



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

Ανάλυση και Επεξεργασία Σακκαδικών Κινήσεων Σε Οφθαλμικά Σήματα Υγιών Ατόμων

ΕΚΘΕΣΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

της

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ Ι.ΚΟΡΔΑ

Διπλωματούχου Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και
Φυσικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

Ανάλυση και Επεξεργασία Σακκαδικών Κινήσεων Σε Οφθαλμικά Σήματα Υγιών Ατόμων

ΕΚΘΕΣΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

της

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ Ι.ΚΟΡΔΑ

Διπλωματούχου Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και
Φυσικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

Ανάλυση και Επεξεργασία Σακκαδικών Κινήσεων Σε Οφθαλμικά Σήματα Υγιών Ατόμων

ΕΚΘΕΣΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

της

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ Ι.ΚΟΡΔΑ

Διπλωματούχου Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και
Φυσικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Συμβουλευτική Επιτροπή:

Αν. Καθ. Γεώργιος Ματσόπουλος

Καθ. Νικόλαος Ουζούνογλου

Αν. Καθ. Νικόλαος Σμυρνής

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την.....

.....
Γ. Ματσόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Ασβεστάς
Επ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι.

.....
Ν. Σμυρνής
Αν. Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

.....
Α. Σταφυλοπάτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ε. Βεντούρας
Καθηγητής Τ.Ε.Ι.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2017

Copyright © Αλεξάνδρα Ι. Κορδά, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right 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 στο συγγραφέα.

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

Ευχαριστίες

Φθάνοντας στο τέλος της συγγραφής της παρούσας διατριβής συνειδητοποίησα ότι αποτέλεσε τον καρπό προσωπικού αγώνα, αλλά συγχρόνως και συνδρομής και υποστήριξης πολλών ανθρώπων στους οποίους θέλω να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπωντα της διατριβής μου, κ. Γεώργιο Ματσόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π, ο οποίος με εισήγαγε σε θέματα επεξεργασίας ιατρικού σήματος και ήταν παρόν σε όλη την διάρκεια της διδακτορικής διατριβής για την καθοδήγηση και την έγκυρη επίλυση προβληματισμών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Παντελή Ασβεστά, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής του Τ.Ε.Ι. Αθήνας, όπου η ευρεία γνώση του σε σχετικά θέματα και ο λογικός τρόπος σκέψης του αποτέλεσαν αξιοσημείωτη αξία για μένα, καθώς οι συμβουλές του άλλαξαν και διαφώτισαν τον τρόπο σκέψης μου.

Ιδιαίτερα επίσης ευχαριστώ τον κ. Νικόλαο Σμυρνή, Αναπληρωτή Καθηγητή της Ιατρικής Σχολής Αθηνών, για την εισαγωγή και εκπαίδευση σε θέματα ιατρικής που αποτέλεσε τη βάση για την διεξαγωγή της διατριβής. Τον κ. Ερρίκο Βεντούρα, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής του Τ.Ε.Ι. Αθήνας για την συνεχή διαθεσιμότητά του για συνεργασία και την συμβολή του σε μεγάλο βαθμό στην παραγωγή των αποτελεσμάτων της διατριβής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Περικλή Κτώνα για την ιδέα και την συμβολή του στην παραγωγή αποτελεσμάτων.

Όμως, το πιο μεγάλο ευχαριστώ από όλα τα παραπάνω δικαιωματικά το οφείλω στην οικογένειά μου και στους φίλους μου, οι οποίοι ήταν η δύναμή μου όλο αυτό το χρονικό διάστημα και που με «έμαθαν» να απαντώ στα πιο δύσκολα ερωτήματα για την αναγνώριση της δικής μου αλήθειας. Θα ήθελα να εκφράσω τις μεγαλύτερες ευχαριστίες στους γονείς μου, Ιωάννη και Φρειδερίκη, οι οποίοι δέχτηκαν με μεγάλη χαρά και στήριξαν την επιθυμία μου για συνέχιση των σπουδών μου, τον αδερφό μου Διονύση, τους φίλους μου Δημήτρη και Σπυριδούλα για την συμπαράστασή τους.

Στους ανθρώπους που είναι δίπλα μου

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση, η ανάπτυξη και η παρουσίαση τεχνικών ανάλυσης οφθαλμικών κινήσεων, χρησιμοποιώντας εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος. Αρχικά, πραγματοποιείται μια εισαγωγή στο σύστημα της όρασης και στις τεχνικές καταγραφής της οφθαλμικής κίνησης. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής των οφθαλμικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή, καθώς και η επεξεργασία αυτών με διαθέσιμες τεχνικές επεξεργασίας σημάτων. Η έρευνα επικεντρώθηκε σε τεχνικές αναγνώρισης των διαφόρων οφθαλμικών κινήσεων όπως σακκαδικές, μικροσακκαδικές, βλεφαρισμοί και σημεία προσήλωσης από οφθαλμικά σήματα. Το πρώτο βήμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η ομαλοποίηση του σήματος με την αφαίρεση των γραμμικών τάσεων και την αποθορυβοποίηση αυτού. Στη συνέχεια, ο υπολογισμός της γωνιακής ταχύτητας και η εξαγωγή χαρακτηριστικών από το ομαλοποιημένο σήμα όπως και από αυτό της ταχύτητας υλοποιείται με την εφαρμογή δύο κυλιόμενων παραθύρων. Τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά εισήχθησαν σε μία αλληλουχία τριών νευρωνικών δικτύων για την εκπαίδευση και τον έλεγχο αυτών. Η ευαισθησία και η ακρίβεια της αναγνώρισης των τεσσάρων τύπων οφθαλμικών κινήσεων με χρήση αυτών των χαρακτηριστικών αυτών ήταν πάνω από 95,5% και 95,9%, αντίστοιχα. Η επιλογή των κατάλληλων χαρακτηριστικών εξετάστηκε με εφαρμογή ευρέως διαδεδομένων αλγορίθμων στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Όσον αφορά την ανίχνευση και αναγνώριση των οφθαλμικών κινήσεων εκτός από την εφαρμογή των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, μία νέα μέθοδος αναπτύχθηκε με χρήση του μέγιστου εκθέτη Lyapunov σε συνδυασμό με τον λογάριθμο των αποστάσεων των κοντινότερων γειτόνων του σημείου του σήματος. Η ευαισθησία της μεθόδου στην ανίχνευση των σακκαδικών ήταν 97,1% και η ακρίβεια 98,3%, ενώ η ευαισθησία της μεθόδου για την ανίχνευση των βλεφαρισμών ήταν 98,0% και η ακρίβεια 96,9%. Το απόλυτο μέσο σφάλμα της ανίχνευσης της έναρξης και του τερματισμού κάθε οφθαλμικής κίνησης ήταν κάτω από 0,018 δευτερόλεπτα. Η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί προηγούμενη γνώση της ύπαρξης σακκαδικών κινήσεων και βλεφαρισμών. Οι δύο αυτές μέθοδοι πέραν της ανίχνευσης των οφθαλμικών κινήσεων καταλήγουν και στον εντοπισμό των σημείων έναρξης και τερματισμού αυτών. Έχοντας λοιπόν εντοπίσει τα σημεία έναρξης των σακκαδικών κινήσεων, τα διαστήματα μεταξύ διαδοχικών σημείων έναρξης υπολογίστηκαν. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι διαχωρισμού ομάδων, με και χωρίς επίβλεψη,

καταλήγοντας σε δύο ομάδες. Η στοχαστικότητα των ενδιάμεσων διαστημάτων των σακκαδικών οφθαλμικών κινήσεων μελετήθηκε με χρήση Μαρκοβιανών Μοντέλων ενώ αναγνωρίστηκε το πρότυπο δύο καταστάσεων. Κατά τη διάρκεια της προσήλωσης οι σακκαδικές οφθαλμικές κινήσεις μπορούν να εμφανιστούν με δύο τρόπους, πρώτον κατά ριπές με μικρά ενδιάμεσα διαστήματα ή σε χρονικά διαστήματα μεγαλύτερα του ενός δευτερολέπτου. Γίνεται λοιπόν ξεκάθαρο με τη χρήση Μαρκοβιανών Μοντέλων ότι δύο ενδοφαινότυποι υφίστανται κατά τη διάρκεια προσήλωσης.

Λέξεις Κλειδιά

Σακκαδικές οφθαλμικές κινήσεις, μικροσακκαδικές, βλεφαρισμοί, σημεία προσήλωσης, ομαδοποίηση, νευρωνικά δίκτυα, μοντέλα Μάρκοβ, εκθέτες Λγαρυπον

Abstract

The primary purpose of this PhD thesis is the research, development and presentation of advanced signal processing techniques for the identification of different types of eye movements. An introduction on the data acquisition that used in this thesis is performed, as well as the processing techniques focusing on the treatment of oculomotor signals. In this thesis, a methodological scheme for identifying distinct patterns of oculomotor behavior such as saccades, microsaccades, blinks and fixations from time series of eye's angular displacement is presented. The first step of the proposed methodology involves signal detrending for artifacts removal and estimation of eye's angular velocity. Then, feature vectors from fourteen first-order statistical features are formed from each angular displacement and velocity signal using sliding, fixed-length time windows. The obtained feature vectors are used for training and testing three artificial neural network classifiers, connected in cascade. The selection of suitable characteristics was tested by applying widely used algorithms in existing literature. Also, a methodology based on the Largest Lyapunov Exponent and the logarithm of the divergence of the points is performed for the discrimination of the eye movements. Both of the above methods result in the discrimination of the onset and offset of the saccades and blinks. Having these points, the intersaccade intervals (ISIs) were calculated and classified with supervised and unsupervised methods resulting to two clusters: "short" ISIs and "long" ISIs. The stochastic process of the production of saccades during fixation tasks was studied by means of Markov models. Two patterns were identified during fixation tasks, the first is an attractor in "short" ISIs and the second in "long" ISIs.

Keywords:

Saccades, microsaccades, blinks, fixation, classification, neural network, Markov models, Lyapunov Exponents.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| Ευχαριστίες | 11 |
| Περίληψη | 13 |
| Abstract | 15 |
| Κεφάλαιο 1 | 27 |
| Εισαγωγή | 27 |
| 1.1 Σκοπός διδακτορικής διατριβής | 27 |
| 1.2 Περιεχόμενα διδακτορικής διατριβής | 29 |
| Κεφάλαιο 2 | 31 |
| Το σύστημα της Όρασης | 31 |
| 2.1 Εισαγωγή | 31 |
| 2.2 Ο Οφθαλμός | 33 |
| 2.2.1 Εσωτερική δομή οφθαλμού | 34 |
| 2.2.2 Αμφιβληστροειδής χιτώνας | 36 |
| 2.2.3 Οπτικό νεύρο και οπτικός φλοιός | 36 |
| 2.3 Οφθαλμικές Κινήσεις | 37 |
| 2.3.1 Το Σύστημα Προσήλωσης (Fixation System) | 38 |
| 2.3.2 Τρέμουλο ή Φυσιολογικός Νυσταγμός (Tremor) | 39 |
| 2.3.3 Κινήσεις Διολίσθησης (Drifts) | 39 |
| 2.3.4 Μικροσακκαδικές (Microsaccades) | 40 |
| 2.3.5 Βλεφαρισμοί Των Οφθαλμών | 41 |
| 2.3.6 Σακκαδικές Παρεμβολές | 42 |
| 2.3.7 Οπτικοκινητικός νυσταγμός (optokinetic nystagmus) | 43 |
| 2.3.8 Περιστροφικές κινήσεις (torsional movements) | 44 |
| 2.4 Το Οφθαλμοκινητικό Σύστημα | 44 |
| 2.4.1 Σακκαδικές Κινήσεις (Saccades) | 44 |
| 2.4.2 Ομαλές Κινήσεις Παρακολούθησης (Smooth Pursuit Movements) | 45 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.4.3 | Κινήσεις Σύγκλισης-Απόκλισης (Vergence Eye Movements) | 45 |
| 2.5 | Το σύστημα σταθεροποίησης | 46 |
| 2.6 | Το σύστημα κίνησης του κεφαλιού | 47 |
| 2.6.1 | Αιθουσιαίο-οπτικό αντανακλαστικό (Vestibular– Ocular reflex) | 47 |
| 2.6.2 | Οπτικοκινητικό αντανακλαστικό (Optokinetic reflex) | 47 |
| 2.7 | Καταγραφή οφθαλμικών κινήσεων - Τεχνικές που βασίζονται σε ανακλώμενες ακτίνες | 48 |
| 2.7.1 | Καταγραφή της κίνησης του σκληροκερατοειδικού ορίου (limbus tracking) | 48 |
| 2.7.2 | Καταγραφή της κίνησης του ορίου ίριδας – κόρης (pupil tracking) | 49 |
| 2.7.3 | Καταγραφή της σχετικής θέσης κερατοειδή – κόρης / VideoOculoGraphy | 49 |
| 2.7.4 | Καταγραφή με χρήση πομπού – δέκτη υπερύθρων / InfraRed OculoGraphy | 50 |
| 2.8 | Τεχνική που βασίζεται στην καταγραφή του ηλεκτρικού δυναμικού του δέρματος / ElectroOculoGraphy | 51 |
| 2.9 | Τεχνικές που βασίζονται σε χρήση φακών επαφής | 52 |
| Κεφάλαιο 3 | | 53 |
| Συλλογή των δεδομένων | | 53 |
| 3.1 | Εισαγωγή | 53 |
| 3.2 | Ψυχομετρικές δοκιμασίες | 53 |
| 3.3 | Πειραματική διάταξη για την καταγραφή οφθαλμικών κινήσεων | 54 |
| 3.4 | Δοκιμασίες προσήλωσης | 56 |
| 3.5 | Παρουσίαση δεδομένων | 58 |
| Κεφάλαιο 4 | | 62 |
| Αυτόματη Ανίχνευση Οφθαλμικών Κινήσεων Με Χρήση Τεχνικών Αναγνώρισης Προτύπων | | 62 |
| 4.1 | Εισαγωγή | 62 |
| 4.2 | Μεθοδολογία | 65 |
| 4.2.1 | Προεπεξεργασία | 66 |
| 4.2.1.1 | Απομάκρυνση των γραμμικών ολισθήσεων (Detrending) | 66 |
| 4.2.1.2 | Υπολογισμός της ταχύτητας του σήματος | 67 |
| 4.2.2 | Εξαγωγή χαρακτηριστικών | 71 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 4.2.3 | Κατηγοριοποίηση με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων | 74 |
| 4.3 | Αποτελέσματα | 79 |
| 4.3.1 | Διαχωρισμός βλεφαρισμών από τις υπόλοιπες οφθαλμικές κινήσεις (1 ^{ος} ταξινομητής) | 79 |
| 4.3.2 | Διακριτοποίηση σημείων προσήλωσης από τις σακκαδικές κινήσεις (2 ^{ος} ταξινομητής) | 80 |
| 4.3.3 | Διακριτοποίηση των σακκαδικών από μικροσακκαδικές (3 ^{ος} ταξινομητής) | 81 |
| 4.4 | Η διαδικασία επιλογής καλύτερων χαρακτηριστικών | 82 |
| 4.5 | Απόδοση του συστήματος. | 86 |
| 4.5.1 | Ταξινόμηση ανά διαδικασία προσήλωσης | 86 |
| 4.5.2 | Σύγκριση με άλλους αλγορίθμους | 87 |
| 4.5.2.1 | Αλγόριθμος Velocity Threshold | 87 |
| 4.5.2.2 | Μέθοδος Ομαδοποίησης (Clustering Method) | 88 |
| 4.5.3 | Ανίχνευση σακκαδικών σε σήματα που έχουν καταγραφεί με την κάμερα ISCAN ETL-200. | 89 |
| 4.6 | Ανάλυση αποτελεσμάτων | 91 |
| Κεφάλαιο 5 | | 99 |
| Αυτόματη Ανίχνευση Οφθαλμικών Κινήσεων Με Χρήση Εκθετών Lyapunov. | | 99 |
| 5.1 | Εισαγωγή | 99 |
| 5.2 | Μεθοδολογία | 101 |
| 5.2.1 | Προ-επεξεργασία των δεδομένων | 102 |
| 5.2.2 | Ανακατασκευή του χώρου κατάστασης | 102 |
| 5.2.2.1 | Επιλογή παραμέτρων του χώρου κατάστασης | 103 |
| 5.2.2.1.1 | Η Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης | 103 |
| 5.2.2.1.2 | Η Μέθοδος της Αμοιβαίας Πληροφορίας | 104 |
| 5.2.2.1.3 | Η Μέθοδος των Εσφαλμένα Κοντινότερων Γειτόνων (FNN) | 106 |
| 5.3 | Εκτίμηση του μέγιστου εκθέτη Lyapunov και του λογαρίθμου της απόκλισης των αποστάσεων. | 107 |
| 5.4 | Αυτόματη ανίχνευση των διαφόρων τύπων οφθαλμικών κινήσεων | 111 |
| 5.5 | Εκτίμηση της έναρξης και του τερματισμού των Βλεφαρισμών/Σακκαδικών | 112 |
| 5.6 | Αποτελέσματα | 114 |

| | | |
|---|---|------------|
| 5.6.1 | Σύγκριση με υπάρχουσα μεθοδολογία για την ανίχνευση των βλεφαρισμών και των σακκαδικών. | 114 |
| 5.7 | Ανάλυση αποτελεσμάτων | 117 |
| Κεφάλαιο 6 | | 125 |
| Ανάλυση Παρεμβατικών Σακκαδικών Κινήσεων με Χρήση Μοντέλων Μάρκοβ | | 125 |
| 6.1 | Εισαγωγή | 125 |
| 6.2 | Προ-επεξεργασία Δεδομένων | 129 |
| 6.3 | Καθορισμός των κατηγοριών των ISIs | 131 |
| 6.3.1 | Η Μέθοδος Affinity Propagation | 131 |
| 6.3.2 | Η Μέθοδος Bootstrap | 132 |
| 6.3.3 | Η Ανίχνευση του κατωφλίου διαχωρισμού | 133 |
| 6.4 | Ανάλυση Μάρκοβ | 136 |
| 6.5 | Αλυσίδες Μάρκοβ k τάξης | 139 |
| 6.6 | Στατιστική Αναφορά σχετικά με τα Μοντέλα Μάρκοβ | 142 |
| 6.6.1 | Στατιστικός έλεγχος Στοχαστικής Διαδικασίας | 142 |
| 6.6.2 | Στατιστικός έλεγχος της τάξης της Μαρκοβιανής Αλυσίδας | 144 |
| 6.7 | Αποτελέσματα Ανάλυσης Πρώτης Τάξης | 146 |
| 6.8 | Αποτελέσματα Ανάλυσης Δεύτερης Τάξης | 149 |
| 6.9 | Ανάλυση αποτελεσμάτων | 152 |
| Κεφάλαιο 7 | | 155 |
| Μελλοντικές Επεκτάσεις | | 155 |
| Αναφορές | | 159 |
| Δημοσιεύσεις | | 169 |

Περιεχόμενα Εικόνων-Πινάκων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 2.1: Τα βασικά μέρη του οφθαλμού. | 34 |
| Εικόνα 2.2: Η περιστροφική κίνηση του οφθαλμού μέσω των οφθαλμικών μυών. | 35 |
| Εικόνα 2.3: Διερεύνηση εικόνας με τη βοήθεια σακκαδικών κινήσεων. Οι οφθαλμοί κινούνται συνεχώς και συγκεντρώνουν την προσοχή (μαύρες κουκίδες) σε περιοχές ενδιαφέροντος. | 37 |
| Εικόνα 2.4: Παρουσίαση των μικροσακκαδικών, της κίνησης διολίσθησης και του φυσιολογικού νυσταγμού. | 41 |
| Εικόνα 2.5: Ο Βλεφαρισμός παρουσιάζει μεγαλύτερη γωνιακή απόκλιση από μία σακκαδική. | 42 |
| Εικόνα 2.6: Τέσσερις τύποι σακκαδικών παρεμβολών: (a) μονοφασικές (MSWI), (b) διφασικές (BSWI), (c) ενός παλμού (SSP), (d) διπλού παλμού (DSP). | 43 |
| Εικόνα 2.7: Ομαλή κίνηση παρακολούθησης. | 45 |
| Εικόνα 2.8: Παρουσίαση των κινήσεων σύγκλισης- απόκλισης. | 46 |
| Εικόνα 2.9: Καταγραφή της κίνησης του σκληροκερατοειδικού ορίου. | 48 |
| Εικόνα 2.10: Καταγραφή της κίνησης του ορίου ίριδας-κόρης. | 49 |
| Εικόνα 2.11: Εικόνες Purkinje, η τέταρτη εικόνα Purkinje είναι ασθενέστερη της πρώτης. | 50 |
| Εικόνα 2.12: Ανίχνευση οφθαλμικών κινήσεων με χρήση πομπού – δέκτη υπερέθρων. | 51 |
| Εικόνα 2.13: Τεχνική EOG. | 51 |
| Εικόνα 3.1: Η πειραματική διάταξη καταγραφής οφθαλμικών κινήσεων. | 55 |
| Εικόνα 3.2: Η παρατήρηση των οφθαλμικών κινήσεων κατά την διάρκεια του πειράματος. | 55 |
| Εικόνα 3.3: Η συσκευή υπερέθρων καταγραφής οφθαλμικών κινήσεων IRIS SCALAR. | 56 |
| Εικόνα 3.4: Η πρώτη δοκιμασία περιλαμβάνει την προσήλωση των συμμετεχόντων στον λευκό σταυρό. | 57 |
| Εικόνα 3.5: Η δεύτερη δοκιμασία περιλαμβάνει την προσήλωση των συμμετεχόντων στον λευκό σταυρό αγνοώντας τους λευκούς σταυρούς που εμφανίζονται περιμετρικά. | 57 |
| Εικόνα 3.6: Η τρίτη δοκιμασία περιλαμβάνει την προσήλωση των συμμετεχόντων στην μαύρη οθόνη. | 58 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 3.7: Σήμα καταγραφής της γωνιακής απόκλισης του οφθαλμού με χρήση του συστήματος IRIS SCALAR. | 58 |
| Εικόνα 3.8: α) Το σήμα βαθμονόμησης, β) Θορυβώδες σήμα βαθμονόμησης το οποίο απαλείφεται από την μελέτη, γ) Το σήμα της γωνιακής απόκλισης πριν την προεπεξεργασία και ύστερα από προεπεξεργασία δ). | 60 |
| Εικόνα 3.9: Η κόκκινη κουκίδα δείχνει το κεντρικό σημείο της σακκαδικής, οι κάθετες μαύρες γραμμές ορίζουν το μήκος του παραθύρου W2. | 61 |
| Εικόνα 4.1: Τεχνικό διάγραμμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας. | 65 |
| Εικόνα 4.2: α) Η μπλε γραμμή αντιστοιχεί στο καταγεγραμμένο σήμα το οποίο δεν έχει υποστεί επεξεργασία και η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο καταγεγραμμένο σήμα ύστερα από την απομάκρυνση των γραμμικών ολισθήσεων. β) Μεγέθυνση ενός μέρους του σήματος. | 67 |
| Εικόνα 4.3: α) Η γωνιακή ταχύτητα του σήματος για $\sigma = 0.1$, β) $\sigma = 0.5$, γ) $\sigma = 1$ και δ) $\sigma = 2$. | 69 |
| Εικόνα 4.4: α) Ένα χαρακτηριστικό ομαλοποιημένο σήμα και β) η αντίστοιχη γωνιακή ταχύτητα του σήματος. Οι ετικέτες 1-3 αντιστοιχούν στους βλεφαρισμούς, ενώ η ετικέτα 4 αντιστοιχεί σε αλληλουχία σακκαδικών. | 70 |
| Εικόνα 4.5: Η γωνιακή απόκλιση του οφθαλμού που αντιστοιχεί σε α) βλεφαρισμό, β) σακκαδική, και γ) σημεία προσήλωσης. Οι αντίστοιχες γωνιακές ταχύτητες φαίνονται στα σχήματα δ), ε), στ). Τα σχήματα αυτά προέρχονται από μεγέθυνση των τμημάτων του σήματος που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.7. | 71 |
| Εικόνα 4.6: Τα ιστογράμματα των γωνιακών αποκλίσεων (α-γ) και των γωνιακών ταχυτήτων (δ-στ) δέκα παραθύρων από κάθε τύπο οφθαλμικής κίνησης. | 72 |
| Εικόνα 4.7: Αλληλουχία των ταξινομητών στην προτεινόμενη μεθοδολογία. | 76 |
| Εικόνα 4.8: Ταξινομητής (Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο) με μία είσοδο, 10 υπολογιστικούς νευρώνες και μία έξοδο που δίνει τιμές 0 ή 1. | 76 |
| Πίνακας 4.1: Απόδοση των τριών ταξινομητών για τις διαφορετικές τιμές του πλήθους των νευρώνων και των εποχών. | 77 |
| Πίνακας 4.2: Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων ταξινόμησης των διανυσμάτων χαρακτηριστικών από τον πρώτο κατηγοριοποιητή ύστερα από 10 δοκιμές με διαφορετικά σύνολα εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ελέγχου. | 80 |

| | |
|--|----|
| Πίνακας 4.3: Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων ταξινόμησης των διανυσμάτων χαρακτηριστικών από τον δεύτερο κατηγοριοποιητή ύστερα από 10 δοκιμές με διαφορετικά σύνολα εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ελέγχου . | 80 |
| Πίνακας 4.4: Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων κατηγοριοποίησης των διανυσμάτων χαρακτηριστικών του συνόλου ελέγχου από τον τρίτο ταξινομητή ύστερα από 10 δοκιμές με διαφορετικά σύνολα εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ελέγχου. | 81 |
| Εικόνα 4.9: Οι Roc καμπύλες του συνόλου ελέγχου για κάθε ταξινομητή (α-γ). | 82 |
| Πίνακας 4.5: Τα αποτελέσματα του πρώτου ταξινομητή με χρήση των επιλεγμένων χαρακτηριστικών από τον αλγόριθμο SFFS. | 84 |
| Πίνακας 4.6: Τα αποτελέσματα του δεύτερου ταξινομητή με χρήση των επιλεγμένων χαρακτηριστικών από τον αλγόριθμο SFFS. | 84 |
| Πίνακας 4.7: Τα αποτελέσματα του τρίτου ταξινομητή με χρήση των επιλεγμένων χαρακτηριστικών από τον αλγόριθμο SFFS. | 85 |
| Εικόνα 4.10: Οι Roc καμπύλες των αποτελεσμάτων του συνόλου ελέγχου από τους τρεις ταξινομητές (α-γ). | 86 |
| Πίνακας 4.8: Απόδοση του προτεινόμενου συστήματος για την ανίχνευση όλων των ειδών οφθαλμικών κινήσεων. | 86 |
| Πίνακας 4.9: Απόδοση της προτεινόμενης μεθοδολογίας στις τρεις διαφορετικές διαδικασίες προσήλωσης και σύγκριση των ταξινομητών με τις μεθόδους Velocity Threshold και Μέθοδο Ομαδοποίησης. | 88 |
| Εικόνα 4.11: Στο σχήμα παρουσιάζεται ένα μέρος του καταγεγραμμένου σήματος ων κριτών ρυθμικής γυμναστικής. Ο πράσινος κύκλος δηλώνει τη έναρξη της σακκαδικής ενώ με μαύρο αστέρι σημειώνεται ο τερματισμός της σακκαδικής. | 91 |
| Πίνακας 4.10: Πίνακας διασύνδεσης των σημάτων καταγραφής από κάμερα ISCAN ETL-200. | 91 |
| Εικόνα 4.12: Η συνολική ακρίβεια του πρώτου ταξινομητή για διαφορετικές τιμές του παραθύρου W1. Η υψηλότερη ακρίβεια υπολογίζεται για μήκος παραθύρου 400ms. | 92 |
| Εικόνα 4.13: Η συνολική ακρίβεια του δεύτερου ταξινομητή για διαφορετικές τιμές του παραθύρου W2. Η υψηλότερη ακρίβεια υπολογίζεται για μήκος παραθύρου 13ms. | 93 |
| Εικόνα 4.14: Στο σχήμα α) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δεύτερου ταξινομητή για μήκος παραθύρου W2 13ms και στο σχήμα β) για μήκος παραθύρου 16ms. Ο πράσινος κύκλος δηλώνει τη έναρξη της σακκαδικής ενώ με μαύρο αστέρι σημειώνεται ο τερματισμός | |

| | |
|---|-----|
| της σακκαδικής. Επίσης, οι σακκαδικές που δεν ανιχνεύονται από τον ταξινομητή έχουν περικυκλωθεί με μαύρο χρώμα. | 93 |
| Εικόνα 4.15: Εναλλακτικός τρόπος ταξινόμησης των τεσσάρων ειδών οφθαλμικών κινήσεων. Χρησιμοποιήθηκε ένας ταξινομητής με έξοδο 4 κλάσεις. | 95 |
| Πίνακας 4.11: Πίνακας διασύνδεσης του ταξινομητή τεσσάρων κλάσεων. | 95 |
| Εικόνα 4.16: α) Πίνακας διασύνδεσης του ταξινομητή τεσσάρων κλάσεων όπως φαίνεται στην Εικόνα 15, και β) η αντίστοιχη καμπύλη Roc όπου η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί σε μικροσακκαδικές, η μπλε γραμμή αντιστοιχεί σε σακκαδικές, η πράσινη σε σημεία προσήλωσης. | 96 |
| Εικόνα 4.17: Εναλλακτικός τρόπος ταξινόμησης των τεσσάρων ειδών οφθαλμικών κινήσεων. | 96 |
| Εικόνα 5.1: α) Ένα καταγεγραμμένο σήμα γωνιακής απόκλισης και β) εκτίμηση της παραμέτρου της χρονικής καθυστέρησης τ για το αντίστοιχο σήμα. | 104 |
| Εικόνα 5.2: Η εκτίμηση της παραμέτρου της χρονικής καθυστέρησης τ με τη μέθοδο της αμοιβαίας πληροφορίας για το σήμα της Εικόνας 5.1(α). | 105 |
| Εικόνα 5.3: Παράδειγμα για τον καθορισμό της ελάχιστης απαιτούμενης διάστασης εμφάθυνσης. Το ποσοστό των εσφαλμένα κοντινότερων γειτόνων μηδενίζεται όταν $m = 5$. | 107 |
| Εικόνα 5.4: Ιστόγραμμα του λογαρίθμου των αποκλίσεων των σημείων για κάθε k για όλες τις α) σακκαδικές και β) βλεφαρισμοί. | 112 |
| Εικόνα 5.5: α) Ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Lyapunov του τμήματος του σήματος που εμπεριέχει σακκαδική. Η τελεία αντιστοιχεί στο αρχικά ανιχνεύσιμο σημείο της σακκαδικής. β) Το αντίστοιχο τυπικό οφθαλμικό σήμα. γ) Ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Lyapunov του τμήματος του σήματος που εμπεριέχει σακκαδική στο κέντρο του παραθύρου W . δ) Το αντίστοιχο τυπικό οφθαλμικό σήμα. ε) Ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Lyapunov του τμήματος του σήματος που εμπεριέχει βλεφαρισμό. στ) Το αντίστοιχο τυπικό οφθαλμικό σήμα που εμπεριέχει βλεφαρισμό. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν στην έναρξη της σακκαδικής ή του βλεφαρισμού ενώ ο αστερίσκος αντιστοιχεί στον τερματισμό της σακκαδικής ή του βλεφαρισμού. | 113 |
| Πίνακας 5.1: Πίνακας αποτελεσμάτων ανίχνευσης των σακκαδικών/βλεφαρισμών. | 114 |

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 5.2: Η ευαισθησία και η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε σύγκριση με την τεχνική που αναπτύσσεται στην εργασία του (Pettersson, et al., 2013) για την ανίχνευση των βλεφαρισμών. | 115 |
| Εικόνα 5.6: Τα μαύρα τετράγωνα αντιστοιχούν στην έναρξη και τον τερματισμό των ανιχνευμένων βλεφαρισμών από α) την μέθοδο του Petterson et al. και β) την προτεινόμενη μέθοδο. | 116 |
| Πίνακας 5.3: Η ευαισθησία και η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε σύγκριση με τον Velocity Threshold αλγόριθμο για την ανίχνευση των σακκαδικών. | 117 |
| Εικόνα 5.7: Οι μαύρες τελείες αντιστοιχούν στην έναρξη και τον τερματισμό των ανιχνευμένων σακκαδικών από α) τον Velocity Threshold αλγόριθμο και β) την προτεινόμενη μεθοδολογία. | 117 |
| Εικόνα 5.8: α) Τυπικό σήμα που εμπεριέχει σακκαδική. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν στην έναρξη και ο αστερίσκος στον τερματισμό της σακκαδικής. β) Ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Lyapunov για διαφορετικές τιμές του τ για $m = 2$. γ) Ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Lyapunov για διαφορετικές τιμές του m για $\tau = 0,0183 s$. | 119 |
| Εικόνα 5.9: Οι μαύρες τελείες σημειώνουν την έναρξη και τον τερματισμό των ανιχνεύσιμων σακκαδικών από α) τον Velocity Threshold αλγόριθμο και β) την προτεινόμενη μεθοδολογία. | 120 |
| Εικόνα 5.10: α) Μεγέθυνση μέρους του σήματος της εικόνας 5.1(α), η μαύρη τελεία αποτελεί το ανιχνεύσιμο σημείο της πρώτης σακκαδικής, β) ο αντίστοιχος μέγιστος εκθέτης Lyapunov, γ) μετακίνηση του παραθύρου με κέντρο το σημείο που ανιχνεύθηκε, η έναρξη και ο τερματισμός της σακκαδικής σημειώνονται με δύο μαύρες τελείες, δ) ο αντίστοιχος μέγιστος εκθέτης Lyapunov. | 121 |
| Εικόνα 5.11: Το ιστόγραμμα των μέσων τιμών του λογαρίθμου της απόκλισης των σημείων για κάθε k από μέρη των σημάτων που περιέχουν σημεία προσήλωσης. | 122 |
| Εικόνα 5.12: α) Η γωνιακή απόκλιση του οφθαλμού σε μέρος του σήματος που περιέχει μόνο σημεία προσήλωσης, β) ο αντίστοιχος λογάριθμος της απόκλισης των σημείων $\langle \ln(d(k)) \rangle$ και γ) ο αντίστοιχος μέγιστος εκθέτης Lyapunov. Οι εικόνες προέρχονται από μέρη του σήματος του σχήματος 5.1(α). | 122 |
| Εικόνα 6.1: Τέσσερις διαδοχικές σακκαδικές. | 130 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 6.2: Τέσσερις διαδοχικές σακκαδικές με ενδιάμεση σακκαδική παρεμβολή μεταξύ των σακκαδικών 2 και 3. | 130 |
| Εικόνα 6.3: Διαγραφή της σακκαδικής παρεμβολής. | 131 |
| Εικόνα 6.4: Υπολογισμός του κατωφλίου για τις δοκιμασίες α) VFU, β) VFD και γ) NTF. Για κάθε διαδικασία δύο καμπύλες δίνονται. Η πάνω καμπύλη: Η περιβάλλουσα του ιστογράμματος της κατανομής των ISIs για κάθε δοκιμασία. Η κάτω καμπύλη: Η δεύτερη παράγωγος της περιβάλλουσας του ιστογράμματος. Το κατώφλι διαχωρισμού των δύο καταστάσεων (“short” και “long” ISIs) σε κάθε δοκιμασία είναι η τιμή του ISI (σημειώνεται με τετράγωνο) η οποία αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη τιμή της δεύτερης παραγώγου (σημειώνεται με κύκλο) η οποία είναι δεξιά από το μέγιστο της περιβάλλουσας. | 135 |
| Πίνακας 6.1 : Ανίχνευση του κατωφλίου για τον διαχωρισμό των μικρών και μεγάλων ISIs. | 136 |
| Εικόνα 6.5: Ένα τυπικό μοντέλο αλυσίδας Μάρκοβ, με καταστάσεις τις 4 βάσεις του DNA (A,C,G,T). Τα βέλη συμβολίζουν τις επιτρεπτές μεταβάσεις. Με B και E, συμβολίζονται οι καταστάσεις έναρξης και τερματισμού του μοντέλου, αντίστοιχα. | 139 |
| Εικόνα 6.6: Κατευθυνόμενος Γράφος Μοντέλου Μάρκοβ τριών καταστάσεων A, B, C. | 140 |
| Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα Μαρκοβιανής ανάλυσης πρώτης τάξης. | 148 |
| Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα Μαρκοβιανής ανάλυσης δεύτερης τάξης. | 151 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός διδακτορικής διατριβής

Γνωσιακές και νευροφυσιολογικές διαδικασίες όπως η διατήρηση προσοχής και η διατήρηση της μνήμης, καθώς επίσης οι οφθαλμικές κινήσεις και η δραστηριότητα του εγκεφάλου, αποτελούν ενδοφαινότυπους που μελετώνται συχνά για την ανίχνευση ψυχοπαθολογικών συμπτωμάτων. Οι ενδοφαινότυποι αποτελούν μετρήσιμα μεγέθη που συνδέουν τον γονότυπο με την φαινοτυπική παρουσίαση μίας δυσλειτουργίας. Η συλλογή και ανάλυση οφθαλμικών κινήσεων αποτελεί σημαντικό και αναπόσπαστο τμήμα της σύγχρονης ψυχιατρικής επιστήμης. Η ανάλυση των διαφόρων τύπων οφθαλμικών κινήσεων αποσκοπεί στην δημιουργία νέων ενδοφαινότυπων για την κατανόηση της λειτουργίας του εγκεφάλου τόσο σε υγιείς όσο και σε ασθενείς. Με βάση την ανάλυση δεδομένων των οφθαλμικών σημάτων οι

ειδικοί καλούνται να λάβουν αποφάσεις για την ψυχοπαθολογική κατάσταση των ατόμων. Η λήψη οφθαλμικών σημάτων υπό διαφορετικές διαδικασίες, παρέχει στον ειδικό την δυνατότητα εντοπισμού της κλινικής κατάστασης του ατόμου.

Ωστόσο, μελέτες σχετικά με τις γνωσιακές διαδικασίες της διατήρησης προσοχής έχουν επικεντρωθεί στην μελέτη της συχνότητας των σακκαδικών οφθαλμικών κινήσεων για την αναγνώριση της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών. Η στοχαστικότητα των σακκαδικών οφθαλμικών κινήσεων κατά την διάρκεια της προσήλωσης αποτελεί ένα νέο στοιχείο στη μελέτη της νευροφυσιολογίας της διαδικασίας προσήλωσης. Μέχρι στιγμής η παραγωγή οφθαλμικών σακκαδικών κινήσεων δεν αποτελούσαν δείκτη διαφοροποίησης της λειτουργίας του εγκεφάλου. Μια τέτοια προσέγγιση δημιουργεί νέα βάση τόσο στη μελέτη των οφθαλμικών κινήσεων στις διαδικασίες προσήλωσης όσο και στη μελέτη της λειτουργίας του εγκεφάλου.

Παρά το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική αύξηση στην αξιοποίηση των δεδομένων οφθαλμικών κινήσεων, η ανίχνευση των διαφόρων τύπων αυτών βασίζεται κυρίως στην ποιοτική ανάλυση των οφθαλμικών σημάτων από τους ειδικούς, χωρίς την περεταίρω εμπλοκή αυτοματοποιημένων τεχνικών. Κατά συνέπεια, η ανάλυση των δεδομένων και τα εξαγόμενα συμπεράσματα, βασίζονται στην υποκειμενική κρίση του εκάστοτε ειδικού, χωρίς την ύπαρξη αντικειμενικών κριτηρίων ή κανόνων. Ειδικά όσον αφορά στην ψυχιατρική, λόγω της ιδιαίτερης μορφολογίας των εξαγόμενων σημάτων, εξαιτίας της τεχνικής της καταγραφής όσο και της νοητικής ικανότητας των ατόμων που συμμετέχουν, η έλλειψη κάποιου είδους προτυποποίησης μπορεί να οδηγήσει σε ορισμένες περιπτώσεις στην εξαγωγή λανθασμένων συμπερασμάτων.

Η χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την επεξεργασία ιατρικών γενικότερα και οφθαλμικών ειδικότερα δεδομένων, είναι δυνατό να εξασφαλίσει την προτυποποιημένη ανάλυση των δεδομένων και την εξαγωγή συμπερασμάτων, τα οποία βασίζονται σε αντικειμενικά κριτήρια, κάνοντας χρήση εξειδικευμένων αλγορίθμων επεξεργασίας. Οι αλγόριθμοι αυτοί περιορίζουν την εμπλοκή του ανθρώπινου παράγοντα.

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η παρουσίαση καινοτόμων, αυτοματοποιημένων τεχνικών επεξεργασίας οφθαλμικών δεδομένων, με απώτερο σκοπό τη χρησιμοποίηση των δεδομένων αυτών για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την λειτουργία του εγκεφάλου σε διαδικασίες διατήρησης προσοχής. Βασική μέριμνα της εν λόγω εργασίας δεν είναι η υποκατάσταση του ειδικού ιατρού, αλλά η παροχή βοηθητικών τεχνικών και εργαλείων, τα οποία θα διευκολύνουν τον ειδικό στην ανίχνευση και αξιολόγηση των

οφθαλμικών κινήσεων και πιθανώς στη λήψη αποφάσεων και την αποτίμηση της κλινικής κατάστασης του ασθενούς.

1.2 Περιεχόμενα διδακτορικής διατριβής

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, αναπτύχθηκαν διάφορες καινοτόμες τεχνικές επεξεργασίας οφθαλμικών δεδομένων. Η έρευνα επικεντρώθηκε σε τεχνικές ανίχνευσης των οφθαλμικών κινήσεων καθώς και της μελέτης της στοχαστικότητας των οφθαλμικών κινήσεων κατά την διαδικασία της προσήλωσης. Η εφαρμογή των προτεινόμενων αλγορίθμων αποσκοπεί στην αυτοματοποιημένη ανίχνευση των οφθαλμικών κινήσεων. Οι προτεινόμενες τεχνικές ανίχνευσης βασίζονται στη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων ή Εκθετών Lyapunov. Όσον αφορά στην αποτίμηση των προτεινόμενων αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από διαφορετικές τεχνικές καταγραφής, καθώς και άλλες ευρέως διαδεδομένες τεχνικές ανίχνευσης οφθαλμικών κινήσεων. Τα αποτελέσματα και οι παρατηρήσεις σχετικά με την επίδοση των αλγορίθμων παρουσιάζονται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια γενική εισαγωγή στο σύστημα της όρασης. Αναλύεται εκτενέστερα η νευροφυσιολογία του οφθαλμού καθώς και των διαφόρων τύπων οφθαλμικών κινήσεων που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι τεχνικές που αφορούν στη συλλογή των δεδομένων των οφθαλμικών κινήσεων.

Το σύστημα καταγραφής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναπτύσσονται και οι διαδικασίες προσήλωσης που ακολούθησαν οι συμμετέχοντες στην διαδικασία καταγραφής των οφθαλμικών σημάτων. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα αυτόματης ανίχνευσης των οφθαλμικών κινήσεων με χρήση τεχνικών αναγνώρισης προτύπων. Αρχικά, αναλύεται η διαδικασία αποθορυβοποίησης των σημάτων με κατάλληλα φίλτρα. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το σύστημα ανίχνευσης το οποίο απαρτίζεται από τρία διαφορετικά υποσυστήματα: (α) ανίχνευσης βλεφαρισμών, (β) ανίχνευσης σακκαδικών κινήσεων και (γ) ανίχνευσης μικρών σακκαδικών κινήσεων. Η Ευαισθησία της ανίχνευσης βλεφαρισμών ήταν 99,9% και η ακρίβεια 99,8%. Η Ευαισθησία της ανίχνευσης σακκαδικών κινήσεων ήταν 95,5% και η ακρίβεια 97,5%, ενώ για την ανίχνευση μικρών σακκαδικών κινήσεων η ευαισθησία και η ακρίβεια ήταν 95,9%. Παρουσιάζονται παραλλαγές της διάταξης των υποσυστημάτων και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για κάθε διάταξη. Επίσης, αναλύονται τα στατιστικά

χαρακτηριστικά πρώτης τάξης τα οποία εξήχθησαν και χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Η καταλληλότητα των χαρακτηριστικών που επιλέχτηκαν εξετάστηκε με την χρήση κατάλληλων αλγορίθμων. Τέλος, ο προτεινόμενος αλγόριθμος αξιολογήθηκε σε καταγεγραμμένα σήματα με χρήση κάμερας. Το σύστημα παρουσίασε υψηλά ποσοστά ανίχνευσης τόσο στις οριζόντιες όσο και στις κάθετες σακκαδικές κινήσεις.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η μεθοδολογία της μη γραμμικής ανάλυσης σήματος με χρήση του μέγιστου εκθέτη Lyapunov. Η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι η πρώτη φορά που εφαρμόζεται σε οφθαλμικά σήματα για την ανίχνευση κίνησης. Αποτελεί μία εύκολα εφαρμόσιμη μεθοδολογία η οποία παράγει ακριβή αποτελέσματα. Η προτεινόμενη μέθοδος εξετάστηκε σε 26.000 σακκαδικές και 2.616 βλεφαρισμούς, παρέχοντας υψηλά ποσοστά σωστού εντοπισμού και των δύο τύπων κίνησης. Συγκεκριμένα, η ευαισθησία στην ανίχνευση των σακκαδικών ήταν 97,1% και η ακρίβεια 98,3%, ενώ η ευαισθησία για την ανίχνευση των βλεφαρισμών ήταν 98,0% και η ακρίβεια 96,9%. Το απόλυτο μέσο σφάλμα της ανίχνευσης της έναρξης και του τερματισμού κάθε οφθαλμικής κίνησης ήταν κάτω από 0,018 δευτερόλεπτα.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 εξετάζεται η στοχαστικότητα των οφθαλμικών κινήσεων στις διαδικασίες προσήλωσης. Η καινοτομία της μεθόδου υφίσταται στο γεγονός ότι δεν μελετάται όπως συνηθίζεται η συχνότητα των παραγόμενων σακκαδικών σε διαδικασίες προσήλωσης αλλά η εξαρτώμενη παραγωγή αυτών. Το ερώτημα που απαντάται είναι κατά πόσο η παραγωγή μίας σακκαδικής στη διαδικασία προσήλωσης αποτελεί ανεξάρτητη λειτουργία του εγκεφάλου σε σχέση με την παραγωγή μίας προηγούμενης σακκαδικής κίνησης. Η χρήση των Μαρκοβιανών Μοντέλων οδήγησε στην διαφοροποίηση των προτύπων των σακκαδικών κινήσεων. Καταλήξαμε ότι η λειτουργία του εγκεφάλου διαφοροποιείται στην παραγωγή σακκαδικών κατά ριπές, καθώς τείνει η κίνηση του οφθαλμού να χαρακτηριστεί ως ελκυστής, επίσης και η συνεχής παραγωγή σακκαδικών κινήσεων σε εύρος χρόνου χαρακτηρίζεται ως κατάσταση ελκυστή. Παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική εναλλαγή των δύο αυτών καταστάσεων παραγωγής οφθαλμικών κινήσεων.

Κεφάλαιο 2

Το σύστημα της Όρασης

2.1 Εισαγωγή

Οι χειρονομίες, οι πράξεις και η ομιλία είναι αδιαμφισβήτητα στοιχεία που χαρακτηρίζουν έναν άνθρωπο. Οι οφθαλμικές κινήσεις αποτελούν επιπλέον ένα από τα χαρακτηριστικά του ανθρώπου που μελετώνται ώστε να καθορίσουν την ανθρώπινη συμπεριφορά (Leigh R. , 2004), κυρίως για τον λόγο ότι οι οφθαλμικές κινήσεις δηλώνουν την εστίαση της οπτικής προσοχής σε ένα σημείο, μολονότι οι οφθαλμοί δεν χαρακτηρίζονται ποτέ ως ακίνητοι. Η συνεισφορά των οφθαλμικών κινήσεων στην ανάλυση της ανθρώπινης συμπεριφοράς έχει απασχολήσει αρκετές δεκαετίες την επιστημονική κοινότητα. Πλήθος ερευνών έχουν διεξαχθεί με σκοπό την ανάλυση της οπτικής προσοχής και την κατανόηση του μηχανισμού λειτουργίας του οφθαλμού με αξιόλογα αποτελέσματα που έδωσαν το έναυσμα για την συσχέτιση των οφθαλμικών κινήσεων με ψυχοπαθολογικές διαταραχές.

Στην εργασία (Posner, 1980) μελετήθηκε ο τρόπος με τον οποίον επέρχεται ο προσανατολισμός της προσοχής, ύστερα από την ανίχνευση των αισθητηριακών πληροφοριών που βρίσκονται στο οπτικό πεδίο. Ο ρόλος των οφθαλμικών κινήσεων κατά τη διάρκεια προσήλωσης του βλέμματος αλλά και κατά τη διάρκεια ανίχνευσης του οπτικού μας περιβάλλοντος είναι πολύ σημαντικός για την αντίληψη της όρασης. Η εστίαση σε σταθερή εικόνα, έχει παρατηρηθεί ότι προκαλεί νευρωνική προσαρμογή, δηλαδή αδρανοποίηση των νευρώνων στους οποίους οφείλονται οι οφθαλμικές κινήσεις. Στην πραγματικότητα όμως, η νευρωνική προσαρμογή αποφεύγεται επειδή τα μάτια μας εκτελούν συνεχώς ακούσιες κινήσεις, με αποτέλεσμα η εικόνα στον αμφιβληστροειδή να μη μένει σταθερή ακόμα και όταν προσηλώνουμε το βλέμμα μας σε ένα σταθερό σημείο. Όπως αναφέρεται και στην εργασία (Everling & Munoz, 2004), οι οφθαλμοί δεν παραμένουν σταθεροί κατά την παρακολούθηση μίας σταθερής σκηνής αλλά μετακινούνται συνεχώς “χτίζοντας” έναν νοητό χάρτη από τα σημεία ενδιαφέροντος που παρατηρούνται. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας ότι μόνο μία μικρή περιοχή του αμφιβληστροειδούς χιτώνα, το βοθρίο, είναι ικανό να αντιληφθεί μία εικόνα με υψηλή οξύτητα.

Ο ανθρώπινος αμφιβληστροειδής δεν έχει την ίδια ικανότητα επεξεργασίας του οπτικού σήματος σε όλη την επιφάνειά του (λόγω διαφορετικής πυκνότητας κωνίων και ραβδίων). Το αντικείμενο παρατήρησης πρέπει να βρίσκεται στο κέντρο του αμφιβληστροειδή, στην περιοχή (fovea) που είναι υπεύθυνη για την οπτική επεξεργασία. Εκεί έχουμε μεγάλη πυκνότητα κωνίων, με αποτέλεσμα η περιοχή να έχει μεγάλη διακριτική ικανότητα. Στην περιφερειακή περιοχή, υπάρχει μεγάλη πυκνότητα ραβδίων. Η περιοχή αυτή είναι υπεύθυνη για την ανίχνευση και την κατεύθυνση του οπτικού ερεθίσματος. Οι κινήσεις που εκτελεί το βλέμμα για να κρατήσει το σημείο του ενδιαφέροντος στην κεντρική περιοχή καλούνται σακκαδικές κινήσεις. Οι σακκαδικές αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για τη νευροβιολογία, αφού είναι ένα δημοφιλές μέσο για τη μελέτη της κινητικής και της γνωστικής λειτουργίας αλλά και της μνήμης και συχνά χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τεχνικές, όπως η λειτουργική απεικόνιση και η διακρανιακή μαγνητική διέγερση (Leigh R. , 2004).

Σύμφωνα με τους (Leigh & Zee, 1991), τέσσερις τύποι οφθαλμικών κινήσεων έχουν αποτυπωθεί: α) οι σακκαδικές κινήσεις οι οποίες είναι γρήγορες εκούσιες κινήσεις οι οποίες εστιάζουν το βοθρίο στο κέντρο ενδιαφέροντος μίας σταθερής εικόνας, β) ομαλές κινήσεις παρακολούθησης (smooth pursuits), οι οποίες περιέχουν μία συνεχή μικρή κίνηση και των δύο οφθαλμών με σκοπό την παρακολούθηση μίας κινητής εικόνας σε ένα οπτικό πεδίο, γ) κινήσεις σύγκλισης/απόκλισης των ματιών κατά τις οποίες τα μάτια είτε συγκλίνουν, κατά την διάρκεια

της προσαρμογής, είτε αποκλίνουν και συμβαίνουν όταν ένα αντικείμενο-στόχος πλησιάζει ή απομακρύνεται αντίστοιχα, δ) κινήσεις προσήλωσης, οι οποίες χαρακτηρίζουν την αδράνεια των οφθαλμών και το “κλείδωμα” σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Ουσιαστικά, δεν πρόκειται για αναστολή της κίνησης αλλά για πολύ μικρή μεταβολή της κίνησης.

2.2 Ο Οφθαλμός

Ο οφθαλμός είναι το όργανο της όρασης. Ίσως είναι το πιο σημαντικό αισθητήριο όργανο του ανθρώπου, αφού οι περισσότεροι αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους πρώτα με την όραση και μετά με τις υπόλοιπες αισθήσεις. Ο οφθαλμός αποτελείται από τον οφθαλμικό βολβό, που είναι το κυρίως όργανο της όρασης και από τα επικουρικά όργανα όπως βλέφαρα, μύες κ.τ.λ. Τα επικουρικά όργανα είναι απαραίτητα για την προστασία και την λειτουργία του οφθαλμικού βολβού. Ο οφθαλμός έχει τρεις τύπους αδένων τους δακρυϊκούς αδένες, τους σμηγματογόνους αδένες και τους βλεφαρικούς αδένες.

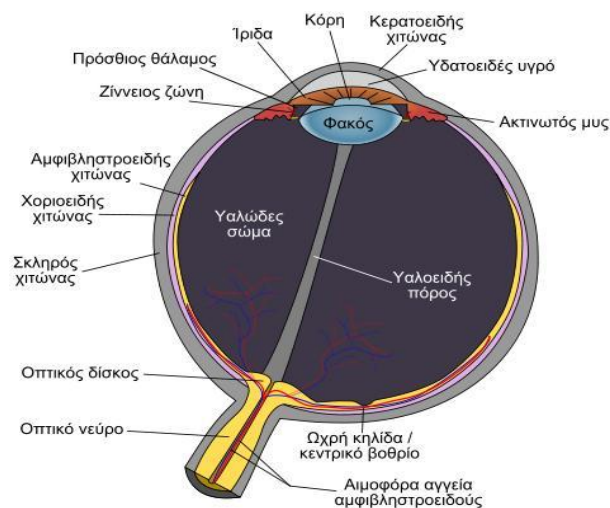
Οι δακρυϊκοί αδένες βρίσκονται στο βλέφαρο, ακριβώς επάνω από τον οφθαλμικό βολβό κάθε ματιού. Οι δακρυϊκοί αδένες εκκρίνουν συνεχώς μικρή ποσότητα δακρύων που διανέμεται στην επιφάνεια του ματιού με το βλεφαρισμό, αποχετεύεται στο δακρυϊκό ασκό μέσω των δακρυϊκών πόρων και κατόπιν, στη μύτη, μέσω του ρινοδακρυϊκού πόρου. Τα δάκρυα σχηματίζουν ένα προστατευτικό λεπτό υμένιο, που εφυγραίνει το μάτι και παρασύρει δυνητικώς επιβλαβή σωματίδια, όπως σκόνη και χημικές ουσίες. Ακόμη, περιέχουν μία φυσική αντισηπτική ουσία, τη λυσοζύμη, που συντελεί στη προστασία των ματιών από τις μολύνσεις. Οι σμηγματογόνοι αδένες εμφανίζονται κατά μήκος των ακρών των βλεφάρων.

