



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τηλεχειρισμός Τροχοφόρου Ρομπότ από
Ρομποτικό Βραχίονα Μέσω Οπτικής
Ανατροφοδότησης Βασισμένη σε Εικόνα από
Οθόνη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΜΙΧΑΗΛ Δ. ΛΟΓΟΘΕΤΗ

Επιβλέπων: Στέφανος Κόλλιας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ
Αθήνα, Ιούλιος 2016



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Τεχνολογίας Πληροφορικής και Υπολογιστών
Εργαστήριο Ψηφιακής Επεξεργασίας Σημάτων και Εικόνων

Τηλεχειρισμός Τροχοφόρου Ρομπότ από
Ρομποτικό Βραχίονα Μέσω Οπτικής
Ανατροφοδότησης Βασισμένη σε Εικόνα από
Οθόνη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΜΙΧΑΗΛ Δ. ΛΟΓΟΘΕΤΗ

Επιβλέπων: Στέφανος Κόλλιας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19η Ιουλίου 2016.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Στέφανος Κόλλιας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ανδρέας -Γεώργιος Σταφυλοπάτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Κυριακόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

(Υπογραφή)

.....

ΜΙΧΑΗΛ Δ. ΛΟΓΟΘΕΤΗΣ

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

© 2016 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Τεχνολογίας Πληροφορικής και Υπολογιστών
Εργαστήριο Ψηφιακής Επεξεργασίας Σημάτων και Εικόνων

Copyright ©–All rights reserved Μιχαήλ Δ. Λογοθέτης, .
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κυριακόπουλο για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου. Επίσης ευχαριστώ όλα τα μέλη του εργαστηρίου για την άψογη συνεργασία που είχαμε και ιδιαιτέρως τον Γ.Καρρά για την καθοδήγησή του. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου αλλά και τους φίλους μου για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του προβλήματος τηλεχειρισμού ενός τροχοφόρου ρομπότ από ρομποτικό σύστημα βραχίονα-πλατφόρμας μέσω οπτικής ανατροφοδότησης βασισμένη σε εικόνα από οθόνη. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος αναπτύχθηκε ένα Image-Based Visual Servo σχήμα ελέγχου στο οποίο τα οπτικά δεδομένα που εισάγονται συλλέγονται από την οθόνη. Το ρομπότ χειριστής χρησιμοποιεί μια ενσωματωμένη κάμερα που κοιτάζει την οθόνη από την οποία λαμβάνεται η οπτική πληροφορία και έχοντας ως τελικό σημείο δράσης του ρομποτικού βραχίονα ένα ρομποτικό χέρι με το οποίο πιάνει το joystick επιτυγχάνεται η διαδικασία του τηλεχειρισμού. Το τροχοφόρο ρομπότ αποτελείται από μία ολονομική πλατφόρμα στην οποία είναι προσκολλημένη μία κάμερα. Η οπτική πληροφορία που συλλέγεται από την κάμερα προβάλλεται στην οθόνη την οποία παρακολουθεί το ρομπότ χειριστής.

Δεδομένου ότι η σχετική θέση του τροχοφόρου ρομπότ με τον στόχο, τα χαρακτηριστικά της κάμερας που είναι προσκολλημένη σε αυτό καθώς και η ακριβής ταχύτητα με την οποία κινείται είναι άγνωστα, αναπτύχθηκε ένα σχήμα ελέγχου το οποίο υπολογίζει τις επιθυμητές κινήσεις του joystick ώστε το τροχοφόρο ρομπότ να φτάσει στον στόχο. Τέλος, μια εκτενής πειραματική μελέτη επιβεβαιώνει τα θεωρητικά αποτελέσματα.

Λέξεις Κλειδιά

Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότηση, Τηλεχειρισμός, Οπτική Ανατροφοδότηση μέσω οθόνης, Τροχοφόρα Ρομπότ, Ρομποτική

Abstract

In this work, the tele-operation problem of a mobile robot via a mobile - manipulator system is studied. To contribute to this problem, an image-based visual servo control scheme is proposed. The robot-operator robotic system is equipped with a camera, which is monitoring a screen, to acquire the visual data and having grasped a joystick, it accomplishes the tele-operation task. On the other hand, the mobile robot consists of a holonomic robot platform and a camera whose acquired vision data is displayed on the screen.

Since the camera intrinsic parameters of the mobile robot, the relative position between the mobile robot and the target and the accurate value of the mobile robot's spatial velocity are unknown, it is necessary to develop a control scheme that controls the joystick movements in order to achieve the goal. Finally, an extensive experimental study clarifies and verifies the theoretical findings.

Keywords

Visual Servoing, Tele-operation, Visual Feedback Control through a Screen, Mobile Robot, Robotics

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	8
1 Εισαγωγή	9
1.1 Τροχοφόρα Ρομπότ	9
1.2 Ρομποτικοί Βραχίονες	11
1.2.1 Ευθεία Κινηματική	13
1.2.2 Αντίστροφη Κινηματική	13
1.2.3 Ιακωβιανή Ορίζουσα	13
1.3 Μοντέλο Κάμερας και Προοπτική Προβολή	13
1.4 Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης	16
1.5 Τηλεχειρισμός	18
2 Σκοπός Διπλωματικής	19
2.1 Διατύπωση Προβλήματος	19
2.2 Σχετικές Εργασίες - Βιβλιογραφία	20
3 Μοντελοποίηση	23
3.1 Τροχοφόρο Ρομπότ	23
3.2 Ρομποτικό Σύστημα Πλατφόρμα-Βραχίονας	24
3.3 Joystick	26
3.4 Κάμερες	27
3.5 Οθόνη	28
3.6 Εντοπισμός (Detection)	29
4 Σχεδίαση Ελεγκτή	31
4.1 Πρόβλημα Οπτικής Ανατροφοδότησης Μέσω Εικόνας Από Οθόνη	31

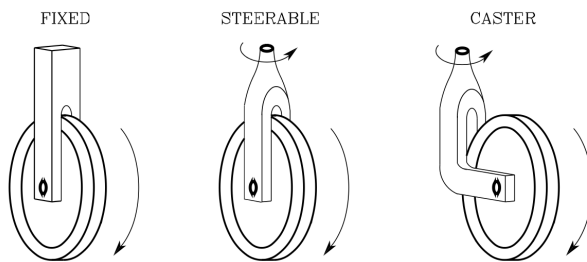
4.2	Προβολική Αντιστοίχιση (Projective Mapping)	32
4.3	Μεθοδολογία Επίλυσης	34
4.3.1	Αρχικοποίηση (Initialization)	35
4.3.2	Εντοπισμός (Detection)	36
4.3.3	Προβολική Αντιστοίχιση (Projective Mapping)	36
4.3.4	Αντιστοίχιση Συντεταγμένων του Επιπέδου της Εικόνας της cam_2 σε αυτό της cam_1	37
4.3.5	Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης (Visual Servo Control)	38
4.3.6	Έλεγχος Τελικού Σημείου Δράσης	40
4.4	Ευστάθεια Κατά Lyapunov	41
5	Πειράματα	49
5.1	Διάταξη	49
5.2	Αποτελέσματα	50
6	Συμπεράσματα	55
6.1	Ανακεφαλαίωση	55
6.2	Μελλοντικές Εργασίες	55
	Bibliography	56

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Τροχοφόρα Ρομπότ

Τα τροχοφόρα ρομπότ αποτελούν μια βασική υποκατηγορία των κινούμενων ρομπότ. Η ικανότητάς τους να κινούνται στο περιβάλλον που επενεργούν, είτε αυτόνομα ή υπό εξωτερική καθοδήγηση, χρησιμοποιώντας απλούς μηχανισμούς και μειωμένα προβλήματα ευστάθειας τα καθιστά αρκετά δημοφιλή και εύχρηστα. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικά περιβάλλοντα για την μεταφορά βαρέων αντικειμένων, σε νοσοκομειακές εγκαταστάσεις για την μεταφορά φαρμάκων, ως βοηθοί σε χειρουργικές επεμβάσεις, σε επικίνδυνα περιβάλλοντα για επιθεώρηση ή χαρτογράφηση του χώρου καθώς επίσης για αγροτικές και στρατιωτικές εφαρμογές.



(α') Fixed - Steerable - Caster Wheels



(β') Swedish Wheel

Σχήμα 1.1

Τα τροχοφόρα ρομπότ συνήθως αποτελούνται από ένα άκαμπτο σώμα και ένα σύστημα από τροχούς οι οποίοι παρέχουν την δυνατότητα κίνησης σε σχέση με το δάπεδο. Η κατηγοριοποίηση των τροχοφόρων ρομπότ γίνεται βάση της μορφολογίας των τροχών του και της διάταξη με την οποία είναι προσκολλημένοι στο σασί.

Οι 4 κυριότεροι και δημοφιλέστεροι τύποι τροχών είναι:

- Σταθερός τροχός (*fixed wheel*). Μπορεί να στραφεί μόνο ως προς έναν άξονα, τον άξονα που περνάει από το κέντρο της ρόδας. Οι τροχοί αυτού του τύπου είναι άκαμπτα στερεωμένοι

στο σασί με συγκεκριμένη διάταξη και προσανατολισμό ως προς αυτό.

- *Κατευθυνόμενος τροχός (steerable wheel)*. Έχει δύο άξονες περιστροφής, ένας είναι ο άξονας που περνάει από το κέντρο της ρόδας και ο δεύτερος είναι κάθετος ως προς τον πρώτο και διέρχεται και αυτός από το κέντρο της ρόδας. Έτσι, ελέγχοντας με έναν κινητήρα τον δεύτερο άξονα περιστροφής μπορεί να αλλάξει ο προσανατολισμός του τροχού σε σχέση με το σασί.
- *Παθητικός τροχός (caster wheel)*. Έχει τους ίδιους βαθμούς ελευθερίας με την κατευθυνόμενη ρόδα με την μόνη διαφορά ότι ο κάθετος άξονας περιστροφής δεν περνάει από το κέντρο της στεφάνης του τροχού. Αυτή η διάταξη ευνοεί την αυτόματη περιστροφή του τροχού σύμφωνα με τον προσανατολισμό του οχήματος. Συνεπώς, χρησιμοποιείται ως βοηθητικός τροχός (τροχός στήριξης).
- *Πολυκατευθυντικός τροχός (omni-directional wheel)*. Οι τροχοί αυτού του τύπου, γνωστοί και ως Mecanum ή Swedish wheel, είναι ένα σύμπλεγμα σταθερού τροχού (fixed wheel) με παθητικούς κυλίνδρους. Οι κύλινδροι είναι τοποθετημένοι στην στεφάνη του τροχού και οι άξονες περιστροφής τους διαφέρουν κατά 45° από τον άξονα περιστροφής της στεφάνης. Τα τροχοφόρα ρομπότ που είναι εξοπλισμένα με τέτοιου είδους ρόδες έχουν την ιδιότητα να κινούνται ως προς τους δύο άξονες του επιπέδου με όποιον προσανατολισμό επιθυμούν (omni directional) και ονομάζονται ολονομικά (holonomic).

Διάφορες διατάξεις που συνδυάζουν τους παραπάνω τροχούς προσφέρουν διαφορετικές κινηματικές ιδιότητες στα τροχοφόρα ρομπότ. Οι δημοφιλέστερες είναι:

- *Διαφορική οδήγηση (differential-drive)*. Αποτελείται από δύο σταθερούς τροχούς που έχουν κοινό άξονα περιστροφής αλλά μπορούν να ελεγχθούν ξεχωριστά και έναν ή παραπάνω παθητικούς τροχούς οι οποίοι ισορροπούν το όχημα. Το όχημα αυτό έχει την ικανότητα να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του όταν οι σταθεροί τροχοί έχουν ταχύτητα ίσου μέτρου αλλά αντίθετης φοράς αλλά και να κινείται ως προς έναν άξονα όταν έχουν ταχύτητα ίδιου μέτρου και φοράς. Δηλαδή, έχει 2 βαθμούς ελευθερίας (x, ϕ)
- *Συγχρονισμένη οδήγηση (synchro-drive)*. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται συνήθως από 3 κατευθυνόμενες τροχούς όπου ελέγχονται σύγχρονα μέσω μίας μηχανικής σύζευξης, αλυσίδας ή ζώνη μετάδοσης. Στην διάταξη υπάρχουν δύο κινητήρες όπου ο πρώτος ελέγχει την ταχύτητα στροφής των τροχών και ο δεύτερος τον προσανατολισμό τους. Προσδίδει δυνατότητα κίνησης με γραμμική ταχύτητα ως προς δύο άξονες και γωνιακής ως προς τον κάθετο τους άξονα, δηλαδή 3 βαθμούς ελευθερίας (x, y, ϕ) .
- *Τρίκυκλα (tricycle)*. Αποτελείται από δυο σταθερούς τροχούς με ίδιο άξονα περιστροφής και έναν κατευθυνόμενο τροχό που ελέγχει τον προσανατολισμό. Όμοιες κινητικές δυνατότητες με την διαφορική οδήγηση.
- *car-like*. Ίδια διάταξη με αυτή των αυτοκινήτων.

- *Πολυκατευθυντική (omni-directional)*. Σε αυτή την διάταξη χρησιμοποιούνται πολυκατευθυντικοί τροχοί που είναι ανά ζεύγη παράλληλα τοποθετημένοι στο σασί. Ο έλεγχος γίνεται σε κάθε τροχό ξεχωριστά και η συνισταμένη των επιμέρους ταχυτήτων παράγει την επιθυμητή κίνηση στο όχημα. Προσδίδει 3 βαθμούς ελευθερίας στο τροχοφόρο ρομπότ (x, y, ϕ).

Όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή του κεφαλαίου, η βασική ιδιότητα των τροχοφόρων ρομπότ είναι η δυνατότητα κίνησης στο περιβάλλον που επενεργούν. Είναι προφανές ότι το περιβάλλον αυτό είναι θεωρητικά άπειρο. Παρόλα αυτά για ένα μη ολονομικό τροχοφόρο ρομπότ, η περιορισμένη ικανότητα κίνησης μειώνει τον χώρο εργασίας καθώς υπόκειται το ρομπότ σε κάποιους περιορισμούς. Πιο συγκεκριμένα εφόσον δεν είναι δυνατόν να ελεγχθεί ταυτόχρονα τόσο η θέση αλλά και ο προσανατολισμός του ρομπότ στο επίπεδο δημιουργούνται προβλήματα ελέγχου.



Σχήμα 1.2: Τροχοφόρο Ρομπότ με Βραχίονα



Σχήμα 1.3: Omni-Directional Uranus



Σχήμα 1.4: Pioneer 3-AT

Τέλος, στα τροχοφόρα ρομποτικά οχήματα μπορούν να συνδεθούν διάφορα μηχανικά εξαρτήματα σύμφωνα με την εργασία που καλούνται να διεκπεραιώσουν. Ο πιο δημοφιλής και πρακτικός συνδυασμός είναι αυτός του ρομποτικού συστήματος πλατφόρμας με βραχίονα καθώς δίνει την δυνατότητα στον βραχίονα να έχει θεωρητικά άπειρο χώρο εργασίας.

1.2 Ρομποτικοί Βραχίονες

Οι ρομποτικοί βραχίονες αποτελούνται από αλληλουχίες άκαμπτων συνδέσμων (*links*) που συνδέονται μεταξύ τους μέσω αρθρώσεων (*joints*). Στην άκρη του βραχίονα είναι συνδεδεμένο ένα τελικό σημείο δράσης (χέρι, εργαλείο, αρπάγη) η δομή του οποίου εξαρτάται από την διαδικασία που καλείται να διεκπεραιωθεί.

Η βασική δομή ενός ρομποτικού βραχίονα περιγράφεται από την κινηματική αλυσίδα. Ονομάζεται *ανοιχτή κινηματική αλυσίδα* όταν τα δύο άκρα της συνδέονται με μόνο μια αλληλουχία συνδέσμων και κλειστή όταν η αλληλουχία συνδέσμων σχηματίζει βρόγχο.



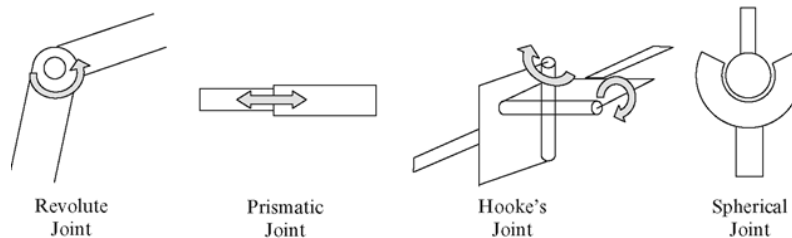
Σχήμα 1.5: 7-DOF Kuka Manipulator



Σχήμα 1.6: IA-20 7-DOF



Σχήμα 1.7: PUMA Robot Manipulator



Σχήμα 1.8: Τύποι Αρθρώσεων

Η δυνατότητα κίνησης μίας κινηματικής αλυσίδας εξαρτάται από τις αρθρώσεις που την αποτελούν. Οι αρθρώσεις κατηγοριοποιούνται σε πρισματικές, στροφικές και σφαιρικές όπως φαίνονται στο Σχήμα 1.8. Οι πρισματικές και οι στροφικές προσδίδουν ένα βαθμό ελευθερίας (DOF) στον βραχίονα και προκαλούν μεταφορική και στροφική κίνηση αντίστοιχα. Αντίθετα, οι σφαιρικές προσδίδουν 3 βαθμούς ελευθερίας. Οι βαθμοί ελευθερίας για ένα βραχίονα ανοιχτής κινηματικής αλυσίδας είναι ίσοι με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας των αρθρώσεων. Ενώ για κλειστής κινηματικής αλυσίδας είναι λιγότεροι από αυτόν. Η δομή του βραχίονα αλλά και οι βαθμοί ελευθερίας του δίνουν την δυνατότητα κίνησης ή τοποθέτησης του τελικού σημείου δράσης του.

Για την αυθαίρετη τοποθέτηση του τελικού σημείου δράσης στον χώρο τόσο ως προς την θέση όσο και τον προσανατολισμό απαιτούνται 6 βαθμοί ελευθερίας. Αν διατίθενται παραπάνω βαθμοί ελευθερίας από αυτούς που απαιτούνται για την εκτέλεση μιας εργασίας το σύστημα ονομάζεται πλεονάζον (redundant). Το σύνολο των σημείων που μπορεί να επενεργήσει το τελικό σημείο δράσης ονομάζεται χώρος εργασίας. Ο χώρος εργασίας (*workspace*) είναι υποσύνολο του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται ο βραχίονας και εξαρτάται το μέγεθός του αλλά και το σχήμα του τόσο από την δομή του βραχίονα όσο και από τα όρια των αρθρώσεων.

1.2.1 Ευθεία Κινηματική

Η ευθεία κινηματική ενός βραχίονα είναι η συσχέτιση της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού σημείου δράσης με την μεταβολή της τιμής των βαθμών ελευθερίας των αρθρώσεων που αποτελούν έναν βραχίονα και εκφράζεται ως:

$$\mathbf{P}_{ee} = \mathbf{F}(\mathbf{q}) \quad (1.1)$$

,όπου $\mathbf{P}_{ee} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ η θέση και ο προσανατολισμός του τελικού σημείου δράσης ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης, $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ η τιμή των βαθμών ελευθερίας των αρθρώσεων και η συνάρτηση \mathbf{F} είναι μη γραμμική και εκφράζει την σχέση μεταξύ των συντεταγμένων στον χώρο των αρθρώσεων και αυτών στον χώρο εργασίας.

