



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ Η/Υ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη Συστήματος Παρακολούθησης Οφθαλμού
για Έξυπνες Φορητές Συσκευές με στόχο τη Μέτρηση
της Οπτικής Προσοχής**

Διπλωματική εργασία που υποβάλλεται για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού
Διπλώματος Εξειδίκευσης στην Ιατρική Πληροφορική

Χάμου Δήμητρα

Επιβλέπων Καθηγητής
Χρήστος Μαραμής

Τριμελής Επιτροπή
Χρήστος Μαραμής, Ιωάννα Χουβαρδά, Αντώνιος Αλετράς

Θεσσαλονίκη, 6 Σεπτεμβρίου 2020

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Χρήστο Μαραμή για την πολύτιμη βοήθεια του, τις συμβουλές του και την υπομονή που επέδειξε σε όλο αυτό το διάστημα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε σε όλες τις προσπάθειες μου όλα αυτά τα χρόνια καθώς και τους εθελοντές που έλαβαν μέρος στην πειραματική διαδικασία.

Περίληψη

Ένα προηγμένο σύστημα ανίχνευσης του βλέμματος μπορεί να προσφέρει ερευνητικές ευκαιρίες σε εφαρμογές της καθημερινής ζωής, ιδιαίτερα στον τομέα της υγείας και σε άτομα με ψυχικές διαταραχές. Ένα κινητό τηλέφωνο, χωρίς επιπρόσθετο υλικό, μπορεί να γίνει μια προηγμένη ιατρική συσκευή παρακολούθησης των κινήσεων του οφθαλμού και κατ' επέκταση μελέτη της εγκεφαλικής και συμπεριφορικής δραστηριότητας. Γι' αυτό το λόγο η αποδοτική υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης του βλέμματος για την μέτρηση της οπτικής προσοχής με αξιοπιστία είναι ένα κρίσιμο ζήτημα στην εξέλιξη της τεχνολογίας της παρακολούθησης των οφθαλμών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τις τεχνικές παρακολούθησης του ανθρώπινου οφθαλμού και τη χαρτογράφηση του πεδίου της καταγραφής του βλέμματος υλοποιώντας μια εφαρμογή σε έξυπνα κινητά τηλέφωνα Android για την ανίχνευση των οφθαλμών και της κίνησης τους. Οι αλγόριθμοι που υλοποιούνται και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται έχουν ως στόχο την μέτρηση της οπτικής προσοχής μέσω παραμέτρων, όπως της καταγραφής του βλέμματος συνδυαστικά με τις μετρήσεις του αριθμού του βλεφαρίσματος σε έξυπνα κινητά τηλέφωνα στον κλάδο της Ιατρικής Πληροφορικής.

Στην εφαρμογή που αναπτύχθηκε γίνεται καταγραφή δύο παραμέτρων που σχετίζονται με την οπτική προσοχή. Πρώτον, καταγράφεται η κατεύθυνση του βλέμματος του χρήστη ώστε να προσεγγιστεί η περιοχή της οθόνης όπου κοιτάει ο χρήστης και δεύτερον, υπολογίζεται ο αριθμός των βλεφαρισμάτων για να εκτιμηθεί η ταχύτητα βλεφαρίσματος, καθώς και να διεξαχθεί ο έλεγχος της συσχέτισης των συνολικών βλεφαρισμάτων, με το ενδιαφέρον του χρήστη για το παρατηρούμενο περιεχόμενο. Η καταγραφή επιτυγχάνεται μέσω απλής απεικόνισης κειμένων ανομοιογενούς περιεχομένου σε διαφορετικές περιοχές της οθόνης, η οποία είναι χωρισμένη σε τέσσερα τεταρτημόρια, με στόχο να κατευθύνουν το βλέμμα του χρήστη στην οθόνη του κινητού.

Η αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω πιλοτικής μελέτης σε περιορισμένο αριθμό εθελοντών σε ελεγχόμενες πειραματικές συνθήκες για την εξαγωγή συμπερασμάτων, όσον αφορά την επιλογή των δεικτών μέτρησης της οπτικής προσοχής και την μέτρηση της ακρίβειας της υλοποίησης του ολοκληρωμένου συστήματος.

Για τον προσδιορισμό και την ταξινόμηση της κατεύθυνσης του βλέμματος στην οθόνη της φορητής συσκευής, υλοποιήθηκαν διάφοροι αλγόριθμοι ταξινόμησης μηχανικής μάθησης, επικεντρώνοντας σε μεγαλύτερο βαθμό στον ταξινομητή του δέντρου αποφάσεων που πέτυχε τα μεγαλύτερα ποσοστά ακρίβειας. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων απέδωσε αξιολογικά αποτελέσματα, τα οποία οπτικοποιήθηκαν σε κατάλληλα διαγράμματα για την απόδοση ολοκληρωμένης και κατανοητής εικόνας σχετικά με το σύστημα μελέτης ανίχνευσης.

Μετά από τη συγκριτική μελέτη μεταξύ ολόκληρου του συνόλου δεδομένων των μετρήσεων του βλέμματος και των βλεφαρισμάτων που καταγράφηκαν, αποδείχθηκε ότι το σύστημα αποδίδει μεγαλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα για κάθε μεμονωμένο χρήστη σε αντίθεση με το ολόκληρο σύνολο, γι' αυτό το λόγο προτείνεται η αρχική βαθμονόμηση κάθε χρήστη

του ολοκληρωμένου συστήματος για την επίτευξη μέγιστης απόδοσης του συστήματος.

Για την παράμετρο της οπτικής προσοχής χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος μέτρησης του αριθμού των βλεφαρισμάτων στη χρήση της εφαρμογής και πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος συσχέτισης των σχετικών μεταβλητών, χωρίς ωστόσο στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα λόγω του περιορισμένου μεγέθους του δείγματος. Επιπλέον, έγινε εμπειρική πειραματική ανάλυση στο σύνολο των δεδομένων για τον έλεγχο της υπόθεσης συσχέτισης του αριθμού βλεφαρισμάτων σε σχέση με το ενδιαφέρον που αξιολόγησε ο χρήστης για το περιεχόμενο του κειμένου ανάγνωσης που οδήγησε σε ορισμένα συμπεράσματα για τη οπτική προσοχή του χρήστη.

Λέξεις κλειδιά: Ιχνηλάτηση οφθαλμών στην ιατρική, Τεχνολογία παρακολούθησης οφθαλμών, Φορητές συσκευές, Ιατρικές φορητές συσκευές, Οπτική προσοχή

Extended Abstract

An advanced eye detection system can offer research opportunities in everyday applications, especially in the field of health and in people with mental disorders. A mobile phone, without additional hardware material, can become an advanced medical device for eye movements monitoring and consequently to study of brain and behavioral activity. So, the efficient implementation of a fully embedded eye monitoring and tracking system for the measurement of visual attention with reliability is a critical issue in the evolution of eye tracking technology.

This thesis explores the human eye monitoring techniques and mapping the field of eye tracking by implementing an application on Android smartphones to detect the eyes and their movements. The algorithms that are implemented and the tools that are used to measure the visual attention through parameters, such as the gaze tracking in combination with the measurements of the number of blinks on smart mobile phones in the field of Medical Informatics.

In the application, two parameters related to visual attention are recorded. First, the direction of the user's gaze is recorded to approach the area of the screen where the user is looking and secondly, the number of blinks is calculated in order to estimate the blinking speed, as well as to check the correlation of the total eye blinks with the user's interest for the observed content. The recording is achieved by simply displaying texts of heterogeneous content in different areas of the screen, which is divided into four quarters, in order to direct the user's gaze to the mobile screen.

The system evaluation was carried out through a pilot study on a limited number of volunteers in controlled experimental conditions in order to conclude regarding the selection of the indicators for measuring visual activity and to measure the accuracy of the implementation of the overall system.

Gaze classification on the mobile screen achieved by the implementation of various machine learning classification algorithms, focusing more on the decision tree classifier that achieved the highest accuracy percentage. The results analysis yielded on remarkable results, which were visualized in appropriate charts and figures, for the rendering of a complete and comprehensible image of the detection study system.

The comparative analysis between the data eye records and total blinks, proved that the system achieves more accurate results for each individual user as opposed to the total dataset, therefore the initial calibration for each user is proposed in order to achieve the maximum system performance.

The visual attention parameter was measured by using the total blinks counter and a statistical test of correlation of the relevant variables was performed, without statistically significant results due to the limited sample size. In addition, empirical experimental analysis was performed on the dataset to test the correlation of the number of blinks in relation to the user's interest in the content of the reading text, which led to some conclusions about the user's visual attention.

Keywords: Eye Tracking in medicine, Eye tracking technology, Eye Detection mobile devices, medical mobile devices, visual attention

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Περιγραφή του προβλήματος	2
1.2	Ερευνητικός στόχος	2
1.3	Δομή της διπλωματικής εργασίας	2
2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	4
2.1	Παρακολούθηση δραστηριότητας οφθαλμού	4
2.1.1	Τύποι οφθαλμικών κινήσεων	4
2.1.2	Σύστημα κίνησης κεφαλιού	6
2.2	Μέθοδοι ανίχνευσης βλέμματος	7
2.2.1	Υλικοτεχνικός εξοπλισμός	9
2.2.2	Λογισμικό και αλγόριθμοι αναγνώρισης οφθαλμών	10
2.2.3	Εμπειρία του χρήστη και περιορισμοί	14
2.3	Μέτρηση της οπτικής προσοχής στην υγεία	15
2.3.1	Γενικές εφαρμογές στην υγεία	16
2.3.2	Διάγνωση	17
2.3.3	Θεραπεία	17
2.3.4	Ιατρική Εκπαίδευση	18
3	Μεθοδολογία	20
3.1	Ερευνητικά εργαλεία	20
3.1.1	Βιβλιοθήκες Ανίχνευσης προσώπου	20
3.2	Έρευνα σε ανθρώπινα υποκείμενα	23
3.3	Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων	24
3.3.1	Ταξινόμηση και συσχέτιση των δεδομένων	25
3.3.2	Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων	26
4	Σχεδιασμός και Υλοποίηση	27
4.1	Υλικοτεχνικός εξοπλισμός	27
4.2	Σχεδίαση	28
4.2.1	Ενσωμάτωση της βιβλιοθήκης στο Android	28
4.3	Υλοποίηση απλής Εφαρμογής	30
5	Συλλογή και ανάλυση δεδομένων	34
5.1	Πρωτόκολλο Συλλογής δεδομένων	34
5.2	Συμμετέχοντες	35
5.3	Διαδικασία	35
5.4	Ανάλυση δεδομένων και Αποτελέσματα	37
5.4.1	Ανάλυση σε διαγράμματα διασποράς	39
5.4.2	Ταξινόμηση	40
5.4.3	Συσχέτιση με την οπτική προσοχή	43