Ο οφθαλμός αποτελείται από το τοίχωμα καθώς και το περιεχόμενο. Το τοίχωμα αρχικά περιλαμβάνει τρεις χιτώνες τον αμφιβληστροειδή, τον αγγειώδη και τον ινώδη. Ο ινώδης χιτώνας προστατεύει το μάτι και χωρίζεται σε δύο μέρη στον κερατοειδή και στο σκληρό. Ο αγγειώδης χιτώνας αποτελείται απ' το χοριοειδή, το ακτινωτό σώμα και την ίριδα. Η κόρη είναι το μέρος εκείνο της ίριδας στο κέντρο, που το άνοιγμά της ρυθμίζεται απ' τους μυς, σφιγκτήρα και διαστολέα. Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας, περιέχει διάφορα κύτταρα, όπως τα οπτικά κ.ά.

Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας εφάπτεται στο χοριοειδή χιτώνα, που προστατεύει το μάτι και φέρει αιμοφόρα αγγεία του ματιού. Είναι ο εσωτερικός χιτώνας του οφθαλμικού βολβού. Καλύπτει ολόκληρη την εσωτερική επιφάνεια του βολβού, εκτός από το τμήμα της κόρης. Περιέχει φωτοαισθητήρες, τα κωνία και τα ραβδία, καθώς επίσης και πέντε τύπους νευρώνων.

Τα κωνία και τα ραβδία αντιδρούν στο φως με βραδείες, κλιμακωτές αλλαγές του δυναμικού της μεμβράνης τους. Τα ραβδία αντιδρούν αργά έτσι ώστε φωτόνια που απορροφώνται σε χρονικό διάστημα 100 ms, να αθροίζονται. Αυτό επιτρέπει την ανίχνευση ακόμα και πολύ μικρών ποσοτήτων φωτός. Γενικά τα ραβδία προσδιορίζουν την ένταση του φωτός, ενώ τα κωνία ανιχνεύουν το χρώμα. Ο αμφιβληστροειδής περιέχει 120 εκατομμύρια ραβδία και 6 εκατομμύρια κωνία.

Ο οφθαλμός ανιχνεύει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, με μήκη κύματος που ανήκουν στην ορατή περιοχή του φάσματος του φωτός. Στη συνέχεια, το συλλεγόμενο φως μετατρέπεται σε ηλεκτρικά σήματα τα οποία μεταδίδονται στον εγκέφαλο, ο οποίος κατόπιν τα μεταφράζει σε οπτικές εικόνες (Εικόνα 2.1).



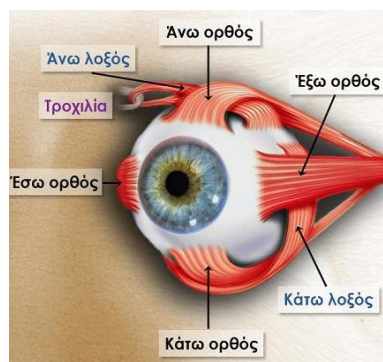
Εικόνα 2.1: Τα βασικά μέρη του οφθαλμού.

2.2.1 Εσωτερική δομή οφθαλμού

Κάθε μάτι αποτελείται από τον οφθαλμικό βολβό, που έχει περίπου σφαιρικό σχήμα, και βρίσκεται μέσα στον οφθαλμικό κόγχο. Ο οφθαλμικός κόγχος είναι μια κοιλότητα που σχηματίζουν τα οστά του κρανίου. Στο σχηματισμό της κοιλότητας αυτής συμμετέχουν αρκετά οστά, όπως η άνω γνάθος, το ζυγωματικό, το σφηνοειδές, το μετωπιαίο, το ηθμοειδές και το δακρυϊκό. Το μάτι προστατεύεται από τα βλέφαρα, το άνω και το κάτω. Κάθε οφθαλμικός βολβός είναι χονδρικά σφαιρικός, με διάμετρο περίπου 2,5 εκατοστά και βρίσκεται προφυλαγμένος

Το σύστημα της Όρασης

μέσα στον οφθαλμικό κόγχο, που σχηματίζουν τα οστά του κρανίου. Η ρύθμιση των κινήσεων του οφθαλμικού βολβού πραγματοποιείται με την βοήθεια των εξωβολβικών ή αλλιώς οφθαλμοκινητικών μυών (άνω ορθός, κάτω ορθός, έσω ορθός, έξω ορθός, άνω λοξός και κάτω λοξός). Οι έξι μύες, 4 ορθοί και 2 λοξοί, λειτουργούν ανά ζεύγη: ένα ζεύγος είναι αρμόδιο για την προς τα πάνω και προς τα κάτω κίνηση, ένα ζεύγος για την αριστερή και δεξιά κίνηση και ένα ζεύγος ελέγχει την περιστροφή (Εικόνα 2.2). Αυτοί ελέγχουν την κατεύθυνση του βλέμματός μας και λειτουργούν σε συνεργασία με τους οφθαλμοκινητικούς μύες του άλλου ματιού. Αν για κάποιο λόγο οι μύες των δύο ματιών δεν συνεργάζονται αρμονικά, τα μάτια μπορεί να μην εστιάζουν ταυτόχρονα στο ίδιο σημείο με αποτέλεσμα την εμφάνιση στραβισμού. Ο βολβός του ματιού αποτελείται από τρία στρώματα: τον σκληρό χιτώνα, τον χοριοειδή χιτώνα και τον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Ο σκληρός χιτώνας (ή το λευκό του ματιού) είναι ένα ανθεκτικό περίβλημα που περιβάλλει τον οφθαλμικό βολβό και διατηρεί το σχήμα του. Ο χοριοειδής χιτώνας, ο οποίος τροφοδοτεί το μάτι με τις απαραίτητες θρεπτικές ουσίες, καλύπτει εσωτερικά το σκληρό. Ο χιτώνας αυτός περιλαμβάνει τον κερατοειδή χιτώνα, τον κρυσταλλοειδή φακό και την ίριδα. Οι εισερχόμενες στο μάτι φωτεινές ακτίνες διαθλώνται αρχικά από τον κερατοειδή χιτώνα. Ο δακτύλιος των μυών της ίριδας ρυθμίζει το εύρος της κόρης για να επιτρέψει την είσοδο λιγότερων ή περισσότερων φωτεινών ακτίνων. Ο κρυσταλλοειδής φακός με την ελαστικότητα που τον διακρίνει μπορεί να αλλάζει σχήμα ώστε να εστιάζει τις φωτεινές ακτίνες και από κοντινά και από μακρινά αντικείμενα. Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας καλύπτει εσωτερικά τον χοριοειδή και περιέχει δύο ειδών φωτοευαίσθητα κύτταρα: τα ραβδία, τα οποία είναι υπεύθυνα για την όραση σε αμυδρά φωτιζόμενους χώρους και τα κωνία, τα οποία χρησιμεύουν για την όραση στο φως και την αντίληψη των χρωμάτων.



Εικόνα 2.2: Η περιστροφική κίνηση του οφθαλμού μέσω των οφθαλμικών μυών.

2.2.2 Αμφιβληστροειδής χιτώνας

Ο αμφιβληστροειδής είναι ένας χιτώνας που καλύπτει το πίσω μέρος του οφθαλμού. Είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό, το οποίο στη συνέχεια θα το επεξεργαστεί ο εγκέφαλος ώστε να μετατραπεί σε εικόνα. Τα κύτταρα που είναι υπεύθυνα για αυτή τη μετατροπή είναι οι φωτοϋποδοχείς. Το σήμα από τους φωτοϋποδοχείς μεταβιβάζεται στα γαγγλιακά κύτταρα μέσω των δίπολων κυττάρων και έτσι η πληροφορία φτάνει μέχρι το οπτικό νεύρο και από εκεί στον εγκέφαλο. Ο βολβός του ματιού έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε το φως να φτάνει στον αμφιβληστροειδή με την ελάχιστη δυνατή παραμόρφωση. Ο αμφιβληστροειδής απορροφά το φως που φτάνει σε αυτόν με τους φωτοϋποδοχείς. Υπάρχουν δύο τύποι υποδοχέων, τα ραβδία ή ραβδιοφόρα κύτταρα και τα κωνία ή κωνιοφόρα κύτταρα, τα οποία, όπως και ο υπόλοιπος αμφιβληστροειδής έχουν νευρική προέλευση, καθώς αναπτύσσονται από το νευρικό εξώδερμα. Όμως, σε αντίθεση με τον εγκέφαλο αυτό κάθε αυτό, ο αμφιβληστροειδής έχει απλούστερη στιβαδωτή δομή, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για μελέτες σχετικά με τον τρόπο που γίνεται η επεξεργασία πληροφοριών από νευρωνικά κυκλώματα.

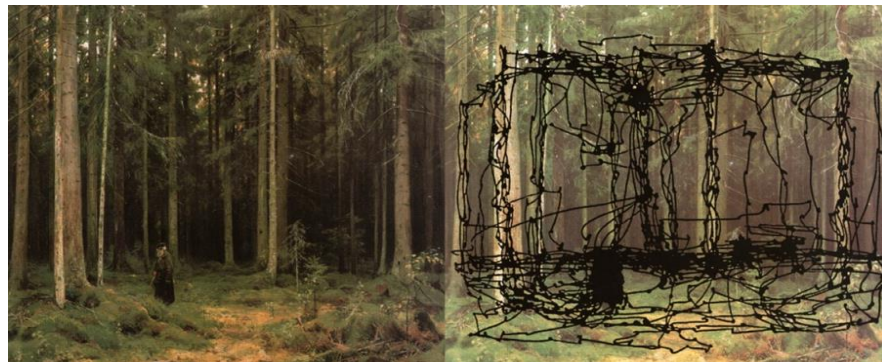
2.2.3 Οπτικό νεύρο και οπτικός φλοιός

Οι νευρικές ώσεις από όλα τα κύτταρα (φωτοϋποδοχείς) του κάθε αμφιβληστροειδή μεταδίδονται μέσω των οπτικών νεύρων. Οι νευρικές ώσεις και από τα δύο μάτια φθάνουν σε μία περιοχή στο οπίσθιο τμήμα του εγκεφάλου, τον ινιακό λοβό, όπου εντοπίζεται το κέντρο της όρασης. Εκεί συνενώνονται, γίνεται η ανόρθωση της εικόνας και επιτυγχάνεται έτσι η πλήρης αντίληψη του οπτικού πεδίου. Ο οπτικός φλοιός, επομένως, που βρίσκεται στον εγκέφαλο, λαμβάνει τα νευρικά ερεθίσματα, εκεί όπου τα μηνύματα ενοποιούνται από τα δύο μάτια σε μια πλήρη εικόνα και μεταφράζονται σε μεγέθη, μορφές, αντικείμενα και χρώματα.

Κάθε ένας από τους δύο οφθαλμούς έχει τη δυνατότητα παρατήρησης αντικειμένων που βρίσκονται σε ένα αρκετά μεγάλο οπτικό πεδίο. Ο συνδυασμός και των δύο οφθαλμών του οπτικού συστήματος, μας παρέχει μια καλή αντίληψη του βάθους και βοηθάει στην ανάπλαση της τρισδιάστατης απεικόνισης. Βέβαια, ακόμα και στην περίπτωση της μονό-οφθαλμικής παρατήρησης, η όραση είναι επαρκής για τις περισσότερες από τις ανθρώπινες ανάγκες.

2.3 Οφθαλμικές Κινήσεις

Οι οφθαλμικές κινήσεις είναι χρήσιμες για την εξερεύνηση του εξωτερικού κόσμου καθώς χάρη σε αυτές ο οπτικός άξονας προσανατολίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα είδωλα των αντικειμένων του ενδιαφέροντός μας να μεταφερθούν στο κεντρικό βοθρίο όπου μπορούν να αναλυθούν πλήρως. Η όραση είναι μια ενεργητική διαδικασία κατά την οποία οι οφθαλμικές κινήσεις μετακινούν το βλέμμα πολλές φορές το δευτερόλεπτο σε επιλεγμένα σημεία της εικόνας με σκοπό τη διερεύνηση των ενδιαφερόντων χαρακτηριστικών. Μας επιτρέπει να συγκεντρώνουμε περιοδικά την προσοχή μας στα σημεία της εικόνας που περιέχουν την πιο σημαντική πληροφορία. Επιπλέον, οι οφθαλμικές κινήσεις αποκαλύπτουν κατά κάποιο τρόπο τη στρατηγική που ακολουθεί ο παρατηρητής κατά τη διερεύνηση μιας οπτικής σκηνής (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3: Διερεύνηση εικόνας με τη βοήθεια σακκαδικών κινήσεων. Οι οφθαλμοί κινούνται συνεχώς και συγκεντρώνουν την προσοχή (μαύρες κουκίδες) σε περιοχές ενδιαφέροντος.

Το μάτι μπορεί να δώσει δύο γενικούς τύπους αντίδρασης στα ερεθίσματα. Ο πρώτος είναι αυτός όπου τα μάτια δεν κινούνται, δηλαδή οι βλεφαρισμοί, η προσαρμογή του φακού και οι αποκρίσεις του επιθηλίου του οφθαλμού, ενώ ο δεύτερος είναι αποκρίσεις όπου το μάτι κινείται, δηλαδή σακκαδικές, ομαλές κινήσεις παρακολούθησης, νυσταγμός κ.λ.π.. Το σύστημα παρατήρησης που είναι υπεύθυνο για τον εντοπισμό και τη διατήρηση των εικόνων στο κεντρικό βοθρίο χωρίζεται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Σύστημα προσήλωσης (Fixation system)
2. Οφθαλμοκινητικό σύστημα (Oculomotor system)
3. Σύστημα κίνησης κεφαλιού (Head motor system)

2.3.1 Το Σύστημα Προσήλωσης (Fixation System)

Το σύστημα σταθεροποίησης προσδιορίζεται από τις οφθαλμικές κινήσεις προσήλωσης. Το οπτικό μας σύστημα ελέγχεται από τους νευρώνες, η λειτουργία των οποίων αποτελεί τη βάση κάθε οπτικής επεξεργασίας. Οι σταθερές φωτεινές εντάσεις παράγουν αδύναμες νευρωνικές αποκρίσεις, ενώ οι απότομες αλλαγές των φωτεινών εντάσεων στον χώρο και στον χρόνο προκαλούν ισχυρές νευρωνικές αποκρίσεις (Kuffler, 1952). Το αποτέλεσμα πρακτικά είναι τα σταθερά χαρακτηριστικά να εξασθενούν και τελικά να χάνονται από την οπτική μας αντίληψη.

Στο σύστημα προσήλωσης έχουν παρατηρηθεί επίσης τρία είδη κινήσεων: το τρέμουλο (ή φυσιολογικός νυσταγμός) (tremor), οι κινήσεις διολίσθησης (drifts) και οι μικροσακκαδικές κινήσεις (microsaccades) (Yarbus, 1967). Ο ρόλος των οφθαλμικών κινήσεων κατά την διάρκεια της προσήλωσης σε ένα στόχο, αλλά και κατά την διάρκεια που διερευνούμε το οπτικό μας περιβάλλον, είναι πολύ σημαντικός για τη λειτουργικότητα της όρασης. Ένα κρίσιμο ερώτημα το οποίο παραμένει αναπάντητο είναι ποιος είναι ο ακριβής λόγος συνύπαρξης των τριών αυτών διαφορετικών οφθαλμικών κινήσεων προσήλωσης.

Τα υποδεκτικά πεδία στην περιοχή του βοθριού είναι τόσο μικρά ώστε οι κινήσεις διολίσθησης και το τρέμουλο να μπορούν να εξαλείφουν την αδρανοποίηση των νευρώνων ακόμα και κατά την απουσία των μικροσακκαδικών κινήσεων. Επίσης, οι μικροσακκαδικές κινήσεις είναι επαρκείς για την υποστήριξη της όρασης ακόμα και κατά την απουσία αυτών των κινήσεων γιατί τα υποδεκτικά πεδία στην περιφέρεια είναι τόσο μεγάλα, ώστε μόνο οι μικροσακκαδικές κινήσεις είναι αρκετά μεγάλες και γρήγορες για να εμποδίσουν την νευρωνική αδρανοποίηση. Αδιευκρίνιστο επίσης παραμένει και το αν διαφέρει ο ρόλος των μικροσακκαδικών κινήσεων από αυτόν των κινήσεων διολίσθησης και του τρέμουλου (όπως παριγράφονται στην συνέχεια). Το πιο πιθανό είναι ότι οι μικροσακκαδικές κινήσεις είναι περισσότερο σημαντικές για την περιφεριακή όραση και οι κινήσεις διολίσθησης και το τρέμουλο περισσότερο σημαντικές για την κεντρική όραση. Όσον αφορά στη συνήθη κατεύθυνση των μικροσακκαδικών και των κινήσεων διολίσθησης έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα ατομικό χαρακτηριστικό που μπορεί να εξαρτάται από τις οπτικές εκτροπές, τον προσανατολισμό των νευρώνων ή την αστάθεια των οφθαλμοκινητικών μυών.

Οι οφθαλμικές κινήσεις κατά τη διάρκεια της προσήλωσης είναι συνεπώς απαραίτητες, για να ξεπεραστεί η αδυναμία της οπτικής αντίληψης λόγω αδράνειας των αμφιβληστροειδών

νευρώνων, ακόμη και αν αυτό σημαίνει ενδεχόμενη μείωση της οπτικής οξύτητας (Yarbus, 1967). Ο σκοπός των οφθαλμοκινητικών μηχανισμών προσήλωσης δεν είναι η αμφιβληστροειδή σταθεροποίηση, αλλά η ελεγχόμενη μετακίνηση του αμφιβληστροειδούς ειδώλου, ώστε να είναι τελικά κατάλληλο για οπτική επεξεργασία.

Οι οφθαλμοί μας κινούνται συνεχώς, ακόμα και όταν προσηλώνουμε το βλέμμα μας σε κάποιο αντικείμενο. Τις οφθαλμοκινήσεις αυτές δεν τις αντιλαμβανόμαστε, ενώ το πλάτος τους είναι αρκετό για να είναι ορατές, ενώ αν δεν υπήρχαν, η οπτική μας αντίληψη θα χανόταν τελείως, ως αποτέλεσμα της νευρωνικής προσαρμογής (Martinez-Conde S. M., 2004). Παρακάτω θα περιγραφούν τα τρία είδη κινήσεων προσήλωσης που γνωρίζουμε: τρέμουλο ή φυσιολογικός νυσταγμός, κινήσεις διολίσθησης και μικροσακκαδικές κινήσεις.

2.3.2 Τρέμουλο ή Φυσιολογικός Νυσταγμός (Tremor)

Το τρέμουλο είναι ακούσιες, μη συζυγείς, απεριοδικές και κυματοειδείς κινήσεις των οφθαλμών και έχουν το μικρότερο πλάτος από όλες τις οφθαλμικές κινήσεις. Το πλάτος τους δεν ξεπερνά τη διάμετρο ενός κωνίου στην περιοχή του βοθρίου (fovea), δηλαδή περίπου $2.5\mu\text{m}$ ή 0.5arcmin (αντιστοιχία σε γωνία όρασης). Αποκαλούνται και φυσιολογικός νυσταγμός, έχουν συχνότητα περίπου 90Hz και ταχύτητα μικρότερη από 20arcmin/sec (Martinez-Conde S. M., 2004). Τα πλάτη και οι συχνότητές τους είναι συνήθως στο εύρος του θορύβου του συστήματος καταγραφής και για το λόγο αυτό είναι αρκετά δύσκολη η ακριβής καταγραφή τους.

Οι κινήσεις τρέμουλο δεν γίνονται αντιληπτές, επειδή η συχνότητά τους είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη διακριτική χρονική ικανότητα του ανθρώπου, άρα δεν έχουν ορατά αποτελέσματα (H.J.M. Gerrits, 1970). Είναι σημαντικό το ότι, παρόλο το μικρό τους μέγεθος, είναι ικανές να διατηρήσουν τους νευρώνες σε λειτουργία. Παρόλα αυτά ο ρόλος τους στην υποστήριξη της όρασης δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί. Επιπλέον οι κινήσεις τρέμουλο συμβαίνουν ανεξάρτητα στους δύο οφθαλμούς, κάτι που ίσως δημιουργεί ένα όριο στη στερεοσκοπική μας όραση (Skavenski, 1979).

2.3.3 Κινήσεις Διολίσθησης (Drifts)

Οι κινήσεις διολίσθησης είναι αργές καμπυλοειδείς κινήσεις των οφθαλμών, που συμβαίνουν ταυτόχρονα με τις κινήσεις τρέμουλο στο χρονικό διάστημα μεταξύ των μικροσακκαδικών κινήσεων, για λόγους διατήρησης της προσήλωσης. Είναι ακούσιες κινήσεις

και έχουν καταγραφεί και ως συζυγείς και ως μη συζυγείς. Συμβαίνουν περίπου κατά το 95% - 97% του χρόνου προσήλωσης και η ταχύτητά τους δεν ξεπερνά τα 30 arcmins/sec (Martinez-Conde S. M., 2004).

Κατά τη διάρκειά τους το είδωλο μετατοπίζεται για 5-15 φωτοϋποδοχείς, δηλαδή για 2,5arcmins – 7,5arcmins (12,5μm – 37,5μm) και για το λόγο αυτό αρχικά η ύπαρξή τους είχε αποδοθεί στην αστάθεια των οφθαλμοκινητικών μυών. Πρόσφατες έρευνες, όμως, έχουν δείξει πως ο ρόλος τους είναι η διατήρηση της προσήλωσης και είναι αντισταθμιστικός ως προς το ρόλο των μικροσακκαδικών κινήσεων, σε διαστήματα όπου οι τελευταίες απουσιάζουν ή σε διαστήματα όπου η αντιστάθμισή τους δεν είναι επαρκής((Sprauschus, 1999), (F. Møller, 2002)).

2.3.4 Μικροσακκαδικές (Microsaccades)

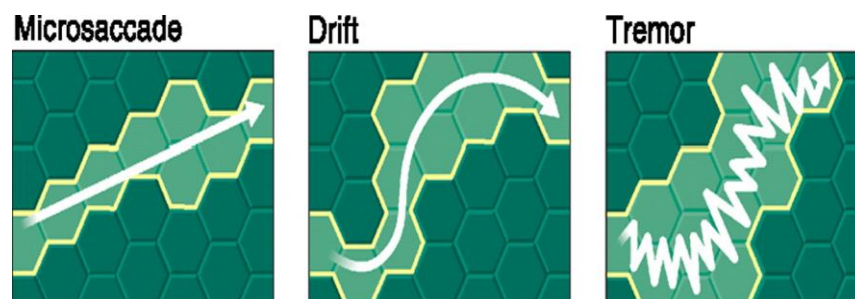
Οι μικροσακκαδικές αποτελούν τις γρηγορότερες και μεγαλύτερες σε εύρος από τις οφθαλμικές κινήσεις προσήλωσης. Είναι μικρές, απότομες, συζυγείς και ακούσιες κινήσεις, συμβαίνουν στη διάρκεια της προσήλωσης και μεταφέρουν το αμφιβληστροειδικό είδωλο δια μέσω μερικών δεκάδων φωτοϋποδοχέων. Το πλάτος τους κυμαίνεται μεταξύ 5 arcmin - 120 arcmin (25 μm - 100 μm) και η ταχύτητά τους είναι μεγαλύτερη από 10⁰/sec. Η συχνότητά τους είναι από 0,1 Hz – 5,0 Hz, ενώ διαρκούν περίπου 25 msec (Ditchburn, 1980). Οι μικροσακκαδικές κινήσεις δεν μπορούν να προσδιοριστούν μόνο από το μέγεθός τους καθώς το πλάτος των εκούσιων σακκαδικών κινήσεων μπορεί να είναι το ίδιο μικρό. Για το λόγο αυτό καθοριστικά για τον προσδιορισμό τους είναι η ταχύτητα και η επιτάχυνσή τους. Μικροσακκαδικές κινήσεις έχουν παρατηρηθεί και σε διάφορα άλλα είδη εκτός του ανθρώπου και κυρίως σε είδη με φοβική όραση (foveal vision).

Ένας από τους πιθανότερους ρόλους των μικροσακκαδικών κινήσεων είναι η αντιστάθμιση των μετατοπίσεων των οφθαλμών, που παράγονται από τις κινήσεις διολίσθησης (drifts) (Cornsweet, 1956). Η πραγματοποίηση, η κατεύθυνση και το πλάτος των μικροσακκαδικών σχετίζεται με προηγούμενες μετατοπίσεις του ειδώλου στον αμφιβληστροειδή, δηλαδή οι μικροσακκαδικές κινήσεις τείνουν να επαναφέρουν το είδωλο στην αρχική του θέση στην περιοχή του κεντρικού βοθρίου, του αμφιβληστροειδή. Επιπλέον παίζουν σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη της όρασης, αντιδρώντας στη νευρωνική προσαρμογή και αδρανοποίηση ((R.W. Ditchburn, 1959), (F. Møller, 2002)). Βοηθούν στην εξισορρόπηση της

νευρωνικής προσαρμογής σε μικρή κλίμακα χρόνου και στη διόρθωση των σφαλμάτων προσήλωσης σε πιο ευρεία κλίμακα χρόνου (Engbert & Kliegl, 2003).

Η σχέση της ταχύτητας των μικροσακκαδικών με το πλάτος τους είναι γραμμική, κατά αντιστοιχία με τις σακκαδικές κινήσεις. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί πως ίσως οι μικροσακκαδικές και οι σακκαδικές κινήσεις να ελέγχονται από τα ίδια κέντρα του εγκεφάλου (Yarbus, 1967). Όσον αφορά στην κατευθυντικότητα των μικροσακκαδικών κινήσεων (αλλά και των κινήσεων διολίσθησης), έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει κάποια επιλεκτικότητα, τόσο στις οριζόντιες όσο και στις κατακόρυφες κατευθύνσεις. Παράγοντες όπως η παρουσία αστιγματισμού, οι οπτικές εκτροπές υψηλής τάξης αλλά και η αστάθεια των οφθαλμοκινητικών μυών, πιθανότατα να την επηρεάζουν.

Παρά το γεγονός ότι οι μικροσακκαδικές είναι ακούσιες κινήσεις, έχει παρατηρηθεί πως μπορούν να κατασταλούν εκούσια από έμπειρους παρατηρητές για μερικά δευτερόλεπτα χωρίς την απώλεια της οπτικής αντίληψης του στόχου (Sprauschus, 1999), ενώ συμβαίνει συχνά και κατά την πραγματοποίηση εργασιών που απαιτούν πολύ προσεκτική προσήλωση. Φυσικά η παρατήρηση αυτή δεν αναιρεί το θεμελιώδη ρόλο των μικροσακκαδικών κινήσεων στη λειτουργικότητα της όρασης (Ditchburn, 1980). Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζονται οι μικροσακκαδικές, οι κινήσεις διολίσθησης και το τρέμουλο όπως αυτές καταγράφονται.



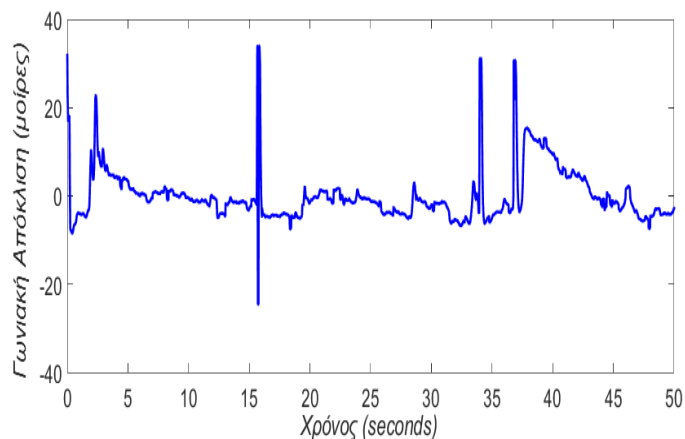
Εικόνα 2.4: Παρουσίαση των μικροσακκαδικών, της κίνησης διολίσθησης και του φυσιολογικού νυσταγμού.

2.3.5 Βλεφαρισμοί Των Οφθαλμών

Το βλεφάρισμα είναι η γνωστή κίνηση γρήγορου ανοιγο-κλεισίματος των βλεφάρων. Μια νέα μελέτη ειδικών του Πανεπιστημίου της Οσάκα στην Ιαπωνία έχει δείξει ότι ο ανθρώπινος εγκέφαλος εκμεταλλεύεται αυτόν τον ελάχιστο χρόνο του ανοιγο-κλεισίματος των

βλεφάρων για να ξεκουραστεί. Οι περισσότεροι άνθρωποι έχουν περίπου 15 - 20 τέτοιες στιγμές ξεκούρασης του εγκεφάλου τους ανά λεπτό. Αυτή η πνευματική ξεκούραση μπορεί να διαρκέσει από ένα έως και μερικά δευτερόλεπτα προτού αποκατασταθεί πλήρως η προσοχή του ατόμου. Τα αποτελέσματα προέκυψαν μετά από διεξαγωγή απεικονιστικών εξετάσεων σε 20 υγιείς νεαρούς εθελοντές, στη διάρκεια των οποίων οι ερευνητές παρατήρησαν πως όταν οι εθελοντές έκλειναν στιγμιαία τα μάτια τους οι περιοχές του εγκεφάλου που συνδέονται με την προσοχή έβγαιναν παροδικά εκτός λειτουργίας (Denney & Denney, 1984).

Τα σήματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης ήταν σήματα γωνιακής απόκλισης των οφθαλμών και σήματα γωνιακής ταχύτητας των οφθαλμών. Στα σήματα αυτά καταγράφηκαν και βλεφαρισμοί, όπως είναι φυσιολογικό, οι οποίοι έχουν χαρακτηριστικά υψηλή ταχύτητα (υψηλότερη της ταχύτητας των σακκαδικών), ενώ η διάρκειά τους είναι μικρότερη από αυτή των σακκαδικών κινήσεων των οφθαλμών. Με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατός και ο διαχωρισμός τους (Εικόνα 2.5).



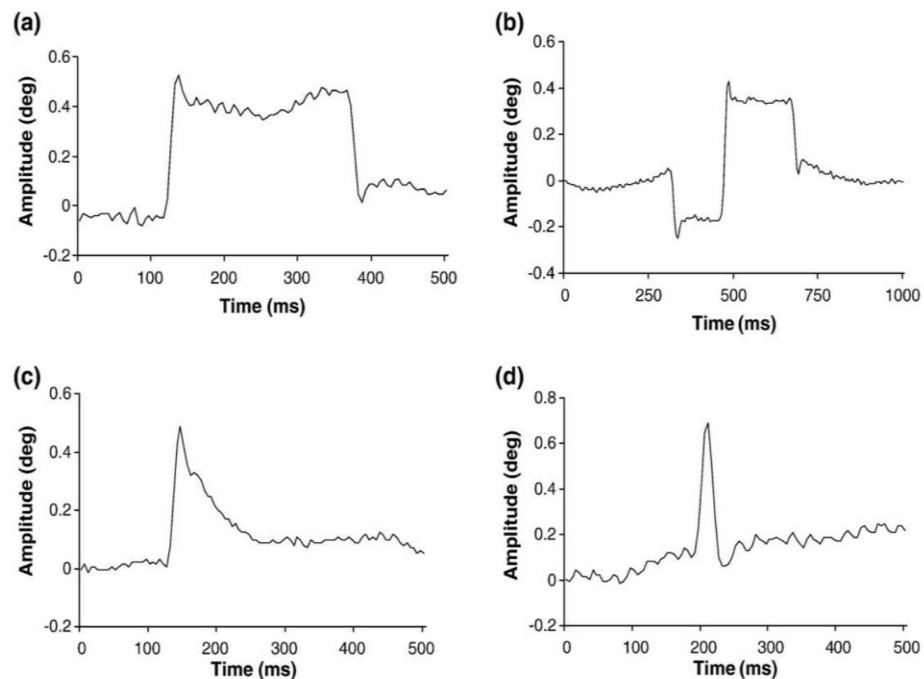
Εικόνα 2.5: Ο βλεφαρισμός παρουσιάζει μεγαλύτερη γωνιακή απόκλιση από μία σακκαδική.

2.3.6 Σακκαδικές Παρεμβολές

Οι σακκαδικές παρεμβολές αποτελούν ένα άλλο είδος ακούσιων κινήσεων, πρόσφατα τεκμηριωμένες, που συμβαίνουν παράλληλα με τις οφθαλμικές κινήσεις προσήλωσης. Οι σακκαδικές παρεμβολές έχουν μέγεθος 3 με 4 φορές μεγαλύτερο από των σακκαδικών (Abadi & Gowen, 2004). Οι φυσιολογικές σακκαδικές παρεμβολές διακρίνονται σε: μονοφασικές

(Monophasic square-wave intrusions- MSWI), διφασικές (biphasic square-wave intrusions- BSWI), ενός παλμού (Single Saccadic Pulses- SSP) και διπλού παλμού (double Saccadic Pulses- DSP). Το πλάτος, η διάρκεια και η συχνότητα διαφέρουν για κάθε κατηγορία. Οι οφθαλμικές κινήσεις προσήλωσης διακόπτονται συχνά από square-wave jerks. Η διάρκεια μιας MSWI μπορεί να είναι από 20 msec μέχρι 870 msec και μιας BSWI από 20msec μέχρι 130msec (Abadi & Gowen , 2004).

Γενικά μπορούμε να πούμε ότι οι MSWI και BSWI έχουν τη μορφή τετραγωνικού παλμού και λέμε ότι είναι square - wave jerks, οι δύο άλλες κατηγορίες έχουν τη μορφή κορυφών στο σήμα. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις ο οφθαλμός μένει ακίνητος για ένα χρονικό διάστημα πριν επιστρέψει στο σημείο προσήλωσης, ενώ στις δύο επόμενες ο οφθαλμός είτε επιστρέφει με μια αργή κίνηση διολίσθησης (SSP), είτε επιστρέφει αμέσως με μία δεύτερη σακκαδική (DSP) (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Τέσσερις τύποι σακκαδικών παρεμβολών: (a) μονοφασικές (MSWI), (b) διφασικές (BSWI), (c) ενός παλμού (SSP), (d) διπλού παλμού (DSP).

2.3.7 Οπτικοκινητικός νυσταγμός (optokinetic nystagmus)

Ο οπτικοκινητικός νυσταγμός αποτελεί συζυγή κίνηση του ματιού η οποία διακρίνεται από χρονικές σειρές οι οποίες παρουσιάζονται οδοντωτές. Χαρακτηρίζεται και ως νυσταγμός

τρένου (train nystagmus) και είναι ένα είδος ομαλής κίνησης παρακολούθησης που προκαλείται από ένα κινούμενο οπτικό πεδίο το οποίο περιέχει επαναλαμβανόμενα σχέδια. Χαρακτηρίζεται από μια αργή φάση στην οποία το μάτι προσηλώνεται σε ένα τμήμα του κινούμενου οπτικού πεδίου και το παρακολουθεί με ομαλές κινήσεις παρακολούθησης, καθώς και από μια γρήγορη φάση στην οποία μεταπηδά με μια σακκαδική κίνηση σε ένα άλλο τμήμα του οπτικού πεδίου. Ο ελάχιστος χρόνος μεταξύ των δύο φάσεων ανέρχεται σε 0,2 sec με μέγιστη συχνότητα τα 5 Hz. Το γωνιακό πλάτος των κινήσεων αυτών κυμαίνεται από 10 έως 100 (Laurence R. Young, 1975). Παρόμοια κίνηση αποτελεί και ο διαδρομικός νυσταγμός, η οποία χαρακτηρίζεται από αργή και γρήγορη φάση. Τέλος, ο αυθόρμητος νυσταγμός (spontaneous-gaze nystagmus) αποτελεί μια ανώμαλη μορφή νυσταγμού με νευρολογικές διαταραχές. Μπορεί να παρατηρηθεί είτε απευθείας, όταν η κίνηση είναι αρκετά μεγάλη, ή με τη βοήθεια μηχανισμού καταγραφής.

2.3.8 Περιστροφικές κινήσεις (torsional movements)

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει περιστροφικές κινήσεις του ματιού, της γραμμής του βλέμματος. Περιορίζονται σε γωνίες μικρότερες των 10°. Οι κινήσεις αυτές μπορεί να διεγείρονται από περιστροφικό οπτικοκινητικό νυσταγμό. Ο παράγοντας της περιστροφής παρουσιάζεται λόγω της περιστροφής της κεφαλής και είναι παρόμοιος με οριζόντιο και κατακόρυφο διαδρομικό νυσταγμό (Laurence R. Young, 1975).

2.4 Το Οφθαλμοκινητικό Σύστημα

Ο ρόλος του οφθαλμοκινητικού συστήματος είναι να διατηρεί το είδωλο του αντικειμένου-στόχου στο κεντρικό βοθρίο και συνεπώς υποστηρίζει την παρατήρηση ακίνητων και κινούμενων στόχων. Αυτό επιτυγχάνεται με τριών ειδών κινήσεις:

- (α) τις σακκαδικές κινήσεις (saccades),
- (β) τις ομαλές κινήσεις παρακολούθησης (smooth pursuit movements) και
- (γ) τις κινήσεις σύγκλισης / απόκλισης (vergence eye movements).

2.4.1 Σακκαδικές Κινήσεις (Saccades)

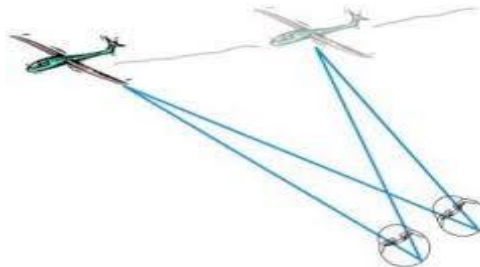
Από τις οφθαλμικές κινήσεις του οφθαλμοκινητικού συστήματος, οι σακκαδικές έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη συγκεκριμένη μελέτη αλλά και συνολικά για τη νευροφυσιολογία. Με τις σακκαδικές κινήσεις μεταφέρουμε το σημείο του ενδιαφέροντός μας στο κεντρικό βοθρίο

ή σαρώνουμε μία εικόνα. Είναι οι πιο γρήγορες κινήσεις του ανθρώπινου οφθαλμού (~700°/sec) και είναι πολύ σύντομες (~50 msec). Το πλάτος τους κυμαίνεται από 1° – 20° και η κατεύθυνσή τους είναι εκούσια, ενώ η ταχύτητά τους είναι ακούσια και καθορίζεται από την εκκεντρότητα του στόχου (όσο αυξάνεται η εκκεντρότητα του στόχου άρα και το πλάτος της σακκαδικής τόσο αυξάνεται και η ταχύτητά της). Επιπλέον, η εκκεντρότητα και η προβλεψιμότητα του στόχου καθορίζει και την καθυστέρηση της απόκρισής τους. Τέλος, μπορούν να πραγματοποιηθούν και χωρίς την ύπαρξη στόχου, ακόμα δηλαδή και σε σκοτοπικές συνθήκες.

Επιπλέον, οι σακκαδικές κατηγοριοποιούνται ως μεγάλες ή μικρές με βάση το πλάτος τους, συγκεκριμένα οι μεγάλες σακκαδικές είναι εμφανής με γυμνό μάτι ενώ οι μικρές σακκαδικές είναι αδύνατον να ανιχνευθούν χωρίς τη χρήση ειδικών μηχανημάτων (Collewijn & Kowler, 2008).

2.4.2 Ομαλές Κινήσεις Παρακολούθησης (Smooth Pursuit Movements)

Οι ομαλές κινήσεις παρακολούθησης είναι κινήσεις με τις οποίες μπορούμε να παρακολουθήσουμε ένα αντικείμενο που κινείται στο οπτικό μας πεδίο. Η μέγιστη ταχύτητά τους είναι περίπου 100°/sec (πολύ μικρότερη από αυτή των σακκαδικών) και εξαρτάται από την ταχύτητα του κινούμενου αντικειμένου. Η προβλεψιμότητα της κίνησης του αντικειμένου (κατεύθυνση και στιγμή έναρξης) καθορίζει και την ταχύτητα απόκρισής τους (Εικόνα 2.7).

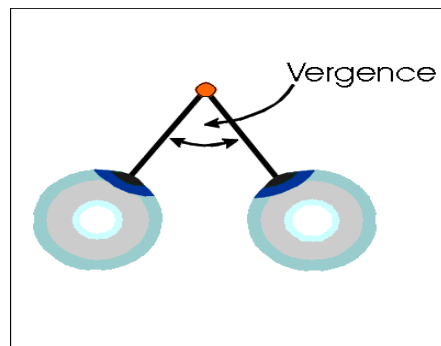


Εικόνα 2.7: Ομαλή κίνηση παρακολούθησης.

2.4.3 Κινήσεις Σύγκλισης-Απόκλισης (Vergence Eye Movements)

Είναι μη συζυγείς οφθαλμικές κινήσεις κατά τις οποίες τα μάτια είτε συγκλίνουν, κατά την διάρκεια της προσαρμογής, είτε αποκλίνουν και συμβαίνουν όταν ένα αντικείμενο-στόχος

πλησιάζει ή απομακρύνεται αντίστοιχα. Εξαρτώνται από το βαθμό ανομοιότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου. Ανομοιότητα του αμφιβληστροειδή (retina disparity) ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο το είδωλο του αντικειμένου-στόχου προβάλλεται σε διαφορετικές περιοχές του αμφιβληστροειδή σε κάθε μάτι. Η σχετική αυτή κίνηση των ματιών αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία απαιτεί ανώτερη επεξεργασία στον εγκεφαλικό φλοιό και για αυτό παρατηρείται καθυστέρηση στην απόκριση κίνησης (Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Παρουσίαση των κινήσεων σύγκλισης- απόκλισης.

2.5 Το σύστημα σταθεροποίησης

Το σύστημα σταθεροποίησης προσδιορίζεται από τις οφθαλμικές κινήσεις που λαμβάνουν μέρος κατά την διάρκεια προσήλωσης σε ένα σταθερό σημείο. Είναι υπεύθυνο για την ύπαρξη τριών ειδών κινήσεων, α) τις τρέμουλο κινήσεις, β) τις κινήσεις διολίσθησης και γ) τις μικροσακκαδικές κινήσεις.

1. Το τρέμουλο (tremors) ή διαφορετικά φυσιολογικός νυσταγμός είναι μια σειρά ταλαντευτικών κινήσεων που κρατούν τους νευρώνες σε συνεχή λειτουργία. Πρόκειται για απεριοδικές κυματοειδείς κινήσεις με συχνότητα περίπου 90Hz. Είναι οι μικρότερες οφθαλμικές κινήσεις, με πλάτος που είναι περίπου ίσο με τη διάμετρο του κωνίου στην περιοχή του βοθρίου. Η καταγραφή του τρέμουλου είναι δύσκολη, ενώ η συγκεκριμένη κίνηση διαφέρει για τα δύο μάτια.

2. Οι κινήσεις διολίσθησης (drifts) είναι καμπυλοειδείς κινήσεις που πραγματοποιούνται ταυτόχρονα με το τρέμουλο και μεταξύ των μικροσακκαδικών κινήσεων. Με την πραγματοποίηση των κινήσεων διολίσθησης, το είδωλο του αντικειμένου κινείται δια μέσου

των φωτοϋποδοχέων. Οι κινήσεις διολίσθησης έχουν καταγραφεί ως συζυγείς και ως μη-συζυγείς κινήσεις.

3. Οι μικροσακκαδικές κινήσεις (microsaccades) είναι απότομες κινήσεις που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της προσήλωσης και μεταφέρουν το είδωλο στο βοθρίο μετά την απομάκρυνση του λόγω των κινήσεων διολίσθησης.

2.6 Το σύστημα κίνησης του κεφαλιού

Το οφθαλμοκινητικό σύστημα και το σύστημα σταθεροποίησης συνδέονται άμεσα με το σύστημα κίνησης του κεφαλιού. Εξαιτίας της συνεχούς ακούσιας και εκούσιας κίνησης του κεφαλιού, το πλάτος και η κατεύθυνση των οφθαλμικών κινήσεων επηρεάζεται από το μέγεθος της κίνησης του. Παλαιότερες έρευνες έχουν δείξει ότι η κίνηση του κεφαλιού έχει βοηθητικό ρόλο στην διαδικασία αποφυγής της οπτικής νευρωνικής προσαρμογής. Έτσι τα χαρακτηριστικά (μέγεθος, ταχύτητα, κατεύθυνση και συχνότητα) των οφθαλμικών κινήσεων σε συνθήκες όπου το κεφάλι είναι σταθεροποιημένο διαφέρουν σε συνθήκες όπου το κεφάλι είναι ελεύθερο. Το σύστημα κίνησης του κεφαλιού ελέγχεται από δυο ειδών αντανακλαστικές κινήσεις (reflex). Το vestibular – ocular reflex και το optokinetic reflex.

2.6.1 Αιθουσιαίο-οπτικό αντανακλαστικό (Vestibular– Ocular reflex)

Είναι η πιο αρχέγονη αντανακλαστική κίνηση ελέγχου της προσήλωσης του βλέμματος. Καθοδηγείται από ένα μηχανισμό στο εσωτερικό του αυτιού (vestibular μηχανισμός) ο οποίος αποτελείται από τρεις ημικυκλικούς σωλήνες με υγρό οι οποίοι παρέχουν στον εγκέφαλο πληροφορίες για την θέση του σώματος και του κεφαλιού στο χώρο. Ο μηχανισμός αυτός λειτουργεί έτσι ώστε να διατηρούμε το είδωλο μιας εικόνας στη fovea ακόμα και όταν το κεφάλι ή το σώμα κινούνται. Ουσιαστικά τα μάτια στρέφονται σε αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με το κεφάλι ώστε να προσηλώνουν σε κάποιο σταθερό σημείο.

2.6.2 Οπτικοκινητικό αντανακλαστικό (Optokinetic reflex)

Αποτελείται από εναλλακτικές σακκαδικές κινήσεις και ομαλές κινήσεις παρακολούθησης, αντίθετης κατεύθυνσης, οι οποίες λαμβάνουν χώρα όταν προσπαθούμε να προσηλώσουμε σε διαδοχικά περάσματα κινούμενων αντικειμένων (π.χ. όταν προσπαθούμε να παρακολουθήσουμε διαδοχικά περάσματα αυτοκινήτων που περνάνε από μπροστά μας). Οι

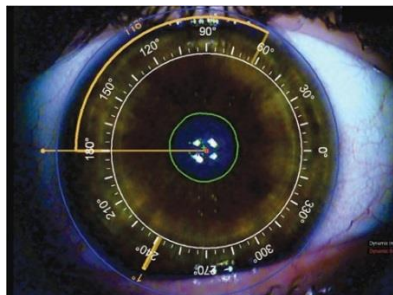
εναλλακτικές αυτές smooth pursuit (slow phase) και σακκαδικές (fast phase) κινήσεις συνθέτουν τον λεγόμενο οπτικοκινητικό νυσταγμό (ΟΚΝ).

2.7 Καταγραφή οφθαλμικών κινήσεων - Τεχνικές που βασίζονται σε ανακλώμενες ακτίνες

Ο βασικός στόχος που επιτεύχθηκε με τις πρώτες τεχνικές καταγραφής οφθαλμικών κινήσεων ήταν απλά η συνεισφορά στην έρευνα για τη συλλογή δεδομένων της συμπεριφοράς του οφθαλμοκινητικού συστήματος του ανθρώπου. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών, ιδανικών για πιο ακριβή καταγραφή των οφθαλμικών κινήσεων.

2.7.1 Καταγραφή της κίνησης του σκληροκερατοειδικού ορίου (limbus tracking)

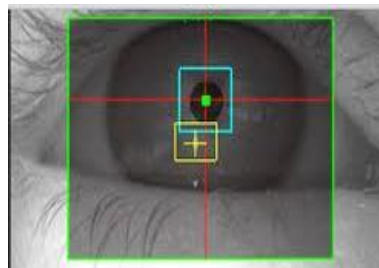
Εξαιτίας του γεγονότος ότι το σκληροκερατοειδικό όριο (limbus) είναι οπτικά ανιχνεύσιμο (ο σκληρός χιτώνας είναι άσπρος ενώ η ίριδα σκουρόχρωμη) η κίνηση του μπορεί εύκολα να καταγραφεί. Λόγω του ότι αυτή η τεχνική βασίζεται στη καταγραφή της θέσης του limbus σε σχέση με το κεφάλι πρέπει ή το κεφάλι να είναι κάπου σταθεροποιημένο ή ο μηχανισμός καταγραφής να είναι σταθεροποιημένος στο κεφάλι του εξεταζομένου. Επίσης εξαιτίας της μερικής κάλυψης του limbus από τα βλέφαρα αυτή η τεχνική είναι κατάλληλη για καταγραφή οριζοντίων κινήσεων μόνο (Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9: Καταγραφή της κίνησης του σκληροκερατοειδικού ορίου.

2.7.2 Καταγραφή της κίνησης του ορίου ίριδας – κόρης (pupil tracking)

Η τεχνική αυτή είναι παρόμοια με την προηγούμενη μόνο που εδώ χρησιμοποιείται το όριο μεταξύ κόρης και ίριδας. Και σε αυτή την τεχνική ο μηχανισμός καταγραφής πρέπει να σταθεροποιείται στο κεφάλι του εξεταζομένου. Τα πλεονεκτήματα σε σχέση με την προηγούμενη τεχνική είναι ότι υπάρχει δυνατότητα καταγραφής και των καθέτων κινήσεων (δεν υπάρχει επικάλυψη του ορίου από τα βλέφαρα) και ότι υπάρχει καλύτερη διακριτική ικανότητα λόγω του γεγονότος ότι το όριο ίριδας – κόρης είναι πιο «αιχμηρό». Το μειονέκτημα σε σχέση με την προηγούμενη τεχνική είναι η δυσκολία ανίχνευσης του ορίου λόγω της μικρότερης αντίθεσης του (Εικόνα 2.10).

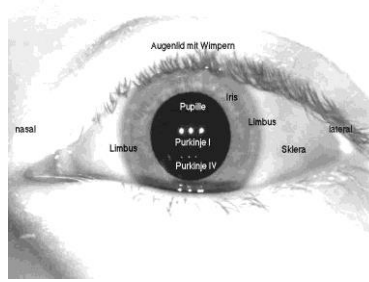


Εικόνα 2.10: Καταγραφή της κίνησης του ορίου ίριδας-κόρης.

2.7.3 Καταγραφή της σχετικής θέσης κερατοειδή – κόρης / VideoOculoGraphy

Όταν υπέρυθρη ακτινοβολία προσπίπτει στο μάτι του εξεταζομένου λαμβάνουν χώρα πολλαπλές ανακλάσεις, οι λεγόμενες εικόνες Purkinje. Η πρώτη εικόνα Purkinje μαζί με την ανάκλαση από το σκληροκερατοειδικό όριο μπορούν να βιντεοσκοπηθούν χρησιμοποιώντας μια υπέρυθρη κάμερα ως ένα φωτεινό σημείο και ένα λιγότερο φωτεινό αντίστοιχα. Όταν το μάτι κινείται οριζόντια ή κάθετα η σχετική θέση των δύο ανακλάσεων αλλάζουν ανάλογα και η θέση του ματιού μπορεί να υπολογιστεί από αυτές τις σχετικές θέσεις. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι πλευρικές μετατοπίσεις του κεφαλιού μπορεί να τοποθετήσουν την εικόνα του ματιού εκτός εστίας ή ακόμα και εκτός του οπτικού πεδίου της υπέρυθρης κάμερας. Μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιεί τις εικόνες Purkinje είναι η Dual – Purkinje κατά την οποία χρησιμοποιούνται η πρώτη (ανάκλαση από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή) και η

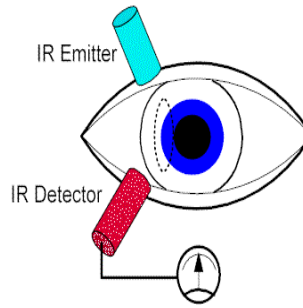
τέταρτη (ανάκλαση από την οπίσθια επιφάνεια του φακού) εικόνα. Η τεχνική αυτή είναι πιο ακριβής από τις άλλες και προσφέρει συχνότητα δειγματοληψίας μεγαλύτερη από 4.000Hz. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι η τέταρτη εικόνα Purkinje είναι σχετικά ασθενής οπότε ο περιβάλλοντας φωτισμός πρέπει να είναι ελεγχόμενος (Εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.11: Εικόνες Purkinje, η τέταρτη εικόνα Purkinje είναι ασθενέστερη της πρώτης.

2.7.4 Καταγραφή με χρήση πομπού – δέκτη υπέρυθρων / InfraRed OculoGraphy

Εάν μια σταθεροποιημένη πηγή φωτός κατευθύνεται προς το μάτι του εξεταζομένου το ποσό της ακτινοβολίας που ανακλάται και συλλέγεται από τον δέκτη εξαρτάται από τη θέση του ματιού. Αυτή την αρχή εκμεταλλεύονται πολλά εμπορικά διαθέσιμα συστήματα καταγραφής οφθαλμικών κινήσεων (eye trackers) (Εικόνα 2.12). Η ακτινοβολία που χρησιμοποιείται είναι υπέρυθρη, καθώς είναι «αόρατη» για το ανθρώπινο μάτι, και έτσι έχει το πλεονέκτημα ότι δεν επηρεάζει τον εξεταζόμενο. Εφόσον οι ανιχνευτές υπέρυθρων δεν επηρεάζονται από άλλες εκτεταμένες πηγές φωτός, ο περιβάλλον φωτισμός δεν επηρεάζει τις μετρήσεις. Η χωρική διακριτική ικανότητα (το μέγεθος της μικρότερης κίνησης που μπορεί να ανιχνευθεί) είναι καλή, της τάξης των 0.1° και χρονική διακριτική ικανότητα της τάξης του 1ms μπορεί να επιτευχθεί.



Εικόνα 2.12: Ανίχνευση οφθαλμικών κινήσεων με χρήση πομπού – δέκτη υπερύθρων.