Ο υπολογισμός της συνάρτησης \mathbf{F} γίνεται χρησιμοποιώντας ομογενείς μετασχηματισμούς από την βάση του βραχίονα έως το τελικό σημείο δράσης. Δηλαδή:

$${}^0\mathbf{T}_{ee} = {}^0\mathbf{A}_1(q_1) {}^1\mathbf{A}_2(q_2) \dots {}^{n-1}\mathbf{A}_{ee}(q_n) \quad (1.2)$$

1.2.2 Αντίστροφη Κινηματική

Διοθέντος της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού σημείου δράσης στον χώρο για να υπολογιστούν οι συντεταγμένες των αρθρώσεων λύνεται το πρόβλημα της αντίστροφης κινηματικής που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{q} = \mathbf{F}^{-1}(\mathbf{P}_{ee}) \quad (1.3)$$

η επίλυση του παραπάνω προβλήματος δεν είναι πάντοτε δυνατή ή μπορεί να μην είναι και μοναδική η λύση του. Η ύπαρξη λύσης εξασφαλίζεται μόνο στην περίπτωση που η επιθυμητή θέση και προσανατολισμός του τελικού σημείου δράσης είναι εντός του χώρου εργασίας, όμως μπορεί σε αυτή την περίπτωση να υπάρχουν πάνω από μία λύσης για πλεονάζον (redundant) συστήματα.

1.2.3 Ιακωβιανή Ορίζουσα

Εν συνεχεία, η Ιακωβιανή ορίζουσα εκφράζει την σχέση μεταξύ της ταχύτητας των αρθρώσεων και της χωρικής ταχύτητας του τελικού σημείου δράσης, γραμμική και γωνιακής.

$$\mathbf{v}_{ee} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{P}}_{ee} \\ \omega_{ee} \end{bmatrix} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (1.4)$$

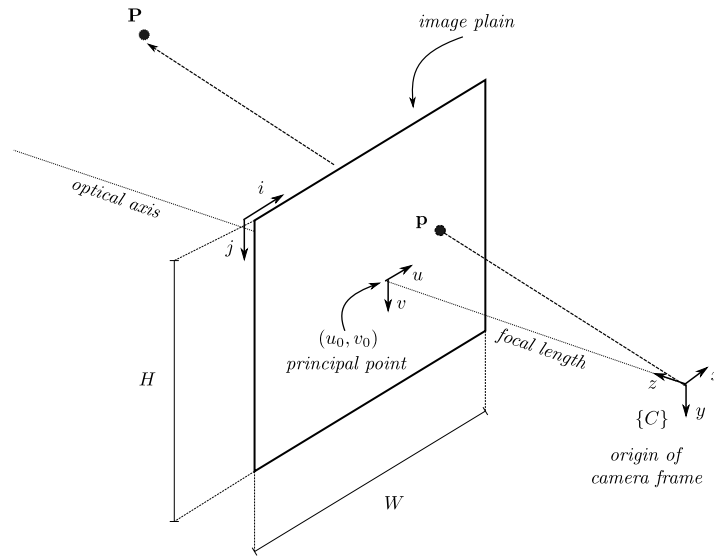
όπου \mathbf{v}_{ee} είναι διάνυσμα 6×1 , ο πίνακας $\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ και το διάνυσμα των ταχυτήτων των αρθρώσεων $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ όπου n είναι ο αριθμός των αρθρώσεων.

1.3 Μοντέλο Κάμερας και Προοπτική Προβολή

Οι κάμερες είναι οπτικοί αισθητήρες που έχουν την δυνατότητα να μετρούν την ένταση του φωτός όταν αυτό ανακλάται σε ένα αντικείμενο. Ένα φωτοευαίσθητο στοιχείο χρησιμοποιείται

για την μετατροπή αυτής της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική. Διάφορα είδη αισθητήρων χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αυτής της μετατροπής με τους πιο δημοφιλείς να είναι οι CCD και CMOS οι οποίοι βασίζονται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο των ημιαγωγών. Πέρα από τους αισθητήρες που είναι υπεύθυνοι για αυτήν την μετατροπή οι κάμερες απαρτίζονται και από άλλα μέρη όπως κλείστρο, φακούς, αναλογικά ηλεκτρονικά φίλτρα προ-επεξεργασίας κ.α.

Η διαδικασία σχηματισμού μιας εικόνας με ένα μάτι ή μια κάμερα προέρχεται από την διαδικασία προβολής του τρισδιάστατου χώρου σε μια δισδιάστατη επιφάνεια. Ο μετασχηματισμός αυτός ονομάζεται προοπτική προβολή (perspective projection). Έπειτα από την εφαρμογή αυτού του μετασχηματισμού, η αίσθηση του βάθους χάνεται και δεν μπορεί να διακριθεί αν ένα αντικείμενο είναι πολύ μεγάλο και μακριά ή μικρό και κοντά στην κάμερα.



Σχήμα 1.9: Μοντέλο Κεντρικής Προοπτικής Προβολής

Στην μηχανική όραση χρησιμοποιείται το μοντέλο της κεντρικής προοπτικής απεικόνισης που φαίνεται στο Σχήμα 1.9. Οι ακτίνες του φωτός αφού ανακλούν σε ένα αντικείμενο συγκλίνουν στην αρχή του πλαισίου συντεταγμένων της κάμερας και μία μη ανεστραμμένη εικόνα προβάλλεται στο επίπεδο της εικόνας της κάμερας που βρίσκεται στο $z = f$. Θεωρώντας ένα σημείο στο χώρο με ομογενείς συντεταγμένες ${}^C\tilde{\mathbf{P}} = (X, Y, Z, 1)^T = ({}^0\mathbf{T}_C)^{-1}{}^0\tilde{\mathbf{P}}$ εκφρασμένες ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της κάμερας και την προβολή του σημείου αυτού στο επίπεδο της εικόνας $\mathbf{p} = (x, y)$, ισχύει ότι:

$$\begin{cases} x = f \frac{X}{Z} \\ y = f \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (1.5)$$

Το διάνυσμα \mathbf{p} μπορεί να γραφεί στην ομογενή του μορφή $\tilde{\mathbf{p}} = (x', y', z')$ ως εξής:

$$\begin{cases} x' = f \frac{X}{Z} \\ y' = f \frac{Y}{Z} \\ z' = Z \end{cases} \quad (1.6)$$

και να εκφραστεί με την μορφή πινάκων:

$$\tilde{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Στην περίπτωση που θεωρούμαι $f = 1$ οι συντεταγμένες αναφέρονται ως κανονικοποιημένες συντεταγμένες επιπέδου εικόνας. Συνεπώς οι μη ομογενείς κανονικοποιημένες συντεταγμένες στο επίπεδο της εικόνας είναι

$$\begin{cases} x = \frac{X}{Z} \\ y = \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (1.7)$$

Το επίπεδο της εικόνας σε ψηφιακές κάμερες είναι ένα $W \times H$ πλέγμα από pixels που αντιστοιχούν στο πλήθος των φωτοευαίσθητων στοιχείων. Οι συντεταγμένες ενός σημείου που προβάλλεται στην εικόνα, εκφρασμένες σε pixels units, έχουν αρχή του πλαισίου συντεταγμένων τους στην πάνω αριστερά γωνία του πλέγματος. Θεωρούμαι το κεντρικό σημείο (*principal point*) των pixels με συντεταγμένες (u_0, v_0) και c_w, c_H το πλάτος και το ύψος των pixels, τότε οι ομογενείς συντεταγμένες ενός σημείου στο χώρο προβάλλονται στο επίπεδο της εικόνας της κάμερας σε συντεταγμένες pixel με αρχή το κέντρο του πλαισίου συντεταγμένων το (u_0, v_0) ως εξής:

$$\tilde{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} f/c_w & 0 & u_0 \\ 0 & f/c_H & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} {}^C\tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{K}_I ({}^0\mathbf{T}_C)^{-1} {}^0\tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{C}_m {}^0\tilde{\mathbf{P}} \quad (1.8)$$

όπου ο πίνακας \mathbf{C}_m είναι ο πίνακας κάμερας που αποτελείται από τον πίνακα εσωτερικών παραμέτρων \mathbf{K}_I και των εξωτερικών $({}^0\mathbf{T}_C)^{-1}$. Ο πρώτος περιέχει τις παραμέτρους (f, u_0, v_0, c_w, c_H) ενώ ο δεύτερος περιγράφει την θέση της κάμερας στον χώρο. Έτσι, υπολογίζονται οι συντεταγμένες εκφρασμένες σε pixels από τις αντίστοιχες ομογενείς $\tilde{\mathbf{p}} = (u', v', w')$:

$$\begin{cases} u = f \frac{u'}{w'} \\ v = f \frac{v'}{w'} \end{cases} \quad (1.9)$$

1.4 Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης

Ο έλεγχος οπτικής ανατροφοδότησης (*visual servo control*) αναφέρεται στην χρήση των οπτικών δεδομένων για τον έλεγχο της κίνησης ενός ρομπότ. Η διαδικασία αυτή είναι ένα συνονθύλευμα επεξεργασίας εικόνας, μηχανικής όρασης και θεωρίας ελέγχου. Τα οπτικά δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν είτε από μια κάμερα που είναι προσκολλημένη σε γνωστή θέση στο ρομπότ ή σε ένα σταθερό σημείο στο περιβάλλον από το οποίο μπορεί να παρακολουθείτε ο στόχος και το ρομπότ ταυτόχρονα. Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για τον οπτικό έλεγχο, η προσέγγιση βάση του σχήματος που βασίζεται σε εικόνα (*Image-Based Visual Servo*) και αυτού που βασίζεται στην θέση (*Position-Based Visual Servo*). Στην πρώτη περίπτωση οι συντεταγμένες του αντικειμένου στο επίπεδο της εικόνας χρησιμοποιούνται άμεσα στο σχήμα ελέγχου ενώ στην δεύτερη περίπτωση, γνωρίζοντας την γεωμετρία του αντικειμένου υπολογίζεται η θέση του στον χώρο και εισάγεται ως ανάδραση στον αλγόριθμο ελέγχου.

Ο στόχος του σχήματος ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης είναι η μείωση του σφάλματος $\mathbf{e}(t)$:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{s}(t) - \mathbf{s}_d \quad (1.10)$$

,όπου $\mathbf{s}(t)$ είναι διάνυσμα από k οπτικά χαρακτηριστικά (*visual features*) και το \mathbf{s}_d αποτελείται από τις αντίστοιχες επιθυμητές θέσεις των οπτικών χαρακτηριστικών.

Η ανάλυση επικεντρώνεται στην περίπτωση που ο στόχος είναι σταθερός και το διάνυσμα $\mathbf{s}(t)$ εξαρτάται μόνο από την μεταβολή της κάμερας. Δηλαδή, αναλύεται η διάταξη eye-in-hand με οπτική ανάδραση που βασίζεται σε εικόνα, συνεπώς το (*Image-Based Visual Servo*) σχήμα ελέγχου.

Για την επίτευξη του οπτικού ελέγχου είναι αναγκαία μια σχέση που να συνδέει την χρονική παράγωγο του διανύσματος \mathbf{s} με την χωρική ταχύτητα της κάμερας $\mathbf{v}_C = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_C \\ \omega_C \end{bmatrix}$:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_S \mathbf{v}_C \quad (1.11)$$

όπου $\mathbf{L}_S \in \mathbb{R}^{2n \times 6}$ ο πίνακας αλληλεπίδρασης (*interaction matrix*) με n τον αριθμό των οπτικών χαρακτηριστικών. Αν στην Σχέση 1.11 εισαχθεί η σχέση 1.10 τότε:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}_S \mathbf{v}_C \quad (1.12)$$

Χρησιμοποιώντας την \mathbf{v}_C ως είσοδο στο ρομπότ και επιζητώντας την διασφάλιση της εκθετικής μείωσης του σφάλματος, δηλαδή $\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e}$, προκύπτει:

$$\mathbf{v}_C = -\lambda \mathbf{L}_S^+ \mathbf{e} \quad (1.13)$$

,με $\mathbf{L}_S^+ \in \mathbb{R}^{6 \times 2n}$ ο Moore-Penrose ψευδο-αντίστροφος του \mathbf{L}_S , ο οποίος υπολογίζεται από την σχέση $\mathbf{L}_S^+ = (\mathbf{L}_S^T \mathbf{L}_S)^{-1} \mathbf{L}_S^T$ όταν ο \mathbf{L}_S είναι βαθμού 6. Στην περίπτωση που $n = 3$, ο πίνακας \mathbf{L}_S μπορεί να αντιστραφεί και η σχέση γράφεται ως $\mathbf{v}_C = -\lambda \mathbf{L}_S^{-1} \mathbf{e}$.

Παρόλα αυτά, στην πραγματικότητα είναι αδύνατο να υπολογιστούν με ακρίβεια οι πίνακες \mathbf{L}_S και \mathbf{L}_S^+ δεδομένου ότι η τιμή του βάθους για κάθε οπτικό χαρακτηριστικό είναι άγνωστη και

για αυτό χρησιμοποιείται η εκτίμηση αυτών στο σχήμα ελέγχου:

$$\mathbf{v}_C = -\lambda \hat{\mathbf{L}}_S^+ \mathbf{e} \quad (1.14)$$

Το διάνυσμα οπτικών χαρακτηριστικών αποτελείται από συντεταγμένες εικόνας ως έχουν υπολογιστεί στην Ενότητα 1.3. Έστω ένα σημείο στο χώρο ${}^C\mathbf{P} = (X, Y, Z)$ εκφρασμένο ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της κάμερας με τη προβολή αυτού στο επίπεδο της εικόνας να υπολογίζεται βάση της Σχέσης 1.7:

$$\begin{cases} x = \frac{X}{Z} \\ y = \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (1.15)$$

Η χρονική παράγωγος των παραπάνω σχέσεων είναι:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\dot{X} - x\dot{Z}}{Z} \\ \dot{y} = \frac{\dot{Y} - y\dot{Z}}{Z} \end{cases} \quad (1.16)$$

Ενώ η σχέση που συνδέει την ταχύτητα της κάμερας με την ταχύτητα του σημείου ${}^C\mathbf{P}$ στο χώρο υπολογίζεται βάση της γνωστής σχέσης:

$${}^C\dot{\mathbf{P}} = -\mathbf{v}_C - \omega_C \times {}^C\mathbf{P} = \begin{cases} \dot{X} = -u_C^x - \omega_C^y Z + \omega_C^z Y \\ \dot{Y} = -u_C^y - \omega_C^z X + \omega_C^x Z \\ \dot{Z} = -u_C^z - \omega_C^x Y + \omega_C^y X \end{cases} \quad (1.17)$$

Κάνοντας χρήση της Σχέσης 1.17 στην 1.16 προκύπτει:

$$\mathbf{L}_S = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -\frac{1}{Z} & \frac{y}{Z} & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

,όπου \mathbf{L}_S ο πίνακας αλληλεπίδρασης της σχέσης $\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \mathbf{L}_S \mathbf{v}_C$. Συνεπώς σε κάθε σχήμα ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης που χρησιμοποιείται η μορφή του πίνακα 1.4 είναι αναγκαία η εκτίμηση της τιμής του Z , δηλαδή του βάθους των σημείων που προβάλλονται στο επίπεδο της εικόνας.

Δεδομένου ότι η τιμή του βάθους είναι άγνωστη, για την κατασκευή του πίνακα 1.4 έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχήμα ελέγχου 1.14 υπάρχουν ποικίλες τεχνικές που χρησιμοποιούνται. Αρχικά, στην περίπτωση που η τιμή του Z είναι διαθέσιμη τότε επιλέγεται $\hat{\mathbf{L}}_S^+ = \mathbf{L}_S^+$ εφόσον ο πίνακας \mathbf{L}_S της μπορεί να υπολογιστεί. Έπειτα, μια αρκετά δημοφιλής προσέγγιση είναι η επιλογή $\hat{\mathbf{L}}_S^+ = \mathbf{L}_{Sd}^+$ όπου ο πίνακας \mathbf{L}_{Sd} έχει υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το βάθος των επιθυμητών χαρακτηριστικών έτσι ώστε να αποφευχθεί η συνεχής εκτίμηση της τιμής του Z . Μια επιπλέον μέθοδος που προτείνεται στην βιβλιογραφία είναι η κατασκευή του ψευδο-αντίστροφου πίνακα αλληλεπίδρασης χρησιμοποιώντας όχι μόνο τις επιθυμητές τιμές του βάθους αλλά και τις εκτιμώμενες τιμές του σε κάθε μέτρηση, δηλαδή $\hat{\mathbf{L}}_S^+ = (\frac{1}{2}\mathbf{L}_S + \frac{1}{2}\mathbf{L}_{Sd})^+$.

Η επιλογή του τρόπου υπολογισμού της μήτρας αλληλεπίδρασης επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης αλλά και την τροχιά που ακολουθεί η κάμερα κατά την σύγκλιση για δεδομένες τιμές του διαγώνιου πίνακα κερδών λ .

1.5 Τηλεχειρισμός

Ο τηλεχειρισμός, όπως υποδηλώνει και η ετοιμολογία της λέξης τηλε - χειρίζομαι, είναι ο έλεγχος μιας μηχανής από απόσταση (*remote control*). Ο χειριστής (*operator*) ελέγχει το σύστημα (*tele-operator*), το οποίο μπορεί να είναι ευφυές (*tele-robot*) επικοινωνώντας είτε ασύρματα (WiFi, Bluetooth) είτε ενσύρματα. Μερικές από τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται στα πλαίσια της ρομποτικής είναι:

- *Διαστημικές Εφαρμογές (Space Robots)*. Ο έλεγχος ενός ρομπότ στο διάστημα από ανθρώπους που βρίσκονται στην γη ή ακόμα και από τους αστροναύτες γίνεται για την εξερεύνηση ενός χώρου στο διάστημα, για την επισκευή μιας βλάβης ή ακόμα και για την συντήρηση ενός διαστημόπλοιου έτσι ώστε να μην επέμβει ο ίδιος.
- *Τηλεδιάσκεψη-Τηλεπαρουσία (Telepresence Robots)*. Τα ρομπότ αυτού του είδους είναι κινούμενα και εφοδιασμένα με οθόνη, κάμερες, μικρόφωνα και ηχεία έτσι ώστε να μπορεί να τα ελέγχει ένα άτομο από απόσταση όταν δεν μπορεί να παρευρεθεί σε συναντήσεις ή συνεδριάσεις. Έτσι δίνεται η δυνατότητα στο άτομο αυτό να έχει ελευθερία κινήσεων στο χώρο, εικόνα, ήχο αλλά και να μπορεί να επέμβει σε αυτόν αν το ρομπότ είναι εξοπλισμένο με κάποιου είδους βραχίονες.
- *Θαλάσσιες Εφαρμογές (Marine Applications)*. Χρησιμοποιούνται τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια ρομπότ σε αποστολές στις οποίες είτε είναι επικίνδυνο το περιβάλλον ή πολύ μεγάλο το βάθος για να επέμβει ο άνθρωπος.
- *Ιατρικές Εφαρμογές (Medicine)*. Χρησιμοποιούνται κυρίως για χειρουργικές επεμβάσεις παρέχοντας την δυνατότητα στον χειρουργό να πραγματοποιεί την επέμβαση από απόσταση αλλά και με μεγαλύτερη ακρίβεια, καλύτερη οπτική και μικρότερη αιμορραγία.