6	Συμπεράσματα και Συζήτηση	46
6.1	Κύρια Ευρήματα	46
6.2	Περιορισμοί	47
6.3	Συζήτηση και Μελλοντικές προεκτάσεις	49

Κατάλογος Σχημάτων

1	Ο νοητικός χάρτης της ιχνηλάτισης των οφθαλμών στον τομέα της Υγείας	8
2	Αλληλοεξάρτηση της τεχνολογίας της παρακολούθησης των οφθαλμών	9
3	Η ροή της επεξεργασίας εικόνας ενός ανιχνευτή	11
4	Τα δεκαέξι σημεία καταγραφής της περιοχής του οφθαλμού	25
5	Απλή εφαρμογή της βιβλιοθήκης Firebase ML Kit	31
6	Τα δικαιώματα πρόσβασης για τη χρήση της εφαρμογής	32
7	Βασικά στιγμιότυπα-οθόνες της εφαρμογής EyeTrackDemo	32
8	Εικόνα εφαρμογής χωρισμένη σε τέσσερα τεταρτημόρια για την ταξινόμηση του βλέμματος	36
9	Κατανομή του βλέμματος του δεξιού οφθαλμού όλων των χρηστών.	38
10	Διάγραμμα διασποράς της κατανομής του βλέμματος στην οθόνη για το δεξί οφθαλμό όλων των χρηστών.	39
11	Κατανομή των δεκαέξι σημείων της περιοχής του οφθαλμού στην οθόνη του κινητού για το χρήστη 3	40
12	Καταγεγραμμένη θέση του βλέμματος στην οθόνη των δύο οφθαλμών του χρήστη 3	41
13	Κανονικοποιημένος Confusion matrix με χρήση του ταξινομητή δέντρο απόφασης για την πρόβλεψη της θέσης του βλέμματος στην οθόνη που εφαρμόστηκε στο σύνολο των δεδομένων	42
14	Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης της περιοχής του βλέμματος και της θέσης στην οθόνη με τον αριθμό βλεφαρισμάτων.	44

Κατάλογος Πινάκων

1	Συγκριτική πειραματική αξιολόγηση των τριών βιβλιοθηκών.	22
2	Τα χαρακτηριστικά της συσκευής που εγκαταστάθηκε και εκτελέστηκε η εφαρμογή	27
3	Το περιεχόμενο των κειμένων που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή 33	
4	Μέτρηση ακρίβειας των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης που εφαρμόστηκε στα συνολικά δεδομένα χωρίς 10-fold cross validation	41
5	Εφαρμογή του δέντρου απόφασης με 10-fold cross validation στο σύνολο των δεδομένων και σε κάθε χρήστη ξεχωριστά για την ταξινόμηση της θέσης του βλέμματος στην οθόνη και των 16 σημείων του περιγράμματος της περιοχής των οφθαλμών	43
6	Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων συσχέτισης των παραμέτρων των καταγεγραμμένων βλεφαρισμάτων με τη θέση του αντίστοιχου κειμένου στην οθόνη	44
7	Αποτελέσματα αξιολόγησης των χρηστών ως προς το περιεχόμενο των κειμένων σε συνδιασμό με το καταγεγραμμένο σύνολο βλεφαρισμάτων	45

1 Εισαγωγή

Οι άνθρωποι οφθαλμοί αποτελούν ένα από τα εκφραστικά μη λεκτικά μέσα επικοινωνίας που διαθέτει ένα άτομο [42]. Η ανάλυση των ακούσιων και εκούσιων οφθαλμικών κινήσεων υποδηλώνουν μία νέα προσέγγιση ανίχνευσης και αναγνώρισης της δραστηριότητας του ατόμου. Ιδιαίτερα στον τομέα της Υγείας, η αποκρυπτογράφηση των συγκεκριμένων σημάτων επικοινωνίας μέσω αποδοτικών και μη επεμβατικών τεχνικών οφθαλμικής παρακολούθησης και ιχνηλάτισης των οφθαλμών αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνας, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της αλληλεπίδρασης ανθρώπου - υπολογιστή Human Computer Interaction (HCI) [37].

Η αναγνώριση του ανθρώπινου προσώπου και του οφθαλμού απασχόλησε ιδιαίτερα την ερευνητική κοινότητα την τελευταία δεκαετία για την αποκωδικοποίηση των οφθαλμικών κινήσεων και τη χαρτογράφηση τους σε συγκεκριμένα μοτίβα δραστηριοτήτων. Ειδικότερα, η χρήση έξυπνων φορητών και φορετών συσκευών, όπως τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα, γυαλιά, ρολόγια, που χρησιμοποιούνται ευρέως από τους ανθρώπους σε καθημερινή βάση αποτέλεσε πεδίο έρευνας και ευκαιρία μελέτης για την ενσωμάτωση αλγορίθμων ανίχνευσης της θέσης του οφθαλμού [16]. Η εκτεταμένη καθημερινή χρήση τους, σε συνδυασμό με τις εξελιγμένες τεχνολογίες ανίχνευσης των χαρακτηριστικών του προσώπου, έχουν δημιουργήσει την ανάγκη ανάπτυξης αποδοτικών αλγορίθμων παρακολούθησης των οφθαλμών με σκοπό την ανάλυση του βλέμματος και την εξαγωγή χρήσιμης πληροφορίας για την μέτρηση της οπτικής προσοχής.

Παράλληλα, οι τεχνολογικές εξελίξεις στην μεθοδολογία παρακολούθησης των οφθαλμών εφαρμόζουν την αυτόματη αναγνώριση του βλέμματος και την επεξεργασία της ροής της εικόνας και του βίντεο σε εμπορικές και ερευνητικές εφαρμογές, για την μέτρηση παραμέτρων, όπως η μέτρηση της οπτικής προσοχής του χρήστη. Οι σύγχρονες μελέτες έχουν εστιάσει στην καταγραφή της οπτικής προσοχής κατά βάση για εμπορικούς λόγους στους κλάδους της διαφήμισης, της ψυχαγωγίας και του σχεδιασμού ιστοσελίδων, για το λόγο ότι προσφέρουν μεγάλο πλεονέκτημα εξαγωγής συμπερασμάτων της συμπεριφοράς του χρήστη και τη βελτιστοποίηση τους. Ωστόσο, η έρευνα επεκτάθηκε στους κλάδους της ιατρικής διάγνωσης, της ψυχολογικής ανάλυσης, της οφθαλμολογίας και της νευροφυσιολογίας. Ειδικότερα, η έρευνα της μέτρησης της οπτικής προσοχής που στοχεύει σε ειδικούς πληθυσμούς στον τομέα της υγείας αποτελεί χρήσιμο διαγνωστικό και θεραπευτικό παράγοντα που συνεχώς εξελίσσεται λόγω της προόδου της τεχνολογίας [26].

Παρόλα αυτά, οι ερευνητές τονίζουν ότι υπάρχει ακόμη χώρος για έρευνα στον συγκεκριμένο κλάδο. Ο λόγος είναι ότι η ανίχνευση και η παρακολούθηση του οφθαλμού μέσω κινητών συσκευών έχει αρκετούς περιορισμούς, τόσο στην ακριβή ανίχνευση της θέσης του βλέμματος στην οθόνη με τη χρήση καθημερινής κάμερας, όσο και στη διαδικασία επεξεργασίας (κωδικοποίησης, αποκωδικοποίησης) των δεδομένων.

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Η παρούσα διπλωματική εξετάζει την αξιοποίηση καινοτόμων αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνων και μηχανικής μάθησης για την ανίχνευση των ανθρώπινων οφθαλμών και την καταγραφή του βλέμματος του χρήστη στην οθόνη έξυπνων φορητών συσκευών, για την καταγραφή του δείκτη μέτρησης της οπτικής προσοχής, μέσω οπτικών παραμέτρων. Για την συγκεκριμένη μελέτη, συνδιάστηκαν οι τεχνολογίες ανάπτυξης εφαρμογών για έξυπνες φορητές συσκευές με το λειτουργικό σύστημα Android και οι τεχνικές νευροεπιστημονικής έρευνας, για την αποδοτική μέτρηση της οπτικής προσοχής του κάθε χρήστη με την καταγραφή των παραμέτρων της περιοχής των οφθαλμών, της θέσης του βλέμματος και του βλεφαρίσματος. Παράλληλα, εξετάζεται η υπόθεση της συσχέτισης του βλεφαρίσματος για την μέτρηση του δείκτη της οπτικής προσοχής.

1.2 Ερευνητικός στόχος

Ο σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι η διερεύνηση των σύγχρονων τεχνολογιών παρακολούθησης του ανθρώπινου οφθαλμού για τη μέτρηση της οπτικής προσοχής. Ο κύριος ερευνητικός στόχος είναι η λεπτομερής μελέτη και η χαρτογράφηση του πλαισίου έρευνας για τη σχεδίαση και την ανάπτυξη της μεθοδολογίας, καθώς και η καταγραφή των περιορισμών και των προκλήσεων που προκύπτουν. Για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος δρομολογήθηκε η υλοποίηση ενός εξελιγμένου συστήματος παρακολούθησης του βλέμματος σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση της μπροστινής κάμερας από έξυπνο κινητό τηλέφωνο χρησιμοποιώντας αξιόπιστους αλγόριθμους ανίχνευσης και παρακολούθησης των οφθαλμών, προσφέροντας παράλληλα ευχάριστη εμπειρία στο χρήστη. Σε αυτά τα πλαίσια έγινε η υλοποίηση μιας εφαρμογής για την ανίχνευση των οφθαλμών, της παρακολούθησης του βλέμματος και της καταγραφής του βλεφαρίσματος από έξυπνο κινητό τηλέφωνο, με χρήση εξελιγμένων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης.

