πίνησης του οχήματος πλατφόρμας καθώς και αισθητήρες θέσης και πληροφοριακές βάσεις γεωγραφικών δεδομένων. Το κατανεμημένης αρχιτεκτονικής σύστημα σύντηξης δεδομένων που προτείνεται αποσκοπεί στην απόδοση υψηλού επιπέδου πληροφορίας για τα εντοπισμένα οχήματα στο περιβάλλον του οχήματος-πλατφόρμας αξιοποιώντας και ξεπεριώντας τις παρατηρήσεις των υπαρχόντων αισθητήρων. Η παρουσίαση του συστήματος περιλαμβάνει τα επιμέρους υποσυστήματα: της εκτίμησης και φιλτραρίσματος των παραμέτρων και της δυναμικής του οχήματος πλατφόρμας, των συστημάτων προεπεξεργασίας (ιχυηλασίας) των παρατηρήσεων καθενός από τους επιμέρους αισθητήρες και της σύνδεσης δεδομένων και εσωτερικά του υποσυστήματος ιχυηλασίας.

Οι καινοτομίες που προτείνονται σε αυτήν την εργασία περιλαμβάνουν τέσσερα κυρίως σημεία: (α) την διαχείριση πολλαπλών πηγών ετερογενούς πληροφορίας σε κινούμενη πλατφόρμα με έναν γενικό αλγόριθμο, (β) την επίλυση νέων προβλημάτων σύνδεσης δεδομένων για σημειακά και πολυσημειακά αντικείμενα, και την πολυδιάστατη ανάθεση (για πάνω από δύο αισθητήρες), (γ) την κυκλική γύρω από το όχημα-πλατφόρμα παρακολούθηση άλλων κινούμενων οχημάτων και (δ) την ανάπτυξη αλγορίθμου ιχνηλασίας για διαφορετικές τοπολογίες (π.χ. πίσω ή υπό γωνία) και τύπους αισθητήρων. Στην διδακτορική διατριβή περιλαμβάνονται η θεωρητική περιγραφή και σχεδίαση του γενικού συστήματος καθώς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής κάποιων υποσυστημάτων όσο και των διαφόρων εκδοχών του συστήματος.

Λέξεις κλειδιά: οδική ασφάλεια, ιχνηλασία, πολυδιάστατη σύνδεση δεδομένων, σύντηξη ετερογενών δεδομένων, κυκλική παρακιολούθηση, ανίχνευση αντικειμένων

ABSTRACT

The use of multiple, and of different types, sensors in onboard automotive safety systems is gaining continuously acceptance during the last years. Yet, the difficult issue of managing this heterogeneous, multisource, redundant or complementary information has been recognized as a bottleneck in the extension and improvement of these systems. Multiple sensor data fusion has also been acknowledged as the only promising solution for the rational use of this information and the operational and functional extension of advanced automotive safety applications.

This work contributes towards this direction with the design and development of a global data fusion algorithm that aims at the successful dynamic recognition and surveillance of neighboring moving vehicles to the also moving sensor equipped platform vehicle. Typical sensors used in this kind of applications and in the systems developed in this work, include long and short range microwave radars, laser scanners and various types of passive vision sensors. Moreover, platform vehicle usually contains movement inertial sensors, position sensors and some times data bases of geographic information systems. The proposed distributed data fusion system intends to assign high level of information to the tracked vehicles in the platform-vehicle's environment exploiting and outclassing the performance of single sensors. The outline of the main systems incorporates the subsystems of: estimation and filtering of platform vehicle's position and dynamics, preprocessing (tracking) systems of single sensors data and data association which is a subsystem of tracking systems and data fusion as well.

The innovative aspects introduced in this work comprise four main issues: (a) management of multisource heterogeneous information (many and of different type sensors) in a moving platform with a generic global algorithm, (b) solution of new data association problems for single and multipoint objects together with multidimensional assignment (more than two sensors), (c) the all-around platform vehicle tracking of other moving vehicles and (d) the development of a sensor tracking algorithm that deals with various topologies (e.g. rear or side looking sensors) and various types of sensors.

Keywords: traffic safety, tracking, multidimensional data association, heterogeneous data fusion, all around surveillance, object detection

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	5
Abstract	6
Περιεγόμενα	7
Πρόλογος	10
Γισανωνή	
$L = \frac{1}{2} P \alpha \pi u \kappa \alpha \alpha$	1 <i>4</i> 1 <i>1</i>
1.1 Βασικές εννοιες και ομολογία	14
Ορισμοι ρασικών εννοιών	14
12 $4z$ 0 z	
1.2 Αισθητηρες και συστηματά στις οοικες εφαρμογες	19
Πηγες πληροφοριας	19 22
20στηματα εφαρμογών οσικης ασφαλείας	
1.3 Επίστημη της συντης ης πληροφορίας	
Εκτιμηση καταστασης	
Συνδεση δεδομενων	
Συντηζη δεδομενων	
1.4 Επικεντρο και συνεισφορά της διατριβης	
1.5 Δομή του κειμένου	
Συμπεράσματα	
Αναφορές	
Αρχιτεκτονική Συστήματος	
2.1 Ιεραρχικά επίπεδα της σύντηζης δεδομένων στα συστήματα οδικής ασφάλ	<i>λειας</i> 46
2.2 Σύστημα σύντηξης δεδομένων και υποσυστήματα	
2.3 Σύστημα φορτηγού οχήματος	
Αρχιτεκτονική	
Αισθητήρες	
Εναλλακτική τοπολογία	
2.4 Σύστημα επιβατικού οχήματος	
Αρχιτεκτονική	
Αισθητήρες	64
2.5 Αλλα συστήματα	
Σύστημα σύντηξης ραντάρ-κάμερας	
Σύστημα σύντηξης ραντάρ-σαρωτή λέιζερ	
Σύστημα μηδενικού υπολογισμού θέσης	
Συμπεράσματα	
Αναφορές	
Ιννηλασία δεδομένων επιπέδου αισθητήρα	68
31 Σύστημα μνηλασίας αισθητήρα	
5.1 200 τημα τχνηλαστας ατοσητηρα Εκτίμηση κατάστασης	
Μέτοα επίδοσης αίλτοων	
3.2 Substruct underweich underweich θ égne	
5.2 Συστήμα μησενικού υπολογισμού θεσης	9/
Δυστηματά συντεταγμένων	80 02
Περιγραφή αλγορισμου	80
Anothereo μ and μ	
2.5 Δυστημα ιχνηλασίας μανταρ μακρινης αποστασης	
προσομοιωση της επισοσης οιαφορων φιλτρων	
πρακτικές εφαρμογές	
Ανιχνευση γεωμετριας οριων ορομου	

3.4 Σύστημα ιχνηλασίας ραντάρ κοντινής απόστασης	
3.5 Σύστημα ιχνηλασίας δεδομένων επεζεργασίας εικόνας	
3.6 Κεντρική σύντηζη δεδομένων επεζεργασίας εικόνας και ραντάρ	
3.7 Σύστημα ιχνηλασίας δεδομένων σαρωτή λέιζερ	
Σύστημα ανάλυσης δεδομένων σαρωτή λέιζερ χαμηλού επιπέδου	
Σύστημα ανάλυσης δεδομένων σαρωτή λέιζερ υψηλού επιπέδου	
Συμπεράσματα	
Αναφορές	
Σύνδεση δεδομένων σε δύο ή περισσότερες διαστάσεις	140
41 Επίλυση δυσδιάστατης ανάθεσης	140
Αλνόριθμος πλειστροιασμού	141
Αλνόσιθμος IVC	143
Αλγόριθμος Ν-καλυτέρων λύσεων	
Πιθανοτικές μέθοδοι σύνδεσης δεδομένων	
Η μέθοδος ΡΠΔ	140 146
Η μέθοδος ΙΡΩΛ	140 1/18
Λονικοποίηση και διανοακή ίκρους στην μέθοδο PDA	148 1 <i>1</i> 0
Επεκτάσεις και τοοποποιήσεις της μεθόδου IDA	
$A_2 = E_{\pi}(l_{1}) \sigma_{\pi} \sigma_{\pi}(l_{2}) \sigma_{\pi} \sigma_{\pi}(l_{2}) \sigma_{\pi} \sigma_{\pi}(l_{2}) \sigma_{\pi} \sigma_{\pi}(l_{2}) \sigma_{\pi} \sigma_{\pi}(l_{2}) \sigma_{\pi} \sigma_{\pi}(l_{2}) $	
4.2 Επιλυση πολοσιαστατής ανασεσής	130
M (θαδρα μα) άρω της αναθεσης πολλαπλών σιαστασεών	131 μάθοστας 152
Microsoft χ and μ	\sqrt{u}
Mieboooc χαλαρωσης του Lagrange για το S-οιαστάτο προρλημα της αν	<i>ιθεσης</i> 130
4.3 $\Pi \rho \sigma \sigma \rho \rho \sigma \omega \sigma \varepsilon \varsigma \kappa \sigma \sigma$	
Αποτελεσματα ουσοιαστατης αναθεσης	
Αποτελεσματα πολυδιαστατης αναθεσης	
Συμπερασματα	
Αναφορές	
Σύστημα σύντηξης δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων	174
5.1 Εφαρμογή δυναμικής επιτήρησης πίσω και πλαϊνών περιοχών	
Επεξεργασία δεδομένων των υποσυστημάτων εισόδου	
Συγχρονισμός	
Μετασχηματισμοί	
Σύνδεση δεδομένων και διαχείριση αντικειμένων	
Προσομοίωση συστήματος σύντηξης	
Αποτελέσματα προσομοίωσης	
Τελική εφαρμογή του συστήματος	
5.2 Εφαρμογή δυναμικής κυκλικής επιτήρησης	
5.3 Εφαρμογή πολυδιάστατης ανάθεσης	
Συμπεράσματα	
Αναφορές	
Συμπεράσματα	
 61 Σγολιασμός αποτελεσμάτων και συμπεράσματα. 	196
62 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	199
Δημοσιεύσεις	201
Ζημουιουοις	
Κατάλογος Πινάκων	
Συντομογραφίες	
Παράρτημα: Περιγραφή Λογισμικού	
Λογισμικό στο πειραματικό όγημα FIAT-INSAFES	

Λογισμικό στο πειραματικό όχημα VOLVO-ProFusion2	
Περιγραφή κύριων βιβλιοθηκών λογισμικού	
Συνολική Βιβλιονραφία	

Προλογος

Κύριο αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής αποτέλεσε η σχεδίαση και ανάπτυξη ενός γενικού αλγορίθμου σύντηξης δεδομένων που αποσκοπεί στην επιτυχή δυναμική αναγνώριση και παρακολούθηση των γειτονικών κινούμενων οχημάτων και η εφαρμογή του σε μια σειρά πειραματικών οχημάτων. Στην διδακτορική διατριβή περιέχονται σε γενικές γραμμές όλα τα ενδιάμεσα στάδια μελέτης, σχεδίασης και ανάπτυξης που έλαβαν χώρα από την έναρξη ενασχόλησης έως τον Οκτώβριο του 2007. Κυρίως παρουσιάζονται τα τρία τελικά συστήματα (οχήματα) στα οποία εξετάστηκε η λειτουργικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου σύντηξης, καθώς και τα επιμέρους υποσυστήματα τους. Η παρούσα εργασία αφορά επίσης και στην θεωρητική μελέτη, σχεδίαση και ανάπτυξη των αλγορίθμων αυτών σε Matlab σε πρώτη φάση και σε Visual C++ σε τελικό στάδιο. Σημαντικό κομμάτι της εργασίας αφορούσε επίσης στην ενσωμάτωση/ολοκλήρωση και έλεγχο των αλγορίθμων αυτών σε πραγματικά συστήματα οδικής ασφάλειας που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων της ομάδας Ι-SENSE του Εργαστηρίου Μικροκυμάτων. Ο συγγραφέας της εργασίας αυτής ασχολείται ερευνητικά με το ευρύτερο θέμα της σύντηξης δεδομένων από την περίοδο της ενασχόλησης με την διπλωματική του εργασία (Συστήματα Σύζευξης Δεδομένων – Ανάλυση και Προσομοίωση Υποσυστημάτων, Σεπτέμβριος 2002) στην σχολή ΗΜΜΥ του ΕΜΠ (περίοδος 2001-2) και εντατικά από τον Οκτώβριο του 2002 όταν εντάχθηκε στο ερευνητικό δυναμικό της ομάδας Ι-SENSE του Εργαστηρίου Μικροκυμάτων. Ευχαριστίες οφείλονται για την συνεργασία, την στήριξη και τις παρατηρήσεις τους στον επιβλέποντα καθηγητή και διευθυντή του εργαστηρίου Καθηγητή Ν. Ουζούνογλου και τον Δρ. Άγγελο Αμδίτη υπεύθυνο της ομάδας και συνεπιβλέποντα του διδακτορικού. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται για την άριστη συνεργασία και την εποικοδομητική συνεισφορά τους στους υποψ. Δρ. Μανόλη Τσόγκα και Δρ. Άρι Πολυχρονόπουλο καθ' όλη τη διάρκεια της ενασχόλησης μου με την διατριβή, καθώς και τον υποψ. Δρ. Παναγιώτη Λυτρίβη κατά τον τελευταίο χρόνο. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω του Ηλ. Μηχανικούς Χαρά Σερμπετζόγλου και Χάρη Αυγουστίδη που πραγματοποίησαν τη διπλωματική τους εργασία στην ερευνητική μας ομάδα και συνεργαστήκαμε σε θέματα που αφορούν τμήματα της διατριβής μου. Δεν πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ομάδας I-SENSE και ιδιαιτέρως τους Κωστή Κοντόπουλο, Κάτια Παγκλέ και Αρετή Τζελέπη με τους οποίους μοιραστήκαμε τον ίδιο χώρο εργασίας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τέλος, αλλά πάνω από όλα ευχαριστώ την οικογένεια μου για την συμπαράσταση και την στήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι τα πειραματικά οχήματα, δεδομένα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν στην διατριβή, αναπτύχθηκαν στα πλαίσια Ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων και συγκεκριμένα από το Κέντρο Ερευνών της FIAT και την VOLVO και πρέπει να ευχαριστήσω για τις τεχνικές υποδείξεις τους και την όλη συνεργασία, τους Dr. Maurizio Miglietta και Andrea Saroldi από την FIAT και τον Dr. Malte Ahrholdt από την VOLVO.

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Εισαγωγή

Η χρήση πολλαπλών αισθητήρων, συχνά και διαφορετικού τύπου, σε ενσωματωμένα συστήματα ασφαλούς οδήγησης εντός οχημάτων τα τελευταία χρόνια επεκτείνεται συνεχώς. Το πρόβλημα της διαχείρισης αυτής της προερχομένης από πολλαπλές πηγές, διαφορετικές μεταξύ τους, συμπληθωματικής ή πλεονασματικής πληθοφοθίας έχει αναγνωθιστεί ως ένας πεθιοθιστικός παράγων στην επέκταση και βελτίωση των παραπάνω συστημάτων. Σε γενικές γραμμές οι τυπικές εφαρμογές ασφαλούς οδήγησης απαιτούν υψηλής ακρίβειας πληροφορία, μεταξύ άλλων για τα γειτονικά οχήματα, τυχόν εμπόδια στον δρόμο, την γεωμετρία των ορίων του δρόμου ή των λωρίδων κυκλοφορίας κ.α. Η σύντηξη δεδομένων (data fusion) πολλαπλών αισθητήρων για την ορθολογική χρήση της ποικίλης αυτής πληροφορίας έχει πλέον καθοριστεί ως η κύρια λύση για την λειτουργική και χρηστική επέκταση των προχωρημένων εφαρμογών οδικής ασφάλειας. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται ιδιαιτέρως διότι η φύση των εφαρμογών αυτών συνεχώς αλλάζει προς πιο συγκεντρωτικές και απαιτητικές εφαρμογές, όπου η διαχείριση της εισερχομένης πληροφορίας δεν είναι όσο προφανής ήταν στο μονοαισθητηριακά συνήθως συστήματα της πρώτης γενιάς εφαρμογών ασφαλούς οδήγησης. Επίσης οι εφαρμογές αυτές εξελίσσονται και αυξάνονται σε πλήθος, από τα αρχικά συστήματα αποφυγής εμπρόσθιας σύγκρουσης, σε συστήματα για αποφυγή σύγκρουσης από τα πίσω ή τα πλάγια, συστήματα ασφαλούς αλλαγής λωρίδας, νυχτερινής οδήγησης, συνδυασμός με γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών κ.α.. Όλα τα παραπάνω εισάγουν με την σειρά τους σε διαφορετικούς τύπους και τοπολογίες αισθητήρων δημιουργώντας όλο και περισσότερο την ανάγκη ενός κοινού και αποτελεσματικού ενδιάμεσου επιπέδου μεταξύ αισθητήρων και εφαρμογών. Το ενδιάμεσο αυτό επίπεδο επεξεργασίας είναι η θέση που καταλαμβάνει ένα σύστημα σύντηξης δεδομένων αισθητήρων οδικών εφαρμογών.

Η εργασία αυτή συνεισφέρει στην κατεύθυνση αυτή με την σχεδίαση και ανάπτυξη ενός γενικού αλγορίθμου σύντηξης δεδομένων που αποσκοπεί στην επιτυχή δυναμική αναγνώριση και παρακολούθηση των γειτονικά κινούμενων οχημάτων ενός εξοπλισμένου με αισθητήρες οχήματος-πλατφόρμας το οποίο επίσης κινείται. Το κύριο βάρος όπως προαναφέρθηκε επικεντρώνεται στην αναγνώριση άλλων οχημάτων, που είναι μεγάλοι συνήθως στόχοι και παρατηρούνται από το σύνολο των διαθεσίμων αισθητήρων. Οι άλλοι παράγοντες της ανακατασκευής ενός οδικού περιβάλλοντος πέραν του οχήματος-πλατφόρμας και των οχημάτων-στόχων, που είναι οι πεζοί/ποδηλάτες και η γεωμετρία του δρόμου (λωρίδες κυκλοφορίας, μεταλλικές μπάρες) αναγνωρίζονται συνήθως από εξειδικευμένα συστήματα (συνήθως κάμερες) και δεν αποτελούν κύριο αντικείμενο μελέτης σε αυτήν την εργασία.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως στις εν λόγω εφαρμογές ασφαλούς οδήγησης καθώς και στα συστήματα σύντηξης δεδομένων που εξετάζεται εδώ είναι τα μικροκυματικά ραντάρ μακρινού και κοντινού πεδίου, σαρωτές λέιζερ και διάφοροι τύποι οπτικών παθητικών αισθητήρων. Οι αισθητήρες αυτοί πέραν της διαφορετικής ποιότητας μετρήσεων που δίνουν διαφέρουν και ως προς το είδος της διαθέσιμης πληροφορίας που παρέχει ο κάθε κατασκευαστής. Για παράδειγμα κάποια ραντάρ διαθέτουν επιπλέον πληροφορία ακτινικής ταχύτητας σε αντίθεση με άλλα που δίνουν μόνο πληροφορία θέσης. Γενικά το επίπεδο επεξεργασίας που υφίσταται τα σήματα εισόδου σε κάθε διαφορετικό αισθητήρα δεν είναι συνήθως γνωστό, λόγω της πολιτικής του εκάστοτε προμηθευτή, με κάποια συστήματα να δίνουν και επιπλέον ποιοτικές τιμές όπως τυπικές αποκλίσεις και διακυμάνσεις. Η κατάσταση αυτή είναι ένας ακόμα λόγος της επιλογής του υπό εξέταση κατανεμημένου συστήματος σύντηξης δεδομένων οπού ένα ενδιάμεσο επίπεδο επεξεργασίας (ιχνηλασία) των μετρήσεων κάθε αισθητήρα λαμβάνει χώρα πριν το τελικό στάδιο σύντηξης των δεδομένων. Η διαδικασία στο επίπεδο των μετρήσεων του κάθε αισθητήρα καθορίζει και τον χαρακτηρισμό του συστήματος σύντηξης σαν κατανεμημένο σε αντιπαράθεση με τις αρχιτεκτονικές κεντρικού επιπέδου όπου δεν υπάρχει αυτό το ενδιάμεσο επίπεδο και υπάρχει άμεση επεξεργασία των μετρήσεων. Όσον αφορά τους αισθητήρες πρέπει να σημειωθεί ότι το όχημα πλατφόρμα είναι πάντοτε εξοπλισμένο με αδρανειακούς αισθητήρες κίνησης καθώς και αισθητήρες αναγνώρισης θέσης και αρκετές φορές πληροφοριακές βάσεις γεωγραφικών δεδομένων.

Το κατανεμημένης αρχιτεκτονικής σύστημα σύντηξης δεδομένων που προτείνεται αποσκοπεί στην απόδοση υψηλού επιπέδου πληροφορίας για τα εντοπισμένα οχήματα στο περιβάλλον του οχήματος-πλατφόρμας αξιοποιώντας και ξεπερνώντας τις παρατηρήσεις των υπαρχόντων αισθητήρων. Η πληροφορία αυτή περιλαμβάνει ένα διάνυσμα κατάστασης που περιέχει κάποιο συνδυασμό εκτιμήσεων θέσης, ταχύτητας, επιτάχυνσης, πιθανόν γωνιακή επιτάχυνση, εκτιμήσεις διαστάσεων και ύψους του στόχου και ταυτοποίηση του τύπου του οχήματος. Συνήθως οι τελευταίες παράμετροι διαστάσεων και τύπου του στόχου δεν είναι εφικτοί χωρίς κάποιου είδους επεξεργασίας εικόνας στο σύστημα. Οι πληροφορίες του διανύσματος κατάστασης πρέπει να συνοδεύονται πάντα από κάποιο μέτρο ποιότητας και εμπιστοσύνης, το οποίο κατά κανόνα είναι η μήτρα συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης του διανύσματος κατάστασης, για την υλοποίηση ενός κατανεμημένου συστήματος σύντηξης δεδομένων. Το εν λόγω σύστημα περιλαμβάνει τα επιμέρους υποσυστήματα: της εκτίμησης και φιλτραρίσματος των παραμέτρων και της δυναμικής του οχήματος πλατφόρμας, των συστημάτων προεπεξεργασίας (ιχνηλασίας) των παρατηρήσεων καθενός από τους επιμέρους αισθητήρες και της σύνδεσης δεδομένων που αποτελεί υποσύστημα τόσο των συστημάτων ιχνηλασίας όσο και του γενικού συστήματος σύντηξης δεδομένων. Η σύνδεση δεδομένων αφορά την ανάθεση νέων μετρήσεων σε υπάρχοντα ίχνη στα συστήματα ιχνηλασίας και στη σύνδεση ιχνών από διαφορετικούς αισθητήρες μεταξύ τους στην σύντηξη δεδομένων. Η ύπαρξη των εκτιμημένων παραμέτρων θέσης και δυναμικής του οχήματος-πλατφόρμας είναι ισχυρό προαπαιτούμενο για την επιτυχή επίδοση τόσο των συστημάτων ιχνηλασίας όσο και του γενικού συστήματος σύντηξης.

Οι καινοτόμες λύσεις που προτείνονται σε αυτήν την εργασία επικεντρώνονται σε τέσσερα κυρίως σημεία: (α) την διαχείριση πολλαπλών πηγών πληροφορίας (μεγάλος αριθμός και διαφορετικοί τύποι αισθητήρων) σε κινούμενη πλατφόρμα με έναν γενικό αλγόριθμο, (β) την επίλυση νέων προβλημάτων σύνδεσης δεδομένων για σημειακά και πολυσημειακά αντικείμενα, και την πολυδιάστατη ανάθεση (για πάνω από δύο αισθητήρες), (γ) την κυκλική γύρω από το όχημαπλατφόρμα παρακολούθηση άλλων κινούμενων οχημάτων και (δ) την ανάπτυξη αλγορίθμων ιχνηλασίας για διαφορετικές τοπολογίες (π.χ. πίσω ή υπό γωνία) και τύπους αισθητήρων. Το πρώτο σημείο έγκειται στο ότι τα συνήθη κατανεμημένα συστήματα σύντηξης δεδομένων περιλαμβάνουν αισθητήρες του ιδίου τύπου και επίσης αποτελούνται από αισθητήρες σταθερής θέσης (μη κινούμενους). Το υπό εξέταση σύστημα διαχειρίζεται δεδομένα διαφορετικής φύσης με έναν γενικό τρόπο πάνω σε μια κινούμενη πλατφόρμα. Υπάρχουν δεδομένα εισόδου από διαφόρους τύπους ραντάρ, από μετασχηματισμένα στο επίπεδο του δρόμου δεδομένα επεξεργασίας εικόνας από ενσωματωμένες κάμερες και επίσης μετρούμενα αντικείμενα αποτελούμενα από ομάδες σημείων και προερχόμενα από μετρήσεις ραντάρ κοντινού πεδίου και σαρωτές λέιζερ. Σε αυτήν την εργασία ένας αλγόριθμος σύντηξης δεδομένων αποσκοπεί στην εξαγωγή υψηλού επιπέδου πληροφορίας πολλαπλών στόχων από πολλές και διαφορετικές πηγές. Η ύπαρξη των προαναφερθέντων αντικειμένων αποτελούμενων από πολλαπλά σημεία δημιουργεί το θέμα που αφορά στην ομαδοποίηση των σημείων και τη δημιουργία των ομαδικών αντικειμένων καθώς και την ανάπτυξη μεθόδων σύνδεσης πολυσημειαχών αντιχειμένων μεταξύ τους ή με σημειαχά. Επίσης εξετάστηκε και η επέκταση των τυπικών δυσδιάστατων λύσεων στο πρόβλημα της ανάθεσης σε πολυδιάστατα συστήματα σύνδεσης δεδομένων, όπου πάνω από δύο αισθητήρες επιτηρούν την ίδια περιοχή. Το τρίτο θέμα αφορά την κυκλική παρακολούθηση αντικειμένων γύρω από το όχημαπλατφόρμα, και αφορά στην επιτυχή διατήρηση της ταυτότητας και συνέχειας των ιχνών όταν διασχίζουν πεδία παρακολούθησης διαφορετικών αισθητήρων. Ειδικές αρχιτεκτονικές και

τοπολογίες πειραματικών οχημάτων επιτρέπουν τον έλεγχο και την αξιολόγηση της προτεινόμενης λύσης για αυτήν την περίπτωση και για τις υπόλοιπες. Τέλος, το τέταρτο θέμα αφορά τους αλγορίθμους ιχνηλασίας κάθε ξεχωριστού αισθητήρα προτείνοντας ειδικές λύσεις για κάθε μια από τις οικογένειες των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων και για τα επιμέρους προβλήματα που υπεισέρχονται στον τομέα της ιχνηλασίας σε οδικά περιβάλλοντα, όπως την ύπαρξη απότομων ελιγμών της πλατφόρμας και των στόχων, την συχνή απόκρυψη οχημάτων από άλλα οχήματα και το μικρό γωνιακό εύρος επιτήρησης των περισσότερων αισθητήρων σε συνάρτηση με την ταχύτατη αναγνώριση των αντικειμένων που απαιτείται για την αξιόπιστη λειτουργία των εφαρμογών οδικής ασφάλειας.

Το υπόλοιπο του εισαγωγικού αυτού κεφαλαίου περιλαμβάνει τις ακόλουθες ενότητες: 1.1 με τις βασικές έννοιες και ορισμούς που χρησιμοποιούνται στο υπόλοιπο του κειμένου, 1.2 τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε οδικές εφαρμογές καθώς και τα υπάρχοντα συστήματα πολλαπλών αισθητήρων και τις δυνατότητες τους, η επόμενη ενότητα 1.3 περιλαμβάνει σε ένα γενικότερο πλαίσιο πέραν των οδικών εφαρμογών μια περίληψη των γενικότερων κατευθύνσεων της έρευνας πάνω στους τομείς που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, η ενότητα 1.4 αποτελεί τον χώρο της σφαιρικότερης ανάλυσης των καινοτομιών που εισάγονται και σε αντιπαράθεση με αυτά που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες και τέλος η εισαγωγή κλείνει με την 1.5 που περιλαμβάνει την δομική περιγραφή του υπολοίπου κειμένου. Αυτό όπως και κάθε κεφάλαιο της εργασίας επιλέχθηκε να περιλαμβάνει τις σχετικές αναφορές αντί να περιληφθούν όλες μόνο στο τέλος του κειμένου.

1.1 Βασικές έννοιες και οgολογία

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι βασικές έννοιες και όροι που χρησιμοποιούνται στην συνέχεια του κειμένου. Οι όροι αυτοί αποτελούν βασικές έννοιες στις θεωρίες της ιχνηλασίας, της σύνδεσης δεδομένων και της σύντηξης δεδομένων. Ακολουθεί ένας σύντομος ορισμός για κάθε μια από τις βασικές αυτές έννοιες μαζί με τον αντίστοιχο όρο στην αγγλική και την σχετική αναφορά. Η επόμενη παράγραφος περιέχει τους ορισμούς κάποιων βασικών εννοιών, ενώ στην συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη και περιληπτική μαθηματική περιγραφή κάποιων από τους όρους αυτούς καθώς και των σχέσεων μεταξύ τους.

Ορισμοί βασιχών εννοιών

Ακολουθεί ο σχετικός πίνακας:

Έννοια	Ορισμός
Παρατηρησιμότητα - Observability	Το θέμα της εύρεσης του αριθμού και των τύπων των παρατηρήσεων που είναι αναγκαίες για την ανάπτυξη μιας εκτίμησης του διανύσματος κατάστασης [1][2]
Παρατήρηση - Observation	Ένας κοινός όρος που χρησιμοποιείται για αναφορά σε όλες τις παρατηρούμενες (ή μετρούμενες) ποσότητες που περιλαμβάνονται στην αναφορά εξόδου (ανιχνεύσεις) ενός αισθητήρα [4]
Θόρυβος παρατηρήσεων - Observation noise	Μια πιθανοτική ερμηνεία του θορύβου στις παρατηρήσεις ενός αισθητήρα [1][2]
Επίδοση ανίχνευσης αισθητήρα – Detection performance (of a sensor)	Τα χαρακτηριστικά ανίχνευσης (ρυθμός ψευδών συναγερμών, πιθανότητες και αποστάσεις ανίχνευσης) για έναν βαθμονομημένο (calibrated) στόχο σε ένα γνωστό υπόβαθρο θορύβου [1]
Ακρίβεια μετρήσεων - Accuracy (of measurement)	Η ακρίβεια των μετρήσεων του αισθητήρα με στατιστικούς όρους [1]
Διακριτικότητα (χωρική/ χρονική) - Resolution (spatial/temporal of sensor)	Η ικανότητα διαχωρισμού μεταξύ δύο ή περισσοτέρων στόχων στον χώρο και τον χρόνο [1]

Ακατέργαστα δεδομένα αισθητήρα - Sensor raw data	Η έξοδος ενός αισθητήρα σε φυσικούς όρους (π.χ. σειρά εικονοστιχίων-pixel, ταχύτητα Doppler)
Σύστημα αισθητήρων - Sensor system	Ένας αισθητήρας ή ένα σύνολο αισθητήρων (όχι απαραίτητα ομογενών) που εκτελούν ένα συγκεκριμένο έργο
Μοντελοποίηση δυναμικής - Dynamic modelling	Η αναγκαίες και ακριβείς εξισώσεις κίνησης που περιγράφουν την εξέλιξη ενός διανύσματος κατάστασης στο χρόνο [1][2]
Ίχνος – Track	Μια διατηρημένη χρονοακολουθία αναπαράστασης της συμπεριφοράς ένα κινούμενου αντικειμένου [1]
Σειρά ιχνών – Track array	Ένα σύνολο ιχνών προερχόμενα από την επεξεργασία μιας σάρωσης μετρήσεων
Ιχνηλασία - Tracking	Η εκτίμηση της κατάστασης ενός κινούμενου αντικειμένου βασιζόμενη σε μετρήσεις από μακριά, χρησιμοποιώντας έναν ή περισσότερους αισθητήρες σε σταθερές ή κινούμενες πλατφόρμες [3]
Τύπος Bayes - Bayes' formula	Παρέχει την σχέση μεταξύ της εκ των προτέρων πιθανότητας για μια υπόθεση, της υπό συνθήκη πιθανότητας μιας παρατήρησης δεδομένης της υπόθεσης και της εκ των υστέρων πιθανότητας της εν λόγω υπόθεσης [1]
Μπεϋσιανή ανάλυση - Bayesian inference	Ανανεώνει τις πιθανότητες εναλλακτικών υποθέσεων, βασιζομένη σε παρατηρήσεις και χρησιμοποιώντας τον τύπο του Bayes [1]
Στατιστική ανάλυση - Statistical Inference	Αναζητεί συμπεράσματα για τον υποκρυπτόμενο μηχανισμό ή κατανομή ενός παρατηρούμενου δείγματος δεδομένων. Υποτίθεται ένα πιθανοτικό μοντέλο που περιλαμβάνει μια ή περισσότερες τυχαίες μεταβλητές που έχουν μια καθορισμένη αλλά άγνωστη κατανομή πιθανότητας που συνδέει τα παρατηρούμενα δεδομένα με έναν πληθυσμό [1]
Απόκλιση - Divergence	Το φαινόμενο ένα φίλτρο να αποδίδει απαράδεκτα υψηλά σφάλματα εκτίμησης λόγω: (1) σφαλμάτων μοντελοποίησης, (2) αριθμητικών σφαλμάτων, (3) προγραμματιστικών σφαλμάτων[3]
Φίλτρο Kalman - Kalman filter	Ο βέλτιστος εκτιμητής υπό την έννοια των ελάχιστων τετραγώνων [6]
Εκτίμηση - Estimation	Η διαδικασία εξαγωγής συμπερασμάτων για μια ποσότητα ενδιαφέροντος από μη ευθείς, μη ακριβείς και αβέβαιες παρατηρήσεις [3]
Ρύθμιση φίλτρου - Filter tuning	Η διαδικασία ρύθμισης του θορύβου διαδικασίας ώστε να μοντελοποιηθούν κατάλληλα οι διαταραχές, π.χ. οι ελιγμοί του στόχου [3]
Φιλτράρισμα - Filtering	Η διαδικασία της εκτίμησης της τρέχουσας κατάστασης ενός δυναμικού συστήματος εξαλείφοντας το ανεπιθύμητο σήμα θορύβου [3]
Βέλτιστος εκτιμητής - Optimal estimator	Ένας υπολογιστικός αλγόριθμος που επεξεργάζεται παρατηρήσεις ώστε να αποδώσει μια εκτίμηση μιας μεταβλητής ενδιαφέροντος που βελτιστοποιεί ένα συγκεκριμένο κριτήριο [3]
Πρόβλεψη- Prediction	Είναι η εκτίμηση κατάστασης για χρονικό διάστημα πέρα από το διάστημα ανανέωσης των δεδομένων βασισμένη σε δεδομένα προηγούμενου χρόνου. [3]
Εξομάλυνση - Smoothing	Είναι η εκτίμηση κατάστασης για χρονικό διάστημα πριν από το διάστημα ανανέωσης των δεδομένων βασισμένη σε δεδομένα προηγούμενου χρόνου. [3]

Εύρεση πορείας- Navigation	Είναι η εκτίμηση της κατάστασης της πλατφόρμας όπου έχει τοποθετηθεί ένας αισθητήρας [3]
Καθοδήγηση - Guidance	Καθορίζει μια κατάλληλη ακολουθία ενεργειών ώστε να προσεγγιστεί ένας προορισμός [3]
Έλεγχος πύλης - Gating	Η διαδικασία ενός αρχικού διαχωρισμού για την εξάλειψη ασυσχέτιστων ομαδοποιήσεων (ή ζευγών) παρατηρήσεων μόνο, παρατηρήσεων και ιχνών ή ιχνών [1]
Σύνδεση δεδομένων - Data association	Το πρόβλημα του καθορισμού ποια ζεύγη (ή ομάδες) παρατηρήσεων, παρατηρήσεων και ιχνών ή ιχνών μεταξύ τους αντιπροσωπεύουν παρατηρήσεις της ίδιας οντότητας [1]
Μέτρα σύνδεσης - Association measures	Η επιλογή μέτρων ποσοτικοποίησης της εγγύτητας ή ομοιότητας μεταξύ παρατηρήσεων, παρατηρήσεων και ιχνών ή ιχνών [1]
Ανάθεση - Assignment	Το τελικό βήμα της διαδικασίας της σύνδεσης δεδομένων με την πραγματική ανάθεση παρατήρησης σε παρατήρηση, παρατήρηση σε ίχνος ή ίχνους σε ίχνος [1]
Διαχείριση ιχνών – Track management	Η διαδικασία της αρχικοποίησης, επιβεβαίωσης, ενημέρωσης ή διαγραφής ενός ίχνους
Είσοδοι σύντηξης δεδομένων αισθητήρων- Sensor data fusion inputs	Περιλαμβάνουν τρία βασικά συστατικά: (1) δεδομένα παρατήρησης των αισθητήρων, (2) δεδομένα και εντολές εισόδου από χειριστές ή χρήστες, και (3) εκ των προτέρων δεδομένα από προκαθορισμένη βάση δεδομένων [1]
Σύντηξη πληροφοριών - Information Fusion (1)	Περικλείει την θεωρία, τις τεχνικές και τα εργαλεία που καταστρωθήκαν και εφαρμόστηκαν για την εκμετάλλευση των συνεργιών της πληροφορίας που αποκτήθηκε από πολλαπλές πηγές έτσι ώστε το αποτέλεσμα απόφαση ή ενέργεια να είναι κατά μια έννοια καλύτερο (ποιοτικά ή ποσοτικά) από ότι θα ήταν πιθανόν εάν κάποιο από τις πηγές αυτές χρησιμοποιούταν μόνη της ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες [5]

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα η θεωρία των συστημάτων σύντηξης δεδομένων περιλαμβάνει στοιχεία από ένα σύνολο επιμέρους επιστημών, των: Γραμμικής Άλγεβρας, Γραμμικών Συστημάτων, Πιθανοτήτων, Στατιστικής, Βελτιστοποίησης με ελαχιστοποίηση κόστους, Γραμμικού προγραμματισμού, Μοντελοποίηση κίνησης. Στην επόμενη παράγραφο δίδεται η μαθηματική τυποποίηση που ακολουθείται στην συνέχεια του κειμένου.

Μαθηματική ορολογία

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις και οι παράμετροι που υπεισέρχονται στα τρία κύρια προβλήματα που αποτελούν μέρη του γενικότερου συστήματος σύντηξης δεδομένων. Αυτά είναι η εκτίμηση κατάστασης, η σύνδεση δεδομένων και η κατανεμημένη σύντηξη ιχνών πολλαπλών αισθητήρων.

Αρχίζοντας με την *εκτίμηση κατάστασης* και θεωρώντας την γενική σημειογραφία του [7] τα στοχαστικά μοντέλα διακριτού χρόνου για τα διανύσματα κατάστασης και μέτρησης, είναι:

$$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{f}_{k-1} (\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{v}_{k-1})$$
(1.1)
$$\mathbf{z}_{k} = \mathbf{h}_{k} (\mathbf{x}_{k}, \mathbf{w}_{k})$$
(1.2)

Όπου \mathbf{f}_{k-1} και \mathbf{h}_k είναι γνωστές, πιθανόν μη γραμμικές, συνάρτησης του διανύσματος κατάστασης \mathbf{x}_{k-1} (διάστασης n_x) με ακολουθία θορύβου διαδικασίας \mathbf{v}_{k-1} και διάνυσμα μετρήσεων \mathbf{z}_k (διάστασης n_z) με ακολουθία θορύβου μέτρησης \mathbf{w}_k , αντίστοιχα. Το αντικείμενο του μη γραμμικού φιλτραρίσματος είναι η επαναληπτική εκτίμηση του \mathbf{x}_k από τις μετρήσεις \mathbf{z}_k , με k τον δείκτη διακριτού χρόνου. Αναζητείται η εκτίμηση $\hat{\mathbf{x}}_k$ της πραγματικής κατάστασης \mathbf{x}_k έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η αναμενόμενη τιμή $E[\hat{\mathbf{x}}_k - \mathbf{x}_k] = 0$.

Η επίλυση του προβλήματος της εκτίμησης κατάστασης γίνεται με επαναληπτικό τρόπο σύμφωνα με την ανάλυση Bayes (1.3) και την επαναληπτική εξίσωση Chapman-Colmogorov (1.4). Η τελευταία δίνει τη ζητούμενη πιθανότητα εκτίμησης του διανύσματος κατάστασης δεδομένων των μετρήσεων όλων των προηγούμενων διακριτών χρονικών στιγμών ως συνάρτηση της εκτίμησης της αμέσως προηγούμενης χρονικής στιγμής και της υπό συνθήκης πιθανότητας που συνδέει την εκτίμηση της στιγμής k δεδομένης της εκτίμησης της προηγούμενης στιγμής k-1 (αντιστοιχεί στο μοντέλο κίνησης).

$$p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{z}_{1:k}) = c \cdot p(z_k \mid \mathbf{x}_k) \cdot p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{z}_{1:k-1})$$
(1.3)

$$p(\mathbf{x}_{k} | \mathbf{z}_{1:k-1}) = \int p(\mathbf{x}_{k} | \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{z}_{1:k-1}) \cdot p(\mathbf{x}_{k-1} | \mathbf{z}_{1:k-1}) d\mathbf{x}_{k-1} \quad (1.4)$$

Η επίλυση της (1.4) γίνεται με εκτίμηση της μέγιστης εκ των υστέφων πιθανότητας (Maximum A Posteriori) όπως φαίνεται στην εξίσωση (1.5) ή υπό την έννοια της εκτίμησης μέσω του ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Minimum Mean Square Error) της εξίσωσης (1.6).

$$\widehat{\mathbf{x}}^{MAP}(\mathbf{z}_{1:k}) = \arg\max_{\mathbf{x}} p(\mathbf{x}_{k} \mid \mathbf{z}_{1:k})$$
(1.5)

$$\widehat{\mathbf{x}}^{MMSE}(\mathbf{z}_{1:k}) = E[\mathbf{x}_{k} \mid \mathbf{z}_{1:k}] = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{x} \, p(\mathbf{x}_{k} \mid \mathbf{z}_{1:k}) \, d\mathbf{x}$$
(1.6)

Η επίλυση σύμφωνα με τις εξισώσεις του φίλτρου Kalman [6] και με βάση την (1.6) ισχύει όταν λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες τρεις συνθήκες και αποδεικνύεται ότι τότε το φίλτρο Kalman είναι ο βέλτιστος εκτιμητής. Οι αναγκαίες αυτές συνθήκες είναι:

- Οι **v**_{k-1} και **w**_k ακολουθούν Γκαουσσιανές κατανομές με γνωστές παραμέτρους και είναι αθροιστικές στα διανύσματα
- Η $\mathbf{f}_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{v}_{k-1})$ είναι γνωστή γραμμική συνάρτηση των \mathbf{x}_{k-1} και \mathbf{v}_{k-1}
- Η $\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k)$ είναι γνωστή γραμμική συνάρτηση των \mathbf{x}_k και \mathbf{w}_k

Τότε οι εξισώσεις (1.1) και (1.2) γράφονται:

$$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{F}_{k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{v}_{k-1}$$
(1.7)
$$\mathbf{z}_{k} = \mathbf{H}_{k-1}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{w}_{k}$$
(1.8)

Με \mathbf{F}_{k-1} (διαστάσεων $n_x \times n_x$) και \mathbf{H}_k (διαστάσεων $n_z \times n_x$) τις μήτρα μετάβασης (transition) και μήτρα μετρήσεων. Σε πολλά όμως προβλήματα εκτίμησης οι παραπάνω προϋποθέσεις δεν ισχύουν και αρκετές φορές οι συναρτήσεις **f**, **h** είναι μη γραμμικές. Οι παραπάνω περιπτώσεις θα παρουσιαστούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Το πρόβλημα της σύνδεσης δεδομένων εμφανίζεται τόσο σε απλά συστήματα ιχνηλασίας (σύνδεση παρατηρήσεων με ίχνη), σε πιο περίπλοκα συστήματα ιχνηλασίας ή σύντηξης (σύνδεση μεταξύ παρατηρήσεων ή ιχνών από διαφορετικές πηγές μεταξύ τους). Γενικά τα προβλήματα σύνδεσης δεδομένων χαρακτηρίζονται ως προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς και μπορεί να εκτείνονται σε δύο ή περισσότερες διαστάσεις ανάθεσης μεταξύ των συνδεόμενων μεγεθών. Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η ορολογία της γενικής περίπτωσης ενός πολυδιάστατου προβλήματος σύνδεσης δεδομένων.

Αρχικά ας θεωρήσουμε N συνδεόμενες πηγές δεδομένων με M_p παρατηρούμενα μεγέθη να λαμβάνονται από την p πηγή όπου p=1,2,... N. Στη συνέχεια ορίζεται η ποσότητα $z_{i_1i_2...i_N}$, η οποία αναφέρεται στην υπόθεση σχηματισμού σύνδεσης, όπου οι παρατηρήσεις $i_1, i_2,..., i_N$ προέρχονται από την ίδια πηγή-στόχο. Για παράδειγμα το z_{322} αναφέρεται στο γεγονός ότι η παρατήρηση 3 της πηγής 1, η παρατήρηση 2 της πηγής 2 και η παρατήρηση 2 της πηγής 3

προέρχονται από την ίδια πηγή-στόχο. Αν ένας δείκτης τεθεί ίσος με μηδέν τότε αυτό θα σημαίνει ότι η συγκεκριμένη πηγή δεν είχε κάποια ανίχνευση. Δηλαδή το z₃₀₂ σημαίνει ότι ο αισθητήρας 2 δεν ανίχνευσε κάτι. Έτσι η δυαδική μεταβλητή z_{i,i2...in} ορίζεται για την υπόθεση μιας σύνδεσης ως εξής:

 $z_{i_{l}i_{2}...i_{N}} =$ 1, η υπόθεση ίχνους είναι σωστή

 $z_{i_l i_2 \ldots i_N} = 0,$ η υπόθεση ίχνους είναι λανθασμένη

Τελικά, όλες οι υποθέσεις σύνδεσης δεδομένων θα είναι μια συλλογή υποθέσεων πηγών για όλες τις παρατηρήσεις. Ομοίως, ορίζεται το κόστος σχηματισμού συνδέσεων ως $c_{i_i i_2 \dots i_N}$, όπου μια κατάλληλη επιλογή για την τιμή αυτού είναι η τιμή της διαβάθμισης κέρδους. Η πρόβλεψη ότι η παρατήρηση μιας πηγής p είναι ψευδής συναγερμός έχει κόστος $c_{0\dots i_L 0\dots 0} = 0$.

Έχοντας ως δεδομένους τους παραπάνω ορισμούς, το πρόβλημα σχηματισμού συνδέσεων λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα από Ν πηγές μετατρέπεται στο ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\max \sum_{i_1=0}^{M_1} \dots \sum_{i_N=0}^{M_N} c_{i_1\dots i_N} z_{i_1\dots i_N}$$
(1.9)
$$\sum_{i_1=0}^{M_2} \dots \sum_{i_N=0}^{M_N} z_{i_1\dots i_N} = 1, \quad i_1 = 1, 2, \dots, M_1$$
(1.10. 1)

δεδομένου ότι

$$\sum_{i_{1}=0}^{i_{2}=0} \dots \sum_{i_{N}=0}^{M_{N}} z_{i_{1}\dots i_{N}} = 1, \quad i_{2} = 1, 2, \dots, M_{2}$$
(1.10.2)

$$\sum_{i_{1}=0}^{M_{1}} \dots \sum_{i_{N-1}=0}^{M_{N-1}} z_{i_{1}\dots i_{N}} = 1, \quad i_{N} = 1,2,\dots,M_{N} \quad (1.10. \text{ N})$$

Οι παραπάνω περιορισμοί μπορούν να εκφραστούν και ως εξής:

$$\sum_{i_{1}=0}^{M_{1}} \dots \sum_{i_{k-1}=0}^{M_{k-1}} \sum_{i_{k+1}=0}^{M_{k+1}} \dots \sum_{i_{N-1}=0}^{M_{N-1}} z_{i_{1}\dots i_{k}\dots i_{N}} = 1, \quad \forall i_{p} = 1, 2, \dots, M_{p}, \quad \forall p = 1, 2, \dots N$$
(1.11)

. . .

Η παραπάνω δείχνει κυρίως ότι όλες οι παρατηρήσεις της πηγής *p* πρέπει να ληφθούν υπόψη μία μόνο φορά κατά την παραγωγή όλων των δυνατών συνδυασμών παρατηρήσεων από τους υπόλοιπους αισθητήρες. Η υποπερίπτωση όπου οι συνδεόμενες πηγές είναι δύο και αναζητούνται ζεύγη παρατηρήσεων λύνεται με μια σειρά αλγορίθμων βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς που δίνουν ένα-προς-ένα ανάθεση, με την επέκταση σε πιθανοτικές σχέσεις μεταξύ των συνδεόμενων μεγεθών επίσης εφικτή.

Η ακριβής λύση στο πρόβλημα της ανάθεσης Ν-διαστάσεων για N>2 είναι γενικά εφικτή εφόσον καταφύγουμε στην μη πρακτική χρήση της ολικής απαρίθμησης. Παρ' όλα αυτά μια καλή, αλλά όχι πάντα ακριβής λύση, μπορεί να βρεθεί με την μέθοδο χαλάρωσης του Lagrange. Η μέθοδος αυτή όπως και οι προαναφερθείσες της δυσδιάστατης περίπτωσης παρουσιάζονται στο Κεφαλαίο 4.

Η σύντηξη ιχνών κατανεμημένων αισθητήρων είναι μια από τις τρεις κύριες αρχιτεκτονικές σύντηξης δεδομένων. Οι αρχιτεκτονικές αυτές είναι η κεντρικού επιπέδου όπου το σύνολο των παρατηρήσεων επεξεργάζεται από έναν κεντρικό αλγόριθμο σύντηξης, τις κατανεμημένες αρχιτεκτονικές όπου ένα εκτεταμένο επίπεδο επεξεργασίας λαμβάνει χώρα στο επίπεδο του αισθητήρα πριν εισαχθούν τα δεδομένα στον αλγόριθμο σύντηξης, και τέλος τις υβριδικές αρχιτεκτονικές με συνδυασμούς των ανωτέρω. Περισσότερα για τις αρχιτεκτονικές των συστημάτων σύντηξης παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα και στο Κεφάλαιο 2. Το κύριο σύστημα που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή είναι ένα σύστημα σύντηξης ιχνών (κατανεμημένης αρχιτεκτονικής ή επιπέδου αισθητήρα) και σε αυτό επικεντρώνεται η παράγραφος αυτή.

Στην σύντηξη ιχνών μια σειρά από N διαφορετικούς αισθητήρες με M_N ίχνη ο καθένας, αφού δημιουργηθούν οι συνδεόμενες ομαδοποιήσεις, έστω G των M_G ιχνών η κάθε μία, αποδίδει τα G τελικά συγχωνευμένα ή συντηγμένα ίχνη (fused) μαζί με τα υπόλοιπα που παρατηρηθήκαν μόνο από έναν από τους N αισθητήρες. Γενικά κάθε αισθητήρας στην σύντηξη ιχνών πρέπει να διαθέτει για κάθε ίχνος πέραν του εκτιμημένου διανύσματος κατάστασης και ένα μέτρο ποιότητας της εκτίμησης αυτής, που συνήθως είναι η μήτρα συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης. Για παράδειγμα η σειρά ιχνών του αισθητήρα n (n από 1 έως N) θα είναι:

Σειρά ιχνών αισθητήρα *n*: $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{P}_1\}, \{\mathbf{x}_2, \mathbf{P}_2\}, ..., \mathbf{x}_{Mn}, \mathbf{P}_{Mn}$ (1.12)

Το ζητούμενο είναι για κάθε ομάδα ιχνών από διαφορετικούς αισθητήρες το τελικό συντηγμένο ίχνος να είναι μια καλύτερη εκτίμηση από κάθε μία από τις εκτιμήσεις καθενός από τους αισθητήρες ξεχωριστά. Το συντηγμένο ίχνος αποτελείται από ένα νέο διάνυσμα κατάστασης και ένα αντίστοιχο μέτρο ποιότητας που εξαρτάται από τις εκτιμήσεις των συνεισφερόντων αισθητήρων. Η εκτίμηση και η συνδιακύμανση του συντηγμένου ίχνους *i* (με *i* μεταξύ 1 και G) που θα προέλθει από τις εκτιμήσεις M_G αισθητήρων έστω των αισθητήρων $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_{MG}$ (μεταξύ 1 και N) είναι συνάρτηση αυτών των παραμέτρων, δηλαδή θα είναι:

$$\mathbf{x}_{fused} = f_1 \Big(\mathbf{x}_{\lambda 1}, \mathbf{P}_{\lambda 1}, \mathbf{x}_{\lambda 2}, \mathbf{P}_{\lambda 2}, ..., \mathbf{x}_{\lambda MG}, \mathbf{P}_{\lambda MG} \Big)$$
(1.13)

$$\mathbf{P}_{fused} = f_2 \left(\mathbf{P}_{\lambda 1}, \mathbf{P}_{\lambda 2}, ..., \mathbf{P}_{\lambda MG} \right)$$
(1.14)

Το ζητούμενο είναι η εύρεση των κατάλληλων σχέσεων f₁ και f₂ ώστε να ικανοποιηθούν οι γενικές προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν για τα αποτελέσματα της εκτίμησης μετά από σύντηξη δεδομένων. Περισσότερες λεπτομέρειες περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 5. Παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές σύντηξης επιπέδου ιχνών καθώς και σχεδιαστικές τεχνικές για τα υπόλοιπα θέματα που αφορούν τα συστήματα που παρουσιάζονται.

1.2 Αισθητή ες και συστήματα στις οδικές εφαρμογές

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται γενικά στα συστήματα οδικής ασφάλειας, όπως και στα συστήματα που εξετάζονται σε αυτήν την εργασία, μαζί με τα τυπικά τους χαρακτηριστικά. Επιπλέον γίνεται μια παρουσίαση της πορείας και των τελευταίων εξελίξεων στα συστήματα πολλαπλών αισθητήρων στις οδικές εφαρμογές.

Πηγές πληροφορίας

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται σύντομα οι συνηθέστεροι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε συστήματα σύντηξης δεδομένων σαν αυτό που περιγράφεται σε αυτήν την εργασία. Περιλαμβάνουν τέσσερις κύριες κατηγορίες: (α) τους αισθητήρες θέσης και δυναμικής του οχήματος-πλατφόρμας, (β) τους ενεργητικούς αισθητήρες ανίχνευσης στόχων, (γ) τους παθητικούς αισθητήρες ανίχνευσης στόχων και (δ) τους εικονικούς «αισθητήρες» πληροφορίας. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται οι αδρανειακοί αισθητήρες γυροσκόπιο και ταχύμετρο καθώς και ο υπολογιστής θέσης δέκτης GPS. Στους ενεργητικούς αισθητήρες περιλαμβάνονται τα ραντάρ διαφορών τύπων και οι σαρωτές λέιζερ. Στους παθητικούς αισθητήρες τα διαφορά συστήματα όρασης με τους τύπους καμερών που χρησιμοποιούνται. Στην τέταρτη κατηγορία δεν περιέχονται συγκεκριμένοι αισθητήρες, αλλά είναι ένας συμβατικός τρόπος περιγραφής της πληροφορίας που διατίθεται από ενσωματωμένες γεωγραφικές βάσεις δεδομένων για οδικά περιβάλλοντα καθώς και τυχόν πληροφορίες που λαμβάνονται μέσω επικοινωνίας οχήματος με όχημα και οχήματος με υποδομές. Η τέταρτη αυτή κατηγορία είναι εκτός του αντικειμένου αυτής της εργασίας όσον αφορά ανίχνευση στόχων, επίσης και η διαδικασία επεξεργασίας εικόνας δεν περιλαμβάνεται. Η σχετική πληροφορία επεξεργασίας εικόνας μετατοπισμένη στο επίπεδο του δρόμου λαμβάνεται από έτοιμα συστήματα (υλοποιημένα από συνεργάτες) σαν είσοδος στα συστήματα σύντηξης που παρουσιάζονται. Στην συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή των αρχών λειτουργίας των

συνηθέστερων συστημάτων με την περιγραφή των χαρακτηριστικών των συγκεκριμένων αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν να παρουσιάζεται στο Κεφαλαίο 2.

<u>Αισθητήφες θέσης και δυναμικής οχήματος</u>

Το γυροσκόπιο είναι μια συσκευή που μέτρα τον ρυθμό στροφής ή γωνιακή ταχύτητα του οχήματος (turn rate ή yaw rate), και δίνει έμμεσα πληροφορίες για την κατεύθυνση του αυτοκινήτου. Ένας συνήθης αισθητήρας γωνίας στροφής αποτελείται συνήθως από ένα μεταλλικό διαμόρφωμα το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω σε έναν εσωτερικό αποσβεστήρα ταλάντωσης που συντελεί στην αποφυγή μηχανικής υπερφόρτωσης στον αισθητήρα. Ο αισθητήρας υπολογισμού γωνίας στροφής βασίζει την λειτουργία του στην μέτρηση της δύναμης Coriolis, που είναι κάθετη στα παλλόμενα σεισμικά μέρη του που ταλαντώνονται στην κατεύθυνση της κίνησης του οχήματος. Υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης επίσης της ακτινικής επιτάχυνσης πάλι μέσω της δύναμης Coriolis που εισάγεται λόγω αλλαγής στην γωνία στροφής. Τα συνήθη γυροσκόπια οδικών εφαρμογών αποδίδουν τις μετρήσεις τους με ψηφιακό τρόπο.

Το ταχύμετοο είναι η συσκευή μέτρησης της ταχύτητα του οχήματος. Υπάρχουν πολλά είδη ταχυμέτρων, όπως επίσης και οδομέτρων που μετρούν την απόσταση και ως εκ τούτου και την ταχύτητα, σε εφαρμογές που απαιτείται ευαισθησία και απόλυτη αξιοπιστία, χρησιμοποιείται ένα αρκετά πολύπλοκο αλλά ακριβές ταχύμετρο. Ένα τέτοιο ταχύμετρο τοποθετημένο στην ρόδα του οχήματος, είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να «ανιχνεύει» την κίνηση των μεταλλικών μερών του τροχού. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται μετατρέπεται από τον αισθητήρα σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα, η συχνότητα του οποίου είναι άμεσα ανάλογη προς την ταχύτητα του οχήματος.

Επιπλέον αδρανειακοί αισθητήρες μέτρησης της δυναμικής κατάστασης του αυτοκινήτου που χρησιμοποιούνται είναι οι αισθητήρες μέτρησης: γωνίας τιμονιού (steering angle), γωνίας τροχών, πίεσης φρένου, πίεσης γκαζιού κλπ.

Ο δέκτης GPS (μελλοντικά το GALLILEO) δίνει πληροφορία εκτίμησης γεωδαιτικής θέσης του οχήματος λαμβάνοντας σήματα από δορυφόρους, δίνοντας αρκετές φορές και επιπλέον πληροφορία γωνίας κατεύθυνσης και ταχύτητας. Συνήθως οι διάφορες πηγές σφαλμάτων επηρεάζουν την ακρίβεια του εντοπισμό θέσης μέσω τέτοιου είδους συστημάτων, όπως σφάλματα στην: τροχιά δορυφόρου, ρολόι δορυφόρου, κώδικας δορυφόρου, στον δέκτη λόγω μετασχηματισμού της παρατήρησης και θορύβου της παρατήρησης, στην κεραία λόγω λήψης από διαφορετικές διαδρομές και εξαιτίας της διάθλασης στην ατμόσφαιρα (ιονόσφαιρα, τροπόσφαιρα). Για καλύτερη επίδοση έχει αναπτυχθεί η τεχνική του εντοπισμού θέσης στόχου με την βοήθεια του GPS με διαφορική λήψη με σημαντικά πλεονεκτήματα. Ο εντοπισμός της θέσης και των άλλων κινηματικών παραμέτρων του οχήματος στόχου με την βοήθεια του GPS, λειτουργεί καλά όταν τουλάχιστον τέσσερις δορυφόροι έχουν άμεση οπτική επαφή. Σε ένα αστικό περιβάλλον αυτό δεν είναι εφικτό πάντα, καθώς η θέα προς τον ουρανό εμποδίζεται σε πολλές περιπτώσεις ή τα πολύ ψηλά κτίρια αντανακλούν έντονα τα GPS σήματα προκαλώντας διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Σαν αποτέλεσμα, η ποιότητα του GPS επιδεινώνεται δραστικά. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η τεχνολογία Μηδενικού Υπολογισμού (Dead Reckoning) με την οποία, παράλληλα με το GPS, μπορεί να επιτευχθεί 100% κάλυψη κάθε περιοχής. Ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος έγινε στα πλαίσια αυτής της διατριβής και θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3.

Αισθητήρες ενεργητικής ανίχνευσης στόχων

Στην κατηγορία αυτή των αισθητήρων περιλαμβάνονται κυρίως τα **ραντάρ**, που διαθέτουν τεχνολογία εκπομπής πολύ υψηλής συχνότητας ραδιοκυμάτων και ανιχνεύουν τα ανακλώμενα σήματα. Έλλειψη αντικειμένων στην περιοχή οδηγεί σε ασθενή λαμβανόμενα σήματα και αντίστοιχα παρουσία αντικειμένου σε ισχυρά. Τα παλμικά συστήματα ραντάρ μετρούν τον χρόνο που χρειάζεται για την λήψη του εκπεμπόμενου σήματος πίσω, κάτι που απαιτεί υψηλής ακρίβειας συστήματα. Τα μικροκύματα και χιλιοστομετρικά ραντάρ χαρακτηρίζονται από υψηλή επίδοση κάτω από ενάντιες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως βροχή και ομίχλη. Τα συστήματα ραντάρ με διαμόρφωση FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) έχουν την επιπλέον δυνατότητα μέτρησης της ταχύτητας μαζί με την απόσταση ενός αντικειμένου σε μια μόνο μέτρηση. Τα ραντάρ που συνήθως χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές οδικής ασφάλειας λειτουργούν στην ζώνη των 77 GHz με περιορισμένη γωνιακή κάλυψη. Τελευταία εμφανίστηκαν και ραντάρ που λειτουργούν στους 24 GHz που έχουν μικρότερο κόστος, αλλά απαιτούν μεγαλύτερη κεραία. Η τεχνολογία των 24 GHz πιστεύεται ότι θα αποτελέσει μια ενδιάμεση βαθμίδα μέχρι την επόμενη γενιά αισθητήρων ραντάρ στα 79 GHz που λέγεται ότι θα είναι και η μόνιμη λύση στις οδικές εφαρμογές. Κάποια επιπλέον στοιχεία για τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες ραντάρ περιλαμβάνονται στην επόμενη ενότητα.

Οι σαρωτές λέιζερ χρησιμοποιούνται ευρέως στις εφαρμογές που εξετάζουμε. Οι σαρωτές λέιζερ είναι συσκευές μέτρησης απόστασης που δημιουργούν δυσδιάστατο ή τρισδιάστατο προφίλ της κατανομής των αποστάσεων στην περιοχή παρακολούθησης. Ένας σαρωτής λέιζερ εκπέμπει υπέρυθρους παλμούς λέιζερ και ανιχνεύει τους ανακλώμενους παλμούς. Η αρχή της λειτουργίας τους βασίζεται όπως και στα ραντάρ στην μέθοδο μέτρησης του χρόνου μεταξύ μετάδοσης και λήψης. Η σάρωση της δέσμης κατεύθυνσης επιτυγχάνεται μέσω ενός περιστρεφόμενου πρίσματος. Οι σαρωτές λέιζερ έχουν την δυνατότητα να φθάσουν σε άνοιγμα γωνίας ανίχνευσης έως 270° εύρος έως και τα 100 m, ανιχνεύοντας πολύ μικρά αντικείμενα με μεγάλη ακρίβεια.

Στους αισθητήρες ενεργητικής ανίχνευσης στόχων στα συστήματα που εξετάζουμε περιλαμβάνονται και οι αισθητήρες υπερήχων. Οι συσκευές αυτές συνήθως μεταδίδουν μια σύντομη ριπή υπερηχητικών κυμάτων προς έναν στόχο, ο οποίος ανακλά τον ήχο πίσω στον αισθητήρα. Το σύστημα τότε μετρά τον χρόνο που χρειάστηκε η ηχώ να επιστρέψει στον αισθητήρα και υπολογίζει την απόσταση του στόχου χρησιμοποιώντας την ταχύτητα του ήχου στο μέσο. Τα σήματα υπερήχων είναι μια ταλάντωση σε συχνότητα πάνω από τα 20 kHz που ένας άνθρωπος ακούει. Τα μικρόφωνα και μεγάφωνα που χρησιμοποιώνται για λήψη και μετάδοση σημάτων υπερήχων ονομάζονται μετατροπείς (transducer). Οι περισσότεροι αισθητήρες υπερήχων χρησιμοποιούν έναν μόνο μετατροπέα για μετάδοση του ηχητικού παλμού και λήψη της ανακλώμενης ηχούς του, με τυπική λειτουργία στις συχνότητες μεταξύ 40 kHz και 250 kHz. Τα μέγιστα εύρη ανίχνευσης είναι της τάξης των 1 – 10 μέτρων, εξαρτώμενα από παραμέτρους όπως η συχνότητα, η σύσταση του μέσου μετάδοσης (αέρας), υγρασία, θόρυβος περιβάλλοντος, το πρότυπο εκπομπής ήχου (γωνία κατεύθυνσης της δέσμης), η απόσταση του στόχου, η γεωμετρία, η επιφάνεια και το μέγεθος. Η περιοχή χρήσης αυτών των αισθητήρων περιορίζεται κυρίως σε εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως υποβοήθηση παρκαρίσματος.

Αισθητήρες παθητικής ανίχνευσης στόχων

Τα συστήματα όρασης που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές οδικής ασφάλειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως: αισθητήρες CCD, αισθητήρες CMOS, αισθητήρες υπερύθρων και συστήματα στερεοσκοπικής όρασης.

Ο συνηθέστερος τύπος αισθητήρα εικόνας είναι ο **CCD** (Charge-Coupled Device). Σε ένα σύστημα CCD, το φως συλλαμβάνεται από φωτοδιόδους. Τα φωτόνια που εισχωρούν στον αισθητήρα μετατρέπονται σε έναν ίσου αριθμού ηλεκτρόνια που αποθηκεύονται σε διακριτές θέσεις του αισθητήρα. Τα ηλεκτρόνια αυτά διαβάζονται με ηλεκτρονικό τρόπο και η πληροφορία που μεταφέρουν βγαίνει από τον καταχωρητή φορτίου μετατρεπόμενη στην αντίστοιχη ψηφιακή τιμή.

Ο άλλος τύπος ψηφιακής κάμερας είναι οι αισθητήρες **CMOS** (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Τόσο οι κάμερες CMOS όσο και οι CCD κατασκευάζονται από πυρίτιο. Έχουν παρόμοια ευαισθησία στο φως λειτουργώντας στο ορατό και το κοντινό στο IR φάσμα. Και στο πιο βασικό επίπεδο και οι δύο μετατρέπουν το προσπίπτον φως σε ηλεκτρονικό φορτίο με την ίδια διαδικασία φωτομετατροπής.

Παρόλα αυτά παρουσιάζουν τις σημαντικές διαφορές που ακολουθούν:

- Οι αισθητήρες CCD δημιουργούν υψηλής ποιότητας και χαμηλού θορύβου εικόνες.
 Οι αισθητήρες CMOS είναι πιο επιρρεπείς στον θόρυβο. Όμως τα τελευταία χρόνια οι περιορισμοί αυτοί περιορίζονται καθώς οι κάμερες CMOS δεν υφίστανται μείωση στον σηματοθορυβικό τους λόγο καθώς η ανάλυση της εικόνας τους αυξάνει.
- Η φωτοευαισθησία σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (chip) CMOS είναι χαμηλότερη.

- Οι αισθητήρες CMOS καταναλώνουν λίγη ισχύ, σε αντίθεση με τους CCD που καταναλώνουν πολλή.
- Οι κάμερες CMOS προσφέρουν μεγαλύτερη δυνατότητα ολοκλήρωσης (περισσότερες λειτουργίες στο chip), λιγότερη απώλεια ισχύος (στο επίπεδο του chip), και μικρότερο μέγεθος εις βάρος της ποιότητας της εικόνας τους και της ευελιξίας τους.
- Το κόστος στο επίπεδο του chip είναι παρόμοιο. Οι κάμερες CMOS μπορεί να απαιτήσουν λιγότερα υποσυστήματα και λιγότερη ισχύ, αλλά πιθανόν να απαιτήσουν κυκλώματα επεξεργασίας στη συνέχεια για να αντισταθμίσουν την χαμηλότερη ποιότητα των εικόνων τους.

Μια συγκριτική ανάλυση μεταξύ των δύο τύπων αισθητήρων περιλαμβάνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 2: Σύγκριση μεταξύ αισθητήρων CCD και CMOS			
Επίδοση	CCD	CMOS	
Απόκριση	Μέτρια	Ελαφρώς καλύτερη	
Δυναμικό εύρος	Υψηλό	Μέτριο	
Ομοιομορφία	Υψηλή	Χαμηλή έως Μέτρια	
Άνοιγμα διαφράγματος	Γρήγορο	Αργό	
Ταχύτητα	Μέτρια έως Υψηλή	Μεγαλύτερη	
Άνοιγμα (windowing)	Περιορισμένο	Εκτεταμένο	
Antiblooming	Υψηλό έως καθόλου	Υψηλό	

Η στεφεοσκοπία (stereovision) είναι μια τεχνική απόκτησης πληφοφοφίας απόστασης από δύο εικόνες, η οποία μποφεί να χφησιμοποιηθεί στα συστήματα ασφαλούς οδήγησης. Η απόσταση από ένα 3D αντικείμενο υπολογίζεται από τα pixels της αφιστεφής και της δεξιάς κάμεφας και τις παφαμέτφους τις σχετικές με τον σχηματισμό των αισθητήφων. Συνήθως για εντοπισμό αντικειμένων χφησιμοποιείται το σχετικό ύψος των σημείων στις στεφεοσκοπικές εικόνες όπως υπολογίζεται από τις αποστάσεις τους. Με στεφεοσκοπική ανίχνευση αντικειμένων είναι δυνατή και η ιχνηλασία τους.

Οι αισθητήρες **υπερύθρων** χρησιμοποιούνται επίσης στα συστήματα οδηγικής υποστήριξης. Το ορατό φως κυμαίνεται από τα 400 nm (violet/blue) στα 700 nm (red), τα μήκη κύματος πάνω από 700 nm και έως περίπου τα 30 μm (= 30000 nm) είναι γνωστά ως η περιοχή των υπερύθρων. Η περιοχή των υπερύθρων διαχωρίζεται σε κοντινή-υπέρυθρη NIR (0.7-1.2 μm), μέσου-κύματος υπέρυθρη (MWIR) (3-5 μm) και μεγάλου-κύματος (LWIR) (8-12 μm). Οι αισθητήρες που λειτουργούν στην περιοχή ακτινοβολίας NIR βασίζονται στην ανίχνευση φωτονίων NIR που ανακλώνται από αντικείμενα ενώ οι συνήθεις ανιχνευτές MWIR και LWIR εντοπίζουν θερμικά φωτόνια που εκπέμπονται από τις θερμές περιοχές των αντικειμένων.



Εικόνα 1: Το φάσμα του φωτός

Θέματα μεθόδων επεξεργασίας εικόνας κατάλληλες για τα προβλήματα των οδικών εφαρμογών καθώς και προχωρημένες τεχνικές χρήσης εικόνας από μια ή περισσότερες κάμερες περιλαμβάνονται στην ενότητα των συστημάτων.

Άλλες πηγές πληροφορίας

Πρόσθετες πηγή πληροφορίας για ένα όχημα με σημαντικές εφαρμογές τόσο οδικής ασφάλειας στο απώτερο μέλλον όσο και σε εφαρμογές ενημέρωσης και ψυχαγωγίας αποτελούν οι

ψηφιακοί χάρτες, ενώ προς την πρώτη κατεύθυνση μπορούν να ταξινομηθούν και τα συστήματα επικοινωνίας του οχήματος υπό εξέταση με άλλα οχήματα καθώς και με υπηρεσίες των οδικών υποδομών. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί κυρίως στην εκτίμηση οχημάτων στόχων με βάση τους ενσωματωμένους αισθητήρες αποκλειστικά χωρίς την επιπλέον πληροφορία αυτών των πηγών πληροφορίας. Μια σύντομη περιγραφή των πηγών αυτών ακολουθεί εδώ.

Ένας ψηφιακός χάφτης μπορεί να περιέχει πληροφορία για δρόμους, κτίρια, φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής αλλά και να περιλαμβάνει λεπτομερείς ενδείξεις για σήματα κυκλοφορίας, το πλήθος των λωρίδων του δρόμου ακόμα και online ενημέρωση για την ροή της κυκλοφορίας. Αυτό σημαίνει ότι το αυτοκίνητο εκτός από τα «εκ των προτέρων» φορτωμένα στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή του χαρτογραφικά δεδομένα, που είναι, τουλάχιστον για ένα εύλογο χρονικό διάστημα, αμετάβλητα θα πρέπει να χρησιμοποιεί και πρόσθετους αισθητήρες για την άμεση ενημέρωση της κατάστασης στους δρόμους που κινείται.

Οι παρακάτω νέες κατευθύνσεις μπορούν να διακρίθούν ως προς την βελτίωση της πλοήγησης ενός αυτοκινήτου με την χρήση των ψηφιακών χαρτών. Την χρήση τους ως: (α) μνήμη, (β) χρήση των ορίων ταχύτητας για ανίχνευση υπερβολικής ταχύτητα που είναι μια συνήθης αιτία ατυχημάτων, (γ) χρήση ως φίλτρο ελέγχου, (δ) αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων που οφείλονται στην τοπογραφίας του δρόμου, πχ. σε κρυμμένες διασταυρώσεις, στις εισόδους δρόμων ταχείας κυκλοφορίας κλπ., (ε) ως πηγή πληροφοριών, (στ) με συνδυασμό ψηφιακών χαρτών και αισθητήρων χρήση κυρίως που αφορά στην καλύτερη εκτίμηση των ορίων του δρόμου.

Η δυνατότητα ύπαρξης δεδομένων από επικοινωνία αυτοκινήτου με αυτοκίνητο και αυτοκινήτου με συστήματα οδικών υποδομών αυξάνει την διαθέσιμη πληροφορία σε ένα σύστημα ασφαλούς οδήγησης βελτιώνοντας με τη σειρά του το εύρος αυτών των εφαρμογών. Υπάρχει η προοπτική της μετάδοσης μέσω συστημάτων επικοινωνιών σε ένα όχημα πληροφορίας σχετικής τόσο με άλλα οχήματα που είναι εκτός του ορατού πεδίου των αισθητήρων του αλλά εντός των αισθητήρων ενός άλλου συνεργαζόμενου οχήματος, όσο και χρήσιμων μηνυμάτων σχετικών με την κατάσταση στη περιοχή κίνησης του.

Συστήματα εφαρμογών οδικής ασφάλειας

Στην ενότητα αυτή αναφέρεται αρχικά η γενική επιδίωξη τέτοιου είδους συστημάτων καθώς και μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης όσον αφορά τις τεχνολογίες τέτοιου είδους συστημάτων καθώς και τις υλοποιήσεις που αναπτύχθηκαν. Αναφέρεται και μια εκτίμηση για την πορεία των συστημάτων οδικής ασφάλειας μαζί με μια αναλυτική περιγραφή των συστημάτων σύντηξης πληροφορίας που υπάρχουν μέχρι σήμερα.

Κίνητρο-Στόχος

Οι μεταφορές καταλαμβάνουν ένα σημαντικό ποσοστό στη σύγχρονη παγκόσμια οικονομία, και ειδικότερα στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) που αντιστοιχούν σε περισσότερο από το 10% του ΑΕΠ και απασχολούν περίπου 10 εκ. ανθρώπους. Τα αυτοκίνητα, με τη σειρά τους, ως μέσο μεταφοράς συμβάλλουν κατά 80% στην κινητικότητα επιβατών (επιβάτες/χλμ) [8]. Όπως είναι γνωστό τα τροχαία ατυχήματα και δυστυχήματα αποτελούν μια κοινωνική πληγή με τεράστιες απώλειες κυρίως σε ανθρώπινο δυναμικό, αλλά και σε υλικό πλούτο. Υπολογίζεται ότι κάθε λεπτό περίπου σε ολόκληρο τον κόσμο ένας άνθρωπος χάνει τη ζωή του σε κάποιο τροχαίο δυστύχημα. Επίσης σε ένα χρόνο (αναφορά για το 2001) περίπου δέκα εκατομμύρια άνθρωποι θα τραυματιστούν με τα δύο με τρία εκατομμύρια να υφίστανται σοβαρούς τραυματισμούς. Πέραν από τις σημαντικότατες ανθρώπινες απώλειες τα τροχαία δυστυχήματα λόγω εξόδων για νοσοκομειακή περίθαλψη, καταστροφή περιουσιακών στοιχείων και άλλα κόστη οδηγούν σε ένα κόστους που υπολογίζεται σε ένα ποσοστό μεταξύ 1-3% του συνολικού συνολικό ποσό ακαθάριστου παραγόμενου προϊόντος της υφηλίου (σύμφωνα με τα στοιχεία της υπηρεσίας του ΟΟΣΑ στο Παρίσι). Για τις ΗΠΑ το ποσό αυτό φθάνει τα 200 δις δολάρια. Στην Ευρώπη υπάρχουν 200 εκατομμύρια οδηγοί και αντίστοιχος αριθμός οχημάτων που κινούνται στα 4 εκατομμύρια χλμ του οδικού δικτύου, ενώ πραγματοποιούνται περίπου κάθε χρόνο περίπου 1,3 εκατομμύρια ατυχήματα με 40000 νεκρούς και 1,7 εκατομμύρια τραυματίες. Το αντίστοιχο κόστος αγγίζει τα 160 δις ευθώ ποσό ίσο με το 2% του ΑΕΠ της ΕΕ. Τα αντίστοιχα στοιχεία για την χώφα μας είναι 17000 ατυχήματα με θύματα ετησίως (στοιχεία 2004) με πεφίπου 1650 νεκφούς (5 άτομα/ημέφα) και 22000 τφαυματισμούς, με 1 νεκφό / 35 ατυχήματα σε αστικές πεφιοχές και 1 / 7 ατυχήματα για πεφιοχές εκτός αυτών (στοιχεία από διάλεξη της κ. Τ. Ναθαναήλ, προέδφου Συλλόγου Ελλήνων Συγκοινωνιολόγων).

Σύμφωνα με την παρουσίαση [9] το 2003 κινούνταν στους δρόμους των χωρών της ΕΕ 261 εκατομμύρια οχήματα, με τα ατυχήματα με τραυματισμούς να φτάνουν τα 1.3 εκατομμύρια, τις απώλειες 46900 ανθρώπων και τα θανατηφόρα δυστυχήματα να αντιστοιχούν σε 1:5600. Από σχετική έρευνα που παρουσιάζεται στην ίδια πηγή τονίζεται ότι το 1999 τα τροχαία δυστυχήματα ήταν η 7^η παγκοσμίως αιτία νοσηλείας, ενώ χωρίς την λήψη προληπτικών μέτρων και την εξακολούθηση των ίδιων ρυθμών αύξησης αναμένεται κατά το έτος 2020 να ανέλθει στην 3^η θέση. Προς την κατεύθυνση της συγκράτησης της ραγδαίας αυτής αύξησης των τροχαίων ατυχημάτων οι αρχές της ΕΕ, των ΗΠΑ και τις Ιαπωνίας έχουν θέσει μια σειρά από στόχους μείωσης των αριθμών αυτών. Η ΕΕ έχει θέσει ως στόχο την μείωση των απωλειών από τροχαία δυστυχήματα κατά 50% μέχρι το έτος 2010. Αυτό εκτιμάται ότι θα επιτευχθεί με συνδυασμένη ενεργητική και παθητική ασφάλεια όπως εικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Στην [9] η συνδυασμένη ενεργητική και παθητική ασφάλεια αποτελείται από τα εξής συστατικά στοιχειά: ενεργητική ασφάλεια (συστήματα ABS, ESP, VDM, κ.α.), παθητική ασφάλεια (αερόσακοι, ζώνες ασφαλείας κ.α.), υποστήριξη οδηγού (ACC, κ.α.) και επικοινωνίες.



Εικόνα 2: Στόχος μείωσης επιπτώσεων τροχαίων δυστυχημάτων στην ΕΕ [9]

Τα παραπάνω οδήγησαν και οδηγούν σε μια συνεχιζόμενη προσπάθεια των επιστημόνων μηχανικών για την μείωση αυτών των δυσάρεστων κοινωνικών συνεπειών, η οποία εξελίσσεται εδώ και αρκετά χρόνια με την ανάπτυξη των εξελιγμένων συστημάτων αερόσακων, ζωνών ασφαλείας, συστημάτων ABS και ESP, ειδικές σχεδιάσεις των οχημάτων προς την κατεύθυνση της ασφάλειας κλπ. Όμως έχει αναγνωριστεί ήδη ότι η προσπάθεια πρέπει να επικεντρωθεί όλο και περισσότερο στην αποφυγή της ίδιας της σύγκρουσης σε αντίθεση με τις προσπάθειας ελαχιστοποιήσεων των επιπτώσεων της [10]. Προς αυτήν την κατεύθυνση μια τεράστια ερευνητική δραστηριότητα λαμβάνει χώρα στην Ευρώπη, στην Ιαπωνία και τις ΗΠΑ με τα πρώτα συστήματα ACC (Adaptive Cruise Control) να υπάρχουν ήδη σε πολυτελή οχήματα εδώ και κάποια χρόνια. Στην συνέχεια τα λεγόμενα συνεργατικά (π.χ. επικοινωνία μεταξύ οχημάτων) συστήματα ασφαλείας αναμένεται με τη σειρά τους να εισαχθούν στα αυτοκίνητα. Η γενικευμένη χρήση αυτών των συστημάτων αναμένεται να λάβει χώρα περίπου το 2020 [10]. Παρόλα αυτά οι περισσότεροι κατασκευαστές οχημάτων συνεχίζουν να εξοπλίζουν εξειδικευμένα μοντέλα τους με συστήματα ασφαλείας που παρατηρούν την κίνηση του οχήματος και τυχόν εμπόδια στην πορεία του. Η πρώτη εισαγωγή συστήματος ACC έγινε από την Toyota στην Ιαπωνία το 1998, στην συνέχεια ακολούθησε η Jaguar και άλλες εταιρίες στην Ευρώπη και αργότερα στις ΗΠΑ.

Συστήματα ενεργητικών αισθητήρων

Τα συστήματα ACC χρησιμοποιούν τεχνολογίες αισθητήρων ραντάρ ή λίνταρ (lidarlight detection and ranging-τεχνολογία λέιζεο). Το λίνταο έχει μικρότερο μέγεθος και είναι οικονομικότερη λύση αλλά παρουσιάζει προβλήματα σε κρίσιμες περιστάσεις δύσκολων καιρικών συνθηκών και προτιμάται από ελάχιστους κατασκευαστές για τέτοιου είδους εφαρμογές. Οι συσκευές ραντάρ οδικών εφαρμογών χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους επέκτασης της μικρής γωνιάς κάλυψης με μηγανική σάρωση ή πολλαπλούς λοβούς ακτινοβολίας. Τέτοιοι αισθητήρες λειτουργούν συνήθως στα 76-77GHz κυρίως λόγω του μικρού μεγέθους κεραίας που ζητείται από του κατασκευαστές οχημάτων ώστε να υπάρχει συμβατότητα για την ενσωμάτωση του αισθητήρα πάνω στο όχημα. Οι συχνότητες αυτές επιτρέπουν την ευκολότερη ενσωμάτωση (μικρό μέγεθος αισθητήρα) αλλά οδηγούν σε μεγάλα κόστη. Λόγω ακριβώς του υψηλού κόστους μεγαλύτερες συχνότητες στα 94 και 125 GHz απερρίφθησαν. Η μείωση όμως του μεγέθους των ραντάρ θα διευκολύνει περεταίρω την ενσωμάτωση τους στο όχημα, αντί στον προφυλακτήρα, σε άλλες θέσεις όπως στα πλάγια, στον καθρέπτη ή κοντά στα φώτα. Επίσης η τεχνολογία MMICs (monolithic microwave integrated circuits) που αναπτύχθηκε αρχικά για στρατιωτικές εφαρμογές και εφαρμογές επικοινωνιών εξυπηρετεί προς την κατεύθυνση της συμπύκνωσης του μεγέθους των αισθητήρων.

Τα μικροκυματικά ραντάρ στα 77GHz συνήθως καλούνται ραντάρ μακρινού εύρους LRR (Long Range Radar) στις οδικές εφαρμογές. Τέτοιου είδους αισθητήρες βρίσκονται στην αγορά οδικής ασφαλείας εδώ και αρκετά χρόνια. Αυτοί οι αισθητήρες χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες που χαρακτηρίζονται από τον τρόπο απόκτησης της πληροφορίας αζιμουθίου γωνίας που δίνουν: είτε μέσω σταθερού λοβού (beam) ή μέσω μηχανικής σάρωσης (αρκετές φορές και μέσω ηλεκτρονικής σάρωσης). Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα τυπικών αισθητήρων LRR ακολουθούν στον παρακάτω μη πλήρη πίνακα [11]:

	······································		
Πινακας 3: Χαρακτηριστικα λειτουργιας τυπικων αισθητηρων LRR			
Αισθητήρας	Λοβοί	Κυματομορφή	
Bosch	3, με μεταγωγή (switched)	FMCW	
ADC	3, με μεταγωγή (switched)	Pulse Doppler	
Fujitsu Ten	1, μηχανικής σάρωσης		
Delphi	1, μηχανικής σάρωσης		
Autocruise	1 φωτίζον (illuminator), λήψη Σ και Δ		
RoadEye	1 φωτίζον (illuminator), 7 παράλληλοι λοβοί λήψης	FMCW και Range Doppler	

Αρκετοί [12] ισχυρίζονται ότι το υψηλό κόστος των ραντάρ στα 77GHz μπορεί να αποφευχθεί με τα ραντάρ στα 24GHz που προτείνονται τελευταία ως εναλλακτική λύση μιας και είναι αρχετά φθηνότερα. Αυτά αναφέρονται ως ραντάρ κοντινού ή μεσαίου εύρους στις οδικές εφαρμογές (SRR-MRR, Short or Medium Range Radar). Βέβαια δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τα ραντάρ μακρινού πεδίου στις εφαρμογές (1...200m) όπου η τεχνολογία 24GHz ISM-Band δεν είναι κατάλληλη εξαιτίας της μεγάλου ανοίγματος κεραίας που θα απαιτούταν. Επίσης αναφέρεται ότι τα συστήματα στα 77GHz παρουσιάζουν ένα σημαντικό μειονέκτημα που είναι η κάλυψη ενός μονό μικρού γωνιακού τομέα (ανοίγματος 10...15°). Αυτό οδηγεί σε προβλήματα στις εφαρμογές που έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις και ακόμα και αν ήταν εφικτή η επανασχεδίαση της κεραίας τους δεν θα ήταν δυνατή η κάλυψη περιοχής μεγαλύτερης των 60-120° με έναν αισθητήρα LRR [12]. Η ολοκληρωτική 360° γύρω από το όχημα κάλυψη που είναι πλέον το ζητούμενο στις εφαρμογές οδικής ασφάλειας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η λύση είναι προς την χρήση δικτύου κατανεμημένων αισθητήρων μικρότερου εύρους, η οποία είναι αρκετά χαμηλότερου κόστους. Αρχικά τα συστήματα ACC στη αγορά αξιοποιούσαν την πληροφορία παρατήρησης μόνο για το κοντινότερο αποκλειστικά προπορευόμενο όχημα, ενώ με την πάροδο του χρόνου τεχνικές ιχνηλασίας κατάλληλες για τις πιο προχωρημένες εφαρμογές που εμφανιστήκαν άρχισαν να αναζητούνται. Η κατάσταση με την επεξεργασία των δεδομένων των λέιζεο σε ερευνητικό επίπεδο ήταν πιο έντονη με κατεύθυνση την αναγνώριση τόσο αντικειμένων όσο και γεωμετρίας του δρόμου.

Οι επιπλέον δυνατότητες που μπορούν να προσδοθούν στα συστήματα ραντάρ με κατάλληλη επεξεργασία (ιχυηλασία) των παρατηρήσεων τους έχει γίνει πλέον κατανοητή τόσο στα συστήματα σύντηξης δεδομένων όπως θα δειχθεί στην συνέχεια, όσο και σε απλά συστήματα ενός αισθητήρα (π.χ. [13]) με κάποιες εργασίες να αποσκοπούν και στην εξαγωγή μοντελοποίησης τυπικών στόχων οδικών ραντάρ [14]. Η επεξεργασία των δεδομένων των συσκευών λέιζερ για εξαγωγή αντικειμένων εντός οδικού περιβάλλοντος είναι αρκετά πιο δύσκολη διαδικασία μιας και απαιτεί ειδικές τεχνικές μοντελοποίησης στόχων λόγω του αρκετά μεγάλου πλήθους επιστροφών που δίνουν αυτοί οι αισθητήρες. Η έρευνα πάνω σε αυτόν τον τομέα της προεπεξεργασίας των δεδομένων για εξαγωγή χαρακτηριστικών πριν την ιχνηλασία ή ταυτόχρονα απασχολεί αρκετές ερευνητικές ομάδες, με χαρακτηριστικών πριν την ιχνηλασία ή ταυτόχρονα απασχολεί αρκετές ερευνητικές ομάδες, με χαρακτηριστικών που τους, την σύνδεση δεδομένων στις περιπτώσεις παρατηρήσεων λέιζερ [17], την διόρθωση του χρονικού σφάλματος των δεδομένων [19], με μια πολύ καλή μελέτη πάνω στην χρήση του λέιζερ για ταυτοποίηση οχημάτων σε διαφορετικές αποστάσεις και παρουσίαση των μεθόδων κέντρου βάρους, κουτί περικλεισης, γραμμών, γωνιών, δύο γραμμών, ανάθεση τμήματος σε αντικείμενο και άλλων να παρουσιάζεται στην [15].

Συστήματα παθητικών αισθητή<u>ο</u>ων

Αφήνοντας την μελέτη της επεξεργασίας των ενεργητικών αισθητήρων θα παρουσιαστεί η χρήση των παθητικών αισθητήρων (όρασης) στις υπό μελέτη εφαρμογές. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1990 οδικά συστήματα όπως για παράδειγμα τα συστήματα αναγνώρισης λωρίδας, γίνονταν βασιζόμενα είτε σε αισθητήρες όρασης (vision) είτε σε αισθητήρες απόστασης (λέιζερ ή ραντάρ) καθώς αυτά αναπτύσσονταν ξεχωριστά. Τότε τα συστήματα αυτά εισήχθησαν στην αγορά με ταυτόχρονη αναγνώριση των προβλημάτων που είχε η ξεχωριστή χρήση των αισθητήρων όρασης και απόστασης. Την ίδια περίοδο περίπου [10] οι μηχανικοί της Fujitsu Ten Ltd. εισήγαγαν από τους πρώτους στην κοινότητα της έρευνας έξυπνων οχημάτων την έννοια της σύντηξης πληροφορίας μεταξύ ενός ραντάρ και μια στερεοσκοπικής μονάδας επεξεργασίας εικόνας για ένα σύστημα ACC εφαρμογής σε σταμάτημα-ξεκίνημα (stop & go) για τις περιπτώσεις της κίνησης.

Η εφευνητική εφγασία σε ενεφγητικούς αισθητήφες οδικής ασφάλειας είχε ήδη αφχίσει πεφίπου από την δεκαετία του 1970. Το κφίσιμο πφόβλημα σε αυτά τα συστήματα αποτέλεσε η ανάθεση του ανιχνευόμενου αντικειμένου στην σωστή λωφίδα (μέτφηση αζιμουθιακής γωνίας αντικειμένου) κάτι που οδηγούσε σε ανεπιθύμητες επιταχύνεις ή επιβφαδύνσεις με αφκετούς να ισχυφίζονται ότι παφά την δουλειά που έχει γίνει υπάφχουν ακόμα σημαντικά πφοβλήματα [20]. Η έφευνα σε αισθητήφες όφασης για χφήση στα οχήματα άφχισε πεφίπου στο μέσο της δεκαετίας του 1980 με την πφωτοποφιακή εφγασία του Dickmanns [21]. Σε αυτήν αναπτύχθηκε μια πφοσέγγιση με βάση αισθητήφες όφασης για αυτόνομη οδήγηση οχημάτων και χφήση σύγχφονων εφγαλείων ελέγχου όπως το φίλτφο Kalman. Αφγότεφα την δεκαετία του 1990 η μέθοδος αυτή συνεχίστηκε με την ανάπτυξη αφκετών συστημάτων βασιζόμενη σε τέτοιου είδους αισθητήφες.

Πολλοί εφευνητές υποστηφίζουν την μεγάλη χφησιμότητα των αισθητήφων βίντεο για την καταγφαφή του πεφιβάλλοντος ενός κινουμένου οχήματος λόγω της υψηλής ανάλυσης που παφέχεται και του χαμηλού τους κόστους [22]. Μια κατηγοφία πφοσεγγίσεων στο θέμα της ανίχνευσης οχημάτων βασίζονται στην εκ των πφοτέφων γνώση για την εμφάνιση οχημάτων στο δυσδιάστατο πεδίο της εικόνας. Κάποιοι [23] υποθέτουν ότι η εμφάνιση των αντικειμένων χαφακτηφίζεται από την σύνδεση δυο ζευγών ευθύγφαμμων τμημάτων πάνω στην εικόνα, ενώ άλλοι πφοτείνουν ομαδοποίηση των ευθύγφαμμων τμημάτων και δημιουφγία υποθέσεων [24]. Άλλη μέθοδος είναι η αποτίμηση της συμμετφίας των πίσω τμημάτων των αυτοκινήτων [25], [26] και [27]. Μια πφοσέγγιση ελαστικού δικτύου για δυσδιάστατη δημιουφγία πεφιγφαμμάτων οχημάτων για ταυτοποίηση πφοτάθηκε στο [28].Η μέθοδος του [29] είναι η εύφεση αντικειμένων. Αναζήτηση ξεχωφιστών χαφακτηφιστικών ή μοτίβων όπως η δομή της εικόνας [39] και το σχήμα [40] επίσης εξετάζονται. Άλλες προσεγγίσεις βασίζονται σε οπτική φοή (optical flow) που πφοκύπτει από την σχετική κίνηση μεταξύ του αυτοκινήτου και του πεφιβάλλοντος του [33], [41] και [22]. Επιπλέον αναπτύχθηκαν τεχνικές για ταυτόχοονη αναγνώριση και ιχνηλασία πάνω στην εικόνα [35], [36] και [34]. Οι ερευνητές στην [32] αναλύουν διαφορές μεταξύ μετατοπισμένων εικόνων υποθέτοντας γνωστή κίνηση κάμερας και δομής του σκηνικού. Όσον αφορά τις κάμερες υπάρχουν τεχνολογίες που αξιοποιούν περαιτέρω τις υπάρχουσες δυνατότητες με δύο τεχνικές [47] που επεκτείνουν το περιορισμένο ορατό πεδίο των απλών καμερών με: (α) ενεργές κάμερες: που είναι προσαρμοσμένες σε σημεία με δυνατότητα πανοραμικής κλίσης και στρέφονται αναλόγως προς την επιθυμητή κατεύθυνση και (β) πανοραμικές κάμερες: που χρησιμοποιούνται ευρέως στην ρομποτική, και όπου με χρήση ενός παραβολικού κατόπτρου αποκτούν αίσθηση 360 μοιρών, όχι όμως της ίδιας ποιότητας. Σημαντική χρήση στις εφαρμογές οδικής ασφάλειας γνωρίζουν επίσης τα συστήματα υπέρυθρης όρασης τα οποία έχουν το βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας ανεξαρτήτως συνθηκών περιβάλλοντος, καιρικών συνθηκών ή φυσικού φωτισμού. Ένα τέτοιο τυπικό σύστημα περιγράφεται στην [37]. Επίσης η χρήση καμερών έγχρωμης εικόνας συνεισφέρει σημαντικά προς την κατεύθυνση των συστημάτων ενίσχυσης υπό περιορισμένες συνθήκες περιβαλλοντικού φωτισμού [38].

Πιο πρόσφατα πέρα από τα βασικά μονοκάμερα συστήματα ανίχνευσης οχημάτων μεγάλη απήχηση έχουν οι τεχνικές στερεοσκοπικής ανίχνευσης με δύο ή περισσότερες κάμερες. Τα συστήματα που βασίζονται σε μια μόνη κάμερα δεν είναι ικανά για αξιόπιστη μέτρηση της απόστασης μεταξύ οχήματος στόχου και πλατφόρμας. Η προσπάθεια της υιοθέτησης τεχνικών στερεοσκοπικής ανάλυσης έχει προχωρήσει αρκετά, με χαρακτηριστικές εργασίες με αντιστοίχηση μεταξύ εικόνων που λαμβάνονται από δύο κάμερες ταυτόχρονα στις [30] και [31] και παρόμοιες προσπάθειες στις [42], [43] και [44]. Όμως στα συστήματα στερεοσκοπικής όρασης το πρόβλημα της αντιστοιχίας μεταξύ των καμερών θεωρείται ακόμα δύσκολο να επιλυθεί [45]. Τελευταία στον τομέα της επεξεργασίας βίντεο για συστήματα ΑCC ο διαδοχικός ταξινομητής adaboost (cascaded adaboost classifier) που πρωτοεισήχθηκε στην [46] φαίνεται να έχει κυριαρχήσει επί των κλασσικών μεθόδων χρήσης τανυστών ενέργειας και συμμετρίας.

Κατεύθυνση στις τεχνολογίες οδικών συστημάτων

Όπως αναφέρεται και στην [8] υπάρχουν αλληλοσυγκρουόμενες απόψεις σχετικά με το μέλλον των συστημάτων οδικής ασφάλειας, με τους υποστηρικτές της επεξεργασίας κινούμενης εικόνας να ισχυρίζονται πως, πέρα από τα προβλήματα που ακόμα υπάρχουν, τα συστήματα τεχνητής όρασης (vision) θα αποτελέσουν τη βάση των έξυπνων αυτοκινήτων του μέλλοντος [48]. Αντίθετα, άλλοι ερευνητές διατείνονται την υπεροχή των ραντάρ έναντι της εικόνας [49]. Κάποιοι υποστηρικτές των συστημάτων όρασης ισχυρίζονται ακόμα ότι τα προχωρημένα συστήματα ανίχνευσης αντικειμένων σε οδικό περιβάλλον δεν μπορούν να υπάρξουν χωρίς τα συστήματα όρασης [38]. Ισχυρίζονται ακόμα ότι η όραση μηχανών έχει σημειώσει αρκετή πρόοδο τα τελευταία χρονιά χωρίς αυτό να οφείλεται αποκλειστικά στην εξέλιξη των δυνατοτήτων των μικροεπεξεργαστών. Όμως σημαντικά προβλήματα παραμένουν όπως η απαίτηση αξιόπιστης και σταθερής επίδοσης κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες και φωτισμού περιβάλλοντος, με τα θέματα αυτά ακόμα υπό εξέταση. Η περεταίρω ανάπτυξη των υπολογιστικών δυνατοτήτων αναμένεται να επιτρέψει [50] την συμπερίληψη νέων μεθόδων χρήσης έγχρωμης εικόνας και αναγνώρισης υφής που υπολογίζεται ότι θα καλύψει τα προηγούμενα προβλήματα. Η εξέλιξη αυτή οδηγεί τους ένθερμους υποστηρικτές των συστημάτων όρασης [50] στην εντύπωση ότι μελλοντικά θα μειωθεί το ενδιαφέρον για ανίχνευση και εκτίμηση κατάστασης από ενεργητικούς αισθητήρες απόστασης όπως τα ραντάρ και τα λέιζερ.