Τα κύρια προβλήματα που συναντούνται κατά τον τηλεχειρισμό είναι η καθυστέρηση (*delay*) αν η απόσταση του χειριστή με το τηλεχειριζόμενο σύστημα είναι μεγάλη ή ο διάυλος επικοινωνίας υπόκεινται σε περιορισμούς ταχύτητας ή όγκου δεδομένων κατά την διάδοση πληροφορίας. Επίσης, ένα επιπλέον ζήτημα είναι η ποιότητα αλλά και η δυνατότητα ανάδρασης πληροφορίας από το τηλεχειριζόμενο σύστημα στον χειριστή ή η ικανότητα τηλεχειρισμού λόγω δυσχερούς περιβάλλοντος.

Κεφάλαιο 2

Σκοπός Διπλωματικής

2.1 Διατύπωση Προβλήματος

Σε αυτήν την εργασία μελετάται το πρόβλημα τηλεχειρισμού ενός ρομποτικού οχήματος από ρομποτικό σύστημα βραχίονα-πλατφόρμας. Η ιδέα της διερεύνησης ενός τέτοιου προβλήματος προέκυψε από το γεγονός ότι τα ρομποτικά συστήματα κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος στην καθημερινότητα του ανθρώπου. Έτσι στο μέλλον τα ίδια τα ρομπότ θα κληθούν να ελέγξουν άλλα ρομπότ είτε επειδή ο άνθρωπος δεν θα έχει την δυνατότητα να το κάνει είτε επειδή θα είναι σε ένα περιβάλλον ή κατάσταση επικίνδυνη για αυτόν.

Στα πλαίσια της διπλωματικής διερευνάται το πρόβλημα του τηλεχειρισμού. Το τηλεχειριζόμενο ρομπότ είναι εξοπλισμένο με μία κάμερα η οποία στέλνει ασύρματα την εικόνα της σε μία οθόνη η οποία βρίσκεται στο περιβάλλον του ρομπότ χειριστή. Επιπλέον, είναι συνδεδεμένο με ένα joystick με το οποίο μπορούν ελεγχθούν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας του. Το τροχοφόρο ρομπότ κινείται στο επίπεδο με ικανότητα κίνησης και στους δύο άξονες που ορίζουν το επίπεδο καθώς επίσης και γύρω από τον κάθετο άξονα που διέρχεται από το κέντρο της πλατφόρμας (ολονομικό ρομπότ), δηλαδή ταυτόχρονος έλεγχος θέσης και προσανατολισμού.

Από την άλλη, το ρομποτικό σύστημα βραχίονα-πλατφόρμας καλείται να τηλεχειριστεί το τροχοφόρο ρομπότ. Ο στόχος του τηλεχειρισμού είναι η οδήγηση του από μία τυχαία θέση στην επιθυμητή έχοντας οπτική πληροφορία μέσω της οθόνης και αλληλεπίδραση με αυτό μέσω του joystick. Η δυσκολία του προβλήματος έγκειται στο ότι το ρομπότ χειριστής δεν γνωρίζει τα χαρακτηριστικά και την απόσταση από τον στόχο της κάμερας του τροχοφόρου ρομπότ. Επίσης, δεν είναι γνωστή η σχέση που συνδέει την θέση του joystick με την αντίστοιχη ταχύτητα που αυτή παράγει καθώς επίσης και η ανάδραση θέσης ή ταχύτητας από το τηλεχειριζόμενο ρομπότ. Συνεπώς, δεν μπορεί να εφαρμοστεί ένας κλασικός IBVS έλεγχος όπως έχει περιγραφεί στην Ενότητα 1.4 αφού η εκτίμηση του βάθους του στόχου και των παραμέτρων της κάμερας είναι αδύνατη ενώ τα οπτικά χαρακτηριστικά δεν είναι άμεσα διαθέσιμα.

Η επίλυση αυτού του προβλήματος επιτυγχάνεται με την σχεδίαση ενός ελεγκτή βασισμένο στον IBVS. Ο ελεγκτής αυτός λαμβάνει υπόψη του και την πιθανή μεταβολή της σχετικής θέσης του ρομπότ ελεγκτή με την οθόνη κατά την διαδικασία ελέγχου. Το σχήμα εκμεταλλεύεται

την θέση των οπτικών χαρακτηριστικών στο επίπεδο της οθόνης και τις διαστάσεις της για τον υπολογισμό των κανονικοποιημένων συντεταγμένων των οπτικών χαρακτηριστικών στο επίπεδο της εικόνας της κάμερας που είναι τοποθετημένη στο τηλεχειριζόμενο ρομπότ. Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας μια σταθερή θετική τιμή για το βάθος υπολογίζεται ο πίνακας αλληλεπίδρασης (Σχέση 1.4).

Για την κατασκευή αυτού του ελεγκτή έχουν γίνει οι παρακάτω υποθέσεις:

- Το configuration με το οποίο το σύστημα βραχίονα-πλατφόρμας έχει πιάσει το joystick είναι γνωστό και βάση αυτού έχει εξασφαλιστεί ότι η οθόνη δεν θα χαθεί από το οπτικό πεδίο καθόλη την διάρκεια του ελέγχου.
- Το deadzone του joystick και τα όρια του χώρου εργασίας που ορίζονται από αυτό είναι γνωστά.
- Ο πίνακας μετασχηματισμού από το πλαίσιο συντεταγμένων του joystick στο πλαίσιο συντεταγμένων της κάμερας που είναι τοποθετημένη στο τροχοφόρο ρομπότ θεωρείται γνωστός.
- Το δίκτυο δεν εισάγει καθυστερήσεις κατά την μετάδοση πληροφορίας.

2.2 Σχετικές Εργασίες - Βιβλιογραφία

Τις τελευταίες δεκαετίες, πληθώρα εργασιών μελετούν το πρόβλημα της οπτικής οδήγησης (Visual Servoing) για ρομποτικά συστήματα. Οι βασικές κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται οι εργασίες αυτές είναι για Image Based (IBVS), Position Based (PBVS) και Hybrid approaches (συνδυασμός 2D-3D servoing) σχήματα ελέγχου οπτικής οδήγησης. Σχετικά με τα IBVS σχήματα ελέγχου διάφορες εργασίες έχουν αναπτυχθεί για την εφαρμογή του σε uncalibrated κάμερες [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Στο [6] περιγράφεται μια τεχνική εκτίμησης του πίνακα αλληλεπίδρασης παρατηρώντας την τροχιά των features στο επίπεδο της εικόνας για γνωστή κίνηση του τελικού σημείου δράσης. Ένας προσαρμοστικός ελεγκτής για οπτική οδήγηση βασισμένη σε εικόνα ο οποίος δεν απαιτεί την γνώση του δυναμικού μοντέλου του ρομποτικού συστήματος προτείνεται στο [7] αλλά αφορά επίπεδους βραχίονας. Εν συνεχεία, το [8] προτείνει ένα προσαρμοστικό σχήμα ελέγχου οπτικής οδήγησης για τροχοφόρο ρομπότ το οποίο λαμβάνει τα οπτικά δεδομένα από μια fixed uncalibrated κάμερα αλλά απαιτεί την ανάδραση της θέσης - προσανατολισμού, γραμμικής - γωνιακής ταχύτητας του τροχοφόρου ρομπότ ως προς την κάμερα αλλά και την ακριβή ταχύτητα του. Ο προσαρμοστικός ελεγκτής που αναλύεται στο [9] προϋποθέτει την γνώση της ακριβούς τιμής των αρθρώσεων του manipulator που οδηγείται ενώ στο [10] κατασκευάζεται μια μορφή ενός πίνακα αλληλεπίδρασης ανεξάρτητη του βάθους των σημείων η οποία βασίζεται στις δυναμικές εξισώσεις του ρομπότ. Οι δυναμικές εξισώσεις απαιτούνται και για το προσαρμοστικό σχήμα ελέγχου στο [11] ενώ στο [12] απαιτείται η ανάδραση της θέσης - προσανατολισμού, γωνιακής - γραμμικής ταχύτητας και επιτάχυνσης.

Όσο αφορά τον τηλεχειρισμό ρομποτικών συστημάτων από άνθρωπο διάφορες εργασίες μελετούν ζητήματα που προκύπτουν είτε λόγω καθυστερήσεων που εισάγονται από το δίκτυο [13],

[14], [15], είτε λόγω δυσκολίας χειρισμού [16], [17], [18], [19]. Παρόλα αυτά, στην ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν αναλύεται το πρόβλημα του τηλεχειρισμού ρομποτικού συστήματος από ρομπότ μέσω οπτικού ελέγχου.

Στην παρούσα διπλωματική αναλύεται ένα Image-Based Visual Servoing σχήμα ελέγχου το οποίο λαμβάνει τα οπτικά δεδομένα από οθόνη μέσω μίας κάμερας με γνωστές παραμέτρους για την οπτική οδήγηση μιας uncalibrated κάμερας η οποία προβάλλει την εικόνα της στην οθόνη. Συνεπώς, το ρομπότ χειριστής το οποίο λαμβάνει τον έλεγχο χειρισμού του τηλεχειριζόμενου ρομπότ είναι αδύνατο να εξάγει την ακριβή θέση - προσανατολισμό ή γραμμική - γωνιακή ταχύτητα του ρομπότ που τηλεχειρίζεται αφού η μόνη πληροφορία που είναι διαθέσιμη είναι η εικόνα της οθόνης που παρακολουθεί.

Κεφάλαιο 3

Μοντελοποίηση

Στα πλαίσια της διπλωματικής ο συμβολισμός \mathbf{C}_i χρησιμοποιείται για τα καρτεσιανά πλαίσια συντεταγμένων. Θεωρούμαι \mathbf{C}_0 το inertial πλαίσιο συντεταγμένων του ρομποτικού συστήματος πλατφόρμας βραχίονα, το αναφορικό σύστημα συντεταγμένων της πλατφόρμας του συστήματος είναι \mathbf{C}_p , της βάσης του βραχίονα \mathbf{C}_b , \mathbf{C}_{C1} και \mathbf{C}_{C2} τα αντίστοιχα της κάμερας με την οποία είναι εφοδιασμένο το τηλεχειριζόμενο σύστημα (*cam₁*) και της κάμερας (*cam₂*) του ρομπότ ελεγκτή. Επίσης, \mathbf{C}_M , \mathbf{C}_J και \mathbf{C}_{ee} τα πλαίσια συντεταγμένων του τηλεχειριζόμενου συστήματος (τροχοφόρο ρομπότ), του Joystick, και του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα του ρομπότ ελεγκτή.

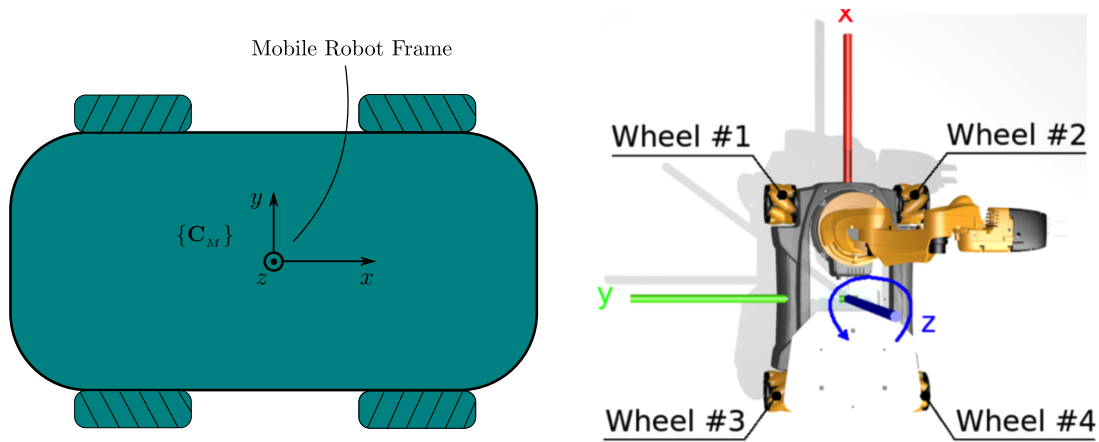
Ο συμβολισμός ${}^a\mathbf{A}_b$ χρησιμοποιείται για τους ομογενείς πίνακες μετασχηματισμού 4×4 από το πλαίσιο συντεταγμένων b στο a . Όπου:

$${}^a\mathbf{A}_b = \begin{bmatrix} {}^a\mathbf{R}_b & {}^a\mathbf{P}_b \\ \mathbf{0}_{3 \times 1}^T & 1 \end{bmatrix}$$

με ${}^a\mathbf{R}_b \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ πίνακας στροφής, ${}^a\mathbf{P}_b \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ το διάνυσμα θέσης του b ως προς το a και $\mathbf{0}_{3 \times 1}$ μηδενικό διάνυσμα 3×1 . Επίσης, όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 1.4 τα σύμβολα με μικρό γράμμα ${}^a\mathbf{p}_b$ συμβολίζουν τις δισδιάστατες μεταβλητές, π.χ. προβολές, του σημείου b ως προς το a , τα σημεία στο χώρο συμβολίζονται με κεφαλαίο γράμμα ${}^a\mathbf{P}_b$ και με ${}^a\tilde{\mathbf{P}}_b$ οι ομογενείς συντεταγμένες του ${}^a\mathbf{P}_b$, δηλαδή ${}^a\tilde{\mathbf{P}}_b = \begin{bmatrix} {}^a\mathbf{P}_b \\ 1 \end{bmatrix}$.

3.1 Τροχοφόρο Ρομπότ

Το τροχοφόρο ρομπότ που χρησιμοποιείται ως τηλεχειριζόμενο σύστημα είναι ολινομικό και κινείται στο επίπεδο. Οπότε έχει 3 βαθμούς ελευθερίας (x, y, θ) , δηλαδή μπορεί να κινηθεί και στους δύο άξονες που ορίζουν το επίπεδο (x, y) και να περιστραφεί γύρω από τον κάθετο άξονα (θ) . Αυτή η ιδιότητα πηγάζει από τις swedish wheels που διαθέτει και τον διαφορικό τρόπο με τον οποίο τις οδηγεί (έναν κινητήρα για κάθε τροχό). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η πλατφόρμα Youbot της Kuka.



Σχήμα 3.1: Τροχοφόρο Ρομπότ

Ο low-level controller που έχει υλοποιηθεί από την εταιρία δίνει την δυνατότητα να ελέγχεται η πλατφόρμα στέλνοντας εντολές ταχύτητας ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης του $\{C_M\}$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 αλλά και παράλληλα να εξάγεται η οδομετρία της ως προς το αντίστοιχο πλαίσιο με την βοήθεια των encoders που είναι τοποθετημένοι σε κάθε τροχό. Το διάνυσμα ταχυτήτων που εισάγεται στον velocity controller της πλατφόρμας είναι της μορφής ${}^M \mathbf{v} = [{}^M u_x \quad {}^M u_y \quad {}^M \omega_z]^T$.

Η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να κινηθεί είναι $0.8m/s$ και μπορεί να μεταφέρει μέγιστο φορτίο $20kg$.

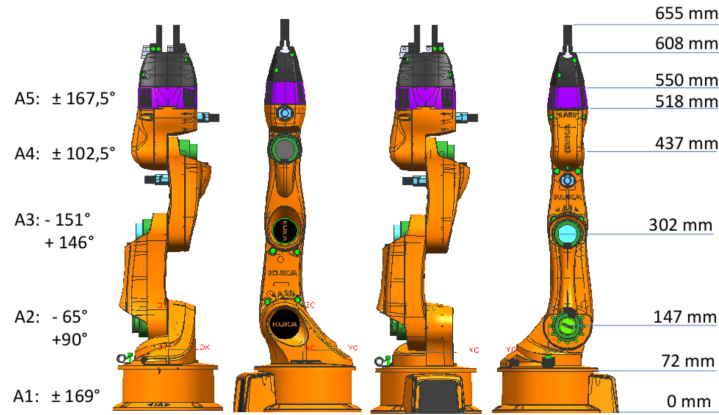
3.2 Ρομποτικό Σύστημα Πλατφόρμα-Βραχίονας

Το ρομποτικό σύστημα πλατφόρμας - βραχίονα που χρησιμοποιείται έχει 8 βαθμούς ελευθερίας. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η πλατφόρμα που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.1 έχοντας συνδέσει το ρομποτικό βραχίονα 5 βαθμών ελευθερίας της Kuka, Youbot Arm.

Ο ρομποτικός βραχίονας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 έχει 5 βαθμούς ελευθερίας με τους (A_1, A_5) να στρέφονται ως προς παράλληλους άξονες όπως και οι υπόλοιποι 3 A_2, A_3 και A_4 . Σε κάθε άρθρωση μπορεί να γίνει έλεγχος θέσης, ταχύτητας και ροπής λόγω του ότι οδηγούνται με ξεχωριστό κινητήρα και διαθέτουν encoders οι οποίοι μετρούν την γωνία που έχει στραφεί. Επιπλέον γνωρίζοντας την διάταξη με την οποία είναι τοποθετημένες οι αρθρώσεις αλλά και το μήκος των συνδέσμων που τις ενώνουν είναι δυνατή η επίλυση του προβλήματος της ευθείας κινηματικής της ανοιχτής κινηματικής αλυσίδας όπως έχει περιγραφεί στην Υποενότητα 1.2.2:

$${}^b \mathbf{A}_{ee}(\mathbf{q}_A) = {}^b \mathbf{A}(q_1)_{A_1} {}^{A_1} \mathbf{A}(q_2)_{A_2} \dots {}^{A_5} \mathbf{A}_{ee} \quad (3.1)$$

όπου $\mathbf{q}_A = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5]^T$ το διάνυσμα των γωνιών των αρθρώσεων και ${}^{A_5} \mathbf{A}_{ee}$ σταθερός πίνακας μετασχηματισμού από την τελευταία άρθρωση ως το τελικό σημείο δράσης. Έτσι προκύπτει η θέση και ο προσανατολισμός του τελικού σημείου δράσης συναρτήσει των τιμών των γωνιών κάθε άρθρωσης (\mathbf{q}_A) .



Σχήμα 3.2: Ρομποτικός Βραχίονας 5-DOF Youbot Arm

Εν συνεχεία, η επίλυση του προβλήματος της αντίστροφης κινηματικής είναι εξίσου σημαντική καθώς είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του διανύσματος \mathbf{q}_A για συγκεκριμένη θέση και προσανατολισμό του τελικού σημείου του ρομποτικού βραχίονα. Στην περίπτωση της αντίστροφης κινηματικής το πρόβλημα είναι αρκετά πιο σύνθετο λόγω του ότι οι εξισώσεις που καλούνται να επιλυθούν είναι κατά γενική περίπτωση μη γραμμικές, μπορεί να προκύψουν πολλαπλές λύσεις ή ακόμα και άπειρες στην περίπτωση που ο βραχίονας είναι κινηματικά πλεονάζων όπως και μη αποδεκτές λύσεις λόγω της δομής του.