Η τελική αξιοποίηση της επιστημονικής έρευνας, επί της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και η υλοποίηση της εφαρμογής για έξυπνα κινητά τηλέφωνα εφαρμόστηκαν σε πειραματική μελέτη σε περιορισμένο αριθμό ανθρώπινων υποκειμένων για την αξιολόγηση του συστήματος. Η συμβολή της συγκεκριμένης προσέγγισης διακρίνεται στην μέτρηση της οπτικής προσοχής με την καταγραφή της περιοχής των οφθαλμών, της θέσης του ανθρώπινου βλέμματος και του αριθμού των βλεφαρισμάτων με τη χρήση μη επεμβατικών μέσων σε έξυπνες φορητές συσκευές. Στα πλαίσια της προκειμένης εργασίας, αναπτύχθηκαν και δημοσιεύτηκε πηγαίος κώδικας της ανάπτυξης της εφαρμογής, καθώς και τα δεδομένα καταγραφής του ανθρώπινου οφθαλμού που έχουν σκοπό να αποτελέσουν υπόβαθρο για μελλοντικές μελέτες της μέτρησης της οπτικής προσοχής με την ανίχνευση του βλέμματος στους τομείς της ιατρικής διάγνωσης, της ιατρικής πληροφορικής και της υγείας.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Αρχικά, στο Κεφάλαιο 2 αναφέρονται οι βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις που πραγματοποιήθηκαν, όσον αφορά τη μέτρηση της οπτικής προσοχής των μεθόδων πα-

ρακολούθησης της δραστηριότητας και των κινήσεων του ανθρώπινου οφθαλμού, με σύγχρονες τεχνολογίες και της καταγραφής του βλέμματος με επικέντρωση στην ανίχνευση της κόρης του οφθαλμού και του βλέμματος. Εισάγονται οι βασικές έννοιες των οφθαλμικών κινήσεων και οι ορολογίες των παραμέτρων μέτρησης της οφθαλμικής δραστηριότητας, στις οποίες στηρίζεται η μεθοδολογία της παρούσας επιστημονικής διαδικασίας. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στις εφαρμογές της μέτρησης της οφθαλμικής δραστηριότητας και στη μελέτη της οπτικής προσοχής, παρατίθοντας τις σχετικές εφαρμογές στον τομέα της υγείας. Σε επόμενο βήμα, στο Κεφάλαιο 3, γίνεται αναφορά της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε με αναφορές στην σύνοψη των εργαλείων και των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος εφαρμογής σε ανθρώπινα υποκείμενα και η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων. Στο Κεφάλαιο 4 αναφέρονται λεπτομερώς οι διαδικασίες ανάπτυξης λογισμικού που υλοποιήθηκαν για τη δημιουργία πιλοτικής εφαρμογής σε έξυπνο κινητό τηλέφωνο Android. Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται η διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας για την μαζική συλλογή δεδομένων, στο πιλοτικό πείραμα που πραγματοποιήθηκε από εθελοντές και παρατίθενται τα δεδομένα αξιολόγησης του συστήματος. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 επισημαίνονται τα συμπεράσματα και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων της προκειμένης μελέτης για την κατανομή της θέσης του βλέμματος στην οθόνη και της συσχέτισης του αριθμού βλεφαρισμάτων με την οπτική προσοχή του χρήστη για την πειραματική εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε. Τέλος, δίνεται η ευκαιρία για συζήτηση της μελέτης που διεξήχθη και για μελλοντικές προεκτάσεις της εργασίας.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται, σε θεωρητικό πλαίσιο, οι ανθρώπινες οφθαλμικές κινήσεις, οι σύγχρονες μέθοδοι ανίχνευσης του βλέμματος που χρησιμοποιούνται στη σχετική βιβλιογραφία και αναλύονται οι παράμετροι μέτρησης της οπτικής προσοχής με εφαρμογές που εμφανίζονται στον τομέα της Υγείας.

2.1 Παρακολούθηση δραστηριότητας οφθαλμού

Η παρακολούθηση του οφθαλμού είναι η μέτρηση της δραστηριότητας του οφθαλμού, με στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων, όσον αφορά την εστίαση ή την αγνόηση, αλλά και την συνολική αντίδραση απέναντι σε συγκεκριμένα ερεθίσματα [33]. Ο ανεξερεύνητος κλάδος της ιχνηλάτισης της δραστηριότητας του οφθαλμού αποτελεί μια πλούσια πηγή πληροφοριών και παρατηρείται ότι προσφέρει χρήσιμα στοιχεία για την εξαγωγή και την κατανόηση συμπεριφορικών διαδικασιών, όσον αφορά την οπτική προσοχή.

Τα μοτίβα κίνησης της οπτικής συμπεριφοράς που εκτελούν οι άνθρωποι οφθαλμοί, καθώς πραγματοποιούν συγκεκριμένες δραστηριότητες αποκαλύπτουν χρήσιμες πληροφορίες που μπορούν να αξιοποιηθούν από τους ερευνητές. Οι καταγραφές προκύπτουν από δραστηριότητες με συγκεκριμένα οπτικά καθήκοντα, όπως η ανάγνωση κειμένου, η αντιγραφή κειμένου, η παρακολούθηση βίντεο ή εικόνων, η περιήγηση στο περιβάλλον μιας εφαρμογής ή μιας ιστοσελίδας, η οδήγηση αυτοκινήτου ή άλλες σωματικές δραστηριότητες κ.ά. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα αναγνώρισης της δραστηριότητας, μέσω ανάλυσης της κίνησης των οφθαλμών.

Η ανάλυση της κίνησης των οφθαλμών αποτελεί μια πρωτοποριακή μέθοδο αναγνώρισης της δραστηριότητας των οφθαλμών, όπου τα δεδομένα κίνησης συνήθως καταγράφονται με τη χρήση ενός συστήματος ηλεκτροκοχκογραφίας (EOG) [17]. Η ανάλυση πραγματοποιείται για την κατανόηση του τρόπου επεξεργασίας των καθηκόντων από τον εγκέφαλο και αποτελεί εργαλείο διερεύνησης της οπτικής συμπεριφοράς. Οι ερευνητικές μελέτες έχουν ως στόχο την μοντέλοποίηση της οπτικής συμπεριφοράς, μέσω των γνωστών χαρακτηριστικών κινήσεων των οφθαλμών, κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων εργασιών.

2.1.1 Τύποι οφθαλμικών κινήσεων

Για να γίνει κατανοητή η ανάλυση της κίνησης των οφθαλμών και η μελέτη της δραστηριότητας τους είναι σκόπιμο να αναφερθούν οι διαφορετικοί τύποι κίνησης των οφθαλμών. Οι βασικοί τύποι κίνησης των οφθαλμών που ανιχνεύονται εύκολα και αποτελούν παράμετροι μέτρησης της οφθαλμικής δραστηριότητας είναι οι εξής:

- **Saccades**, ή σακκαδική κίνηση, η γρήγορη κίνηση των οφθαλμών, όπου οι οφθαλμοί είναι σε εγρήγορση κατά την προβολή μιας οπτικής σκηνής, με σκοπό τη δημιουργία ενός διανοητικού χάρτη από τις ενδιαφέροντες περιοχές της σκηνής. Στη συγκεκριμένη κίνηση γίνεται ταυτόχρονη κίνηση των δύο οφθαλμών. Η διάρκεια της κίνησης saccades εξαρτάται από τη γωνιακή

απόσταση που χαράζουν οι οφθαλμοί κατά τη διάρκεια της κίνησης, που ονομάζεται εύρος saccade. Το τυπικό πλάτος είναι περίπου είκοσι (20) μοίρες σε 10 – 200ms [28].

- **Fixations**, ή εστίαση, όπου οι οφθαλμοί διατηρούν μία στάσιμη κατάσταση προσήλωσης και το βλέμμα συγκρατείται σε ορισμένη σταθερή θέση της οπτικής σκηνής. Συνήθως, ορίζονται ως η χρονική περίοδος μεταξύ δύο κινήσεων fixation, με μέση διάρκεια 100 – 200 ms [17]. Είναι υπεύθυνο για την ύπαρξη τριών επιπλέον ειδών κινήσεων, τις μικροσακαδικές κινήσεις (microsaccades), τις κινήσεις διολίσθησης (drifts) και τις τρέμολο-κινήσεις (tremors).
- **Blinking**, ή βλεφάρισμα, όπου οι οφθαλμοί ανοιγοκλείνουν ταχέως. Η συγκεκριμένη κίνηση βοηθά στην εξάπλωση του λεπτού υγρού φιλμ, επονομαζόμενο και ως “προγεννητικό φιλμ δακρύων”, με το οποίο είναι καλυμμένο το μετωπικό τμήμα του κερατοειδούς χειτώνα. Ο μέσος ρυθμός του βλεφαρισμάτος κυμαίνεται 12 – 19 ανά λεπτό σε κατάσταση ηρεμίας του ατόμου [22]. Η κίνηση του βλεφαρίσματος επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες που περιλαμβάνουν την σχετική υγρασία του οφθαλμού, τη θερμοκρασία, τη φωτεινότητα αλλά και από τη σωματική δραστηριότητα του ατόμου και την κόπωση [32].
- **Smooth pursuit movements**, ή οι ομαλές κινήσεις παρακολούθησης, όπου οι οφθαλμοί παρακολουθούν ένα κινούμενο αντικείμενο στην οπτική σκηνή, δηλαδή πραγματοποιείται εθελοντική μετατόπιση του βλέμματος. Το τυπικό πλάτος είναι πολύ μικρότερο από των σακαδικών κινήσεων (100 μοίρες) και εξαρτάται από την ταχύτητα του κινούμενου αντικειμένου.
- **Vergence movements**, ή οι κινήσεις σύγκλισης - απόκλισης, όπου οι οφθαλμοί συγκλίνουν ή απομακρύνονται ο ένας από τον άλλον, κατά τη διάρκεια προσαρμογής, όταν ένα αντικείμενο πλησιάζει ή απομακρύνεται αντίστοιχα από την οπτική σκηνή. Η συγκεκριμένη κίνηση αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία με ανώτερη επεξεργασία από τον εγκέφαλο.