Η μεγάλη όμως πλειοψηφία των εφευνητών μηχανικών οδικής τεχνολογίας θεωφούν ότι η αξιοποίηση των δυνατοτήτων όλων των διαθέσιμων αισθητήφων και η εφαφμογή των συστημάτων σύντηξης δεδομένων πολλαπλών αισθητήφων είναι η πφοφανής λύση για τα ζητήματα ανίχνευσης αντικειμένων σε οδικό πεφιβάλλον. Πφιν παφουσιαστεί η τφέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας σύντηξης δεδομένων πολλαπλών οδικών αισθητήφων, συμπεφιλαμβάνονται σε αυτή την εισαγωγική παφάγφαφο οι εναπομείνασες εφαφμογές οδικής ασφάλειας. Δεν αναφέφθηκαν πέφα από τα κλασσικά συστήματα ACC (αποφυγής εμπφόσθιας σύγκφουσης) με τις παφαλλαγές τους (π.χ. stop & go) και τα συστήματα ελέγχου λωφίδας οι υπόλοιπες εφαφμογές που αναπτύχθηκαν την ίδια πεφίοδο. Αυτές είναι οι εφαφμογές για υποβοήθηση παφκαφίσματος και κατά την οδήγηση με την όπισθεν, που πραγματοποιούνται συνήθως με την αξιοποίηση πληφοφοφίας αισθητήφων υπεφήχων. Οι εφαφμογές υποβοήθησης στις τυφλές πεφιοχές (blind spots) λειτουργούν με χρήση διαφόφων τύπων αισθητήφων. Τα συστήματα πρόσκρουσης (pre-crash) που ενεργοποιούνται όταν ο κίνδυνος πρόσκρουσης είναι πιο άμεσος με χρήση κυφίως SRR. Οι βασιζόμενες σε συστήματα καμεφών είναι οι εφαφμογές υποβοήθησης όρασης (λόγω νύκτας ή καιφικών συνθηκών), ανίχνευσης λωφίδας κυκλοφορίας και απώλειας λωφίδας. Επίσης αναπτύσσονται και εφαφμογές προστασίας ευάλωτων χρηστών (πεζών, ποδηλατών) που απαιτούν πιο ευαίσθητους αισθητήφες και εξειδικευμένη επεξεργασία. Τέλος υπάρχουν και συστήματα παφακολούθησης της φυσικής κατάστασης του οδηγού, π.χ. κατάσταση υπνηλίας. Επίσης υπάρχουν μια σειφά από εξειδικευμένα συστήματα ανίχνευσης επικινδυνότητας λόγω ολισθηφότητας οδοστρώματος εξαιτίας χαμηλής τριβής. Γενικά όλα αυτά τα τελευταία είναι εκτός του αντικειμένου της εργασίας αυτής που αφορά κυφίως στην αναγνώφιση και παφακολούθηση αντικειμένων εντός οδικού πεφιβάλλοντος με τους υπάρχοντες αισθητήφες και για τις εφαφμογές πλευφικού και κατά μήκους ελέγχου του οχήματος και αποφυγής συγκρούσεων.

Η συνεργατική αποφυγή σύγκρουσης με επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και ανταλλαγή παραμέτρων δυναμικής του οχήματος είναι επίσης μια προτεινόμενη λύση για συστήματα ACC που δοκιμάστηκε στο πρόγραμμα ΡΑΤΗ από το υπουργείο μεταφορών της Καλιφόρνιας και το πανεπιστήμιο Berkeley [51]. Ως διεπικοινωνία οχημάτων [52] ορίζεται ακόμα η επικοινωνία μεταξύ οδηγών ή οχημάτων στις εφαρμογές έξυπνων μεταφορών. Στις ΗΠΑ και στην Ιαπωνία οι επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων είναι μόνο ένα από τα τέσσερα πεδία τέτοιου είδους επικοινωνιών με τα υπόλοιπα να είναι επικοινωνία κοντινού πεδίου (DSRC, δρόμος και όχημα), ευρείας περιοχής ασύρματες επικοινωνίες και οι επικοινωνίες wireline. Το χαρακτηριστικό της διεπικοινωνίας οχημάτων είναι ότι ένας οδηγός ή ένα όχημα μπορεί να επικοινωνήσει με άλλους οδηγούς ή οχήματα σε οποιαδήποτε τοποθεσία ή χρόνο απαιτηθούν δεδομένα που είναι δύσκολο ή αδύνατο να αποκτηθούν από το όχημα αυτό. Τέτοιου είδους συστήματα προφανώς μπορούν να επεκτείνουν το πεδίο εφαρμογών των υπαρχόντων ενσωματωμένων εντός του οχήματος συστημάτων αισθητήρων. Μια πρώτη μελέτη πάνω στην διεπικοινωνία οχημάτων έλαβε χώρα από την JSK (ένωση ηλεκτρονικής τεχνολογίας για την οδήγηση και κυκλοφορία αυτοκινήτων) στην Ιαπωνία στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Στο τέλος της δεκαετίας του 1990 και μέχρι το 2000 έλαβαν χώρα τα έργα ακολούθησης αλυσίδας οχημάτων (platooning) PATH στην Καλιφόρνια και Chauffeur στην ΕΕ και αρκετά παρόμοια συνεργατικά συστήματα στην Ιαπωνία. Πρόσφατα συστήματα περιλαμβάνουν επίσης μετάδοση πληροφορίας για ατύχημα ή ανάγκη από ένα όχημα σε αυτά που ακολουθούν. Σημαντικό χώρο σε τέτοιου είδους συστήματα φιλοδοξεί να καταλάβει το πρόγραμμα SAFESPOT της ΕΕ [53] που αφορά στην πρόληψη των τροχαίων ατυχημάτων αναπτύσσοντας ένα σύστημα υποβοήθησης εντοπισμού του περιθωρίου ασφαλείας ("Safety Margin Assistant") που ανιχνεύει εκ των προτέρων πιθανές επικίνδυνες καταστάσεις επεκτείνοντας στον χώρο και στον χρόνο την ενημερότητα του οδηγού για το οδηγικό περιβάλλον. Ο εντοπιστής του περιθωρίου ασφάλειας θα είναι ένα έξυπνο συνεργατικό σύστημα (Intelligent Cooperative System) που βασίζεται σε επικοινωνίες αυτοκινήτου προς αυτοκίνητο (Vehicle to Vehicle - V2V) και αυτοκινήτου προς υποδομές (Vehicle to Infrastructure - V2I). Στις εφαρμογές του SAFESPOT η δημιουργία του τοπικού δυναμικού χάρτη (local dynamic map) έχει σημαντικό ρόλο. Ο δυναμικός τοπικός χάρτης θα περιλαμβάνει δεδομένα πραγματικού χρόνου που παρέχονται από αισθητήρες, δεδομένα από το αυτοκίνητο και τις υποδομές και επιπλέον επεξεργασμένη πληροφορία.

Γενικώς καθώς η συνεχής αυτή ανάπτυξη προχωρά αναμένεται ότι στις επόμενες δεκαετίες ο ρόλος του οδηγού μέσα στο όχημα θα τείνει να περιοριστεί μόνο στον έλεγχο του τιμονιού ή ακόμα και χωρίς ούτε αυτόν [10]. Οι τεχνολογίες αισθητήρων συνεχώς εξελίσσονται με την τάση προς ένα σύνολο αισθητήρων με κάλυψη 360 μοιρών του περιβάλλοντος γύρω από το όχημα. Ακόμα αναμένεται τα οχήματα να έχουν την δυνατότητα συνεχούς επικοινωνίας με άλλα, επιτρέποντας την κίνηση σε ομάδες ακόμα και σε μεγάλες ταχύτητες. Ο τελικός στόχος όλης αυτής της έρευνας είναι η εκμηδένιση των ανθρώπινων απωλειών από ένα μέσο που προσέφερε κινητικότητα και αυτονομία στον άνθρωπο αλλά δημιούργησε και σημαντικά κοινωνικά προβλήματα.

Συστήματα σύντηξης πληροφορίας

Όπως προαναφέρθηκε τα συστήματα υποβοήθησης οδήγησης επιλέγουν από μια σειρά από αισθητήρες επί του οχήματος όπως αισθητήρες υπερήχων, LIDAR, RADAR ή αισθητήρες εικόνας και χρησιμοποιούνται ευρέως [48]. Οι αισθητήρες υπερήχων χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές βοήθειας παρκαρίσματος, ενώ τα LIDAR, RADAR σε συστήματα προσαρμοζόμενου ελέγχου πορείας, οι οπτικοί αισθητήρες είναι κατάλληλοι για συστήματα νυχτερινής όρασης ή για συστήματα προειδοποίησης απώλειας λωρίδας [47]. Εκτός από τους συνήθης τοπικούς αισθητήρες, συστήματα εύρεσης πορείας αξιοποιούν τις δορυφορικές υποδομές για τον εντοπισμό του οχήματος μέσω GPS σε συνδυασμό με ψηφιακούς χάρτες μπορούν να αποδώσουν σημαντικές πληροφορίες διαδρομής.

Σε αντίθεση με τα πρώτα συστήματα ελέγχου πορείας (cruise control), τα προσαρμοζόμενα συστήματα ελέγχου πορείας (Adaptive Cruise Control - ACC) χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα απόστασης για να υπολογίσουν την ταχύτητα αποφυγής σύγκρουσης με το προπορευμένο όχημα. Τέτοιου είδους συστήματα εισήχθησαν ευρέως στην αγορά γύρω στο 1999. Αυτά υπήρξαν το πρώτο βήμα προς την σχεδίαση των μελλοντικών προηγμένων βοηθητικών συστημάτων οδηγού (Advanced Driver Assistance Systems - ADAS). Τα ACC συστήματα βασίζονταν μόνο σε έναν αισθητήρα (ραντάρ ή λέιζερ) με το πεδίο των εφαρμογών τους να είναι περιορισμένο, έχοντας επίσης και σημαντικά προβλήματα με τα σταθερά αντικείμενα δίνοντας συχνά ψευδείς συναγερμούς και παρουσιάζοντας επίσης προβλήματα αναγνώρισης κατά την απότομη εμφάνιση οχήματος [54]. Η ανάγκη επέκταση αυτών των συστημάτων για λειτουργία σε πιο σύνθετες καταστάσεις και πυκνά περιβάλλοντα οδήγησης (αστικά) αναγνωρίστηκε αμέσως. Στα περιβάλλοντα αυτά η κυκλοφορία χαρακτηρίζεται από χαμηλότερες ταχύτητες, απότομες στροφές, σήματα κυκλοφορίας, ευάλωτους χρήστες όπως τους μοτοσικλετιστές, ποδηλάτες και πεζούς. Επίσης στην πρώτη γενιά έξυπνων οχημάτων για τις εφαρμογές ΑCC όπως προαναφέρθηκε ήδη, χρησιμοποιούνταν κυρίως ραντάρ μακρινού εύρους και lidar. Ως κύριο μέτρο ταξινόμησης των στόχων μεταξύ στόχων ενδιαφέροντος και άσχετες μετρήσεις ήταν αποκλειστικά η χρήση της ταχύτητας των στόχων. Αυτό βέβαια αναγνώριζε μόνο κινούμενους στόχους και οι νέες προηγμένες εφαρμογές των ACC stop-and-go και ανίχνευσης ευάλωτων χρηστών αντιμετώπιζαν δυσκολίες [55]. Για τον λόγο αυτό τα συστήματα ACC νέας γενιάς αναζητούν την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιώντας επιπρόσθετα χαρακτηριστικά των δεδομένων για την ανίχνευση μη κινούμενων αντικειμένων. Το άλλο θέμα είναι η ανάπτυξη αυτών των συστημάτων όσον αφορά στις στρατηγικές ετερογενούς σύντηξης δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων. Τα μελλοντικά αυτοκίνητα αναμένεται σε κάθε περίπτωση να είναι εξοπλισμένα με επιπρόσθετους αισθητήρες όπως τα συστήματα βίντεο για νυχτερινή όραση και διατήρηση λωρίδας και ψηφιακούς χάρτες για λόγους καθοδήγησης.

Στην πορεία προς την δημιουργία κατάλληλων συστημάτων προς αυτήν την κατεύθυνση γίνονται προσπάθειες για την βελτίωση των υπαρχόντων αισθητήρων όπως τα ραντάρ, οι σαρωτές λέιζερ και η επεξεργασία εικόνας και προς την επίτευξη αλγορίθμων σύντηξης που αποδίδουν μεγαλύτερη ακρίβεια, αποδοτική χρήση των πηγών με τον καλύτερο τρόπο αυξάνοντας το περιεχόμενο της υπάρχουσας πληροφορίας.

Γενικά οι προχωρημένες εφαρμογές ADAS έχουν υψηλές απαιτήσεις από το σύνολο των συστημάτων αισθητήρων που διαθέτουν, τα οποία δεν είναι μόνο συμπληρωματικά μεταξύ τους αλλά διαθέτουν και πλεονασματική πληροφορία. Η σύντηξη δεδομένων καλείται να παρέχει μια περιγραφή του οδικού περιβάλλοντος γύρω από το όχημα, η οποία θα είναι σχετική με τα ADAS, αλλά δεν θα συγκεκριμενοποιείται σε κάποια αποκλειστικά εφαρμογή. Έτσι το εύρος επιτήρησης ενός μόνο αισθητήρα μεγαλώνει, η βεβαιότητα και ακρίβεια των εκτιμήσεων αυξάνει και αυτή και επιπροσθέτως η σχεδίαση γίνεται οικονομικά εφικτή, καθώς διαφορετικές εφαρμογές μοιράζονται ένα σύνολο αισθητήρων [15].

Ο εφικτός τρόπος αξιοποίησης αυτών των δεδομένων είναι η σύντηξη σειρών αντικειμένων ή ιχνών (κατανεμημένη αρχιτεκτονική) επιτρέποντας την ενσωμάτωση των διαφόρων αισθητήρων

ακόμα και διαφορετικών κατασκευαστών με χαμηλό επικοινωνιακό κόστος. Κύριο μειονέκτημα όμως είναι ότι αν και μπορεί να επιτευχθεί καλή επίδοση της θέσης και της ταχύτητας του στόχου, η επίδοση της ανίχνευσης και της ταυτότητας ή κλάσης του στόχου θεωρείται φτωχή γιατί ο κάθε στόχος βασίζεται αποκλειστικά στις ανεξάρτητες παρατηρήσεις του χωρίς να παίρνει τις παρατηρήσεις των άλλων στόχων υπόψη. Αντιθέτως η σύντηξη δεδομένων χαμηλού επιπέδου ή επιπέδου χαρακτηριστικών απαιτεί μεγαλύτερο επικοινωνιακό κόστος και την χρήση των ανεπεξέργαστων δεδομένων των αισθητήρων. Αλλά θεωρείται ότι αυτό αποπληρώνεται με την χρήση του συνόλου της πληροφορίας των αισθητήρων πριν παρθούν οι προφάσεις για ανίχνευση και ταυτοποίηση, [55] και [56].

Μια ειδική εξευνητική κατεύθυνση προς συστήματα χαμηλού επιπέδου σύντηξης πληροφορίας αποτελεί η προσπάθεια για βελτίωση της επίδοσης των αισθητήρων απόστασης με χρήση πληροφορίας για λωρίδες κυκλοφορίας από οπτικό αισθητήρα. Οι απλές γεωμετρικές μέθοδοι δεν δίνουν πάντα βέλτιστα αποτελέσματα με γενική την αναγνώριση ότι προχωρημένες μέθοδοι σύντηξης δεδομένων αποτελούν την λογική επέκταση για τέτοιου είδους συστήματα. Τυπική εφαρμογή χρήσης μετρήσεων αισθητήρων απόστασης μαζί με πληροφορία γεωμετρίας δρόμου από οπτικούς αισθητήρες δίνεται στην [20]. Μια σειρά από εργασίες υποστηρίζουν αυτήν την επιλογή, για παράδειγμα οι [81] και [82]. Η δραστηριότητα σε αυτήν την κατεύθυνση συνεχίζεται με ένα προτεινόμενο συνδυασμένο μοντέλο κίνησης για ταυτόχρονη ιχνηλασία οχημάτων και πρόβλεψη της γεωμετρίας του δρόμου να παρουσιάζεται στην [80]. Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο για συνδυασμό πολλών τυπικών εφαρμογών όπως αποφυγής σύγκρουσης και ανίχνευσης αλλαγής λωρίδας.

Γενικά η επιλογή στις οδικές εφαρμογές μεθόδων σύντηξης πληροφορίας χαμηλού ή υψηλού επιπέδου παρουσιάζει επίσης ένα διαχωρισμό στις προτιμήσεις των ερευνητών μηχανικών παρόμοιο με αυτόν της προτίμησης στους παθητικούς ή τους ενεργητικούς αισθητήρες. Αυτοί που προτιμούν (ή προέρχονται από τον χώρο) των αισθητήρων όρασης τείνουν να προτιμούν επίσης και τις χαμηλού επιπέδου μεθοδολογίες σύντηξης δεδομένων, σε αντίθεση με τους ερευνητές της επεξεργασίας ραντάρ που προτιμούν συνήθως τις υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονικές, με επεξεργασία στο επίπεδο του αισθητήρα σε πρώτη φάση. Συγκρίσεις των δύο κύριων αρχιτεκτονικών σύντηξης υπάρχουν αρκετές στην βιβλιογραφία, για παράδειγμα οι [63] και [64], αλλά σε κάθε περίπτωση η επίδοση εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή που εξετάζεται. Επιπλέον υπάρχουν και οι υβριδικές τεχνικές σύντηξης και ακόμα οι τεχνικές ανάδρασης με ανατροφοδότηση των συντηγμένων ιχνών κατά την επεξεργασία των νέων ιχνών [65].

Στις οδικές εφαρμογές παρουσιάζονται συνεχώς νέα συστήματα διαφορετικών αρχιτεκτονικών, με κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα συστημάτων σύντηξης χαμηλού επιπέδου για παράδειγμα, ένα σύστημα με λέιζερ σαρωτές και σύστημα μονοκάμερης όρασης που έγινε στην [59], επίσης στην [60] όπου παρουσιάστηκε σύντηξη χαμηλού επιπέδου με συσκευή θερμοστοιχείων και ραντάρ κοντινού πεδίου για ανίχνευση πεζών. Χαμηλού επιπέδου σύντηξη δεδομένων βίντεο και λέιζερ με επιπροσθέτως μεθόδους για χρονική ευθυγράμμιση των μετρήσεων περιεγράφει στην [55]. Όμως και οι προσεγγίσεις ίχνους προς ίχνους είναι αρκετά συχνές, όπως στην [57] για σύντηξη βίντεο και lidar με πολλούς λοβούς. Μια παρόμοια μέθοδος για σύντηξη ιχνών στερεοσκοπικής εικόνας και δεδομένων αποστάσεως λέιζερ παρουσιάστηκε στην [58]. Και αρκετά άλλα συστήματα αρκετά από τα οποία θα αναφερθούν στην συνέχεια του κεφαλαίου.

Σε γενικές γραμμές τέσσερις θεμελιώδεις λύσεις [66] απαιτούνται από τα συστήματα πολλαπλών αισθητήρων στις οδικές εφαρμογές:

- Πλεονασμός πληροφορίας (redundancy): για βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων και για μεγαλύτερη ανοχή σε σφάλματα π.χ. αν ένας αισθητήρας αποτύχει
- Συμπληρωματικότητα (complementarity): η πληροφορία βελτιώνεται με είσοδο από διαφορετικούς αισθητήρες, χωρικά (μεγαλύτερο καλυπτόμενο εύρος), σε σχέση με το παρατηρούμενο αντικείμενο (ανεξάρτητες μετρήσεις) και λόγω πιθανής εξουδετέρωσης τυχόν αβεβαιοτήτων

- Χρονική ακρίβεια: αύξηση της ταχύτητας κτήσης δεδομένων με παράλληλη επεξεργασία ή με κατάλληλη χρονική διαμόρφωση των πληροφοριών από τους αισθητήρες
- Συνολικό κόστος: τα κόστη και κέρδη από την χρήση πολλαπλών αισθητήρων πρέπει να συγκρίνονται με αυτά ενός συστήματος με λιγότερους αισθητήρες

Επανερχόμενοι στις προηγούμενες κρίσεις περί των πλεονεκτημάτων κάθε αρχιτεκτονικής σύντηξης, στις κεντρικές αρχιτεκτονικές (ή χαμηλού επιπέδου) όλη η επεξεργασία γίνεται στην κεντρική μονάδα χωρίς προεπεξεργασία. Το αντίθετο συμβαίνει στην αποκεντροποιημένη (decentralized ή κατανεμημένη ή υψηλού επιπέδου ή επιπέδου ιχνών) δομή όπου ίχνη προς σύντηξη σε ένα υψηλότερο επίπεδο δημιουργούνται ενδιαμέσως. Στην κεντρική αρχιτεκτονική δεν υπάρχει καμία ενδιάμεση πιθανή απώλεια πληροφορίας και τα δεδομένα μπορούν να υποστούν επεξεργασία με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Δεν υπάρχει επίσης κίνδυνος ανακολουθιών μεταξύ των υποθέσεων μοντελοποίησης στις διάφορες μονάδες επεξεργασίας. Αλλά απαιτείται ένα μεγάλο εύρος ζώνης για τη μεταφορά της πληροφορίας από τους αισθητήρες στην κεντρική μονάδα. Όλη η υπολογιστική ισχύς επίσης επικεντρώνεται σε ένα σημείο στη αρχιτεκτονικής είναι η ανύπαρκτη ευελιξία σε τροποποιήσεις ή επεκτάσεις με κανέναν τρόπο μιας και αυτό θα απαιτούσε επανασχεδίαση και βελτιστοποίηση της κεντρικής μονάδας.

Στην δεύτερη περίπτωση της αποκεντρωμένης αρχιτεκτονικής απαιτείται μόνο ένα μικρό εύρος για την μετάδοση της πληροφορίας (ιχνών). Επεκτάσεις και τροποποιήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με σχετική ευκολία, αφού τα δεδομένα μπορούν να υποστούν επεξεργασία στον αισθητήρα. Προβλήματα προκύπτουν όπως προαναφέρθηκε από το γεγονός ότι δεν υπάρχουν εγγυήσεις ότι οι υποθέσεις γενικού μοντέλου διατηρούνται σε όλο το σύστημα. Δηλαδή διαφορετικοί αισθητήρες μπορεί να μοντελοποιούν διαφορετικά τα δεδομένα τους. Επίσης τα σφάλματα στους διαφορετικούς αισθητήρες είναι στατιστικά εξαρτημένα μεταξύ τους και πρέπει να ληφθούν υπόψη. Βεβαία οι αρχιτεκτονικές αυτές παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα γενικότερα όσο και στις συγκεκριμένες εφαρμογές που εξετάζονται εδώ, αναλυτικότερα αυτά θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 2 της αρχιτεκτονικής του συστήματος. Κάποια από αυτά

	Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά	αρχιτ	τεκτονικών σύντηξης δεδομένων
	Σύντηξη Κεντρικού Επιπέδου		Σύντηξη Επιπέδου Αισθητήρα
•	Βελτιστοποίηση του ίχνους του αντικειμένου και της εκτίμησης θέσεως Πιο ακριβής διάκριση αντικειμένων από την σύζευξη επιπέδου αισθητήρα αν τα δεδομένα πολλαπλών αισθητήρων δεν δημιουργούνται από ανεξάρτητα φαινόμενα	•	Διάκριση μεταξύ των πιθανών στόχων ή αντικειμένων ενδιαφέροντος πριν τα δεδομένα εισαχθούν στον επεξεργαστή σύζευξης, που μειώνει το υπολογιστικό φορτίο του επεξεργαστή σύντηξης Βελτιστοποίηση της επεξεργασίας σήματος του κάθε αισθητήρα ανάλογα της
•	Αυξημένη αξιοπιστία του υλικού επεξεργασίας σήματος εάν χρησιμοποιούνται λιγότεροι επεξεργαστές για την υποστήριξη των αλγορίθμων σύζευξης. Η αξιοπιστία αυξάνεται περαιτέρω, αν χρειάζεται, παρέχοντας εφεδρικές διαδρομές επεξεργασίας	•	διάταξης μετατροπής Ενημέρωση με ρύθμιση της επεξεργασίας σήματος του αισθητήρα και των παραμέτρων της περιοχής που ερευνάται με βάση δεδομένα από άλλους αισθητήρες Ευελιξία στο πλήθος και το είδος των αισθητήρων που επιτρέπει πρόσθεση,
•	Μειωμένο βάρος, όγκος, ισχύς, και παραγωγικό κόστος σε σχέση με τη σύζευξη επιπέδου αισθητήρα αν χρησιμοποιούνται λιγότεροι επεξεργαστές	•	απομάκρυνση, ή αλλαγή αισθητήρων χωρίς να απαιτείται βασική αλλαγή στη δομή του αλγορίθμου σύντηξης Αποδοτικό οικονομικά ώστε να επιτρέπει επιπρόσθετη σύντηξη δεδομένων σε μία ήδη υπάρχουσα διάταξη πολλαπλών αισθητήρων

Στην συνέχεια της ενότητας θα αναφερθούν τα πιο γνωστά συστήματα ιχνηλασίας πολλαπλών αισθητήρων για οδικές εφαρμογές που μελετηθήκαν και αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια καθώς και μια μικρή περιγραφή σχετικά με τα πιο ενδιαφέροντα σε σχέση με το αντικείμενο αυτής της μελέτης θέματα. Το σύστημα σύντηξης που προτείνεται σε αυτήν την μελέτη είναι ένα σύστημα υψηλού επιπέδου για σύντηξη ιχνών πολλαπλών αισθητήρων, ετερογενούς φύσεως δεδομένων. Στις επόμενες γραμμές παρουσιάζονται τυπικά συστήματα σύντηξης πολλαπλών αισθητήρων.

Στο εξευνητικό πρόγραμμα CARSENSE [67] πραγματοποιήθηκε ένα σύστημα σύντηξης πολλαπλών αισθητήρων για την εμπρόσθια περιοχή του οχήματος με χρήση τριών CCD καμερών, ενός σαρωτή λέιζερ, και δύο ραντάρ. Χρησιμοποιείται μια κατανεμημένη υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική σύντηξης με επεξεργασία στο επίπεδο του κάθε αισθητήρα αφού πρώτα ομογενοποιηθούν οι πληροφορίες με συγχρονισμό και επεξεργασία. Χρησιμοποιήθηκε η τεχνική προγραμματισμού Bayes [54] κατάλληλη για συνδυασμό πολλαπλών αισθητήρων και σύντηξη σε πολύπλοκα προβλήματα με ελλιπή γνώση ή αυξημένη αβεβαιότητα. Στην [68] δίνονται μοντέλα αισθητήρων για το σύστημα σύντηξης της Volkswagen με χρήση ραντάρ, συστήματος όρασης με μονοκάμερη επεξεργασία και σαρωτές λέιζερ. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζει δυναμική ταυτοποίηση. Στο γαλλικό έργο PAROTO [69] έγινε ένα σύστημα σύντηξης επιπέδου ιχνών για δύο ξεχωριστές αρχιτεκτονικές, η πρώτη ήταν ραντάρ και υπέρυθρη κάμερα και η δεύτερη ραντάρ και λίνταρ. Σύστημα αποφυγής εμπρόσθιας σύγκρουσης με σύντηξη υπερύθρων και μικροκυμάτων αισθητήρων παρουσιάζεται στην [70]. Σύντηξη μονής κάμερας και ραντάρ, σε ένα χαμηλού επιπέδου σύστημα με τις μετρήσεις του ραντάρ να μεταφέρονται στο επίπεδο της εικόνας για διόρθωση στην πληροφορία βάθους δόθηκε στην [71].

Αρχιτεκτονική συστήματος για εφαρμογές σε διασταυρώσεις με σύντηξη εικόνας, χαρτών και GPS παρουσιάστηκε στην [47]. Στο έργο ARCOS αναπτύχθηκε σύντηξη σαρωτή λέιζερ και στερεοσκοπικής οπτικής πληροφορίας [58]. Σύντηξη δεδομένων σαρωτή λέιζερ και βίντεο στο επίπεδο των χαρακτηριστικών με εξαγωγή χαρακτηριστικών από το λέιζερ σε πρώτη φάση στην [59]. Σύντηξη ραντάρ και εικόνας με χρήση των νεοεισαχθέντων στην εκτίμηση κατάστασης φίλτρων σωματιδίων (particles) για σύστημα νυχτερινής όρασης, προτάθηκε στην [72]. Σύντηξη λέιζερ σαρωτή και στεροσκοπικής όρασης για ανίχνευση αντικειμένων, με χρήση της στερεοσκοπικής πληροφορίας για την επιβεβαίωση των αντικειμένων που δίνει το λέιζερ στην [73].

Η ανάπτυξη μεθόδων πλεγμάτων (grid) για ανίχνευση αντικειμένων με ένα δίκτυο, προτείνεται όλο και πιο συχνά ως κατάλληλη λύση για τα προβλήματα ανίχνευσης αντικειμένων στο οδικό περιβάλλον [74]. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται στο τυπικό πρόβλημα των κλασσικών μεθόδων σύντηξης όπου πρέπει με γεωμετρικό τρόπο να συνδεθούν τα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται από τους αισθητήρες. Η αβεβαιότητα τότε μοντελοποιείται ως Γκαουσσιανή και με την σύνδεση δεδομένων δύο αντικείμενα που ανήκουν στο ίδιο αντικείμενο εισέρχονται στην διαδικασία σύντηξης. Όπως όμως ισχυρίζονται οι υποστηρικτές το μειονέκτημα των κλασσικών προσεγγίσεων είναι ότι υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών (σημεία, τομείς, πολύγωνα, ελλείψεις κλπ.) που πρέπει ένας αλγόριθμος να χειριστεί. Και επίσης θεωρείται δύσκολο να υποστεί επεξεργασία ένα νεοεμφανιζόμενο χαρακτηριστικό στο περιβάλλον που δεν ταιριάζει με κάποιο από τα προκαθορισμένα σύνολα χαρακτηριστικών (μοντέλα). Η προτεινομένη μέθοδος που πρωτοεισήχθηκε από τους Elfes και Moravec στο τέλος της δεκαετίας του 1980 για σύντηξη πολλαπλών αισθητήρων είναι με χρήση των κατεχόμενων πλεγμάτων (Occupancy Grids). Ένα κατεχόμενο πλέγμα είναι μια στοχαστική αναπαράσταση μωσαϊκών χωρικής πληροφορίας, όπου υπάρχουν πιθανοτικές εκτιμήσεις της κατοχής για κάθε κελί μέσα στο δίκτυο του πλέγματος. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η ευκολότερη δυνατότητα ενσωμάτωσης διαφορετικών αισθητήρων στο πλαίσιο παίρνοντας υπόψη μόνο την ενυπάρχουσα αβεβαιότητα των αισθητήρων, σε αντίθεση με τις γεωμετρικές μεθόδους που κατηγοριοποιούν τον χώρο σε γεωμετοικά ποότυπα.

Συνεχίζοντας με τα συστήματα, εφαρμογή σύντηξης μεταξύ πολλαπλών οπτικών χαρακτηριστικών από συστήματα όρασης δίνεται στην [75]. Σύντηξη βίντεο και λέιζερ με επιπροσθέτως μέθοδο για χρονική ευθυγράμμιση στην [55]. Σύστημα σύντηξης σαρωτή λέιζερ και ραντάρ κοντινού πεδίου για εφαρμογές πρόσκρουσης με παρουσίαση δυο μεθόδων σύντηξης σε κεντρικό επίπεδο με φίλτρο Kalman και μέθοδοι σύντηξης σε πλεγματικά κελία δόθηκε στην [76]. Στην [77] παρουσιάζεται μια αρχιτεκτονική σύντηξης επιπέδου ιχνών με εφαρμογή EKF (Extended Kalman Filter) και PF (Particle Filter) σε δεδομένα από ραντάρ και λίνταρ σε τοπολογία επιτήρησης μπροστά από το όχημα. Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε ότι το EKF παρουσιάζει παρόμοια επίδοση με το PF αλλά είναι προτιμότερο λόγω της ταχύτερης επεξεργασίας του. Στην σύντηξη ιχνών γενικά απαιτείται σύνδεση των ιχνών που ανήκουν στον ίδιο στόχο κάτι που είναι εξαιρετικά κρίσιμο στην διαδικασία της σύντηξης αυτού του τύπου. Εάν οι συνδέσεις είναι αναποτελεσματικές υπάρχει το ενδεχόμενο τα συντηγμένα αντικείμενα να μην είναι ικανοποιητικά σε σχέση με τα ξεχωριστά ίχνη των αισθητήρων. Η μέθοδος σύνδεσης δεδομένων των συγγραφέων της [77] παρουσιάστηκε στην [69] όπου γίνεται διαχείριση των ιχνών αναλόγως αν αυτά προέρχονται από ένα ή είναι διπλά παρατηρούμενα ίχνη εξετάζοντας ένα μέτρο ανομοιότητας τους. Σύντηξη πληροφορίας από λέιζερ και οπτικούς αισθητήρες με PF και την εισαγωγή ειδικού κατάλληλου φίλτρου πυκνότητας πιθανότητας υπόθεσης έγινε στην [78].

Το μεγάλο εξευνητικό έξινο στις ΗΠΑ DARPA [79] για δημιουργία οχήματος αυτόνομης κίνησης εκτός δεόμου με σύντηξη δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων για την εξαγωγή πληροφορίας του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η πλατφόρμα περιέχει ανιχνευτές απόστασης λέιζερ, στερεοσκοπικό σύστημα όρασης, ραντάρ και αισθητήρες υπερήχων. Οι αισθητήρες υπερήχων στοχεύουν στην πίσω και τις πλάγιες πλευρές του οχήματος, ενώ οι υπόλοιποι αισθητήρες μπροστά. Επίσης συμπεριλαμβάνονται δέκτης GPS, γυροσκόπιο, ψηφιακή πυξίδα και αισθητήρες ταχύτητας τροχού για μηδενικό υπολογισμό (dead reckoning). Η σύντηξη των δεδομένων πραγματοποιείται σε χάρτη περιοχών-κελιών χρησιμοποιώντας μέτρα εμπιστοσύνης και εκτιμώμενο ύψος αντικειμένων.

Το εφευνητικό έφγο EUCLIDE της ΕΕ όπως παφουσιάστηκε στις [8] αναλυτικά, και στην [84] αφοφά ένα σύστημα ενισχυμένης όφασης και αποφυγής συγκρούσεων με χφήση ενός χιλιοστομετφικού φαντάφ συνεχούς κύματος με διαμόφφωση συχνότητας και κεντφική συχνότητα λειτουφγίας τα 77GHz κατάλληλο για εύφεση και επεξεφγασία έως και 200 στόχων ταυτόχφονα κάθε 100ms και μιας υπέφυθφης κάμεφας στην πεφιοχή 8-14μm η οποία δίνει τη θεφμική εικόνα του δφόμου με συχνότητα 25Hz. Αποτελέσματα της σύντηξης χαμηλού επιπέδου για την εξαγωγή πληφοφοφίας αντικειμένων και της ειδικής επεξεφγασίας των δεδομένων του φαντάφ για εξαγωγή πληφοφοφίας γεωμετφίας των οφίων του δφόμου παφουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια αυτής της μελέτης.

Κύριο αντικείμενο έρευνας και ένα από τα κίνητρα της εκπόνησης αυτής της μελέτης ήταν η ερευνητική εργασία για το ευρωπαϊκό πρόγραμμα PReVENT. Το πρόγραμμα αυτό φιλοδοξεί με βάση τη στατιστική ανάλυση των ατυχημάτων και την κατάλληλη επανασχεδίαση των συστημάτων ενεργητικής ασφάλειας να δώσει στοχευμένες λύσεις για καθένα από τα σενάρια θανατηφόρων ατυχημάτων. Υποστηρίζοντας ταυτόχρονα τον οδηγό σε όλες τις συνθήκες οδήγησης, καιρικών συνθηκών και κίνησης. Όπως αναφέρεται στην [8] τα θανατηφόρα ατυχήματα στην Ευρώπη οφείλονται κυρίως στον ανθρώπινο παράγοντα (το 90% αυτών), με στατιστικά σημαντικότερες τις περιπτώσεις: (α) χάσιμο του ελέγχου σε στροφές, (β) συγκρούσεις σε προσπεράσεις ή αλλαγές λωρίδας, (γ) συγκρούσεις σε διασταυρώσεις, (δ) ατυχήματα με ευάλωτους χρήστες (πεζούς, ποδηλάτες κλπ.) και (ε) σε συνθήκες περιορισμένης ορατότητας. Τα αντίστοιχα σενάρια αφορούν αντικείμενο μελέτης του προγράμματος με τα διάφορα ειδικευμένα υποσυστήματα του που αναπτύσσονται. Το σύστημα ολοκληρωμένης υποστήριξης οδηγού του ερευνητικού προγράμματος PReVENT δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Τα συγκεκριμένα υποσυστήματα του PReVENT που αναπτύχθηκαν κατά την διάρκεια σχεδίασης και δοκιμής των αλγορίθμων είναι: (α) SASPENCE για διατήρηση ασφαλούς απόστασης και ταχύτητας όπου σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος μηδενικού υπολογισμού και φιλτραρίσματος παραμέτρων θέσης και δυναμικής οχήματος με χρήση δεδομένων GPS και αδρανειακών αισθητήρων, (β) LATERAL SAFE σύστημα αποφυγής συγκρούσεων πλευρικών και πίσω περιοχής όπου σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν αλγόριθμοι ιχνηλασίας ραντάρ και ολοκληρωμένο σύστημα σύντηξης για παρακολούθηση των περιοχών ενδιαφέροντος, και τέλος το (γ) ProFusion2 το κατεξοχήν ερευνητικό υποπορόγραμμα του PReVENT όπου σχεδιάστηκα και αναπτύσσεται ο κύριος αλγόριθμος που περιγράφεται εδώ και είναι υπό δοκιμή σε δύο ερευνητικά οχήματα (τρεις αρχιτεκτονικές αισθητήρων) με κύρια πεδία ελέγχου στο ένα την κυκλική δυναμική παρακολούθηση και στο δεύτερο την πολυδιάστατη τους και την περιγραφή των αισθητήρων τους περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 2.

1.3 Επιστήμη της σύντηξης πληφοφοφίας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται μια μικρή ιστορική αναδρομή μαζί με τις σημαντικότερες τελευταίες εξελίξεις στην επιστήμη της σύντηξης πληροφορίας, της σύνδεσης δεδομένων καθώς και της εκτίμησης κατάστασης και γενικότερα των συστημάτων σύντηξης δεδομένων και ιχνηλασίας που χρησιμοποιούν στοιχεία από το σύνολο των προηγουμένων. Η παράγραφος αυτή περιέχει κυρίως στοιχεία, πέραν από τον χώρο των οδικών εφαρμογών που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, στην κύρια περιοχή ανάπτυξης τέτοιου είδους συστημάτων κατά το παρελθόν αλλά και σήμερα που είναι: τα συστήματα επιτήρησης εναέριας κυκλοφορίας της πολιτικής αεροπορίας, τα συστήματα επιτήρησης σε στρατιωτικές εφαρμογές εναέριας ή και υποθαλάσσιας περιοχής, αναγνώρισης πεδίου μάχης, στρατηγικής προειδοποίησης, καθώς και σε μια σειρά από άλλες πολιτικές εφαρμογές πιο εξειδικευμένες στην ρομποτική, ιατρική, μετεωρολογία, παρακολούθηση σύνθετων συστημάτων κλπ. τα οποία δεν συσχετίζονται τόσο με το θέμα της εργασίας αυτής όσο τα προηγούμενα. Η ενότητα χωρίζεται στις υποενότητες της εκτίμησης κατάστασης, της σύνδεσης δεδομένων και της σύντηξης δεδομένων.

Εκτίμηση κατάστασης

Στα προβλήματα που αφορούν στην παρούσα εργασία σημαντικό ρόλο κατέχει το πρόβλημα της κινηματικής εκτίμησης κατάστασης (LSE) που τυπικά αναφέρεται στο φιλτράρισμα και την πρόβλεψη συνήθως της θέσης και της ταχύτητας ενός στόχου. Το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης βασίζεται στις αρχές της εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων. Οι εκτιμητές ελαχίστων τετραγώνων είναι μια ομαδική (batch) μέθοδος εκτίμησης που χρησιμοποιεί πολλαπλές σαρώσεις δεδομένων ώστε να εκτιμήσει παραμέτρους που υποτίθενται σταθερές στο χρονικό διάστημα της συλλογής των δεδομένων. Από την επαναληπτική μορφή του LSE προκύπτουν το φίλτρο Kalman και ο επαναληπτικός εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων (ILSE) που εφαρμόζεται και σε μη γραμμικά προβλήματα εκτίμησης.

Τα κύρια χαρακτηριστικά που διαχωρίζουν τον LSE και το φίλτρο Kalman είναι ότι το τελευταίο παρέχει ένα βολικό τρόπο στην εισαγωγή του θορύβου διαδικασίας που χρησιμεύει στην μοντελοποίηση της τυχαίας κίνησης ενός στόχου. Πέρα από τα φίλτρα Kalman υπάρχουν και τα φίλτρα σταθερού κέρδους, όπως ο ιχνηλάτης α-β. Για την περίπτωση που είτε η δυναμική του στόχου είτε το μοντέλο μέτρησης είναι μη γραμμικά το εκτεταμένο φίλτρο Kalman (EKF) έχει προταθεί, το οποίο γραμμικοποιεί τις εξισώσεις εκτίμησης. Επίσης η χρήση ψευδο-μετρήσεων είναι μια εναλλακτική προσέγγιση σε μη γραμμικά προβλήματα. Σημαντικό ρόλο στην σχεδίαση ενός συστήματος ιχνηλασίας παίζει η κατάλληλη επιλογή του συστήματος συντεταγμένων καθώς και το σχετιζόμενο θέμα της αποσύνδεσης (decoupling) των παραμέτρων του φίλτρου [4].

Όσον αφορά την μοντελοποίηση και την ιχνηλασία δυναμικών στόχων μια σειρά από εξειδικευμένες εργασίας πάνω στο θέμα έχει λάβει χώρα, με το συμπέρασμα να είναι ότι δεν υπάρχει μια γενική μέθοδος που να είναι ξεκάθαρα καλύτερη για όλων των τύπων τις εφαρμογές [4]. Η ενσωμάτωση των διαφόρων μοντέλων κίνησης στις εξισώσεις του φίλτρου Kalman είναι επίσης ένα σημαντικό θέμα. Επίσης ο τομέας της έρευνας προς την ιχνηλασία εξαιρετικά ελισσόμενων στόχων είναι ιδιαίτερα σημαντικός με την δημιουργία διαφόρων σχημάτων προσαρμοζόμενων (adaptive) φίλτρων. Σημαντικό χώρο σε αυτόν τον τομέα καταλαμβάνει η μέθοδος των αλληλεπιδρώντων πολλαπλών μοντέλων (IMM) που χρησιμοποιούνται σε μεγάλου εύρους εφαρμογές [3].

Οι προϋποθέσεις για να είναι το φίλτρο Kalman ο βέλτιστος εκτιμητής όπως παρουσιάστηκαν στην σελίδα 17 δεν ισχύουν πάντα αφού μια σειρά από προβλήματα εκτίμησης κατάστασης παρουσιάζουν μη γραμμικότητες ενώ και ο θόρυβος που υπεισέρχεται σε αυτά δεν ακολουθεί πάντα Γκαουσσιανές κατανομές. Το μη γραμμικό φιλτράρισμα αποτέλεσε το επίκεντρο του ενδιαφέροντος της κοινότητας της στατιστικής και των μηχανικών για πάνω από 30 χρόνια. Το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης και η λύση του μέσω της επαναληπτικής μεθόδου του Bayes (εξισώσεις 1.3 και 1.4) με την εξεύρεση ενός εκτιμητή ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MMSE) ή μέγιστης εκ των υστέρων πιθανότητας (MAP) λύνεται με μία σειρά από βέλτιστους ή υπο-βέλτιστους αλγορίθμους. Η βέλτιστοι αλγόριθμοι περιλαμβάνουν το φίλτρο Kalman όπως προαναφέρθηκε και τα φίλτρα πλεγμάτων (grid) που υποθέτουν ότι ο χώρος είναι διακριτός και αποτελείται από ένα πεπερασμένο αριθμό καταστάσεων και τα φίλτρα Benes και Daum που λύνουν προβλήματα μη γραμμικών συστημάτων υποθέτοντας ότι η εκ των υστέρων κατανομή πυκνότητας πιθανότητας είναι ένα ικανοποιητικό στατιστικό μέγεθος πεπερασμένης και σταθερής διάστασης. Στην κατηγορία των βέλτιστων εκτιμητών υπάγονται και τα πολλαπλά εναλλασσόμενα δυναμικά μοντέλα (Jump Markov systems).

Εκτός από το ΕΚF που ανήκει στην κατηγορία των υπο-βέλτιστων φίλτρων με (1) αναλυτικές προσεγγίσεις στα προβλήματα μη γραμμικού φιλτραρίσματος, διακρίνονται και άλλες τρεις κατηγορίες τέτοιου είδους εκτιμητών, με (2) αριθμητικές προσεγγίσεις, (2) τα φίλτρα Γκαουσσιανού αθροίσματος ή φίλτρα πολλαπλών μοντέλων και (3) οι μέθοδοι με δειγματοληψία (sampling) [7]. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκει το φίλτρο IMM που προαναφέρθηκε που μπορεί να εναλλάσσει μια σειρά από μοντέλα είτε με στατικό ή δυναμικό τρόπο. Στην κατηγορία των φίλτρων με χρήση δειγμάτων ανήκει η οικογένεια των Unscented φίλτρων Kalman (UKF) που χρησιμοποιούν έναν μετασχηματισμό που προσεγγίζει την εκ των υστέρων πιθανότητα υπό εκτίμηση με μια Γκαουσσιανή ποσότητα που αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο ντετερμινιστικά εξελεγμένων δειγμάτων. Αυτά τα σημεία-δείγματα ανταποκρίνονται στο Γκαουσσιανό πραγματικό μέσο και την διακύμανση.

Στην κατηγορία των υποβέλτιστων εκτιμητών καταχωρούνται και τα φίλτρα σωματιδίων (Particle Filters). Αυτά κάνουν ακολουθιακή εκτίμηση κατά Monte Carlo (SMC) βασιζόμενα σε αντιπροσώπευση των πυκνοτήτων πιθανότητας από μάζες σημείων ή σωματίδια. Η βασική ιδέα πίσω από την εκτίμηση SMC εισήχθη στην στατιστική τη δεκαετία του 1950 και ερευνήθηκε σποραδικά κατά τις δεκαετίες του 1960 και του 1970, αν και ουσιαστικά είχε παραβλεφθεί. Κύρια αιτία ήταν το μεγάλο υπολογιστικό κόστος που έχουν αυτές οι μέθοδοι. Η κυριότερη προσθήκη σε αυτές τις τεχνικές ήταν η συμπερίληψη του βήματος της επαναδειγματοληψίας (resampling) καθώς και η εισαγωγή ισχυρότερων υπολογιστών που κατέστησαν την υλοποίηση των φίλτρων σωματιδίων πρακτικά εφικτή. Από την στιγμή αυτή (μέσα δεκαετίας του 1990) η ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα αυτό αυξήθηκε κατακόρυφα.

Σύνδεση δεδομένων

Η σύνδεση δεδομένων περιλαμβάνει τη διαδικασία ελέγχου μέσω πύλης, της σύνδεσης, της αρχικοποίησης ιχνών, της επιβεβαίωσης και της διαγραφής ιχνών, καθώς και την επίλυση του προβλήματος της ανάθεσης. Οι περισσότερες μέθοδοι σύνδεσης δεδομένων απαιτούν μέτρα πιθανοτήτων ώστε να αποτιμηθούν διάφορες εναλλακτικές υποθέσεις. Αυτά περιλαμβάνουν τη συνάρτηση κόστους ύπαρξης ενός ίχνους, η οποία μετατρέπεται απευθείας στην μορφή των πιθανοτήτων για τις υποθέσεις ύπαρξης ιχνών. Με την σειρά της αυτή επιτρέπει τη δυνατότητα η επιβεβαίωση και η διαγραφή των ιχνών να βασίζεται σε στατιστικά ορισμένους κανόνες αντί σε ad hoc κανόνες [4]. Ο έλεγχος μέσω πύλης χρησιμεύει στην ελάττωση των αχρείαστων πλεοναζόντων υπολογισμών για απίθανες αναθέσεις παρατηρήσεων σε ίχνη.

Η τυπική προσέγγιση στην σύνδεση δεδομένων είναι η μέθοδος του γενικά πιο κοντινού γείτονα (GNN) η οποία αναφέρεται και ως η μέθοδος της ιχνηλασίας της μοναδικής υπόθεσης. Καθώς ένα νέο σύνολο δεδομένων καταφθάνει στόχος είναι η ανεύρεση της μοναδικής πιο πιθανής υπόθεσης για την ανάθεση των υποθέσεων σε υπάρχοντα ίχνη καθώς και στην δημιουργία νέων ιχνών. Η εφαρμογής της GNN καθώς και των άλλον μεθόδων σύνδεσης δεδομένων απαιτεί την επίλυση του προβλήματος της ανάθεσης το οποίο μπορεί να είναι δυσδιάστατο με την εύρεση της βέλτιστης λύσης, ή πολυδιάστατο με την εξεύρεση μια ικανοποιητικής λύσης κοντά στην βέλτιστη για την περίπτωση της ανάθεσης σε πολυδιάστατα προβλήματα ή σε προβλήματα πολλαπλών σαρώσεων (σε βάθος χρόνου).

Η εξεύφεση της λύσης στα προβλήματα σύνδεσης δεδομένων με τους αλγορίθμους ανάθεσης είναι μια από τις εναλλακτικές προσεγγίσεις σε τέτοιου είδους προβλήματα και θεωρείται εξαιρετικά αποτελεσματική σε προβλήματα ιχνηλασίας παρουσία θορύβου - clutter. Στην ανάθεση η σύνδεση δεδομένων τυποποιείται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς, όπου μια συνάρτηση κόστους συνήθως ελαχιστοποιείται. Οι συντελεστές αυτής της συναρτήσεως κόστους υπολογίζονται από τα αποτελέσματα των εκτιμητών κατάστασης. Υπάρχει ένα σύνολο από αλγορίθμους που επιλύουν αυτό το πρόβλημα σε δύο διαστάσεις, όπως ο αλγόριθμος πλειστηριασμού, ο αλγόριθμος Jonker-Volgenant-Castanon, ο αλγόριθμος RELAX προβλήματα ροής δικτύων και οι μέθοδοι υπογραφής [86]

Όσον αφορά τα προβλήματα της πολυδιάστατης ανάθεσης, όπου μετρήσεις από τις τελευταίες S-1 σαρώσεις συνδέονται με τις S λίστες των ιχνών σε μια αρχιτεκτονική ιχνηλασίας πολλαπλών υποθέσεων MHT. Το πρόβλημα αυτό προκύπτει και κατά τη σύνδεση πληροφορίας από περισσοτέρους των δύο αισθητήρων. Το πρόβλημα της S-D ανάθεσης όταν είναι S>2 αποδεικνύεται ότι είναι NP-δύσκολο ακόμα και με την υπόθεση ότι υπάρχουν μηδενικοί ψευδείς συναγερμοί και μοναδιαίες πιθανότητες ανίχνευσης. Το πρόβλημα αυτό δεν μπορεί να επιλυθεί με βέλτιστο τρόπο με έναν αλγόριθμο πολυωνυμικής πολυπλοκότητας. Διάφορες προσεγγίσεις στο πρόβλημα έχουν προταθεί που γίνονται απαγορευτικές υπολογιστικά σε περιβάλλοντα πολλών στόχων. Επίσης διάφορες ευριστικές προσεγγίσεις έχουν παρουσιαστεί για τις οποίες όμως δεν
υπάρχει συστηματικός τρόπος αποτίμησης της ποιότητας της σύνδεσης δεδομένων που επιτυγχάνεται σε μεγάλα προβλήματα.

Οι τεχνικές της χαλάφωσης Lagrange επιτυγχάνουν την επίλυση του S-D προβλήματος ως μια σειρά από 2-D προβλήματα ανάθεσης, τα οποία επιλύονται σε ψευδοπολυωνυμικό χρόνο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της χαλάφωσης των συντελεστών Lagrange είναι ότι παρέχονται μέτρα της εγγύτητας της λύσης στην πιθανόν και άγνωστη βέλτιστη λύση.

Επίσης αλγόριθμοι της εύρεσης των m-καλύτερων (ταξινομημένων) λύσεων όπου όχι μόνο βρίσκεται η βέλτιστη αλλά επίσης και οι m ακόλουθες κορυφαίες λύσεις του προβλήματος. Η μέθοδος ιχνηλασίας JPDA επιλύεται με την χρήση του αλγορίθμου των m-καλύτερων 2-D λύσεων στην ανάθεση παρατηρήσεων σε ίχνη με την εξεύρεση συνδυαστικών μέσων από διανύσματα κατάστασης στόχων.

Όπως αναφέζεται η εξεύζεση της σχεδόν βέλτιστης λύσεως στο πρόβλημα της σύνδεσης δεδομένων δεν προκαλεί την μεγάλη καθυστέζηση σε τέτοιου είδους συστήματα, αντίθετα το μεγάλο πρόβλημα είναι η διασύνδεση σε τέτοιου είδους αλγορίθμους δηλαδή ο υπολογισμός των συντελεστών κόστους σε ένα σύστημα ανάθεσης που είναι ο κύζιος παράγων καθυστέζησης υπολογιστικού φόζτου (που μποζεί να φθάσει το 95% του χρόνου CPU ενός συστήματος σύνδεσης δεδομένων [86]). Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχουν αναπτυχθεί δύο τεχνικές: η ομαδοποίηση για το ξεκαθάζισμα των απίθανων υποψήφιων συνδέσεων και η παραλληλοποίηση της σύνδεσης δεδομένων με το επίκεντζο στον σχηματισμό του προβλήματος ανάθεσης.

Επανερχόμενοι τώρα στις μεθόδους σύνδεσης δεδομένων σε συστήματα ιχνηλασίας όπως έχει ήδη προαναφερθεί πέρα από την μέθοδο GNN της μόνης υπόθεσης σύνδεσης δεδομένων υπάρχουν και οι μέθοδοι όπου σχηματίζονται πολλαπλές υποθέσεις. Στην από κοινού πιθανοτική σύνδεση δεδομένων JPDA πολλαπλές υποθέσεις υπολογίζονται σε κάθε σάρωση δεδομένων και στη συνέχεια συνδυάζονται πριν από την επόμενη σάρωση δεδομένων. Η διάδοση και ο σχηματισμός πολλαπλών υποθέσεων από σάρωση σε σάρωση σε βάθος χρόνου χρησιμοποιείται στην ιχνηλασία πολλαπλών υποθέσεων MHT. Επίσης υπάρχει και μια σειρά από ειδικές εφαρμογές πιθανοτικών μεθόδων σύντηξης δεδομένων όπως η IPDA και άλλες.

Επίσης έχουν αναπτυχθεί και τεχνικές ομαδικής ιχνηλασίας αλλά λόγω των πρακτικών προβλημάτων έχουν αποθαρρύνει τους ερευνητές στην χρήση τους. Επίσης το πρόβλημα της ιχνηλασίας κοντινά κινούμενων στόχων όταν οι στόχοι σε άλλες σαρώσεις ξεχωρίζονται ενώ σε άλλες όχι είναι σημαντικό. Πιθανόν αυτό να επιτυγχάνεται με την σύνδεση δεδομένων MHT.

Σύντηξη δεδομένων

Η χρήση πολλαπλών αισθητήρων σε συστήματα παρακολούθησης πολλαπλών στόχων τους προσδίδει σημαντικά πλεονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα αυτά προέρχονται από το γεγονός ότι δεδομένα από κάθε αισθητήρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αλληλοσυμπληρώσουν την πληροφορία από τους άλλους αισθητήρες ώστε να αποκτηθούν μεγαλύτερη κάλυψη, πιο ακριβείς εκτιμήσεις κατάστασης στόχων και αποφάσεων, μείωση ψευδών συναγερμών και μειωμένη ευαισθησία σε αντίμετρα. Παρά τα θεωρητικά πλεονεκτήματα της χρήσης της ιχνηλασίας πολλαπλών αισθητήρων μια σειρά από πρακτικά θέματα που κάνουν την ανάπτυξη τέτοιου είδους αυτοματοποιημένων συστημάτων αρκετά δύσκολη. Το κυριότερο θέμα είναι η κατάλληλη επιλογή της αρχιτεκτονικής ιχνηλασίας που θα παρέχει την πιο ακριβή εικόνα επιτήρησης από αυτή που θα έδιναν οι αισθητήρες ξεχωριστά. Άλλα θέματα που προκύπτουν είναι αυτά του συγχρονισμού και της ευθυγράμμισης των μετρήσεων και των ιχνών, η ανόμοια ακρίβεια μετρήσεων και ανάλυση τα προβλήματα εφαρμογής αξιόπιστης δεδομένων των αισθητήρων, σύνδεσης συμπεριλαμβανομένης και της περίπτωσης τα δεδομένα να είναι ανόμοιας φύσης.

Το επίπεδο 1 της σύντηξης δεδομένων αποδίδει συνήθως κινηματική πληροφορία στόχων καθώς και πληροφορία ID. Τα ακόλουθα επίπεδα ενός συστήματος σύντηξης δεδομένων χρησιμοποιούν την έξοδο του επιπέδου 1 ώστε να σχηματίσουν υψηλότερα επίπεδα εννοιών όπως η πρόθεση των διαφορών στόχων η γενική κατάσταση της περιοχής ενδιαφέροντος και οι μέθοδοι αποτίμησης τυχόν απειλών εντός αυτής. Η πληροφορία αυτή στην συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναδιανομή των μέσων των αισθητήρων στις ακόλουθες συλλογές δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη την αποτίμηση της τρέχουσας. Η έξοδος του επιπέδου 1 είναι ακρογωνιαίος λίθος στα συστήματα σύντηξης δεδομένων αφού όλα τα συνεχόμενα επίπεδα απόφασης εξαρτώνται άμεσα από την επίδοση αυτού και συγκεκριμένα από την ορθή σύνδεση δεδομένων και ιχνηλασία.

Τα συστήματα πολλαπλών αισθητήρων μπορεί να είναι παραθεμένα στο ίδιο μέρος, όπως π.χ. σε ένα αεροσκάφος, οι κατανεμημένα όπως σε ένα δίκτυο από ραντάρ. Όλοι οι συνδυασμοί παραθεμένων και δικτυωμένων αισθητήρων μπορεί να παρουσιαστούν σε ένα μόνο σύστημα με την διαδικασία σύντηξης των δεδομένων να μπορεί να περιλαμβάνει αισθητήρες που παράγουν ίδιου τύπου ή διαφορετικού τύπου πληροφορία. Όλα αυτά οδηγούν σε έναν σημαντικό αριθμό διαφορετικών αρχιτεκτονικών και μεθοδολογιών στα συστήματα σύντηξης δεδομένων.

Οι αρχιτεκτονικές συστημάτων σύντηξης δεδομένων περιλαμβάνουν ιχνηλασία κεντρικού επιπέδου, όπου όλες οι μετρήσεις επεξεργάζονται σε ένα γενικό επίπεδο, σε ιχνηλασία επιπέδου αισθητήρα όπου όλες οι παρατηρήσεις επεξεργάζονται στο επίπεδο του αισθητήρα και μόνο δεδομένα ιχνών στέλνονται στο γενικό επίπεδο σύντηξης. Θεωρητικά η ιχνηλασία κεντρικού επιπέδου θα πρέπει να έχει την καλύτερη επίδοση. Όμως πρακτικά θέματα όπως οι περιορισμοί στις επικοινωνίες, τα σφάλματα καταγραφών, διαφορετικές αναλύσεις αισθητήρων οδηγούν σε μια ποικιλία αρχιτεκτονικών με τα πραγματικά συστήματα να ακολουθούν συνδυασμούς των βασικών αρχιτεκτονικών [4].

Σημαντικό ρόλο στα συστήματα σύντηξης δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων παίζει ο μετασχηματισμός των μετρήσεων σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς. Αυτές αφορούν είτε μετασχηματισμό σε καρτεσιανές συντεταγμένες πριν την είσοδο στα φίλτρα ιχνηλασίας είτε την είσοδο τους απευθείας σαν μη-γραμμικές μετρήσεις σε πολικές συντεταγμένες. Στην ιχνηλασία κεντρικού επιπέδου σημαντικό πρόβλημα προκύπτει με τη διαχείριση των μετρήσεων εκτός ακολουθίας λόγω καθυστερήσεων στις επικοινωνίες. Όσον αφορά τη σύντηξη ιχνών πολλαπλών αισθητήρων και τις μεθόδους σύντηξης ίχνους προς ίχνος διακρίνονται οι μέθοδοι της χρήσης της μήτρας συνδιακύμανσης ή σύντηξης σταθμισμένης (weighted) διακύμανσης [87] και [90] που λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση μεταξύ των ιχνηλατών (κοινός θόρυβος διαδικασίας) παράγοντας τη μήτρα συνδιακύμανσης από τις δύο υπάρχουσες μήτρες διακύμανσης, η χρήση των ισοδυνάμων μετρήσεων [4] που συνοψίζει όλη την πληροφορία από όλα τα δεδομένα μετρήσεων που χρησιμοποιηθήκαν από ένα ίχνος επιπέδου αισθητήρα από την τελευταία φορά που στάλθηκαν δεδομένα στο κεντρικό επίπεδο. Πέρα από τις δύο παραπάνω μεθόδους υπάρχουν και άλλες μέθοδοι για σύντηξη ιχνών αρχίζοντας από την απλούστερη μορφή σύντηξης όπως προτάθηκε στην [91] που υποθέτει ότι τα ίχνη είναι ασυσχέτιστα γι' αυτό είναι και μη βέλτιστη λύση. Τελευταία αναπτύχθηκαν η μέθοδος της τομής διακυμάνσεων (covariance intersection) [88] η οποία υποστηρίζεται ότι αντιμετωπίζει το πρόβλημα της άστοχης χρήσης πλεονασματικής πληροφορίας. Η άλλη μέθοδος που αναπτύχθηκε είναι αυτή της ένωσης των διακυμάνσεων [89] (covariance union) που επιλύει το πρόβλημα της επιδείνωσης από λανθασμένες εκτιμήσεις. Η μέθοδος ένωσης διακυμάνσεων εγγυάται την συνάφεια (consistency [3]) όταν το σύστημα και οι μετρήσεις παραμένουν συναφείς, αλλά είναι υπολογιστικά απαιτητική. Όπως υποστηρίζεται από πολλούς η μέθοδος της τομής των διακυμάνσεων είναι συντηρητική (μιας και η συντηγμένη διακύμανση είναι μεγαλύτερη από αυτήν της μεθόδου της συνδιακύμανσης).

Το θέμα της καταγραφής πολλαπλών αισθητήρων και της εκτίμησης της λανθασμένης ευθυγράμμισης επίσης είναι σημαντικό στην διόρθωση της πόλωσης των μετρήσεων των αισθητήρων, μιας και οδηγούν σε σημαντικά σφάλματα ιχνηλασίας. Τρεις κύριες πηγές σφάλματος καταγραφής (registration) διακρίνονται: η λανθασμένη ευθυγράμμιση των αξόνων των συστημάτων συντεταγμένων μετρήσεων, το σφάλμα πόλωσης στις μετρήσεις της απόστασης και της γωνίας και το σφάλμα θέσης του αισθητήρα.

Οι μέθοδοι σύντηξης της πληροφορίας από δίκτυα αισθητήρων αποτελούν μια άλλη σημαντική περιοχή εφαρμογών με σημαντική ερευνητική δραστηριότητα.

1.4 Επίκεντρο και συνεισφορά της διατριβής

Οι καινοτομίες που προτείνονται σε αυτήν την εργασία επικεντρώνονται σε τέσσερα κυρίως σημεία: (α) την διαχείριση πολλαπλών πηγών ετερογενούς πληροφορίας (μεγάλος αριθμός και διαφορετικοί τύποι αισθητήρων) σε κινούμενη πλατφόρμα με έναν γενικό αλγόριθμο, (β) την επίλυση νέων προβλημάτων σύνδεσης δεδομένων για σημειακά και πολυσημειακά αντικείμενα, και την πολυδιάστατη ανάθεση (για πάνω από δύο αισθητήρες), (γ) την κυκλική γύρω από το όχημαπλατφόρμα δυναμική παρακολούθηση άλλων κινούμενων οχημάτων και (δ) την ανάπτυξη αλγορίθμου ιχνηλασίας για διαφορετικές τοπολογίες (π.χ. πίσω ή υπό γωνία) και τύπους αισθητήρων. Τα παραπάνω σημεία αναπτύσσονται περισσότερο στην συνέχεια. <u>Πολλαπλές πηγές ετερογενούς πληροφορίας</u>

Όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 1.2 οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα που εξετάζουμε είναι εξαιρετικά ανομοιογενείς πηγές δεδομένων. Οι μέχρι τώρα λύσεις συστημάτων σύντηξης δεδομένων που έχουν αναπτυχθεί συνήθως επιχειρούν να λύσουν το πρόβλημα της ανομοιογένειας με κεντρικές αρχιτεκτονικές και αρκετά λιγότερες με κατανεμημένες. Όμως στην συντριπτική τους πλειοψηφία τα συστήματα αυτά αφορούν σε όλες τις περιπτώσεις δύο συστήματα αισθητήρων σε μια συγκεκριμένη τοπολογία, που είναι προς στην εμπρόσθια περιοχή του οχήματος. Από όσον γνωρίζουμε δεν υπάρχουν μέχρι τώρα συστήματα οδικής ασφαλείας (ή και γενικότερα) με το πλήθος και την ανομοιογένεια των ενσωματωμένων αισθητήρων που έχουν τα συστήματα που εξετάζουμε στο παρόν έργο. Επίσης η συνήθης διαχείριση της ανομοιογένειας μέσω εξαιρετικά ειδικευμένων τεχνικών κεντρικής σύντηξης απέχει πολύ από την δημιουργία ενός γενικού αλγορίθμου σύντηξης για οδικές εφαρμογές, που είναι μια από τις απαιτήσεις των κατασκευαστών και των σχεδιαστών εφαρμογών οδικής ασφαλείας. Το παρόν σύστημα κατανεμημένης σύντηξης που παρουσιάζεται έχει τη δυνατότητα της γενίκευσης για κάθε σύστημα πολλαπλών αισθητήρων (τουλάχιστον τρία παρουσιάζονται) αποδίδοντας κατά τον επιθυμητό τρόπο με μικρή απαίτηση καθορισμού προδιαγραφών και ταυτόχρονα απαιτώντας εύλογο ποσό υπολογιστικών πόρων. Επίσης υπάρχει και η δυνατότητα διαχείρισης πληροφορίας από οποιοδήποτε εξειδικευμένο έτοιμο σύστημα ενός ή δικτύου αισθητήρων χωρίς την απαίτηση επανασχεδίασης. Αυτά θα αποδειχθούν με την παρουσίαση των συστημάτων στην συνέχεια. Πολυσημειακή και πολυδιάστατη σύνδεση δεδομένων

Η συγκεκριμένη επιλογή της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής σύντηξης δεδομένων με ταυτόχρονη εφαρμογή της κλασσικής μεθόδου μοντελοποίησης του περιβάλλοντος ενδιαφέροντος (π.χ. χωρίς την χρήση πλέγματος κελιών στο επίπεδο του δρόμου που ελαχιστοποιεί την εξάρτηση από τη σύνδεση δεδομένων ή την απλούστευση με λειτουργία των αλγορίθμων στο επίπεδο της εικόνας – περισσότερες λεπτομέρειες για τα συστήματα αυτά στην ενότητα 1.2), οδηγεί στην απαίτηση ενός εξαιρετικά αποδοτικού αλγορίθμου σύνδεσης δεδομένων (data association). Όσον αφορά την απόρριψη της μεθόδου μεταφοράς και επεξεργασίας των δεδομένων στο επίπεδο της εικόνας, προφανώς υπάρχει σημαντική απώλεια πληροφορίας των δεδομένων ραντάρ μιας και όσο μεγάλη και να είναι η ανάλυση της εικόνας δεν είναι δυνατόν να μην οδηγήσει σε απώλεια κρίσιμης πληροφορίας. Βέβαια ισχύει και το αντίστροφο κατά την μεταφορά αποτελεσμάτων της επεξεργασίας εικόνας στο επίπεδο του δρόμου, αλλά ούτως ή άλλως στην περίπτωση αυτή η πληροφορία δεν είναι τόσο μεγάλης ακριβείας, δεν χάνεται κανένα ποσοστό της, και σε κάθε περίπτωση η μετάβαση αυτή θα απαιτηθεί οπωσδήποτε και κατά την προαναφερθείσα περίπτωση μιας και οι εφαρμογές απαιτούν π.χ. αποστάσεις στο επίπεδο του δρόμου. Η μέθοδος της χρήσης του πλέγματος κελίων με πιθανότητες κατοχής είναι πραγματικά μια νέα και πολλα υποσχόμενη ιδέα, χωρίς να σημαίνει ότι δεν είναι και σε αυτήν απαιτούμενη τέλεια λειτουργία ιχνηλασίας και μοντελοποίησης στόχων κάθε αισθητήρα σε τοπικό επίπεδο. Επίσης οι εφαρμογές οδικής ασφάλειας απαιτούν όσον τον δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια από την σύντηξη δεδομένων μειώνοντας ούτως ή άλλως τις διαστάσεις τω κελιών τείνοντας προς τις περιπτώσεις που εξετάζουμε. Επανερχόμενοι στο θέμα που αφορά την εργασία μας όπως προαναφέρθηκε, ο αλγόριθμος σύνδεσης δεδομένων αυτός οφείλει να αποδίδει τόσο στην δυσδιάστατη κλασσική περίπτωση όσο και στην πολυδιάστατη περίπτωση σύνδεσης δεδομένων η οποία πρωτοπαρουσιάζεται στην περιοχή των οδικών συστημάτων στις συγκεκριμένες εφαρμογές που εξετάζουμε. Το μεγάλο πρόβλημα στην περίπτωση μας έγκειται στην ύπαρξη πολυσημειακών αντικειμένων σε αντίθεση με τα σημειακά αποκλειστικά αντικείμενα που υπάρχουν στα συνήθη δύσκολα προβλήματα σύνδεσης δεδομένων. Μέθοδοι για τη διαχείριση πολυσημειακών ιχνών μέσω της κατάλληλης αρχικοποίησης τοπικών ιχνών και συντηγμένων ιχνών, του κατάλληλου υπολογισμού των μέτρων σύνδεσης και φυσικά για την επίλυση και εξαγωγή των αναθέσεων παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Κυκλική και δυναμική παρακολούθηση

Όπως προαναφέρθηκε τα μέχρι τώρα συστήματα έδιναν το βάρος στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος, συνήθως του χώρου μπροστά από το όχημα και λιγότερο στις άλλες περιοχές (π.χ. με χρήση αισθητήρων μόνο για ειδικευμένες εφαρμογές). Μια συγκεκριμένη εφαρμογή, από αυτές που εξετάζονται εδώ, έχει πλήρη κυκλική επιτήρηση γύρω από το όχημα αναφοράς με την χρήση ισοδύναμης ποιότητας αισθητήρων μπροστά πίσω και στις πλαϊνές περιοχές. Η χρήση τέτοιου πλήθους διαφορετικών αισθητήρων με αλληλεπικαλυπτόμενες οριακά, ελάχιστα ή αρκετά περιοχές οδηγεί στο πρόβλημα της εξασφάλισης διατήρησης και συνέχειας της ταυτότητας ενός προϋπάρχοντος ίχνους κατά την μετάβαση του σε διαφορετικές περιοχές αισθητήρων. Το θέμα αυτό απαιτεί εξαιρετικής ποιότητας τοπική ιχνηλασία με γρήγορη επιβεβαίωση ίχνους και αξιοπιστία, ειδικές τεχνικές διατήρησης για κάποιο διάστημα κατά την έξοδο από την περιοχή του τοπικού ίχνους και πλατφόρμας.

Ιχνηλασία για διαφορετικές τοπολογίες

Η ιχνηλασία στο τοπικό επίπεδο πρέπει να λύσει πέραν από κάποια από τα θέματα που περιγράφηκαν στα προηγούμενα σημεία (π.χ. αρχικοποίηση και διατήρηση τοπικού ίχνους) και το θέμα της ύπαρξης πρωτότυπων και δυσκολοχείριστων τοπολογιών. Οι περισσότεροι αισθητήρες των εφαρμογών οδικής ασφάλειας είναι κατασκευασμένοι για απόδοση σε συνήθης τοπολογίες εμπρόσθιων εφαρμογών ACC, οι προχωρημένες εφαρμογές που εξετάζονται εδώ απαιτούν την χρήση αισθητήρων τόσο για την πίσω όσο και τις πλάγιες περιοχές του οχήματος. Γενικά η επίλυση αυτών των προβλημάτων δεν είναι προφανής επέκταση των μεθόδων που εφαρμόζονται στις συνήθεις τοπολογίες, λόγω των ειδικών συνθηκών που επικρατούν στο οδικό περιβάλλον που είναι ένας ειδικός χώρος επιτήρησης με συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως δύσκολους ελιγμούς σχετικής κίνησης ως προς το όχημα πλατφόρμα, διάφορες γεωμετρίες τυπικών αναμενομένων επιστροφών στόχων, απόκρυψη και επανεμφάνιση οχημάτων από αλλά που εμφανίζονται και τα κρύβουν από τους αισθητήρες. Γενικά προτείνονται λύσεις για τα προβλήματα αυτά, σημειώνοντας πως στις κατανεμημένες αρχιτεκτονικές σύντηξης δεδομένων η τοπικού επιπέδου ιχνηλασία είναι βασικό προαπαιτούμενο για την ορθή λειτουργία του γενικού συστήματος.

1.5 Δομή του κειμένου

Η διάφθρωση του κειμένου ακολουθεί την γενικότερη περιγραφή των κύριων μονάδων του συστήματος σύντηξης ιχνών που παρουσιάζεται. Μετά το εισαγωγικό Κεφάλαιο 1 ακολουθεί το Κεφάλαιο 2 που περιγράφει την αρχιτεκτονική του γενικού συστήματος σύντηξης δεδομένων που σχεδιάστηκε μαζί με τις διαφορές υπομονάδες που το αποτελούν καθώς και την αιτιολόγηση της επιλογής του εν λόγω συστήματος. Επίσης περιλαμβάνεται η γενική αρχιτεκτονική των συστημάτων οδικής ασφάλειας με τη θέση του υποσυστήματος σύντηξης δεδομένων σε αυτό και την αλληλεπίδραση του με τα υπόλοιπα υποσυστήματα. Σημαντικό χώρο σε αυτό καταλαμβάνει και η παρουσίαση των δύο βασικών οχημάτων που αποτελούν τις πλατφόρμες δοκιμών των αλγορίθμων που περιλαμβάνονται στην εργασία, με περιγραφή των τοπολογιών, υποσυστημάτων και αισθητήρων που περιλαμβάνονται σε αυτά. Περιλαμβάνονται επίσης και περιγραφές των δευτερευόντων συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν σε άλλες σχετικές εφαρμογές που αναφέρονται στα προβλήματα της εκτίμησης κατάστασης, της διαχείρισης ιχνών και της διασύνδεσης των υποσυστημάτων αυτών μεταξύ τους (το θέμα της σύνδεσης δεδομένων εξετάζεται σε άλλο

κεφάλαιο). Περιλαμβάνεται η θεωρητική και σχεδιαστική ανάλυση των συστημάτων ιχνηλασίας καθώς και οι τροποποιήσεις για τα επιμέρους προβλήματα των διαφορετικού τύπου αισθητήρων που εξετάζονται, και επίσης τα αποτελέσματα των εφαρμογών που υλοποιηθήκαν. Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν το σύστημα μηδενικού υπολογισμού θέσης για βέλτιστη αξιοποίηση της πληροφορίας GPS. Ανάλυση ιχνηλασίας αισθητήρων LRR με προσομοίωση της επίδοσης διαφορετικών φίλτρων και χρήση πραγματικών δεδομένων για ανίχνευση αντικειμένων και γεωμετρίας του δρόμου. Περιλαμβάνεται επίσης παρουσίαση συστημάτων εικόνας και διασύνδεσης συστήματος υπέρυθρης εικόνας με ραντάρ σε αρχιτεκτονική κεντρικού επιπέδου. Αρχιτεκτονική σύντηξης επιπέδου αισθητήρα δεδομένων ραντάρ και σαρωτή λέιζερ παρουσιάζεται επίσης με κάποια αποτελέσματα. Το κεφάλαιο αυτό συμπληρώνεται με την ιχνηλασία/επεξεργασία των δεδομένων ραντάρ κοντινού πεδίου και το σύστημα προεπεξεργασίας υψηλού επιπέδου δεδομένων σαρωτή λέιζερ. Το Κεφάλαιο 4 αφορά στην σύνδεση δεδομένων, όπου παρουσιάζονται οι τεχνικές επίλυσης αρχικά του δυσδιάστατου προβλήματος για την ένα-προς-ένα και για την πιθανοτική ανάθεση. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι τεχνικές επίλυσης του πολυδιάστατου προβλήματος, μαζί με τα αποτελέσματα των εφαρμογών που υλοποιηθήκαν. Το Κεφάλαιο 5 περιέχει την αντίστοιχη περιγραφή των συστημάτων σύντηξης δεδομένων που εξετάζονται θεωρητικά, σχεδιαστικά καθώς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής επιτήρησης πλαϊνών και πίσω περιοχών καθώς και την περιγραφή των κύριων συστημάτων που δίνονται στο Κεφάλαιο 2. Η παρουσίαση των συμπερασμάτων της εργασίας καθώς και η περιγραφή των επόμενων ερευνητικών βημάτων που προχύπτουν δίνονται στο Κεφάλαιο 6. Το χείμενο χλείνει με τις δημοσιεύσεις που υποστηρίζουν την εργασία του κειμένου αυτού, τους καταλόγους σχημάτων και πινάκων, τις συντομογραφίες και την συνολική βιβλιογραφία όλης της εργασίας. Σημειώνεται ότι η δομή κάθε κεφαλαίου ξεχωριστά περιέχει μια αναλυτική εισαγωγική περιγραφή, το κύριο σώμα κάθε κεφαλαίου, και κλείνει πάντα με την παράγραφο των γενικών συμπερασμάτων και τις αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό.

Συμπεράσματα

Στο εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο κύριος στόχος και οι καινοτομίες που προτείνονται στην διδακτορική διατριβή. Αρχικά παρουσιαστήκαν οι ορισμοί των βασικών εννοιών που υπεισέρχονται στα προβλήματα που μελετώνται μαζί με την κύρια μαθηματική τυποποίηση τους. Στη συνέχεια δόθηκε μια λεπτομερής περιγραφή του στόχου της δημιουργίας τέτοιων συστημάτων σαν αυτά που περιγράφονται, μαζί με μια πλήρη περιγραφή της ιστορικής διαδρομής και των τρεχουσών εξελίξεων στους τομείς αυτούς για εφαρμογές οδικής ασφάλειας. Έπειτα παρουσιάστηκε και η κατάσταση στους θεμελιώδεις τομείς της επιστήμης που αφορούν τέτοιου είδους συστήματα, δηλαδή της εκτίμησης κατάστασης, της σύνδεσης δεδομένων και της σύντηξης δεδομένων. Η σημαντικότερη ενότητα του κεφαλαίου αφορούσε την περιγραφή των καινοτομιών που προτείνονται στο παρόν έργο οι οποίες είναι: (α) η διαχείριση πολλαπλών πηγών ετερογενούς πληροφορίας σε κινούμενη πλατφόρμα με έναν γενικό αλγόριθμο, (β) η επίλυση προβλημάτων σύνδεσης δεδομένων για πολυσημειακά αντικείμενα και με τεχνικές πολυδιάστατης ανάθεσης, (γ) η κυκλική γύρω από το όχημα-πλατφόρμα δυναμική παρακολούθηση άλλων κινούμενων οχημάτων και (δ) η ανάπτυξη αλγορίθμων ιχνηλασίας για ειδικές μη συνηθισμένες τοπολογίες. Το κεφάλαιο κλείνει με την δομή του κειμένου της διατριβής.

Αναφορές

- [1] David L. Hall, Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion, Artech House, Boston-London, 1992.
- [2] K. G. Gauss, Theoria Motus Corporum Coelestium, 1809.
- [3] Y. Bar-Shalom, X.-Rong Li, T. Kirubarajan, Estimation with applications to tracking and navigation, John Willey & Sons, 2001.
- [4] S.S. Blackman, R. Popoli, Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Norwood, MA: Artech House, 1999.
- [5] J. Llinas, "An Introduction to Data and Information Fusion", presentation, June 2001 (available online http://www.infofusion.buffalo.edu/).

- [6] R.E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", Trans. ASME, J. Basic Engineering, vol. 82, pp. 34-35, Mar. 1960.
- [7] B. Ristic, S. Arulampalam, Beyond the Kalman Filter: Particle filters for tracking applications, N. Gordon, Artech House, Boston, 2004.
- [8] Α.Δ. Πολυχρονόπουλος, Σχεδίαση και ανάπτυξη συστήματος σύντηξης δεδομένων από πολλαπλές πηγές με χρήση εκτιμητών Kalman με εφαρμογή στην ανασύνθεση του οδικού περιβάλλοντος, διδακτορική διατριβή, HMMY/EMII, Ιούνιος 2004
- Uwe Kaiser Dieckhoff, A roadmap for future integrated safety systems CAPS, Transport Research Arena– Europe 2006, TRA Conference, Goteborg, Sweden, June 15-16 2006.
- [10] W.D. Jones, Keeping cars from crashing, cover article IEEE SPECTRUM, September 2001
- C. Hartzstein, 76 GHz Radar Sensor for Second Generation ACC, ATA, vol. 55, no. 11/12, pp. 408-416, Nov-Dec 2002.
- [12] Ralph Mende, A Multifunctional Automotive Short Range Radar System, GRS 2000, German Radar Symposium, Berlin 2000.
- [13] R. Möbus, A. Joos, U. Kolbe, Multi-Target Multi-Object Radar tracking, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Ohio, USA, June 9-11, 2003, pp. 489-494.
- [14] M. Buhren, B. Yang, Simulation of Automotive Radar Target Lists using a Novel Approach of Object Representation, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Tokyo, Japan, June 13-15, 2006, paper 8-13, pp.314-319.
- [15] N. Kaempchen, K. C. Fuerstenberg, A. G. Skibicki, K. C. J. Dietmayer, Sensor Fusion for Multiple Automotive Active Safety and Comfort Applications, In International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA), pp. 137-163, Berlin 2004.
- [16] S. Wender, M. Schoenherr, N. Kaempchen, K. Dietmayer, Classification of Laserscanner Measurements at Intersection Scenarios with Automatic Parameter Optimization, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 128
- [17] A. Kapp, Quality Measures for Lidar Signal Processing, Intelligent Vehicles Symposium 2006, Tokyo, Japan, June 13-15, 2006, paper 4-2, pp163-168
- [18] A. Kapp, Robust Object Segmentation and Parameterization of 3D Lidar Data, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 158, pp. 694-699
- [19] O. Bezet, V. Cherfaoui, Time Error Correction For Laser Range Scanner Data, Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion, Florence, Italy, July 10-14, 2006, paper 115.
- [20] Z. Zomotor, U.Franke, Sensor Fusion for improved vision based lane recognition and object tracking with range-finders, In IEEE Conference on intelligent Transportation Systems, Boston USA November 1997, pp. 595-600
- [21] E.D. Dickmanns, A.Zapp, A curvature based scheme for improving road vehicle guidance by computer vision, Proc. SPIE Conference on Mobile Robots, Vol. 727, 1986, pp. 161- 168
- [22] D. Willersinn, W. Enkelmann, Robust obstacle detection and tracking by motion analysis, In Proc. of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 1997, pp. 717-722
- [23] U. Solder, V. Graefe, Object Detection in Real Time, SPIE Symposium on Advances in Intelligent Systems, November 8-9, 1990, Boston/MA, Vol. 1388, 112-119.
- [24] D. Wetzel, H. Niemann, S. Richter, A Robust Cognitive Approach to Traffic Scene Analysis, Proc. Second IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Sarasota, Florida, 5.-7.12.1994, pp. 65-72.
- [25] T. Zielke, M. Brauckmann, W. von Seelen, Intensity and Edge-Based Symmetry Detection with an Application to Car-Following, CVGIP: Image Understanding 58 (1993), pp. 177-190.
- [26] A. Kuehnle, Symmetry-Based Recognition of Vehicle Rears, Pattern Recognition Letters 12 (1991), pp. 249-258
- [27] E. D. Dickmanns, R. Behringer, C. Briidigam, D. Dickmanns, F. Thomanek, V. v. Bolt, An All-Transputer Visual Autobahn-Autopilot/Copilot, Fourth International Conference on Computer Vision - ICCV '93, May 11-14, 1993, Berlin, Germany, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos/CA, 1993, pp. 608-615.
- [28] M. Schwarzinger, D. Noll, W. von Seelen, Object Recognition with Constrained Elastic Models, Special Issue on Network, Control, Communication and Computing Technologies for Intelligent Transportation Systems, S.M. Amin, A. Garcia-Ortiz, J.R. Wootton (eds.), Mathematical and Computer Modelling 22:4-7 (1995), pp. 163-184.
- [29] F. Thomanek, E. D. Dickmanns, D. Dickmanns, Multiple Object Recognition and Scene Interpretation for Autonomous Road Vehicle Guidance, Intelligent Vehicles '94 Symposium, October 24-26, 1994, Paris, France, pp. 231-236.
- [30] J.-C. Burie, J.-G. Postaire, Enhancement of the Road Safety with a Stereovision System Based on Linear Cameras, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, September 19-20, 1996, Tokyo, Japan, 147-152.
- [31] U. Franke, I. Kutzbach, Fast Stereo Based Object Detection for Stop & Go Traffic, IEEE Intelligent Vehicles 'Symposium, Tokyo, Japan, September 19-20, 1996, pp. 339-344.
- [32] S. Carlsson, J.-O. Eklundh, Object Detection Using Model Based Prediction and Motion Parallax, First European Conference on Computer Vision - ECCV '90, O. Faugeras (ed.), Antibes, France, April 23-27,

1990, Lecture Notes in Computer Science 427, Springer- Verlag Berlin Heidelberg New York, 1990, pp. 297-306.

- [33] A. Giachetti, M. Campani, R. Sanni, A. Succi, The Recovery of Optical Flow for Intelligent Cruise Control, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Paris, France, October 24-26, 1994, pp. 91-96.
- [34] G. L. Foresti, V. Murino, C. Regazzoni, Vehicle Recognition and Tracking from Road Image Sequences, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 48, No. 1, January 1999
- [35] V. Graefe, Vision for intelligent road vehicles, in IEEE Workshop on Intelligent Vehicles, Tokyo, Japan, 1993, pp. 1–6.
- [36] D. Koller, K. Daniilidis, H. Nagel, Model-based object tracking in monocular image sequences of road traffic scenes, Int. J. Computer Vision, vol. 10, pp. 257–281, 1993
- [37] L. Andreone, P.C. Antonello, M, Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli, D. Ranzato, Vehicle Detection and Localization in Infra-Red Images, The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 3 - 6 September 2002, Singapore, pp.141-146.
- [38] I. Cabani, G. Toulminet, A. Bensrhair, A Fast and Self-adaptive Color Stereo Vision Matching; a first step for Road Obstacle Detection, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, paper 3-5
- [39] T. Kalinke, C. Tzomakas, W. von Seelen, A-Texture-based Object Detection and an Adaptive Model-based Classification, in Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium, pp. 341-346, 1998
- [40] M. Xie, L. Trassoudaine, J. Alizon and J. Gallice, Road Obstacle Detection and Tracking by an Active and Intelligent Sensing Strategy, Machine Vision and Applications, Vol. 7, pp. 165-177, 1994
- [41] S. M. Smith, J. M.Brady, ASSET-2: Real-time motion segmentation and object tracking, IEEE Trans. PAMI, Vol. 17, No. 8, pp. 814-820, 1995
- [42] U. Franke, D. Gavrila, S. Gorzig, F. Lindner, F. Paetzold, C. Wohler, Autonomous Driving Approaches Downtown, IEEE Intelligent Systems, Vo. 13, Nr. 6, pp. 1-14, 1999
- [43] S. Nedevschi, R. Danescu, D. Frentiu, T. Marita, F. Oniga, C. Pocol, R. Schmidt, T. Graf, High Accuracy Stereo Vision System for Far Distance Obstacle Detection, in Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium '04, pp. 14-17, 2004
- [44] M. Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli and S. Nichele, Stereo Vision-Based Vehicle Detection, in Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium 2000, pp. 39-44, 2000
- [45] K. Yong Lee, J. Woong Lee, M. Rai Cho, Detection of Road Obstacles Using Dynamic Programming for Remapped Stereo Images to a Top-View, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 39
- [46] P. Viola and M. Jones, Robust real-time object detection, in Second international Workshop on statistical and computational Theories of Vision-Modeling, Learning, Computing, and Sampling, Vancouver, Canada, July 13, 2001
- [47] S. K. Gehrig, S. Wagner, U. Franke, System Architecture for an Intersection Assistant Fusing Image, Map, and GPS information, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Ohio, USA, June 9-11, 2003, pp. 144-149
- [48] L. Vlacic, M. Parent, F. Harashima, Intelligent Vehicle Technologies: Theory and applications, Butterworth – Heinemann, 2001
- [49] U. Meis, R. Schneider, Radar Image Acquisition and interpretation for automotive applications, Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Ohio, 2003, pp. 328-332
- [50] E.D. Dickmanns, The development of machine vision for road vehicles in the last decade, keynote article, Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Versailles, *France*, June 2002
- [51] S.E. Shladover, C.A. Desoer, J.K. Hedrick, M. Tomizuka, J. Walrand, W.-B. Zhang, D.H. McMahon, H. Peng, S. Sheikholeslam, N. McKeown, Automatic Vehicle Control Developments in the PATH Program, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 40, No. 1, February 1991, pp.114-130
- [52] S. Tsugawa, Inter-Vehicle Communications and their Applications to Intelligent Vehicles: An Overview, keynote article, Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Versailles, France, June 2002
- [53] http://www.safespot-eu.org/
- [54] C. Coue, Th. Fraichard, P. Bessiere and E. Mazer, Using Bayesian Programming for Multi-Sensor Multi-Target Tracking in Automotive Applications, Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipai, Taiwan, May 12-17, 2003
- [55] M. Mählisch, R. Schweiger, W. Ritter, K. Dietmayer, Sensorfusion Using Spatio-Temporal Aligned Video and Lidar for Improved Vehicle Detection, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, paper 11-5, pp.424-429
- [56] T. Tatschke, Early Sensor Data Fusion Techniques for Collision Mitigation Purposes, Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Tokyo, Japan, June 13-15, 2006, paper 13-3, pp. 445-452
- [57] J. Thiem, M. Mühlenberg, Datafusion of two driver assistance system sensors, in Proceedings of Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, Germany, 2005, pp. 97-114
- [58] R. Labayrade, C. Royere, D. Aubert, A collision mitigation system using laser scanner and stereovision fusion and its assessment, in Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, USA, 2005, pp. 441–446

- [59] N. Kaempchen, M.Buehler, K.Dietmayer, Feature-level fusion for free-form object tracking using laserscanner and video, in Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, USA, 2005, pp.453–458.
- [60] D.T. Linzmeier, M. Skutek, M. Mekhaiel, K.C.J. Dietmayer, A Pedestrian Detection System based on Thermopile and Radar Sensor Data Fusion, Proc. of the 8th Eight International Conference on Information Fusion, Philadelphia, PA USA, July 25- 29, 2005, paper D9-2
- [61] A. Gad, M. Farooq, J. Serdula, D. Peters, Multitarget tracking in a multisensor multiplatform environment, In Proc. of ISIF International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, June 28–1st July 2004, pp. 206-213.
- [62] X. Lin, Y. Bar-Shalom, T. Kirubarajan, Multisensor-multitarget bias estimation for general asynchronous sensors, In Proc. of ISIF International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, June 28– 1st July 2004, pp. 243-250.
- [63] J.B. Gao, C.J. Harris, Some remarks on Kalman filters for the multisensor fusion, In Information Fusion, volume 3, issue 3, pages 191–201, September 2002.
- [64] H. Chen, T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom, Performance limits of track-to-track fusion vs. centralized estimation: theory and application, In IEEE transactions on Aerospace and Electronics Systems, volume 39, issue 2, pages 386–400, April 2003.
- [65] Y. Xue, D. Morrell, Target tracking and data fusion using multiple adaptive foveal sensors, In ISIF International Conference on Information Fusion, Cairns (Australia), July 2003.
- [66] M. Darms, H. Winner, A Modular System Architecture for Sensor Data Processing of ADAS Applications, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 320, pp. 729-734
- [67] D. Gruyer, M. Mangeas, R. Alix, Multi-sensors fusion approach for driver assistance systems, IEEE International Workshop on robot and Human Interactive Communication, 2001.
- [68] K. Weiss, D. Stueker, A. Kirchner, Target Modeling and Dynamic Classification for Adaptive Sensor Data Fusion, IEEE 2003, pp. 132-137
- [69] C. Blanc, L. Trassoudaine, Y. LeGuilloux, R. Moreira, Track to track fusion applied to road obstacle detection, In ISIF Seventh International conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, June 28– 1st July 2004
- [70] E. Lemaire, E.M. El Koursi, P. Deloof, J.-P. Ghys, Safety Analysis of a Frontal Collision Warning System, IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Versailles, France, June 18-20, 2002, paper IV-46.
- [71] B. Steux, C. Laurgeau, L. Salesse, D.Wautier, Fade: A Vehicle Detection and Tracking System Featuring Monocular Color Vision and Radar Data Fusion, IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Versailles, France, June 18-20, 2002, paper IV-85.
- [72] R. Schweiger, H. Neumann, W. Ritter, Multiple-cue data fusion with particle filters for vehicle detection in night view automotive applications, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 96.
- [73] M. Perrollaz, R. Labayrade, C. Royere, N. Hautiere, D, Aubert, Long Range Obstacle Detection Using Laser Scanner and Stereovision, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, paper 5-1, pp.182-187
- [74] M. Yguel, O. Aycard, D. Raulo, C. Laugier, Grid based fusion of off-board cameras, Intelligent Vehicles Symposium 2006, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, paper 8-7, pp.276-281.
- [75] C. Hoffmann, Fusing multiple 2D visual features for vehicle detection, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, paper 11-2, pp.406-411.
- [76] M. Skutek, D.T. Linzmeier, N. Appenrodt, G. Wanielik, A PreCrash System based on Sensor Data Fusion of Laser Scanner and Short Range Radars, Proc. of the Eight International Conference on Information Fusion, Philadelphia, PA USA, July 25- 29, 2005, paper D9-2
- [77] C. Blanc, L. Trassoudaine, J. Gallice, EKF and Particle Filter Track to Track Fusion: a Quantitative Comparison from Radar/Lidar Road Obstacle Tracks, Proc. of the Eight International Conference on Information Fusion, Philadelphia, PA USA, July 25- 29, 2005, paper D10-2.
- [78] M. Maehlisch, R. Schweiger, W. Ritter, K. Dietmayer, Multisensor Vehicle Tracking with the Probability Hypothesis Density Filter, Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion, Florence, Italy, July 10 – 14, 2006, paper 218.
- [79] K.A. Redmill, J.I. Martin, U. Ozguner, Sensing and Sensor Fusion for the 2005 Desert Buckeyes DARPA Grand Challenge Offroad Autonomous Vehicle, Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Tokyo, Japan, June 13-15, 2006, paper 13-16, pp. 528-533
- [80] A. Eidehall, F. Gustafsson, The Marginalized Particle Filter for Automotive Tracking Applications, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 150.
- [81] Automotive collision avoidance system field operational test, Technical report, National Highway Traffic Safety Administration, USA, 2000.
- [82] F. Dellaert, C. Thorpe, Robust car tracking using Kalman filtering and Bayesian templates. SPIE: Intelligent Transportation Systems, 1997.

- [83] Z. Zomotor and U. Franke, Sensor fusion for improved vision based lane recognition and object tracking with range-finders, IEEE Conference on intelligent transportation systems, 1997.
- [84] A. Polychronopoulos, U. Scheunert, F. Tango, Centralized data fusion for obstacle and road borders tracking in a collision warning system, Proc. of the ISIF 7th International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, 28/06-01/07 2004, pp. 760-767.
- [85] Ν. Φλούδας, Μ. Τσόγκας, Συστήματα Σύζευξης Δεδομένων (Data Fusion) Ανάλυση και Προσομοίωση Υποσυστημάτων, διπλωματική εργασία, ΗΜΜΥ/ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2002.
- [86] Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances, Volume III, Chapter 2: Survey of Assignment Techniques for Multitarget Tracking, K. R. Pattipati, R. L. Popp, T. Kirubarajan - Y. Bar-Shalom, W. D. Blair Editors, Artech House, Boston-London, 2000.
- [87] Y. Bar-Shalom, L. Campo, "The effect of the common process noise on the two-sensor fused-track covariance", IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-22, Nov. 1986, pp. 803-805.
- [88] S. Julier and J. Uhlmann, Handbook of Multisensor Data Fusion, 2001, edited by D. Hall and J. Llinas, Chapter 12, General Decentralized Data Fusion with Covariance Intersection (CI).
- [89] J. Uhlmann, Covariance Consistency Methods for Fault-Tolerant Distributed Data Fusion, Information Fusion 4, p. 201-215, 2003.
- [90] Y. Bar-Shalom, On the Track-to-Track Correlation Problem, On IEEE Transactions on Automatic Control, TAC 26(2):571-572, Apr 1981.
- [91] R.A. Singer and A.J. Kanyuck, Computer Control of Multiple Site Track Correlation, Automatica, 7:455 -462, 1971.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Αρχιτεπτονική Συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η γενική αρχιτεκτονική του αλγορίθμου σύντηξης που περιλαμβάνει την εσωτερική αρχιτεκτονική των υποσυστημάτων ιχνηλασίας και σύνδεσης δεδομένων σε επίπεδο υπομονάδων των ξεχωριστών λειτουργιών. Επίσης δίνεται ιδιαίτερο βάρος στις συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές και τοπολογίες αισθητήρων στις κύριες εφαρμογές που εξετάζονται. Αυτές περιλαμβάνουν μια γενική περιγραφή με κάτοψη του οχήματος με τους διάφορους ενσωματωμένους αισθητήρες, περιγραφή των χαρακτηριστικών των αισθητήρων και των πεδίων επιτήρησης συνολικά για κάθε όχημα. Πέρα από τις κύριες εφαρμογές που παρουσιάζονται δίνονται σε μια ξεχωριστή ενότητα ειδικές ενδιάμεσες τοπολογίες που εξεταστήκαν στην πορεία υλοποίησης των τελικών εφαρμογών.

2.1 Ιεραρχικά επίπεδα της σύντηξης δεδομένων στα συστήματα οδικής ασφάλειας

Η γενική αρχιτεκτονική που ακολουθείται στα συστήματα που περιγράφονται σε αυτήν την εργασία είναι σύμφωνα με την πρόταση της [1] ένα λειτουργικό μοντέλο για σύντηξη δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων σε αυτοκινητιστικά περιβάλλοντα πραγματικού χρόνου που ακολουθεί σε γενικές γραμμές το μοντέλο σύντηξης των Joint Directors of Laboratories (JDL) [2][3]. Το λειτουργικό μοντέλο ProFusion2 όπως ονομάζεται αποτελείται από τέσσερα διακριτά επίπεδα.

Επίπεδο	Ορισμός
Επίπεδο0: Σημάτων	Η φυσική έξοδος ενός αισθητήρα
Επίπεδο1: Αντικειμένων	
 Επίπεδο1a: Χαρακτηριστικά 	Εξαγόμενα χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου.
 Επίπεδο1b: Ίχνη 	Υπολογιζόμενα χαρακτηριστικά που αντιπροσωπεύουν ένα ίχνος
 Επίπεδο1c: Αντικείμενα 	Υψηλότερου επιπέδου αναπαράσταση αντικειμένων
Επίπεδο2: Κατάστασης (situation)	Ανάλυση των σχέσεων μεταξύ των αντικειμένων, υψηλότερου επιπέδου αναπαράσταση του περιβάλλοντος
Επίπεδο3: Εφαρμογών	Εφαρμογές οδικής ασφάλειας

Πίνακας 5:	Επίπεδα	συστήματος	σύντηξης	δεδομένων
III wanay 5.	Lincou	obornmanos	00000	00000000

όπου:

Ίχνος = Μία διατηρημένη χρονοακολουθία αναπαράστασης της συμπεριφοράς ενός κινούμενου αντικειμένου Χαρακτηριστικό = Μία αφαίρεση των ανεπεξέργαστων δεδομένων που αποσκοπεί στην παραγωγή ενός μικρότερου συνόλου δεδομένων που αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια γνήσια πληροφορία για το αντικείμενο (για παράδειγμα ακμή ενός οχήματος)

Αντικείμενο = ένα ολοκληρωμένο στοιχείο του οδικού περιβάλλοντος (για παράδειγμα ένας πεζός, μία λωρίδα κυκλοφορίας, ένα όχημα κλπ)

Κατάσταση = ο τρόπος με τον οποίο είναι κάτι τοποθετημένο εντός του περιβάλλοντος

Σε ένα σύστημα σύντηξης δεδομένων, τα γεγονότα, οι δραστηριότητες και οι κινήσεις συσχετίζονται και αναλύονται καθώς λαμβάνουν χώρα στον τόπο και στον χρόνο, έτσι ώστε να καθοριστεί η θέση, η ταυτότητα και η κατάσταση των διαφόρων αντικειμένων, να αποτιμηθεί η κατάσταση, και να καθοριστούν ποιοτικά και ποσοτικά οι ενδεχόμενες απειλές για την ασφάλεια του οχήματος και την ανίχνευση δραστηριοτήτων που φανερώνουν πρόθεση ή ικανότητα.