Επιπλέον, ο υπολογισμός της ιακωβιανής ορίζουσας του συστήματος είναι απαραίτητος αφού είναι επιθυμητό να υπολογιστεί μια σχέση που συνδέει την ταχύτητα (γραμμική και γωνιακή) του τελικού σημείου δράσης με την αντίστοιχη ταχύτητα των αρθρώσεων.

$$\mathbf{v}_{ee} = \mathbf{J}_A(\mathbf{q}_A)\dot{\mathbf{q}}_A$$

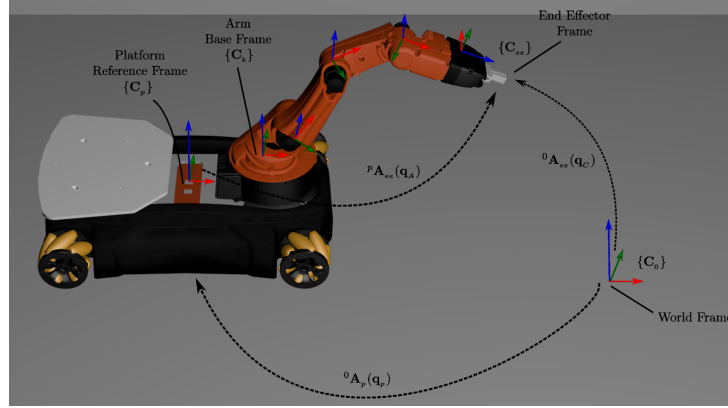
Η ιακωβιανή ορίζουσα είναι συνάρτηση του διανύσματος \mathbf{q}_A και στην περίπτωση όπου ένα configuration προκαλεί μείωση του βαθμού του πίνακα $\mathbf{J}_A(\mathbf{q}_A)$ αποκαλείται kinematic singularity. Τα singularities είναι τιμές των αρθρώσεων για τις οποίες η ικανότητα κίνησης είναι μειωμένη, δηλαδή δεν είναι δυνατόν να επιβληθεί μια αυθαίρετη κίνηση στο τελικό σημείο δράσης και μπορούν να οδηγήσουν σε άπειρες λύσεις της αντίστροφης κινηματικής ή ακόμα και σε μεγάλες ταχύτητες στο χώρο των αρθρώσεων.

Επίσης, μελετάται το πρόβλημα της αντίστροφης διαφορικής κινηματικής για το ρομποτικό σύστημα αφού επιθυμητές ταχύτητες στο τελικό σημείο δράσης είναι απαραίτητο να εκφραστούν στις αντίστοιχες ταχύτητες στον χώρο των αρθρώσεων, δηλαδή:

$$\dot{\mathbf{q}}_A = \mathbf{J}_A^+(\mathbf{q}_A)\mathbf{v}_{ee} \quad (3.2)$$

όπου \mathbf{J}_A^+ ο ψευδοαντίστροφος $\mathbf{J}_A^+ = \mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$. Ο συγκεκριμένος τρόπος επίλυση διασφαλίζει την μείωση της νόρμας του διανύσματος των ταχυτήτων των αρθρώσεων ($\|\dot{\mathbf{q}}_A\|_{min}$).

Συνεπώς, υπολογίζουμε τον ομογενή πίνακα μετασχηματισμού για την ευθεία κινηματική του συστήματος των 8 βαθμών ελευθερίας (Σχήμα 3.3) $\mathbf{q}_e = [\mathbf{q}_p, \mathbf{q}_A]^T \in \mathcal{R}^{8 \times 1}$, με $\mathbf{q}_p =$



Σχήμα 3.3: Ρομποτικός Σύστημα Πλατφόρμα-Βραχίονας

$[{}^0x_p, {}^0y_p, {}^0\theta_p]^T$ το διάνυσμα θέσης και προσανατολισμού της πλατφόρμας στο επίπεδο. Υπολογίζουμε:

$${}^0\mathbf{A}_{ee}(\mathbf{q}_e) = {}^0\mathbf{A}_p(\mathbf{q}_p) \cdot {}^p\mathbf{A}_b \cdot {}^b\mathbf{A}_{ee}(\mathbf{q}_A) \quad (3.3)$$

όπου εκφράζει τον ομογενή μετασχηματισμό από το $\{C_0\}$ στο τελικό σημείο δράσης $\{C_{ee}\}$ με την βοήθεια της οδομετρίας, του γνωστού πίνακα μετασχηματισμού από το $\{C_p\}$ στο $\{C_b\}$ και της Σχέσης 3.1.

Αντίστοιχα, υπολογίζεται και η ιακωβιανή ορίζουσα του συστήματος των 8 βαθμών ελευθερίας που συνδέει την ταχύτητα του τελικού σημείου δράσης με την χρονική μεταβολή του διανύσματος $\mathbf{q}_e = [\mathbf{q}_p, \mathbf{q}_A]^T$:

$$\mathbf{v}_{ee} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p(\mathbf{q}_p) \\ \mathbf{J}_A(\mathbf{q}_A) \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_e \quad (3.4)$$

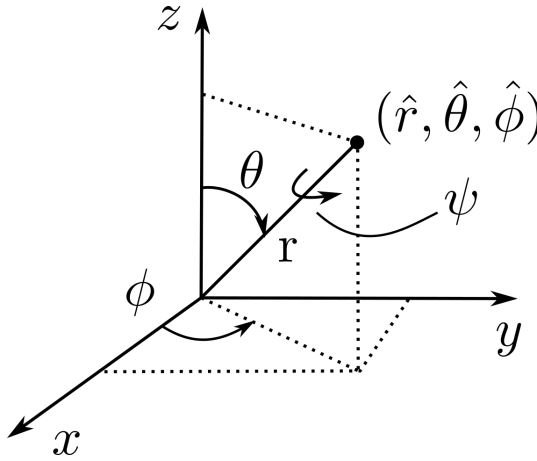
Για τον υπολογισμό των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε η Kinematics and Dynamics Library (KDL) βιβλιοθήκη.

Διοθέντος της Σχέσης 3.3 και 3.4 τα αντίστροφα προβλήματα επιλύονται ως έχουν αναφερθεί στην Υποενότητα 1.2.2 και της Σχέσης 3.2 αντίστοιχα.

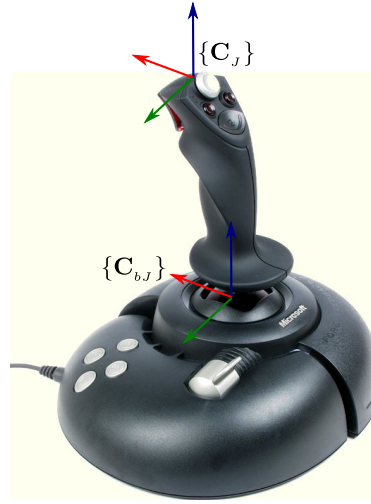
3.3 Joystick

Στην γενική περίπτωση, ένα joystick μοντελοποιείται ως ένας άξονας μήκους l συνδεδεμένος σε μια σφαιρική άρθρωση. Συνεπώς, ο χώρος εργασίας που ορίζεται από αυτό είναι ένα τμήμα της επιφάνειας μιας σφαίρας ακτίνας l όπου το μέγεθός του καθορίζεται από τις μέγιστες τιμές των γωνιών εκφρασμένες σε σφαιρικές συντεταγμένες $\theta \in [\theta_{min}, \theta_{max}]$ και $\phi \in [\phi_{min}, \phi_{max}]$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

Ο χώρος εργασίας εκφράζεται και σε καρτεσιανές συντεταγμένες ώστε να βρεθούν τα αντί-



Σχήμα 3.4: Σύστημα Σφαιρικών Συντεταγμένων



Σχήμα 3.5: Joystick

στοιχία $[x_{min}, x_{max}]$, $[y_{min}, y_{max}]$ και $[z_{min}, z_{max}]$ χρησιμοποιώντας τις γνωστές σχέσεις:

$$\begin{cases} x = r \sin(\theta) \cos(\phi) \\ y = r \sin(\theta) \sin(\phi) \\ z = r \cos(\theta) \end{cases}$$

Το Joystick που χρησιμοποιείται είναι το Microsoft Sidewinder Force Feedback 2 το οποίο έχει μήκος $l = 17cm$. Ο χώρος εργασίας που ορίζει στο καρτεσιανό επίπεδο ως προς του άξονες $x, y - axis$ είναι συμμετρικός και ίσος με $([-5, 5], [-5, 5])$ σε cm ως προς το $\{C_j\}$.

Όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 2.1 το Joystick μπορεί να ελέγξει και τους 3 βαθμούς ελευθερίας του τροχοφόρου ρομπότ. Δηλαδή, πέρα από την μετατόπισή του στους άξονες $x, y, z - axis$ μπορεί να στραφεί κατά τον άξονα z του πλαισίου του $\{C_j\}$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Έτσι έχει 3 βαθμούς ελευθερίας στο σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων (ϕ, θ, ψ) όπως διακρίνονται στο Σχήμα 3.4.

3.4 Κάμερες

Η λειτουργία της κάμερας καθώς και το μοντέλο της κεντρικής προοπτικής προβολής που χρησιμοποιείται από αυτές έχει αναλυθεί στην Ενότητα 1.3. Η κάμερα με την οποία είναι εφοδιασμένη το τροχοφόρο ρομπότ (*cam1*) είναι τοποθετημένη στο κέντρο μάζας του με γνωστό προσανατολισμό ως προς αυτό, δηλαδή ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων του $\{C_M\}$:

$${}^M P_{C1} = {}^M R_0 P_{C1} \quad (3.5)$$

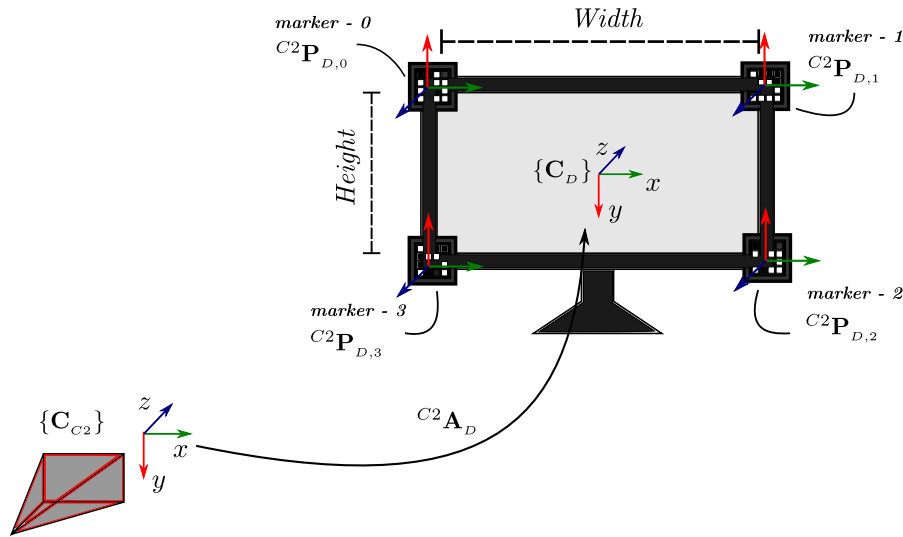
όπου το μητρώο στροφής ${}^M R_0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ εκφράζει τον μετασχηματισμό του world frame ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων του τροχοφόρου ρομπότ.

Η δεύτερη κάμερα (*cam2*) είναι τοποθετημένη με γνωστή θέση και προσανατολισμό ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης της πλατφόρμας $\{C_p\}$ σε τέτοιο σημείο ώστε να μπορεί να παρακολουθήσει την οθόνη χωρίς να παρεμβάλλεται στο οπτικό πεδίο της ο βραχίονας.

Τέλος, θεωρούμαι ότι και οι δυο κάμερες χρησιμοποιούν το μοντέλο κεντρικής προοπτικής προβολής με τα πλαίσια συντεταγμένων C_{C_1} , C_{C_2} να είναι τοποθετημένα στο οπτικό τους κέντρο και τον z άξονα τους να ορίζει τον οπτικό άξονα ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο της εικόνας.

3.5 Οθόνη

Η οθόνη μπορεί να θεωρηθεί ως ένα επίπεδο που ορίζεται από 4 σημεία. Δεδομένου ότι η οπτική πληροφορία εξάγεται από το επίπεδο που προβάλλεται η εικόνα στην οθόνη τα 4 σημεία αυτά είναι οι 4 γωνίες αυτού του επιπέδου. Το πλαίσιο συντεταγμένων της οθόνης $\{C_D\}$ είναι τοποθετημένο στο κέντρο του επιπέδου με τον άξονα z κάθετο ως προς αυτό όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, δηλαδή προσανατολισμένο με το πλαίσιο συντεταγμένων της *cam1* ($\{C_{C_2}\}$) η οποία προβάλλει σε αυτήν την εικόνα της. Η θέση του πλαισίου συντεταγμένων της οθόνης υπολογίζεται βάση της θέσης των 4 γωνιών στις οποίες έχουν τοποθετηθεί *markers*. Μετρώντας την θέση και τον προσανατολισμό κάθε *marker* ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της *cam2* ($\{C_{C_2}\}$) υπολογίζονται και τα αντίστοιχα για το κέντρο της οθόνης.



Σχήμα 3.6: Οθόνη

Έστω $C^2P_{D,i} = [{}^{C^2}X_{D,i}, {}^{C^2}Y_{D,i}, {}^{C^2}Z_{D,i}]^T$ για $i = 0, 1, 2, 3$ οι συντεταγμένες των 4 γωνιών της οθόνης ως προς το $\{C_{C_2}\}$. Υπολογίζονται βάση αυτών οι διαστάσεις του επιπέδου στο οποίο προβάλλεται η εικόνα, το κέντρο του επιπέδου αυτού και το μητρώο μετασχηματισμού από το πλαίσιο συντεταγμένων της κάμερας σε αυτό της οθόνης ως εξής:

$${}^{C^2}\mathbf{P}_D = \begin{bmatrix} {}^{C^2}X_D \\ {}^{C^2}Y_D \\ {}^{C^2}Z_D \end{bmatrix} \quad (3.6\alpha')$$

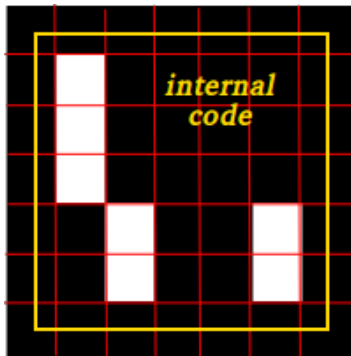
$$\begin{cases} d_W \\ d_H \end{cases} \quad (3.6\beta')$$

$${}^{C^2}\mathbf{A}_D = \begin{bmatrix} {}^{C^2}\mathbf{R}_D & {}^{C^2}\mathbf{P}_D \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6\gamma')$$

3.6 Εντοπισμός (Detection)

Για τον εντοπισμό της οθόνης έχουν τοποθετηθεί 4 markers όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 3.5 στις γωνίες της και ένα χαρτόνι με 4 γνωστούς markers για τον εντοπισμό του στόχου. Ο αλγόριθμος εντοπισμού που χρησιμοποιείται είναι το πακέτο ar-sys του ROS που χρησιμοποιεί markers του aruco και βασίζεται στην OpenCV βιβλιοθήκη. Ο αλγόριθμος αυτός υπολογίζει τόσο την θέση όσο και τον προσανατολισμό κάθε marker σε σχέση με την κάμερα με αρκετά μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια. Επίσης, ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του είναι η ευρωστία του (robustness), δηλαδή η ισορροπία ανάμεσα στην ικανότητα επίλυσης του προβλήματος υπολογισμού της θέσης και του προσανατολισμού κάθε marker και στην αποτελεσματικότητα που απαιτείται σε πολλά διαφορετικά περιβάλλοντα, η οποία αποτελεί σημαντικό κριτήριο για την μηχανική όραση.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά προκύπτουν κατά κύριο λόγο από την ιδιαιτερότητα της μορφής που έχουν οι markers. Ο κάθε ένας από αυτούς είναι μια τετράγωνη εικόνα η οποία αποτελείται από έναν εσωτερικό τετραγωνικό πίνακα μεγέθους 5 που σε κάθε στοιχείο του έχει ένα δυαδικό (μαύρο - άσπρο) τετράγωνο. Συνεπώς, κάθε marker έχει εσωτερική κωδικοποίηση 5 λέξεων των 5 bits όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 3.7 και ο κωδικός αυτού αποτελεί την ταυτότητά του (id).



Σχήμα 3.7: Εσωτερική Κωδικοποίηση Marker

Έτσι λοιπόν, ο αλγόριθμος εντοπισμού υπολογίζει τόσο την θέση όσο και τον προσανατολισμό για κάθε marker που εντοπίζεται. Δηλαδή τους 4 της οθόνης και τους 4 που ορίζουν τον

στόχο αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} {}^{C^2}\mathbf{P}_{D,i} &= [{}^{C^2}X_{D,i}, {}^{C^2}Y_{D,i}, {}^{C^2}Z_{D,i}]^T \\ {}^{C^2}\mathbf{P}_{T,i} &= [{}^{C^2}X_{T,i}, {}^{C^2}Y_{T,i}, {}^{C^2}Z_{T,i}]^T \end{aligned} \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} &{}^{C^2}\mathbf{R}_{D,i} \\ &{}^{C^2}\mathbf{R}_{T,i} \end{aligned} \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (3.8)$$

,όπου ${}^{C^2}\mathbf{R}_{D,i}$ και ${}^{C^2}\mathbf{R}_{T,i}$ οι μήτρες στροφής των markers της οθόνης και του στόχου ως προς το πλαίσιο αναφοράς της κάμερας cam_2 , αντίστοιχα.

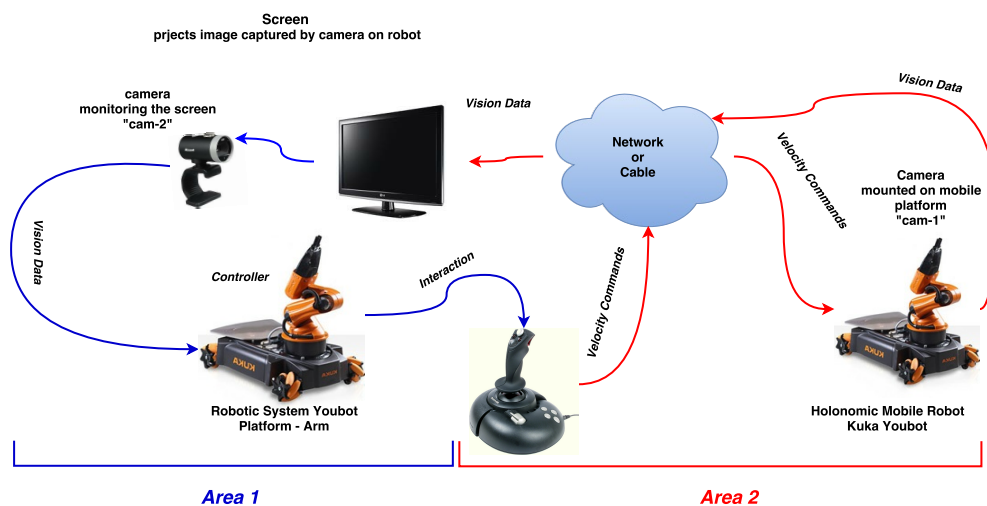
Κεφάλαιο 4

Σχεδίαση Ελεγκτή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη και ο τρόπος σχεδίασης του ελεγκτή που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος τηλεχειρισμού τροχοφόρου ρομπότ από ρομποτικό σύστημα πλατφόρμας - βραχίονα μέσω οπτικής ανατροφοδότησης βασισμένη σε εικόνα από οθόνη.

4.1 Πρόβλημα Οπτικής Ανατροφοδότησης Μέσω Εικόνας Από Οθόνη

Ο έλεγχος οπτικής ανατροφοδότησης βασισμένος σε εικόνα (image-based visual servo control) όπως περιγράφεται στην Ενότητα 1.4 απαιτεί γνώση των εγγενών παραμέτρων της κάμερας (focal length, principal point) η οποία είναι τοποθετημένη στο ρομπότ που οδηγείται. Παρόλα αυτά, το ρομποτικό σύστημα που καλείται να τηλεχειριστεί αυτό το ρομπότ λαμβάνει τα οπτικά δεδομένα μέσω μίας οθόνης. Συνεπώς είναι αδύνατο να γνωρίζει τις παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά της κάμερας από την οποία η εικόνα λαμβάνεται και προβάλλεται στην οθόνη.