Επιπρόσθετες έννοιες και παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην μέτρηση της δραστηριότητας των κινήσεων των οφθαλμών και της μέτρησης της προσοχής αναφέρονται παρακάτω [37]:

- **Διαδρομές σάρωσης (scanpath)**, που είναι η ακολουθία μεταξύ των κινήσεων του σταθερό βλέμμα- σακαδικό - σταθερό βλέμμα (fixations-saccade-fixations).
- **Χάρτες θερμότητας (heatmaps)**, που αποτελούν τις στατικές ή δυναμικές συγκεντρώσεις των σημείων του βλέμματος και απεικονίζουν τη διανομή της οπτικής προσοχής του ερεθίσματος, με την οπτικοποίηση ενός χάρτη θερμότητας.
- **Περιοχή ενδιαφέροντος (Area Of Interest (AOI))**, που αναφέρονται σε υποπεριοχές του ερεθίσματος που εμφανίζεται στην οπτική σκηνή.

- **Ακολουθία σταθεροποίησης**, που προσδιορίζεται από τη χρονική διάρκεια παραμονής και τη θέση που εστιάζει ο χρήστης, έτσι δημιουργείται μια βαθμολογημένη σειρά περιοχών που εστίασε ο χρήστης. Η συγκεκριμένη παράμετρος χρησιμοποιείται για την μέτρηση των εμφανών στοιχείων της οπτικής σκηνής που προσελκύουν μεγάλη προσοχή και ενδιαφέρον στο χρήστη.
- **Χρόνος παραμονής σε μία περιοχή**, όπου αναφέρεται στο χρόνο που αφιέρωσαν οι χρήστες σε μία συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος, καθώς η μακρόχρονη παραμονή σε μία περιοχή υποδεικνύει συνήθως, υψηλό επίπεδο ενδιαφέροντος.

Η καταγραφή των οφθαλμικών κινήσεων και η μέτρηση των παραμέτρων έχουν στόχο αρχικά τη συλλογή δεδομένων για την μελέτη της συμπεριφοράς του ανθρώπινου οφθαλμοκινητικού συστήματος. Με το πέρασμα των χρόνων, η εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε στην ανάπτυξη συστημάτων καταγραφής των οφθαλμών και των σχετικών κινήσεων με μεγαλύτερη πιστότητα. Ένα ολοκληρωμένο ιδανικό σύστημα καταγραφής της οπτικής δραστηριότητας συνίσταται να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις που επισημαίνονται παρακάτω.

- Αποφυγή εξωτερικών παρεμβολών από την οπτική σκηνή του χρήστη.
- Εύχρηστη και βολική εφαρμογή του υλικοτεχνικού εξοπλισμού που δεν επιβαρύνει το χρήστη.
- Ακριβείς επιδόσεις ανίχνευσης της περιοχής των οφθαλμών και των σχετικών χαρακτηριστικών μέτρησης του πλάτους σε μοίρες.
- Λειτουργία με συχνότητα δειγματοληψίας πάνω από 100Hz.
- Ικανότητα καταγραφής οριζόντιων, κάθετων και κυκλοστροφικών κινήσεων του κεφαλιού και του σώματος
- Εφαρμογή σε ετερογενή πληθυσμό

Οι περισσότερες τεχνικές καταγραφής οφθαλμικών κινήσεων στην βιβλιογραφία βασίζονται, είτε σε ανακλώμενες ακτίνες με χρήση υπέρυθρων για τον προσδιορισμό της σχετικής θέσης της κόρης του οφθαλμού, είτε σε καταγραφή του ηλεκτρικού δυναμικού του δέρματος, είτε σε τεχνικές που βασίζονται σε χρήση φακών επαφής. Ωστόσο, όλες οι προλεγόμενες τεχνικές είναι δύσχρηστες, ακριβές και καθόλου φιλικές για το χρήστη γι' αυτό το λόγο διερευνήθηκαν επιπλέον τεχνικές με τη χρήση απλοποιημένου υλικοτεχνικού εξοπλισμού για την καταγραφή της θέσης και των κινήσεων των οφθαλμών που αποδίδουν παρόμοια ποσοστά ακρίβειας.

2.1.2 Σύστημα κίνησης κεφαλιού

Το οφθαλμοκινητικό σύστημα συνδέεται στενά με το σύστημα κίνησης του κεφαλιού. Το πλάτος και η κατεύθυνση των οφθαλμικών κινήσεων επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το εύρος της συνεχούς εκούσιας ή ακούσιας κίνησης του κεφαλιού. Γι' αυτό το λόγο, παρατηρείται ότι τα χαρακτηριστικά των οφθαλμικών

κινήσεων (μέγεθος, πλάτος, ταχύτητα) διαφέρουν σε συνθήκες όπου το κεφάλι είναι σταθεροποιημένο και σε συνθήκες όπου το κεφάλι είναι ελεύθερο. Το σύστημα κίνησης του κεφαλιού επηρεάζεται, κυρίως, από δύο ειδών αντανακλαστικές κινήσεις.

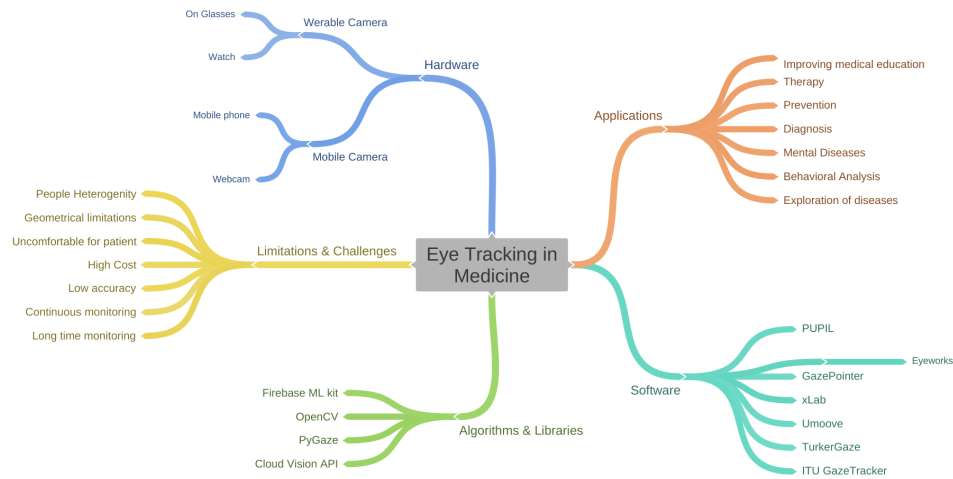
- **Vestibular - Ocular reflex**, όπου η κίνηση εκτελείται έτσι ώστε η επιθυμητή περιοχή να διατηρείται συνεχώς στην οπτική σκηνή ακόμα και το κεφάλι ή το σώμα κινούνται ή στρέφονται σε αντίθετη κατεύθυνση και προσηλώνονται σε κάποιο σταθερό σημείο.
- **Optokinetic reflex**, όπου οι κινήσεις εκτελούνται όταν γίνεται προσπάθεια προσήλωσης σε διαδοχικά περάσματα κινούμενων αντικειμένων και θεωρούνται ως εναλλακτικές αργές ή γρήγορες οφθαλμικές κινήσεις (slow pursuit - saccades).

2.2 Μέθοδοι ανίχνευσης βλέμματος

Για την αποδοτική ιχνηλάτιση των οφθαλμών δημιουργούνται εξελιγμένα συστήματα ανίχνευσης και παρακολούθησης της οφθαλμικής δραστηριότητας. Παρόλο το ευρύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον στον τομέα της υγείας και την αναγκαιότητα της εξέλιξης της τεχνολογίας στον τομέα της πληροφορικής, είναι σκόπιμο να διερευνηθούν οι τεχνολογίες και οι εφαρμογές που υφίστανται μέχρι στιγμής στο επίπεδο του υλικοτεχνικού εξοπλισμού και των υλοποιημένων εργαλείων, καθώς και οι τεχνικές και τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την ιχνηλάτιση των οφθαλμών. Παράλληλα, διερευνώνται οι περιορισμοί που εμφανίζονται και εμποδίζουν την ταχεία εξέλιξη της ανάπτυξης της τεχνολογίας της καταγραφής του οφθαλμού και των κινήσεων του, όπως επίσης καταγράφονται οι προκλήσεις που υπάρχουν. Με αυτό τον τρόπο, προσδιορίζεται ένα μονοπάτι για την πρώιμη υλοποίηση της τεχνολογίας της παρακολούθησης του οφθαλμού και την ανάπτυξή της με χρήση εξελιγμένων μεθόδων.

Στην Εικόνα 1 απεικονίζεται ο νοητικός χάρτης που διαμορφώθηκε από τη μελέτη της παρούσας διπλωματικής εργασίας επειτά από τη σχετική έρευνα. Η παρακολούθηση του οφθαλμού και των κινήσεων του βλέμματος βρίσκει αρκετές εφαρμογές στον τομέα της Υγείας. Η τεχνολογία καταγραφής και ιχνηλάτισης οφθαλμού αποκτά διαφορετική οπτική, όσον αφορά τις βασικές αρχές της πρόληψης, διάγνωσης και θεραπείας. Με τη συμπεριφορική ανάλυση δίνεται η δυνατότητα πρόληψης και περιορισμού τυχόν επιβλαβών συμπεριφορών για την υγεία του χρήστη-ασθενή. Επίσης, με τα κατάλληλα επιπρόσθετα εργαλεία, είναι δυνατόν να επιτευχθεί και η θεραπεία του ασθενούς, ανάλογα με τη σοβαρότητα της ασθένειας και την επεκτασιμότητα της.

Τα ζητήματα που προκύπτουν από την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης βλέμματος περιλαμβάνουν τη χρήση του κατάλληλου υλικοτεχνικού εξοπλισμού, την υλοποίηση και την εφαρμογή αποδοτικών αλγορίθμων ανίχνευσης των επιθυμητών χαρακτηριστικών μελέτης για την υλοποίηση του συστήματος και την συνολική καταγραφή της εμπειρίας του χρήστη όσον αφορά τη χρήση του συστήματος. Οι τρεις άξονες μελέτης είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι μεταξύ τους, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.