2.8 Τεχνική που βασίζεται στην καταγραφή του ηλεκτρικού δυναμικού του δέρματος / ElectroOculoGraphy

Η τεχνική αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι ένα ηλεκτροστατικό πεδίο περιστρέφεται μαζί με το μάτι. Καταγράφοντας τις μικρές αλλαγές του ηλεκτρικού δυναμικού γύρω από το μάτι η θέση του μπορεί να ανιχνευθεί. Η τεχνική αυτή δεν απαιτεί καθαρό οπτικό πεδίο κάτι το οποίο συνεπάγεται καταγραφή κινήσεων σε ένα εύρος περίπου $\pm 70^\circ$. Το μειονέκτημα της είναι ότι είναι ενοχλητική για τον εξεταζόμενο αφού απαιτείται άμεση επαφή ηλεκτροδίων γύρω από το μάτι του (Εικόνα 2.13). Οι οφθαλμικές κινήσεις καταγράφονται από το βιοηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που τοποθετούνται δερματικά σε κάθε πλευρά του άξονα κερατοειδή – αμφιβληστροειδή. Περιορίζεται σε καταγραφή καθέτων και οριζοντίων κινήσεων μόνο αλλά επιτρέπει την διόφθαλμη καταγραφή.



Εικόνα 2.13: Τεχνική EOG.

2.9 Τεχνικές που βασίζονται σε χρήση φακών επαφής

Με χρήση φακών επαφής από το χρήστη, ο εντοπισμός της κατεύθυνσης της κίνησης του οφθαλμού μπορεί να γίνει με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνικές που στηρίζονται στη χρήση φακών επαφής:

(α) εισάγοντας μία ή περισσότερες επίπεδες ανακλαστικές επιφάνειες στο φακό επαφής και υπολογίζοντας τη θέση του οφθαλμού με βάση τις ανακλάσεις των ακτίνων φωτός, και

(β) εμφυτεύοντας στο φακό επαφής ένα μικροσκοπικό πηνίο επαγωγής και εντοπίζοντας την ακριβή θέση του φακού μέσα στον οφθαλμό με χρήση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου υψηλής συχνότητας γύρω από το κεφάλι του χρήστη. Οι τεχνικές αυτές είναι προφανώς μη εφαρμόσιμες για καθημερινή χρήση.

Τόσο τα θέματα υγείας που σχετίζονται με την εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων υψηλής συχνότητας όσο και η χρήση φακών επαφής ειδικού τύπου από το χρήστη που περιορίζουν την άνεσή του, καθιστούν τη συγκεκριμένη μέθοδο κατάλληλη μόνο για εργαστηριακή έρευνα.

Κεφάλαιο 3

Συλλογή των δεδομένων

3.1 Εισαγωγή

Στην έρευνα συμμετείχαν 2.130 νέοι αρσενικού γένους ηλικίας 18-24 ετών οι οποίοι εκτελούσαν την στρατιωτική τους θητεία στην Ελληνική Αεροπορία. Το 97,4% αυτών υπέγραψε γραπτή συγκατάθεση για την συμμετοχή του στην έρευνα καταλήγοντας σε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 2.075 ατόμων. Κάθε συμμετέχων υποβλήθηκε σε διαδικασίες οφθαλμικών κινήσεων οι οποίες περιελάμβαναν αργές κινήσεις ολίσθησης, σακκαδικές κινήσεις, αντι-σακκαδικές κινήσεις και κινήσεις προσήλωσης, καθώς επίσης και σε ψυχομετρικές δοκιμές. Όλοι οι συμμετέχοντες διεξήγαγαν τις δοκιμές στις στρατιωτικές εγκαταστάσεις της Ελληνικής Αεροπορίας κατά τη διάρκεια των δυο πρώτων εβδομάδων της θητείας τους.

3.2 Ψυχομετρικές δοκιμασίες

Οι συμμετέχοντες υποβλήθηκαν σε διαγνωστικές δοκιμασίες όπως η δοκιμή συνεχούς απόδοσης (Continuous Performance Task [CPT-IP]), η οποία οδηγεί σε μία συμπεριφορική εκτίμηση της διαμόρφωσης προσοχής του οφθαλμοκινητικού συστήματος (Rosvold H.E., 1956). Η δοκιμή αυτή αρχικά είχε εφαρμοστεί σε ασθενείς με εγκεφαλικές βλάβες και στη συνέχεια εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση της αδιάλειπτης προσοχής και την ανίχνευση επιληψίας, της ύπαρξης όγκου του εγκεφάλου, της άνοιας, της σχιζοφρένειας και σε άλλες ψυχιατρικές

ασθένειες, όπως η διαταραχή ελλειμματικής προσοχής υπερκινητικότητας (ADHD) και αγχώδεις διαταραχές (Rosvold H.E., 1956), (Honey, et al., 2005), (Kanaka N., 2008)).

Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές εκδοχές της δοκιμής αυτής, κάποιες από αυτές είναι η εκδοχή X-CPT η οποία περιλαμβάνει την παρακολούθηση από τους συμμετέχοντες τυχαίων διαφορετικών κινήτρων και την απόκριση αυτών στη παρουσίαση του στόχου κινήτρου X με το πάτημα ενός κουμπιού. Στην αντίστοιχη δοκιμή AX-CPT, οι συμμετέχοντες καλούνται να αποκριθούν με το πάτημα ενός κουμπιού όταν ένα από τα γράμματα A ή X παρουσιαζόταν. Τα χαρακτηριστικά που συλλέχτηκαν από τα πειράματα ήταν το πλήθος των λαθών παράλειψης, δηλαδή πόσες φορές οι συμμετέχοντες αδυνατούσαν να ανταποκριθούν στο στόχο διέγερση, το πλήθος των λαθών απόκρισης, δηλαδή πόσες φορές τα άτομα ανταποκρίθηκαν σε μη επαρκές στόχο διέγερση, ο μέσος χρόνος απόκρισης και οι παράμετροι απόκλισης για τα δύο είδη λαθών παράλειψης-απόκρισης, (Suwa H., 2004). Με βάση τη βιβλιογραφία, υπάρχουν κάποιες ενδείξεις ότι η μη ικανότητα συνεχούς προσοχής, όπως αυτή ανιχνεύεται από την δοκιμή CPT, θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ενδοφαινότυπος της σχιζοφρένειας (Gottesman, 2003). Επιπλέον των ψυχομετρικών δοκιμών, το 80% των συμμετεχόντων, 1.657 άτομα, κλήθηκε να συμπληρώσει ερωτηματολόγια με σκοπό την εκτίμηση παραμέτρων ψυχικής υγείας όπως: α) της σχιζοφρένειας με κλίμακες Αντίληψης Ψυχικής Ανωμαλίας (Perceptual Aberration Scale (Charman, 1978) και της Σχιζότυπης Προσωπικότητας (Raine, 1991), β) της ψυχοπαθολογίας με σύμπτωμα Hopkins (Hopkins Symptom Checklist 90 (Derogatis, 1974)), το οποίο μεταφράστηκε και κανονικοποιήθηκε με γνώμονα τον Ελληνικό πληθυσμό, και γ) τα χαρακτηριστικά προσωπικότητας (Temperament and Character Inventory—Revised (Cloninger, 1993)).

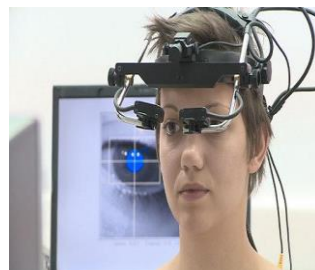
3.3 Πειραματική διάταξη για την καταγραφή οφθαλμικών κινήσεων

Οι δοκιμασίες στις οποίες υποβλήθηκαν οι συμμετέχοντες πέραν των ψυχολογικών ελέγχων περιελάμβαναν την καταγραφή των οφθαλμικών κινήσεων. Για κάθε καταγραφή χρησιμοποιήθηκε ένας υπολογιστής, μία προσαρμοζόμενη καρέκλα για τον εξεταζόμενο, ένα ειδικά σχεδιασμένο τραπέζι πάνω στο οποίο υπήρχε η υποδοχή για την στερέωση του κεφαλιού τοποθετημένο στην άκρη του ενώ στην άλλη άκρη του τραπεζιού σε απόσταση ενός μέτρου τοποθετήθηκε μία οθόνη 17 ιντσών (43,18 εκατοστά) (Εικόνα 3.1).



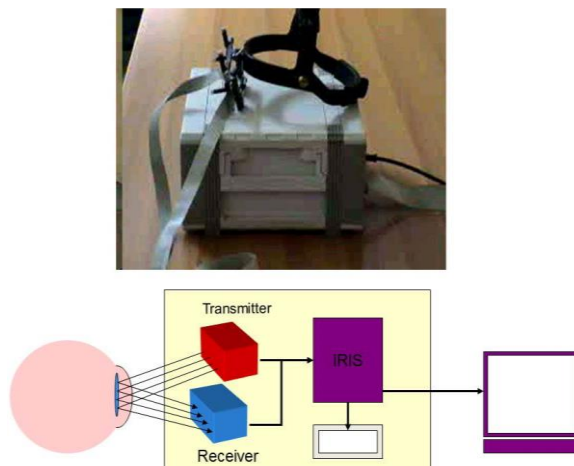
Εικόνα 3.1: Η πειραματική διάταξη καταγραφής οφθαλμικών κινήσεων.

Ένα χαλύβδινο πλαίσιο ντυμένο με μαύρο ύφασμα χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη της περιοχής γύρω από το τραπέζι δημιουργώντας έτσι ένα σκοτεινό θάλαμο. Το πάνω μέρος της οθόνης ήταν έξω από την καλυμμένη περιοχή ώστε να είναι εμφανής στους ειδικούς του πειράματος. Στο κάτω μέρος της οθόνης παρουσιάζονταν οι στόχοι παρακολούθησης στους συμμετέχοντες και στο πάνω μέρος της οθόνης προβαλλόταν η θέση του οφθαλμού έτσι ώστε οι ειδικοί να παρακολουθούν απευθείας την εκτέλεση του πειράματος και να κρίνουν την ποιότητα των αποτελεσμάτων (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Η παρατήρηση των οφθαλμικών κινήσεων κατά την διάρκεια του πειράματος.

Οι οφθαλμικές κινήσεις καταγράφηκαν από το δεξί μάτι μόνο χρησιμοποιώντας την συσκευή υπερύθρων IRIS SCALAR (SCALAR MEDICAL BV, Delft, the Netherlands) (Smyrnis , et al., 2004), η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3.



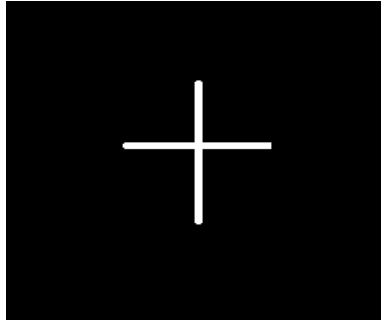
Εικόνα 3.3: Η συσκευή υπερύθρων καταγραφής οφθαλμικών κινήσεων IRIS SCALAR.

Για την μετατροπή των σημάτων σε ψηφιακή μορφή χρησιμοποιήθηκε ένας ψηφιακός μετατροπέας 12-bit. Οι στόχοι παρουσιάστηκαν σε οθόνη υπολογιστή. Ο σχεδιασμός των στόχων έγινε σε γλώσσα Turbo Pascal 7,0 για DOS. Η δειγματοληψία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με συχνότητα 600 δείγματα/δευτερόλεπτο (Advantech PC-Lab Card 818L; Advantech Co., Ltd., Ταϊpei, Taiwan) και τα δεδομένα αποθηκεύτηκαν σε σκληρό δίσκο για περαιτέρω επεξεργασία.

3.4 Δοκιμασίες προσήλωσης

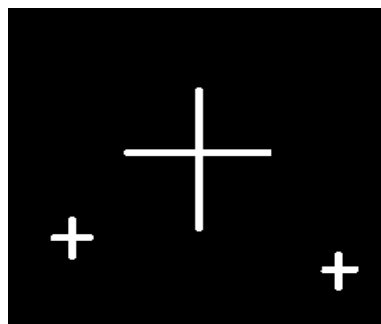
Κάθε άτομο εξετάστηκε σε δοκιμασίες προσήλωσης, σακκαδικών και αντισακκαδικών κινήσεων, όπως και δοκιμασίες αντίληψης. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι οφθαλμικές κινήσεις, συγκεκριμένα ο ρόλος των παρεμβατικών σακκαδικών, των ατόμων σε δοκιμασίες προσήλωσης. Συγκεκριμένα, ζητήθηκε από κάθε άτομο να μην εκτελεί οφθαλμικές κινήσεις (να εκτελεί προσήλωση) για 50 δευτερόλεπτα σε τρεις καταστάσεις (Evdokimidis, et al., 2002).

Στην πρώτη διαδικασία (visual fixation undistracted, VFU) οι συμμετέχοντες καθοδηγήθηκαν ώστε να προσηλωθούν σε έναν στόχο στο κέντρο της οθόνης (λευκός σταυρός $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$) για 50 δευτερόλεπτα (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4: Η πρώτη δοκιμασία περιλαμβάνει την προσήλωση των συμμετεχόντων στον λευκό σταυρό.

Στην δεύτερη διαδικασία προσήλωσης (visual fixation distracted, VFD), ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να εστιάσουν σε έναν κεντρικό σταυρό αγνοώντας στόχους που εμφανίζονται περιμετρικά δεξιά ή αριστερά του σταυρού. Οι στόχοι αποπροσανατολισμού ήταν είτε δύο μικροί λευκοί σταυροί $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ ή δύο μεγάλοι $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Καθένας από αυτούς εμφανιζόταν για 500ms τυχαία σε απόσταση $2^\circ - 9^\circ$ και σε τυχαία κατεύθυνση στα δεξιά ή αριστερά από τον κεντρικό στόχο, κατά την διάρκεια προσήλωσης των 50 δευτερολέπτων (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Η δεύτερη δοκιμασία περιλαμβάνει την προσήλωση των συμμετεχόντων στον λευκό σταυρό αγνοώντας τους λευκούς σταυρούς που εμφανίζονται περιμετρικά.

Τέλος, η τρίτη διαδικασία (no target fixation, NTF) στην οποία υποβλήθηκαν οι συμμετέχοντες περιείχε την προσήλωση αυτών στην ευθεία του κεφαλιού τους παρατηρώντας μία μαύρη οθόνη και με την οδηγία να μην εκτελέσουν καμία οφθαλμική κίνηση (Εικόνα 3.6).

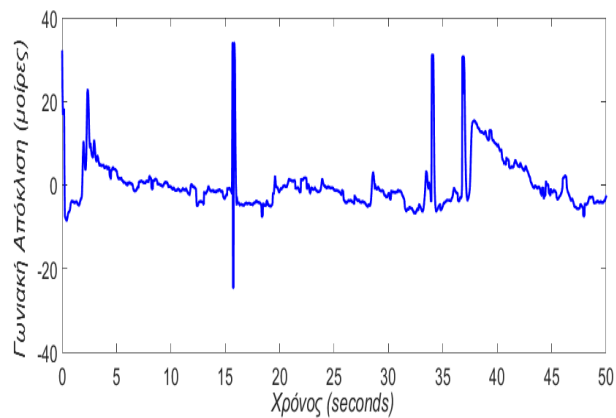


Εικόνα 3.6: Η τρίτη δοκιμασία περιλαμβάνει την προσήλωση των συμμετεχόντων στην μαύρη οθόνη.

Κάθε άτομο που συμμετείχε στην έρευνα καταγραφόταν ως ένας μοναδικός κωδικός αριθμός. Η σχέση μεταξύ ατόμου και κωδικού καταστράφηκε ώστε να διασφαλιστούν τα προσωπικά δεδομένα των ατόμων που συμμετείχαν στην έρευνα.

3.5 Παρουσίαση δεδομένων

Η συλλογή των δεδομένων αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μορφή ενός καταγεγραμμένου σήματος έχει την μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 3.7.

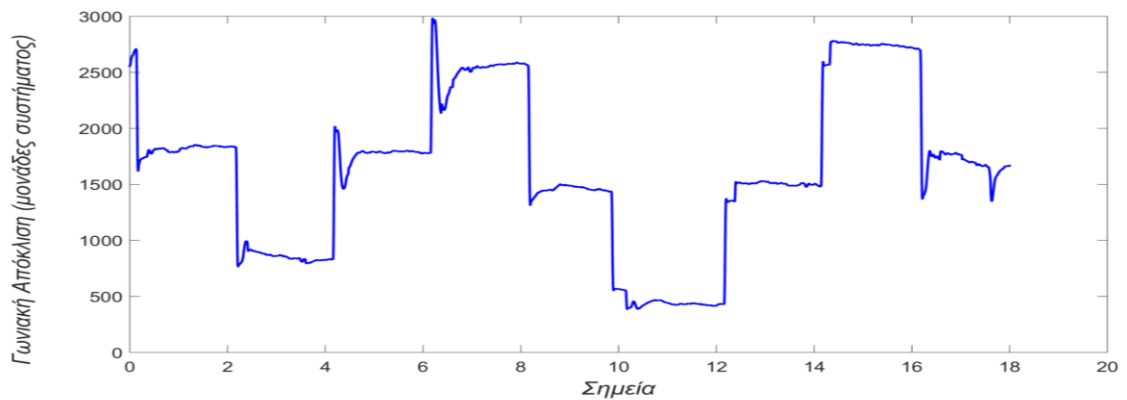


Εικόνα 3.7: Σήμα καταγραφής της γωνιακής απόκλισης του οφθαλμού με χρήση του συστήματος IRIS SCALAR.

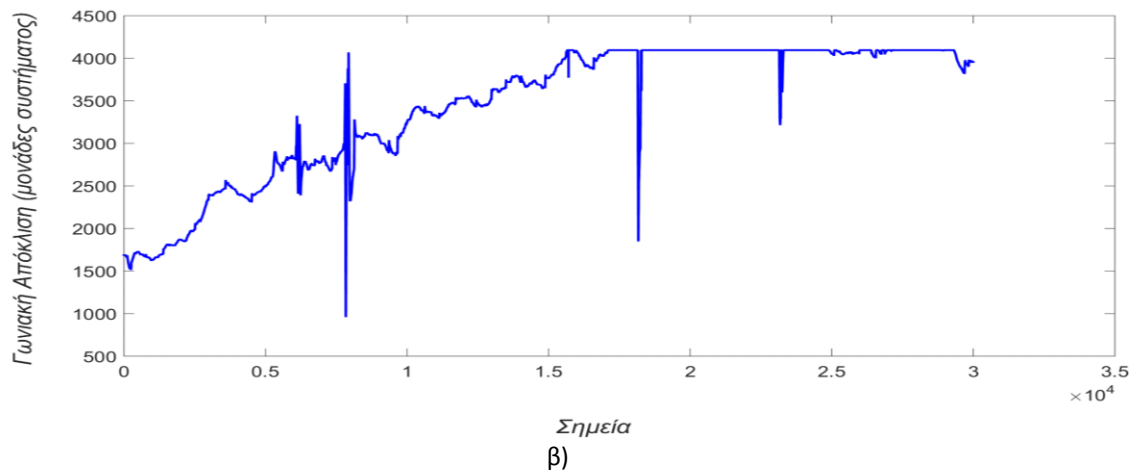
Πριν από κάθε διαδικασία καταγραφής ο συμμετέχοντας υποβαλλόταν σε διαδικασία βαθμονόμησης του συστήματος. Αυτή περιείχε ελεγχόμενες σακκαδικές 10° δεξιά και 10°

Συλλογή των δεδομένων

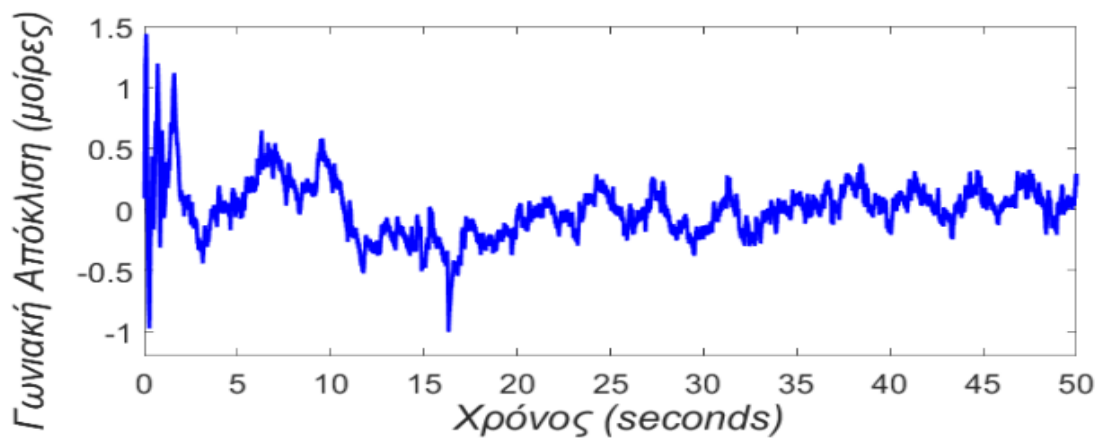
αριστερά από έναν κεντρικό στόχο. Ένα σήμα βαθμονόμησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.8(α). Η βαθμονόμηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για την μετατροπή των μονάδων μέτρησης από ανεξάρτητες μονάδες του συστήματος σε μοίρες. Σε πολλά σήματα βαθμονόμησης παρατηρήθηκε θόρυβος εξαιτίας της λανθασμένης κίνησης του ατόμου ή την ολίσθηση της συσκευής που ήταν τοποθετημένη στο κεφάλι του συμμετέχοντα. Ένα θορυβώδες σήμα βαθμονόμησης φαίνεται στην Εικόνα 3.8(β). Τέτοιου είδους σήματα αποκλείστηκαν από την μελέτη. Επίσης, υπήρχαν περιπτώσεις όπου τα σήματα βαθμονόμησης ήταν φυσιολογικά και τα καταγεγραμμένα σήματα οφθαλμικών κινήσεων παρουσίαζαν ισχυρό θόρυβο, όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3.8(γ). Σε αυτά τα σήματα εφαρμόστηκε βαθυτεπατό φίλτρο το οποίο απομακρύνει τις υψηλές συχνότητες, στην Εικόνα 3.8(δ) φαίνεται ένα ομαλοποιημένο σήμα.



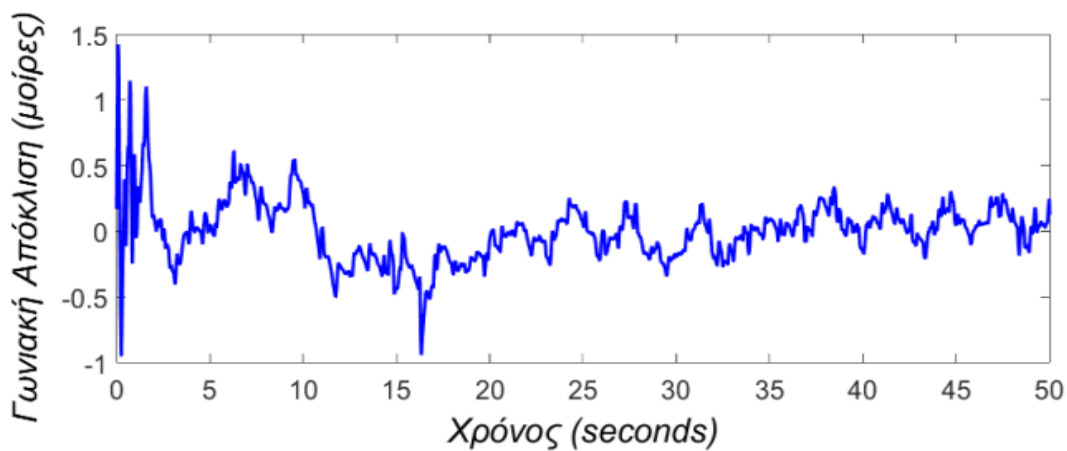
α)



β)



γ)



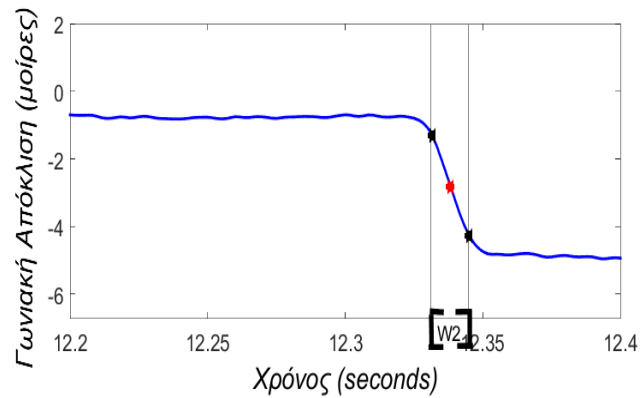
δ)

Εικόνα 3.8: α) Το σήμα βαθμονόμησης, β) Θορυβώδες σήμα βαθμονόμησης το οποίο απαλείφεται από την μελέτη, γ) Το σήμα της γωνιακής απόκλισης πριν την προεπεξεργασία και ύστερα από προεπεξεργασία δ).

Συνολικά, 2.335 σήματα από τα 1.392 άτομα επιλέχτηκαν για περαιτέρω ανάλυση. Η ανίχνευση των οφθαλμικών κινήσεων σε ένα υποσύνολο του δείγματος πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια δύο ειδικών από το Αιγινήτειο Νοσοκομείο (Ν. Σμυρνης και Ι. Ευδοκιμίδης), οι οποίοι ύστερα από οπτική επίβλεψη σημείωσαν το κεντρικό σημείο σε κάθε οφθαλμική κίνηση (βλεφαρισμός, σακκαδική και μικροσακκαδική). Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε παράθυρο κατάλληλου μεγέθους το οποίο τοποθετήθηκε στο κεντρικό σημείο κάθε κίνησης και στο κομμάτι

Συλλογή των δεδομένων

αυτό του σήματος εξήχθησαν τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω ανάλυση. Στην Εικόνα 3.9 φαίνεται η εφαρμογή του παραθύρου στο κεντρικό σημείο μίας σακκαδικής (κόκκινη κουκίδα).



Εικόνα 3.9: Η κόκκινη κουκίδα δείχνει το κεντρικό σημείο της σακκαδικής, οι κάθετες μαύρες γραμμές ορίζουν το μήκος του παραθύρου W2.

Κεφάλαιο 4

Αυτόματη Ανίχνευση Οφθαλμικών Κινήσεων Με Χρήση Τεχνικών Αναγνώρισης Προτύπων

4.1 Εισαγωγή

Οι σακκαδικές κινήσεις είναι ένα από τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούν οι νευρολόγοι για την μελέτη της φυσιολογικής όρασης υγιών και ασθενών (Hooge & Smeets, 2003). Οι σακκαδικές κινήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για την μελέτη ασθενών με ψυχοπαθολογικές ανωμαλίες, ηλικιωμένων και νέων για την ανίχνευση της διαφοροποίησης της όρασης σε ίδιες συνθήκες (Klein & Ettinger, 2008). Μολονότι η μελέτη των οφθαλμικών κινήσεων αποτελεί ευρέως ένα από τα εργαλεία για την ανάλυση της ανθρώπινης συμπεριφοράς, η ανάλυση αυτών των κινήσεων είναι ιδιαίτερος δύσκολη εξαιτίας της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει η κίνηση του ματιού (Smyrnis N. , 2008). Η δυσκολία που αντιμετωπίζει κάποιος

όταν μελετά τις σακκαδικές κινήσεις είναι η ανίχνευση αυτών με ένα αντικειμενικό και αυτοματοποιημένο τρόπο. Πολλές είναι οι εργασίες που χρησιμοποίησαν την ανίχνευση των οφθαλμικών κινήσεων για την ανάλυση της όρασης σε διαδικασίες προσήλωσης ή σε παρακολούθηση κινητής εικόνας.

Στην εργασία (Anderson & Salvucci, 2001), η ανίχνευση των οφθαλμικών κινήσεων υλοποιείται με τη διαδικασία της ιχνογράφησης (tracing methods), δηλαδή τον τρόπο που «σκανάρει» κάποιος μία εικόνα. Συγκεκριμένα, ζητήθηκε από επτά άτομα να διεξάγουν τις εξής δοκιμασίες: επίλυση εξισώσεων, ανάγνωση και προσήλωση σε εικόνες. Στα καταγεγραμμένα σήματα εφαρμόστηκαν Κρυφά Μαρκοβιανά Μοντέλα (Hidden Markov Models), με τα οποία μελετήθηκε η συσχέτιση της ακολουθίας των κινήσεων καταλήγοντας σε υψηλό ποσοστό ανίχνευσης των κινήσεων μεταξύ 87,5% και 93,7%, χρησιμοποιώντας ως αναφορά τα αποτελέσματα της οπτικής εξέτασης των συγκεκριμένων καταγραφών από ειδικούς. Σε επόμενη έρευνα, μέθοδοι μηχανικής μάθησης εφαρμόστηκαν για την βελτιστοποίηση της ανίχνευσης της ήπιας γνωστικής εξασθένησης (Mild Cognitive Impairment (MCI)) σε εξήντα (60) συμμετέχοντες, μοντελοποιώντας τύπους οφθαλμικών κινήσεων όπως κινήσεις προσήλωσης, σακκαδικές και επαναπροσήλωσης κατά τη διάρκεια Οπτικής Σύγκρισης Ζευγών (Visual Paired Comparison test) (Lagun, Manzanaresb, & Zola, 2011). Τα χαρακτηριστικά των οφθαλμικών κινήσεων που είχαν επιλεχθεί προς ανάλυση για τον διαχωρισμό των υγιών από τους ασθενείς ήταν η διάρκεια προσήλωσης, η κατεύθυνση της επανα-προσήλωσης και της σακκαδικής κίνησης, όπως επίσης και η διάμετρος της κόρης του οφθαλμού. Αυτά εισήχθησαν σε ταξινομητή μηχανής διανυσμάτων στήριξης (Support Vector Machine - SVM). Η απόδοση του ταξινομητή ήταν 87,0% για τον διαχωρισμό υγιών και ασθενών.

Σε πρόσφατη έρευνα, ένα σύνολο 90 χαρακτηριστικών των οφθαλμικών κινήσεων εξήχθησαν από δέκα (10) άτομα κατά την υλοποίηση πέντε δραστηριοτήτων: αντιγραφή κειμένου, ανάγνωση άρθρου, καταγραφή σημειώσεων, παρακολούθηση βίντεο και περιήγηση στο διαδίκτυο (Bulling, Ward, & Gellersen, 2011). Κάποια από τα χαρακτηριστικά που εξήχθησαν ήταν η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του πλάτους της σακκαδικής, το μέγιστο πλάτος του σήματος που προέρχεται από το οφθαλμογράφημα, ο ρυθμός των μικρών ή των μεγάλων σακκαδικών και η κατεύθυνση των οριζόντιων ή των κάθετων σακκαδικών. Ύστερα από επιλογή των καλύτερων χαρακτηριστικών, έγινε χρήση του ταξινομητή SVM για την κατηγοριοποίηση των πέντε δραστηριοτήτων παρέχοντας ακρίβεια 80,2%. Σε επόμενη εργασία (Holmqvist & Nyström,

2010), παρουσιάστηκε ένας νέος αλγόριθμος ανίχνευσης σακκαδικών κινήσεων βασιζόμενος στην ταχύτητα αυτών. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται στο σήμα της ταχύτητας του σήματος και περιλαμβάνει αρχικά τον καθορισμό ενός κατωφλίου για την ανίχνευση του μεγίστου της σακκαδικής, το οποίο αντιστοιχεί στην κεντρική τιμή της σακκαδικής, και εν συνεχεία την ανίχνευση της έναρξης και του τερματισμού αυτής. Η επιλογή του κατωφλίου βασίζεται σε παραμέτρους όπως το επίπεδο θορύβου που περιέχει το σήμα, τις φυσικές παραμέτρους των οφθαλμικών κινήσεων και ένα κατώφλι σχετικά με το πλάτος της σακκαδικής. Η μέθοδος αυτή ανιχνεύει σακκαδικές και προ-σακκαδικές ταλαντώσεις υπό την παρουσία κινήσεων ολίσθησης με 92,0%-96,0% ειδικότητα και 80,0%-90,0% ευαισθησία. Σε επόμενη μελέτη, η ανίχνευση των σακκαδικών κινήσεων, των βλεφαρισμών, των προ-σακκαδικών ταλαντώσεων και των σημείων προσήλωσης μελετήθηκε στο σήμα της επιτάχυνσης του καταγεγραμμένου σήματος (Larsson, Nystrom, & Stridh, 2013). Η μέθοδος αποτελείται από δύο βασικά βήματα, την ανίχνευση των ενδιάμεσων διαστημάτων των σακκαδικών και στη συνέχεια την ανίχνευση της έναρξης και του τερματισμού αυτών. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε τριάντα τρία (33) άτομα τα οποία διεξήγαγαν τρεις διαφορετικές διαδικασίες. Η ευαισθησία ήταν μεταξύ 66,7% και 97,8%, ενώ η ειδικότητα μεταξύ 82,8% και 99,9%. Σε επόμενη έρευνα, παρουσιάστηκε η ανάπτυξη αλγορίθμου για την αυτόματη ανίχνευση μικροσακκαδικών με μία νέα μέθοδο ομαδοποίησης χωρίς επίβλεψη η οποία παρουσιάζεται στην εργασία (Otero-Millan, Alba Castro, Martinez-Conde, & Macknik L, 2014). Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε μία βάση δεδομένων είκοσι (20) ατόμων (12 άνδρες και 8 γυναίκες) με φυσιολογική όραση τα οποία επικεντρώθηκαν σε ένα σημείο. Η μέθοδος παρουσίασε υψηλή ακρίβεια σε σχέση με άλλες μεθόδους για τα σήματα που προέρχονται από την καταγραφή του ενός ματιού ή και των δύο. Σε επόμενη μελέτη για την ανίχνευση μικρών σακκαδικών (Engbert & Kliegl, 2003) αναπτύχθηκε αλγόριθμος υπολογισμού της ταχύτητας των οφθαλμικών σημάτων κατά τη διάρκεια προσήλωσης στο διδιάστατο χώρο. Παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα των μικρών σακκαδικών διέφερε από την ταχύτητα των σημείων πορσήλωσης, το μέσο σφάλμα της ανίχνευσης των μικρών σακκαδικών ήταν 0,25 λάθη ανά δευτερόλεπτο με μέσο ρυθμό σφάλματος 0,1 λάθη ανά δευτερόλεπτο. Ο πραγματικός ρυθμός ανίχνευσης μικρών σακκαδικών της μεθόδου ομαδοποίησης χωρίς επίβλεψη και της μεθόδου με χρήση της ταχύτητας στον διδιάστατο χώρο, είναι πάνω από 75,0% με αναφορά την οπτική εξέταση. Επίσης, στην εργασία (Engbert & Mergenthaler, 2006), για την ανίχνευση μικροσακκαδικών ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να προσηλωθούν σε μία τελεία στην οθόνη ενός υπολογιστή. Οι μικροσακκαδικές ανιχνεύθηκαν στο σήμα της ταχύτητας χρησιμοποιώντας δύο κατώφλια, ένα

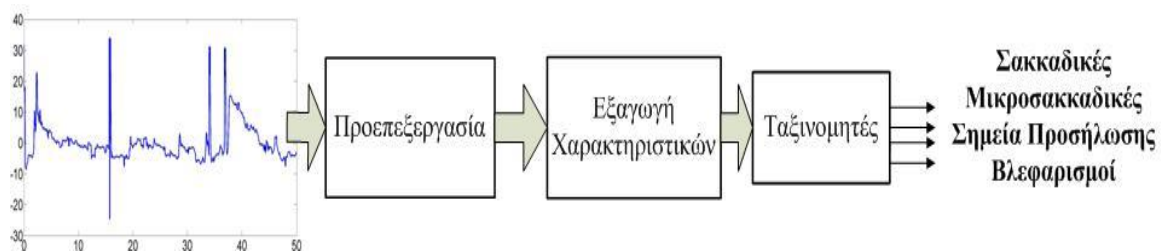
για τη μέγιστη ταχύτητα μίας σακκαδικής και ένα για την ελάχιστη διάρκεια αυτής, ομοίως με την εργασία που αναφέραμε προηγουμένως (Engbert & Kliegl, 2003), ο ρυθμός ανίχνευσης των μικρών σακκαδικών ήταν μία έως δύο ανά δευτερόλεπτο.

Το παρόν κεφάλαιο αποσκοπεί στο να παρουσιάσει μία μεθοδολογία για την αυτοματοποιημένη ανίχνευση των τεσσάρων ειδών οφθαλμικών κινήσεων (σακκαδικές, μικροσακκαδικές, σημεία προσήλωσης και βλεφαρισμοί) σε καταγεγραμμένα σήματα υγιών. Για το σκοπό αυτό επεξεργάστηκαν 2.335 σήματα οφθαλμικών κινήσεων από 1.392 άτομα. Η κατηγοριοποίηση των οφθαλμικών κινήσεων έγινε με πρώτης τάξης στατιστικά χαρακτηριστικά (Smyrnis, et al., 2004). Η παρούσα μεθοδολογία βασίζεται σε μία αλληλουχία τριών ταξινομητών, ο πρώτος ταξινομητής διαχωρίζει τους βλεφαρισμούς από τις υπόλοιπες κινήσεις, ο δεύτερος διαχωρίζει τα σημεία προσήλωσης από τις σακκαδικές και τέλος ο τρίτος ομαδοποιεί σε δύο κλάσεις τις μικρές και τις μεγάλες σακκαδικές.

4.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αυτόματη διακριτοποίηση των τριών τύπων οφθαλμικών κινήσεων (σακκαδικές, βλεφαρισμούς και σημεία προσήλωσης) περιλαμβάνει 3 βήματα (Εικόνα 4.1):

1. Προεπεξεργασία
2. Εξαγωγή χαρακτηριστικών
3. Ομαδοποίηση με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων



Εικόνα 4.1: Τεχνικό διάγραμμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Δύο παράθυρα W1 και W2 χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση όλων των ειδών των οφθαλμικών κινήσεων. Τα παράθυρα W1 και W2 χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση των βλεφαρισμών και των σακκαδικών/σημείων προσήλωσης, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, για κάθε σακκαδική που σημειώθηκε από τους ειδικούς, ένα κομμάτι του σήματος μήκους W2 σημειώθηκε αμέσως πριν και μετά τη σακκαδική. Τα μέρη αυτά του σήματος αντιστοιχούν σε σημεία προσήλωσης. Η επιλογή των παραθύρων δεν έγινε τυχαία αλλά επιλέχθηκε με βάση την διάρκεια των κινήσεων όπως παρουσιάζεται στην βιβλιογραφία. Ένα παράθυρο W1 μεγέθους 400ms, το οποίο αντιστοιχεί σε 240 σημεία ($240/600=0,4$ δευτερόλεπτα), επιλέχθηκε ώστε να περιέχει ολόκληρη την κίνηση του βλεφαρισμού. Οι βλεφαρισμοί είναι συνήθως διάρκειας 100-400ms (Jiang, Trundle, & Ren, 2010), ενώ οι σακκαδικές είναι συνήθως διάρκειας 6-300ms (Martinez-Conde, Mackni, & Hubel, 2009). Το μήκος του παραθύρου W2 καθορίστηκε ως 13ms βασιζόμενοι στην ελάχιστη διάρκεια μίας σακκαδικής που είναι σε 6ms δηλαδή περίπου 4 σημεία όταν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 600Hz. Έτσι, επιλέξαμε ένα κυλιόμενο παράθυρο 8 σημείων ($8/600=13ms$) ώστε αυτό να εμπεριέχει μία ολόκληρη μικροσακκαδική. Συνολικά, από τα 2.335 σήματα, 16.012 διαστήματα εξήχθησαν τα οποία περιέχουν βλεφαρισμούς (200ms πριν από το κεντρικό σημείο και 200ms μετά) και 316.612 διαστήματα εξήχθησαν τα οποία περιέχουν σακκαδικές και μικρό-σακκαδικές.

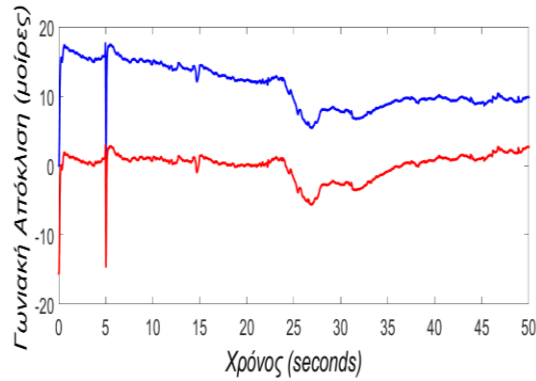
4.2.1 Προεπεξεργασία

Η προεπεξεργασία αποτελείται από δύο διαδικασίες, η πρώτη είναι η απομάκρυνση των γραμμικών ολισθήσεων στο καταγεγραμμένο σήμα και η δεύτερη είναι ο υπολογισμός της γωνιακής ταχύτητας. Η προεπεξεργασία αποτελεί απαραίτητη διαδικασία για την σωστή ταξινόμηση των δεδομένων.

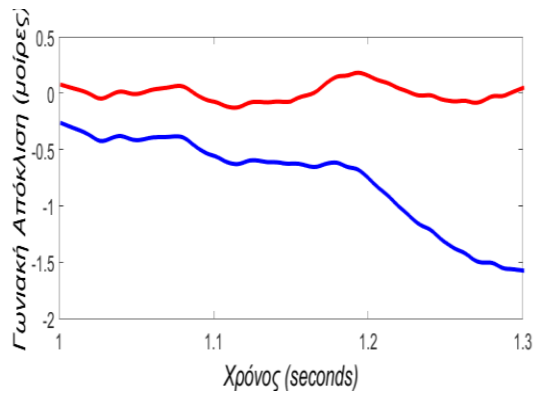
4.2.1.1 Απομάκρυνση των γραμμικών ολισθήσεων (Detrending)

Ως γραμμική ολίσθηση χαρακτηρίζεται η αύξουσα ή φθίνουσα τάση που παρουσιάζουν τα σήματα και πολλές φορές προέρχεται από την ολίσθηση του ανιχνευτή κίνησης. Η συγκεκριμένη διεργασία είναι απαραίτητη ώστε να εξαλείψουμε από το σήμα τις διακυμάνσεις χαμηλής συχνότητας. Είναι μια διεργασία στην οποία υποβάλλεται το σήμα ώστε να ενισχυθούν οι διακυμάνσεις που μας ενδιαφέρουν (σακκαδικές-βλεφαρισμοί) και να μειωθεί ο θόρυβος που υπάρχει σε αυτό. Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε αφαιρεί την γραμμική τάση των δεδομένων,

η οποία ανιχνεύεται με χρήση της προσαρμογής των ελαχίστων τετραγώνων σε κομμάτια του σήματος (Εικόνα 4.2).



α)



β)

Εικόνα 4.2: α) Η μπλε γραμμή αντιστοιχεί στο καταγεγραμμένο σήμα το οποίο δεν έχει υποστεί επεξεργασία και η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο καταγεγραμμένο σήμα ύστερα από την απομάκρυνση των γραμμικών ολισθήσεων. β) Μεγέθυνση ενός μέρους του σήματος.

4.2.1.2 Υπολογισμός της ταχύτητας του σήματος

Έχει παρατηρηθεί ότι οι οφθαλμικές κινήσεις κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες σύμφωνα με τις διακυμάνσεις της ταχύτητας αυτών. Οι μικρές ταχύτητες κάτω από $100^\circ / \text{seconds}$ αντιστοιχούν στο προφίλ της ταχύτητας των σημείων προσήλωσης, και οι μεγάλες πάνω από $300^\circ / \text{seconds}$ αντιστοιχούν στο προφίλ ταχύτητας των σακκαδικών κινήσεων (Anderson & Salvucci, 2001). Το γεγονός αυτό μας οδήγησε στο να χρησιμοποιήσουμε το σήμα της ταχύτητας για τον διαχωρισμό των οφθαλμικών κινήσεων. Ο υπολογισμός της ταχύτητας

βασίζεται στη μέθοδο των διαφορών και ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων διαιρούμενο με τη χρονική διαφορά μεταξύ των σημείων (Wu Z. , Huang, Long, & Peng, 2007).

Οι σακκαδικές είναι μικρές απότομες κινήσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές της πρώτου παραγώγου του καταγεγραμμένου σήματος. Η γωνιακή ταχύτητα $\omega(t)$, την χρονική στιγμή t ορίζεται ως η πρώτη παράγωγος της γωνιακής μετατόπισης $a(t)$:

$$\omega(t) = \frac{d a(t)}{dt} \quad (4.1)$$

Καθώς όμως οι οφθαλμικές κινήσεις που μελετάμε συχνά περιέχουν και μικρότερες κινήσεις όπως τρέμουλο ή κινήσεις ολίσθησης, φαίνεται ότι στο σήμα της ταχύτητας αυτές οι κινήσεις θα εμφανίζονται ως διακυμάνσεις και ίσως δυσκολέψουν την περαιτέρω ανάλυση. Για την απομάκρυνση αυτών η γωνιακή απόκλιση των οφθαλμικών κινήσεων πρώτα ομαλοποιείται με τη συνέλιξη με έναν πυρήνα ομαλοποίησης Γκάους και στη συνέχεια υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα.

$$\omega(t) = \frac{d(\alpha * h)(t)}{dt} = (\alpha * \frac{dh}{dt})(t) \quad (4.2)$$

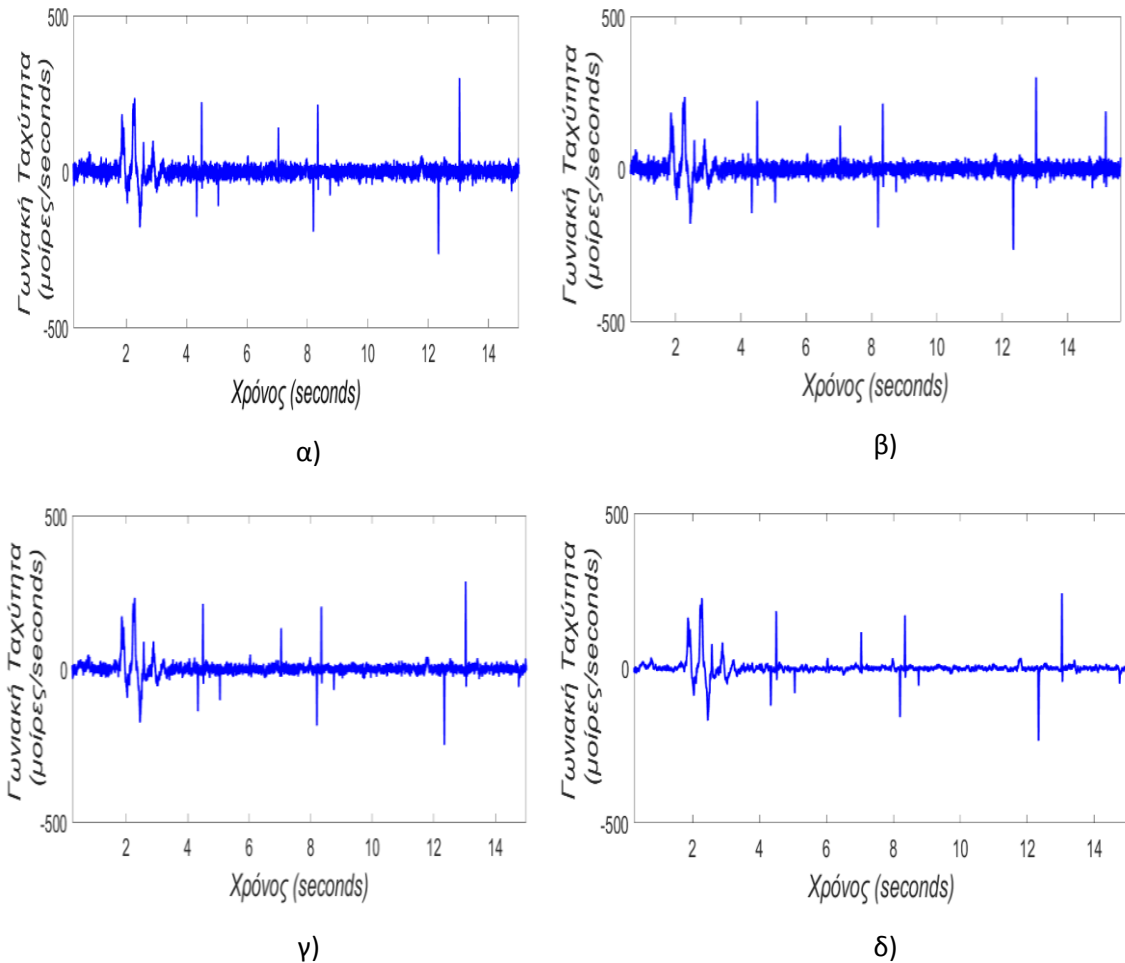
όπου το σύμβολο $*$ δηλώνει τη συνέλιξη.

Ένας κατάλληλος πυρήνας για αυτή την διαδικασία είναι ο γκαουσιανός πυρήνας:

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-t^2/2\sigma^2} \quad (4.3)$$

όπου η παράμετρος σ καθορίζει το επίπεδο εξομάλυνσης.

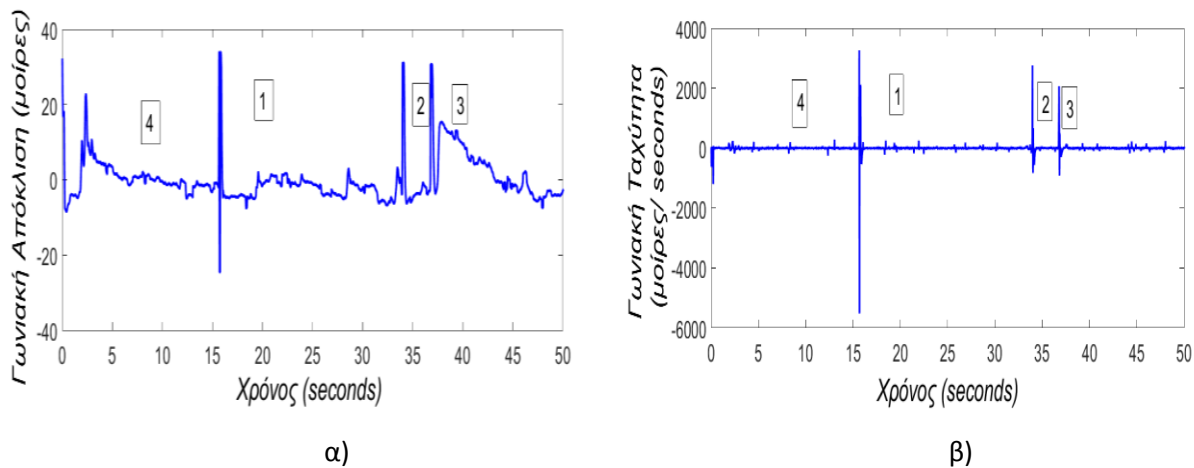
Χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές του σ , υπολογίστηκε η ταχύτητα του σήματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3. Είναι φανερό ότι η επιλογή μικρών τιμών της παραμέτρου σ δεν είναι ιδανική για την αποθορυβοποίηση του σήματος (Εικόνα 4.3(α), 4.3(β)). Για μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου (για παράδειγμα 2) η εξομάλυνση συμβαίνει σε τέτοιο βαθμό που οι μικρές σακκαδικές τείνουν να παρερμηνευθούν ως σημεία προσήλωσης (Εικόνα 4.3(δ)). Η χρήση $\sigma = 1$ αποτελεί την τιμή επιλογής αφού δημιουργείται ένα ομαλοποιημένο σήμα με ενισχυμένες τις διαφορές μεταξύ των διαφόρων τύπων των οφθαλμικών κινήσεων.



Εικόνα 4.3: α) Η γωνιακή ταχύτητα του σήματος για $\sigma = 0.1$, β) $\sigma = 0.5$, γ) $\sigma = 1$ και δ) $\sigma = 2$.

Η γωνιακή ταχύτητα του σήματος ύστερα από την απομάκρυνση των γραμμικών τάσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.4, όπου έχουν σημειωθεί από τους ειδικούς με αριθμούς οι τύποι των οφθαλμικών κινήσεων. Οι ετικέτες 1, 2 και 3 αντιστοιχούν σε βλεφαρισμούς και η ετικέτα 4 αντιστοιχεί σε σακκαδικές. Όπως είναι φανερό, οι βλεφαρισμοί είναι εμφανείς και στα δύο ομαλοποιημένα σήματα, της γωνιακής απόκλισης και της γωνιακής ταχύτητας. Ένας τυπικός βλεφαρισμός καταγράφεται ως μία αλληλουχία δύο διαδοχικών ακρότατων στο καταγεγραμμένο σήμα, ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο, σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, ο διαχωρισμός των βλεφαρισμών από τις σακκαδικές δεν είναι τόσο εμφανής πάντα, όπως στην περίπτωση της ετικέτας 4 όπου πρόκειται για μια αλληλουχία διαδοχικών σακκαδικών. Αυτό

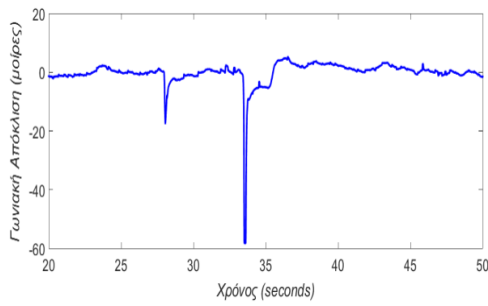
είναι ξεκάθαρο στο σήμα της γωνιακής ταχύτητας όπου το κομμάτι αυτό του σήματος αντιστοιχεί σε αρκετά χαμηλές ταχύτητες σε σχέση με αυτή των βλεφαρισμών. Επίσης, η διάρκεια αυτού του φαινομένου αλληλουχίας σακκαδικών ξεπερνά το άνω χρονικό όριο των βλεφαρισμών που είναι 400ms.



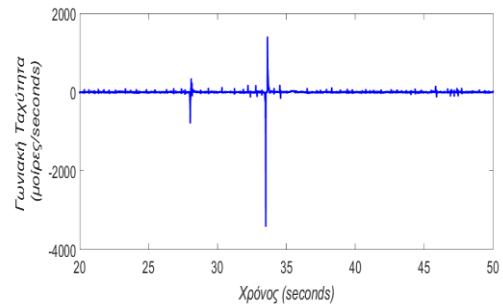
Εικόνα 4.4: α) Ένα χαρακτηριστικό ομαλοποιημένο σήμα και β) η αντίστοιχη γωνιακή ταχύτητα του σήματος. Οι ετικέτες 1-3 αντιστοιχούν στους βλεφαρισμούς, ενώ η ετικέτα 4 αντιστοιχεί σε αλληλουχία σακκαδικών.

Τέλος, στην Εικόνα 4.5, παρουσιάζεται η γωνιακή απόκριση τριών τύπων οφθαλμικών κινήσεων, όπως καθορίστηκαν από τους ειδικούς: βλεφαρισμοί (Εικόνα 4.5(α)), σακκαδική (Εικόνα 4.5(β)) και σημεία προσήλωσης (Εικόνα 4.5(γ)). Αντίστοιχα, παρουσιάζεται η γωνιακή ταχύτητα αυτών στις Εικόνες 4.5(δ-ζ).