Σχήμα 4.1: Αναλυτικό Σχήμα

Τα ζητήματα που παρουσιάζονται κατά την εφαρμογή του ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης μέσω εικόνας από οθόνη καθώς και οι υποθέσεις που έχουν γίνει για την σχεδίαση του ελεγκτή έχουν αναλυθεί στην Ενότητα 2.1. Μια συνοπτική παρουσίαση των ζητημάτων είναι:

- Τα χαρακτηριστικά της κάμερας του τροχοφόρου ρομπότ είναι άγνωστα.
- Η απόσταση ανάμεσα στην κάμερα του τροχοφόρου ρομπότ και του στόχου είναι άγνωστη.
- Η ακριβής θέση-ταχύτητα του τροχοφόρου ρομπότ κατά την διάρκεια του τηλεχειρισμού είναι άγνωστη.

Δεδομένων των παραπάνω ζητημάτων η εκτίμηση των παραμέτρων της κάμερας ή του βάρθους μεταξύ κάμερας και στόχου είναι αδύνατη καθώς η μόνη πληροφορία που έχουμε από το σύστημα που τηλε-χειρίζεται το ρομπότ είναι η εικόνα που προβάλλεται στην οθόνη. Ένα επιπλέον ζήτημα που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι ότι η σχετική θέση της οθόνης και της κάμερας που παρακολουθεί αυτή μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του τηλεχειρισμού καθώς το ρομποτικό σύστημα ελεγκτής στο οποίο η κάμερα είναι προσκολλημένη είναι πιθανό να μετακινηθεί για να ελέγξει το joystick. Αυτή η μεταβολή θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και να μην επηρεάζει τον έλεγχο.

Αντιθέτως, έχει διασφαλιστεί το ότι η κάμερα έχει εντός του οπτικού της πεδίου την οθόνη αλλά και ότι δεν παρεμβάλλεται σε αυτό ο βραχίονας επιλέγοντας κατάλληλη αρχική θέση για το ρομποτικό σύστημα βραχίονα-πλατφόρμας και κατάλληλο τρόπο πιασίματος του joystick από το ρομποτικό χέρι. Επιπλέον, θεωρούμε ότι η cam_1 είναι τοποθετημένη στο κέντρο περιστροφής του τροχοφόρου ρομπότ με γνωστή δυνατότητα κίνησης και χρησιμοποιεί το μοντέλο προοπτικής προβολής.

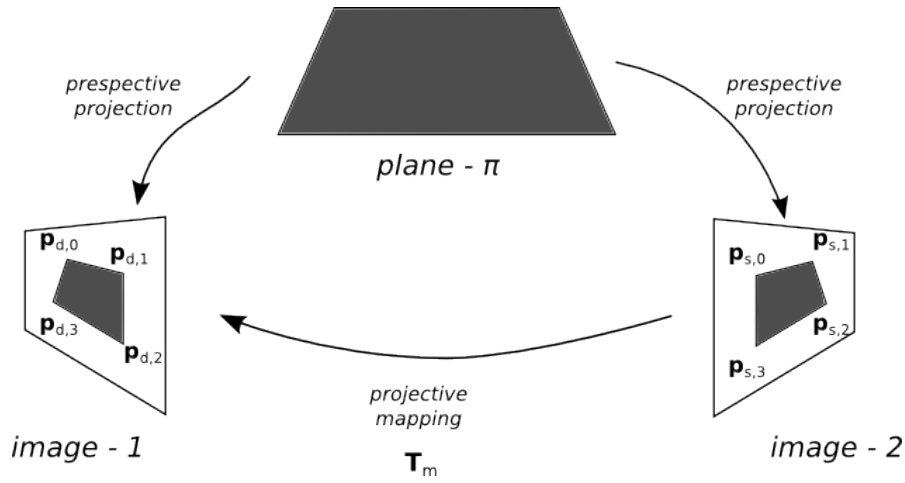
Για την αποφυγή συγχύσεων κατά την ανάλυση επιλέγεται cam_1 η ονομασία της κάμερας που είναι προσκολλημένη στο τροχοφόρο ρομπότ και cam_2 η κάμερα του ρομποτικού συστήματος βραχίονα-πλατφόρμας που παρακολουθεί την οθόνη.

4.2 Προβολική Αντιστοίχιση (Projective Mapping)

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της μεταβολής της σχετικής θέσης της cam_2 ως προς την οθόνη χρησιμοποιείται η μέθοδος της προβολικής αντιστοίχισης η οποία είναι ένας 2D ομογενής μετασχηματισμός [20]. Η μέθοδος περιγράφει την αντιστοίχιση σημείων ενός επίπεδου με τα αντίστοιχα σημεία που είναι προβεβλημένα σε ένα άλλο επίπεδο, δηλαδή μία προβολή επίπεδου-σε-επίπεδο (plain-to-plain projection).

Έστω ότι το επίπεδο π – *plane* που ορίζει η οθόνη προβάλλεται στο επίπεδο της εικόνας της cam_2 από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες (*image* – 1 και *image* – 2). Η αντιστοίχιση των σημείων του επιπέδου π στην *image* – 1 με τα αντίστοιχα στην *image* – 2 περιγράφεται από έναν πίνακα μετασχηματισμού \mathbf{T}_m .

Ορίζουμε $\mathbf{p}_{s,i} = [u_{s,i}, v_{s,i}]$ τα σημεία του επιπέδου που ορίζει η οθόνη στην *image* – 2 και $\mathbf{p}_{d,i} = [x_{d,i}, y_{d,i}]$ τα αντίστοιχα σημεία στην *image* – 1 όπως φαίνεται στην Σχήμα 4.2. Η σχέση που συνδέει τις συντεταγμένες των σημείων αυτών είναι:



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα Προβολικής Αντιστοίχισης

$$\begin{bmatrix} w_i \cdot \mathbf{p}_{d,i} \\ w_i \end{bmatrix} = \mathbf{T}_m \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{s,i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} x_{d,i} = \frac{a \cdot u_{s,i} + b \cdot v_{s,i} + c}{g \cdot u_{s,i} + h \cdot v_{s,i} + 1} \\ y_{d,i} = \frac{d \cdot u_{s,i} + e \cdot v_{s,i} + f}{g \cdot u_{s,i} + h \cdot v_{s,i} + 1} \end{cases} \quad (4.2)$$

Άρα ο πίνακας μετασχηματισμού ορίζεται ως:

$$\mathbf{T}_m = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Όπως φαίνεται η 4.3 μήτρα μετασχηματισμού \mathbf{T}_m έχει 8 αγνώστους οι οποίοι μπορούν να προσδιοριστούν από τις αντιστοιχίσεις των 4 γωνιών του επιπέδου που ορίζουν την οθόνη ($i = 0, 1, 2, 3$). Έτσι προκύπτουν 8 σχέσεις για να υπολογίσουμε τους 8 αγνώστους $a - h$ οι οποίες μπορούν να γραφούν σε ένα 8×8 σύστημα ως εξής:

$$\begin{bmatrix} u_{r,0} & v_{r,0} & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_{r,0} \cdot x_{d,0} & -v_{r,0} \cdot x_{d,0} \\ 0 & 0 & 0 & u_{r,0} & v_{r,0} & 1 & -u_{r,0} \cdot y_{d,0} & -v_{r,0} \cdot y_{d,0} \\ u_{r,1} & v_{r,1} & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_{r,1} \cdot x_{d,1} & -v_{r,1} \cdot x_{d,1} \\ 0 & 0 & 0 & u_{r,1} & v_{r,1} & 1 & -u_{r,1} \cdot y_{d,1} & -v_{r,1} \cdot y_{d,1} \\ u_{r,2} & v_{r,2} & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_{r,2} \cdot x_{d,2} & -v_{r,2} \cdot x_{d,2} \\ 0 & 0 & 0 & u_{r,2} & v_{r,2} & 1 & -u_{r,2} \cdot y_{d,2} & -v_{r,2} \cdot y_{d,2} \\ u_{r,3} & v_{r,3} & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_{r,3} \cdot x_{d,3} & -v_{r,3} \cdot x_{d,3} \\ 0 & 0 & 0 & u_{r,3} & v_{r,3} & 1 & -u_{r,3} \cdot y_{d,3} & -v_{r,3} \cdot y_{d,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{d,0} \\ y_{d,0} \\ x_{d,1} \\ y_{d,1} \\ x_{d,2} \\ y_{d,2} \\ x_{d,3} \\ y_{d,3} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

η εξίσωση είναι της μορφής $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{C}$ όπου \mathbf{A} και \mathbf{C} είναι γνωστοί πίνακες. Λύνοντας ως προς τον \mathbf{x} όταν ο \mathbf{A} είναι αντιστρέψιμος:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{C}$$

έτσι μπορεί να βρεθεί ο πίνακα μετασχηματισμού (\mathbf{T}_m).

Βάση των παραπάνω κάθε φορά που λαμβάνεται μια εικόνα από την cam_2 το τετράπλευρο που σχηματίζεται στο επίπεδο της εικόνας της κάμερας από τις 4 γωνίες της οθόνης μετασχηματίζεται στο reference τετράπλευρο και ο πίνακας μετασχηματισμού που υπολογίζεται εφαρμόζεται σε όλα τα σημεία που ανήκουν στο τετράπλευρο, δηλαδή τα σημεία της εικόνας.

Ως εκ τούτου, θέτουμε τις προβολές των τεσσάρων σημείων $C^2\mathbf{p}_{r,i} = [C^2x_{r,i}, C^2y_{r,i}]$ που ορίζουν την οθόνη στο επίπεδο της εικόνας της cam_2 που έχει ληφθεί από την επιθυμητή οπτική γωνία και $C^2\mathbf{p}_{D,i} = [C^2x_{D,i}, C^2y_{D,i}]$ τα αντίστοιχα σημεία από μια διαφορετική γωνία. Τα σημεία αυτά έχουν επιλεγεί να είναι οι γωνίες της οθόνης όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 3.5. Η σχέση αντιστοίχισης αυτών είναι:

$$\begin{bmatrix} w_i \cdot C^2x_{r,i} \\ w_i \cdot C^2y_{r,i} \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C^2x_{D,i} \\ C^2y_{D,i} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i = 0, 1, 2, 3$$

Με την ίδια λογική εφαρμόζεται ο πίνακας μετασχηματισμού και στα σημεία που ορίζουν τον στόχο. Στα πλαίσια του πειράματος ο στόχος αποτελείται από 4 markers άρα θεωρούμε τα 4 σημεία με συντεταγμένες $C^2\mathbf{p}_{T,i} = [C^2x_{T,i}, C^2y_{T,i}]$ όταν λαμβάνονται από μια τυχαία οπτική γωνία και $C^2\mathbf{p}_{t,i} = [C^2x_{n,i}, C^2y_{n,i}]$ οι προβολές τους στο επίπεδο της εικόνας που έχει ληφθεί από την επιθυμητή οπτική γωνία. Για την αντιστοίχιση των παραπάνω σημείων εφαρμόζεται ο πίνακας μετασχηματισμού που έχει υπολογιστεί από την Σχέση 4.4:

$$\begin{bmatrix} w_i \cdot C^2x_{n,i} \\ w_i \cdot C^2y_{n,i} \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C^2x_{T,i} \\ C^2y_{T,i} \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow C^2\mathbf{p}_{t,i} = \frac{1}{w_i} * \mathbf{T}_m * C^2\mathbf{p}_{T,i}, \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (4.5)$$

4.3 Μεθοδολογία Επίλυσης

Έπειτα από τον προσδιορισμό του προβλήματος και την εκτενή περιγραφή του τρόπου υπολογισμού των απαραίτητων παραμέτρων του επιπέδου της οθόνης (Ενότητα 3.5) και της προβολικής αντιστοίχισης (Ενότητα 4.2) που παρέχει την δυνατότητα να επιλυθεί το πρόβλημα της πιθανής μεταβολής της cam_2 σε σχέση με την οθόνη είναι δυνατή η ανάπτυξη της μεθοδολογίας επίλυσης του προβλήματος ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης η οποία είναι βασισμένη σε εικόνα από οθόνη.

Σκοπός της μεθοδολογίας είναι, πρωτίστως, η ανάπτυξη μίας σχέσης που συνδέει τα σημεία του επιπέδου εικόνας της cam_2 με τα αντίστοιχα της cam_1 , δηλαδή $C^1\mathbf{p} = \mathbf{g}(C^2\mathbf{p})$, και αφετέρου η εφαρμογή του αλγόριθμου ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- **Αρχικοποίηση (Initialization)**, αυτό το βήμα εκτελείται μία φορά πριν αρχίσει ο αλγόριθμος ελέγχου. Το ρομποτικό σύστημα ελεγκτής βρίσκεται στην reference θέση, δηλαδή στην αναφορική οπτική γωνία της cam_2 σχετικά με την οθόνη, και υπολογίζονται τόσο οι παράμετροι του επιπέδου της οθόνης όπως έχουν περιγραφεί στην Ενότητα 3.5 (${}^{C_2'}\mathbf{A}_D, [d_W, d_H], {}^{C_2'}\mathbf{P}_D$) όσο και οι συντεταγμένες των τεσσάρων γωνιών στο επίπεδο της εικόνας της cam_2 , ${}^{C_2'}\mathbf{p}_{r,i}$.
- **Εντοπισμός (Detection)**, εντοπίζονται οι markers της οθόνης και του στόχου από τον αλγόριθμο εντοπισμού και υπολογίζονται οι προβολές των συντεταγμένων των σημείων στο επίπεδο της εικόνας της cam_2 . Δηλαδή, τα δισδιάστατα διανύσματα ${}^{C_2'}\mathbf{p}_{D,i}$ και ${}^{C_2'}\mathbf{p}_{T,i}$, της οθόνης και του στόχου αντίστοιχα.
- **Προβολική Αντιστοίχιση (Projective Mapping)**, οι δισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων του στόχου στο επίπεδο της εικόνας της cam_2 όταν έχουν ληφθεί από μία τυχαία οπτική γωνία προβάλλονται στο επιθυμητό επίπεδο της εικόνας της που έχει ληφθεί από την αναφορική οπτική γωνία. Αυτή η αντιστοίχιση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις αναφορικές δισδιάστατες συντεταγμένες των γωνιών της οθόνης (${}^{C_2'}\mathbf{p}_{t,i}$) και της μεθοδολογίας που αναλύθηκε στην Ενότητα 4.2.
- **Αντιστοίχιση Συντεταγμένων του Επιπέδου της Εικόνας της cam_2 σε αυτό της cam_1** , αρχικά υπολογίζονται οι χωρικές συντεταγμένες των σημείων του στόχου στο επίπεδο της οθόνης (${}^D\mathbf{p}_{T,i}$) και έπειτα διαφρούνται με το αντίστοιχο μήκος διάστασης της οθόνης ($[d_W, d_H]$) για τον υπολογισμό των κανονικοποιημένων συντεταγμένων στο επίπεδο της εικόνας της cam_1 , ${}^{C_1}\mathbf{p}_{T,i}$.
- **Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης (Visual Servo Control)**, οι συντεταγμένες των σημείων που έχουν υπολογιστεί από το προηγούμενο βήμα, ${}^{C_1}\mathbf{p}_{T,i}$, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πίνακα αλληλεπίδρασης (Interaction Matrix) και του σφάλματος $e(t)$ ώστε να επιτευχθεί ο έλεγχος οπτικής ανατροφοδότησης. Οι χωρικές ταχύτητες ${}^{C_1}\mathbf{v}$ που προκύπτουν αντιστοιχίζονται σε θέσεις ${}^{ee}\mathbf{p}_d$ του τελικού σημείου δράσης βάση του σχήματος και του μεγέθους του χώρου εργασίας αλλά και του τρόπου που έχει πιάσει το joystick.
- **Έλεγχος του Ρομποτικού Συστήματος Βραχίονα Πλατφόρμας**. Ένας PID ελεγκτής χρησιμοποιείται για τον έλεγχο θέσης του τελικού σημείου δράσης του ρομποτικού συστήματος βραχίονα-πλατφόρμας.

4.3.1 Αρχικοποίηση (Initialization)

Το βήμα της αρχικοποίησης που εκτελείται μία φορά πριν αρχίσει ο αλγόριθμος ελέγχου είναι αρκετά σημαντικό καθώς υπολογίζονται όλοι οι παράμετροι οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα επόμενα βήματα ελέγχου. Οι υπολογισμοί γίνονται από μία αναφορική θέση της κάμερας ως προς την οθόνη, όπου το αναφορικό πλαίσιο συντεταγμένων ορίζεται ως εξής $\{C_{C_2'}\}$. Οι παράμετροι είναι

οι διαστάσεις της οθόνης ($[d_w, d_H]$), η μήτρα ομογενούς μετασχηματισμού του πλαισίου συντεταγμένων της οθόνης ως προς την cam_2 ($C^2 \mathbf{A}_D$) και οι χωρικές συντεταγμένες του κέντρου της οθόνης ως προς το πλαίσιο της cam_2 $C^2 \mathbf{P}_D$ αλλά και οι δισδιάστατες αναφορικές συντεταγμένες των γωνιών της οθόνης στο επίπεδο τη εικόνας της cam_2 , $C^2 \mathbf{p}_{D,i}$ (Ενότητα 3.5).

4.3.2 Εντοπισμός (Detection)

Ο εντοπισμός τόσο της οθόνης όσο και του στόχου γίνεται με τον αλγόριθμο εντοπισμού που έχει αναλυθεί στην Ενότητα 3.6. Ο αλγόριθμος αυτός υπολογίζει τις χωρικές συντεταγμένες των σημείων ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων $\{C_{C2}\}$ και έπειτα υπολογίζονται οι προβολές αυτών στο επίπεδο της εικόνας βάση των Σχέσεων 1.7. Συνεπώς:

$$\begin{cases} C^2 \mathbf{p}_{D,i} = \begin{bmatrix} C^2 x_{D,i} \\ C^2 y_{D,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C^2 X_{D,i}}{C^2 Z_{D,i}} \\ \frac{C^2 Y_{D,i}}{C^2 Z_{D,i}} \end{bmatrix} \\ C^2 \mathbf{p}_{T,i} = \begin{bmatrix} C^2 x_{T,i} \\ C^2 y_{T,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C^2 X_{T,i}}{C^2 Z_{T,i}} \\ \frac{C^2 Y_{T,i}}{C^2 Z_{T,i}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (4.6)$$

, όπου $C^2 \mathbf{p}_{D,i}$ και $C^2 \mathbf{p}_{T,i}$ οι δισδιάστατες συντεταγμένες των γωνιών της οθόνης και του στόχου στο επίπεδο της εικόνας της cam_2 . Επίσης, οι χωρικές συντεταγμένες των παραπάνω σημείων ως προς το $\{C_{C2}\}$ ορίζονται ως $C^2 \mathbf{p}_{D,i} = [C^2 X_{D,i}, C^2 Y_{D,i}, C^2 Z_{D,i}]^T$ και $C^2 \mathbf{p}_{T,i} = [C^2 X_{T,i}, C^2 Y_{T,i}, C^2 Z_{T,i}]^T$, αντίστοιχα.