Σχήμα 1: Ο νοητικός χάρτης της ιχνηλάτισης των οφθαλμών στον τομέα της Υγείας

Ένα σύστημα παρακολούθησης των οφθαλμών είναι ένα πολύπλοκο σύστημα που αποτελείται από φυσικές συσκευές, όπως μία απλή κάμερα καταγραφής των οφθαλμών, αισθητήρες δραστηριότητας εγκεφάλου, αισθητήρες κίνησης κεφαλής, ειδικούς φακούς επαφής κ.λπ. καθώς και τους αλγόριθμους ανάλυσης σήματος. Η εικόνα ή το καρέ εικόνων που καταγράφει χρησιμοποιείται ως μεταβλητή εισόδου στο σύστημα λογισμικού ανίχνευσης του οφθαλμού. Η μη επεμβατική και απλή χρήση της κάμερας για την καταγραφή αυξάνει την συνολική εμπειρία του χρήστη, ως προς την χρήση του συστήματος.

Οι αλγόριθμοι παρακολούθησης περιλαμβάνουν συνήθως την ανίχνευση της περιοχής των οφθαλμών, την ανίχνευση της θέσης της κόρης των οφθαλμών, και της αποδοτικής αξιολόγησης των αλγορίθμων τους. Η απόδοση των αλγορίθμων εξαρτάται από την ποιότητα της λήψης της εικόνας, δηλαδή από τον παράγοντα εισόδου της κάμερας. Επιπλέον, η υπολογιστική ισχύς του επεξεργαστή επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τελική απόδοση του αλγορίθμου. Παράλληλα, η ακρίβεια των αλγορίθμων χωρίς τη χρήση επιπρόσθετων υλικών έχει αναπτυχθεί, λόγω της ένταξης και της συνεχούς εξέλιξης των τεχνολογιών μηχανικής μάθησης.

Η καταγραφή της εμπειρίας του χρήστη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από τους δύο παραπάνω παράγοντες, καθώς η χρήση απλών συσκευών και η απόδοση των αλγορίθμων δημιουργούν πιο ευχάριστη εμπειρία για το χρήστη.

Ωστόσο, το θεμελιώδες πρόβλημα είναι ο συνδυασμός του ακριβή εντοπισμού της θέσης του βλέμματος, με τη βοήθεια προηγμένων και απαιτητικών αλγορίθμων σε καθημερινές φορητές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Την τελευταία δεκαετία, αν και έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την ανίχνευση του οφθαλμού και την παρακολούθηση της θέσης του βλέμματος, παρόλα αυτά η ακριβής απόδοση παρακολούθησης του βλέμματος καθίσταται αρκετά απαιτητική.



Σχήμα 2: Αλληλοεξάρτηση της τεχνολογίας της παρακολούθησης των οφθαλμών

2.2.1 Υλικοτεχνικός εξοπλισμός

Η υλοποίηση των εφαρμογών επικεντρώθηκαν κατά κύριο λόγο σε σταθερούς επιτραπέζιους υπολογιστές ή έξυπνες φορητές συσκευές με τη χρήση απλής κάμερας, είτε σε συνδιασμό υλικοτεχνικού εξοπλισμού με τη χρήση εξειδικευμένων γυαλιών με ενσωματωμένη κάμερα προηγμένης τεχνολογίας για τον προσδιορισμό της θέσης του βλέμματος του χρήστη και την αλληλεπίδραση του ανθρώπου με τον υπολογιστή. Η χρήση των εξελιγμένων μοντέλων έχει στοχεύσει στη βελτίωση της οδήγησης [14], σε δεδομένα της αγοραστικής συμπεριφοράς των καταναλωτών, στην οπτομετρία και στην ιατρική διάγνωση ασθενειών, όπως η νόσος του Πάρκινσον και η διάγνωση συμπτωμάτων στραβισμού [18].

Οι εξειδικευμένες συσκευές παρακολούθησης βλέμματος επιτυγχάνουν υψηλότερα ποσοστά ακρίβειας, ωστόσο η χρήση τους είναι δυσχερής και άβολη για τον χρήστη. Επιπλέον, η πρόσβαση σε αυτές είναι περιορισμένη για, κυρίως, οικονομικούς λόγους με απαιτητικές διεργασίες επεξεργασίας βίντεο, που απαιτούν ογκώδη βοηθητικό εξοπλισμό. Η χρήση καθημερινών έξυπνων φορητών συσκευών αποτελεί θεμελιακό στόχο της έρευνας, καθώς βελτιώνει την εμπειρία χρήσης των εφαρμογών για το χρήστη και είναι πιο προσιτή και εύχρηστη για τον μέσο χρήστη-ασθενή.

Ένα σύστημα παρακολούθησης και ιχνηλάρισης του οφθαλμού μπορεί να φαίνεται απλό ως προς τη δομή του, αλλά είναι αρκετά περίπλοκο ως προς την ολοκληρωμένη και αποτελεσματική επίτευξη της λειτουργικότητας του. Ένα βασικό σύστημα παρακολούθησης και επεξεργασίας οφθαλμού αποτελείται κυρίως από:

- μια κάμερα για τη λήψη εικόνων
- έναν επεξεργαστή
- το λογισμικό και τη μνήμη του επεξεργαστή

Η συλλογή των δεδομένων παρακολούθησης γίνεται μη επεμβατικά και περιλαμβάνει μία κάμερα και μία φωτεινή πηγή που κατευθύνεται προς το μάτι. Με αυτό τον τρόπο, η κάμερα έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί την κίνηση του ματιού και πιο συγκεκριμένα, την κόρη του οφθαλμού με τελικό στόχο την ανίχνευση, τόσο της περιστροφής και κατεύθυνσης του βλέμματος, όσο και τη συχνότητα του βλεφαρίσματος. Όλα τα δεδομένα που συλλέγονται συγκεντρώνονται σε ένα αρχείο που είναι συμβατό με το λογισμικό που θα εκτελεστεί η ανάλυση της παρακολούθησης οφθαλμών.

Η παρακολούθηση εκτελείται με τη χρήση είτε:

- απομακρυσμένης κάμερας παρακολούθησης -eye-tracker σε κινητή συσκευή ή λάπτοπ
- από κάμερα σε φορητές συσκευές, τοποθετημένη στο κεφάλι του χρήστη και είναι συνδεδεμένη με ένα σύστημα για την αποθήκευση και την επεξεργασία των δεδομένων.

Οι κάμερες είναι ευαίσθητες και επηρεάζονται από τους παράγοντες φωτεινότητας, της απόστασης και της γωνίας κλίσης των σημείων ανίχνευσης του υποκειμένου, γι' αυτό το λόγο η πολύπλευρη μελέτη για την ακριβή παρακολούθηση του βλέμματος αναγεννά αρκετές προκλήσεις με ιδιαίτερες απαιτήσεις.

Οι κάμερες μπορεί να είναι απλές ή εξειδικευμένες με χρήση υπέρυθρων ή ευαίσθητων αισθητήρων [35], για την λήψη καλύτερης ποιότητας της εικόνας του οφθαλμού και την αξιοποίηση της από κατάλληλους αλγόριθμους. Πολλές μελέτες χρησιμοποιούν προηγμένο εξοπλισμό με κάμερες υπέρυθρης ακτινοβολίας και με χρήση υψηλών μοντέλων εκτίμησης της θέσης του βλέμματος, τόσο για επιτραπέζιους υπολογιστές, όσο και για φορητές συσκευές [16].

Το υλικό εξοπλισμού αποτελείται συνήθως από μια κάμερα υψηλής ποιότητας για τη λήψη εικόνων της κόρης του οφθαλμού και την παροχή του απαραίτητου φωτισμού. Ωστόσο, ένα ιδανικό σύστημα ανίχνευσης και παρακολούθησης του οφθαλμού δε θα απαιτούσε επιπλέον υλικό, πέρα από την ενσωματωμένη κάμερα μιας φορητής συσκευής καθημερινής χρήσης, για την επίτευξη καλύτερης εμπειρίας του χρήστη.

2.2.2 Λογισμικό και αλγόριθμοι αναγνώρισης οφθαλμών

Το σύστημα ανίχνευση προσώπων είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την αυτόματη ανίχνευση προσώπων και επαληθεύει την ταυτότητα ενός ατόμου από μια ψηφιακή εικόνα ή ένα βίντεο. Γενικά, το πρόβλημα ανίχνευσης προσώπου και χαρακτηριστικών αποτελείται από δύο στάδια. Πρώτον, την ανίχνευση του προσώπου, δηλαδή την εύρεση του προσώπου στο πλαίσιο εικόνας και την ανάλυση της επιθυμητής περιοχής, που στην προκειμένη περίπτωση θεωρούνται οι οφθαλμοί.

Η ανάλυση δεδομένων της κίνησης της κόρης του οφθαλμού μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους. Η πιο συνήθης ανάλυση είναι αυτή της ανάλυσης της οπτικής διαδρομής των οφθαλμών, μέσω της ανίχνευσης της κόρης και της γωνίας κλίσης, σε μια διεπαφή, όπως μια οθόνη υπολογιστή ή κινητού.

Οι μέθοδοι ανίχνευσης του οφθαλμού, με τη βοήθεια συνδυασμού αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας, ακολουθούν συνήθως την παρακάτω διαδικασία που απεικονίζεται στην Εικόνα 3. Με τη διαδικασία λήψης των δεδομένων λαμβάνεται μια ακολουθία καρέ εικόνων από τον αισθητήρα της κάμερας. Η βασική ακολουθία για την αναγνώριση της κόρης του ματιού έχει ως εξής. Αρχικά, γίνεται η ανίχνευση του προσώπου ενός ατόμου από το σύνολο των εικόνων, με τη βοήθεια αλγορίθμων εκτίμησης, κατάτμησης και ταξινόμησης των ουδέτερων χαρακτηριστικών του προσώπου και στη συνέχεια η ανίχνευση των οφθαλμών. Με τη χρήση εξειδικευμένων αλγορίθμων, ακολουθεί στη συνέχεια η ανίχνευση της κόρης του οφθαλμού για να επιτευχθεί η καταγραφή του βλέμματος.



Σχήμα 3: Η ροή της επεξεργασίας εικόνας ενός ανιχνευτή

Η τεχνολογική εξέλιξη στην ανάπτυξη αλγορίθμων για την παρακολούθηση των οφθαλμών σε έξυπνες συσκευές οδήγησε στη χρήση και στην υλοποίηση των συγκεκριμένων συστημάτων σε εφαρμογές εκτίμησης του βλέμματος. Ωστόσο η εφαρμογή των νέων τεχνολογιών περιορίζεται από συγκεκριμένους παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια ανίχνευσης και παρακολούθησης. Παράλληλα, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση είναι ιδιαίτερα απαιτητικοί με υψηλές απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύς, καθώς χρησιμοποιούν μοντέλα επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνας, μοντέλα μηχανικής και βαθιάς μάθησης.