Εικόνα 4: Το λειτουργικό μοντέλο PF2

Το κύριο ενδιαφέρον σε αυτήν την εργασία επικεντρώνεται στο επίπεδο 1 και την εξαγωγή πληροφορίας αντικειμένων του περιβάλλοντος αυτών που αφορούν τα κινούμενα αντικείμενα (οχήματα) και λιγότερο τις παραμέτρους δυναμικής του ιδίου οχήματος και πληροφορίας για τη γεωμετρία του δρόμου.

2.2 Σύστημα σύντηξης δεδομένων και υποσυστήματα

Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή η κύρια αρχιτεκτονική του συστήματος σύντηξης δεδομένων που αναπτύσσουμε είναι αποκεντρωμένου τύπου, με την επεξεργασία των δεδομένων του κάθε αισθητήρα ή συστήματος αισθητήρων να λαμβάνει χώρα σε ένα προηγούμενο επίπεδο διακριτό από το τελικό επίπεδο της σύντηξης. Η γενική αυτή αρχιτεκτονική ενδέχεται να περιλαμβάνει και επιμέρους συστήματα αισθητήρων που τα δεδομένα τους επεξεργάζονται αρχικά πριν εισαχθούν στο γενικότερο σύστημα σύντηξης σαν υψηλού επιπέδου πληροφορία ιχνών. Επίσης η μεγάλου βαθμού ετερογένεια των δεδομένων στα συστήματα που εξετάζουμε οδηγεί στην επιλογή, όπως θα δειχθεί στη συνέχεια, εναλλακτικών μεθόδων σύντηξης ανάλογα με τον βαθμό εμπιστοσύνης στην ακρίβεια των δεδομένων του κάθε αισθητήρα.

Βασικό συστατικό στοιχείο σε ένα σύστημα σύντηξης κεντρικού επιπέδου είναι το επιμέρους σύστημα ιχνηλασίας στο επίπεδο του αισθητήρα. Η γενική μορφή ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Σε αυτό εικονίζεται ένα τυπικό σύστημα ιχνηλασίας πολλαπλών στόχων. Στην γενική της μορφή αυτή η αρχιτεκτονική βρίσκει εφαρμογή σε δεδομένα οποιουδήποτε τύπου αισθητήρα από αυτούς που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές που εξετάζουμε. Η υπομονάδα της μορφοποίησης και προεπεξεργασίας των μετρήσεων είναι το κατεξοχήν μέρος όπου λαμβάνει χώρα η άμεσα εξαρτώμενη από την ξεχωριστή φύση των δεδομένων του κάθε αισθητήρα επεξεργασία των δεδομένων του. Συνήθως όλοι οι αισθητήρες περιλαμβάνουν κάποιου τύπου προεπεξεργασία των παρατηρήσεων τους που σε γενικές γραμμές είναι άγνωστη στο σύστημα μετά από αυτήν την υπομονάδα. Το εύρος της προεπεξεργασίας αυτής μπορεί να περιλαμβάνει απλή ανάλυση για εξαγωγή μετρήσεων έως και προχωρημένες τεχνικές ιχνηλασίας και επεξεργασίας (φιλτράρισμα, ομαδοποίηση, εξαγωγή χαρακτηριστικών κ.α.) των μετρήσεων. Το είδος των δεδομένων που φθάνουν στην είσοδο ενός συστήματος σύντηξης παίζει σημαντικό ρόλο στην επίδοση του συστήματος αυτού και είναι εξαιρετικής σημασίας η γνώση της επεξεργασίας που έλαβε χώρα για την κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος σύντηξης. Επίσης η υπομονάδα αυτή μπορεί να αποτελέσει ένα απαραίτητο στάδιο επέμβασης από τον σχεδιαστή του αλγορίθμου για την παραγωγή ομοιόμορφων δεδομένων που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία ενός συστήματος σύντηξης κεντρικού επιπέδου. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν ένας αισθητήρας παρέχει υψηλού επιπέδου πληροφορία, για παράδειγμα φιλτραρισμένα δεδομένα, ταξινομημένα ίχνη με ταυτότητα και αξιοπιστία, προφανώς το σύστημα ιχνηλασίας επιπέδου αισθητήρα μπορεί να παρακαμφθεί.



Εικόνα 5: Σύστημα Ιχνηλασίας Αισθητήρα

Η γενική αρχή λειτουργίας του συστήματος ιχνηλασίας ακολουθεί: υποθέτουμε ότι καταρχήν έχει πραγματοποιηθεί ήδη επαναλαμβανόμενη διαδικασία και έχουν εντοπιστεί ίχνη από προηγούμενη σάρωση. Τα δεδομένα εισόδου από τον αισθητήρα έχουν ληφθεί και εκτελείται ο βρόχος της διαδικασίας που περιγράφεται στο Σχήμα 5. Οι εισερχόμενες παρατηρήσεις πρώτα εξετάζονται για την ενημέρωση των υπαρχόντων ιχνών. Ο έλεγχος μέσω πύλης (Gating) καθορίζει ποια από τα πιθανά ζεύγη παρατήρησης-ίχνους είναι «λογικά» και ένας πιο ακριβής αλγόριθμος χρησιμοποιείται για να καθορίσει τα τελικά ζεύγη. Οι παρατηρήσεις που δεν ανατέθηκαν σε κάποιο από τα υπάρχοντα ίχνη μπορούν να αρχικοποιήσουν νέα αβέβαια (tentative) ίχνη. Ένα αβέβαιο ίγνος επιβεβαιώνεται όταν το πλήθος και η ποιότητα των παρατηρήσεών του ικανοποιούν τα κριτήρια επιβεβαίωσης. Ομοίως, χαμηλής ποιότητας ίχνη, που καθορίζονται από την διαδικασία ενημέρωσης, διαγράφονται όταν πληρούνται οι αντίστοιχες προϋποθέσεις. Όλη αυτή η προηγούμενη διαδικασία της αρχικοποίησης, της επιβεβαίωσης και της διαγραφής ίχνους αποτελεί το υποσύστημα της Διαχείρισης Ιχνών (Track Management). Τελικά, μετά τον συνυπολογισμό των νέων παρατηρήσεων, τα ίχνη προβλέπονται για τον χρόνο άφιξης της καινούριας ομάδας παρατηρήσεων. Γύρω από τις θέσεις αυτές δημιουργούνται πύλες και ο κύκλος της παραπάνω διαδικασίας επαναλαμβάνεται.

Στη συνέχεια τα ίχνη που προέκυψαν από κάθε αισθητήρα εισάγονται στο επίπεδο της σύντηξης κεντρικού επιπέδου. Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται η γενική ιδέα των βασικών αρχιτεκτονικών σύντηξης δεδομένων. Μια γενική επισκόπηση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των δύο βασικών μεθόδων σύντηξης δεδομένων παρουσιάστηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο. Επιπλέον υπάρχει και μια σειρά από αρχιτεκτονικές που ανήκουν στα συστήματα υβριδική σύντηξης δεδομένων. Σε τέτοιου είδους συστήματα η σύντηξη κεντρικού επιπέδου συμπληρώνεται από ξεχωριστούς αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος αισθητήρα, οι οποίοι ενδέχεται επίσης να παρέχουν εισόδους σε έναν εφεδρικό αλγόριθμο σύντηξης επιπέδου αισθητήρα. Η υβριδική σύντηξη διατηρεί τα πλεονεκτήματα της σύντηξης κεντρικού επιπέδου χρησιμοποιώντας τα ελάχιστα επεξεργασμένα δεδομένα εισόδου των αισθητήρων και επιπροσθέτως επιτρέπει και την σύντηξη των ιχνών των στόχων όπως υπολογίστηκαν από τους ανεξάρτητους αισθητήρες σε μια διαδικασία σύντηξης επιπέδου αισθητήρα. Η υβριδική σύντηξη μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να υποστηρίξει ταξινόμηση των χαρακτηριστικών στόχων όταν τα δεδομένα των αισθητήρων δεν δημιουργούνται από ανεξάρτητα φαινόμενα. Το κύριο μειονέκτημα της υβριδικής σύντηξης είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα της διαδικασίας και οι πιθανές υψηλές απαιτήσεις μετάδοσης δεδομένω.





(β) Σύντηξη επιπέδου αισθητήρα

Εικόνα 6: Οι δύο κύριες αρχιτεκτονικές σύντηξης δεδομένων

Η γενική περίπτωση που εξετάζουμε αναφερόμαστε σε ένα σύστημα που ακολουθεί την αρχιτεκτονική του συστήματος σύντηξης επιπέδου αισθητήρα ή υψηλού επιπέδου, αλλά υπάρχει και η πρόβλεψη για επέκταση σε υβριδικές αρχιτεκτονικές με τη σύνδεση συστημάτων δύο ή περισσοτέρων αισθητήρων.



Εικόνα 7: Αρχιτεκτονική του συστήματος σύντηξης δεδομένων που προτείνεται

Οι λίστες ιχνών που φθάνουν στην είσοδο του συστήματος σύντηξης δεδομένων αποτελούν την έξοδο από συστήματα παρόμοια με αυτό του σχήματος 5. Η σύντηξη επιπέδου ιχνών είναι μια κατανεμημένη προσέγγιση που υποθέτει ότι ένα επίπεδο επεξεργασίας έχει ήδη έρθει εις πέρας στο ιδιαίτερο επίπεδο του κάθε αισθητήρα ή υποσυστήματος αισθητήρων, και η έξοδος (λίστες ιχνών) τροφοδοτούν τον κεντρικό αλγόριθμο. Υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής του σε δίκτυα αισθητήρων εντός αυτοκινήτων με συμπληρωματική ή πλεονασματική κάλυψη. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εξασφαλίζει την συναρμολογησιμότητα (modularity) λόγω της ευέλικτης δόμης της επιτρέποντας ταυτόχρονα την δοκιμασία των διαφόρων υπομονάδων μιας και δεν επιτρέπονται βρόχοι και ανατροφοδοτήσεις κατά την επεξεργασία.

Τα κύρια τμήματα του αλγορίθμου σύντηξης επιπέδου ιχνών όπως εικονίζεται στο σχήμα 7 είναι: η χρονική και χωρική ευθυγράμμιση των ιχνών εισόδου, την υποδιαίρεση του γενικού προβλήματος σύντηξης σε μια σειρά από υποπροβλήματα σύμφωνα με την περιοχή κάλυψης του κάθε αισθητήρα και φυσικά την ποιότητα των παρατηρήσεων του κάθε αισθητήρα (θα αναλυθεί στη συνέχεια), η διαδικασία της σύνδεσης ίχνους προς ίχνος που επιλύεται με αλγορίθμους 2Δ ή S-D (με S \geq 3) ανάθεσης, η σύντηξη ίχνους προς ίχνος με βάση τα ζεύγη ή τις ομάδες των S ιχνών που συνδέθηκαν και τέλος της διαχείρισης (τελευταίος έλεγχος) των τελικών συντηγμένων αντικειμένων πριν αυτά φθάσουν στην έξοδο του γενικού συστήματος.



Εικόνα 8: Διάσπαση περιοχής επιτήρησης σε επιμέρους υποπροβλήματα σύνδεσης ίχνους προς ίχνος

Σημαντικό φόλο στην σύντηξη επιπέδου ιχνών κατέχει ο αλγόφιθμος της σύνδεσης ίχνους πφος ίχνος, όσον αφοφά την επίδοση του εξασφαλίζοντας την συνέχεια και τη διατήφηση των αντικειμένων σε όλη την καλυπτόμενη πεφιοχή από τους αισθητήφες καθώς και την επίλυση του θέματος της ανάθεσης των πφοεφχομένων από πολλαπλές πηγές αντικειμένων. Η σύνδεση δεδομένων στην ΣΕΙ αφοφά τις τεχνικές για τη διαχείφιση πληφοφοφίας αντικειμένων από διαφοφετικές πηγές (αντικείμενα από πολλαπλά σημεία, από αισθητήφες διαφοφετικής αξιοπιστίας και ακφίβειας κλπ), την εξαγωγή των κατάλληλων μέτφων σύνδεσης αντικειμένων, τη δυσδιάστατη ή πολυδιάστατη λύση για το πφόβλημα της βελτιστοποίησης υπό πεφιοφισμούς για την ανάθεση ίχνους πφος ίχνος και τις διάφοφες μεθόδους για το θέμα της διαχείφισης των ιχνών.

Όπως προαναφέρθηκε σημαντική συμμετοχή στην γενική αρχιτεκτονική έχει το υποσύστημα του διαχωρισμού του γενικότερου προβλήματος σε μικρότερα υποπροβλήματα – ευκολότερα στην επίλυση. Αυτό είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί γνωρίζοντας εκ των προτέρων το ορατό πεδίο του κάθε αισθητήρα, οπότε είναι επίσης γνωστές και οι περιοχές οπού αναμένονται να

υπάρξουν ίχνη που δεν είναι δυνατόν να συνδεθούν με ίχνη από άλλους αισθητήρες καθώς και περιοχές όπου αυτό είναι εφικτό. Τότε μπορούν αναλόγως να χωριστούν και τα ίχνη του κάθε αισθητήρα σε υποομάδες αναλόγως την περιοχή που αυτά εμφανίζονται. Διασπώντας έτσι το γενικότερο πρόβλημα σε επιμέρους προβλήματα ελαττώνεται το υπολογιστικό κόστος των αλγορίθμων αποφεύγοντας επιπλέον ελέγχους για την εξάλειψη των απίθανων συνδυασμών ιχνών.

Βέβαια η ετερογένεια των αισθητήρων που παράγουν δεδομένα στις εφαρμογές που εξετάζουμε είναι δυνατόν να οδηγήσει, ιδιαίτερα αν οι περιοχές ελέγχου είναι μικρές σε έκταση και οι αισθητήρες διαφορετικοί, σε κακής ποιότητας συνδυασμούς αντικειμένων. Για παράδειγμα καθώς ένα αντικείμενο κινείται μεταξύ διαφορετικών περιοχών ενδέχεται να παρουσιαστούν «άλματα» στην θέση του τελικού αντικειμένου ή να απωλεσθεί η συνέχεια του αριθμού ταυτότητας ΙD του στόχου. Μια λύση σε τέτοιου είδους θέματα είναι η εισαγωγή όπου αυτό είναι εφικτό και όχι ακολουθώντας αυστηρά τον διαχωρισμό στις περιοχές του σχήματος 8 της μεθόδου της ακολουθιακής και ανά ζεύγη σύνδεσης ίχνους προς ίχνος, που δίνεται στο σχήμα 9. Η λογική πίσω από αυτή την αρχιτεκτονική βασίζεται στην γνώση εκ των προτέρων των χαρακτηριστικών του κάθε αισθητήρα. Συνεπώς αναμένεται τα ίχνη του ακριβέστερου αισθητήρα να είναι πιο αξιόπιστα συγκρινόμενα με τα ίχνη άλλων κατώτερης ποιότητας αυσθητήρων. Σημαντικό ρόλο παίζει βέβαια και η εκάστοτε τοπολογία των αισθητήρων μεταξύ τους. Συνεπώς συγκρινόμενα με τους υπόλουθιακά συγκρίνεται με τους υπόλοιπους αισθητήρων εκταξο τους οποίους επιτηρούν την ίδια περιοχή και συνδυάζονται ανά δύο δίνοντας ενδιάμεσα συνδυασμένα ίχνη μέχρι την επίτευξη του τελικού συντηγμένου ίχνους.



Εικόνα 9: Ακολουθιακή και ανά ζεύγη σύνδεση ίχνους προς ίχνος

Μεγάλης σημασίας στα συστήματα που εξετάζουμε έχει η διατήρηση της ταυτότητας ID ενός στόχου καθώς αυτός διασχίζει διαφορετικές περιοχές αισθητήρων. Η ομαλή και ορθή μετάβαση ενός στόχου καθώς διασχίζει διαφορετικές περιοχές αισθητήρων είναι ένα αρκετά επίπονο πρόβλημα και ιδιαίτερα σημαντικό για την σωστή επίδοση των εφαρμογών οδικής ασφάλειας.

2.3 Σύστημα φορτηγού οχήματος

Ο γενικός αλγόριθμος σύντηξης δεδομένων που αναπτύσσεται σε αυτήν τη διδακτορική διατριβή εφαρμόζεται σε διαφορετικά επιμέρους οχήματα και αρχιτεκτονικές. Στο παρών κεφαλαίο αυτά παρουσιάζονται ξεχωριστά. Σαν σύστημα πολυδιάστατης ανάθεσης αναφέρεται η τοπολογία του φορτηγού Volvo FH12 που εικονίζεται στο σχήμα 10 που συνδυάζει αισθητήρες και εφαρμογές του προγράμματος PReVENT. Διακρίνονται δύο αρχιτεκτονικές του φορτηγού και στο εξής θα αναφέρονται ως Volvo-INSAFES και Volvo-ProFusion.



Εικόνα 10: Το όχημα εφαρμογής του συστήματος πολυδιάστατης ανάθεσης

Αοχιτεκτονική

Οι εφαρμογές που υποστηρίζονται από το εν λόγω όχημα περιλαμβάνουν: (1) ολοκληρωμένη πλευρική υποστήριξη (προσαρμοστική υποστήριξη διατήρησης ιδίας λωρίδας, και προειδοποίηση αλλαγής λωρίδας), (2) προειδοποίηση για είσοδο σε στροφή με υπερβολική ταχύτητα και (3) κυκλική επιτήρηση. Η κυκλική επιτήρηση δεν περιλαμβάνει στην παρούσα αρχιτεκτονική την επιτήρηση της πίσω πλευράς κυρίως λόγω της ύπαρξης του ρυμουλκούμενου που δεν επιτρέπει τέτοιου είδους λύσεις.

Το φορτηγό Volvo-INSAFES στην κύρια αρχιτεκτονική του περιλαμβάνει τους ακόλουθους αισθητήρες: 1 LRR, 3 SRR, 2 MRR και μια κάμερα η θέση τους και η περιοχή κάλυψης που έχουν δίνεται στο σχήμα 11.



Εικόνα 11: Περιοχή κάλυψη του φορτηγού (αρχιτεκτονική INSAFES)

Οι αισθητήρες και η κάλυψη στην παραπάνω εικόνα είναι: ένα LRR που κοιτάει μπροστά, ένα δίκτυο τριών αισθητήρων SRR που κοιτάει μπροστά, επίσης μπροστά υπάρχει ένα σύστημα δύο αισθητήρων με επεξεργασία εικόνας για αναγνώριση αντικειμένων, ένα εμπρόσθιας επιτήρησης σύστημα καμερών για ανίχνευση λωρίδας, και ένα σύστημα δύο αισθητήρων MRR που στοχεύουν προς τα πίσω στις πλευρικές περιοχές.

Η εσωτερική αρχιτεκτονική του επιπέδου της αναγνώρισης του συστήματος INSAFES [4] με τα επιμέρους συστατικά του στοιχεία φαίνεται στο σχήμα 12 και αποτελείται από τα στοιχεία: (1) προεπεξεργασίας και ιχνηλασίας των δεδομένων του SRR, (2) επεξεργασία εικόνας, (3) επεξεργασία εικόνας για ανίχνευση λωρίδας, (4) το σύστημα MLP (Most Likely Path) πρόβλεψης της πιο πιθανής πορείας που θα ακολουθήσει ένα όχημα βασιζόμενο σε δεδομένα από ψηφιακούς χάρτες, (5) τετραδιάστατη σύνδεση δεδομένων, (6) σύντηξη δεδομένων για εκτίμηση γεωμετρίας λωρίδων, (7) διαχείριση ιχνών και (8) σύντηξη δεδομένων.

Τα υποσυστήματα του επιπέδου απόφασης/εφαρμογών είναι: το σύστημα πρόβλεψης μελλοντικής πορείας του οχήματος, (2) η συσχέτιση αντικειμένου με λωρίδα κίνησης, (3) αποτίμηση κατάστασης για πλευρικά οχήματα, (4) προειδοποίηση επικίνδυνης αλλαγής λωρίδας, (5) ανίνευση επικίνδυνων αντικειμένων, (6) εκτίμηση πρόθεσης δεξιάς στροφής, (7) λειτουργία παρεμπόδισης εκκίνησης και (8) υπολογισμός μέγιστης ανεκτής ταχύτητας εισόδου σε στροφή.

Η τοπολογία των αισθητή ων του συστήματος εικονίζεται στο σχήμα 14.



Εικόνα 12: Εσωτερική αρχιτεκτονική επιπέδου αναγνώρισης (όχημα Volvo - INSAFES)



Εικόνα 13: Τοπολογία του συστήματος στο όχημα (Volvo - INSAFES)

Η εικόνα 13 δείχνει τα κύρια στοιχεία του συστήματος στο όχημα Volvo – INSAFES που διαθέτει πέντε κύριες μονάδες επεξεργασίας με διακριτούς ρόλους:

- INSAFES/SAFELANE gateway xPC, υπεύθυνο για τις εφαρμογές INSAFES και τον ελεγκτή μηχανισμού κίνησης τιμονιού (steering actuator control)
- INSAFES/APALACI Gateway xPC, υπεύθυνο για τη διασύνδεση των δεδομένων αισθητήρων APALACI με το σύστημα του INSAFES Gateway xPC, για περαιτέρω διανομή στις μονάδες επεξεργασίας/απόφασης.
- Η μονάδα σύντηξης/απόφασης, υπεύθυνη για τη δημιουργία του μοντέλου οδικού περιβάλλοντος.
- Η μονάδα επεξεργασίας εικόνας APALACI
- AIDE Gateway/ICA xPC, που συνδέει το σύστημα INSAFES με το σύστημα AIDE που συντονίζει τις λειτουργίες HMI

Οι διασυνδέσεις επιτυγχάνονται με μια σειρά από διαφορετικούς διαύλους CAN που δείχνονται με διαφορετικά χρώματα στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 14: Τοπολογία συστήματος Volvo - INSAFES

Τα διάφορα συστήματα που απεικονίζονται στο σχήμα 14 και η αντιστοιχία τους είναι: (1. a,b) Short range radar, MA/COM, (2 a,b) Κάμερες, (3) Short range radar, SMS, (4 a,b) Medium range radar, SMS, (5) Κάμερα ιχνηλασίας λωρίδας, (6) Long range radar για λειτουργία ACC, (7) INSAFES/APALACI gateway, xPC, (8) PC επεξεργασίας εικόνας (APALACI), (9) PC σύντηξης δεδομένων, (10) INSAFES/SAFELANE Gateway, xPC, (11) PC ανιχνευτή λωρίδας, (12) AIDE / ICA, xPC, (13) στοιχείο ενεργητικής στροφής τιμονιού (SAFELANE), (14 a,b) κανάλια πλευρικού HMI, (15) DID και ομάδα οργάνων, (16) συσκευές εισαγωγής αποφάσεων από τον οδηγό, (17) HUD και/ή δευτερεύουσα οθόνη, (18) ECM, BCM, etc. (ECUs πάνω στο CAN του οχήματος), (19) πληροφορία ψηφιακών χαρτών (MAPS & ADAS).

Αισθητήρες

Short-Range-Radar: το όχημα Volvo – INSAFES είναι εξοπλισμένο με δύο ραντάρ κοντινού πεδίου τοποθετημένα μπροστά, πίσω από τον προφυλακτήρα, για την επιτήρηση της μπροστινής περιοχής. Ο αισθητήρας SRR της M/A-COM / Tyco Electronics (εικόνα 15) έχει σχεδιαστεί ώστε να εντοπίζει αντικείμενα γύρω από το όχημα σε αποστάσεις από 0.2 έως 30μ. Το εύρος της γωνιακής του κάλυψης τις +/-65° για τη γωνία αζιμουθίου. Οι μετρούμενες ποσότητες για τα αντικείμενα είναι απόσταση, ταχύτητα και γωνία ανίχνευσης. Το SRR είναι ένα ραντάρ που λειτουργεί με παλμούς ultra wide band (UWB) με την συχνότητα φέροντος στα 24 GHz.



Εικόνα 15: Αισθητήρας SRR της Μ/Α-COM / Tyco Electronics

Οι αισθητήρες ραντάρ κοντινού πεδίου M/A-COM [6] δίνουν τα ακόλουθα δεδομένα εξόδου:

- Σχετική απόσταση αντικειμένου από το όχημα (Το πολύ δέκα στόχους για κάθε αισθητήρα)
- Σχετική ταχύτητα αντικειμένου για κάθε ανιχνευόμενο αντικείμενο.
- Γωνιακή θέση για κάθε ανιχνευόμενο αντικείμενο.
- Πλάτος των κορυφών του σήματος του στόχου σε decibels για κάθε ανιχνευόμενο αντικείμενο.
- Time stamp για κάθε ανιχνευόμενο αντικείμενο.

Υπάρχει επίσης τοποθετημένο ένα ραντάρ κοντινού πεδίου της SMS [5] στην δεξιά πλευρά του οχήματος που καλύπτει τη δεξιά αόρατη στον οδηγό περιοχή. Επιπλέον δύο μέσου πεδίου ραντάρ SMS σε κάθε πλευρά του οχήματος για επιτήρηση των εν λόγω περιοχών.



(a) SMS SRR (b) SMS MRR (c) SMS ECU Εικόνα 16: Σύστημα ραντάρ κοντινού και μέσου πεδίου της SMS

Τα ραντάρ SMS είναι συνδεδεμένα σε μία ECU για κάθε πλευρά του οχήματος. Αυτές εκτελούν ιχνηλασία των στόχων που ανιχνεύονται από τους αισθητήρες και αποδίδουν τα ακόλουθα δεδομένα: κατάσταση του αισθητήρα (ορθή λειτουργία, μέγιστη απόσταση ανίχνευσης...), απόσταση του οχήματος (κατεύθυνση-x) (το πολύ 64 αντικείμενα), απόσταση (κατεύθυνση-y), σχετική ταχύτητα (κατεύθυνση-x), σχετική ταχύτητα (κατεύθυνση-y), μέγεθος αντικειμένου και τύπος κατάστασης αντικειμένου (γνωστό, άγνωστο, ανιχνευμένο).

Και χρησιμοποιεί τα ακόλουθα δεδομένα του οχήματος: γωνιακή ταχύτητα, ταχύτητα οχήματος, πλευρική επιτάχυνση, ταχύτητα τροχών, αριθμός παλμών σε μισή περιστροφή του τροχού, γωνία περιστροφής τιμονιού και θέση ταχύτητας. Αλλά μόνο η γωνιακή ταχύτητα και η ταχύτητα του οχήματος είναι εντελώς απαραίτητα, τα άλλα δεδομένα χρησιμοποιούνται προαιρετικά για βελτίωση της επίδοσης του αλγορίθμου ιχνηλασίας.

Long-Range-Radar: ο αισθητήρας που χρησιμοποείται είναι το ραντάρ Autocruise ACC radar από την TRW. Το ραντάρ αυτό ανιχνεύει τα κινούμενα οχήματα μπροστά από το φορτηγό και

στέλνει δεδομένα: απόστασης, ουθμού μεταβολής της απόστασης και γωνία, χοησιμοποιώντας την ταχύτητα του οχήματος και τη γωνιακή ταχύτητα.



Εικόνα 17: Το ραντάρ μακρινού πεδίου Autocruise

Κάμερα ανιχνευσης λωρίδας: το σύστημα αυτό διαχωρίζεται στην κεφαλή της κάμερας και στην μονάδα που λαμβάνει χώρα η επεξεργασία της εικόνας. Η κεφαλή της κάμερας είναι τοποθετημένη απευθείας πάνω στο παμπρίζ στο μέσο του οχήματος. Το σύστημα εικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 18: Η κάμερα ανίχνευσης λωρίδας

Στεφεοσκοπικό σύστημα καμεφών: χρησιμοποιούνται δύο μεγάλου εύρους κάμερες της Mekra-Lang τοποθετημένες λίγο κάτω από το παμπρίζ του φορτηγού που αποσκοπούν στην ανίχνευση αντικειμένων μπροστά από το φορτηγό. Τα κύρια χαρακτηριστικά των καμερών αυτών είναι: οριζόντιο ορατό εύρος 100-130 μοίρες, κατακόρυφο εύρος 75-98 μοίρες και ανάλυση εικόνας 542 x 582 pixels. Η μονάδα επεξεργασίας εικόνας χρησιμοποιεί δεδομένα βίντεο από τις δύο κάμερες κάνοντας στερεοσκοπική ανάλυση για τον εντοπισμό αντικειμένων.



Εικόνα 19: Η κάμερα Mekra-Lang

Η αναλυτική παρουσίαση των υπόλοιπων υποσυστημάτων όπως διαύλων επικοινωνίας και υπολογιστικών μονάδων παραλείπεται από αυτήν την περιγραφή.

Εναλλακτική τοπολογία

Το ίδιο όχημα που περιγράφηκε παραπάνω χρησιμοποιείται σε εναλλακτική αρχιτεκτονική με παρεμφερείς στόχους.

- Ένας σαρωτής λέιζερ που επιτηρεί την περιοχή μπροστά του οχήματος.
- Έναν αισθητήρα αναγνώρισης γεωμετρίας λωρίδων κυκλοφορίας

με κύριο στόχο την επεξεργασίας των δεδομένων του εν λόγω οχήματος στην χρήση πολλαπλών αλληλεπικαλυπτόμενων αισθητήρων που οδηγεί σε πολυδιάστατη ανάθεση. Η περιοχή κάλυψης των αισθητήρων γύρω από το ίδιο όχημα φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 20: Περιοχή κάλυψη του φορτηγού (αρχιτεκτονική ProFusion)

Όσον αφορά τους αισθητήρες αναλυτικά αυτοί φαίνονται στην εικόνα 20. Οι κοινοί αισθητήρες είναι οι ίδιοι με αυτούς της αρχιτεκτονικής INSAFES με την προσθήκη του σαρωτή λέιζερ.

Σαφωτής λέιζες: ονομάζεται Automotive Laser Scanner (ALASCA) [7], κατασκευάζεται από τις εταιζείες Hella και IBEO και επιτζέπει τη σάζωση με μεγάλη περιοχή κάλυψης (στην εφαρμογή μας 270 μοίζες) του περιβάλλοντος του οχήματος βασιζόμενο σε έναν πλήρως περιστζεφόμενο λοβό υπέρυθρης ακτινοβολίας. Το εύρος εντοπισμού οχημάτων φθάνει τα 80 μέτζα, με ανάλυση πολλαπλών στόχων στα 5 εκατοστόμετζα, με οριζόντια ανάλυση γωνίας 0.25 έως μία μοίζα και κάθετη 3.2 μοίζες, για την εφαρμογή του οχήματος Volvo-ProFusion χρησιμοποιώντας τα παρεχόμενα από τον αισθητήρα αντικείμενα σε μορφή πολυγωνικών τμημάτων.



Εικόνα 21: Ο σαρωτής λέιζερ ALASCA



Εικόνα 22: Εσωτερική αρχιτεκτονική επιπέδου αναγνώρισης (όχημα Volvo - ProFusion)

2.4 Σύστημα επιβατικού οχήματος

Η κύρια εφαρμογή που εξετάζεται για την περίπτωση της κυκλικής δυναμικής επιτήρησης είναι το εικονιζόμενο επιβατικό όχημα FIAT. Σε αυτό το όχημα είναι ενσωματωμένα υποσυστήματα από διάφορες εφαρμογές του PReVENT.



Εικόνα 23: Το όχημα Fiat-INSAFES

Αοχιτεκτονική

- Οι εφαρμογές που προβλέπεται να εξυπηρετηθούν από το εν λόγω όχημα περιλαμβάνουν:
 - Κυκλική προειδοποίηση κινδύνου σύγκρουσης (All-around Collision Warning): ο οδηγός προειδοποιείται για την παρουσία επικίνδυνου εμποδίου στην μπροστά περιοχή, στις πλαϊνές ή στην πίσω περιοχή του οχήματος του. Οι στρατηγικές προειδοποίησης είναι τέτοιες ώστε να ενημερώνεται εγκαίρως ο οδηγός ώστε να αποφευχθεί κάθε κίνδυνος σύγκρουσης με οπτικά ή ακουστικά ερεθίσματα.
 - Ολοκληρωμένη διαμήκης υποστήριξη (Integrated Longitudinal Support): ο οδηγός λαμβάνει οπτική υπόδειξη σύμφωνα με το προφίλ της ταχύτητας του ώστε να αποφύγει την είσοδο σε επικίνδυνες καταστάσεις λόγω υπερβολικής ταχύτητας.
 - Υπόδειξη ελιγμού (Manoeuvre Suggestion): ο οδηγός λαμβάνει μια οπτική υπόδειξη σχετικά με το αν πρέπει να διατηρήσει ή να αλλάξει λωρίδα, σύμφωνα με την θέση του αυτοκινήτου στο δρόμο και την παρουσία εμποδίων.

Το όχημα Fiat-INSAFES αποτελείται από δύο φαντάφ μακφινού πεδίου (LRR), 6 SRR (κοντινού πεδίου) and 2 (μέσου πεδίου) MRR αισθητήφες και 4 κάμεφες. Οι θέσεις και το οπτικό πεδίο των αισθητήφων έχουν σχεδιαστεί στο σχήμα 24. Με κόκκινο χφώμα και με ποφτοκαλί είναι η πεφιοχές κάλυψης των αισθητήφων LRR, με πφάσινο είναι οι πεφιοχές που ελέγχονται από τις κάμεφες, με μπλε χφώμα οι πεφιοχές των αισθητήφων SRR και μωβ οι πεφιοχές των αισθητήφων MRR.



Εικόνα 24: Οι περιοχές κάλυψης στο όχημα Fiat-INSAFES

Οι αισθητήρες της παραπάνω εικόνας διαχωρίζονται στις ακόλουθες συσσωματώσεις: LRR (ένα) εμπρόσθιας περιοχής, δίκτυο δύο LRR στην πίσω περιοχή, δίκτυο 2 αισθητήρων MRR στην εμπρόσθια περιοχή, δύο δίκτυα των τριών αισθητήρων SRR σε κάθε πλευρά, μία κάμερα σε κάθε καθρέπτη για τις αόρατες περιοχές (Blind Spot), και τέλος οι δύο εμπρόσθιας επιτήρησης κάμερες με σύστημα επεξεργασίας εικόνας. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 25: Η εσωτερική αρχιτεκτονική του οχήματος Fiat-INSAFES

Το επίπεδο της επεξεργασίας των δεδομένων του συστήματος Fiat-INSAFES αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Δίκτυο SRR επεξεργασίας και σύντηξης δεδομένων (2 πλευρικά)
- Σύστημα ιχνηλασίας LRR (πίσω)
- Επεξεργασία εικόνας για εντοπισμό αντικειμένων (στις αόρατες περιοχές)
- Σύστημα ιχνηλασίας LRR (εμπρός)
- Δύο συστήματα ιχνηλασίας MRR (εμπρός)
- Επεξεργασία εικόνας για εντοπισμό αντικειμένων (στην εμπρόσθια περιοχή)
- Υποσύστημα εκτίμησης κατάστασης του ιδίου οχήματος (συμπεριλαμβανομένου του εντοπιστή θέσης-localisation)
- Εκτιμητής γεωμετρίας δρόμου
- Σύστημα σύντηξης δεδομένων

Τα υποσυστήματα του επιπέδου απόφασης/εφαρμογών είναι: πρόβλεψη πορείας για το ίδιο όχημα, πρόβλεψης πορείας για άλλο όχημα, αποτίμηση κατάστασης (situation awareness),

εκτίμηση αβέβαιης πορείας (evasive trajectory), κυκλική προειδοποίηση σύγκρουσης, και ολοκληρωμένη διαμήκης υποστήριξη.

Τα κύρια τμήματα της τοπολογίας του οχήματος Fiat-INSAFES δίνονται στο διάγραμμα 26 το σύστημα αποτελείται από αρκετές υπολογιστικές μονάδες που συνδέονται μεταξύ τους με δύο διαύλους CAN:

- Μονάδα επεξεργασίας σήματος (πίσω): υπεύθυνη για την επεξεργασία σήματος των καμερών στις αόρατες περιοχές του οχήματος
- Μονάδα επεξεργασίας σήματος (εμπρος): υπεύθυνη για την επεξεργασία σήματος των καμερών στην εμπρόσθια περιοχή του οχήματος
- Μονάδα επεξεργασίας πλευρικών SRR: υπεύθυνη για την διαχείριση και την προεπεξεργασία των δεδομένων των 6 πλευρικών ραντάρ κοντινού πεδίου
- Μονάδα επεξεργασίας των εμπρόσθιων SRR: υπεύθυνη για την διαχείριση και την προεπεξεργασία των δεδομένων των 2 εμπρόσθιων ραντάρ κοντινού πεδίου
- PC σύντηξης δεδομένων και εφαρμογών: όπου η εκτέλεση και η εφαρμογή των αλγορίθμων της σύντηξης δεδομένων και των εφαρμογών λαμβάνει χώρα
- Υπολογιστική μονάδα ΗΜΙ
- Μονάδα ελέγχου του οχήματος: υπεύθυνη για την ηλεκτρική διαχείριση και διασύνδεση μεταξύ των διαύλων επικοινωνίας



Εικόνα 26: Η τοπολογία του συστήματος Fiat-INSAFES



Εικόνα 27: Η θέση των αισθητήρων στο όχημα Fiat-INSAFES

Εναλλακτική αρχιτεκτονική αισθητήρων στο ίδιο όχημα χρησιμοποιείται για το σύστημα LATERAL SAFE που επιτηρεί τις πλευρικές και την πίσω περιοχή του οχήματος.



Εικόνα 28: Οι περιοχές κάλυψης στο όχημα Fiat-LATERAL SAFE

Η αρχιτεπτονική του υποσυστήματος εξαγωγής αντιπειμένων στο σύστημα Fiat- LATERAL SAFE δίνεται στην ειπόνα 28. Το σύστημα LATERAL SAFE αποτελείται από αισθητήρες παι συστήματα ιχνηλασίας παι σύντηξης δεδομένων που εξυπηρετούν τις τρεις πύριες εφαρμογές του:

- Εφαρμογή επιτήρησης πίσω και πλευρικών περιοχών: μειώνει τον κίνδυνο σύγκρουσης λόγω περιορισμένης ορατότητας ή απροσεξίας του οδηγού στις περιοχές αυτές
- Εφαρμογή προειδοποίησης για πλάγια σύγκρουση που ανιχνεύει αντικείμενα στις πλευρικές περιοχές και προειδοποιεί τον οδηγό για επικείμενο κίνδυνο ατυχήματος.
 Η εφαρμογή αυτή μπορεί να λειτουργεί μόνη της (βασισμένη μόνο στους πλευρικούς αισθητήρες) ή να χρησιμοποιεί και γενικότερη πληροφορία από την ανακατασκευή του οδικού περιβάλλοντος
- Ένα σύστημα υποστήριξης αλλαγής λωρίδας με ενσωματωμένο σύστημα ενίσχυσης εικόνας των αόρατων περιοχών (blind spot) που αποσκοπεί στην υποβοήθηση του



οδηγού κατά την αλλαγή λωρίδας σε δρόμους με περισσότερες της μίας λωρίδας ανά κατεύθυνση.

Εικόνα 29: Η εσωτερική αρχιτεκτονική του οχήματος Fiat-LATERAL SAFE

Αισθητήρες

Το σύστημα του Fiat-INSAFES έχει τους ίδιους τύπους αισθητήρων SRR, τους SRR της M/A-COM / Tyco Electronics και το ραντάρ μέσου πεδίου της SMS (UMRR-0722A) που εκτελεί και ιχνηλασία σε ειδική ECU, με το σύστημα Volvo-INSAFES και οι οποίοι παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Εδώ περιγράφονται σύντομα το ραντάρ μακρινού πεδίου και η κάμερα του συστήματος.

Long range radar: χρησιμοποιείται ένα LRR που στοχεύει την πίσω περιοχή στο σύστημα Fiat-LATERAL SAFE και ένα σύστημα δύο αισθητήρων για την πίσω περιοχή και επιπροσθέτως ένας αισθητήρας για την μπροστά περιοχή στο σύστημα Fiat-INSAFES. Ο αισθητήρας είναι της Bosch ο αισθητήρας δεύτερης γενιάς (LRR2) [8] που χρησιμοποιείται συνήθως για εφαρμογές ACC. Έχει περιοχή κάλυψης γωνιακού εύρους +/- 8° και μέγιστης απόστασης στα 200 μέτρα. Οι ποσότητες των στόχων που μετρώνται σε κύκλους των 100ms είναι απόσταση, ταχύτητα και γωνία κατεύθυνσης. Το LRR2 είναι ένας αισθητήρας ραντάρ FMCW με συχνότητα φέροντος στα 77 GHz.



Εικόνα 30: Ο αισθητήρας LRR2

Κάμερα: Χρησιμοποείται η κάμερα INKA της εταιρείας Aglaia GmbH η οποία είναι αισθητήρας CMOS με High Dynamic Range (HDR, 12 Bit/Pixel++, 110 dB++) και δίνει οπτικά αποτελέσματα ασπρόμαυρης εικόνας χωρίς θολώσεις. Η ανάλυση της εικόνας είναι VGA (640x480 pixels) @ 30 fps. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο αισθητήρας και η τοποθέτηση του σε έναν καθρέπτη του οχήματος, ειδικά για την περίπτωση του συστήματος Fiat-LATERAL SAFE υπάρχει και η χρήση μία τρίτης κάμερας στην πίσω πλευρά του οχήματος.



Εικόνα 31: Η κάμερα ΙΝΚΑ με τη μονάδα ελέγχου της και η συνδεσμολογία της στον καθρέπτη

2.5 Άλλα συστήματα

Κάποια επιμέρους συστήματα οδικής ασφάλειας, οι συνδεσμολογίες των αισθητήρων τους και οι περιγραφή των τελευταίων, που αναφέρονται στα διάφορα συστήματα επεξεργασίας και σύντηξης δεδομένων που περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια. Τα συστήματα αυτά είναι το σύστημα EUCLIDE σύντηξης ραντάρ και αισθητήρα υπερύθρων (αναφορά στην ενότητα 3.6), ένα σύστημα επιτήρησης πίσω περιοχής με αισθητήρα λέιζερ και ραντάρ μακρινού πεδίου (αναφορά στην ενότητα 3.7) και το σύστημα SASPENCE με περιγραφή μόνο των αισθητήρων μηδενικού υπολογισμού θέσης (αναφορά στην ενότητα 3.2).

Σύστημα σύντηξης ραντάρ-κάμερας

Το σύστημα EUCLIDE [9] αποτελείται από τους εξής δύο αισθητήρες:

Ραντά υψηλής ευκρίνειας στα 77GHz, το οποίο εντοπίζει και δίνει τα κινηματικά χαρακτηριστικά ακίνητων και κινούμενων αντικειμένων και τις διαστάσεις αυτών.

Υπέρυθρη κάμερα (far infrared) (8-12μm) η οποία ενισχύει την όραση κυρίως τη νύχτα, αλλά και, μέσω επεξεργασίας εικόνας, εντοπίζει κινούμενα και ακίνητα αντικείμενα: Οι θερμικές κάμερες, αξιοποιούν τη θερμική ακτινοβολία των αντικειμένων στην περιοχή των 8-12μm, και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία ενός αντικειμένου, τόσο περισσότερη ποσότητα ακτινοβολίας εκπέμπεται. Οι διαφορετικές θερμοκρασίες των αντικειμένων και του περιβάλλοντος δημιουργούν μια αντίθεση στη θερμική εικόνα, το οποίο και επιτρέπει των εντοπισμό αντικειμένων.

Η κάμερα έχει ανάλυση 320*240 pixels με το μέγεθος του pixel να είναι 45 * 45 μm με το μήκος κύματος (8 ÷ 14) μm ενώ δίνει δεδομένα με συχνότητα 40Hz. Το ραντάρ λειτουργεί στα 77 GHz και σε αντίθεση με τα συνήθη ραντάρ οδικών εφαρμογών μπορεί να δώσει μέχρι και 200 μετρήσεις σε σχετικές ταχύτητες έως και ± 200 km/h με συχνότητα μετρήσεων 10 Hz. Η μέγιστη γωνία αζιμουθίου είναι ± 11° ενώ οι ακρίβεια των μετρήσεων είναι 1m για την απόσταση, 1km/h για την ακτινική ταχύτητα και 0.4deg για τη γωνία. Φυσικά όπως σε κάθε παρόμοιο σύστημα υπάρχει πληροφορία από τους αδρανειακούς αισθητήρες για ταχύτητα και γωνιακή ταχύτητα κίνησης του οχήματος.



Εικόνα 32: Φωτογραφίες της κάμερας και του ραντάρ

Σύστημα σύντηξης ραντάρ-σαρωτή λέιζερ

Το σύστημα είναι μία εναλλακτική εκδοχή του συστήματος LATERAL SAFE που χρησιμοποιεί για κάλυψη της πίσω περιοχής έναν αισθητήρα LRR2 και ένα σαρωτή λέιζερ ALASCA σαν αυτούς που περιγράφηκαν σε προηγούμενη παράγραφο.

Σύστημα μηδενικού υπολογισμού θέσης

Το σύστημα SASPENCE [10] χρησιμοποιεί εσωτερικά τις μετρήσεις των αδρανειακών αισθητήρων και το σύστημα UBLOX ANTARIS Evaluation Kit για το δέκτη GPS (TIM-LL) με DGPS/SBAS [11]. Ο δέκτης διαθέτει 16 κανάλια με μέγιστο ρυθμό ενημέρωσης 4 Hz, αν και στην κύρια εφαρμογή αυτός ήταν 1 Hz, η ακρίβεια εκτίμησης θέσης είναι 2.5m CEP ενώ στην σπάνια περίπτωση λειτουργίας σε περιοχή με διόρθωση θέσης από επίγειο σταθμό DGPS/SBAS φθάνει τα 2.0m CEP και ο χρόνος έναρξης του συστήματος είναι < 3.5 sec.



Εικόνα 33: To UBLOX ANTARIS Evaluation Kit

Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφηκαν τα βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του συστήματος σύντηξης δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων που πραγματοποιείται σε αυτήν την εργασία. Αρχικά περιγράφηκε η θέση των συστημάτων σύντηξης δεδομένων ή εξαγωγής αντικειμένων οδικού περιβάλλοντος σε ένα γενικευμένο σύστημα οδικής ασφάλειας καθώς και των διαφόρων υποσυστημάτων από τα οποία αποτελείται. Η αρχιτεκτονική που προτείνεται είναι ένα υψηλού επιπέδου σύστημα σύντηξης ιχνών που χρησιμοποιεί ίχνη από συστήματα ιχνηλασίας δεδομένων ενός ή και δικτύων αισθητήρων. Εκτός της απευθείας σύντηξης των ιχνών, χρησιμοποιείται ευρέως και η αρχιτεκτονική της ακολουθιακής και ανά ζεύγη σύνδεση ίχνους προς ίχνος αρχίζοντας από τον πιο αξιόπιστο αισθητήρα και αναλόγως της περιοχής κάλυψης τους λαμβάνει πληροφορία από τους υπόλοιπους.

Σε δεύτερη φάση περιγράφονται τα συστήματα-οχήματα στα οποίο σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν τα υποσυστήματα σύντηξης ιχνών που προτείνονται και με βάση τη γενικότερη αρχιτεκτονική. Τα συστήματα αυτά είναι τα ακόλουθα: σύστημα φορτηγού οχήματος με δύο διακριτές αρχιτεκτονικές που αναφέρονται στο εξής ως Volvo-INSAFES και Volvo-ProFusion, το σύστημα επιβατικού οχήματος με τις αρχιτεκτονικές Fiat-INSAFES και Fiat-LATERAL SAFE που είναι και τα κύρια οχήματα δοκιμών της επίδοσης του αλγορίθμου. Τέλος τα συστήματα οχήματος EUCLIDE, εναλλακτική αρχιτεκτονική LATERAL SAFE και το σύστημα μηδενικού υπολογισμού γεωδαιτικής θέσης είναι τα πεδία δοκιμών επιμέρους αλγορίθμων επεξεργασίας δεδομένων επιπέδου αισθητήρα. Επίσης περιγράφονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στα παραπάνω συστήματα.

Αναφορές

- A. Polychronopoulos, A. Amditis, U. Scheunert, T. Tatschke, Revisiting JDL model for automotive safety applications: the PF2 functional model, Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion (FUSION 2006), Florence, Italy, 10 - 14/07/2006, paper 259.
- [2] White, F.E., "A Model for Data Fusion", Proc. 1st National Symposium on Sensor Fusion, 1988
- [3] Steinberg, A.N., Bowman, C.L., and White, F.E., "Revisions to the JDL Data Fusion Model", in Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications, Proceedings of the SPIE, Vol. 3719, 1999
- [4] A. Amditis, A. Polychronopoulos, A. Sjögren, M. Maglietta, Integrated lateral and longitudinal support functions: INSAFES project, 10th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, Germany, 25 - 27 April 2006
- [5] Ralph Mende, A Multifunctional Automotive Short Range Radar System, GRS 2000, German Radar Symposium, Berlin 2000.
- [6] Πληροφορίες από: www.tycoelectronics.com
- [7] B. Roessler, K. Fuerstenberg, U. Lages, Laserscanner for Multiple Applications in Passenger Cars and Trucks, Proceedings of AMAA 2006, 10th International Conference on Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, April 2006
- [8] Long-Range-Radar-Sensor f
 ür Fahrerassistenz-Systeme, Dr. J
 örg Hilsebecher, Dr. G
 ötz K
 ühnle, Dr. Herbert Olbrich, http://www.elektroniknet.de
- [9] Polychronopoulos, U. Scheunert, F. Tango, "Centralized data fusion for obstacle and road borders tracking in a collision warning system", *Proc. of the ISIF 7th International Conference on Information Fusion*, Stockholm, Sweden, 28/06-01/07 2004, pp. 760-767.
- [10] H. Cramer, A. Saroldi, Introduction to SASPENCE subproject, 12th ITS World Congress San Francisco, USA, 7 November 2005
- [11] Πληροφορίες από: www.U-BLOX.com

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Ιχνηλασία δεδομένων επιπέδου αισθητήρα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα επιμέρους συστήματα ιχνηλασίας και επεξεργασίας των δεδομένων που δίνουν οι αισθητήρες στις εφαρμογές που εξετάζονται. Αρχικά προηγείται μια γενική περιγραφή του κύριου αλγορίθμου που γενικά είναι παρεμφερής για όλες τις περιπτώσεις. Αυτή περιλαμβάνει θεωρητική παρουσίαση κυρίως των αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης και της διασύνδεσης των υποσυστημάτων. Επίσης δίνονται και ειδικές μέθοδοι (για παράδειγμα αρχικοποίησης ιχνών) για τους διάφορους αισθητήρες. Τέλος περιγράφονται μαζί με ενδιάμεσα αποτελέσματα εκτίμησης για τα επιμέρους συστήματα που αφορούν ραντάρ μακρινής και κοντινής ακτίνας, σαρωτή λέιζερ και συστημάτων όρασης. Για τις δύο τελευταίες περιπτώσεις αναφέρονται τεχνικές ιχνηλασίας μεμονωμένα ή σε κεντρικού επιπέδου σύντηξη με δεδομένα ραντάρ. Τέλος, συμπεριλαμβάνεται επίσης το απλό σύστημα ιχνηλασίας-φιλτραρίσματος για εκτίμηση γεωδαιτικής θέσης με μηδενικό υπολογισμό.

3.1 Σύστημα ιχνηλασίας αισθητήρα

Η γενική αρχιτεκτονική ενός συστήματος ιχνηλασίας παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2. Σε γενικές γραμμές η αρχιτεκτονική αυτή εφαρμόζεται στο σύνολο από τους διαθέσιμους αισθητήρες με αρκετές διαφορές να υπεισέρχονται στον τρόπο προσέγγισης καθενός από αυτούς εξαιτίας της διαφορετικής φύσης των δεδομένων τους. Οι διαφορετικές τεχνικές (αρχικοποίηση, μοντελοποίηση κίνησης και στόχου, έλεγχος μέσω θύρας, και ομαδοποίηση παρατηρήσεων) που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε έναν από αυτούς παρουσιάζονται στις επιμέρους ενότητες του παρόντος κεφαλαίου, ενώ οι μέθοδοι σύνδεσης δεδομένων θα περιγραφούν στο επόμενο κεφάλαιο. Η ενότητα αυτή διαχωρίζεται στις υποενότητες της σύντομης περιγραφής του υποβάθρου της εκτίμησης κατάστασης και των μέτρων ελέγχου της επίδοσης των φίλτρων.

Εκτίμηση κατάστασης

Το πρόβλημα του μη γραμμικού φιλτραρίσματος βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος εδώ και 30 χρόνια, και το οποίο περιγράφεται ως η εκτίμηση ακολουθιακά της κατάστασης ενός δυναμικού συστήματος χρησιμοποιώντας μια σειρά θορυβωδών μετρήσεων που παράγονται από κάποιο σύστημα. Για τη λύση του προβλήματος υιοθετείται η προσέγγιση στο χώρο καταστάσεων για τη μοντελοποίηση δυναμικών συστημάτων, κυρίως για προβλήματα διακριτού χρόνου, αναζητώντας μια εκτίμηση για το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος. Αυτό το διάνυσμα περιέχει όλες τις σχετικές πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την περιγραφή του εξεταζόμενου συστήματος. Για παράδειγμα, στα προβλήματα ιχνηλασίας, που είναι και βασικό αντικείμενο αυτής της εργασίας, αυτές οι πληροφορίες σχετίζονται με τα κινηματικά χαρακτηριστικά του οχήματος - στόχου. Το διάνυσμα μέτρησης είναι εν γένει (αλλά όχι αναγκαία) μικρότερης διάστασης από το διάνυσμα κατάστασης.

Προκειμένου να αναλυθεί ένα δυναμικό σύστημα και να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με αυτό, απαιτούνται τουλάχιστον δυο μοντέλα: πρώτον, ένα μοντέλο (ή περισσότερα) που περιγράφει την εξέλιξη της κατάστασης στον χρόνο (μοντέλο συστήματος ή δυναμικό μοντέλο) και δεύτερον, ένα μοντέλο που σχετίζεται με τις «θορυβώδεις» μετρήσεις της κατάστασης (μοντέλο μέτρησης). Αν τα μοντέλα αυτά είναι διαθέσιμα σε πιθανοτική μορφή καθώς και η ανάγκη για ενημέρωση των πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του στόχου με την λήψη των νέων μετρήσεων ταιριάζουν ιδανικά με την μπαεσιανή προσέγγιση η οποία παρέχει ένα ακριβές και γενικό πλαίσιο για προβλήματα εκτίμησης δυναμικής κατάστασης. Στην μπαεσιανή προσέγγιση, κατασκευάζεται η «εκ των υστέρων» συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σππ) της κατάστασης, με βάση όλες της διαθέσιμες πληροφορίες, περιλαμβανομένου και του συνόλου των λαμβανόμενων μετρήσεων.

Εάν είτε το μοντέλο συστήματος είτε το μοντέλο μέτρησης είναι μη γραμμικό τότε η σππ είναι μη γραμμική. Εφόσον αυτή η σππ περιλαμβάνει όλες τις διαθέσιμες στατιστικές πληροφορίες, μπορεί να θεωρηθεί ως η πλήρης λύση στο πρόβλημα εκτίμησης. Κατά κανόνα, μια βέλτιστη (ικανοποιώντας οποιοδήποτε κριτήριο) εκτίμηση κατάστασης μπορεί να επιτευχθεί από την «εκ των υστέρων» σππ. Ένα μέτρο της ορθότητας της ακρίβειας της μπορεί επίσης να εξαχθεί. Σε πολλά προβλήματα μια εκτίμηση απαιτείται κάθε φορά που «λαμβάνεται» μια νέα μέτρηση. Σε αυτή την περίπτωση ένα επαναληπτικο (recursive) φίλτρο είναι μια κατάλληλη λύση. Ένα τέτοιο φίλτρο αποτελείται ουσιαστικά από δυο στάδια: πρόβλεψη και ενημέρωση. Το στάδιο πρόβλεψης χρησιμοποιεί το μοντέλο συστήματος για να προβλέψει την σππ της κατάστασης από τον χρόνο της κάθε μέτρησης στην επόμενη. Εφόσον η κατάσταση είναι συνήθως αντικείμενο αγνώστου θορύβου (που μοντελοποιείται ως τυχαίος θόρυβος), η πρόβλεψη εν γένει μεταφράζει, αποδιαμορφώνει και διευρύνει την σππ. Η διαδικασία ενημέρωσης χρησιμοποιεί την τελευταία μέτρηση για να αλλάξει (συνήθως να περιορίσει) την προβλεπόμενη από το πιο πάνω στάδιο σππ. Αυτό είναι εφικτό με το θεώρημα του Bayes, που είναι ο μηχανισμός για την ενημέρωση της υπάρχουσας γνώσης σχετικά με την κατάσταση του στόχου υπό το φως των επιπλέον πληροφοριών από τα νέα δεδομένα.

Θεωρητικό υπόβαθρο

Για να οριστεί το πρόβλημα του μη γραμμικού φιλτραρίσματος, έστω το διάνυσμα κατάστασης του στόχου $x_k \in \mathbb{R}^{n_k}$, όπου n_k είναι η διάσταση του διανύσματος κατάστασης, \mathbb{R} είναι το σύνολο των πραγματικών αριθμών, $k \in \mathbb{N}$ είναι ο δείκτης του χρόνου και \mathbb{N} είναι το σύνολο των φυσικών αριθμών. Εδώ το k αποδίδεται στην συνεχούς χρόνου μεταβλητή t_k , και το «διάστημα δειγματοληψίας» T_{k-1} μπορεί να εξαρτάται από τον χρόνο. Το διάνυσμα κατάστασης προκύπτει σύμφωνα με το στοχαστικό μοντέλο διακριτού χρόνου που ακολουθεί:

$$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{f}_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{v}_{k-1}), \tag{3.1}$$

όπου \mathbf{f}_{k-1} είναι μια γνωστή, πιθανώς μη γραμμική συνάρτηση του \mathbf{x}_k και το \mathbf{v}_k είναι ο θόρυβος της διαδικασίας. Ο θόρυβος αυτός ικανοποιεί κάθε απρόβλεπτη ανωμαλία στο μοντέλο κίνησης του στόχου. Ο αντικειμενικός στόχος του μη γραμμικού φιλτραρίσματος είναι η εκτίμηση του \mathbf{x}_k από τις μετρήσεις $\mathbf{z}_k \in \mathbb{R}^{n_k}$. Οι μετρήσεις σχετίζονται με το διάνυσμα στόχου μέσω της εξίσωσης μέτρησης:

$$\mathbf{z}_k = h_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k), \tag{3.2}$$

όπου h_k είναι μια γνωστή, πιθανώς μη γραμμική συνάρτηση και \mathbf{w}_k είναι ο θόρυβος μέτρησης. Οι ακολουθίες θορύβου \mathbf{v}_{k-1} , \mathbf{w}_k θα υποθέσουμε ότι είναι λευκές με γνωστές τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας και αμοιβαίως ανεξάρτητες. Η αρχική κατάσταση του θορύβου θεωρείται ότι έχει επίσης γνωστή σππ και είναι ανεξάρτητη από τον θόρυβο.

Ексічо пов ачаўцтвітан вічан філтрадіоціёчеς витиціровіς тов \mathbf{x}_k βаліоціёчеς отпу аколовіа олюн тыч блавёліцых цетріровых $Z_k = \{\mathbf{z}_i, i = 1, ..., k\}$ ёшс та хдооний отнуція k. Ало тар цпавліачія оптикія, то проівлация вічан о ачаброцико́с полотико́с прообнодіоція ха́понов βавцьої випноторічата тов \mathbf{x}_k оточ хдо́чо \mathbf{k} , пайрчочтас бла́фодес тиціє, це бебоцієча та Z_k ёшс та хдочний отнуція k. Συνεπώς, апантвітан и натальной тар «єн тыч вотіедыч» оппп $p(\mathbf{x}_k | Z_k)$. Н архінія оппп тов блачібщатос витіцараціенна у $p(\mathbf{x}_o) = p(\mathbf{x}_o | \mathbf{z}_o)$, о́пов о́цшес то \mathbf{z}_o беч афода цетріровіс. Етон, ната начо́ча, а $p(\mathbf{x}_k | Z_k)$ цподеі на вξахаві ачаброцина це ва́ота та бво ота́бла пов ачафіедваначы: про́влефа нан вчаціерова. Υποθέτουμε ότι η απαιτούμενη σππ $p(\mathbf{x}_{k-1} | Z_{k-1})$ είναι διαθέσιμη. Το στάδιο της πρόβλεψης περιλαμβάνει τον υπολογισμό της «εκ των προτέρων» σππ την χρονική στιγμή k χρησιμοποιώντας την (3.1), μέσω της εξίσωσης Chapman-Kolmogorov [1]:

$$p(\mathbf{x}_{k} | Z_{k-1}) = \int p(\mathbf{x}_{k} | \mathbf{x}_{k-1}) p(\mathbf{x}_{k-1} | Z_{k-1}) d\mathbf{x}_{k-1}.$$
(3.3)

Να σημειωθεί ότι στην (3.3) έγινε χρήση του γεγονότος ότι $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}, Z_{k-1}) = p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1})$ καθώς η (3.1) περιγράφει μια διαδικασία Markov πρώτης τάξης. Το πιθανοτικό μοντέλο της εξέλιξης κατάστασης (που συχνά αναφέρεται ως πυκνότητα διάδοσης), $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1})$, ορίζεται από την εξίσωση (3.1) και τις γνωστές στατιστικές ποσότητες του \mathbf{v}_{k-1} .

Την χρονική στιγμή k όπου η μέτρηση \mathbf{z}_k γίνεται διαθέσιμη, λαμβάνει χώρα το στάδιο της ενημέρωσης. Αυτό περιλαμβάνει την «εκ των προτέρων» σππ, που υπολογίστηκε κατά την πρόβλεψη, μέσω του κανόνα του Bayes:

$$p(\mathbf{x}_{k} | Z_{k}) = p(\mathbf{x}_{k} | \mathbf{z}_{k}, Z_{k-1}) = \frac{p(\mathbf{z}_{k} | \mathbf{x}_{k}, Z_{k-1}) \cdot p(\mathbf{x}_{k} | Z_{k-1})}{p(\mathbf{z}_{k} | Z_{k-1})}$$
$$= \frac{p(\mathbf{z}_{k} | \mathbf{x}_{k}) \cdot p(\mathbf{x}_{k} | Z_{k-1})}{p(\mathbf{z}_{k} | Z_{k-1})}$$
(3.4)

όπου η σταθερά κανονικοποίησης

$$p(\mathbf{z}_{k} | Z_{k-1}) = \int p(\mathbf{z}_{k} | \mathbf{x}_{k}) \cdot p(\mathbf{x}_{k} | Z_{k-1}) \cdot d\mathbf{x}_{k}$$
(3.5)

εξαρτάται από την συνάρτηση $p(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_k)$ όπως ορίζεται από το μοντέλο μέτρησης (3.2) και τις γνωστές στατιστικές ποσότητες του \mathbf{w}_k . Στο στάδιο ενημέρωσης (3.4), η μέτρηση \mathbf{z}_k χρησιμοποιείται για να μεταβάλλει την «εκ των προτέρων» πυκνότητα ώστε να υπολογίσει την «εκ των υστέρων» σππ της τρέχουσας κατάστασης.

Βέλτιστες λύσεις – Το φίλτρο Kalman

Βέλτιστοι αλγόριθμοι πεπερασμένης διάστασης για επαναληπτική μπαεσιανή εκτίμηση κατάστασης μπορούν να διαμορφωθούν στην περίπτωση γραμμικού, γκαουσσιανού συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση, η συναρτησιακή αναδρομή των (3.3) και (3.4) δίνει το γραμμικό φίλτρο Kalman [2][7]. Το φίλτρο Kalman θεωρεί ότι η «εκ των υστέρων» συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας σε κάθε χρονικό βήμα είναι γκαουσσιανή και άρα επακριβώς και πλήρως χαρακτηριζόμενη από δύο παραμέτρους, τον μέσο όρο και την διακύμανση της.

Εάν η $p(\mathbf{x}_{k-1} | Z_{k-1})$ είναι γκαουσσιανή, μπορεί να αποδειχτεί ότι η $p(\mathbf{x}_{k} | Z_{k})$ είναι επίσης γκαουσσιανή, με την προϋπόθεση ότι ισχύουν τα ακόλουθα:

Τα V_k και W_k προκύπτουν από γκαουσσιανές πυκνότητες με γνωστές παραμέτρους.

- Η $\mathbf{f}_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1},\mathbf{v}_{k-1})$ είναι μια γνωστή γραμμική συνάρτηση των \mathbf{x}_{k-1} και \mathbf{v}_{k-1}

- Η $h_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k)$ είναι μια γνωστή γραμμική συνάρτηση των \mathbf{x}_k και \mathbf{w}_k

Με βάση αυτά η (3.1) και (3.2) μπορούν να ξαναγραφούν ως:

$$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{F}_{k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{v}_{k-1} \tag{3.5}$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \tag{3.6}$$

όπου οι \mathbf{F}_{k-1} (διάστασης $n_x \le n_x$) και \mathbf{H}_k (διάστασης $v_z \le v_z$) είναι γνωστοί πίνακες (μήτζες) που ορίζουν τις γραμμικές συναρτήσεις. Οι τυχαίες ακολουθίες θορύβου \mathbf{v}_{k-1} και \mathbf{w}_k είναι αμοιβαίως ανεξάρτητες, μηδενικού μέσου όρου, λευκές και γκαουσσιανές με μήτζες συνδιακύμανσης \mathbf{Q}_{k-1} και \mathbf{R}_k αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι τόσο η μήτρα συστήματος (μετάβασης) και η μήτρα μέτρησης \mathbf{F}_{k-1} , \mathbf{H}_k όσο και οι μήτζες συνδιακύμανσης \mathbf{Q}_{k-1} , \mathbf{R}_k μπορούν να μεταβάλλονται στο χρόνο.

Ο αλγόριθμος του φίλτρου Kalman, που παράγεται χρησιμοποιώντας τις (3.3) και (3.4), μπορεί να πάρει την παρακάτω μορφή :

$p(\mathbf{x}_{k-1} Z_{k-1}) = N(\mathbf{x}_{k-1}; \hat{\mathbf{x}}_{k-1 k-1}, \mathbf{P}_{k-1 k-1})$	(3.7)
$p(\mathbf{x}_k \mid Z_{k-1}) = \mathbf{N}(\mathbf{x}_k; \hat{\mathbf{x}}_{k k-1}, \mathbf{P}_{k k-1})$	(3.8)
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

$$p(\mathbf{x}_k \mid Z_k) = N(\mathbf{x}_k; \mathbf{x}_{k|k}, \mathbf{P}_{k|k})$$
(3.9)

όπου N(**x;m,P**) είναι μια γκαουσσιανή πυκνότητα με παράμετρο **x**, μέση τιμή m και διασπορά **P**, δηλαδή:

$$N(\mathbf{x};m,\mathbf{P}) = |2\pi\mathbf{P}|^{-1/2} \exp\{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-m)^{T}\mathbf{P}^{-1}(\mathbf{x}-m)\}.$$
 (3.10)

Οι μέσοι και οι συνδιακυμάνσεις του φίλτρου Kalman υπολογίζονται ως εξής:

$$\mathbf{X}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k-1} \mathbf{X}_{k-1|k-1}$$
(3.11)
$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{Q}_{k-1} + \mathbf{F}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k-1}^{T}$$
(3.12)

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_{k} (\mathbf{z}_{k} - \mathbf{H}_{k} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})$$
(3.13)

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{S}_k \mathbf{K}_k^{T}$$
(3.14)

όπου

είναι ο πίνακας συνδιακύμανσης του διανύσματος υπολοίπου $\mathbf{v}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$, και

$$\mathbf{K}_{k} = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_{k}^{T} \mathbf{S}_{k}^{-1}$$
(3.16)

είναι το κέρδος του φίλτρου.

Με βάση τις (3.15) και (3.16) η (3.14) μπορεί να γραφεί:

 $\mathbf{S}_{k} = \mathbf{H}_{k} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^{T}_{k} + \mathbf{R}_{k}$

$$_{k|k} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k}\mathbf{H}_{k}]\mathbf{P}_{k|k-1}$$

όπου το \mathbf{I} είναι ο μοναδιαίος πίνακας διάστασης $n_x \ge n_x$.

Το φίλτρο Kalman υπολογίζει αναδρομικά τον μέσο όρο και τη διακύμανση της $p(\mathbf{x}_{_k} \mid Z_k)$. Αυτή είναι η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα ιχνηλασίας – εκτίμησης εφόσον οι (πολύ περιοριστικές) υποθέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω ισχύουν. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει αλγόριθμος που μπορεί να λειτουργήσει καλύτερα από το φίλτρο Kalman σε ένα γραμμικό, γκαουσσιανό περιβάλλον.

Μη γοαμμικό ποόβλημα

Η πραγματικότητα σε σχέση με τις υποθέσεις του φίλτρο Kalman πολύ συχνά αποδεικνύεται σαφώς πιο πολύπλοκη: μη γραμμικές, μη γκαουσσιανές, μη σταθερές καταστάσεις στόχων. Γι' αυτό, στις περισσότερες περιπτώσεις, η βέλτιστη λύση που παρουσιάστηκε πιο πάνω δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Έτσι είμαστε αναγκασμένοι να προσφύγουμε σε προσεγγίσεις ή υποβέλτιστες λύσεις. Τέτοιου είδους λύσεις είναι το Extended Kalman Filter (EKF) και τα Particle Filters (PF).

Extended Kalman filter (EKF)

Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του φίλτρου είναι ότι προσεγγίζει αναλυτικά (γραμμικοποιεί) τις μη γραμμικές συναρτήσεις στα μοντέλα συστήματος και μέτρησης. Το ΕΚF [2] παράγεται για τα μη γραμμικά συστήματα με πρόσθετο θόρυβο · αυτό σημαίνει ότι για την ειδική περίπτωση των (3.1-3.2) παίρνουμε :

$$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{f}_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{v}_{k-1}$$
(3.18)
$$\mathbf{z}_{k} = \mathbf{h}_{k}(\mathbf{x}_{k}) + \mathbf{w}_{k}$$
(3.19)

Οι τυχαίες ακολουθίες θορύβου \mathbf{v}_{k-1} και \mathbf{w}_k είναι αμοιβαίως ανεξάρτητες, μηδενικού μέσου όρου, λευκές και γκαουσσιανές με μήτρες συνδιακύμανσης \mathbf{Q}_{k-1} και \mathbf{R}_k αντίστοιχα. Οι μη γραμμικές συναρτήσεις των παραπάνω εξισώσεων προσεγγίζονται από τους πρώτους όρους του κατά Taylor αναπτύγματος τους. Το ΕΚF βασίζεται στην υπόθεση ότι η τοπική γραμμικοποίηση των

(3.15)

(3.17)

παραπάνω εξισώσεων μπορεί να είναι μια επαρκής περιγραφή της μη γραμμικότητας. Η «εκ των υστέρων» σππ $p(\mathbf{x}_k \,|\, Z_k)$ προσεγγίζεται από μια γκαουσσιανή σππ και οι σχέσεις (3.7)-(3.9) θεωρούμε ότι ισχύουν. Ο μέσος όρος και η συνδιακύμανση αυτής της γκαουσσιανής πυκνότητας υπολογίζονται αναδρομικά με τη βοήθεια των σχέσεων που ακολουθούν:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{f}_{k-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1})$$
(3.20)
$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{Q}_{k-1} + \hat{\mathbf{F}}_{k-1}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\hat{\mathbf{F}}_{k-1}^{T}$$
(3.21)

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_{k} (\mathbf{z}_{k} - \mathbf{H}_{k} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_{k} \mathbf{S}_{k} \mathbf{K}^{T}_{k}$$
(3.22)
(3.23)

όπου:

$$\mathbf{S}_{k} = \hat{\mathbf{H}}_{k} \mathbf{P}_{k|k-1} \hat{\mathbf{H}}_{k}^{T} + \mathbf{R}_{k}$$
(3.24)

$$\mathbf{K}_{k} = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_{k}^{T} \mathbf{S}_{k}^{-1}$$
(3.25)

και οι $\hat{\mathbf{F}}_{k-1}$, $\hat{\mathbf{H}}_k$ είναι το αποτέλεσμα της τοπικής γραμμικοποίησης των \mathbf{f}_{k-1} , h_k αντίστοιχα, δηλαδή προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$\hat{\mathbf{F}}_{k-1} = \left[\forall_{\mathbf{x}_{k-1}} f^{T}_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1}) \right]^{T} |_{\mathbf{x}_{k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}}$$

$$\hat{\mathbf{H}}_{k} = \left[\forall_{\mathbf{x}_{k}} h^{T}_{k}(\mathbf{x}_{k}) \right]^{T} |_{\mathbf{x}_{k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}}$$

$$(3.26)$$

$$(3.27)$$

όπου:

$$\forall_{\mathbf{x}_{k}} = \left[\frac{d}{d\mathbf{x}_{k}[1]} \dots \frac{d}{d\mathbf{x}_{k}[n_{x}]}\right]^{T}$$
(3.28)

με το $\mathbf{x}_k[i], i = 1, ..., n_x$ να είναι το ι-οστό στοιχείο του διανύσματος \mathbf{x}_k . Σύμφωνα με τα παραπάνω, λοιπόν, ένα στοιχείο του \mathbf{H}_k θα δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{\mathbf{H}}_{k}[i,j] = \frac{\partial h_{k}[i]}{\partial \mathbf{x}_{k}[j]} |_{\mathbf{x}_{k} = \mathbf{x}_{k|k-1}}$$
(3.29)

όπου το $h_k[i]$ δηλώνει το ι-οστό στοιχείο του διανύσματος $h_k(\mathbf{x}_k)$. Πρέπει να τονιστεί, ότι σύμφωνα με τις (3.26) και (3.27), οι Ιακωβιανές $\hat{\mathbf{F}}_{k-1}$, $\hat{\mathbf{H}}_k$ υπολογίζονται με βάση (και άρα εξαρτώνται από) τις εκτιμήσεις του διανύσματος κατάστασης. Το ΕΚΕ αναφέρεται ως «αναλυτική προσέγγιση» επειδή οι Ιακωβιανές $\hat{\mathbf{F}}_{k-1}$, $\hat{\mathbf{H}}_k$ πρέπει να εξαχθούν αναλυτικά. Αυτό σημαίνει, όμως, πως εάν οι συναρτήσεις \mathbf{f}_k , h_k παρουσιάζουν ασυνέχειες, αυτό το φίλτρο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Τέλος, να σημειωθεί ότι το ΕΚΕ πάντα θεωρεί ότι η $p(\mathbf{x}_k | Z_k)$ είναι γκαουσσιανή. Εάν η μη γραμμικότητα στα μοντέλα (3.18)-(3.19) είναι ισχυρή τότε η απόδοση του φίλτρου δεν θα είναι καθόλου ικανοποιητική.

IMM (interactive multiple model)

Σε πολλές εφαρμογές ιχνηλασίας στόχου με μη γραμμικά δυναμικά χαρακτηριστικά είναι καλύτερο να χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα φίλτρα σε συνδυασμό, έτσι ώστε να παρακολουθείται το όχημα τόσο στις ευθείες κινήσεις όσο και στις απότομες μανούβρες. Ένα φίλτρο τέτοιου είδους είναι το IMM, το οποίο χρησιμοποιεί ένα πλήθος s φίλτρων και αξιοποιεί το εξής χαρακτηριστικό του δυναμικών φίλτρων: η είσοδος στο φίλτρο j αποτελεί μια αλληλεπίδραση (μίξη) των s φίλτρων. Εξ' αυτού, πριν το βήμα του φιλτραρίσματος, το IMM εκτελεί την μίξη των μοντέλων [2][7]: η «εκ των υστέρων» σππ την χρονική στιγμή k-1 το μοντέλο j αντιπροσωπεύεται από $N(\mathbf{x}_{k-1}^{j}; \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}^{(j)}, \mathbf{p}_{k-1|k-1}^{(j)})$, όπου:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}^{(j)} = \sum_{i=1}^{s} \mu_{k-1}^{i|j} \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}^{(j)}$$
(3.30)
$$\mathbf{P}_{k-1|k-1}^{(j)} = \sum_{i=1}^{s} \mu_{k-1}^{i|j} [\mathbf{P}_{k-1|k-1}^{i} + (\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}^{i} - \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}^{(j)}) (\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}^{i} - \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}^{(j)})^{T}]$$
(3.31)

Τα βάρη είναι οι πιθανότητες $\mu_k^{i|j}$ που ορίζονται από την:

$$\mu_{k}^{i|j} = P\{r_{k-1} = i \mid r_{k} = j, \mathbf{Z}_{k-1}\}$$
(3.32)

Χρησιμοποιώντας την μπαεσιανή προσέγγιση:

$$\mu_{k}^{i|j} = \frac{\pi_{ij} w_{k-1}^{i}}{\sum_{i=1}^{s} \pi_{ij} w_{k-1}^{i}}$$
(3.33)

όπου το π_{ij} είναι οι μεταβατικές πιθανότητες. Μετά το φιλτράρισμα, η «εκ των υστέρων» σππ του μοντέλου k την χρονική στιγμή k αντιπροσωπεύεται από την $N(\mathbf{x}_k^j; \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{(j)}, \mathbf{P}_{k|k}^{(j)})$. Χρησιμοποιώντας τον κανόνα του Bayes, οι πιθανότητες αυτές ενημερώνονται ως εξής :

$$w_{k-1}^{j} = \frac{\Lambda_{k}^{j} \sum_{i=1}^{s} \pi_{ij} w_{k-1}^{i}}{\sum_{j=1}^{s} \Lambda_{k}^{j} \sum_{i=1}^{s} \pi_{ij} w_{k-1}^{i}}$$
(3.34)

όπου $\Lambda_k^j = p(z_k \mid Z_{k-1}, r_k = j)$.Η έξοδος του IMM υπολογίζεται ξανά μέσω των σχέσεων:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \sum_{i=1}^{3} w_{k}^{i} \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{j}$$
(3.35)

$$\mathbf{P}_{k|k} = \sum_{i=1}^{s} w_{k}^{i} [\mathbf{P}_{k|k}^{i} + (\hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{i} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}) (\hat{\mathbf{x}}_{k|k}^{i} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k})^{T}]$$
(3.36)

Μια σχηματική αναπαράσταση των βημάτων ενός ΙΜΜ δυο μοντέλων φαίνεται στο Σχήμα 34. Τα Μ1 και Μ2 παριστάνουν τα φίλτρα 1 και 2 αντίστοιχα.



Εικόνα 34: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας ΙΜΜ (από [17])

Ένα φίλτρο IMM μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την από κοινού πιθανοτική μέθοδο σύνδεσης δεδομένων JPDA (θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο) στο φίλτρο IMMJPDAF [7] που παρουσιάζεται στη συνέχεια. Οι εξισώσεις της πιθανοτικής σύνδεσης

δεδομένων λαμβάνει χώρα με τη χρήση των ακόλουθων εξισώσεων ενημέρωσης του διανύσματος υπολοίπου:

$$\mathbf{inn}_{i,k} = \sum_{j=1}^{N} p_{ij} \cdot \mathbf{inn}_{ij,k}$$
(3.37)

όπου ο δείκτης *i* είναι ο αριθμός του ίχνους και *j* ο αντίστοιχος αριθμός της μέτρησης, οι πιθανότητες p_{ij} είναι η κανονικοποιημένη έξοδος του αλγορίθμου των Ν-καλύτερων λύσεων (ενότητα 4.1). Για την περίπτωση της PDA οι τυπικές εξισώσεις του φίλτρου Kalman (3.11-15) γίνονται:

$$\hat{\mathbf{x}}_{i,k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-1} + \mathbf{K}_k \cdot \mathbf{inn}_{i,k}$$
(3.38)

με \mathbf{K}_k το γνωστό κέ
έρδος του φίλτρου Kalman. Η μήτρα συνδιακύμανσης αλλάζει τώρα σύμφωνα με:

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k}^0 + \mathbf{d}\mathbf{P}_k \tag{3.39}$$

όπου $\mathbf{P}_{k|k}^{0}$ είναι η μήτρα συνδιακύμανσης κατά Kalman, εάν μόνο μια επιστροφή υπάρχει και χρησιμοποιείται σαν συνδεδεμένη μέτρηση και \mathbf{dP}_{k} είναι ένας όρος αύξησης που αντιπροσωπεύει τις αβέβαιες συνδέσεις. Είναι:

$$\mathbf{P}_{k|k}^{0} = p_{i0}\mathbf{P}_{k|k-1} + (1 - p_{i0})\mathbf{P}_{k|k}^{*}$$

$$\mathbf{d}\mathbf{P}_{k} = \mathbf{K}_{k} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij} \cdot \mathbf{inn}_{ij,k} \cdot \mathbf{inn}_{ij,k}^{T} - \mathbf{inn}_{i,k} \cdot \mathbf{inn}_{i,k}^{T}\right] \cdot \mathbf{K}_{k}^{T}$$
(3.40)
(3.41)

με $P_{k|k}^*$ σύμφωνα με τη συνήθη εξίσωση του φίλτοου Kalman $\mathbf{P}_{k|k}^* = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \cdot \mathbf{H}_{k-1}] \cdot \mathbf{P}_{k|k-1}$.

Unscented Kalman Filter (UKF)

Η κατανομή της κατάστασης του UKF αντιπροσωπεύεται από μια γκαουσσιανή τυχαία μεταβλητή και συγκεκριμένα από ελάχιστου αριθμού και προσεκτικά επιλεγμένα σημεία δειγματοληψίας [29]. Ο πραγματικός μέσος και η συνδιακύμανση της γκαουσσιανής τυχαίας μεταβλητής καλύπτονται εντελώς από αυτά τα σημεία. Με τη χρήση του μετασχηματισμού unscented και την επαναληπτική διαδικασία οδηγεί στην ακριβή εκτίμηση του εκ των υστέρων μέσου και της συνδιακύμανσης με προσέγγιση έως τρίτου βαθμού και ανεξάρτητα από το είδος της μη γραμμικότητας. Η αναλυτική περιγραφή των εξισωσεων του φίλτρου παραλείπεται.

Particle Filters

Τα φίλτρα Particle (PF) είναι επίσης υποβέλτιστες λύσεις στο πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης. Πραγματοποιούν διαδοχικά Monte Carlo (SMC) εκτιμήσεις βασισμένες σε συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας που δημιουργούνται με βάση μια μάζα σημείων (που ονομάζονται «μόρια» ή particles). Αν και η ιδέα της εφαρμογής του SMC σε προβλήματα ξεκινά από την δεκαετία του '50, η απουσία γρήγορων υπολογιστών απέτρεπε την εφαρμογή τους σε πολλές εφαρμογές. Σήμερα η εξέλιξη του υλικού έχει οδηγήσει στην βελτίωση των PF και στην χρησιμοποίηση τους για τη λύση ποικίλων προβλημάτων [1].

Ολοκλήρωση Monte Carlo

Η βασική ιδέα των μεθόδων SMC είναι η ολοκλήρωση Monte Carlo. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να υπολογίσουμε αριθμητικά το πολυδιάστατο ολοκλήρωμα :

$$I = \int g(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

$$\pi(\mathbf{x}) > 0 \Rightarrow q(\mathbf{x}) > 0$$

$$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n_{x}}$$

$$\mathbf{X}_{k} = \{\mathbf{x}_{j}, j = 0, ..., k\}$$

$$p(\mathbf{X}_{k} | \mathbf{Z}_{k}) \approx \sum_{i=1}^{N} w_{k}^{i} \delta(\mathbf{X}_{k} - \mathbf{X}_{k}^{i})$$

$$p(\mathbf{x}_{k} | \mathbf{Z}_{k})$$

$$\{\mathbf{X}_{k}^{i}, w_{k}^{i}\}_{i=1}^{N}$$

$$\{\mathbf{X}_{k}^{i}, i = 1, ..., N\}$$

$$\{w_{k}^{i}, i = 1, ..., N\}$$

$$\sum_{i} w_{k}^{i} = 1$$

$$w_{k}^{i} \propto \frac{p(\mathbf{X}_{k}^{i} | \mathbf{Z}_{k})}{q(\mathbf{X}_{k}^{i} | \mathbf{Z}_{k})}$$

όπου $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n_x}$. Οι μέθοδοι Monte Carlo (MC) για αριθμητική ολοκλήρωση παραγοντοποιούν το $g(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x})\pi(\mathbf{x})$ κατά τέτοιο τρόπο ώστε το π(\mathbf{x}) να ερμηνεύεται ως πυκνότητα πιθανότητας που ικανοποιεί $\pi(\mathbf{x}) \ge 0$ και $\int \pi(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = 1$. Η ιδέα είναι ότι είναι δυνατό να δημιουργηθούν N>>1 δείγματα { \mathbf{x}^i ; i = 1,...,N} που κατανέμονται σύμφωνα με το π(\mathbf{x}). Η MC Εκτίμηση του ολοκληρώματος

$$I = \int f(\mathbf{x})\pi(\mathbf{x})d\mathbf{x} \tag{3.43}$$

είναι ο μέσος όρος των δειγμάτων:

$$I_{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} f(\mathbf{x}^{i})$$
(3.44)

Εάν τα δείγματα \mathbf{x}' είναι ανεξάρτητα τότε το I_N είναι μια αδέσμευτη εκτίμηση και σύμφωνα με την θεωρία των μεγάλων αριθμών, θα συγκλίνει σχεδόν σίγουρα στο I. Εάν η διακύμανση της $f(\mathbf{x})$,

$$\sigma^2 = \int (f(\mathbf{x}) - I)^2 \,\pi(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

είναι πεπερασμένη, τότε το θεώρημα κεντρικού ορίου ικανοποιείται και η εκτίμηση λάθους συγκλίνει στη διασπορά : $\lim_{N\to\infty} \sqrt{N}(I_N - I) \sim N(0, \sigma^2)$.

Το σφάλμα της MC εκτίμησης, $e = I_N - I$, είναι τάξης O(N^{-1/2}), που σημαίνει ότι ο ουθμός σύγκλισης της εκτίμησης είναι ανεξάρτητος της διάστασης της προς ολοκλήρωσης ποσότητας (n_x). Αντίθετα, κάθε ντετερμινιστική αριθμητική ολοκλήρωση έχει ρυθμό σύγκλισης που μειώνεται καθώς η διάσταση του n_x μειώνεται. Αυτή η χρήσιμη και σημαντική ιδιότητα της MC ολοκλήρωσης οφείλεται στην επιλογή των δειγμάτων, καθώς προέρχονται αυτόματα από περιοχές του χώρου κατάστασης που είναι πολύ σημαντικές για το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης. Στο πλαίσιο της μπαεσιανής εκτίμησης, η πυκνότητα $\pi(\mathbf{x})$ είναι η «εκ των υστέρων» σππ. Δυστυχώς, δεν είναι συνήθως δυνατή η αποτελεσματική δειγματοληψία από την κατανομή αυτής της σππ καθώς αυτή είναι πολυμεταβλητή, μη σταθερή και γνωστή μόνο σε κάποιο βαθμό. Μια δυνατή λύση είναι η εφαρμογή της μεθόδου της «δειγματοληψίας σημαντικότητας»-(importance sampling IS) [1].

(3.42)

Δειγματοληψία Σημαντικότητας

Στην ιδανική περίπτωση ζητείται να παραχθούν δείγματα απευθείας από την $\pi(\mathbf{x})$ και να υπολογίσουμε το I από την (3.44). Θεωρώντας ότι μπορούμε να παράγουμε δείγματα μόνο από μια πυκνότητα $q(\mathbf{x})$, η οποία είναι παρόμοια στην $\pi(\mathbf{x})$. Τότε μια σωστή ανάθεση βαρών στα δείγματα μπορεί επίσης να κάνει την MC εκτίμηση εφικτή. Η σππ $q(\mathbf{x})$ αναφέρεται ως συνάρτηση σημαντικότητας.Οι λεπτομέρειες της μεθόδου παραλείπονται. Το φίλτρο SIS (Sequential Importance Sampling) είναι ένας απλός και γενικός αλγόριθμος που αποτελεί την βάση για τα περισσότερα PF [1] και πάνω σε αυτόν στηρίχθηκαν κάποια φίλτρα που υλοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα τους παρουσιάζονται στη συνέχεια

Η δειγματοληψία σημαντικότητας είναι μια γενική MC μέθοδος ολοκλήρωσης που εφαρμόζεται στο πρόβλημα του μη γραμμικού φιλτραρίσματος. Ο αλγόριθμος της διαδοχικής δειγματοληψίας σημαντικότητας, που θα προκύψει, είναι μια μέθοδος MC που αποτελεί την βάση για τα περισσότερα MC φίλτρα που αναπτύχθηκαν τις περασμένες δεκαετίες. Το κλειδί σε αυτή την τεχνική είναι η αναπαράσταση της απαιτούμενης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας μέσω τυχαίων δειγμάτων με τα κατάλληλα βάρη και η πραγματοποίηση εκτιμήσεων βάσει αυτών των δειγμάτων. Καθώς ο αριθμός αυτών των δειγμάτων γίνεται πολύ μεγάλος, αυτή η μέθοδος γίνεται ισοδύναμη με την συναρτησιακή περιγραφή της «εκ των υστέρων» σππ και το SIS φίλτρο προσεγγίζει τον βέλτιστο μπαεσιανό εκτιμητή.

Πρόβλημα Εκφυλισμού

Ιδανικά η συνάρτηση πυκνότητας σημαντικότητας πρέπει να είναι η ίδια η «εκ των υστέρων» κατανομή, η $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Z}_k)$. Για την συνάρτηση σημαντικότητας, έχει αποδειχθεί ότι η διακύμανση των βαρών μπορεί μόνο να αυξηθεί συν το χρόνο. Αυτή η αύξηση της διακύμανσης έχει αρνητικές συνέπειες στην ακρίβεια και οδηγεί σε ένα σύνηθες πρόβλημα των PF: το πρόβλημα εκφυλισμού τους. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων, όλα τα μόρια (particles), εκτός από ένα, έχουν αμελητέο βάρος (πρακτικά μηδενικό) [1]. Αυτός ο εκφυλισμός είναι αδύνατο να ξεπεραστεί από τον αλγόριθμο SIS.

Ένα κατάλληλο μέγεθος μέτρησης του εκφυλισμού είναι το $N_{e\!f\!f}$ που ορίζεται ως εξής:

$$\hat{N}_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N} (\mathbf{w}_{k}^{i})^{2}}$$
(3.45)

Είναι εύχολο να αποδείξουμε ότι $1 \le N_{\it eff} \le N$ με τις αχόλουθες δυο αχραίες περιπτώσεις:

(1) αν όλα τα βάρη είναι ίσα (πχ. $\mathbf{w}_{k}^{i} = \frac{1}{N}$ για $\mathbf{i} = 1,...,N$) τότε $N_{eff} = N$ και (2) αν

∃ $j \in \{1,...,N\}$ ισχύει $\mathbf{w}_{k}^{j} = 1$ και $\mathbf{w}_{k}^{j} = 0$ για κάθε i ≠ j τότε $N_{eff} = 1$. Συνεπώς, μικρό N_{eff} σημαίνει σοβαρός εκφυλισμός και αντίστροφα. Η μέθοδος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι η *επαναδειγματοληψία* (resampling) [1] που αναλύεται ακριβώς παρακάτω.

Όποτε παρατηρείται έντονο πρόβλημα εκφυλισμού (για παράδειγμα όταν το N_{eff} πέφτει κάτω από ένα κατώφλι N_{thr} που εμείς ορίζουμε) απαιτείται επαναδειγματοληψία στον αλγόριθμο SIS. Αυτή συνίσταται στην εξάλειψη των δειγμάτων με αμελητέο βάρος και στην αύξηση εκείνων με σημαντικά βάρη (κατά αναλογία με τους γενετικούς αλγορίθμους).

Μια γραφική αναπαράσταση ενός ενός απλού PF (Generic Particle Filter) τέτοιου φίλτρου (με μόνο 10 δείγματα), που χρησιμοποιεί την πυκνότητα μετάβασης ως πυκνότητα σημαντικότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Ξεκινώντας από ένα τυχαίο μέτρο δειγμάτων με ίσα βάρη $\{\mathbf{x}_k', 1/N\}$, που προσεγγίζει την πυκνότητα πρόβλεψης. Στη συνεχεία χρησιμοποιούμε την ληφθείσα μέτρηση \mathbf{z}_k για να υπολογίσουμε το βάρος κάθε δείγματος. Αυτό ενέχει την συνάρτηση πιθανοφάνειας $p(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_k)$. Το

αποτέλεσμα είναι το $\{\mathbf{x}_{k}^{i}, \mathbf{w}_{k}^{i}\}$ που προσεγγίζει την $p(\mathbf{x}_{k} | \mathbf{Z}_{k})$. Αν $N_{eff} < N_{thr}$ εκτελείται η διαδικασία της επαναδειγματοληψίας. Το τελευταίο βήμα είναι η πρόβλεψη, που εισάγει μια ανομοιότητα (εξαιτίας του θορύβου διαδικασίας).



Εικόνα 35: Ένας κύκλος ενός PF ([1])

Παρότι, όμως, η επαναδειγματοληψία περιορίζει δραστικά τα αποτελέσματα του εκφυλισμού, εισάγει άλλα πρακτικά προβλήματα. Το σημαντικότερο είναι ότι τα μόρια με μεγάλα βάρη επιλέγονται στατιστικά πολλές φορές. Αυτό οδηγεί σε απώλεια της ποικιλίας μεταξύ των μορίων καθώς το δείγμα που προκύπτει θα περιέχει πολλά επαναλαμβανόμενα σημεία. Αυτό το πρόβλημα, που είναι γνωστό ως εξασθένιση των μορίων, είναι πολύ σοβαρό στην περίπτωση όπου ο θόρυβος διαδικασία είναι πολύ χαμηλός. Οδηγεί σε μια κατάσταση όπου όλα τα μόριά θα καταλήξουν σε ένα και μόνο στοιχείο μετά από λίγες επαναλήψεις. Μια λύση αυτού του προβλήματος είναι η διαδικασία της κανονικοποίησης (regularization).

Εκδοχές των Particle Filters

Ο αλγόριθμος SIS που παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι η βάση για τα περισσότερα PF που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα. Υπάρχει βέβαια μια πληθώρα PF κάποια από τα οποία περιληπτικά παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Το φίλτρο SIR

Το φίλτρο αυτό προτάθηκε αρχικά με το όνομα «bootstrap» φίλτρο [1] [31]. Οι υποθέσεις που πρέπει να ικανοποιούνται για να χρησιμοποιηθεί είναι πολύ αδύναμες: (1) οι συναρτήσεις δυναμικής κατάστασης και μέτρησης στις (3.1) και (3.2) αντίστοιχα, πρέπει να είναι γνωστές, (2) απαιτείται να μπορεί να γίνει δειγματοληψία από την κατανομή του θορύβου διαδικασίας \mathbf{v}_{k-1} και από την σππ πρόβλεψης. Ακόμα, η συνάρτηση πιθανοφάνειας $p(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_k)$ πρέπει να είναι διαθέσιμη για αναλογικότητα από άποψης σημείων.

Ο αλγόριθμος SIR [1] προκύπτει από τον SIS, διαλέγοντας την πυκνότητα σημαντικότητας να είναι η «εκ των προτέρων» συνάρτηση μετάβασης και πραγματοποιώντας το βήμα επαναδειγματοληψίας σε κάθε χρονικό βήμα (σάρωση).

Το φίλτρο auxiliary SIR(ASIR)

Το βοηθητικό SIR [1][6] εισήχθη ως μια παραλλαγή του φίλτρου SIR. Η βασική ιδέα είναι να πραγματοποιηθεί το βήμα της επαναδειγματοληψίας την χρονική στιγμή k-1 (χρησιμοποιώντας τη μέτρηση \mathbf{z}_k) προτού αναπαραχθούν τα μόρια την χρονική στιγμή k. Με αυτό τον τρόπο, το

φίλτρο ASIR προσπαθεί να «μιμηθεί» την αλληλοδιαδοχή των βημάτων όπως αυτή προκύπτει όταν η βέλτιστη πυκνότητα σημαντικότητας είναι διαθέσιμη.

PF με βελτιωμένη ανομοιότητα δειγμάτων (Regularized PF)

Η επαναδειγματοληψία προτάθηκε στο φίλτρο SIR ως μια μέθοδος αντιμετώπισης του προβλήματος του εκφυλισμού. Παρόλα αυτά, έχει αποδειχτεί ότι αυτή εισάγει νέα προβλήματα, και συγκεκριμένα την απώλεια ποικιλίας μεταξύ των μορίων [1]. Αυτό προκύπτει εξαιτίας του ότι κατά το στάδιο της επαναδειγματοληψίας, τα δείγματα προέρχονται από μια διακριτή κατανομή και όχι από μια συνεχή. Εάν αυτό το πρόβλημα δεν αντιμετωπιστεί κατάλληλα, μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο της «κατάρρευσης των μορίων», κατά το οποίο και τα Ν μόρια αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο, δίνοντας έτσι μια περιορισμένη εικόνα της «εκ των υστέρων» σππ. Μια τεχνική που επιδιώκει να βελτιώσει την ανομοιότητα μεταξύ των μορίων, η οποία βασίζεται στο βήμα τακτοποίησης (regularization) και γι' αυτό το φίλτρο που προκύπτει ονομάζεται Regularized Particle Filter (RPF) [1][32].

Μέτρα επίδοσης φίλτρων

Σφάλμα RMS

Προκείμενου να εξετάστει η επίδοση ενός φίλτρου, στο στάδιο της προσομοίωσης, ώστε να βεβαιωθούμε ότι μπορεί όντως να μας δώσει την εκτίμηση κατάστασης του οχήματος-στόχου μέσα σε μια περιοχή που είναι για μας ικανοποιητική (και σαφώς καλύτερη από την απόκλιση των μετρήσεων λόγω θορύβου) έτσι ώστε να μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε με «ασφάλεια» και στα πραγματικά δεδομένα, χρησιμοποιείται ως μέτρο επίδοσης η RMS τιμή του σφάλματος μεταξύ της πραγματικής και της εκτιμούμενης τιμής. Το RMS σφάλμα (RMS error) για μια μονόμετρη (μη διανυσματική) παράμετρος όπως προκύπτει από N Monte Carlo επαναλήψεις και ορίζεται ως:

$$RMS(\hat{\mathbf{x}}_{i}) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (\mathbf{x}_{i} - \hat{\mathbf{x}}_{i})^{2}}$$
(3.46)

όπου \mathbf{x}_i είναι η πραγματική τιμή της παραμέτρου και $\hat{\mathbf{x}}_i$ είναι η εκτιμούμενη τιμή που δίνει το φίλτρο μας [2].

Συνοχή των εκτιμητοιών κατάστασης (consistency)

Στο πρόβλημα της εκτίμησης μιας παραμέτρου που είναι σταθερή, η συνοχή (consistency) [2] του εκτιμητή ορίζεται ως η σύγκλιση της εκτιμούμενης τιμής στην πραγματική τιμή. Κατά την εκτίμηση όμως της κατάστασης ενός στόχου σε ένα δυναμικό σύστημα, καμία τέτοια σύγκλιση δεν υπάρχει. Αυτό που έχει κάποιος, εκτός της εκτίμησης κατάστασης $\hat{\mathbf{x}}(k \mid k)$, είναι ο πίνακας συνδιακύμανσης της $\mathbf{P}(k \mid k)$. Και εφόσον το κέρδος φίλτρου βασίζεται στον υπολογισμό (από το ίδιο το φίλτρο) της συνδιακύμανσης σφάλματος, προκύπτει ότι η συνοχή είναι απαραίτητη για να χαρακτηριστεί ένα φίλτρο βέλτιστο. Ένα φίλτρο χαρακτηρίζεται ως σταθερό (με συνοχή) όταν ικανοποιεί τις παρακάτω συνθήκες:

$$E[\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k \mid k)] = E[\hat{\mathbf{x}}(k \mid k)] = 0$$

$$E[[\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k \mid k)][\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k \mid k)]'] = E[\hat{\mathbf{x}}(k \mid k)\hat{\mathbf{x}}(k \mid k)'] = \mathbf{P}(k \mid k)$$
(3.47)

Αυτή είναι μια ιδιότητα συνοχής πεπερασμένου αριθμού δειγμάτων, δηλαδή, τα σφάλματα εκτίμησης που βασίζονται σε έναν περιορισμένο (πεπερασμένο) αριθμό δειγμάτων (μετρήσεων) θα πρέπει να έχουν συνοχή με τις θεωρητικές τους ιδιότητες:

- 1. Να έχουν μηδενικό μέσο όρο
- 2. Να έχουν μήτρα συνδιακύμανσης όπως αυτή προκύπτει από το φίλτρο.