4.3.3 Προβολική Αντιστοίχιση (Projective Mapping)

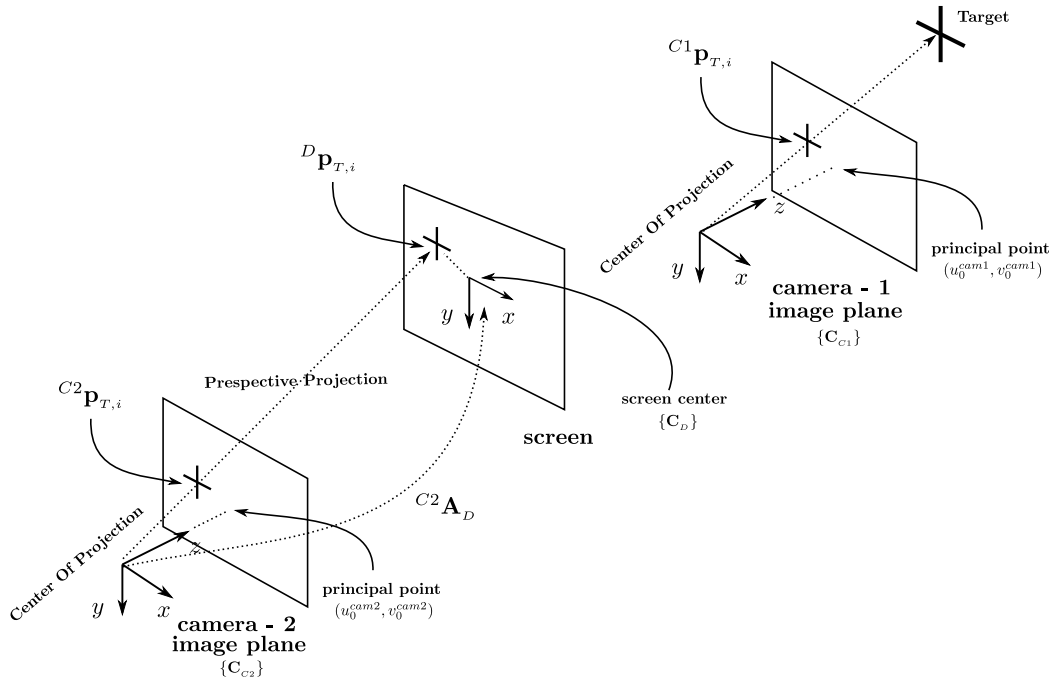
Οι συντεταγμένες των σημείων του στόχου στο επίπεδο της cam_2 για τυχαία οπτική γωνία, ως έχουν υπολογιστεί στο προηγούμενο βήμα βάση της Σχέσης 4.6, προβάλλονται στο reference επίπεδο εικόνας, δηλαδή σε αυτό που έχει ληφθεί από την αναφορική οπτική γωνία κατά το βήμα της αρχικοποίησης. Κάνοντας χρήση των αποθηκευμένων δισδιάστατων διανυσμάτων $C^2 \mathbf{p}_{D,i}$ και των σχέσεων της προβολικής αντιστοίχισης (Ενότητα 4.2) υπολογίζεται ο πίνακας μετασχηματισμού \mathbf{T}_m και εφαρμόζεται στις προβολές των σημείων του στόχου ($C^2 \mathbf{p}_{T,i}$).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} w_i \cdot C^2 \mathbf{p}_{T,i} \\ w_i \end{bmatrix} &= \mathbf{T}_m \cdot \begin{bmatrix} C^2 \mathbf{p}_{T,i} \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \\ C^2 \mathbf{p}_{T,i} &= \begin{bmatrix} C^2 x_{T,i} \\ C^2 y_{T,i} \end{bmatrix} = \frac{1}{w_i} \mathbf{T}_{m_{2 \times 3}} \cdot \begin{bmatrix} C^2 x_{T,i} \\ C^2 y_{T,i} \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.7)$$

4.3.4 Αντιστοίχιση Συντεταγμένων του Επιπέδου της Εικόνας της cam_2 σε αυτό της cam_1

Δοθέντος των συντεταγμένων του στόχου στο reference επίπεδο της εικόνας της cam_2 υπολογίζονται οι αντίστοιχες διαστάσεις συντεταγμένες στο επίπεδο της οθόνης, δηλαδή εκφρασμένες ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων $\{C_D\}$, και έπειτα ως προς το $\{C_{C1}\}$, δηλαδή στο επίπεδο της εικόνας της cam_1 , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

Έστω ${}^D\mathbf{P}_{T,i} = [{}^DX_{T,i}, {}^DY_{T,i}, {}^DZ_{T,i}]$ οι χωρικές συντεταγμένες του στόχου ως προς το $\{C_D\}$ και ${}^{C2'}\mathbf{P}_{T,i}$ οι αντίστοιχες ως προς το $\{C_{C2'}\}$ όπου αναφέρεται στο πλαίσιο συντεταγμένων της cam_2 για την reference οπτική γωνία, τότε θεωρώντας ότι το επίπεδο της οθόνης για την reference οπτική γωνία είναι παράλληλο ως προς το επίπεδο της εικόνας, δηλαδή τα σημεία που ανήκουν σε αυτό έχουν το ίδιο βάθος ως προς το $\{C_{C2'}\}$, ισχύει ότι:



Σχήμα 4.3: Προβολή Στόχου από το Επίπεδο της Εικόνας cam_2 στο Επίπεδο της cam_1

$${}^{C2'}\mathbf{P}_{T,i} = \begin{bmatrix} {}^{C2'}X_{T,i} \\ {}^{C2'}Y_{T,i} \\ {}^{C2'}Z_{T,i} \end{bmatrix} = {}^{C2'}\mathbf{P}_D(3) \cdot {}^{C2'}\tilde{\mathbf{p}}_{T,i} = {}^{C2'}Z_D \cdot \begin{bmatrix} {}^{C2'}x_{T,i} \\ {}^{C2'}y_{T,i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Εν συνεχεία, εκφράζονται ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της οθόνης $\{C_D\}$ το οποίο είναι τοποθετημένο στο κέντρο αυτής με συγκεκριμένο προσανατολισμό.

$${}^D\mathbf{P}_{T,i} = {}^{C2'}\mathbf{A}_D^{-1} \cdot {}^{C2'}\mathbf{P}_{T,i} \quad (4.9)$$

, όπου ${}^D\mathbf{P}_{T,i} = [{}^DX_{T,i}, {}^DY_{T,i}, {}^DZ_{T,i}]$

Δεδομένου ότι το κέντρο της οθόνης αλλά και τα σημεία του στόχου κείτονται στο ίδιο επίπεδο, στο επίπεδο που ορίζεται από την οθόνη, μπορούν να περιγραφούν από ένα δισδιάστατο διάνυσμα ως προς το $\{C_D\}$ αφού το βάθος τους είναι πρακτικά μηδέν:

$${}^D\mathbf{p}_{T,i} = \begin{bmatrix} {}^Dx_{T,i} \\ {}^Dy_{T,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^DX_{T,i} \\ {}^DY_{T,i} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Για την απεικόνιση μιας εικόνας συγκεκριμένων διαστάσεων (pixels) σε μεγαλύτερες ή μικρότερες εφαρμόζεται μια διαδικασία scaling για την οποία χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές επεξεργασίας εικόνας. Οι συντεταγμένες των σημείων της εικόνας που έχει υποστεί μεγέθυνση ή σμίκρυνση έχουν αλλάξει σύμφωνα με τον βαθμό του scaling.

Συνεπώς, για τον υπολογισμό των κανονικοποιημένων συντεταγμένων της εικόνας που έχει ληφθεί από την cam_1 διαιρούνται οι συντεταγμένες των σημείων της εικόνας στο επίπεδο της οθόνης με τις διαστάσεις της οθόνης:

$${}^{C1}\mathbf{p}_{T,i} = \begin{bmatrix} {}^{C1}x_{T,i} \\ {}^{C1}y_{T,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{{}^Dx_{T,i}}{d_W} \\ \frac{{}^Dy_{T,i}}{d_H} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

και εφόσον το αναφορικό πλαίσιο συντεταγμένων της οθόνης $\{C_D\}$ έχει επιλεγεί να είναι στο κέντρο αυτής με προσανατολισμό ίδιο με αυτό του μοντέλου κάμερας, άρα και της $\{C_{C1}\}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3 τότε οι συντεταγμένες που υπολογίζονται από την Σχέση 4.11 ταυτίζονται με τις αντίστοιχες κανονικοποιημένες ως προς το πλαίσιο της εικόνας της cam_1 .

4.3.5 Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης (Visual Servo Control)

Οι κανονικοποιημένες συντεταγμένες του στόχου στο επίπεδο της εικόνας της cam_1 ως έχουν υπολογιστεί στην Εξίσωση 4.11 χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του interaction matrix:

$$\mathbf{L}_i = \begin{bmatrix} \frac{-1}{{}^{C1}Z} & 0 & \frac{{}^{C1}x_{T,i}}{{}^{C1}Z} & {}^{C1}x_{T,i} \cdot {}^{C1}y_{T,i} & -(1 + ({}^{C1}x_{T,i})^2) & {}^{C1}y_{T,i} \\ 0 & \frac{-1}{{}^{C1}Z} & \frac{{}^{C1}y_{T,i}}{{}^{C1}Z} & (1 + ({}^{C1}y_{T,i})^2) & -{}^{C1}x_{T,i} \cdot {}^{C1}y_{T,i} & -{}^{C1}x_{T,i} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Εφόσον ο στόχος αποτελείται από 4 σημεία $i = 0, 1, 2, 3$, τότε ο συνολικός interaction matrix είναι:

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_0 \\ \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{L}_2 \\ \mathbf{L}_3 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 1.4 το βάθος ${}^{C1}Z$ είναι απαραίτητο για την κατασκευή του Πίνακα 4.12. Όμως τα χαρακτηριστικά της cam_1 και τα δεδομένα του τροχοφόρου ρομπότ (θέση, ταχύτητα) είναι άγνωστα οπότε η εκτίμηση της τιμής αυτής είναι αδύνατη. Συνεπώς, επιλέγεται μια σταθερή θετική τιμή για το βάθος ${}^{C1}Z$ χωρίς αυτό να επηρεάζει την ευστάθεια

του αλγορίθμου, όπως αποδεικνύεται στην συνέχεια, παρά μόνο την τροχιά που ακολουθούν τα σημεία στο επίπεδο της εικόνας κατά την σύγκλιση άρα και την ταχύτητα σύγκλισης, η οποία αντισταθμίζεται επιλέγοντας κατάλληλες τιμές του διαγώνιου πίνακα κερδών.

Έτσι η επιθυμητή ταχύτητα της cam_1 υπολογίζεται από την Σχέση 1.14:

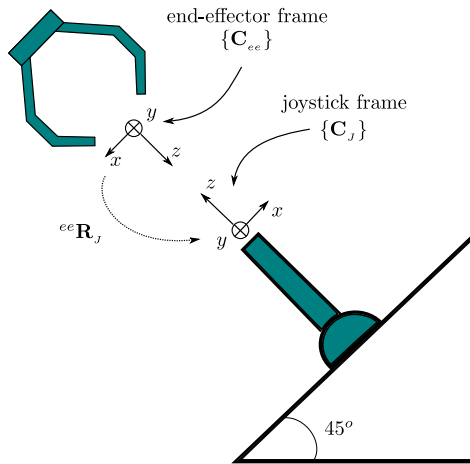
$$\mathbf{v}_{C1} = -\mathbf{K}\mathbf{L}_s^+ \mathbf{e} \quad (4.14)$$

όπου το σφάλμα \mathbf{e} ορίζεται ως $\mathbf{e} = {}^{C1}\mathbf{p}_T - {}^{C1}\mathbf{p}_{des}$ με ${}^{C1}\mathbf{p}_{des} \in \mathbb{R}^{8 \times 1}$ διάνυσμα με τις επιθυμητές συντεταγμένες του διανύσματος ${}^{C1}\mathbf{p}_T = [{}^{C1}\mathbf{p}_{T,0}, {}^{C1}\mathbf{p}_{T,1}, {}^{C1}\mathbf{p}_{T,2}, {}^{C1}\mathbf{p}_{T,3}]^T \in \mathbb{R}^{8 \times 1}$ και $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ ο διαγώνιος πίνακας κερδών.

Η επιθυμητή χωρική ταχύτητα του τροχοφόρου ρομπότ \mathbf{v}_{C1} δεν μπορεί να σταλθεί άμεσα σε αυτό αλλά μέσω του joystick. Συνεπώς, είναι αναγκαία η αντιστοίχιση των σημείων του καρτεσιανού χώρου εργασίας που ορίζεται από το joystick με τις ταχύτητες που παράγονται από τον αλγόριθμο οπτικής οδήγησης. Η αντιστοίχιση αυτή γίνεται βάση του μεγέθους του χώρου εργασίας αλλά και των τιμών της μέγιστης κατά απόλυτη τιμή ταχύτητας που εξάγεται από την Σχέση 4.14.

$$\begin{bmatrix} JX_m \\ JY_m \\ J\psi_m \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{v}_{C1} \quad (4.15)$$

,όπου $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{|x_{lim}|}{|C1v_x^{max}|} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{|y_{lim}|}{|C1v_y^{max}|} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{|\psi_{max}|}{|C1\omega_z^{max}|} \end{bmatrix}$ ο πίνακας αντιστοίχισης.



Σχήμα 4.4: Τελικό Σημείο Δράσης - Joystick

Το ρομπότ ελεγκτής μπορεί να ελέγξει όσους βαθμούς ελευθερίας είναι διαθέσιμοι από το joystick. Στην προκειμένη περίπτωση είναι οι τρεις που έχουν αναλυθεί στην Ενότητα 3.3 και κατά συνέπεια το διάνυσμα ταχυτήτων $\mathbf{v}_{C1} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$. Υπολογίζεται το διάνυσμα της επιθυμητής θέσης

και στροφής ως προς το $\{C_J\}$ (${}^J\mathbf{P}_m$ και ${}^J\omega_m$) και έπειτα μετασχηματίζεται βάση του γνωστού configuration που έχει πιαστεί το joystick στα αντίστοιχα ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων του τελικού σημείου δράσης $\{C_{ee}\}$, δηλαδή τα ${}^{ee}\mathbf{P}_m$ και ${}^{ee}\omega_m$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4.

$$\begin{bmatrix} {}^{ee}\mathbf{P}_m \\ {}^{ee}\omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{ee}\mathbf{R}_J & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^{ee}\mathbf{R}_J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^J\mathbf{P}_m \\ {}^J\omega_m \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

4.3.6 Έλεγχος Τελικού Σημείου Δράσης

Για την επίτευξη των επιθυμητών μεταβολών της Σχέσης 4.16 χρησιμοποιείται έλεγχος θέσης του τελικού σημείου δράσης με χρήση PID ελεγκτή. Έπειτα η έξοδος του pid ελεγκτή μετατρέπεται σε ταχύτητα των αρθρώσεων με την βοήθεια της αντίστροφης ιακωβιανής του ρομποτικού συστήματος βραχίονα-πλατφόρμας, όπως έχει αναλυθεί στην Ενότητα 3.2, και εισάγεται στους ελεγκτές ταχύτητας του ρομποτικού συστήματος. Η ανάδραση της θέσης του τελικού σημείου δράσης υπολογίζεται λύνοντας το πρόβλημα της ευθείας κινηματικής και χρησιμοποιώντας μετρήσεις της οδομετρίας.

Ο προσανατολισμός του τελικού σημείου δράσης πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα με την επιθυμητή μεταβολή του joystick, δηλαδή να ακολουθεί συνεχώς το ακτινικό μοναδιαίο διάνυσμα. Παρόλα αυτά η ικανότητα συμμόρφωσης των δαχτύλων παρέχει την δυνατότητα στο τελικό σημείο δράσης να μην ακολουθεί τον ακριβή προσανατολισμό σε σχέση με το joystick αλλά τα δάχτυλα να συμμορφώνονται βάση αυτού ώστε να διατηρείται το grasping. Έτσι επιλέγεται να ακολουθείται μόνο ο προσανατολισμός σε σχέση με την θ γωνία που σχηματίζει το joystick ($\{C_J\}$) ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης του, $\{C_{b,J}\}$.

Συνοπώς, αν $\mathbf{R}_d = [\mathbf{n}_d \mathbf{s}_d \mathbf{a}_d]$ ορίζουν την επιθυμητή μήτρα στροφής του τελικού σημείου δράσης βάση της επιθυμητής θέσης του (${}^{ee}\mathbf{P}_m$) και $\mathbf{R}_e = [\mathbf{n}_e \mathbf{s}_e \mathbf{a}_e]$ η αντίστοιχη η οποία έχει υπολογιστεί βάση των τιμών των αρθρώσεων, η σχέση που ορίζει το σφάλμα προσανατολισμού μεταξύ των δύο είναι:

$$\mathbf{e}_o = \frac{1}{2}(\mathbf{n}_e(q) \times \mathbf{n}_d + \mathbf{s}_e(q) \times \mathbf{s}_d + \mathbf{a}_e(q) \times \mathbf{a}_d) \quad (4.17)$$

Η χρονική παράγωγος της Σχέσης 4.17 είναι:

$$\dot{\mathbf{e}}_o = \mathbf{L}^T \omega_d - \mathbf{L} \omega_e \quad (4.18)$$

,όπου

$$\mathbf{L} = -\frac{1}{2}(\mathbf{S}(\mathbf{n}_e)\mathbf{S}(\mathbf{n}_d) + \mathbf{S}(\mathbf{s}_e)\mathbf{S}(\mathbf{s}_d) + \mathbf{S}(\mathbf{a}_e)\mathbf{S}(\mathbf{a}_d)) \quad (4.19)$$

με τον τελεστή $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & -\omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$ και $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ το διάνυσμα γωνιακών ταχυτήτων. Έτσι, για τον έλεγχο τόσο της θέσης όσο και της γωνίας του τελικού σημείου

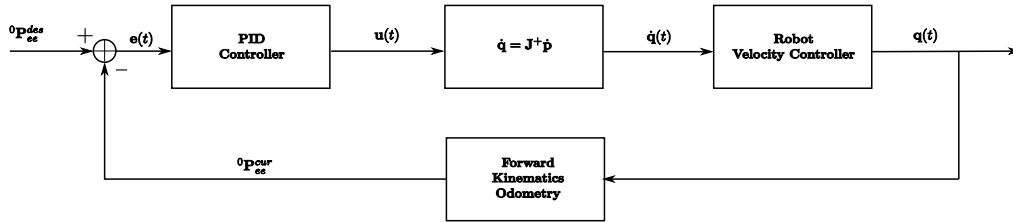
δράσης λύνοντας το πρόβλημα της αντίστροφης διαφορικής κινηματικής προκύπτει:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^+(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} \mathbf{e}_p \\ \mathbf{K}_o \mathbf{e}_o \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

όπου \mathbf{e}_p , το σφάλμα θέσης που υπολογίζεται από τον PID - controller και \mathbf{e}_o , το σφάλμα προσατολισμού του τελικού σημείου δράσης (4.17).

Τέλος, η τελευταία άρθρωση του βραχίονα του ρομποτικού συστήματος ελέγχεται ξεχωριστά για τον καθορισμό της στροφής του joystick γύρω από τον κάθετο άξονά του, δηλαδή τον έλεγχο της $^J\psi_m$ γωνίας.

Το παρακάτω μπλοκ διάγραμμα, Διάγραμμα 4.5, περιγράφει την διαδικασία ελέγχου του τελικού σημείου δράσης:



Σχήμα 4.5: Σύστημα Σφαιρικών Συντεταγμένων

4.4 Ευστάθεια Κατά Lyapunov

Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η ευστάθεια του σχήματος ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης βασισμένο σε εικόνα από οθόνη. Όπως έχει αναφερθεί και στην Υποενότητα 4.3.5 για τον υπολογισμό του interaction matrix (4.12) χρησιμοποιείται μια σταθερή θετική τιμή για την απόσταση της κάμερας cam_1 από τον στόχο ($C^1 Z$) καθώς είναι αδύνατο να εκτιμηθεί η τιμή της.