Οι έρευνες που έχουν διεξαχθεί χρησιμοποιούν αλγόριθμους επεξεργασίας εικόνας με την αξιοποίηση μηχανικής μάθησης για την ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης και ιχνηλάτισης των οφθαλμών. Παρόλα αυτά, η ακρίβεια που επιτυγχάνεται είναι σχετικά χαμηλή, ιδιαίτερα σε χρήση καθημερινών καμερών χαμηλού κόστους. Παράλληλα, οι αλγόριθμοι που αναπτύσσονται είναι αρκετά πολύπλοκοι, με αποτέλεσμα τα συστήματα να αξιοποιούνται σε εργαστηριακό περιβάλλον. Μέχρι τώρα, ο αριθμός των μελετών για την ανίχνευση του οφθαλμού σε φορητές συσκευές σε πραγματικές συνθήκες είναι περιορισμένος.

Υπάρχουν αρκετοί αλγόριθμοι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της κόρης του οφθαλμού σε ερευνητικό επίπεδο. Η βασική διαδικασία που χρησιμοποιούν είναι, αρχικά, η επεξεργασία εικόνας για την ανίχνευση του προσώπου

και των οφθαλμών, έπειτα η ανίχνευση της κλίσης και γωνίας του κεφαλιού και η εύρεση του κέντρου του κάθε οφθαλμού, με τελικό στόχο την ανίχνευση της κόρης και κατά συνέπεια του βλέμματος.

Κάθε παρατήρηση δεδομένων του οφθαλμού μεταφράζεται σε ένα σύνολο συντεταγμένων εικονοστοιχείων [39]. Με τη βοήθεια των αλγορίθμων δίνεται η δυνατότητα να εξεταστεί η παρουσία ή η απουσία σημείων του βλέμματος των οφθαλμών σε διαφορετικές περιοχές οθόνης. Αυτός ο τύπος ανάλυσης χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την εμφάνιση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, τις παραμέτρους μέτρησης της οπτικής προσοχής, την ταχύτητα μετακίνησης του οφθαλμού στην οθόνη, το περιεχόμενο που παραβλέπεται και σχεδόν οποιαδήποτε παράμετρο σχετικά με το βλέμμα. Οι περισσότερες μελέτες βασίζονται σε ψηφιακή επεξεργασία εικόνων για την ανίχνευση του προσώπου και της κόρης του οφθαλμού με υλοποιήσεις σε αρκετές γλώσσες προγραμματισμού.

Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι οι αλγορίθμοι που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από τα παρακάτω βασικά στάδια [34]:

- Λήψη εικόνων από το βίντεο και μετατροπή τους σε επεξεργάσιμη μορφή (π.χ αποχρώσεις του γκρι)
- Ανίχνευση προσώπου
- Ανίχνευση της περιοχής των οφθαλμών με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων κατάτμησης, λαμβάνοντας υπόψιν τυχόν γεωμετρικούς παράγοντες (π.χ. γωνία κλίσης, θέση κεφαλιού κλπ.)
- Ανίχνευση της κόρης των οφθαλμών με χρήση ειδικών αλγορίθμων (με χρήση threshold, κατάτμησης κτλ.)

Γι' αυτό το λόγο ορίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν τυποποιημένες μεθοδολογίες για την ανάπτυξη και την αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων παρακολούθησης του βλέμματος και την ανίχνευση της θέσης του οφθαλμού, με σκοπό να επιταχυνθεί η συνέπεια των πειραμάτων και η συγκριτική αξιολόγηση [19]. Οι έρευνες δίνουν έμφαση στην βελτίωση της ακρίβειας και στην ελάττωση των φυσικών και των λειτουργικών περιορισμών.

Οι Li, Fu et al [31], υλοποίησαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα οφθαλμικής ιχνηλάτισης των οφθαλμών για κινητά τηλέφωνα, ονομαζόμενο Etracker, για την ανίχνευση του βλέμματος στην οθόνη του κινητού τηλεφώνου. Χρησιμοποίησαν αλγορίθμους συνελκτικής μάθησης ακολουθώντας τη διαδικασία αφαίρεσης των εικόνων, με σκοπό την πρόβλεψη της θέσης του βλέμματος. Όρισαν ένα γεωμετρικό μοντέλο για την ακριβή παρακολούθηση του ανθρώπινου βλέμματος, χρησιμοποιώντας ωστόσο μία αρχική μέτρηση για τη βαθμονόμηση του βλέμματος του χρήστη με στόχο την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας. Τα δεδομένα βλέμματος που συνέλεξαν από τις πειραματικές μελέτες και οι εφαρμογή του συνδιασμένου αλγορίθμου ανίχνευσης του βλέμματος πέτυχαν ακρίβεια 98%.

Οι Dementyev and Holz [20], χρησιμοποίησαν την τεχνολογία της παρακολούθησης του οφθαλμού για τη συνεχή παρακολούθηση, ανίχνευση και ιχνηλάτιση του βλεφαρίσματος των ματιών και την εξέταση της ξηροφθαλμίας στον υπολογιστή με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Η τεχνολογία που πρότειναν την ονόμασαν

Dualbink. Η συσκευή που χρησιμοποίησαν ήταν τα γυαλιά με ενσωματωμένη κάμερα επάνω τους. Επίσης, η συσκευή που χρησιμοποίησαν είναι μια φορητή συσκευή τεχνητής όρασης που σχεδιάστηκε για τη βοήθεια ατόμων με μερικά ή ολικά προβλήματα όρασης και με δυσκολία στην ανάγνωση. Η πρωτοποριακή κάμερα που μπορεί να ενσωματωθεί στα γυαλιά διαβάζει «φωναχτά» το κείμενο από ψηφιακή ή πραγματική επιφάνεια και έχει την ικανότητα να αναγνωρίσει πρόσωπα και αντικείμενα σε πραγματικό χρόνο.

Ειδικότερα, έχουν αναπτυχθεί ειδικές βιβλιοθήκες λογισμικού για την ενίσχυση της υλοποίησης συστημάτων παρακολούθησης, καταγραφής και ανίχνευσης της κόρης του οφθαλμού. Μερικές βιβλιοθήκες είναι ιδιαίτερα εύχρηστες για την υλοποίηση τους σε φορητές συσκευές.

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία η βιβλιοθήκη **Open Source Computer Vision Library (OpenCV)** [13], είναι μια βιβλιοθήκη ανοιχτού κώδικα που θεωρείται κατάλληλη και χρησιμοποιείται ευρέως για εφαρμογές που βασίζονται σε σθόνες υπολογιστών και φορητών συσκευών στον τομέα του Computer Vision. Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη κυκλοφόρησε το 2000, ωστόσο επειδή είναι αρκετά διαδεδομένη, διαθέτει αρκετές επικαιροποιημένες εκδόσεις και ενημερώνεται συνεχώς. Υποστηρίζει τα λειτουργικά συστήματα Windows, Linux, MacOS, Android και iOS, καθώς και τις γλώσσες προγραμματισμού C++, Python και Java.

Το **Cloud vision api** [12], είναι μια υπηρεσία ανάλυσης εικόνων που ανήκει στο Cloud Platform της Google. Δημιουργήθηκε τα τελευταία χρόνια για την ανάλυση εικόνας με χρήση των τεχνολογιών της τεχνητής νοημοσύνης και εφαρμογή ισχυρών μοντέλων μηχανικής μάθησης σε ένα εύχρηστο REST API. Με τη χρήση του συγκεκριμένου API παρέχεται η δυνατότητα γρήγορης και αποδοτικής ταξινόμησης προσώπων και αντικειμένων από εικόνες και καρέ βίντεο.

Η υπηρεσία **Firebase ML kit** αναπτύχθηκε από τη Google το 2018 και ανήκει στη γενική πλατφόρμα της Firebase με κύριο στόχο την υλοποίηση εφαρμογών με την υποστήριξη έξυπνων λειτουργιών και την αξιοποίηση εξελιγμένων αλγορίθμων [5]. Περιλαμβάνει τεχνολογίες ανίχνευσης προσώπου, αναγνώρισης κειμένου, ταξινόμησης αντικειμένων κ.α. Το API της ανίχνευσης προσώπου δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού των προσώπων από εικόνα που λαμβάνεται από κάμερα κινητού σε πραγματικό χρόνο και ο προσδιορισμός βασικών χαρακτηριστικών του προσώπου στα πρόσωπα που ανιχνεύονται. Ο συνδιασμός της εφαρμογής έξυπνων τεχνολογιών μηχανικής μάθησης για ανάπτυξη εφαρμογών σε κινητά τηλέφωνα χρησιμοποιεί Tensorflow Lite, Cloud Vision API και Android Neural Networks API και διευκολύνει την χρήση τους και την ενσωμάτωση στην εφαρμογή με λίγες γραμμές κώδικα μέσω ενός .

Το λογισμικό που απαιτείται για την παρακολούθηση του οφθαλμού πρέπει να έχει την ικανότητα να υποστηρίζει την έγκυρη εξαγωγή πληροφορίας και να μην είναι ιδιαίτερα απαιτητικό σε υπολογιστικό χρόνο και στην κατανάλωση ενέργειας, αφού θα χρησιμοποιείται από φορητές συσκευές με περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους και ενέργειας. Έπειτα από αναζήτηση στο Διαδίκτυο, καταγράφηκαν μερικά λογισμικά που αναπτύχθηκαν για την ανίχνευση, την ανάλυση της κόρης του οφθαλμού και σε διάφορες εφαρμογές που αναπτύχθηκαν στην τεχνολογία παρακολούθησης οφθαλμών. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα GazePointer [6], xLabs [11], Umoove Umoove, PUPIL [9], TurkerGaze [10] και ITU Gaze Tracker [8], που

είναι ελεύθερα λογισμικά ανοιχτού κώδικα.