Από την άλλη πλευρά, η συνοχή των παραμέτρων του εκτιμητή είναι μια ασυμπτωτική (μη πεπερασμένου αριθμού δειγμάτων) ιδιότητα. Τα κριτήρια συνοχής ενός φίλτρου είναι:

 a) Τα σφάλματα κατάστασης πρέπει να είναι αποδεκτά ως μηδενικής μέσης τιμής και το μέγεθος τους να είναι ανάλογο της συνδιακύμανσης κατάστασης όπως αυτή προκύπτει από το φίλτρο.

- b) Το διάνυσμα της διαφοράς μεταξύ της μετρούμενης και της εκτιμούμενης τιμής πρέπει να έχει την ίδια ιδιότητα.
- c) Το διάνυσμα της διαφοράς θα πρέπει να είναι αποδεκτό ως «λευκό».

Τα δυο τελευταία είναι τα μόνα που μπορούν να ελεγχθούν σε πραγματικά δεδομένα. Το πρώτο κριτήριο, το οποίο είναι στην πραγματικότητα και το πιο σημαντικό, μπορεί να ελεγχθεί μόνο κατά την προσομοίωση. Χρησιμοποιώντας τον συμβολισμό:

$$\hat{\mathbf{x}}(k \mid k) = \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k \mid k)$$
(3.49)

volume to tetoaywykó goddug kayoyikopolnużyne extiungne (NEES) we:

οιζεται το τετοαγωνικό σφαλμα κανονικοποιημενης εκτιμησης (NEES) ως

$$\varepsilon(k) = \hat{\mathbf{x}}(k \mid k)' \mathbf{P}(k \mid k) \hat{\mathbf{x}}(k \mid k)$$
(3.50)

Το $\varepsilon(k)$ έχει μια κατανομή X² με n_x βαθμούς ελευθέριας, όπου n_x είναι η διάσταση του διανύσματος κατάστασης x. Κατά την Monte Carlo προσομοίωση Ν-επαναλήψεων, ορίζεται η μέση τιμή του NEES ως:

$$\overline{\varepsilon}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \varepsilon^{i}(k)$$
(3.51)

Τότε το $N\overline{\varepsilon}(k)$ θα έχει X^2 πυκνότητα με N n_x βαθμούς ελευθερίας. Για να θεωρήσουμε ότι το φίλτρο έχει συνοχή – δηλ. ικανοποιείται το πρώτο κριτήριο συνοχής – θα πρέπει $\overline{\varepsilon}(k) \in [r_1, r_2]$ όπου το αποδεκτό αυτό διάστημα καθορίζεται έτσι ώστε: $P\{\overline{\varepsilon}(k) \in [r_1, r_2]\} = 1 - \alpha$. Έτσι αν υποθέτωντας ότι $\alpha = 0.05$, τότε το διάστημα αυτό αποτελεί την περιοχή συγκέντρωσης του $\overline{\varepsilon}(k)$ με πιθανότητα 95%.

Με παρόμοιο τρόπο μπορεί να ελεγχθεί και το δεύτερο κριτήριο συνοχής. Έτσι ορίζεται το normalized innovation squared (NIS) ως:

 $\varepsilon_{\nu}(k) = \nu(k)' S(k)^{-1} \nu(k)$ (3.52)

η οποία, αν το φίλτρο έχει συνοχή (consistent) έχει μια X² κατανομή με n_z βαθμούς ελευθερίας, όπου το n_z είναι η διάσταση του διανύσματος μέτρησης. Αντιστοίχως, η μέση τιμή του NIS για MC προσομοίωση, N-επαναλήψεων είναι:

$$\overline{\varepsilon_{\nu}}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \varepsilon_{\nu}^{i}(k)$$
(3.53)

η οποία μπορεί να ελεγχθεί όπως και η $\overline{\varepsilon}(k)$, με δεδομένο βέβαια ότι το αποδεκτό διάστημα καθορίζεται με βάση το γεγονός ότι η $\overline{\varepsilon}_{\nu}(k)$ ακολουθεί X^2 κατανομή με $N\overline{\varepsilon}_{\nu}(k)$ βαθμούς ελευθερίας.

Τέλος, αναφέρουμε το «τεστ λευκότητας» το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί για ένα μόνο στοιχείο κάθε φορά με βάση τον παρακάτω τύπο :

$$\rho_l(k,j) = \sum_{i=1}^{N} \mathbf{v}_l^i(k) \mathbf{v}_l^i(j) [\sum_{i=1}^{N} [\mathbf{v}_l^i(k)]^2 [\mathbf{v}_l^i(j)]^2]^{-1/2} \qquad l = 1, \dots, n_z$$
(3.54)

Για πολύ μεγάλες τιμές του N, και με την προϋπόθεση ότι τα διανύσματα υπολοίπου είναι μηδενικής μέσης τιμής και λευκά, τότε η μέση τιμή της (3.54) θα είναι μηδενική και η διασπορά της ίση με 1/N.

3.2 Σύστημα μηδενικού υπολογισμού θέσης

Στα συστήματα οδικής ασφάλειας που εξετάζουμε είναι μεγάλης σημασίας η ύπαρξη αξιόπιστης πληροφορίας για την θέση του ιδίου οχήματος λόγω της ύπαρξης των δεδομένων από ψηφιακούς χάρτες (όπου απαιτείται καλύτερη τοποθέτηση του οχήματος πάνω σε αυτούς) και στην δυνατότητα επέκτασης σε συνεργατικά συστήματα με επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων όπου η ακριβής θέση των οχημάτων παίζει επίσης σημαντικό ρόλο. Το σύστημα μηδενικού υπολογισμού θέσης που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας SASPENCE [13], αναφερόμενο στο εξής ως Εκτίμηση Θέσης και Κατάστασης Ιδίου Οχήματος (ΕΘΚΙΟ) ή Position and Ego State Estimation (PESE), έχει τους ακόλουθους στόχους:

- Φιλτράρισμα των μετρήσεων GPS ελαχιστοποιώντας το σφάλμα του αισθητήρα
- Ενσωμάτωση της πληροφορίας των μετρήσεων των αδρανειακών αισθητήρων (γραμμική ταχύτητα και γωνιακή ταχύτητα) για περαιτέρω βελτίωση της εκτίμησης
- Παροχή αποτελεσμάτων με μηδενικό υπολογισμό (dead reckoning) σε έναν κύκλο μικρότερο από τον προκαθορισμένο κύκλο του αισθητήρα GPS
- Βελτίωση της εξόδου του συστήματος για την περίπτωση της απώλειας μετρήσεων από το GPS σε περιπτώσεις κίνησης σε αστικό περιβάλλον, κάτω από γέφυρες, σε τούνελ, γκαράζ κλπ

Το σύστημα PESE χρησιμοποιεί τις μετρήσεις από τον αισθητήρα UBLOX ANTARIS Evaluation Kit για δέκτη GPS (TIM-LL) με DGPS/SBAS ([14]). Τα δεδομένα εισόδου του αφορούν κυρίως την εκτίμηση θέσης σε συντεταγμένες WGS84. Αναλυτικά τα κύρια δεδομένα εισόδου είναι:

111/0/10.	In a har the child of a contribution of the second se
Παράμετροι μέτρησης αισθητήρα GPS	Περιγραφή παραμέτρου
Γεωγραφικό πλάτος (Latitude)	(-180°Δ, +180°Α): η γεωδαιτική γωνία μετρημένη στο επίπεδο του
Ι εωγραφικο μηκος	(-90°N, +90°B): η γεωδαιτικη γωνια μετρημενη στο επιπεδο του
(Longitude)	ισημερινού μεταξύ του πρώτου μηδενικού μεσημβρινού (άξονας-Χ) και του επιπέδου των μεσημβρινών
Ύψος (Altitude)	(-500 με 7500μ) γεωδαιτικό ύψος πάνω από το ελλειψοειδές WGS84
Γωνία κατεύθυνσης (heading)	(-π με π) γωνία κατεύθυνσης ως προς τον Βορά (09 κατά τους δείκτες του ρολογιού (σε rad)
Ταχύτητα	m/s
Κατάσταση αισθητήρα	(0: μη έγκυρη λειτουργία, 1: τυπική λειτουργία GPS, 2: λειτουργία
	διαφορικού GPS, 6: εκτίμηση μέτρηση)
HDOP	(Horizontal Dilution of Precision) μέτρο επίδοσης του αισθητήρα (προδιαγραφές NMEA)
Time Stamp	σε ms από την έναρξη λειτουργίας

Πίνακας 6: Παράμετροι μέτρησης αισθητήρα GPS και περιγραφή

Οι παφάμετφοι του αισθητήφα έφχονται κάθε 1000ms. Οι μετφήσεις δυναμικής του οχήματος που χφησιμοποιούνται έφχονται στο σύστημα σε πολύ μικφότεφο κύκλο: **Γφαμμική** ταχύτητα (0 με 70 m/s), **Γωνιακή ταχύτητα** (-2.2 με 2.2 rad/s) και **Time Stamp:** χφόνος άφιξης των δεδομένων του οχήματος.

Οι παφάμετροι εξόδου του συστήματος PESE αποδίδονται σε μεγαλύτερη συχνότητα από τις μετφήσεις του αισθητήφα θέσης (όταν καλείται η συνάφτηση) και αφοφούν τις φιλτφαφισμένες τιμές των ακόλουθων μεταβλητών: Γεωγφαφικό Πλάτος και Μήκος, Υψόμετφο, Γωνία κατεύθυνσης, Ταχύτητα και γωνιακή ταχύτητα. Καθώς και τις επιπφόσθετες παφαμέτφους δυναμικής του οχήματος: Γφαμμική επιτάχυνση, Εγκάφσια Επιτάχυνση, Ταχύτητα γωνιακής ταχύτητας, και δείκτες επίδοσης της εκτίμησης (συνδιακύμανση σφάλματος εκτίμησης)

Συστήματα συντεταγμένων

Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται είναι το World Geodetic System 84 (WGS84), χρησιμοποιούνται επιπλέον το κινούμενο σύστημα συντεταγμένων με την αρχή των αξόνων επί του ιδίου οχήματος (2Δ στο οποίο συνήθως γίνονται όλοι οι υπολογισμοί στα συνήθη συστήματα ενεργητικής οδικής ασφάλειας), και τέλος το τοπικό εφαπτομενικό σύστημα που χρησιμεύει σαν ενδιάμεσο σύστημα μεταξύ του 2Δ συστήματος του οχήματος και του WGS84.



Εικόνα 36: Το σύστημα συντεταγμένων WGS84

World Geodetic System 84

To WGS84 σύμφωνα με το ([15]) ορίζεται ως ένα Conventional Terrestrial System (CTS), από την υπηρεσία Navy Navigation Satellite System (NNSS), or TRANSIT, Doppler Reference Frame (NSWC 9Z-2) σε αρχή και κλίμακα, και περιστρέφεται ώστε να φέρει τον μεσημβρινό αναφοράς σε συμφωνία με τον μηδενικό μεσημβρινό. Η αρχή και οι άξονες του WGS84 ορίζονται ως:

Σύστημα WGS84	Περιγραφή
Αρχή	Το κέντρο μάζας της γης
Άξονας-Ζ	Η κατεύθυνση του Conventional Terrestrial Pole (CTP)
Άξονας-Χ	Η τομή του μεσημβρινού επιπέδου αναφοράς του WGS84 με το επίπεδο του ισημερινού του CTP
Άξονας-Υ	Συμπληρώνει το δεξιόστροφο, Earth Centered, Earth Fixed (ECEF) ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων, μετρούμενο στο επίπεδο του ισημερινού CTP, 90° ανατολικά του άξονα-x.

Το σύστημα WGS84 φαίνεται στο σχήμα 36. Οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν το σχήμα του ελλειψοειδούς της γης, τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του και τη μάζα της γης περιλαμβάνονται στον ακόλουθο πίνακα.

III and III and		
Παράμετρος	Ονομα	WGS 84
Ημιμέγιστος άξονας (semimajor)	A	6378137 m
Πλάτυνση (Flattening)	F	1/298.257223563
Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής	W	7.292115 x 10 ⁻⁵ rad s ⁻¹
Γεωκεντρική βαρυτική σταθερά	GM	398600.5 km³ s⁻²
Κανονικοποιημένος 2 ^{ου} βαθμού αρμονικός συντελεστής βαρύτητας ζώνης	C ₂₀	-484.16685 x 10 ⁻⁶

Πίνακας 7: Κύριες παραμετροι του WGS 84

Το σύστημα WGS84 εκτος από τις καρτεσιανές συντεταγμένες ECEF, αποδίδεται και με ελλειπτικές γεωγραφικές συντεταγμένες.



Εικόνα 37: Ελλειψοειδείς γεωγραφικές συντεταγμένες

Ελλειψοειδείς γεωγραφικές συντεταγμένες

Η επιφάνεια της γης μπορεί να προσεγγιστεί ως ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής με πεπλατυσμένους πόλους με απόκλιση ύψους από το γεωειδές < 100 m. Αποτέλεσμα της προσέγγισης αυτής είναι ο καθορισμός των ελλειψοειδών συστημάτων. Το ελλειψοειδές εκ περιστροφής δημιουργείται περιστρέφοντας την έλλειψη του μεσημβρινού γύρω από τον μικρό άζονα της. Το σχήμα του ελλειψοειδούς περιγράφεται από δύο γεωμετρικές παραμέτρους, τον ημιμέγιστο άζονα (semimajor) a και τον ημίμικρο (semiminor) άζονα b. Γενικά, η παράμετρος b αντικαθίσταται από μια μικρότερη και πιο κατάλληλη παράμετρο: την παράμετρο (γεωμετρικής) πλάτυνσης f, με f = (a - b)/a. Επιπλέον ορισμοί περιλαμβάνουν ως αρχή του συστήματος το κέντρο μάζας της γης, γεωγραφικό μήκος και πλάτος, όπως περιγράφηκαν ήδη στον πίνακα 6.

Χωρικά ελλειψοειδείς γεωγραφικές συντεταγμένες

Για τον χωρικό προσδιορισμό σημείων στην φυσική επιφάνεια της γης (ή και πέραν αυτής) με αναφορά στο ελλειψοειδές εκ περιστροφής, ορίζεται το ύψος h πάνω από το ελλειψοειδές επιπλέον των γεωδαιτικών παραμέτρων φ, λ. Το σημείο Q (σχήμα 37.β) προέρχεται από προβολή του επιφανειακού ή εκτός της επιφανείας σημείου P στο ελλειψοειδές. Ένα σημείο στο χώρο αποδίδεται από τις παραμέτρους (φ, λ, h) και το σχήμα του ελλειψοειδούς (a, f). Για το σύστημα WGS84 είναι a = 6378137 m and f¹ = 298.257223563. Το ύψος του ελλειψοειδούς δεν έχει φυσική σημασία, είναι μια γεωμετρική ποσότητα η οποία δεν αποδίδει μια επιφάνεια. Σαν συμπέρασμα σημειώνεται ότι το σύστημα WGS84 είναι ένα τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς που μπορεί να αποδοθεί με τις παραμέτρους X, Y, Z ή φ, λ, h. Η παράμετρος h είναι το (γεωμετρικό) ύψος πάνω από το ελλειψοειδές του WGS84.

Σύστημα συντεταγμένων του οχήματος

Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στο σύστημα SASPENCE και είναι ορισμένο κατά ISO 8855 απεικονίζεται στην Εικόνα 38. Τα θετικά x είναι μπροστά από το όχημα, ο άξονας y κάθετα στον x με θετικά προς τα αριστερά και ο άξονας z κάθετος στο επίπεδο x-y με θετικές τιμές προς τα επάνω. Το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων βρίσκεται στο βαρύκεντρο του οχήματος.



Εικόνα 38: Σύστημα συντεταγμένων οχήματος ISO 8855

Τοπικό εφαπτομενικό επίπεδο

Το τοπικό εφαπτομενικό επίπεδο χρησιμοποιείται σαν ενδιάμεσο σύστημα αναφοράς μεταξύ των δεδομένων εισόδου του αισθητήρα GPS των χωρικών ελλειψοειδών συντεταγμένων (λ, φ, h) και του 2Δ επιπέδου του συστήματος του οχήματος. Αυτό χρησιμοποιεί ένα σημείο αναφοράς πάνω στο ελλειψοειδές σύστημα και έχει καρτεσιανές συντεταγμένες. Η θέση του συστήματος αυτού εικονίζεται στο σχήμα 39.



Εικόνα 39: Το τοπικό εφαπτομενικό σύστημα συντεταγμένων

Το καρτεσιανό τοπικό εφαπτομενικό σύστημα συντεταγμένων αναφέρεται και ως σύστημα northing-easting-down. Το σημείο αναφοράς Ο (Σχήμα 39) καθορίζεται όταν το σύστημα SASPENCE ξεκινά για πρώτη φορά και ανανεώνεται αναλόγως. Η επεξεργασία του υποσυστήματος PESE λαμβάνει χωρά σε αυτό το σύστημα.

Μετασχηματισμοί

Αρχικά παραθέτονται κάποιοι βασικοί ορισμοί για την ορολογία που αναφέρεται: ως διάνυσμα ταχύτητας (velocity) αναφέρεται ένα διανυσματικό μέγεθος το μέτρο του οποίου συχνά αναφέρεται επίσης ως μέτρο ταχύτητας (speed); επίσης τονίζεται η διαφορά της κατεύθυνσης του διανύσματος της ταχύτητας (course) από την κατεύθυνση οχήματος (heading) που είναι διαφορετικό. Τονίζεται ότι κατεύθυνση οχήματος είναι η κατεύθυνση που κάποιος νομίζει ότι ακολουθεί ενώ κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας είναι η πραγματική κατεύθυνση κίνησης ([2]). Αν και στην ελληνική δεν υπάρχει σύγχυση ορών όπως τα ζεύγη speed-velocity και courseheading η διαφορά αυτή αναφέρεται γιατί οι αγγλικοί όροι χρησιμοποιούνται συχνά στα διαγράμματα που περιλαμβάνονται στην εργασία.



Εικόνα 40: Μετασχηματισμοί συντεταγμένων στο υποσύστημα PESE

Από το σχήμα 40 φαίνεται ότι οι μετασχηματισμοί που απαιτούνται είναι: γεωδαιτικές σε ECEF και αντίστροφα, ECEF σε τοπικές εφαπτομενικές και αντίστροφα, και τοπικές εφαπτομενικές σε συντεταγμένες με κέντρο το όχημα και αντίστροφα. Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες αναφέρονται και ως LLA (Latitude-Longitude-Altitude).

Ευθύς μετασχηματισμός LLA → ECEF

φ = γεωγραφικό πλάτος, λ = γεωγραφικό μήκος, h = ύψος

$X = (N+h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda$	(3.55)
$Y = (N+h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda$	(3.56)
$Z = \left[N\left(1 - e^2\right) + h \right] \cdot \sin \varphi$	(3.57)

Η εκκεντρότητα του ελλειψοειδούς είναι: *e* = 0.0818 και τα μήκη των αξόνων του φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί. Η ακτίνα της καμπυλότητας είναι:



Εικόνα 41: Παράμετροι του ελλειψοειδούς αναφοράς

Αντίστροφος μετασχηματισμός ECEF \rightarrow LLA Υπολογισμός του: $\lambda = \arctan \frac{Y}{X}$ (3.59) Επαναληπτικός υπολογισμός των φ και h. Υπάρχει γρήγορη σύγκλιση αν h<<N $h_0 = 0$ $\varphi_0 = \arctan \frac{Z}{p(1-e^2)}$

Επανάληψη:

$$N_i = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_i}} \tag{3.60}$$

$$h_{i+1} = \frac{p}{\cos\varphi_i} - N_i \tag{3.61}$$

$$\varphi_{i+1} = \arctan \frac{Z}{p\left(1 - e^2 \frac{N_i}{N_i + h_{i+1}}\right)}$$
(3.62)

$$M\epsilon: p = \sqrt{X^2 + Y^2} \tag{3.63}$$

Εναλλακτική λύση με κλειστές εξισώσεις:

$$\lambda = \arctan \frac{Y}{X}$$
(3.64)
$$\varphi = \arctan \frac{Z + e'^2 b \sin^3 \theta}{2}$$
(3.65)

$$\varphi = \frac{1}{p - e^2 a \cos^3 \theta}$$

$$h = \frac{p}{\cos \varphi} - N$$
(3.66)

Mε p όπως στην (3.63) και
$$\theta = \arctan \frac{Za}{pb}$$
 (3.67)

Τοπικό εφαπτομενικό σύστημα και ECEF

Χρησιμοποιείται η ακόλουθη μήτρα μετασχηματισμού:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0\\ -\sin\varphi \cdot \cos\lambda & -\sin\varphi \cdot \sin\lambda & \cos\varphi\\ \cos\varphi \cdot \cos\lambda & \cos\varphi \cdot \sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix}$$
(3.68)

Ог συντεταγμένες του σημείου αναφοράς σε ECEF είναι (X_0, Y_0, Z_0) και οι μετασχηματισμοί έχουν ως εξής. Ο ευθύς μετασχηματισμός ECEF \rightarrow τοπικές εφαπτομενικές:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} = \mathbf{L} \cdot \begin{pmatrix} X \\ \mathbf{Y} \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$
(3.69)

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός τοπικές εφαπτομενικές -> ECEF:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \mathbf{L}^T \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$
(3.70)

Όπου (X,Y,Z) είναι οι συντεταγμένες ECEF και (x,y,z) είναι οι τοπικές εφαπτομενικές, επίσης αναφερόμενες και ως (N,E,D) μερικές φορές.



Τοπικό εφαπτομενικό σύστημα και συντεταγμένες οχήματος

Εικόνα 42: Συστήματα συντεταγμένων τοπικό εφαπτομενικό και με κέντρο στο όχημα

Η αρχή του τοπικού εφαπτομενικού συστήματος είναι $(N_0, E_0, D_0) \equiv (0, 0, 0)$ αντίστοιχο σε μια τριάδα συντεταγμένων του συστήματος WGS (λ,φ,h). Ο μετασχηματισμός γίνεται στην νέα αρχή $(N',E',D') \equiv (0,0,0)$ του συστήματος του οχήματος και με στροφή κατά "heading" μοίρες (θ)επί του επιπέδου N-D. Θεωρώντας ότι ο άζονας Down σχεδόν ταυτίζεται με το z-άζονα του συστήματος του οχήματος και όλη η κίνηση γίνεται εντός 2Δ επιπέδων έχουμε τον μετασχηματισμό θέσης ενός σημείου από το τοπικό εφαπτόμενο στο σύστημα του οχήματος και τον αντίστροφο να γίνονται από τους αντίστοιχους πίνακες μετασχηματισμών:

 $\cos\theta - \sin\theta$ $\sin\theta \quad \cos\theta$

ναι

(3.71)

Ένα παράδειγμα των μετασχηματισμών αυτών δίνεται στα δεδομένα του διαγράμματος που ακολουθεί στην εικόνα 43.

 $\sin\theta$

 $\cos\theta$

 $-\sin\theta \cos\theta$

Περιγραφή αλγορίθμου

Συγχρονισμός και εξισώσεις μετρήσεων

Οι μετρήσεις των παραμέτρων της κίνησης του οχήματος και οι μετρήσεις του GPS φθάνουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στο σύστημα που εξετάζουμε. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μια διαδικασία συγχρονισμού για αυτά τα δεδομένα. Οι μετρούμενες ποσότητες που χρησιμοποιούνται στο φίλτρο είναι οι:

- Μετρήσεις του GPS (γεωγραφικό πλάτος, μήκος, ύψος, κατεύθυνση οχήματος)
- Μετρήσεις οχήματος (μέτρο ταχύτητας, γωνιακή ταχύτητα)

Οι χρόνοι ενημέρωσης των μετρήσεων είναι 1000 ms και 100-150ms, αντίστοιχα. Ο χρόνος απόδοσης δεδομένων του PESE είναι όποτε αυτό καλείται, δηλαδή στο χρόνο απόδοσης εξόδου από το σύστημα SASPENCE, που δεν είναι πάντα σταθερός αλλά συνήθως είναι γύρω στα 150ms. Το υποσύστημα PESE διαβάζει τα τελευταία διαθέσιμα δεδομένα οχήματος την ώρα που αυτό καλείται. Ένα αξιόπιστο time-stamping με κοινή αναφορά για τις δύο πηγές δεδομένων ήταν ένα προαπαιτούμενο, όμως δεν ήταν πάντοτε διαθέσιμο. Τα δεδομένα GPS έφθαναν κάθε 250ms, αλλά αυτός ο ουθμός δεν αντιστοιχούσε σε ποαγματική ενημέρωση αλλά σε μετάδοση ήδη υπαρχόντων δεδομένων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας εναλλακτικός μηχανισμός με τη χρήση του πακέτου δεδομένων UTC time stamp που αποδίδει το GPS για την αναγνώριση της πραγματικής χρονικής στιγμής ενημέρωσης των δεδομένων θέσης. Φυσικά αυτός ο μηχανισμός



εισάγει κάποιο σφάλμα που συσσωρεύεται, όμως ο έλεγχος που έγινε έδειξε ότι το σφάλμα αυτό δεν είναι σημαντικό ώστε να επηρεάζει πολύ την επίδοση του συστήματος.

Εικόνα 43: Παράδειγμα ενός σεναρίου (~9min) με μετασχηματισμούς δεδομένων GPS



Εικόνα 44: Ρυθμοί ενημέρωσης μετρήσεων GPS και προγράμματος (κόκκινο και μπλε, αντίστοιχα)

(3.72)

Το διάνυσμα μετρήσεων αποτελείται από τρία υπό-διανύσματα:

 $\mathbf{z}_{GPS}(K) = \begin{bmatrix} N & E & \theta \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{z}_V(k) = \begin{bmatrix} V \end{bmatrix}$ had $\mathbf{z}_{\omega}(k) = \begin{bmatrix} \omega \end{bmatrix}$

Με το N να αντιστοιχεί στο northing, το E στο easting, θ στη γωνία κατεύθυνσης οχήματος, το V στο μέτρο της ταχύτητας του οχήματος και το ω στη γωνιακή ταχύτητα του οχήματος. Οι μετρήσεις NED χρησιμοποιούνται αντί των LLA μιας και είναι πιο κατάλληλες για την εξαγωγή εξισώσεων δυναμικής και μοντέλων κίνησης. Η θ είναι υπολογιζόμενη ποσότητα από το GPS. Οι δείκτες k και K αντιστοιχούν σε διακριτές χρονικές στιγμές: ο k είναι ο δείκτης για τις μετρήσεις του οχήματος (αναλόγως του χρόνου εκτέλεσης του γενικότερου προγράμματος) και K ο χρόνος της εισόδου μετρήσεων του GPS.

Η τυπική απόκλιση των σφαλμάτων μέτρησης για τα δεδομένα του GPS και του οχήματος σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους είναι:

$\sigma_N = \sigma_E = \sigma_D = 2.0m$ to 2.5m	(3.73)
$\sigma_V = 0.3m/s$	(3.74)
$\sigma_{\omega} \leq 2 \deg/s$	(3.75)

Το σφάλμα της εξίσωσης (3.73) εξαρτάται από το αν ήταν διαθέσιμη πληροφορία DGPS ή όχι. Η εξίσωση μετρήσεων είναι:

$\left[\mathbf{z}_{GPS}\left(k\right)\right]$		$\left[\mathbf{h}_{1k}\left(N,E,\theta\right)\right]$	
$\mathbf{z}_{\omega}(k)$	=	$\mathbf{h}_{2k}(\boldsymbol{\omega})$	(3.76)
$\mathbf{z}_{V}(k)$		$\begin{bmatrix} & & \\ & & \\ & & \mathbf{h}_{3k} \left(V \right) \end{bmatrix}$	

Οι συναφτήσεις μετφήσεων **h**_{1k}, **h**_{2k} και **h**_{3k} του φίλτφου είναι γφαμμικές συναφτήσεις των παφαμέτφων του διανύσματος κατάστασης. Ο συγχφονισμός των μετφήσεων του **h**_{1k} είναι απαφαίτητος πριν την πεφαιτέφω επεξεφγασία:

$$\mathbf{z}_{GPS}(k) = \mathbf{F}_{K \to k} \mathbf{z}_{GPS}(K) \tag{3.77}$$

όπου $\mathbf{F}_{NE\theta(K\to k)} = \mathbf{F}_{NE\theta} (TS(k) - TS(K))$ είναι η μήτρα μετάβασης των μεταβλητών N, E και θ του διανύσματος κατάστασης από την διακριτή χρονική στιγμή της τελευταίας ενημέρωσης του GPS K έως την τρέχουσα χρονική στιγμή k. Η μήτρα μετάβασης παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο. TS(K) είναι η timestamp της πιο πρόσφατης στιγμής που δόθηκαν μετρήσεις GPS και TS(k) είναι η timestamp των δεδομένων του οχήματος, που αντιστοιχεί στον χρόνο εκτέλεσης της συνάρτησης. Παρόμοια ενημέρωση για τις μετρήσεις της ταχύτητας και της γωνιακής ταχύτητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν ήταν διαθέσιμη πιο ακριβής χρονική πληροφορία.

Η μήτρα συνδιακύμανσης του θορύβου μέτρησης του διανύσματος μετρήσεων της (3.76) είναι:

 $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_N^2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \sigma_E^2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \sigma_{\omega}^2 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \sigma_V^2 \end{bmatrix}$ (3.78)

Εξισώσεις κατάστασης και δεδομένα εξόδου

Το διάνυσμα κατάστασης που χρησιμοποιείται είναι:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} N & E & \theta & \dot{\theta} & \ddot{\theta} & v & \dot{v} & \ddot{v} \end{bmatrix}^T$$
(3.79)

με τις παραμέτρους του να είναι αντίστοιχα: Boράς-Northing (m), Ανατολή-Easting (m), Κατεύθυνση-Heading (rad), Γωνιακή ταχύτητα (rad/s), ρυθμός μεταβολής γωνιακής ταχύτητας (rad/s²), ταχύτητα (m/s), επιτάχυνση (m/s²) και ρυθμός μεταβολής επιτάχυνσης (m/s³).

Η μήτρα μετάβασης για την εξίσωση κατάστασης (3.5) είναι:

$$\mathbf{F}(T) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{2x2} & \mathbf{0}_{2x3} & \mathbf{F}_{1}(T) \\ \mathbf{0}_{3x2} & \mathbf{F}_{CA}(T) & \mathbf{0}_{3x3} \\ \mathbf{0}_{3x2} & \mathbf{0}_{3x3} & \mathbf{F}_{CA}(T) \end{bmatrix}$$
(3.80)

όπου $\mathbf{I}_{_{2x2}}$ είναι
η2x2μοναδιαία μήτρα και $\mathbf{0}_{_{nxm}}$ είναι μία nxm μηδενι
κή μήτρα και:

$$\mathbf{F}_{1}(T) = \begin{bmatrix} T \cdot \cos \theta & 0 & 0 \\ T \cdot \sin \theta & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{CA}(T) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^{2}/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.81)

Η μήτρα συνδιακύμανσης του θορύβου της διαδικασίας είναι:

$$\mathbf{Q}(T) = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{POS}(T) & \mathbf{0}_{3x3} & \mathbf{0}_{3x3} \\ \mathbf{0}_{3x3} & \mathbf{Q}_{CA}(T) & \mathbf{0}_{3x3} \\ \mathbf{0}_{3x3} & \mathbf{0}_{3x3} & \mathbf{Q}_{CA}(T) \end{bmatrix}$$
(3.82)

με

$$\mathbf{Q}_{CA}(T) = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}T^4 & \frac{1}{2}T^3 & \frac{1}{2}T^2 \\ \frac{1}{2}T^3 & T^2 & T \\ \frac{1}{2}T^2 & T & 1 \end{bmatrix} \cdot \sigma_a^2$$
(3.83)

όπου σ_α είναι η τυπική απόκλιση του θορύβου διαδικασίας, ο οποίος εδώ είναι ο ρυθμός μεταβολής του θορύβου της γωνιακής ταχύτητας και ο ρυθμός μεταβολής του θορύβου της επιτάχυνσης. Και Τ είναι το χρονικό βήμα εκτέλεσης των υπολογισμών:

$$T = time(k) - time(k-1), \quad [sec] \tag{3.84}$$

Οι υπομήτρες μετρήσεων για την δημιουργία της εξίσωσης (3.6) είναι γραμμικές και ίσες με:

											/V
		[1	0	0	0	0	0	0	0		F
$\begin{bmatrix} \mathbf{h}_{1k}(N, E, \theta) \end{bmatrix}$]	0	1	0	0	0	0	0	0		E
		0	0	1	0	0	0	0	0		θ
\mathbf{h} (\mathbf{x})			U	1	U	U	U	U	U		$\dot{ heta}$
$\mathbf{h}_{2k}(\omega)$	=		•••••	•••••	••••	•••••	•••••	•••••	••••	×	$\ddot{\theta}$
		0	0	0	1	0	0	0	0		
$\mathbf{h}_{3k}(V)$			• • • • • • •								<i>v</i>
		0	0	0	0	0	1	0	0		v
	l	L	U	U	U	U	1	U	· -	J	ÿ

Όσον αφορά το φιλτράρισμα, όπως φάνηκε από τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε ένα τυπικό φίλτρο Kalman αφού τόσο οι εξισώσεις μετρήσεων και κατάστασης είναι γραμμικές.

Σημαντικό θέμα στο φιλτράρισμα των παραπάνω μετρήσεων έχει η εκτίμηση της γωνίας κατεύθυνσης που δίνει το GPS η οποία είναι φραγμένη μεταξύ –π και π. Το πέρασμα της γωνίας κατεύθυνσης του οχήματος από το Νότο, δηλαδή από –π σε π ή αντίστροφα, δημιουργεί σφάλματα στο φίλτρο μιας και αυτό το πέρασμα δεν επιτρέπεται, δηλαδή φαίνεται σαν το όχημα να κάνει στροφή 360 μοιρών. Για το λόγο αυτό ένα σχήμα διόρθωσης του φίλτρου εισάχθηκε χρησιμοποιώντας μια μέθοδο κορεσμού (saturation) για το διάνυσμα υπολοίπου. Κατά τον υπολογισμό των εξισώσεων του φίλτρου Kalman ελέγχεται το υπόλοιπο της εκτίμησης της γωνίας κατεύθυνσης του οχήματος και ειδικότερα αν η τιμή αυτή είναι μεταξύ –π και π, με την ιδανική προσδοκία αυτό να τείνει στο μηδέν. Εάν η τιμή αυτή είναι εκτός αυτού του πεδίου τότε μια ποσότητα ίση με 2π προστίθεται ή αφαιρείται ανάλογα. Αυτό εξασφαλίζει ότι το υπόλοιπο τείνει πάντα στο μηδέν και η εκτίμηση της γωνίας καιτεύθυνσης θα είναι ομαλή και συνεχής και κατά τη έξοδο φράσσεται ανάλογα ώστε να είναι όπως και η μέτρηση στο πεδίο –π έως π [16].

Στην τελική φάση της επεξεργασίας οι μετρήσεις δίνονται στην τελική τους μορφή σύμφωνα με τα διαγράμματα που ακολουθούν στην επόμενη σελίδα.

Τέλος είναι απαραίτητος ένας μετασχηματισμός της ταχύτητας και της επιτάχυνσης στο σύστημα ISO συντεταγμένων του οχήματος, καθώς και ο μετασχηματισμός της θέσης στο κέντρο του συστήματος αυτού, μιας και η εκτίμηση γίνεται με σημείο αναφοράς τη θέση της κεραίας πάνω στο όχημα, σύμφωνα με το σχήμα που ακολουθεί.

Απαραίτητες παράμετροι για το τελευταίο στάδιο των μετασχηματισμών είναι η πραγματική θέση της κεραίας GPS πάνω στο όχημα (x₀, y₀) σε συντεταγμένες του ISO συστήματος του οχήματος. Η γωνία κατεύθυνσης δίνεται στο τρέχον σύστημα NED ως προς το βορά χωρίς να χρειάζεται κάποιος μετασχηματισμός. Επίσης οι παράμετροι γωνιακή ταχύτητα και ο ρυθμός της δεν απαιτούν κάποιον μετασχηματισμό. Η γωνία κατεύθυνσης (yaw) που προέρχεται από την ολοκλήρωση της γωνιακής ταχύτητας (yaw rate) χρειάζεται αφαίρεση από π/2 ώστε να αντιστοιχεί στη κατεύθυνση του οχήματος (heading) ως προς το βορά, που είναι η είσοδος και η επιθυμητή έξοδος του φίλτρου.



Εικόνα 45: Μετασχηματισμός εξόδου



Εικόνα 46: Τελικός μετασχηματισμός συντεταγμένων εξόδου για γεωγραφικό μήκος και πλάτος



Εικόνα 47: Θέση κεραίας GPS σε σχέση με το ISO σύστημα συντεταγμένων του οχήματος

Αποτελέσματα του φίλτρου PESE

Στις ακόλουθες εικόνες σχεδιάζονται για διάφορα τμήματα δεδομένων τα αποτελέσματα του συστήματος, με μπλε χρώμα είναι οι μετρούμενες ποσότητες και με κόκκινο χρώμα οι εκτιμώμενες. Οι εκτιμήσεις για την ταχύτητα και τη γωνιακή ταχύτητα φαίνονται στην εικόνα 48.



Εικόνα 48: Αποτελέσματα επίδοσης του PESE στην εκτίμηση της ταχύτητας (πάνω), γωνιακής ταχύτητας και γωνίας κατεύθυνσης (αριστερά και δεξιά αντίστοιχα)

Από την εικόνα 48 είναι φανερό ότι το υποσύστημα PESE φιλτράρει και εξομαλύνει τις μετρούμενες ποσότητες της ταχύτητας και της γωνιακής ταχύτητας του οχήματος. Τα ίδια συμπεράσματα μπορούν να βγουν και από την εκτίμηση της γωνίας κατεύθυνσης (heading), από την ίδια εικόνα φαίνεται επίσης και η σωστή λειτουργία του υποσυστήματος όταν η γωνία κατεύθυνσης περνά από –π σε π και αντίστροφα. Η εκτιμωμένη γωνία κατεύθυνσης δίνεται επίσης εντός αυτού του διαστήματος.



Εικόνα 49.(α-δ): Σενάρια εκτίμησης γεωδαιτικής θέσης από το PESE

Οι παραπάνω εικόνες 49.α-δ δείχνουν διάφορα σενάρια των μετρούμενων σε αντιπαράθεση με τις εκτιμώμενες γεωδαιτικές θέσεις του οχήματος. Υπάρχουν αρκετά σημεία όπου οι εκτιμώμενες (με κόκκινο) τιμές είναι παρούσες όταν οι μετρούμενες (μπλε) δεν υπάρχουν καθόλου, και φυσικά πάντοτε οι εκτιμήσεις είναι παρούσες ενδιαμέσως των μετρήσεων του GPS.

Η εικόνα 49.α δείχνει την επίδοση της εκτίμησης θέσης (positioning) με την παρουσία εκτιμήσεων ενδιαμέσως των ενημερώσεων του GPS και επίσης η εκτίμηση της γωνίας κατεύθυνσης (heading) είναι καλή καθώς οι προβλεπόμενες θέσεις σχεδόν ταυτίζονται με τις νέες μετρήσεις. Στην εικόνα 49.β η ενημέρωση από τον αισθητήρα GPS είναι απούσα για αρκετές χρονικές στιγμές αν και αυτή αναμενόταν, με αποτέλεσμα η ενημέρωση να γίνεται μόνο με χρήση των μετρήσεων των αδρανειακών αισθητήρων (ταχύτητα και γωνιακή ταχύτητα). Η εκτίμηση αυτή προσεγγίζει κάπως τη νέα μέτρηση όταν αυτή φθάνει. Το σφάλμα σε αυτήν την περίπτωση μειώνεται κατά αρκετά μετρά αν και παραμένει σημαντικό και επίσης ο αισθητήρας δίνει πληροφορία όταν δεν υπάρχει καθόλου σχετική μέτρηση. Φυσικά όταν ο αισθητήρας αστοχεί στην ενημέρωση του (λόγω εμποδίων στην επαφή της κεραίας του και των δορυφόρων) για μικρότερους χρόνους σε σχέση με αυτούς της εικόνας το σύστημα αποδίδει καλυτέρα.

Οι εικόνες 49.γ και δ δείχνουν δύο σενάφια με μεγάλες στροφές (roundabout). Επιπροσθέτως στην εικόνα 49.γ ο αισθητήρας δεν ενημερώνεται κανονικά καθώς αρκετά εσφαλμένα σημεία (μπλε) μπορούν να διακριθούν, ενώ το υποσύστημα σε αυτές τις περιπτώσεις με κατάλληλη τεχνική αγνοεί αυτές τις παρατηρήσεις. Αντιθέτως ακόμα και σε περιπτώσεις roundabouts όπως αυτή της 49.δ όπου ο αισθητήρας λειτουργεί κανονικά οι εκτιμήσεις είναι πολύ καλύτερες. Σε εφαρμογές οδικής ασφάλειας όπως αυτή του SASPENCE η εκτίμηση της γεωδαιτικής θέσης και γωνίας κατεύθυνσης σε σταυροδρόμια και συγκοινωνιακούς κόμβους σαν τις περιπτώσεις στις παραπάνω εικόνες είναι πολύ σημαντική και το σύστημα PESE φαίνεται να αποδίδει ικανοποιητικά.

3.3 Σύστημα ιχνηλασίας φαντάφ μακφινής απόστασης

Τα ραντάρ μακρινού πεδίου είναι σε ευρεία χρήση στις εφαρμογές που εξετάζουμε και κατάλληλα συστήματα ιχνηλασίας υλοποιηθήκαν για την επεξεργασία των δεδομένων τους. Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνεται αρχικά μια προσομοίωση σειράς φίλτρων και σύγκριση της επίδοσης τους, ενώ στη συνεχεία περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα της πραγματικής εφαρμογής των αλγορίθμων ιχνηλασίας σε δεδομένα των ραντάρ Celsius (EUCLIDE) και Bosch (που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2).

Προσομοίωση της επίδοσης διαφόρων φίλτρων

Όπως αναφέθθηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, σύμφωνα με την μπαεσιανή λογική το πρόβλημα του φιλτραρίσματος στην ιχνηλασία είναι η επαναληπτική ποσοτικοποίηση της κατάστασης με κάποιο βαθμό εμπιστοσύνης στην χρονική στιγμή k, λαμβάνοντας τα δεδομένα μετρήσεων ως τη χρονική αυτή στιγμή.

Στο πρόβλημα που εξετάζουμε υπάρχει μη γραμμικότητα στο χώρο των μετρήσεων ενώ το μοντέλο κίνησης του συστήματος μπορεί να είναι γραμμικό. Ένα σενάριο κίνησης οχήματος και ανίχνευσης του από άλλο κινούμενο όχημα δημιουργήθηκε σύμφωνα με το μοντέλο κίνησης σταθερής επιτάχυνσης CA [17][7] με την επιβολή τεχνητού ελιγμού (με είσοδο την επιτάχυνση), τόσο στο όχημα στόχο όσο και στο όχημα πλατφόρμα, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Οι μετρήσεις λαμβάνονται σε πολικές συντεταγμένες με προσθετικό γκαουσσιανό θόρυβο γνωστής συνδιακύμανσης και μηδενικής μέσης τιμής. Η όλη διαδικασία περιλήφθηκε σε σχετική δημοσίευση [8] και αφορούσε στον έλεγχο της επίδοσης διαφόρων φίλτρων χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του ίδιου σεναρίου και υποθέτοντας ότι κατανομές θορύβων και χαρακτηριστικά τους είναι γνωστά, καθώς επίσης και ότι το μοντέλο κίνησης περιγράφει απόλυτα την εξέλιξη του οχήματος στόχου στον χώρο. Προφανώς σε πραγματικές συνθήκες η μοντελοποίηση δεν είναι πάντοτε ικανοποιητική και επιπροσθέτως υπεισέρχονται και τα θέματα της σύνδεσης δεδομένων όπως θα περιγράφει στη συνεχεία.

Προσέγγιση Extended Kalman Filter

Οι μετρήσεις που δίνουν τα συνήθη ραντάρ για οδικές εφαρμογές αφορούν σε πολικές συντεταγμένες, μετρήσεις για την απόσταση στόχου από τον αισθητήρα, μέτρηση γωνιάς αζιμουθίου και ρυθμό μεταβολής της απόστασης (ακτινική ταχύτητα). Οι εξισώσεις αυτών σε πολικό-καρτεσιανό σχήμα είναι:

$$R = \sqrt{X^{2} + Y^{2}}, \theta = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right), V_{R} = \frac{X \cdot V_{x} + Y \cdot V_{y}}{\sqrt{X^{2} + Y^{2}}}$$
(3.86)

Με R, θ και X, V_x, Y, V_y σημειώνονται πολικές και καρτεσιανές συντεταγμένες αντίστοιχα με τους χρονικούς δείκτες να παραλείπονται. Με τους μετασχηματισμούς $X = R \cos \theta$, $Y = R \sin \theta$ μπορεί να ελαττωθεί η μη γραμμικότητα, όμως στην περίπτωση της ακτινικής ταχύτητας η μη γραμμικότητα παραμένει μιας και δεν υπάρχει κάποιου είδους πληροφορία για την εγκάρσια ταχύτητα. Η τεχνική αυτή προκαλεί επίσης κάποιες μεταβολές στην προφανή μήτρα συνδιακύμανσης του σφάλματος μέτρησης – εάν σ_R^2 , σ_θ^2 , και σ_{VR}^2 είναι οι διακυμάνσεις των πολικών μετρήσεων, τότε θα είναι:

$$\mathbf{COV}(\mathbf{w}_{k}) = \begin{bmatrix} \sigma_{X}^{2} & \sigma_{XY} & 0\\ \sigma_{XY} & \sigma_{Y}^{2} & 0\\ 0 & 0 & \sigma_{VR}^{2} \end{bmatrix}$$

$$\sigma_{X}^{2} = \sigma_{R}^{2} \cos^{2} \theta + R^{2} \sigma_{\theta}^{2} \sin^{2} \theta$$
(3.87)
(3.88)

Mε

$$\sigma_Y^2 = \sigma_R^2 \sin^2 \theta + R^2 \sigma_\theta^2 \cos^2 \theta$$
(3.89)
$$\sigma_{XY} = \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \left(\sigma_R^2 - R^2 \sigma_\theta^2\right)$$
(3.90)

Η αναλυτική (Ιακωβιανή) προσέγγιση της συνάρτησης μέτρησης για 1^{ου} βαθμού ΕΚΓ [2] είναι η ακόλουθη χρονικά μεταβαλλόμενη μήτρα μετρήσεων:

$$\widetilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & 0 & h_{14} & 0 & 0 \\ h_{21} & 0 & 0 & h_{24} & 0 & 0 \\ h_{31} & h_{32} & 0 & h_{34} & h_{35} & 0 \end{bmatrix}$$
(3.91)

όπου:

$$h_{31} = \frac{1}{X^2 + Y^2} \left(V_X \sqrt{X^2 + Y^2} - (XV_X + YV_Y) \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)$$

$$h_{34} = \frac{1}{X^2 + Y^2} \left(V_Y \sqrt{X^2 + Y^2} - (XV_X + YV_Y) \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)$$

$$h_{32} = X / \sqrt{X^2 + Y^2}, \text{ xat } h_{35} = Y / \sqrt{X^2 + Y^2}$$
(3.92)

Εάν χρησιμοποιηθούν οι μετασχηματισμοί που αναφερθήκαν θα είναι:

$$h_{11} = h_{24} = 1, \text{ xou } h_{14} = h_{21} = 0 \tag{3.93}$$

Διαφορετικά με χρήση απευθείας των πολικών μετρήσεων για τη γωνιά και την απόσταση, θα είναι:

$$h_{11} = X/\sqrt{X^2 + Y^2}$$
, $h_{14} = Y/\sqrt{X^2 + Y^2}$, $h_{21} = -Y/X^2 + Y^2$, $h_{24} = X/X^2 + Y^2$ (3.94)

Η χρήση των ψευδομετρήσεων μπορεί να επιλεχθεί για να αποφευχθεί η μη γραμμικότητα σε μέρος του προβλήματος αν όχι στο σύνολο του. Μια δευτέρου βαθμού προσέγγιση για τη μη γραμμική συνάρτηση μπορεί επίσης να επιλεγεί. Σε περίπτωση όχι πολύ μεγάλων αρχικών σφαλμάτων και θορύβων όπως στην περίπτωση που εξετάζουμε το φίλτρο ΕΚF αποδίδει καλά [1]. Η προσέγγιση ΕKF εισάγει σημαντικά σφάλματα καθώς αγνοεί τους μεγαλύτερους ορούς και επειδή οι προσεγγίσεις γίνονται με τις εκτιμήσεις και όχι με τις πραγματικές τιμές των μεγεθών.

Για να αποφευχθεί η συσχέτιση των σφαλμάτων των δύο συντεταμένων απόστασης και αζιμουθίου κατά την μετατροπή σε καρτεσιανό σύστημα χρησιμοποιείται ευρέως και ο μετασχηματισμός debiased converted measurements της [28] ο οποίος ενσωματώνει τις αρχικές μετρήσεις σε ένα μη γραμμικό σχήμα εντός συστήματος εκτίμησης στόχων καταλήγοντας σε ένα σύστημα φίλτρου αναμεμιγμένων (mixed) συντεταγμένων. Στην περίπτωση μας όμως παραμένει η μη γραμμικότητα λόγω της ύπαρξης της μέτρησης της ακτινικής ταχύτητας.

Γραμμικοποίηση των μετρήσεων

Είναι δυνατόν να εφαρμοστούν και μέθοδοι που γραμμικοποιούν τον χώρο μετρήσεων. Εάν αυτό επιτευχθεί τότε οι προϋποθέσεις του φίλτρου Kalman ισχύουν και απλό ή πολλαπλών μοντέλων φίλτρο Kalman μπορεί να εφαρμοστεί. Σε αυτήν την περίπτωση η μήτρα μετρήσεων της εξίσωσης (3.91) θα είναι σταθερή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι αυτές.

Αγνόηση της ακτινικής ταχύτητας (LKF-1): Όπως αναφέθθηκε η μη γραμμικότητα στον χώρο των μετρήσεων προκύπτει από τις μετρήσεις ακτινικής ταχύτητας. Εάν οι μετρήσεις αυτές παραληφθούν εφαρμόζεται το γραμμικό φίλτρο Kalman που είναι ένας βέλτιστος εκτιμητής αν οι προϋποθέσεις του ισχύουν. Όμως η μη αξιοποίηση όλων των υπαρχόντων δεδομένων δεν μπορεί να είναι μία σωστή λύση.

Χρήση πολικών συντεταγμένων (LKF-2): Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο σταθερής ακτινικής και εγκάρσιας επιτάχυνσης ή ταχύτητας. Ο χώρος μετρήσεων αποτελείται από τις τρεις διαθέσιμες μετρήσεις..

Χρήση ψευδομετρήσεων για την ταχύτητα (LKF-3): Είναι μία ευριστική και όχι απόλυτα μαθηματικά ορθή μέθοδος. Βασίζεται στην παρατήρηση ότι στους αυτοκινητοδρόμους τα οχήματα κινούνται στην ίδια ή σε γειτονικές λωρίδες κυκλοφορίας σε σχεδόν ευθεία τμήματα δρόμου για σύντομες αποστάσεις. Εάν αυτές οι υποθέσεις ισχύουν η γωνία αζιμουθίου είναι σχεδόν σταθερή για αρκετές συνεχόμενες σαρώσεις του αισθητήρα και συνεπώς η άγνωστη εγκάρσια

ταχύτητα που είναι ανάλογη της γωνίας αζιμουθίου μπορεί να υποτεθεί αμελητέα ή μηδέν. Τότε οι καρτεσιανές ψευδομετρήσεις για το διάνυσμα της ταχύτητας μπορούν να προσεγγιστούν, θέτοντας $V_L \approx 0, \ \sigma_{VL}^2 \approx 0,$ στις ακόλουθες εξισώσεις.

$$V_{X} = V_{R} \cos \theta - V_{L} \sin \theta, V_{Y} = V_{R} \sin \theta + V_{L} \cos \theta$$
(3.95)
Με κάποιους επιπλέον υπολογισμούς σαν αυτούς της εξίσωσης (3.91) είναι:

$$\mathbf{COV}(\mathbf{w}_{k}) = \begin{bmatrix} \sigma_{X}^{2} & \sigma_{XYX} & \sigma_{XY} & \sigma_{XYY} \\ \sigma_{XYX} & \sigma_{YX}^{2} & \sigma_{YXY} & \sigma_{YXYY} \\ \sigma_{XY} & \sigma_{YXY} & \sigma_{Y}^{2} & \sigma_{YYY} \\ \sigma_{XYY} & \sigma_{YXYY} & \sigma_{YYY} & \sigma_{Y}^{2} \end{bmatrix}$$
(3.96)

Με τις (3.88-90) να συνεχίζουν να ισχύουν και επιπλέον:

$$\sigma_{XVX} = (V_R \sin \theta + V_L \cos \theta) \cdot R \cdot \sigma_{\theta}^2 \cdot \sin \theta$$

$$\sigma_{XVY} = -R \cdot \sigma_{\theta}^2 \cdot \sin \theta \cdot (V_R \cos \theta - V_L \sin \theta)$$

$$\sigma_{VX}^2 = \sigma_{VR}^2 \cos^2 \theta + \sigma_{VL}^2 \sin^2 \theta + \sigma_{\theta}^2 (V_R \sin \theta + V_L \cos \theta)^2$$

$$\sigma_{VXY} = -R \cdot \sigma_{\theta}^2 \cdot \cos \theta \cdot (V_R \sin \theta + V_L \cos \theta)$$

$$\sigma_{VYY} = R \cdot \sigma_{\theta}^2 \cdot \cos \theta \cdot (V_R \cos \theta - V_L \sin \theta)$$

$$\sigma_{VYY}^2 = \sigma_{VR}^2 \sin^2 \theta + \sigma_{VL}^2 \cos^2 \theta + \sigma_{\theta}^2 \cdot (V_R \cos \theta - V_L \sin \theta)^2$$

$$\sigma_{VXYY} = (\sigma_{VR}^2 - \sigma_{VL}^2) \cos \theta \cdot \sin \theta - \sigma_{\theta}^2 (V_R \sin \theta + V_L \cos \theta)$$
(3.97)

Η παραπάνω δίνει και αυτή μια λύση εξουδετερώνοντας τη μη γραμμικότητα και προσφέροντας μία βέλτιστη λύση, όμως προκύπτουν διάφορα θέματα όπως κατά την προσέγγιση σε στροφές όπου οι προϋποθέσεις αυτές δεν ισχύουν. Το τελευταίο συνήθως οδηγεί σε απώλειες ιχνών, εσφαλμένες επαναρχικοποιήσεις, καθυστερήσεις κλπ καθιστώντας τη λύση αναξιόπιστη.

Δημιουργία μετρήσεων εγκάρσιας ταχύτητας (LKF-4): Μία εναλλακτική λύση είναι η δημιουργία μετρήσεων εγκάρσιας ταχύτητας – η οποία είναι η πρώτη παράγωγος του αζιμουθίου πολλαπλασιασμένη επί την απόσταση – και ακολούθως στη δημιουργία μέτρησης ταχύτητας-y. Υπάρχουν κάποιοι εναλλακτικοί τρόποι για να επιτευχθεί αυτό: ο πιο απλός είναι η διατήρηση της διαφοράς των μετρήσεων αζιμουθίου από δύο διαδοχικές σαρώσεις μετρήσεων ή αν το αζιμούθιο είναι διαθέσιμο από άλλη πηγή (για παράδειγμα μέτρηση κάμερας). Άλλη μέθοδος είναι η εισαγωγή ενός προηγούμενου ή παράλληλου (π.χ. μονού αισθητήρα, έκδοση του σχήματος σύντηξης της [3], φίλτρου σταθερής εγκάρσιας επιτάχυνσης πριν από το κύριο φίλτρο το οποίο θα αποσκοπεί κυρίως στην εκτίμηση της εγκάρσιας ταχύτητας. Με την εκτίμηση του ρυθμού μεταβολής της γωνίας αζιμουθίου έχουμε ένα τεσσάρων διαστάσεων διάνυσμα μετρήσεων (σε πολικές ή καρτεσιανές συντεταγμένες) το οποίο εισάγεται στο φίλτρο. Οι εξισώσεις (3.95-97) υπολογίζονται τώρα αναλυτικά χρησιμοποιώντας τις:

$$V_{L} = R \frac{\Delta \theta}{T} , \ \sigma_{VL} = \frac{\Delta \theta}{T} \sigma_{R} + \frac{R}{T} \sigma_{\theta}$$
(3.98)

Λύσεις Particle Filter

Εξετάστηκαν και μέθοδοι Particle filters τα οποία όπως προαναφέρθηκε εκτελούν ακολουθιακή εκτίμηση Monte Carlo βασιζόμενες στην αντιπροσώπευση των κατανομών πιθανοτήτων με σημεία μάζας (particles). Οι παράμετροι που υπεισέρχονται κατά την σχεδίαση ενός particle filter είναι ο αριθμός των δειγμάτων, το διάνυσμα κατάστασης (με όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος, καθώς η επίδοση πέφτει για μεγάλες διαστάσεις διανυσμάτων [4], η πυκνότητα σημαντικότητας (importance density) $q(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{z}_k)$, η ενδιάμεση εκ των προτέρων πιθανότητα $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1})$, και η πιθανότητα $p(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_k)$ που μπορεί να είναι γκαουσσιανή ή όχι. Μια τυπική επιλογή για την πυκνότητα σημαντικότητας είναι να είναι ίση της ενδιάμεσης εκ των προτέρων όταν η βέλτιστη ποσότητα δεν μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά [1].

Ακολουθώντας την [4] αναπτύχθηκε μια σειρά από Particle filters που εφαρμόστηκαν στο πρόβλημα που εξετάζουμε. Σύμφωνα με αυτά που παρουσιάστηκαν ήδη στην ενότητα 3.1 υλοποιήθηκε αρχικά ένα φίλτρο SIS το οποίο δημιουργεί δείγματα με κανονικοποιημένα βάρη. Αυτό παρουσιάζει το πρόβλημα του εκφυλισμού, δηλαδή όλα τα δείγματα εκτός ενός εμφανίζουν αμελητέα βάρη. Η επαναδειγματοληψία λύνει αυτό το θέμα σύμφωνα με τον έλεγχο κατωφλίου της τιμής , $N_{eff} = 1 / \sum_{i=1}^{N} (\mathbf{w}_{k}^{i})^{2}$, με το κατώφλι να τίθεται N/5 με N τον αριθμό των δειγμάτων και \mathbf{w} τα βάρη τους. Το πρώτο φίλτρο που ελέγχθηκε είναι το γενικευμένο φίλτρο Generic (Gen) particle filter [1] που είναι μια έκδοση του SIS με την προσθήκη του βήματος της επαναδειγματοληψίας. Αυτό με τη σειρά του υπόκειται στο πρόβλημα της διαφορετικότητας των δειγμάτων καθώς αρκετά δείγματα επαναλαμβάνονται, το πρόβλημα είναι γνωστό ως πτώχεια των δειγμάτων (impoverishment). Λύση σε αυτό προκύπτει από τον αλγόριθμο Sampling Importance Resampling (SIR) [1][5] ή φίλτρο "bootstrap" το οποίο προκύπτει από το SIS με την πυκνότητα σημαντικότητας είναι να είναι ίση της εκ των προτέρων και την επαναδειγματοληψία να λαμβάνει χώρα σε κάθε σάρωση. Το φίλτρο Auxiliary SIR (ASIR) [1][6] κάνει επαναδειγματοληψία πριν το δείγμα διαδοθεί, δημιουργώντας επιπλέον καθυστέρηση διπλασιάζοντας τον χρόνο που χρειάζεται ο υπολογισμός των βαρών. Η χρήση βελτιωμένης διαφορετικότητας των δειγμάτων είναι η επόμενη λύση με την υλοποίηση του Regularized (Reg) particle filter [4]. Το φίλτρο αυτό είναι παρόμοιο με το generic particle filter με επιπρόσθετα βήματα ομαλοποίησης (regularization) κατά την επαναδειγματοληψία. Η άλλη κατηγορία φίλτρων που υλοποιήθηκαν είναι τα φίλτρα τοπικής γραμμικοποίησης Local Linearization (LL) τα οποία υπολογίζουν την πυκνότητα σημαντικότητας τους με μία σειρά από ΕΚΓ. Αυτό μπορεί να γίνει και με χρήση unscented Kalman φίλτρων, αλλά εδώ επιλέχθηκε η λύση των EKF, αναφερόμενα στο εξής ως (LL-EKF). Η τοπική γραμμικοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί και με χρήση φίλτρων πολλαπλών μοντέλων όμως στην περίπτωση μας το πραγματικό μοντέλο κίνησης στην προσομοίωση είναι ήδη γνωστό.

Βελτίωση στην επίδοση της δειγματοληψίας επιτυγχάνεται με τη χρήση αυτών των περιορισμών στην PDF. Στην περίπτωση μας οι περιορισμοί επιβάλλονται στην θέση που ένας στόχος επιτρέπεται να καταλάβει (τα δείγματα πρέπει να είναι εντός των ορίων του δρόμου) και η ταχύτητες των στόχων δεν επιτρέπεται να ξεπερνούν τα γνωστά όρια μέσα στα οποία κινούνται. Αυτό παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 50: Κατανομή πιθανότητας με περιορισμούς

Στην εικόνα 50 το όχημα με το φαντάφ εικονίζεται στην αφχή των αξόνων στο σημείο (0,0) ενώ το όχημα στόχος φαίνεται με τη μαύφη τελεία πεφίπου στο σημείο (22,-4), και τα κίτφινα σημεία είναι τα 4000 δείγματα που δημιουφγούνται από τον αλγόφιθμο πεφιοφισμένα εντός των οφίων. Τα δείγματα που τοποθετούνται από τον αλγόφιθμο εκτός των οφίων αποφρίπτονται και αντικαθίστανται με άλλα που ικανοποιούν τους πεφιοφισμούς.

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Το σενάφιο της προσομοίωσης αποτελείται από 300 συνεχόμενες σαφώσεις του 0.1 sec με δύο οχήματα το ίδιο όχημα με τον αισθητήρα και το όχημα στόχο. Και τα δύο οχήματα κινούνται σύμφωνα με το μοντέλο σταθεφής επιτάχυνσης με διαφορετικά αρχικά διανύσματα κατάστασης και διαφορετικές εισόδους που επιβάλλονται σε διαφορετικούς χρόνους. Το σενάφιο αποτελείται από δύο κύφιους ελιγμούς που λαμβάνουν χώρα κατά περίπου την 60στη και την 120στη σάφωση. Οι πραγματικές καταστάσεις των οχημάτων μεταφέρονται από το γενικό σύστημα στο σύστημα του αισθητήρα ώστε το όχημα στόχος να δίνεται σε σχετική θέση ως προς το όχημα με τον αισθητήρα. Με αυτόν τον τρόπο αποδίδονται μετρήσεις της γωνίας αζιμουθίου, της ακτινικής απόστασης και της ακτινικής ταχύτητας του οχήματος στόχου. Οι θέσεις των δύο οχημάτων τα όρια του δρόμου και το συνολικό σενάφιο απεικονίζονται στο σχήμα 51. Με μπλε και κόκκινο χρώμα φαίνονται οι θέσεις του οχήματος πλατφόρμας και του οχήματος στόχου αντίστοιχα στο γενικό σύστημα συντεταγμένων. Τα όρια δρόμου επίσης φαίνονται με μαύρο χρώμα. Οι περιορισμοί με βάση τα όρια του δρόμου σε κάθε σάρωση δημιουργούνται με μια τρίτου βαθμού πολυωνυμική συνάρτηση και αποδίδονται απευθείας στον αλγόριθμο ιχνηλασίας.



Εικόνα 51: Το σενάριο προσομοίωσης

Η επίδοση των φίλτρων εξετάζεται με 100 ανεξάρτητες εκτελέσεις κατά Monte Carlo για όλα τα φίλτρα. Τα κριτήρια επίδοσης που χρησιμοποιούνται είναι τα σφάλματα θέσης και ταχύτητας RMS σε *m* και *m/s*, το ποσοστό των απωλειών των ιχνών (ένα ίχνος διαγράφεται και επαναρχικοποείται όταν απομακρύνεται κατά 3μ από την πραγματική θέση) και η σύγκριση της χρονικής καθυστέρησης με αναφορά τον ταχύτερο αλγόριθμο. Οι τυπικές αποκλίσεις των σφαλμάτων μέτρησης που προστέθηκαν στις πραγματικές τιμές των μεταβλητών κίνησης είναι: 1m για την ακτινική απόσταση, 0.005rad για τη γωνία και 2m/s για την ακτινική ταχύτητα. Ο θόρυβος επιτάχυνσης και για τις δύο συντεταγμένες επιλέχθηκε στα 0.05m/s².

Αποτελέσματα φίλτρων Kalman

Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται τα αποτελέσματα της επίδοσης των γραμμικών ή μη γραμμικών φίλτρων Kalman που υλοποιήθηκαν. Όπως αναφέρθηκε το μοντέλο CA χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των τεχνητών δεδομένων και συνεπώς το ίδιο μοντέλο χρησιμοποιείται και για τις εξισώσεις κατάστασης. Το μοντέλο CV παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα με το CA, αλλά η χρήση του άλλου εναλλακτικού μοντέλου που συνήθως χρησιμοποιείται CT (Constant Turn) επιδεινώνει τα αποτελέσματα όπως είναι λογικό. Το σύστημα συντεταγμένων που είναι σύμφωνα με το όχημα πλατφόρμα και όχι σύμφωνα με το κάθε όχημα στόχο είναι ένας άλλος παράγων σφαλμάτων στην μοντελοποίηση των στόχων.

Δύο εκδοχές φίλτρων EKF, τα EKF-1 και EKF-2, για την απευθείας εφαρμογή και την εφαρμογή ψευδομετρήσεων στην θέση υλοποιήθηκαν και εξετάστηκαν. Τρεις εκδοχές φίλτρων IMM επίσης υλοποιήθηκαν, η πρώτη εφαρμογή IMM-1 χρησιμοποιεί δύο φίλτρα EKF-1 (μιας και αυτό είχε την καλύτερη επίδοση) και το ένα από τα δύο να έχει μεγαλύτερο θόρυβο διαδικασίας (0.1m/s²) για την αναγνώριση των ελιγμών. Η άλλη εκδοχή IMM-2 χρησιμοποιεί τα δύο καλύτερα EKF και LKF (που ήταν τα EKF-1 και LKF-4 αντίστοιχα). Τέλος η τρίτη εκδοχή φίλτρου IMM η IMM-3 είναι της ίδιας μορφής με το IMM-1 αλλά χρησιμοποιεί το LKF-4. Τα αποτελέσματα



της διαδικασίας σύγκρισης των φίλτρων περιλαμβάνεται στις εικόνες και στον πίνακα που ακολουθούν.

Εικόνα 52: Σφάλμα θέσης RMS



Εικόνα 53: Σφάλμα ταχύτητας RMS

Πίνακας 8: Επίδοση των λύσεων με βάση τα φίλτρα Kalman

Τύπος φίλτρου	Χοονική καθυστέρηση (κανονικ/νη)	Σφάλμα θέσης RMS (m)	Σφάλμα ταχύτητας RMS (m/s)	Σαρώσεις με απώλειες (%)	Επίδοση	Κατάταξη
EKF-1	1	0.281	0.281	0	1.000	3
EKF-2	1	0.282	0.289	0	0.992	5
LKF-1	1	0.302	0.319	0	0.950	7
LKF-2	1	0.237	0.902	0	0.660	9
LKF-3	1	0.325	0.359	0	0.902	8
LKF-4	1	0.265	0.294	0	1.003	2
IMM-1	1.01	0.278	0.289	0	0.992	4
IMM-2	1.01	0.275	0.280	0	1.003	1
IMM-3	1.01	0.268	0.311	0	0.982	6

Τα μέτρα επίδοσης που χρησιμοποιούνται στην σύγκριση έχουν ως βάση αναφοράς το φίλτρο EKF-1 που έχει επίδοση 1. Το μέτρο αυτό επίδοσης ορίζεται ως:

$$Perf^{-1} = Mean\left(\frac{TD}{1.0}, \frac{PE}{0.281}, \frac{VE}{0.281}, (1-M)\right)$$
(3.99)

όπου TD είναι η χρονική καθυστέρηση, PE η μέση τιμή του RMS σφάλματος θέσης, VE η μέση τιμή του RMS σφάλματος ταχύτητας και Μ το ποσοστό απωλειών (miss) ιχνών. Το μέτρο επίδοσης αυτό ονομάζεται στο εξής ως γενική επίδοση Overall Performance (OP), εάν ο χρονικός όρος παραληφθεί τότε ορίζεται η επίδοση εκτίμησης Estimation Performance (EP). Αυτές τα 4 ή 3 μέτρα θεωρούνται ισοδύναμης σημασίας εδώ, αν και η επίδοση των εκτιμήσεων γενικά είναι μεγαλύτερης σημασίας σε συστήματα ιχνηλασίας. Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα η χρονική καθυστέρηση αυτών των φίλτρων είναι περίπου ισοδύναμη και δεν επηρεάζει πολύ τις επιδόσεις τους.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι τα ΕΚF αποτελούν μια αποδεκτή λύση για το πρόβλημα που εξετάζουμε. Φαινόμενα αστάθειας ή περιορισμένης συνοχής δεν παρουσιαστήκαν κατά τη διάρκεια αυτής της, μελέτης προσομοίωσης. Επίσης τα LKF παρουσίασαν παρόμοιες επιδόσεις με αυτές των ΕΚF εντός του 10% της επίδοσης των τελευταίων με την εξαίρεση του LKF-2. Το LKF-4 εμφανίζεται να αποδίδει κατά λίγο καλύτερα από τα ΕΚF. Από την άλλη πλευρά τα IMM φαίνεται να δίνουν καλύτερες εκτιμήσεις θέσης, το ΙΜΜ-2 δίνει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα από το EKF-1 και συγκρίσιμα με το LKF-4. Το LKF-2 δείχνει εντυπωσιακή απόδοση στην εκτίμηση της θέσης, αλλά οι εκτιμήσεις της ταχύτητας που δίνει είναι καταστροφικές λόγω της ολοκληρωτικής απουσίας πληροφορίας εγκάρσιας ταχύτητας. Τα LKF-1 και δείχνουν παρόμοια αποτελέσματα με τα EKFs και IMM στην επίδοση ταχύτητας μέχρι περίπου τη σάρωση 220, αλλά αμέσως μετά αυτή επιδεινώνεται κατά πολύ. Ο λόγος για τέτοιου είδους συμπεριφορά είναι ότι προφανώς οι υποθέσεις τους δεν ισχύουν μετά από αυτό το σημείο. Συγκεκριμένα με αναφορά στο τελευταίο τμήμα (μετά τη σάρωση 220) στην εικόνα 51 το όχημα στόχος δεν είναι πλέον ευθεία μπροστά στο όχημα πλατφόρμα αφού αυτό βρίσκεται στην αριστερή του πλευρά. Αυτό σημαίνει ότι η εγκάρσια ταχύτητα του στόχου είναι σημαντική, το ίδιο και η γωνία αζιμουθίου και μεταβαλλόμενη και συνεπώς ο ρυθμός μεταβολής της δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι η επίδοση του LKF-1 είναι πολύ καλή στην εκτίμηση της ταχύτητας του σε τέτοιες συνθήκες, παρόλα αυτά σε πραγματικές συνθήκες για να επιτευχθεί τέλεια επίδοση σαν αυτήν απαιτείται τέλεια μοντελοποίηση της δυναμικής του οχήματος, κάτι το οποίο είναι δύσκολο να επιτευχθεί.

Αποτελέσματα Particle Filter

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα particle filters με τους περιορισμούς στην θέση κατά την δημιουργία δειγμάτων που υλοποιήθηκαν είναι τα: Gen, SIR, ASIR, Reg and LL-EKF. Η συνάρτηση πιθανότητας που χρησιμοποιήθηκε για όλα αυτά είναι γκαουσσιανή με τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτές των φίλτρων Kalman. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια πρώτη αρχική προσομοίωση με τη χρήση 1000 δειγμάτων με χρήση όλων των φίλτρων για να δοκιμαστούν οι επιδόσεις τους και να εξαχθούν οι πιο υποσχόμενοι αλγόριθμοι. Αυτό έγινε για την αποφυγή υπερβολικού υπολογιστικού φόρτου, αφού για τους καλύτερους αλγορίθμους θα πραγματοποιούνταν υλοποιήσεις με μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το CV μιας και εξασφαλίζει μικρότερο διάνυσμα κατάστασης και συνεπώς μικρότερη καθυστέρηση και καλύτερη επίδοση. Τα πρώτα αυτά αποτελέσματα εμφανίζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Οι στήλες με τις επιδόσεις για την εκτίμηση μόνο και τη γενική επίδοση αντιστοιχούν σε αυτά που παρουσιάστηκαν ήδη στην εξίσωση (3.99).

Πίνακας 9: .	Αποτελέσματα	για 1000	δείγματα

PF (1000)	Gen	SIR	ASIR	Reg	LLEKF
TD	2.816	2.816	4.974	3.526	3.711
PE (m)	0.437	0.455	0.403	0.505	0.373
VE(m/s)	1.146	1.332	1.295	1.613	1.210
M (%)	0	0	0	0.004	0
Estimation	0.452	0.408	0.426	0.352	0.452
Overall	0.423	0.393	0.333	0.331	0.387

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα σημαντικότερα φίλτρα που αξίζει να ελεγχθούν είναι τα Gen και LL-EKF που είχαν καλύτερη επίδοση στις εκτιμήσεις που παρείχαν, αν και η γενική επίδοση του LL-EKF δεν είναι τόσο καλή αφού αργεί σημαντικά. Η γενική επίδοση (με την χρονική καθυστέρηση επίσης να λαμβάνεται υπόψη) κατεβάζει το LL-EKF σε παρόμοια επίπεδα με αυτά του SIR, συνεπώς το Gen είναι αυτό που αποδείχθηκε το καλύτερο. Για αυτά τα δύο PF, πραγματοποιήθηκαν εκτελέσεις με αυξανόμενο αριθμό δειγμάτων και πρέπει να σημειωθεί ότι με σχεδόν τον τριπλό και παραπάνω χρόνο που απαιτεί ένα EKF μόνο το 50% της επίδοσης του μπορεί να επιτευχθεί. Η επίδοση αυτών των δύο φίλτρων σε χρονική καθυστέρηση και στην επίδοση τους φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.

4000

5000



Εικόνα 54: Καθυστέρηση των PF σε σχέση με τον αριθμό των δειγμάτων



Η επίδοση και η χρονική καθυστέρηση είναι με σημείο αναφοράς το EKF-1. Η εικόνα 54 δείχνει ότι η αύξηση του αριθμού των δειγμάτων αυξάνει υπερβολικά την χρονική καθυστέρηση, όπως άλλωστε αναμένεται. Η εικόνα 55 παρουσιάζει τα μέτρα επίδοσης των δύο φίλτρων. Είναι φανερό ότι το μέτρο OP αποτυγχάνει εντελώς λόγω της τεράστιας καθυστέρησης που προκαλείται με την αύξηση των δειγμάτων, την ίδια στιγμή και η EP δεν φαίνεται να αυξάνει σημαντικά. Το Gen δείχνει μία πολύ μικρή αύξηση με την αύξηση των δειγμάτων, αν και το LL-EKF φαίνεται να έχει φτάσει το μέγιστο όριο της επίδοσης του. Ιδιαίτερα η εκτίμηση της ταχύτητας που δίνουν είναι πολύ κακή.

Οι αιτίες της αποτυχίας των αλγορίθμων αυτών μπορεί να είναι: μη επαρκής αριθμός δειγμάτων, οι αυστηροί περιορισμοί κατά τη δημιουργία των δειγμάτων που εφαρμόστηκαν σε φίλτρα με βελτιωμένη πυκνότητα σημαντικότητας (όπως τα Reg και LL-EKF), δεν τεχνικές επαναδειγματοληψίας χρησιμοποιήθηκε κάποια από τις βελτιωμένες που χρησιμοποιούνται πλέον, και σημαντικότερη ότι η έκταση της μη γραμμικότητας του προβλήματος δεν είναι τόσο μεγάλη και τα φίλτρα Kalman αποδίδουν πολύ καλά σε αυτήν την περίπτωση. Πιθανόν κάποια καλύτερη έκδοση PF (όπως το MM-PF) να έδινε καλύτερα αποτελέσματα, αν και η τεράστια χρονική καθυστέρηση που προκαλούν αυτές οι τεχνικές τις κάνουν ανεπαρκείς για τις εφαρμογές που εξετάζουμε.

Συμπεράσματα

Από την μελέτη προσομοίωσης που προηγήθηκε εξετάστηκε η επίδοση μια σειράς από φίλτρα με αναφορά σε ένα κοινό σενάριο για ένα σύνηθες μη γραμμικό πρόβλημα φιλτραρίσματος ιχνηλασίας ραντάρ και έδωσε σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τις επιδόσεις και την χρησιμότητα του κάθε φίλτρου.

Οι συγκρίσεις έδειξαν ότι τα φίλτρα Kalman είναι μακράν τα καλύτερα σε αυτό το πρόβλημα και συγκεκριμένα τα IMM-2, LKF-4 και EKF-1. Τα Particle Filters δεν φθάνουν σε καμία περίπτωση τα επίπεδα αυτών των φίλτρων όσον αφορά την εκτίμηση που δίνουν και επιπροσθέτως η καθυστέρηση που εισάγεται είναι εξαιρετικά υπερβολική για ένα σύστημα ιχνηλασίας πραγματικού χρόνου. Αυτό συμβαίνει επειδή τα συστήματα οδικής ασφάλειας απαιτούν ταχύτατη επεξεργασία και λήψη αποφάσεων μιας και η έγκαιρη χρονική απόκριση είναι μεγάλης σημασίας. Τυπικοί χρόνοι απόδοσης μετρήσεων από ένα LRR είναι 0.1s και ο χρόνος που απαιτεί ένα σύστημα επεξεργασίας βασισμένο σε φίλτρο Kalman (εξαρτώμενο και από των αριθμό των στόχων) μπορεί να φθάσει τα 30ms.



Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα της επίδοσης στην εκτίμηση της θέσης και της ταχύτητας για το σύνολο του σεναρίου προσομοίωσης και φαίνονται τα καλύτερα φίλτρα που προέκυψαν από αυτήν τη μελέτη. Με πράσινο χρώμα φαίνεται επιπροσθέτως η RMS τιμή του σφάλματος μέτρησης. Το μεγάλο RMS σφάλμα μέτρησης της ταχύτητας των μετρήσεων οφείλεται στην ολοκληρωτική έλλειψη μετρήσεων της εγκάρσιας συνιστώσας της ταχύτητας. Στα σχήματα φαίνονται επίσης οι δύο σχετικοί ελιγμοί των οχημάτων περίπου τις χρονικές στιγμές σαρώσεων 60 και 120, ιδίως στην εικόνα της ταχύτητας. Οι επιδόσεις των τριών καλύτερων φίλτρων είναι περίπου η ίδια αν και οι μέσες τιμές του πίνακα 8 δείχνουν το IMM-2 να είναι ελαφρώς καλύτερο, αυτό φαίνεται κυρίως στην εικόνα της ταχύτητας και ιδιαίτερα στις κορυφές της εκτίμησης θέσης αν και ξεπερνά το σφάλμα της εκτίμησης του LKF-4 προς το τέλος. Σε μια εφαρμογή πραγματικού χρόνου κάποιο από τα παραπάνω φίλτρα φάνηκε καθαρά ότι αποτελεί μια αξιόπιστη λύση στο πρόβλημα που εξετάζεται.

Πρακτικές εφαρμογές

Συστήματα ιχνηλασίας αισθητήρα LRR υλοποιήθηκαν για μια σειρά από τέτοιου είδους αισθητήρες στα πλαίσια της εργασίας που περιγράφεται εδώ. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η περιγραφή ενός πλήρους συστήματος ιχνηλασίας που εφαρμόστηκε για το σύστημα LATERAL SAFE με τις προδιαγραφές του να φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Module	Structure	Max num of struct	nr	Name of value in the struct	Description	Coordinate system	Range	Туре	Unit
	meas	1	1	objNum	number of objects	-	[032]	int	
LRR	LRR_	1	1	time	time stamp	-	-	float	s
R			1	id	0 means no object	-	[063]	int	
(LR	÷		1	flagMeas	0 -> tracked, 1 -> measured	-	{0,1}	int	
Р1	ojec		1	dist	distance	LRR system	[0255]	float	m
	, ,	32	1	latOffset	lateral offset	LRR system	[-256256]	float	m
	а В В В В В В В В В В В В В В В В В В В		1	radialVel	relative radial velocity	LRR system	[-128128]	float	m/s
	_		1	varLatOff	varaince of lat. Offset	LRR system	[02]	float	m2
			1	radialAcc	relative radial acceleration	LRR system	[-1616]	float	m/s2

Πίνακας 10: Προδιαγραφές δεδομένων αισθητήρα LRR2

Η έξοδος του συστήματος ιχνηλασίας του συγκεκριμένου αισθητήρα και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του συστήματος LATERAL SAFE είναι μια σειρά (λίστα) αντικειμένων με τις ακόλουθες παραμέτρους: αριθμό αντικειμένων, θέση X [m], θέση Y [m], σχετική ταχύτητα X [m/s], σχετική ταχύτητα Y [m/s], σχετική επιτάχυνση X [m/s²], σχετική επιτάχυνση Y [m/s²], ID αντικειμένου, μήτρα συνδιακύμανσης σφάλματος εκτίμησης, και κάποιο (άλλο) επίπεδο εμπιστοσύνης.

Το σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα LRR απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 58: Σύστημα συντεταγμένων ιχνηλάτη LRR

Ο αισθητήρας LRR είναι εγκατεστημένος στην πίσω πλευρά του οχήματος και συγκεκριμένα 0.9m από την αριστερή του πλευρά (στις κατά ISO συντεταγμένες του οχήματος στα 2.15m) η κατεύθυνση στόχευσης του αισθητήρα είναι 6 μοίρες στα αριστερά σε σχέση με το διαμήκη άξονα του οχήματος. Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα έχει το διαμήκη άξονα του x με θετικές τιμές προς τα πίσω σε σχέση με την κατεύθυνση πορείας του οχήματος, ο κάθετος άξονας y έχει τα θετικά του προς τα αριστερά της περιοχής κάλυψης του αισθητήρα.

Εξισώσεις κατάστασης και μέτρησης

Το βασικό μοντέλο κίνησης που επιλέχθηκε για την εφαρμογή ιχνηλασίας του αισθητήρα είναι το μοντέλο σταθερής επιτάχυνσης CA. Το διάνυσμα κατάστασης είναι το ακόλουθο:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x & V_x & a_x & y & V_y & a_y \end{bmatrix}^T$$
(3.100)

με V και a να αντιπροσωπεύουν τα μεγέθη ταχύτητας και επιτάχυνσης, αντίστοιχα. Η κίνηση στους άξονες x και y υποτίθενται ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Με

$$\mathbf{x}_{CA-x} = \begin{bmatrix} x & V_x & a_x \end{bmatrix}^T \text{ και } \mathbf{x}_{CA-y} = \begin{bmatrix} y & V_y & a_y \end{bmatrix}^T$$
(3.101)
να είναι τα δύο διανύσματα, αντίστοιχα. Η γραμμική μήτρα μετάβασης για κάθε ένα από αυτά να
είναι:

$$\mathbf{F}_{CA} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^{2}/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.102)
$$\mathbf{Q}_{CA} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}T^{4} & \frac{1}{2}T^{3} & \frac{1}{2}T^{2} \\ \frac{1}{2}T^{3} & T^{2} & T \\ \frac{1}{2}T^{2} & T & 1 \end{bmatrix} \cdot \sigma_{a}^{2}$$
(3.103)

όπου σ_α είναι η τυπική απόκλιση του θορύβου διαδικασίας και Τ είναι ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών εισόδων δεδομένων και συνεπώς ο κύκλος επανάληψης του συστήματος ιχνηλασίας:

$$T = time(k) - time(k-1), [sec]$$
(3.104)

Το διάνυσμα μέτρησης που χρησιμοποιείται στην ιχνηλασία LRR είναι:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} x & y & V_R \end{bmatrix}^T \tag{3.105}$$

Η ακτινική ταχύτητα που εισάγει τη μη γραμμικότητα στο σύστημα, μιας και η μέτρηση θέσης δίνεται από τον αισθητήρα σε καρτεσιανές συντεταγμένες απευθείας:

$$V_{R} = \frac{x \cdot V_{x} + y \cdot V_{y}}{\sqrt{x^{2} + y^{2}}}$$
(3.106)

Η μήτρα μετρήσεων για το διάνυσμα κατάστασης του μοντέλου CA και χρησιμοποιώντας προσέγγιση με πρώτου βαθμού παραγώγους είναι:

$$\widetilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ h_{31} & h_{32} & 0 & h_{34} & h_{35} & 0 \end{bmatrix}$$
(3.107)

Όπου:

$$h_{31} = \frac{1}{x^2 + y^2} \cdot \left(V_X \cdot \sqrt{x^2 + y^2} - \left(x \cdot V_X + y \cdot V_Y \right) \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right)$$
(3.108)

$$h_{34} = \frac{1}{x^2 + y^2} \cdot \left(V_Y \cdot \sqrt{x^2 + y^2} - \left(x \cdot V_X + y \cdot V_Y \right) \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right)$$
(3.109)

$$h_{32} = x / \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3.110}$$

$$h_{35} = y / \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3.111}$$

Εάν σ_x^2 , σ_y^2 , και σ_{VR}^2 είναι οι προδιαγραμμένες διακυμάνσεις των μετρήσεων είναι:

$$\mathbf{COV}(\mathbf{w}_{k}) = \begin{bmatrix} \sigma_{X}^{2} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y}^{2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{VR}^{2} \end{bmatrix}$$
(3.112)

Σύνδεση δεδομένων

Όπως έχει περιγραφεί και αλλού το πρόβλημα της σύνδεσης δεδομένων αφορά κυρίως στην ανάθεση των νέων μετρήσεων του αισθητήρα σε κάποιο από τα προϋπάρχοντα ίχνη. Η ορολογία που χρησιμοποιείται στη συνέχεια είναι N ο αριθμός των ιχνών, M ο αριθμός των μετρήσεων στην τρέχουσα σάρωση του συστήματος k. Για να πραγματοποιηθεί η δημιουργία της μήτρας ανάθεσης πριν την επίλυση του προβλήματος της σύνδεσης δεδομένων επιβάλλεται ένας έλεγχος μέσω θυρών για να σχηματίσουν τα ζεύγη παρατηρήσεων και ιχνών. Το μέτρο εγγύτητας που χρησιμοποιείται υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$a_{ij} = G_{ij} - d_{ij}^2 \tag{3.113}$$

Με G_{ij} να είναι η έκταση της θύρας και η στατιστική απόσταση d_{ij}^2 να είναι ένα μέτρο συσχέτισης μεταξύ του ίχνους i και της μέτρησης j, γνωστή ως απόσταση Mahalanobis [18]. Αυτή ορίζεται ως:

$$d^2 = \mathbf{inn}^T \cdot \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{inn}$$

(3.114)

Το θέμα της ανάθεσης είναι αυτό της εύρεσης των καλύτερων ζευγών μεταξύ ιχνών και μετρήσεων ελαχιστοποιώντας μια συνάρτηση κόστους, με περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την μαθηματική τυποποίηση του προβλήματος αυτού να αναφέρονται στο κεφάλαιο 4.

Ακολουθούνται δύο μέθοδοι: η μέθοδος GNN και η πιθανοτική μέθοδος JPDA. Η πρώτη είναι μια προσέγγιση ένα προς ένα για την ανάθεση μετρήσεων σε ίχνη ενώ η δεύτερη έχει τη δυνατότητα ανάθεσης περισσότερων από μία μετρήσεων σε ένα ίχνος, και μία μέτρηση είναι δυνατόν να ενημερώνει πάνω από ένα ίχνη με διαφορετικά πιθανοτικά βάρη. Η μέθοδος σύνδεσης δεδομένων για το σύστημα ιχνηλασίας του LRR λειτουργεί σε δύο 2 modes GNN και JPDA, με υλοποίηση αλγορίθμων για 1-προς-1 και Ν-προς-1 ανάθεση μέτρησης σε ίχνος. Η τελική απόφαση για το υποσύστημα DA που θα ακολουθηθεί εξαρτάται από τον έλεγχο της επίδοσης καθενός από αυτά βασισμένο σε πραγματικά δεδομένα εξάλλου ο αλγόριθμος μπορεί εύκολα να αλλάζει από μια λειτουργία στην άλλη.

Διαχείριση ιχνών

Ως πρόβλημα διαχείρισης ιχνών αναφέρεται το πρόβλημα της αρχικοποίησης, επιβεβαίωσης και διαγραφής ενός ίχνους. Αυτό γίνεται με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για τις δύο διαφορετικές μεθόδους σύνδεσης δεδομένων που χρησιμοποιούνται.

Αλγό επιβεβαίωσης-διαγ εαφής στην GNN

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της 1-1 ανάθεσης ένα ίχνος που έχει συσχετιστεί με μία μέτρηση έχει μία ενημέρωση "hit" στην τρέχουσα σάρωση, αλλιώς έχει μία απώλεια "miss". Οι τιμές των "hits" και "misses" αποθηκεύονται στην πληροφορία που κατέχει το κάθε ίχνος. Η πληροφορία κάθε ίχνους αποτελείται από το διάνυσμα κατάστασης, τη μήτρα συνδιακύμανσης και το διάνυσμα ID. Πιο συγκεκριμένα το διάνυσμα έχει ως εξής:

[conf	${f E} \pi$ ιβεβαιωμένο ή αβέβαιο	
	id	ID αντικειμένου	
	firstObs	Αριθμός σάρωσης πρώτης παρατήρησης	
	currScan	Αριθμός τρέχουσας σάρωσης	
ID =	hits	Συνολικός αριθμός hits (συσχετίσεις με μετρήσεις)	
	miss	Συνολικός αριθμός misses	
	0,	Παρατήρηση στην τρέχουσα σάρωση– D+1 (0 ή 1)	
	O_2	Παρατήρηση στην τρέχουσα σάρωση – D+2 (0 ή 1)	
	- 2	(για τις D τελευταίες σαρώσεις)	
	0	Παρατήρηση στην τρέχουσα σάρωση (0 ή 1)	
I	currscan _		(0.445

(3.115)

Για επιβεβαίωση και διαγραφή ιχνών χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος που δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Όταν ένα νέο ίχνος επιβεβαιώνεται ή ένα υπάρχον ίχνος διαγράφεται η λίστα των ιχνών ανανεώνεται αναλόγως. Η διαχείριση ιχνών είναι το τελευταίο βήμα πριν το βήμα του φιλτραρίσματος, αμέσως μετά για κάθε ίχνος στο οποίο έχει συνδεθεί μία μέτρηση πραγματοποιείται ενημέρωση του σύμφωνα με τις εξισώσεις του φίλτρου.



Εικόνα 59: Αλγόριθμος διαχείρισης ιχνών (GNN DA)

Διαχείριση ιχνών JPDA

Στην πιθανοτική μέθοδο σύνδεσης δεδομένων υπολογίζονται πιθανότητες ύπαρξης των ιχνών με κανονικοποίηση των βαρών σύνδεσης για κάθε υπάρχον ίχνος σύμφωνα με όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις στην τρέχουσα σύνδεση. Εάν οι πιθανότητες αυτές είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι – π.χ. 0.5 – τότε το ίχνος διαγράφεται. Στην μέθοδο διαχείρισης ιχνών για την περίπτωση της JPDA όλα τα ίχνη θεωρούνται επιβεβαιωμένα.



Εικόνα 60: Αλγόριθμος διαχείρισης ιχνών (JPDA DA)

Αρχικοποίηση ιχνών (GNN DA)

Το θέμα της αρχικοποίησης ιχνών στην ιχνηλασία είναι μεγάλης σημασίας. Στην περίπτωση των δεδομένων του ραντάρ μακρινού πεδίου που παρουσιάζεται εδώ κάθε μέτρηση που δεν συσχετίστηκε με κάποιο από τα υπάρχοντα ίχνη γίνεται αυτόματα ένα νέο ίχνος και αρχικοποιείται σύμφωνα με τις εξισώσεις που ακολουθούν. Στην διαδικασία της αρχικοποίησης μία μέτρηση με διάνυσμα $\mathbf{z} = \begin{bmatrix} x_m & y_m & V_{Rm} \end{bmatrix}^T$ πρέπει να σχηματίσει ένα νέο ίχνος με διάνυσμα κατάστασης, διάνυσμα ID και μήτρα συνδιακύμανσης. Αρχικά ορίζονται οι παρακάτω ποσότητες:

$$V_{L} = 0.5 m/s \quad \mu\varepsilon \quad \sigma_{VL} = 3m/s$$

$$a_{x} = 0.1m/s^{2} \quad \mu\varepsilon \quad \sigma_{ax} = 0.5m/s^{2}$$

$$a_{y} = 0.03m/s^{2} \quad \mu\varepsilon \quad \sigma_{ay} = 0.3m/s^{2}$$

$$\theta = \tan^{-1}(y/x)$$

Τα στοιχεία του αρχικού διανύσματος κατάστασης $\mathbf{x}_{0|0}$ ορίζονται ως ακολούθως:

$$\mathbf{x}_{0|0}(1) = x_m$$

$$\mathbf{x}_{0|0}(2) = V_{Rm} \cos \theta - V_L \sin \theta$$

$$\mathbf{x}_{0|0}(3) = a_x$$

$$\mathbf{x}_{0|0}(4) = y_m$$

$$\mathbf{x}_{0|0}(5) = V_{Rm} \sin \theta + V_L \cos \theta$$

$$\mathbf{x}_{0|0}(6) = a_y$$
(3.116)

Το διάνυσμα ID της (3.115) συμπληρώνεται με το νέο ίχνος να αποθηκεύεται ως αβέβαιο και έχοντας 1 και 0 misses. Η μήτρα συνδιακύμανσης ορίζεται σύμφωνα με τις παρακάτω παραμέτρους:

$$\mathbf{P}_{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{yxx} & p_{yyyx} & 0 & p_{yyy} & p_{yyyy} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ p_{yyx} & p_{yyyx} & 0 & p_{yyy} & p_{yyyy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{P}_{0|0} = \mathbf{P}_{1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{x}^{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{VR}^{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{ax}^{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{VL}^{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{ay}^{2} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}_{1} \qquad (3.117)$$

όπου:

$$p_{vxx} = (-V_{Rm}\sin\theta - V_{L}\cos\theta) \cdot x_{m}^{2} \cdot \sigma_{x}^{2} / (x_{m}^{2} + y_{m}^{2})$$

$$p_{vxyx} = \cos\theta$$

$$p_{vxy} = (-V_{Rm}\sin\theta - V_{L}\cos\theta) \cdot y_{m}^{2} \cdot \sigma_{y}^{2} / (x_{m}^{2} + y_{m}^{2})$$

$$p_{vxyy} = -\sin\theta$$

$$p_{vyx} = (V_{Rm}\cos\theta - V_{L}\sin\theta) \cdot x_{m}^{2} \cdot \sigma_{x}^{2} / (x_{m}^{2} + y_{m}^{2})$$

$$p_{vyyx} = \sin\theta$$

$$p_{vyy} = (V_{Rm}\cos\theta - V_{L}\sin\theta) \cdot y_{m}^{2} \cdot \sigma_{y}^{2} / (x_{m}^{2} + y_{m}^{2})$$

$$p_{vyyy} = \cos\theta$$

Για να εξασφαλιστεί ότι η αρχική εκτίμηση δεν θα έχει υπερβολικό σφάλμα που θα διατηρηθεί για αρκετό χρόνο [2] επιβάλλεται η συνθήκη ότι η αρχική συνδιακύμανση θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε:

$$\mathbf{x}_{0|0}^{T} \cdot \mathbf{P}_{0|0}^{-1} \cdot \mathbf{x}_{0|0} \le c_{1} \tag{3.118}$$

όπου c_1 είναι το ανώτατο ό
ριο της κατανομής χ^2 με εμπιστοσύνη 95% και n_x βαθ
μούς ελευθερίας.

Φιλτράρισμα

Η τεχνική φιλτραρίσματος για τα δεδομένα του LRR είναι το EKF, όπως ορίστηκε στις εξισώσεις (3.18-29). Κατά την φάση των αρχικών δοκιμών ελέγχθηκε και η επίδοση συστημάτων IMM και particle filters, όμως η μέθοδος φιλτραρίσματος που επελέγη είναι ένα σχήμα EKF με μοντέλο το CA και δύο μεθόδους για DA την GNN ή την JPDA.

Στροφή συστήματος συντεταγμένων

Ένας όρος για να συμπληρώσει την αλλαγή από σάρωση σε σάρωση τους συστήματος αναφοράς είναι απαραίτητος για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και υπολογίζεται υποθέτοντας ένα μοντέλο κυκλικής κίνησης του οχήματος [10]. Αυτός απαιτεί τη χρήση των μετρήσεων της γωνιακής ταχύτητας ω και της ταχύτητας υ του ιδίου οχήματος.

Αυτή η αλλαγή συστήματος συντεταγμένων φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το ίδιο όχημα ταξιδεύει από το σημείο Α στο σημείο Β, από το σύστημα συντεταγμένων x-y στο σύστημα x'-y' επί του κυκλικού τομέα ΑΒ με μήκος S και τον κύκλο να έχει ακτίνα R. Τα ανιχνευόμενα αντικείμενα όταν ο αισθητήρας είναι στο σημείο Α πρέπει να διορθωθούν καθώς στο μεταξύ το ίδιο όχημα και συνεπώς ο αισθητήρας θα έχει φθάσει στο σημείο Β.



Εικόνα 61: Κυκλική μετατόπιση του συστήματος συντεταγμένων του ιδίου οχήματος

Είναι:

$$S = \upsilon \cdot T, R = \upsilon / \omega \text{ for } \gamma = S / R = \omega \cdot T \text{ [rad]}$$
 (3.119)

και:

$\Delta x = R \cdot \left(1 - \cos \gamma\right)$	(3.120)
$\Delta y = R \cdot \sin \gamma$	(3.121)

Ο όρος που θα πρέπει να προστεθεί στις συντεταγμένες της θέσης στο διάνυσμα κατάστασης για να ληφθεί υπόψη η σχετική κίνηση του ιδίου οχήματος και η στροφή του συστήματος κατά γ rad υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 - \Delta x \\ y_0 - \Delta y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$$
(3.122)

με (x_0, y_0) να είναι η προβλεπόμενη θέση για ένα ίχνος από τον αισθητήρα όταν αυτός βρίσκεται στο σημείο Α. Για την επόμενη σάρωση όταν ο αισθητήρας θα βρίσκεται στο σημείο Β ο όρος της εξίσωσης 3.122 προστίθεται στα στοιχεία θέσης του διανύσματος κατάστασης.

Γενική εικόνα του αλγορίθμου ιχνηλασίας LRR και αποτελέσματα

To block διάγραμμα του αλγορίθμου ιχνηλασίας LRR δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 62: Αλγόριθμος ιχνηλασίας LRR
Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτέλεσμα της επίδοσης του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε με χρήση δεδομένων προσομοίωσης και πραγματικών δεδομένων. Τα πρώτα αφορούν ελέγχους της επάρκειας του αλγορίθμου για ένα πρόβλημα φιλτραρίσματος με κατάλληλο (matched) μοντέλο, ενώ τα δεύτερα αφορούν δοκιμές της επάρκειας του συστήματος όσον αφορά τη συνάφειά του και τη χρονική καθυστέρηση των αλγορίθμων.