Για την απόδειξη ευστάθειας στο παραπάνω σχήμα ελέγχου εφαρμόζεται η μεθοδολογία Lyapunov. Έστω $V : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ μια συνεχής scalar και τοπικά θετικά ορισμένη συνάρτηση με:

- $V(x) > 0, \forall x \in \mathbb{R}^n$
- $V(x) = 0$, if and only if $x = 0$

Ορίζεται $x_e = 0$ ένα σημείο ισορροπίας του συστήματος $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t))$. Αν $V(\dot{\mathbf{x}}) < 0$ για όλα τα $\mathbf{x} \neq 0$ και $V(\dot{x}_e) = 0$ τότε κάθε τροχιά συγκλίνει στο x_e όσο το $t \rightarrow \infty$.

Αρχικά, ορίζεται ως υποψήφια συνάρτηση Lyapunov :

$$V = \frac{1}{2} \|\mathbf{e}(t)\|^2 \quad (4.21)$$

όπου είναι θετικά ορισμένη, συνεχής και μηδενίζεται για $\mathbf{e}(t) = 0$. Η παράγωγος της (4.21) είναι:

$$\dot{V} = \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}} \quad (4.22)$$

,χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις (1.12) και (1.14) προκύπτει $\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \cdot \mathbf{L}_s \hat{\mathbf{L}}_s^+ \mathbf{e}$ άρα και :

$$\dot{V} = -\lambda \cdot \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{L}_s \hat{\mathbf{L}}_s^+ \cdot \mathbf{e} \quad (4.23)$$

Συνεπώς, η ασυμπτωτική ευστάθεια επιτυγχάνεται εάν διασφαλίζεται η παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{L}_s \cdot \hat{\mathbf{L}}_s^+ > 0 \quad (4.24)$$

Όμως, για την κατασκευή του πίνακα $\hat{\mathbf{L}}_s^+$ χρησιμοποιείται η θετική και σταθερή τιμή ${}^{C^1}Z$ η οποία διαφέρει από την πραγματική τιμή ${}^{C^1}Z_c$, ${}^{C^1}Z = \alpha_z {}^{C^1}Z_c$. Αντικαθιστώντας:

$$\mathbf{L}_s({}^{C^1}Z_c) \cdot \hat{\mathbf{L}}_s^+({}^{C^1}Z) = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_z - 1}{(x_p^2 + y_p^2 + 1)\alpha_z^2 {}^{C^1}Z_c + 1} + 1 & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_z - 1}{(x_p^2 + y_p^2 + 1)\alpha_z^2 {}^{C^1}Z_c + 1} + 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

οι ιδιοτιμές του πίνακα 4.25 είναι θετικές αν $\alpha_z > 0 \Rightarrow {}^{C^1}Z > 0$ άρα και θετικά ορισμένος ο πίνακας. Οπότε η ασυμπτωτική ευστάθεια διασφαλίζεται με την επιλογή ενός θετικού ${}^{C^1}Z$ για την κατασκευή του interaction matrix. Η επιλογή της τιμής του ${}^{C^1}Z$ επηρεάζει την τροχιά των pixels στο επίπεδο της εικόνας αλλά και την ταχύτητα σύγκλισης όπως φαίνεται παρακάτω στα Σχήματα (4.8) και (4.9).

Έπειτα, μελετάται η ευστάθεια για την περίπτωση που εισάγονται σφάλματα υπολογισμού ή κατά τον εντοπισμό των σημείων. Τα σφάλματα αυτά μοντελοποιούνται ως μια φραγμένη είσοδος στο σύστημα. Άρα η διαφορική εξίσωση του συστήματος είναι:

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{e}(t), \mathbf{w}(t))$$

με $\|\mathbf{w}(t)\| = \mathbf{w}_{MAX}$. Για την περίπτωση του ελεγκτή που έχει αναλυθεί ορίζεται: $\mathbf{e}'(t) = \mathbf{e}(t) + \mathbf{w}(t)$ με $\mathbf{e}(t) = \mathbf{p}(t) - \mathbf{p}_d$. Όπου $\mathbf{p}(t) \in \mathbb{R}^{2n \times 1}$ το διάνυσμα οπτικών χαρακτηριστικών και \mathbf{p}_d το διάνυσμα με τα αντίστοιχα επιθυμητά. Το $\mathbf{w}(t)$ εισάγεται στο σύστημα λόγω θορυβώδες feedback. Άρα:

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = -\lambda \cdot \mathbf{L}_e \hat{\mathbf{L}}_e^+ \mathbf{e}'(t) \quad (4.26)$$

Επιλέγεται υποψήφια συνάρτηση Lyapunov η 4.21 και συνεπώς η παράγωγος αυτής υπολογίζεται βάση της Σχέσης 4.22. Λαμβάνοντας υπόψη και την Σχέση 4.26 προκύπτει:

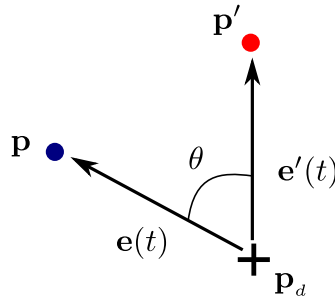
$$\dot{V} = \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}} = -\lambda \cdot \mathbf{e}^T \mathbf{L}_e \hat{\mathbf{L}}_e^+ \mathbf{e}' \quad (4.27)$$

Αρχικά, εξετάζεται το γινόμενο πινάκων $\mathbf{L}_e \hat{\mathbf{L}}_e^+$ το οποίο έχει ιδιοτιμές:

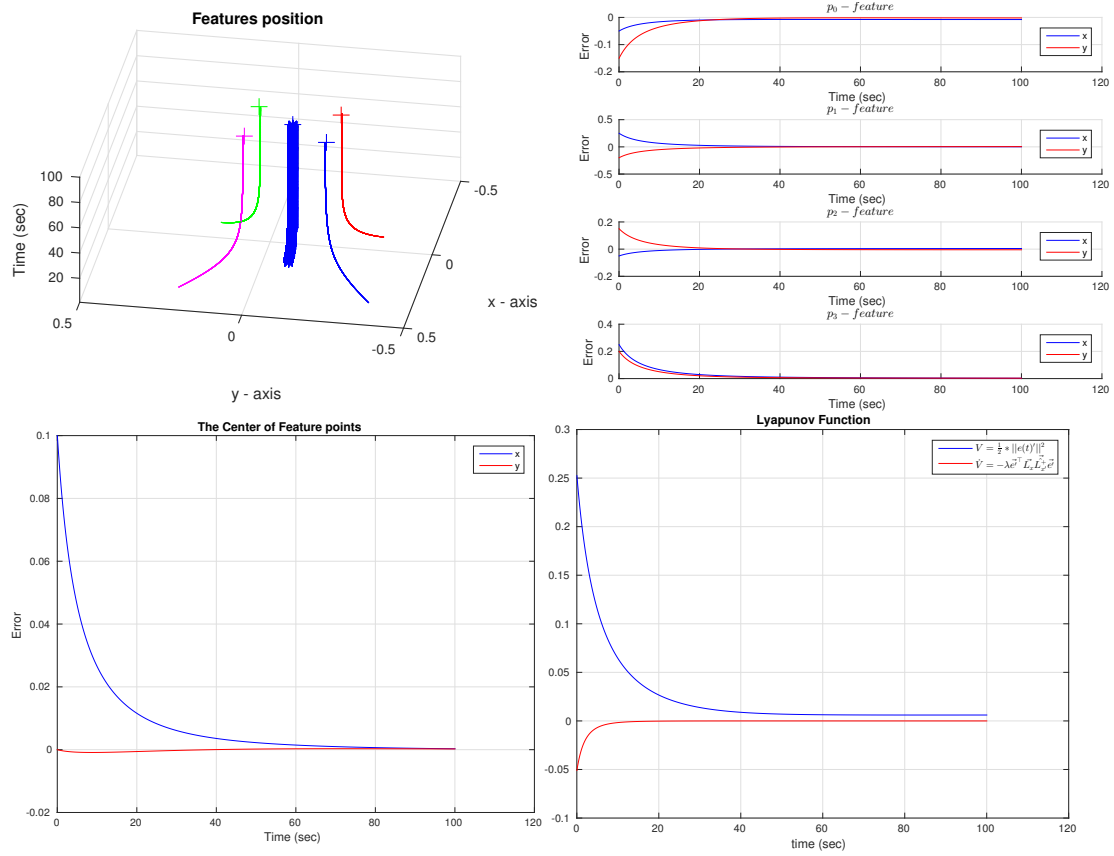
$$\lambda_1 = \frac{\alpha_z^2 {}^{C^1}Z_c^2 (\mathbf{p}'^T \cdot \mathbf{p} + 1) + \alpha_z}{\alpha_z^2 {}^{C^1}Z_c^2 (x'^2 + y'^2 + 1) + 1}$$

$$\lambda_2 = \frac{\frac{1}{\alpha_z \sigma_1 Z_c^2} (\mathbf{p}'^T \cdot \mathbf{p} + 1) + (x^2 + y^2)(x'^2 + y'^2 + 1)}{(x'^2 + y'^2 + 1)[(x^2 + y^2 + 1) + \frac{1}{\alpha_z^2 \sigma_1 Z_c^2}]}$$

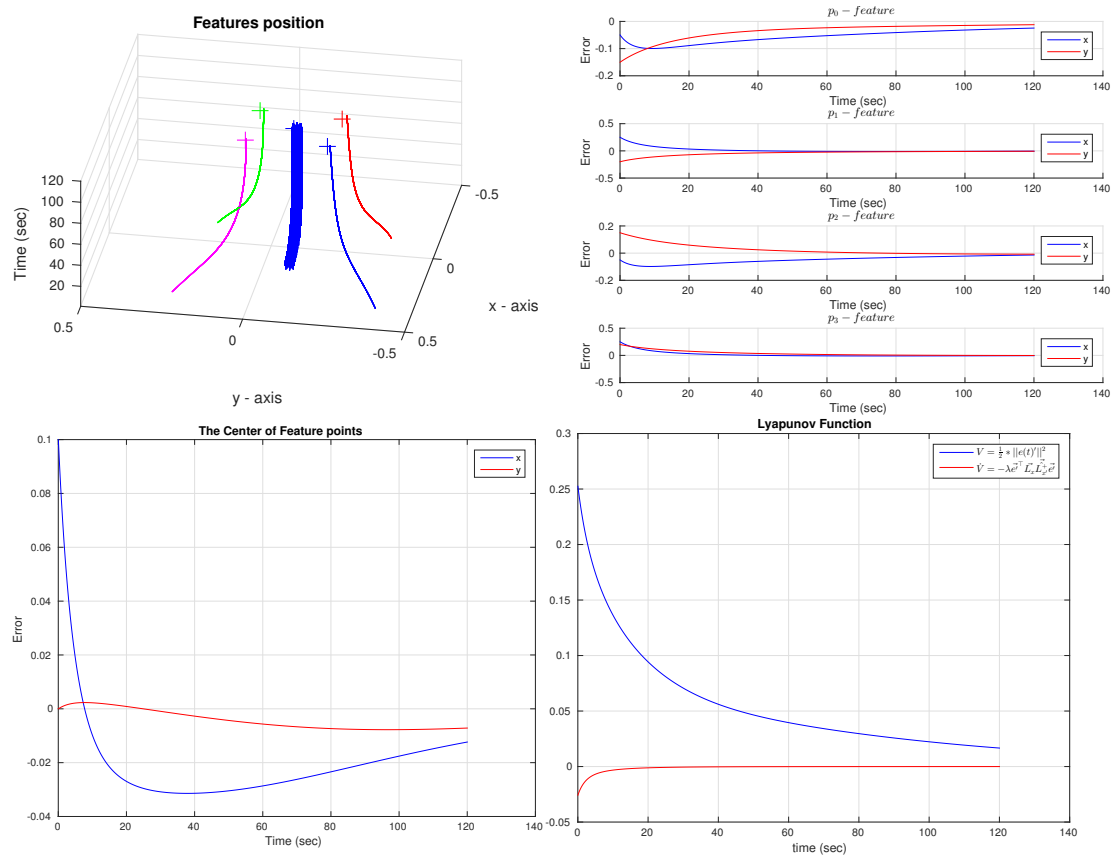
Το γινόμενο πινάκων $\mathbf{L}_e \hat{\mathbf{L}}_e^+$ είναι θετικά ορισμένο και $\dot{V} < 0$ αν ισχύει ότι $\mathbf{p}'^T \cdot \mathbf{p} > 0 \Rightarrow \mathbf{e}'^T \mathbf{e} > 0$. Συνεπώς διασφαλίζεται η ασυμπτωτική ευστάθεια. Αυτό το αποτέλεσμα σημαίνει ότι το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ των δύο διανυσμάτων πρέπει να είναι θετικό, δηλαδή η γωνία του συνημιτόνου να είναι $\theta \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ όπως φαίνεται στο Σχήμα.



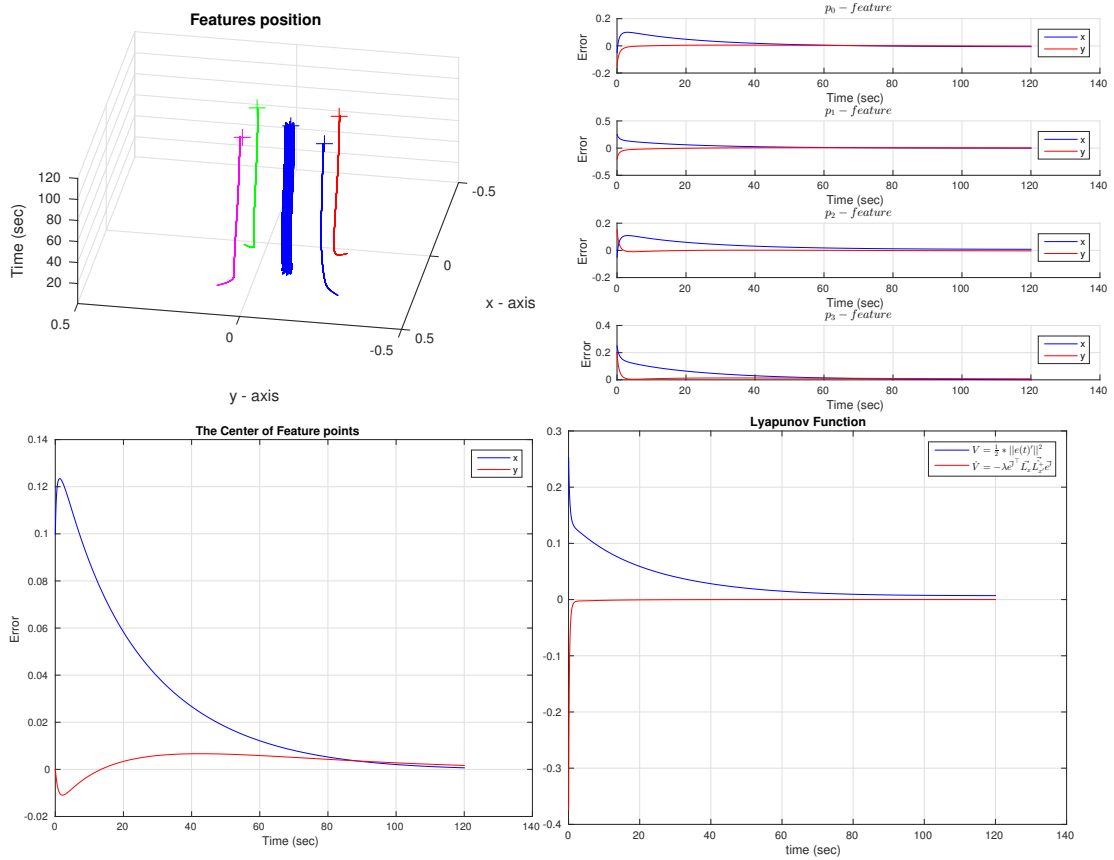
Σχήμα 4.6: Εσωτερικό Γνώμενο Διανυσμάτων $\mathbf{e}(t)$ $\mathbf{e}'(t)$



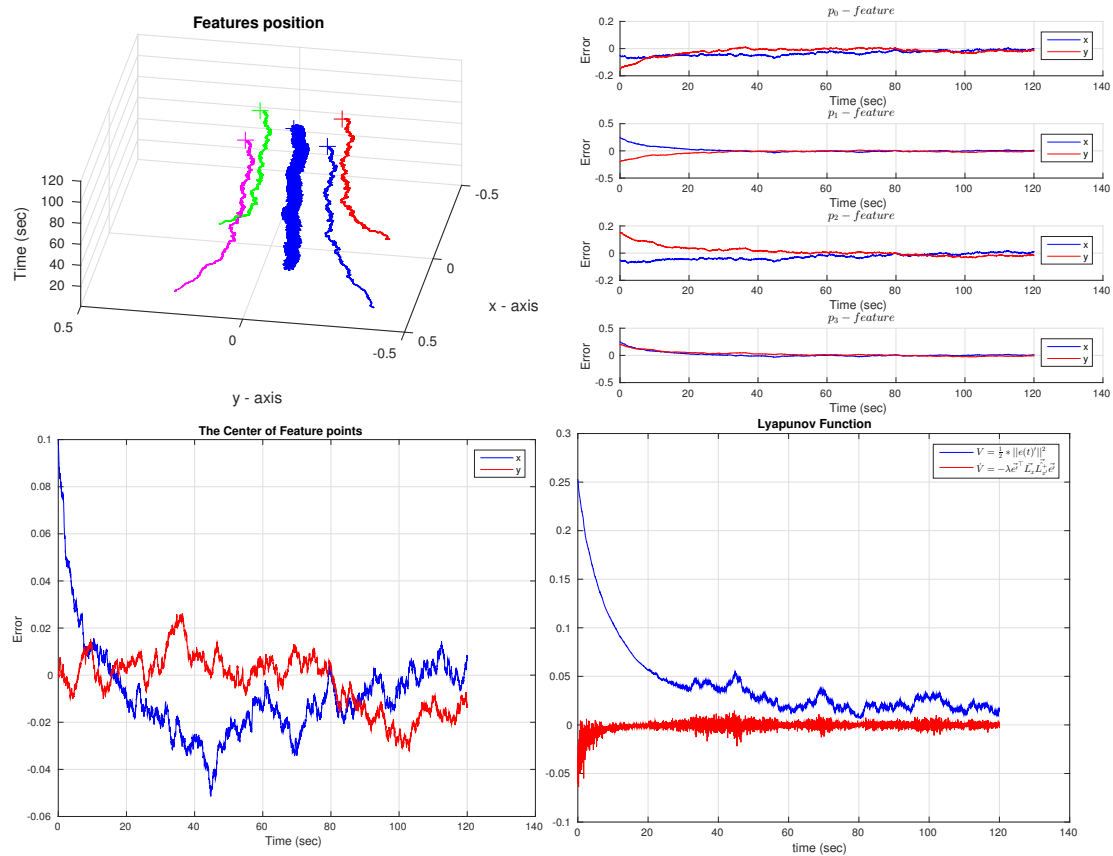
Σχήμα 4.7: $C^1 Z = C^1 Z_c$ & $\|\mathbf{w}(t)\| = 0$



Σχήμα 4.8: $C^1 Z = 0.3 C^1 Z_c$ & $\|\mathbf{w}(t)\| = 0$



Σχήμα 4.9: $C^1 Z = 10^{C^1} Z_c$ & $\|\mathbf{w}(t)\| = 0$



Σχήμα 4.10: $C^1 Z = 0.5 C^1 Z_c$ & $\|w(t)\| = 0.1414$

Κεφάλαιο 5

Πειράματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται η διάταξη και τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή ως έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 4

5.1 Διάταξη

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, χρησιμοποιούνται η τροχοφόρα πλατφόρμα της KUKA - Youbot Platform και για το ρομποτικό σύστημα χειριστή η πλατφόρμα KUKA - Youbot Platform της εξοπλισμένη με τον βραχίονα 5 βαθμών ελευθερίας. Η τροχοφόρα πλατφόρμα είναι εφοδιασμένη με μια κάμερα στο κέντρο βάρους της η οποία διαδίδει την συμπιεσμένη οπτική πληροφορία της μέσω δικτύου στην οθόνη που βρίσκεται στο ίδιο περιβάλλον με το ρομπότ χειριστή. Η κάμερα έχει στο οπτικό της πεδίο τους 4 markers από τους οποίους αποτελείται ο στόχος. Σε αυτήν διάταξη (κάμερα-τροχοφόρο ρομπότ) το ρομπότ ελεγκτής δεν έχει πρόσβαση, οπότε δεν μπορεί να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά της κάμερας και τίποτε παραπάνω πέρα από την ικανότητα κίνησης του τροχοφόρου ρομπότ.