Το λογισμικό εμπορικού σκοπού Umoove είναι ένα λογισμικό παρακολούθησης προσώπου και οφθαλμών, που έχει σχεδιαστεί ειδικά για περιβάλλοντα κινητής τηλεφωνίας. Η βασική του λειτουργία είναι η ερμηνεία και η μετατροπή των κινήσεων του προσώπου και των ματιών σε πολύτιμα δεδομένα, όπως η κατανόηση της κατάστασης των χρηστών και της ανίχνευσης πιθανών διαταραχών του εγκεφάλου. Στον τομέα της Υγείας, μπορούν να γίνουν αντιληπτά η κόπωση, εγκεφαλικά επεισόδια, ο αυτισμός, η νόσος του Πάρκινσον, καθώς επίσης βρίσκει εφαρμογές σε παιχνίδια, στην ασφάλεια της οδήγησης, στη διαφήμιση και σε φορετές συσκευές. Ένα από τα πλεονεκτήματα χρήσης του είναι η χαμηλή κατανάλωση πόρων και η μοναδική απαίτηση πρόσβασης της μπροστινής κάμερας. Είναι εξοπλισμένη με Face SDK, EyeMovement SDK και objectTracking SDK, τα οποία είναι διαθέσιμα για iOS και Android.

2.2.3 Εμπειρία του χρήστη και περιορισμοί

Προφανώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παρούσα μελέτη της παρακολούθησης του οφθαλμού προκύπτουν αρκετοί περιορισμοί. Οι παράγοντες κλειδί για τις συσκευές παρακολούθησης μεταξύ του εξοπλισμού και του στοιχείου στόχου (οφθαλμός) είναι η σχετική κίνηση τους και η γωνία της συσκευής σε σχέση με τους οφθαλμούς του χρήστη. Επιπλέον άλλος παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του μοντέλου είναι το μέγεθος της οθόνης όπου ποικίλλει στις έξυπνες συσκευές (έξυπνα κινητά τηλέφωνα, tablet, κ.ά.). Η χρήση καμερών με υψηλή ανάλυση για την ειδική ανίχνευση της κόρης του οφθαλμού αυξάνει αρκετά το κόστος των έξυπνων συσκευών με κάμερα, χωρίς βέβαια να εξασφαλίζεται παράλληλα και η επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας της ανίχνευσης. Η λήψη και η καταγραφή της εικόνας πιθανότατα θα είναι ποιοτική, ωστόσο η ανίχνευση και η παρακολούθηση της κόρης του οφθαλμού είναι πολυπαραγοντική και αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί με απόλυτη ακρίβεια.

Επιπρόσθετα, σημαντικό ρόλο κατέχει η μεγάλη ετερογένεια στην εμφάνιση των ανθρώπων, οι οποίοι διαφέρουν τόσο στο σχήμα του προσώπου, στη θέση των οφθαλμών, στο χρώμα του δέρματος κλπ. Ακόμη, η ανίχνευση της κόρης του οφθαλμού εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της θέσης της κάμερας και του χρήστη, όπως για παράδειγμα τη γωνία λήψης της κάμερας, τη θέση του κεφαλιού, την αντανάκλαση κ.α. Οι συσκευές με κάμερα που δεν είναι διακριτικές αλλά δύσχρηστες προκαλούν δυσφορία και ενόχληση στο χρήστη-ασθενή, με αποτέλεσμα, είτε να μην τις χρησιμοποιεί τόσο συχνά, είτε να μην συμπεριφέρεται «φυσιολογικά». Τέλος, κρίνεται μεγάλης σημασίας τα δεδομένα που λαμβάνονται να προέρχονται από συνεχή παρακολούθηση και για μεγάλο χρονικό διάστημα έτσι ώστε να θεωρούνται αξιόπιστα. Κάτι τέτοιο, πιθανότατα είναι αποθαρρυντικό για τους χρήστες-ασθενείς, ιδιαίτερα όταν ο εξοπλισμός είναι επιβαρυντικός, ως προς τη χρήση της εφαρμογής για την αξιοποίηση του συστήματος.

Για τη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη - ασθενή ο στόχος αρχικά, είναι η χρήση συσκευών με απλή κάμερα, οι οποίες είναι διακριτικές και φιλικές για τον χρήστη, με σκοπό την ενσωμάτωση των συσκευών στην καθημερινή ζωή τους, λειτουργώντας, παράλληλα με φυσιολογικό τρόπο. Γι' αυτό το λόγο, η επέκταση

αυτού του είδους της τεχνολογίας σε φορητές συσκευές και στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) αποτελεί βασικό στόχο για την προώθηση της τεχνολογίας ιχνηλάτισης οφθαλμού [16].

Οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής κινούνται σε επίπεδο εξοπλισμού και λειτουργικού συστήματος και είναι συνεχώς εξελισσόμενες. Το ενδιαφέρον πολλών κλάδων, όπως της διαφήμισης, της Υγείας κ.ά., τόσο για οικονομικούς λόγους, όσο και για την βελτίωση του τρόπου ζωής, έχει στοχεύσει στην εφαρμογή της παρακολούθησης του βλέμματος και της οπτικής προσοχής για την καταγραφή δεδομένων και την ανάλυση τους. Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία στον τομέα της Υγείας, εξάγονται συμπεράσματα για τον ασθενή που παρακολουθείται και χρησιμεύουν στην μελέτη της κατάστασης του, στην κατανόηση του προβλήματος και την εύρεση πιθανής θεραπείας και κατ' επέκταση στην βελτίωση της υγείας του.

Επιπλέον είναι χρήσιμο και σκόπιμο να αναφερθεί με τη χρήση των συγκεκριμένων συστημάτων ανάλογα με την μελέτη περίπτωσης κάθε φορά, σε συνδυασμό με άλλους αισθητήρες, όπως οι αισθητήρες μέτρησης του αναπνευστικού, της καρδιάς, τη συσκευή κεφαλής ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (HEG) κ.α. βελτιώνει την εξαγωγή αποτελέσματος με μεγαλύτερη ακρίβεια και την συνολική απόδοση της μελέτης. Δυστυχώς ωστόσο, σε περίπτωση μελέτης πληθυσμών με ασθένεια, είναι πιθανό, οι χρήστες να είναι αρνητικοί ως προς την χρήση τέτοιου είδους συσκευών που θα επιβαρύνουν την καθημερινότητα τους.

2.3 Μέτρηση της οπτικής προσοχής στην υγεία

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η εφαρμογή προηγμένων τεχνικών στον τομέα της Υγείας βελτιώνει την απόδοση και την ποιότητα παραδοσιακών ιατρικών διαδικασιών και θεραπειών. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών καταγραφής των οφθαλμικών κινήσεων βοηθά στην κατανόηση της λειτουργίας ανθρώπινων δραστηριοτήτων και του νου. Οι μέθοδοι για την λήψη και την επεξεργασία εικόνων του οφθαλμού προσφέρει τη δυνατότητα διάγνωσης δυσλειτουργιών στην οφθαλμική λειτουργία, καθώς και στην ευρύτερη γνώση με επίκεντρο τα συναισθήματα και τις προθέσεις των ανθρώπων.

Τα συστήματα καταγραφής των οφθαλμών έχουν στενή σχέση με τους μηχανισμούς προσοχής και χρησιμοποιούνται στον τομέα της Υγείας για την αποκωδικοποίηση των οπτικών πληροφοριών. Η αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών οδήγησε στην ανάπτυξη συστημάτων υποβοήθειας χρηστών - ασθενών στον τομέα της Υγείας, σε συστήματα έγκαιρης διάγνωση ασθενειών στην ψυχιατρική και ιδιαίτερα, για διανοητικά νοσήματα που σχετίζονται με το κεντρικό νευρικό σύστημα, την ψυχολογική ανάλυση με τη μέτρηση της οπτικής προσοχής σε συγκεκριμένες πληθυσμιακές ομάδες, καθώς και σε γενικότερες εφαρμογές για την βελτίωση της ποιότητας της καθημερινής ζωής των χρηστών [26]. Επιπλέον, γίνονται αναφορές σε εφαρμογές για τη συμπεριφορική προσέγγιση των ασθενών, τα μέσα πρόληψης, διάγνωσης και αξιολόγησης της θεραπείας και της βελτίωσης της ιατρικής εκπαίδευσης στους τομείς της οφθαλμολογίας, της νευρολογίας, της νευροφυσιολογίας, της ψυχοφυσικής και της φαρμακολογίας [37].

2.3.1 Γενικές εφαρμογές στην υγεία

Η ανίχνευση οφθαλμών και η παρακολούθηση του βλέμματος στον κλάδο της Υγείας για την οφθαλμική ιχνηλάτιση, με τη χρήση αισθητήρων, αναφέρεται στις μετρήσεις και στην παρακολούθηση της δραστηριότητας του οφθαλμού σε φυσιολογικές συνθήκες των χρηστών, καθώς και στην παρακολούθηση τους σε παθολογικές καταστάσεις ή σε ψυχικές διαταραχές των ασθενών.

Ο συνδυασμός των νέων τεχνολογιών ιχνηλάτισης της δραστηριότητας του οφθαλμού με άλλες τεχνολογίες, παρέχει τη δυνατότητα πρώιμης διάγνωσης αρκετών ασθενειών, καθώς φυσικά και της λεπτομερούς μελέτης τους με διαφορετική προσέγγιση. Η παρακολούθηση του βλέμματος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την βελτίωση της μελέτης και τη διάγνωση μεγαλύτερου αριθμού ψυχικών διαταραχών, αλλά και παθολογικών καταστάσεων. Επιπλέον, η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας έχει διερευνηθεί για τη δραστηριότητα της οδήγησης και της μέτρησης της οπτικής προσοχής του οδηγού σε φυσιολογική κατάσταση και σε κατάσταση κόπωσης, με στόχο την αξιολόγηση της οδηγικής συμπεριφοράς και την ανάπτυξη συστημάτων υποβοήθειας και βελτίωσης της ασφάλειας της οδήγησης [41].

Παρατηρούμε, ότι η παρακολούθηση του οφθαλμού και του βλέμματος πιο συγκεκριμένα, είναι στενά συνδεδεμένη με τις συσκευές hardware από τις οποίες γίνεται η λήψη των εικόνων για την μετέπειτα επεξεργασία τους. Συνδυαστικά, η επεξεργασία τους αναλαμβάνεται από ειδικά λογισμικά επεξεργασίας εικόνων για την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Τα συγκεκριμένα λογισμικά είναι εξειδικευμένα για την καταγραφή της δραστηριότητας του οφθαλμού και χρησιμοποιούν ειδικούς αλγόριθμους.