Αποτελέσματα προσομοίωσης (φιλτράρισμα)

Με αναφορά στο σενάριο προσομοίωσης του συστήματος LATERAL SAFE που αναπτύχθηκε (περιγραφή στην ενότητα 5.1) πραγματοποιήθηκαν δοκιμές της επίδοσης του αλγορίθμου ιχνηλασίας LRR. Μόνο ένα αντικείμενο επελέγη για τον έλεγχο της επάρκειας του αλγορίθμου με σύγκριση μετρούμενων και εκτιμώμενων σφαλμάτων. Το σενάριο αποτελείται από 300 σαρώσεις του ανιχνευόμενου από το LRR αντικειμένου και επιδεικνύονται τα Root Mean Square (RMS) Errors που υπολογίζονται με βάση τις πραγματικές τιμές του στόχου.



Εικόνα 63: Εκτιμήσεις θέσης του αντικειμένου LRR (προσομοίωση)







Εικόνα 64: Εκτιμήσεις ταχύτητας του αντικειμένου LRR (προσομοίωση)

Τα αποτελέσματα των παραπάνω εικόνων δείχνουν ότι το ΕΚF εκτιμά ικανοποιητικά το σφάλμα των μετρήσεων του LRR. Επιπλέον δοκιμές με χρήση πραγματικών δεδομένων παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.

Αποτελέσματα με πραγματικά δεδομένα (καθυστέρηση, συνάφεια, απόκρυψη)

Για το σύστημα ιχνηλασίας LRR που ήδη περιγράφηκε εξετάστηκαν οι δύο περιπτώσεις CA-GNN και CA-JPDA) όσον αφορά τη χρονική καθυστέρηση που εισάγουν καθώς και τη συνάφεια του φιλτραρίσματος τους. Επίσης παρουσιάζεται σε αυτήν την παράγραφο και μια τεχνική αποφυγής των περιπτώσεων της απόκουψης από τον αισθητήρα οχημάτων από άλλα μπροστά από αυτά. Τα δεδομένα του σεναρίου δοκιμών αποτελούνται από 700 σαρώσεις του αισθητήρα, με το ραντάρ να είναι τοποθετημένο στην πίσω πλευρά του οχήματος.

Χρονική καθυστέρηση

Για τη αποτίμηση της χρονικής καθυστέρησης των δύο εκδοχών του αλγορίθμου μετρήθηκαν οι καθυστερήσεις ανά επιμέρους συνάρτηση της ιχνηλασίας (σύνδεση δεδομένων, διαχείριση ιχνών και φιλτράρισμα) ως προς τον αριθμό των ανιχνευόμενων αντικειμένων.





α. Μέση καθυστέρηση ανά συνάρτηση, για διαφορετικούς
 αριθμούς ιχνών

β. Μέσο ποσοστό καθυστέρησης ανά συνάρτηση, για διαφορετικούς αριθμούς ιχνών

Εικόνα 65: Χρονική καθυστέρηση για την περίπτωση ιχνηλασίας LRR GNN-CA



Εικόνα 66: Χρονική καθυστέρηση για την περίπτωση ιχνηλασίας LRR JPDA-CA

Αυτά τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά ανά συνάρτηση και για καθεμία από τις δύο τεχνικές ιχνηλασίας που υλοποιήθηκαν περιλαμβάνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Όσον αφορά τον αριθμό των ιχνών πρέπει να σημειωθεί ότι στο σενάριο που εξετάστηκε η μέθοδος JPDA έχει συγκριτικά μικρό αριθμό περιπτώσεων με εμφάνιση 4 και 5 ιχνών συνεπώς για αυτές τις τιμές τα αποτελέσματα δεν είναι στατιστικά αξιόπιστα.

Όπως αναμενόταν η μέθοδος JPDA είναι σε γενικές γραμμές πιο απαιτητική σε χρόνο λόγω της διπλάσιας σχεδόν καθυστέρησης της για του υπολογισμούς των εξισώσεων του φίλτρου και φυσικά κυρίως λόγω των καθυστερήσεων της πιο απαιτητικής σύνδεσης δεδομένων που έχει. Η πιθανοτική σύνδεση δεδομένων καλεί εσωτερικά τον αλγόριθμο της GNN αρκετές φορές για τις υπομήτρες του αλγορίθμου όταν ο αριθμός των ιχνών είναι μεγάλος, όμως στην περίπτωση που παρουσιάζεται εδώ και ο αριθμός των ιχνών είναι από 1-5 αυτό δεν είναι προφανές. Τα αποτελέσματα αυτά καθώς και άλλα στη συνέχεια έδειξαν ότι η μέθοδος GNN είναι προτιμότερη της JPDA μιας και ο αισθητήρας που εξετάζουμε δεν έχει υπερβολικό αριθμό θορύβου και συνήθως μία παρατήρηση αντιστοιχεί σε ένα μόνο πραγματικό όχημα στόχο.

Συνάφεια φίλτρου

Εφαρμόστηκαν οι δοκιμές συνάφειας όπως ορίστηκαν στην [2] για ελέγχους πραγματικού χρόνου, που παρουσιάστηκαν ήδη στην 1^η ενότητα αυτού του κεφαλαίου. Το τεστ πόλωσης είναι δυνατόν να αναγνωρίσει από που προέρχεται ένα τέτοιο σφάλμα ώστε να οδηγήσει σε αναθεώρηση της σχεδίασης του φίλτρου έως ότου τα όρια που τίθενται από αυτά τα τεστ να μην ξεπερνόνται. Οι κύριες παράμετροι που υπεισέρχονται σε αυτήν την διαδικασία ρύθμισης (tuning) του φίλτρου είναι οι διακυμάνσεις του θορύβου επιτάχυνσης σε x και y.

Όταν ελέγχονται δεδομένα πραγματικού χρόνου οι πραγματικές τιμές των στόχων δεν είναι διαθέσιμες για να υπολογιστούν άλλα μέτρα όπως τα σφάλματα RMS που παρουσιάστηκαν προηγουμένως και τα τεστ συνάφειας είναι μια τυπική λύση. Επιλέχθηκε ένας στόχος που διατηρείται για αρκετό χρόνο ώστε να ικανοποιούνται οι προαπαιτήσεις των εξισώσεων 3.47-54 για κάθε μέθοδο φιλτραρίσματος και έγινε έλεγχος offline για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου κίνησης και παραμέτρων θορύβων διαδικασίας.

Οι καλύτερες τιμές που επελέγησαν ρυθμίζοντας ανάλογα τις παραμέτρους ήταν θόρυβος επιτάχυνσης στον x 0.3m²/s⁴ και στον y 1m²/s⁴. Έγινε προσπάθεια όλες οι τιμές να είναι εντός των ορίων του διαστήματος εμπιστοσύνης 95% της κατανομής χ².

Όσον αφορά το τεστ αυτοσυσχέτισης και λευκότητας θορύβου επιτεύχθηκαν οι τιμές -0.01987 για τον x, 0.1473 για την VR και 0.798 για τον y, με τα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης για 95% να είναι [-0.20894,0.20894], το οποίο επιτεύχθηκε μόνο για την ακτινική ταχύτητα και την θέση x.



Εικόνα 68: Μέτρα συνάφειας για έναν στόχο LRR στην περίπτωση GNN-EKF

Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και στον ιχνηλάτη JPDA-EKF όπου διαπιστώθηκε ότι το αντικείμενο επιβίωσε για περισσότερο χρόνο συγκριτικά με τη GNN. Συγκεκριμένα για 210 σαρώσεις σε σχέση με τις 90, μια ακόμα ένδειξη της υπεροχής σε αυτόν τον τομέα της πιθανοτικής μεθόδου σύνδεσης δεδομένων. Οι υπολογισμοί των κριτηρίων είναι σε αυτήν την περίπτωση ήταν πιο πολύπλοκοι με την προσπάθεια να διατηρηθεί η συνάφεια αρκετά δυσκολότερη με το κύριο βάρος στη διατήρηση του 1^{ου} κριτηρίου και τις τιμές που προέκυψαν να είναι θόρυβος επιτάχυνσης για x και y, 0.01 και 0.05, αντίστοιχα. Τα κριτήρια λευκότητας και NIS δεν κατορθώθηκε να ικανοποιηθούν. Η αύξηση του θορύβου διαδικασίας οδηγεί στην αυτοσυσχέτιση να είναι εντός των ορίων αλλά το αντίθετο να συμβαίνει με το NIS και αντίστροφα.



Εικόνα 69: Μέτρα συνάφειας για έναν στόχο LRR στην περίπτωση JPDA-EKF

Γενικά πρέπει να σημειωθεί ότι η απόδοση από τον αισθητήρα απευθείας μετρήσεων θέσης σε καρτεσιανό σύστημα και όχι των ευθέων μετρήσεων σε πολικές συντεταγμένες δημιουργεί αρκετά προβλήματα στην σχεδίαση του φίλτρου και στον έλεγχο της συνάφειας του. Όπως προαναφέρθηκε η τελική μέθοδος που επελέγη ήταν η GNN-EKF που αποδίδει καλύτερα στα τεστ συνάφειας και αποδείχθηκε και επαρκής στους άλλους ελέγχους.

Αποφυγή απόκρυψης στόχων

Αναπτύχθηκε μια επιπρόσθετη τεχνική για την αποφυγή διαγραφής επιβεβαιωμένων στόχων που έχουν απώλεια μετρήσεων λόγω απόκρυψης τους από την στόχευση του αισθητήρα λόγω άλλων προπορευόμενων οχημάτων. Ο αλγόριθμος διαγραφής ιχνών δεν εκτελείται για τα ίχνη τα οποία έχουν αναγνωριστεί ως αποκρυμμένα, αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των "miss" δεν αυξάνει και το ίχνος ενημερώνεται μόνο από το μοντέλο κίνησης. Στην ακόλουθη εικόνα δείχνεται μια ακολουθία από σχήματα όπου φαίνεται αυτή η διαδικασία μη διαγραφής ίχνους στη περίπτωση απόκρυψης.

Η εικόνα περιλαμβάνει μια ακολουθία 8 σαρώσεων του αισθητήρα LRR. Στην σάρωση με αριθμό 119 το ίχνος 1 επελέγη από τον αλγόριθμο σαν όχημα που πιθανόν αποκρύβει άλλα οχήματα πίσω από αυτά. Το ίχνος με ταυτότητα 2 το οποίο στην σάθωση αυτή έχει μια παρατήρηση που φαίνεται με κόκκινη τελεία και ήδη 13 misses. Τα αντικείμενα διαγράφονται έπειτα από 5 συνεγόμενες misses. Στην επόμενη σάρωση 120 το αντικείμενο 2 δεν έχει παρατήρηση και οι απώλειες του γίνονται 14. Στην σάρωση 121 το όχημα έχει νέα παρατήρηση αν και έχει τώρα αναγνωριστεί ότι ανήκει σε περιοχή πιθανής απόκρυψης. Αυτό συμβαίνει λόγω της συνήθους απουσίας πληροφορίας σχετικής με το πλάτος του οχήματος με συνέπεια και οι περιοχές απόκρυψης να αναγνωρίζονται προσεγγιστικά. Στις επόμενες σαρώσεις 122-125 οι παρατηρήσεις του ίχνους 2 έχουν αποκρυβεί εντελώς από το προπορευόμενο ίχνος 1 όπως φαίνεται στα σχήματα. Κανονικά ο δείκτης των misses θα έπρεπε να αυξηθεί αλλά στην συγκεκριμένη περίπτωση τα κριτήρια διαγραφής έχουν απενεργοποιηθεί λόγω εξακρίβωσης απόκουψης και το ίχνος έχει ενημερωθεί αναλόγως. Τελικά κατά την σάρωση 126 το ίχνος 2 έχει βγει από την περιοχή απόκρυψης και μία μέτρηση έχει ανατεθεί σε αυτό. Η παραπάνω μέθοδος μειώνει σημαντικά των αριθμό των απωλειών ιχνών σε συστήματα ιχνηλασίας LRR καθώς οι περιπτώσεις απόκρυψης είναι πολύ συχνές σε οδικά περιβάλλοντα. Επίσης ελαττώνει και τις καθυστερήσεις καθώς αποφεύγονται επαναρχικοποιήσεις αντικειμένων αφού γνωρίζει την παρουσία αντικειμένων όταν ο αισθητήρας δεν τους ανιχνεύει κάτι που είναι εξαιρετικά σημαντικό για περιπτώσεις συστημάτων ασφαλούς οδήγησης, για παράδειγμα ανιχνεύσεις οχημάτων που προσπερνούν πίσω από ένα άλλο όχημα. Η μέθοδος παρουσιάστηκε στην [9].



Εικόνα 70: Παράδειγμα διαχείρισης ιχνών στην περίπτωση απόκρυψης αντικειμένων

Ύπαρξη στόχων φαντασμάτων και άλλα προβλήματα

Σύστημα ιχνηλασίας υλοποιήθηκε και για τον αισθητήρα CELSIUS του συστήματος EUCLIDE που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2. ο αισθητήρας αυτός αποδίδει μετρήσεις απευθείας σε πολικές συντεταγμένες και η αντιμετώπιση τους στο σύστημα ιχνηλασίας είναι παρόμοια με αυτήν που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Σε αυτήν την παράγραφο αναφέρεται η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για την αποφυγή των στόχων φαντασμάτων που είναι αρκετά συχνοί σε αυτόν τον αισθητήρα.

Η ιχνηλασία με αυτόν τον αισθητήρα ραντάρ (αλλά και αρκετούς άλλους) έχει να αντιμετωπίσει μια σειρά προβλημάτων που σχετίζονται με τη φύση του αισθητήρα και τη διακριτική του ικανότητα. Τέτοια προβλήματα είναι [12]:

- Παρουσία φαντασμάτων (ghosts) λόγω πλευρικών λοβών της κεραίας του ραντάρ και φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης σημάτων
- Εσφαλμένοι εντοπισμοί αντικειμένων που όμως σπανίως οδηγούν σε επιβεβαιωμένα ίχνη από τη διαχείριση των ιχνών
- Διπλά αντικείμενα που οδηγούν σε διατήρηση δύο ιχνών στην εικόνα ραντάρ
- Μέτρια έως κακή εκτίμηση των εγκάρσιων χαρακτηριστικών της κίνησης των αντικειμένων (θέση, εγκάρσια ταχύτητα και αντίστοιχη επιτάχυνση)
- Αδυναμία κατηγοριοποίησης των αντικειμένων

Το σημαντικότερο πρόβλημα που εντοπίζεται είναι η εμφάνιση φαντασμάτων, γιατί είναι το μόνο πρόβλημα που επιβιώνει στο χρόνο και οδηγεί σε λανθασμένες ειδοποιήσεις. Η διαγραφή των φαντασμάτων γίνεται:

α) με την παρατήρηση ότι αυτά εμφανίζονται μετά το πραγματικό αντικείμενο

β) με διαγραφή όσων φαντασμάτων είναι εκτός της γεωμετρίας του δρόμου

Ανίχνευση γεωμετρίας ορίων δρόμου

Είναι δυνατόν με κατάλληλη χρήση των επιπλέον δεδομένων ενός ραντάρ, σαν το CELSIUS του συστήματος EUCLIDE που αποδίδει μια πληθώρα από ακίνητα σημεία που ανιχνεύονται στα όρια του δρόμου, να γίνει με κατάλληλη επεξεργασία εκτίμηση της γεωμετρίας και της θέσης των ορίων του δρόμου. Οι επιστροφές αυτές προέρχονται κυρίως από τις μεταλλικές μπάρες και άλλα μεταλλικά αντικείμενα που υπάρχουν συνήθως για προστασία στα όρια του δρόμου. Τα σημεία αυτά έχουν συνήθως μηδενική ή αμελητέα ανιχνευόμενη ταχύτητα και αποτελούν την κύρια πηγή δεδομένων στο σύστημα ανίχνευσης γεωμετρίας ορίων του δρόμου που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Μοντελοποίηση της γεωμετρίας του δρόμου

Η περιγραφή της γεωμετρίας του δρόμου και κυρίως των δρόμων ταχείας κυκλοφορίας περιγράφεται με τον όρο της καμπυλότητας C. Ως καμπυλότητα (curvature) ορίζεται το αντίστροφο της ακτίνας καμπυλότητας R κυκλικού τομέα.

<u>Ορισμός clothoid</u>: Ως clothoid ορίζουμε την καμπύλη, η καμπυλότητα της οποίας είναι ανάλογη του μήκους της *l*:

$$c(l) = c_0 + c_1 l \tag{3.123}$$

 c_0 είναι η αρχική καμπυλότητα και $c_1 = \frac{\partial C}{\partial l}$ η παράγωγος της καμπυλότητας (curvature rate). Μεταβαίνοντας από τη διαφορική γεωμετρία στο καρτεσιανό επίπεδο, το ολοκλήρωμα της

καμπυλότητας δίνει τη γωνία μετάβασης Δχ σε μήκος τόξου Δl. Οπότε:

$$\Delta \chi = \int_{0}^{l} c(t)dt = c_{0}l + c_{1}\frac{l^{2}}{2}$$
(3.124)

(3.127)

(3.132)

$$x(l) = x_0 + \int_{0}^{l} \cos(\Delta x) d\tau$$
 (3.125)

$$y(l) = y_0 + \int_0^{\infty} \sin(\Delta x) d\tau$$
 (3.126)

Για μικρές γωνίες $|\Delta x| < 15^\circ$, $\cos(\Delta x) = 1$ και $\sin(\Delta x) = \Delta x$. Η παραδοχή αυτή δεν περιορίζει το πεδίο εφαρμογών του μοντέλου, αφού ο δρόμος μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους τμήματα που ικανοποιούν την παραδοχή [19]. Οπότε προκύπτει:

x(l) = l

$$x(l) = y_0 + c_0 \frac{l^2}{2} + c_1 \frac{l^3}{6}$$
(3.128)

Αποδείχθηκε, λοιπόν, ότι το κλωθοειδές (όρος από [12]) και κατ' επέκταση η γεωμετρία του δρόμου μπορεί να προσεγγιστεί ως ένα 3^{ου} βαθμού πολυώνυμο.

$$y(x) = c_0 \frac{x^2}{2} + c_1 \frac{x^3}{6} + y_0$$
(3.129)

Όπου y₀ είναι η μετατόπιση (Offset) της γεωμετρίας σε σχέση με το ίδιο όχημα. Η γεωμετρία μπορεί να αναφέρεται είτε στα όρια του δρόμου είτε στις λωρίδες κυκλοφορίας.

Σχεδίαση αλγορίθμου

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο που παρουσιάζεται, τα αντικείμενα κατηγοριοποιούνται ως κινούμενα και ακίνητα, καθώς επίσης και τα υποψήφια για τη γεωμετρία του δρόμου. Η επιλογή γίνεται με βάση τη κινηματική συμπεριφορά των. Τα κινούμενα αντικείμενα αποτελούν τα δεδομένα εισόδου του ιχνηλάτη, ενώ τα ακίνητα διαχωρίζονται σε μέλη της αριστερής ή της δεξιάς γεωμετρίας ανατίθενται ή απορρίπτονται ως ανεπιθύμητες επιστροφές. Τέλος, υλοποιείται ο εκτιμητής κατάστασης για να τροφοδοτήσει την εφαρμογή.

Επειδή η εκτίμηση των ορίων του δρόμου γίνεται δυναμικά, είναι απαραίτητη η γνώση των δυναμικών χαρακτηριστικών του οχήματος. Σε κάθε σάρωση οι παράμετροι του οχήματος η ταχύτητα του V από το ταχύμετρο και η γωνιακή του ταχύτητα ω από τον αντίστοιχο αισθητήρα που μετρώνται και παρέχονται στο σύστημα και με βάση αυτά ορίζεται το διάνυσμα μέτρησης:

$$\mathbf{y}_{v} = \left(V, \boldsymbol{\omega}\right)^{T} \tag{3.130}$$

Το διάνυσμα κατάστασης που επιλέγεται είναι:

$$\hat{\mathbf{x}}_{v} = \left(V, a, \theta, \omega\right)^{T} \tag{3.131}$$

με *α* την εφαπτομενική επιτάχυνση και *θ* τη γωνία μεταβολής της ταχύτητας του οχήματος. Το μοντέλο της κίνησης του οχήματος που χρησιμοποιείται για τον εκτιμητή γεωμετρίας είναι το μοντέλο σταθερής γωνιακής ταχύτητας με σταθερή ακτινική επιτάχυνση και το οποίο τροφοδοτεί το αντίστοιχο φίλτρο Kalman.

Εκτιμητής κατάστασης

Ο δρόμος ορίζεται ως δύο ταυτόσημα κλωθοειδή με παραμέτρους c₀ και c₁, αλλά με διαφορετικές τιμές για τις μετατοπίσεις y₀₁ και y_{0r} (offset). Συνεπώς ο δρόμος μπορεί να περιγραφεί από το ακόλουθο διάνυσμα κατάστασης ως:

$$\mathbf{x}_{RB} = (c_0, c_1, y_{0l}, y_{0r})^T$$

Για την επιλογή ενός διακριτού χρόνου μοντέλου ενημέρωσης του διανύσματος κατάστασης χρησιμοποιούνται οι φιλτραρισμένες παράμετροι του οχήματος. Οι παράμετροι αυτές είναι η ταχύτητα V, η κατεύθυνση - διαφορά των γωνιών της τρέχουσας και της προηγούμενης χρονικής στιγμής δθ και η γωνιακή ταχύτητα του οχήματος ω. Επίσης, χρησιμοποιείται και το χρονικό βήμα T της διαδικασίας (σάρωση). Αναλόγως των τιμών της γωνιακής ταχύτητας ω του οχήματος υπολογίζονται οι χρονικές μετατοπίσεις του Δx και Δy, που λαμβάνουν χώρα κάθε Τ δευτερόλεπτα. Με βάση τις τιμές αυτές είναι δυνατόν να καταστρωθεί ένα μοντέλο διακριτού χρόνου που να καθορίζει τη μετάβαση του διανύσματος κατάστασης στην επόμενη χρονική στιγμή.

(α) Έτσι, αν η γωνιακή ταχύτητα του οχήματος είναι αρκετά μεγάλη (μεγαλύτερη του 0.01rad/s για παράδειγμα) και συνεπώς επηρεάζει την κίνηση του οχήματος θα ισχύει:

$$\Delta x = \frac{V}{\omega} \sin(\delta\theta)$$
(3.133)
$$\Delta y = \frac{V}{\omega} (1 - \cos(\delta\theta))$$
(3.134)

(β) Διαφορετικά, αν η γωνιακή ταχύτητα είναι μικρή (μικρότερη του 0.01rad/s) μπορεί να θεωρηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια ότι το όχημα κινείται αποκλειστικά στην διεύθυνση της ταχύτητάς του, δηλαδή πάνω στον x-άξονα, οπότε:

 $\Delta x \approx VT$

(3.135)

 $\Delta y \approx 0$

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, η εξίσωση κατάστασης του μοντέλου ορίζεται ως ακολούθως:

$$\mathbf{x}_{RB}(k+1) = \mathbf{F}_{RB}(k) \cdot \mathbf{x}_{RB}(k) + \mathbf{G}_{RB}(k) \cdot \mathbf{w}_{RB}(k)$$
(3.136)

όπου η μήτρα μετάβασης από τη σάρωση k στη σάρωση k+1 και το διάνυσμα εισόδου $\mathbf{G}_{\scriptscriptstyle RB}$ είναι:

$$\mathbf{F}_{RB} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta x & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta x^2}{2} & \frac{\Delta x^3}{6} & 1 & 0 \\ \frac{\Delta x^2}{2} & \frac{\Delta x^3}{6} & 0 & 1 \end{bmatrix}, \ \mathbf{G}_{RB} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta y \\ -\Delta y \end{bmatrix}$$
(3.137)

Ορίζεται η μήτρα συνδιακύμανσης **P** με $\mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{F}_{RB}(k)\mathbf{P}(k|k)\mathbf{F}_{RB}^{T} + \mathbf{Q}(k)$, όπου **Q** η συνδιακύμανση του θορύβου διαδικασίας:

$$\mathbf{Q} = E\left(\widehat{\mathbf{x}}\widehat{\mathbf{x}}^{T}\right) = \begin{bmatrix} E\left(c_{0}^{2}\right) & E\left(c_{0}c_{1}\right) & 0 & 0\\ E\left(c_{1}c_{0}\right) & E\left(c_{1}^{2}\right) & 0 & 0\\ 0 & 0 & E\left(y_{0l}^{2}\right) & 0\\ 0 & 0 & 0 & E\left(y_{0r}^{2}\right) \end{bmatrix}$$
(3.138)

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την μήτρα αυτή είναι η διακύμανση του ρυθμού της καμπυλότητας $E(c_1^2) = s_c^2$ και η διακύμανση των μετατοπίσεων $E(y_0^2) = s_0^2$ (ίδιο και για τις δύο περιπτώσεις αριστερών και δεξιών ορίων). Επειδή η αρχική καμπυλότητα c_0 εξαρτάται από την παράγωγο c_1 οι δύο μεταβλητές δεν είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, οπότε ισχύει:

$$E(c_0c_1) = E(c_1c_0) = E(c_1^2l) = s_c^2 E(l)$$

$$E(c_0^2) = E(c_1^2l^2) = s_c^2 E(l^2)$$
(3.139)
(3.140)

Για τον υπολογισμό των μέσων τιμών για το μήκος της καμπύλης που διανύεται το χρονικό διάστημα επανάληψης της διαδικασίας χρησιμοποιούνται τα στοιχειώδη διαστήματα Δx και Δy που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οπότε:

(3.141)

$$E(l) = \sqrt{\Delta x^{2} + \Delta y^{2}} = \begin{cases} \frac{V}{\omega} \sqrt{|1 - 2\cos\delta\theta|} \\ VT \end{cases}$$

για τις περιπτώσεις (α) και (β) αντίστοιχα και $E(l^2) = (E(l))^2$. Έστω a = E(l), ο πίνακας **Q** γίνεται:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} a^2 s_c^2 & a s_c^2 & 0 & 0\\ a s_c^2 & s_c^2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & s_0^2 & 0\\ 0 & 0 & 0 & s_0^2 \end{bmatrix}$$
(3.142)

Το σύνολο των υπό ανάθεση υποψηφίων μετρήσεων θεωρείται γνωστό και αποτελεί αντικείμενο της επόμενης παραγράφου. Οι πίνακες των μετρήσεων περιλαμβάνουν τα όρια της αριστερής αλυσίδας διάστασης NI x 2 και τα όρια της δεξιάς αλυσίδας διάστασης Nr x 2. Οι παράμετροι Nl, Nr μπορεί να είναι και οι δύο διάφοροι του μηδενός, και οι δύο μηδέν ή ένας από τους δύο μηδέν. Στη γενική περίπτωση από τα Nl ζεύγη σημείων $(x_{il}, y_{il}), i = 1...Nl$ και από τα Nr ζεύγη $(x_{ir}, y_{ir}), i = 1...Nr$ σχηματίζεται το διάνυσμα μέτρησης με τα αβέβαια σημεία στον yάξονα. Το διάνυσμα μέτρησης ορίζεται ως ακολούθως:

$$\mathbf{y} = (y_{1l}, \dots, y_{Nll}, y_{1r}, \dots, y_{Nrr})^T$$
(3.143)

Με βάση το διάνυσμα μέτρησης, ο πίνακας μέτρησης που δημιουργεί το προβλεπόμενο διάνυσμα για τις μετρήσεις σύμφωνα με το διάνυσμα κατάστασης είναι:

$$\mathbf{y}_{RB}(k) = \mathbf{H}_{RB}\mathbf{x}_{RB}(k+1)\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}_{RB}$$
(3.144)
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{x_{1l}^2}{2} & \frac{x_{1l}^3}{6} & 1 & 0\\ \frac{x_{NII}^2}{2} & \frac{x_{NII}^3}{6} & 1 & 0\\ \frac{x_{1r}^2}{2} & \frac{x_{1r}^3}{6} & 0 & 1\\ \frac{x_{1r}^2}{2} & \frac{x_{1r}^3}{6} & 0 & 1\\ \frac{x_{1r}^2}{2} & \frac{x_{Nrr}^3}{6} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.145)

Η μήτρα Sz διακύμανσης του σφάλματος μέτρησης, επιλέγεται να είναι διαγώνια μήτρα διαστάσεων (Nl + Nr)x(Nl + Nr) με όλα τα στοιχεία της διαγωνίου της να έχουν τιμή 0.5m/s².

Στην πρώτη σάρωση ή αν έχει προηγηθεί διαγραφή, το διάνυσμα κατάστασης αρχικοποιείται με μηδενικές τις παραμέτρους c_0 , c_1 και για τις μετατοπίσεις επιλέγεται η y-τιμή του πρώτου σημείου της αλυσίδας αν αυτή υπάρχει, διαφορετικά η αμέσως προηγούμενη που έχει αποθηκευτεί. Το διάνυσμα κατάστασης διαγράφεται αν συμπληρωθούν 3 διαδοχικά «miss» παρατηρήσεων και για τις δυο πλευρές του δρόμου αφού και το διάνυσμα κατάστασης δέχεται είσοδο και για τις δύο πλευρές και δίνει αποτέλεσμα για 2 κλωθοειδή. Άμεση διαγραφή συμβαίνει και όταν η τιμή της αρχικής καμπυλότητας ξεπερνά ένα κατώφλι που σχετίζεται με την υπό σχεδίαση εφαρμογή (π.χ. 0.004m⁻¹ για δρόμους κλάσης IV σύμφωνα με την προτυποποίηση κατά ISO TC204/WG14) [20]. Ο αλγόριθμος δίνει αποτελέσματα και στην περίπτωση που εκτιμηθεί μόνο η δεξιά ή η αριστερή γεωμετρία.

Ανάθεση μετρήσεων στη γεωμετρία

Η μοντελοποίηση της γεωμετρίας ως συνεχή κλωθοειδή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, παρουσία αξιόπιστων μετρήσεων. Σε περιπτώσεις πυκνών ανεπιθύμητων επιστροφών η μέθοδος μπορεί να αποτύχει αν δε σχεδιαστεί κατάλληλα η συνάρτηση ανάθεσης των μετρήσεων στη γεωμετρία και η ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων επιστροφών [10]. Ανάλογοι αλγόριθμοι, κυρίως βασιζόμενοι σε πιθανοτικές δοκιμές LRT (Likelihood Ratio Test) έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία [21], αλλά εφαρμόζονται σε συστήματα LDW για την ιχνηλασία λωρίδων δρόμου με χρήση τεχνητής όρασης σε ιδανικές καιρικές συνθήκες. Στην εργασία [10] προτείνεται ένας γεωμετρικός αλγόριθμος για την ανάθεση των μετρήσεων, σθεναρός σε υψηλό ρυθμό ανεπιθύμητων επιστροφών ώστε να είναι κατάλληλος για συστήματα ραντάρ. Συνδυάζεται, επίσης και με πιθανοτικά μοντέλα ώστε να παρουσιάζει την ελάχιστη διαχύμανση.

Η πιθανοτική προσέγγιση είναι η πιο συνηθισμένη για την ανάθεση. Υπολογίζει την τυπική απόκλιση στον άξονα у και μετατοπίζει το clothoid ώστε να δημιουργηθεί μία περιοχή υποψηφίων μετρήσεων. Για ένα σημείο ισχύει $\mathbf{\hat{x}}_{RB} = (c_0, c_1, y_{0l}, y_{0r})^T - εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης –$ το οποίο δίνει:

$$\hat{\mathbf{y}}_{RB} = \mathbf{c} \ \hat{\mathbf{x}}_{RB}$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} x_{RB}^2 / x_{RB}^3 / 6 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ xat } \mathbf{c} = \begin{bmatrix} x_{RB}^2 / x_{RB}^3 / 6 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.146)
(3.147)

για την αριστερή και τη δεξιά γεωμετρία αντίστοιχα. Έστω $\mathbf{y}' = \mathbf{c}\mathbf{x}'$ είναι οι πραγματικές τιμές σε αντίθεση με την εκτίμηση $\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{c}\hat{\mathbf{x}}$. Η διακύμανση της εκτίμησης είναι:

$$\sigma_{y}^{2} = E\left\{\left(\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}'\right)\left(\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}'\right)^{T}\right\} = E\left\{\mathbf{c}\left(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}'\right)\left[\mathbf{c}\left(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}'\right)\right] = E\left\{\mathbf{c}\left(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}'\right)\left(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}'\right)^{T}\mathbf{c}^{T}\right\} = \mathbf{c}E\left\{\left(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}'\right)\left(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}'\right)^{T}\right\}\mathbf{c}^{TT}\right\}$$

$$\sigma_{y} = \sqrt{\mathbf{cPc}^{T}}$$
(3.148)

Εναλλακτικά, αντί να χρησιμοποιηθεί ένα σημείο, μπορεί να γίνει χρήση του διανύσματος μέτρησης:

$$\mathbf{y} = \left(y_{1l}, \dots, y_{Nll}, y_{1r}, \dots, y_{Nrr}\right)^T$$
έτσι ώστε: $\boldsymbol{\sigma}_y = \sqrt{\mathbf{HPH}^T}$ (3.149)

Η πρώτη μέθοδος, ωστόσο, δε συνίσταται λόγω του αυξημένου υπολογιστικού της φορτίου, αφού οι αποκλίσεις υπολογίζονται για κάθε σημείο και πιθανές πολώσεις μεταφέρονται αθροιστικά.

Θα δειχτεί στη συνέχεια ότι η πιθανοτική μέθοδος δεν είναι επαρκής για πυκνό ρυθμό ανεπιθύμητων επιστροφών. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος προϋποθέτει διαχωρισμό των σημείων σε δύο αλυσίδες (δεξιά και αριστερή). Για κάθε σημείο που ανήκει σε κάποια από τις δύο περιοχές εξετάζονται όλα τα σημεία που βρίσκονται εντός στραμμένης έλλειψης και επιλέγεται το κοντινότερο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το επόμενο σημείο, διαδοχικά μέχρι το σχηματισμό μιας αλυσίδας σημείων. Για την εύρεση πιθανών αλυσίδων χρησιμοποιείται η συνάρτηση με είσοδο τα υποψήφια σημεία και έξοδο την αλυσίδα. Για την επιλογή χρησιμοποιείται μια τεχνική πύλης μεταξύ του τελευταίου σημείου της «αλυσίδας» (x_1, y_1) και του υποψήφιου σημείου (x_2, y_2) . Αρχικά υπολογίζονται οι εξής παράμετροι:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right)$$

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$
(3.150)
(3.151)

Οι γωνίες φ όλων των διαδοχικών ζευγών της αλυσίδας αποθηκεύονται σε έναν πίνακα, για κάθε νέο έλεγχο υπολογίζεται η μέση γωνία $\overline{\varphi} = \underset{i}{mean}(\Phi_i)$ και υπολογίζεται η διαφορά: $d\varphi = |\varphi - \overline{\varphi}|$. Για να θεωρηθεί ότι το σημείο (x_2, y_2) ανήκει στην αλυσίδα με τελευταίο στοιχείο το (x_1, y_1) θα πρέπει να ισχύουν ταυτοχρόνως τα ακόλουθα δύο κριτήρια: d < 15m και $d\phi < \frac{\pi}{6}$ rad.

Αν ισχύουν οι παραπάνω συνθήκες το τελικό κριτήριο είναι αν το σημείο (x_2, y_2) ικανοποιεί την ελλειψοειδή θύρα με κέντρο το σημείο (x_1, y_1) και διαστάσεις gatex στον οριζόντιο άξονα και gatey στον κατακόρυφο. Η ελλειψοειδής θύρα που εξετάζεται είναι στραμμένη κατά φ rad σε σχέση με το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Οι εξισώσεις που υλοποιούν την παραπάνω συνθήκη ελέγχου είναι:

$$a = (x_2 - x_1)\cos\varphi + (y_2 - y_1)\sin\varphi$$
(3.152)

$$b = -(x_2 - x_1)\sin\varphi + (y_2 - y_1)\cos\varphi$$
(3.153)

Και ο τελικός έλεγχος της θύρας είναι:

$$\frac{a^2}{gatex^2} + \frac{b^2}{gatey^2} \le 1$$
(3.154)

Αν ισχύει η παραπάνω σχέση τότε το σημείο (x_2, y_2) είναι υποψήφιο για προσθήκη στην αλυσίδα, διαφορετικά αν ένας από τους τρεις ελέγχους δεν ισχύει, το σημείο αυτό παραλείπεται. Αφού επιλεγούν για το σημείο αφετηρίας όλα τα σημεία που ικανοποιούν τους παραπάνω ελέγχους, τελικά επιλέγεται το σημείο εκείνο που απέχει λιγότερο από αυτό. Η διαδικασία επιλογής των σημείων που περιγράφηκε απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 71: Επιλογή σημείου για την ενημέρωση της αλυσίδας

Αποτελέσματα

Για τα πειραματικά αποτελέσματα, χρησιμοποιήθηκε χιλιοστομετρικό ραντάρ αυτοκινήτων. Μελετήθηκε μια σειρά ακολουθιών ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα και να σχεδιαστεί ο τελικός αλγόριθμος που σε πραγματικό χρόνο θα εκτιμά τη γεωμετρία του δρόμου με χρήση μόνος ενός ραντάρ. Στο σύνολο των μετρήσεων περιλαμβάνονται όλα τα είδη δρόμων η καμπυλότητα των οποίων κυμαίνεται από κλάση Ι ως ΙV, κινούμενων και ακίνητων αντικειμένων, γέφυρες, κλπ. Όλοι οι αλγόριθμοι όπως αναμενόταν αποδίδουν ικανοποιητικά σε αυτοκινητοδρόμους με σαφή γεωμετρία (μεταλλικές μπάρες) όπου η πιθανοτική μέθοδος υπερέχει συγκρίνοντας τα στατιστικά δεύτερης τάξης των εκτιμητριών. Προβλήματα υπεισέρχονται όταν:

- Δεν υπάρχουν επαρκείς μετρήσεις
- Υπάρχει πυκνός ρυθμός ανεπιθύμητων επιστροφών ιδιαίτερα σε επαρχιακούς και αστικούς δρόμους
- Παρουσιάζεται το φαινόμενο φαντασμάτων (διπλών αντικειμένων) που οφείλεται είτε σε πολυδιαδρομική διάδοση είτε στους πλευρικούς λοβούς της κεραίας του ραντάρ.

Στο σχήμα που ακολουθεί σχεδιάζεται ένα τυπικό σενάριο δρόμου (πυκνού ρυθμού ανεπιθύμητων επιστροφών) αθροιστικά για 100 διαδοχικές σαρώσεις. Ο δρόμος είναι σχεδόν ευθύς και η πιθανοτική προσέγγιση αποτυγχάνει να εκτιμήσει τη γεωμετρία αφού ο εκτιμητής κατάστασης πολώνεται σε λάθος ελάχιστο και καθυστερεί να επανέλθει.



Εικόνα 72: Αθροιστική περιγραφή των εκτιμήσεων της γεωμετρίας του δρόμου με τη γεωμετρική και την πιθανοτική ανάθεση μετρήσεων.

Για να επιτευχθεί η βέλτιστη αξιοποίηση των δύο προσεγγίσεων για τις αναθέσεις αναπτύχθηκε μια συνδυαστική προσέγγιση η οποία επιλέγει το σύνολο υποψηφίων μετρήσεων που παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά ως προς τον εκτιμητή ελαχίστων τετραγώνων (νόρμα ελάχιστης διακύμανσης). Ο πίνακας παρουσιάζει συγκεντρωτικά αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων για 1200 διαδοχικές σαρώσεις. Το σχήμα που ακολουθεί δίνει γραφικά την πιθανότητα σωστής ανάθεσης.

Scan	Prob-miss	Geom-miss	P&G-miss	Prob-false	Geom-false	P&G-false
0-100	8	2	2	35	0	2
100-200	11	35	20	16	0	13
200-300	6	8	3	28	2	5
300-400	7	11	1	8	0	4
400-500	10	14	4	32	0	3
500-600	0	0	0	0	0	0
600-700	0	0	0	0	0	0
700-800	0	2	0	0	0	0
800-900	0	0	0	0	0	0
900-1000	0	3	0	0	0	0
1000-1100	0	0	0	0	2	0
1100-1200	0	3	0	0	0	0
Total (%)	2,8	5,2	2	7,9	0,3	1,8

Πίνακας 11: Συγκριτικά αποτελέσματα εσφαλμένων αναθέσεων μεταζύ πιθανοτικής (Prob), γεωμετρικής (Geom) και συνδιαστικής μεθόδου (P&G)



Εικόνα 73: Πιθανότητα σωστής ανάθεσης μετρήσεων – σύγκριση μεθόδων ανάθεσης

Οι παρατηρήσεις που έγιναν για να εξαχθούν τα παραπάνω αποτελέσματα πραγματοποιήθηκαν συγκρίνοντας βήμα προς βήμα τα αποτελέσματα του αλγορίθμου με την εικόνα συγχρονισμένης κάμερας και καταγραφή των ψευδών συναγερμών και των απωλειών του συστήματος.

3.4 Σύστημα ιχνηλασίας φαντάφ κοντινής απόστασης

Για το δίκτυο αισθητήρων ραντάρ κοντινής απόστασης του οχήματος (αναφορά στην εικόνα 20) εφαρμόστηκε ένα ειδικό στάδιο προεπεξεργασίας δεδομένων ώστε να εξαχθούν αντικείμενα ενδιαφέροντος στα οποία θα ακολουθηθεί ιχνηλασία. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αισθητήρες αυτοί δίνουν πολλαπλές επιστροφές για ένα πραγματικό στόχο και επίσης υπάρχουν πολλές μετρήσεις που ανήκουν σε θόρυβο περιβάλλοντος ή σε μπάρες δρόμων. Τα ραντάρ μακρινού πεδίου LRR συνήθως δίνουν μια μέτρηση για κάθε πραγματικό όχημα και επίσης η ταχύτητα που μετρούν είναι περισσότερο αξιόπιστη με συνέπεια να μην απαιτείται κάποιο ειδικό βήμα επεξεργασίας των μετρήσεων πριν εισαχθούν στο σύστημα ιχνηλασίας.

Συγκεκριμένα για το εν λόγω δίκτυο των δύο αισθητήρων διαπιστώθηκε ότι η ακριβή γωνία που αποδίδουν οι αισθητήρες μειώνεται καθώς αυξάνει η απόσταση ανίχνευσης των στόχων. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε μια μέθοδος που συσχετίζει τις μετρήσεις των δύο αισθητήρων και ακολούθως για δύο συσχετισμένα μεταξύ τους σημεία προκύπτει από κοινού διόρθωση της γωνίας μέτρησης. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι συγχωνευμένα αντικείμενα που αντιστοιχούν σε παρατηρήσεις και των δυο αισθητήρων, τα οποία μαζί με τα αντικείμενα που ανιχνεύονται μόνο από έναν από τους δύο αισθητήρες εισάγονται σε σύστημα ιχνηλασίας.

Ένα παράδειγμα της λειτουργίας αυτής της μεθόδου διαδικασίας δίνεται στην εικόνα 74. Με μπλε και κυανό χρώμα παρουσιάζονται οι μετρήσεις από τους δύο αισθητήρες SRR, με σταυρούς χρώματος ματζέντα σχεδιάζεται το αποτέλεσμα της διαδικασίας συγχώνευσης των μετρήσεων αυτών. Με πράσινες γραμμές σχεδιάζονται οι μετρήσεις του σαρωτή λέιζερ που δίνουν μια ιδέα σχετικά με το που κινείται το όχημα ενδιαφέροντος, μιας και ο αισθητήρας αυτός αποτελεί μια αξιόπιστη πηγή πληροφορίας. Η εικόνα αυτή αποτελεί ένα συγκεντρωτικό αποτέλεσμα των εξόδων όλων των αισθητήρων για 25 περίπου συνολικά σαρώσεις. Το όχημα ενδιαφέροντος όπως διακρίνεται από τις μετρήσεις του λέιζερ εμφανίζεται αρχικά στη θέση (4,4)μ και κινείται έως περίπου το σημείο (23,4)μ. Οι ανιχνεύσεις των SRR ακόμα και αν αυτές δεν αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο πάνω στο όχημα στόχο φαίνεται ξεκάθαρα ότι αποκλίνουν καθώς η απόσταση αυξάνεται. Το συγχωνευμένο σημείο δίνει μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση του πραγματικού (σύμφωνα με την ανίχνευση του σαρωτή λέιζερ) αντικειμένου και τέτοιου είδους είναι τα σημεία που εισάγονται στο σύστημα ιχνηλασίας του δικτύου των SRR (αναφορά στις παραγράφους 5.2 και 5.3). Τα συγχωνευμένα μετρούμενα σημεία του δικτύου αυτού ιχνηλατούνται με σύστημα ιχνηλασίας παρόμοιο με αυτό που παρουσιάζεται στην παράγραφο 3.3 με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων. Το διάνυσμα μέτρησης αποτελείται από απόσταση, γωνία και ακτινική ταχύτητα.



Εικόνα 74: Συγχώνευση παρατηρήσεων δικτύου αισθητήρων ραντάρ κοντινού πεδίου

3.5 Σύστημα ιχνηλασίας δεδομένων επεξεργασίας εικόνας

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 τα συστήματα που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν συνήθως και συστήματα βασιζόμενα σε επεξεργασία εικόνας. Η επεξεργασία των δεδομένων αυτών των συστημάτων είναι πέραν του αντικειμένου αυτής της εργασίας. Σε αρκετά σημεία κυρίως στο κεφάλαιο 5 που περιγράφονται τα συστήματα σύντηξης θα περιγραφούν περιληπτικά τα συστήματα αυτά, δεδομένα των οποίων χρησιμοποιούνται στα γενικότερα συστήματα σύντηξης. Εδώ περιγράφεται περιληπτικά το σύστημα IR του συστήματος EUCLIDE.

Η FIR κάμερα δίνει εικόνες που περιέχουν πληροφορίες για τη θερμοκρασία των αντικειμένων σε σχέση με το περιβάλλον. Σε οχήματα, υψηλές θερμοκρασίες παρατηρούνται κυρίως στην εξάτμιση, αλλά και στις ρόδες με το πέρασμα του χρόνου λόγω τριβής. Ο αλγόριθμος ιχνηλασίας, αρχικά, εντοπίζει τις θερμές περιοχές [22], και επιλέγει περιγράμματα – ορθογώνια ως υποψήφια οχήματα. Από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του περιγράμματος γίνεται και η κατηγοριοποίησή του και επιβεβαιώνεται με συσχέτισή του με τα περιγράμματα των επόμενων – χρονικά - frames της εικόνας. Λαμβάνεται, επίσης, υπόψη και το γεγονός ότι τα περιγράμματα είναι στο κάτω μέρος των οχημάτων. Η εκτίμηση απόστασης γίνεται είτε με βάση το μέγεθος του περιγράμματος και δεδομένης της κατηγοριοποίησης, είτε με κατάλληλους μετασχηματισμούς που θα δειχθούν στη συνέχεια. Τελικά, ο αλγόριθμος δίνει τις συντεταγμένες της μίας άκρης του περιγράμματος (*i*, *j*) σε pixel, το ύψος και το πλάτος του περιγράμματος *Li* και *Lj* σε pixel επίσης.



Εικόνα 75: Παράδειγμα θερμών περιοχών σε εικόνα IR για ανίχνευση αυτοκινήτων

Η χρήση των ιχνών που εντοπίζονται από την κάμερα απαιτεί την μετάβαση από το επίπεδο της εικόνας σε pixel στο επίπεδο του δρόμου (ground plane). Ο μετασχηματισμός εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κάμερας, όπως η εστιακή απόσταση (focal length), η γωνία pitch α, και το ύψος της κάμερας Η και είναι μεγάλη πηγή σφαλμάτων και αβεβαιότητας κυρίως λόγω του pitch σε ανωμαλίες του δρόμου και ελιγμούς του οδηγού. Η κάμερα θεωρείται ως σύστημα το οποίο πραγματοποιεί ένα γραμμικό μετασχηματισμό από τον προβολικό χώρο P³ στον προβολικό επίπεδο P². Μαθηματικά, η απεικόνιση αυτή γράφεται ως:

$$\begin{bmatrix} i\\ j\\ 1 \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14}\\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24}\\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x\\ y\\ z\\ 1 \end{bmatrix}$$
(3.155)

Όπου Α ονομάζεται πίνακας μετασχηματισμού (calibration matrix) και εξαρτάται όπως αναφέρθηκε από τις παραμέτρους τις κάμερας, και f ο παράγοντας κλίμακας (scaling factor). Οι συντεταγμένες ενός σημείου του περιγράμματος στην εικόνα και στο χώρο είναι (*i,j*) και (*x,y,z*) αντίστοιχα. Υποθέτοντας επίπεδο δρόμο, η μεταβλητή z μηδενίζεται αφαιρείται η τρίτη στήλη του πίνακα μετασχηματισμού. Απαλείφοντας τον παράγοντα κλίμακας, στην τυχαία χρονική στιγμή *t_k*, το σύστημα περιγράφεται ως στοχαστικός μη γραμμικός μετασχηματισμός ως εξής:

$$\begin{bmatrix} i(t_{k}) \\ j(t_{k}) \\ \Delta i(t_{k}) \\ \Delta j(t_{k}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}x(t_{k}) + a_{12}y(t_{k}) + a_{13}}{a_{31}x(t_{k}) + a_{32}y(t_{k}) + a_{33}} \\ \frac{a_{21}x(t_{k}) + a_{32}y(t_{k}) + a_{33}}{a_{31}x(t_{k}) + a_{32}y(t_{k}) + a_{33}} \\ \frac{f \frac{h(t_{k})}{y(t_{k})}}{f \frac{w(t_{k})}{y(t_{k})}} \\ \frac{f \frac{w(t_{k})}{y(t_{k})}}{f \frac{w(t_{k})}{y(t_{k})}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{i}(t_{k}) \\ \mathbf{w}_{j}(t_{k}) \\ \mathbf{w}_{\Delta i}(t_{k}) \\ \mathbf{w}_{\Delta j}(t_{k}) \end{bmatrix}$$
(3.156)

όπου (Δi, Δj) και (w, b) είναι το πλάτος και το ύψος του αντικειμένου στην εικόνα και το δισδιάστατο χώρο αντίστοιχα και w γκαουσσιανός θόρυβος μηδενικής μέσης τιμής και διασποράς σ_w. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για αντιστοίχηση από το χώρο των μετρήσεων στο χώρο του διανύσματος κατάστασης σε ένα σύστημα ελέγχου Kalman. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος υπολογισμού του πίνακα μετασχηματισμού στηρίζεται στη μέτρηση δυσδιάστατων σημείων στο χώρο (π.χ. από ραντάρ και GPS ή απλές μετρήσεις) και αντιστοίχηση αυτών σε pixel της εικόνας. Απαιτείται μεγάλος αριθμός δειγμάτων για τον ακριβή υπολογισμό του πίνακα ώστε να καταλήγει σε σύστημα που επιλύεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

3.6 Κεντρική σύντηξη δεδομένων επεξεργασίας εικόνας και ραντάρ

Τα συστήματα αποφυγής συγκρούσεων βασίζονται σε ενεργά συστήματα μέτρησης απόστασης (range finders), τα οποία εντοπίζουν κινούμενα αντικείμενα και ειδοποιούν τον οδηγό σε επικίνδυνες καταστάσεις. Δυστυχώς, οι πληροφορίες που παρέχει το ραντάρ ή οποιοσδήποτε άλλος παρόμοιος αισθητήρας δεν είναι αρκετές ώστε να εκτιμηθεί πλήρως η κινηματική κατάσταση του αντικειμένου και να προβλεφθεί η συμπεριφορά του λόγω της κακής εκτίμησης της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας ως προς την ακτίνα που συνδέει το ίδιο όχημα με το αντικείμενο (lateral velocity) [11].

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, προτείνεται η χρήση ενός διπλού ασύζευπου εκτιμητή κατάστασης Kalman UDF (Uncoupled Double Filter), του οποίου ο χώρος μετρήσεων περιλαμβάνει τόσο ίχνη όσο και μετρήσεις από το ραντάρ, αλλά και ένα σύστημα τεχνητής όρασης. Το σύστημα τεχνητής όρασης υπερέχει στην εκτίμηση γωνίας αζιμουθίου και εγκάρσιας ταχύτητας, οπότε και αναμένεται να συμπληρώσει και να βελτιώσει τις εκτιμήσεις του ραντάρ. Παρουσιάζονται αποτελέσματα σε ελιγμούς και στροφές με προσομοιώσεις, αλλά και πραγματικά δεδομένα από υπέρυθρη κάμερα και ραντάρ, τα οποία παρατίθενται παράλληλα με αποτελέσματα της τεχνικής διασταυρούμενης διακύμανσης και αποτελέσματα από ιχνηλάτη ραντάρ.



Εικόνα 76: Ανάλυση σφαλμάτων συστημάτων ραντάρ και κάμερας στο επίπεδο του δρόμου

Στο σχήμα 76 δίνεται η πραγματική εικόνα των σφαλμάτων των προαναφερθέντων αισθητήρων. Οι ελλείψεις δίνουν τις μετρήσεις των αισθητήρων με γκαουσσιανό θόρυβο μηδενικής μέσης τιμής και αποκλίσεις $\sigma_R = 1$ m και $\sigma_{\theta} = 0.01$ rad για το σφάλμα απόστασης και γωνίας του ραντάρ και $\sigma_R = 5$ m και $\sigma_{\theta} = 0.001$ για για το σφάλμα απόστασης και γωνίας της κάμερας. Στην περίπτωση της κάμερας, τα σφάλματα απόστασης προκύπτουν από την επεξεργασία εικόνας και το μετασχηματισμό από το επίπεδο της εικόνας σε pixel στο επίπεδο του δρόμου σε καρτεσιανές συντεταγμένες όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Στη βιβλιογραφία, ο συνδυασμός ραντάρ και κάμερας συναντιέται ευρέως (π.χ. [23][24][25][26]) για τη βελτίωση της απόδοσης συστημάτων τεχνητής όρασης όπως π.χ. χρήση αποστάσεων από το ραντάρ για διαχωρισμό της εικόνας σε περιοχές ενδιαφέροντος ή συστημάτων LDW. Στο [27] ο αλγόριθμος πραγματοποιείται σε δύο στάδια: σύντηξη για εντοπισμό οχημάτων και ιχνηλασία με βάση τον εκτιμητή λωρίδας κυκλοφορίας (εκτιμητής γεωμετρίας). Όπως και στην προτεινόμενη προσέγγιση [11], οι κινήσεις διαχωρίζονται σε διαμήκη και εγκάρσια (longitudinal & lateral). Για την πρώτη χρησιμοποιείται μοντέλο σταθερής ταχύτητας και για τη δεύτερη λαμβάνεται η υπόθεση ότι η παράγωγος της απόστασης του οχήματος από τη λωρίδα του είναι μηδέν. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε υβριδική αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί μετρήσεις και ίχνη σε ένα διπλό ασύζευκτο φίλτρο Kalman (UDF). Το διπλό φίλτρο αποτελείται από ένα φίλτρο «απόστασης» (range filter) και ένα φίλτρο «γωνίας» τα οποία χρησιμοποιούν μετρήσεις ραντάρ/ίχνη κάμερας και ίχνη ραντάρ/μετρήσεις κάμερας αντίστοιχα.

Ο ιχνηλάτης φαντάφ βασίζεται στη θεωφία GNN ή JPDA ιχνηλασίας με μοντέλο σταθεφής επιτάχυνσης στους δύο άξονες. Ο εκτιμητής κατάστασης και το διάνυσμα μετφήσεων είναι αντίστοιχα:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x & u_x & a_x & y & u_y & a_y \end{bmatrix}^T$$
(3.157)
$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} x & u_x & y & u_y \end{bmatrix}^T$$
(3.158)

Η ιχνηλασία πραγματοποιείται στο επίπεδο του δρόμου σε καρτεσιανές συντεταγμένες, ενώ οι μετρήσεις (πολικές συντεταγμένες) είναι επίσης διαθέσιμες:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} r & \dot{r} & \theta \end{bmatrix}^T \tag{3.159}$$

Το σύστημα ιχνηλασίας της κάμερας βασίζεται στον εντοπισμό και τη συσχέτιση των περιγραμμάτων σε pixel που αντιστοιχούν σε κινούμενα αντικείμενα. Στη συνέχεια, σε δεύτερο στάδιο, τα περιγράμματα μετασχηματίζονται και τοποθετούνται στο επίπεδο του δρόμου και επιβάλλεται μοντέλο σταθερής ταχύτητας. Το διάνυσμα κατάστασης και το διάνυσμα μετρήσεων είναι αντίστοιχα:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x & u_x & y & u_y \end{pmatrix}^T$$
(3.160)
$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} i & j \end{pmatrix}^T$$
(3.161)

Η απεικόνιση του χώρου των μετρήσεων στο χώρο κατάστασης είναι μη γραμμική σύμφωνα με:

$$\binom{i}{j} = \binom{\frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}}}{\frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}}}$$
(3.162)

όπου α είναι οι συντελεστές της calibration matrix. Επιβάλλεται, στη συνέχεια, ένα φίλτρο, μη γραμμικό - ΕΚΓ - με γραμμικοποιημένο πίνακα μετρήσεων Η:

$$H(x,y) = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & h_{13} & 0 \\ h_{21} & 0 & h_{23} & 0 \end{bmatrix}$$
(3.163)
$$h_{11} = \frac{a_{11}(a_{31}x + a_{32}y + a_{33}) - a_{31}(a_{11}x + a_{12}y + a_{13})}{(a_{31}x + a_{32}y + a_{33})^2}$$
$$h_{13} = \frac{a_{12}(a_{31}x + a_{32}y + a_{33}) - a_{32}(a_{11}x + a_{12}y + a_{13})}{(a_{31}x + a_{32}y + a_{33})^2}$$
$$h_{21} = \frac{a_{21}(a_{31}x + a_{32}y + a_{33}) - a_{31}(a_{21}x + a_{22}y + a_{23})}{(a_{31}x + a_{32}y + a_{33})^2}$$
$$h_{23} = \frac{a_{22}(a_{31}x + a_{32}y + a_{33}) - a_{32}(a_{21}x + a_{22}y + a_{23})}{(a_{31}x + a_{32}y + a_{33})^2}$$

με

Απαραίτητη προϋπόθεση για οποιαδήποτε σύστημα σύντηξης είναι η συσχέτιση των ιχνών. Προτείνεται η συσχέτιση των ιχνών της κάμερας στα ίχνη από το ραντάρ και όχι το αντίστροφο – τα ίχνη του ραντάρ είναι περισσότερα από την κάμερα – ενώ ως κριτήριο θεωρείται η y συνιστώσα των ιχνών. Η νέα λίστα με ίχνη περιλαμβάνει αυτά που προκύπτουν από τη διαδικασία σύντηξης δεδομένων και ίχνη του ραντάρ στα οποία δεν ανατέθηκε ίχνος της κάμερας. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιεί μόνο τα κοινά ίχνη και αναφέρεται στα πιο κοντινά κινούμενα οχήματα. Η αρχιτεκτονική του UDF δίνεται στο σχήμα 77, όπου περιγράφονται τα αυτόνομα συστήματα ιχνηλασίας, η σύνδεση των ιχνών και η λειτουργία του διπλού φίλτρου που θα περιγραφεί στη συνέχεια.



Εικόνα 77: Αρχιτεκτονική συστήματος UDF [12]

Στο φίλτρο UDF γίνεται χρήση πολικών συντεταγμένων στο επίπεδο, πράγμα που επιτρέπει την άμεση χρήση των μετρήσεων του ραντάρ (απόστασης και μεταβολή αυτής) και το διαχωρισμό των κινήσεων και των φίλτρων σε δύο ασύζευκτα φίλτρα «απόστασης» και «γωνίας/αζιμουθίου». Το φίλτρο «απόστασης» περιγράφεται από το διάνυσμα κατάστασης $\begin{bmatrix} R & u_R & a_R \end{bmatrix}^T$ που περιλαμβάνει απόσταση, μεταβολή της απόστασης (=ακτινική ταχύτητα) και ακτινική επιτάχυνση και το διάνυσμα μετρήσεων $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$. Στο φίλτρο «απόστασης» η παράγωγος της ακτινικής επιτάχυνσης μοντελοποιείται ως θόρυβος μηδενικής μέσης τιμής και απόκλισης $(\sigma_{a_R}^2)$. Η μετάβαση του διακριτού δυναμικού συστήματος από τη σάρωση k στη σάρωση k+1 γίνεται με τον πίνακα $\mathbf{Φ}_1$:

$$\boldsymbol{\Phi}_{1} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\omega^{2} T^{2}}{2} & T & T^{2} / 2 \\ \omega^{2} T & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.164)

Όπου $\omega = \hat{\omega}$ είναι η εκτίμηση της γωνιακής ταχύτητας από το φίλτρο «γωνίας». Το διάνυσμα κέρδους θορύβου δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^2 / 2 & T & 1 \end{bmatrix}^T \tag{3.165}$$

ενώ οι πίνακες συνδιακύμανσης θορύβου διαδικασίας και μετρήσεων είναι:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{B} \left(\sigma_{a_R}^2 \right) \mathbf{B}^T \text{ xou } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_R^2 & 0\\ 0 & \sigma_{u_R}^2 \end{bmatrix}$$
(3.166)

Το φίλτρο «γωνίας» περιγράφεται από το διάνυσμα κατάστασης $\begin{bmatrix} \theta & u_L & a_L \end{bmatrix}^r - \alpha$ ζιμούθιο, κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας και της επιτάχυνσης αντίστοιχα – και το διάνυσμα μέτρησης $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$. Η μέτρηση προκύπτει από τα ίχνη τόσο της κάμερας όσο και του ραντάρ:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_{camera}}{x_{radar}} \right)$$
(3.167)

Η προσθήκη της κάθετης επιτάχυνσης στο διάνυσμα κατάστασης είναι απαραίτητη, αφού κινούμενα αντικείμενα με σταθερή ταχύτητα στο καρτεσιανό επίπεδο δεν παράγουν κινήσεις σταθερού αζιμουθίου [7]. Έτσι, απαιτούνται παράγωγοι ανώτερης τάξης για την παρακολούθηση ακόμα και μη ελισσόμενων αντικειμένων. Στο προτεινόμενο φίλτρο η παράγωγος της κάθετης επιτάχυνσης μοντελοποιείται ως γκαουσσιανός θόρυβος μηδενικής μέσης τιμής και απόκλισης $(\sigma_{a_L}^2)$. Η μετάβαση του διακριτού δυναμικού συστήματος από τη σάρωση k στη σάρωση k+1γίνεται με τον πίνακα **Φ**.:

$$\mathbf{\Phi}_{2} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{T}{R} \left(1 - \frac{u_{R}T}{R} \right) & T^{2} / 2R \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.168)

Όπου $u_R = \hat{u}_R$ και $\mathbf{R} = \hat{R}$ είναι οι εκτιμήσεις της ακτινικής ταχύτητας και της απόστασης από το φίλτρο «απόστασης». Το διάνυσμα κέρδους θορύβου δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^2 / 2R & T & 1 \end{bmatrix}^T \tag{3.169}$$

ενώ οι πίνακες διακύμανσης θορύβου διαδικασίας και μετρήσεων είναι:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{B}\left(\sigma_{a_{L}}^{2}\right)\mathbf{B}^{T} \operatorname{xal} \mathbf{R} = \left(\sigma_{\theta}^{2}\right)$$
(3.170)

Έτσι, τα στοχαστικά συστήματα που περιγράφουν τα δύο φίλτρα είναι τα εξής:

$$\begin{bmatrix} R(k+1)\\ u_{R}(k+1)\\ a_{R}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\omega^{2}(k)T^{2}}{2} & T & \frac{T^{2}}{2}\\ \omega^{2}(k)T & 1 & T\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R(k)\\ u_{R}(k)\\ a_{R}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T^{2}}{2}\\ T\\ 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{q}_{a_{R}}(k)$$
(3.171)
$$\begin{bmatrix} \theta(k+1)\\ u_{L}(k+1)\\ a_{L}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{T}{R(k)} \left(1 - \frac{u_{R}(k)T}{R}\right) & \frac{T^{2}}{2R}\\ 0 & 1 & T\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta(k)\\ u_{L}(k)\\ a_{L}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T^{2}}{2}\\ T\\ 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{q}_{a_{L}}(k)$$
(3.172)

Η απόδειξη των παραπάνω εξισώσεων περιλαμβάνεται στην [11].

Για την πιστοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με προσομοιώσεις και με πραγματικά δεδομένα από το σύστημα EUCLIDE υπέρυθρης κάμερας και μικροκυματικού ραντάρ υψηλής ευκρίνειας. Στις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ότι οι ακτινικές μεταβλητές έχουν μικρό θόρυβο στις μετρήσεις του ραντάρ, οπότε θα παρουσιαστούν αποτελέσματα για τις εγκάρσιες συνιστώσες όπου θα δειχθεί η υπεροχή του προτεινόμενου UDF φίλτρου. Τα σενάρια που δημιουργήθηκαν αφορούν οχήματα που βρίσκονται μπροστά από το ίδιο όχημα και πραγματοποιούν απότομους ελιγμούς. Το ίδιο όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα. Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι γραφικές παραστάσεις (τιμή και μέσο τετραγωνικό σφάλμα) επίδοσης των διαφόρων εκτιμητών κατάστασης σε σχέση με την πραγματική θέση ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων και συγκεκριμένα:

- Εκτιμητής σταθερής επιτάχυνσης με αισθητήρα ραντάρ
- Εκτιμητής σταθερής ταχύτητας με αισθητήρα κάμερα
- Σύντηξης με τεχνική διασταυρούμενης διακύμανσης
- Διπλό φίλτρο UDF (το προτεινόμενο)

Τα σενάθια κίνησης που υλοποιούνται στον προσομοιωτή είναι:

- Απότομος ελιγμός προπορευόμενου οχήματος
- Ομαλή αλλαγή λωρίδας προπορευόμενου οχήματος
- Διπλή προσπέραση προπορευόμενου οχήματος



Εικόνα 78: Αποτελέσματα (γωνία και εγκάρσια ταχύτητα) σε απότομο ελιγμό του μπροστινού οχήματος, δεδομένα προσομοίωσης

Από τα παραπάνω σχήματα είναι φανερή η υπεροχή του φίλτρου UDF έναντι των υπολοίπων μεθόδων. Στην εκτίμηση της γωνίας αζιμουθίου, τα φίλτρα ακολουθούν ικανοποιητικά τις μεταβολές με μικρή υπεροχή του UDF. Αντίθετα, στην εκτίμηση της εγκάρσιας συνιστώσας της ταχύτητας, ικανοποιητικά αποτελέσματα δίνει η ιχνηλασία της κάμερας και η διασταυρούμενη συνδιακύμανση σε μικρές μεταβολές, ενώ αποτυγχάνουν σε απότομες αλλαγές. Η ιχνηλασία του ραντάρ με μοντέλο σταθερής επιτάχυνσης αποτυγχάνει σε όλες τις περιπτώσεις. Αλλαγή του μοντέλου κίνησης δεν επιφέρει καλύτερες εκτιμήσεις δεδομένης της αδυναμίας του ραντάρ να εκτιμήσει την εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας.



Εικόνα 79: Αποτελέσματα (γωνία και εγκάρσια ταχύτητα) σε σενάριο προσπέρασης, δεδομένα προσομοίωσης

Τα παραπάνω φίλτρα δοκιμάστηκαν, στη συνέχεια, με πραγματικά δεδομένα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Το μειονέκτημα των πραγματικών δεδομένων είναι η αδυναμία πραγματοποίησης άμεσων ελέγχων, οπότε οι αλγόριθμοι και τα φίλτρα κρίνονται διαισθητικά μέσω του αποτελέσματος της εφαρμογής. Ένδειξη καλής εκτίμησης είναι και ο πίνακας συνδιακύμανσης, του οποίου οι τιμές συγκλίνουν στο χαμηλότερο όριο τόσο τα στοιχεία της κυρίας διαγωνίου όσο και οι ετεροσυσχετίσεις. Το σενάριο που έχει επιλεγεί για επίδειξη περιλαμβάνει ελιγμούς του προπορευόμενου οχήματος σε σχέση με το ίδιο όχημα. Σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα το ραντάρ αποτυγχάνει στην ιχνηλασία, ενώ το UDF εξομαλύνει την ιχνηλασία της κάμερας, ενώ επιτυγχάνει να δώσει και αξιόπιστη εκτίμηση της εγκάρσιας συνιστώσας της επιτάχυνσης.



Εικόνα 80: Αποτελέσματα (γωνία, εγκάρσια ταχύτητα και επιτάχυνση) σε σενάριο ελιγμών των προπορευόμενων οχημάτων, με πραγματικά δεδομένα προσπέρασης

Για περαιτέρω ενδείξεις και απόδειξη της καλής απόδοση του UDF, δόθηκαν και αποτελέσματα από την εφαρμογή εκτίμησης τροχιών [12]. Ο εκτιμητής τροχιών (path prediction) διαδίδει το διάνυσμα κατάστασης του ιχνηλάτη στο μέλλον και προβλέπει τις συμπεριφορές των κινούμενων αντικειμένων, αλλά και του ιδίου οχήματος. Η τροχιά του ιδίου οχήματος μπορεί να προβλεφθεί εύκολα λόγω της αξιόπιστης πληροφορίας για τη δυναμική του, αντίθετα οι τροχιές των αντικειμένων δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν αξιόπιστα με βάση μόνο τον ιχνηλάτη του ραντάρ, λόγω της αδυναμίας μέτρησης και καλής εκτίμησης των εγκάρσιων συνιστωσών της κίνησης. Για το λόγο αυτό, η αξιολόγηση κινδύνου σε ανάλογα συστήματα γίνεται με στατικό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη θέση και όχι την πρόθεση των κινούμενων αντικειμένων. Η χρήση του UDF (ή άλλου συστήματος σύντηξης πολλαπλών δεδομένων) ως εκτιμητή τροχιών επιτρέπει τη δυναμική αναπαράσταση της κίνησης των αντικειμένων.

Επιλέγεται ένα σενάριο 10 δευτερολέπτων, στο οποίο δίνονται οι τροχιές σε διάφορα στιγμιότυπα της κίνησης και η εκτίμηση της γεωμετρίας του δρόμου. Το ίδιο όχημα είναι στη θέση (0,0) σε όλα τα στιγμιότυπα. Δίνονται τρεις εκτιμήσεις α) με διάδοση του διανύσματος κατάστασης του ραντάρ (διακεκομμένη γραμμή) β) με διάδοση του διανύσματος κατάστασης του ραντάρ

(ασυνεχή γραμμή), μηδενίζοντας την τιμή της επιτάχυνσης και γ) με διάδοση του διανύσματος κατάστασης του UDF (γραμμή). Για κάθε στιγμιότυπο υπολογίζεται και το σφάλμα εκτίμησης με βάση τις μετρήσεις του ραντάρ και τον υπολογισμό της ίδιας τροχιάς ώστε να διατηρείται ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων. Ως αναφορά έχει ληφθεί η χρήση της μελλοντικής θέσης του οχήματος που είναι γνωστή σε offline επεξεργασία των δεδομένων, δίνοντας το μέτρο επίδοσης του εγκάρσιου (lateral) offset.



Εικόνα 81: Μέσο σφάλμα πρόβλεψης πορείας και εκτίμησης δυναμικής στόχου



Εικόνα 82: Εκτιμώμενη τροχιά προπορευόμενου οχήματος (1)



Εικόνα 83: Εκτιμώμενη τροχιά προπορευόμενου οχήματος (2)

3.7 Σύστημα ιχνηλασίας δεδομένων σαρωτή λέιζερ

Στην παρούσα ενότητα δίνονται οι αναλύσεις της επεξεργασίας δεδομένων σαρωτή λέιζερ πριν την εισαγωγή τους στο γενικό σύστημα σύντηξης δεδομένων. Η ανάλυση περιλαμβάνει δύο δοκιμές που έλαβαν χώρα, η πρώτη αφορά την επεξεργασία από την αρχή τελείως ανεπεξέργαστων (raw) δεδομένων σαρωτή όπου υλοποιήθηκαν όλα τα στάδια από την ομαδοποίηση, την εξαγωγή χαρακτηριστικών, την ιχνηλασία των μετρήσεων και την σύντηξη με δεδομένα αισθητήρα ραντάρ μακρινού πεδίου, και τη δεύτερη να αφορά τη χρήση υψηλού επιπέδου επεξεργασμένων δεδομένων από την μονάδα επεξεργασίας του αισθητήρα και τη χρήση των πολυγωνικών τμημάτων που δίνει αυτός στο γενικό σύστημα σύντηξης δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων.

Σύστημα ανάλυσης δεδομένων σαρωτή λέιζερ χαμηλού επιπέδου

Ο αισθητήρας λέιζεο που χρησιμοποιήθηκε για προεπεξεργασία των μετρήσεων είναι το Automotive Laser Scanner (ALASCA) της Hella και της IBEO που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2. Σε αντίθεση με τον αισθητήρα LRR το λέιζεο παράγει ένα τεράστιο αριθμό επιστροφών από το περιβάλλον του οχήματος τα οποία δεν είναι απαραίτητο να είναι μεταλλικά και προφανώς κάθε όχημα στόχος ή άλλο αντικείμενο αντιπροσωπεύεται από έναν μεγάλο αριθμό σημείων και όχι μόνο από ένα. Όλα αυτά δημιουργούν την ανάγκη της εξαγωγής ενός ειδικού βήματος παροεπεξεργασίας για την ομαδοποίηση, την ταξινόμηση και το φιλτράρισμα των πλεοναζόντων από τα raw σημεία που δίνει ο αισθητήρας. Ένα παράδειγμα για το πλήθος των δεδομένων που δίνει σε μια τυπική του σάρωση το λέιζερ και την σταδιακή τους μείωση στα διάφορα στάδια του αλγορίθμου προεπεξεργασίας που προτείνεται φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 84: Αριθμός τυπικών επιστροφών από σάρωση του λέιζερ, συγκρινόμενος με επιστροφές του LRR καθώς και των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων του αλγορίθμου ομαδοποίησης

Γενικά στα σενάρια που εξετάζουμε σε αυτήν την αρχιτεκτονική το πλήθος των πραγματικών αντικειμένων εντός του δρόμου πρακτικά ταυτίζεται με τις επιστροφές του LRR, μιας και αυτό δίνει μία επιστροφή για κάθε κινούμενο αντικείμενο και λίγες για τα ακίνητα αντικείμενα. Αντίθετα ο σαρωτής λέιζερ δίνει επιστροφές για πολλά αντικείμενα στο περιβάλλον οδήγησης όπως οχήματα, όρια δρόμου, κτίρια, δέντρα κλπ και πολλαπλές επιστροφές για καθένα από αυτά. Τα ανεπεξέργαστα δεδομένα του λέιζερ δίνονται με μπλε χρώμα και φθάνουν περίπου τα 1000 σημεία για κάθε σάρωση, το ενσωματωμένο σύστημα εξαγωγής αντικειμένων του αισθητήρα δίνει επίσης αρκετές δεκάδες αντικείμενα (η κόκκινη καμπύλη στο σχήμα). Με πράσινη γραμμή δίνονται οι ανεπεξέργαστες μετρήσεις του LRR. Τέλος με μαύρη γραμμή είναι τα αντικείμενα εξόδου του αλγορίθμου που υλοποιήθηκε και προέρχονται από ομαδοποίηση και ταξινόμηση των ανεπεξέργαστων δεδομένων του λέιζερ όπως θα περιγραφεί στις επόμενες παραγράφους.

Εξαγωγή αντικειμένων από τις μετρήσεις

Ο αλγόριθμος εξαγωγής μετρήσεων από τα δεδομένα του σαρωτή λέιζερ παρουσιάζεται στο ακόλουθο block διάγραμμα της εικόνας 85. Η 2xN_p μήτρα με τα δεδομένα εισόδου του σαρωτή λέιζεο εισάγεται στον αλγόριθμο. Αρχικά η μήτρα των σημείων ταξινομείται και ομαδοποιούνται τα δεδομένα της ώστε να αποφευχθεί υπερβολικό υπολογιστικό φορτίο στον αλγόριθμο. Η διαδικασία ομαδοποίησης γίνεται με συγχώνευση των σημείων που είναι κοντά μεταξύ τους, για παράδειγμα 1 μέτρο. Η μικρότερη μήτρα των 2xNG εισάγεται στον αλγόριθμο clustering. Αρχικά επιλέγεται ο αριθμός των αντικειμένων που θα έχει το κάθε cluster σύμφωνα με το μέγεθος της αρχικής μήτρας εισόδου, τυπικό μέγεθος για το cluster είναι 5 σημεία. Το επόμενο βήμα αφορά το c-means clustering με τον αριθμό των clusters να είναι συμφωνά με τον αριθμό των δεδομένων εισόδου και των επιθυμητών σημείων που επιθυμούμε να περιέχεται σε καθένα από αυτά. Το διάνυσμα εισόδου περιλαμβάνει αποκλειστικά τις τιμές της γ-συντεταγμένης των αντικειμένων. Οι γ-συντεταγμένες προτιμήθηκαν καθώς το λέιζερ δίνει πολλές επιστροφές για τις γραμμές των ορίων του δρόμου (που έχουν παρόμοια y) και δεν θα ήταν έξυπνο να δοθεί σαν είσοδος όλο το σημείο καθώς αυτό θα χώριζε τις γραμμές των ορίων σε πολλαπλά τμήματα. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα του c-means clustering ελέγχονται ως προς την πυκνότητα των τιμών-x ώστε να αποφευχθεί η περίπτωση δύο ή περισσότερα οχήματα να ομαδοποιηθούν σαν μία γραμμή. Αυτό γίνεται με έλεγχο όλων των ομάδων εσωτερικά ώστε η x-τιμές να εκτείνονται ομοιόμορφα μέσα σε

αυτήν και να μην υπάρχουν συσσωματώσεις. Αν ο έλεγχος είναι ικανοποιητικός η διαδικασία προχωράει στο επόμενο βήμα διαφορετικά λαμβάνει χώρα περαιτέρω clustering των μη κατάλληλων ομάδων. Οι επιτυχείς ομάδες-clusters ταξινομούνται σε γραμμές και πιθανά αντικείμενα με βάση την πολυωνυμική παρεμβολή και τον έλεγχο των πολυωνυμικών παραμέτρων. Τα αντικείμενα που δεν είναι γραμμές ομαδοποιούνται ακόμα μια φορά ώστε να αποφευχθεί η ύπαρξη εκτεταμένων αντικειμένων με χρήση ελέγχων θύρας και μέσων τιμών των σημείων που αποτελούν ένα αντικείμενο. Η έξοδος αυτής της διαδικασίας αποτελείται από τις μετρήσεις εισόδου στο σύστημα ιχνηλασίας του σαρωτή λέιζερ. Τα υπόλοιπα δεδομένα που αποτελούν γραμμές συγχωνεύονται σε πιθανά αριστερά και δεξιά υποψήφια όρια του δρόμου και εισάγονται στον αντίστοιχο αλγόριθμο.



Εικόνα 85: Αλγόριθμος προεπεξεργασίας δεδομένων σαρωτή λέιζερ

Ένα screen shot του αλγορίθμου για την εξαγωγή δεδομένων ορίων του δρόμου και άλλων αντικειμένων φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Διακρίνεται δεξιά και η συγχρονισμένη εικόνα της κάμερας που χρησιμοποιήθηκε για λόγους αποτίμησης της επίδοσης των αλγορίθμων όπως και σε αρκετές εφαρμογές που περιγράφονται στην εργασία αυτή. Διακρίνονται με πράσινο χρώμα 1090 ανεπεξέργαστα δεδομένα του σαρωτή λέιζερ, τα οποία αρχικά ομαδοποιούνται σε 106 με τον παραπάνω αλγόριθμο να δίνει 22 αντικείμενα και γραμμές.





Εικόνα 86: Πρώτο βήμα ομαδοποίησης των δεδομένων του σαρωτή λέιζερ (παράδειγμα)

Στην ακόλουθη εικόνα δίνεται επίσης ένα ακόμα παράδειγμα επεξεργασίας με μεγαλύτερη ανάλυση. Υπάρχουν 588 ανεπεξέργαστα δεδομένα του σαρωτή λέιζερ ενώ με μπλε χρώμα διακρίνονται τα 41 ομαδοποιημένα αντικείμενα ενώ με μαύρο φαίνονται τα 12 αντικείμενα που εισάγονται στον αλγόριθμο επεξεργασίας.



Εικόνα 87: Εξαγωγή μετρήσεων για ιχνηλασία δεδομένων σαρωτή λέιζερ (παράδειγμα)

Στην εικόνα 87 υπάρχουν κάποια αντικείμενα που είναι πολύ κοντά πάνω ή εκτός των ορίων του δρόμου, αυτά μπορούν να μειωθούν αν υπάρχει στο σύστημα πληροφορία σχετική της θέσης των ορίων του δρόμου.

Επεξεργασία δεδομένων του σαρωτή λέιζερ

Η διαδικασία εξαγωγής μετρήσεων εισόδου για τον ιχνηλάτη δεδομένων λέιζερ δημιουργεί μεγάλο αριθμό ψευδών στόχων όπως φάνηκε από τα παραπάνω παραδείγματα. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η μέθοδος JPDA (βλέπε ενότητα 4.1) για την ιχνηλασία των δεδομένων αυτών με τον χώρο μετρήσεων και κατάστασης να είναι γραμμικός, τα δεδομένα εισόδου είναι οι καρτεσιανές θέσεις x-y και χρησιμοποιείται απλό φίλτρο Kalman. Επίσης χρησιμοποιείται και ο αλγόριθμος εξαγωγής ορίων του δρόμου που περιγράφηκε στην ενότητα 3.3 χωρίς καμιά επιπλέον αλλαγή. Το πρόγραμμα σύντηξης εκτός από την ιχνηλασία και την επεξεργασία των δεδομένων του σαρωτή λέιζεο περιλαμβάνει σύστημα ιχνηλασίας ραντάρ μακρινού πεδίου τοποθετημένο στην πίσω περιοχή σαν αυτό που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3, στην παράγραφο της προσομοίωσης. Το σύστημα σύντηξης δεδομένων των δύο αυτών αισθητήρων χρησιμοποιεί σύντηξη συνδιακυμάνσεων επιπέδου αισθητήρα με τη μέθοδο της διασταυρούμενης συνδιακύμανσης και τα αποτελέσματα της δίνονται στη συνέχεια.

Αποτελέσματα

Στην εικόνα 88 παρουσιάζεται ένα screen shot του προγράμματος Matlab που υλοποιήθηκε για την εξέταση της επίδοσης του συστήματος σύντηξης του λέιζερ και του ραντάρ. Στην αριστερή πλευρά της εικόνας φαίνονται οι εκτιμήσεις των ορίων του δρόμου από τις παρατηρήσεις του λέιζερ με μαύρο χρώμα, φαίνονται επίσης τρία τελικά συντηγμένα αντικείμενα (μαύρα τετράγωνα) με το ID τους, τα ίχνη των συστημάτων ιχνηλασίας του σαρωτή και του ραντάρ απεικονίζονται με πράσινα και κόκκινα τετράγωνα αντίστοιχα. Το ίδιο όχημα φαίνεται με ένα μαύρο ορθογώνιο στην αρχή των αξόνων. Το FOV του ραντάρ διακρίνεται επίσης στην εικόνα, υπάρχει επίσης διαθέσιμη και εικόνα από κάμερα της πίσω περιοχής όπου διακρίνονται τα δύο τουλάχιστον αντικείμενα που αναγνωρίστηκαν στο επίπεδο του δρόμου.







Εικόνα 88: Εικόνα του προγράμματος αποτίμησης της επίδοσης της σύντηξης σαρωτή λέιζερ και LRR

Για τον έλεγχο της επίδοσης του συστήματος επελέγησαν διάφορα σενάρια κίνησης και στην εικόνα που ακολουθεί δίνονται συσωρευτικά σχήματα για δύο συγκεκριμένα σενάρια: (1) κυκλοφορίας σε αστικό περιβάλλον με το ίδιο όχημα να προσπερνάται, διάρκειας 1628 σαρώσεων, (2) κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομο με το ίδιο όχημα επίσης να προσπερνάται, διάρκειας 1423 σαρώσεων. Τα αποτελέσματα όπως φαίνεται από τα ακόλουθα διαγράμματα δεν είναι ευνοϊκά κυρίως λόγω της διαφαινόμενης αποτυχίας του αλγορίθμου ομαδοποίησης των δεδομένων του λέιζερ όπως φαίνεται από την πληθώρα των ψευδών συντηγμένων ιχνών και στα δύο σενάρια. Επίσης ο ευθύς τρόπος σύντηξης των ιχνών πιθανόν να ευθύνεται και αυτός για την επίδοση αυτή.

Η επιλογή ανάλυσης χαμηλού επιπέδου δεδομένων σαρωτή λέιζερ εγκαταλείφθηκε (λόγω και της μεγάλης καθυστέρησης που εισάγει) και επελέγη η χρήση υψηλού επιπέδου πληροφορίας από τον ίδιο αισθητήρα, με την μέθοδο και τα αποτελέσματα της να περιγράφονται στην παράγραφο που ακολουθεί.



Εικόνα 89: Συσωρευτικά σχήματα αποτελεσμάτων σύντηξης σαρωτή λέιζερ και LRR για τα σενάρια 1 και 2

Σύστημα ανάλυσης δεδομένων σαρωτή λέιζερ υψηλού επιπέδου

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 74 ο σαρωτή λέιζερ που χρησιμοποιείται στο εξεταζόμενο πειραματικό όχημα VOLVO (παράγραφος 2.3, εικόνα 10) αποδίδει μετρήσεις με τη μορφή πολυγωνικών γραμμών που αντιστοιχούν τόσο σε οχήματα όσο και σε όρια του δρόμου και άλλα στοιχεία του οδικού περιβάλλοντος (π.χ. κτίρια, δέντρα κλπ). Για το λόγο αυτό είναι εντελώς απαραίτητο να προηγηθεί μια ταξινόμηση και ταυτοποίηση των πολύγωνων αυτών ώστε να αξιοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό η πολύμορφη πληροφορία που προσφέρει ο συγκεκριμένος αισθητήρας. Επιπροσθέτως η πληροφορία ταχύτητας που δίνει ο αισθητήρας αυτός (με εσωτερική επεξεργασία) αποδεικνύεται αναξιόπιστη και δεν οδηγεί στον διαχωρισμό μεταξύ κινούμενων στόχων (αυτοκίνητα) ή μη. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η προεπεξεργασία να κινηθεί προς την κατεύθυνση του γεωμετρικού ελέγχου για προκαθορισμένα σχήματα, τυπικά των δεδομένων του σαρωτή λέιζερ.

Ο αλγόριθμος ψάχνει για απλές γραμμές οριζόντιες ή κάθετες και σχήματα "L" διαφορετικών κατευθύνσεων. Τα κάθετα σχήματα "I" και τα σχήματα "L"συνήθως αντιστοιχούν σε οχήματα με πληροφορία σχετική με τις διαστάσεις τους να εξάγεται επίσης. Η επιλογή των δεδομένων που είναι υποψήφια για εκτίμηση ορίων του δρόμου βασίζεται στην ακόλουθη ιδέα. Λαμβάνονται υπόψη τα σημεία που βρίσκονται μεταξύ δύο παράλληλων λωρίδων, αριστερά και δεξιά του ιδίου οχήματος, αδιαφορώντας για τα υπόλοιπα σημεία. Με αυτόν τον τρόπο το πρώτο σύνολο μετρήσεων έχει δημιουργηθεί. Ακολούθως το δεύτερο βήμα είναι ο εντοπισμός των οχημάτων που βρίσκονται εντός των δύο αυτών λωρίδων. Ένας αλγόριθμος ψάχνει συγκεκριμένα για κοντινά και παράλληλα κινούμενα σημεία τα οποία εξαιρούνται από τη χρήση τους στην εκτίμηση των ορίων του δρόμου.

Ο αλγόριθμος ανίχνευσης των ορίων του δρόμου με χρήση των μετρήσεων του σαρωτή λέιζερ είναι παρόμοιος με αυτόν που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3 (με χρήση των μετρήσεων του ραντάρ μακρινού πεδίου) με τη διαφορά ότι σε αυτήν την περίπτωση δεν χρησιμοποιούνται οι τεχνικές επιλογής σημείων (με γεωμετρική και συνδυαστική μέθοδο ανίχνευσης σημείων) που χρησιμοποιηθήκαν σε εκείνη την περίπτωση.



οχήματα

Στην εικόνα 90 παρουσιάζονται τυπικές περιπτώσεις πολυγωνικών μετρήσεων που αναγνωρίστηκαν ως οχήματα.

Όσον αφορά την ιχνηλασία των δεδομένων του σαρωτή λέιζερ σημειώνεται ότι στο διάνυσμα κατάστασης και μετρήσεων εισάγεται επιπλέον και πληροφορία διάστασης του αντικειμένου (πλάτος και μήκος) καθώς και οι συντεταγμένες μέτρησης δίνονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα βασικά συστήματα ιχνηλασίας ή (προ)επεξεργασίας δεδομένων επιπέδου αισθητήρα που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της υλοποίησης των κύριων συστημάτων σύντηξης δεδομένων που εξετάστηκαν. Η φύση των συστημάτων σύντηξης δεδομένων επιπέδου ιχνών που παρουσιάζονται στην εργασία αυτήν, προϋποθέτει υψηλής ακρίβειας και καλής επίδοσης επεξεργασία στο επίπεδο του αισθητήρα. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται τα υποσυστήματα επεξεργασίας: μηδενικού υπολογισμού θέσης, ιχνηλασίας δεδομένων ραντάρ (με εφαρμογή σε διαφόρους τύπους ραντάρ και στα επεξεργασμένα δεδομένα του σαρωτή λέιζερ, ανίχνευση ορίων δρόμου με χρήση δεδομένων ραντάρ ή λέιζερ, προεπεξεργασία μετρήσεων ραντάρ κοντινού πεδίου και λέιζερ καθώς και σύστημα χαμηλού επιπέδου σύντηξης δεδομένων ραντάρ και κάμερας.

Το σύστημα ιχνηλασίας δεδομένων που αναπτύχθηκε και ελέγχθηκε κυρίως με χρήση δεδομένων ραντάρ μακρινού εύρους αποδείχθηκε ότι λειτουργεί ικανοποιητικά σε μια σειρά από δοκιμές που πραγματοποιηθήκαν. Με κατάλληλες τροποποιήσεις που αφορούσαν κυρίως τα διανύσματα κατάστασης και μετρήσεων το γενικό σχήμα ιχνηλασίας εφαρμόστηκε και στα δεδομένα των ραντάρ κοντινού πεδίου και του σαρωτή λέιζερ με αξιόπιστη λειτουργία στους τομείς της διατήρησης και του εντοπισμού των στόχων. Η βέλτιστη αξιοποίηση των δεδομένων του ιχνηλάτη λέιζεο στην εξαγωγή του ακοιβούς περιγράμματος των αντικειμένων του οδικού περιβάλλοντος ήταν επίσης ένα σημαντικό αποτέλεσμα της ιχνηλασίας στο επίπεδο του αισθητήρα. Η ανάπτυξη ενός κατάλληλου αλγορίθμου εντοπισμού ορίων του δρόμου χρησιμοποιώντας τις πλεονάζουσες ανιχνεύσεις των αισθητήρων παρουσιάστηκε επίσης σε αυτό το κεφάλαιο με χρήση δεδομένων τόσο του ραντάρ υψηλής ευκρίνειας όσο και του σαρωτή λέιζερ. Τέλος, εξετάστηκε η χρήση χαμηλού επιπέδου σύντηξης μεταξύ ραντάρ και κάμερας για εξαγωγή πληροφορίας θέσης αντικειμένου και σύντηξη στο επίπεδο του δρόμου. Γενικά, η μέθοδος σύντηξης επιπέδου ιχνών που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5 τροφοδοτείται όπως φάνηκε στο παρόν κεφάλαιο από πληροφορία ιχνών υψηλού επιπέδου με πλήρες διάνυσμα κατάστασης (θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση) και επίσης και πληροφορία μεγέθους και διαστάσεων (στην περίπτωση του λέιζερ) και μήτρα συνδιακύμανσης. Αυτή η πληροφορία των ιχνών επιτρέπει την εξαγωγή πληροφορίας με τη σύντηξη των δεδομένων αυτών.

Αναφορές

- [1] B. Ristic, S. Arulampalam, N. Gordon, Beyond the Kalman Filter Particle Filters for Tracking Applications, Artech House, Boston-London, 2004.
- [2] Y. Bar-Shalom, X. Rong Li, T. Kirubarayan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*, John Willey & Sons, Inc., New York, 2001.
- [3] A. Amditis, N. Floudas, A. Polychronopoulos, *Lateral motion tracking of automobiles*, in Proc. of the ISIF 7th International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, 28/06-01/07 2004, pp. 768-774.
- [4] F. Gustafsson, F. Gunnarsson, N. Bergman, U. Forssell, J. Jansson, R. Karlsson, P. Nordlund, *Particle Filters for Positioning, Navigation and Tracking*, IEEE Transactions on Signal Processing, Special issue on Monte Carlo methods for statistical signal processing.
- [5] N. J. Gordon, D. J. Salmond, A. F. M. Smith, Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation, IEE Proc.-F, Vol. 140, No. 2, pp. 107-113, 1993.
- [6] M. Pitt, N. Shephard, *Filtering via simulation: Auxiliary particle filters,* Journal of the American Statistical Association, Vol. 94, No. 446, pp. 590-599, 1999
- Blackman S. S. and Popoli R., "Design and Analysis of Modern Tracking Systems", Norwood, MA: Artech House, 1999.
- [8] N. Floudas, A. Polychronopoulos, A. Amditis, "A survey of filtering techniques for vehicle tracking by radar equipped automotive platforms", Proc. of the 8th Eight International Conference on Information Fusion (FUSION 2005), Philadelphia, PA USA, 25- 29/07/2005, paper P-7.

- [9] N. Floudas, A. Polychronopoulos, M. Tsogas, A. Amditis, "Multi-Sensor Coordination And Fusion For Automotive Safety Applications", Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion (FUSION 2006), Florence, Italy, 10 - 14/07/2006, paper 346.
- [10] A. Polychronopoulos, A. Amditis, N. Floudas, H. Lind, "Integrated object and road borders tracking using 77GHz automotive radars", IEE Proc.-Radar Sonar Navig., Vol. 151, No. 6, December 2004, pp. 375-381.
- [11] A. Amditis, A. Polychronopoulos, N. Floudas, L. Andreone, "Fusion of infrared Vision and Radar for estimating the lateral dynamics of obstacles", (Elsevier) Information Fusion, Vol. 6, Issue 2, June 2005, pp. 129-141.
- [12] Α.Δ. Πολυχρονόπουλος, Σχεδίαση και ανάπτυξη συστήματος σύντηξης δεδομένων από πολλαπλές πηγές με χρήση εκτιμητών Kalman με εφαρμογή στην ανασύνθεση του οδικού περιβάλλοντος, διδακτορική διατριβή, ΗΜΜΥ/ΕΜΠ, Ιούνιος 2004
- [13] H. Weigel, H. Cramer, G. Wanielik, A. Polychronopoulos, A. Saroldi, Accurate Road Geometry Estimation for a Safe Speed Application, Intelligent Vehicles Symposium 2006, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, pp.516-521.
- [14] ANTARIS GPS Evaluation kit, User's guide, GPS.G3-EK-02003-B, 1/11/2004, www.u-blox.com
- [15] WGS 84 Implementation Manual, version 2.4, February 12, 1998, by EUROCONTROL European Organization for the Safety of Air Navigation Brussels, Belgium and Institute of Geodesy and Navigation (IfEN) University FAF Munich, Germany
- [16] N. Floudas, M. Tsogas, A. Amditis, H. Weigel, POSITIONING AND PATH PREDICTION FOR SCENARIO ASSESSMENT OF SAFE SPEED SYSTEM, submitted to ITS World Congress, Beijing, 2007.
- [17] Ν. Φλούδας, Μ. Τσόγκας, Συστήματα Σύζευξης Δεδομένων (Data Fusion) Ανάλυση και Προσομοίωση Υποσυστημάτων, διπλωματική εργασία, ΗΜΜΥ/ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2002.
- [18] David L. Hall, Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion, Artech House, Boston-London, 1992.
- [19] Dickmanns, E., Mysliwetz B., "Recursive 3-D Road and Relative Ego-State Recognition", Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence", Vol. 14, No. 2, February, 1998
- [20] "Road Vehicles Adaptive Cruise Control Systems, Performance requirements and test procedures". ISO/TC204/WG14/N143.14 – Nov 98
- [21] Kirchner, A., Heinrich, T., "Model based detection of road boundaries with a laser scanner", IEEE International Conference on Intelligent Vehicles", 1998.
- [22] Andreone, L., Antonello, P.C., Bertozzi, M., Broggi, A., Fascioli, A., Ranzato, D., "Vehicle Detection and Localization in Infra-Red Images", In Proc. IEEE Intl. Conf. On Intelligent Transportation Systems 2002, pages 141-146, Singapore, September 2002.
- [23] Dellaert, F., Pomerleau, D., Thorpe, C., "Model-Based Car Tracking Integrated with a Road-Follower", Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, 16-20 May 1998, Vol. 3, pp. 1889 -1894.
- [24] Handmann, U., Lorenz, G., Schnitger, T., Seelen, W., "Fusion of Different sensors and algorithms for segmentation", Proc. IEEE Conference on Intelligent Vehicles, 1998.
- [25] Kato, T., Ninomiya, Y., Masaki, I., "An obstacle detection method by fusion of Radar and Motion Stereo", IEEE Trans. on Intel. Transp. Systems, Sept. 2002, Vol.3
- [26] Beauvais, M., Lakshmann, S., "CLARK: an heterogeneous sensor fusion method for finding lanes and obstacles", Proc. IEEE Conference on Intelligent Vehicles, 1996.
- [27] Gern, A., Franke U., Levi, P., "Robust Vehicle tracking fusing radar and vision", 2001
- [28] D. Lerro, Y. Bar-Shalom, Tracking with debiased consistent converted measurements versus EKF, IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems 29 (3) (July 1993) 1015-1022.
- [29] S. Julier, J. Uhlmann, H.F. Durrant-White, "A new method for nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators", IEEE Trans. Automatic Control, vol. 33, pp. 780-783, March 2000.
- [30] A. Doucet, S. Godsill, C. Andrieau, "On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering", Statistics and Computing, vol. 10, mo. 3, pp.197-208, 2000.
- [31] N. J. Gordon, D. J. Salmond, A.F.M. Smith, "Novel approach to nonlinear-non-Gaussian Bayesian state estimation," IEE Proc.-F, vol. 140, no. 2, pp. 107-113, 1993.
- [32] C. Musso, N. Oudjane, F. LeGland, "Improving regularized particle filters", in Sequential Monte Carlo Methods in Practice (A. Doucet, n. de Freitas and N.J. Gordon, eds.), New York: Springer, 2001

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Σύνδεση δεδομένων σε δύο ή περισσότερες διαστάσεις

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι κύριες μέθοδοι σύνδεσης δεδομένων και εξαγωγής της πληροφορίας ανάθεσης. Περιγράφονται θεωρητικά οι τεχνικές βελτιστοποίησης για την επίλυση των δυσδιάστατων και των πολυδιάστατων προβλημάτων ανάθεσης μαζί με τις κλασσικές μεθόδους αξιοποίησης των πληροφοριών αυτών σε συνδυαστικές πιθανοτικές μεθόδους σύνδεσης δεδομένων και ιχνηλασίας. Τέλος περιγράφονται οι μέθοδοι υλοποίησης των μέτρων συνδεσιμότητας μεταξύ των πολυσημειακών δεδομένων για την δημιουργία των μητρών σύνδεσης και το κεφάλαιο κλείνει με αποτελέσματα που αφορούν διάφορες προσομοιώσεις κυρίως στο θέμα της ανάθεσης.

4.1 Επίλυση δυσδιάστατης ανάθεσης

Μία εναλλακτική προσέγγιση σύνδεσης δεδομένων και η κύρια μέθοδος που εφαρμόζεται εδώ είναι μέσω των αλγορίθμων ανάθεσης, οι οποίοι έχουν αποδειχτεί ιδιαίτερα αποτελεσματικοί για ιχνηλασία στόχων παρουσία clutter [2]. Το πρόβλημα της σύνδεσης δεδομένων παρουσιάζεται τότε ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, όπου συνήθως απαιτείται η μεγιστοποίηση ή η ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης.