(α') Τροχοφόρο Ρομπότ



(β') Ρομποτικός Βραχίονας

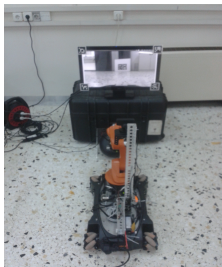


(γ') Ρομποτικό Χέρι

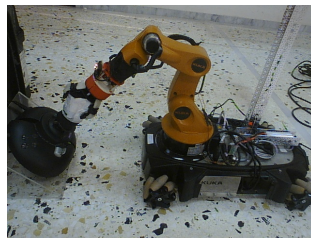
Σχήμα 5.1

Το ρομποτικό σύστημα βραχίονα-πλατφόρμα έχει πιάσει το joystick με γνωστό configuration και βρίσκεται σε τέτοια θέση και προσανατολισμό ώστε να μπορεί το τελικό σημείο δράσης να βρίσκεται σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου εργασίας που ορίζει το joystick και παράλληλα να διασφαλίζεται ότι δεν θα χάσει την οθόνη από το οπτικό του πεδίο. Η κάμερα που είναι τοποθετημένη πάνω του συλλέγει την οπτική πληροφορία που αναπαράγεται στην οθόνη για να την χρησιμοποιήσει ως ανάδραση στον ελεγκτή. Ο βραχίονας ως τελικό σημείο δράσης έχει συνδεδεμένο το ρομποτικό χέρι τριών δακτύλων της Openbionics, [25]. Η επιλογή αυτού του χεριού έγινε λόγω της ελαστικότητας των δακτύλων και την ικανότητα προσαρμογής στο αντικείμενο το οποίο πιάνει. Η ελαστικότητα αυτή δίνει την δυνατότητα συμμόρφωσης των δακτύλων ανάλογα με το σχήμα αλλά και την αλλαγή του προσανατολισμού του joystick.

Η αρχική διάταξη για τα δυο ρομπότ φαίνεται παρακάτω:



(α') Ρομποτικό Σύστημα Βραχίονας - Πλατφόρμα



(β') Ρομποτικό Χέρι-Joystick



(γ') Τροχοφόρο Ρομπότ

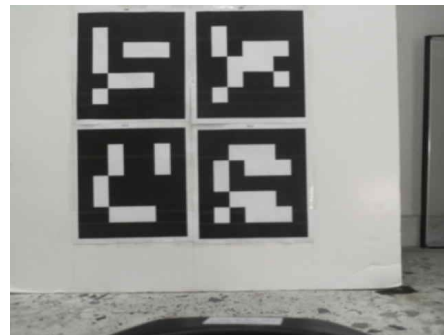
Σχήμα 5.2

5.2 Αποτελέσματα

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος για αρχικό configuration όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Η τιμή του βάθους που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του Interaction Matrix είναι $C^1Z = 1m$. Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται ότι τα features συγκλίνουν στις επιθυμητές θέσεις τους αλλά όχι με ομαλή τροχιά. Αυτό οφείλεται αρχικά στο ότι ο πίνακας αλληλεπίδρασης δεν χρησιμοποιεί την πραγματική τιμή του βάθους των σημείων κάθε χρονική στιγμή αλλά μια σταθερή τιμή. Επιπλέον τα πιθανά σφάλματα υπολογισμού της θέσης των features στο επίπεδο της εικόνας της cam_1 καθώς επίσης η αδυναμία του ρομπότ χειριστή να ακολουθήσει επακριβώς τις επιθυμητές θέσεις του τελικού σημείου δράσης που υπολογίζονται από το σχήμα ελέγχου. Τέλος, κατά τον έλεγχο του joystick από το τελικό σημείο δράσης παρατηρείται μικρή ολίσθηση των δακτύλων στην επιφάνειά του γεγονός που επηρεάζει άμεσα τον έλεγχο.

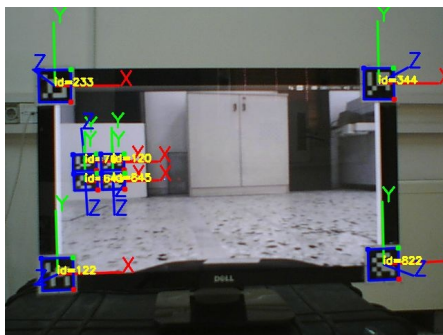


(α') Εικόνα από την Αρχική Θέση

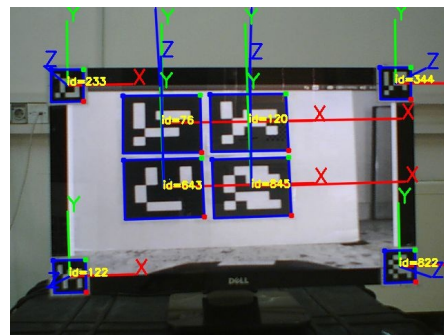


(β') Εικόνα από την Τελική Θέση

Σχήμα 5.3: Κάμερα Τροχοφόρου Ρομπότ

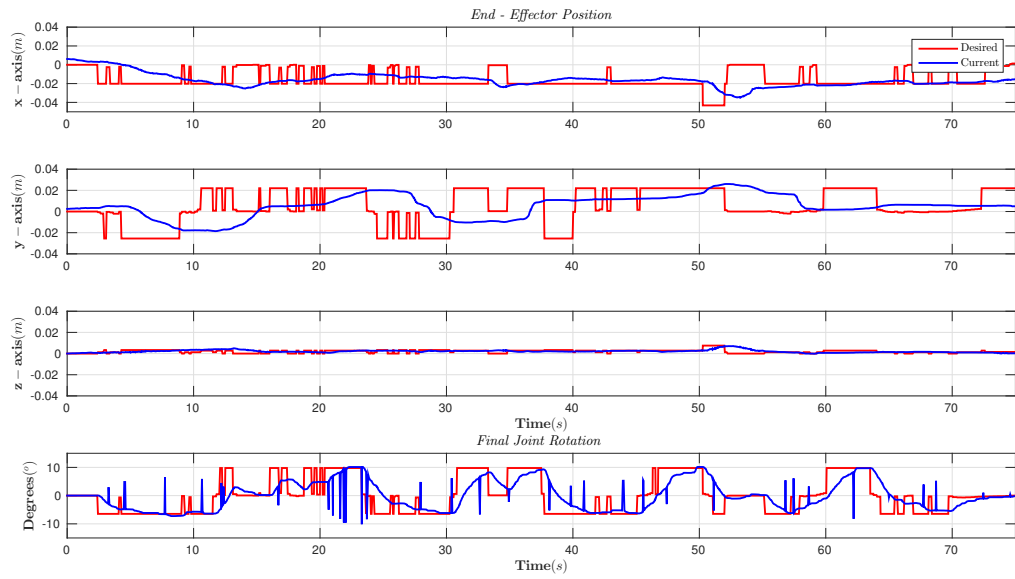


(α') Εικόνα από την Αρχική Θέση

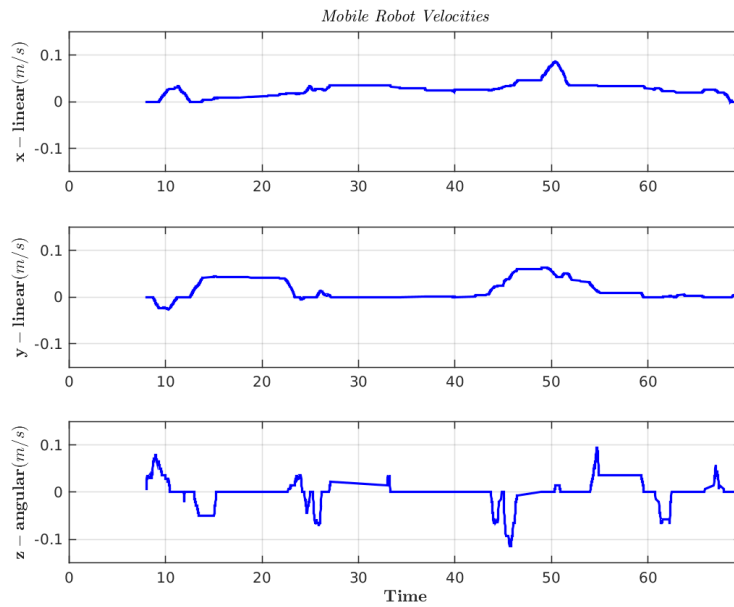


(β') Εικόνα στο Τέλος του Ελέγχου

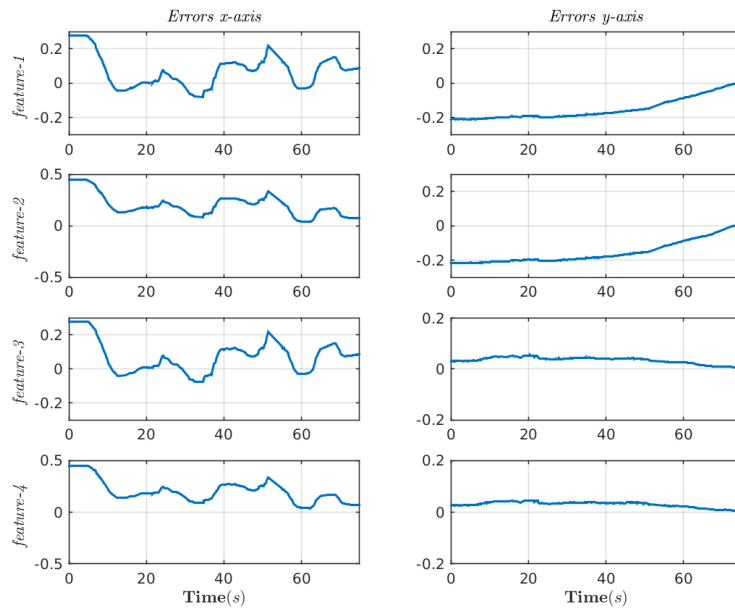
Σχήμα 5.4: Κάμερα Ρομπότ Χειριστή



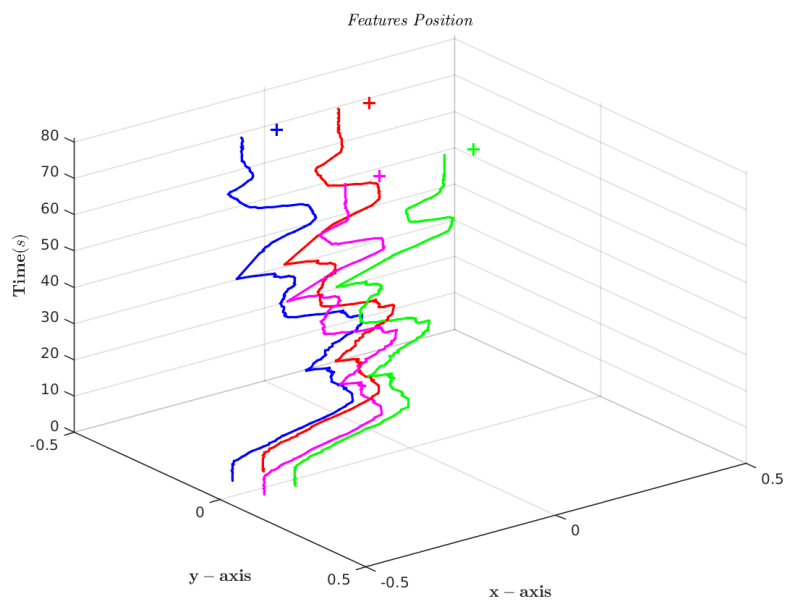
Σχήμα 5.5: Μεταβολές Τελικού Σημείου Δράσης



Σχήμα 5.6: Ταχύτητες Τροχοφόρου Ρομπότ



Σχήμα 5.7: Σφάλμα θέσης των features



Σχήμα 5.8: Θέση των features στο χρόνο

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

6.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα σχήμα ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης για τον τηλεχειρισμό ενός τροχοφόρου ρομπότ από ρομποτικό σύστημα βραχίονα-πλατφόρμας. Το παραπάνω σχήμα ελέγχου οδηγεί μια κάμερα αγνώστων εγγενών χαρακτηριστικών λαμβάνοντας οπτικά δεδομένα μέσω οθόνης από κάμερα γνωστών εγγενών παραμέτρων. Εν συνεχεία, στο τροχοφόρο ρομπότ δεν στέλνονται απευθείας οι ταχύτητες που εξάγονται από το σχήμα ελέγχου αλλά μέσω ενός joystick όπου η σχέση που συνδέει την μεταβολή αυτού με την ταχύτητα που παράγει στο τροχοφόρο ρομπότ είναι άγνωστη. Επίσης, ο ελεγκτής λαμβάνει υπόψη του μια πιθανή μεταβολή της σχετικής θέσης της οθόνης και της κάμερας που παρακολουθεί αυτήν. Τέλος, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα ενός ενδεικτικού πειράματος για το οποίο αναλύονται τα αποτελέσματα.

6.2 Μελλοντικές Εργασίες

Για την σχεδίαση του ελεγκτή έχουν γίνει σημαντικές υποθέσεις για παραμέτρους οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν σε μελλοντικές εργασίες. Αρχικά, το σύστημα βραχίονας πλατφόρμα μπορεί να εντοπίσει την οθόνη και το joystick στο χώρο, να οδηγηθεί σε αυτό και να το πιάσει με κατάλληλο configuration για το οποίο το ρομποτικό σύστημα θα έχει την βέλτιστη ικανότητα ελέγχου του για όλους τους βαθμούς ελευθερίας του αλλά με περιορισμό να βρίσκεται εντός του οπτικού της πεδίου η οθόνη. Επιπλέον, να υπολογίζει το deadzone του joystick, τον χώρο εργασίας του αλλά και την πιθανή ολίσθηση - παραμόρφωση των δαχτύλων κατά τον έλεγχό του. Τέλος, το σχήμα ελέγχου μπορεί αφενός να πλασιασωθεί με περιορισμούς ως προς την οθόνη, δηλαδή να διασφαλίζεται ότι η οθόνη θα είναι εντός του οπτικού πεδίου της cam_2 καθ' όλη την διάρκεια του ελέγχου, και αφετέρου να επιλύει το πρόβλημα οδήγησης ενός μη ολονομικού οχήματος.

Bibliography

- [1] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [2] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer handbook of robotics*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [3] P. Corke, *Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB*, vol. 73. Springer, 2011.
- [4] F. Chaumette and S. Hutchinson, “Visual servo control. i. basic approaches,” *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 13, no. 4, pp. 82–90, 2006.
- [5] F. Chaumette and S. Hutchinson, “Visual servo control. ii. advanced approaches [tutorial],” *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 14, no. 1, pp. 109–118, 2007.
- [6] B. H. Yoshimi and P. K. Allen, “Active, uncalibrated visual servoing,” in *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*, pp. 156–161, IEEE, 1994.
- [7] L. Hsu and P. Aquino, “Adaptive visual tracking with uncertain manipulator dynamics and uncalibrated camera,” in *Decision and Control, 1999. Proceedings of the 38th IEEE Conference on*, vol. 2, pp. 1248–1253, IEEE, 1999.
- [8] W. E. Dixon, D. M. Dawson, E. Zergeroglu, and A. Behal, “Adaptive tracking control of a wheeled mobile robot via an uncalibrated camera system,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, vol. 31, no. 3, pp. 341–352, 2001.
- [9] J. A. Piepmeier and H. Lipkin, “Uncalibrated eye-in-hand visual servoing,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 22, no. 10-11, pp. 805–819, 2003.
- [10] Y.-H. Liu, H. Wang, C. Wang, and K. K. Lam, “Uncalibrated visual servoing of robots using a depth-independent interaction matrix,” *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 4, pp. 804–817, 2006.
- [11] C. Cai, E. Dean-León, D. Mendoza, N. Somani, and A. Knoll, “Uncalibrated 3d stereo image-based dynamic visual servoing for robot manipulators,” in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 63–70, IEEE, 2013.

- [12] C. Hua, Y. Wang, and X. Guan, "Visual tracking control for an uncalibrated robot system with unknown camera parameters," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 1, pp. 19–24, 2014.
- [13] D. Lee, O. Martinez-Palafox, and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation of a wheeled mobile robot over delayed communication network," in *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, pp. 3298–3303, IEEE, 2006.
- [14] C. Monroy, R. Kelly, M. Arteaga, and E. Bugarin, "Remote visual servoing of a robot manipulator via internet2," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 49, no. 2, pp. 171–187, 2007.
- [15] I. Elhajj, N. Xi, and Y.-h. Liu, "Real-time control of internet based teleoperation with force reflection," in *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, vol. 4, pp. 3284–3289, IEEE, 2000.
- [16] W.-C. Chang and S.-A. Lee, "Autonomous visual servoing with tele-supervision," in *Networking, Sensing and Control, 2004 IEEE International Conference on*, vol. 1, pp. 82–87, IEEE, 2004.
- [17] G. C. Karras, S. G. Loizou, and K. J. Kyriakopoulos, "Semi-autonomous teleoperation of a non-holonomic underwater vehicle using a laser vision system: A visual-servoing switching control approach," in *Control and Automation, 2009. MED'09. 17th Mediterranean Conference on*, pp. 797–802, IEEE, 2009.
- [18] M. Marshall, M. Matthews, A.-P. Hu, G. McMurray, and H. Lipkin, "Uncalibrated visual servoing for intuitive human guidance of robots," in *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 4463–4468, IEEE, 2012.
- [19] H. Nagayama and T. Murakami, "An approach to high operational control of a slave mobile robot by master touch manipulation," in *Advanced Motion Control (AMC), 2014 IEEE 13th International Workshop on*, pp. 557–562, IEEE, 2014.
- [20] P. Heckbert, "Projective mappings for image warping," *Image-Based Modeling and Rendering*, pp. 15–869, 1999.
- [21] F. Chaumette, "Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing," in *The confluence of vision and control*, pp. 66–78, Springer, 1998.
- [22] KUKA, "Youbot store." <http://www.youbot-store.com/>.
- [23] KUKA, "Kuka youbot user manual." ftp://ftp.youbot-store.com/manuals/KUKA-youbot_UserManual_v1.01.pdf, 2012.

-
- [24] R. Bischoff, U. Huggenberger, and E. Prassler, “Kuka youbot-a mobile manipulator for research and education,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1–4, IEEE, 2011.
- [25] A. Zisimatos, M. Liarokapis, C. Mavrogiannis, and K. Kyriakopoulos, “Open-source, affordable, modular, light-weight, underactuated robot hands,” in *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3207–3212, Sept 2014.
- [26] “Ros.” <http://www.ros.org/>.