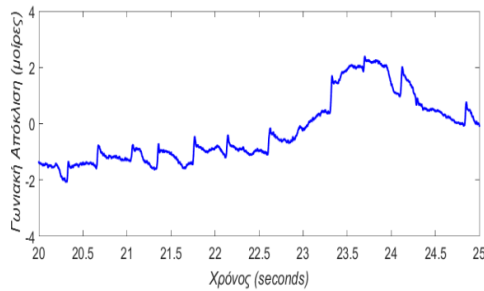
Αυτόματη Ανίχνευση Οφθαλμικών Κινήσεων Με Χρήση Τεχνικών Αναγνώρισης Προτύπων



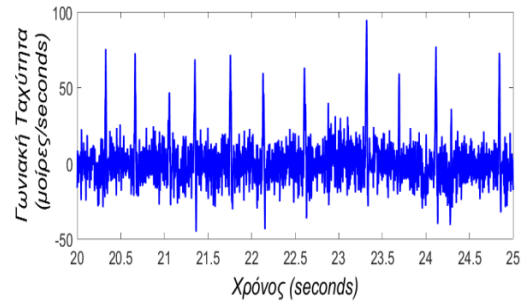
α)



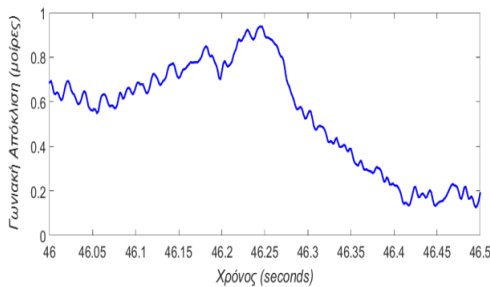
δ)



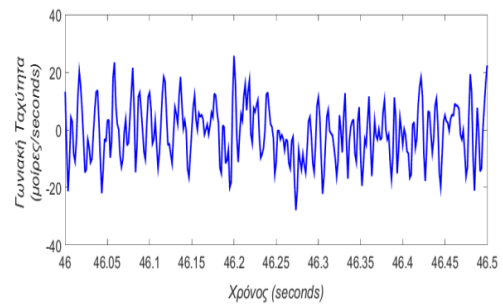
β)



ε)



γ)



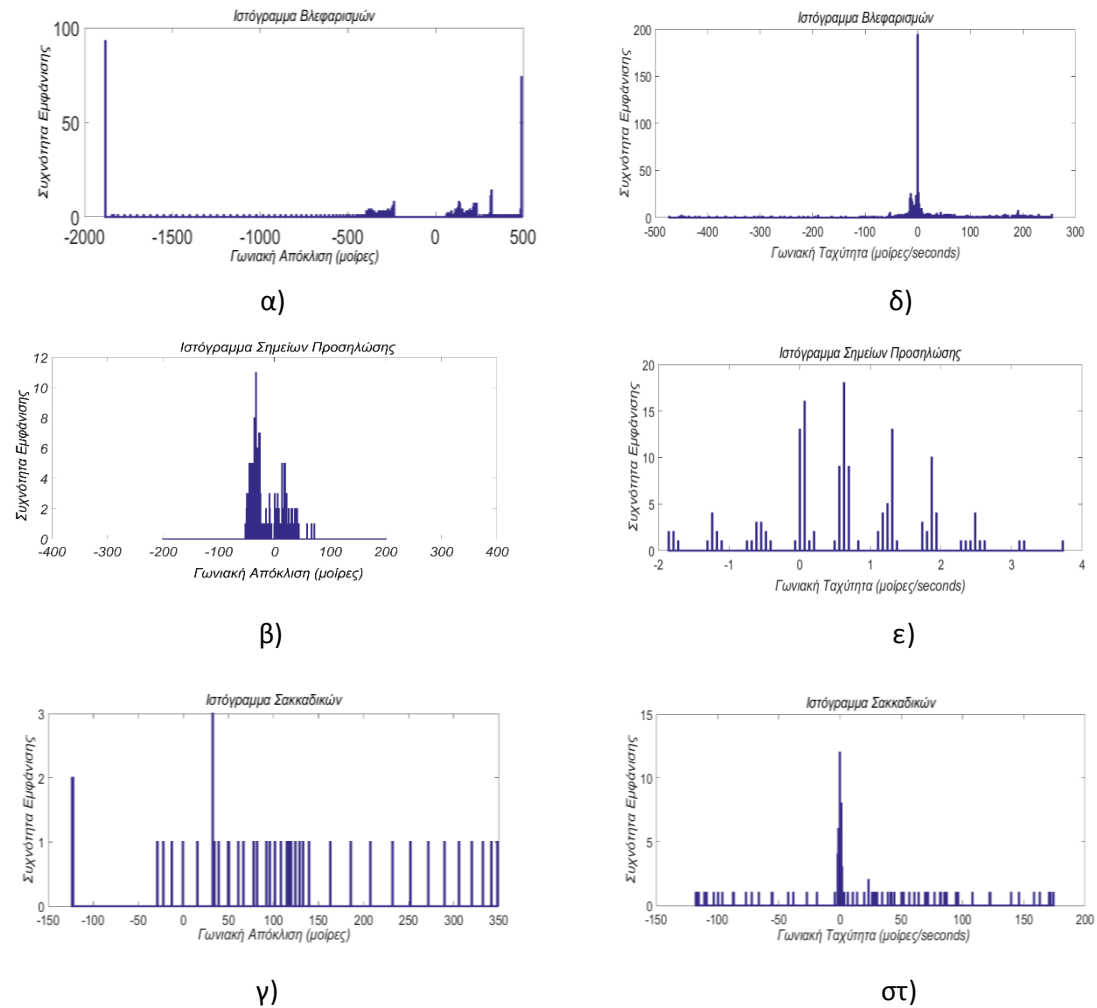
στ)

Εικόνα 4.5: Η γωνιακή απόκλιση του οφθαλμού που αντιστοιχεί σε α) βλεφαρισμό, β) σακκαδική, και γ) σημεία προσήλωσης. Οι αντίστοιχες γωνιακές ταχύτητες φαίνονται στα σχήματα δ), ε), στ). Τα σχήματα αυτά προέρχονται από μεγέθυνση των τμημάτων του σήματος που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.7.

4.2.2 Εξαγωγή χαρακτηριστικών

Το πρώτο βήμα για την ανίχνευση των διαφόρων τύπων οφθαλμικών κινήσεων είναι ο καθορισμός των στατιστικών χαρακτηριστικών που θα εξαχθούν από τα σήματα της γωνιακής απόκλισης και της αντίστοιχης γωνιακής ταχύτητας. Πρόκειται για στατιστικά χαρακτηριστικά

πρώτης τάξης τα οποία υπολογίζονται στο ιστογράμμα των σημείων που περιέχει κάθε παράθυρο. Συγκεκριμένα, για να γίνει εμφανής η καταλληλότητα των χαρακτηριστικών για τον διαχωρισμό των διαφόρων τύπων οφθαλμικών κινήσεων, τιμές από δέκα παράθυρα που περιέχουν τον συγκεκριμένο τύπο οφθαλμικής κίνησης στο σήμα της γωνιακής απόκλισης συλλέχθηκαν και τα ιστογράμματα αυτών παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6: Τα ιστογράμματα των γωνιακών αποκλίσεων (α-γ) και των γωνιακών ταχυτήτων (δ-στ) δέκα παραθύρων από κάθε τύπο οφθαλμικής κίνησης.

Αρχικά, δύο χρονικά παράθυρα W1 και W2 ολισθαίνουν σημείο προς σημείο σε κάθε σήμα (γωνιακής απόκλισης και γωνιακής ταχύτητας), υπολογίζοντας στα κομμάτια αυτά του

σήματος τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Έτσι, παράγεται ένα διάνυσμα 14 χαρακτηριστικών για κάθε παράθυρο.

1. Μέγιστη τιμή, αναφέρεται στη μέγιστη τιμή της γωνιακής απόκλισης και την μέγιστη τιμή της γωνιακής ταχύτητας.

2. Μέση τιμή, είναι ο μέσος όρος κάθε σήματος σύμφωνα με τον τύπο:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.4)$$

όπου $x_i = 1, 2, \dots, n$ είναι οι τιμές του σήματος και n είναι το πλήθος των τιμών αυτών.

3. Τυπική απόκλιση, είναι ένα μέτρο της διασποράς του συνόλου των τιμών x_i από την μέση τιμή \bar{x} και υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4.5)$$

4. Κύρτωση, είναι μία έννοια που προσπαθεί να περιγράψει το σχήμα που έχει η κορυφή μιας κατανομής πιθανοτήτων. Ορίζεται ως τέταρτης τάξης στατιστική ροπή της κατανομής των δεδομένων, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\hat{\sigma}} \right)^4 \quad (4.6)$$

5. Λοξότητα, είναι μέτρο ασυμμετρίας της κατανομής του σήματος, γύρω από τη μέση τιμή. Αν η λοξότητα είναι αρνητική (θετική), τα δεδομένα διασπείρονται περισσότερο αριστερά (δεξιά), από τη μέση τιμή από ότι δεξιά (αριστερά). Η λοξότητα της κανονικής κατανομής είναι μηδέν. Η εξίσωση που εκφράζει την λοξότητα δίνεται από τον τύπο:

$$S = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\hat{\sigma}^3} \quad (4.7)$$

6. Ενέργεια του σήματος, ορίζεται ως εξής:

$$E_S = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (4.8)$$

7. Εντροπία, είναι το μέτρο της ομοιομορφίας της κατανομής των τιμών του σήματος:

$$H(x) = - \sum_{k=0}^{M-1} p_k \log_2 p_k \quad (4.9)$$

όπου $\{p_k\}$ ($k=0,1,\dots,M-1$) είναι οι εκτιμήτριες της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, $f(x)$, του διανύσματος x στα κέντρα του πυρήνα \bar{c}_k . Οι εκτιμήτριες μπορούν να υπολογιστούν με χρήση πυρήνων πυκνότητας (Parzen window) όπως περιγράφονται στο άρθρο (Duda, Hart, & Stork, 2001). Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, $f(x)$, του δείγματος προσεγγίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$f(x) \cong \frac{1}{Mh} \sum_{k=0}^{M-1} K\left(\frac{x-\bar{c}_k}{h}\right) \quad (4.10)$$

όπου $K(\bullet)$ είναι μία μη αρνητική συνάρτηση η οποία παίρνει τιμές από 0 έως 1 και έχει μέση τιμή μηδέν, η παράμετρος $h > 0$ είναι παράμετρος ομαλοποίησης. Μία ευρέως γνωστή συνάρτηση πυρήνας είναι η Γκαουσιανή και εκφράζεται ως εξής:

$$f(x) \cong \frac{1}{M\sqrt{2\pi}h} \sum_{k=0}^{M-1} e^{-\left(\frac{x-\bar{c}_k}{\sqrt{2}h}\right)^2} \quad (4.11)$$

Για την συνάρτηση Gauss η κατάλληλη επιλογή του h είναι :

$$h = \left(\frac{4\hat{\sigma}^5}{3M}\right)^{\frac{1}{5}} \approx 1.06\hat{\sigma}M^{-1/5} \quad (4.12)$$

Με $\hat{\sigma}$ να εκφράζει την τυπική απόκλιση του δείγματος.

4.2.3 Κατηγοριοποίηση με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

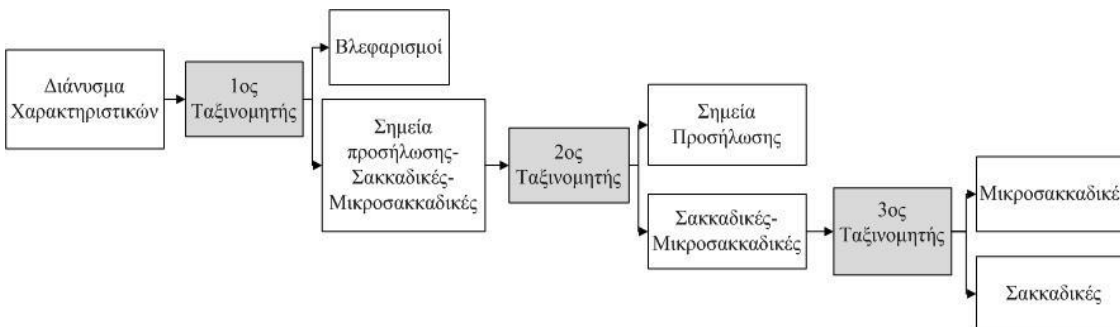
Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Network) παρέχουν έναν εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού εμπνευσμένο από τα βιολογικά μοντέλα σύμφωνα με τον οποίο οι υπολογισμοί γίνονται παράλληλα και μαζικά. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι μια συλλογή μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων στοιχείων επεξεργασίας που ονομάζονται νευρώνες οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους, λειτουργούν αρμονικά και είναι οργανωμένοι σε στρώματα. Κάθε νευρώνας έχει πολλές εισόδους αλλά μόνο μια έξοδο η οποία με την σειρά της μπορεί να αποτελέσει είσοδο για άλλους νευρώνες. Οι νευρώνες κατηγοριοποιούνται στους νευρώνες εισόδου, στους νευρώνες εξόδου και στους υπολογιστικούς ή κρυμμένους νευρώνες. Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων διαφέρουν και η σπουδαιότητα τους προσδιορίζεται από τον συντελεστή βάρους για κάθε σύναψη. Η συνεργασία νευρώνων καθορίζεται από την συνάρτηση μεταφοράς η οποία καθορίζει την κάθε έξοδο σε σχέση με τις εισόδους και τους συντελεστές βάρους. Η επεξεργασία κάθε νευρώνα καθορίζεται από την συνάρτηση ενεργοποίησης η οποία

ρυθμίζει την έξοδο σε σχέση με τις εισόδους και τους συντελεστές βάρους. Οι κρυμμένοι νευρώνες πολλαπλασιάζουν κάθε είσοδό τους με το αντίστοιχο βάρος και υπολογίζουν το ολικό άθροισμα των γινομένων, αυτό τροφοδοτείται ως όρισμα στη συνάρτηση ενεργοποίησης. Η τιμή που λαμβάνει η συνάρτηση για το συγκεκριμένο όρισμα είναι και η έξοδος του νευρώνα για τις τρέχουσες εισόδους και βάρη. Οι νευρώνες εισόδου, μεταφέρουν το σήμα στο επίπεδο εξόδου χωρίς να κάνουν καμία επεξεργασία ενώ δεν μεταφέρεται καμία πληροφορία αντίστροφα. Ο χαρακτηρισμός ενός επιπέδου καθορίζεται από το επίπεδο εξόδου σχετικά με το πλήθος των υπολογιστικών νευρώνων που περιέχει. Το επίπεδο εισόδου δεν προσμετράται γιατί δεν εκτελείται κανένας υπολογισμός σε αυτό.

Για να χρησιμοποιηθεί ένα δίκτυο πρέπει αρχικά να περάσει την διαδικασία εκπαίδευσης. Η μάθηση περιλαμβάνει αλλαγές στις συναπτικές σχέσεις (βάρη) που περιέχονται μεταξύ των νευρώνων. Συγκεκριμένα ένα μέρος της εκπαίδευσης αποτελεί τη διαδικασία προσδιορισμού των κατάλληλων συντελεστών βάρους το οποίο πραγματοποιείται με την βοήθεια κατάλληλων αλγορίθμων. Έπειτα από αυτή την διαδικασία το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι σε θέση να εκτελεί τους υπολογισμούς για τους οποίους εκπαιδεύτηκε χρησιμοποιώντας την εμπειρική γνώση που απέκτησε μέσω των βαρών που υπάρχουν στις συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων. Ο ρόλος των συντελεστών μάθησης μπορεί να ερμηνευτεί ως αποθήκευση γνώσης, η οποία παρέχεται στο σύστημα με την βοήθεια παραδειγμάτων κάτι που ισχύει και στα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα. Η εκπαίδευση γίνεται με δύο τρόπους: με επίβλεψη και χωρίς επίβλεψη. Η εκπαίδευση με επίβλεψη περιέχει την είσοδο μιας ομάδας από πρότυπα στο δίκτυο, αντιπροσωπευτικά ή παρόμοια με αυτά που θέλουμε να μάθει το δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι δίνουμε στο δίκτυο ως εισόδους κάποια πρότυπα για τα οποία ξέρουμε ποια πρέπει να είναι η έξοδος στο δίκτυο, ξέρουμε δηλαδή ποιος είναι ο στόχος, τι πρέπει να δίνει το δίκτυο ως απάντηση στα πρότυπα που του παρουσιάζουμε. Οι μέθοδοι εκπαίδευσης χωρίς επίβλεψη αναφέρονται ως αυτό-οργανώμενοι (self-organized) και βασίζονται μόνο σε τοπική πληροφορία σε όλη τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Οι αλγόριθμοι αυτοί οργανώνουν τα δεδομένα και ανακαλύπτουν σημαντικές συλλογικές ιδιότητες αυτών (Jiang, Trundle, & Ren, 2010).

Οι τέσσερις τύποι οφθαλμικών κινήσεων που θα ομαδοποιηθούν σε αυτή την εργασία είναι οι βλεφαρισμοί, οι σακκαδικές, οι μικροσακκαδικές και τα σημεία προσήλωσης. Ως μικροσακκαδικές ορίζονται οι σακκαδικές με πλάτος μικρότερο των 0.5° (He, Wei, Zhou, & Wang,

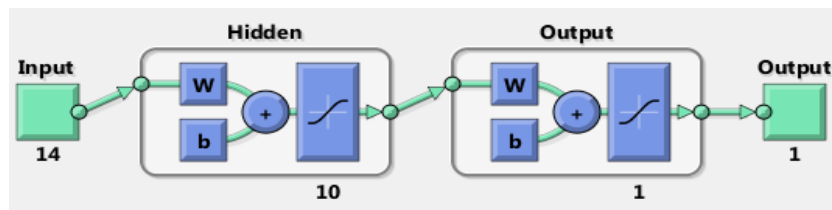
2012). Για την κατηγοριοποίηση αυτών χρησιμοποιήθηκε η εξής ιεραρχία στην αλληλουχία των τριών νευρωνικών δικτύων όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7: Αλληλουχία των ταξινομητών στην προτεινόμενη μεθοδολογία.

Ο πρώτος ταξινομητής διακρίτοποιεί τα διανύσματα χαρακτηριστικών που έχουν παραχθεί με χρήση του παραθύρου W_1 , και διακρίτοποιεί τους βλεφαρισμούς (ομάδα $C_{1,2}$) από τους μη βλεφαρισμούς (ομάδα $C_{1,1}$). Η ομάδα των μη βλεφαρισμών περιέχει τις σακκαδικές και τα σημεία προσήλωσης, έτσι αν δεν ανιχνευθεί ένας βλεφαρισμός ο δεύτερος ταξινομητής ενεργοποιείται για τον διαχωρισμό των σημείων προσήλωσης (ομάδα $C_{2,2}$) από τις σακκαδικές (ομάδα $C_{2,1}$). Τα σημεία του σήματος που αντιστοιχούν σε σακκαδικές περιέχουν σακκαδικές πλάτους μεγαλύτερου από $0,1^\circ$ και υπολογίζονται με χρήση του παραθύρου W_2 . Τελικά, αν το κομμάτι του σήματος μήκους W_2 δεν αντιστοιχεί σε σημείο προσήλωσης τότε ο τρίτος ταξινομητής ενεργοποιείται που διαχωρίζει τις μικρές σακκαδικές (ομάδα $C_{3,2}$) από τις μεγάλες (ομάδα $C_{3,1}$).

Κάθε ταξινομητής είναι ένα δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης ενός επιπέδου (feedforward). Πρόκειται για δίκτυο νευρώνων στο οποίο η έξοδος κάθε επιπέδου αποτελεί είσοδο του επομένου επιπέδου και ποτέ είσοδο για το ίδιο επίπεδο. Ένα παράδειγμα τέτοιου δικτύου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα Εικόνα 4.8:



Εικόνα 4.8: Ταξινομητής (Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο) με μία είσοδο, 10 υπολογιστικούς νευρώνες και μία έξοδο που δίνει τιμές 0 ή 1.

Τα νευρωνικά δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τριών επιπέδων, με επίπεδο εισόδου ενός νευρώνα, κρυφό επίπεδο με 10 νευρώνες και επίπεδο εξόδου ενός νευρώνα. Ύστερα από πειράματα, επιλέχθηκε κρυφό επίπεδο με 10 στο πλήθος νευρώνες ώστε τα αποτελέσματα να είναι ακριβή και ο χρόνος υπολογισμού σύντομος. Κάθε ταξινομητής δοκιμάστηκε με διαφορετικό πλήθος νευρώνων 5, 10, 15 και 20 στο κρυμμένο επίπεδο. Ένα υποσύνολο των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος σε κάθε δίκτυο και παρατηρήθηκε ότι η ακρίβεια παρουσιάζει μειωμένες τιμές όταν χρησιμοποιήθηκαν 5 νευρώνες ενώ δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες διακυμάνσεις όταν οι νευρώνες ήταν 10, 15, και 20 στο πλήθος (Πίνακας 4.1). Έτσι, επιλέξαμε τη χρήση 10 νευρώνων ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα του συστήματος. Τέλος, η διαδικασία εκπαίδευσης ολοκληρώνεται σε 1.000 εποχές και δίνει υψηλή ακρίβεια. Η τιμή αυτή δεν επιλέχθηκε τυχαία, αλλά καθορίστηκε από την ακρίβεια της σωστής ταξινόμησης (Πίνακας 4.1). Το επίπεδο εξόδου αποτελείται από έναν νευρώνα που διαχωρίζει δύο ομάδες. Οι τιμές της εξόδου είναι 0 ή 1. Για τη αποφυγή της υπέρ-εκπαίδευσης το σύνολο των δεδομένων διαχωρίστηκε σε σύνολο εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ελέγχου. Κάθε τεχνητό νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύτηκε με το σύνολο εκπαίδευσης και τα βάρη που οδηγούν στην καλύτερη επαλήθευση αποθηκεύτηκαν.

Πίνακας 4.1: Απόδοση των τριών ταξινομητών για τις διαφορετικές τιμές του πλήθους των νευρώνων και των εποχών.

| Πλήθος εποχών | Πλήθος νευρώνων | Απόδοση Πρώτου Ταξινομητή | Απόδοση Δεύτερου Ταξινομητή | Απόδοση Τρίτου Ταξινομητή |
|---------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1000 | 5 | 99,8% | 93,0% | 90,7% |
| | 10 | 99,8% | 97,5% | 95,9% |
| | 15 | 99,8% | 97,0% | 91,0% |
| | 20 | 99,8% | 93,3% | 92,5% |
| 2000 | 5 | 99,8% | 97,1% | 92,9% |
| | 10 | 98,4% | 97,0% | 93,4% |
| | 15 | 99,8% | 97,5% | 92,4% |
| | 20 | 99,8% | 97,1% | 84,6% |
| 3000 | 5 | 99,8% | 96,7% | 95,2% |
| | 10 | 99,8% | 97,1% | 91,3% |
| | 15 | 99,8% | 97,1% | 90,7% |
| | 20 | 99,9% | 96,7% | 90,5% |

Κάθε δίκτυο εκπαιδεύτηκε με δέκα διαφορετικά υποσύνολα, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο συζυγών κλίσεων ανάστροφης οπισθοδρόμησης (scaled conjugate gradient backpropagation algorithm) (Moller, 1993). Πρόκειται για μια οικογένεια αλγορίθμων, οι οποίοι σε κάθε βήμα εκτελούν τοπική αναζήτηση προσπαθώντας να βρουν την βέλτιστη τιμή αλλά και την βέλτιστη κατεύθυνση μεταβολής των βαρών, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η διαφορά μεταξύ των επιθυμητών εξόδων και των εκάστοτε εξόδων του δικτύου. Συνήθως πετυχαίνουν πολύ καλά αποτελέσματα, επιταχύνοντας κατά 10-100 φορές τη διαδικασία της εκπαίδευσης.

Το σύνολο εκπαίδευσης αποτελεί το 60% του συνόλου των δεδομένων, το οποίο αντιστοιχεί σε 1.401 σήματα. Τα υπόλοιπα διανύσματα χαρακτηριστικών διαμοιράζονται σε σύνολο επαλήθευσης (20%) και σε σύνολο ελέγχου (20%), αντιστοιχούν 467 σήματα στο κάθε σύνολο. Εφόσον σε κάθε σήμα ο αριθμός των οφθαλμικών κινήσεων είναι διαφορετικός, το πλήθος των διανυσμάτων χαρακτηριστικών που χρησιμοποιείται σε κάθε υποσύνολο είναι διαφορετικό. Κατά μέσο όρο, στον πρώτο ταξινομητή, που διαχωρίζει βλεφαρισμούς από μη βλεφαρισμούς, 649.236 διανύσματα χαρακτηριστικών εξήχθησαν με τη χρήση του παραθύρου W1. Ο μέσος όρος του συνόλου εκπαίδευσης είναι 405.737 διανύσματα χαρακτηριστικών, το σύνολο ελέγχου αποτελείται από 118.791 για την κλάση C_{1,1} (μη βλεφαρισμοί) και 2.958 για την κλάση C_{1,2} (βλεφαρισμοί). Στον δεύτερο ταξινομητή, 633.224 διανύσματα χαρακτηριστικών εξήχθησαν με χρήση του παραθύρου W2, από τα μέρη του σήματος που δεν περιείχαν βλεφαρισμούς. Ο μέσος όρος των διανυσμάτων χαρακτηριστικών για το σύνολο εκπαίδευσης ήταν 413.122, ενώ για το σύνολο ελέγχου στην κλάση C_{2,1} (όχι σημεία προσήλωσης) είναι 21.456 και για την κλάση C_{2,2} (σημεία προσήλωσης) είναι 88.595. Τέλος, εξήχθησαν 127.750 διανύσματα χαρακτηριστικών με χρήση του παραθύρου W2, από τα σημεία του σήματος που δεν περιείχαν βλεφαρισμούς και σημεία προσήλωσης. Ο μέσος όρος των διανυσμάτων εκπαίδευσης είναι 76.650, ο μέσος όρος των διανυσμάτων ελέγχου είναι 12.267 για την ομάδα C_{3,1} (σακκαδικές) και 13.283 για την ομάδα C_{3,2} (μικροσακκαδικές).

Τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης των οφθαλμικών κινήσεων σε κάθε ομαδοποιητή αξιολογούνται από τις τιμές των παραμέτρων ειδικότητας (specificity) και ευαισθησίας (sensitivity). Συγκεκριμένα, η απόδοση του κάθε ταξινομητή υπολογίζεται ως εξής:

- Ειδικότητα για τον ταξινομητή i, $SPEC_i = 100 \times M_{i,1} / N_{i,1}$
- Ευαισθησία για τον ταξινομητή i, $SENS_i = 100 \times M_{i,2} / N_{i,2}$
- Ακρίβεια για τον ταξινομητή i, $ACC_i = 100 \times (M_{i,1} + M_{i,2}) / (N_{i,1} + N_{i,2})$

όπου ως $N_{i,j}$ συμβολίζεται το πλήθος των διανυσμάτων χαρακτηριστικών που ανήκουν στο σύνολο ελέγχου και τα οποία πράγματι αντιστοιχούν στην ομάδα $C_{i,j}$. Ως $M_{i,j}$ συμβολίζεται το πλήθος των διανυσμάτων χαρακτηριστικών που ανήκουν στο σύνολο ελέγχου και τα οποία πράγματι αντιστοιχούν στην ομάδα j που ταξινομούνται σωστά από τον αντίστοιχο ταξινομητή i με $i = 1, 2, 3$ και $j = 1, 2$.

4.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα του συνόλου ελέγχου παρουσιάζονται στη συνέχεια μέσω των πινάκων διασύνδεσης (confusion matrix) και των ROC καμπυλών για κάθε ταξινομητή. Ο πίνακας διασύνδεσης κάθε ταξινομητή εμπεριέχει τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων από 10 διαφορετικά τρεξίματα όπως αναφέραμε προηγουμένως. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα των τιμών της ευαισθησίας, της ειδικότητας και της ακρίβειας εμφανίζονται στους πίνακες. Επίσης, για κάθε ταξινομητή ο ρυθμός της σωστής ταξινόμησης των διανυσμάτων χαρακτηριστικών έναντι αυτών που δεν ταξινομούνται σωστά παρουσιάζεται με τη μορφή ROC καμπύλης.

4.3.1 Διαχωρισμός βλεφαρισμών από τις υπόλοιπες οφθαλμικές κινήσεις (1^{ος} ταξινομητής)

Ο μέσος όρος των μετρήσεων για τον πρώτο ταξινομητή δίνει ευαισθησία 99,9%, ειδικότητα 97,1% και ακρίβεια 99,8%. Ο Πίνακας 4.2 δείχνει τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων ταξινόμησης των διανυσμάτων χαρακτηριστικών του συνόλου ελέγχου. Στην Εικόνα 4.9(α) φαίνεται η ακρίβεια του πρώτου ταξινομητή, η οποία παραμένει υψηλή σε κάθε κλάση για διαφορετικές τιμές του κατωφλίου διαχωρισμού.

Πίνακας 4.2: Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων ταξινόμησης των διανυσμάτων χαρακτηριστικών από τον πρώτο κατηγοριοποιητή ύστερα από 10 δοκιμές με διαφορετικά σύνολα εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ελέγχου.

| Πραγματική κλάση | Προβλεπόμενη κλάση | | | |
|------------------|--------------------|------------------|-------|-------------------|
| | C _{1,1} | C _{1,2} | | |
| C _{1,1} | 118.703 | 88 | 99,9% | Ευαισθησία |
| C _{1,2} | 86 | 2.872 | 97,1% | Ειδικότητα |
| | | | 99,8% | Ακρίβεια |

4.3.2 Διαχωρισμός σημείων προσήλωσης από τις σακκαδικές κινήσεις (2^{ος} ταξινομητής)

Ο μέσος όρος των ευαισθησία, ειδικότητα και ακρίβεια είναι 95,5%, 98,0% και 97,5%, αντίστοιχα. Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζεται ο πίνακας διασύνδεσης με τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων ταξινόμησης των διανυσμάτων χαρακτηριστικών του συνόλου ελέγχου. Στην Εικόνα 4.9(β) φαίνεται η ακρίβεια του δεύτερου ομαδοποιητή, η οποία παραμένει υψηλή σε κάθε κλάση για διαφορετικές τιμές του κατωφλίου διαχωρισμού.

Πίνακας 4.3: Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων ταξινόμησης των διανυσμάτων χαρακτηριστικών από τον δεύτερο κατηγοριοποιητή ύστερα από 10 δοκιμές με διαφορετικά σύνολα εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ελέγχου .

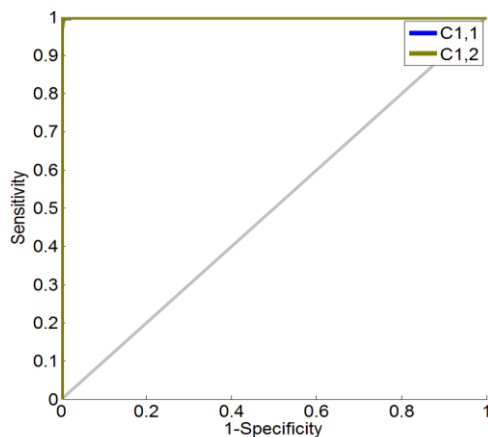
| Πραγματική κλάση | Προβλεπόμενη κλάση | | | |
|------------------|--------------------|------------------|-------|-------------------|
| | C _{2,1} | C _{2,2} | | |
| C _{2,1} | 20.484 | 972 | 95,5% | Ευαισθησία |
| C _{2,2} | 1.737 | 86.858 | 98,0% | Ειδικότητα |
| | | | 97,5% | Ακρίβεια |

4.3.3 Διαχωρισμός των σακκαδικών από μικροσακκαδικές (3^{ος} ταξινομητής)

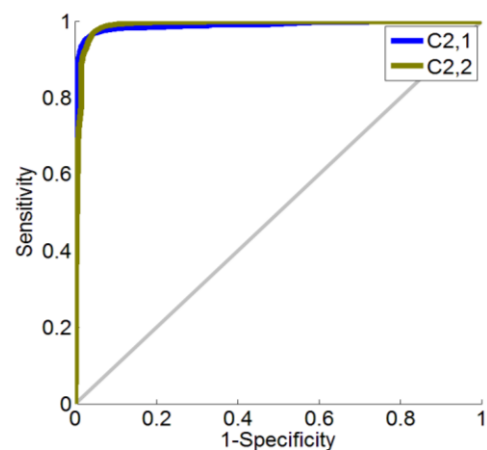
Ο μέσος όρος των ευαισθησία, ειδικότητα και ακρίβεια είναι 95,9%, 96,0% και 95,9%,, αντίστοιχα. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται ο πίνακας διασύνδεσης με τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων ταξινόμησης των διανυσμάτων χαρακτηριστικών του συνόλου ελέγχου. Στην Εικόνα 4.9(γ) φαίνεται η ακρίβεια του δεύτερου ταξινομητή, η οποία παραμένει υψηλή σε κάθε κλάση για διαφορετικές τιμές του κατωφλίου διαχωρισμού.

Πίνακας 4.4: Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων κατηγοριοποίησης των διανυσμάτων χαρακτηριστικών του συνόλου ελέγχου από τον τρίτο ταξινομητή ύστερα από 10 δοκιμές με διαφορετικά σύνολα εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ελέγχου.

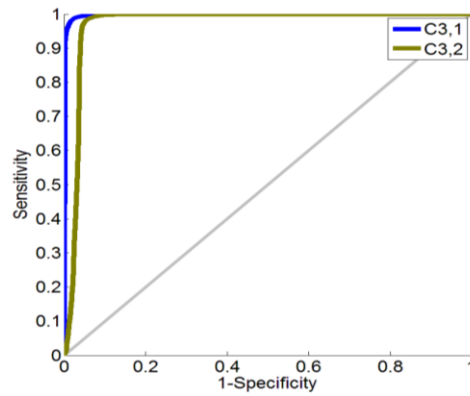
| Πραγματική κλάση | Προβλεπόμενη κλάση | | | |
|------------------|--------------------|-----------|-------|-------------------|
| | $C_{3,1}$ | $C_{3,2}$ | | |
| $C_{3,1}$ | 11.761 | 506 | 95,9% | Ευαισθησία |
| $C_{3,2}$ | 531 | 12.752 | 96,0% | Ειδικότητα |
| | | | 95,9% | Ακρίβεια |



α)



β)



γ)

Εικόνα 4.9: Οι Roc καμπύλες του συνόλου ελέγχου για κάθε ταξινομητή (α-γ).

4.4 Η διαδικασία επιλογής καλύτερων χαρακτηριστικών

Η κατοχύρωση της σημαντικότητας των χαρακτηριστικών που επιλέχθηκαν επιβεβαιώθηκε μέσω της διαδικασίας Σειριακής Εμπρόσθιας Μεταβλητής Επιλογής SFFS (Sequential Forward Floating Selection). Η μέθοδος της Σειριακής Εμπρόσθιας Επιλογής (SFS) αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη της SFFS. Ο αλγόριθμος αυτός ξεκινά από ένα κενό σύνολο και προσθέτει συνεχώς χαρακτηριστικά σύμφωνα με κάποιο μέτρο, όπως η βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός νευρωνικού δικτύου. Το πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν επαναπροσδιορίζει τα χαρακτηριστικά που έχουν επιλεγεί, αυτό αποκαλείται φαινόμενο φωλιάσματος (nesting effect). Η εξέλιξη του αλγορίθμου είναι ένας επιπλέον μηχανισμός επανεξέτασης όλων των χαρακτηριστικών του υποσυνόλου που δημιουργείται σε κάθε επανάληψη ώστε να επιλεγεί ο καλύτερος συνδυασμός αυτών. Η μεθοδολογία στηρίζεται στην εξαγωγή ενός υποσυνόλου χαρακτηριστικών, από το σύνολο των δεκατεσσάρων (14) αρχικών, που περιέχουν επαρκή πληροφορία για το ζητούμενο διαχωρισμό των οφθαλμικών κινήσεων (Somola, Pudil, Nononičová, & Paclík, 1999). Ο αλγόριθμος SFFS κάνει χρήση του αλγορίθμου Fuzzy C-Means και η αρχή λειτουργίας του είναι η εξής:

Επιλέγεται $k = 0$ και $X_0 = \emptyset$, στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αλγόριθμος SFS μέχρις ώτου να προκύψει το X_2 , δηλαδή ένα σύνολο με δύο χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια ακολουθούνται διαδοχικά τα παρακάτω βήματα μέχρις ώτου να προκύψει το καλύτερο υποσύνολο με το πλήθος των χαρακτηριστικών που έχει οριστεί.

1. Αρχική Επιλογή

Έστω το σύνολο των V χαρακτηριστικών που συγκροτούν ένα σύνολο μετρήσεων X_ν και X_κ το υποσύνολο αυτού. Έστω $\Phi(X_\kappa)$ η αντίστοιχη συνάρτηση αξιολόγησης. Με τη μέθοδο SFS επιλέγεται αρχικά το σημαντικότερο χαρακτηριστικό $x_{\kappa+1}$ του συνόλου X_κ από το σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων $X_\nu - X_\kappa$ ώστε να σχηματιστεί το σύνολο $X_{\kappa+1} = X_\kappa + x_{\kappa+1}$.

2. Εξαίρεση υπό συνθήκη

Απομακρύνει μέσω της συνθήκης $\Phi(X_\nu)$ το λιγότερο σημαντικό χαρακτηριστικό στο σύνολο $X_{\kappa+1}$. Έστω το $x_{\kappa+1}$ το λιγότερο σημαντικό χαρακτηριστικό του X_κ , τότε $\Phi(X_{\kappa+1} - x_{\kappa+1}) \geq \Phi(X_{\kappa+1} - x_j)$ για κάθε $j = 1, 2, \dots, \kappa$. Θέσε $k = \kappa + 1$ και επέστρεψε στο βήμα 1.

Αν τώρα κάποιο άλλο στοιχείο $x_s, 1 \leq s \leq \kappa$ του διαμορφωμένου συνόλου X_κ είναι το λιγότερο σημαντικό στο σύνολο $X_{\kappa+1}$, δηλαδή ισχύει $\Phi(X_{\kappa+1} - x_p) \geq \Phi(X_\kappa)$, τότε αφαιρείται το στοιχείο x_p από το $X_{\kappa+1}$, οπότε προκύπτει το σύνολο $X'_\kappa = X_{\kappa+1} - x_p$. Αν $k = 2$ τότε θέσε $X_\kappa = X'_\kappa$ και $\Phi(X_\kappa) = \Phi(X'_\kappa)$ και επέστρεψε στο πρώτο βήμα, διαφορετικά προχώρα στο βήμα 3.

3. Συνέχιση εξαίρεσης υπό συνθήκη

Έστω $x_s, 1 \leq s \leq \kappa$ το λιγότερο σημαντικό στοιχείο στο σύνολο X'_κ . Αν ισχύει $\Phi(X'_{\kappa-1}) \geq \Phi(X'_\kappa - x_s)$ τότε θέσε $X_\kappa = X'_\kappa$ και $\Phi(X_\kappa) = \Phi(X'_\kappa)$ και επέστρεψε στο βήμα 1. Αν όμως $\Phi(X'_{\kappa-1}) < \Phi(X'_\kappa - x_s)$ τότε απομάκρυνε το x_s από το X'_κ καταλήγοντας στο σύνολο $X'_{\kappa-1} = X'_\kappa - x_s$.

Θέσε $k = k - 1$. Αν $k = 2$ τότε θέσε $X_\kappa = X'_\kappa$ και $\Phi(X_\kappa) = \Phi(X'_\kappa)$ και επέστρεψε στο βήμα 1. Διαφορετικά προχώρα στο βήμα 3.

Η χρήση του αλγόριθμου SFFS έφερε ελάχιστα διαφοροποιημένα αποτελέσματα για κάθε ταξινομητή. Τα χαρακτηριστικά που διαχωρίζουν καλύτερα τους βλεφαρισμούς από τις υπόλοιπες κινήσεις, με βάση των αλγόριθμο SFFS, ήταν: η τυπική απόκλιση, η λοξότητα και η ενέργεια της γωνιακής απόκλισης, ενώ από το σήμα της ταχύτητας επιλέχτηκαν η μέγιστη τιμή, η τυπική απόκλιση, η λοξότητα, η εντροπία και η ενέργεια της γωνιακής ταχύτητας. Η συνολική ακρίβεια του πρώτου σταδίου ταξινόμησης υπολογίστηκε τώρα να είναι 99,7%, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5, ενώ η αντίστοιχη ROC καμπύλη για κάθε κλάση διαχωρισμού του πρώτου ταξινομητή φαίνεται στην Εικόνα 4.10(α).

Πίνακας 4.5: Τα αποτελέσματα του πρώτου ταξινομητή με χρήση των επιλεγμένων χαρακτηριστικών από τον αλγόριθμο SFFS.

| Πραγματική κλάση | Προβλεπόμενη κλάση | | | |
|------------------|--------------------|------------------|-------|-------------------|
| | C _{1,1} | C _{1,2} | | |
| C _{1,1} | 126.407 | 265 | 99,8% | Ευαισθησία |
| C _{1,2} | 173 | 3.002 | 94,6% | Ειδικότητα |
| | | | 99,7% | Ακρίβεια |

Για το δεύτερο στάδιο ταξινόμησης, κατά το οποίο διαχωρίζονται τα σημεία προσήλωσης από τις σακκαδικές η χρήση του SFFS υπέδειξε ως καλύτερα χαρακτηριστικά τα εξής: μέση τιμή, τυπική απόκλιση, λοξότητα και ενέργεια του σήματος της γωνιακής απόκλισης, ενώ από το σήμα της ταχύτητας επιλέχθηκαν η μέγιστη τιμή, η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, η λοξότητα, η εντροπία και η ενέργεια του σήματος. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου επιλογής χαρακτηριστικών, SFFS, φαίνονται στον Πίνακα 4.6 και στην Εικόνα 4.10(β), όπου επετεύχθη συνολική ακρίβεια 96,7%.

Πίνακας 4.6: Τα αποτελέσματα του δεύτερου ταξινομητή με χρήση των επιλεγμένων χαρακτηριστικών από τον αλγόριθμο SFFS.

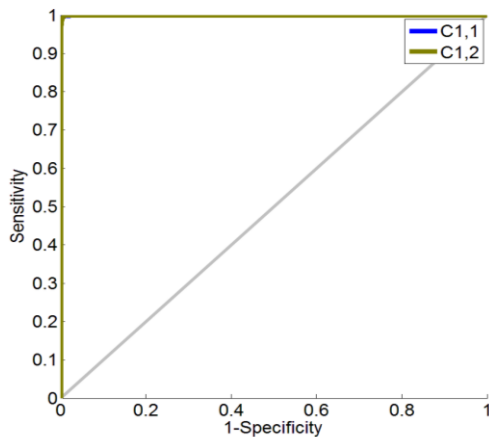
| Πραγματική κλάση | Προβλεπόμενη κλάση | | | |
|------------------|--------------------|------------------|-------|-------------------|
| | C _{2,1} | C _{2,2} | | |
| C _{2,1} | 20.069 | 1.064 | 95,0% | Ευαισθησία |
| C _{2,2} | 2.593 | 88.501 | 97,2% | Ειδικότητα |
| | | | 96,7% | Ακρίβεια |

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου επιλογής χαρακτηριστικών, SFFS για τον τρίτο ταξινομητή, φαίνονται στον Πίνακα 4.7 και στην Εικόνα

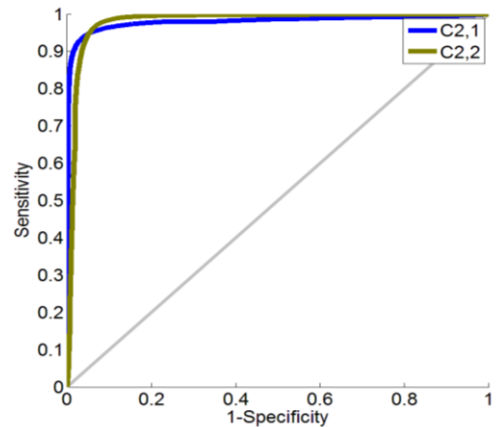
4.10(γ), αντίστοιχα, όπου επετεύχθη συνολική ακρίβεια 73,2% και έγινε επιλογή των χαρακτηριστικών της τυπικής απόκλισης και της λοξότητας του σήματος της γωνιακής απόκλισης και από το σήμα της γωνιακής ταχύτητας επιλέχτηκαν η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, η λοξότητα και η ενέργεια.

Πίνακας 4.7: Τα αποτελέσματα του τρίτου ταξινομητή με χρήση των επιλεγμένων χαρακτηριστικών από τον αλγόριθμο SFFS.

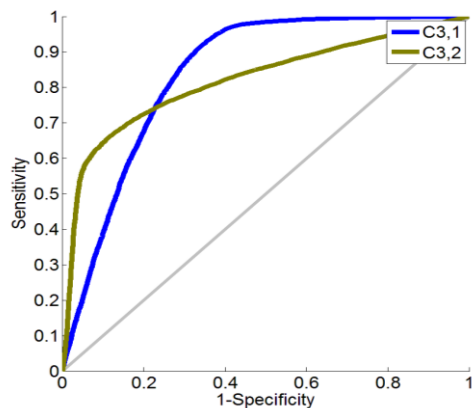
| Πραγματική κλάση | Προβλεπόμενη κλάση | | | |
|------------------|--------------------|-----------|-------|-------------------|
| | $C_{3,1}$ | $C_{3,2}$ | | |
| $C_{3,1}$ | 8.186 | 2.831 | 74,3% | Ευαισθησία |
| $C_{3,2}$ | 4.159 | 10.917 | 72,4% | Ειδικότητα |
| | | | 73,2% | Ακρίβεια |



α)



β)



γ)

Εικόνα 4.10: Οι Roc καμπύλες των αποτελεσμάτων του συνόλου ελέγχου από τους τρεις ταξινομητές (α-γ).

4.5 Απόδοση του συστήματος.

Η μεταφορά του σφάλματος διαδοχικά στους ταξινομητές παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.8. Παρατηρείται ότι ο τρίτος ταξινομητής έχει μικρή απόδοση καθώς το σφάλμα των προηγούμενων ταξινομητών μεταφέρεται διαδοχικά στον τελευταίο ταξινομητή.

Πίνακας 4.8: Απόδοση του προτεινόμενου συστήματος για την ανίχνευση όλων των ειδών οφθαλμικών κινήσεων.

| Τύποι οφθαλμικών κινήσεων | Βλεφαρισμοί | Σημεία Προσήλωσης | Σακκαδικές | Μικροσακκαδικές |
|---------------------------|-------------|-------------------|------------|-----------------|
| Ακρίβεια | 97,1% | 97,9% | 91,5% | 91,6% |

4.5.1 Ταξινόμηση ανά διαδικασία προσήλωσης

Η απόδοση της προτεινόμενης μεθοδολογίας από τον συνδυασμό των τριών ταξινομητών εξετάστηκε ανά διαδικασία προσήλωσης και παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.9. Όπως παρατηρείται, η διαδικασία στην οποία υποβλήθηκαν οι συμμετέχοντες δεν επηρεάζει την

απόδοση του συστήματος. Επίσης, σε κάθε διαδικασία προσήλωσης εφαρμόστηκαν δύο ευρέως διαδεδομένοι μέθοδοι ανίχνευσης των σακκαδικών (Velocity Threshold) και των μικροσακκαδικών (Μέθοδος Ομαδοποίησης) οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια και τα αποτελέσματα σύγκρισης επίσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9.

4.5.2 Σύγκριση με άλλους αλγορίθμους

4.5.2.1 Αλγόριθμος Velocity Threshold

Η προτεινόμενη μεθοδολογία, συγκρίθηκε με τον ευρέως διαδεδομένο Velocity Threshold algorithm όπως παρουσιάζεται στο άρθρο (Holmqvist & Nyström, 2010), για τον διαχωρισμό των σημείων προσήλωσης από τις υπόλοιπες οφθαλμικές κινήσεις και για τον διαχωρισμό των σακκαδικών από μικροσακκαδικές, σε σήματα τα οποία έχουν υποστεί την προεπεξεργασία και έχει γίνει απομάκρυνση των βλεφαρισμών. Η βασική μεθοδολογία του αλγορίθμου είναι η επιλογή ενός κατωφλίου στο σήμα της ταχύτητας, μεταξύ των τιμών $100^\circ / second - 300^\circ / second$. Για τα σημεία του σήματος που έχουν ταχύτητα κάτω από αυτή την τιμή του κατωφλίου PT_0 , η μέση τιμή, μ_0 , και η τυπική απόκλιση, σ_0 , υπολογίζονται. Το κατώφλι επαναυπολογίζεται με βάση αυτές τις τιμές ως εξής, $PT_1 = \mu_0 + 6\sigma_0$. Σύμφωνα με την εργασία (Holmqvist & Nyström, 2010) η άθροιση του $6\sigma_0$ στην μέση τιμή εξασφαλίζει ότι ο αλγόριθμος προτείνεται να εφαρμοστεί στην ανίχνευση των μικροσακκαδικών (Engbert & Kliegl, 2003). Η διαδικασία υπολογισμού του νέου κατωφλίου συνεχίζεται μέχρις ότου η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών αυτών να μην ξεπερνά την $1^\circ / second$. Το κατώφλι σταθεροποιείται και ακολουθεί η ανίχνευση των κορυφών του σήματος που έχουν ταχύτητα πάνω από αυτό το κατώφλι. Αυτά τα σημεία θεωρούνται κορυφές των σακκαδικών. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος ψάχνει οπισθοδρομικά και εμπρόσθια για την ανίχνευση της έναρξης και του τερματισμού, αντίστοιχα. Η έναρξη και ο τερματισμός των σακκαδικών είναι εύκολο να ανιχνευθούν εξαιτίας της διακεκριμένης μορφής αυτών στο σήμα της ταχύτητας, θεωρώντας ως σημεία επιλογής εκείνα που παρουσιάζουν μηδενική ταχύτητα ακριβώς δεξιά και αριστερά της κορυφής. Ο αλγόριθμος επιλέχθηκε καθώς είναι ένας από τους πιο ευρέως διαδεδομένους στην ανίχνευση σακκαδικών. Η ακρίβεια του αλγορίθμου εκτιμήθηκε από ειδικούς ιατρούς, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα,

είναι φανερό ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρέχει υψηλότερη διακριτική ικανότητα στην ανίχνευση σακκαδικών και μικρών σακκαδικών σε κάθε διαδικασία προσήλωσης.

4.5.2.2 Μέθοδος Ομαδοποίησης (Clustering Method)

Η προτεινόμενη μεθοδολογία συγκρίθηκε με τον αλγόριθμο που παρουσιάζεται στην εργασία (Otero-Millan, Alba Castro, Martinez-Conde, & Macknik L, 2014), ο οποίος βασίζεται σε τεχνικές ομαδοποίησης για την ανίχνευση ενός κατωφλίου διαχωρισμού μεταξύ σακκαδικών και μικρών σακκαδικών. Ο αλγόριθμος παρουσιάζει αρκετά υψηλή ακρίβεια συγκριτικά με άλλες μεθόδους για δεδομένα καταγραφής οφθαλμικών κινήσεων από τα δύο μάτια ή από το ένα. Βασιζόμενος σε παραμέτρους όπως η ταχύτητα και η επιτάχυνση των σακκαδικών-μικροσακκαδικών ανιχνεύει ένα κατώφλι διαχωρισμού ως προς το πλάτος αυτών.

Για την σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δεδομένα με εκείνα του τρίτου ταξινομητή της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Ο αλγόριθμος ανίχνευσε όλα τα μικροσακκαδικά με ακρίβεια 100% και παρουσίασε υψηλότερη ακρίβεια από τον αλγόριθμο Velocity Threshold algorithm σε κάθε διαδικασία προσήλωσης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία παρουσιάζει την υψηλότερη ακρίβεια (Πίνακας 4.9).

Πίνακας 4.9: Απόδοση της προτεινόμενης μεθοδολογίας στις τρεις διαφορετικές διαδικασίες προσήλωσης και σύγκριση των ταξινομητών με τις μεθόδους Velocity Threshold και Μέθοδο Ομαδοποίησης.

| Διαδικασία Ταξινόμησης | Μεθοδολογία | Διαδικασία Προσήλωσης | | |
|---|---------------------------------|-----------------------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Βλεφαρισμοί vs. Σακκαδικές-Σημεία Προσήλωσης | Προτεινόμενη Μέθοδος | 96,3% | 96,3% | 95,2% |
| | Velocity Threshold Algorithm | - | - | - |
| | Μέθοδος Ομαδοποίησης | - | - | - |

| | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
| Σημεία Προσέλωσης vs. Σακκαδικές | Προτεινόμενη Μέθοδος | 87,4% | 93,1% | 92,1% |
| | Velocity Threshold Algorithm | 84,0% | 93,0% | 95,0% |
| | Μέθοδος Ομαδοποίησης | - | - | - |
| Μικροσακκαδικές vs. Σακκαδικές | Προτεινόμενη Μέθοδος | 87,2% | 92,5% | 92,0% |
| | Velocity Threshold Algorithm | 79,0% | 47,0% | 69,7% |
| | Μέθοδος Ομαδοποίησης | 76,4% | 75,5% | 75,6% |

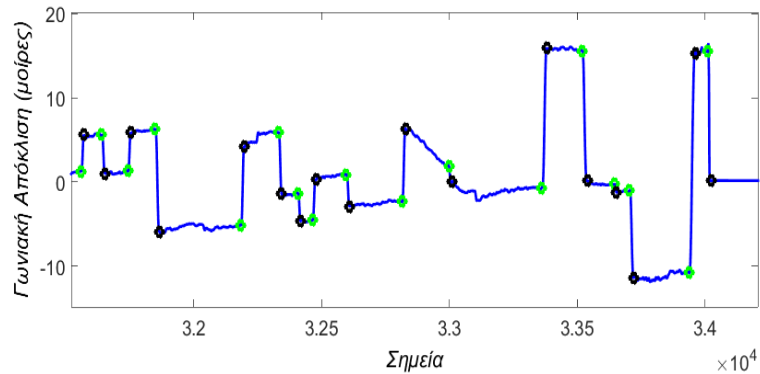
4.5.3 Ανίχνευση σακκαδικών σε σήματα που έχουν καταγραφεί με την κάμερα ISCAN ETL-200.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία δοκιμάστηκε επίσης σε ένα σύνολο οφθαλμικών κινήσεων που έχουν καταγραφεί με χρήση κάμερας. Τα νευρωνικά δίκτυα που παρουσιάζουν την καλύτερη απόδοση στα δεδομένα καταγραφής από τη συσκευή IRIs SCALAR αποθηκεύτηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία των δεδομένων από την κάμερα χωρίς περαιτέρω εκπαίδευση. Το πείραμα περιγράφεται στην εργασία (Flessas, et al., 2014). Εν συντομία, οριζόντιες και κάθετες σακκαδικές εκτελέστηκαν από τριάντα (30) συμμετέχοντες ενώ εκείνοι παρακολουθούσαν δύο βίντεο ρυθμικής γυμναστικής διάρκειας 2'29" και 2'30" αντίστοιχα, με ένα διάλειμμα λίγων λεπτών μεταξύ τους. Τα βίντεο δεν περιείχαν ήχο. Μία βάση χρησιμοποιήθηκε για την σταθεροποίηση του κεφαλιού των συμμετεχόντων. Από τους συμμετέχοντες ζητήθηκε να επαληθευτεί η επιτυχία των διαγωνιζόμενων στην ακολουθία των

κινήσεων που τους είχε επιβληθεί, γνωρίζοντας την ακολουθία των κινήσεων που έπρεπε να πραγματοποιήσουν. Οι καταγεγραμμένες οφθαλμικές κινήσεις προέρχονται από το δεξί μάτι των συμμετεχόντων. Η καταγραφή έγινε με την κάμερα ISCAN ETL-200 με συχνότητα δειγματοληψίας 240Hz. Οι διαστάσεις του βίντεο επιλέχτηκαν να είναι το μέγιστο 20' οριζόντιας απόκλισης και 15' μέγιστης κάθετης απόκλισης από το κέντρο της οθόνης. Η χωρική απόκλιση της κίνησης του οφθαλμού ήταν 0,07° και 0,12° στο οριζόντιο και κάθετο άξονα, αντίστοιχα. Κάθε συμμετέχων πριν την έναρξη της διαδικασίας ακολούθησε μία διαδικασία βαθμονόμησης η οποία περιελάμβανε ένα επίπεδο εννέα σημείων και έναν κινούμενο λευκό στόχο, έχοντας ως φόντο σκηνές που περιείχαν τα βίντεο. Η διαδικασία βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε πριν και μετά το πείραμα ώστε να επιβεβαιωθούν τα ποσοστά ακρίβειας.