Το πρόβλημα της ανάθεσης αρχικά μελετήθηκε για προβλήματα της οικονομικής θεωρίας όπως για παράδειγμα η ανάθεση καθηκόντων σε προσωπικό. Ο στόχος σε προβλήματα τέτοιου είδους είναι η ελαχιστοποίηση ενός κόστους (ή μεγιστοποίηση ενός κέρδους) χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους πόρους. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση του προβλήματος, αλλά καθώς το πρόβλημα της ανάθεσης άρχισε να σχετίζεται και με άλλα πεδία, όπως η ιχνηλασία, αναπτύχθηκαν νέες τεχνικές. Στη συνέχεια ακολουθεί μια περιγραφή του προβλήματος της ανάθεσης δύο διαστάσεων.

Δίνεται μια μήτρα με στοιχεία τα a_{ii} και ζητείται να βρεθούν εκείνα τα x_{ii} για τα οποία το

κόστος
$$C = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_{ij}$$
 (4.1)

ελαχιστοποιείται υπό την προϋπόθεση ότι ισχύουν τα εξής:

$$\sum_{i} x_{ij} = 1, \forall j$$

$$\sum_{i} x_{ij} = 1, \forall i$$
(4.2)
(4.3)

Μια βέλτιστη λύση στο πρόβλημα αυτό δίνει την δυνατότητα τα στοιχεία x_{ij} να είναι είτε 0 είτε 1. Στην περίπτωση όπου έχουμε ιχνηλασία στόχων τα στοιχεία x_{ij} αποτελούν τα ζητούμενα ζεύγη παρατήρησης-ίχνους και το κόστος (ή αντίστοιχα η αρνητική διαβάθμιση κέρδους) είναι αυτό που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Παρόμοια στην περίπτωση όπου έχουμε σύντηξη ιχνών τα στοιχεία x_{ij} είναι τα ζητούμενα ζεύγη ίχνους-ίχνους. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται η μεγιστοποίηση μιας συνάρτησης κέρδους ή μιας πιθανότητας αντί της ελαχιστοποιήσης μιας συνάρτησης κόστους. Οι πρώτες μέθοδοι που είχαν εφαρμοστεί για την επίλυση του προβλήματος της ανάθεσης έδιναν αποτελέσματα μόνο για τετραγωνικές μήτρες ανάθεσης και είχαν πολυπλοκότητα O(n⁴). Πιο εξελιγμένοι αλγόριθμοι είχαν πολυπλοκότητα O(n²m) όπου n το min(πλήθος παρατηρήσεων, πλήθος ιχνών) και m το max(πλήθος παρατηρήσεων,πλήθος ιχνών). Πιο σύγχρονες και ταχύτερες μέθοδοι είναι ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού [4], ο αλγόριθμος JVC [8] και οι διάφορες εκδοχές τους, καθώς και οι διάφορες τεχνικές χαλάρωσης [6][17][7]. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στους παραπάνω αλγορίθμους διαφέρουν ως προς τον τρόπο που προσεγγίζουν την λύση. Οι πρώτες τεχνικές προσπαθούσαν μέσω της κατευθύνσεως της πιο απότομης κλίσης να βελτιώσουν την λύση, ενώ η μέθοδος της χαλάρωσης χρησιμοποιεί μια μέθοδο κλίσης συντεταγμένων με κατευθύνσεις, οι οποίες δεν είναι απαραίτητα οι πιο απότομες, αλλά μπορούν να υπολογιστούν γρηγορότερα. Ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού μπορεί να χειροτερεύσει τη λύση σε μια επανάληψη αλλά το τελικό αποτέλεσμα θα είναι μια λύση που θα είναι είτε ή βέλτιστη ή τόσο κοντά στην βέλτιστη ώστε να μην υπάρχει ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δύο λύσεων. Το γεγονός ότι ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού εφαρμόζεται στην πλειοψηφία των εφαρμογών φανερώνει ότι είναι ο πιο αποτελεσματικός μέχρι στιγμής.

Αλγόριθμος πλειστηριασμού

Όπως σε μια πραγματική δημοπρασία ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού έχει ως στόχο την μεγιστοποίηση του κέρδους. Για αυτό το λόγο, τα στοιχεία στη μήτρα ανάθεσης επιλέγονται να είναι οι διαβαθμίσεις κέρδους των επιτρεπτών ζευγών παρατήρησης-ίχνους (εκείνων δηλαδή που περνούν τον έλεγχο της πύλης). Εναλλακτικά τα στοιχεία της μήτρας μπορεί να είναι οι τιμές των θυρών μείον τις κανονικοποιημένες αποστάσεις.

Αρχικά ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού είχε σχεδιασθεί για την επίλυση τετραγωνικών μητρών ανάθεσης, αλλά τελικά επεκτάθηκε ώστε να επιλύει και ορθογώνιες μήτρες. Ο αλγόριθμος ([4][20][2][21]) αποτελείται από δύο φάσεις: την φάση της προσφοράς και την φάση της ανάθεσης. Η φάση της προσφοράς περιλαμβάνει την αναζήτηση του καλύτερου ίχνους για κάθε ασύνδετη παρατήρηση και την προσφορά για αυτήν. Η προσφορά υπολογίζεται με στόχο την αύξηση της "τιμής" P του ίχνους, έτσι ώστε η παρατήρηση να ικανοποιηθεί με το δεύτερο καλύτερο ίχνος στην περίπτωση που κάποια άλλη παρατήρηση και καταργείται τυχόν προηγούμενη ανάθεσης στην ίδια παρατήρηση και την αραστήρηση και καταργείται τυχόν προηγούμενη ανάθεση στην ίδια παρατήρηση. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι όλες οι παρατηρήσεις να είναι σχεδόν ικανοποιημένες ή όταν έχει βρεθεί η βέλτιστη λύση. Όπως και σε ένα πραγματικό πλειστηριασμό ο αλγόριθμος συγκλίνει γρηγορότερα, όταν τα βήματα των προσφορών είναι μεγάλα, αλλά μεγάλα βήματα προσφορών μπορεί να μην οδηγήσουν στη βέλτιστη λύση. Θα λέμε ότι μια παρατήρηση *μ* είναι μέγιστη (το ε καθορίζει αν η ανάθεση θα είναι βέλτιστη). Θα πρέπει δηλαδή να ισχύει:

$$[\max_{i}(a_{ij} - P_i)] - (a_{i,j} - P_{i_j}) \le \varepsilon$$

$$(4.4)$$

όπου $a_{i_j,j}$ το κέφδος ανάθεσης της παφατήφησης j στο ίχνος i_j και P_{i_j} η τιμή του ίχνους i_j . Αν υπάρχει έστω και μια δυνατή λύση, ο αλγόφιθμος τεφματίζει με αυτή την δυνατή ανάθεση, η οποία απέχει *nε* από το να είναι βέλτιστη. Αυτό σημαίνει ότι το τελικό κέφδος ανάθεσης απέχει *nε* από το αντίστοιχο βέλτιστο (βέλτιστο κέφδος έχουμε όταν τα κέφδη a_{ij} είναι ακέφαιοι και ισχύει $\varepsilon < 1/n$). Μια δυνατή ανάθεση είναι η ανάθεση όλων των παφατηφήσεων σε ίχνη, η οποία όμως θα ικανοποιεί τους αρχικούς πεφιορισμούς του προβλήματος της ανάθεσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βήματα του αλγορίθμου του πλειστηριασμού:

1. Αρχικοποίηση όλων των παρατηρήσεων ως μη ανατεθειμένες. Αρχικοποίηση των τιμών των ιχνών P_i είτε με μηδενικές τιμές είτε με αμελητέα μικρές τιμές.

2. Επιλογή μιας παρατήρησης *j* η οποία δεν έχει ανατεθεί σε κάποιο ίχνος. Αν όλες οι παρατηρήσεις είναι ανατεθειμένες τότε ο αλγόριθμος έχει τελειώσει.

3. Εύρεση του καλύτερου ίχνους i, για κάθε παρατήρηση j έτσι ώστε να ισχύει:

$$a_{i_j} - P_{i_j} = \max_{i=1\dots,n} (a_{ij} - P_i)$$
(4.5)

 Κατάργηση αν υπάρχει κάποια ανάθεση παρατήρησης στο ίχνος i, και ανάθεση του ίχνους i, στην παρατήρηση j.

5. Η τιμή του ίχνους i_j γίνεται $P_{i_j} = P_{i_j} + y_j + \varepsilon$ όπου y_j η διαφορά μεταξύ των δυο πρώτων καλύτερων τιμών ανάθεσης για την / παρατήρηση.

6. Επιστροφή στο βήμα 2.

Πολλές φορές, και κυρίως όταν η μήτρα ανάθεσης αφορά το πρόβλημα σύνδεσης ιχνών από πολλαπλούς αισθητήρες ή από πολλαπλές σαρώσεις, είναι δυνατόν να γίνονται αναθέσεις των γραμμών-ιχνών σε αυτά των στηλών-ιχνών, δηλαδή ισχύει $a_{j_i} - P_{j_i} = \max(a_{ij} - P_j)$.

Είναι ακόμη σημαντικό να αναφερθεί ότι για την επίλυση του γενικευμένου προβλήματος ανάθεσης 2 διαστάσεων χρησιμοποιείται ο τροποποιημένος αλγόριθμος πλειστηριασμού [21]. Το γενικευμένο πρόβλημα ανάθεσης δύο διαστάσεων είναι το ακόλουθο:

$$\max\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}a_{ij}x_{ij}$$
(4.6)

όπου

$$\sum_{i} x_{ij} = 1, \forall j \tag{4.7}$$

$$\sum_{j} x_{ij} = 1, \forall i \tag{4.8}$$

Το δϋικό του παραπάνω προβλήματος είναι (θεωρώντας ότι a₀₀=0):

$$\min_{i,j} \left\{ \sum_{i=1}^{n} p_i + \sum_{j=1}^{m} q_j \right\}$$
(4.9)

όπου $p_i + q_j \ge a_{ij}$, $1 \le i \le n, 1 \le j \le m$

$$p_i \ge a_{i0}, 1 \le i \le n \tag{4.11}$$

$$q_j \ge a_{0j}, 1 \le j \le m \tag{4.12}$$

Τα p_i και q_i είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange. Ισοδύναμα το δυικό πρόβλημα μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

(4.10)

$$\min_{q_j \ge a_{oj}} \left\{ \sum_{i=1}^n \max \left\{ \max_{1 \le j \le m} \left\{ (a_{ij} - q_j), a_{i0} \right\} \right\} + \sum_{j=1}^m q_j \right\}$$
(4.13)

και χρησιμοποιώντας τους μετασχηματισμούς $q'_j = q_j - a_{0j}$ και $p'_i = p_i - a_{i0}$ παίρνουμε το τροποποιημένο δυικό πρόβλημα:

$$\min_{q_{j}' \ge 0} \left\{ \sum_{i=1}^{n} \max_{i,j} \left\{ \max_{1 \le j \le m} \left\{ (a_{ij}' - q_{j}'), 0 \right\} \right\} + \sum_{j=1}^{m} q_{j}' + \sum_{i=1}^{n} a_{i0} + \sum_{j=1}^{m} a_{0j} \right\}$$
(4.14)

όπου $a'_{ij} = a_{ij} - a_{i0} - a_{0j}$.

Το παραπάνω δυικό πρόβλημα έχει την ακόλουθη ερμηνεία. Τα ίχνη με δείκτη i αντιστοιχούν στα πρόσωπα ενώ οι μετρήσεις του αισθητήρα με δείκτη j αντιστοιχούν στα πράγματα. Το ίχνος i προσφέρει για την μέτρηση j την τιμή q'_i . Η προσφορά της μέτρησης j για το ίχνος i είναι a'_{ij} και το καθαρό κέρδος της μέτρησης j είναι $p'_i = a'_{ij} - q'_j$.

Κάθε ίχνος επιθυμεί να ανατεθεί σε μέτρηση που θα ελαχιστοποιεί το κόστος του, και έτσι δίνει μια προσφορά για αυτήν. Για να βρεθεί ποια τιμή θα πρέπει να προσφέρει ένα ίχνος σε μια μέτρηση, κάθε μη ανατεθειμένο ίχνος υπολογίζει το μέγιστο καθαρό κέρδος max $p'_i = \max_i (a'_{ij} - q'_j)$ και την αντίστοιχη παρατήρηση $\hat{j} = \arg\max_i (a'_{ij} - q'_j)$.

Αν max $p'_i < 0$ τότε το ίχνος i δεν προσφέρει τίποτα. Διαφορετικά το επόμενο καθαρό κέρδος αυτού του ίχνους υπολογίζεται και είναι $p''_i = \max \{\max_{j,j\neq j} (a'_{ij} - q'_j), 0\}\}$. Η προσφορά του ίχνους i για την καλύτερη μέτρηση \hat{j} γίνεται $\hat{b}_{ij} = \hat{a}_{ij} - p''_i + \varepsilon$ όπου ε είναι όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η παράμετρος της χαλάρωσης για την οποία ισχύει $\varepsilon < \frac{1}{\max(n,m)}$.

Βάσει των παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι ο τροποποιημένος αλγόριθμος του πλειστηριασμού διαφέρει από τον κλασσικό αλγόριθμο στα ακόλουθα σημεία:

1. Αλλαγή των στοιχείων της μήτρας ανάθεσης σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

 $a'_{ij} = a_{ij} - a_{i0} - a_{0j}$, i = 0,1,...,n, j = 0,1,...,m ενώ τα στοιχεία με $a_{ij} < 0$ αγνοούνται καθώς αυτά δεν θα συμβάλλουν στην μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάζετησης. Αρχικοποίηση των $q'_{ij} = 0,1 \le j \le m$.

2. Επειδή η ανάθεση ενός ίχνους στην dummy μέτρηση (μέτρηση 0) εξασφαλίζει μηδενικό κέρδος, αρνητικά κέρδη δεν λαμβάνονται υπόψη.

3. Ίχνη μη ανατεθειμένα σε κάποια μέτρηση, $1 \le j \le m$, ανατίθενται στην μέτρηση 0 (dummy μέτρηση).

4. Μετρήσεις μη ανατεθειμένες σε κάποιο ίχνος, $1 \le i \le n$, ανατίθενται στο ίχνος 0 (dummy ίχνος).

Οι παραπάνω αλλαγές εξασφαλίζουν ότι οι τιμές των μετρήσεων μόνο θα αυξάνουν, το οποίο είναι απαραίτητο για την σύγκλιση του αλγορίθμου του πλειστηριασμού.

Αλγόοιθμος JVC

Ο αλγόριθμος JVC [21][8][17] είναι ένας αλγόριθμος για το δυσδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης, ο οποίος χρησιμοποιεί μια ειδική παραλλαγή του αλγόριθμου του Dijkstra για την εύρεση ενός ελάχιστου μονοπατιού. Παρακάτω θα παρουσιάζεται ο αλγόριθμος για την ελαχιστοποίηση του κόστους μιας μήτρας ανάθεσης, αλλά όπως έχει ήδη αναφερθεί το πρόβλημα αυτό μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης.

Η αρχική και η δυική μορφή του προβλήματος είναι οι ακόλουθες:

	Αοχική		Δυική	
	$\min\sum_{i}\sum_{j}c_{ij}x_{ij}$	(4.15)	$\max \sum_{i} u_i + \sum_{i} q_i$	(4.19)
εφόσον	$\sum_{i} x_{ij} = 1$	(4.16)	$c_{ij} - u_i - q_j \ge 0$	(4.20)
	$\sum_{i}^{i} x_{ij} = 1$	(4.17)		
	$x_{ii} \ge 0$	(4.18)		

Θεωρούμε ότι οι δείκτες i και j αναφέρονται σε ίχνη και μετρήσεις αντίστοιχα. Επιπλέον θεωρούμε ότι υπάρχουν dummy ίχνη και dummy μετρήσεις, ώστε να ισχύει n=m. Για την περιγραφή του αλγορίθμου χρειάζονται και οι ακόλουθες μεταβλητές: x_i , η οποία αναφέρεται στο δείκτη της στήλης, που ανατίθεται στη γραμμή i, y_j , η οποία αναφέρεται στο δείκτη της γραμμής, που ανατίθεται στη στήλη j. Το $x_i = 0$ σημαίνει ότι η γραμμή i είναι μη ανατεθειμένη, ενώ το $y_j = 0$ σημαίνει ότι η στήλη j είναι μη ανατεθειμένη. Οι δυικές μεταβλητές u_i, q_j αντιστοιχούν στην i γραμμή και j στήλη αντίστοιχα, με μειωμένο κόστος $c_{ij} - u_i - q_j$.

Τα βασικά βήματα του αλγόριθμου είναι:

Βήμα 1:Αρχικοποίηση

Βήμα 2:Τερματισμός, αν όλες οι γραμμές είναι ανατεθειμένες

Βήμα 3:Αὑξηση

Καθορίζει ένα μονοπάτι ελαχίστου κόστους από μια μη ανατεθειμένη γραμμή i σε μία μη ανατεθειμένη στήλη j.

Βήμα 4:Ανανέωση της δυικής λύσης Επιστροφή στο Βήμα 2

I) Αρχικοποίηση

Μία συνηθισμένη μέθοδος αρχικοποίησης για αυτόν τον αλγόριθμο είναι η μείωση των στηλών και των γραμμών. Για κάθε στήλη j καθορίζεται ένας δείκτης γραμμής i^{*} με ελάχιστο c_{ij} . Το q_j τοποθετείται στο c_{i^*j} , και αν το i^{*} είναι μη ανατεθειμένο τότε το j ανατίθεται στο i^{*}. Στη συνέχεια βρίσκουμε για κάθε μη ανατεθειμένη γραμμή i μια στήλη j^{*} με ελάχιστο $c_{ij} - q_j$ και αναθέτουμε την στήλη j^{*}, αν είναι μη ανατεθειμένη, στη γραμμή i.

Σε αυτό τον αλγόριθμο η αρχικοποίηση στοχεύει αρχικά σε μια υψηλή μείωση του κόστους της μήτρας. Αποτελείται από τρεις διαδικασίες : 1) μείωση των στηλών, 2) μεταφορά της μείωσης από μη ανατεθειμένες γραμμές σε ανατεθειμένες και 3) μείωση της αύξησης μη ανατεθειμένων γραμμών.

Η πρώτη διαδικασία μπορεί να υλοποιηθεί όπως και μια συνηθισμένη μείωση στηλών. Δηλαδή για κάθε στήλη *j* βρίσκεται ένας δείκτης γραμμής *i*_j με ελάχιστο κόστος c_{ij}. Τότε το

 q_j τοποθετείται στο c_{i_ij} και αν το i_j είναι μη ανατεθειμένο το j ανατίθεται στο i_j .

Η δεύτερη διαδικασία είναι η μεταφορά της μείωσης, ο αντικειμενικός σκοπός της οποίας είναι να μειωθούν περαιτέρω οι ανατεθειμένες γραμμές. Η διαδικασία αυτή δεν έχει επίδραση στο ολικό κόστος. Η επίδραση της διαδικασίας αυτής είναι διπλή. Πρώτα από όλα οι ανατεθειμένες στήλες γίνονται 'ακριβότερες' σε σύγκριση με τις μη ανατεθειμένες. Ακόμη τα ελάχιστα μονοπάτια στη φάση της αύξησης θα φτάσουν σε μία μη ανατεθειμένη στήλη ευκολότερα.

Η τρίτη διαδικασία της αρχικοποίησης είναι η μείωση της αύξησης των μη ανατεθειμένων γραμμών. Δηλαδή, γίνεται μια προσπάθεια να βρεθούν αυξανόμενα μονοπάτια που ξεκινούν από μη ανατεθειμένες γραμμές, στις οποίες την ίδια στιγμή έχει μεταφερθεί η μείωση. Στην διαδικασία αυτή οι ανατεθειμένες στήλες παραμένουν ανατεθειμένες, ενώ οι γραμμές μπορεί να γίνουν ανατεθειμένες, μη ανατεθειμένες ή να ανατεθούν ξανά.

II) Προσαύξηση

Η φάση αυτή ξεκινά με την εύgεση ενός εναλλακτικού μονοπατιού. Το μονοπάτι είναι μια ακολουθία δεικτών γραμμών και στηλών εναλλάξ, με πρώτο στοιχείο μια μη ανατεθειμένη γραμμή, τελευταίο μια στήλη και με τα ενδιάμεσα στοιχεία να είναι στήλες και γραμμές ανατεθειμένες σε διαδοχικά ζεύγη. Αν η τελευταία στήλη είναι μη ανατεθειμένη, η προσαύξηση μιας εν μέρει λύσης μπορεί να γίνει με το να αναθέσουμε όλες τις γραμμές στο μονοπάτι με την επόμενη στήλη αυτών, το οποίο θα έχει σαν αποτέλεσμα ακόμα μία ανάθεση.

ΙΙΙ) Ανανέωση δυικής λύσης

Μετά την προσαύξηση μιας μερικής ανάθεσης οι τιμές των δυικών μεταβλητών πρέπει να ανανεωθούν, έτσι ώστε να αποκατασταθεί η συμπληρωματική χαλαρότητα, δηλαδή να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί. Δηλαδή είναι απαραίτητες οι παρακάτω αλλαγές:

$$c_{ik} - u_i - q_k = 0$$
, av $x_i = k(i = 1,...,n)$
$c_{ij} - u_i - q_j \ge 0, (i, j = 1, ..., n)$

Αφαιρώντας τις τιμές u_i από τις παραπάνω εξισώσεις έχει σαν αποτέλεσμα να ισχύει:

 $c_{ik} - q_k \le c_{ij} - q_j, j = 1, ..., n$

Έτσι, όλες οι αναθέσεις στη μεφική λύση πφέπει να αντιστοιχούν στη γφαμμή ελαχίστων της μήτφας μειωμένου κόστους. Αυτή η απλή παφατήφηση είναι χφήσιμη στο βήμα της ανανέωσης για τους αλγόφιθμους που βασίζονται σε ελάχιστα μονοπάτια. Η τιμή q_k για κάθε ανατεθειμένη στήλη

 $k ~(με ~y_k = i)$ πρέπει τώρα να ρυθμιστεί ώστε να ισχύει:

$$c_{ik} - q_k = \min\{c_{ij} - q_j \mid j = 1, ..., n\}$$
(4.21)

Αλγόριθμος Ν-καλυτέρων λύσεων

Με μια κατάλληλη τροποποίηση των συνιστωσών κόστους και με την επίλυση μιας σειράς τροποποιημένων αντιγράφων του αρχικού προβλήματος της ανάθεσης είναι δυνατόν να βρεθούν οι Ν-καλύτερες λύσεις του προβλήματος [2][21][1].

Η επίλυση του προβλήματος της εύρεσης των Ν καλύτερων λύσεων για το πρόβλημα της ανάθεσης απαιτείται τόσο για την μέθοδο JPDA (joint probabilistic data association, επομενη ενότητα) όσο και για την υλοποίηση της μεθόδου MHT (π.χ. [2]). Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι εφόσον έχει βρεθεί η πρώτη βέλτιστη λύση μπορεί να βρεθεί μια πρόσθετη λύση, η οποία δεν είναι καλύτερη από την βέλτιστη. Αυτό γίνεται με διαγραφή των πιθανοτήτων που αφορούν ζεύγη συνδέσεων της βέλτιστης ανάθεσης.

Ένα δυσδιάστατο πρόβλημα ανάθεσης, έστω P, αποτελούμενο από n ίχνη και m παρατηρήσεις, καθορίζεται από ένα σύνολο τριπλετών $\langle i_j j, a_{ij} \rangle$ όπου *i* ένα υποθετικό ίχνος, *j* μια παρατήρηση και a_{ij} το κόστος ανάθεσης της παρατήρησης *j* στο ίχνος *i*. Μια δυνατή λύση ή ανάθεση έστω a_i είναι ένα σύνολο τριπλετών όπου κάθε ίχνος *i* και κάθε παρατήρηση *j* χρησιμοποιείται μία μόνο φορά με εξαίρεση βέβαια το dummy ίχνος, *i*=0, και τη dummy μέτρηση, *j*=0, τα οποία μπορούν να εμφανιστούν πολλές φορές. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$\alpha_{i} = \{ < i, j, a_{ij} > \} \cup \{ < 0, d_{j}, 0 > \} \cup \{ < d_{i}, 0, 0 > \}$$

$$(4.22)$$

όπου $1 \le i, d_i \le n, 1 \le j, d_j \le m, i \ne d_i, j \ne d_j$ (4.23)

$$\{i\} \cup \{d_i\} = \{1, 2, \dots, n\}, \{j\} \cup \{d_j\} = \{1, 2, \dots, m\}$$

$$(4.24)$$

Ο χώρος των δυνατών λύσεων μπορεί τότε να εκφραστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$A = \bigcup \{a_i\}, \{a_i\} \neq \{a_j\}, i \neq j$$

$$(4.25)$$

όπου το μέγεθος του χώρου των δυνατών λύσεων είναι:

$$|A| = \sum_{j=0}^{\min\{n,m\}} \frac{m!n!}{j!(m-j)!(n-j)!}$$
(4.26)

Το κόστος μιας ανάθεσης, έστω $C(\alpha_i)$, βρίσκεται αθροίζοντας τα κόστη της κάθε τριπλέτας του χώρου των λύσεων, δηλαδή:

$$C(\alpha_i) = \sum_{\langle i, j, a_{ij} \rangle \in \alpha_i} a_{ij}$$
(4.27)

Το να καθορίσουμε την καλύτερη ανάθεση $A^*_{(1)}$ για το P, είναι τώρα πια θέμα καθορισμού εκείνης της λύσης που μεγιστοποιεί ένα άθροισμα, όπου μπορεί πλέον να εφαρμοστεί για παράδειγμα ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού. Οι Ν-καλύτερες λύσεις για το P, δηλαδή $A^*_{(1)}, A^*_{(2)}, ..., A^*_{(N)}$, είναι οι N αναθέσεις $\alpha_i \in A$ με μέγιστα κόστη, όπου:

$$A^{*}_{(1)} = \arg\min_{\alpha_{i} \in A} \{ C(\alpha_{i}) \}$$
(4.28.1)

$$A^{*}_{(2)} = \arg\min_{\alpha_{i} \in A \setminus A^{*}_{(1)}} \{C(\alpha_{i})\}$$
(4.28.2)

$$A^{*}_{(N)} = \arg\min_{\substack{\alpha_{i} \in A \setminus A^{*}_{(K)} \\ k = 1, 2, \dots, N-1}} \{C(\alpha_{i})\}$$
(4.28.N)

όπου ο συμβολισμός $A \setminus A^*_{(k)}$ σημαίνει όλα τα στοιχεία του συνόλου Α εκτός από αυτά που ανήχουν στο $A^*_{(k)}$.

Πιθανοτικές μέθοδοι σύνδεσης δεδομένων

Η μέθοδος αυτή χρησιμεύει στη δημιουργία πολλαπλών υποθέσεων για το πρόβλημα σύνδεσης δεδομένων. Αποτελεί μια βελτίωση της μεθόδου GNN, η οποία απλώς αναζητά την μοναδική πιο πιθανή υπόθεση. Αρχικά θεωρείται ότι πολλαπλές υποθέσεις σχηματίζονται μετά από κάθε σάρωση δεδομένων, αλλά αυτές οι υποθέσεις συνδυάζονται πριν από την επόμενη σάρωση δεδομένων. Το αποτέλεσμα είναι ότι μια νέα εκτίμηση για ένα δεδομένο ίχνος μπορεί να περιλαμβάνει συνεισφορά περισσότερων της μίας παρατήρησης. Δηλαδή ο όρος 'εξετάζοντας όλους τους γείτονες' αναφέρεται στο γεγονός ότι για την ενημέρωση ενός ίχνους χρησιμοποιούνται όλες οι γειτονικές παρατηρήσεις που βρίσκονται μέσα στην περιοχή της πύλης. Η μέθοδος σύνδεσης δεδομένων η οποία εξετάζει όλους τους γείτονες υπό την προϋπόθεση ότι έχουμε ένα μόνο στόχο είναι γνωστή ως πιθανοτική σύνδεση δεδομένων (probabilistic data association,PDA) και οδηγεί σε ένα κατάλληλα τροποποιημένο φίλτρο ιχνηλασίας που ονομάζεται PDAF [1] [4]. Στην πραγματικότητα η PDA χρησιμοποιεί όλες τις τελευταίες έγκυρες μετρήσεις, με διαφορετικά βάρη για την καθεμία, για την ενημέρωση των ιχνών. Έχει αποδειχτεί όμως ότι αυτή η μέθοδος δεν αποδίδει καλά στην περίπτωση πολλαπλών στόχων. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε μια τροποποιημένη μέθοδος, η από κοινού σύνδεση δεδομένων (joint probabilistic data association, JPDA), η οποία αντιμετωπίζει τις περιπτώσεις όπου έχουμε παρουσία πολλαπλών στόχων. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος υπολογίζει τις πιθανότητες για τις τελευταίες συνδέσεις ίχνουςπαρατήρησης και τις συνδυάζει ώστε να υπολογιστούν κατά προσέγγιση οι υποθετικοί μέσοι των εκτιμήσεων των καταστάσεων στόχου. Είναι τέλος σημαντικό να αναφερθεί ότι η JPDA αποτελεί μια ειδική περίπτωση της μεθόδου ΜΗΤ.

Η μέθοδος PDA

Θεωφούμε την πεφίπτωση όπου έχουμε ένα μόνο ίχνος στόχου παφουσία εξωτεφικών πηγών, όπως clutter. Οφίζουμε ως P_D την πιθανότητα ανίχνευσης και P_G την πιθανότητα μια έγκυφη επιστφοφή να βρίσκεται μέσα στην πύλή του ίχνους. Τυπικά ισχύει $P_G \cong 1$, αλλά για χάφη της γενικότητας θα διατηφηθεί το P_G . Υποθέτουμε ακόμη ότι η πιθανότητα εξωτεφικών επιστφοφών β είναι Poisson και πεφιλαμβάνει νέους στόχους και ψευδείς συναγεφμούς.

Έχοντας ως δεδομένο ότι υπάρχουν Ν παρατηρήσεις μέσα στην πύλη του ίχνους *i*, μπορούν να σχηματιστούν N+1 υποθέσεις για αυτό το ίχνος. Η πρώτη υπόθεση (έστω H₀) είναι η περίπτωση όπου καμία παρατήρηση δεν είναι έγκυρη. Η πιθανότητα της H₀ είναι ανάλογη της p'_{i0} όπου:

$$p'_{i0} = \beta^N (1 - P_D P_G) \tag{4.29.a}$$

Ομοίως η πιθανότητα για την υπόθεση H_j (j=1,2,...,N) ότι η παρατήρηση j είναι έγκυρη είναι ανάλογη της p'_{ij} όπου:

$$p'_{ij} = \beta^{N-1} P_D P_G \frac{e^{-d^2_{ij}/2}}{P_G (2\pi)^{M/2} \sqrt{|S_i|}} = \frac{\beta^{N-1} P_D e^{-d^2_{ij}/2}}{(2\pi)^{M/2} \sqrt{|S_i|}}$$
(4.29.β)

Τέλος, οι πιθανότητες p_{ij} που σχετίζονται με τις N+1 υποθέσεις για την ανάθεση της παρατήρησης *j* στο ίχνος *i* υπολογίζονται από την εξίσωση κανονικοποίησης :

$$p_{ij} = \frac{p'_{ij}}{\sum_{l=0}^{N} p'_{il}}$$
(4.30)

Ο παράγοντας β^{N-1} καταργείται κατά την διαδικασία της κανονικοποίησης και έτσι δεν απαιτείται για τον υπολογισμό της p_{ii} . Επομένως, μια απλοποιημένη μορφή της p_{ii} είναι:

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{b}{b + \sum_{l=1}^{N} a_{il}}, j = 0\\ \frac{a_{ij}}{b + \sum_{l=1}^{N} a_{il}}, 1 \le j \le N \end{cases}$$

$$b = (1 - P_D P_G) \beta (2\pi)^{M/2} \sqrt{|S_i|}$$
(4.32)

$$a_{ij} = P_D e^{-d^2 ij/2} \tag{4.33}$$

Το επόμενο βήμα μετά τον υπολογισμό των πιθανοτήτων είναι η συγχώνευση των υποθέσεων. Πρώτα από όλα το υπολειμματικό διάνυσμα, που χρησιμοποιείται στην εξίσωση ενημέρωσης του φίλτρου Kalman, είναι ένα άθροισμα με βάρη των υπολειμματικών διανυσμάτων που συνδέονται με τις Ν παρατηρήσεις, δηλαδή:

$$\tilde{\mathbf{y}}_{i}(k) = \sum_{j=1}^{N} p_{ij} \tilde{\mathbf{y}}_{ij}(k)$$
(4.34)

όπου

όπου

$$\widetilde{\mathbf{y}}_{ij}(k) = \mathbf{y}_{j}(k) - \mathbf{H}\widehat{\mathbf{x}}_{i}(k \mid k-1)$$
(4.35)
$$\mathbf{y}_{j}(k) = \eta \pi \alpha \rho \alpha \tau \eta \rho \eta \sigma \eta j \lambda \eta \varphi \theta \varepsilon \delta \sigma \sigma \tau \eta \sigma \delta \rho \omega \sigma \eta k$$

Για διευκόλυνση παραλείπεται ο δείκτης *i*, που αναφέρεται στο ίχνος *i*, οπότε δεν υπάρχει αβεβαιότητα στην αναφορά στις ποσότητες του φίλτρου Kalman. Η εξίσωση ενημέρωσης του φίλτρου Kalman είναι:

$$\hat{\mathbf{x}}(k \mid k) = \hat{\mathbf{x}}(k \mid k-1) + \mathbf{K}(k)\tilde{\mathbf{y}}(k)$$

όπου το **K**(k) είναι το κέρδος. Παρόλα αυτά η συνδιακύμανση για την σάρωση k τροποποιείται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

(4.36)

$$\mathbf{P}(k \mid k) = \mathbf{P}^{0}(k \mid k) + d\mathbf{P}(k)$$
(4.37)

όπου $\mathbf{P}^{o}(k \mid k)$ η συνδιαχύμανση Kalman, που μπορεί να υπολογιστεί αν υπάρχει και είναι γνωστή ως η κατάλληλη σύνδεση για μία μόνο επιστροφή και $d\mathbf{P}(k)$ είναι μια αύξηση που αντανακλά την επίδραση της αβέβαιης σύνδεσης. Οι εξισώσεις των $\mathbf{P}^{o}(k \mid k)$ και $d\mathbf{P}(k)$ είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{P}^{0}(k \mid k) = p_{i0}\mathbf{P}(k \mid k-1) + (1-p_{i0})\mathbf{P}^{*}(k \mid k)$$

$$d\mathbf{P}(k) = \mathbf{K}(k) \left[\sum_{j=1}^{N} p_{ij}\tilde{\mathbf{y}}_{ij}\tilde{\mathbf{y}}_{ij}' - \tilde{\mathbf{y}}_{i}\tilde{\mathbf{y}}_{ij}'\right]\mathbf{K}'(k)$$
(4.38)

και $\mathbf{P}^*(k \mid k)$ η εξίσωση της μήτρας συνδιακύμανσης του φίλτρου Kalman, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση:

(4.39)

$$\mathbf{P}^*(k \mid k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}]\mathbf{P}(k \mid k-1)$$

Ο όφος $d\mathbf{P}(k)$ αυξάνει την συνδιακύμανση σύμφωνα με τις a posteriori πιθανότητες (ή αβεβαιότητες) και την διασπορά των παρατηρήσεων που βρέθηκαν μέσα στην πύλη του ίχνους. Οι υπολογισμοί των πιθανοτήτων των εξισώσεων (4.29-31) απαιτούν την ύπαρξη μιας τιμής β για την πυκνότητα εξωτερικών επιστροφών. Μια μη παραμετρική εκδοχή της μεθόδου PDA χρησιμοποιεί το πλήθος των επιστροφών Ν μέσα στην περιοχή της πύλης και δίνει $\beta = N/V_g$, όπου V_g ο όγκος της περιοχής της πύλης.

Τα αποτελέσματα για ένα μόνο στόχο παρουσία clutter έχουν δείξει μια σημαντική μείωση του πλήθους των χαμένων ιχνών, όταν χρησιμοποιείται η PDA μέθοδος για σύνδεση δεδομένων αντί της GNN.

Η μέθοδος JPDA

Η μέθοδος JPDA [2] είναι όμοια με την PDA με την διαφορά ότι οι πιθανότητες σύνδεσης υπολογίζονται χρησιμοποιώντας όλες τις παρατηρήσεις και όλα τα ίχνη. Η εκτίμηση του κέρδους κατάστασης και της συνδιακύμανσης υπολογίζονται όπως και προηγουμένως από τις εξισώσεις (4.34-39). Η εξίσωση (4.34) όμως για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων πρέπει να επεκταθεί, ώστε να περιλαμβάνει τα πολλαπλά ίχνη. Ας θεωρήσουμε μια τυπική κατάσταση σύγκρουσης όπως αυτή του σχήματος 91.



Εικόνα 91:Παράδειγμα κατάστασης σύγκρουσης όπου είναι κατάλληλη η εφαρμογή της μεθόδου JPDA

Όπως βλέπουμε στο σχήμα, οι παρατηρήσεις O_1 , O_2 , O_3 βρίσκονται στην πύλη της προβλεπόμενης θέσης P_1 για το ίχνος T_1 , ενώ οι O_2 , O_3 βρίσκονται στην πύλη για το ίχνος P_2 . Η μέθοδος JPDA θα υπολογίσει το υπολειμματικό διάνυσμα με βάρη για το ίχνος T_1 βασιζόμενη και στις τρεις παρατηρήσεις, αλλά τα βάρη των O_2 και O_3 θα μειωθούν λόγω της ταυτόχρονης παρουσίας τους στην πύλη του ίχνους T_2 . Το υπολειμματικό διάνυσμα για το ίχνος T_2 σχηματίζεται χρησιμοποιώντας τις παρατηρήσεις O_2 , O_3 .

Στη συνέχεια απαιτείται ο υπολογισμός μιας μήτρας υποθέσεων με τις αντίστοιχες πιθανότητες. Για αυτό το λόγο χρειάζεται η γκαουσσιανή συνάρτηση πιθανότητας g_{ij} που σχετίζεται με την ανάθεση της παρατήρησης *j* στο ίχνος *i* και είναι:

$$g_{ij} = \frac{e^{-\mathbf{d}_{ij}^2/2}}{(2\pi)^{M/2} \sqrt{|\mathbf{S}_{ij}|}}$$
(4.40)

Ο
ρίζουμε ως N_o το πλήθος των παρατηρήσεων, ως N_T το πλήθος των ιχνών και ως
 $P'(H_l)$ τις πιθανότητες των υποθέσεων. Αν N_o
> N_T ο κοινός όρος στην πιθανότητα είναι το $\beta^{(N_o-N_T)}$,

ενώ αν N₀< N_T ο κοινός όρος είναι $(1-P_D)^{(N_T-N_O)}$, όπου θεωρείται ότι η πιθανότητα ανίχνευσης είναι ίδια για όλα τα ίχνη. Για παράδειγμα στο προηγούμενο σχήμα ο υπολογισμός της πιθανότητας $P'(H_I)$ για την ανάθεση της παρατήρησης 2 στο ίχνος 1, και της 0 στο 2 είναι $g_{12}P_D(1-P_D)\beta^2$. Τέλος οι κανονικοποιημένες πιθανότητες $P(H_I)$ υπολογίζονται από τον γνωστό τύπο :

$$P(H_{l}) = \frac{P'(H_{l})}{\sum_{j=1}^{N_{H}} P'(H_{l})} , N_{H}$$
το πλήθος των υποθέσεων (4.41)

Ένας τρόπος εφαρμογής της JPDA είναι η απαρίθμηση των υποθέσεων, ώστε να υπολογιστούν οι a posteriori πιθανότητες της ανάθεσης παρατηρήσεων σε ίχνη. Αυτή η διαδικασία της δημιουργίας των υποθέσεων και των επακόλουθων πιθανοτήτων μμπορεί να γίνει πιο αποδοτικά αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του υπολογισμού των Ν-καλύτερων λύσεων του προβλήματος της ανάθεσης.

Αρχικοποίηση και διαγραφή ίχνους στην μέθοδο PDA

Οι αρχικές μέθοδοι PDA και JPDA δεν προέβλεπαν με σαφήνεια την αρχικοποίηση και την διαγραφή ιχνών. Είχε θεωρηθεί ότι τα ίχνη προϋπήρχαν και το ζήτημα ήταν η διατήρηση τους. Για αυτό το λόγο προτάθηκαν διάφορες προσεγγίσεις για χειρισμούς επιβεβαίωσης και διαγραφής ίχνους στη δομή JPDA. Οι ευρύτερα αποδεκτές προσεγγίσεις είναι η μέθοδος IMMPDAF, η οποία χρησιμοποιεί καταστάσεις στόχου και καταστάσεις μη στόχου, και η μέθοδος IPDA (integrated probabilistic data association) [23].

Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν μια μαρκοβιανή απεικόνιση δυο καταστάσεων, με την κατάσταση 1 να αναπαριστά ένα μη παρατηρούμενο στόχο και την κατάσταση 2 να αναπαριστά ένα παρατηρούμενο στόχο. Οι πιθανότητες μετάβασης από την κατάσταση *i* στην κατάσταση *j* ορίζονται ως P_{ii} με :

$$P_{11} + P_{12} = 1$$
, $P_{21} + P_{22} = 1$

Μια επιλογή που γίνεται για αυτές τις σχεδιαστικές παραμέτρους είναι $P_{11} = P_{22} = 0.98$. Έχοντας τώρα ως δεδομένο τις παραπάνω πιθανότητες μετάβασης και τις εξισώσεις του IMM, η μέθοδος IMMPDAF υπολογίζει τις πιθανότητες κατάστασης όπως αυτές ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Η IPDA μέθοδος χρησιμοποιεί τα ίδια δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων παρατηρήσεων με βάρη (εξίσωση (4.31)) με σκοπό τον καθορισμό της πιθανότητας παρουσίας στόχου.

Μια συνηθισμένη μέθοδος αρχικοποίησης ίχνους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχηματισμό αβέβαιων ιχνών, τα οποία δεν έχουν μεγάλη πιθανότητα σύνδεσης με κάποιο υπάρχον ίχνος. Έτσι θεωρούμε ότι ένα αβέβαιο ίχνος υπάρχει στη σάρωση k και ότι N_k παρατηρήσεις βρίσκονται μέσα στην πύλη του ίχνους. Αρχικά υπολογίζεται η πιθανότητα ύπαρξης αληθινού στόχου, $P_r(k | k - 1)$, πριν την λήψη δεδομένων στη σάρωση k, βάσει της εξίσωσης:

$$P_T(k \mid k-1) = P_{22}P_T(k-1 \mid k-1) + P_{12}[1 - P_T(k-1 \mid k-1)]$$
(4.42)

όπου $P_T(k-1|k-1)$ η πιθανότητα ύπαρξης στόχου, η οποία υπολογίζεται μετά την σάρωση k. Στη συνέχεια ξεκινά η εισαγωγή δεδομένων από την τρέχουσα σάρωση. Η ενημερωμένη πιθανότητα ύπαρξης στόχου είναι:

$$P_T(k \mid k) = \frac{1 - \delta_k}{1 - \delta_k P_T(k \mid k - 1)} P_T(k \mid k - 1)$$
(4.43)

όπου $\delta_k = \begin{cases} P_D P_G, N_k = 0 \\ P_D P_G [1 - \frac{V_{G_k}}{\hat{N}} \sum_{i=1}^{N_k} \Lambda_i], \alpha \lambda \lambda i \omega \varsigma \end{cases}$

(4.44)

Στον παραπάνω τύπο P_G είναι η πιθανότητα της πύλης και V_G είναι ο όγκος της πύλης, ενώ τα A_i και \hat{N}_k ορίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις :

$$\Lambda_{i} = \frac{1}{P_{G}(2\pi)^{M/2} \sqrt{|\mathbf{S}|}} e^{-\mathbf{d}_{i}^{2}/2}$$

$$\hat{N}_{k} = N_{k} - P_{D}P_{G}P_{T}(k \mid k-1)$$
(4.45)

Το μέγεθος \hat{N}_k είναι μια εκτίμηση του αναμενόμενου πλήθους των εσφαλμένων παρατηρήσεων στην πύλη και το A_i είναι η πιθανότητα που σχετίζεται με την παρατήρηση *i*.

Επεκτάσεις και τροποποιήσεις της μεθόδου JPDA

Οι βασικές μέθοδοι PDA και JPDA που αναφέφθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους έχουν επεκταθεί σε διάφορες εφαρμογές όπως στις μετρήσεις χαρακτηριστικών, στην επιλογή κατωφλίου ανίχνευσης και στην ιχνηλασία με imaging αισθητήρες.

Η μέθοδος JPDA μπορεί να οδηγήσει στην ένωση των κοντινών ιχνών-στόχων. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει προταθεί η μέθοδος PDA του πλησιέστερου γείτονα (nearest neighbor PDA, NNPDA). Βάσει αυτής της μεθόδου οι πιθανότητες σύνδεσης της παρατήρησης *i* με το ίχνος *j*, *P_{ij}*, υπολογίζονται όπως στη μέθοδο JPDA. Παρόλα αυτά τα ίχνη ενημερώνονται από μία μόνο παρατήρηση, αφού πρώτα γίνει μια ανάθεση παρατήρησης-ίχνους χρησιμοποιώντας τις πιθανότητες *P_{ij}*. Έτσι η διαδικασία της ανάθεσης θα βασίζεται σε μια λύση της μήτρας ανάθεσης, όπως και στη μέθοδο GNN. Αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η μέθοδος NNPDA είναι προτιμότερη, όταν υπάρχουν πολλαπλοί κοντινοί στόχοι.

Τέλος, έχει προταθεί η cheap JPDA, όπου τα βάρη των πιθανοτήτων υπολογίζονται προσεγγιστικά, ενώ έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές επέκτασης της λογικής της JPDA για την επεξεργασία δεδομένων από πολλαπλές σαρώσεις.

4.2 Επίλυση πολυδιάστατης ανάθεσης

Η σύνδεση δεδομένων χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο ανάθεσης πολλαπλών διαστάσεων έχει αποδειχτεί ότι είναι μια πρακτική και δυνατή εναλλακτική έναντι της MHT, καθώς δεν απαιτούνται εξαντλητικές απαριθμήσεις και ad hoc προσεγγίσεις, οι οποίες δεν είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν [2]. Πράγματι η ανάθεση N-διαστάσεων μπορεί να θεωρηθεί ως μια έξυπνη μέθοδος MHT με παράθυρο μήκους N-1. Δυστυχώς για N>2 το πρόβλημα της ανάθεσης είναι NP-δύσκολο, ακόμη και αν θεωρηθεί μηδενική πιθανότητα ψευδούς συναγερμού και μοναδιαία πιθανότητα ανίχνευσης. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένας βέλτιστος αλγόριθμος για το N-διάστατο πρόβλημα της ανάθεσης, όπου N>2, με το όριο του χρόνου εκτέλεσης να είναι μια πολυωνυμική συνάρτηση του πλήθους των αναφορών των αισθητήρων, αν και μόνο αν όλα τα προβλήματα που ανήκουν στην κλάση NP, μπορούν να λυθούν σε πολυωνυμικό χρόνο.

Γενικά απαιτείται ένα δέντρο αναζήτησης για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Η πολυπλοκότητα και οι απαιτήσεις σε μνήμη όμως αυξάνουν εκθετικά με το πλήθος των δυνατών ιχνών και για αυτό το λόγο τέτοιου είδους αλγόριθμοι δεν είναι πρακτικοί. Έτσι έχουν προταθεί διάφοροι ευριστικοί τρόποι για την επίλυση του προβλήματος της ανάθεσης S-διαστάσεων. Παρακάτω παρουσιάζεται μία από αυτές τις μεθόδους, η μέθοδος χαλάρωσης του Lagrange. Η μέθοδος αυτή λύνει το πρόβλημα σε (ψευδο)πολυωνυμικό χρόνο και ταυτόχρονα παρέχει ένα μέτρο για το πόσο κοντά είναι η ευρισκόμενη λύση στην πραγματική.

Το πρόβλημα της ανάθεσης πολλαπλών διαστάσεων

Το πρόβλημα σύνδεσης δεδομένων, τα οποία προέρχονται είτε από πολλαπλούς αισθητήρες είτε από πολλαπλές σαρώσεις, μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα πρόβλημα ανάθεσης πολλαπλών διαστάσεων, όπου είναι εφαρμόσιμη η μέθοδος χαλάρωσης του Lagrange (Lagrangian relaxation) [2][11][17][7][5]. Στο πολυδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης χρησιμοποιούνται οι εκτιμήσεις για την κατάσταση των ιχνών των N-1 αισθητήρων για την παραγωγή των τρεχόντων ιχνών.

Αρχικά ας θεωρήσουμε Ν αισθητήρες με M_k παρατηρήσεις να λαμβάνονται από τον k αισθητήρα όπου k=1,2,. Ν. Στη συνέχεια ορίζουμε την ποσότητα $z_{i_li_2...i_N}$, η οποία αναφέρεται στην υπόθεση σχηματισμού ίχνους, όπου οι παρατηρήσεις $i_1, i_2, ..., i_N$ προέρχονται από την ίδια πηγή-στόχο. Για παράδειγμα το z_{322} αναφέρεται στο γεγονός ότι η παρατήρηση 3 του αισθητήρα 1, η παρατήρηση 2 του αισθητήρα 2 και η παρατήρηση 2 του αισθητήρα 3 προέρχονται από την ίδια πηγή-στόχο. Αν ένας δείκτης τεθεί ίσος με μηδέν τότε αυτό θα σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος αισθητήρας δεν είχε κάποια ανίχνευση. Δηλαδή το z_{302} σημαίνει ότι ο αισθητήρας 2 δεν ανίχνευσε κάτι. Έτσι η μεταβλητή $z_{i_li_2...i_N}$ ορίζεται για την υπόθεση ενός ίχνους ως εξής:

$$z_{i_i i_j \dots i_N} = 1$$
, η υπόθεση ίχνους είναι σωστή (4.46)

 $z_{i,i_2...i_N} = 0$, η υπόθεση ίχνους είναι λανθασμένη (4.47)

Τελικά, όλες οι υποθέσεις σύνδεσης δεδομένων θα είναι μια συλλογή υποθέσεων ιχνών για όλες τις παρατηρήσεις. Ομοίως, ορίζεται το κόστος σχηματισμού ίχνους ως $c_{i_i i_2...i_N}$, όπου μια κατάλληλη επιλογή για την τιμή αυτού είναι η τιμή της διαβάθμισης κέρδους του ίχνους. Η πρόβλεψη ότι η παρατήρηση ενός αισθητήρα k είναι ψευδής συναγερμός έχει κόστος $c_{0...i_N} = 0$.

Έχοντας ως δεδομένους τους παραπάνω ορισμούς, το πρόβλημα σχηματισμού ιχνών λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα από Ν αισθητήρες μετατρέπεται στο ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\max\sum_{i_1=0}^{M_1} \dots \sum_{i_N=0}^{M_N} c_{i_1\dots i_N} z_{i_1\dots i_N}$$
(4.48)

δεδομένου ότι
$$\sum_{i_2=0}^{M_2} \dots \sum_{i_N=0}^{M_N} z_{i_1 \dots i_N} = 1, i_1 = 1, 2, \dots, M_1$$

$$\sum_{i_1=0}^{M_1} \dots \sum_{i_N=0}^{M_N} z_{i_1\dots i_N} = 1, i_2 = 1, 2, \dots, M_2$$
(4.49.2)

$$\sum_{i_{1}=0}^{M_{1}} \dots \sum_{i_{N-1}=0}^{M_{N-1}} z_{i_{1}\dots i_{N}} = 1, i_{N} = 1, 2, \dots, M_{N}$$
(4.49.N)

Οι παραπάνω περιορισμοί μπορούν να εκφραστούν και ως εξής:

. . .

$$\sum_{i_{1}=0}^{M_{1}} \dots \sum_{i_{k-1}=0}^{M_{k-1}} \sum_{i_{k+1}=0}^{M_{k+1}} \dots \sum_{i_{N-1}=0}^{M_{N-1}} z_{i_{1}\dots i_{k}\dots i_{N}} = 1, \forall i_{k} = 1, 2, \dots, M_{k}, \forall k = 1, 2, \dots N$$
(4.50)

Το παραπάνω δείχνει κυρίως ότι όλες οι παρατηρήσεις του αισθητήρα k πρέπει να ληφθούν υπόψη μία μόνο φορά κατά την παραγωγή όλων των δυνατών συνδυασμών ζευγών παρατηρήσεων από τους υπόλοιπους αισθητήρες.

(4.49.1)

Η ακριβής λύση στο πρόβλημα της ανάθεσης Ν-διαστάσεων για N>2 είναι γενικά εφικτή εφόσον καταφύγουμε στην μη πρακτική χρήση της ολικής απαρίθμησης. Παρόλα αυτά μια καλή, αλλά όχι πάντα ακριβής λύση, μπορεί να βρεθεί με την μέθοδο χαλάρωσης του Lagrange.

Μέθοδος χαλάρωσης του Lagrange για το τρισδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης

Το πρόβλημα της ανάθεσης Ν-διαστάσεων για N ≥ 3 είναι μαθηματικά χαρακτηρισμένο ως NP-δύσκολο (NP-hard). Αυτό σημαίνει ότι το υπολογιστικό κόστος μιας βέλτιστης λύσης μπορεί να αυξάνει με εκθετικό ρυθμό, καθώς ο αριθμός των επεξεργασμένων παρατηρήσεων αυξάνει. Παρόλα αυτά αν μια καλή αλλά όχι απαραίτητα βέλτιστη λύση είναι ικανοποιητική, τότε η προσέγγιση της τεχνικής χαλάρωσης του Lagrange καθιστά το πρόβλημα υπολογιστικά δυνατό.

Εξαιτίας της δυσκολίας του προβλήματος και των πολύπλοκων παραστάσεων που απαιτούνται θα αναλυθεί πρώτα η επίλυση του τρισδιάστατου προβλήματος της ανάθεσης. Στη συνέχεια θα επεκτείνουμε τη λύση για το Ν-διαστατο πρόβλημα της ανάθεσης. Για την περίπτωση όπου N=3 το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι το ακόλουθο:

$$u(z) = \max_{z_{i_1 i_2 i_3}} \sum_{i_1=0}^{M_1} \sum_{i_2=0}^{M_2} \sum_{i_3=0}^{M_3} c_{i_1 i_2 i_3} z_{i_1 i_2 i_3}$$
(4.51)

εφόσον ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$\sum_{i_2=0}^{M_2} \sum_{i_3=0}^{M_3} z_{i_1 i_2 i_3} = 1, i_1 = 1, 2, \dots, M_1$$
(4.52.1)

$$\sum_{i_1=0}^{M_1} \sum_{i_3=0}^{M_3} z_{i_1 i_2 i_3} = 1, i_2 = 1, 2, \dots, M_2$$
(4.52.2)

$$\sum_{i_1=0}^{M_1} \sum_{i_2=0}^{M_2} z_{i_1 i_2 i_3} = 1, i_3 = 1, 2, \dots, M_3$$
(4.52.3)

Σύμφωνα με τη μέθοδο χαλάφωσης του Lagrange ένα σύνολο περιορισμών, σε αυτή την περίπτωση έστω αυτό της εξίσωσης (4.52.3), αφαιρείται και εκφράζεται με τη βοήθεια των πολλαπλασιαστών Lagrange στην αντικειμενική συνάρτηση της εξίσωσης (4.51). Έτσι το τρισδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης μετατρέπεται σε ένα δυσδιάστατο πρόβλημα ανάθεσης. Το κίνητρο για αυτή την προσέγγιση είναι ότι μια κατάλληλη επιλογή πολλαπλασιαστών Lagrange θα τείνει να οδηγήσει σε ικανοποίηση των περιορισμών που αφαιρέθηκαν.

Ορίζουμε u_{i_3} $(u_0, u_1, ..., u_{M_3})$ να είναι ένα M_3+1 διαστάσεων σύνολο πολλαπλασιαστών Lagrange με $u_0 = 0$. Τώρα αντί να απαιτείται μια αυστηρή τήρηση των περιορισμών της εξίσωσης (4.52.3), οι περιορισμοί αυτοί αναπαρίστανται με την επέκταση της αντικειμενικής συνάρτησης όπως αυτή δίνεται στην εξίσωση (4.51). Δηλαδή προσθέτουμε σε αυτή την εξίσωση τον όρο:

$$L(u) = \sum_{i_3=0}^{M_3} u_{i_3} \left[\sum_{i_1=0}^{M_1} \sum_{i_2=0}^{M_2} z_{i_1 i_2 i_3} - 1 \right]$$
(4.53)

και αλλάζουμε τη σειρά της άθροισης, ώστε να έχουμε μια άλλη συνάρτηση ελαχιστοποίησης:

$$q(u) = \max_{z_{i_1 i_2 i_3}} \sum_{i_1=0}^{M_1} \sum_{i_2=0}^{M_2} \sum_{i_3=0}^{M_3} b_{i_1 i_2 i_3} - \sum_{i_3=0}^{M_3} u_{i_3}$$
(4.54)

με την προϋπόθεση ότι ισχύουν οι περιορισμοί των εξισώσεων (4.52.1), (4.52.2) και θεωρώντας

$$b_{i_1i_2i_3} = (c_{i_1i_2i_3} + u_{i_3})z_{i_1i_2i_3}$$
(4.55)

Οι περιορισμοί της εξίσωσης (4.52.3) για την ανάθεση των παρατηρήσεων του τρίτου αισθητήρα έχουν αντικατασταθεί ('χαλαρωθεί') από τον ορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης, q(u), η οποία 'τιμωρεί' αλλά δεν εμποδίζει την παραβίαση των περιορισμών. Έτσι η ελαχιστοποίηση της q(u) λαμβάνοντας υπόψη το τρίτο σύνολο των παρατηρήσεων (i_3) μπορεί να γίνει προτού θεωρηθεί η ανάθεση των παρατηρήσεων (i_1, i_2) από τους δύο πρώτους αισθητήρες. Αυτό γίνεται με τον ορισμό των d_{i,i_2} :

$$d_{i_1 i_2} = \max_{i_1} (c_{i_1 i_2 i_3} + u_{i_3})$$
(4.56)

και θεωρώντας ως $w_{i_i i_2}$ τον μειωμένο δείκτη διάστασης, ο οποίος αναφέρεται στην ανάθεση της παρατήρησης i_1 από τον αισθητήρα 1 στην παρατήρηση i_2 από τον αισθητήρα 2. Επιπλέον, θα πρέπει να ισχύει $d_{00} \ge 0$. Η ισοδύναμη έκφραση του δυσδιάστατου τώρα πια προβλήματος είναι:

$$q(u) = \max_{w_{i_1i_2}} \sum_{i_1=0}^{M_1} \sum_{i_2=0}^{M_2} d_{i_1i_2} w_{i_1i_2} - \sum_{i_3=0}^{M_3} u_{i_3}$$
(4.57)

με την προϋπόθεση ότι ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$\sum_{i_1=0}^{M_1} w_{i_1i_2} = 1, \forall i_2 = 1, 2, \dots M_2$$

$$\sum_{i_1=0}^{M_{21}} w_{i_1i_2} = 1, \forall i_1 = 1, 2, \dots M_1$$
(4.58.2)

Επειδή η μεγιστοποίηση όπως αυτή ορίζεται στις εξισώσεις (4.56-58) αφορά δύο μόνο περιορισμούς, το αρχικό πρόβλημα έχει μετατραπεί σε ένα πρόβλημα ανάθεσης δύο διαστάσεων. Η λύση αυτού του προβλήματος αναφέρεται ως χαλαρή (δυική) λύση, και γενικά αυτή η λύση μπορεί να μην είναι δυνατή για το αρχικό πρόβλημα, εννοώντας δηλαδή ότι δεν ικανοποιείται ο περιορισμός της εξίσωσης (4.52.3). Ας σημειωθεί ξανά ότι οι εξισώσεις (4.53) και (4.54) αποτελούν ένα είδος 'τιμωρίας' για τις παραβιάσεις των περιορισμών, αλλά αν αυτή η 'τιμωρία' δεν είναι αρκετά μεγάλη οι περιορισμοί μπορεί πάλι να παραβιάζονται. Συγκεκριμένα αυτό σημαίνει ότι κάποια παρατήρηση του αισθητήρα 3 χρησιμοποιείται δύο ή περισσότερες φορές στη χαλαρή λύση. Το αποτέλεσμα είναι ότι το εν δυνάμει βέλτιστο κόστος q(u) μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το πραγματικά μέγιστο κόστος, δηλαδή:

 $q(u) \ge u(z)$

 $i_2 = 0$

(4.59)

Ο λόγος για τον οποίο εισάγεται ο όρος L(u) στην μεγιστοποίηση είναι για να 'τιμωρήσει' τις παραβιάσεις των περιορισμών μέσω της σωστής επιλογής των πολλαπλασιαστών Lagrange (u_{i_3}) . Οι πολλαπλασιαστές Lagrange μπορεί να είναι είτε θετικοί είτε αρνητικοί. Για παράδειγμα ένας αρνητικός πολλαπλασιαστής u_{i_3} τιμωρεί την χρήση της παρατήρησης i_3 περισσότερο από μία φορά, αφού η συμβολή αυτής της παρατήρησης γίνεται:

 $-u_{i_3}\left[\sum_{i_1=0}^{M_1}\sum_{i_2=0}^{M_2} z_{i_1i_2i_3} - 1\right] > 0$ (4.60)

Όμοια επιλέγοντας $u_{i_3} > 0$ τιμωρείται οποιαδήποτε τάση να μην χρησιμοποιηθεί η παρατήρηση i_3 στη λύση που θα μεγιστοποιεί την αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση.

Η δυική λύση για το τρισδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης, όπως αυτή καθορίζεται από την μεγιστοποίηση της (4.57), μπορεί να μην ικανοποιεί τους περιορισμούς της (4.52.3) για τις παρατηρήσεις του τρίτου αισθητήρα. Παρόλα αυτά οι περιορισμοί των εξισώσεων (4.52.1) και (4.52.2) για τις παρατηρήσεις των δύο πρώτων αισθητήρων θα ικανοποιούνται. Έτσι, μια δυνατή λύση για το τρισδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας πρώτα τους συνδυασμούς των παρατηρήσεων των δύο πρώτων αισθητήρων σύμφωνα με τη δυική λύση, και στη συνέχεια αυξάνοντας τη λύση αυτή με τις παρατηρήσεις του τρίτου αισθητήρα. Αυτό γίνεται με ένα δεύτερο δυσδιάστατο πρόβλημα ανάθεσης που θα μεγιστοποιεί το κόστος, ενώ συγχρόνως θα διατηρείται ο περιορισμός που πρέπει να ισχύει για τις παρατηρήσεις του τρίτου αισθητήρα. Το κόστος $u(\bar{z})$ που σχετίζεται με τη δυνατή λύση θα είναι γενικά μικρότερο από το κόστος u(z) της άγνωστης βέλτιστης λύσης. Η εξίσωση (4.59) επεκτείνεται δηλαδή στην ακόλουθη εξίσωση:

 $u(\bar{z}) \le u(z) \le q(u)$

(4.61)

Έτσι το q(u) της δϋικής λύσης και το $u(\bar{z})$ της δυνατής λύσης θα αποτελούν άνω και κάτω όρια για το πραγματικό κόστος u(z).

Γίνονται λοιπόν διαδοχικές επαναλήψεις χρησιμοποιώντας διαφορετικούς πολλαπλασιαστές Lagrange κάθε φορά με σκοπό την μείωση του q(u) και την αύξηση του $u(\bar{z})$. Το ελάχιστο $q^*(u)$ και το μέγιστο $u^*(\bar{z})$ αποθηκεύονται. Οι επαναλήψεις σταματούν όταν η απόσταση μεταξύ των δύο λύσεων είναι μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, όταν δηλαδή ισχύει:

$$gap = \frac{\overbrace{[q^*(u) - u^*(z)]}^{\substack{duality\\gap}}}{|q^*(u)|} \le \min gap$$
(4.62)

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν η δυική λύση είναι και δυνατή λύση (δηλαδή έχουμε ταύτιση χαλαρής και δυνατής λύσης), τότε έχει βρεθεί η βέλτιστη λύση και η αναζήτηση της λύσης θα πρέπει να σταματήσει. Επειδή όμως δεν είναι σίγουρο ότι με τις διαδοχικές επαναλήψεις θα οδηγηθούμε στην ικανοποίηση της παραπάνω εξίσωσης οι επαναλήψεις θα πρέπει να σταματούν μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων.

Οι πολλαπλασιαστές Lagrange αρχικά τίθενται ίσοι με μηδέν. Στη συνέχεια μετά από κάθε επανάληψη, στην οποία η λύση θα είναι μη ικανοποιητική και δεν θα έχουμε φτάσει το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, οι πολλαπλασιαστές Lagrange θα ανανεώνονται με σκοπό να επιτευχθεί μια καλύτερη λύση. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ανανέωσης των πολλαπλασιαστών. Στη συνέχεια ακολουθούν κάποιες μέθοδοι ανανέωσης των πολλαπλασιαστών Lagrange.

Ορίζουμε ως g_{i_3} τη διαφορά του πλήθος των φορών που η παρατήρηση i_3 χρησιμοποιείται στη δυική λύση από την μονάδα. Θα είναι μηδέν αν η δυική λύση δεν παραβιάζει τους περιορισμούς για τη i_3 (δηλαδή η παρατήρηση χρησιμοποιείται μια μόνο φορά στη λύση), θα είναι ίσο με ένα, αν η παρατήρηση i_3 είναι μη ανατεθειμένη και αρνητικό αν έχουν γίνει πολλαπλές αναθέσεις σε αυτήν. Στην περίπτωση όπου $g_{i_3} \neq 0$ οι πολλαπλασιαστές Lagrange u_{i_3} τροποποιούνται προς εκείνη την κατεύθυνση ώστε να τείνουν να διορθώσουν την παραβίαση των περιορισμών. Μία ευριστική μέθοδος ανανέωσης των πολλαπλασιαστών είναι:

 $u_{i_{3}} = u_{i_{3}} + c_{a} * g_{i_{3}}, i_{3} = 1, 2, \dots M_{3}$ (4.63) $\dot{o}\pi o c_{a} = [q^{*}(u) - u^{*}(\bar{z})] / |g|^{2}$ $|g|^{2} = \sum_{i_{3}=1}^{M_{3}} g_{i_{3}}^{2}$ (4.66)

Ο αφιθμητής του c_a είναι το duality gap μεταξύ του κόστους της καλύτεφης χαλαφής και της καλύτεφης δυνατής λύσης, όπως αυτά έχουν βφεθεί μέχφι εκείνη την επανάληψη. Έτσι η διόφθωση είναι ανάλογη του duality gap και οδηγεί τους πολλαπλασιαστές Lagrange στο να ικανοποιηθούν οι πεφιοφισμοί που ισχύουν για τις παφατηφήσεις του τφίτου αισθητήφα. Δηλαδή αν μια παφατήφηση i_3 χφησιμοποιείται δύο φοφές ο αντίστοιχος όφος g_{i_3} θα είναι αφνητικός όπως και ο u_{i_3} . Θα πφέπει να αναφεφθεί ότι μικφές τιμές του u_{i_3} θα μειώσουν το κόστος ανάθεσης i_3 και έτσι στην επόμενη επανάληψη οι πολλαπλές αναθέσεις της i_3 θα είναι λιγότεφο πιθανές.

Ένας άλλος τρόπος ανανέωσης των πολλαπλασιαστών Lagrange είναι η μεγαλύτερη αύξηση των πολλαπλασιαστών στα πρώτα βήματα του αλγορίθμου και στη συνέχεια η πιο μικρή αύξησή τους, σε αντίθεση βέβαια με την προηγούμενη μέθοδο όπου είχαμε μια αργή αύξηση των

πολλαπλασιαστών στην αρχή και μεγαλύτερη αύξηση αργότερα. Η μόνη λοιπόν τροποποίηση αφορά το c_a , το οποίο γίνεται:

$$c_a = [q^*(u) - u^*(\bar{z})]^* |g|^2 / [length(g_{i_3})]^2$$
(4.67)

Ακόμη υπάρχει και η τεχνική space-dilation κατά την οποία οι πολλαπλασιαστές Lagrange ανανεώνονται ως εξής:

$$u_{i_3} = u_{i_3} + \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha}\right) * \left(\frac{q_a - q_a(u)}{|g_{i_3}|^2}\right) p_{i_3}, i_3 = 1, 2, \dots M_3$$
(4.68)

όπου

$$= [p_1, p_2, ..., p_{M_3}]^T$$

$$= + \frac{(1 - \alpha^{-2})^{-T}}{T}, \quad _{(0)} =$$
(4.69)
(4.70)

Ο πίνακας **H** ισούται με τον μοναδιαίο πίνακα κάθε M_3 επαναλήψεις. Ο όρος q_a είναι ένας προσαρμοστικός παράγοντας κόστους που καθορίζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου και δίνεται από την εξίσωση:

$$q_{a} = [1 + \frac{a}{\beta^{b}}]^{*} q^{*}(u)$$
(4.71)

Οι παράμετροι α, b που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εξισώσεις είναι ρυθμιστικοί παράγοντες και λαμβάνουν τις ακόλουθες τιμές $0.05 \le a \le 0.3$ και $1.1 \le b \le 1.6$. Τέλος η παράμετρος $\beta \ge 1$ αυξάνεται κατά ένα κάθε φορά που ισχύει $q(u) > q^*(u)$. Σε διαφορετική περίπτωση ανανεώνεται σύμφωνα με τον κανόνα $\beta = \max(\beta - 1, 1)$. Μια τυπική τιμή για την σταθερά α είναι $\alpha = 2$ και έχει αποδειχθεί ότι δουλεύει αρκετά καλά για προβλήματα σύνδεσης δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων.

Μια άλλη εναλλακτική μέθοδος ανανέωσης των πολλαπλασιαστών είναι:

$$u_{i_{3}} = u_{i_{3}} + \frac{[q^{*}(u) - u^{*}(\bar{z})]}{|g|^{2}} \left[\frac{\mu_{i_{3}}}{\frac{1}{M_{3}} \left(\sum_{k=1}^{M_{3}} \mu_{k} \right)} \right] g_{i_{3}}, i_{3} = 1, 2, ..., M_{3}$$
(4.72)

όπου μ_{i_2} η τιμή που προκύπτει για την i_3 παρατήρηση μετά τον αλγόριθμο του πλειστηριασμού, όταν αυτός εφαρμόζεται για την εύρεση της δυνατής λύσης στο δυσδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης. Η σημασία του μ_{i_2} είναι η εξής: αν για μια δεδομένη i_3 είναι δύσκολο να εφαρμόσουμε τον περιορισμό, ότι θα πρέπει να χρησιμοποιείται μια μόνο φορά, το αντίστοιχο μ_{i_2} θα είναι μεγάλο και άρα θα οδηγεί σε αύξηση του αντίστοιχου πολλαπλασιαστή Lagrange. Ο αντίστοιχος παρανομαστής του μ_{i_1} αποτελεί ένα τρόπο ώστε η ανανέωση του πολλαπλασιαστή να είναι ανεξάρτητη από το πλήθος των παρατηρήσεων M3.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της μεθόδου χαλάρωσης του Lagrange

(4.69)

(4.74.1)



Εικόνα 92: Διάγραμμα ροής της μεθόδου χαλάρωσης του Lagrange για το τρισδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης [22]

Μέθοδος χαλάρωσης του Lagrange για το S-διάστατο πρόβλημα της ανάθεσης

Θεωρούμε ότι έχουμε S σύνολα μετρήσεων από N_s αισθητήρες, οι οποίοι επιτηρούν μια περιοχή και ανιχνεύουν στόχους, ο αριθμός των οποίων όμως δεν είναι απαραίτητα ίσος με το πλήθος των πραγματικών στόχων. Κάθε ανίχνευση, η οποία μπορεί να μην αφορά πραγματικό στόχο αλλά να αποτελεί ψευδή συναγερμό, συνοδεύεται από μία μέτρηση. Στην περίπτωση που η πηγή της μέτρησης είναι πραγματικός στόχος, η μέτρηση είναι μια συνάρτηση της κατάστασης του στόχου μαζί με ένα πρόσθετο θόρυβο μέτρησης. Αντίθετα στην περίπτωση ψευδούς συναγερμού η μέτρηση είναι θόρυβος, η τιμή του οποίου όμως είναι αρκετά μεγάλη ώστε να θεωρείται ότι έχουμε κάποιο στόχο. Σκοπός του προβλήματος είναι η ανίχνευση ενός άγνωστου αριθμού στόχων και η εκτίμηση της κατάστασης τους (θέση στόχου, ταχύτητα, επιτάχυνση κλπ) χρησιμοποιώντας S σύνολα μετρήσεων.

Το S-διαστάσεων πρόβλημα της ανάθεσης [2] επιλύεται ως μια σειρά δυσδιάστατων προβλημάτων ανάθεσης κάνοντας χρήση των πολλαπλασιαστών Lagrange για κάθε σύνολο περιορισμών το οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη.

Το S-διαστάσεων πρόβλημα της ανάθεσης παρουσιάζεται με μαθηματικό τρόπο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\max\sum_{i_1=0}^{M_1} \dots \sum_{i_S=0}^{M_S} c_{i_1\dots i_S} z_{i_1\dots i_S}$$
(4.73)

 $\sum_{i_{1}=0}^{M_{2}} \dots \sum_{i_{c}=0}^{M_{S}} z_{i_{1}\dots i_{S}} = 1, i_{1} = 1, 2, \dots, M_{1}$

δεδομ

$$\sum_{i_1=0}^{M_1} \dots \sum_{i_s=0}^{M_s} z_{i_1\dots i_s} = 1, i_2 = 1, 2, \dots, M_2$$
(4.74.2)

$$\sum_{i_1=0}^{M_1} \dots \sum_{i_{S-1}=0}^{M_{S-1}} z_{i_1\dots i_S} = 1, i_S = 1, 2, \dots, M_S$$
(4.74.S)

Τα $z_{i_1...i_s}$ είναι δυαδικές μεταβλητές σύνδεσης όπου θα ισχύει $z_{i_1...i_s} = 1$, αν το σύνολο των μετρήσεων $i_1,...,i_s$ σχετίζεται με ένα υποψήφιο στόχο. Σε διαφορετική περίπτωση θα είναι ίσο με μηδέν. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει περιορισμός ως προς το πόσες φορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί η dummy μέτρηση.

Υπάρχουν μέχρι στιγμής δύο προσεγγίσεις επίλυσης του S-διάστατου προβλήματος της ανάθεσης με την τεχνική χαλάρωσης του Lagrange. Στην πρώτη προσέγγιση 'χαλαρώνεται' ένας περιορισμός κάθε φορά. Έτσι το πρόβλημα S-διαστάσεων επιλύεται με την χαλάρωση ενός συνόλου περιορισμών μέσω των αντίστοιχων πολλαπλασιαστών Lagrange, την επίλυση του S-1διάστατου προβλήματος επαναληπτικά και τέλος την αναδημιουργία μιας δυνατής λύσης του αρχικού προβλήματος S-διαστάσεων. Στη δεύτερη προσέγγιση χαλαρώνονται οι S-2 περιορισμοί ταυτόχρονα. Το υποπρόβλημα που έχει δημιουργηθεί είναι τώρα ένα δυσδιάστατο πρόβλημα είναι ότι θα πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος ανανέωσης των πολλαπλασιαστών Lagrange, που σχετίζονται με το αντίστοιχο σύνολο περιορισμών ταυτόχρονα, ώστε να επιτευχθεί ταχύτερα η σύγκλιση.

Η τεχνική χαλάφωσης του Lagrange, που έχει υλοποιηθεί, ακολουθεί την επίλυση του Sδιάστατου προβλήματος σαν μια σειρά 'χαλαφών' δυσδιάστατων υποπροβλημάτων σε δύο φάσεις: 1) σταδιακή χαλάφωση των περιορισμών μέσω των αντίστοιχων πολλαπλασιαστών Lagrange και 2) ανανέωση των πολλαπλασιαστών Lagrange και ικανοποίηση των περιορισμών. Δηλαδή χαλαφώνονται σταδιακά τα σύνολα των περιορισμών r = S, S - 1, S - 1, ..., 3 και επισυνάπτονται στη συνάφτηση κόστους μέσω των πολλαπλασιαστών Lagrange u_r . Έτσι στο στάδιο r = 3 το προβλημα έχει μετατραπεί σε ένα δυσδιάστατο πρόβλημα ανάθεσης που μπορεί να λυθεί βέλτιστα με το γενικευμένο αλγόριθμο του πλειστηριασμού σε πολυωνυμικό χρόνο. Στη συνέχεια υπολογίζεται μια δυνατή λύση για το τρισδιάστατο πρόβλημα βάσει της λύσης του δυσδιάστατου προβλήματος και ανανεώνονται οι πολλαπλασιαστές u_3 . Ομοίως, υπολογίζονται οι δυνατές λύσεις για τα r-διαστάσεων υποπροβλήματα, όπου r=4,5,...,S, και ανανεώνονται και οι αντίστοιχοι πολλαπλασιαστές. Τα παραπάνω επαναλαμβάνονται μέχρι είτε να βρεθεί η βέλτιστη λύση είτε να βρεθεί μια δυνατή λύση αποδεκτής ποιότητας.

Μιας και οι δυνατές λύσεις των διαφόρων υποπροβλημάτων ανάθεσης δεν ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς του αρχικού προβλήματος, το κόστος αυτών των λύσεων θα αποτελεί άνω όριο του κόστους της βέλτιστης λύσης. Επειδή δεν γνωρίζουμε αν αυτές οι δυνατές λύσεις είναι και βέλτιστες, μόνο το κόστος δυνατής λύσης του δυσδιάστατου προβλήματος ανάθεσης αποτελεί έγκυρο άνω όριο της βέλτιστης λύσης. Οι ενδιάμεσες δυνατές λύσεις του S-διάστατου προβλήματος έχουν κόστους μικρότερο ή ίσο του αντίστοιχου κόστους βέλτιστης λύσης. Η απόσταση μεταξύ του κόστους δυκής λύσης f_{dual} και του κόστους δυνατής λύσης. Η απόσταση μεταξύ του κόστους δυκής λύσης f_{dual} και του κόστους δυνατής λύσης J_s ονομάζεται duality gap και αποτελεί μια εκτίμηση της ακρίβειας της δυνατής λύσης. Οι επαναλήψεις του αλγορίθμου θα συνεχίζονται μέχρι είτε τα J_s και f_{dual} να είναι ίσα, οπότε και θα έχει βρεθεί η βέλτιστη λύση, είτε τα J_s και f_{dual} να έχουν πλησιάσει τόσο ώστε η λύση να μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή. Ένα χαρακτηριστικό αυτού του υποβέλτιστου αλγορίθμου είναι ότι όχι μόνο έχουμε και ένα μέτρο της ποιότητας της λύσης μέσω του duality gap. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στις περιπτώσεις όπου θα πρέπει να τερματίσει ο αλγόριθμος πριν βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα block διάγραμμα του αλγορίθμου, καθώς και ένα παράδειγμα γραφικής παράστασης όπου φαίνεται σχεδιασμένο το κόστος δυνατής λύσης, το κόστος δυικής λύσης καθώς και το αντίστοιχο duality gap.



Εικόνα 93: Γραφική παράσταση του κόστους δυνατής και δυικής λύσης

Τώρα θα παρουσιαστεί η παραπάνω αναφερθείσα μέθοδος χαλάρωσης του Lagrange με μαθηματικό τρόπο. Ορίζονται οι πολλαπλασιαστές Lagrange u_r , r = S, S - 1,...,3 και οι περιορισμοί των εξισώσεων (4.74.r+1) - (4.74.S) στη συνάρτηση κόστους της εξίσωσης (4.73). Τοτε προκύπτει το ακόλουθο r 'χαλαρό' υποπρόβλημα:

$$\max_{z_{i_1...i_S}} \sum_{i_1=0}^{M_1} \sum_{i_2=0}^{M_2} \dots \sum_{i_S=0}^{M_S} (c_{i_1...i_S} + u_{(r+1)_{i_{r+1}}} \dots + u_{S_{i_S}}) z_{i_1...i_S} - \sum_{i_{r+1}=0}^{M_{r+1}} u_{(r+1)_{i_{r+1}}} \dots - \sum_{i_S=0}^{M_S} u_{S_{i_S}}$$
(4.75)

δεδομένου των r πρώτων περιορισμών της εξίσωσης (4.74). Όπως έχει ήδη αναφερθεί δεν υπάρχουν περιορισμοί ως προς το πόσες φορές θα χρησιμοποιηθεί η dummy μέτρηση και άρα θα ισχύει $u_{r_0} = 0, \forall r$. Ορίζουμε νέες δυαδικές μεταβλητές $w^r_{i_1...i_s}$ και νέα κόστη $d^r_{i_1...i_s}$ για το r υποπρόβλημα :

$$w^{r}_{i_{1}\dots i_{r}} = \sum_{i_{r+1}=0}^{M_{r+1}} \dots \sum_{i_{s}=0}^{M_{s}} z_{i_{1}\dots i_{s}} = \sum_{i_{r+1}=0}^{M_{r+1}} w^{r+1}_{i_{1}\dots i_{r+1}}$$
(4.76)

$$d^{r_{i_{1}\dots i_{r}}} = \max_{i_{r+1}} \dots \max_{i_{s}} (c_{i_{1}\dots i_{s}} + u_{(r+1)_{i_{r+1}}} \dots + u_{s_{i_{s}}}) = \max_{i_{r+1}} (d^{r+1}_{i_{1}\dots i_{r+1}} + u_{(r+1)_{i_{r+1}}})$$
(4.77)

Προφανώς ισχύει $d^{s}_{i_{1}...i_{s}} = c_{i_{1}...i_{s}}$. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.76-77) το r υποπρόβλημα μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\max_{w^{r_{i_{1}\dots i_{r}}}} \sum_{i_{1}=0}^{M_{1}} \sum_{i_{2}=0}^{M_{2}} \dots \sum_{i_{r}=0}^{M_{r}} d^{r_{i_{1}\dots i_{r}}} w^{r_{i_{1}\dots i_{r}}} - \sum_{i_{r+1}=0}^{M_{r+1}} u_{(r+1)_{i_{r+1}}} \dots - \sum_{i_{s}=0}^{M_{s}} u_{s_{i_{s}}}$$
(4.78)

δεδομένου ότι
$$\sum_{i_2=0}^{M_2} \dots \sum_{i_S=0}^{M_r} w^r_{i_1\dots i_r} = 1, i_1 = 1, 2, \dots, M_1$$
 (4.79.1)

$$\sum_{i_1=0}^{M_1} \dots \sum_{i_S=0}^{M_r} w^r{}_{i_1\dots i_r} = 1, i_2 = 1, 2, \dots, M_2$$
(4.79.2)

$$\sum_{i_{1}=0}^{M_{1}} \dots \sum_{i_{r-1}=0}^{M_{r-1}} w^{r}{}_{i_{1}\dots i_{r}} = 1, i_{r} = 1, 2, \dots, M_{r}$$

$$(4.79.r)$$

Έτσι για ένα δεδομένο σύνολο πολλαπλασιαστών Lagrange το r υποπρόβλημα είναι ένα γενικευμένο πρόβλημα ανάθεσης, όπου $r \leq S$. Ορίσαμε το δυικό πρόβλημα γιατί οι πολλαπλασιαστές Lagrange θα επιβάλλουν ένα είδος 'τιμωρίας' στους χαλαρωμένους περιορισμούς που παραβιάστηκαν από τη λύση. Οι πολλαπλασιαστές Lagrange θα ανανεώνονται με μεθόδους αντίστοιχες με αυτές που παρουσιάστηκαν για τη μέθοδο χαλάρωσης του Lagrange στο τρισδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης.



Εικόνα 94: Block διάγραμμα του αλγορίθμου ανάθεσης S-διαστάσεων

4.3 Προσομοιώσεις και αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται τα αποτελέσματα από διάφορους ελέγχους της επίδοσης των συστημάτων που υλοποιηθήκαν και αφορούν κυρίως ελέγχους της επίδοσης των αλγορίθμων ανάθεσης.

Αποτελέσματα δυσδιάστατης ανάθεσης

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί (ενότητα 4.1) ο αλγόριθμος JVC αποτελείται από τρεις φάσεις: αρχικοποίηση, προσαύξηση και προσαρμογή της δυικής λύσης. Οι κύριες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι οι πίνακες x,y,u και q. Ο πίνακας x περιέχει τους δείκτες των στηλών, οι οποίες έχουν ανατεθεί στις γραμμές. Συγκεκριμένα στη θέση x(i) υπάρχει ο αριθμός της στήλης που έχει ανατεθεί στην i γραμμή. Αντίστοιχα ο πίνακας y περιέχει τους δείκτες των γραμμών, οι οποίες έχουν ανατεθεί στις στήλες. Η περίπτωση x(i)=0 ή y(i)=0 σημαίνει ότι η i γραμμή ή η i στήλη αντίστοιχα είναι μη ανατεθειμένες. Τα στοιχεία των πινάκων u και q είναι τα κόστη της κάθε γραμμής και στήλης αντίστοιχα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που υλοποιήθηκε.



Εικόνα 95: Block διάγραμμα του αλγορίθμου JVC (από [22])

<u>Σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου JVC με τον αλγόριθμο του</u> πλειστηριασμού για την επίλυση του δυσδιάστατου προβλήματος της ανάθεσης

Μετά την παρουσίαση του τρόπου υλοποίησης του αλγόριθμου JVC γίνεται μία σύγκριση με τον αλγόριθμο του πλειστηριασμού σχετικά με τον χρόνο εκτέλεσης που απαιτούν οι αλγόριθμοι. Για την σύγκριση των αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα προσομοίωσης, δηλαδή τυχαίες δυσδιάστατες μήτρες ανάθεσης, με τυχαία αραιότητα στοιχείων, που θα μπορούσαν να είχαν προκύψει κατά την ιχνηλασία κάποιων στόχων. Για την παραγωγή των δυσδιάστατων προβλημάτων ανάθεσης επιλέχθηκαν τετραγωνικές μήτρες διαστάσεως από 10x10 μέχρι και 45x45. Αρχικά επιλέγονταν η διάσταση της μήτρας και στη συνέχεια για κάθε στοιχείο της μήτρας επιλέγονταν μία τυχαία τιμή κόστους. Για όσα στοιχεία το κόστος υπερέβαινε μία δεδομένη τιμή, η οποία δινόταν με την κλήση της συνάρτησης που έφτιαχνε τις μήτρες ανάθεσης, το αντίστοιχο κόστος μηδενιζόταν. Με αυτό τον τρόπο παράγονταν μήτρες τυχαίας αραιότητας. Μάλιστα η συνάρτηση επέστρεφε εκτός από την δυσδιάστατη μήτρα και το αντίστοιχο ποσοστό μη μηδενικών στοιχείων.

Από την σύγκριση των χρόνων εκτέλεσης των δύο αλγορίθμων προκύπτει ότι ο χρόνος εκτέλεσης του αλγόριθμου του πλειστηριασμού είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο του JVC για αραιές μήτρες και το αντίθετο συμβαίνει για πυκνές μήτρες. Μάλιστα καθώς αυξάνεται η διάσταση της μήτρας είναι φανερή η διαφορά αυτή. Έτσι δημιουργήθηκαν με την προαναφερθείσα συνάρτηση τετραγωνικές μήτρες διαστάσεων 10x10, 20x20, 30x30, 35x35, 40x40 και 45x45, και δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχες γραφικές του χρόνου εκτέλεσης των δύο αλγορίθμων συναρτήσει του ποσοστού των μη μηδενικών στοιχείων της μήτρας.





Εικόνα 96: Σύγκριση του χρόνου εκτέλεσης των αλγορίθμων του πλειστηριασμού (μπλε *) και του JVC (κόκκινο +) συναρτήσει του ποσοστού των μη μηδενικών στοιχείων (αραιότητα) για μήτρες 10x10 (α), 20x20 (β), 30x30 (γ), 35x35 (δ), 40x40 (ε), 45x45 (στ).

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, και κυρίως από τις δύο τελευταίες, ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού υπερτερεί ως προς τον χρόνο εκτέλεσης στις αραιές μήτρες, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στις πυκνές μήτρες. Καθώς αυξάνει η πυκνότητα του προβλήματος αυξάνεται και η πιθανότητα συσχέτισης των ιχνών με συγκεκριμένες παρατηρήσεις. Έτσι ενώ ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού έχει το πλεονέκτημα της γρήγορης σύγκλισης για αραιές μήτρες ανάθεσης έχει μειωμένη απόδοση σε περιπτώσεις πυκνών μητρών ανάθεσης, εξαιτίας της εσωτερικής σύγκρουσης τιμών κατά τη συσχέτιση ιχνών-παρατηρήσεων.

Η συμπληρωματική αυτή ιδιότητα όμως των δύο αλγορίθμων χρησιμοποιείται από τα συστήματα ιχνηλασίας που υλοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει ένα όριο αραιότητας (30 με 40%) πάνω από το οποίο θα χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος JVC, ενώ σε διαφορετική περίπτωση θα χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Η παραπάνω ιδιότητα ισχύει ξεκάθαρα στην περίπτωση που το μέγεθος της μήτρας είναι σημαντικό. Στις συνήθεις περιπτώσεις που εξετάζουμε στα συστήματα ιχνηλασίας οι μήτρες σπάνια ξεπερνούν τον αριθμό 15, συνεπώς όπως φαίνεται στην εικόνα 96.β δεν διακρίνεται ξεκαθαρη διαφορά της επίδοσης των αλγορίθμων για αραιές μήτρες.



Εικόνα 97: Επίλυση δυσδιάστατης ανάθεσης

Αποτελέσματα πολυδιάστατης ανάθεσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής προσομοιώσεων διαφόρων συστημάτων σύνδεσης δεδομένων και τα οποία παρουσιάστηκαν και στην [22].

<u>Μέθοδος Lagrangian relaxation για N=3</u>

Αρχικά υλοποιήθηκε η μέθοδος χαλάρωσης του Lagrange για το τρισδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης και στη συνέχεια η μέθοδος επεκτάθηκε και για N>3. Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν ένας από τους περιορισμούς χαλαρώνεται, έστω ο τελευταίος, και λαμβάνεται υπόψη στο u(z) μέσω των πολλαπλασιαστών Lagrange. Τότε το τρισδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης έχει μετατραπεί σε ένα δυσδιάστατο πρόβλημα ανάθεσης. Το δυσδιάστατο αυτό πρόβλημα επιλύεται με κάποιον από τους προαναφερθέντες αλγορίθμους (αλγόριθμος πλειστηριασμού, JVC). Η λύση που προκύπτει από την επίλυση του δυσδιάστατου προβλήματος ονομάζεται «χαλαρή» λύση, καθώς μπορεί να μην ικανοποιεί τον περιορισμό που έχει χαλαρωθεί, και άρα δεν θα αποτελεί και λύση του τρισδιάστατου προβλήματος. Για αυτό το λόγο υπάρχουν άλλωστε και οι πολλαπλασιαστές Lagrange, οι οποίοι αποτελούν ένα είδος «τιμωρίας» για εκείνες τις παρατηρήσεις του τρίτου αισθητήρα που έχουν χρησιμοποιηθεί στη λύση του δυσδιάστατου προβλήματος πάνω από μία φορά. Δηλαδή οι πολλαπλασιαστές Lagrange τείνουν να οδηγήσουν σε ικανοποίηση των περιορισμών που δεν έχουν ληφθεί υπόψη. Μία δυνατή λύση για το τρισδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας τους συνδυασμούς των παρατηρήσεων των δύο πρώτων αισθητήρων σύμφωνα με την λύση του δυσδιάστατου προβλήματος που έχει προκύψει και την επέκταση αυτών των συνδυασμών με τις παρατηρήσεις του τρίτου αισθητήρα. Αυτό γίνεται με την επίλυση ενός δεύτερου δυσδιάστατου προβλήματος ανάθεσης, η λύση του οποίου θα ικανοποιεί βέβαια και τους τρεις περιορισμούς, αλλά μπορεί να μην είναι η βέλτιστη λύση για το αρχικό πρόβλημα. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται με τους αντίστοιχους πολλαπλασιαστές κάθε φορά, μέχρι η διαφορά του κόστος της χαλαρής και της δυνατής λύσης να ικανοποιεί κάποιο κατώφλι, μέχρι δηλαδή η χαλαρή λύση να προσεγγίσει σε ικανοποιητικό βαθμό μία δυνατή λύση. Όπως δηλαδή φαίνεται από τα παραπάνω καθώς και από την προηγούμενη περιγραφή σε κάθε επανάληψη θα επιλύονται δύο δυσδιάστατα προβλήματα ανάθεσης, θα κρατείται κάθε φορά η βέλτιστη λύση για το κάθε πρόβλημα, θα ελέγχεται κατά πόσο έχουν πλησιάσει οι δύο λύσεις και αν απέχουν κατά ένα μεγάλο ποσοστό θα βρίσκονται οι πολλαπλασιαστές Lagrange και μια νέα επανάληψη θα πραγματοποιείται. Στη συνέχεια φαίνεται το block διάγραμμα του αλγορίθμου, όπου χρησιμοποιούνται τα ονόματα των συναρτήσεων (υλοποίηση σε Matlab) που έχουν χρησιμοποιηθεί.

<u>Μέθοδος Lagrangian relaxation για N>3</u>

Η μέθοδος που έχει υλοποιηθεί επιλύει το Ν-διάστατο πρόβλημα σαν μία σειρά «χαλαρών» δυσδιάστατων προβλημάτων σε δύο στάδια: 1) σταδιακή χαλάρωση των περιορισμών μέσω των αντίστοιχων πολλαπλασιαστών Lagrange και 2) ανανέωση των πολλαπλασιαστών Lagrange ώστε να οδηγηθούμε σε ικανοποίηση των περιορισμών. Συγκεκριμένα χαλαρώνονται σταδιακά τα σύνολα των περιορισμών r=N,N-1,...,3 και λαμβάνονται υπόψη στην συνάρτηση κόστους μέσω των πολλαπλασιαστών u_r . Αυτή η διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα το πρόβλημα να μετατραπεί σε ένα δυσδιάστατο πρόβλημα ανάθεσης, για το οποίο υπάρχουν αλγόριθμοι που το επιλύουν σε πολυωνυμικό χρόνο. Μετά την επίλυση του δυσδιάστατου προβλήματος ανάθεσης, υπολογίζεται βάσει της λύσης αυτής μία δυνατή λύση για το τρισδιάστατο πρόβλημα, και ανάλογα ανανεώνονται και οι πολλαπλασιαστές u_3 . Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι δυνατές λύσεις για επόμενα υποπροβλήματα r-διαστάσεων, όπου r=4,...,N, καθώς και οι αντίστοιχοι πολλαπλασιαστές Lagrange. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι είτε να βρεθεί η βέλτιστη λύση είτε να βρεθεί μία λύση αποδεκτής ποιότητας, υπό την έννοια ότι απέχει κατά ένα μικρό ποσοστό από την αντίστοιχη βέλτιστη λύση. Παρακάτω παρουσιάζεται το block διάγραμμα του αλγορίθμου με τις συναρτήσεις που έχουν υλοποιηθεί και που αναπαριστούν τις διαδικασίες που προαναφέρθηκαν. Στη συνέχεια επεξηγείται η λειτουργία της κάθε συνάρτησης.





Εικόνα 98: Block διάγραμμα της μεθόδου χαλάρωσης του Lagrange για το τρισδιάστατο πρόβλημα της ανάθεσης (από [22])

Η είσοδος στο πρόγραμμα όπως φαίνεται και στο διάγραμμα είναι ένας Ν-διάστατος πίνακας με το στοιχείο $a_{i_1...i_N}$ να είναι το κόστος συνδυασμού της παρατήρησης i_1 του 1^{ου} αισθητήρα, της i_2 του 2^{ου} αισθητήρα,... και της i_N του Ν-οστού αισθητήρα. Για να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία των στοιχείων του πολυδιάστατου πίνακα ο αρχικός πίνακας μετατρέπεται σε ένα κελί από δυσδιάστατους πίνακες, όπου οι θέσεις των στοιχείων θα βρίσκονται πλέον βάσει του παρακάτω πίνακα [22]:

Πίνακας 12: Τρόπος αρίθμι	σης των στοιχείων στον αλγόριθμο του Lagrange για το S-διάστατο				
πρόβλημα της ανάθεσης					
; ;	; Θέση στο κελί D				

$i_3 i_4 \dots i_N$	Θἑση στο ι
111	1
211	2
•	
•	
$i_{3}11$	i_3
121	<i>i</i> ₃ +1
221	<i>i</i> ₃ +2
	•
<i>i</i> ₃ 21	2* i ₃
•	
$i_3 i_4 \dots 1$	$i_{3} * i_{4}$







Εικόνα 99: Block διάγραμμα της μεθόδου χαλάρωσης του Lagrange για το Ν-διάστατο πρόβλημα της ανάθεσης (από [22])

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα το πλήθος των στοιχείων του κελιού D είναι $m = i_3 * i_4 * \dots * i_N$. Οι πολλαπλασιαστές Lagrange αναπαρίστανται και αυτοί με ένα κελί U, όπου βέβαια θα ισχύει U{1}=0 και U{2}=0, ενώ για τα επόμενα στοιχεία θα ισχύει U{3} = $u_3, \dots, U{N} = u_N$. Παρακάτω παρουσιάζεται το block διάγραμμα του αλγορίθμου.

Εφαρμογή της 3-D τεχνικής χαλάρωσης του Lagrange ως μέθοδος σύνδεσης δεδομένων σε σύστημα ιχνηλασίας τριών αισθητήρων, με ιχνηλασία επιπέδου αισθητήρα

Σε αυτή την εφαρμογή τα δεδομένα που λαμβάνονται προέρχονται από τρεις αισθητήρες και πραγματοποιείται ιχνηλασία στο επίπεδο του αισθητήρα. Για την υλοποίηση της εφαρμογής θεωρήθηκε ότι τα δεδομένα των τριών αισθητήρων ήταν συγχρονισμένα. Ο κάθε αισθητήρας παράγει μία σειρά από ίχνη, δηλαδή πραγματοποιείται η διαδικασία της ιχνηλασίας για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά. Στη συνέχεια το σύστημα Data Fusion (DF) δέχεται ως είσοδο αυτές τις σειρές ιχνών και παράγει την τελική σειρά συντηγμένων ιχνών (fused). Η σειρά αυτή των ιχνών αποτελεί ουσιαστικά αποτέλεσμα ενός υποθετικού αισθητήρα που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των υπολοίπων. Η διαδικασία σύντηξης που υλοποιήθηκε ακολουθεί τον αλγόριθμο Covariance Intersection (CI) που περιγράφεται στην [10].