Για την ανίχνευση των σακκαδικών χρησιμοποιήθηκε παράθυρο W2 διαφορετικού μήκους από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στα δεδομένα καταγραφής από το IRIS SCALAR, καθώς η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 240 δείγματα/δευτερόλεπτο και τότε το παράθυρο W2 διάρκειας 13ms θα αντιστοιχούσε σε $240 \frac{13}{1000} \cong 3$ δείγματα το οποίο δεν επαρκή για τον υπολογισμό των 14 χαρακτηριστικών της κάθε οφθαλμικής κίνησης. Έτσι, στα σήματα από την κάμερα επιβλήθηκε επανα-δειγματοληψία με συχνότητα 600Hz με χρήση της εντολής *resample* του Matlab. Στη συνέχεια, η ομάδα ειδικών από το Αιγηνήτειο Νοσοκομείο ανίχνευσαν με οπτική εξέταση τις διάφορες οφθαλμικές κινήσεις σε ένα υποσύνολο των 702 σημάτων συνολικά που καταγράφηκαν από την κάμερα και τα αποτελέσματα της οπτικής επίβλεψης χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των ποσοστών ακριβείας. Συνολικά, 11.188 διανύσματα χαρακτηριστικών προέκυψαν για την κλάση C_{1,1} (όχι βλεφαρισμοί) και 845 διανύσματα χαρακτηριστικών για την κλάση C_{1,2} (βλεφαρισμοί). Επίσης, 3.724 διανύσματα χαρακτηριστικών προέκυψαν για την κλάση C_{2,1} (όχι σημεία προσήλωσης) και 7.464 διανύσματα χαρακτηριστικών επιλέχτηκαν για την κλάση C_{2,2} (σημεία προσήλωσης). Για την κλάση C_{3,1} (σακκαδικές) τα διανύσματα χαρακτηριστικών ήταν 2.547 και για την κλάση C_{3,2} (μικροσακκαδικές) ήταν 1.029. Τα αποτελέσματα κατηγοριοποίησης των τριών ταξινομητών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.10. Η συνολική ακρίβεια είναι 98,2%, οι τιμές των ευαισθησία και ειδικότητα για τους βλεφαρισμούς είναι 97,7% και 98,2%, αντίστοιχα. Οι τιμές των ευαισθησία και ειδικότητα για τα σημεία προσήλωσης είναι 99,6% και 95,7%, αντίστοιχα. Οι τιμές των ευαισθησία-ειδικότητα για τις σακκαδικές είναι 96,9% και 98,5%, αντίστοιχα. Οι τιμές των ευαισθησία και ειδικότητα για τις μικροσακκαδικές είναι 91,3% και

98,8%, αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι ικανή να ανιχνεύσει κάθετες και οριζόντιες σακκαδικές με μέγιστη γωνιακή απόκλιση 20° (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11: Στο σχήμα παρουσιάζεται ένα μέρος του καταγεγραμμένου σήματος ων κριτών ρυθμικής γυμναστικής. Ο πράσινος κύκλος δηλώνει τη έναρξη της σακκαδικής ενώ με μαύρο αστέρι σημειώνεται ο τερματισμός της σακκαδικής.

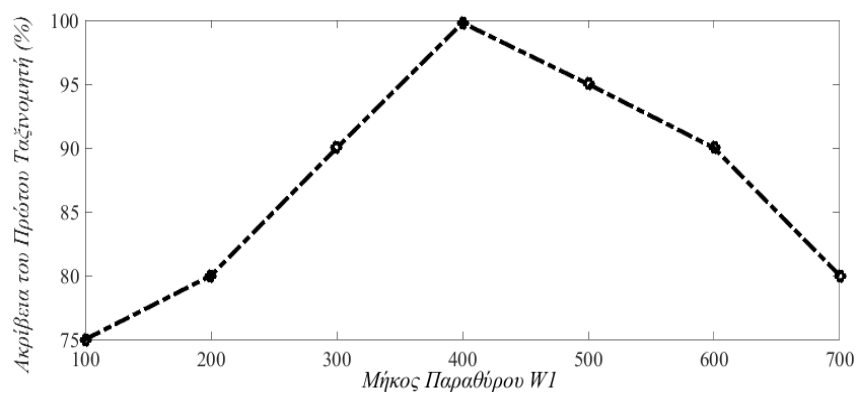
Πίνακας 4.10: Πίνακας διασύνδεσης των σημάτων καταγραφής από κάμερα ISCAN ETL-200.

| Πραγματική Ταξινόμηση | Ταξινόμηση | | | | Ευαισθησία | Ειδικότητα |
|-----------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|------------|
| | $C_{1,2}$ | $C_{2,2}$ | $C_{3,1}$ | $C_{3,2}$ | | |
| Βλεφαρισμοί | 835 | 0 | 0 | 0 | 97,7% | 98,2% |
| Σημεία Προσήλωσης | 10 | 7.448 | 16 | 0 | 99,7% | 95,7% |
| Σακκαδικές | 0 | 0 | 2.467 | 80 | 96,9% | 98,5% |
| Μικροσακκαδικές | 0 | 0 | 90 | 39 | 91,3% | 98,8% |
| | | | | | Ακρίβεια | 98,2% |

4.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων

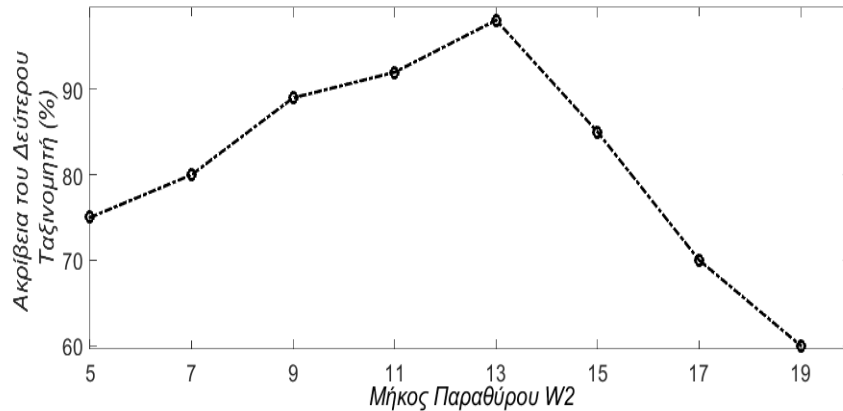
Είναι αρκετοί οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Αρχικά, η χρήση των παραθύρων W1 και W2 για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών επιδέχεται αρκετή μελέτη σχετικά με το μήκος των παραθύρων. Η επιλογή των παραθύρων έγινε με βάση την διάρκεια των σακκαδικών και των βλεφαρισμών, καθώς

παράθυρα μικρότερης διάρκειας δεν θα περιελάμβαναν ολόκληρη την οφθαλμική κίνηση και έτσι τα χαρακτηριστικά δεν θα ήταν αντιπροσωπευτικά της κίνησης, ενώ παράθυρα μεγαλύτερης διάρκειας θα περιείχαν εκτός από την σακκαδική ή τους βλεφαρισμούς και σημεία προσήλωσης. Η επιρροή του μήκους του παραθύρου W1 στην ακρίβεια του πρώτου ταξινομητή φαίνεται στην Εικόνα 4.12, όπου σημειώνεται η απόδοση του πρώτου ταξινομητή όταν η εξαγωγή των χαρακτηριστικών έχει γίνει με διάφορες τιμές του παραθύρου. Είναι φανερό ότι η μέγιστη ακρίβεια επιτυγχάνεται για μήκος παραθύρου W1 ίσο με 400ms.



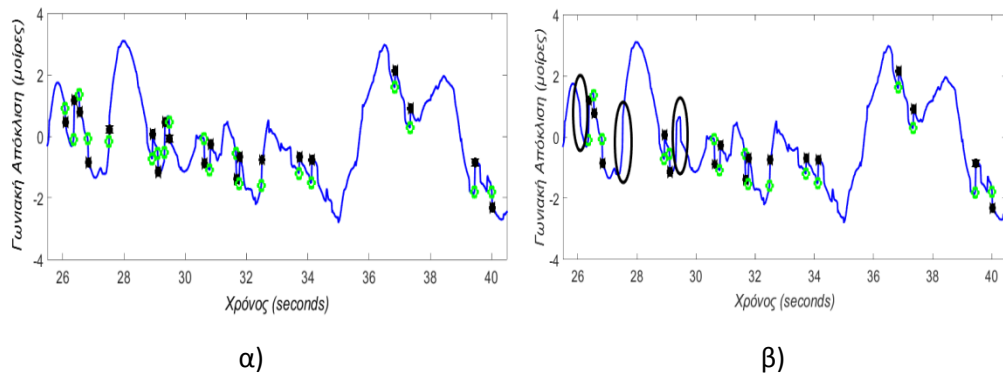
Εικόνα 4.12: Η συνολική ακρίβεια του πρώτου ταξινομητή για διαφορετικές τιμές του παραθύρου W1. Η υψηλότερη ακρίβεια υπολογίζεται για μήκος παραθύρου 400ms.

Στην Εικόνα 4.13 φαίνεται η επίδραση της ακρίβειας του δεύτερου ταξινομητή από το μεταβαλλόμενο παράθυρο W2. Είναι φανερό ότι η μέγιστη ακρίβεια επιτυγχάνεται όταν το μήκος του παραθύρου W2 είναι 13ms.



Εικόνα 4.13: Η συνολική ακρίβεια του δεύτερου ταξινομητή για διαφορετικές τιμές του παραθύρου W2. Η υψηλότερη ακρίβεια υπολογίζεται για μήκος παραθύρου 13ms.

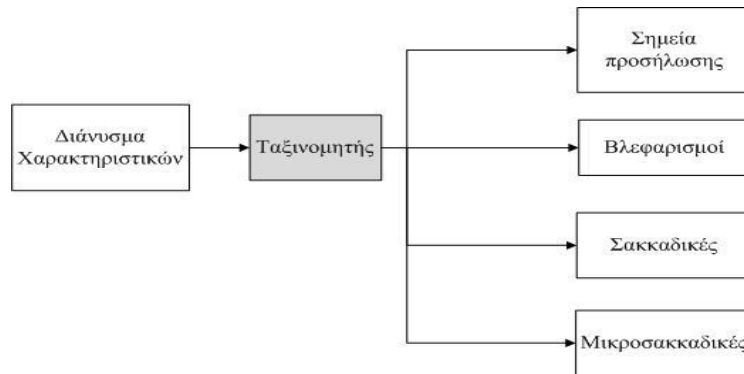
Επιπλέον στην Εικόνα 4.14, φαίνεται ένα παράδειγμα της επιρροής του παραθύρου W2 στην ανίχνευση των σακκαδικών. Επιλέχτηκαν τα διανύσματα χαρακτηριστικών με χρήση ενός παραθύρου W2 με μήκος 16ms και παρατηρείται ότι το σύστημα χάνει τέσσερις (4) σακκαδικές.



Εικόνα 4.14: Στο σχήμα α) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δεύτερου ταξινομητή για μήκος παραθύρου W2 13ms και στο σχήμα β) για μήκος παραθύρου 16ms. Ο πράσινος κύκλος δηλώνει τη έναρξη της σακκαδικής ενώ με μαύρο αστέρι σημειώνεται ο τερματισμός της σακκαδικής. Επίσης, οι σακκαδικές που δεν ανιχνεύονται από τον ταξινομητή έχουν περικυκλωθεί με μαύρο χρώμα.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η ικανότητα ανίχνευσης μικρών σακκαδικών από $0,1^\circ$ μέχρι $0,5^\circ$ γωνιακής απόκλισης. Όπως προαναφέρθηκε, η προτεινόμενη μεθοδολογία ομαδοποίησης παρέχει υψηλότερα ποσοστά ακρίβειας έναντι του αλγορίθμου Velocity Threshold σε όλες τις διαδικασίες προσήλωσης για τον διαχωρισμό σακκαδικών από τα σημεία προσήλωσης καθώς επίσης και για τον διαχωρισμό των σακκαδικών από μικροσακκαδικές. Η αδυναμία του αλγορίθμου Velocity Threshold είναι η διακριτοποίηση των σακκαδικών από τα σημεία προσήλωσης όπως φαίνεται στο άρθρο (Larsson, Nystrom, & Stridh, 2013). Επίσης, η μέθοδος που εφαρμόζεται για την ανίχνευση μικροσακκαδικών Clustering Method παρουσιάζει υψηλή ακρίβεια σε σχέση με τον αλγόριθμο Velocity Threshold κυρίως για την διακριτοποίηση σακκαδικών από μικροσακκαδικές. Η προτεινόμενη μεθοδολογία ξεπερνά σε ακρίβεια και τις δύο μεθόδους.

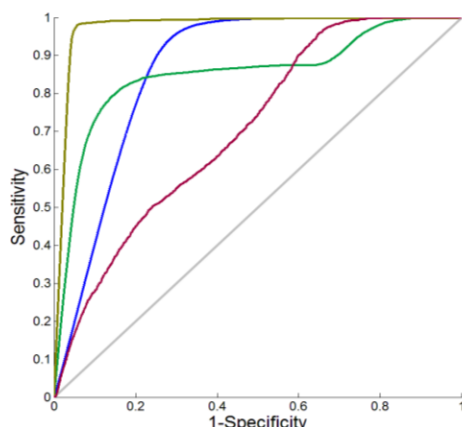
Η απόδοση της προτεινόμενης μεθοδολογίας μελετήθηκε σε τροποποιημένη διάταξη νευρωνικών δικτύων. Στην πρώτη περίπτωση ένα ταξινομητής με έξοδο τέσσερις κλάσεις χρησιμοποιήθηκε ο οποίος ταξινομεί τις τέσσερις διαφορετικές οφθαλμικές κινήσεις: σημεία προσήλωσης, βλεφαρισμοί, σακκαδικές και μικροσακκαδικές (Εικόνα 4.15). Η απόδοση του ταξινομητή είναι 49,2% (Πίνακας 4.11) το οποίο επαληθεύει την υπεροχή της προτεινόμενης μεθοδολογίας (Εικόνα 4.16). Οι τιμές των ευαισθησία και ειδικότητα για τα σημεία προσήλωσης είναι 47,0% και 58,4%, αντίστοιχα. Οι τιμές των ευαισθησία-ειδικότητα για τα σακκαδικές είναι 51,6% και 47,9%, αντίστοιχα. Οι τιμές των ευαισθησία και ειδικότητα για τους βλεφαρισμούς είναι 52,5% και 52,9%, αντίστοιχα. Οι τιμές των ευαισθησία και ειδικότητα για τις μικροσακκαδικές είναι 52,9% και 32,1%, αντίστοιχα. Η μειωμένη απόδοση οφείλεται στην δυσκολία της διακριτοποίησης των διαφόρων τύπων οφθαλμικών κινήσεων μεταξύ τους, κυρίως μεταξύ μικρών σακκαδικών από τα σημεία προσήλωσης όπως και η διακριτοποίηση μεταξύ σακκαδικών και βλεφαρισμών. Αυτή η παρατήρηση μας οδήγησε στην επιλογή τριών διαδοχικών νευρωνικών δικτύων για την ταξινόμηση των οφθαλμικών κινήσεων.



Εικόνα 4.15: Εναλλακτικός τρόπος ταξινόμησης των τεσσάρων ειδών οφθαλμικών κινήσεων. Χρησιμοποιήθηκε ένας ταξινομητής με έξοδο 4 κλάσεις.

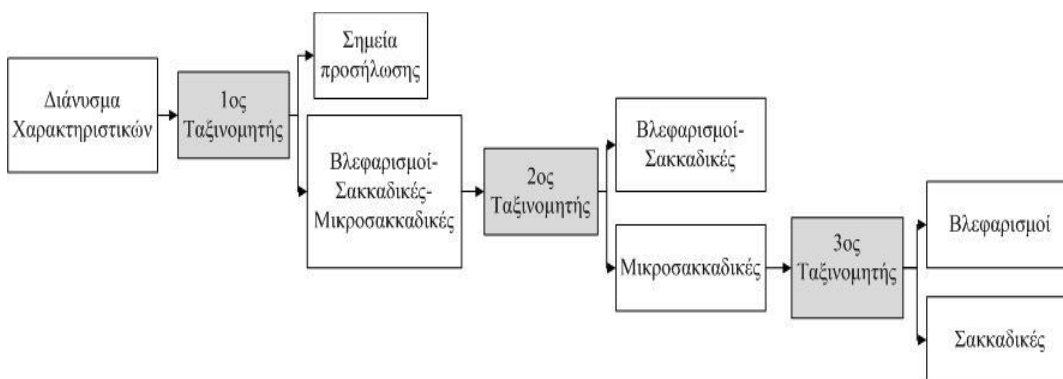
Πίνακας 4.11: Πίνακας διασύνδεσης του ταξινομητή τεσσάρων κλάσεων.

| Πραγματική/ Προβλεπόμε νη | Σημεία Προσήλωσης | Σακκαδικές | Μικροσα/κές | Βλεφαρισμοί | Ευαισθησία |
|---------------------------------|----------------------|------------|-------------|-------------|--------------------------|
| Σημεία Προσήλωσης | 14.798 | 6.037 | 9.145 | 1.475 | 47,0% |
| Σακκαδικές | 5.208 | 5.559 | 0 | 3 | 51,6% |
| Μικροσακ/κ ές | 3.808 | 5 | 4.319 | 38 | 52,9% |
| Βλεφαρισμοί | 1.540 | 0 | 1 | 1.705 | 52,5% |
| Ειδικότητα | 58,4% | 47,9% | 32,1% | 52,9% | Ακρίβεια 49,2% |



Εικόνα 4.16: α) Πίνακας διασύνδεσης του ταξινομητή τεσσάρων κλάσεων όπως φαίνεται στην Εικόνα 15, και β) η αντίστοιχη καμπύλη Roc όπου η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί σε μικροσακκαδικές, η μπλε γραμμή αντιστοιχεί σε σακκαδικές, η πράσινη σε σημεία προσήλωσης.

Στην δεύτερη περίπτωση μία διαφορετική διάταξη των ταξινομητών χρησιμοποιήθηκε όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.17.



Εικόνα 4.17: Εναλλακτικός τρόπος ταξινόμησης των τεσσάρων ειδών οφθαλμικών κινήσεων.

Ο πρώτος ομαδοποιητής διαχωρίζει τα σημεία προσήλωσης από τις υπόλοιπες οφθαλμικές κινήσεις (βλεφαρισμοί, σακκαδικές και μικροσακκαδικές) καταλήγοντας σε ακρίβεια 95,8%. Ο δεύτερος ομαδοποιητής διαχωρίζει τα διανύσματα χαρακτηριστικών που ταξινομήθηκαν ως μικρές σακκαδικές ή σακκαδικές (περιλαμβάνοντας τους βλεφαρισμούς και τις σακκαδικές) καταλήγοντας σε ακρίβεια 94,1%. Τέλος, ο τρίτος ταξινομητής διαφοροποιεί τα

διανύσματα χαρακτηριστικών που έχουν οριστεί ως σακκαδικές, σε σακκαδικές και βλεφαρισμούς με ακρίβεια 98,0%. Έτσι, καταλήγουμε ότι αυτή η αναδιάταξη των ταξινομητών οδηγεί σε μικρότερη ακρίβεια από την προτεινόμενη ταξινόμηση.

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετοί αλγόριθμοι ομαδοποίησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διακριτοποίηση των οφθαλμικών κινήσεων όπως τα δέντρα απόφασης, ο k-NN και ο SVM. Η πιο διαδεδομένη εναλλαγή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι ο αλγόριθμος SVM. Σε αρκετές εργασίες αναφέρεται ότι η απόδοση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων είναι ισάξια ή και καλύτερη από αυτή των SVM (Moraes, Valiati, & Wilson, 2013), (Wu, Huang, & Meng, 2008), μολονότι η ακρίβεια αυτών εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους, όπως ο θόρυβος και η φύση των δεδομένων. Ενώ η δομή των δύο αλγορίθμων είναι ίδια, διαφέρουν στον τρόπο που παράγονται οι λύσεις. Το πλήθος των διανυσμάτων υποστήριξης στον αλγόριθμο SVM αποτελεί πρόβλημα το οποίο επιλύεται με μεθόδους βελτιστοποίησης, και χρησιμοποιείται ως υποσύνολο των δεδομένων που εισάγονται στον SVM. Από την άλλη μεριά, οι κρυμμένοι νευρώνες του ANN αλγορίθμου είναι παράμετρος που επιλέγεται εκ των προτέρων. Ο αλγόριθμος SVM επιλέγει αυτόματα το μέγεθος του μοντέλου, επιλέγοντας το πλήθος των διανυσμάτων υποστήριξης ανάλογο με το πλήθος των δεδομένων εκπαίδευσης. Ωστόσο, μεγάλο πλήθος διανυσμάτων υποστήριξης οδηγεί σε καθυστέρηση του αποτελέσματος. Το πλήθος των νευρώνων στα ANN είναι συνήθως μικρό ενώ για την βελτιστοποίηση των βαρών γίνονται πολλές επαναλήψεις με διαφορετικά σύνολα εκπαίδευσης.

Η διαδικασία αυτή επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία και καταλήξαμε σε εφαρμογή διάρκειας 50 δευτερολέπτων για κάθε σήμα που εισέρχεται στο σύστημα για την ανίχνευση των οφθαλμικών κινήσεων. Ωστόσο, η υλοποίηση εξαρτάται από τον υπολογιστή που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των δεδομένων. Σε υπολογιστή με επεξεργαστή Intel i7, 3.4GHz και 8GB RAM ο προτεινόμενος αλγόριθμος υλοποιείται σε 50 δευτερόλεπτα. Ο αλγόριθμος Velocity Threshold είχε διάρκεια υλοποίησης 3 λεπτών σε κάθε σήμα, ενώ η μέθοδος ομαδοποίησης 10 δευτερόλεπτα για κάθε σήμα.

Κεφάλαιο 5

Αυτόματη Ανίχνευση Οφθαλμικών Κινήσεων Με Χρήση Εκθετών Lyapunov.

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η μελέτη και ανίχνευση των οφθαλμικών κινήσεων με χρήση μη γραμμικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov (Largest Lyapunov Exponent) και ο λογάριθμος της απόκλισης των σημείων στον χρόνο χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του τύπου της οφθαλμικής κίνησης, καθώς και για τον εντοπισμό αυτών στα καταγεγραμμένα οφθαλμικά σήματα. Η προτεινόμενη μέθοδος εξετάστηκε σε 26.000 σακκαδικές και 2.616 βλεφαρισμούς, παρέχοντας υψηλά ποσοστά σωστού εντοπισμού και των δύο τύπων κίνησης. Συγκεκριμένα, η ευαισθησία στην ανίχνευση των σακκαδικών ήταν 97,1% και η ακρίβεια 98,3%, ενώ η ευαισθησία για την ανίχνευση των βλεφαρισμών ήταν 98,0% και η ακρίβεια 96,9%. Το απόλυτο μέσο σφάλμα της ανίχνευσης της έναρξης και του τερματισμού κάθε οφθαλμικής κίνησης ήταν κάτω από 0,018 δευτερόλεπτα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν

απαιτεί προηγούμενη γνώση για την ύπαρξη των συγκεκριμένων κινήσεων κατά τη διάρκεια της καταγραφής. Επιπλέον, εφαρμόζεται απευθείας στο πρωτογενές σήμα, αποφεύγοντας τον υπολογισμό του σήματος της ταχύτητας ή της επιτάχυνσης.

Σε αρκετές έρευνες έχει εφαρμοστεί η μέθοδος του εκθέτη Lyapunov για την ανίχνευση και πρόβλεψη διαφόρων ασθενειών. Συγκεκριμένα, στην εργασία (Jeong, Chae, & Kim, 2001) προτάθηκε η μη γραμμική ανάλυση ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος¹ (HEΓ) με σκοπό την ανίχνευση της νόσου Alzheimer. Η μέση τιμή και η διασπορά των τιμών του μέγιστου εκθέτη Lyapunov παρατηρήθηκε ότι ήταν χαμηλότερη για τους ασθενείς με Alzheimer από αυτή των φυσιολογικών. Οι (Gulera, Ubeylib, & Guler, 2005) μελέτησαν με χρήση των εκθετών Lyapunov την ανίχνευση της επιληψίας σε τμήματα HEΓ. Τα χαρακτηριστικά που επέλεξαν ήταν η μέση τιμή και η μέγιστη απόλυτη τιμή του μέγιστου εκθέτη Lyapunov, καθώς και η μέση ισχύ και η διασπορά αυτής. Αυτά εισήχθησαν σε Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο καταλήγωντας σε 96,1% ακρίβεια ανίχνευσης της επιληψίας. Επίσης, μη γραμμικές τεχνικές εφαρμόστηκαν για την πρόβλεψη της επιληψίας σε HEΓ σήματα (Truong, Nguyen, & Vo, 2012). Σύμφωνα με τη μελέτη, η ανάλυση βασιζόμενη στον μέγιστο εκθέτη Lyapunov αποδείχθηκε ότι είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος για την κατανόηση της χαοτικής συμπεριφοράς των HEΓ καταγραφών. Συμπληρωματικά, εκτιμήθηκε ότι η έναρξη της επιληψίας υποδηλώνεται με υπολογισμό του μέγιστου εκθέτη Lyapunov μόνο από συγκεκριμένα ηλεκτρόδια, ο οποίος μάλιστα 2 λεπτά πριν την έναρξη της επιληψίας παρουσιάζει απότομη μείωση, ενώ η έναρξη της επιληψίας αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή του. Επίσης, οι ερευνητές (Goshvarpour, Abbasi, & Goshvarpour, 2013), εφάρμοσαν τον μέγιστο εκθέτη Lyapunov για την μελέτη της άπνοιας. Παρατηρήθηκε ότι κατά τη διάρκεια βαθύ ύπνου και παρουσίας άπνοιας η μέση τιμή του μέγιστου εκθέτη Lyapunov ήταν χαμηλότερη από αυτή σε φυσιολογική αναπνοή. Επίσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο μέσος μέγιστος εκθέτης Lyapunov σε σήματα HEΓ αυξάνεται κατά τη διάρκεια REM².

Οι εκθέτες Lyapunov σε συνδυασμό με άλλα μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως η Διάσταση Συσχέτισης και ο Εκθέτης Hurst, έχουν εφαρμοστεί για την ομαδοποίηση βιολογικών

¹Το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (HEΓ) είναι η καταγραφή της ηλεκτρικής δραστηριότητας του εγκεφάλου μέσω ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στο δέρμα του κεφαλιού.

² Ο ύπνος REM (Rapid Eye Movement) γνωστός και ως ύπνος γρήγορων κινήσεων των ματιών είναι το πέμπτο στάδιο του ύπνου και χαρακτηρίζεται από γρήγορες κινήσεις των ματιών, από εγκεφαλικά κύματα που δείχνουν ενεργοποιημένα και μοιάζουν με πολύ ελαφρύ ύπνο ή με την εγρήγορση, αλλά και από βαθιά χαλάρωση των μυών, παρόμοια με αυτή στο βαθύ ύπνο

σημάτων (HEG και ΗΚΓ³) (Balli & Palaniappan, 2010). Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι οι τιμές του αυξάνονται σε βαθύ ύπνο σε σύγκριση με τον ελαφρύ ύπνο. Επίσης, στην μελέτη (Acharya, Fausta, Kannathala, Chua, & Laxminarayan, 2005), η λειτουργία του φλοιού του εγκεφάλου μελετήθηκε με χρήση μέγιστου εκθέτη Lyapunov. Τέλος, στην εργασία (Aştefănoaei, Pretegiani, Optican, Creangă, & Rufa, 2013), οφθαλμικές κινήσεις συλλέχθηκαν από υγιή άτομα με χρήση κάμερας υπερύθρων με σκοπό την ανάλυση της συνδυαστικής δυναμικής των οφθαλμικών κινήσεων με χρήση εκθετών Hurst και μέγιστου εκθέτη Lyapunov. Οι συγγραφείς κατέληξαν ότι υπάρχει υψηλή συνδυαστική δυναμική των κινήσεων σε διαδικασίες σακκαδικών.

Μελετώντας τη σχετική βιβλιογραφία, είναι η πρώτη φορά που ο συνδυασμός αυτών των παραμέτρων χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των οφθαλμικών κινήσεων και τον καθορισμό της έναρξης και του τερματισμού αυτών. Το κεφάλαιο αποτελείται από τις εξής ενότητες. Στην πρώτη ενότητα αναπτύσσεται η μεθοδολογία και η ανάλυση του χώρου κατάστασης. Στην δεύτερη ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανίχνευση των σακκαδικών και των βλεφαρισμών σε σύγκριση με άλλες υπάρχουσες μεθόδους. Τέλος, ακολουθεί συζήτηση σχετικά με τους περιορισμούς της μεθόδου και την εξέλιξη αυτής.

5.2 Μεθοδολογία

Ο βασικός σκοπός της μελέτης είναι η αυτόματη ανίχνευση δύο τύπων οφθαλμικών κινήσεων, των σακκαδικών και των βλεφαρισμών, με χρήση του μέγιστου εκθέτη Lyapunov. Η έλλειψη οποιωνδήποτε a-priori γνωστών θεωρητικών τιμών του φάσματος Lyapunov για τις οφθαλμικές κινήσεις επιτρέπει την συσχέτιση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου με άλλες τεχνικές.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελείται από τα πέντε διαδοχικά βήματα:

1. *Προ-επεξεργασία των δεδομένων*
2. *Ανακατασκευή του χώρου κατάστασης*
3. *Εκτίμηση του μέγιστου εκθέτη Lyapunov και του λογάριθμου της απόκλισης των σημείων*
4. *Αυτόματη ανίχνευση των οφθαλμικών κινήσεων*

³Ηλεκτροκαρδιογράφημα ονομάζεται η μη επεμβατική εξέταση κατά την οποία καταγράφονται, με τη βοήθεια ηλεκτροδίων και μεταλλικών πλακών, ηλεκτρικά δυναμικά (=ρεύματα) που φθάνουν στην επιφάνεια του σώματος και προέρχονται από την καρδιά. Η καταγραφή τους σε χαρτί και η καμπύλη που λαμβάνεται, αποτελεί το ηλεκτροκαρδιογράφημα.

5. Εκτίμηση των σημείων έναρξης και τερματισμού των βλεφαρισμών και των σακκαδικών κινήσεων

5.2.1 Προ-επεξεργασία των δεδομένων

Η προ-επεξεργασία των σημάτων παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2.1.

5.2.2 Ανακατασκευή του χώρου κατάστασης

Με την προτεινόμενη μεθοδολογία υλοποιείται η ανίχνευση των σακκαδικών και των βλεφαρισμών. Το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση αποτελεί η ανακατασκευή του χώρου φάσεων του σήματος. Ο χώρος φάσεων αποτελεί μία μαθηματική κατασκευή με χρονικά εξαρτημένες μεταβλητές (Kodba, et al., 2005) ο οποίος ανακλά την δυναμική του σήματος. Ένας κοινός αποδεκτός τρόπος ανακατασκευής του χώρου φάσεων είναι η μέθοδος των καθυστερήσεων (MOD), η οποία βασίζεται στο θεώρημα του Takens (Takens, 1981). Το Θεώρημα Εμβάπτισης του Takens αποτελεί τη θεωρητική βάση για την ανάλυση των χρονοσειρών που παράγονται από μη γραμμικά ντετερμινιστικά δυναμικά συστήματα. Στην ουσία λέει ότι εάν είναι διαθέσιμη μία βαθμωτή παρατηρήσιμη ποσότητα φ της καταστάσεως X ενός ντετερμινιστικού δυναμικού συστήματος τότε τυπικά μπορούμε να ανακατασκευάσουμε ένα αντίγραφο του αρχικού συστήματος θεωρώντας τις ομάδες $(\varphi(X(t)), \varphi(X(t+\tau)), \varphi(X(t+2\tau)), \dots, \varphi(X(t+(m-1)\tau))$ των m διαδοχικών παρατηρήσεων της ποσότητας φ , όπου το m είναι αρκούντως μεγάλο. Με $X(t)$ συμβολίζεται η κατάσταση του συστήματος τη χρονική στιγμή t και $\tau > 0$ είναι κάποιο διάστημα δειγματοληψίας. Υπάρχουν βέβαια πολλά πρακτικά εμπόδια που πρέπει να υπερπηδήσει κανείς όταν αντιμετωπίζει το θέμα στην πράξη, όπως είναι η επιλογή του m και του τ .

Στο πρόβλημά μας τώρα, έστω x_i η γωνιακή απόκλιση του οφθαλμού την χρονική στιγμή $i \cdot T$, όπου $T = \frac{1}{600} s$, $i = 0, 1, \dots, N-1$ και N είναι ο αριθμός των σημείων στο σήμα, ήτοι 30.000 στην περίπτωσή μας. Η δυναμική της δεδομένης χρονικής σειράς μπορεί να εκφραστεί με τη χρήση του θεωρήματος Takens, ως ένας πίνακας X . Κάθε γραμμή του πίνακα X , X_k , είναι ένα διάνυσμα στο χώρο φάσεων:

$$\mathbf{X}_k = [x_k, x_{k+\tau}, x_{k+2\tau}, \dots, x_{k+(m-1)\tau}] \quad (5.1)$$

όπου $k=0,1,\dots,M-1$, $M=N-(m-1)\tau$ και τ , m είναι η χρονική καθυστέρηση και η διάσταση εμβάθυνσης, αντίστοιχα. Σύμφωνα με το θεώρημα Takens, το διάνυσμα που κατασκευάζεται με χρήση του πίνακα X έχει τις ίδιες μαθηματικές ιδιότητες με το καταγεγραμμένο σήμα. Συγκεκριμένα, κάθε σημείο x_i του σήματος στο χώρο φάσεων προέρχεται από τον συνδυασμό των χαρακτηριστικών όλων των υπόλοιπων σημείων του αρχικού σήματος. Έτσι, το σημείο $x_{i+\tau}$ αποτελεί μία δευτερεύουσα μεταβλητή η οποία φέρει την πληροφορία της επιρροής όλων των σημείων στο σημείο x_i την χρονική στιγμή τ .

Για την ορθή ανακατασκευή του διανύσματος με χρήση του πίνακα X , σημαντική επιρροή παρουσιάζουν η χρονική καθυστέρηση και η διάσταση εμβάθυνσης.

5.2.2.1 Επιλογή παραμέτρων του χώρου κατάσταση

Για την εκτίμηση της χρονικής καθυστέρησης δύο κριτήρια είναι σημαντικά (Ott, 1993). Αρχικά, η χρονική καθυστέρηση πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε η πληροφορία που λαμβάνεται από την μεταβλητή $x_{i+\tau}$ να είναι σημαντικά διαφορετική από την πληροφορία που ήδη περιλαμβάνεται στη μεταβλητή x_i . Δεύτερον, η χρονική καθυστέρηση δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη χρονική διάρκεια όπου το σύστημα των μεταβλητών χάνει τη μνήμη της αρχικής του κατάστασης. Αυτό είναι σημαντικό για τα χαοτικά συστήματα τα οποία χάνουν τη μνήμη στην πάροδο του χρόνου.

Κάθε διάνυσμα X_k αποτελείται από m τιμές προερχόμενες από τη χρονοσειρά x_i διακριτοποιημένη στο χρόνο από μία σταθερά τ . Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι υπολογισμού της χρονικής καθυστέρησης είναι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και η αμοιβαία πληροφορία. Στην παρούσα διατριβή εφαρμόστηκε η μέθοδος της αυτοσυσχέτισης καθώς τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά (p -value ≈ 0.98 , t -test με επίπεδο σημαντικότητας 0.05).

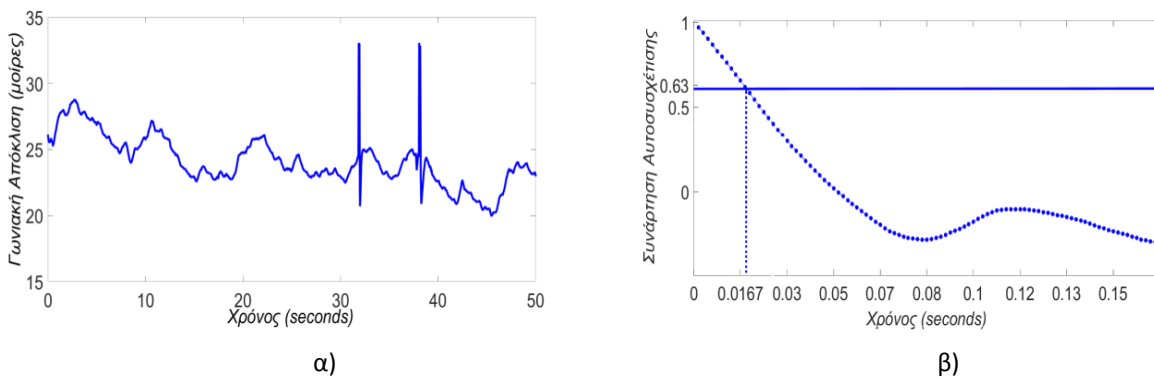
5.2.2.1.1 Η Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης γενικά ορίζεται από τη σχέση:

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x_i x_{i-\tau} \quad (5.2)$$

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης παρέχει τον βαθμό ομοιότητας μεταξύ διαφόρων τμημάτων του σήματος. Γενικά, μας δίνει πληροφορίες για το αν υπάρχουν γραμμικές συσχετίσεις και περιοδικότητες στο σήμα. Ο χρόνος συσχέτισης είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης R_{xx} της γωνιακής απόκλισης x_i έχει μειωθεί στο $1 - \frac{1}{e}$ της μέγιστης τιμής.

Στην Εικόνα 5.1(β) φαίνεται η αυτοσυσχέτιση ενός από τα σήματα που μελετήθηκαν (Εικόνα 5.1(α)). Η τιμή της συνάρτησης πέφτει στο 0,63 της αρχικής της τιμής την χρονική στιγμή $\tau = 11$ που αντιστοιχεί σε 0,0183s .



Εικόνα 5.1: α) Ένα καταγεγραμμένο σήμα γωνιακής απόκλισης και β) εκτίμηση της παραμέτρου της χρονικής καθυστέρησης τ για το αντίστοιχο σήμα.

5.2.2.1.2 Η Μέθοδος της Αμοιβαίας Πληροφορίας

Η συνάρτηση της αμοιβαίας πληροφορίας είναι γνωστή στη θεωρία της πληροφορίας και ως στατιστική αυτοσυσχέτιση. Στην Στατιστική είναι ευρέως διαδεδομένη μέθοδος προκειμένου να ανιχνευθούν χαρακτηριστικά σε χρονοσειρές τα οποία θα μπορούσαν να αποδώσουν δείκτες συσχέτισης. Δεδομένης μιας παρατήρησης x_i , η συνάρτηση αμοιβαίας πληροφορίας έρχεται να διερευνήσει με πόση ακρίβεια μπορούμε να προβλέψουμε την $x_{i+\tau}$, όπου τ ένας χρόνος καθυστέρησης. Η συνάρτηση αμοιβαίας πληροφορίας συμβολίζεται με $I(\tau)$, και όταν παίρνει μικρές τιμές τότε η πιθανότητα να προβλέψουμε τη μετάβαση στην τιμή

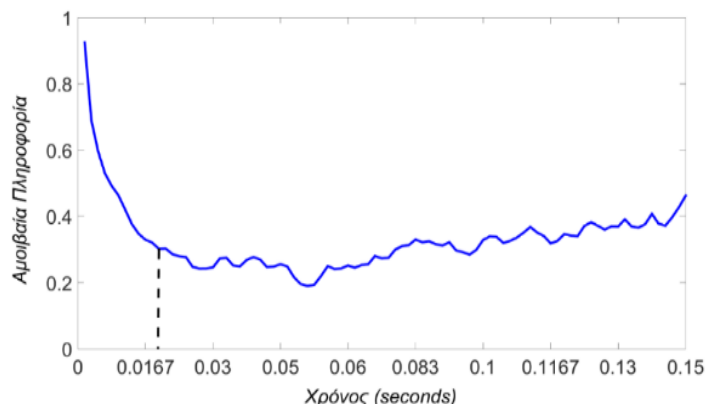
$x_{i+\tau}$ από την τιμή x_i είναι μικρή. Οι Fraser και Swinney επέλεξαν το πρώτο ελάχιστο της $I(\tau)$ για να προσεγγίσουν την τιμή του χρόνου καθυστέρησης τ για την MOD. Βέβαια, η μέθοδος δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμη για πειραματικές χρονοσειρές και σε πολλές περιπτώσεις ο ίδιος ο υπολογισμός της αμοιβαίας πληροφορίας είναι πιο δύσκολος από την ίδια τη μέθοδο MOD.

Η μέση αμοιβαία πληροφορία $I(\tau)$ δεδομένης μιας παρατήρησης x_i είναι:

$$I(\tau) = \sum_{i=1}^N P(x_i, x_{i+\tau}) \log_2 \left(\frac{P(x_i, x_{i+\tau})}{P(x_i)P(x_{i+\tau})} \right) \quad (5.3)$$

Η $I(\tau)$ αποτελεί μια γενίκευση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Στην αυτοσυσχέτιση για κάθε όρο του αθροίσματος της σχέσης (5.2) λαμβάνεται υπόψιν ένα και μοναδικό ζευγάρι $x_i, x_{i-\tau}$, ενώ για την αμοιβαία πληροφορία σε κάθε όρο του αθροίσματος λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα της μετάβασης από $x_i \rightarrow x_{i+\tau}$. Το πρώτο ελάχιστο της αμοιβαίας πληροφορίας δηλώνει το χρόνο τ όπου το $x_{i+\tau}$ προσφέρει την ελάχιστη πληροφορία στη γνώση που έχουμε από το x_i . Η αμοιβαία πληροφορία είναι ένα στατιστικό μέτρο το οποίο καθορίζει τη ροή της πληροφορίας μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών.

Στην Εικόνα 5.2 φαίνεται ο υπολογισμός της χρονικής καθυστέρησης τ του σήματος της Εικόνας 5.1(α) με χρήση της μεθόδου της αμοιβαίας πληροφορίας. Το πρώτο ελάχιστο της αμοιβαίας πληροφορίας για το δεδομένο σήμα παρουσιάζεται την χρονική στιγμή $\tau = 11$ που αντιστοιχεί σε $0,0183s$.



Εικόνα 5.2: Η εκτίμηση της παραμέτρου της χρονικής καθυστέρησης τ με τη μέθοδο της αμοιβαίας πληροφορίας για το σήμα της Εικόνας 5.1(α).

Και οι δύο μέθοδοι συνιστούν ότι δύο διαδοχικά στοιχεία x_i και $x_{i+\tau}$ του ανακατασκευασμένου σήματος είναι ασυσχέτιστα. Ωστόσο, ακόμα και αν τα στοιχεία x_i και $x_{i+\tau}$ είναι ασυσχέτιστα, όπως και τα $x_{i+\tau}$ και $x_{i+2\tau}$, δεν έπεται ότι τα στοιχεία x_i και $x_{i+m\tau}$ είναι επίσης ασυσχέτιστα.

5.2.2.1.3 Η Μέθοδος των Εσφαλμένα Κοντινότερων Γειτόνων (FNN)

Η διάσταση εμβάθυνσης m εκτιμάται με τη μέθοδο των εσφαλμένα κοντινότερων γειτόνων (Kennel, Brown, & Abarbanel, 1992). Η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι σημεία τα οποία είναι κοντινοί γείτονες στον ανακατασκευασμένο χώρο φάσεων παραμένουν κοντά με την πάροδο του χρόνου. Έτσι, εάν η απόσταση μεταξύ δύο κοντινών γειτόνων X_i και X_j είναι κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι D_{rr} , τότε η απόσταση τους δεν θα γίνει μεγαλύτερη από αυτή του κατωφλίου στην πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, αν ένα σημείο είχε έναν κοντινό γείτονα ο οποίος δεν υλοποιεί αυτό το κριτήριο, τότε αυτό σημειώνεται ως εσφαλμένα κοντινότερος γείτονας. Το ποσοστό των συνολικών σημείων που έχουν ένα εσφαλμένα κοντινότερο γείτονα ελαχιστοποιείται επιλέγοντας μία αρκετά μεγάλη διάσταση εμβάθυνσης. Αν η διάσταση εμβάθυνσης είναι αρκετά μικρή, τότε δύο σημεία που εμφανίζονται να είναι κοντινοί γείτονες πιθανόν να τείνουν να απομακρυνθούν μελλοντικά. Για τον υπολογισμό του ποσοστού των εσφαλμένα κοντινότερων γειτόνων, ο ακόλουθος αλγόριθμος υλοποιείται:

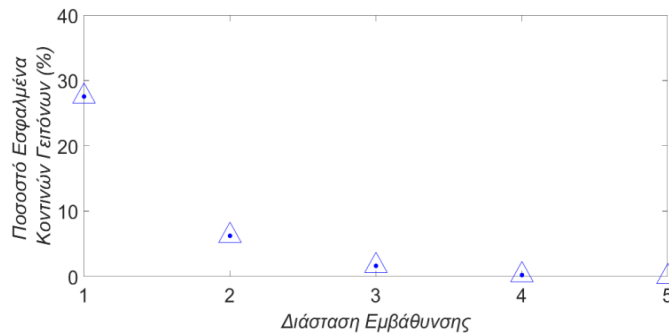
- Για τιμές $m = 1, 2, \dots$ για κάθε σημείο $X_j^{(m)}$ στον ανακατασκευασμένο χώρο διάστασης m υπολογίζονται οι κοντινοί γείτονες $X_i^{(m)}$, έτσι ώστε $\|X_j^{(m)} - X_i^{(m)}\| < D_{rr}$, όπου $\|\dots\|$ είναι η ευκλείδεια απόσταση και D_{rr} είναι σταθερά συνήθως όχι μεγαλύτερη από την διασπορά των δεδομένων (Strogatz, 2015). Σύμφωνα με τους (Kennel, Brown, & Abarbanel, 1992), $D_{rr} = 10$.

- Για κάθε σημείο $X_j^{(m)}$, υπολογίζεται η κανονικοποιημένη απόσταση:

$$D_i = \frac{|x_{j+m\tau} - x_{i+m\tau}|}{\|X_j^{(m)} - X_i^{(m)}\|} \quad (5.4)$$

- Αν η τιμή D_i είναι μεγαλύτερη από το δεδομένο κατώφλι D_{tr} , τότε το σημείο $X_j^{(m)}$ σημειώνεται ότι έχει εσφαλμένα κοντινότερους γείτονες.
- Η τιμή της διάστασης εμβάθυνσης m η οποία δίνει τον ελάχιστο αριθμό σημείων τα οποία έχουν εσφαλμένα κοντινότερους γείτονες είναι αυτή που επιλέγεται.

Στην Εικόνα 5.3 παρουσιάζεται το ποσοστό των εσφαλμένα κοντινότερων γειτόνων ως προς τις διαφορετικές τιμές της διάστασης εμβάθυνσης του σήματος της Εικόνας 5.1(α). Η επιλεγμένη τιμή για την διάσταση εμβάθυνσης είναι αυτή που ελαχιστοποιεί το ποσοστό των εσφαλμένα κοντινότερων γειτόνων. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1(α), η επιλεγμένη διάσταση είναι $m = 5$.



Εικόνα 5.3: Παράδειγμα για τον καθορισμό της ελάχιστης απαιτούμενης διάστασης εμβάθυνσης. Το ποσοστό των εσφαλμένα κοντινότερων γειτόνων μηδενίζεται όταν $m = 5$.

5.3 Εκτίμηση του μέγιστου εκθέτη Lyapunov και του λογαρίθμου της απόκλισης των αποστάσεων.

Σε ένα ντετερμινιστικό δυναμικό σύστημα μπορούμε να υπολογίσουμε μία μελλοντική κατάσταση $X(\tau)$ γνωρίζοντας την κατάσταση του $x_0 = X(0)$ σε μία δεδομένη χρονική στιγμή, εάν επιλύσουμε αναλυτικά ή αριθμητικά τις εξισώσεις κίνησης. Ωστόσο, οι αρχικές συνθήκες είναι συχνά γνωστές μόνο με πεπερασμένη ακρίβεια. Επομένως, μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε πώς θα εξελιχθεί στο χρόνο ένα αρχικό σφάλμα ή μια διαταραχή στις αρχικές

συνθήκες. Συστήματα στα οποία κυριαρχούν ευσταθή σημεία χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι το αρχικό σφάλμα αυξάνει γραμμικά με το χρόνο και επομένως η προβλεψιμότητα είναι βέβαιη για αρκετό χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση ενός ολικού ελκυστικού σημείου, το σύστημα θα τείνει πάντα προς το σημείο αυτό και το αρχικό σφάλμα θα μειώνεται με το χρόνο.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι θεωρούμε ένα σύστημα με δύο ευσταθή σημεία ισορροπίας και ένα ασταθές σημείο μεταξύ τους. Στην περιοχή αστάθειας, μια μικρή διαταραχή στις αρχικές συνθήκες μπορεί να αναγκάσει το σύστημα να τείνει προς το ένα ή το άλλο ευσταθές σημείο, οδηγώντας έτσι στην μη προβλεψιμότητα της τελικής κατάστασης του συστήματος για μικρές αρχικές διαταραχές. Αυτό συμβαίνει ωστόσο, μόνο για μια πολύ μικρή ειδική περιοχή του φασικού χώρου, την περιοχή του ασταθούς σημείου, οπουδήποτε αλλού η εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες είναι πολύ λιγότερο ακραία.

Το κύριο χαρακτηριστικό του ασταθούς σημείου που οδηγεί το σύστημα σε αυτή τη συμπεριφορά είναι η διαίρεση του φασικού χώρου στις τροχιές που ξεκινούν ή συγκλίνουν στο ασταθές σημείο. Αυτές οι τροχιές είναι οι ασταθείς και οι ευσταθείς πολλαπλότητες του ασταθούς σημείου, τα σύνολα δηλαδή όλων των σημείων που είτε αποκλίνουν είτε συγκλίνουν στο σημείο ισορροπίας, αντίστοιχα. Αυτές οι συγκεκριμένες τροχιές οριοθετούν τις κατευθύνσεις της ροής στο φασικό χώρο κοντά στο εν λόγω σημείο. Το σημαντικότερο είναι ότι στις θέσεις που οι πολλαπλότητες αυτές τέμνονται, απαιτείται μόνο μια μικρή αλλαγή στις αρχικές συνθήκες για την παραγωγή μίας πολύ διαφορετικής εξέλιξης. Συστήματα που εμφανίζουν ντετερμινιστική χαοτική δυναμική χαρακτηρίζονται επίσης από ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες. Στα συστήματα αυτά ο ελκυστής περιέχει άπειρα ασταθή στοιχεία, καθένα από τα οποία περιλαμβάνει τεμνόμενες ευσταθείς και ασταθείς πολλαπλότητες που ξανά διαμερίζουν την κατεύθυνση της ροής στο φασικό χώρο. Έτσι, υπάρχουν τεμνόμενες πολλαπλότητες πυκνά κατανομημένες στον ελκυστή και υπάρχει ευαίσθητη εξάρτηση από την αρχική κατάσταση σε όλον τον ελκυστή. Επομένως, στους παράξενους ελκυστές μικρές διαταραχές μπορούν να ενισχυθούν με εκθετική ταχύτητα και να καταστρέψουν την προβλεψιμότητα του συστήματος μετά από πεπερασμένο χρόνο. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποτελέσει και ορισμό του ντετερμινιστικού χάους. Ο ποσοτικός προσδιορισμός της ευαίσθητης εξάρτησης από τις αρχικές συνθήκες στηρίζεται στην έννοια των εκθετών Lyapunov.

Οι εκθέτες Lyapunov αποτελούν ένα αλγοριθμικό και υπολογιστικό μοντέλο, ένα ποσοτικό μέτρο του βαθμού της χαοτικής κίνησης μίας τροχιάς. Ουσιαστικά, οι εκθέτες Lyapunov μίας τροχιάς χαρακτηρίζουν τον μέσο όρο της εκθετικής απόκλισης των γειτονικών τροχιών της

από αυτή. Η μελέτη του φάσματος των εκθετών Lyapunov είναι από τα πλέον χρήσιμα εργαλεία για να αποφανθούμε αν ένα δυναμικό σύστημα είναι χαοτικό ή όχι. Εξ' ορισμού, ένα ντετερμινιστικό δυναμικό σύστημα είναι χαοτικό όταν έχει τουλάχιστον ένα θετικό εκθέτη Lyapunov. Ένα δυναμικό σύστημα n διαστάσεων έχει n εκθέτες Lyapunov, που περιγράφουν την δράση της δυναμικής που προσδιορίζει την εξέλιξη των τροχιών στο χώρο φάσεων. Οι εκθέτες Lyapunov εκφράζουν τον μέσο ρυθμό σύγκλισης ή απόκλισης δύο γειτονικών τροχιών στο χώρο των φάσεων. Θετικός εκθέτης Lyapunov συνεπάγεται εκθετικά απόκλιση δύο γειτονικών τροχιών (ευαισθησία ως προς τις αρχικές συνθήκες) και άρα απώλεια προβλεψιμότητας μετά από μικρό χρονικό διάστημα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο εκθέτης Lyapunov σε μία περιοχή ενός δυναμικού συστήματος τόσο μικρότερη είναι η προβλεψιμότητα σε αυτήν την περιοχή. Αν ο ελκυστής βρίσκεται σε περιορισμένο τμήμα του χώρου φάσεων, η εκθετική απόκλιση δεν είναι δυνατή προς όλες τις κατευθύνσεις. Συστολές και αναδιπλώσεις της τροχιάς αντιστοιχούν σε αρνητικό εκθέτη Lyapunov. Όταν ένα χαοτικό σύστημα έχει δύο ή περισσότερους θετικούς εκθέτες Lyapunov τότε χαρακτηρίζεται από υπερχάος.