Περιγραφή του αλγορίθμου του συστήματος ιχνηλασίας τριών αισθητήρων, με ιχνηλασία επιπέδου αισθητήρα

Αρχικά γίνεται ιχνηλασία από κάθε αισθητήρα χωριστά με αποτελέσμα να παράγονται τρεις σειρές ιχνών. Στη συνέχεια πρέπει να δημιουργηθεί η μήτρα σύνδεσης δεδομένων, όπου με την βοήθεια του ελέγχου μέσω πύλης θα βρεθούν οι συσχετίσεις, εάν βέβαια αυτές είναι δυνατές, μεταξύ των ιχνών. Τα στοιχεία της μήτρας σύνδεσης δεδομένων υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$\mathbf{P}_{z} = (w_{1}\mathbf{P}_{1}^{-1} + w_{2}\mathbf{P}_{2}^{-1} + w_{3}\mathbf{P}_{3}^{-1})^{-1}$$
$$\mathbf{K}_{1} = w_{1}\mathbf{P}_{z}\mathbf{P}_{1}^{-1}, \ \mathbf{K}_{2} = w_{2}\mathbf{P}_{z}\mathbf{P}_{2}^{-1}, \ \mathbf{K}_{3} = w_{3}\mathbf{P}_{z}\mathbf{P}_{3}^{-1}$$
$$\mathbf{z} = \mathbf{K}_{1}\mathbf{x}_{1} + \mathbf{K}_{2}\mathbf{x}_{2} + \mathbf{K}_{3}\mathbf{x}_{3}$$
$$w_{1}, w_{2}, w_{3} \in [0, 1], \ w_{1} + w_{2} + w_{3} = 1$$

Για την περίπτωση που έχουμε σύνδεση δεδομένων για δύο μόνο ίχνη, δηλαδή ο ένας αισθητήρας δεν ανιχνεύει κάποιο στόχο, τον οποίο ανιχνεύουν όμως οι άλλοι δύο αισθητήρες, η σύνδεση δεδομένων γίνεται βάσει των εξισώσεων:

$$\mathbf{P}_{z} = (w\mathbf{P}_{1}^{-1} + (1 - w)\mathbf{P}_{2}^{-1})^{-1}$$
$$\mathbf{K}_{1} = w\mathbf{P}_{z}\mathbf{P}_{1}^{-1}, \ \mathbf{K}_{2} = (1 - w)\mathbf{P}_{z}\mathbf{P}_{2}^{-1}, \ \mu \varepsilon w \in [0, 1]$$
$$\mathbf{z} = \mathbf{K}_{1}\mathbf{x}_{1} + \mathbf{K}_{2}\mathbf{x}_{2}$$

Για τις παραπάνω εξισώσεις \mathbf{x}_i είναι τα ίχνη που προχύπτουν από τον *i* αισθητήρα με μήτρα συνδιαχύμανσης \mathbf{P}_i . Το \mathbf{z} είναι το προχύπτον συντηγμένο ίχνος με μήτρα συνδιαχύμανσης \mathbf{P}_z . Τα w_1, w_2, w_3 επιλέγονται ώστε να ικανοποιούν τους περιορισμούς που περιγράφονται από τις προαναφερθείσες εξισώσεις και συγχρόνως να αποδίδουν καλύτερα την κίνηση του στόχου. Αφού σχηματιστεί η μήτρα σύνδεσης δεδομένων πραγματοποιείται η διαδιχασία του ελέγχου μέσω πύλης. Για τα στοιχεία της μήτρας, τα οποία είναι μεγαλύτερα από ένα δεδομένο κατώφλι, τοποθετούνται μηδενικά στις αντίστοιχες θέσεις. Μετά την διαδιχασία ελέγχου μέσω πύλης και αφού προστεθούν και οι συνδυασμοί με τα dummy ίχνη στη μήτρα σύνδεσης δεδομένων εφαρμόζεται η τεχνική χαλάρωσης του Lagrange για τρισδιάστατα προβλήματα ανάθεσης, με σκοπό να βρεθούν τα ίχνη που προέρχονται από την ίδια πηγή-στόχο. Στη συνέχεια για τους συνδυασμούς των ιχνών που έχουν βρεθεί πραγματοποιείται σύντηξη δεδομένων όπου χρησιμοποιούνται οι προαναφερθείσες εξισώσεις για την εύρεση των συντηγμένω ιχνών. Στην περίπτωση που δύο από τους τρεις αισθητήρες τεθούν εκτός λειτουργίας το συντηγμένο ίχνος ταυτίζεται με το ίχνος του αισθητήρα που λειτουργεί.

Αποτελέσματα του συστήματος ιχνηλασίας τριών αισθητήρων, με ιχνηλασία επιπέδου αισθητήρα

Στον πίνακα που αφορά το παραπάνω σύστημα ιχνηλασίας σημειώνονται τα ίχνη που επιβεβαιώνονται από την ιχνηλασία για τον κάθε αισθητήρα χωριστά. Όπως φαίνεται και στον πίνακα το πλήθος των επιβεβαιωμένων ιχνών του κάθε αισθητήρα χωριστά είναι μεγαλύτερο από το πλήθος των πραγματικών ιχνών. Βέβαια το πλήθος των επιβεβαιωμένων συντηγμένων ιχνών είναι ακριβώς αυτό που αναμενόταν στην πλειοψηφία των σεναρίων, δηλαδή τόσο η σύνδεση δεδομένων όσο και η σύντηξη των ιχνών ήταν αποδοτικές. Στην πρώτη στήλη υπάρχει μια σύντομη περιγραφή του σεναρίου με αριθμό πραγματικών στόχων και είδος κίνησης, στην δεύτερη στήλη δίνεται το πλήθος των σαρώσεων του σεναρίου προσομοίωσης, από αυτές τις δύο στήλες προκύπτει το πλήθος των πραγματικών στόχων που αναμένονται από το σύστημα στο τέλος της διαδικασίας. Οι επόμενες τρεις στήλες περιέχουν τις προσομοιωμένες ανιχνεύσεις των τριών αισθητήρων, όπου φαίνεται η προσθήκη υπερβολικού θορύβου clutter σε αυτές. Στις επόμενες τρεις στήλες δείχνεται η έξοδος των τριών ιχνηλατών από τα δεδομένα των αισθητήρων, σε αυτές τις στήλες ο αριθμός των ιχνών εξόδου έχει μειωθεί σημαντικά τείνοντας στον αριθμό των πραγματικών ιχνών. Η τελευταία στήλη δίνει την έξοδο του τελικού συστήματος σύντηξης δεδομένων των τριών αισθητήρων όπου φαίνεται ο τελικός αριθμός συντηγμένων ιχνών του συστήματος.

Σενάριο κίνησης	Αριθμός σαρώσεων	Πλήθος μετρήσεων 1 ^{ου} αισθητήρα	Πλήθος μετρήσεων 2 ^{ου} αισθητήρα	Πλήθος μετρήσεων 3 ^{ου} αισθητήρα	Πλήθος επιβεβαιω μένων ιχνών 1 ^{ου} αι σ θητήρα	Πλήθος επιβεβαιω μένων ιχνών 2 ^{ου} αισθητήρα	Πλήθος επιβεβαιω μένων ιχνών 3 ^{ου} αι σ θητήρα	Πλήθος επιβεβαιω μέ νων ιχνών σύντηζης
1 ευθύγραμμος στόχος	120	730	691	702	127	142	121	120
1 ευθύγραμμος στόχος με ελιγμό	120	725	703	682	120	145	120	120
2 παράλληλοι ευθύγραμμοι στόχοι	120	1330	1422	1332	298	305	293	244
2 παράλληλοι ευθύγραμμοι στόχοι (με καθυστέρηση εκκίνησης) ¹	120	864	942	877	160	245	160	160
2 ευθύγραμμοι συγκρουόμενοι στόχοι	120	1416	1234	1334	254	271	256	240
1 ευθύγραμμος στόχος (με απώλειες παρατηρήσεων του 2 ^{ου} αισθητήρα)	120	693	664	763	125	130	125	120

Πίνακας 13: Επίδοση σύνδεσης δεδομένων του συστήματος DF επιπέδου αισθητήρα, 3 αισθητήρων

Πίνακας 14: Ψευδείς συναγερμοί και απώλειες του συστήματος DF επιπέδου αισθητήρα, 3 αισθητήρων

Σενάριο κίνησης	Πλήθος πραγματικών αντικειμένων	Ψευδείς συναγερμοί	Απώλειες επιβεβαίωσης ίχνους
1 ευθύγραμμος στόχος	120	0	0
1 ευθύγραμμος στόχος με ελιγμό	120	0	0
2 παράλληλοι ευθύγραμμοι στόχοι	240	5	1
2 παράλληλοι ευθύγραμμοι στόχοι με καθυστέρηση της	160	160 0	
εκκίνησης του ενός			
2 ευθύγραμμοι συγκρουόμενοι στόχοι	240	0	0
1 ευθύγραμμος στόχος με απώλειες παρατηρήσεων του 2 ^{ου} αισθητήρα	120	0	0

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι σε αυτό το σύστημα για τα περισσότερα σενάρια κίνησης δεν υπήρχαν ψευδείς συναγερμοί και απώλεια ανίχνευσης των πραγματικών στόχων. Εξαίρεση αποτελεί το σενάριο κίνησης των δύο ευθύγραμμων παράλληλα κινούμενων στόχων στο οποίο παρατηρήθηκε 1 απώλεια ανίχνευσης στόχου και 5 ψευδείς συναγερμοί (2.08% επί του συνόλου των πραγματικών αντικειμένων). Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι για το σενάριο του ευθύγραμμου στόχου με απώλειες παρατηρήσεων του ενός αισθητήρα παρατηρήθηκε απώλεια επιβεβαίωσης ίχνους από τον δεύτερο αισθητήρα για 4 σαρώσεις, παρόλο που σε αυτές τις σαρώσεις υπήρχαν παρατηρήσεις από αυτόν τον αισθητήρα για τον πραγματικό στόχο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο δεύτερος αισθητήρας ήταν ο λιγότερο ακριβής, με αποτέλεσμα να

¹ Ο δεύτερος στόχος εμφανίζεται για 40 σαρώσεις.

υπάρξει αποτυχία συσχέτισης μέτρησης-ίχνους του συστήματος ιχνηλασίας αυτού του αισθητήρα. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις όμως οι επιβεβαιώσεις και από τους τρεις αισθητήρες ήταν σωστές.

Συμπεράσματα

Σύγκριση αλγορίθμου JVC με τον αλγόριθμο του πλειστηριασμού

Οι δύο αλγόριθμοι συγκρίθηκαν ως προς τον χρόνο εκτέλεσης τους για τυχαίες δυσδιάστατες μήτρες με τυχαία πυκνότητα μη μηδενικών στοιχειών. Όπως διαπιστώθηκε ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού αποδίδει καλύτερα σε αραιά δυσδιάστατα προβλήματα ανάθεσης, ενώ ο JVC σε πυκνά. Ειδικότερα ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού είναι ιδιαίτερα αποδοτικός έναντι του JVC για προβλήματα ιδιαίτερα μεγάλης αραιότητας, και συγκεκριμένα για ποσοστό μη μηδενικών στοιχείων μικρότερο του 30%. Αντίθετα, για ποσοστό μη μηδενικών στοιχείων μεγαλύτερο του 60% είναι φανερή η υπεροχή του JVC. Καθώς αυξάνει το ποσοστό μη μηδενικών στοιχείων αυξάνει και ο «ανταγωνισμός» των ιχνών για συγκεκριμένες παρατηρήσεις. Έτσι στην περίπτωση του αλγορίθμου του πλειστηριασμού δημιουργείται μια εσωτερική «διαμάχη» τιμών με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος εκτέλεσης. Η συμπληρωματική αυτή ιδιότητα των δύο αλγορίθμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα συστήματα ιχνηλασίας. Συγκεκριμένα θα πρέπει στο σύστημα ιχνηλασίας να υπάρχει ένα κριτήριο αραιότητας, σύμφωνα με το οποίο θα εξετάζεται αν η μήτρα του δυσδιάστατου προβλήματος που ζητείται να επιλυθεί είναι αραιή ή πυκνή, και στη συνέχεια θα εφαρμόζεται ο αντίστοιχος αλγόριθμος. Αυτό οδηγεί σε πιο αποτελεσματικές λύσεις του προβλήματος σύνδεσης δεδομένων κυρίως σε δυναμικά περιβάλλοντα και σε μήτρες μεγάλης διάστασης.

Σύστημα ιχνηλασίας τριών αισθητήρων με ιχνηλασία επιπέδου αισθητήρα

Η μέθοδος σύνδεσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε ήταν η 3-D τεχνική χαλάρωσης του Lagrange με σύνδεση δεδομένων επιπέδου ιχνών και όχι σύνδεση μετρήσεων με ίχνη όπως στις συνήθεις περιπτώσεις. Η σύντηξη των ιχνών έγινε με τον αλγόριθμο τομής συνδιακυμάνσεων (Covariance Intersection, CI) για την περίπτωση ιχνών από τρία συστήματα ιχνηλασίας. Όπως φάνηκε και από τα αποτελέσματα το συντηγμένο ίχνος έτεινε στο ίχνος του ακριβέστερου αισθητήρα. Βέβαια τα συστήματα πολλαπλών αισθητήρων δεν χρησιμοποιούν κάποιο αισθητήρα, ο οποίος απλά αποδίδει καλύτερα από τους υπόλοιπους. Χρησιμοποιούν διαφορετικού τύπου αισθητήρες ή αισθητήρες που βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις, οι οποίοι λειτουργούν καλά ο καθένας κάτω από διαφορετικές συνθήκες εξασφαλίζοντας ότι ένα τέτοιο σύστημα θα είναι αποδοτικότερο από ένα σύστημα, όπου κάθε αισθητήρας θα λειτουργεί χωριστά. Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα ο αλγόριθμος σύνδεσης δεδομένων και ο αλγόριθμος σύντηξης ιχνών λειτουργούν ικανοποιητικά. Σε κάποια σενάρια κίνησης όπως φαίνεται και από τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου παρατηρήθηκαν απώλειες ανίχνευσης των πραγματικών στόχων και ψευδείς συναγερμοί, σε μικρό βέβαια ποσοστό.

Αναφορές

- [1] Bar-Shalom Y. Blair W. D., "Multitarget Multisensor Tracking:Applications and Advances", Volume III, Artech House, 2001
- [2] Blackman S. S. and Popoli R., "Design and Analysis of Modern Tracking Systems", Norwood, MA: Artech House, 1999.
- [3] David L. Hall, "Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion", Artech House, 1992.
- [4] Bertsekas D. P., "Linear Network Optimization: Algorithms and Codes, Cambridge MA: The MIT Press, 1992.
- [5] Deb S., Yeddanapudi M., Pattipati K., Bar-Shalom Y., " A Generalized S-D Assignment Algorithm for Multisensor-Multitarget State Estimation", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-33, No. 2, April 1997, pp. 523-538
- [6] Pattipati K. R., Bar-Shalom Y., "A New Relaxation Algorithm and Passive Sensor Data Association", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 37, No. 2, February 1992, pp. 197-213
- [7] Poore A. B., Robertson A. J., "A New Lagrangian Relaxation Based Algorithm for a Class of Multidimensional Assignment Problems", Computational Optimization and Applications, Vol. 8, No. 2, September 1997, pp. 129-150

- [8] Jonker R., Volgenant A., "A Shortest Augmenting Path Algorithm for Dense and Sparse Linear Assignment Problems", J. Computing, Vol. 38, 1987, pp. 325-340
- [9] Malkoff D. B., "Evaluation of Jonker-Volgenant-Castanon (JVC) Assignment Algorithm for Track Association", Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition VI, Proc SPIE, Vol. 3068, April 1997, pp. 228-239
- [10] Chen L., Arambel P. O., Mehra R. K., "Fusion under Unknown Correlation-Covariance Intersection as a Special Case", Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion, Vol. 2, 2002, pp. 905-915
- [11] Fisher M. L., "The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems", Management Science, Vol. 27, No. 1, 1981, pp. 1-18
- [12] Kim J., Singh T., Llinas T., "Large Scale Simulation of a Distributed Target Tracking System", ", Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion, Vol. 1, 8-11, July 2002, pp. 624-629
- [13] Poore A. B., Gadaleta S., "Some assignment problems arising from multiple target tracking", Mathematical and Computer Modelling, Vol. 45, Issues 9-10, May 2006, pp1074-1091
- [14] Chiafair D. F., Blair W. D., West P. D., "Implementation of a 3-D Assignment Algorithm in Matlab", IEEE, Proceedings of the Southeastern Symposium on System Theory, 2004, pp. 200-204
- [15] Llinas J., Hall D. L., "An introduction to Multi-sensor Data Fusion", IEEE, Proceedings of the IEEE, Vol. 85, Issue 1, January 1997, pp. 6-23
- [16] Chong C. Y., Mori S., Barker W. H., Chang K. C., "Architectures and Algrithms for Track Association and Fusion", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 15, No. 2, Issue 1, January 2000, pp. 5-13.
- [17] Gad A., Farooq M., Serdula J., Peters D., "Multitarget Tracking in Multisensor Multiplatform Environment", In ISIF 7th International conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, June 28– 1st July 2004, pp. 206-213.
- [18] Poore A., Rijavec N., "Multitarget tracking, Multidimensional Assignment Problems, and Lagrangian Relaxation", Proc. SDI Panels on Tracking, August 1991, pp. 51-74
- [19] Castanon D. A., New Assignment Algorithms for Data Association", Proc.SPIE, Vol. 1698, 1992, pp. 313-323
- [20] D. Bertsekas, Auction Algorithms for Network Flow Problems: A Tutorial Introduction, Journal of Computational Optimization and its Applications, May 1992.
- [21] K. R. Pattipati, R. L. Popp, T. Kirubarajan, Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances, Volume III, – Chapter 2: Survey of Assignment Techniques for Multitarget Tracking, - Y. Bar-Shalom, W. D. Blair Editors, Artech House, Boston-London, 2000.
- [22] Χαρίκλεια Σερμπετζόγλου, Επίλυση Προβλημάτων Ανάθεσης Μετρήσεων και Ιχνών στο Ν-διάστατο Χώρο για Παρακολούθηση Κινουμένων Αντικειμένων, διπλωματική εργασία, ΗΜΜΥ/ΕΜΠ, Ιούλιος 2006.
- [23] D. Musicki, R. J. Evans, and S. Stankovic. "Integrated Probabilistic Data Association", IEEE Trans. Auto. Control, Vol. 39, no. 6, pp. 1237–1241, June 1994.

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Σύστημα σύντηξης δεδομένων πολλαπλών αισθητήφων

Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνεται η παρουσίαση της γενικής εικόνας του συστήματος σύντηξης δεδομένων που προτείνεται στηην εργασία αυτή με αναφορές στα υποσυστήματα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από τα κύρια συστήματα που αναπτυχθήκαν, τα οποία είναι ένα αρχικό σύστημα δυναμικής επιτήρησης για παρακολούθηση πίσω και πλαϊνών περιοχών. Τα επόμενα είναι τα δύο κύρια συστήματα σύντηξης που δοκιμαστήκαν το ένα με κύριο αντικείμενο την πολυδιάστατη ανάθεση και το δεύτερο την κυκλική δυναμική παρακολούθηση. Σημειώνεται ότι ο ίδιος αλγόριθμος εκτελέστηκε και στις δύο κύριες τοπολογίες πειραματικών οχημάτων.

5.1 Εφαρμογή δυναμικής επιτήρησης πίσω και πλαϊνών περιοχών

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται ο αλγόριθμος ιχνηλασίας δεδομένων και σύντηξης των δεδομένων από μία σειρά από υποσυστήματα αισθητήρων σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του συστήματος LATERAL SAFE που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.4. Η αρχιτεκτονική αυτή αποσκοπεί στην επιτήρηση και αναγνώριση των αντικειμένων εντός των πλευρικών και της πίσω περιοχής του οχήματος παρέχοντας πληροφορία στις τρεις κύριες εφαρμογές του συστήματος. Τα τρία συστήματα αισθητήρων σύντηξης δεδομένων. Οι λίστες αυτές είναι: του LRR, του δικτύου SRR στα αριστερά, του δικτύου SRR στα δεξιά και του συστήματος συνθετικής επεξεργασίας εικόνας SVIP.

Η περιγραφή του αλγορίθμου περιλαμβάνει τον συγχρονισμό των ιχνών σε κοινή χρονική αναφορά, την μετατροπή σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων, την σύνδεση ίχνους προς ίχνος, τη διαχείριση των αντικειμένων (αρχικοποίηση, επιβεβαίωση και διαγραφή) και την τελική σύντηξη των ιχνών. Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη του το FOV των αισθητήρων και τις περιοχές συμπληρωματικής ή πλεονάζουσας κάλυψης.

Το υποσύστημα σύντηξης του συστήματος LATERAL SAFE έχει κύριο στόχο τον συνδυασμό, την ενσωμάτωση των δεδομένων και την παροχή της εξόδου του επιπέδου αντικειμένων (ή και perception layer [1]). Το επίπεδο εξαγωγής αντικειμένων ορίζεται ως το ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ του συστήματος αισθητήρων και του επιπέδου των εφαρμογών [2]. Το επίπεδο αυτό δίνει μια πραγματική αναπαράσταση του οδικού περιβάλλοντος βελτιώνοντας την επίδοση της χρήσης μόνο των αισθητήρων με παροχή πιο αξιόπιστης πληροφορίας στις εφαρμογές. Ο ρόλος του επιπέδου εξαγωγής αντικειμένων είναι:

- Η παροχή αξιόπιστης εξαγωγής αντικειμένων ανεξάρτητα της εφαρμογής
- Περιγραφή του οδικού περιβάλλοντος και του σεναρίου κυκλοφορίας με έναν προκαθορισμένο τρόπο
- Υποστήριξη των συγκεκριμένων εφαρμογών του συστήματος LATERAL SAFE
- Λειτουργία ως διασύνδεση (gateway) μεταξύ αισθητήρων και εφαρμογών με προδιαγεγραμμένο πρωτόκολλο διεπαφής εισόδου/εξόδου



Η εσωτερική αρχιτεκτονική του επιπέδου εξαγωγής αντικειμένων του συστήματος LATERAL SAFE φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

Το επίπεδο εξαγωγής αντικειμένων είναι πάντοτε ενεργοποιημένο και πάντα ελέγχει και σχηματοποιεί το οδικό περιβάλλον.

Επεξεργασία δεδομένων των υποσυστημάτων εισόδου

Το σύστημα ιχνηλασίας φαντάφ με χφήση του ACC2 LRR παφουσιάστηκε στην ενότητα 3.3. Το σύστημα ιχνηλασίας αυτό αποτελείται από τφία υποσυστήματα: σύνδεσης δεδομένων, διαχείφισης ιχνών και φιλτφαφίσματος και πφόβλεψης. Η μέθοδος φιλτφαφίσματος είναι το EKF [4] με χφήση μοντέλου CA για την κίνηση των στόχων και GNN [7] με τον αλγόφιθμο πλειστηφιασμού [6] για τη σύνδεση δεδομένων. Ο αλγόφιθμος διαχείφισης ιχνών είναι αυτός που παφουσιάστηκε στο σχήμα 59.

Το σύστημα επεξεργασίας δικτύου αισθητήρων SRR για τις δύο πλευρές του οχήματος [2] πραγματοποιήθηκε με βάση τα ακόλουθα στάδια. Ανάπτυξη ενός μοντέλου αισθητήρα που χρησιμοποιεί την ακρίβεια σε απόσταση και γωνία καθώς και ιδιότητες ανάκλασης τυπικών αισθητήρων. Η μετρήσεις των αισθητήρων φιλτράρονται ανεξάρτητα καθώς φθάνουν από τον κάθε αισθητήρα με ένα ΕΚF με αναμεμιγμένες συντεταγμένες, με GNN για τη σύνδεση δεδομένων. Στη συνέχεια ακολουθεί ενσωμάτωση δεδομένων για τα ίχνη των αισθητήρων που ανήκουν στην ίδια περιοχή με έλεγχο πύλης (gating) και ο παράγοντας βαρών υπολογίζεται σύμφωνα με την ακρίβεια και τη θέση του κάθε στόχου. Στην συνέχεια ακολουθεί ιχνηλασία των ενσωματωμένων αντικειμένων σύμφωνα με το σχήμα Converted Measurement Kalman Filter (CMKF) [13].

Το σύστημα συνθετικής επεξεργασίας εικόνας SVIP χρησιμοποιείται στο σύστημα σύντηξης όπως και το προηγούμενο σύστημα επεξεργασίας δικτύου αισθητήρων SRR έτοιμο από συνεργαζόμενη ομάδα στην ανάπτυξη του συστήματος LATERAL SAFE. Περιλαμβάνει δύο εκδοχές, η πρώτη είναι η περίπτωση χρήσης αποκλειστικά των καμερών στους καθρέπτες και η εξαγωγή πληροφορίας για την ύπαρξη ή μη αντικειμένου στην περιοχή που επιτηρούν. Η δεύτερη έκδοση αφορά επεξεργασία εικόνας ανεξάρτητα από την κάθε κάμερα με χρήση επιπροσθέτως μιας τρίτης κάμερας στο πίσω μέρος του οχήματος. Η ανίχνευση στόχων με βάση τις κάμερες αποκλειστικά δεν φθάνει την ακρίβεια απόστασης που δίνουν τα ραντάρ, αλλά δίνει μια ένδειξη σχετικά με την περιοχή κίνησης του στόχου. Για τις ανιχνεύσεις αυτές ακολουθεί επεξεργασία με χρήση μοντέλου σταθερής ταχύτητας και φίλτρου Kalman που αποδίδει επιπρόσθετα πληροφορία ταχύτητας και τη μήτρα συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης. Ο τρόπος χρήσης της ετερογενούς αυτής πληροφορίας περιγράφεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Συγχρονισμός

Οι τέσσερις λίστες ιχνών που φθάνουν στην είσοδο του συστήματος διαθέτουν χρονικές ενδείξεις (time stamps) με κοινή αναφορά και με βάση το χρόνο που αυτές αποκτήθηκαν από τους αισθητήρες. Ο χρονικός κύκλος του LRR είναι 100ms, για τα αντικείμενα του SVIP κυμαίνεται από 40-100 ms ενώ για τα ίχνη του SRR είναι 40ms. Το σύστημα σύντηξης δεδομένων που αναπτύχθηκε αποδίδει αποτελέσματα ακολουθώντας τον χρόνο δεδομένων του LRR σύμφωνα με το σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 101: Διαδικασία συγχρονισμού δεδομένων του συστήματος

Για καθεμία από τις λίστες ιχνών που είναι διαθέσιμες μετά την άφιξη της πληροφορίας των ιχνών του LRR (κάθε 100ms) λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

- Εύρεση του τελευταίου διαθέσιμου ίγνους από μία από τις τρεις διαθέσιμες λίστες ιχνών
- Υπολογισμός της χρονικής μετατόπισης από την στιγμή που το αντικείμενο ήταν διαθέσιμο έως την χρονική στιγμή της σύντηξης Δt_i , με i = 1,2,3.

)

Υπολογισμός της μήτρας μετάβασης Α(Δt_i)

Η χρονική ευθυγράμμιση της κάθε λίστας ιχνών πραγματοποιείται με βάση τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\hat{\mathbf{x}}_{i-aligned} = \mathbf{A}(\Delta t_i) \cdot \hat{\mathbf{x}}_i$$

$$\mathbf{P}_{i-aligned} = \mathbf{A}(\Delta t_i) \cdot \mathbf{P}_i \cdot \mathbf{A}(\Delta t_i)^T + \mathbf{Q}(\Delta t_i)$$
(5.2)

Μετά τη χρονική ευθυγράμμιση των ιχνών ακολουθεί η χωρική ευθυγράμμιση τους στο κοινό σύστημα συντεταγμένων αναφοράς του συστήματος σύντηξης.

Μετασχηματισμοί

Χρησιμοποιείται ο τυπικός μετασχηματισμός ενός 2Δ συστήματος συντεταγμένων με μετατόπιση και περιστροφή. Έστω ξ1, ξ2 είναι οι συντεταγμένες στο σύστημα συντεταγμένων του οχήματος και D είναι η στροφή του νέου συστήματος (κατεύθυνσης στόχευσης αισθητήρα). Οι νέες συντεταγμένες του διανύσματος κατάστασης στο σύστημα του οχήματος από το σύστημα του αισθητήρα (σημειώνεται με δείκτη s), δίνονται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\begin{bmatrix} x \\ v_x \\ a_x \\ y \\ v_y \\ a_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos D & 0 & 0 & \sin D & 0 & 0 \\ 0 & \cos D & 0 & 0 & \sin D & 0 \\ 0 & 0 & \cos D & 0 & 0 & \sin D \\ -\sin D & 0 & 0 & \cos D & 0 & 0 \\ 0 & -\sin D & 0 & 0 & \cos D & 0 \\ 0 & 0 & -\sin D & 0 & 0 & \cos D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_s \\ v_{x-s} \\ a_{x-s} \\ y_s \\ v_{y-s} \\ a_{y-s} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \xi_1 \\ 0 \\ 0 \\ \xi_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(5.3)

όπου ν και a, για ταχύτητα και επιτάχυνση αντίστοιχα. Μετασχηματισμοί για τα στοιχεία της μήτρας συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης δεν χρειάζεται.



Εικόνα 102: Μετασχηματισμοί από τις συντεταγμένες του αισθητήρα στις συντεταγμένες του οχήματος

Σύνδεση δεδομένων και διαχείδιση αντικειμένων

Οι ευθυγραμμισμένες στον χρόνο και τον χώρο λίστες ιχνών εισάγονται στο σύστημα σύνδεσης δεδομένων του γενικότερου συστήματος σύντηξης δεδομένων. Η επίδοση της σύνδεσης δεδομένων εξαρτάται άμεσα από την επίδοση των τριών ξεχωριστών ιχνηλατών και ιδιαίτερα από την ικανότητα διατήρησης του ID των ιχνών, καθώς αυτό θα πρέπει να διατηρηθεί κατά τη δημιουργία του γενικευμένου (συντηγμένου) αντικειμένου. Το σήμα της σύντηξης δεδομένων δεν χρησιμοποιεί εκτεταμένη πληροφορία πίσω στο χρόνο σχετικά με τα τελικά αντικείμενα με κύριο στόχο την αποφυγή πολλαπλών ενδείξεων για το ίδιο αντικειμένου και τη διατήρηση της πληροφορίας της ταυτότητας του στόχου στο χρόνο. Η σύνδεση των αντικειμένων του συστήματος που εξετάζεται αφορά:

- Σύνδεση μεταξύ των αντικειμένων του SVIP και του LRR
- Σύνδεση μεταξύ των αντικειμένων του SRR-L και των συντηγμένων αντικειμένων της αριστερής πλευράς κατά την μετάβαση από την πίσω αριστερή στην αριστερή πλευρά
- Σύνδεση μεταξύ των αντικειμένων του SRR-R και των συντηγμένων αντικειμένων της δεξιάς πλευράς κατά την μετάβαση από την πίσω δεξιά στην δεξιά πλευρά

Σύνδεση δεδομένων δύο ιχνών

Οι περιπτώσεις της τοπολογίας που εξετάζονται αφορούν αποκλειστικά σύνδεση δύο ιχνών. Τα ίχνη που δεν έχουν συνδεθεί με κάποιο άλλο ίχνος απλά μεταφέρονται στην έξοδο. Ένα μέτρο συνδεσιμότητας μεταξύ των ιχνών χρειάζεται να δημιουργηθεί πριν προχωρήσει ο αλγόριθμος στην ανάθεση. Αυτό γίνεται με χρήση της μήτρας διασταυρούμενης συνδιακύμανσης [10] όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Υποθέτοντας ότι υπάρχουν δύο συνδεδεμένα ίχνη από διαφορετικούς αισθητήρες i, j με διανύσματα κατάστασης $\hat{\mathbf{x}}_i, \hat{\mathbf{x}}_j$ και μήτρες συνδιακύμανσης $\mathbf{P}_i, \mathbf{P}_j$ αντίστοιχα, ορίζεται η διαφορά των διανυσμάτων κατάστασης και η μήτρα συνδιακύμανσης που λαμβάνει υπόψη τα σφάλματα εκτίμησης μεταξύ των δύο ιχνών, σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$$

$$\mathbf{P}_{ij}(l,m) = \rho \cdot \left[\mathbf{P}_i(l,m) \cdot \mathbf{P}_j(l,m) \right]^{1/2}$$
(5.4)
(5.5)

όπου *l,m* είναι τα στοιχεία των μητρών συνδιακύμανσης ένα προς ένα, και ρ είναι ο συντελεστής συσχέτισης, που για ιχνηλασία σε δύο διαστάσεις επιλέγεται να είναι 0.4 [5]. Η στατιστική απόσταση μεταξύ των ιχνών *i, j* χρησιμοποιώντας τη διασταυρούμενη συνδιακύμανση:

$$\mathbf{d}_{ij}^{2} = \widetilde{\mathbf{x}}_{ij}^{T} \cdot \left[\mathbf{P}_{i} + \mathbf{P}_{j} - \mathbf{P}_{ij} - \mathbf{P}_{ij}^{T} \right]^{-1} \cdot \widetilde{\mathbf{x}}_{ij}$$
(5.6)

Μετά τον υπολογισμό της απόστασης – και συνεπώς της μήτρας – το πρόβλημα ανάθεσης μπορεί να λυθεί με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της δυσδιάστατης σύνδεσης δεδομένων σε ένα απλό πρόβλημα ιχνηλασίας με χρήση του αλγορίθμου πλειστηριασμού.



Εικόνα 103: Περιοχής κάλυψης (χωρίς κλίμακα)

Συνάgτηση FOV

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση της αρχιτεκτονικής του συστήματος LATERAL SAFE με αναφορά στην ακόλουθη εικόνα οι περιοχές κάλυψης που μπορούν να αναγνωριστούν μεταξύ των διαφόρων αισθητήρων είναι επτά. Οι εξής:

- 1. Η περιοχή των αντικειμένων του SRR-R για τις περιοχές που δεν υπάρχει κάλυψη από την κάμερα του δεξιού καθρέπτη.
- 2. Η περιοχή των αντικειμένων SRR-R που δεν ανήκουν στην περιοχή 1 και τα αντικείμενα SVIP που ανήκουν στην περιοχή των SRR-R
- Η περιοχή των αντικειμένων SVIP που δεν ανήκουν στις περιοχές του LRR και των δύο πλευρικών περιοχών SRR
- Η περιοχή των αντικειμένων SVIP στην κοινή περιοχή FOV με τα αντικείμενα του LRR, με τα οποία λαμβάνει χώρα και σύντηξη
- 5. Η περιοχή των αντικειμένων LRR πέραν της περιοχής κάλυψης του SVIP

- 6. Η περιοχή των αντικειμένων SRR που δεν ανήκουν στην περιοχή 7, και των αντικειμένων SVIP εντός της περιοχής των SRR-L
- Η περιοχή των αντικειμένων SRR-L εκτός της περιοχής κάλυψης της αριστερής κάμερας στον καθρέπτη.

Ένα αντικείμενο με συντεταγμένες στο σύστημα του ιδίου οχήματος (x_T, y_T) ανήκει στην περιοχή του FOV με κίτρινο χρώμα στην εικόνα 102 γύρω από ένα σημείο (x_0, y_0) πάνω στο όχημα εάν ικανοποιεί τις ακόλουθες εξισώσεις. Η διαδικασία διαχωρισμού των αντικειμένων αναλόγως της περιοχής που ανήκουν γίνεται για την ελάττωση της χρονικής καθυστέρησης που υπεισέρχεται κατά την σύνδεση μεταξύ ιχνών. Χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παράμετροι.

- D: Γωνία κατεύθυνσης του αισθητήρα [-180,180) μοίρες
- FOV : FOV του αισθητήρα
- R: Μέγιστη απόσταση ανίχνευσης του αισθητήρα
- x_0, y_0 : Θέση του αισθητήρα
- x_T, y_T : Θέση του στόχου

Σύμφωνα με την εικόνα 104 οι γωνίες που καθορίζουν μια περιοχή FOV είναι:

$$\varphi_1 = D - FOV/2 \tag{5.7}$$







$$r = \sqrt{\left(x_T - x_0\right)^2 + \left(y_T - y_0\right)^2}$$
(5.8)

$$\phi = -\tan^{-1} \left(\frac{y_T - y_0}{x_T - x_0} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad [\text{deg}]$$
(5.9)

Ένα ίχνος στο σημείο (x_T, y_T) ανήκει στο συγκεκριμένο τομέα FOV με σημείο αναφοράς το (x_0, y_0) αν ισχύει η ακόλουθη συνθήκη:

$$r \le R \quad and \quad \phi \in \left[\varphi_1, \varphi_2\right] \tag{5.10}$$

Διατήρηση της ταυτότητας ID του συντηγμένου αντικειμένου

Για τη διατήφηση του γενικού ID σύντηξης γίνεται χφήση του ID που αποδόθηκε κατά την ιχνηλασία των δεδομένων του κάθε αισθητήφα. Τα ίχνη των τεσσάφων υποσυστημάτων ιχνηλασίας ανατίθενται αφχικά σε μια από τις επτά πεφιοχές που οφίστηκαν στην εικόνα 101. Κάθε ίχνος μποφεί να συντηχθεί με άλλο ίχνος κάποιας άλλης λίστας ιχνών εάν ανήκει στις πεφιοχές 2, 4 και 6, αλλιώς τα αντικείμενα δεν αντιστοιχούν σε πεφιοχές σύντηξης και απλά πφοστίθενται στην τελική λίστα των αντικειμένων της σύντηξης. Σε κάθε συντηγμένο αντικείμενο που παφατηφήθηκε για πφώτη φοφά αποδίδεται ένα ID και διατηφείται επίσης και το ID της ιχνηλασίας του. Και αν στο μέλλον ID ιχνών που υπάφχουν στην πληφοφοφία ενός συντηγμένου αντικειμένου ξαναεμφανίζονται κατά την ενημέφωση του αυτό διατηφείται.



Προσομοίωση συστήματος σύντηξης

Εικόνα 105: Γενική ιδέα του συστήματος σύντηξης (προσομοίωση)
Η σύντηξη ιχνών του συστήματος LATERAL SAFE αποδίδεται περιγραφικά από το παραπάνω διάγραμμα. Οι τέσσερες λίστες ιχνών του συστήματος μετά την χωρική και χρονική ευθυγράμμιση τους εισάγονται στο σύστημα η σύντηξη των δύο ιχνών (με χρήση διανυσμάτων κατάστασης και συνδιακυμάνσεων) μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια σειρά μεθόδων.

Η θεμελιώδης μέθοδος είναι η απλή σύντηξη [9] που υποθέτει ότι τα ίχνη είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους και συνεπώς δεν αποτελεί βέλτιστη λύση. Η συνδιακύμανση με βάρη [10][5] που λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση μεταξύ των ιχνηλατών (λόγω κοινού θορύβου διαδικασίας) με τη δημιουργία της μήτρας διασταυρούμενης συνδιακύμανσης από τις δύο υπάρχουσες μήτρες συνδιακύμανσης.

Η μέθοδος σύντηξης που τελικά επελέγη στο σύστημα σύντηξης που χρησιμοποιήθηκε κατά την διαδικασία ανάπτυξης της εφαρμογής και προσομοιώθηκε κάνει χρήση της μεθόδου τομής των συνδιακυμάνσεων - Covariance Intersection method [11]. Η μέθοδος αυτή επιλύει το θέμα της λανθασμένης ενσωμάτωσης πλεονάζουσας πληροφορίας. Το διάνυσμα κατάστασης και η μήτρα συνδιακύμανσης:

$$\mathbf{P}_{f} = \left[w \mathbf{P}_{1}^{-1} + (1 - w) \mathbf{P}_{2}^{-1} \right]^{-1}$$

$$\mathbf{x}_{f} = \mathbf{P}_{f} \cdot \left[w \cdot \mathbf{P}_{1}^{-1} \cdot \mathbf{x}_{1} + (1 - w) \cdot \mathbf{P}_{2}^{-1} \cdot \mathbf{x}_{2} \right]$$
(5.12)

με το w να ανήκει στο διάστημα [0,1].

Η μέθοδος ένωσης συνδιακυμάνσεων - Covariance Union [12] επιλύει το πρόβλημα της χρήσης λανθασμένων εκτιμήσεων. Η μέθοδος αυτή εγγυάται τη συνάφεια όταν το σύστημα και οι εκτιμήσεις είναι το ίδιο συναφείς, αλλά είναι υπολογιστικά απαιτητική. Η μέθοδος της τομής των συνδιακυμάνσεων είναι συντηρητική λύση σε σχέση με την μέθοδο της διασταυρούμενης συνδιακύμανσης αλλά επιλέχθηκε λόγω της ιδιότητας της να ενσωματώνει ομαλά πιθανόν λανθασμένη πλεονάζουσα πληροφορία.

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Αναπτύχθηκε μια εφαρμογή του αλγορίθμου σε Matlab με βάση ένα σενάριο προσομοίωσης που περιλαμβάνει το ίδιο όχημα και τρία οχήματα στόχους. Οι θέσεις των αισθητήρων και τα χαρακτηριστικά τους είναι μεταβλητά και προκαθορίζονται, για παράδειγμα οι παράμετροι του LRR φαίνονται στην εικόνα 106.

LRR parameters			×
Sensor Position ar	nd Properties	Sensor Measurement	Errors
X Position (m)	2.15	X meas. noise (m)	0.8
Y Position (m)	-0.35	Y meas. noise (m)	0.4
Set FOV (deg)	16	VR meas. noise (m/s)	1
Range (m)	150		
Direction angle (deg)	6	ок	CANCEL
Е	/		

Εικόνα 106: Παράμετροι LRR στο σύστημα προσομοίωσης

Το περιβάλλον του προσομοιωτή απεικονίζεται στο σχήμα 107 η λειτουργία του σεναρίου έχει ως εξής: αρχικά δημιουργούνται οι πραγματικές θέσεις των στόχων και του οχήματος, οι θέσεις του κάθε στόχου αναλόγως της θέσης των αισθητήρων και του FOV δίνονται σαν μετρήσεις στους διαφορετικούς αισθητήρες και τελικά προστίθεται γκαουσσιανός θόρυβος σύμφωνα με τις καθορισμένες τιμές που έχουν τεθεί σε κάθε αισθητήρα. Για την προσομοίωση υποτέθηκαν όλα τα συστήματα αισθητήρων SRR και SVIP της ίδιας μορφής με το υποσύστημα ιχνηλασίας του LRR, αν και όπως θα δειχθεί στη συνέχεια αυτό γενικά δεν ισχύει.

Η επίδοση της σύντηξης στην προσομοίωση περιλαμβάνει έλεγχο των αποτελεσμάτων του φιλτραρίσματος καθώς και της επιτυχούς σύνδεσης των δεδομένων με καταμέτρηση των απωλειών ανίχνευσης των γνωστών πραγματικών αντικειμένων. Πραγματοποιήθηκαν συνεχόμενες εκτελέσεις κατά Monte Carlo για να αποτιμηθούν αξιόπιστα οι αλγόριθμοι λόγω της ύπαρξης του τυχαίου θορύβου.



Εικόνα 107: Το γραφικό περιβάλλον του προσομοιωτή

Το σεναφίο της πφοσομοίωσης πεφιλαμβάνει 500 σύνθετες σαφώσεις με τφεις στόχους όπως διακφίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το ίδιο όχημα είναι πάντοτε στην αφχή του συστήματος αξόνων και η σχετική θέση των υπολοίπων τφιών οχημάτων αποτυπώνεται συνολικά για όλη τη διάφκεια του σεναφίου.

Το σενάφιο προσομοίωσης πεφιλαμβάνει δύο οχήματα που προσπεφνούν το ίδιο όχημα, ένα από τα αφιστεφά πφωτοεμφανιζόμενο από πίσω, το οποίο και πφοσπεφνά από αφιστεφά επιταχυνόμενο, το άλλο κινείται στα δεξιά και παφάλληλα του ιδίου οχήματος και ένα τφίτο όχημα εμφανίζεται στα δεξιά και πφοσπεφνάται από το ίδιο όχημα. Για το γενικό αυτό σενάφιο των 500 σαφώσεων οι χφόνοι εμφάνισης και εξαφάνισης των παφαπάνω στόχων, Τ1, Τ2 και Τ3 πεφιλαμβάνονται στον ακόλουθο πίνακα:



Εικόνα 108: Συνολική αποτύπωση των 500 σαρώσεων του συστήματος

Αντικείμα εντός FO	evo V	Εμφάνιση [# σάρωσης]	Εμφάνιση [#σάρωσης]	Διάρκεια [σαρώσεις]
	01	1	380	380
FUS	O2	1	500	500
	O3	386	468	82
	01	1	318	318
LRR	O2	-	-	-
	O3	-	-	-
	01	137	370	233
SVIP	O2	1	258	258
	O3	437	468	31
	01	-	-	-
SRR-R	O2	200	500	300
	O3	386	462	76
	01	348	380	32
SRR-L	O2	-	-	-
	O3	-	-	-
	01	137	318	181
LRR &	O2	-	-	-
SVIP	O3	-	-	-
	01	-	-	-
SRR-R &	O2	200	258	58
SVIP	O3	437	462	25
	01	348	370	22
SRR-L &	02	-	-	-
SVIP	03	-	-	-

Πίνακας 15: Λεπτομέρειες του σεναρίου προσομοίωσης



Για την περίπτωση ενός κοινού αντικειμένου που ανιχνεύεται από το LRR και το SVIP ακολουθήθηκε μια διαδικασία ελέγχου του φιλτραρίσματος. Αυτό είναι το όχημα στόχος T2 (πίνακας 15 και εικόνα 106) που παρατηρείται για 181 σαρώσεις. Τα αποτελέσματα για 100 εκτελέσεις Monte Carlo δίνονται στις εικόνες που ακολουθούν:



Εικόνα 109: Εκτίμηση θέσης στα επίπεδα επεξεργασίας του αισθητήρα και της σύντηξης (προσομοίωση)



Εικόνα 110: Εκτίμηση ταχύτητας στα επίπεδα επεξεργασίας του αισθητήρα και της σύντηξης (προσομοίωση)

Τα μέσα σφάλματα RMS παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα. Από αυτά συμπεραίνεται ότι σε γενικές γραμμές η σύντηξη βελτιώνει την επίδοση που θα έδιναν τα δύο συστήματα ιχνηλασίας μόνα τους. Οι τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων ήταν: για το LRR 0.8m στο x, 0.4m στο y, 1m/s στην ακτινική ταχύτητα, για το σύστημα εικόνας 1.5m στο x και 0.2m στο y. Οι «μετρούμενες» τιμές που παρουσιάζονται αλλά δεν μετρούνται ευθέως από τους αισθητήρες υπολογίζονται με χρήση μόνο των υπαρχουσών μετρήσεων (για παράδειγμα οι ταχύτητες σε x και y μπορούν να υπολογιστούν από την ακτινική ταχύτητα και τη γωνία ενός αντικειμένου).

Μέση τιμή	Απόσταση [m]	Γωνία [°]	Θέση-Χ [m]	Θέση -Υ [m]	Ταχύτητα [m/s]	Κατεύθυνση [°]	Ταχυτητα -Χ [m/s]	Ταχυτητα -Υ [m/s]
Meas-R	0.419	0.158	0.546	0.385	0.582	0.158	0.684	0.207
Meas-C	0.713	0.158	0.749	0.273	0.575	0.158	0.681	0.212
Est-R	0.248	0.064	0.427	0.301	0.302	0.064	0.439	0.358
Est-C	0.314	0.059	0.502	0.221	0.313	0.059	0.467	0.313
Fusion	0.228	0.057	0.432	0.218	0.264	0.057	0.424	0.296

Πίνακας 16: Μέσα σφάλματα RMS στα επίπεδα επεξεργασίας του αισθητήρα και της σύντηξης (προσομοίωση)

Β. Επίδοση της σύνδεσης δεδομένων του συστήματος σύντηξης δεδομένων

Υπάρχουν τρία αντικείμενα στις περιοχές παρακολούθησης των τριών αισθητήρων. Στην παράγραφο αυτή περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα της επίδοσης των αλγορίθμων όσον αφορά τη σύνδεση δεδομένων. Γνωρίζοντας την αναμενόμενη διάρκεια εμφάνισης των πραγματικών στόχων περιμένουμε από τον αλγόριθμο σύντηξης και τους επιμέρους αλγόριθμους ιχνηλασίας να αναγνωρίσουν τους αντίστοιχους στόχους για το ίδιο χρονικό διάστημα. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι τα ίχνη και κατ' επέκταση και τα συντηγμένα ίχνη δεν επιβεβαιώνονται αμέσως στην πρώτη τους παρατήρηση κάτι που έχει ληφθεί υπόψη κατά την εξέταση των αποτελεσμάτων. Ένας επιπρόσθετος έλεγχος για την αποφυγή απόδοσης διπλών ID και αντικειμένων έχει προβλεφθεί επίσης στο σύστημα (εκδοχή v2). Οι δύο εκδοχές v1 και v2 συγκρίθηκαν ως προς την επίδοση τους με 30 εκτελέσεις Monte Carlo όπου καταγράφηκαν οι διάρκειες και το πλήθος των ιχνών και των συντηγμένων αντικειμένων. Οι 3 σαρώσεις πριν την επιβεβαίωση ή της ύπαρξης πριν την οριστική διαγραφή ενός αντικειμένου παραλείπονται από την εξέταση. Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τις απώλειες των δεδομένων ιχνών, λανθασμένα αντικείμενα, επαναρχικοποιήσεις αντικειμένων (πρόβλημα της ιχνηλασίας κυρίως) και εμφάνιση διπλών αντικειμένων.

Τα ποσοστά στον πίνακα είναι για κάθε υπάρχον αντικείμενο. Συνολικά υπάρχουν 500 σαρώσεις με 962 συνολικά αναμενόμενα αντικείμενα από τη σύντηξη των δεδομένων του συστήματος. Οπότε η πιθανότητα επιτυχούς επίδοσης του αλγορίθμου σύντηξης κάτω από τις προϋποθέσεις του συγκεκριμένου σεναρίου ορίζονται ως εξής:

$$P_{succ} = 1 - P_{miss} - P_{false} - P_{dupl}$$

(5.13)

Με "Miss" σημειώνεται το ποσοστό-πιθανότητα αποτυχίας αναγνώρισης ενός υπάρχοντος αντικειμένου ως προς κάθε αντικείμενο, η αναγνώριση ενός μη υπάρχοντος αντικειμένου σημειώνεται με το ποσοστό "False" για κάθε δεδομένο αντικείμενο και ο διπλασιασμός (duplication) ID είναι η ανάθεση σε ένα αντικείμενο ενός ID που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί. Η τελευταία περίπτωση έχει σχεδόν εξαφανιστεί στην εκδοχή 2 του συστήματος (FUSv2).

Ορίζεται επίσης και ο δείκτης της διατήρησης ID ως: $P_{maint} = 1 - R.I./total$, αυτός αποτιμά την επαναρχικοποίηση ενός ίχνους χωρίς λόγο επί του συνολικού αριθμού των αντικειμένων, καθορίζεται ως η βέλτιστη περίπτωση των 0 επαναρχικοποιήσεων και η χειρότερη με 962 (μηδενική διατήρηση ID). 962 είναι ο αριθμός των πραγματικών αντικειμένων στο σενάριο. Εναλλακτικά θεωρώντας 3 συνολικά ID σε όλο το σενάριο τα αποτελέσματα είναι ότι υπήρξαν 2.33 επιπλέον λανθασμένα ID στην περίπτωση που δεν λαμβάνει χώρα καθόλου σύντηξη, ενώ αυτά είναι 1.67 και 1.37 για τις δύο εκδοχές του συστήματος σύντηξης αντίστοιχα.

Στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα των περιπτώσεων χωρίς καθόλου εφαρμογή σύντηξης δεδομένων (NO) με απλή απόδοση των 4 υποσυστημάτων, η μέθοδος σύντηξης που παρουσιάστηκε σημειώνεται με (v1) και ο ίδιος αλγόριθμος με επιπρόσθετο έλεγχο για τους διπλασιασμούς ID αντικειμένων με (v2).

Μέθοδος DA	Απώλειες αντικειμέν ων [%]	Ψευδή αντικείμενα [%]	Διπλά αντικείμενα [%]	Λάθος επαναρχικοπ οιήσεις [%]	P _{succ} [%]	P _{maint} [%]
NO	0.13	26.86	0	0.73	73.01	99.27
FUSv1	0.04	0.42	0.21	0.17	99.34	99.83
FUSv2	0.025	0.40	0	0.14	99.58	99.46

Το πρόβλημα των απωλειών, ψευδών συναγερμών και επαναρχικοποιήσεων προέρχεται κυρίως από την επίδοση της ιχνηλασίας στο επίπεδο των αισθητήρων, ο αλγόριθμος FUS διορθώνει ένα ποσοστό αυτών αλλά ένας σημαντικός αριθμός παραμένει. Όσον αφορά τα επιμέρους αντικείμενα φαίνεται ότι ο στόχος T3 σχεδόν πάντα παρουσιάζει προβλήματα, σε αντίθεση με τον T2 που έχει προβλήματα σε ελάχιστες περιπτώσεις. Ο T3 εμφανίζεται μόνο για 80 σαρώσεις στην περιοχή κάλυψης των αισθητήρων με σημαντική ταχύτητα, και παρουσιάζει δύσκολους ελιγμούς, με αποτέλεσμα η ιχνηλασία του να μην είναι η βέλτιστη δυνατή.

Γ. Χρονική καθυστέρηση αλγορίθμου σύντηξης

Συγκριτικός έλεγχος της καθυστέρησης που υπεισέρχεται στο σύστημα ιχνηλασίας παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3 και ο ίδιος έλεγχος πραγματοποιήθηκε για την ιχνηλασία ενός ζεύγους ιχνών. Το βήμα της σύντηξης δεδομένων υπολογίστηκε ότι είναι πιο απαιτητικό υπολογιστικά κατά 17.7% σε σύγκριση με το φιλτράρισμα ζεύγους παρατήρησης-ίχνους με το EKF.

Τελική εφαρμογή του συστήματος

Στην πράξη όταν άρχισε η εφαρμογή του σχεδιασθέντος συστήματος με τους πραγματικούς αισθητήρες διαπιστώθηκε ότι η επεξεργασία μόνης εικόνας αποδίδει παρατηρήσεις αντικειμένων με πολύ μεγαλύτερο σφάλμα θέσης σε σχέση με τα ραντάρ. Επίσης τα πλευρικά ραντάρ λόγω της πολύ κοντινής τους θέσης στα διερχόμενα οχήματα δίνουν πολλαπλές ανακλάσεις (εικόνα 109) οι οποίες μπορεί να είναι ευθείς ανακλάσεις, πολυδιαδρομικές ανακλάσεις, ανακλάσεις από την αντίθετη πλευρά του οχήματος (τροχοί, pillar) και επιστροφές από το περιβάλλον του οχήματος (clutter). Επίσης ως προς την επίδοση της ιχνηλασίας πρέπει να σημειωθεί ότι η ίδια ανίχνευση δεν παρατηρείται σταθερά για συνεχόμενες σαρώσεις καθώς το όχημα διασχίζει την πλευρική περιοχή του ιδίου οχήματος. Αυτό σημαίνει ότι ένα ίχνος συχνά ενημερώνεται από νέα μέτρηση που αντιστοιχεί σε διαφορετική θέση στο όχημα στόχο συγκρινόμενη με τη μέτρηση που το αρχικοποίησε ή ενημέρωσε στις προηγούμενες. Επίσης τόσο το δίκτυο των αισθητήρων SRR όσο και τα συστήματα επεξεργασίας εικόνας αποδίδουν μειωμένης αξιοπιστίας ταχύτητα. Αυτά οδήγησαν στην ανάγκη χρήσης των δεδομένων των δύο αυτών πηγών πληροφορίας για ενημέρωση και διατήρηση των δεδομένων ιχνηλασίας του LRR με έλεγχο μέσω πύλης των δεδομένων της επεξεργασίας εικόνας και του δικτύου SRR. Για το πρώτο χρησιμοποιούνται οι παρατηρήσεις της επεξεργασίας όπως είναι, ενώ για το δίκτυο SRR ακολουθείται μια διαδικασία ομαδοποίησης με βάση τις θέσεις των πολλαπλών στόχων ώστε να δοθεί μία γενική πληροφορία ένδειξης παρουσίας στόχου ή άλλου εμποδίου.



Εικόνα 111: Διάγραμμα τελικού αλγορίθμου σύντηξης δεδομένων



Εικόνα 112: Τυπικές επιστροφές του δικτύου αισθητήρων SRR

Η αρχιτεκτονική του τελικού συστήματος ιχνηλασίας φαίνεται στο μπλοκ διάγραμμα που ακολουθεί. Σε γενικές γραμμές το σχήμα αυτό αποδίδει ικανοποιητικά ως προς την διατήρηση των αντικειμένων που προσπερνούν με τη διατήρηση του ID στις περισσότερες περιπτώσεις. Επίσης αντικείμενα από τα SRR και SVIP που δεν συνδέθηκαν με κάποιο υπάρχον αντικείμενο σύντηξης απλά αποδίδονται στην έξοδο του συστήματος μιας και αυτή η πληροφορία απαιτείται από τις εφαρμογές του συστήματος LATERAL SAFE. Τα τελικά ίχνη της σύντηξης αποδίδονται με επιπρόσθετη πληροφορία για την πηγή-αισθητήρα από την οποία εντοπίστηκαν ή ενημερώθηκαν για όλη τη διάρκεια ύπαρξης τους και ένδειξη για τον τύπο του στόχου (π.χ. αυτοκίνητο).

5.2 Εφαφμογή δυναμικής κυκλικής επιτήφησης

Το πειραματικό επιβατικό όχημα FIAT-INSAFES παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.4, όπως παρουσιάστηκε και επαναλαμβάνεται σύντομα εδώ, το σύστημα από την άποψη της επεξεργασίας δεδομένων σκοπεύει στην εξαγωγή και διατήρηση των αντικειμένων σε μια περιοχή κυκλικά γύρω από το όχημα. Το όχημα έχει ενσωματωμένες μια σειρά από εφαρμογές οδικής ασφάλειας που παρουσιάστηκαν ήδη και αποτελεί μια επέκταση του συστήματος FIAT-LATERAL SAFE που παρουσιάστηκε παραπάνω. Το ακόλουθο διάγραμμα επαναλαμβάνει τους υπάρχοντες αισθητήρες του συστήματος που είναι μια σειρά από ραντάρ και κάμερες που προσφέρουν πραγματικά με εξαίρεση την μπροστά πλαϊνή περιοχή μια συνεχή κάλυψη της περιοχής γύρω από το ίδιο όχημα.



Εικόνα 113: Αισθητήρες και περιοχή κάλυψης για το σύστημα δυναμικής κυκλικής επιτήρησης

Τα υποσυστήματα του κύφιου αυτού συστήματος παφουσιάστηκαν στην εικόνα 25 οι διάφοφες τεχνικές εξαγωγής αντικειμένων παφουσιάστηκαν στις παφαγφάφους του κεφαλαίου 3. Συνοπτικά η λειτουφγία των υποσυστημάτων αυτών δίνεται στη συνέχεια.

Επεξεργασία δικτύου πλευρικών αισθητήρων SRR

Οι αισθητήρες M/A-COM / Tyco Electronics παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2. Οι μετρούμενες ποσότητες που αποδίδουν είναι: απόσταση, ταχύτητα και γωνία ανίχνευσης. Όπως έχει προαναφερθεί η επίδοση των συγκεκριμένων αισθητήρων ως προς την εξαγωγή αντικειμένων δεν είναι ικανοποιητική λόγω της συγκεκριμένης τοπολογίας. Αυτό συμβαίνει λόγω του γεγονότος ότι ο αριθμός των ψευδών συναγερμών αυξάνει ανεπίτρεπτα. Η λύση είναι η συγχώνευση πολλαπλών αντικειμένων σε ένα, όταν αυτά κατά κάποιον τρόπο «πλησιάζουν» το ίδιο όχημα ή κινούνται από κοινού προς κάποια κατεύθυνση.

Επεξεργασία δικτύου μπροστινών αισθητήρων MRR

Δύο φαντάφ μέσου πεδίου (από την SMS) είναι τοποθετημένα στην μπφοστινή πεφιοχή του οχήματος. Τα φαντάφ αυτά δίνουν πληφοφοφία θέσης και σχετικής ταχύτητας σε καφτεσιανές

189

συντεταγμένες με ειδική επεξεργασία που γίνεται εσωτερικά του αισθητήρα. Επιπλέον επεξεργασία δεν λαμβάνει χώρα.

Ιχνηλασία για τον μπροστά αισθητήρα LRR

Χρησιμοποιείται ένα Fujitsu Ten ραντάρ μακρινού πεδίου με πεδίο ανίχνευσης 4 με 120 μέτρα και γωνιακό πεδίο κάλυψης 16 μοιρών. Οι μετρούμενες ποσότητες και αυτού του αισθητήρα δίνονται σε πολικές συντεταγμένες και πραγματοποιείται ιχνηλασία των δεδομένων του με τη μέθοδο GNN EKF που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.

Ιχνηλασία για τον πίσω αισθητήρα LRR

Δύο αισθητήρες Bosch LRR2 έχουν τοποθετηθεί στην πίσω πλευρά του οχήματος FIAT-INSAFES και αποδίδουν μετρήσεις σαν δίκτυο, δηλαδή η κοινή υπολογιστική τους μονάδα στέλνει μια κοινή σειρά δεδομένων. Της ίδιας μορφής με τον ένα αισθητήρα LRR2 (του οχήματος FIAT- LATERAL SAFE) παρουσιάστηκε με λεπτομέρεια στο κεφάλαιο 3. Κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο λαμβάνει χώρα και η ιχνηλασία των αισθητήρων αυτών με αποτέλεσμα μια ακόμα σειρά ιχνών να στέλνεται προς το γενικό αλγόριθμο σύντηξης δεδομένων του συστήματος.

Σύστημα μηδενικού υπολογισμού θέσης

Το σύστημα μηδενικού υπολογισμού θέσης και η λειτουργία του εντός του γενικότερου συστήματος SASPENCE παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2. Όπως εξηγήθηκε το υποσύστημα αυτό φιλτράρει και αποδίδει εκτιμήσεις θέσης του οχήματος σε χρονικές στιγμές που ο αισθητήρας GPS δεν στέλνει μετρήσεις, και επιπροσθέτως στέλνει και περεταίρω εκτιμήσεις παραμέτρων δυναμικής του οχήματος όπως της διαμήκους και της εγκάρσιας επιτάχυνσης και του ρυθμού μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας του οχήματος μαζί με μέτρα της επίδοσης της γενικής εκτίμησης όλων των παραμέτρων του φίλτρου. Η εκτίμηση των παραμέτρων δυναμικής και θέσης του οχήματος στα συστήματα οδικής ασφάλειας έχει ένα σημαντικό ρόλο διότι η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται εκτενώς τόσο από τα υποσυστήματα σύντηξης δεδομένων (π.χ. ταχύτητα και γωνία κατεύθυνσης ιδίου οχήματος) και από τα συστήματα ψηφιακών χαρτών ανεξάρτητα ή σε συνεργασία με τις τα συστήματα υποστήριξης του οδηγού.

Σύντηξη ιχνών του συστήματος κυκλικής επιτήρησης

Οι χρονικές στιγμές απόδοσης μετρήσεων για τους αισθητήρες του συγκεκριμένου συστήματος είναι 40ms για τα SRR και περίπου 100ms για τους LRR. Όπως παρουσιάστηκε και στην προηγούμενη ενότητα πρώτο βήμα της σύντηξης των δεδομένων είναι ο συγχρονισμός και η μεταφορά σε κοινό σύστημα συντεταγμένων των ιχνών από την επεξεργασία των υποσυστημάτων που περιγράφηκαν στις παραπάνω παραγράφους. Σημειώνεται ότι ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος αυτού επιλέχθηκε σταθερός στα 30ms, κάτι που οδήγησε σε έναν ειδικό έλεγχο εντός των συστημάτων ιχνηλασίας και σύντηξης δεδομένων ως προς το πότε θα γίνει επεξεργασία ή όχι. Οι σειρές ιχνών που καταφθάνουν ως είσοδος στο σύστημα σύντηξης είναι οι εξής:

- ΤΑ1: ίχνη αριστερών SRR
- ΤΑ2: ἰχνη δεξιών SRR
- ΤΑ3: ἰχνη μπροστά MRR
- ΤΑ4: ἰχνη μπροστά LRR
- ΤΑ5: ἰχνη πίσω LRR
- ΤΑ6: ανιχνεύσεις καμερών τυφλών περιοχών αριστερά και δεξιά (Blind Spot)
- ΤΑ7: ανιχνεύσεις κάμερας μπροστά

Τα ίχνη των σειρών ΤΑ4 και ΤΑ5 εισάγονται σε μια πρώτη φάση σύντηξης και δίνουν μια λίστα για τα ίχνη της μπροστά περιοχής μαζί με τις ανιχνεύσεις ΤΑ7 που αξιολογηθήκαν ως σημαντικές. Οι σειρές ιχνών ΤΑ1, ΤΑ2, ΤΑ5 και ΤΑ6 επεξεργάστηκαν με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα του συστήματος FIAT-LATERAL SAFE δίνοντας μια συνεχή κάλυψη και απόδοση αντικειμένων στην περιοχή 270 μοιρών αριστερά, δεξιά και πίσω του ιδίου οχήματος. Έγινε κατάλληλη τροποποίηση για την κάλυψη όλης της περιοχής γύρω από το όχημα και διατήρηση των ιχνών όταν αυτές περνούν μπροστά και πλάι. Η επιτυχία σε αυτό τον τομέα δεν είναι πάντα εξασφαλισμένη μιας και το κενό μεταξύ των μπροστινών και των υπολοίπων αισθητήρων είναι αρκετά μεγάλο (η μπροστά κάμερα δεν δίνει αξιόπιστες μετρήσεις σε όλη την περιοχή κάλυψης).



Εικόνα 114: Περιβάλλον ελέγχου της επίδοσης των αλγορίθμων σύντηξης στο σύστημα FIAT-INSAFES

5.3 Εφαρμογή πολυδιάστατης ανάθεσης

Το σύστημα πολυδιάστατης ανάθεσης VOLVO-ProFusion2 παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.3 και περιλαμβάνει την ακόλουθη σειρά από αισθητήρες με τα πεδία κάλυψης στην περιοχή μπροστά από το φορτηγό, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Οι αισθητήρες του συστήματος είναι: ένας αισθητήρας LRR, ένα δίκτυο δύο αισθητήρων SRR, ένας σαρωτής λέιζερ και μία κάμερα για ανίχνευση λωρίδας με επεξεργασία εικόνας. Η τριάδα των αισθητήρων ανίχνευσης αντικειμένων επεξεργάζεται κατάλληλα ξεχωριστά με τις τρεις σειρές ιχνών να εισάγονται στο τελικό σύστημα σύντηξης. Τα υποσυστήματα του γενικού συστήματος πολυδιάστατης ανάθεσης απεικονίζονται στην εικόνα 22 του κεφαλαίου 2.



Εικόνα 115: Αισθητήρες και περιοχή κάλυψης για το σύστημα πολυδιάστατης ανάθεσης

Η εναλλακτική αρχιτεκτονική του συστήματος VOLVO-INSAFES αντιμετωπίζεται με παρόμοιο τρόπο με αυτό του οχήματος FIAT-INSAFES που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Επανερχόμενοι στο σύστημα VOLVO-ProFusion2 τα υποσυστήματα της εικόνας 22 που ενδιαφέρουν για την ανίχνευση αντικειμένων είναι: οι επεξεργασία δεδομένων των δύο αισθητήρων SRR, η ιχνηλασία των δεδομένων του LRR, η επεξεργασία των δεδομένων του σαρωτή λέιζερ και το υποσύστημα της σύντηξης δεδομένων των τριών αυτών σειρών ιχνών. Η περιγραφή των υποσυστημάτων αυτών ακολουθεί στη συνέχεια.

Επεξεργασία δικτύου μπροστά αισθητήρων SRR

Τόσο στο όχημα VOLVO-INSAFES όσο και στο όχημα VOLVO-ProFusion2 χρησιμοποιείται ένα δίκτυο αισθητήρων ραντάρ κοντινού πεδίου τα οποία ελέγχουν την περιοχή μπροστά από το ίδιο όχημα. Η διαδικασία συγχώνευσης των μετρήσεων των δύο συγκεκριμένων αισθητήρων παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.4 με την διαδικασία ιχνηλασίας να εφαρμόζεται στην συνέχεια επί των μετρήσεων αυτών ώστε να προκύψουν τα τελικά ίχνη του δικτύου. Το σύστημα ιχνηλασίας που εφαρμόζεται είναι αυτό που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 (για πολικές συντεταγμένες στο διάνυσμα των μετρήσεων).

Ιχνηλασία για τον μπροστά αισθητήρα LRR

Χρησιμοποιείται ένα Autocruise ACC ραντάρ μακρινού πεδίου με τις μετρούμενες ποσότητες αυτού του αισθητήρα δίνονται σε πολικές συντεταγμένες και πραγματοποιείται ιχνηλασία των δεδομένων του με τη μέθοδο GNN EKF που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.

Επεξεργασία δεδομένων του σαρωτή λέιζερ

Ο σαρωτής λέιζερ που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.3 είναι τοποθετημένος στο μπροστινό και δεξί μέρος του φορτηγού και καλύπτει σχεδόν όλη την περιοχή μπροστά από το όχημα με εύρος 270 μοίρες αποδίδοντας πολυγωνικά ευθύγραμμα τμήματα. Από την επεξεργασία αυτών των δεδομένων προκύπτει πληροφορία για τη γεωμετρία των ορίων του δρόμου καθώς και για τα οχήματα που ανιχνεύονται όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.7.

Σύντηξη ιχνών του συστήματος κυκλικής επιτήρησης

Όπως προαναφέρθηκε τρεις σειρές ιχνών εισάγονται στο συγκεκριμένο σύστημα σύντηξης, αυτές είναι:

- ΤΑ1: ἰχνη δικτύου SRR
- ΤΑ2: ίχνη αισθητήρα LRR
- ΤΑ3: ἰχνη σαρωτή λέιζερ

Οι χρονικοί κύκλοι απόδοσης των μετρήσεων είναι 40ms για τα SRR και τα δεδομένα του λέιζερ και 100ms για το LRR. Η σύντηξη των ιχνών λαμβάνει χώρα κάθε περίπου 40ms με την χρονική καθυστέρηση της επεξεργασίας να είναι σημαντικά μικρότερη των 40ms. Όπως σε κάθε περίπτωση συγχρονισμός και τοπική ευθυγράμμιση των ιχνών είναι το πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση της σύντηξης των δεδομένων (αναφορά στην εικόνα 7). Ακολούθως σύμφωνα με το σχήμα σύντηξης της εικόνας 9 πρώτα πραγματοποιείται σύντηξη των σειρών ιχνών ΤΑ1 και ΤΑ2 (με τα ίχνη του LRR να έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία) και στη συνέχεια τα συντηγμένα ίχνη των ΤΑ1 και ΤΑ2 υποβάλλονται σε σύντηξη με τα ίχνη του λέιζερ ΤΑ3 με τα τελευταία να έχουνε εξ' ορισμού υψηλότερη ακρίβεια.

Ο παραπάνω αλγόριθμος δοχιμάστηκε και υλοποιήθηκε αρχικά σε Matlab με offline επεξεργασία των δεδομένων και ακολούθως υλοποιήθηκε όπως και το σύνολο των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν σε αυτήν την εργασία σε C++. Εικόνες από τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά την υλοποίηση και έλεγχο των αλγορίθμων φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 116: Περιβάλλον ανάπτυξης αλγορίθμων σύντηξης δεδομένων σε Matlab



Εικόνα 117: Περιβάλλον εκτέλεσης των αλγορίθμων με δυνατότητα λειτουργίας online και offline

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα τρία βασικά συστήματα σύντηξης δεδομένων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Τα συστήματα αυτά αρχίζουν με το σύστημα FIAT-LATERAL SAFE που περιλαμβάνει αισθητήρες που καλύπτουν την περιοχή αριστερά και δεξιά και πίσω από το ίδιο όχημα. Παρουσιάστηκε μια προσομοίωση του συστήματος και αναλυτική περιγραφή του συστήματος που εφαρμόστηκε στην πραγματική εφαρμογή του συστήματος. Το σύστημα αυτό σύντηξης δεδομένων όπως και τα υπόλοιπα που παρουσιάζονται περιλαμβάνουν τα συστήματα σύντηξης επιπέδου αισθητήρα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, καθώς και τα συστήματα σύνδεσης δεδομένων του κεφαλαίου 4. Επέκταση του συστήματος αυτού είναι το σύστημα κυκλικής επιτήρησης FIAT-INSAFES που περιλαμβάνει αισθητήρες κυκλικά γύρω από το ίδιο όχημα. Επιτυγχάνεται και στα δύο παραπάνω συστήματα διατήρηση των αντικειμένων καθώς αυτά διασχίζουν τις περιοχές κάλυψης των διαφορετικών αισθητήρων και τα αντικείμενα σύντηξης με επιτυχία χρησιμοποιήθηκαν από τις εφαρμογές οδικής ασφάλειας των δύο πειραματικών οχημάτων της FIAT και της VOLVO. Το σύστημα VOLVO-ProFusion2 στοχεύει κυρίως στην ανακατασκευή του οδικού περιβάλλοντος μπροστά από το ίδιο όχημα με την χρήση τεσσάρων αισθητήρων. Η ύπαρξη του σαρωτή λέιζερ, με την υψηλού επιπέδου πληροφορία που αποδίδει, επιτρέπει την εξαγωγή του ακριβούς περιγράμματος των αντικειμένων του οδικού περιβάλλοντος, οχημάτων και ορίων του δρόμου. Στο πειραματικό όχημα VOLVO-ProFusion2 επιτεύχθει η πολυδιάστατη σύνδεση δεδομένων από τρεις σειρές ιχνών και η απόδοση ενός γενικού συντηγμένου αντικειμένου με ικανοποιητική πληροφορία που αξιοποιήθηκε με τη σειρά της από τις εφαρμογές του συστήματος. Η τεχνική περιγραφή των βιβλιοθηκών λογισμικού που υλοποιήθηκαν περιγράφεται επίσης σε αυτό το κεφάλαιο.

Αναφορές

- A. Polychronopoulos, A. Amditis, U. Scheunert, T. Tatschke, Revisiting JDL model for automotive safety applications: the PF2 functional model, Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion (FUSION 2006), Florence, Italy, 10 - 14/07/2006, paper 259.
- [2] A. Polychronopoulos, N. Floudas, A. Amditis, D. Bank, B. van der Broek, "Data Fusion in multi sensor platforms for wide area perception", IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2006, Tokyo, Japan, 13-15/06/06, pp. 412-417.
- [3] B. Ristic, S. Arulampalam, N. Gordon, Beyond the Kalman Filter: Particle filters for tracking applications, Artech House, Boston, 2004.
- [4] Y. Bar-Shalom, X. Rong Li, T. Kirubarajan, Estimation with Applications to Tracking and Navigation, Theory Algorithms and Software, John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.
- [5] S. Blackman and R. Popoli, Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Artech House, Boston, 1999.
- [6] D. Bertsekas, Auction Algorithms for Network Flow Problems: A Tutorial Introduction, Journal of Computational Optimization and its Applications, May 1992.
- [7] Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances, Volume III, Chapter 2: Survey of Assignment Techniques for Multitarget Tracking, K. R. Pattipati, R. L. Popp, T. Kirubarajan - Y. Bar-Shalom, W. D. Blair Editors, Artech House, Boston-London, 2000.
- [8] N. Floudas, A. Polychronopoulos, A. Amditis, A survey of filtering techniques for vehicle tracking by radar equipped automotive platforms, 8th international conference of Information Fusion, Philadelphia, USA, 25-29 July 2005.
- [9] R.A. Singer and A.J. Kanyuck, Computer Control of Multiple Site Track Correlation, Automatica, 7:455 -462, 1971.
- [10] Y. Bar-Shalom, On the Track-to-Track Correlation Problem, On IEEE Transactions on Automatic Control, TAC 26(2):571-572, Apr 1981.
- [11] Handbook of Multisensor Data Fusion, 2001, edited by D. Hall and J. Llinas, Chapter 12, S. Julier and J. Uhlmann, General Decentralized Data Fusion with Covariance Intersection (CI).
- [12] J. Uhlmann, Covariance Consistency Methods for Fault-Tolerant Distributed Data Fusion, Information Fusion 4, p. 201-215, 2003.
- [13] D. Lerro, Y. Bar-Shalom, Tracking with debiased consistent converted measurements versus EKF, IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems 29 (3) (July 1993) 1015-1022.

6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται τα συνολικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των εφαρμογών και συστημάτων που αναπτύχθηκαν και εξετάστηκαν στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής διατριβής. Επίσης παρουσιάζονται αναλυτικά τα μελλοντικά στάδια ερευνάς που κατά την εκτίμηση μας μπορούν να συνεισφέρουν στην βελτίωση και επέκταση των λύσεων που προτάθηκαν στο παρών έργο.

6.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο κύριος στόχος και οι καινοτομίες που προτείνονται σε αυτήν την διδακτορική διατριβή. Αρχικά παρουσιάστηκαν οι ορισμοί των βασικών εννοιών που υπεισέρχονται στα προβλήματα που μελετώνται μαζί με την κύρια μαθηματική τυποποίηση τους. Στη συνέχεια δόθηκε μια λεπτομερής περιγραφή του στόχου της δημιουργίας τέτοιων συστημάτων σαν αυτά που περιγράφονται μαζί με μια πλήρη περιγραφή της ιστορικής διαδρομής και των τρεχουσών εξελίξεων στους τομείς αυτούς για τις εφαρμογές οδικής ασφάλειας. Έπειτα παρουσιάστηκε η κατάσταση στους θεμελιώδεις τομείς της επιστήμης που αφορούν τέτοιου είδους συστήματα, δηλαδή της εκτίμησης κατάστασης, της σύνδεσης δεδομένων και της σύντηξης δεδομένων. Η σημαντικότερη ενότητα του κεφαλαίου αφορούσε στην περιγραφή των καινοτομιών που προτείνονται στο παρόν έργο και είναι: (α) η διαχείριση πολλαπλών πηγών ετερογενούς πληροφορίας σε κινούμενη πλατφόρμα με έναν γενικό αλγόριθμο, (β) η επίλυση προβλημάτων σύνδεσης δεδομένων για πολυσημειακά αντικείμενα και η διερεύνηση λύσεων με τεχνικές πολυδιάστατης ανάθεσης, (γ) η κυκλική γύρω από το όχημα-πλατφόρμα δυναμική παρακολούθηση άλλων κινούμενων οχημάτων και (δ) η ανάπτυξη αλγορίθμων ιχνηλασίας για ειδικές μη συνηθισμένες τοπολογίες. Η παρουσίαση των εξελίξεων στην επεξεργασία για εξαγωγή αντικειμένων στις εφαρμογές οδικής ασφάλειας αποδεικνύει την προηγούμενη έλλειψη ολοκληρωμένων λύσεων στους παραπάνω τέσσερις τομείς και ειδικότερα στην προοπτική της χρήσης ενός γενικευμένου αλγορίθμου σύντηξης δεδομένων κατάλληλου για το σύνολο των σύνθετων εφαρμογών οδικής ασφάλειας. Όσον αφορά την επίτευξη των παραπάνω στόχων σημειώνεται ότι: (α) Εξετάστηκαν και αναλύθηκαν διάφορα συστήματα ετερογενών αισθητήρων (κάμερες, διαφόρων τύπων ραντάρ και λέιζερ) που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 3.6, 5.1 και 5.2 στα οποία εφαρμόστηκε μία συγκεκριμένη τεχνική σύντηξης δεδομένων της οποίας η κεντρική ιδέα παρουσιάζεται στην ενότητα 2.2. (β) Το θέμα της διαχείρισης πολυσημειακών αντικειμένων (από ραντάρ κοντινού πεδίου και σαρωτή λέιζερ) και οι τρόποι αντιμετώπισης του παρουσιάστηκαν στις ενότητες 3.4 και 3.7 με την εξαγωγή με κατάλληλη προεπεξεργασία ενδιάμεσων αντικειμένων, όσον αφορά τη σύνδεση δεδομένων τέτοιου τύπου εξετάστηκε η περίπτωση της πολυδιάστατης ανάθεσης (ενότητες 4.2 και 4.3) με την τελική εφαρμογή να αναπτύσσεται στην 5.3. (γ) Η δυναμική παρακολούθηση οχημάτων γύρω από το όχημα πλατφόρμα εξετάστηκε σε δύο συγκεκριμένες εφαρμογές που παρουσιάζονται στις ενότητες 5.1 και 5.2. (δ) Ο αλγόριθμος ιχνηλασίας που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3 εφαρμόστηκε σε δεδομένα αισθητήρων ραντάρ και λέιζερ, για διαφορετικού τύπου δεδομένα εισόδου και για τοπολογίες σε διάφορα σημεία πάνω στο ίδιο όχημα (ενότητες 3.3, 3.4 και 3.7).

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφηκαν τα βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του συστήματος σύντηξης δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων που πραγματοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία. Αρχικά περιγράφηκε η θέση των συστημάτων σύντηξης δεδομένων ή εξαγωγής αντικειμένων οδικού περιβάλλοντος σε ένα γενικευμένο σύστημα οδικής ασφάλειας καθώς και των διαφόρων υποσυστημάτων από τα οποία αυτό αποτελείται. Η αρχιτεκτονική που προτείνεται είναι ένα υψηλού επιπέδου σύστημα σύντηξης ιχνών που χρησιμοποιεί ίχνη από συστήματα ιχνηλασίας δεδομένων ενός μόνο ή και δικτύων αισθητήρων. Εκτός της απευθείας σύντηξης των ιχνών, χρησιμοποιείται ευρέως και η αρχιτεκτονική της ακολουθιακής και ανά ζεύγη σύνδεση ίχνους προς ίχνος αρχίζοντας από τον πιο αξιόπιστο αισθητήρα και αναλόγως της περιοχής κάλυψης τους. Σε δεύτερη φάση περιγράφονται τα συστήματα-οχήματα στα οποίο σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε το γενικότερο σύστημα που προτείνεται. Τα συστήματα αυτά είναι τα ακόλουθα: σύστημα φορτηγού οχήματος με δύο διακριτές αρχιτεκτονικές που αναφέρονται ως Volvo-INSAFES και Volvo-ProFusion, το σύστημα επιβατικού οχήματος με τις αρχιτεκτονικές Fiat-INSAFES και Fiat-LATERAL SAFE που είναι και τα κύρια οχήματα δοκιμών της επίδοσης του αλγορίθμου και τέλος τα συστήματα οχήματος EUCLIDE, εναλλακτική αρχιτεκτονική LATERAL SAFE και το σύστημα μηδενικού υπολογισμού γεωδαιτικής θέσης. Επίσης περιγράφηκαν συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στα παραπάνω συστήματα.

Τα κύρια συστήματα ιχνηλασίας που υπεισέρχονται στα συστήματα σύντηξης δεδομένων που αναπτύσσονται σε αυτήν την εργασία περιγράφονται στο τρίτο κεφάλαιο. Αρχικά γίνεται μια συνοπτική θεωρητική περιγραφή των φίλτρων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ιχνηλασίας που περιγράφονται. Το πρώτο σύστημα που παρουσιάζεται είναι ένα σύστημα απόδοσης με μηδενικό υπολογισμό γεωδαιτικής θέσης με χρήση μετρήσεων υπολογιστή θέσης με δέκτη GPS και μετρήσεις γωνιακής και γραμμικής ταχύτητας από τους αδρανειακούς αισθητήρες. Το σύστημα που αναπτύχθηκε δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες και αποδείχθηκε ότι αποδίδει ικανοποιητικά παρέχοντας πληροφορίες θέσης σε κύκλο μικρότερο από τον κύκλο δεδομένων του GPS, δίνοντας δεδομένα όταν το GPS αποτυγχάνει εντελώς και επεκτείνοντας τις πληροφορίες που αυτό δίνει σε μια σειρά επιπλέον υπολογισμών παραμέτρων δυναμικής του οχήματος. Ένας πλήρης έλεγχος του συστήματος ιχνηλασίας ενός ραντάρ μακρινού πεδίου περιλαμβάνεται επίσης στο ίδιο κεφάλαιο. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια μελέτη προσομοίωσης όπου με βάση ένα δεδομένο σενάριο έγινε έλεγχος της επίδοσης μιας σειράς από φίλτρα Kalman γραμμικά ή όχι συμπεριλαμβανομένων και φίλτρων πολλαπλών μοντέλων καθώς και PF. Το γενικό συμπέρασμα αυτής της μελέτης ήταν ότι τα φίλτρα Kalman αποδίδουν άριστα στα προβλήματα που μελετούμε κυρίως διότι το εύρος μη γραμμικότητας σε αυτά δεν είναι τόσο μεγάλο. Οι λύσεις των PF πέραν της μεγάλης καθυστέρησης που προκαλούν δεν κατορθώνουν να ξεπεράσουν την επίδοση των διαφόρων τύπων φίλτρων Kalman. Τα παραπάνω συμπεράσματα εφαρμόστηκαν στην σχεδίαση συστημάτων ιχνηλασίας για δυο διαφορετικά ραντάρ μακρινού πεδίου. Περιγράφηκε πλήρως η διαδικασία σχεδίασης και ρύθμισης των συστημάτων ιχνηλασίας, με παρουσίαση αποτελεσμάτων της καθυστέρησης και της συνάφειας τους, καθώς και λύσεις στα προβλήματα της εξαγωγής των στόχων φαντασμάτων και της απόκουψης στόχων από στόχους που προπορεύονται. Επίσης παρουσιάστηκαν και τα αποτελέσματα της χρήσης των μη κινούμενων επιστροφών ενός συστήματος ραντάρ για την εξαγωγή της πληροφορίας ορίων του δρόμου. Ένα πλήρες σύστημα αναλύθηκε και εφαρμόστηκε με τα δεδομένα ενός ραντάρ υψηλής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα απέδειξαν την αφίστη επίδοση του αλγοφίθμου που αναπτύχθηκε για το εν λόγω πφόβλημα. Όσον αφορά τα συστήματα επεξεργασίας εικόνας που υπεισέρχονται στα συστήματα που μελετηθήκαν δεν προτείνεται κάποια επιπλέον μέθοδος ανάλυσης, και τα μετασχηματισμένα δεδομένα τους στο επίπεδο του δρόμου χρησιμοποιούνται ως έχουν. Ένα σύστημα κεντρικού επιπέδου που προτείνεται χρησιμοποιεί τις παρατηρήσεις απόστασης ενός ραντάρ και τις παρατηρήσεις εγκάρσιας θέσης μιας κάμερας υπερύθρων σε μια αρχιτεκτονική ασύζευκτου φίλτρου που αποδίδει αρκετά καλά σε εφαρμογές προσομοίωσης και πραγματικών δεδομένων. Βέβαια το θέμα της χρήσης τέτοιου είδους αρχιτεκτονικών είναι αρκετά πολύπλοκο λόγω της δύσκολης σύνδεσης δεδομένων για τους δύο αυτούς αισθητήρες. Επίσης περιγράφεται η προεπεξεργασία ενός δικτύου αισθητήρων ραντάρ κοντινού πεδίου με την εξαγωγή των συγχωνευμένων μετρήσεων τους, οι οποίες υποβάλλονται στην συνέχεια σε ιχνηλασία και εισάγονται στο σύστημα σύντηξης. Τέλος περιγράφεται η διαδικασία ομαδοποίησης και ιχνηλασίας ακατέργαστων δεδομένων ενός σαρωτή

λέιζεο σε πίσω περιοχή επιτήρησης οχήματος. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου αυτού δεν ήταν ικανοποιητικά και αποφασίστηκε η χρήση υψηλού επιπέδου δεδομένων σαρωτή λέιζεο (πολυγώνων) για την χρήση τους στα συστήματα που εξετάζονται. Η χρήση των πολυγωνικών μετρήσεων σε διαφορετική αρχιτεκτονική απέδωσε σημαντικά αποτελέσματα με εξαγωγή της πλήρους γεωμετρίας των κινούμενων οχημάτων στις περιοχές κάλυψης του αισθητήρα καθώς επίσης και πληροφορίας της γεωμετρίας των ορίων του δρόμου. Τα επεξεργασμένα δεδομένα του σαρωτή λέιζερ εισέρχονται, βελτιώνοντας σημαντικά την επίδοση, στο σύστημα σύντηξης που παρουσιάζεται στην ενότητα 5.3.

Το Κεφάλαιο 4 αφορά στην μελέτη των προβλημάτων σύνδεσης δεδομένων που υπεισέρχονται στα υπό μελέτη συστήματα, με θεωρητική παρουσίαση των χαρακτηριστικότερων μεθόδων επίλυσης της δυσδιάστατης και πολυδιάστατης ανάθεσης καθώς και την περιγραφή χαρακτηριστικών μεθόδων σύνδεσης δεδομένων σε συστήματα ιχνηλασίας. Αρχικά αναλύθηκαν οι βασικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της δυσδιάστατης ανάθεσης με συγκριτική μελέτη της επίδοσης του αλγορίθμου JVC και του αλγόριθμου του πλειστηριασμού. Οι δύο αλγόριθμοι συγκρίθηκαν ως προς τον χρόνο εκτέλεσης τους για τυχαίες δυσδιάστατες μήτρες με τυχαία πυκνότητα μη μηδενικών στοιχειών. Όπως διαπιστώθηκε ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού αποδίδει καλύτερα σε αραιά δυσδιάστατα προβλήματα ανάθεσης, ενώ ο JVC σε πυκνά. Ειδικότερα ο αλγόριθμος του πλειστηριασμού είναι ιδιαίτερα αποδοτικός έναντι του JVC για προβλήματα ιδιαίτερα μεγάλης αραιότητας, και συγκεκριμένα για ποσοστό μη μηδενικών στοιχείων μικρότερο του 30%. Αντίθετα, για ποσοστό μη μηδενικών στοιχείων μεγαλύτερο του 60% είναι φανερή η υπεροχή του JVC. Καθώς αυξάνει το ποσοστό μη μηδενικών στοιχείων αυξάνει και ο «ανταγωνισμός» των ιχνών για συγκεκριμένες παρατηρήσεις. Έτσι στην περίπτωση του αλγορίθμου του πλειστηριασμού δημιουργείται μια εσωτερική «διαμάχη» τιμών με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος εκτέλεσης. Η συμπληρωματική αυτή ιδιότητα των δύο αλγορίθμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα συστήματα ιχνηλασίας. Συγκεκριμένα θα πρέπει στο σύστημα ιχνηλασίας να υπάρχει ένα κριτήριο αραιότητας, σύμφωνα με το οποίο θα εξετάζεται αν η μήτρα του δυσδιάστατου προβλήματος που ζητείται να επιλυθεί είναι αραιή ή πυκνή, και στη συνέχεια θα εφαρμόζεται ο αντίστοιχος αλγόριθμος. Αυτό οδηγεί σε πιο αποτελεσματικές λύσεις του προβλήματος σύνδεσης δεδομένων κυρίως σε δυναμικά περιβάλλοντα.

Στα πλαίσια της προσομοίωσης της επίδοσης του γενικότερου συστήματος σύντηξης δεδομένων ως προς το θέμα της πολυδιάστατης σύνδεσης δεδομένων. Αναπτύχθηκε προσομοίωση συστήματος ιχνηλασίας τριών αισθητήρων με ιχνηλασία επιπέδου αισθητήρα Η μέθοδος σύνδεσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε ήταν η 3-D τεχνική χαλάρωσης του Lagrange. Η σύζευξη των ιχνών έγινε με τον αλγόριθμο τομής συνδιακυμάνσεων (Covariance Intersection, CI) για την περίπτωση τριών ιχνών. Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα ο αλγόριθμος σύνδεσης δεδομένων και ο αλγόριθμος σύντηξης ιχνών λειτουργούν καλά. Σε κάποια σενάρια κίνησης παρατηρήθηκαν απώλειες ανίχνευσης των πραγματικών στόχων και ψευδείς συναγερμοί, σε μικρό βέβαια ποσοστό κάτι που δεν επηρεάζει σημαντικά την επίδοση του γενικότερου συστήματος σύντηξης δεδομένων.

Το Κεφάλαιο 5 αποτελεί το κεφάλαιο παρουσίασης των κύριων συστημάτων σύντηξης δεδομένων που αναπτύχθηκαν. Αρχικά παρουσιάζεται το σύστημα παρακολούθησης πλευρικών και πίσω περιοχής που αναπτύχθηκε. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί το σύστημα ιχνηλασίας ραντάρ μακρινού πεδίου που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 και συστήματα επεξεργασίας εικόνας και επεξεργασίας δικτύου πλευρικών ραντάρ κοντινού πεδίου. Σε πρώτο στάδιο αναπτύχθηκε μελέτη προσομοίωσης όπου ελέγχθηκε η σχεδίαση του συστήματος όσον αφορά στην επίδοση φιλτραρίσματος και σύνδεσης δεδομένων με έλεγχο των ψευδών συναγερμών και των απωλειών, με θετικά αποτελέσματα. Σε δεύτερη φάση και με την εξέταση της επίδοσης των συστήματος σύντηξης με κατάλληλη επεξεργασία τους ώστε η αξιοπιστία τους να συμβαδίζει με αυτή των δεδομένων του ραντάρ. Η αρχιτεκτονική μετατράπηκε σε ακολουθιακή ένα προς ένα σύνδεση των δεδομένων του πιο αξιόπιστου αισθητήρα LRR με τα υπόλοιπα δεδομένω, και την καλή λειτουργία των εφαρμογών οδικής ασφάλειας του συστήματος. Στην ενότητα 5.2 αναπτύσσεται η επέκταση του προηγούμενου συστήματος με σχεδόν ολοκληρωτική κάλυψη κυκλικά του ιδίου οχήματος. Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε για το σύστημα της 5.1 επεκτάθηκε για το συγκεκριμένο σύστημα με αντίστοιχες επιδόσεις. Η εφαρμογή της πολυδιάστατης ανάθεσης με χρήση τεσσάρων αισθητήρων μπροστά από το ίδιο όχημα αναπτύσσεται στην ενότητα 5.3. Το σύστημα σύντηξης ιχνών που εφαρμόζεται χρησιμοποιεί τα υποσυστήματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα τα συστήματα αυτά είναι της προεπεξεργασίας και ιχνηλασίας του δικτύου των αισθητήρων ραντάρ κοντινού πεδίου, το υποσύστημα ιχνηλασίας του ραντάρ μακρινού πεδίου και το υποσύστημα των δεδομένων του σαρωτή λέιζερ. Οι σειρές ιχνών των παραπάνω υποσυστημάτων εισέρχονται σε ένα ακολουθιακό σύστημα σύντηξη ιχνών με εξαιρετικά αποτελέσματα ως προς τον εντοπισμό, την ιχνηλασία και την εξαγωγή των χαρακτηριστικών των οχημάτων εντός του πεδίου κάλυψης των αισθητήρων.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ανεξαρτήτως της εξέλιξης των προχωρημένων συστημάτων υποστήριξης οδήγησης – δηλαδή προς τα συνεργατικά συστήματα με δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ αυτοκινήτων ή μεταξύ αυτοκινήτου και υποδομών και προς τις αυτοματοποιημένες λειτουργίες της νέας γενιάς των συστημάτων υποστήριξης – φαίνεται ότι η έρευνα πάνω στα συστήματα σύντηξης των δεδομένων των αισθητήρων οδικών εφαρμογών θα εξακολουθήσει να αναπτύσσεται και να προτείνει νέες λύσεις για την αναγνώριση των αντικειμένων του οδικού περιβάλλοντος. Όσον αφορά τις μεθόδους σύντηξης δεδομένων αν και οι διαφορετικής αρχιτεκτονικής προσεγγίσεις, υψηλού και χαμηλού επιπέδου, συνεχίζουν να αναπτύσσονται παράλληλα και ανταγωνιστικά, εκτίμηση μας είναι ότι η πολυπλοκότητα και η μειωμένη ευελιξία των τεχνικών χαμηλού επιπέδου θα καταστήσει τις υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονικές σύντηξης δεδομένων κύρια μέθοδο επίλυσης των προβλημάτων που εξετάζουμε. Δεν πρέπει όμως να παραληφθεί, ότι οι προχωρημένες τεχνικές επεξεργασίας πολλαπλών εικόνων είναι ένας εξαιρετικά υποσχόμενος τομέας έρευνας προς την ακόμα και τρισδιάστατη αναπαράσταση του οδικού περιβάλλοντος ενός οχήματος.

Όσον αφορά τα συγκεκριμένα συστήματα που αναπτύχθηκαν στην διατριβή και τις δυνατότητες επέκτασης τους διακρίνουμε τους ακόλουθους τομείς μελλοντικής έρευνας με αναφορά στα κύρια συμπεράσματα της εργασίας αυτής:

- Από την εξέταση των διαφόρων μεθόδων ιχνηλασίας δεδομένων και φιλτραρίσματος συμπερασματικά μπορεί να εξαχθεί ότι τα περιθώρια βελτίωσης των αποτελεσμάτων είναι περιορισμένα. Η χρήση πολυπλοκότερων μεθόδων ιχνηλασίας όπως αυτές των PF δεν προσφέρουν σημαντικά στην επίλυση των υπό εξέταση προβλημάτων σε σύγκριση με τις μεθόδους των φίλτρων Kalman. Σε κάθε περίπτωση όμως ο έλεγχος της επίδοσης των φίλτρων εκτίμησης κατάστασης είναι δύσκολος ειδικά σε πραγματικές συνθήκες. Συνεπώς, άποψη μας είναι ότι η μελλοντική έρευνα στον τομέα της επεξεργασίας δεδομένων αισθητήρων οδικών εφαρμογών πρέπει να στραφεί κυρίως προς την εξαγωγή χαρακτηριστικών (ακριβές περίγραμμα αντικειμένων). Τέτοιου είδους προσέγγιση ακολουθήθηκε στην περίπτωση της εξαγωγής αντικειμένων του σαρωτή λέιζερ και του δικτύου των αισθητήρων SRR, αλλά η προοπτική βελτίωσης των συστημάτων αυτών και οι δυνατότητες αξιοποίησης τέτοιου είδους δεδομένων είναι πολύ σημαντικές.
- Όσον αφορά των τομέα της σύνδεσης των εκτιμήσεων πολλαπλών αισθητήρων μέσω γεωμετρικών χαρακτηριστικών και την επίλυση των προβλημάτων ανάθεσης πραγματοποιήθηκε αναλυτική μελέτη των κύριων μεθόδων αντιμετώπισης τους. Σημειώνεται ότι η επίδοση αυτών των αλγορίθμων εξαρτάται από την ποιότητα και το εύρος της πληροφορίας που έχουν τα ίχνη εισόδου. Η γεωμετρική συσχέτιση των ιχνών όταν κάποιες από τις εκτιμήσεις αυτές είναι ανακριβείς μπορεί να αποβεί αρνητική ως προς την επίδοση του γενικότερου συστήματος. Για το λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη αξιοπιστία στα ίχνη ή σε αντίθετη περίπτωση εκ των προτέρων

γνωστής μειωμένης αξιοπιστίας πρέπει να εισαχθεί η πληροφορία αυτή στο επόμενο στάδιο. Πέρα από την εξέλιξη και τυποποίηση των τεχνικών γεωμετρικής συσχέτισης των ετερογενών δεδομένων, εξαιρετικό ενδιαφέρον θα είχε η έρευνα πάνω στις τεχνικές πλέγματος κελίων που οδηγούν σε μια διαφορετική αναπαράσταση του οδικού περιβάλλοντος σε αντίθεση με τις κλασσικές γεωμετρικές τεχνικές συσχέτισης. Οι τεχνικές αυτές περιορίζουν σημαντικά τα μειονεκτήματα των γεωμετρικών τεχνικών, αλλά η μοντελοποίηση των δεδομένων των διαφόρων αισθητήρων είναι και σε αυτήν την περίπτωση απαραίτητη πριν την διεξαγωγή της σύντηξης των δεδομένων.

- Οι μέθοδοι πολυδιάστατης ανάθεσης που αναπτύχθηκαν στην εργασία αυτή είναι εξαιρετικά αποδοτικοί όταν έχουμε να κάνουμε με σύντηξη ομοιογενών ως προς την μορφή και την ποιότητα ιχνών όπως δείχθηκε σε μελέτη προσομοίωσης που εξετάστηκε στην εργασία αυτή. Στις ετερογενείς όμως περιπτώσεις σύντηξης ιχνών είναι εξαιρετικά επισφαλής η χρήση τέτοιου είδους τεχνικών σύνδεσης δεδομένων. Όμως οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν την δυναμική αξιοποίησης τους σε σύνδεση δεδομένων προηγούμενων σαρώσεων με την αξιοποίηση της μεθόδου ιχνηλασίας πολλαπλών υποθέσεων (MHT). Η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά αποδοτική και μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο για ιχνηλασία δεδομένων ενός αισθητήρα ή και σε σύντηξη δεδομένων.
- Σημαντική μελλοντική επέκταση των συστημάτων σύντηξης δεδομένων στις οδικές εφαρμογές αποτελεί η εισαγωγή πληροφορίας μέσω επικοινωνίας - σαν εικονικός αισθητήρας, όπως έχει προαναφερθεί. Η εξέλιξη αυτή αλλάζει σημαντικά τα δεδομένα στον τομέα που μελετούμε κυρίως λόγω των τεχνικών εντοπισμού που απαιτούνται και των περιορισμών και ειδικών χειρισμών (π.χ. συγχρονισμός, πολιτικές προτεραιοτήτων, μετασχηματισμοί κ.α.) που υπεισέρχονται στα δεδομένα που φθάνουν μέσω συστημάτων επικοινωνιών.
- Ένας ακόμα τομέας που πρέπει να διερευνηθεί μελλοντικά είναι η ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων αποτίμησης της επίδοσης των αλγορίθμων. Οι τεχνικές που παρουσιάστηκαν εδώ αφορούν πλήρη διερεύνηση της επίδοσης σε περιπτώσεις προσομοιώσεων, όπως είναι λογικό. Στην περίπτωση όμως της πραγματικής λειτουργίας κάποιο υποκειμενικό κριτήριο πρέπει να χρησιμοποιηθεί (π.χ. χρήση κάμερας και καταγραφή offline της επίδοσης). Επίσης γενικότερα στα συστήματα υποστήριξης οδήγησης η αποτίμηση επίδοσης που πραγματοποιείται αφορά πρωτευόντως την επίδοση της εφαρμογής (π.χ. προειδοποιήσεις αποφυγής σύγκρουσης) και όχι την επίδοση του συστήματος αναγνώρισης αντικειμένων.