Ο αλγόριθμος για την εκτίμηση του μέγιστου εκθέτη Lyapunov περιγράφεται στο άρθρο (Rosenstein, James, & Carlo J. De Luca, 1993). Ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov εκτιμάται ως ο μέσος ρυθμός χωρισμού των κοντινών γειτόνων. Αποτελεί έναν εύκολα υλοποιήσιμο αλγόριθμο καθώς βασίζεται στην μέτρηση του μέσου ρυθμού διαχωρισμού των σημείων του σήματος. Επιπλέον, η μέθοδος είναι ακριβής ακόμα και αν το πλήθος δεδομένων είναι αρκετά μικρό καθώς λαμβάνει υπόψιν όλα τα δεδομένα του σήματος. Αυτός ο αλγόριθμος ακολουθεί ακριβώς τον ορισμό του μέγιστου εκθέτη Lyapunov και είναι ακριβής επειδή εκμεταλλεύεται όλα τα απαραίτητα δεδομένα. Είναι γρήγορος αλγόριθμος, και σθεναρός σε αλλαγές στις ακόλουθες ποσότητες: διάσταση εμβύθισης, μέγεθος των δεδομένων, καθυστέρηση ανακατασκευής και επίπεδο θορύβου. Ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov αποτελεί μέτρο ανίχνευσης τους χάους σε χρονοσειρές και ορίζεται από τη ακόλουθη εξίσωση:

$$d(t) = d(0)e^{\lambda t} \quad (5.5)$$

όπου λ_1 είναι ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov, $d(t)$ είναι η μέση απόκλιση των σημείων την χρονική στιγμή t και $d(0)$ είναι μία σταθερά η οποία κανονικοποιεί την αρχική απόσταση των σημείων. Η πιο σημαντική παρατήρηση είναι ότι ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov καθορίζει εάν το σύστημα είναι χαοτικό ή όχι. Αν $\lambda_1 > 0$, τότε δύο αρχικά κοντινοί γείτονες του διανύσματος αποκλίνουν εκθετικά στον χρόνο, γεγονός που αποτελεί ένδειξη χαοτικής κατάστασης.

Ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov μπορεί να εκτιμηθεί με χρήση του πίνακα X του ανακατασκευασμένου χώρου φάσεων ως εξής: Για κάθε σημείο X_j ($j=0,1,\dots,M-1$), οι γείτονες του X_j οι οποίοι περικλείονται σε ένα «κέλυφος» με κέντρο το X_j υπολογίζονται με χρήση της διπλής ανισότητας $R_1 < \|X_j - X_i\| < R_2$. Σύμφωνα με τους (Zeng, Eykholt, & Pielke, 1991) η τιμή του R_1 ορίζεται ως το 1% και το R_2 ως το 5% της διασποράς της χρονοσειράς. Έστω $d_{ij}(k) = \|X_{j+k} - X_{i+k}\|$ είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου X_j και του γείτονά του X_i μετά από k χρονικές στιγμές ($k = 1, 2, \dots$), τότε η διακριτοποίηση του χρόνου εισχωρεί στην εξίσωση (5.5) και γίνεται ως εξής:

$$d_j(k) \cong d_j(0)e^{\lambda_1(k \cdot T)} \quad (5.6)$$

όπου $d_j(k)$ είναι ο αριθμητικός μέσος της απόστασης $d_{ij}(k)$. Λογαριθμίζοντας και στα δύο μέλη την εξίσωση (5.6), παίρνουμε:

$$\ln d_j(k) \cong \ln d_j(0) + \lambda_1(k \cdot T) \quad (5.7)$$

Η εξίσωση (5.7) εκφράζει ένα σύνολο παράλληλων ευθειών (για $j = 0, 1, \dots, M-1$), κάθε ευθεία έχει κλίση ανάλογη του λ_1 (Rosenstein, Collins, & De Luca, 1993).

Στη συνέχεια, για κάθε k , ο αριθμητικός μέσος του λογαρίθμου των αποστάσεων των σημείων, $\langle \ln d(k) \rangle$, την χρονική στιγμή $k \cdot T$ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\langle \ln d(k) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} \ln d_j(k) \cong \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} \ln d_j(0) + \lambda_1(k \cdot T) \quad (5.8)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.8), η χρονικά εξαρτώμενη τιμή του μέγιστου εκθέτη Lyapunov, $\lambda_1(k)$, υπολογίζεται ως εξής:

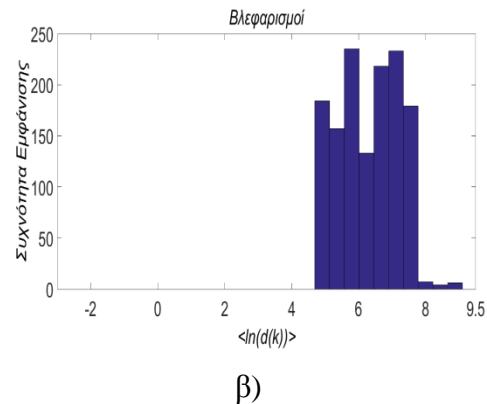
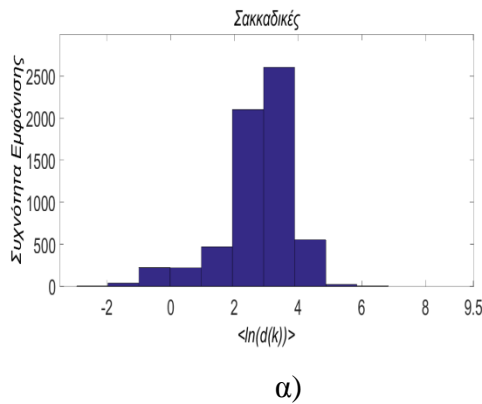
$$\lambda_1(k) = \frac{\langle \ln d(k) \rangle - \langle \ln d(k-1) \rangle}{T}, k > 1 \quad (5.9)$$

Η προτεινόμενη μεθοδολογία για την ανίχνευση διαφορετικών τύπων οφθαλμικών κινήσεων βασίζεται στον υπολογισμό δύο χαρακτηριστικών: α) τον λογάριθμο της απόστασης $\langle \ln d(k) \rangle$ των σημείων $k = 1, 2, \dots$ και β) την χρονικά εξαρτώμενη τιμή του μέγιστου εκθέτη Lyapunov. Η τιμή του $\langle \ln d(k) \rangle$ χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του τύπου της οφθαλμική κίνησης (βλεφαρισμός ή σακκαδική), ενώ η τιμή του μέγιστου εκθέτη Lyapunov, $\lambda_1(k)$,

χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της έναρξης και του τερματισμού της σακκαδικής και του βλεφαρισμού.

5.4 Αυτόματη ανίχνευση των διαφορών τύπων οφθαλμικών κινήσεων

Η ανίχνευση των βλεφαρισμών και των σακκαδικών επιτυγχάνεται με τη χρήση του λογαρίθμου της απόκλισης $\langle \ln d(k) \rangle$ ($k = 1, 2, \dots$). Ο λογάριθμος της απόκλισης των σημείων επιλέγεται αφού οι τιμές του στην περίπτωση των βλεφαρισμών και των σακκαδικών είναι σημαντικά διαφορετικές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4. Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 5.4(α) παρατηρείται η κατανομή του λογαρίθμου της απόκλισης των σημείων δύο τύπων οφθαλμικών κινήσεων ο οποίος έχει υπολογιστεί για κάθε χρονική στιγμή k για όλα τα σημεία των διαθέσιμων σημάτων. Καθώς η έναρξη και ο τερματισμός των σακκαδικών και των βλεφαρισμών καθορίστηκε από τους ειδικούς σε όλα τα διαθέσιμα σήματα, οι τιμές του λογαρίθμου της απόκλισης υπολογίστηκε σε κάθε σακκαδική και βλεφαρισμό, αντίστοιχα. Στη συνέχεια η μέση τιμή υπολογίστηκε για κάθε χρονική στιγμή k . Όπως παρατηρείται, οι δύο κατανομές παρουσιάζουν μία μικρή επικάλυψη τιμών (ωστόσο το 95% διάστημα εμπιστοσύνης των τιμών $\langle \ln d(k) \rangle$ για βλεφαρισμούς και σακκαδικές είναι $[4,75 - 7,46]$ και $[-0,04 - 4,25]$, αντίστοιχα). Αξιοποιώντας την παρατήρηση αυτή, ένα κυλιόμενο παράθυρο, W , εφαρμόζεται σε κάθε σήμα. Σε κάθε θέση του παραθύρου, οι τιμές των τ , m και $\langle \ln d(k) \rangle$ για κάθε $k = 1, 2, \dots, 240$ υπολογίζονται. Αν οι τιμές των $\langle \ln d(k) \rangle$ είναι μεταξύ $[4,75 - 7,46]$, τότε το παράθυρο W θα εμπεριέχει βλεφαρισμό. Διαφορετικά, αν οι τιμές των $\langle \ln d(k) \rangle$ είναι μεταξύ $[-0,04 - 4,25]$, τότε το παράθυρο W θα περιέχει σακκαδική. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, θεωρείται ότι εμπεριέχει κάποια άλλη οφθαλμική κίνηση ή σημεία προσήλωσης. Το μήκος του παραθύρου ορίστηκε 400ms ($400\text{ms} \times 600\text{Hz} = 240$ σημεία), λαμβάνοντας υπόψη ότι η διάρκεια των σακκαδικών είναι μεταξύ 6ms και 300ms και η διάρκεια των βλεφαρισμών είναι συνήθως μεταξύ 100ms και 400ms (Martinez-Conde, Macknik, & Hubel, 2009) και (Kwon, et al., 2013).



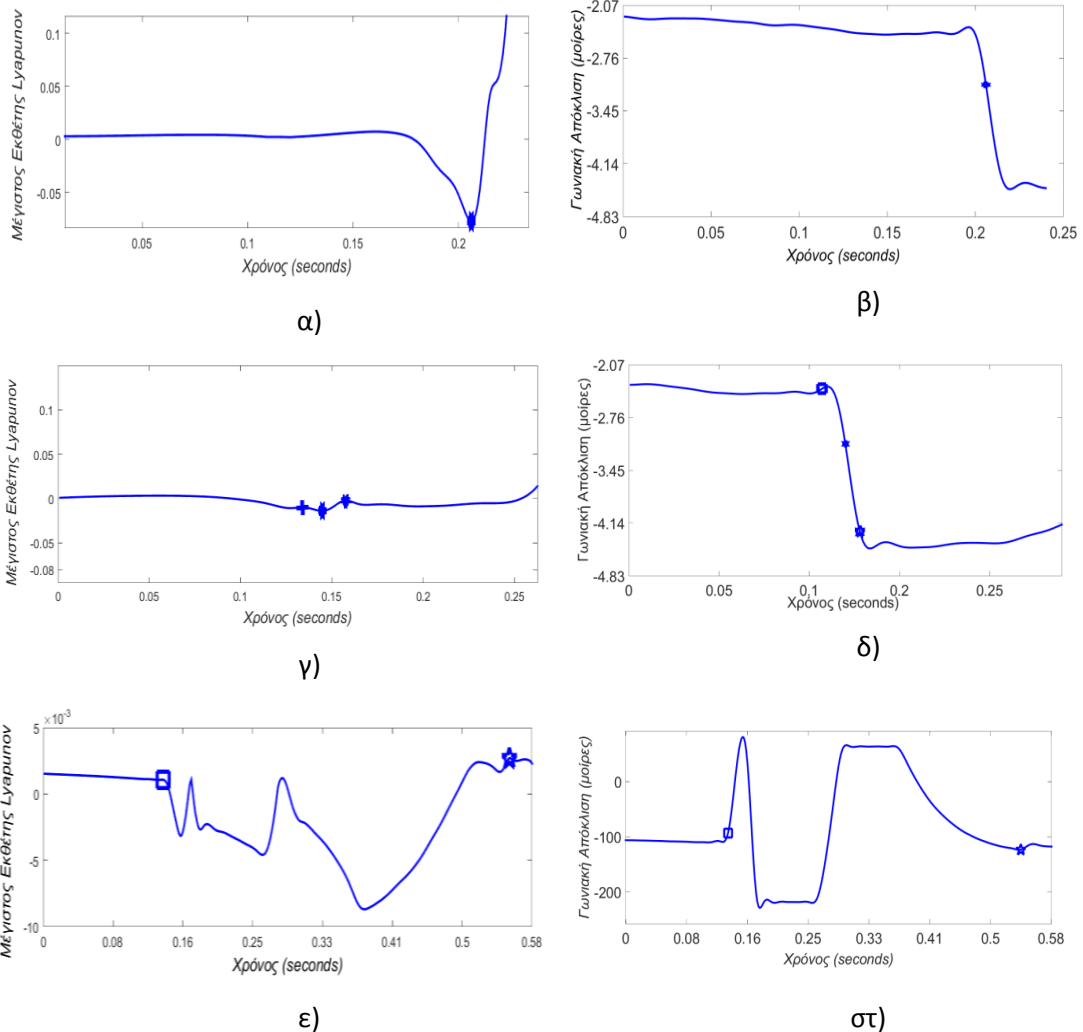
Εικόνα 5.4: Ιστόγραμμα του λογαρίθμου των αποκλίσεων των σημείων για κάθε k για όλες τις α) σακκαδικές και β) βλεφαρισμοί.

5.5 Εκτίμηση της έναρξης και του τερματισμού των Βλεφαρισμών/Σακκαδικών

Μετά την ανίχνευση του τύπου οφθαλμικής κίνησης στην περίπτωση μας, σακκαδικές ή βλεφαρισμός με χρήση του κυλιόμενου παραθύρου W , το πρώτο σημείο στο οποίο ο εξαρτημένος χρονικά μέγιστος εκθέτης Lyapunov παρουσιάζει αρνητικό ελάχιστο μεταξύ δύο διαδοχικών μηδενισμών ανιχνεύεται. Αυτό φαίνεται γραφικά στην Εικόνα 5.5(α), όπου το σημείο που σημειώνεται με τελεία αντιστοιχεί στο τέλος της χαοτικής κατάστασης του δεδομένου διανύσματος του σήματος (Εικόνα 5.5(β)) το οποίο έχει σημειωθεί ως σημείο της σακκαδικής από την προηγούμενη διαδικασία.

Έχοντας ανιχνεύσει το σημείο που αντιστοιχεί σε σακκαδική ή βλεφαρισμό, το παράθυρο W επανατοποθετείται έτσι ώστε το σημείο να βρίσκεται στο κέντρο του παραθύρου πλέον. Η μετακίνηση του παραθύρου γίνεται με σκοπό το παράθυρο πλέον να περιέχει όλη την κίνηση της σακκαδικής ή του βλεφαρισμού μέσα σε αυτό. Ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Lyapunov υπολογίζεται ξανά σε αυτό το παράθυρο. Το τελευταίο τοπικό μέγιστο πριν το αρχικά ανιχνευθέν σημείο της σακκαδικής ή του βλεφαρισμού εντοπίζεται ως έναρξη της κίνησης. Αντίστοιχα, το πρώτο τοπικό μέγιστο του μέγιστου εκθέτη Lyapunov μετά το σημείο που ανιχνεύθηκε αρχικά και σημειώνεται με τελεία, ορίζεται ως το σημείο τερματισμού της κίνησης. Οι Εικόνες 5.5(γ) και (δ) παρέχουν οπτική αιτιολόγηση της διαδικασίας αυτής όπου το τετράγωνο και ο αστερίσκος δείχνουν την έναρξη και τον τερματισμό της σακκαδικής, αντίστοιχα. Στην Εικόνα 5.5(ε) παρουσιάζεται ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov από το τμήμα του σήματος το οποίο περιέχει βλεφαρισμό. Εφόσον,

ο βλεφαρισμός συνήθως περιέχει δύο ή περισσότερα διαδοχικά ακρότατα, η έναρξη του βλεφαρισμού (τετράγωνο στην Εικόνα 5.5(στ)) είναι το τελευταίο τοπικό μέγιστο πριν το πρώτο αρνητικό ελάχιστο του μέγιστου εκθέτη Λγαρυνον και ο τερματισμός του βλεφαρισμού σημειώνεται με αστερίσκο Εικόνα 5.5(στ) είναι το πρώτο μέγιστο μετά το τελευταίο αρνητικό ελάχιστο του μέγιστου εκθέτη Λγαρυνον (Εικόνα 5.5(ε)).



Εικόνα 5.5: α) Ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Λγαρυνον του τμήματος του σήματος που εμπεριέχει σακκαδική. Η τελεία αντιστοιχεί στο αρχικά ανιχνεύσιμο σημείο της σακκαδικής. β) Το αντίστοιχο τυπικό οφθαλμικό σήμα. γ) Ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Λγαρυνον του τμήματος του σήματος που εμπεριέχει σακκαδική στο κέντρο του παραθύρου W . δ) Το αντίστοιχο τυπικό οφθαλμικό σήμα. ε) Ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Λγαρυνον του τμήματος του σήματος που εμπεριέχει βλεφαρισμό. στ) Το αντίστοιχο τυπικό οφθαλμικό σήμα που εμπεριέχει βλεφαρισμό. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν στην έναρξη της σακκαδικής ή του βλεφαρισμού ενώ ο αστερίσκος αντιστοιχεί στον τερματισμό της σακκαδικής ή του βλεφαρισμού.

5.6 Αποτελέσματα

Η προτεινομένη μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε 780 σήματα οφθαλμικών κινήσεων (280 σήματα από την πρώτη δοκιμασία προσήλωσης, 250 σήματα από την δεύτερη και 250 σήματα από την τρίτη δοκιμασία προσήλωσης) τα οποία περιείχαν 26.000 σακκαδικές και 2.616 βλεφαρισμούς. Τα αποτελέσματα της παρούσας μεθοδολογίας αξιολογήθηκαν από τους ειδικούς. Η ευαισθησία για την ανίχνευση των σακκαδικών ήταν 97,1% και η ακρίβεια 98,3%. Η ευαισθησία για την ανίχνευση των βλεφαρισμών ήταν 98,0% και η ακρίβεια 96,9%. Ο πίνακας των αποτελεσμάτων για κάθε τύπο κίνησης παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1. Το μέσο απόλυτο σφάλμα για την ανίχνευση της έναρξης των σακκαδικών και των βλεφαρισμών ήταν περίπου 0,018 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,002 δευτερόλεπτα), ενώ το μέσο απόλυτο σφάλμα για την ανίχνευση του τερματισμού των σακκαδικών και των βλεφαρισμών ήταν περίπου 0,016 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,001 δευτερόλεπτα).

Πίνακας 5.1: Πίνακας αποτελεσμάτων ανίχνευσης των σακκαδικών/βλεφαρισμών.

| | TP | FP | FN | Ακρίβεια | Ευαισθησία |
|-------------|--------|-----|-----|----------|------------|
| Σακκαδικές | 25.558 | 764 | 442 | 97,1% | 98,3% |
| Βλεφαρισμοί | 2.535 | 52 | 81 | 98,0% | 96,9% |

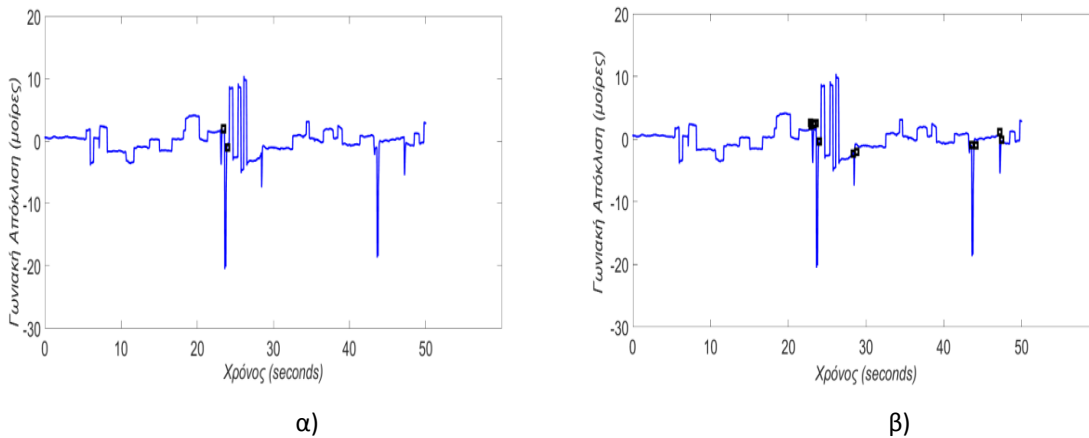
5.6.1 Σύγκριση με υπάρχουσα μεθοδολογία για την ανίχνευση των βλεφαρισμών και των σακκαδικών.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία επίσης συγκρίθηκε έναντι της μεθοδολογίας που προτάθηκε από τον (Pettersson, et al., 2013) για την ανίχνευση των βλεφαρισμών. Σύμφωνα με αυτή την μεθοδολογία, το πρώτο βήμα είναι η εξαγωγή όλων των τοπικών μεγίστων από τις απόλυτες τιμές του σήματος. Τα πλάτη αυτών των δειγμάτων κανονικοποιήθηκαν μεταξύ των τιμών [0, 1] και κατατάχθηκαν σε αύξουσα σειρά. Ξεκινώντας από το υψηλότερο πλάτος και πηγαίνοντας προς τα πίσω, τα διαδοχικά σημεία με διαφορά πλάτους πάνω από 0,03 σημειώθηκαν ως βλεφαρισμοί. Η έναρξη (τερματισμός) του βλεφαρισμού αντιστοιχεί στο 10,0% του μέγιστου πλάτους, αριστερά (δεξιά) του μεγίστου. Εμείς εξετάσαμε αυτή τη μεθοδολογία σε 2.616 βλεφαρισμούς καταλήγοντας σε ευαισθησία 93,0% και ακρίβεια 96,0%, όπως φαίνεται

στον Πίνακα 5.2. Όπως γίνεται φανερό από τον Πίνακα 5.2, η προτεινόμενη μεθοδολογία παράγει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τη μέθοδο του (Pettersson, et al., 2013) σε σχέση με την ευαισθησία, έτσι, λιγότεροι μη βλεφαρισμοί ανιχνεύθηκαν ως βλεφαρισμοί από την παρούσα μεθοδολογία. Αντίθετα, ο αριθμός των λάθος θετικών βλεφαρισμών που σημειώθηκε και από τις δύο μεθόδους είναι σχεδόν ο ίδιος. Στην Εικόνα 5.5 φαίνεται ένα παράδειγμα από την εφαρμογή της μεθόδου του (Pettersson, et al., 2013) στα σήματα της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή. Οι ανιχνεύσιμοι βλεφαρισμοί σημειώθηκαν στο σχήμα με δύο μαύρα τετράγωνα, το πρώτο αντιστοιχεί στην έναρξη και το δεύτερο στον τερματισμό. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6α) η μεθοδολογία του Pettersson, et al., 2013 ανιχνεύει μόνο έναν από τους βλεφαρισμούς, ενώ χάνει τους υπόλοιπους πέντε που πράγματι υπάρχουν και ανιχνεύονται από την παρούσα μεθοδολογία (Εικόνα 5.6β)). Το απόλυτο μέσο σφάλμα από την ανίχνευση της έναρξης και του τερματισμού ήταν 0,037 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,004 δευτερόλεπτα) και 0,05 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,002 δευτερόλεπτα), αντίστοιχα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία παρουσιάζει χαμηλότερο μέσο απόλυτο σφάλμα στην ανίχνευση της έναρξης των βλεφαρισμών, 0,018 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,002 δευτερόλεπτα), και 0,016 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,001 δευτερόλεπτα) του τερματισμού αυτών.

Πίνακας 5.2: Η ευαισθησία και η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε σύγκριση με την τεχνική που αναπτύσσεται στην εργασία του (Pettersson, et al., 2013) για την ανίχνευση των βλεφαρισμών.

| | Προτεινόμενη Μεθοδολογία | Τεχνική Petterson, et al., 2013 |
|-------------------|---------------------------------|--|
| Ευαισθησία | 98,0% | 93,0% |
| Ακρίβεια | 96,9% | 96,0% |

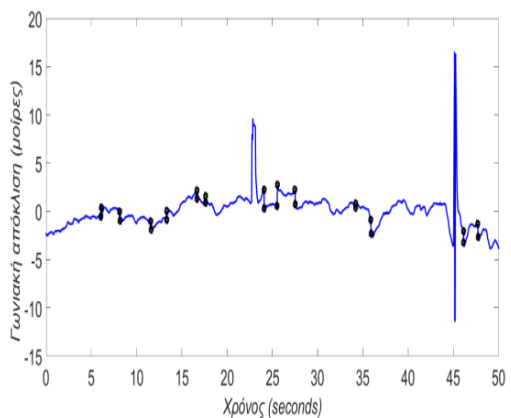


Εικόνα 5.6: Τα μαύρα τετράγωνα αντιστοιχούν στην έναρξη και τον τερματισμό των ανιχνευμένων βλεφαρισμών από α) την μέθοδο του Petterson et al. και β) την προτεινόμενη μέθοδο.

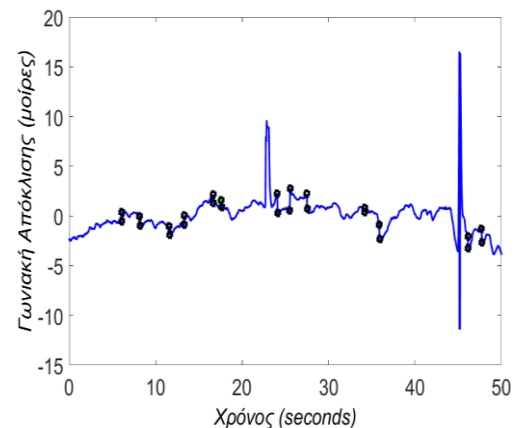
Η προτεινόμενη μεθοδολογία συγκρίθηκε με τον αλγόριθμο Velocity Threshold που προτάθηκε από τους (Nyström & Holmqvist, 2010). Ο αλγόριθμος περιγράφεται στην παράγραφο 4.6.2.1. Η ευαισθησία και η ακρίβεια του αλγορίθμου στα δεδομένα μας ήταν 89,3% και 90,1% αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.7(α), ο αλγόριθμος Velocity Threshold ανιχνεύει έναν υψηλό αριθμό σακκαδικών, σημειώνονται με μαύρες τελείες στο σχήμα (έναρξη/τερματισμός). Στην Εικόνα 5.7(β), οι σακκαδικές οι οποίες ανιχνεύθηκαν σωστά από την προτεινόμενη μέθοδο σημειώνονται επίσης με μαύρες τελείες (έναρξη/τερματισμός). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.3. Η προτεινόμενη μεθοδολογία παράγει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τον Velocity Threshold αλγόριθμο με βάση την ευαισθησία και την ακρίβεια. Το μέσο απόλυτο σφάλμα της ανίχνευσης της έναρξης και του τερματισμού των σακκαδικών με χρήση του Velocity Threshold ήταν 0,020 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,002 δευτερόλεπτα) και 0,018 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,001 δευτερόλεπτα), αντίστοιχα. Η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει μικρότερο μέσο απόλυτο σφάλμα για την ανίχνευση της έναρξης των σακκαδικών 0,018 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,002 δευτερόλεπτα) και 0,016 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,001 δευτερόλεπτα) του τερματισμού.

Πίνακας 5.3: Η ευαισθησία και η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε σύγκριση με τον Velocity Threshold αλγόριθμο για την ανίχνευση των σακκαδικών.

| | Προτεινόμενη Μεθοδολογία | Velocity Threshold |
|-------------------|--------------------------|--------------------|
| Ευαισθησία | 97,1% | 89,3% |
| Ακρίβεια | 98,3% | 90,1% |



α)



β)

Εικόνα 5.7: Οι μαύρες τελείες αντιστοιχούν στην έναρξη και τον τερματισμό των ανιχνευμένων σακκαδικών από α) τον Velocity Threshold αλγόριθμο και β) την προτεινόμενη μεθοδολογία.

5.7 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου είναι το μήκος του κυλιόμενου παραθύρου W , η χρονική καθυστέρηση τ και η διάσταση εμβάθυνσης m . Το μήκος του παραθύρου επιλέχθηκε ύστερα από δοκιμές. Παρατηρήθηκε ότι ένα παράθυρο μήκους 400ms εμπεριέχει ολόκληρο τον βλεφαρισμό ή τη σακκαδική και έτσι η προτεινόμενη μεθοδολογία καταλήγει στην μέγιστη ακρίβεια για τον εντοπισμό της έναρξης και του τερματισμού της σακκαδικής.

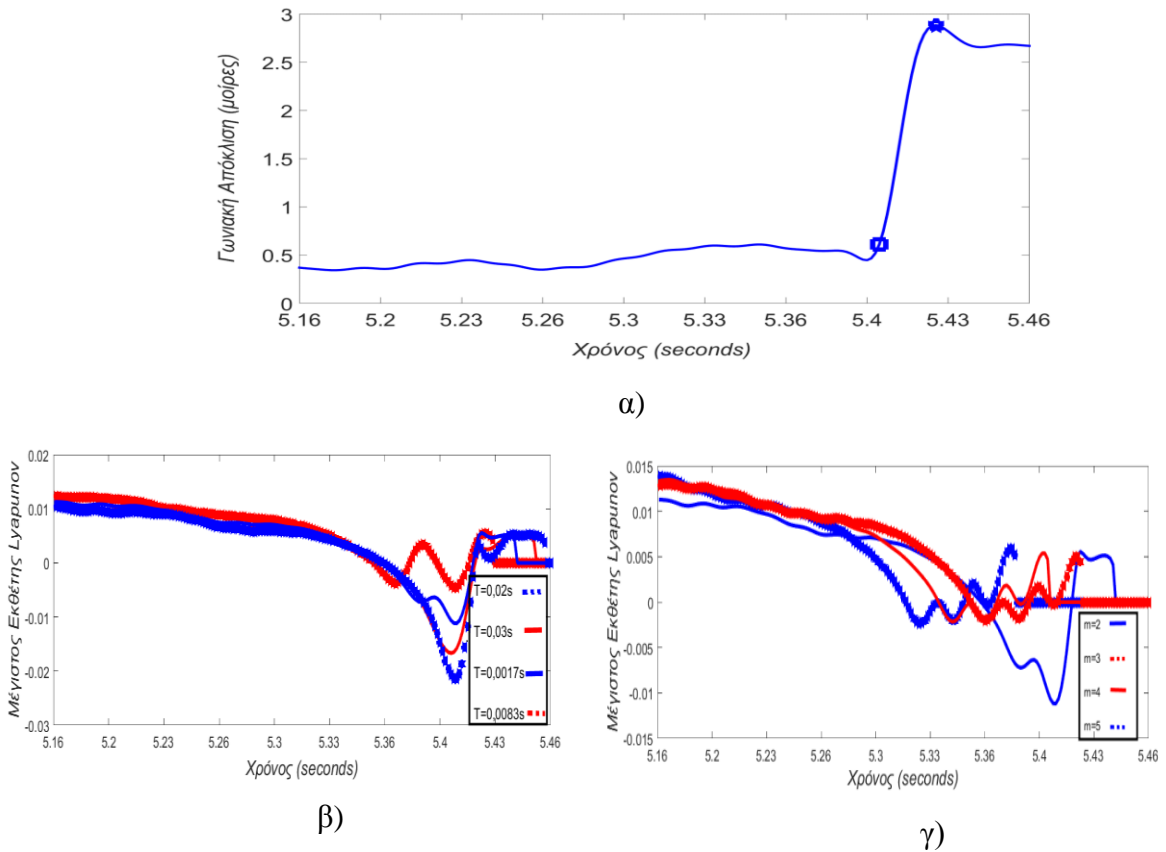
Οι τιμές της χρονικής καθυστέρησης βρίσκονται στο διάστημα μεταξύ 0,017 δευτερόλεπτα και 0,03 δευτερόλεπτα σε όλα τα διαθέσιμα σήματα. Επίσης, η τιμή της παραμέτρου τ μπορεί να εκτιμηθεί με τη μέθοδο της αμοιβαίας πληροφορίας όπως αυτή

αναπτύσσεται στην εργασία (Fraser & Swinney, 1986). Οι τιμές της χρονικής καθυστέρησης εκτιμώνται από δύο μεθόδους και δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση ($p\text{-value} \cong 0,98$ για $t\text{-test}$ με επίπεδο σημαντικότητας 0,05).

Διαφορετικές τιμές της χρονικής καθυστέρησης κρατώντας σταθερή την διάσταση εμβάθυνσης δοκιμάστηκαν. Όπως είναι φανερό στην Εικόνα 5.8, ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις μικρές μεταβολές στην τιμή της παραμέτρου της χρονικής καθυστέρησης. Συγκεκριμένα, για το σήμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 5.8(α), αν η τιμή της χρονικής καθυστέρησης παίρνει τιμές μεταξύ 0,02 δευτερόλεπτα και 0,03 δευτερόλεπτα, τα αποτελέσματα θα είναι όμοια, λαμβάνοντας υπόψη ότι το σημείο της σακκαδικής που ανιχνεύεται αρχικά είναι η ελάχιστη αρνητική τιμή του μέγιστου εκθέτη Lyapunov μεταξύ των δύο διαδοχικών μηδενισμών. Από την άλλη μεριά, αν η χρονική καθυστέρηση τ είναι μεταξύ 0,0083 δευτερόλεπτα και 0,017 δευτερόλεπτα, η ανίχνευση του σημείου με την ελάχιστη τιμή δεν αντιστοιχίζεται στο σημείο της σακκαδικής.

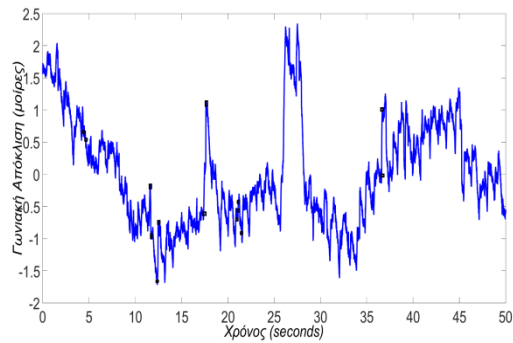
Η επίδραση της διάστασης εμβάθυνσης m στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων μελετήθηκε στη συνέχεια. Για το σήμα στην Εικόνα 5.8(α), η χρονική καθυστέρηση ορίστηκε σε $\tau = 0,0183\text{ s}$ και ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Lyapunov υπολογίστηκε για διαφορετικές τιμές της διάστασης εμβάθυνσης μεταξύ 2 και 5. Η διάσταση εμβάθυνσης υπολογίστηκε με την μέθοδο των κοντινά εσφαλμένων γειτόνων καταλήγοντας σε $m = 2$. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.8(γ) όταν η διάσταση εμβάθυνσης είναι 3, 4 ή 5, η ελάχιστη τιμή του χρονικά εξαρτώμενου μέγιστου εκθέτη Lyapunov αντιστοιχεί στο σημείο ακριβώς πριν την έναρξη της σακκαδικής (όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5.8(α)).

Αυτόματη Ανίχνευση Οφθαλμικών Κινήσεων Με Χρήση Εκθετών Λγαρινων.

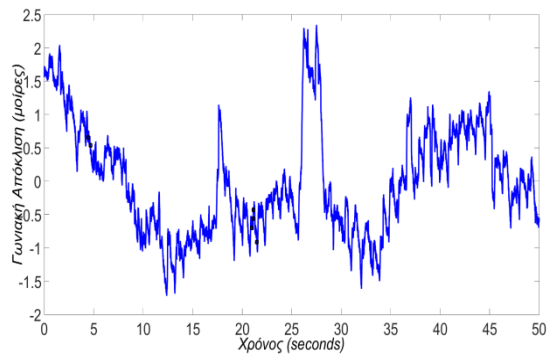


Εικόνα 5.8: α) Τυπικό σήμα που εμπεριέχει σακκαδική. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν στην έναρξη και ο αστερίσκος στον τερματισμό της σακκαδικής. β) Ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Λγαρινων για διαφορετικές τιμές του τ για $m = 2$. γ) Ο τοπικά μέγιστος εκθέτης Λγαρινων για διαφορετικές τιμές του m για $\tau = 0,0183 s$.

Η προτεινόμενη μέθοδος χρήζει βελτίωσης στην εφαρμογή των σημάτων με υψηλή δραστηριότητα κίνησης στην διαδικασία προσήλωσης. Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος Velocity Threshold παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα, Εικόνα 5.9. Στις Εικόνες 5.9(α) και (β) οι σακκαδικές που ανιχνεύονται από τον αλγόριθμο Velocity Threshold και την προτεινόμενη μέθοδο σημειώνονται με μαύρες τελείες, αντίστοιχα.



α)

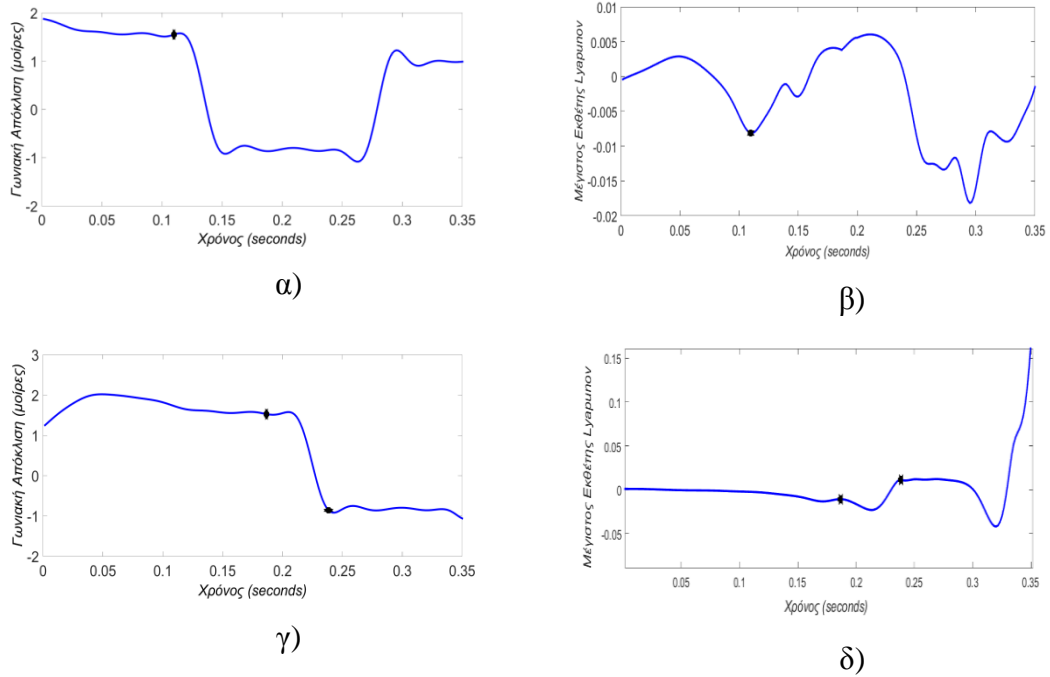


β)

Εικόνα 5.9: Οι μαύρες τελείες σημειώνουν την έναρξη και τον τερματισμό των ανιχνεύσιμων σακκαδικών από α) τον Velocity Threshold αλγόριθμο και β) την προτεινόμενη μεθοδολογία.

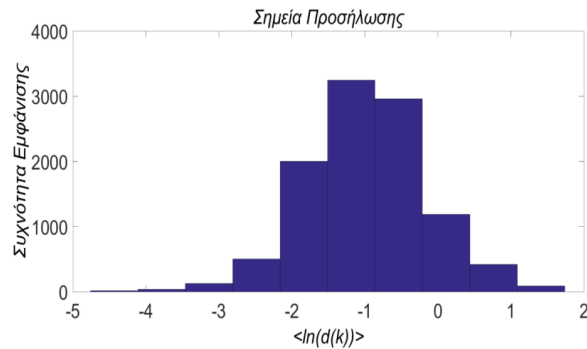
Καθώς ο υπολογισμός του τοπικά μέγιστου εκθέτη Lyapunov εξαρτάται από την δυναμική του κάθε σήματος που εξετάζεται, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ο αλγόριθμος ανιχνεύει τις σακκαδικές και τους βλεφαρισμούς ακόμα και στην περίπτωση που το παράθυρο εμπεριέχει πολλαπλές σακκαδικές ή βλεφαρισμούς. Στην Εικόνα 5.10(α) φαίνεται μέρος ενός σήματος που περιέχει δύο σακκαδικές. Στην Εικόνα 5.10(β) φαίνεται ο αντίστοιχος μέγιστος εκθέτης Lyapunov, όπου με μαύρη τελεία σημειώνεται το πρώτο σημείο ανίχνευσης του αλγορίθμου. Στην συνέχεια τοποθετείται το παράθυρο πάνω στο σήμα με κέντρο αυτό το σημείο (Εικόνα 5.10(γ)) ώστε να ανιχνευθεί το σημείο έναρξης και τερματισμού της πρώτης ανιχνευθείσας σακκαδικής. Στην Εικόνα 5.10(δ) φαίνεται ο αντίστοιχος μέγιστος εκθέτης Lyapunov, όπου με μαύρη τελεία σημειώνεται το σημείο έναρξης και τερματισμού της σακκαδικής. Στη συνέχεια το παράθυρο ολισθαίνει στο τέλος της πρώτης σακκαδικής.

Αυτόματη Ανίχνευση Οφθαλμικών Κινήσεων Με Χρήση Εκθετών Λγαρυνον.



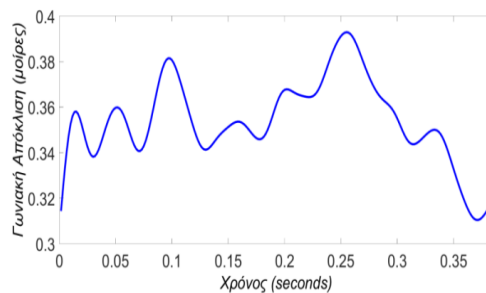
Εικόνα 5.10: α) Μεγέθυνση μέρους του σήματος της εικόνας 5.1(α), η μαύρη τελεία αποτελεί το ανιχνεύσιμο σημείο της πρώτης σακκαδικής, β) ο αντίστοιχος μέγιστος εκθέτης Λγαρυνον, γ) μετακίνηση του παραθύρου με κέντρο το σημείο που ανιχνεύθηκε, η έναρξη και ο τερματισμός της σακκαδικής σημειώνονται με δύο μαύρες τελείες, δ) ο αντίστοιχος μέγιστος εκθέτης Λγαρυνον.

Μελλοντική εργασία αποτελεί η ανίχνευση των σημείων προσήλωσης με την προτεινόμενη μέθοδο, καθώς παρατηρήθηκε ότι διαφοροποιείται σημαντικά από τις σακκαδικές και τους βλεφαρισμούς. Ειδικά, αν το 95,0% των τιμών του $\langle \ln(d(k)) \rangle$ βρίσκεται στο διάστημα $[-1,39 - 0,98]$, τότε το παράθυρο περιέχει σημεία προσήλωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.11. Σε αυτή την περίπτωση το παράθυρο ολισθαίνει μέχρι $\lambda_1(k) > 0$.

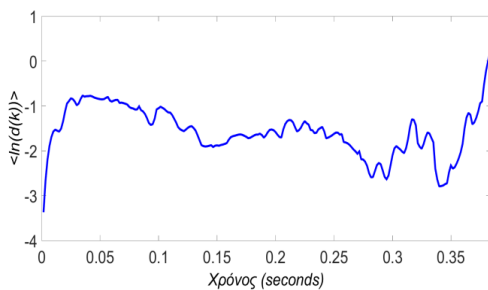


Εικόνα 5.11: Το ιστόγραμμα των μέσων τιμών του λογαρίθμου της απόκλισης των σημείων για κάθε k από μέρη των σημάτων που περιέχουν σημεία προσήλωσης.

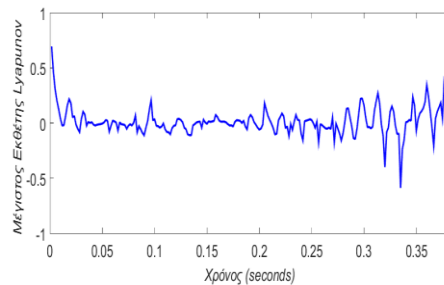
Στην Εικόνα 5.12(α), απεικονίζεται μέρος του σήματος που περιέχει μόνο σημεία προσήλωσης, ο λογάριθμος της απόκλισης των σημείων και ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov από μέρος ενός σήματος που περιέχει σημεία προσήλωσης. Παρατηρείται ότι ο λογάριθμος της απόκλισης των σημείων αντιστοιχεί μόνο σε αρνητικές τιμές.



α)



β)



γ)

Εικόνα 5.12: α) Η γωνιακή απόκλιση του οφθαλμού σε μέρος του σήματος που περιέχει μόνο σημεία προσήλωσης, β) ο αντίστοιχος λογάριθμος της απόκλισης των σημείων $\langle \ln(d(k)) \rangle$ και γ) ο αντίστοιχος μέγιστος εκθέτης Lyapunov. Οι εικόνες προέρχονται από μέρη του σήματος του σχήματος 5.1(α).

Ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου για την επεξεργασία ενός σήματος 30.000 σημείων ήταν 3 λεπτά (PC με Intel i7 επεξεργαστή των 3,4GHz και 8GB RAM). Ωστόσο, ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου εξαρτάται από τον αριθμό των σακκαδικών/βλεφαρισμών ο οποίος υφίσταται σε ένα σήμα.

Ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov αποτελεί ένα μέτρο ευστάθειας ο οποίος εφαρμόζεται συχνά στην ανάλυση σήματος. Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, είναι η πρώτη φορά που η μέθοδος του μέγιστου εκθέτη Lyapunov σε συνδυασμό με τον λογάριθμο απόκλισης των σημείων του σήματος εφαρμόζονται σε οφθαλμικά σήματα για την ανίχνευση των σακκαδικών και των βλεφαρισμών, καθώς και για τον εντοπισμό της έναρξης και του τερματισμού αυτών. Η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι πάνω από 96,9% για την ανίχνευση των σακκαδικών και των βλεφαρισμών ενώ η έναρξη και ο τερματισμός αυτών ανιχνεύονται με μέσο απόλυτο σφάλμα 0,018 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,002 δευτερόλεπτα) και 0,016 δευτερόλεπτα (τ.α. = 0,001 δευτερόλεπτα) για τις σακκαδικές και τους βλεφαρισμούς. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα σε κλινικές δοκιμές εξαιτίας της γρήγορης απόκρισης. Αποτελεί έναν αυτόματο τρόπο ο οποίος μελλοντικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη ανίχνευση σημείων προσήλωσης καθώς και στην πρόβλεψη όλων των τύπων οφθαλμικών κινήσεων.

Κεφάλαιο 6

Ανάλυση Παρεμβατικών Σακκαδικών Κινήσεων με Χρήση Μοντέλων Μάρκοβ

6.1 Εισαγωγή

Οι σακκαδικές κινήσεις μεταφέρουν στην περιοχή του βοθρίου την ακριβή εικόνα του οπτικού πεδίου. Ενώ η οφθαλμική προσήλωση ενεργοποιείται για την επεξεργασία της εικόνας, παράλληλα, η αναστολή των αντανακλαστικών σακκαδικών κινήσεων δραστηριοποιείται. Η παραγωγή και η αναστολή των σακκαδικών πιστεύεται ότι βασίζεται σε ένα σύνθετο νευρωνικό δίκτυο το οποίο ωριμάζει μετά τους πρώτους μήνες της ζωής μας (Johnson, 1990). Αυτό το νευρωνικό δίκτυο περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό εγκεφαλικών δομών, οι οποίες εκτείνονται από τον εγκεφαλικό φλοιό στην γέφυρα του εγκεφάλου. Νευρώνες από τον ανώτερο λοφίσκο (superior colliculus) και τις ενδιάμεσες συνδέσεις αποτελούν το δίκτυο αυτό. Η ύπαρξη αυτών

των νευρώνων προσήλωσης στον ανώτερο λοφίσκο υποδηλώνει την σημαντικότητα των υποφλοιωδών δομών στην διατήρηση της ενεργής προσοχής.

Μολονότι οι υποφλοιωδείς δομές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προσήλωση, και άλλες περιοχές του εγκεφάλου συμμετέχουν στην διαδικασία της διατήρησης προσοχής. Μία περιοχή ενδιαφέροντος στην παραγωγή ανασταλτικών σακκαδικών και διατήρησης προσοχής είναι ο εμπρόσθιος και πλάγιο-οπίσθιος λοβός (περιοχή 46). Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, αυτή η περιοχή λειτουργεί ως εποπτική περιοχή, η οποία αναστέλλει ενεργά ανεπιθύμητες αντανακλαστικές σακκαδικές όταν έχει επιβληθεί διατήρηση προσήλωσης (Gooding, D C, 1999). Η προσήλωση κατά την απουσία οπτικού κινήτρου μελετήθηκε σε πιθήκους καταλήγοντας ότι η προσήλωση των ζώων σε οπτικό κίνητρο οδηγεί στην αύξηση της δραστηριότητας των νευρώνων προσήλωσης. Έτσι, υποδηλώνεται ότι ο αμφιβληστροειδής είναι αυτός που καθοδηγεί την νευρωνική δραστηριότητα στην διαδικασία προσήλωσης. Αυτή η δραστηριότητα μειώνεται όταν το κίνητρο εξαφανίζεται όμως διατηρεί ένα επίπεδο εκκένωσης υποδηλώνοντας την παρουσία μίας πρόσθετης ώσης του αμφιβληστροειδή η οποία οδηγεί τους νευρώνες προσήλωσης (Munoz, D P; Wurtz , R H, 1993a). Έτσι, η προσήλωση χωρίς την παρουσία κινήτρου ίσως εμπεριέχει την ίδια καθοδήγηση με αυτή της οπτικής προσήλωσης σε αντικείμενο στόχο.

Η διατήρηση της ενεργής προσοχής είναι σημαντική για την αντιληπτική διαδικασία και θεωρείται ότι συμμετέχει στην ενεργή αναστολή των ανεπιθύμητων σακκαδικών κινήσεων, αποκαλούμενες ως παρεμβατικές σακκαδικές κινήσεις. Η ικανότητα διατήρησης της προσήλωσης για μία χρονική περίοδο έχει προταθεί ως μέτρηση της αστάθειας προσήλωσης στους ανθρώπους. Επίσης, αυτή η δοκιμασία προσήλωσης για μία χρονική περίοδο έχει προταθεί για την μελέτη ασθενών με σχιζοφρένεια. Οι ασθενείς αυτοί παρουσιάζουν ελαττωματική καταστολή των ανεπιθύμητων σακκαδικών σε αντίθεση με τους υγιείς στην ενεργή οπτική προσήλωση (Mialet & Pichot, 1981), (Amador, et al., 1991), (Amador, et al., 1995) και στην ενεργή οπτική προσήλωση με παρουσία στόχων απόσπασης προσοχής (Paus, 1991), (Curtis, et al. 2001).

Η μελέτη διενεργήθηκε σε δείγμα υγιών ανδρών (Smyrnis, et al., 2004) υπό τις διαδικασίες προσήλωσης όπως παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3. Η απόδοση των υγιών ατόμων σε διαδικασίες προσήλωσης ήταν αρκετά ικανοποιητική, σχετικά με την ικανότητα διατήρησης προσήλωσης και καταστολής των παρεμβατικών σακκαδικών κινήσεων. Παρόλα αυτά η πλειονότητα αυτών παρήγαγε έναν μικρό αριθμό παρεμβατικών σακκαδικών κινήσεων κατά τη διάρκεια της ενεργής προσήλωσης. Η συχνότητα εμφάνισης των ανεπιθύμητων σακκαδικών

ήταν μεγαλύτερη στην διαδικασία προσήλωσης στο σκοτάδι σε σχέση με τις υπόλοιπες δοκιμασίες. Επίσης, η συχνότητα των παρεμβατικών σακκαδικών κινήσεων αυξάνεται στην διάρκεια της διαδικασίας προσήλωσης γεγονός που πάλι είναι εμφανέστερο στην προσήλωση στο σκοτάδι.

Μελέτες σχετικά με την ενεργή προσήλωση σε υγιή και ασθενή άτομα χρησιμοποιούν ευρέως την συχνότητα των παρεμβατικών σακκαδικών κινήσεων για την εκτίμηση της απόδοσης των διαδικασιών προσήλωσης. Ωστόσο, αυτή η ανάλυση δεν εμπεριέχει πληροφορία της χρονικής σειράς των γεγονότων. Το ερώτημα το οποίο προκύπτει είναι εάν οι παρεμβατικές σακκαδικές κινήσεις συμβαίνουν με τυχαίο τρόπο όταν το άτομο προσπαθεί να διατηρήσει την προσοχή ή εάν υπάρχει πρότυπο στην αναπαραγωγή αυτών. Μία αρκετά δυνατή προσέγγιση για την ανίχνευση τέτοιων προτύπων στην χρονική σειρά γεγονότων αποτελεί η ανάλυση με αλυσίδες Μάρκοβ.

Οι αλυσίδες Μάρκοβ έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλά πεδία για την ανάλυση χρονοσειρών, την αναγνώριση προτύπων και την ανάλυση στοχαστικών διαδικασιών, με σκοπό την κατανόηση του μηχανισμού γένεσης τέτοιων γεγονότων και την πρόβλεψη μελλοντικών καταστάσεων του συστήματος που μελετάται (Ricardo , 2008), (Ktonas, et al., 1990), (Ktonas, et al., 2000). Οι αλυσίδες Μάρκοβ έχουν εφαρμοστεί επίσης στην μελέτη πρότυπων οφθαλμικών κινήσεων. Στην εργασία των Ellis και Stark (1986) οι καταστάσεις μίας αλυσίδας Μάρκοβ ορίστηκαν ως σημεία ενδιαφέροντος σε εικόνες. Η στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των αναμενόμενων μεταβάσεων με βάση το κριτήριο της συχνότητας μετάβασης και των υλοποιήσιμων μεταβάσεων κρίθηκε με τον έλεγχο χ^2 . Οι Juttner και Wolf (1994) εφάρμοσαν ένα μοντέλο Μάρκοβ δύο καταστάσεων, όπου κάθε κατάσταση αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο είδος σακκαδικής «ενεργή» ή «φυσιολογική» σακκαδική. Η κατανομή των καθυστερήσεων των σακκαδικών εξαρτάται από την οπτική διαδικασία που ακολουθεί ο εξεταζόμενος και κατά συνέπεια τον τύπο της σακκαδικής. Οι Nikolaou et al. (2004) εξέτασαν τα σημεία ενδιαφέροντος σε λαπαροσκοπικές διαδικασίες με χρήση της πρώτης τάξης αλυσίδας Μάρκοβ, με σκοπό την ανάλυση της γνωστικής διαδικασίας σε σχέση με την ανάπτυξη των σακκαδικών κινήσεων. Οι Bettenbuhl et al. (2012) χρησιμοποίησαν μοντέλα Μάρκοβ για την ανάλυση της ύπαρξης μνήμης σε ακολουθίες μικρο-σακκαδικών κινήσεων. Ως καταστάσεις του μοντέλου θεωρήθηκαν οι οριζόντιες δεξιές και αριστερές μικροσακκαδικές.