Δημοσιεγσεισ

Α. Διεθνή επιστημονικά περιοδικά με κριτές

- 1. "Integrated object and road borders tracking using 77GHz automotive radars", A. Polychronopoulos, A. Amditis, N. Floudas, H. Lind, IEE Proc.-Radar Sonar Navig., Vol. 151, No. 6, December 2004, pp. 375-381.
- "Fusion of infrared Vision and Radar for estimating the lateral dynamics of obstacles", A. Amditis, A. Polychronopoulos, N. Floudas, L. Andreone, (Elsevier) Information Fusion, Vol. 6, Issue 2, June 2005, pp. 129-141.
- "Integrated vehicle's lateral safety: the LATERAL SAFE experience", A. Amditis, N. Floudas, U. Kaiser-Dieckhoff, T. Hackbarth, B. Van den Broek, M. Miglietta, L. Danielson, M. Gemou, E. Bekiaris, IET Intelligent Transport Systems, accepted for publication.

Β. Διεθνή επιστημονικά συνέδρια με κριτές

- "Development of a MATLAB toolbox for trackers' simulation and testing in a multiple sensor network", A. Amditis, N. Floudas, A. Polychronopoulos, G. Katsoulis, I. Karaseitanidis, Proc. of NATO RTO-MP-SET-059 Symposium on "Target Tracking and Sensor Data Fusion for Military Observation Systems', Budapest 15-17/10/2003, pp. 51:1-14.
- "Lateral motion tracking of automobiles", A. Amditis, N. Floudas, A. Polychronopoulos, Proc. of the 7th International Conference on Information Fusion (FUSION 2004), Stockholm, Sweden, 28/06- 01/07/2004, pp. 768-774.
- "A survey of filtering techniques for vehicle tracking by radar equipped automotive platforms", N. Floudas, A. Polychronopoulos, A. Amditis, Proc. of the 8th Eight International Conference on Information Fusion (FUSION 2005), Philadelphia, PA USA, 25-29/07/2005, paper P-7.
- "Data Fusion in multi sensor platforms for wide area perception", A. Polychronopoulos, N. Floudas, A. Amditis, D. Bank, B. van der Broek, IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2006, Tokyo, Japan, 13-15/06/06, pp. 412-417.
- "Multi-Sensor Coordination And Fusion For Automotive Safety Applications", N. Floudas, A. Polychronopoulos, M. Tsogas, A. Amditis, Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion (FUSION 2006), Florence, Italy, 10 14/07/2006, paper 346.
- "Sensor data fusion for LATERAL SAFE applications", A. Amditis, N. Floudas, A. Polychronopoulos, D. Bank, B. van der Broek, F. Oeschle, Proc. of 13th ITS World Congress and Exhibition, London, United Kingdom, 08-12/10/2006.
- "On the track-to-track association problem in road environments", N. Floudas, P. Lytrivis, A. Polychronopoulos, A. Amditis, Proc. of the 10th International Conference on Information Fusion (FUSION 2007), Quebec City, Canada, 9-12/07/2007.
- "Situation refinement for vehicle maneuver identification and driver's intention prediction", M. Tsogas, A. Polychronopoulos, N. Floudas, A. Amditis, Proc. of the 10th International Conference on Information Fusion (FUSION 2007), Quebec City, Canada, 9-12/07/2007.
- "High Level Sensor Data Fusion Approaches For Object Recognition In Road Environment", N. Floudas, A. Polychronopoulos, O. Aycard, J. Burlet, M. Ahrholdt, Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2007, Istanbul, Turkey, 13-15/06/2007, pp 136-141.
- "Positioning and path prediction for scenario assessment of safe speed system", N. Floudas, M. Tsogas, A. Amditis, H. Weigel, Proc. of 14th ITS World Congress, Beijing, China, 9-13/10/2007.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Το φάσμα του φωτός	22
Εικόνα 2: Στόχος μείωσης επιπτώσεων τροχαίων δυστυχημάτων στην ΕΕ [9]	24
Εικόνα 3: Το ολοκληρωμένο σύστημα ενεργητικής ασφάλειας PReVENT [8]	34
Εικόνα 4: Το λειτουργικό μοντέλο PF2	47
Εικόνα 5: Σύστημα Ιχνηλασίας Αισθητήρα	48
Εικόνα 6: Οι δύο κύριες αρχιτεκτονικές σύντηξης δεδομένων	49
Εικόνα 7: Αργιτεκτονική του συστήματος σύντηξης δεδομένων που προτείνεται	. 49
Εικόνα 8: Διάσπαση περιογής επιτήρησης σε επιμέρους υποπορβλήματα σύνδεσης ίγνου	IC
π_{000} (avoc	350
Εικόνα 9. Ακολουθιακή και ανά ζεύνη σύνδεση ίννους ποος ίννος	51
Εικόνα 10: Το όχημα εφαρμονής του συστήματος πολυδιάστατης ανάθεσης	52
Εικόνα 11: Πεοιοχή κάλυψη του φορτηγού (αρχιτεκτονική INSAFES)	53
Εικόνα 12: Εσωτερική αρχιτεκτονική επιπέδου αναννώρισης (όνημα Volvo - INSAFES)	54
Eukova 12. Eowiepiał apriektoviał enacoso avaj vapieli $(0,1)$ av $(0,1)$ $(0,1)$	54
Eukova 15. Tonohovia ros oboti patos Volvo - $INSA FES$	55
Eucova 14. $1000000000000000000000000000000000000$	56
Εικόνα 15. Αισσητηρας SKK της Ινι/Α-COM / Τ yeo Ειectronics	. 50
Eucova 10. 200 tipa paviap kovitvoo kai μ eooo λ eoloo tip Sivis	
Eucova 17. To paviap makpivoo π eotoo Autocraise	
Εικονά 18. Η καμερά ανίχνευσης Λωρισάς	
Elkova 19. H kaµspa Mekra-Lang	
Eικονα 20: Περιοχή καλυψή του φορτήγου (αρχιτεκτονική ProFusion)	38
Eικονα 21: U σαρωτης λειζερ ALASCA	38
Eικονα 22: Εσωτερική αρχιτεκτονική επιπεόου αναγνωρισής (οχήμα Volvo - Profusion)	. 39
Eικονα 23: 10 οχημα Fiat-INSAFES	39
Εικονα 24: Οι περιοχες καλυψης στο οχημα Fiat-INSAFES	60
Εικονα 25: Η εσωτερικη αρχιτεκτονικη του οχηματος Fiat-INSAFES	61
Εικονα 26: Η τοπολογια του συστηματος Fiat-INSAFES	62
Εικόνα 27: Η θέση των αισθητήρων στο όχημα Fiat-INSAFES	. 63
Εικόνα 28: Οι περιοχές κάλυψης στο όχημα Fiat-LATERAL SAFE	. 63
Εικόνα 29: Η εσωτερική αρχιτεκτονική του οχήματος Fiat-LATERAL SAFE	. 64
Εικόνα 30: Ο αισθητήρας LRR2	. 65
Εικόνα 31: Η κάμερα ΙΝΚΑ με τη μονάδα ελέγχου της και η συνδεσμολογία της στον	
καθρέπτη	. 65
Εικόνα 32: Φωτογραφίες της κάμερας και του ραντάρ	. 66
Εικόνα 33: To UBLOX ANTARIS Evaluation Kit	. 66
Εικόνα 34: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας ΙΜΜ (από [17])	. 73
Εικόνα 35: Ένας κύκλος ενός PF ([1])	. 77
Εικόνα 36: Το σύστημα συντεταγμένων WGS84	. 81
Εικόνα 37: Ελλειψοειδείς γεωγραφικές συντεταγμένες	. 82
Εικόνα 38: Σύστημα συντεταγμένων οχήματος ISO 8855	. 83
Εικόνα 39: Το τοπικό εφαπτομενικό σύστημα συντεταγμένων	. 83
Εικόνα 40: Μετασχηματισμοί συντεταγμένων στο υποσύστημα PESE	. 84
Εικόνα 41: Παράμετροι του ελλειψοειδούς αναφοράς	. 84
Εικόνα 42: Συστήματα συντεταγμένων τοπικό εφαπτομενικό και με κέντρο στο όχημα	. 86
Εικόνα 43: Παράδειγμα ενός σεναρίου (~9min) με μετασγηματισμούς δεδομένων GPS	. 87
Εικόνα 44: Ρυθμοί ενημέρωσης μετρήσεων GPS και προγράμματος (κόκκινο και μπλε,	
αντίστοιχα)	87
Εικόνα 45: Μετασχηματισμός εξόδου	. 90

Εικόνα 46: Τελικός μετασχηματισμός συντεταγμένων εξόδου για γεωγραφικό μήκος κα πλάτος	ι 90
Εικόνα 47: Θέση κεραίας GPS σε σχέση με το ISO σύστημα συντεταγμένων του οχήμα	τος 90
Εικόνα 48: Αποτελέσματα επίδοσης του PESE στην εκτίμηση της ταχύτητας (πάνω),	
γωνιακής ταγύτητας και γωνίας κατεύθυνσης (αριστερά και δεξιά αντίστοιγα)	91
Εικόνα 49.(α-δ): Σενάρια εκτίμησης γεωδαιτικής θέσης από το PESE	92
Εικόνα 50: Κατανομή πιθανότητας με περιορισμούς	96
Εικόνα 51: Το σενάριο προσομοίωσης	97
Εικόνα 52: Σφάλμα θέσης RMS	98
Εικόνα 53: Σφάλμα ταχύτητας RMS	98
Εικόνα 54: Καθυστέρηση των PF σε σγέση με τον αριθμό των δειγμάτων	. 100
Εικόνα 55: Επίδοση των PF σε σχέση με τον αριθμό των δειγμάτων	. 100
Εικόνα 56: RMS σφάλμα θέσης	. 101
Εικόνα 57: RMS σφάλμα ταγύτητας	. 101
Εικόνα 58: Σύστημα συντεταγμένων ιγνηλάτη LRR	. 102
Εικόνα 59: Αλγόριθμος διαγείρισης ιγνών (GNN DA)	. 105
Εικόνα 60: Αλγόριθμος διαγείρισης ιγνών (JPDA DA)	. 105
Εικόνα 61: Κυκλική μετατόπιση του συστήματος συντεταγμένων του ιδίου ογήματος	. 107
Εικόνα 62: Αλγόριθμος ιχνηλασίας LRR	. 108
Εικόνα 63: Εκτιμήσεις θέσης του αντικειμένου LRR (προσομοίωση)	. 109
Εικόνα 64: Εκτιμήσεις ταχύτητας του αντικειμένου LRR (προσομοίωση)	. 110
Εικόνα 65: Χρονική καθυστέρηση για την περίπτωση ιχνηλασίας LRR GNN-CA	. 110
Εικόνα 66: Χρονική καθυστέρηση για την περίπτωση ιχνηλασίας LRR JPDA-CA	. 111
Εικόνα 67: Χρονική καθυστέρηση για τις δύο τεχνικές ιχνηλασίας	. 111
Εικόνα 68: Μέτρα συνάφειας για έναν στόχο LRR στην περίπτωση GNN-EKF	. 112
Εικόνα 69: Μέτρα συνάφειας για έναν στόχο LRR στην περίπτωση JPDA-EKF	. 113
Εικόνα 70: Παράδειγμα διαγείρισης ιγνών στην περίπτωση απόκρυψης αντικειμένων	. 114
Εικόνα 71: Επιλογή σημείου για την ενημέρωση της αλυσίδας	. 120
Εικόνα 72: Αθροιστική περιγραφή των εκτιμήσεων της γεωμετρίας του δρόμου με τη	
γεωμετρική και την πιθανοτική ανάθεση μετρήσεων.	. 121
Εικόνα 73: Πιθανότητα σωστής ανάθεσης μετρήσεων – σύγκριση μεθόδων ανάθεσης	. 122
Εικόνα 74: Συγγώνευση παρατηρήσεων δικτύου αισθητήρων ραντάρ κοντινού πεδίου	. 123
Εικόνα 75: Παράδειγμα θερμών περιογών σε εικόνα IR για ανίγνευση αυτοκινήτων	. 124
Εικόνα 76: Ανάλυση σφαλμάτων συστημάτων ραντάρ και κάμερας στο επίπεδο του δρά	ομου
	.125
Εικόνα 77: Αργιτεκτονική συστήματος UDF [12]	. 127
Εικόνα 78: Αποτελέσματα (νωνία και ενκάρσια ταγύτητα) σε απότομο ελινμό του	
μπροστινού ογήματος, δεδομένα προσομοίωσης	. 129
Εικόνα 79: Αποτελέσματα (νωνία και εγκάρσια ταγύτητα) σε σενάριο προσπέρασης.	
δεδομένα προσομοίωσης	. 129
Εικόνα 80: Αποτελέσματα (νωνία, ενκάρσια ταγύτητα και επιτάγυνση) σε σενάριο ελιγ	μών
των προπορευόμενων ογημάτων, με πραγματικά δεδομένα προσπέρασης	130
Εικόνα 81: Μέσο σφάλμα πρόβλεψης πορείας και εκτίμησης δυναμικής στόγου	. 131
Εικόνα 82: Εκτιμώμενη τρογιά ποοπορευόμενου ογήματος (1)	. 131
Εικόνα 83: Εκτιμώμενη τρογιά προπορευόμενου ογήματος (2)	132
Εικόνα 84: Αριθμός τυπικών επιστροφών από σάρωση του λέιζερ, συνκρινόμενος με	
επιστροφές του LRR καθώς και των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων του αλνοοίθμου	
ομαδοποίησης	. 133
Εικόνα 85: Αλγόριθμος προεπεξεργασίας δεδομένων σαρωτή λέιζερ	. 134

Εικόνα 86: Πρώτο βήμα ομαδοποίησης των δεδομένων του σαρωτή λέιζερ (παράδειγμα	α) 135
Εικόνα 87: Εξαγωγή μετρήσεων για ιχνηλασία δεδομένων σαρωτή λέιζερ (παράδειγμα Εικόνα 88: Εικόνα του προγράμματος αποτίμησης της επίδοσης της σύντηξης σαρωτή) 135
λειζερ και LRR Εικόνα 89: Συσωρευτικά σχήματα αποτελεσμάτων σύντηξης σαρωτή λέιζερ και LRR γ σενάρια 1 και 2	136 νια τα 136
Εικόνα 90: Διάφοροι τύποι πολυγωνικών μετρήσεων του σαρωτή λέιζερ που ταυτοποιήθηκαν ως οχήματα	137
εικόνα 91:Παράδειγμα κατάστασης σύγκρουσης όπου είναι κατάλληλη η εφαρμογή τη μεθόδου JPDA	137 S 148
Εικόνα 92: Διάγραμμα ροής της μεθόδου χαλάρωσης του Lagrange για το τρισδιάστατο ποόβλημα της ανάθεσης [22]	156
Εικόνα 93: Γραφική παράσταση του κόστους δυνατής και δυικής λύσης Εικόνα 94: Block διάνοαμμα του αλγορίθμου ανάθεσης S-διαστάσεων	158
Εικόνα 94. Βιοεκ οιαγραμμα του αλγορίθμου JVC (από [22])	160
Εικονα 96: Συγκριση του χρονου εκτελεσης των αλγοριθμων του πλειστηριασμου (μπλ και του JVC (κόκκινο +) συναρτήσει του ποσοστού των μη μηδενικών στοιχείων	(* 3.
(αραιοτητα) για μητρες 10x10 (α), 20x20 (β), 30x30 (γ), 35x35 (δ), 40x40 (ε), 45x45 (σ	5τ). 162
Εικόνα 97: Επίλυση δυσδιάστατης ανάθεσης Εικόνα 98: Block διάγραμμα της μεθόδου χαλάρωσης του Lagrange για το τρισδιάστατ ποόβλημα της ανάθεσης (από [22])	162 to 165
Εικόνα 99: Block διάγραμμα της μεθόδου χαλάρωσης του Lagrange για το Ν-διάστατο πρόβλημα της ανάθεσης (από [22])	168
Εικόνα 100: Αρχιτεκτονική συστήματος LATERAL SAFE	175
Εικόνα 101. Μετασχηματισμοί από τις συντεταγμένες του αισθητήρα στις συντεταγμέν του οχήματος	
Εικόνα 103: Περιοχής κάλυψης (χωρίς κλίμακα) Εικόνα 104: Απόδοπη στόνου το ποριονή ΕΟΜ	178
Εικόνα 104. Αποσοση στόχου σε περιοχή FOV Εικόνα 105: Γενική ιδέα του συστήματος σύντηξης (προσομοίωση) Εικόνα 106: Παράματροι LPP στο σύστημα προσομοίωσης.	179 180
Εικόνα 100: Παραμείροι ΕΚΚ στο συστημα προσομοιωσης Εικόνα 107: Το γραφικό περιβάλλον του προσομοιωτή Εικόνα 108: Συνολική αποτύπωση των 500 σαρόσεων του συστήματος	182
Εικόνα 100. Ζυνολική αλοτολωσή των 500 σαρωσεων του συστηματος Εικόνα 109: Εκτίμηση θέσης στα επίπεδα επεξεργασίας του αισθητήρα και της σύντηξ (προσοιμοίωση)	105 ης 184
(προσομοιωση). Εικόνα 110: Εκτίμηση ταχύτητας στα επίπεδα επεξεργασίας του αισθητήρα και της	104
ουντηζης (προσομοιωση) Εικόνα 111: Διάγραμμα τελικού αλγορίθμου σύντηξης δεδομένων	184
Εικόνα 112: Τυπικες επιστροφες του δικτυου αισθητηρων SRR Εικόνα 113: Αισθητήρες και περιοχή κάλυψης για το σύστημα δυναμικής κυκλικής	18/
επιτήρησης Εικόνα 114: Περιβάλλον ελέγχου της επίδοσης των αλγορίθμων σύντηξης στο σύστημα Ει Α.Τ. Ρ.Ι. Α.Γ.Ε.	188 α
FIA I-INSAFES Εικόνα 115: Αισθητήρες και περιοχή κάλυψης για το σύστημα πολυδιάστατης ανάθεστ	190 ις191
Εικόνα 116: Περιβάλλον ανάπτυξης αλγορίθμων σύντηξης δεδομένων σε Matlab Εικόνα 117: Περιβάλλον εκτέλεσης των αλγορίθμων με δυνατότητα λειτουργίας online offline	192 экан 193
Εικόνα 118: Υποσυστήματα επεξεργασίας δεδομένων στο σύστημα FIAT-INSAFES	209

Εικόνα 119: Τα υποσυστήματα του συστήματος FIAT-INSAFES από την άποψη των
κλάσεων στις βιβλιοθήκες λογισμικού
Εικόνα 120: Υποσυστήματα επεξεργασίας δεδομένων στο σύστημα VOLVO-ProFusion2
Εικόνα 121: Τα υποσυστήματα του συστήματος VOLVO- ProFusion2 από την άποψη των
κλάσεων στις βιβλιοθήκες λογισμικού
Εικόνα 122: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού PosEgoStaEstim.dl
Εικόνα 123: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού DataAssociation.dl
Εικόνα 124: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού SRRnetFront.dl216
Εικόνα 125: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού Lidar.dl
Εικόνα 126: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού Tracking.dl
Εικόνα 127: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού ALLFusion.dl219
Εικόνα 128: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού TLFusion.dl 220
Εικόνα 129: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού RoadBorders.dl221

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Ορισμός βασικών εννοιών	14
Πίνακας 2: Σύγκριση μεταξύ αισθητήρων CCD και CMOS	22
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά λειτουργίας τυπικών αισθητήρων LRR	25
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά αρχιτεκτονικών σύντηξης δεδομένων	31
Πίνακας 5: Επίπεδα συστήματος σύντηξης δεδομένων	46
Πίνακας 6: Παράμετροι μέτρησης αισθητήρα GPS και περιγραφή	80
Πίνακας 7: Κύριες παραμετροι του WGS 84	81
Πίνακας 8: Επίδοση των λύσεων με βάση τα φίλτρα Kalman	98
Πίνακας 9: Αποτελέσματα για 1000 δείγματα	99
Πίνακας 10: Προδιαγραφές δεδομένων αισθητήρα LRR2	101
Πίνακας 11: Συγκριτικά αποτελέσματα εσφαλμένων αναθέσεων μεταξύ πιθανοτικής (Ρ	rob),
γεωμετρικής (Geom) και συνδιαστικής μεθόδου (P&G)	121
Πίνακας 12: Τρόπος αρίθμησης των στοιχείων στον αλγόριθμο του Lagrange για το S-	
διάστατο πρόβλημα της ανάθεσης	165
Πίνακας 13: Επίδοση σύνδεσης δεδομένων του συστήματος DF επιπέδου αισθητήρα,	3
αισθητήρων	170
Πίνακας 14: Ψευδείς συναγερμοί και απώλειες του συστήματος DF επιπέδου αισθητήρ	α, 3
αισθητήρων	170
Πίνακας 15: Λεπτομέρειες του σεναρίου προσομοίωσης	183
Πίνακας 16: Μέσα σφάλματα RMS στα επίπεδα επεξεργασίας του αισθητήρα και της	
σύντηξης (προσομοίωση)	185
Πίνακας 17: Αποτελέσματα σύνδεσης δεδομένων του αλγορίθμου σύντηξης	186

Σύντομογραφίες

ABS	Anti-Blocking System
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
ASIR	Auxiliary SIR
СА	Constant Acceleration
CAN	Controller Area Network
CCD	Charge-Coupled Device
CEP	Circular Error Probable
CI	Covariance Intersection
CMKF	Converted Measurement Kalman Filter
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
СТ	Constant Turn
CTS	Conventional Terrestrial System
CU	Covariance Union
CV	Constant Velocity
DA	Data Association
DF	Data Fusion
DGPS	Differential GPS
DSRC	Dedicated Short Range Communication
ECEE	Earth Centred Earth Eixed
ECLI	Electronic Control Unit
ECO	Extended Kalman Filter
ED	Estimation Derformance
ESD	Electronic Stability Program
ESP	Electronic Stability Program
FIK	Fraguency Modulated Continuous Ways
FMCW	Field Of Wow
FUV	Clabel Neerest Neighbor
GININ	Clobal Desitioning System
Gr5 CUI	Giobal Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HMI	Human Machine Interaction
ID U CE	
ILSE	Iterative Least Square Estimator
	Interacting Multiple Models
IMMPDAF	IMM PDA Filter
IPDA 190	Integrated Probabilistic Data Association
ISO	International Organization of Standardization
JDL	Joint Directors of Laboratories (USA)
JPDA	Joint Probabilistic Data Association
JVC	Jonker-Volgenant-Castanon
LDW	Lane Departure Warning
LKF	Local Kalman Filter
	Local Linearization
LLA	Latitude-Longitude-Altitude
	Long Range Radar
LRT	Likelihood Ratio Test
LSE	Least Square Estimator
LT	Local Tangential

LWIR	Long Wave Infrared
MAP	Maximum A Posteriori
MC	Monte Carlo
MHT	Multiple Hypothesis Tracking
MISE	Mean Integration Square Error
MLP	Most Likely Path
MMICs	Monolithic Microwave Integrated Circuits
MMSE	Minimum Mean Square Error
MRR	Medium Range Radar
MWIR	Medium Wave Infrared
NED	Northing Easting Down
NEES	Normalized Estimation Error Squared
NIS	Normalized Innovation Squared
NNPDA	Nearest Neighbor PDA
NP	Non-deterministic Polynomial time
OP	Overall Performance
PDA	Probabilistic Data Association,
PESE	Position and Ego State Estimation
PF	Particle Filter
RB	Road Borders
RMS	Random Mean Square
RPF	Regularized Particle Filter
S-D	S Dimensional (S>2)
SIR	Sequential Importance Resampling
SIS	Sequential Importance Sampling
SMC	Sequential Monte Carlo
SRR	Short Range Radar
SVIP	Synthesized Vision Image Processing
UDF	Uncoupled Double Filter
UKF	Unscented Kalman Filter
UTC	Universal Time Coordinated (XXI GMT)
UWB	Ultra Wide Band
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
WGS	World Geodetic System

Παράρτημα: Περιγραφή Λογισμικού

Λογισμικό στο πειραματικό όχημα FIAT-INSAFES

Τα υποσυστήματα λογισμικού που αναπτύχθηκαν και αναφέρθηκαν στα προηγούμενα περιγράφονται εδώ από την τεχνική άποψη. Χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες βιβλιοθήκες λογισμικού:

CML.dll:	για μαθηματικούς υπολογισμούς και ορισμούς μεταβλητών		
PosEgoStaEstim.dll:	μηδενικός υπολογισμός θέσης και εκτίμηση παραμέτρων δυναμικής του ιδίου		
	οχήματος		
DataAssociation.dll:	για λειτουργίες σύνδεσης δεδομένων στους αλγορίθμους ιχνηλασίας και σύντηξ		
	δεδομένων		
Tracking.dll:	για τις συναφτήσεις ιχνηλασίας που υλοποιήθηκαν		
ALLFusion.dll:	για την κυκλική (all around) σύντηξη δεδομένων		
InsafesModsICCS.dll:	βιβλιοθήκη διεπαφής (interface) μεταξύ βιβλιοθηκών επεξεργασίας δεδομένων		
	και προγράμματος πλατφόρμας FIAT-INSAFES		

Η πληροφορία των αντικειμένων εξόδου του συστήματος σύντηξης δεδομένων πέραν των συνήθων μεταβλητών θέσης και δυναμικής περιέχει και τα ακόλουθα πεδία:

Obstacles[i].Identifier: πληροφορία αριθμού ταυτότητας (id) αντικειμένου με τιμές μεταξύ 1001 και 2999 (1001 με 1999 για αντικείμενα ανιχνευμένα από το πίσω LRR, σταθερές τιμές 997 για όλα τα αριστερά μόνο SRR, 998 για όλα τα δεξιά μόνο SRR, 999 για τα αριστερά μόνο BS, 1000 για τα δεξιά μόνο αντικείμενα SRR, 2001 με 2999 για αντικείμενα ανιχνευμένα αντικείμενα SRR, 2001 με 2999 για αντικείμενα ανιχνευμένα αντικείμενα τα σταθερές τιμές 997 για όλα τα δεξιά μόνο αντικείμενα δ SR, 2000 για τα μπροστά μόνο αντικείμενα SRR, 2001 με 2999 για αντικείμενα ανιχνευμένα από το πάθερε (ακίνητα) αντικείμενα.

Obstacles[i].Class: 0 αντιστοιχεί σε άγνωστο αντικείμενο και 1 σε αυτοκίνητο. **Obstacles[i].NSample:** για κάθε αντικείμενο προϊόν ιχνηλασίας το πεδίο αυτό περιέχει μια τιμή (ίση με τον αριθμό των φορών που ο εν λόγω στόχος έχει ανιχνευτεί) αλλιώς είναι μηδέν

Obstacles[i].Sensors.Sensor_key: όπου σώζεται η πληροφορία της πηγής που εντόπισε το συγκεκριμένο αντικείμενο (ένας ή πολλαπλοί αισθητήρες)



Εικόνα 118: Υποσυστήματα επεξεργασίας δεδομένων στο σύστημα FIAT-INSAFES



Εικόνα 119: Τα υποσυστήματα του συστήματος FIAT-INSAFES από την άποψη των κλάσεων στις βιβλιοθήκες λογισμικού

Λογισμικό στο πειραματικό όχημα VOLVO-ProFusion2

Οι βιβλιοθήκες του λογισμικού του συστήματος VOLVO ProFusion2 από τεχνικής άποψης περιγράφονται στην παράγραφο αυτή. Αυτές αφορούν την επεξεργασία των δεδομένων του συστήματος και αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας (εκτός της CML.dll που αναπτύχθηκε από άλλο μέλος της ομάδας I-SENSE). Σύντομη περιγραφή της λειτουργίας αυτών των βιβλιοθηκών ακολουθεί:

CML.dll:	για μαθηματικούς υπολογισμούς και ορισμούς μεταβλητών	
DataAssociation.dll:	για λειτουργίες σύνδεσης δεδομένων στους αλγορίθμους ιχνηλασίας και σύντηξ	
	δεδομένων	
Tracking.dll:	για τις συναρτήσεις ιχνηλασίας που υλοποιήθηκαν	
Lidar.dll:	για την επεξεργασία των μετρήσεων του σαρωτή λέιζερ για εκτίμηση γεωμετρίας του δρόμου και εξαγωγή αντικειμένων του οδικού περιβάλλοντος	
SRRnetFront.dlf.	επεξεργασία των δεδομένων του δικτύου των αισθητήρων SRR, συγχώνευση μετρήσεων και ιγνηλασία αυτών	
TLFusion.dll:	ο κύριος αλγόριθμος σύντηξης δεδομένων επιπέδου ιχνών	
PF2Mod.dll:	βιβλιοθήκη διεπαφής (interface) μεταξύ βιβλιοθηκών επεξεργασίας δεδομένων και προγράμματος πλατφόρμας VOLVO- ProFusion2 interface	

Η επιπλέον πληροφορία που αποδίδει ο αλγόριθμος για τα αντικείμενα της σύντηξης δεδομένων περιλαμβάνει τα ακόλουθα πεδία:

- Αριθμός id: 1000-2000 αποδίδεται στα επιβεβαιωμένα αντικείμενα, ενώ σταθερά 999 δίνεται για τις μπάρες του δρόμου και τα υπόλοιπα αντικείμενα που δεν αποτελούν προϊόν ιχνηλασίας
- *nSamples*: ο αριθμός των εκτελέσεων του προγράμματος που έχει παρατηρηθεί το αντικείμενο με το συγκεκριμένο αριθμό id
- Class: με τιμές 0-5 που αντιστοιχούν σε {άγνωστο, αυτοκίνητο, φορτηγό, πεζός, δίκυκλο, pedestrian, cyclist, προστατευτικό κιγκλίδωμα}. Συνήθως κλάσεις 1, 2 και 5 εμφανίζονται συχνότερα, με τις άλλες να εξαρτώνται από τις διαστάσεις και τις ταχύτητες του εκάστοτε αντικειμένου. Για τα αντικείμενα κλάσης 5 προστατευτικό κιγκλίδωμα που αντιστοιχούν στην έξοδο του συστήματος εκτίμησης

ορίων του δρόμου, μόνο οι τιμές των συντεταγμένων x και y αποτελούν αξιόπιστη πληροφορία, τα υπόλοιπα πεδία τίθενται στο μηδέν.

- Confidence: ἐχει τιμές από 0.3 ἐως 1.0, με το 1.0 να αποτελεί τη βέλτιστη τιμή που μπορεί να αποκτήσει ἐνα αντικείμενο. Η εμπιστοσύνη (confidence) ενός αντικειμένου είναι συνάρτηση, του πλήθους και του τύπου των αισθητήρων που συνεισέφεραν στην εκτίμηση του συγκεκριμένου αντικειμένου, στις παραμέτρους της εκτίμησης καθώς και στο πλήθος των σαρώσεων που το συγκεκριμένο αντικείμενο ἐχει εντοπιστεί.
- Sources: όπου σώζεται η πληροφορία της πηγής που εντόπισε το συγκεκριμένο αντικείμενο (ένας ή πολλαπλοί αισθητήρες).



Εικόνα 120: Υποσυστήματα επεξεργασίας δεδομένων στο σύστημα VOLVO-ProFusion2

Από την άποψη των κλάσεων της C++ στις βιβλιοθήκες λογισμικού που αναπτύχθηκαν, η περιγραφή των υποσυστημάτων φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Εικόνα 121: Τα υποσυστήματα του συστήματος VOLVO- ProFusion2 από την άποψη των κλάσεων στις βιβλιοθήκες λογισμικού

Περιγραφή κύριων βιβλιοθηκών λογισμικού

Στη συνέχεια περιγράφονται οι κύριες βιβλιοθήκες λογισμικού που αναπτύχθηκαν και περιγράφηκαν. Στα UML διαγράμματα που ακολουθούν περιλαμβάνονται οι κύριες κλάσεις κάθε βιβλιοθήκης, μαζί με τις δευτερεύουσες βοηθητικές συναρτήσεις καθώς και τις κλάσεις άλλων βιβλιοθηκών που χρησιμοποιούνται στην περιγραφόμενη βιβλιοθήκη. Οι μεταβλητές ή οι λειτουργίες που είναι κοινές (public) συμβολίζονται με ένα «+» στην αρχή τους, αντίθετα οι ιδιωτικές (private) αρχίζουν με ένα «-». Οι βιβλιοθήκες που ακολουθούν περιγράφεται εν συντομία η κλάση που εκτελεί τις κύριες διαδικασίες προορισμού της, στην συνέχεια περιγράφεται εν συντομία η κάση αυτή με τις μεταβλητές της, τις σημαντικότερες λειτουργίες και συναρτήσεις που περιλαμβάνει η κάθε μία από αυτές.

Βιβλιοθήκη μηδενικού υπολογισμού θέσης -PosEgoStaEstim.dll

Η βιβλιοθήκη PosEgoStaEstim.dll αποτελείται από την κλάση egoState που περιλαμβάνει τις λειτουργίες που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3 για το σύστημα μηδενικού υπολογισμού θέσης. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι μετασχηματισμοί στον πίνακα "Utility" και με τις σημαντικότερες λειτουργίες να είναι τα πεδία:

```
if «αρχικοποίηση»
{
      setConstantMatricesINSGPS()
      setReferencePoint("variables")
      convertToLocalPlane("variables")
      init n synchronizeMeasGPS("variables")
      setDynamicMatricesINS("variables")
      setTransitionMatrix("variables")
      initializeINSGPS_v1("variables")
}
else
{
      setDynamicMatricesINS(dt);
      setTransitionMatrix(dt);
      if «μεγάλη χρονική καθυστέρηση λήψης μετρήσεων»
      {
            updateSpeedZero()
      }
      else
      {
      convertToLocalPlane("variables")
      synchronizeMeasGPS("variables")
      if «ακριβή δεδομένα GPS»
      {
            //κύρια λειτουργία σύτνηξης δεδομένων
            formINSGPSMeasVector("variables")
            fusionINSGPS_v3("variables")
      }
      else
      {
            //ενημέρωση φίλτρου ελλείψει δεδομένων
            updateINSGPS()
      }
}
transformToPEEState("variables")
                                    //μετατροπή στο επιθυμητό format
```

	egoState	
+DTGPS : double	-	
+PESE1stRun : unsigned short		
+prTS : unsigned long		
+countGPSvalues : unsigned short	autility Itility	
+prev_UTC_time : DWORD	«duility»ounty	
+prev_lLat : long		
+prev_ILong : long	+DMDtoLLA(in dmd : Vector) : double	
+prTSGPS : unsigned long	+LLAtoDMD(in IIa : double) : Vector	
+TSGPS : unsigned long	+ECEFtoLLA(in ecef : Vector) : Vector	
+DTS : unsigned long	+LLAtoECEF(in Ila : Vector) : Vector	
+firstupdate : unsigned short	+EGEPtoNED(in eder : Vector, in ederu : Vector, in L : M	atrix): Vector
+countupdates : unsigned short	+NEDtoVCN(in ned : Vector, in beading : double) : Vector	atrix): vector
-NINS . Vector	+VCNtoNED(in vcn : Vector, in heading : double) : Vector	
-RINS - Matrix	Volvolveb(in volt. Vector, in heading . double). Vector	,,
-HINS : Matrix		
-HINSGPS : Matrix	CML "Matrix CML "Vector	
-RINSGPS : Matrix		
-FINS : Matrix		
-QINS : Matrix		
-EVPP : Matrix		
-EVPS : Vector		
-EVPSS : Matrix		
-FCA : Matrix		
-L: Matrix		
-ecetu : Vector		
+egoState()		
+egoState(in v1 : vector, in v2 : Matrix)		
+egostate(inout ms : const egostate)		
+getPPath() · Matrix		
+getPStates() · Matrix		
+aetINSVector(): Vector		
+getINSVectorElement(in i : int) : double		
+getINScovElement(in i : int, in j : int) : double		
+printStateVector()		
+printCovMatrix()		
+convertToLocalPlane(in ND : NAV_DATA*, inc	out yGPS : Vector)	
+synchronizeMeasGPS(in dt : float, in pv : VEH	ICLE*, in ND : NAV_DATA*, inout yGPS : Vector)	
+init_n_synchronizeMeasGPS(in dt : float, in pv	: VEHICLE*, in ND : NAV_DATA*, inout yGPS : Vector)	
+takeInertialMeas(in pv : VEHICLE*, inout yINS	: vector)	
+fusionINSCPS_v1(in vINS : Vector in vCPS :	Vector	
+fusionINSGPS_v1(in yinds . vector) . unsigned sh	art (
+undateINSGPS()	STC	
+updateSpeedZero()		
+egoVehiclePathPrediction()		
+egoVehiclePathPrediction_sim(in ppdt : float, i	n step : unsigned short)	
+setConstantMatricesINS()		
+setConstantMatricesINSGPS()		
+setDynamicMatricesINS(in dt : float)		
+setTransitionMatrix(in dt : float)		
HorminsGPSMeasVector(in yINS : Vector, in y	GPS : Vector) : Vector	
+initializeINS(In yINS : Vector) +initializeINSCPS, v1/in vINS : Vector, in vCPS	· Vector)	
+initializeEVPP()	: vector)	
tinitializeEVPP sim(in vINS : Vector in step : u	insigned short)	
+setReferencePoint(in ND : NAV_DATA*)	magness onorcy	
+transformToPEEState(in yGPS : Vector, in pv	: VEHICLE*, in ND : NAV_DATA*)	

nsformToPEEState(in yGPS : Vector, in pv : VEHICLE*, in ND : NAV_DATA*) Εικόνα 122: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού PosEgoStaEstim.dl

Βιβλιοθήκη σύνδεσης δεδομένων - DataAssociation.dll

Η associationMatrix είναι η κλάση της συγκεκριμένης βιβλιοθήκης και αντιστοιχεί στην μήτρα σύνδεσης δεδομένων που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, και πραγματοποιεί τις λειτουργίες σύνδεσης δεδομένων για 1-προς-1 και 1-προς-Ν ανάθεση. Οι γενικές λειτουργίες που προσφέρει η κλάση αυτή είναι οι:

```
//εφαρμογή αλγορίθμου πλειστηριασμού για 1-1 ανάθεση
applyAuction()
//εφαρμογή Ν-καλύτερων λύσεων για N-1 ανάθεση και υπολογισμός πιθανοτήτων
//ανάθεσης
findNbestSolutions(«αριθμός N»)
calculateAssignmentProbabilities()
getNoAssignmentProbabilities()
```

Οι εσωτερικές λειτουργίες της κλάσης αυτής περιλαμβάνονται στις παραπάνω γενικότερες και επίσης η δημιουργία των μητρών σύνδεσης δεδομένων πραγματοποιείται στην βιβλιοθήκη ιχνηλασίας Tracking.dll η οποία λειτουργεί σε συνεργασία με την DataAssociation.dll. Ακολουθεί αναλυτικός πίνακας των δυνατοτήτων της βιβλιοθήκης DataAssociation.dll.

a : Matrix subMr: MatrixCell -nSd : Matrix C : Vector -constraints : VectorCell -prob : Matrix -C : Vector -constraints : VectorCell -prob : Matrix 	associationMatrix					
Proc. Watrix - SecolationMatrix() +associationMatrix(in rows : int, in cols : int) +associationMatrix(in rows : int, in cols : int) +associationMatrix() +associationMatrix() +associationMatrix() +associationMatrix() +associationMatrix() +associationMatrix() +associationMatrix() +getNbestSolutions() : Matrix +getConstraints() : Vector +getConstraints() : VectorCell +adVector2ToVector(in a1 : Vector, in a2 : Vector) : bool +adVector2ToVector(in a1 : Vector, in a2 : Vector) : bool +adVector2ToVector(in a1 : Vector, in a2 : Vector) : bool +adVector2ToVector(in a1 : Vector, in a2 : Vector) : bool +adVector2ToVector(in a1 : Vector, in a2 : Vector) : bool +adVector2ToVector(in a1 : Vector, in a2 : Vector) : bool +adVector2ToVector(in a1 : Vector, in a2 : Vector) : bool +adVector2ToVector(in a1 : Vector, in p : finat) +printNBS() +printNProb() +printNProb() +printNProb() +printNProb() +tupdteAssociationMatrix(in newTrack : Vector, inout y : VectorCell) -excludeElement(in r : int, in c : int) -excludeElement(in r : int, in c : int) -arrangeCellConstraintsVectors(in order : Vector) -arrangeCellConstraintsVectors(in order :	-a : Matrix -subMx : MatrixCell -nSol : Matrix -C : Vector -constraints : VectorCell -prob0 : Vector					
+associationMatrix(i) +associationMatrix(in rows : int, in cols : int) +associationMatrix(in rows : int, in cols : int) +associationMatrix(i) +gelMatrix(): Matrix +gelSubMatrices(): Matrix +gelTotalBiS(): Vector +gelTotalBiS(): VectorCell +gelAssignmentProbabilities(): Vector +gelAssignmentProbabilities(): Vector +printMatrix() +printVAProb() +printVAProb() +statixtixtable(): bool +applyAuction(): Vector +findNbestSolutions(in NN : int) +calculateAssignmentProbabilities() +findNewTracks(): Vector +acludateAssignmentProbabilities() +findNewTracks(): Vector -arrangeCellSoubMatrices(in order : Vector) -arrangeCellConstraintSVectors(in order : Vector) -arrangeCellConstraintSVectors	-OK : bool -Q : unsigned short					
-crieckSolution(in aa : Matrix, in b : Vector, inout tot : int, in vconstr : Vector) -calculateSolution(in aa : Matrix, in k : int, in r : int, in currentconstr : Vector, in currentSol : Vector, in ind : int, in s : Vector, inout tot : int) -sortSolutions()	-q : unsigned short +associationMatrix() +associationMatrix(in rows : int, in cols : int) +associationMatrix(inout rhs : const associationMatrix) +~associationMatrix() +getMatrix() : Matrix +getSubMatrices() : MatrixCell +getNNBestSolutions() : Matrix +getConstraints() : Vector +getConstraints() : VectorCell +getNoAssignmentProbabilities() : Vector +getAssignmentProbabilities() : Matrix +getElement(in i : int, in j : int) : float +setMatrix(in c : Matrix) +printMatrix() +printSubMatrices() +printNBS() +printTB() +printConstr() +printNAProb() +printNAProb() +printNAProb() +printNAProb() +printNAProb() +stindNbestSolutions(in NN : int) +calculateAssignmentProbabilities() +findNewTracks() : Vector +updateAssociationMatrix(in newTrack : Vector, inout y : -excludeElement(in r : int, in c : int) -swapRowsNSOL(in order : Vector) -arrangeCellSubMatrices(in order : Vector) -arrangeCellSubMatrices(in in b : int in c : int) -arrangeCellSubMatrices(in in b : int in c : vector) -arrangeCellConstraintSVectors(in order : Vector)	() «utility»Utility +sortVector(in a : Vector) : Vector +areVectorsEqual(in a1 : Vector, in a2 : Vector) : bool +addVector2ToVector1(in a1 : Vector, in p : float) (ML::Matrix (ML::Matrix) (ML::Vector CML::VectorCell				
	-calculateSolution(in aa : Matrix, in k : int, in r : int, in curr -sortSolutions()	currentconstr : Vector, in currentSol : Vector, in ind : int, in s : Vector, inout tot :	int)			

Εικόνα 123: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού DataAssociation.dl

Βιβλιοθήκη επεξεργασίας δικτύου SRR - SRRnetFront.dll

Η διαδικασία διαχείοισης του δικτύου των αισθητήρων SRR που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο λαμβάνει χώρα με τη χρήση της βιβλιοθήκης SRRnetFront.dll με την κλάση srrFTA να αντιστοιχεί στην κοινή σειρά ιχνών με χρήση των δεδομένων και των δύο αισθητήρων. Η κλάση περιλαμβάνει τις λειτουργίες της συγχώνευσης των μετρήσεων και τις ιχνηλασίας των συγχωνευμένων μετρήσεων. Η λειτουργία έχει ως εξής:

```
oneStepSRRNetFrontProcessing(«δεδομένα των δύο αισθητήρων»)
```

Ή

combineSRRNetFrontObs(«δεδομένα των δύο αισθητήρων») generateMergedObjects(«μεταβλητές»)

Περιλαμβάνονται και λειτουργίες ιχνηλασίας με χρήση της Tracking.dll και φυσικά όπως σε όλες τις βιβλιοθήκες οι μεταβλητές και οι μαθηματικές λειτουργίες γίνονται με τη βοήθεια της CML.dll.



Εικόνα 124: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού SRRnetFront.dl

Βιβλιοθήκη επεξεργασίας μετρήσεων του σαρωτή λέιζερ - Lidar.dll

Η βιβλιοθήκη Lidar.dll οφίζει την κλάση LidarData που υποστηφίζει τις λειτουφγίες διαχωφισμού των δεδομένων του σαφωτή λέιζεφ και ανίχνευσης της γεωμετφίας του δφόμου και των κινούμενων στόχων εντός του οδικού πεφιβάλλοντος. Οι παφακάτω γφαμμές κώδικα είναι απαφαίτητες για την εξαγωγή των παφαμέτφων εκτίμησης της γεωμετφίας του δφόμου και των επεξεφγασμένων μετφήσεων του λέιζεφ τα οποία θα εισαχθούν στο σύστημα ιχνηλασίας.

getObj(«μεταβλητές»)
borderClassification(«μεταβλητές»)
reduceTTL(«μεταβλητές»)
clothoidEstimation(«μεταβλητές»)
	LidarData	
-pointsLeftX : Vector		
-pointsLeftY : Vector		
-pointsRightX : Vecto	r	
-pointsRightY : Vecto	r	
-c_0 : double		
-c_1 : double		
-offsetL : double		
-onseux : double	ŧ	
-coni : unsigneu snor	L	
-msn2 : double		«utility» Utility
-xhat : Matrix		
-xhat1 : Matrix	+max/inaut A : const Vactor) : double	
-P : Matrix	+min(inout A : const Vector) : double	
-P1 : Matrix	+veltr meas(in sigma1 : double in sigma2 : double inout R	· Matrix)
-Sz1 : Matrix	+ispoint(inout mat : const Matrix, in maxx : double, in maxy	double) : bool
-prevL : double	+ishorizontal(inout mat : Matrix, in param : double) : bool	
-previct: double	+isvertical(inout mat : Matrix, in param : double) : bool	
-Xf: double	+ismcar(inout mat : Matrix, inout mcars : Matrix, in car_ttl : u	nsigned int, in YawRate : double, in Speed : double, in ym : double, in yl : double, in yr : double, inout carout : bool) : bool
-RW : double	+getSubMatrix(inout mat : const Matrix, in r_start : unsigned	int, in r_stop : unsigned int, in c_start : unsigned int, in c_stop : unsigned int) : Matrix
-miss : int	+getMeanMatrix(inout mat : const Matrix) : double	
-del : bool	+reduce FTE(Inout mcars : Wathx)	
-falseplot : bool	+sort_borders(inout borders : const Matrix) : Matrix	
-allpnts : bool	+sort_cell(inout A : VectorCell)	
-TURN : bool	+dis ctra4sth(in sigma1 : double, in sigma2 : double, in T : (double, inout F : Matrix, inout G : Matrix, inout Q : Matrix)
-bmem : bool	+calc_matrices(inout F : Matrix, inout G : Matrix, inout Q : M	atrix, in W : double, in V : double, in PHI : double, in dt : double)
-xbl1 : double		
-xhl2 ; double		14 th Q. II
-xhl3 : double	CML::Matrix CML::Vector CML	
-xhl4 : double		
-lrightest_x : double		
-lrightest_y : double		
-riettest_x : double		
-RWheavychange - d	ouble	
-I EET · VectorCell	00010	
-RIGHT : VectorCell		
-RALLS : VectorCell		
-LALLS : VectorCell		
-Iborders : VectorCell		
-rborders : VectorCel	1	
Inoints : VectorCell		
-I NC · VectorCell		
-RNC : VectorCell		
-IObj : VectorCell		
-rObj : VectorCell		
+LidarData()		
+Initialize(in Vehicle :	Ego_State)	
+getPointsLeftX(): V	ector	
+getPointsLeftY(): V	ector	
+getPointsRightX():	Vector	
+getc 0(): double	0000	
+getc 1(); double		
+getOffsetL(): double	e	
+getOffsetR(): doubl	e	
+getConf() : unsigned	d short	
+getXhat1() : Matrix		
+getXhat(): Matrix		
+getP(): Matrix		
+getSz1(): Matrix		
+getObj(in Lidar : LID	ARdata, in Vehicle : Ego_State, inout mcars : Matrix)	
+borderClassification	(in Vehicle : Ego_State, in dt : double)	
+clothoidEstimation(i	n Vehicle : Ego_State, in dt : double, in scan : unsigned int)	

Εικόνα 125: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού Lidar.dl

Βιβλιοθήκη συναρτήσεων ιχνηλασίας - Tracking.dll

Η βιβλιοθήκη Tracking.dll περιλαμβάνει τις λειτουργίες ιχνηλασίας για τις διάφορες περιπτώσεις αισθητήρων και διανυσμάτων κατάστασης και μετρήσεων όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3. Οι λειτουργίες αυτές είναι οι ακόλουθες και είναι αρκετές για την εκτέλεση ενός βήματος του αλγορίθμου ιχνηλασίας:

```
onestepTrackingGNNLRR1 («μεταβλητές»)
onestepTrackingJPDALRR1 («μεταβλητές»)
onestepTrackingGNNLRR2 («μεταβλητές»)
onestepTrackingJPDALRR2 («μεταβλητές»)
onestepTrackingGNNLSC («μεταβλητές»)
```

Οι ενδείξεις GNN και JPDA αντιστοιχούν στις δύο ομώνυμες μεθόδους σύνδεσης δεδομένων που ακολουθούνται από τον αλγόριθμο ιχνηλασίας. Οι ενδείξεις LRR1 και LRR2 αντιστοιχούν στα διανύσματα μετρήσεων σε πολικές συντεταγμένες το πρώτο και σε καρτεσιανές συντεταγμένες θέσης και ακτινική ταχύτητα το δεύτερο, το LSC συμβολίζει τη συνάρτηση ιχνηλασίας για τα επεξεργασμένα δεδομένα του σαρωτή λέιζερ.

	trackAr	тау				
-xhat : VectorCell						
-P : MatrixCell						
-ID : VectorCell						
-C : Matrix						
-Sz : Matrix						
-A : Matrix						
-SW : Mathx						
-conftracks : vectorcell						
-confid : VectorCell						
-tID : int						
+trackArrav()						
+trackArray(in v1 : Vector, in v2 : Matrix, in v3 : Vector)					
+trackArray(in v1 : VectorCell, in v2 : MatrixCell, in v3	VectorC	ell)				
+trackArray(inout rhs : const trackArray)						
+~trackArray()				autilitus litilitus		
+resetTrackArray()				«uunity»Ounty		
+getStateVector(in pos : int) : Vector						
+getCovMatrix(in pos : int) : Matrix		+Find	Ghosts(in y : VectorC	ell, in NoS : Vect	tor) : VectorCell	
+getiDivector(in positint); vector +getNumberOfAllTracks(); int		+GHn	nin(in D : Vector, inout	t dmin : double, i	inout I : int)	
+getNumberOfConfirmedTracks() · int		+Occi	ultationElimination(in >	chat : VectorCell,	, in ID : VectorCe	ell) : Vector
+getConfStateVector(in pos ; int) : Vector						
+getConfCovMatrix(in pos : int) : Matrix	CML::Ma	atrix	CML::MatrixCell	CML::Vector	CML::VectorCe	HI.
+getConfIDVector(in pos : int) : Vector	Official and			On L. Footor		
+getStateVectors() : VectorCell						
+getCovMatrices() : MatrixCell						
+getIDVectors(): VectorCell						
+getConfStateVectors(): VectorCell						
+getContCovMatrices(): MatrixCell						
+getConfldNumber(in pos : int) : int						
+printStateVectors()						
+printCovMatrices()						
+printIDVectors()						
+onestepTrackingGNNLRR1(in dt : float, in scan : uns	igned sho	rt, inou	ut y : VectorCell)			
+onestepTrackingJPDALRR1(in dt : float, in scan : uns	signed she	ort, ina	ut y : VectorCell)			
+onestepTrackingGNNLRR2(in dt : float, in scan : uns issestepTracking IDDAL DD2/in dt : float, in scan : uns	igned sho	rt, inol	ut y : VectorCell)			
<pre>+onestepTrackingJPDALRR2(in at : float, in scan : unsid +onestepTrackingCNNLSC(in dt : float, in scan : unsid</pre>	signed short	inout	ut y : VectorCell)			
+convTrackArrav(in x · VectorCell in n · MatrixCell in	id · Vecto	rCellì	y. vectorcell)			
+setStateVector(in x : Vector, in i : unsigned short)	10.10010	0011				
+setIDVector(in id : Vector, in i : unsigned short)						
+setCovMatrix(in m : Matrix, in i : unsigned short)						
+reformulateState()						
+arrangeIDS(in startID : unsigned short)						
-setDynamicMatricesCA(in dt : float)						
-setDynamicMatricesCA_LSC(in dt : float)	and chort)					
-initializeOneTrackLRR1(in y : vectorCell, in scan : unsign- -initializeOneTrackLRR1(inout tempTA : trackArray, in	v · Vector	in ec	an : unsigned short)			
-initializeOne frackEr(r(inducter)) A trackeray, in	ned short)	, mac	an . unaigneu snort)			
-initializeOneTrackLRR2(inout tempTA : trackArray, in	v : Vector	r. in sc	an : unsigned short)			
initializeTracksLSC(in y : VectorCell, in scan : unsigned	ed short)	,	ant anoigned enerty			
-initializeOneTrackLSC(inout tempTA : trackArray, in v	: Vector,	in sca	n : unsigned short)			
-createAssociationMatrix(in y : VectorCell) : Matrix						
-createAssociationMatrixLRR1(in y : VectorCell) : Matrix						
-createAssociationMatrixLRR2(in y : VectorCell) : Matrix						
-createAssociationMatrixLSC(in y : VectorCell) : Matrix	<					
-kalmanPrediction(in y : VectorCell, in assign : Vector) -extKalmanPrediction(IRP1(in y : VectorCell, in assign	· Vector)					
-extKalmanPredictionLKR1(in y : VectorCell, in assign : Vector)						
-extKalmanPredictionCRR2(in v : VectorCell, in assign : Vector)						
-extKalmanPredictionLSC(in y : VectorCell, in assign :	Vector)					
-calcKalmanParamJPDA(inout res : VectorCell, inout v	wsr : Vecto	orCell,	in prob : Matrix, in y :	VectorCell)		
-kalmanPredictionJPDA(in y : VectorCell, in res : Vector	orCell, in v	wsr:V	ectorCell, in prob0 : V	ector, in prob : N	Matrix)	
 extkalmanPredictionJPDALRR1(in y : VectorCell, in restaurce) 	es : Vecto	rCell, i	in wsr : VectorCell, in	prob0 : Vector, i	n prob : Matrix)	
 extkalmanPredictionJPDALRR2(in y : VectorCell, in result participation) 	es : Vecto	rCell, i	in wsr : VectorCell, in	prob0 : Vector, i	n prob : Matrix)	
-trackDeletion(inout pos : int, inout assign : Vector)						
-trackDereuona=DA(inout pos : int, inout proo : matrix)						
-trackManagement1(inout assign : Vector)						
-trackManagementJPDA(inout prob : Matrix)						
-findConfirmedTracks()						

Εικόνα 126: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού Tracking.dl

Βιβλιοθήκη για κυκλική σύντηξη δεδομένων - ALLFusion.dll

Η βιβλιοθήκη ALLFusion.dll πεφιλαμβάνει τις λειτουργίες της κυκλικής σύντηξης δεδομένων για το οχημα FIAT-INSAFES. Η βασική λειτουργία της κλάσης fusedObjArray διαχειρίζεται τις έξι σειρές ιχνών του συστήματος ως εξής:

```
fuseINSTrackArrays(taLR_R,taLR_F,taSR_F,taSR_L,taSR_R,taBS)
```

όπου taLR_R η σειρά ιχνών του πίσω LRR, taLR_F η σειρά ιχνών του μπροστά LRR, taSR_F η σειρά ιχνών του μπροστά δικτύου αισθητήρων SRR, taSR_L η σειρά ιχνών του αριστερά δικτύου SRR, taSR_R η σειρά ιχνών του δεξιά δικτύου SRR, taBS η σειρά ιχνών που προκύπτουν από τις ανιχνεύσεις των καμερών τυφλών περιοχών (blind spots).

fus	edObjArray
-xFUS : VectorCell	
-pFUS : MatrixCell	
-IDFUS : VectorCell	
-FO_IDS : VectorCell	
-tFID : int	
+fusedObjArray()	
+fusedObjArray(inout rhs : const fusedObjArray)	
+~fusedObjArray()	
+resetfusedObjArray()	
+getObjectState(in pos : int) : Vector	
+getObjectCov(in pos : int) : Matrix	
+getObjectIDVector(in pos : int) : Vector	
+getObjectsNumber() : int	
+fuseINSTrackArrays(inout xLRR_R : trackArray, inout xLRR_F : trackArray, inout xSR	R_F : trackArray, inout xSRR_L : trackArray, inout xSRR_R : trackArray, inout xBS : trackArray)
+copyObjectsArray(in x : VectorCell, in p : MatrixCell, in id : VectorCell)	
+avoidIdDuplication()	
+deleteObject(inout ii : unsigned short, in I : unsigned short)	
+deleteObject1(inout ii : unsigned short)	
«utility» Utility	
+FUSSNLID : VectorCell	1
+didSNL : int = 2000	
+SpatialAlianment(in state : Vector, in COOPD : Vector, in CS : Vector) : Vector	-
TimeAlignment/input SOLIT: Vector, input POLIT: Matrix, in deltaTime : float)	
+calcDistance(in x1 : double, in x1 : double, in x2 : double, in x2 : double) : double	
+fuseFrontRadars(inout tracksLR : trackArray, inout tracksSR : trackArray)	
External Classes::trackArray CML::Matrix CML::MatrixCell	CML::Vector CML::VectorCell

Εικόνα 127: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού ALLFusion.dl

Βιβλιοθήκη για σύντηζης δεδομένων επιπέδου ιχνών - TLFusion.dll

Η βιβλιοθήκη TLFusion.dll πραγματοποιεί τις λειτουργίες της πολυδιάστατης σύντηξης δεδομένων όπως αυτή παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5. Η fusedObjects είναι η κεντρική κλάση της βιβλιοθήκης η οποία υλοποιεί τις συναρτήσεις λειτουργίας του συστήματος του πειραματικού οχήματος VOLVO-ProFusion2

```
fuseSRRNLRR(«μεταβλητές»)
fuseAllPF(«μεταβλητές»)
checkFinalObjects(«μεταβλητές»)
```

Η πρώτη συνάρτηση χειρίζεται τη σύντηξη των ιχνών του δικτύου των αισθητήρων ραντάρ κοντινού πεδίου με τα ίχνη του ραντάρ μακρινού πεδίου. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι κοινή στα συστήματα VOLVO-ProFusion2 και VOLVO-INSAFES. Η δεύτερη λειτουργία χρησιμεύει στην σύντηξη της εξόδου της πρώτης με τα ίχνη του σαρωτή λέιζερ. Ενώ η τελευταία πραγματοποιεί του τελικούς ελέγχους των αποτελεσμάτων της τελικής σύντηξης δεδομένων.

fusedObjects -fusState : VectorCell -fusID : VectorCell -snlState : unsigned short -didSNL : unsigned short -didFUS : unsigned short +fusedObjects() +fusedObjects() +resetFusedObjects() +resetFusedObjects() +getObjectSo(in pos : int) : Vector +getObjectSo(in pos : int) : Vector +getObjectSourinper() : int +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Vector	fusedObjects State : VectorCell SCov : MatrixCell SID : VectorCell ISID : VectorCell IState : VectorCell ICov : MatrixCell IID : VectorCell ISSNLID : VectorCell ISSNLID : VectorCell ISNL : unsigned short IFUS : unsigned short sedObjects()		
-fusState : VectorCell -fusD : VectorCell -fusID : VectorCell -snlState : VectorCell -snlState : VectorCell -snlD : VectorCell -fUSSNLID : VectorCell -didSNL : unsigned short -didFUS : unsigned short +fusedObjects() +fusedObjects() +fusedObjects() +resetFusedObjects() +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectCov(in pos : int) : Vector +getObjectCov(in pos : int) : Vector +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int	sState : VectorCell sCov : MatrixCell sID : VectorCell ISID : VectorCell IState : VectorCell ICov : MatrixCell IID : VectorCell ISSNLID : VectorCell ISNL : unsigned short IFUS : unsigned short sedObjects()		
-fusCov : MatrixCell -fusID : VectorCell -FUSID : VectorCell -snlState : VectorCell -snlD : VectorCell -snlD : VectorCell -FUSSNLID : VectorCell -fusedObjects() +fusedObjects() +rusedObjects() +resetFusedObjects() +resetFusedObjects() +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	sCov : MatrixCell sID : VectorCell ISID : VectorCell IState : VectorCell ICov : MatrixCell IID : VectorCell ISSNLID : VectorCell ISNL : unsigned short IFUS : unsigned short sedObjects()		
-fusID : VectorCell -FUSID : VectorCell -snlState : VectorCell -snlD : VectorCell -snlD : VectorCell -fUSSNLID : VectorCell -didSNL : unsigned short -didFUS : unsigned short -didFUS : unsigned short +fusedObjects() +fusedObjects(inout rhs : const fusedObjects) +~fusedObjects(inout rhs : const fusedObjects) +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectDVector(in pos : int) : Vector +getObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	sID : VectorCell JSID : VectorCell IState : VectorCell ICov : MatrixCell IID : VectorCell ISSNLID : VectorCell ISSNL : unsigned short IFUS : unsigned short sedObjects()		
-FUSID : VectorCell -snlState : VectorCell -snlD : VectorCell -fUSSNLD : VectorCell -didSNL : unsigned short -didFUS : unsigned short +fusedObjects() +fusedObjects() +resetFusedObjects() resetFusedObjects() resetFusedObjects() regetObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectCov(in pos : int) : Matrix +getObjectCov(in pos : int) : Vector +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Matrix +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLLOwider() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	JSID : VectorCell IState : VectorCell ICov : MatrixCell IID : VectorCell ISSNLID : VectorCell ISNL : unsigned short IFUS : unsigned short sedObjects()		
-snlState : VectorCell -snlD : VectorCell -FUSSNLID : VectorCell -fUSSNLID : VectorCell -didSNL : unsigned short -didFUS : unsigned short +fusedObjects() +fusedObjects() +resetFusedObjects() yeetObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectCov(in pos : int) : Vector +getObjectCov(in pos : int) : Vector +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLLOurder() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	IState : VectorCell ICov : MatrixCell IID : VectorCell ISSNLID : VectorCell ISSNL : unsigned short IFUS : unsigned short sedObjects()		
-snlCov : MatrixCell -snlID : VectorCell -FUSSNLID : VectorCell -didSNL : unsigned short -didFUS : unsigned short +fusedObjects() +fusedObjects() +~fusedObjects() +resetFusedObjects() +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectDVector(in pos : int) : Vector +getObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	ICov : MatrixCell IID : VectorCell ISSNLID : VectorCell ISNL : unsigned short IFUS : unsigned short sedObjects()		
-snllD : VectorCell -FUSSNLD : VectorCell -didSNL : unsigned short -didFUS : unsigned short +fusedObjects() +fusedObjects(inout rhs : const fusedObjects) +~fusedObjects() +resetFusedObjects() +resetFusedObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectDVector(in pos : int) : Matrix +getObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	IID : VectorCell ISSNLID : VectorCell ISNL : unsigned short IFUS : unsigned short sedObjects()		
-FUSSNLID : VectorCell -didSNL : unsigned short -didFUS : unsigned short +fusedObjects() +fusedObjects(inout rhs : const fusedObjects) +~fusedObjects() +resetFusedObjects() +resetFusedObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectDVector(in pos : int) : Vector +getObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getSNLCav(in pos : int) : Vector +getSNLCav(in pos : int) : Matrix +getSNLCav(in pos : int) : Matrix +getSNLCav(in pos : int) : Vector +getSNLCav(in pos : int) : Vector +getSNLCav(in pos : int) : Vector +getSNLCav(in pos : int) : Vector +getSNLLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	JSSNLID : VectorCell JSNL : unsigned short JFUS : unsigned short sedObjects()		
-didSNL : unsigned short -didFUS : unsigned short +fusedObjects() +fusedObjects() +~fusedObjects() +resetFusedObjects() +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectCov(in pos : int) : Vector +getObjectsNumber() : int +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLOv(in pos : int) : Matrix +getSNLOv(in pos : int) : Vector +getSNLOv(in pos : int) : Vector +getSNLOv(in pos : int) : Vector +getSNLOv(in pos : int) : Vector +getSNLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	ISNL : unsigned short IFUS : unsigned short sedObjects()		
-didFUS : unsigned short +fusedObjects() +fusedObjects() +~fusedObjects() +resetFusedObjects() +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectCov(in pos : int) : Vector +getObjectSNumber() : int +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	IFUS : unsigned short sedObjects()		
+fusedObjects() +fusedObjects(inout rhs : const fusedObjects) +~fusedObjects() +resetFusedObjects() +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectCov(in pos : int) : Vector +getObjectSNumber() : int +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	sedObjects()		
+fusedObjects(inout rhs : const fusedObjects) +~fusedObjects() +resetFusedObjects() +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectCov(in pos : int) : Vector +getObjectSNumber() : int +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)		7	
+~fusedObjects() +resetFusedObjects() +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getObjectsNumber() : int +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	sedObjects(inout rhs : const fusedObjects)		
+resetFusedObjects() +getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectCov(in pos : int) : Matrix +getObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	usedObjects()		
+getObjectState(in pos : int) : Vector +getObjectCov(in pos : int) : Matrix +getObjectDVector(in pos : int) : Vector +getObjectsNumber() : int +getSNLCov(in pos : int) : Vector +getSNLObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getSNLDVector(in pos : int) : Vector +getSNLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	setFusedObjects()		
+getObjectCov(in pos : int) : Matrix +getObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getObjectsNumber() : int +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getSNLDVector(in pos : int) : Vector +getSNLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	etObjectState(in pos : int) : Vector		
+getObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getObjectsNumber() : int +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getSNLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	etObjectCov(in pos : int) : Matrix		
+getObjectsNumber() : int +getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLOUPdetor(in pos : int) : Vector +getSNLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	atObjectIDVector(in pos : int) : Vector		
+getSNLState(in pos : int) : Vector +getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLOUDVector(in pos : int) : Vector +getSNLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	atObjectsNumber() : int		
+getSNLCov(in pos : int) : Matrix +getSNLObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getSNLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	etSNLState(in pos : int) : Vector		
+getSNLObjectIDVector(in pos : int) : Vector +getSNLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	etSNLCov(in pos : int) : Matrix		
+getSNLNumber() : int +fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	etSNLObjectIDVector(in pos : int) : Vector		
+fuseSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)	atSNLNumber() : int		
	seSRRNLRR(inout tracksSR : trackArray, inout tracksLR : trackArray)		
+fuseAlIPF(inout tracksLS : trackArray)	seAllPF(inout tracksLS : trackArray)		
+checkFinalObjects(in lidar : LidarData, in speed : float, in scan : unsigned short)	eckFinalObjects(in lidar : LidarData, in speed : float, in scan : unsigned short)		
+copyObjectsArray(in x : VectorCell, in p : MatrixCell, in id : VectorCell)	pyObjectsArray(in x : VectorCell, in p : MatrixCell, in id : VectorCell)		
+deleteObject(inout ii : int, in I : unsigned short)	eleteObject(inout ii : int, in I : unsigned short)		
		_	
«utility»Utility	«utility» Utility		
+get_distance(in x1 : double, in y1 : double, in x2 : double, in y2 : double) : double	_distance(in x1 : double, in y1 : double, in x2 : double, in y2 : double) : double	1	
+get_max(in x1 : double, in x2 : double) : double	(_max(in x1 : double, in x2 : double) : double		
+get_min(in x1 : double, in x2 : double) : double	_min(in x1 : double, in x2 : double) : double		
+belongto(in x2 : double, in y2 : double, in x10 : double, in x11 : double, in y10 : double, in y11 : double) : bool	ongto(in x2 : double, in y2 : double, in x10 : double, in x11 : double, in y10 : d	ouble, in y11 : double) : bool	
CML::Matrix CML::MatrixCell CML::Vector CML::VectorCell External Classes::LidarData External Classes::trac	LeMatrix CMLeMatrixCell Four states Four states and four	vternal Classes I idarData	External Classes::trackArray

Εικόνα 128: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού TLFusion.dl

Βιβλιοθήκη για σύντηζης δεδομένων επιπέδου ιχνών - RoadBorders.dll

Η βιβλιοθήκη RoadBorders.dll αποτελείται από την κλάση roadBorders. Περιλαμβάνει τις λειτουργίες που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.3. Η γεωμετρική και η πιθανοτική μέθοδος ανάθεσης πραγματοποιούνται με τις δύο ακόλουθες λειτουργίες αντίστοιχα. Οι λειτουργίες αυτές ενσωματώνουν όλες τα βήματα επεξεργασίας που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3, με εκτέλεση ανά σάρωση όπως σε όλες τις βιβλιοθήκες που περιγράφονται.

```
trackingProcessGeom(«μεταβλητές»)
trackingProcessProb(«μεταβλητές»)
```

roadBorders
xhat : CMLVector
-P : CMLMatrix2D
-LB : CMLCurve
-RB : CMLCurve
-prevL : double
-prevR : double
-RW : double
-miss : int
-del : bool
-nl : int
-nr : int
-xhatV : CMLVector
+roadBorders()
+roadBorders(in lbor : int, in rbor : int)
+roadBorders(inout rhs : const roadBorders)
+~roadBorders()
+gelStateVector() : CMLVector
+getLeftBorders() : CMLCUrve
+getRightBorders(): CMLCurve
+getLSize(): int
+getRSize(): int
+getCurvature(): double
+getRateOfCurvature(): double
+getLeftOffset(): double
+getRightOffset(): double
+getRoadWidth() : double
+GetCovarianceMatrix(): CMLMatrix2D
+pontStateVector()
+pnnLettBorders()
+pnntkightBorders()
+setVehicleParameters(in VEL : double, in DPHI : double)
+tracking+rocessUseom(in allData : CMLCurve, in K ; int, in dt : hoat)
+tracking+rocessProb(in allData : CMLCurve, in K : int, in dt : Ttoat)
-createBorderData(in allData : CMLCurve, inout LEFT: CMLCurve, inout RGHT: CMLCurve)
-createBorderDataProo(in allData : CMLCurve, inout LEFT : CMLCurve, inout RIGHT : CMLCurve)
-createBorderChain(indui Bork : CMICUIVe), in data : CMICUIVe) -createBorderChain(indui Bork : CMICUIVe), in data : CMICUIVe) -createBorderChain(indui Bork : CMICUIVe), in data : CMICUIVe)
-carculaterrocessmainces(infour Q : CMLMainx2D, infour F : CMLMainx2D, infour G : CMLVector, in V : double, in V : double, in CH : infour Q : CMLMainx2D, infour G : CMLMainx2D, infour
-producemeasurement/vector/inout 2 : UME vector, inout EX : UME vector, inout EX : UME vector, in EX : UME
produceweasurement aremistrioumout a concession, induit in concession, induit a concession in the concession, in the concession in the con
policialementation enterination destinout m. commanizazi, nout
Panian menusurina . Garavesa, n.m. Garavesa, n.m. Garavesa, n.e Garavesa, n.e Garavesa, n.e Garavesa,
autilityslitiity

samy ouncy			
+sortCurve(in C : CMLCurve) : CMLCurve			
+addPointToCurve(inout C : CMLCurve, in x : double, in y : double)			
+addElementToVector(inout V : CMLVector, in el : double)			
+distance(in x1 : double, in y1 : double, in x2 : double, in y2 : double) : double			
+mean(in V : CMLVector) : double			
+RBmin(in V : CMLVector) : double			
+getScaleVector(in step : double, in end : double) : CMLVector			
+addVectors(in V1 : CMLVector, in V2 : CMLVector) : CMLVector			
+addMatrices(in MX1 : CMLMatrix2D, in MX2 : CMLMatrix2D) : CMLMatrix2D			
+calcYCoordinates(in XX : CMLVector, in curv : double, in curvRate : double, in offset : double) : CMLVector			
External Classes::CMLCurve External Classes::CMLMatrix2D External Classes::CMLVector			

Εικόνα 129: Μεταβλητές και λειτουργίες της βιβλιοθήκης λογισμικού RoadBorders.dl

Σύνολική Βιβλιογραφία

<u>Επιστημονικά Βιβλία</u>

- David L. Hall, Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion, Artech House, Boston-London, 1992.
- K. G. Gauss, Theoria Motus Corporum Coelestium, 1809.
- Y. Bar-Shalom, X.-Rong Li, T. Kirubarajan, Estimation with applications to tracking and navigation, John Willey & Sons, 2001.
- S.S. Blackman, R. Popoli, Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Norwood, MA: Artech House, 1999.
- B. Ristic, S. Arulampalam, Beyond the Kalman Filter: Particle filters for tracking applications, N. Gordon, Artech House, Boston, 2004.
- L. Vlacic, M. Parent, F. Harashima, Intelligent Vehicle Technologies: Theory and applications, Butterworth Heinemann, 2001
- Bar-Shalom Y. Blair W. D., "Multitarget Multisensor Tracking: Applications and Advances", Volume III, Artech House, 2001
- Bertsekas D. P., "Linear Network Optimization: Algorithms and Codes, Cambridge MA: The MIT Press, 1992.
- Musso, N. Oudjane, F. LeGland, "Improving regularized particle filters", in Sequential Monte Carlo Methods in Practice (A. Doucet, n. de Freitas and N.J. Gordon, eds.), New York: Springer, 2001

Άρθρα σε ειδικές επιστημονικές εκδόσεις

- M. Schwarzinger, D. Noll, W. von Seelen, Object Recognition with Constrained Elastic Models, Special Issue on Network, Control, Communication and Computing Technologies for Intelligent Transportation Systems, S.M. Amin, A. Garcia-Ortiz, J.R. Wootton (eds.), Mathematical and Computer Modelling 22:4-7 (1995), pp. 163-184.
- Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances, Volume III, Chapter 2: Survey of Assignment Techniques for Multitarget Tracking, K. R. Pattipati, R. L. Popp, T. Kirubarajan Y. Bar-Shalom, W. D. Blair Editors, Artech House, Boston-London, 2000.
- S. Julier and J. Uhlmann, Handbook of Multisensor Data Fusion, 2001, edited by D. Hall and J. Llinas, Chapter 12, General Decentralized Data Fusion with Covariance Intersection (CI).

<u>Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά</u>

- D. Bertsekas, Auction Algorithms for Network Flow Problems: A Tutorial Introduction, Journal of Computational Optimization and its Applications, May 1992.
- Castanon D. A., New Assignment Algorithms for Data Association", Proc.SPIE, Vol. 1698, 1992, pp. 313-323
- Chong C. Y., Mori S., Barker W. H., Chang K. C., "Architectures and Algrithms for Track Association and Fusion", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 15, No. 2, Issue 1, January 2000, pp. 5-13.
- D. Koller, K. Daniilidis, H. Nagel, Model-based object tracking in monocular image sequences of road traffic scenes, Int. J. Computer Vision, vol. 10, pp. 257–281, 1993
- D. Lerro, Y. Bar-Shalom, Tracking with debiased consistent converted measurements versus EKF, IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems 29 (3) (July 1993) 1015-1022.
- D. Musicki, R. J. Evans, and S. Stankovic. "Integrated Probabilistic Data Association", *IEEE Trans. Auto. Control*, Vol. 39, no. 6, pp. 1237–1241, June 1994.
- Deb S., Yeddanapudi M., Pattipati K., Bar-Shalom Y., "A Generalized S-D Assignment Algorithm for Multisensor-Multitarget State Estimation", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-33, No. 2, April 1997, pp. 523-538
- Dickmanns, E., Mysliwetz B., "Recursive 3-D Road and Relative Ego-State Recognition", Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence", Vol. 14, No. 2, February, 1998
- Doucet, S. Godsill, C. Andrieau, "On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering", Statistics and Computing, vol. 10, mo. 3, pp.197-208, 2000.
- F. Gustafsson, F. Gunnarsson, N. Bergman, U. Forssell, J. Jansson, R. Karlsson, P. Nordlund, *Particle Filters for Positioning, Navigation and Tracking*, IEEE Transactions on Signal Processing, Special issue on Monte Carlo methods for statistical signal processing.

- Fisher M. L., "The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems", Management Science, Vol. 27, No. 1, 1981, pp. 1-18
- G. L. Foresti, V. Murino, C. Regazzoni, Vehicle Recognition and Tracking from Road Image Sequences, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 48, No. 1, January 1999
- H. Chen, T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom, Performance limits of track-to-track fusion vs. centralized estimation: theory and application, In IEEE transactions on Aerospace and Electronics Systems, volume 39, issue 2, pages 386–400, April 2003.
- J. Uhlmann, Covariance Consistency Methods for Fault-Tolerant Distributed Data Fusion, Information Fusion 4, p. 201-215, 2003.
- J.B. Gao, C.J. Harris, Some remarks on Kalman filters for the multisensor fusion, In Information Fusion, volume 3, issue 3, pages 191–201, September 2002.
- Jonker R., Volgenant A., "A Shortest Augmenting Path Algorithm for Dense and Sparse Linear Assignment Problems", J. Computing, Vol. 38, 1987, pp. 325-340
- Kato, T., Ninomiya, Y., Masaki, I., "An obstacle detection method by fusion of Radar and Motion Stereo", IEEE Trans. on Intel. Transp. Systems, Sept. 2002, Vol.3
- Kuehnle, Symmetry-Based Recognition of Vehicle Rears, Pattern Recognition Letters 12 (1991), pp. 249-258
- Lerro, Y. Bar-Shalom, Tracking with debiased consistent converted measurements versus EKF, IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems 29 (3) (July 1993) 1015-1022.
- Llinas J., Hall D. L., "An introduction to Multi-sensor Data Fusion", IEEE, Proceedings of the IEEE, Vol. 85, Issue 1, January 1997, pp. 6-23
- M. Pitt, N. Shephard, *Filtering via simulation: Auxiliary particle filters,* Journal of the American Statistical Association, Vol. 94, No. 446, pp. 590-599, 1999
- M. Xie, L. Trassoudaine, J. Alizon and J. Gallice, Road Obstacle Detection and Tracking by an Active and Intelligent Sensing Strategy, Machine Vision and Applications, Vol. 7, pp. 165-177, 1994
- Malkoff D. B., "Evaluation of Jonker-Volgenant-Castanon (JVC) Assignment Algorithm for Track Association", Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition VI, Proc SPIE, Vol. 3068, April 1997, pp. 228-239
- N. J. Gordon, D. J. Salmond, A. F. M. Smith, Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation, IEE Proc.-F, Vol. 140, No. 2, pp. 107-113, 1993.
- Pattipati K. R., Bar-Shalom Y., "A New Relaxation Algorithm and Passive Sensor Data Association", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 37, No. 2, February 1992, pp. 197-213
- Polychronopoulos, A. Amditis, N. Floudas, H. Lind, "Integrated object and road borders tracking using 77GHz automotive radars", IEE Proc.-Radar Sonar Navig., Vol. 151, No. 6, December 2004, pp. 375-381.
- Poore A. B., Gadaleta S., "Some assignment problems arising from multiple target tracking", Mathematical and Computer Modelling, Vol. 45, Issues 9-10, May 2006, pp1074-1091
- Poore A. B., Robertson A. J., "A New Lagrangian Relaxation Based Algorithm for a Class of Multidimensional Assignment Problems", Computational Optimization and Applications, Vol. 8, No. 2, September 1997, pp. 129-150
- Poore A., Rijavec N., "Multitarget tracking, Multidimensional Assignment Problems, and Lagrangian Relaxation", Proc. SDI Panels on Tracking, August 1991, pp. 51-74
- R.A. Singer and A.J. Kanyuck, Computer Control of Multiple Site Track Correlation, Automatica, 7:455 462, 1971.
- R.E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", Trans. ASME, J. Basic Engineering, vol. 82, pp. 34-35, Mar. 1960.
- S. Julier, J. Uhlmann, H.F. Durrant-White, "A new method for nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators", IEEE Trans. Automatic Control, vol. 33, pp. 780-783, March 2000.
- S. M. Smith, J. M.Brady, ASSET-2: Real-time motion segmentation and object tracking, IEEE Trans. PAMI, Vol. 17, No. 8, pp. 814-820, 1995
- S.E. Shladover, C.A. Desoer, J.K. Hedrick, M. Tomizuka, J. Walrand, W.-B. Zhang, D.H. McMahon, H. Peng, S. Sheikholeslam, N. McKeown, Automatic Vehicle Control Developments in the PATH Program, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 40, No. 1, February 1991, pp.114-130
- Steinberg, A.N., Bowman, C.L., and White, F.E., "Revisions to the JDL Data Fusion Model", in Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications, Proceedings of the SPIE, Vol. 3719, 1999
- T. Zielke, M. Brauckmann, W. von Seelen, Intensity and Edge-Based Symmetry Detection with an Application to Car-Following, CVGIP: Image Understanding 58 (1993), pp. 177-190.
- U. Franke, D. Gavrila, S. Gorzig, F. Lindner, F. Paetzold, C. Wohler, Autonomous Driving Approaches Downtown, IEEE Intelligent Systems, Vo. 13, Nr. 6, pp. 1-14, 1999

- W.D. Jones, Keeping cars from crashing, cover article IEEE SPECTRUM, September 2001
- Y. Bar-Shalom, L. Campo, "The effect of the common process noise on the two-sensor fused-track covariance", IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-22, Nov. 1986, pp. 803-805.
- Y. Bar-Shalom, On the Track-to-Track Correlation Problem, On IEEE Transactions on Automatic Control, TAC 26(2):571-572, Apr 1981.
- Amditis, A. Polychronopoulos, N. Floudas, L. Andreone, "Fusion of infrared Vision and Radar for estimating the lateral dynamics of obstacles", (Elsevier) Information Fusion, Vol. 6, Issue 2, June 2005, pp. 129-141.

Ανακοινώσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια

- Amditis, A. Polychronopoulos, A. Sjögren, M. Miglietta, Integrated lateral and longitudinal support functions: INSAFES project, 10th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, Germany, 25 27 April 2006
- Amditis, N. Floudas, A. Polychronopoulos, *Lateral motion tracking of automobiles*, in Proc. of the ISIF 7th International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, 28/06-01/07 2004, pp. 768-774.
- B. Steux, C. Laurgeau, L. Salesse, D.Wautier, Fade: A Vehicle Detection and Tracking System Featuring Monocular Color Vision and Radar Data Fusion, IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Versailles, France, June 18-20, 2002, paper IV-85.
- Beauvais, M., Lakshmann, S., "CLARK: an heterogeneous sensor fusion method for finding lanes and obstacles", Proc. IEEE Conference on Intelligent Vehicles, 1996.
- C. Blanc, L. Trassoudaine, J. Gallice, EKF and Particle Filter Track to Track Fusion: a Quantitative Comparison from Radar/Lidar Road Obstacle Tracks, Proc. of the Eight International Conference on Information Fusion, Philadelphia, PA USA, July 25- 29, 2005, paper D10-2.
- C. Blanc, L. Trassoudaine, Y. LeGuilloux, R. Moreira, Track to track fusion applied to road obstacle detection, In ISIF Seventh International conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, June 28–1st July 2004
- C. Coue, Th. Fraichard, P. Bessiere and E. Mazer, Using Bayesian Programming for Multi-Sensor Multi-Target Tracking in Automotive Applications, Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipai, Taiwan, May 12-17, 2003
- C. Hartzstein, 76 GHz Radar Sensor for Second Generation ACC, ATA, vol. 55, no. 11/12, pp. 408-416, Nov-Dec 2002.
- C. Hoffmann, Fusing multiple 2D visual features for vehicle detection, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, paper 11-2, pp.406-411.
- Cabani, G. Toulminet, A. Bensrhair, A Fast and Self-adaptive Color Stereo Vision Matching; a first step for Road Obstacle Detection, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, paper 3-5
- Chen L., Arambel P. O., Mehra R. K., "Fusion under Unknown Correlation-Covariance Intersection as a Special Case", Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion, Vol. 2, 2002, pp. 905-915
- Chiafair D. F., Blair W. D., West P. D., "Implementation of a 3-D Assignment Algorithm in Matlab", IEEE, Proceedings of the Southeastern Symposium on System Theory, 2004, pp. 200-204
- D. Gruyer, M. Mangeas, R. Alix, Multi-sensors fusion approach for driver assistance systems, IEEE International Workshop on robot and Human Interactive Communication, 2001.
- D. Wetzel, H. Niemann, S. Richter, A Robust Cognitive Approach to Traffic Scene Analysis, Proc. Second IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Sarasota, Florida, 5.-7.12.1994, pp. 65-72.
- D. Willersinn, W. Enkelmann, Robust obstacle detection and tracking by motion analysis, In Proc. of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 1997, pp. 717-722
- D.T. Linzmeier, M. Skutek, M. Mekhaiel, K.C.J. Dietmayer, A Pedestrian Detection System based on Thermopile and Radar Sensor Data Fusion, Proc. of the 8th Eight International Conference on Information Fusion, Philadelphia, PA USA, July 25- 29, 2005, paper D9-2
- Dellaert, F., Pomerleau, D., Thorpe, C., "Model-Based Car Tracking Integrated with a Road-Follower", Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, 16-20 May 1998, Vol. 3, pp. 1889 -1894.
- E. D. Dickmanns, R. Behringer, C. Briidigam, D. Dickmanns, F. Thomanek, V. v. Bolt, An All-Transputer Visual Autobahn-Autopilot/Copilot, Fourth International Conference on Computer Vision -ICCV '93, May 11-14, 1993, Berlin, Germany, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos/CA, 1993, pp. 608-615.
- E. Lemaire, E.M. El Koursi, P. Deloof, J.-P. Ghys, Safety Analysis of a Frontal Collision Warning System, IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Versailles, France, June 18-20, 2002, paper IV-46.

- E.D. Dickmanns, A.Zapp, A curvature based scheme for improving road vehicle guidance by computer vision, Proc. SPIE Conference on Mobile Robots, Vol. 727, 1986, pp. 161- 168
- E.D. Dickmanns, The development of machine vision for road vehicles in the last decade, keynote article, Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Versailles, *France*, June 2002
- Eidehall, F. Gustafsson, The Marginalized Particle Filter for Automotive Tracking Applications, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 150.
- F. Dellaert, C. Thorpe, Robust car tracking using Kalman filtering and Bayesian templates. SPIE: Intelligent Transportation Systems, 1997.
- F. Thomanek, E. D. Dickmanns, D. Dickmanns, Multiple Object Recognition and Scene Interpretation for Autonomous Road Vehicle Guidance, Intelligent Vehicles '94 Symposium, October 24-26, 1994, Paris, France, pp. 231-236.
- Gad A., Farooq M., Serdula J., Peters D., "Multitarget Tracking in Multisensor Multiplatform Environment", In ISIF 7th International conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, June 28–1st July 2004, pp. 206-213.
- Gern, A., Franke U., Levi, P., "Robust Vehicle tracking fusing radar and vision", 2001
- Giachetti, M. Campani, R. Sanni, A. Succi, The Recovery of Optical Flow for Intelligent Cruise Control, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Paris, France, October 24-26, 1994, pp. 91-96.
- H. Cramer, A. Saroldi, Introduction to SASPENCE subproject, 12th ITS World Congress San Francisco, USA, 7 November 2005
- H. Weigel, H. Cramer, G. Wanielik, A. Polychronopoulos, A. Saroldi, Accurate Road Geometry Estimation for a Safe Speed Application, Intelligent Vehicles Symposium 2006, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, pp.516-521.
- Handmann, U., Lorenz, G., Schnitger, T., Seelen, W., "Fusion of Different sensors and algorithms for segmentation", Proc. IEEE Conference on Intelligent Vehicles, 1998.
- J. Thiem, M. Mühlenberg, Datafusion of two driver assistance system sensors, in Proceedings of Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, Germany, 2005, pp. 97-114
- J.-C. Burie, J.-G. Postaire, Enhancement of the Road Safety with a Stereovision System Based on Linear Cameras, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, September 19-20, 1996, Tokyo, Japan, 147-152.
- K. Weiss, D. Stueker, A. Kirchner, Target Modeling and Dynamic Classification for Adaptive Sensor Data Fusion, IEEE 2003, pp. 132-137
- K. Yong Lee, J. Woong Lee, M. Rai Cho, Detection of Road Obstacles Using Dynamic Programming for Remapped Stereo Images to a Top-View, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 39
- K.A. Redmill, J.I. Martin, U. Ozguner, Sensing and Sensor Fusion for the 2005 Desert Buckeyes DARPA Grand Challenge Offroad Autonomous Vehicle, Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Tokyo, Japan, June 13-15, 2006, paper 13-16, pp. 528-533
- Kapp, Quality Measures for Lidar Signal Processing, Intelligent Vehicles Symposium 2006, Tokyo, Japan, June 13-15, 2006, paper 4-2, pp163-168
- Kapp, Robust Object Segmentation and Parameterization of 3D Lidar Data, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 158, pp. 694-699
- Kim J., Singh T., Llinas T., "Large Scale Simulation of a Distributed Target Tracking System", ", Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion, Vol. 1, 8-11, July 2002, pp. 624-629
- Kirchner, A., Heinrich, T., "Model based detection of road boundaries with a laser scanner", IEEE International Conference on Intelligent Vehicles", 1998.
- L. Andreone, P.C. Antonello, M, Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli, D. Ranzato, Vehicle Detection and Localization in Infra-Red Images, The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 3 6 September 2002, Singapore, pp.141-146.
- M. Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli and S. Nichele, Stereo Vision-Based Vehicle Detection, in Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium 2000, pp. 39-44, 2000
- M. Buhren, B. Yang, Simulation of Automotive Radar Target Lists using a Novel Approach of Object Representation, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Tokyo, Japan, June 13-15, 2006, paper 8-13, pp.314-319.
- M. Darms, H. Winner, A Modular System Architecture for Sensor Data Processing of ADAS Applications, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 320, pp. 729-734

- M. Maehlisch, R. Schweiger, W. Ritter, K. Dietmayer, Multisensor Vehicle Tracking with the Probability Hypothesis Density Filter, Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion, Florence, Italy, July 10 14, 2006, paper 218.
- M. Mählisch, R. Schweiger, W. Ritter, K. Dietmayer, Sensorfusion Using Spatio-Temporal Aligned Video and Lidar for Improved Vehicle Detection, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, paper 11-5, pp.424-429
- M. Perrollaz, R. Labayrade, C. Royere, N. Hautiere, D, Aubert, Long Range Obstacle Detection Using Laser Scanner and Stereovision, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, paper 5-1, pp.182-187
- M. Skutek, D.T. Linzmeier, N. Appenrodt, G. Wanielik, A PreCrash System based on Sensor Data Fusion of Laser Scanner and Short Range Radars, Proc. of the Eight International Conference on Information Fusion, Philadelphia, PA USA, July 25- 29, 2005, paper D9-2
- M. Yguel, O. Aycard, D. Raulo, C. Laugier, Grid based fusion of off-board cameras, Intelligent Vehicles Symposium 2006, June 13-15, 2006, Tokyo, Japan, paper 8-7, pp.276-281.
- N. Floudas, A. Polychronopoulos, A. Amditis, A survey of filtering techniques for vehicle tracking by radar equipped automotive platforms, 8th international conference of Information Fusion, Philadelphia, USA, 25-29 July 2005.
- N. Floudas, M. Tsogas, A. Amditis, H. Weigel, POSITIONING AND PATH PREDICTION FOR SCENARIO ASSESSMENT OF SAFE SPEED SYSTEM, submitted to ITS World Congress, Beijing, 2007.
- N. Kaempchen, K. C. Fuerstenberg, A. G. Skibicki, K. C. J. Dietmayer, Sensor Fusion for Multiple Automotive Active Safety and Comfort Applications, In International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA), pp. 137-163, Berlin 2004.
- N. Kaempchen, M.Buehler, K.Dietmayer, Feature-level fusion for free-form object tracking using laserscanner and video, in Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, USA, 2005, pp.453–458.
- O. Bezet, V. Cherfaoui, Time Error Correction For Laser Range Scanner Data, Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion, Florence, Italy, July 10-14, 2006, paper 115.
- P. Viola and M. Jones, Robust real-time object detection, in Second international Workshop on statistical and computational Theories of Vision-Modeling, Learning, Computing, and Sampling, Vancouver, Canada, July 13, 2001
- Polychronopoulos, A. Amditis, U. Scheunert, T. Tatschke, Revisiting JDL model for automotive safety applications: the PF2 functional model, Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion (FUSION 2006), Florence, Italy, 10 14/07/2006, paper 259.
- Polychronopoulos, N. Floudas, A. Amditis, D. Bank, B. van der Broek, "Data Fusion in multi sensor platforms for wide area perception", IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2006, Tokyo, Japan, 13-15/06/06, pp. 412-417.
- Polychronopoulos, U. Scheunert, F. Tango, "Centralized data fusion for obstacle and road borders tracking in a collision warning system", *Proc. of the ISIF 7th International Conference on Information Fusion*, Stockholm, Sweden, 28/06-01/07 2004, pp. 760-767.
- R. Labayrade, C. Royere, D. Aubert, A collision mitigation system using laser scanner and stereovision fusion and its assessment, in Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, USA, 2005, pp. 441–446
- R. Möbus, A. Joos, U. Kolbe, Multi-Target Multi-Object Radar tracking, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Ohio, USA, June 9-11, 2003, pp. 489-494.
- R. Schweiger, H. Neumann, W. Ritter, Multiple-cue data fusion with particle filters for vehicle detection in night view automotive applications, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 96.
- Ralph Mende, A Multifunctional Automotive Short Range Radar System, GRS 2000, German Radar Symposium, Berlin 2000.
- S. Carlsson, J.-O. Eklundh, Object Detection Using Model Based Prediction and Motion Parallax, First European Conference on Computer Vision - ECCV '90, O. Faugeras (ed.), Antibes, France, April 23-27, 1990, Lecture Notes in Computer Science 427, Springer- Verlag Berlin Heidelberg New York, 1990, pp. 297-306.
- S. K. Gehrig, S. Wagner, U. Franke, System Architecture for an Intersection Assistant Fusing Image, Map, and GPS information, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Ohio, USA, June 9-11, 2003, pp. 144-149
- S. Nedevschi, R. Danescu, D. Frentiu, T. Marita, F. Oniga, C. Pocol, R. Schmidt, T. Graf, High Accuracy Stereo Vision System for Far Distance Obstacle Detection, in Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium '04, pp. 14-17, 2004

- S. Tsugawa, Inter-Vehicle Communications and their Applications to Intelligent Vehicles: An Overview, keynote article, Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Versailles, France, June 2002
- S. Wender, M. Schoenherr, N. Kaempchen, K. Dietmayer, Classification of Laserscanner Measurements at Intersection Scenarios with Automatic Parameter Optimization, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Las Vegas, Nevada, U.S.A. June 6-8, 2005, paper 128
- T. Kalinke, C. Tzomakas, W. von Seelen, A-Texture-based Object Detection and an Adaptive Modelbased Classification, in Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium, pp. 341-346, 1998
- T. Tatschke, Early Sensor Data Fusion Techniques for Collision Mitigation Purposes, Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Tokyo, Japan, June 13-15, 2006, paper 13-3, pp. 445-452
- U. Franke, I. Kutzbach, Fast Stereo Based Object Detection for Stop & Go Traffic, IEEE Intelligent Vehicles 'Symposium, Tokyo, Japan, September 19-20, 1996, pp. 339-344.
- U. Meis, R. Schneider, Radar Image Acquisition and interpretation for automotive applications, Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Ohio, 2003, pp. 328-332
- U. Solder, V. Graefe, Object Detection in Real Time, SPIE Symposium on Advances in Intelligent Systems, November 8-9, 1990, Boston/MA, Vol. 1388, 112-119.
- V. Graefe, Vision for intelligent road vehicles, in IEEE Workshop on Intelligent Vehicles, Tokyo, Japan, 1993, pp. 1–6.
- White, F.E., "A Model for Data Fusion", Proc. 1st National Symposium on Sensor Fusion, 1988
- X. Lin, Y. Bar-Shalom, T. Kirubarajan, Multisensor-multitarget bias estimation for general asynchronous sensors, In Proc. of ISIF International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, June 28–1st July 2004, pp. 243-250.
- Y. Xue, D. Morrell, Target tracking and data fusion using multiple adaptive foveal sensors, In ISIF International Conference on Information Fusion, Cairns (Australia), July 2003.
- Z. Zomotor, U.Franke, Sensor Fusion for improved vision based lane recognition and object tracking with range-finders, In IEEE Conference on intelligent Transportation Systems, Boston USA November 1997, pp. 595-600
- A. Gad, M. Farooq, J. Serdula, D. Peters, Multitarget tracking in a multisensor multiplatform environment, In Proc. of ISIF International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, June 28–1st July 2004, pp. 206-213.
- A. Polychronopoulos, A. Amditis, U. Scheunert, T. Tatschke, Revisiting JDL model for automotive safety applications: the PF2 functional model, Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion (FUSION 2006), Florence, Italy, 10 14/07/2006, paper 259.
- A. Polychronopoulos, U. Scheunert, F. Tango, Centralized data fusion for obstacle and road borders tracking in a collision warning system, Proc. of the ISIF 7th International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, 28/06-01/07 2004, pp. 760-767.
- N. Floudas, A. Polychronopoulos, M. Tsogas, A. Amditis, "Multi-Sensor Coordination And Fusion For Automotive Safety Applications", Proc. of the 9th International Conference on Information Fusion (FUSION 2006), Florence, Italy, 10 14/07/2006, paper 346.

Επιστημονικές εργασίες στα ελληνικά

- Α.Δ. Πολυχρονόπουλος, Σχεδίαση και ανάπτυξη συστήματος σύντηξης δεδομένων από πολλαπλές πηγές με χρήση εκτιμητών Kalman με εφαρμογή στην ανασύνθεση του οδικού περιβάλλοντος, διδακτορική διατριβή, HMMY/EMΠ, Ιούνιος 2004
- Ν. Φλούδας, Μ. Τσόγκας, Συστήματα Σύζευξης Δεδομένων (Data Fusion) Ανάλυση και Προσομοίωση Υποσυστημάτων, διπλωματική εργασία, ΗΜΜΥ/ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2002.
- Χαρίκλεια Σερμπετζόγλου, Επίλυση Προβλημάτων Ανάθεσης Μετρήσεων και Ιχνών στο Ν-διάστατο Χώρο για Παρακολούθηση Κινουμένων Αντικειμένων, διπλωματική εργασία, ΗΜΜΥ/ΕΜΠ, Ιούλιος 2006.

Άλλα

- J. Llinas, "An Introduction to Data and Information Fusion", presentation, June 2001 (available online http://www.infofusion.buffalo.edu/).
- Uwe Kaiser Dieckhoff, A roadmap for future integrated safety systems CAPS, Transport Research Arena– Europe 2006, TRA Conference, Goteborg, Sweden, June 15-16 2006.
- http://www.safespot-eu.org/
- Automotive collision avoidance system field operational test, Technical report, National Highway Traffic Safety Administration, USA, 2000.
- "Road Vehicles Adaptive Cruise Control Systems, Performance requirements and test procedures". ISO/TC204/WG14/N143.14 – Nov 98

- ANTARIS GPS Evaluation kit, User's guide, GPS.G3-EK-02003-B, 1/11/2004, www.u-blox.com
- Long-Range-Radar-Sensor für Fahrerassistenz-Systeme, Dr. Jörg Hilsebecher, Dr. Götz Kühnle, Dr. Herbert Olbrich, http://www.elektroniknet.de
- WGS 84 Implementation Manual, version 2.4, February 12, 1998, by EUROCONTROL European Organization for the Safety of Air Navigation Brussels, Belgium and Institute of Geodesy and Navigation (IfEN) University FAF Munich, Germany
- Πληροφορίες από: www.**tyco**electronics.com
- Πληροφορίες από: www.U-BLOX.com