Στην εργασία (Boukadoum & Ktonas, 1988), γρήγορες οφθαλμικές κινήσεις κατά την διάρκεια του ύπνου (REM) έχουν μοντελοποιηθεί με την χρήση αλυσίδων Μάρκοβ. Συγκεκριμένα, ο εντοπισμός της ευστάθειας της κατάστασης REM οδήγησε στην υπόθεση ύπαρξης ντετερμινισμού στην παραγωγή REM καταστάσεων. Στην εργασία (Ktonas, et al., 1990), μελετήθηκε η ομαδοποίηση των προτύπων των REM καταστάσεων στη διάρκεια του πρώτου χρόνου της ζωής του ανθρώπου. Υιοθετώντας ότι η γένεση των REM καταστάσεων ακολουθούν το μοντέλο Μάρκοβ προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι REM καταστάσεις τείνουν να ομαδοποιηθούν σε ριπές κατά τη διάρκεια του πρώτου έτους της ζωής μας. Στην εργασία (Douglass, et al., 1992) οι REM καταστάσεις κατηγοριοποιήθηκαν σε δύο καταστάσεις: την παρουσίαση REM κατά ριπές και την μεμονωμένη παρουσίαση REM. Η ανάλυση Μάρκοβ εφαρμόστηκε σε δύο ομάδες ανθρώπων υγιών και ασθενών δείχνοντας ότι και οι δύο ομάδες παρουσιάζουν υψηλή πιθανότητα εστίασης στην πρώτη κατάσταση. Στην μελέτη (Nygren, 1994), οι αλυσίδες Μάρκοβ προτάθηκαν για την αποτίμηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ μεμονωμένων REM καταστάσεων κατά τον ύπνο σε υγιή άτομα. Ένα μοντέλο δύο καταστάσεων εφαρμόστηκε για την ανίχνευση προτύπων τα οποία διατηρούνται κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Οι παραπάνω βιβλιογραφικές αναφορές περιγράφουν τις καταστάσεις ενός συστήματος που αντιστοιχούν σε διαδικασίες παρακολούθησης, έτσι τα παραπάνω μοντέλα ορίζονται ως «παρατηρούμενα» μοντέλα Μάρκοβ (observable). Επέκταση αυτών των μοντέλων αποτελούν τα «κρυφά» μοντέλα Μάρκοβ (Hidden Markov Models - HMMs) (Rabiner, 1989), (Johnson and Willsky, 2013). Οι εφαρμογές των HMMs στην ανάλυση των οφθαλμικών κινήσεων είναι δύο κατηγοριών. Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στον καθορισμό των διαδικασιών που «κρύβονται» πίσω από την ακολουθία των παρατηρούμενων καταστάσεων. Ουσιαστικά, πρόκειται για ανίχνευση της δοκιμασίας στην οποία υποβάλλεται ο εξεταζόμενος, καθώς διαφορετικές διεργασίες αποφέρουν διαφορετικές μεταβάσεις των οφθαλμικών κινήσεων ((Feng, 2006), (Simola et al., 2008), (Haji-Abolhassani, 2013)). Στην δεύτερη κατηγορία, τα HMMs εφαρμόζονται για την διακριτοποίηση μεταξύ υγιών και ασθενών σύμφωνα με την επιτυχημένη ακολουθία των σακκαδικών η οποία εκφράζεται με αλυσίδα Μάρκοβ (Lagun et al., 2011).

Οι αλυσίδες Μάρκοβ εφαρμόστηκαν στην παρούσα διατριβή για την ανίχνευση προτύπου στην παραγωγή παρεμβατικών σακκαδικών κατά τη διάρκεια προσήλωσης. Ως καταστάσεις της αλυσίδας ορίστηκαν τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών παρεμβατικών σακκαδικών (Inter-Saccadic Interval, ISI). Συγκεκριμένα, δύο διαφορετικές κατηγορίες των ISIs ορίστηκαν με βάση το μήκος του ISI, δηλαδή τη χρονική διάρκεια αυτού. Οι καταστάσεις

ορίζονται ως εξής «μικρό» ISI (“short” ISI) και «μεγάλο» ISI (“long” ISI). Ωστόσο, οι σακκαδικές κινήσεις μπορούν να συμβούν σε τυχαίες χρονικές στιγμές, και το γεγονός αυτό απαιτεί ανάλυση με Ημί-Μαρκοβιανή αλυσίδα, όπου τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των σακκαδικών αποτελούν την τυχαία μεταβλητή. Μια Ημί-Μαρκοβιανή στοχαστική διαδικασία είναι μια στοχαστική διαδικασία στην οποία οι καταστάσεις αλλάζουν σύμφωνα με μια Μαρκοβιανή αλυσίδα, ενώ μεσολαβεί ένα τυχαίο χρονικό διάστημα μεταξύ των μεταβάσεων. Στην συγκεκριμένη ανάλυση δεν μελετάμε την χρονική διάρκεια όπου μένει ο οφθαλμός σε μία κατάσταση αλλά την χρονική διάρκεια μετάβασης της ακολουθίας των ISIs.

Με αυτή την ανάλυση προσεγγίζεται η μοντελοποίηση πρώτης και δεύτερης τάξης των παρατηρούμενων ISIs παρεμβατικών σακκαδικών κινήσεων και όχι η ανάλυση μη παρατηρούμενων «κρυφών» καταστάσεων όπως γίνεται με τη χρήση HMMs. Σκοπός είναι η μελέτη της στοχαστικότητας αυτών των παρεμβατικών σακκαδικών, καθώς το γεγονός αυτό οδηγεί στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του εγκεφάλου σε υγιή άτομα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ανάλυση των διαστημάτων μεταξύ των σακκαδικών με χρήση Μοντέλων Μάρκοβ. Για τον σκοπό αυτό αρχικά μέθοδοι ομαδοποίησης, όπως ο αλγόριθμος Affinity Propagation και η επιλογή κατωφλίου διαχωρισμού, εφαρμόστηκαν. Πέραν του καθορισμού α) του πλήθους και β) του κατωφλίου διαχωρισμού των ομάδων, η απομάκρυνση σακκαδικών παρεμβολών (SWJs) αποτέλεσε ένα σημαντικό μέρος της ακριβής υλοποίησης του αλγορίθμου. Η ανάλυση των ενδιάμεσων διαστημάτων των αποκαλούμενων παρεμβατικών σακκαδικών οδήγησε στον καθορισμό δύο προτύπων κίνησης των οφθαλμών σε διαδικασίες προσήλωσης και κατά συνέπεια σε εγκεφαλικές διαδικασίες.

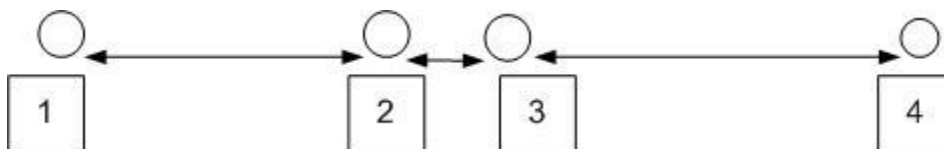
6.2 Προ-επεξεργασία Δεδομένων

Τα δεδομένα εισήχθησαν στο σύστημα που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4. Η έξοδος του συστήματος είναι ένα αρχείο με τρεις στήλες: την χρονική στιγμή έναρξης, την χρονική στιγμή τερματισμού και το πλάτος της σακκαδικής. Το πλάτος της σακκαδικής μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό ανάλογα με τη φορά της κίνησης δεξιά ή αριστερά, αντίστοιχα. Η έναρξη των σακκαδικών κινήσεων σημειώθηκε σε κάθε σήμα.

Πρέπει να τονιστεί ότι το σύστημα καταγραφής (IRIS) το οποίο χρησιμοποιήθηκε ανιχνεύει μόνο οριζόντιες κινήσεις και δεν ανιχνεύει τυχόν κατακόρυφες σακκαδικές. Σε αυτή τη μελέτη, σακκαδικές πλάτους πάνω από 0.5° γωνιακή απόκλιση χρησιμοποιήθηκαν για τον

καθορισμό των ενδιάμεσων διαστημάτων, γνωστά ως ISIs. Επιπρόσθετα, ένα κάτω όριο στη χρονική διάρκεια των ISIs ορίσθηκε στα 450ms. Σκοπός είναι η απομάκρυνση των σακκαδικών παρεμβολών “square wave jerks” (SWJs) όπως αυτές περιγράφονται στην παράγραφο 2.3.6. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η διάρκεια των σακκαδικών παρεμβολών είναι μεταξύ 100-450ms. Κατάλληλος αλγόριθμος αναπτύχθηκε για την απομάκρυνση των σακκαδικών παρεμβολών ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

Έστω τέσσερις διαδοχικές σακκαδικές όπως αυτές φαίνονται στην Εικόνα 6.1.



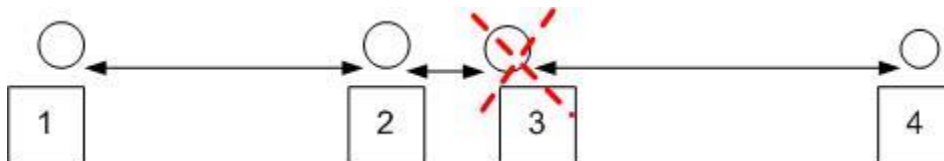
Εικόνα 6.1: Τέσσερις διαδοχικές σακκαδικές.

Οι σακκαδικές 2 και 3 έχουν αντίθετη κατεύθυνση και το ενδιάμεσο διάστημα μεταξύ αυτών είναι μικρότερο από 450ms.

Βήμα 1) Υπολογισμός των ISIs. Υπολογίζεται κάθε ISI ανεξαρτήτως από την χρονική διάρκεια αυτού η οποία έχει εύρος από 0-50 δευτερόλεπτα.

Βήμα 2) Απομάκρυνση των ISIs διάρκειας μικρότερης από 450ms μεταξύ των σακκαδικών διαφορετικής κατεύθυνσης (σακκαδικές 2 και 3), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.2.

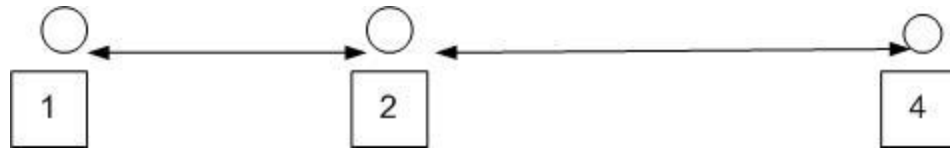
Δύο διαδοχικές σακκαδικές με ISI μικρότερο από 450ms και ίδια κατεύθυνση δεν θεωρούνται σακκαδική παρεμβολή.



Εικόνα 6.2: Τέσσερις διαδοχικές σακκαδικές με ενδιάμεση σακκαδική παρεμβολή μεταξύ των σακκαδικών 2 και 3.

Με αυτόν τον τρόπο η σακκαδική 3 διαγράφεται ενώ η σακκαδική 2 παραμένει, έτσι απαλείφεται το ISI της σακκαδικής παρεμβολής μεταξύ της 2 και της 3.

Βήμα 3) Υπολογισμός των νέων ISIs (Εικόνα 6.3) μεταξύ των σακκαδικών (1, 2, 4). Δύο ISIs υπολογίζονται, αυτά μεταξύ των σακκαδικών 1-2 και 2-4.



Εικόνα 6.3: Διαγραφή της σακκαδικής παρεμβολής.

6.3 Καθορισμός των κατηγοριών των ISIs

6.3.1 Η Μέθοδος Affinity Propagation

Για τον καθορισμό του πλήθους των κατηγοριών των ISIs, η μέθοδος ομαδοποίησης Affinity Propagation (AP) (Frey and Dueck, 2007) εφαρμόστηκε. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους ομαδοποίησης, ο Affinity propagation δεν χρειάζεται να γνωρίζει εξαρχής τον αριθμό των ομάδων και δεν επηρεάζεται από τις αρχικές συνθήκες. Η μέθοδος αυτή αποτελεί έναν επαναληπτικό αλγόριθμο κατά τον οποίο όλα τα «σημεία» θεωρούνται ως πιθανά κέντρα ομάδων. Κάθε σημείο θεωρείται ως ένας κόμβος ενός δικτύου και οι τιμές που ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων καλούνται «μηνύματα». Το πλάτος κάθε μηνύματος αντιστοιχεί στην τάση που έχει κάθε σημείο-κόμβος να επιλεγεί ως κέντρο μίας ομάδας. Η μέθοδος ψάχνει για ομάδες μέχρις ότου μεγιστοποιηθεί η συνάρτηση ομοιότητας μεταξύ των σημείων της ομάδας. Έστω x_i ένα σημείο ενός συνόλου σημείων x_n με άγνωστη δομή, και s η συνάρτηση υπολογισμού της ομοιότητας μεταξύ δύο σημείων τέτοια ώστε $s(x_i, x_j) > s(x_i, x_k)$ αν το x_i είναι περισσότερο όμοιο με το x_j από με το x_k . Κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου δύο πίνακες δημιουργούνται. Ο πίνακας R περιέχει τα στοιχεία $r(i, k)$ τα οποία εκφράζουν το πόσο ικανό είναι το σημείο k να αποτελέσει κέντρο ομάδας που θα περιλαμβάνει το σημείο i σε σχέση με άλλα σημεία που θα μπορούσαν να αποτελούν κέντρα της ομάδας με ένα από τα σημεία αυτά να είναι το i . Ο πίνακας A περιέχει τις τιμές $a(i, k)$ με τις οποίες εκφράζεται το πόσο κατάλληλο είναι το σημείο x_i να επιλέξει το x_k σαν κέντρο της ομάδας που θα ανήκει, λαμβάνοντας υπόψιν και τα υπόλοιπα σημεία που θα επέλεγαν το x_i σαν κέντρο της ομάδας τους. Αρχικά οι πίνακες A και R είναι μηδενικοί. Η υλοποίηση του αλγορίθμου περιέχει 2 βήματα:

1. Υπολογίζεται η ικανότητα όλων των σημείων να αποτελούν κέντρα ομάδων των υπόλοιπων σημείων. Τα κέντρα των ομάδων διαφοροποιούνται από τα υπόλοιπα σημεία καθώς οι τιμές για αυτά στον πίνακα R είναι θετικές, $r(i,i) > 0$.

2. Στη συνέχεια υπολογίζεται η προτίμηση των σημείων να επιλέξουν ως κέντρο της ομάδας που θα ανήκουν το x_k , $a(i,k) < -\min \left(0, r(k,k) + \sum_{i \notin \{i,k\}} \max(0, r(i',k)) \right)$ για $i \neq k$ και $a(k,k) < -\sum_{i \neq k} \max(0, r(i',k))$.

Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται έως ώτου οι ομάδες παραμένουν σταθερές ύστερα από έναν καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Στην παρούσα διατριβή, τα σημεία είναι τα ISIs και $s(i,k)$ είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ISI i και ISI k .

6.3.2 Η Μέθοδος Bootstrap

Στη στατιστική, η μέθοδος Bootstrap είναι μια σύγχρονη, υπολογιστικο-κεντρική, γενικού σκοπού προσέγγιση για στατιστικά συμπεράσματα, που εμπίπτει σε μια ευρύτερη κατηγορία μεθόδων λήψης δείγματος. Στην περίπτωση όπου ένα σύνολο παρατηρήσεων μπορεί να υποτίθεται ότι προέρχεται από έναν ανεξάρτητο και όμοια κατανομημένο πληθυσμό, μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος για την κατασκευή ενός αριθμού δειγμάτων εκ νέου από το παρατηρηθέν σύνολο δεδομένων (και ίσου μεγέθους με το παρατηρηθέν σύνολο δεδομένων), κάθε ένα από το οποίο λαμβάνεται από τυχαία δειγματοληψία με επανατοποθέτηση από το αρχικό σύνολο δεδομένων. Χρησιμοποιείται συχνά ως εναλλακτική λύση για την εξαγωγή συμπερασμάτων βασισμένων σε παραμετρικές υποθέσεις όταν αυτές είναι υπό αμφισβήτηση, ή όπου παραμετρικά συμπεράσματα είναι αδύνατα ή απαιτούνται πολύ περίπλοκοι τύποι για τον υπολογισμό λαθών. Η μέθοδος Bootstrap επιτρέπει τη συλλογή πολλών εναλλακτικών εκδόσεων της απλής στατιστικής η οποία κανονικά θα υπολογιζόταν από ένα δείγμα. Παραδείγματος χάριν, έστω ότι ενδιαφέρει το ύψος των ανθρώπων παγκοσμίως. Δεδομένου ότι δεν μπορεί να μετρηθεί όλος ο πληθυσμός, επιλέγεται μόνο ένα μικρό μέρος από αυτόν. Από αυτό το δείγμα μόνο μια στατιστική τιμή μπορεί να ληφθεί, δηλ. ένας μέσος ή μία τυπική απόκλιση κ.λπ. και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν αποτελέσματα για το πόσο ποικίλλει αυτή η στατιστική. Με τη χρήση της Bootstrap, εξάγεται τυχαία ένα νέο δείγμα από το δείγμα των δεδομένων, όπου κάθε παρατήρηση μπορεί να επιλεχτεί ένα ορισμένο πλήθος φορές. Κάνοντας αυτό αρκετές φορές,

δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός συνόλων δεδομένων που μπορεί να υπολογιστούν οι στατιστικές για καθένα από αυτά τα σύνολα. Κατά συνέπεια, δημιουργείται μια εκτίμηση της κατανομής της στατιστικής.

Στόχος είναι να ανιχνεύσουμε σε πόσες ομάδες μπορούν να διαχωριστούν τα δεδομένα μας. Για τον σκοπό αυτό, η μέθοδος Bootstrap εφαρμόστηκε (Efron, 1979), για την επιλογή τυχαίων δειγμάτων, 15.000 ISIs, και από τις τρεις δοκιμασίες προσήλωσης. Με τον τρόπο αυτό 1.000 διαφορετικά σύνολα δημιουργήθηκαν. Πάνω από το 95,0% των ISIs σε κάθε σύνολο τελικά κατηγοριοποιήθηκαν σε δύο ομάδες, ενώ το υπόλοιπο 5,0% διαχωρίστηκε σε τρίτη ομάδα. Το 5,0% κατά την διαδικασία του Bootstrap υπήρχαν περιπτώσεις που συμπεριλαμβανόταν στις δύο ομάδες για αυτό το λόγο ενσωματώθηκε στην έρευνα.

Ο αλγόριθμος AP χρησιμοποιήθηκε ως μέθοδος ελέγχου για το πλήθος των ομάδων στις οποίες διαχωρίστηκαν τα δεδομένα ISIs. Καθώς ο αλγόριθμος κατέληξε σε δύο ομάδες, η μία περιλαμβάνει τα "short" ISIs και η άλλη τα "long" ISIs. Για τον διαχωρισμό των δύο ομάδων βασιστήκαμε στο πλήθος των κορυφών και την συμμετρία της κατανομής των ISIs. Συγκεκριμένα, για κάθε δοκιμασία προσήλωσης (VFU, VFD και NTF) τα ISIs από όλα τα άτομα χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό της κατανομής πιθανότητας αυτών.

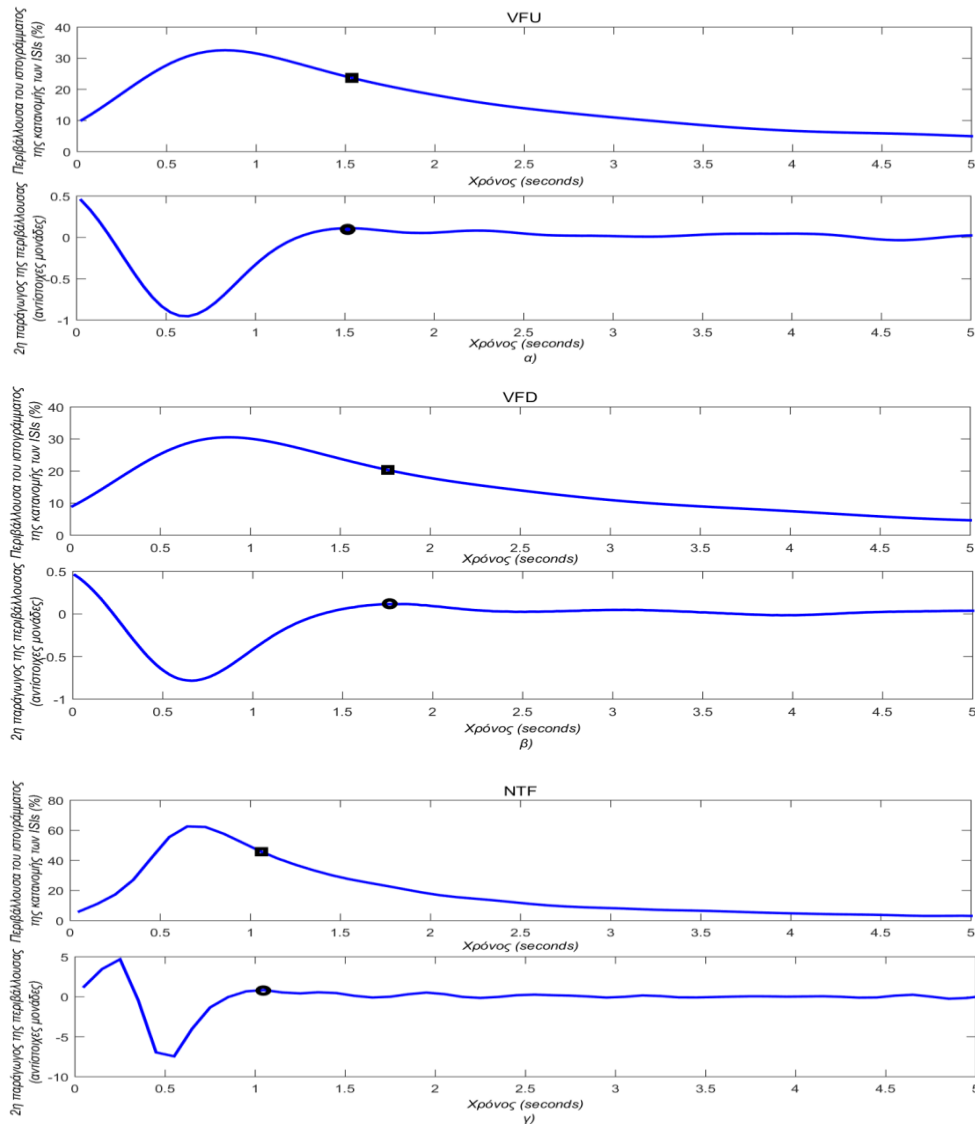
6.3.3 Η Ανίχνευση του κατωφλίου διαχωρισμού

Η διαδικασία για την ανίχνευση της χρονικής διάρκειας η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως κατώφλι για τον διαχωρισμό των δύο καταστάσεων περιγράφεται στη συνέχεια. Η οπτική ανίχνευση αυτού του κατωφλίου είναι σύνηθες σε παρόμοιες καταστάσεις, ειδικά όταν το ιστόγραμμα της κατανομής παρουσιάζει δύο κορυφές. Παρόλα αυτά, η οπτική επίβλεψη δεν καθιστά τα αποτελέσματα αντικειμενικά καθώς εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως το πλάτος των διαστημάτων στο ιστόγραμμα (bin-width). Στην παρούσα μελέτη, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση του κατωφλίου που θα διαχωρίζει τις δύο καταστάσεις βασίζεται στην εκτίμηση της περιβάλλουσας της κατανομής (Lindblad, 2000). Η διαδικασία περιλαμβάνει δύο βήματα: α) την δημιουργία ιστογράμματος και β) τον υπολογισμό του κατωφλίου. Η δημιουργία του ιστογράμματος απαιτεί προσεκτική επιλογή του πλάτους των διαστημάτων (bin-width) το οποίο θα επιλεγεί. Αν αυτό είναι αρκετά μικρό τότε το ιστόγραμμα θεωρείται θορυβώδες. Αντίθετα, αν είναι αρκετά μεγάλο, τότε μπορεί να χάνεται πληροφορία από την κατανομή. Για αυτό τον λόγο πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διαφορετικές τιμές των

πλατών διαστημάτων, με σκοπό την μελέτη της επιρροής αυτών στην μορφολογία του ιστογράμματος. Σε αυτές τις δοκιμές έγινε εκτίμηση της περιβάλλουσας του ιστογράμματος, η οποία παρουσιάζει την ίδια μορφολογία, δηλαδή μία έντονη κορυφή ακολουθούμενη από απότομη μείωση (Εικόνα 6.4(α-γ)). Επιλέξαμε λοιπόν εκείνο το κατώφλι για τις τιμές του ISI (σημειώνονται με τετράγωνο στις πάνω καμπύλες των Εικόνων 6.4(α-γ)) στην οποία η δεύτερη παράγωγος της καμπύλης του ιστογράμματος μεγιστοποιείται (σημειώνονται με κύκλο στις κάτω καμπύλες των Εικόνων 6.4(α-γ)). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο σημείο μηδενισμού της πρώτης παραγώγου της περιβάλλουσας που αντιστοιχεί σε ένα τοπικό ελάχιστο της καμπύλης της περιβάλλουσας. Έτσι, για τις διαφορετικές τιμές των bin-width υπολογίστηκε το κατώφλι σε κάθε διαδικασία. Επιλέξαμε εκείνο το bin-width το οποίο αντιστοιχεί στην καλύτερη προσέγγιση της μέσης τιμής των κατωφλίων που προέκυψαν με διαφορετικές τιμές bin-width. Με αυτόν τον τρόπο αναμένεται ότι η επιλεγθείσα τιμή του κατωφλίου δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή του bin-width.

Για την ανίχνευση του κατωφλίου σε κάθε δοκιμασία, το εύρος του bin-width που εξετάστηκε ήταν από 0,005 δευτερόλεπτα έως 0,2 δευτερόλεπτα. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 6.1. Τα κατώφλια που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για τον διαχωρισμό “short” από “long” ISIs ήταν 1,525 δευτερόλεπτα, 1,7625 δευτερόλεπτα και 1,05 δευτερόλεπτα για τις δοκιμασίες VFU, VFD και NTF, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές βρίσκονται αρκετά κοντά στον μέσο όρο των τιμών.

Ανάλυση Παρεμβατικών Σακκαδικών Κινήσεων με Χρήση Μοντέλων Μάρκοβ



Εικόνα 6.4: Υπολογισμός του κατωφλίου για τις δοκιμασίες α) VFU, β) VFD και γ) NTF. Για κάθε διαδικασία δύο καμπύλες δίνονται. Η πάνω καμπύλη: Η περιβάλλουσα του ιστογράμματος της κατανομής των ISIs για κάθε δοκιμασία. Η κάτω καμπύλη: Η δεύτερη παράγωγος της περιβάλλουσας του ιστογράμματος. Το κατώφλι διαχωρισμού των δύο καταστάσεων (“short” και “long” ISIs) σε κάθε δοκιμασία είναι η τιμή του ISI (σημειώνεται με τετράγωνο) η οποία αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη τιμή της δεύτερης παραγώγου (σημειώνεται με κύκλο) η οποία είναι δεξιά από το μέγιστο της περιβάλλουσας.

Πίνακας 6.1 : Ανίχνευση του κατωφλίου για τον διαχωρισμό των μικρών και μεγάλων ISIs.

| Bin width (δευτερόλεπτα) | Κατώφλι (δευτερόλεπτα) VFU | Κατώφλι (δευτερόλεπτα) VFD | Κατώφλι (δευτερόλεπτα) NTF |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0,2 | 1,3 | 1,7 | 0,9 |
| 0,1 | 1,45 | 1,75 | 1,05 |
| 0,0625 | 1,5313 | 1,7813 | 1,0313 |
| 0,05 | 1,525 | 1,775 | 1,075 |
| 0,025 | 1,5375 | 1,7625 | 1,0875 |
| 0,01 | 1,605 | 1,745 | 1,105 |
| 0,005 | 1,5425 | 1,8525 | 1,1025 |
| Average | 1,4987 | 1,7666 | 1,0501 |

6.4 Ανάλυση Μάρκοβ

Στην παράγραφο αυτή αναλύονται μαθηματικά μοντέλα τα οποία ανήκουν σε μια μεγάλη οικογένεια στοχαστικών-πιθανοθεωρητικών μοντέλων, τα οποία ονομάζονται Μαρκοβιανά μοντέλα. Η έννοια της αλυσίδας Μάρκοβ (Markov Chain) βρίσκει σημαντικές εφαρμογές στη δημιουργία μοντέλων που περιγράφουν αλληλουχίες DNA ή και πρωτεϊνών. Η θεώρηση μιας ακολουθίας ενδεχομένων ως αλυσίδα Μάρκοβ στηρίζεται, πολύ απλά, στην ιδέα ότι κάθε ένα από τα ενδεχόμενα εξαρτάται μόνο από το αμέσως προηγούμενό του ή αλλιώς το κάθε ενδεχόμενο καθορίζει με κάποια πιθανότητα το αμέσως επόμενο του. Αν αυτή η εξάρτηση επεκταθεί και σε 2,3,...,k προηγούμενα ενδεχόμενα τότε μιλάμε για αλυσίδες Μάρκοβ 2^{ης},3^{ης}, ...,k^{ης} τάξης. Πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι το μοντέλο Μάρκοβ θεωρείται από πολλούς ερευνητές ως το πιο φυσικό για να περιγράψει αλληλουχίες μεγαλομορίων όπως του DNA αλλά και των πρωτεϊνών, και αυτό φαίνεται διαισθητικά φυσικό καθώς αυτή η εξάρτηση φαίνεται να προσεγγίζει την έννοια της πληροφορίας που εμπεριέχεται σε μια αλληλουχία. Ήδη από τη δεκαετία του 1970 τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνταν και χρησιμοποιούνται ακόμα με σκοπό

την αναγνώριση και επεξεργασία εικόνας, ήχου κ.α. και υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία πάνω στα θέματα αυτά. Η πιο απλή εξήγηση για τα παραπάνω είναι το γεγονός ότι σε οποιοδήποτε κωδικοποιημένο σύστημα επικοινωνίας όπως στις φυσικές γλώσσες, υπάρχει μια εσωτερική δομή που καθορίζει κάποιο είδος εξάρτησης των συμβόλων. Για παράδειγμα, στην αγγλική γλώσσα το γράμμα Q ακολουθείται σχεδόν πάντοτε από το U, άρα η πιθανότητα να εμφανιστεί το U σε μια θέση δεν είναι πάντα ίδια αλλά εξαρτάται από το αν προηγήθηκε το Q. Για την ακρίβεια, ο ίδιος ο Ρώσος Μαθηματικός Andrey Markov (1856-1922), οδηγήθηκε στην σύλληψη της έννοιας των ομώνυμων αλυσίδων, μελετώντας τις εναλλαγές φωνηέντων και συμφώνων σε κάποιο ποίημα του Pushkin (Markov, 1913).

Μια αλυσίδα Μάρκοβ 1^{ης} τάξης ορίζεται ως μια στοχαστική ανέλιξη διακριτών καταστάσεων σε διακριτό χρόνο. Στην περίπτωση των βιολογικών αλληλουχιών, ως καταστάσεις ορίζονται τα σύμβολα της ακολουθίας τα οποία ανήκουν σε ένα πεπερασμένο αλφάβητο Ω (τα τέσσερα νουκλεοτίδια στην περίπτωση του DNA ή τα 20 αμινοξέα στην περίπτωση των πρωτεϊνών). Αν θεωρήσουμε μια πρωτεϊνική αλληλουχία μήκους L καταλοίπων, και την ονομάσουμε S , έτσι ώστε:

$$S = S_1, S_2, \dots, S_{L-1}, S_L \quad (6.1)$$

και θεωρήσουμε την κατανομή των αμινοξέων σε κάθε θέση i κατά μήκος της αλληλουχίας ως τυχαία μεταβλητή, τότε μπορούμε να ορίσουμε την αλυσίδα Μάρκοβ, ως μια στοχαστική ανέλιξη η οποία διαθέτει τη λεγόμενη «Μαρκοβιανή Ιδιότητα». Στη διακριτή περίπτωση (όπως η συγκεκριμένη), η ανέλιξη αποτελείται από την ακολουθία των τυχαίων μεταβλητών S , η οποία παίρνει τιμές σε ένα «χώρο καταστάσεων» οριζόμενο από το συγκεκριμένο αλφάβητο. Οι τιμές των S_i συμβολίζουν την «κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα την χρονική στιγμή i ». Η Μαρκοβιανή ιδιότητα (σε διακριτό χρόνο) ορίζει ότι η δεσμευμένη κατανομή των «μελλοντικών» παρατηρήσεων $S_{i+1}, S_{i+2}, S_{i+3}$ δεδομένου του «παρελθόντος» $S_1, S_2, \dots, S_{i-1}, S_i$ εξαρτάται από το παρελθόν μόνο μέσω του S_i . Με άλλα λόγια, η γνώση της πιο πρόσφατης κατάστασης του συστήματος καθιστά τη λιγότερο πρόσφατη ιστορία άχρηστη. Αυτό τυπικά διατυπώνεται ως εξής: $P(S_i / S_{i-1}, S_{i-2}, \dots, S_1) = P(S_i / S_{i-1})$.

Μια συγκεκριμένη Αλυσίδα Μάρκοβ χαρακτηρίζεται από τον πίνακα των «πιθανοτήτων μετάβασης» (transition probabilities), ο οποίος πιο απλά ονομάζεται πίνακας μεταβάσεων. Τα στοιχεία αυτού του πίνακα, δίνονται από την παρακάτω σχέση: $a_{st} = P(S_i = t / S_{i-1} = s)$ η οποία

δηλώνει, την πιθανότητα το κατάλοιπο t να εμφανιστεί στη θέση i της αλληλουχίας, δεδομένου ότι το προηγούμενο κατάλοιπο $i-1$ είναι S . Αν αναλογιστούμε ότι μπορούμε να γενικεύσουμε την εξάρτηση στα k προηγούμενα κατάλοιπα, είναι φυσικό η δεδομένη αλυσίδα να ονομάζεται Αλυσίδα Μάρκοβ $k^{\text{ης}}$ τάξεως. Η συνολική πιθανότητα μιας αλληλουχίας υπολογίζεται ως εξής:

$$P(S) = P(S_1, S_2, \dots, S_{i-1}, S_i) = P(S_i / S_{i-1}, \dots, S_1) P(S_{i-1} / S_{i-2}, \dots, S_1) \dots P(S_1) \quad (6.2)$$

όπου $P(S_i)$ είναι η πιθανότητα για την εμφάνιση της πρώτης κατάστασης.

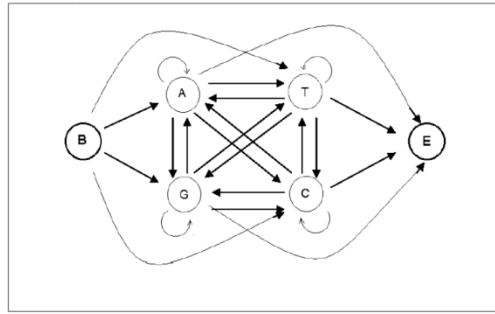
Ο πίνακας ο οποίος περιέχει τις πιθανότητες μεταβάσεως, λέγεται πίνακας πιθανοτήτων μεταβάσεως ή πίνακας μεταβάσεως $1^{\text{ης}}$ τάξης και πρέπει να ικανοποιεί τα παρακάτω:

$$P_{ij} > 0, i, j = 1, \dots, k \quad (6.3)$$

και

$$\sum_{j=1}^k P_{ij} = 1, \forall j = 1, \dots, k \quad (6.4)$$

Γενικότερα κάθε τετραγωνικός πίνακας που ικανοποιεί τις δυο αυτές σχέσεις, λέγεται στοχαστικός. Όπως είδαμε, από τις παραπάνω σχέσεις ορίζεται πλήρως μια αλυσίδα Μάρκοβ, αρκεί να ορίσουμε επιπλέον μια πιθανότητα για την κατάσταση της έναρξης της αλυσίδας (B=Begin). Η πιθανότητα αυτή ονομάζεται αρχική πιθανότητα και ορίζεται ως $P(S_1 = a) = p_{Ba}$. Όμοια, μπορούμε να ορίσουμε (χωρίς όμως και να είναι απαραίτητο) μια άλλη τελική κατάσταση (E=End) για τον τερματισμό της αλυσίδας με πιθανότητα $P(E / S_k = b) = p_{bE}$. Έτσι πλέον μια πλήρης σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου Μάρκοβ φαίνεται στην Εικόνα 6.5 παρακάτω. Παραδοσιακά η λήξη της αλληλουχίας δεν συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο, θεωρούμε δηλαδή ότι η αλυσίδα μπορεί να τελειώνει οπουδήποτε. Το πλεονέκτημα του να συμπεριληφθεί αυτή η κατάσταση στο μοντέλο, είναι όταν θέλουμε να μελετήσουμε την κατανομή του μήκους της αλυσίδας.



Εικόνα 6.5: Ένα τυπικό μοντέλο αλυσίδας Μάρκοβ, με καταστάσεις τις 4 βάσεις του DNA (A,C,G,T). Τα βέλη συμβολίζουν τις επιτρεπτές μεταβάσεις. Με B και E, συμβολίζονται οι καταστάσεις έναρξης και τερματισμού του μοντέλου, αντίστοιχα.

6.5 Αλυσίδες Μάρκοβ k τάξης

Μια διαδικασία Μάρκοβ k τάξης είναι μια τυχαία διαδικασία στην οποία η πιθανότητα η n -οστή κατάσταση μιας διαδικασίας να είναι j εξαρτάται μόνο από τις προηγούμενες k καταστάσεις της διαδικασίας αυτής. Δηλαδή:

$$P(S_m = j / S_{m-1}, S_{m-2}, \dots, S_1) = P(S_m = j / S_{m-1}, S_{m-2}, \dots, S_{m-k}) \quad (6.5)$$

Ως εκ τούτου, η διαδικασία έχει μνήμη του παρελθόντος πληρότητας k , και η έκβαση ενός μελλοντικού γεγονότος S_m επηρεάζεται από την παρούσα και τις προηγούμενες καταστάσεις που περιλαμβάνονται σε αυτή τη διαδικασία. Μια διαδικασία μηδενικής τάξης, δείχνει ότι δεν υπάρχει τέτοια εξάρτηση σε καμία προηγούμενη ή παρούσα κατάσταση. Μια τέτοια διαδικασία θα ήταν εντελώς τυχαία και καλείται ανανεωτική διαδικασία.

Μια διαδικασία Μάρκοβ είναι εντελώς περιγράψιμη από τον πίνακα πιθανοτήτων μετάβασης (STPM) και συμβολίζεται με P . Η αρχική πιθανότητα για κάθε κατάσταση εκφράζεται με ένα διάνυσμα π . Για μια διαδικασία πρώτης τάξης $k = 1$ γράφουμε:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1k} \\ P_{21} & P_{22} & \vdots & P_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{k1} & P_{k2} & \dots & P_{kk} \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

και

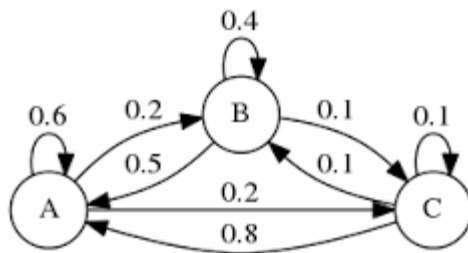
$$\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k) \quad (6.7)$$

όπου

$$P_{ij} = P(S_m = j | S_{m-1} = i) \quad (6.8)$$

είναι η πιθανότητα μιας μετάβασης από την κατάσταση i στην κατάσταση j , π_i είναι η πιθανότητα να βρίσκεται σε μια κατάσταση i ανεξάρτητα από πού προήλθε και k είναι ο αριθμός των καταστάσεων στη διαδικασία. Μια διαδικασία υψηλότερης τάξης απαιτείται για πολυδιάστατο πίνακα STPM. Αφού κάθε γραμμή στον P περιγράφει μια διακριτή κατάσταση της πυκνότητας πιθανότητας, το άθροισμα των στοιχείων σε μια γραμμή στον P , πρέπει να είναι ίσο με 1. Το ίδιο ισχύει και για το διάνυσμα π . Συμβολίσουμε ως \overline{S}^j τον πίνακα μετάβασης (STM), με στοιχεία \overline{S}_{ij}^j τα οποία καθορίζουν τον αριθμό των μεταβάσεων από την κατάσταση i στην κατάσταση j .

Ένα μοντέλο Μάρκοβ μπορεί να οπτικοποιηθεί ως ένας γράφος καταστάσεων και κατευθυνόμενων μεταβάσεων. Οι κόμβοι του γράφου αντιστοιχούν στις καταστάσεις του μοντέλου και οι ακμές στις πιθανότητες μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων. Για κάθε κατάσταση του μοντέλου \overline{S}_i^j υπάρχει ένα σύνολο πιθανοτήτων μετάβασης P_{ij} που αντιστοιχεί σε όλες τις καταστάσεις \overline{S}_j^j του μοντέλου (συμπεριλαμβανομένης της ίδιας της \overline{S}_i^j). Ένα παράδειγμα μοντέλου Μάρκοβ με τρεις καταστάσεις δίνεται στην Εικόνα 6.6.



Εικόνα 6.6: Κατευθυνόμενος Γράφος Μοντέλου Μάρκοβ τριών καταστάσεων A, B, C.

Μία μεγάλη κατηγορία Μαρκοβιανών αλυσίδων είναι εκείνη κατά την οποία οι πίνακες μετάβασης $\overline{S^1}$ δεν εξαρτώνται από το χρόνο. Σε αυτή τη περίπτωση λέμε ότι έχουμε μία ομογενή Μαρκοβιανή αλυσίδα. Σε μία Μαρκοβιανή αλυσίδα θα έχουμε συνεπώς χρονικά αναλλοίωτες τις πιθανότητες μετάβασης. Αν ο αριθμός των καταστάσεων σε μια Μαρκοβιανή διαδικασία είναι πεπερασμένος, ονομάζεται Μαρκοβιανή αλυσίδα. Μια μονοδεσμική αλυσίδα Μάρκοβ είναι μια αλυσίδα που δεν μπορεί να διαχωριστεί σε διαφορετικές αλυσίδες, δηλαδή είναι αδύνατο να βρούμε δύο ή περισσότερα υποσύνολα των καταστάσεων από τα οποία είναι αδύνατο να ξεφύγουμε. Μια παροδική κατάσταση, δηλαδή μια κατάσταση που μπορεί να είναι αρχική, και είναι αδύνατο να ξαναγυρίσει σε αυτήν, μπορεί να είναι μέρος μιας μονοδεσμικής αλυσίδας. Όλες οι είσοδοι, στον STPM πίνακα που συνδέονται με μια παροδική κατάσταση θα είναι μηδενικές.

Από τα παραπάνω, μόνο ο πίνακας P αρκεί για να περιγράψει μια μονοδεσμική αλυσίδα. Οι αλυσίδες Μάρκοβ που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μελέτη θεωρούνται μονοδεσμικές. Επιπλέον, θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν καταστάσεις παροδικές ή παγίδευσης. Αυτό σημαίνει, ότι όλοι οι πίνακες STPM μπορούν να έχουν μηδενικά στοιχεία, αλλά όλες οι στήλες πρέπει να έχουν τουλάχιστον έναν μη μηδενικό όρο. Επίσης, κανένα στοιχείο του STPM δεν επιτρέπεται να είναι ίσο με 1.

Ο γενικός ορισμός της αλυσίδας Μάρκοβ υποθέτει ότι η μετάβαση των καταστάσεων συμβαίνει σε ισαπέχοντα χρονικά διαστήματα και σε καθορισμένο χρόνο. Η παραδοχή αυτή δεν ισχύει για τις σακκαδικές κινήσεις του οφθαλμού, όπως και για τα REM που μελέτησαν οι Ktonas & Boukadoum, αφού οι μεταβάσεις μπορούν να συμβούν σε τυχαίο χρόνο με οποιοδήποτε χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών σακκαδικών (Inter-Saccadic Interval, ISI). Έτσι, χρειαζόμαστε ένα μοντέλο όπου η διάδραση μεταξύ των διαφορετικών καταστάσεων να περιγράφεται από έναν STPM πίνακα, όμως τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των μεταβάσεων να είναι τυχαίες μεταβλητές, που περιγράφονται από μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Ένα τέτοιο μοντέλο ονομάζεται Ημι-Μαρκοβιανή (Semi-Markov) αλυσίδα. Όλα τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τις αλυσίδες Μάρκοβ, εφαρμόζονται και στις Semi-Markov αλυσίδες. Τελικά, όλα τα μοντέλα σε αυτή τη μελέτη, βασίζονται σε μονοδεσμικές, συνεχούς χρόνου, Μάρκοβ αλυσίδες και χρησιμοποιήθηκαν για να ποσοτικοποιηθούν οι εναλλαγές των ISIs.

6.6 Στατιστική Αναφορά σχετικά με τα Μοντέλα Μάρκοβ

Η στατιστική ανάλυση των Μαρκοβιανών αλυσίδων ακολουθούν εκείνες των ((Boukadoum and Ktonas, 1988), (Ktonas et al., 1990)), και ιδιαιτέρως εκείνη του (Nygren, 1994). Προκειμένου να συγκρίνουμε τις αλυσίδες Μάρκοβ με μια υποκειμενική εκτίμηση, μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει μεθόδους ελέγχου υπόθεσης. Ο έλεγχος που θα χρησιμοποιηθεί είναι η βασική δοκιμή προσαρμογής X^2 , που προτάθηκε από τους Anderson & Goodman (1957).

Ως κατάσταση 1 ορίζεται το “short” ISI και ως κατάσταση 2 το “long” ISI. Για κάθε δοκιμασία και για τις αντίστοιχες κατανομές των ISIs, δύο στατιστικοί έλεγχοι εκτελέστηκαν.

6.6.1 Στατιστικός έλεγχος Στοχαστικής Διαδικασίας

Ο πρώτος ήταν εάν ο πίνακας STPM P για την πρώτης τάξης αλυσίδα Μάρκοβ αναπαριστά μία ακολουθία ISI που διαφοροποιείται από τον πίνακα STPM $P^{(0)}$ (εξίσωση 6.15), έτσι ώστε να θεωρηθεί ως μία διαδικασία στοχαστικής ανανέωσης. Ο δεύτερος έλεγχος ήταν να μελετηθεί κατά πόσο η ακολουθία των ISIs αποτελεί μία διαδικασία πρώτης τάξης Ημι-Μαρκοβιανής αλυσίδας ή προέρχεται από μεγαλύτερης τάξης αλυσίδα.

Πριν τον έλεγχο της υπόθεσης, πρέπει να υπολογίσουμε τον πίνακα πιθανοτήτων μετάβασης των καταστάσεων (STPM) σε κάθε διαδικασία. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε τις εκτιμήτριες μέγιστης πιθανοφάνειας (Anderson & Goodman, 1957). Αυτές δίνονται από τον τύπο:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (6.9)$$

όπου το n_{ij} είναι ο αριθμός των μεταβάσεων από μια κατάσταση i σε μια κατάσταση j ($i, j = 1, 2$), σε ένα δείγμα και

$$n_i = \sum_{j=1}^k n_{ij} \quad (6.10)$$

όπου $k = 2$ είναι το πλήθος των καταστάσεων.

Παρομοίως, η πιθανότητα να βρεθεί στην κατάσταση i , μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\pi_i = \frac{n_i}{n} \quad (6.11)$$

όπου το n είναι ο συνολικός αριθμός των μεταβάσεων.

Κάτω από τη μηδενική υπόθεση ότι ο P είναι ισοδύναμος με κάποιον πίνακα αναφοράς (αρχικών καταστάσεων), ας πούμε $P^{(0)}$, αναμένουμε την τιμή:

$$E[n_{ij}] = n_i P_{ij}^{(0)} \quad (6.12)$$

η οποία είναι ο αναμενόμενος αριθμός μεταβάσεων κατάστασης, που συνδέεται με μια θέση ij στον STPM για συγκεκριμένο n_i . Έτσι, σε πλήρη αναλογία με την βασική δοκιμή προσαρμογής χ^2 (Cochran, 1952) μπορούμε να σχηματίσουμε την στατιστική:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{(n_{ij} - n_i P_{ij}^{(0)})^2}{n_i P_{ij}^{(0)}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k n_i \frac{(P_{ij} - P_{ij}^{(0)})^2}{P_{ij}^{(0)}} \quad (6.13)$$

Κάθε γραμμή στον P εμπίπτει στον περιορισμό

$$\sum_{j=1}^k P_{ij} = 1 \quad (6.14)$$

Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας για το χ^2 θα είναι $k(k-1)$. Επομένως, η μηδενική υπόθεση, $H_{0\{\text{renewal}\}} : P = P^{(0)}$ θα είναι αποδεκτή με σημαντικότητα $\alpha = 0.05$, αν το χ^2 είναι μικρότερο από $\chi^2_{\alpha; k(k-1)}$.

Στην περίπτωση μας, $P^{(0)}$, είναι ο πίνακας STPM

$$P^{(0)} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^k n_{i1}}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k n_{ij}} & \frac{\sum_{i=1}^k n_{i2}}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k n_{ij}} \\ \frac{\sum_{i=1}^k n_{i1}}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k n_{ij}} & \frac{\sum_{i=1}^k n_{i2}}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k n_{ij}} \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

Στον πίνακα $P^{(0)}$, κάθε στήλη j ($j=1$ ή 2) έχει την ίδια τιμή $\pi_j = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ij}}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k n_{ij}}$, η οποία

εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί η κατάσταση j , η οποία σε μία διαδικασία ανανέωσης είναι ανεξάρτητη της υλοποίησης μίας προηγούμενης κατάστασης i (Ktonas, et al., 2000).

6.6.2 Στατιστικός έλεγχος της τάξης της Μαρκοβιανής Αλυσίδας

Στη συνέχεια, θέλουμε να ελέγξουμε την υπόθεση ότι η κατανομή καταστάσεων στο χρόνο εξάγεται από μια μαρκοβιανή αλυσίδα πρώτης τάξης σε αντιπαραβολή με το ότι παράγεται από μια μαρκοβιανή υψηλότερης τάξης. Για το λόγο αυτό, οι Anderson & Goodman (1957) πρότειναν την παρακάτω διαδικασία. Πρώτον, θεωρούμε την μαρκοβιανή αλυσίδα δεύτερης τάξης ως μια πιο περίπλοκη αλυσίδα πρώτης τάξης. Αυτό γίνεται αν θέσουμε ένα ζευγάρι καταστάσεων h και i ως αναπαράσταση μιας σύνθετης κατάστασης (h, i) . Τότε η πιθανότητα μετάβασης από μια κατάσταση (h, i) σε μια κατάσταση (i, j) είναι P_{hij} . Φυσικά αυτό σημαίνει ότι είναι αδύνατη μια μετάβαση από την κατάσταση (h, i) στην κατάσταση (g, j) ($g \neq i$). Για παράδειγμα, ο STPM μιας αλυσίδας δεύτερης τάξης για δύο καταστάσεις είναι:

$$P = \begin{bmatrix} P_{111} & P_{112} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{121} & P_{122} \\ P_{211} & P_{212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{221} & P_{222} \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

Σύμφωνα με την αρχική υπόθεση $H_{0\{1st\ order\}}$ ότι η αλυσίδα είναι πρώτης τάξης, οι πιθανότητες μετάβασης P_{hij} είναι ανεξάρτητες από το h και έτσι έχουμε

$$P_{hij} = P_{ij}, \forall h, i, j \quad (6.17)$$

Προκειμένου να ελέγξουν αυτήν την υπόθεση, οι Anderson & Goodman (1957) πρότειναν τον υπολογισμό των παρακάτω παραμέτρων:

$$X^2 = \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k n_{hi} \frac{(P_{hij} - P_{ij})^2}{P_{ij}} \quad (6.18)$$

$$n_{hi} = \sum_{j=1}^k n_{hij} \quad (6.19)$$

$$P_{hij} = \frac{n_{hij}}{n_{hi}} \quad (6.20)$$

και

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (6.21)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση $P_{hij} = P_{ij}, \forall h, i, j$, όταν ισχύει η μηδενική υπόθεση η τιμή P παίρνει την μορφή

$$P^{(0)} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{21} & P_{22} \\ P_{11} & P_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

όπου οι τιμές $P_{ij}, i, j = 1, 2$ υπολογίζονται σύμφωνα με την εξίσωση $P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i}$.

Σημειώνεται ως $\overline{S^2}$ ο πίνακας STM με στοιχεία $\overline{S_{hij}^2}$ τα οποία εξισώνονται με τον αριθμό των μεταβάσεων από την κατάσταση h στην κατάσταση i και στη συνέχεια στην κατάσταση j

. Έτσι, ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας του X^2 θα είναι $k(k-1)^2$. Αν το X^2 είναι μικρότερο από $X^2_{\alpha; k(k-1)^2}$, η υπόθεση ότι η αλυσίδα είναι πρώτης τάξης είναι αποδεκτή σε επίπεδο σημαντικότητας α . Αν όχι, η δοκιμή έχει εντοπίσει μια διαφορά μεταξύ των πιθανοτήτων μετάβασης της πρώτης και της δεύτερης τάξης και μπορεί να αξίζει να εξετάσουμε και την ανάλυση δεύτερης τάξης.

Σε όλες τις περιπτώσεις όπου η μήτρα P της αλυσίδας πρώτης τάξης διαφέρει σημαντικά από την μήτρα STPM $P^{(0)}$, η οποία αντιστοιχεί σε μία ανανεώσιμη διαδικασία πρώτης τάξης, όπως και στις περιπτώσεις όπου η μήτρα STPM P της αλυσίδας δεύτερης τάξης διαφέρει στατιστικά σημαντικά από την μήτρα STPM $P^{(0)}$ πρώτης τάξης, η μεθοδολογία του Bootstrap εφαρμόστηκε για τον έλεγχο της στατιστικής διαφοροποίησης μεταξύ των στοιχείων των μητρών P και $P^{(0)}$, καθώς και μεταξύ των στοιχείων του πίνακα P . Η μεθοδολογία του Bootstrap είναι μία αρκετά αναγνωρισμένη μέθοδος για την εκτίμηση της κατανομής των δεδομένων (Efron, 1979). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε δεδομένα με άγνωστη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας με σκοπό τον υπολογισμό επιπλέον χαρακτηριστικών όπως μέση τιμή και διαστήματα εμπιστοσύνης. Η μέθοδος στηρίζεται στην δημιουργία επιπλέον συνόλων δεδομένων από το αρχικό σύνολο μέσω της δειγματοληψίας. Έτσι, για κάθε στοιχείο της μήτρας P , μία κατανομή 1.000 τιμών κατασκευάστηκε με την μέθοδο Bootstrap, στη συνέχεια το 2,5% και το 97,5% εκατοστημόριο της κατανομής υπολογίστηκε καταλήγοντας στο 95,0% του διαστήματος εμπιστοσύνης. Έτσι η μηδενική υπόθεση H_0 απορρίπτεται όταν η πραγματική τιμή της μήτρας P δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από το αντίστοιχο στοιχείο της μήτρας $P^{(0)}$. Αν η αντίστοιχη τιμή του πίνακα $P^{(0)}$ είναι έξω από το 95,0% διάστημα εμπιστοσύνης, τότε η μηδενική υπόθεση H_0 , ότι η τιμή του πίνακα P δεν είναι στατιστικά διαφορετική από την αντίστοιχη τιμή του πίνακα $P^{(0)}$, απορρίπτεται. Ομοίως, υποθέσεις σχετικά με τις στατιστικά σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των στοιχείων του πίνακα P μελετήθηκαν.

6.7 Αποτελέσματα Ανάλυσης Πρώτης Τάξης

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2, οι μήτρες $\overline{S^I}$, P και $P^{(0)}$ παρουσιάζονται για κάθε δοκιμασία. Οι τιμές του X^2 έλεγχο με $k=2$ βαθμούς ελευθερίας ήταν 170,8 για την VFU δοκιμασία, 102,85 για την VFD και 76,95 για την NTF δοκιμασία. Αυτές οι τιμές είναι μεγαλύτερες

από 5,991, τιμή η οποία αντιστοιχεί στη μεταβλητή του X^2 με $k = 2$ βαθμούς ελευθερίας σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$, π.χ., $\chi^2_{0,05;2}$. Έτσι, η μηδενική υπόθεση $H_{0\{\text{renewal}\}}$ ότι η μήτρα P είναι ίση με την μήτρα $P^{(0)}$ απορρίπτεται, συμπεραίνοντας ότι το σύστημα παράγει ISIs τουλάχιστον με μνήμη πρώτης τάξης σε όλες τις δοκιμασίες.

Επιπλέον στον Πίνακα 6.2 φαίνονται οι τιμές των πιθανοτήτων P_{11} και P_{22} για όλες τις δοκιμασίες οι οποίες είναι στατιστικά σημαντικές συγκριτικά με τις τιμές των πιθανοτήτων $P_{11}^{(0)}$ και $P_{22}^{(0)}$, ενώ οι τιμές των πιθανοτήτων P_{12} και P_{21} είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές των πιθανοτήτων $P_{12}^{(0)}$ και $P_{21}^{(0)}$ (βασιζόμενοι στο 95% διάστημα εμπιστοσύνης όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2). Με βάση αυτά τα αποτελέσματα η κατάσταση 1 και η κατάσταση 2 μπορούν να χαρακτηριστούν ως “ελκυστές” καθώς το σύστημα προσήλωσης έχει την τάση να παράγει αλληλουχία “short” ISIs παρεμβατικών σακκαδικών (κατάσταση 1) ή “long” ISIs για παρεμβατικές σακκαδικές (κατάσταση 2), ενώ δεν υπάρχει σημαντική μετάβαση μεταξύ δύο διαφορετικών καταστάσεων. Μελετώντας τις διαφορές των στοιχείων της μήτρας P , κάποιος παρατηρεί ότι για τις δύο πρώτες δοκιμασίες VFU και VFD η τιμή του P_{11} ήταν σημαντικά υψηλότερη από την τιμή P_{12} , και η τιμή P_{22} ήταν σημαντικά υψηλότερη από την τιμή P_{21} , επιβεβαιώνοντας την άποψη ότι οι καταστάσεις 1 και 2 αποτελούν “ελκυστή”. Στην NTF δοκιμασία η τιμή του P_{22} ήταν σημαντικά υψηλότερη από την τιμή P_{21} , επιβεβαιώνοντας την άποψη ότι η κατάσταση 2 είναι ελκυστής. Ωστόσο, φαίνεται να υπάρχει στατιστική σημαντικότητα στην μετάβαση από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 (εφόσον $P_{12} > P_{11}$) το οποίο αντιτίθεται στο συμπέρασμα ότι η κατάσταση 1 είναι ελκυστής σε αυτή την δοκιμασία.

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα Μαρκοβιανής ανάλυσης πρώτης τάξης.

| h, i, j δείκτες κατάστασης | \overline{S}_{ij}^I | P_{hij} (95% διάστημα εμπιστοσύνης) | $P_{ij}^{(0)}$ |
|------------------------------|-----------------------|--|----------------|
| VFU task | | | |
| 1,1 short - short | 1541 | 0,5264 (0,4878 - 0,5653) | 0,4366 |
| 1,2 short - long | 1386 | 0,4735 (0,4347 - 0,5122) | 0,5633 |
| 2,1 long - short | 1378 | 0,3666 (0,3462 - 0,3860) | 0,4366 |
| 2,2 long - long | 2380 | 0,6333 (0,6140 - 0,6538) | 0,5633 |
| VFD task | | | |
| 1,1 short - short | 1658 | 0,5358 (0,5030 - 0,5683) | 0,4695 |
| 1,2 short - long | 1436 | 0,4641 (0,4317 - 0,4970) | 0,5304 |
| 2,1 long - short | 1438 | 0,4109 (0,3922 - 0,4307) | 0,4695 |
| 2,2 long - long | 2061 | 0,5890 (0,5693 - 0,6078) | 0,5304 |
| NTF task | | | |
| 1,1 short - short | 2946 | 0,4756 (0,4565 - 0,4949) | 0,4338 |
| 1,2 short - long | 3248 | 0,5243 (0,5051 - 0,5435) | 0,5661 |
| 2,1 long - short | 3315 | 0,4025 (0,3883 - 0,4163) | 0,4338 |
| 2,2 long - long | 4921 | 0,5974 (0,5837 - 0,6117) | 0,5661 |

Συμπερασματικά, σε όλες τις δοκιμασίες προσήλωσης, η γένεση των παρεμβατικών σακκαδικών δεν είναι τυχαία αντιθέτως παρουσιάζεται να υπάρχει «μνήμη» στο σύστημα. Επιπλέον, σε δύο από τις δοκιμασίες, τα ISIs μεταξύ των παρεμβατικών σακκαδικών έχουν την τάση να παραμένουν στάσιμες (“ελκυστές”) στις προηγούμενες καταστάσεις, για παράδειγμα, τα “short” παραμένουν “short” ενώ τα “long” παραμένουν “long”. Αντίθετα, στη NTF δοκιμασία, η τάση να παραμείνει σε “long” είναι ισχυρότερη από την τάση να μείνει σε “short”.

6.8 Αποτελέσματα Ανάλυσης Δεύτερης Τάξης

Στον Πίνακα 6.3, οι μήτρες $\overline{S^2}$, P και $P^{(0)}$ παρουσιάζονται για όλες τις δοκιμασίες προσήλωσης. Η τιμή του X^2 έλεγχο με $k = 2$ βαθμούς ελευθερίας ήταν 170,8 για την VFU δοκιμασία, 118,1 για την VFD δοκιμασία και 56,6 για την NTF δοκιμασία. Όλες αυτές οι τιμές ήταν μεγαλύτερες από 5,991, έτσι η μηδενική υπόθεση $H_{0\{1st\ order\}}$ ότι η μήτρα P είναι ίση με την μήτρα $P^{(0)}$ απορρίπτεται, επιβεβαιώνοντας έτσι την υπόθεση ότι μία διαδικασία δεύτερης ή μεγαλύτερης τάξης εμπλέκεται στην αναπαραγωγή των παρεμβατικών σακκαδικών στις τρεις διαδικασίες. Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.3, όλα τα στοιχεία της μήτρας P τα οποία αντιστοιχούν σε μία αλληλουχία τριών καταστάσεων όπου η πρώτη κατάσταση αντιστοιχεί σε “short” ISI και επιστρέφει μετά από δύο μεταβάσεις σε “short” ISI έχει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές από τις αντίστοιχες της μήτρας $P^{(0)}$. Αντίθετα, όλα τα στοιχεία της μήτρας P τα οποία ξεκινούν από “short” ISI και καταλήγουν σε “long” ISI παρουσιάζουν τιμές σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες της μήτρας $P^{(0)}$. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα σε όλες τις διαδικασίες, καταλήγοντας έτσι στο συμπέρασμα ότι η κατάσταση 1 μπορεί να χαρακτηριστεί ως δεύτερης τάξης ελκυστής, αφού το σύστημα έχει την τάση να επιστρέφει στην αρχική κατάσταση ύστερα από δύο μεταβάσεις. Το ίδιο πρότυπο παρατηρείται για τις μεταβάσεις που ξεκινούν από “long” ISI, για την NTF δοκιμασία, όπως αυτό φαίνεται στον Πίνακα 6.3. Συγκεκριμένα, για την NTF δοκιμασία, όλα τα στοιχεία της μήτρας P τα οποία ξεκινούν από “long” ISI και καταλήγουν σε “long” ISI παρουσιάζουν τιμές σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της μήτρας $P^{(0)}$. Σε αντίθεση με τα στοιχεία της μήτρας P τα οποία ξεκινούν από “long” ISI και καταλήγουν σε “short” ISI παρουσιάζουν τιμές σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες της μήτρας $P^{(0)}$. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για την NTF δοκιμασία, η κατάσταση 2 μπορεί να χαρακτηριστεί ως δεύτερης τάξης ελκυστής, αφού το σύστημα έχει την τάση να επιστρέφει στην αρχική κατάσταση ύστερα από δύο μεταβάσεις. Το συγκεκριμένο πρότυπο κίνησης παρουσιάζεται επίσης στην VFU και VFD δοκιμασία, μόνο για την μετάβαση 2->1->2. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις παρουσιάζεται το 95% διάστημα εμπιστοσύνης για την πιθανότητα P να εμπεριέχει οριακά την αντίστοιχη πιθανότητα του $P^{(0)}$ πίνακα.

Εστιάζοντας στα κελιά της μήτρας P αντλείται περισσότερη πληροφορία για την δυναμική των ISIs. Για τις δοκιμασίες που περιέχουν οπτικό κίνητρο οι τιμές P_{112} είναι σημαντικά μικρότερες από τις τιμές P_{111} , επομένως η κατάσταση 1 θεωρείται πάλι ελκυστής δεύτερης

τάξης. Παρουσιάζει ενδιαφέρον ότι ο ελκυστής της κατάστασης 1 (δηλαδή η υψηλή τιμή P_{111}) μπορεί να εξαρτάται από την παρουσία πρώτης τάξης δυναμικής. Επίσης, για τις δύο δοκιμασίες προσήλωσης με στόχο παρατηρείται τιμή P_{211} σημαντικά μικρότερη από την τιμή P_{212} , επίσης, η τιμή P_{221} είναι σημαντικά μικρότερη από την τιμή P_{222} , δείχνοντας έτσι ότι η κατάσταση 2 μπορεί να χαρακτηριστεί ως δεύτερης τάξης ελκυστής. Εφόσον ισχύει $P_{222} > P_{212}$, είναι ενδιαφέρον να υποθέσουμε ότι αυτή η αύξηση της πιθανότητας είναι εξαιτίας της ύπαρξης πρώτης τάξης δυναμικής.

Εξετάζοντας τον πίνακα P στην δοκιμασία προσήλωσης με μη ύπαρξη στόχου (NTF), κάποιος μπορεί να δει ότι η τιμή P_{112} δεν είναι σημαντικά μικρότερη από την τιμή P_{111} , πραγματικότητα η οποία δεν επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι η κατάσταση 1 είναι δεύτερης τάξης ελκυστής. Εδώ πάλι, η τιμή P_{121} είναι σημαντικά μικρότερη από την τιμή P_{122} , θέτοντας ξανά την σημαντικότητα της ύπαρξης πρώτης τάξης δυναμικής όταν η δεύτερη μετάβαση είναι “long”. Από την άλλη μεριά, η τιμή P_{211} είναι σημαντικά μικρότερη από την τιμή P_{212} , και η τιμή P_{221} είναι σημαντικά μικρότερη από την τιμή P_{222} , δείχνοντας έτσι ότι η κατάσταση 2 μπορεί να χαρακτηριστεί ως δεύτερης τάξης ελκυστής. Όπως και στις δοκιμασίες προσήλωσης με στόχο έτσι και εδώ η πρώτου βαθμού δυναμική είναι σημαντική όταν η δεύτερη μετάβαση είναι “long”.

Συμπερασματικά, σε όλες τις δοκιμασίες προσήλωσης, θεωρώντας μία αλληλουχία τριών μεταβάσεων, η τρίτη μετάβαση παρουσιάζει την τάση να επιστρέφει, ή διαφορετικά να μένει, στην ίδια κατάσταση με την μετάβαση 1 ακόμα και όταν η πρώτη μετάβαση είναι “short”. Είναι αξιόλογο να παρατηρήσουμε ότι αν η δεύτερη μετάβαση είναι μικρής διάρκειας τότε η έλξη μεγαλώνει όπως φαίνεται από τις πιθανότητες π.χ. $P_{111} > P_{121}$. Η συνεισφορά της πρώτης τάξης δυναμικής στα παραπάνω αποτελέσματα είναι πιθανή.

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα Μαρκοβιανής ανάλυσης δεύτερης τάξης.

| h, i, j δείκτες κατάστασης | \overline{S}_{ij}^I | P_{hij} (95%διάστημα εμπιστοσύνης) | $P_{ij}^{(0)}$ |
|------------------------------|-----------------------|---|----------------|
| VFU task | | | |
| 1,1,1 short - short – short | 882 | 0,6066 (0,5548 - 0,6549) | 0,5264 |
| 1,1,2 short - short – long | 572 | 0,3933 (0,3451 - 0,4452) | 0,4735 |
| 1,2,1 short - long – short | 544 | 0,4296 (0,3975 - 0,4616) | 0,3666 |
| 1,2,2 short - long – long | 722 | 0,5703 (0,5384 - 0,6025) | 0,6333 |
| 2,1,1 long - short – short | 593 | 0,4658 (0,4342 - 0,4968) | 0,5264 |
| 2,1,2 long - short – long | 680 | 0,5341 (0,5032 - 0,5658) | 0,4735 |
| 2,2,1 long - long – short | 740 | 0,3562 (0,3346 - 0,3776) | 0,3666 |
| 2,2,2 long - long – long | 1337 | 0,6437 (0,6224 - 0,6654) | 0,6333 |
| VFD task | | | |
| 1,1,1 short - short – short | 982 | 0,6274 (0,5844 - 0,6667) | 0,5358 |
| 1,1,2 short - short – long | 583 | 0,3725 (0,3333 - 0,4156) | 0,4641 |
| 1,2,1 short - long – short | 629 | 0,4808 (0,4522 - 0,5125) | 0,4109 |
| 1,2,2 short - long – long | 679 | 0,5191 (0,4875 - 0,5478) | 0,5890 |
| 2,1,1 long - short – short | 596 | 0,4528 (0,4242 - 0,4831) | 0,5358 |
| 2,1,2 long - short – long | 720 | 0,5471 (0,5169 - 0,5758) | 0,4641 |
| 2,2,1 long - long – short | 687 | 0,3925 (0,3713 - 0,4169) | 0,4109 |
| 2,2,2 long - long – long | 1063 | 0,6074 (0,5831 - 0,6287) | 0,5890 |
| NTF task | | | |
| 1,1,1 short - short – short | 1446 | 0,5093 (0,4817 - 0,5359) | 0,4756 |
| 1,1,2 short - short – long | 1393 | 0,4906 (0,4641 - 0,5183) | 0,5243 |
| 1,2,1 short - long – short | 1397 | 0,4504 (0,4312 - 0,4697) | 0,4025 |
| 1,2,2 short - long – long | 1704 | 0,5495 (0,5303 - 0,5688) | 0,5974 |
| 2,1,1 long - short – short | 1431 | 0,4531 (0,4326 - 0,4726) | 0,4756 |
| 2,1,2 long - short – long | 1727 | 0,5468 (0,5274 - 0,5674) | 0,5243 |
| 2,2,1 long - long – short | 1775 | 0,3827 (0,3668 - 0,3983) | 0,4025 |
| 2,2,2 long - long – long | 2863 | 0,6172 (0,6017 - 0,6332) | 0,5974 |

6.9 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Σε αυτή την μελέτη επιβεβαιώνεται ότι το πρότυπο της παραγωγής των παρεμβατικών σακκαδικών στην πάροδο του χρόνου όπου το άτομο ενεργά διατηρεί την προσοχή δεν είναι τυχαίο γεγονός αλλά εξαρτάται από την παραγωγή των προηγούμενων σακκαδικών, έτσι η παραγωγή αυτών θεωρείται ως ένα σύστημα με μνήμη. Σε προγενέστερες μεθόδους οι διαδικασίες προσήλωσης αποτελούσαν μεθόδους βαθμονόμησης της εκάστοτε συσκευής και δεν λαμβάνονταν υπόψιν στα αποτελέσματα των διαδικασιών. Σε αντίθεση με την παρούσα έρευνα, όπου αποκαλύπτεται ένα μη αναμενόμενο πρότυπο κίνησης κατά την διαδικασία προσήλωσης σε υγιείς, το οποίο αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της εγκεφαλικής δραστηριότητας του εξεταζόμενου. Μελλοντικά, ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων των οφθαλμικών κινήσεων κατά τις διαδικασίες προσήλωσης και μη θα αποτελεί μία ολοκληρωμένη ανάλυση της εγκεφαλικής δραστηριότητας.

Πρώτα δείξαμε ότι αν μία αλληλουχία σακκαδικών μοντελοποιείται από πρώτης τάξης αλυσίδα Μάρκοβ, η παραγωγή των παρεμβατικών σακκαδικών κατά τη διάρκεια της ενεργής προσήλωσης θέτει χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα οποία η διάρκεια μιας μετάβασης εξαρτάται σημαντικά από την διάρκεια της προηγούμενης μετάβασης. Αν η πραγματοποίηση των παρεμβατικών σακκαδικών κατά την διάρκεια της προσήλωσης αποτελεί τυχαία διαδικασία, τότε κάποιος θα περίμενε ότι οι μεταβάσεις αποτελούν μία ανανεωτική διαδικασία, έτσι η μετάβαση θα ήταν ανεξάρτητη από προηγούμενες μεταβάσεις, γεγονός το οποίο δεν επιβεβαιώνεται από την παραπάνω ανάλυση σε όλες τις ενεργές διαδικασίες προσήλωσης, με στόχο και χωρίς στόχο.

Το γεγονός ότι οι παρεμβατικές σακκαδικές που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της ενεργής προσήλωσης αποτελούν στοχαστική διαδικασία δεν παρέχει την ίδια πληροφορία με εκείνη που προκύπτει από τα χαρακτηριστικά του μηχανισμού που γεννά τις παρεμβατικές σακκαδικές. Η λεπτομερής ανάλυση των μητρών P και $P^{(0)}$ η οποία παρουσιάστηκε, οδηγεί στο συμπέρασμα της πρώτης τάξης Μαρκοβιανής διαδικασίας της παραγωγής παρεμβατικών δεδομένων. Δεδομένου ενός "short" ISI, η τάση επανάληψης ενός "short" ISI διαφαίνεται, ο μηχανισμός έχει την τάση να παραμείνει στην κατάσταση 1. Επίσης, δεδομένου ενός "long" ISI, η τάση να επαναληφτεί ένα "long" ISI διαφαίνεται, ο μηχανισμός έχει την τάση να παραμείνει στην κατάσταση 2. Έτσι, ο μηχανισμός παραγωγής παρεμβατικών σακκαδικών αποτελεί έναν ελκυστή δύο καταστάσεων, ένας για την συνεχόμενη παραγωγή "short" μεταβάσεων και ο άλλος

για την παραγωγή "long" μεταβάσεων. Επιπλέον, βρήκαμε ότι οι ελκυστές είναι όμοιοι σε όλες τις δοκιμασίες προσήλωσης, καταλήγοντας ότι ο μηχανισμός είναι ανεξάρτητος των διαδικασιών.

Επίσης, με τα προηγούμενα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται ότι η αλληλουχία των σακκαδικών θα μπορούσε να προέρχεται από Μαρκοβιανή αλυσίδα μεγαλύτερης τάξης. Με άλλα λόγια, δείξαμε ότι η γέννηση των παρεμβατικών σακκαδικών σε ενεργή προσήλωση κατέχει χαρακτηριστικά τουλάχιστον δεύτερης τάξης Μαρκοβιανής αλυσίδας, κατά την οποία η παραγωγή ενός τύπου μετάβασης προέρχεται από τον τύπο μετάβασης της προηγούμενης σακκαδικής. Η λεπτομερής ανάλυση των μητρών P και $P^{(0)}$, δεδομένου την ύπαρξη δεύτερης τάξης διαδικασίας Μάρκοβ, παρέχει περισσότερες πληροφορίες για την δομή του μηχανισμού παραγωγής σακκαδικών κινήσεων. Αντίστοιχα, για μία δεδομένη μετάβαση, δείξαμε ότι υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να είναι ίδιου τύπου μετάβαση με εκείνη της αμέσως προηγούμενης από ότι να είναι διαφορετικής. Έτσι, αν έχουμε τρεις διαδοχικές μεταβάσεις, η τρίτη μετάβαση παρατηρείται να έχει την ίδια διάρκεια με εκείνη της πρώτης. Παρόμοια ευρήματα αναδεικνύονται από όλες τις δοκιμασίες προσήλωσης όσον αφορά τις "short" ISIs και στην NTF δοκιμασία για "long" ISIs. Η δεύτερης τάξης Μαρκοβιανή ανάλυση παρέχει επιπλέον πληροφορίες ότι ο μηχανισμός παραγωγής παρεμβατικών σακκαδικών λειτουργεί ως ελκυστής σε δύο καταστάσεις, στις "short" και στις "long" ISIs. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πρώτης τάξης δυναμική των μεταβάσεων συνεισφέρει σε κάποιον βαθμό στην δεύτερης τάξης δυναμική παραγωγής αυτών. Επιπλέον, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η παραγωγή των παρεμβατικών σακκαδικών ίσως επιδεικνύει πρώτης τάξης δυναμική στην αλληλουχία των δύο τύπων μετάβασης σε όλες τις διαδικασίες προσήλωσης, ενώ δεύτερης ή μεγαλύτερης τάξης δυναμική παρουσιάζεται στην παραγωγή μεταβάσεων μικρής διάρκειας. Έτσι, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο ελκυστής στην κατάσταση 1 είναι σταθερότερος στην πάροδο του χρόνου, ενώ ο ελκυστής των μεγάλων μεταβάσεων είναι αδύναμος. Επίσης, η μεγαλύτερης τάξης δυναμική στην δοκιμασία προσήλωσης χωρίς στόχο φαίνεται να διαφέρει από αυτή των άλλων δύο δοκιμασιών προσήλωσης. Στην τρίτη δοκιμασία (NTF), η ύπαρξη ενός δεύτερης τάξης ελκυστή για μικρές μεταβάσεις δεν είναι βέβαιη.

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα, μπορούμε και καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο έλεγχος της ενεργής προσήλωσης λειτουργεί με δύο διαφορετικούς τρόπους οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι από την δοκιμασία προσήλωσης. Αυτές οι δύο καταστάσεις έλξης χαρακτηρίζονται

από υψηλής και χαμηλής πιθανότητας διάσπασης λόγω σακκαδικής. Εφόσον οι σακκαδικές στο παρόν γενικό πλαίσιο αποτελούν διάσπαση της εθελούσιας προσοχής του ατόμου, οι ελκυστές μπορούν να θεωρηθούν διαφορετικές καταστάσεις του οπτικού συστήματος. Έτσι, η κατάσταση της υψηλής προσοχής σπανίως διακόπτεται σε αντίθεση με εκείνη της χαμηλής προσήλωσης. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι οι δύο καταστάσεις παρουσιάζουν λεπτές διαφορές στα χαρακτηριστικά της δυναμικής τους. Η υψηλή προσοχή είναι πιο σταθερή στην πάροδο του χρόνου από ότι η χαμηλής προσοχή με εντονότερη την εμφάνιση στην διατήρηση προσοχής χωρίς στόχο.

Η υπόθεση ότι το σύστημα προσοχής λειτουργεί σε διακριτές καταστάσεις οι οποίες μπορεί να διαφοροποιηθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα μελετώνται εκτενώς (Aston-Jones & Cohen, 2005). Αυτές οι δύο διακριτές καταστάσεις ίσως να ποικίλουν σε μεγαλύτερο χρόνο προσήλωσης ανάμεσα στα άτομα. Η παρούσα μελέτη δείχνει ότι προηγούμενες χρονικές στιγμές παραγωγής παρεμβατικών σακκαδικών στην ενεργή προσήλωση έχουν σημαντική επιρροή στην παραγωγή της επόμενης σακκαδικής, επομένως μπορούμε να πούμε ότι το σύστημα έχει μνήμη. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά της κατανομής των ISIs μας καθοδήγησαν στην μελέτη δύο καταστάσεων, μακράς διάρκειας ISIs και μικρής διάρκειας ISIs. Η νευροφυσιολογία αυτών των καταστάσεων μπορεί να σχετίζεται με την δραστηριότητα του συστήματος προσοχής του εγκεφάλου.

Κεφάλαιο 7

Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το οφθαλμοκινητικό σύστημα παρέχει ένα σημαντικό παράθυρο παρατήρησης στον εγκέφαλο και το κεντρικό νευρικό σύστημα. Περιγραφή και διάγνωση των διαταραχών του οφθαλμοκινητικού συστήματος με βάση τη νευροανατομία και νευροφυσιολογία των οφθαλμικών κινήσεων, μπορεί να οδηγήσει στον ακριβή εντοπισμό των αντίστοιχων αλλοιωμένων περιοχών του εγκεφάλου. Η εξέταση των οφθαλμικών κινήσεων σε ασθενείς αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη νέων μεθόδων διάγνωσης αυτών, αλλά και για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων θεραπευτικών μεθόδων.

Συγκεκριμένα, οι σακκαδικές κινήσεις αποτελούν σημαντικό εργαλείο μελέτης για τους νευροφυσιολόγους. Τα συνηθισμένα μεγέθη που μελετώνται είναι το πλάτος, η διάρκεια, ο χρόνος σακκαδικής απόκρισης, η ταχύτητα και η κατεύθυνση. Σε κάθε περίπτωση η μελέτη γίνεται μέσα από συγκεκριμένες διαδικασίες. Ένα από τα σημαντικότερα θέματα για την

επικύρωση των αποτελεσμάτων αποτελεί η ακριβής ανίχνευση των διαφόρων τύπων οφθαλμικών κινήσεων. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάστηκαν δύο αλγόριθμοι ανίχνευσης αυτών με υψηλή ακρίβεια. Η μέθοδος ανίχνευσης με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων αποτελεί μια μέθοδο ελεγχόμενης επίβλεψης τριών τύπων οφθαλμικής κίνησης (σακκαδικών, βλεφαρισμών, προσήλωσης) με υψηλή ακρίβεια, συμπεριλαμβανομένου και τον εντοπισμό της έναρξης και τερματισμού αυτών. Η μέθοδος ανίχνευσης με χρήση Εκθετών Lyapunov και του λογαρίθμου της απόκλισης των σημείων αποτελεί μία μη ελεγχόμενης επίβλεψης μέθοδο ανίχνευσης και εντοπισμού σακκαδικών και βλεφαρισμών. Μελλοντική επέκταση της μεθόδου αποτελεί η ανίχνευση και εντοπισμός των σημείων προσήλωσης, καθώς και ο διαχωρισμός των μικροσακκαδικών από τις σακκαδικές. Ωστόσο υπάρχουν και άλλα είδη οφθαλμικών κινήσεων όπως drifts, trumors, smooth pursuit, όπως αυτά περιγράφονται στην παρούσα διατριβή, τα οποία αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση της οπτικής παρακολούθησης-της προσήλωσης του ατόμου.

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα των Μαρκοβιανών μοντέλων για τα ISIs, φαίνεται λογικό να συμπεράνουμε ότι σε κάθε άτομο υπάρχουν νευροφυσιολογικοί μηχανισμοί που σχετίζονται με τον αριθμό σακκαδικών που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της παρατήρησης. Επιπλέον, τα μοντέλα Μάρκοβ θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη μελέτη της σχέσης σακκαδικών με άλλες νευρολογικές παθήσεις. Παθήσεις όπως η δυσλεξία, η σχιζοφρένεια, η κατάθλιψη, το σύνδρομο του Tourette, η ιδεοψυχαναγκαστική διαταραχή (OCD), η ελλειμματική προσοχή - υπερκινητικότητα, έχουν συνδεθεί από διάφορες μελέτες με τις σακκαδικές κινήσεις των οφθαλμών. Τα παραπάνω αποτελέσματα θα μπορούσαν να συγκριθούν με αποτελέσματα από τέτοια άτομα, προκειμένου να ελέγξουμε πιθανό ενδο-φαινότυπο.

Τα απλά μοντέλα Μάρκοβ αποτελούν καλή προσέγγιση της διαδικασίας παραγωγής των παρατηρήσεων, αλλά θεωρούν ότι το πλήθος καταστάσεων του μοντέλου είναι ίσο με το πλήθος των διακριτών παρατηρήσεων και κάθε κατάσταση του μοντέλου αντιστοιχεί μόνο σε μια παρατήρηση. Αυτή η απλοποίηση καθιστά το απλό μοντέλο Μάρκοβ μη αποδοτικό σε περιπτώσεις που η πραγματική διαδικασία παραγωγής των παρατηρήσεων είναι πιο σύνθετη. Τα κρυμμένα μοντέλα Μάρκοβ μπορούν να ανταποκριθούν καλύτερα σε τέτοιες περιπτώσεις και για αυτό προτείνεται για μελλοντική εργασία. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι το πλήθος των καταστάσεων δεν είναι απαραίτητα ίσο με το πλήθος των διακριτών παρατηρήσεων και σε κάθε κατάσταση η παρατήρηση παράγεται από μια στοχαστική διαδικασία, η οποία δεν είναι άμεσα

ορατή. Αυτή η εκ πρώτης όψεως μικρή διαφοροποίηση καθιστά τα κρυμμένα μοντέλα Μάρκοβ πιο ισχυρά και τους επιτρέπει να προσεγγίσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα προβλήματα.

Δυνατή μελλοντική εργασία αποτελεί η πρόβλεψη των διαφόρων τύπων οφθαλμικών κινήσεων με χρήση Μοντέλων Παλινδρόμησης, Εκθετών Lyapunov και μεθόδους Μηχανικής Μάθησης. Η δυνατότητα πρόβλεψης των οφθαλμικών κινήσεων σε υγιείς και ασθενείς είναι βέβαιο ότι θα αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τους νευροφυσιολόγους στην διάκριση υγιών και ασθενών με την παραγωγή νέων ενδοφαινότυπων.

Ερευνητές από διαφορετικές επιστημονικές κοινότητες αξιοποιούν την μελέτη των οφθαλμικών κινήσεων ως μοναδικό χαρακτηριστικό των ανθρώπων, όπως παλιότερα το δακτυλικό αποτύπωμα ή η ίριδα του ματιού, για ασφάλεια δικτυακών συσκευών. Έτσι, αξίζει να σημειωθεί ότι η μελέτη του οφθαλμοκινητικού συστήματος πέραν των δυνατοτήτων που παρέχει για την αξιολόγηση νευροπαθολογιών και την παραγωγή ενδοφαινότυπων, ανοίγει ένα παράθυρο ικανό ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία του εγκεφάλου.

Αναφορές

- Abadi , R., & Gowen , E. (2004). Characteristics of saccadic intrusions. *Vision Research*, *44*(23), 2675-2690.
- Acharya, R. U., Fausta, O., Kannathala, N., Chuaa, T., & Laxminarayanb, S. (2005). Non-linear analysis of EEG signals at various sleep stages. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *80*,37-45.
- Amador, X F; Sackeim , H A; Mukherjee , S; Halperin , R N. (1991). Specificity of smooth pursuit eye movement and visual fixation abnormalities in schizophrenia. Comparison to mania and normal controls. *Schizophrenia Research*, *5*(2), 135-144.
- Amador, X F; Malaspina, D; Sackeim, H A; Coleman, E A; Kaufmann, C A; Hasan, A; Gorman, J M. (1995). Visual fixation and smooth pursuit eye movement abnormalities in patients with schizophrenia and their relatives. *The Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*, *7*(2), 197-206.
- Anderson, J. R., & Salvucci, D. D. (2001). Automated eye-movement protocol analysis. *Human-Computer Interaction*, *16*(1), 39–86.
- Anderson, T., & Goodman, L. (1957). Statistical Inference About Markov Chains. *Annals of Mathematical Statistics*, *28*, 89-110.
- Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). Adaptive gain and the role of the locus coeruleus-norepinephrine system in optimal performance. *Journal of Comparative Neurology*, *493*(1), 99-110.
- Aștefănoaei, C., Pretegiani, E., Optican, L. M., Creangă, D., & Rufa, A. (2013). Eye movement recording and nonlinear dynamics analysis - the case of saccades dynamics. *Romanian Journal of Biophysics*, *21*(1-2), 81-92.
- Balli, T., & Palaniappan, R. (2010). Classification of biological signals using linear and nonlinear features. *Physiological Measurement*, *31*, 903-920.
- Bettenbuhl, M., Rusconi, M., Engbert, R., & Matthias, H. (2012). Bayesian Selection of Markov Models for Symbol Sequences: Application to Microsaccadic Eye Movements. University of Manchester, United Kingdom: Magnus Rattray. doi: 10.1371/journal.pone.0043388

- Boccignone G (2015). *Advanced statistical methods for eye movement analysis and modeling: a gentle introduction*. Retrieved June 23, 2015, from arXiv:1506.07194v1
- Boukadoum, A M; Ktonas, P Y. (1988). Non-random patterns of REM occurrences during REM sleep in normal human subjects: An automated second-order study using Markovian modeling. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 70, 404-416.
- Brockmann, D, Geisel, T. (2000). The ecology of gaze shifts. *Neurocomputing*, 32, 643-650.
- Bulling, A., Ward, J. A., & Gellersen, H. (2011). Eye Movement Analysis for Activity Recognition Using Electrooculography. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 33(4), 741-753.
- Carl, R., & Manfred, M. (1997). False-nearest-neighbors algorithm and noise-corrupted time series. *Physical Review E*, 55, 61-62.
- Chapman, L. J. (1978). Body image aberration in schizophrenia. *Journal of Abnormal Psychology*, 87, 399-407.
- Collewijn, H., & Kowler, E. (2008). The significance of microsaccades for vision and oculomotor control. *Journal of Vision*, 8(14), 1–21.
- Cloninger, C. R. (1993). A psychobiological model of temperament and character. *Archives of General Psychiatry*, 50, 975-990.
- Cornsweet, T. N. (1956). Determination of the stimuli for involuntary drifts and saccadic eye movements. *Journal of the Optical Society of America*, 46, 987-993.
- Curtis, C. E., Calkis, M. E., & Iacono, W. G. (2001). Saccadic disinhibition in schizophrenia patients and their first-degree biological relatives: a parametric study of the effects of increasing inhibitory load. *Experimental Brain Research*, 137(2), 228–236.
- Denney, D., & Denney, C. (1984). The eye blink electro-oculogram. *The British Journal of Ophthalmology*, 68(4), 225–228.
- Derogatis, L. R. (1974). The Hopkins Symptom Checklist (HSCL): A self-report symptom inventory. *Behavioral Science*, 19, 1-15.
- Ditchburn, R. W., Fender, D. H., & Mayne, S. (1959). Vision with controlled movements of the retinal image. *The Journal of physiology*, 145(1), 98.
- Ditchburn, R. W. (1980). The function of small saccades. *Vision Research*, 20, 271-272.
- Douglass, A. B., Benson, K., Hill, E. M., & Zarcone Jr., V. P. (1992). Markovian analysis of phasic measures of REM sleep in normal, depressed, and schizophrenic subjects. *Biological Psychiatry*, 31(6), 542-559.

- Duda, R.O., Hart, P.E., Stork, D.G.(2000). Pattern classification, 2nd edition., John Wiley & Sons, New York.
- Efron, B. (1979). Bootstrap methods: Another look at jackknife. *The Annals of Statistics*, 7, 1-26.
- Ellis, S., & Stark, L. (1986). Statistical dependency in visual scanning. *Human Factors*, 28, 421-438.
- Engbert, R., & Kliegl, R. (2003). Microsaccades uncover the orientation of covert attention. *Vision Research*, 9, 1035-1045.
- Engbert, R., & Mergenthaler, K. (2006). Microsaccades are triggered by low retinal image slip. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(18), 7192–7197.
- Evdokimidis, I., Smyrnis, N.,Constantinidis, T.S., Stefanis, NC., Avramopoulos, D., Paximadis, C., Theleritis, C., Efstratiadis, C., Kastriakis, G., Stefanis, CN. (2002). The antisaccade task in a sample of 2,006 young men: Normal population characteristics. *Experimental Brain Research*, 147, 45-52.
- Everling, S., & Munoz, D. P. (2004). Lookaway:the anti-saccade task and the voluntary control of eye movement, 5(3), 218-228.
- F. Møller, M. L. (2002). Binocular quantification and characterization of microsaccades. *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 240, 765–770.
- Feng, G. (2006). Eye movements as time-series random variables: A stochastic model of eye movement control in reading. *Cognitive Systems Research*, 7, 70-95.
- Flessas, K., Mylonas, D., Panagiotaropoulou, G., Tsopani, D., Korda, A., Siettos, C., Smyrnis, N. (2015). Judging the judges' performance in rhythmic gymnastics. *Medicine & Science in Sports & exercise: Official Journal of the American College of Sports Medicine*, 47(3), 640-648.
- Fraser, A. M., & Swinney, H. (1986). Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Physical Review A*, 33, 1134-1140.
- Frey, B. J., & Dueck, D. (2007). Clustering by passing messages between data points. *Science*, 315(5814), 972-976.
- Goldman-Rakic P S (1988). Topography of cognition: parallel distributed networks in primate association cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 11, 137-156.
- Gooding, D C. (1999). The role of executive control in saccade generation. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(4), 686-687.

- Goshvarpour, Af., Abbasi, A., & Goshvarpour, Ak. (2013). Nonlinear Evaluation of Electroencephalogram Signals in Different Sleep Stages in Apnea Episodes. *International Journal Intelligent Systems and Applications*, 10, 68-73.
- Gottesman, I. I., & Gould, T. D. (2003). The endophenotype concept in psychiatry: etymology and strategic intentions. *American Journal of Psychiatry*, 160(4), 636-645.
- Gulera, N. F., Ubeylib, E. D., & Guler, I. (2005). Recurrent neural networks employing Lyapunov exponents for EEG signals classification. *Expert Systems with Applications*, 29, 506-514.
- Gerrits, H. J. M., & Vendrik, A. J. H. (1970). Simultaneous contrast, filling-in process, and information processing in man's visual system. *Experimental Brain Research*, 11, 411-430.
- Hafed, Z. M., Goffart, L., Krauzlis, R. J. (2009). A neural mechanism for microsaccade generation in the primate superior colliculus. *Science*, 323(5916), 940-943.
- Hafed, Z. M., Krauzlis, R. J. (2012). Similarity of superior colliculus involvement in microsaccade and saccade generation. *Journal of Neurophysiology*, 107, 1904-1916.
- Haji-Abolhassani, A. C. (2013). A computational model for task inference in visual search. *Journal of vision*, 13(29), doi:10.1167/13.3.29.
- He, W., Wei, P., Zhou, Y., & Wang, L. (2012). Combination of amplitude and phase features under a uniform framework with EMD in EEG-based Brain-Computer Interface. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 1687-1690.
- Holmqvist, K., & Nyström, M. (2010). An Adaptive Algorithm for Fixation, Saccade, and Glissade Detection in Eye-Tracking Data. *Behavior Research Methods*, 42(1), 188-204.
- Honey, G.D., Pomarol-Clotet, E., Corlett, P.R., Honey, R.A., McKenna, P.J., Bullmore, E.T., Fletcher, P.C. (2005). Functional dysconnectivity in schizophrenia associated with attentional modulation of motor function. *Brain*, 128, 2597-2611.
- Hooge, I., & Smeets, J. (2003). Nature of variability in saccades. *Journal of Neurophysiology*, 90, 12-20.
- Howard, R.A., (1971). *Dynamic Probabilistic Systems*. New York: Wiley.
- Hu, K., Ivanov, P. C., Chen, Z., Carpena, P., & Stanley, H. E. (2001). Effect of trends on detrended fluctuation analysis. *Physical Review E*, 64(1), 011114.
- Jeong, J., Chae, J., & Kim, S., (2001). Nonlinear Analysis of Chaotic Dynamics Underlying the Electroencephalogram in Patients with Alzheimer's Disease. *Journal of the Korean Physical Society*, 58-67.

- Jiang, J., Trundle, P., & Ren, J. (2010). Medical image analysis with artificial neural networks. *Computerized Medical Imaging and Graphics, 34*, 617-631.
- Johnson, M. J., & Willsky, A. S. (2013). Bayesian Nonparametric Hidden Semi-Markov Models. *Journal of Machine Learning Research, 14*, 673-701.
- Juttner, M., & Wolf, W. (1994). Stimulus sequence effects on human express saccades described by a Markov model. *Biological Cybernetics, 70*, 247-253.
- Kanaka, N., Matsuda, T., Tomimoto, Y., Noda, Y., Matsushima, E., Matsuura, M., & Kojima, T. (2008). Measurement of development of cognitive and attention functions in children using continuous performance test. *Psychiatry and clinical Neurosciences, 62*(2), 135-141.
- Kennel, M. B., Brown, R., & Abarbanel, H. D. (1992). Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction. *Physical Review A, 45*(6), 3403-3411.
- Klein, C., & Ettinger, U. (2008). A Hundred Years of Eye Movement Research in Psychiatry. *Brain and Cognition, 3*, 215-482.
- Kodba, S., Perc, M., & Marhl, M. (2005). Detecting chaos from a time series. *European Journal of Physics, 26*(1), 205-215.
- Korda, A. I., Asvestas, P. A., Matsopoulos, G. K., Ventouras, E. M., & Smyrnis, N. P. (2015). Automatic identification of oculomotor behavior using pattern recognition techniques. *Computers in Biology and Medicine, 151-162*.
- Ktonas, P. Y.; Bes, F. W.; Rigoard, M. T.; Wong, C.; Mallart, R.; Salzarulo, P. (1990). Developmental changes in the clustering pattern of sleep rapid eye movement activity during the first year of life: a Markov-process approach. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 75*(3), 136-140.
- Ktonas, P. Y.; Paparrigopoulos, T.; Monoyiou, E. A.; Bergiannaki, J. D.; Soldatos, C. R.. (2000). Sleep spindle incidence dynamics: A pilot study based on a Markovian analysis. *Sleep, 23*(3), 419-423.
- Kuffler, S. (1952). Neurons in the retina: organization inhibition and excitation problems. 27, 281-292. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology.
- Kwon, K.-A., Shipley, R. J., Edirisinghe, M., Ezra, D. G., Rose, G., Best, S. M., & Cameron, R. E. (2013). High-speed camera characterization of voluntary eye blinking kinematics. *Journal of Royal Society Interface, 10*(85). doi:10.1098/rsif.2013.0227.

- Lagun, D., Manzanares, C., Zola, S., Buffalo, E., Buffalo, A. E., Agichtein, E. (2011). Detecting cognitive impairment by eye movement analysis using automatic classification algorithms. *Journal of Neuroscience Methods*, 201(1), 196–203.
- Larsson, L., Nystrom, M., & Stridh, M. (2013). Detection of Saccades and Postsaccadic Oscillations in the Presence of Smooth Pursuit. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 60(9), 2484-2493.
- Laurence, R., Young, D. S. (1975). Survey of eye movement recording methods. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 7(5), 397-429.
- Leigh, J. R., & Zee, D. S. (1991). A Survey of Eye Movements: Characteristics and Teleology The Neurology of Eye Movements, 3-14.
- Leigh, R. (2004). Using saccades as a research tool in the clinical neurosciences. *Brain*, 460–477.
- Lindblad, J. (2000). Histogram thresholding using kernel density estimates. *Proceedings of the Swedish Society for Automated Image Analysis (SSAB) (41-44)*. Symposium on Image Analysis.
- Marple-Horvat, D., Gilbey, S., & Hollands, M. (1996). A method for automatic identification of saccades from eye movement recordings. *Journal of Neuroscience Methods*, 43(2), 163-167.
- Martinez-Conde, S. M. (2004). The role of fixational eye movements in visual perception. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 229–240.
- Martinez-Conde, S., Mackni, S. L., & Hubel, D. H. (2009). Microsaccades: a neurophysiological analysis, 32(9), 463-475.
- Mialet, J P; Pichot, P. (1981). Eye-tracking patterns in schizophrenia. An analysis based on the incidence of saccades. *Archives of General Psychiatry*, 38(2), 183-186.
- Møller, M. F. (1993). A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. *Neural networks*, 6(4), 525-533.
- Moraes, R., Valiati, J. F., & Wilson, P. (2013). Document-level sentiment classification: An empirical comparison between SVM and ANN. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 621-633.
- Munoz, D. P.; Wurtz, R. H. (1993a, July). Fixation cells in monkey superior colliculus. I. Characteristics of cell discharge. *Journal of Neurophysiology*, 70(2), 559-575.
- Nicolaou, M., James, A., Darzi, A., & Yang, G.-Z. (2004). A Study of Saccade Transition for Attention Segregation and Task Strategy in Laparoscopic Surgery. *In Medical image computing and computer-assisted intervention—miccai*, 97-104.

- Nygren, A. (1994). *Methods for the Quantification of Sleep Rapid Eye Movement (REM) Patterns*. Master's Thesis, University of Houston., Department of Electrical and Computer Engineering.
- Otero-Millan, J., Alba Castro, J. L., Martinez-Conde, S., & Macknik L, S. (2014). Unsupervised clustering method to detect microsaccades. *Journal of Vision, 2(18), 1-17*.
- Ott, Edward. *Chaos in dynamical systems*. Cambridge university press, 2002.
- Paus, T. (1991). Two modes of central gaze fixation maintenance and oculomotor distractibility in schizophrenics. *Schizophrenia Research, 5(2), 145-152*.
- Petit, L., Tzourio, N., Orssaud, C., Pietrzyk, U., Berthoz, A., Mazoyer, B. (1995). Functional neuroanatomy of the human visual fixation system. *European Journal of Neuroscience, 7, 169-174*
- Pettersson, K., Jagadeesan, S., Lukander, K., Henelius, A., Hæggström, E., & Müller, K. (2013). Algorithm for automatic analysis of electro-oculographic data. *BioMedical Engineering OnLine, 12-110*.
- Posner, M. I. (1980). Orienting Of Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 32, 3-25*.
- Privitera, C. M., Carney, T., Klein, S., Aguilar, M. (2014). Analysis of microsaccades and pupil dilation reveals a common decisional origin during visual search. *Vision Research, 95, 43-50*.
- Rabiner, L. R. (1989). A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition. *Proceedings of IEEE, 77(2), 257-286*.
- Raine, A. (1991). The SPQ: A scale for the assessment of schizotypal personality in a non-clinical sample: The role of task demand. *Schizophrenia Bulletin, 17, 555-564*.
- Ricardo, O.-R. (2008). Markov Processes for Biomedical Data Analysis. In *Sourcebook of Models for Biomedical Research, 739-745*.
- Rosenstein, M., James J., and Carlo J. De Luca. (1993). A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D: Nonlinear Phenomena, 65(1), 117-134*.
- Rosvold, H. E., Mirsky, A. F., Sarason, I., Bransome Jr, E. D., & Beck, L. H. (1956). A continuous performance test of brain damage. *Journal of consulting psychology, 20(5), 343*.

- Salvucci, D. D., & Goldberg, J. H. (2000). Identifying Fixations and Saccades in Eye-Tracking Protocols. *Proceedings of the Eye Tracking Research and Applications Symposium*, 71-78, ACM Press: New York.
- Simola, J., Salojarvi, J., & Kojo, I. (2008). Using hidden Markov model to uncover processing states from eye movements in information search tasks. *Cognitive Systems Research*, 9, 237–251.
- Skavenski, A. A., Hansen, R. M., Steinman, R. M., & Winterson, B. J. (1979). Quality of retinal image stabilization during small natural and artificial body rotations in man. *Vision research*, 19(6), 675-683.
- Smeets, J., & Hooge, I. (2003). Nature of variability in saccades. *Journal of Neurophysiology*, 90, 12–20.
- Smyrnis, N. (2008). Metric issues in the study of eye movements in psychiatry. *Brain and Cognition*, 68(3), 341-358.
- Smyrnis, N., Evdokimidis, I., Stefanis, N. C., Costantinidis, T. S., Avramopoulos, D., Theleritis, C., Stefanis, C. (2002). The antisaccade task in a sample of 2006 young males: II. Effect of task parameters. *Experimental Brain Research*, 147, 53-63.
- Smyrnis, N., Kattoulas, E., Evdokimidis, I., Stefanis, N. C., Avramopoulos, D., Pantes, G., Thelertis, C., Stefanis, C. N. (2004). Active eye fixation performance in 940 young men: effects of IQ, schizotypy, anxiety and depression. *Experimental Brain Research*, 156(1), 1–10.
- Smyrnis, N., Evdokimidis, I., Stefanis, N. C., Avramopoulos, D., Constantinidis, T. S., & Stavropoulos, A. (2003). Antisaccade performance of 1,273 men: effects of schizotypy, anxiety, and depression. *Journal of Abnormal Psychology*, 112(3), 403-414.
- Somola, P., Pudil, P., Novovičová, J., & Paclík, P. (1999). Adaptive floating search methods in feature selection. *20(11-13)*, 1157–1163.
- Spauschus, A., Marsden, J., Halliday, D.M., Rosenberg, J.R., Brown, P. (1999). The Origin of Ocular Microtremor in Man. *Experimental Brain Research*, 126(4), 556–562.
- Strogatz, S. H. (2015). *Nonlinear Dynamics and Chaos*. United States of America: Westview Press.
- Suwa, H., Matsushima, E., Ohta, K., & Mori, K. (2004). Attention disorders in schizophrenia. *Psychiatry and clinical neurosciences*, 58(3), 249-256.
- Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical systems and turbulence, Lectures Notes in Mathematics*,. In D. a. L.S.Young (Ed.). 898, 365-381. New York: Springer Verlag.

Αναφορές

- Truong , Quang Dang Khoa, Nguyen , Thi Minh Huong, Vo , Van Toi (2012). Detecting epileptic seizure from scalp EEG using Lyapunov spectrum. *Computational and mathematical methods in medicine*, Article ID 847686, 11 pages. doi:10.1155/2012/847686.
- Wu, T.-K., Huang, S.-C., & Meng, Y.-R. (2008). Evaluation of ANN and SVM classifiers as predictors to the diagnosis of students with learning disabilities. *34*, 1846–1856.
- Wu, Z., Huang, N. E., Long, S. R., & Peng, C.-K. (2007). On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. *104(38)*, 14889-14894.
- Yarbus, A. L. (1967). Eye Movements During Perception of Complex Objects. 171-211.
- Zeng, X., R. Eykholt, and R. A. Pielke (1991). Estimating the Lyapunov-exponent spectrum from short time series of low precision. *Physical Review Letters*, *66(25)*, 3229–3232.

Δημοσιεύσεις

Διεθνή Περιοδικά

- K. Flessas, D. Mylonas, G. Panagiotaropoulou, D. Tsopani, A. Korda, C. Siettos, A. Di Cagno, I. Evdokimidis and N. Smyrnis, "Judging the judges' performance in rhythmic gymnastics," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 47, no. 3, pp. 640-648, March 2015.
- Alexandra I. Korda, Pantelis A. Asvestas, George K. Matsopoulos, Errikos M. Ventouras and Nikolaos P. Smyrnis, 'Automatic Identification of Oculomotor Behavior Using Pattern Recognition Techniques,' *International Journal of Computers in Biology and Medicine*, pp. 151-162, May 2015
- Alexandra I. Korda, Mariniki Koliarakis, Pantelis A. Asvestas, George K. Matsopoulos, Errikos M. Ventouras, Periklis Y. Ktonas and Nikolaos Smyrnis, "Discrete states of attention during active visual fixation revealed by Markovian analysis of the time series of intrusive saccades", *Neuroscience* 339,ππ. 385–395, October 2016.

Διεθνή Συνέδρια

- Korda A., Asvestas P., Matsopoulos G., Ventouras E., Cavouras D., Ktonas P. Smyrnis N., "Saccadic movement identification using signal processing techniques". *International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization*, Athens, Greece, July 2011.
- Αλεξάνδρα Ι. Κορδά, Παντελής Α. Ασβεστάς, Γιώργος Κ. Ματσόπουλος, Ερρίκος Μ. Βέντουρας, Περικλής Γ. Κτώνας, Νικόλαος Π. Σμυρνης, 'Ανίχνευση Σακκαδικών κινήσεων με χρήση Νευρωνικών Δικτύων', 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Βιοιατρικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα, Ιανουάριος 2012.
- P. A. Asvestas, A. Korda, I. Karanasiou, S. Kostopoulos, G.K. Matsopoulos and E.M. Ventouras, 'Analysis of Brain Signals for the Discrimination of Observations of Correct and Incorrect Actions,' *International Journal of Signal Processing Systems*, Vol. 3, NO 2, December 2015.
- P. Asvestas, A. Korda, S. Kostopoulos, I. Karanasiou, G.K. Matsopoulos and E.M. Ventouras, 'Identification of Observations of Correct or Incorrect Actions Using Second Order Statistical Features of Event Related Potentials,' *International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing*, Lisbon, Portugal, January, 2015.
- P. Asvestas, A. Korda, S. Kostopoulos, V. Korfiatis, I. Karanasio, I. Kalatzis, E.M. Ventouras

and G.K. Matsopoulos, 'Classifications Systems For Identification Of Error Observations Using Electroencephalographic Signals', 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Βιοϊατρικής Τεχνολογίας, Αθήνα, Ελλάδα, Μάιος 2015.

- P. Asvestas, A. Korda, S. Kostopoulos, I. Karanasiou, A. Ouzounoglou, K. Sidiropoulos, E.C. Ventouras, G. Matsopoulos, "Use of Genetic Algorithm for the Selection of EEG Features", 4th International Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences, Mykonos, Greece, June 5-8, 2015.

- P. Asvestas, E.C. Ventouras, S. Kostopoulos, K. Sidiropoulos, V. Korfiatis, A. Korda, A. Uzunoglu, I. Karanasiou, I. Kalatzis and G. Matsopoulos, "Software Platform for Managing the Classification of Error-Related Potentials of Observers", 4th International Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences, Mykonos, Greece, June 5-8, 2015.