Σε κάθε μελέτη περίπτωσης, η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι διαφορετική, έτσι είναι ιδιαίτερα σκόπιμο να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με επιπρόσθετες μεθόδους που θα συντελέσουν στην εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων, όπως το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα ή η γενικότερη μελέτη της οπτικής προσοχής.

Οι χαρακτηριστικές οφθαλμικές κινήσεις και οι παράμετροι των οφθαλμικών κινήσεων χρησιμοποιούνται σε συστήματα στατικών διεπαφών ανθρώπου - υπολογιστή και ανθρώπου-ρομπότ, όπως το παράδειγμα ελέγχου ηλεκτρικής αναπηρικής καρέκλας από σήματα που λαμβάνονται από ηλεκτροοφθαλμογραφία (EOG) [17]. Τα συγκεκριμένα συστήματα απευθύνονται σε άτομα με σωματική αναπηρία με περιορισμένη κινητικότητα, αλλά διατηρούν τον συντονισμό των οφθαλμικών κινήσεων.

Οι ερευνητικές μελέτες έχουν αποδείξει την εφαρμογή και την αξιοποίηση της τεχνολογίας παρακολούθησης των οφθαλμών στον τομέα της Υγείας. Οι μελέτες διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο προσέγγισης του προβλήματος και της χρήσης των πειραματικών παραδειγμάτων. Οι πληροφορίες που εξάγονται είναι χρήσιμες για την διάγνωση ανωμαλιών στη λειτουργία των οφθαλμών και άλλων παθολογικών καταστάσεων, δρομολογώντας την κατάλληλη θεραπεία. Επιπλέον, παρέχονται γνωστικές πληροφορίες που επικεντρώνονται στην απόκτηση γνώσης σχετικά με τα συναισθήματα, τις προθέσεις των ανθρώπων και των τρόπου που χρησιμοποιούν τις δεξιότητές τους.

2.3.2 Διάγνωση

Η ανάλυση της κίνησης των οφθαλμών έχει εφαρμογές στη διάγνωση διαφορετικών ασθενειών λειτουργώντας συνδιαστικά με άλλες συμβατικές μεθόδους έρευνας ή βιομετρικούς αισθητήρες. Σχετικές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στη διάγνωση της σχιζοφρένειας [30], οδηγώντας σε σχετικές ενδείξεις διάγνωσης αρκετών ψυχικών ασθενειών με τον κατάλληλο σχεδιασμό του πειράματος παρακολούθησης των οφθαλμών. Η διάγνωση ψυχικών διαταραχών μέσω συστημάτων ανίχνευσης οφθαλμών και ανάλυσης της οπτικής προσοχής περιλαμβάνουν τη διπολική διαταραχή [24], την ήπια γνωστική εξασθένηση [45], τη νόσο του Alzheimer [29], τη σκλήρυνση κατά πλάκας [21], τη διαταραχή του αυτισμού (ASD) [43], τη νόσο του Parkinson [42], τη Διαταραχή Ελλειμματικής Προσοχής και Υπερκινητικότητα (ADHD) [42], τη ψυχαναγκαστική διαταραχή (OCD) και τις ψυχώσεις [23]. Ακόμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση υπνηλίας σε πληθυσμιακές ομάδες ακολουθώντας και συγκρίνοντας συγκεκριμένα μοτίβα οφθαλμικών κινήσεων και παρατηρήσεων.

Για παράδειγμα, τα μοτίβα της ανθρώπινης οφθαλμικής κίνησης των φυσιολογικών ενηλίκων εμφανίζουν ομοιότητες όταν κοιτάζουν ανθρώπινα πρόσωπα με επικέντρωση κυρίως στα μάτια, στη μύτη και στο στόμα ενώ τα άτομα με αυτισμό αφιερώνουν λιγότερο χρόνο στην εξέταση αυτών των βασικών χαρακτηριστικών. Συνεπώς, με την ανάλυση των συγκεκριμένων οφθαλμικών κινήσεων να δημιουργηθούν επικυρωμένοι δείκτες συμπεριφοράς για τη διάγνωση των ασθενειών και πιθανών διαταραχών. Παρόμοια μοτίβα χαρακτηριστικών οφθαλμικών κινήσεων παρουσιάζουν τα άτομα με δυσλεξία σε μελέτες που έχουν διεξαχθεί όσον αφορά την ανάγνωση κειμένων και τη γενική ολοκλήρωση οπτικών καθηκόντων [36].

Στην Οφθαλμολογία [37] διεξάγονται μελέτες όρασης στην οθόνη για ιατρικές έρευνες και για τη διερεύνηση οφθαλμικών παθήσεων. Το αποτέλεσμα αυτής της μελέτης βοηθά στην κατανόηση του ανθρώπινου οφθαλμού και της όρασης καθώς επίσης, στην ανάπτυξη καινοτόμων προσεγγίσεων για τη διάγνωση της νόσου. Οι εφαρμογές της ανίχνευσης της παρακολούθησης του οφθαλμού στην οφθαλμολογία είναι η περιμετρία, ο έλεγχος της όρασης, η διάγνωση του στραβισμού, ο εκφυλισμός της ωχράς κηλίδας που σχετίζεται με την ηλικία κ.α.

2.3.3 Θεραπεία

Η παρακολούθηση των οφθαλμών και η ανάλυση της οπτικής προσοχής ενώ έχει ερευνηθεί σε πολυάριθμες μελέτες όσον αφορά τη διάγνωση διαφόρων ασθενειών, υπάρχουν λίγες μελέτες που ασχολούνται με τη θεραπεία, πιθανώς λόγω της πολυπλοκότητας ενός ολοκληρωμένου συστήματος και της δύσχρηστης και υψηλού κόστους εφαρμογής του ανίχνευτή των οφθαλμών με εξειδικευμένο εξοπλισμό.

Η έρευνα για τη βελτίωση της ποιότητας των ατόμων με ειδικές ανάγκες υπόκειται στην θεραπεία υπό την ευρεία έννοια χρήσης του όρου. Κατά κύριο λόγο κινήθηκε στην περιοχή των ανθρώπων με σοβαρές κινητικές αναπηρίες ή επικοινωνιακές δυσλειτουργίες με σκοπό την σχετική αυτονομία του υποκειμένου με αποτελεσματική επικοινωνία και αλληλεπίδραση με το περιβάλλον με τη βοήθεια των οφθαλμικών κινήσεων. Οι απλές διεπαφές που υλοποιήθηκαν έδωσαν στους

χρήστες τη δυνατότητα να απαντούν σε απλές ερωτήσεις κλειστού τύπου (ναι / όχι) με τη μετακίνηση των οφθαλμών επάνω / κάτω, αριστερά / δεξιά. Μερικές πιο εξελιγμένες διεπαφές προσφέρουν τη δυνατότητα σύνταξης ολόκληρης λέξης με τα γράμματα που εμφανίζονται στην οθόνη [38]. Ακόμη, η μέθοδος παρακολούθησης των οφθαλμών και ανάλυσης του βλέμματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά το σχεδιασμό στρατηγικών επαγγελματικής και εναλλακτικής επικοινωνίας για άτομα με αυτισμό, καθώς έχουν εξασθενημένες επικοινωνιακές και γλωσσικές ικανότητες [25].

Η χρήση της τεχνολογίας της παρακολούθησης των οφθαλμών βοηθά άμεσα στη μη επεμβατική θεραπεία στον καρκίνο των οφθαλμών κατά τη διάρκεια ακτινοθεραπείας, καθώς ο ανιχνευτής του οφθαλμού και ο οφθαλμικός ιχνηλάτης είναι ικανός να εντοπίσει έναν όγκο για να συγκεντρωθεί η ακτινοβολία σε αυτόν [44].

Επιπλέον, αρκετές εφαρμογές που συνδυάζουν "οπτικά παιχνίδια" χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια των θεραπειών με παιδιά με αναπηρία που ακολουθούν θεραπεία διέγερσης της όρασης σε συγκεκριμένες καταστάσεις ασθενειών που έχουν υποβληθεί σε χειρουργική ή φαρμακευτική θεραπεία. Με τη συγκεκριμένη προσέγγιση τα παιδιά υποβάλλονται σε εντατικές ασκήσεις που σχετίζονται με την όραση και έχουν τη δυνατότητα να αναπτύξουν νέες οπτικές δεξιότητες. Συνεπώς, με τη χρήση της παρακολούθησης των οφθαλμών με διαδραστική εφαρμογή μπορεί να βελτιώσει τη συνολική διαδικασία που θεωρείται ανιαρή για τα παιδιά με στόχο την επίτευξη της θεραπείας [27]. Τα "οπτικά παιχνίδια" υπέβαλλαν τους χρήστες / παιδιά στην ολοκλήρωση οπτικών καθηκόντων που περιελάμβαναν την εύρεση αντικειμένων με συγκεκριμένο χρώμα ή γεωμετρικά σχήματα που αφού ολοκληρωνόταν ή εύρεση είτε πατούσαν ένα κουμπί ενεργοποίησης ή το μετακινούσαν στην οθόνη στη σωστή θέση με τη χρήση των οφθαλμών. Με τη συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων μεταξύ παιδιών με φυσιολογική όραση και παιδιών με σημαντικά προβλήματα όρασης αποδείχτηκε ότι η επίτευξη των οπτικών δραστηριοτήτων ενώ ολοκληρώθηκε και από τις δύο ομάδες, ήταν πιο γρήγορη στα παιδιά με φυσιολογική όραση.

Παρόμοια πειράματα με τη χρήση "οπτικών παιχνιδιών" παρουσιάστηκαν για τη συμπεριφορική θεραπεία παιδιών με Διαταραχή Ελλειμματικής Προσοχής και Υπερκινητικότητας, με στόχο τη βελτίωση της εστίασης, την οπτική και ακουστική προσοχή, την συγκέντρωση και την μάθηση [15].

Ο στόχος των περισσότερων συστημάτων υποβοήθειας των ασθενών είναι η εξοικείωση της χρήσης των εφαρμογών με τη χρήση συσκευών, ακόμα και στο σπίτι, για την καλύτερη διάγνωση και θεραπεία των διαταραχών.

Είναι άξιο να αναφερθεί, ότι πολλές πιθανές εφαρμογές παρακολούθησης των οφθαλμών στον κλάδο της Υγείας δεν έχουν διερευνηθεί ακόμα και πρόκειται για μια πολλά υποσχόμενη προοπτική κατεύθυνση της έρευνας.

2.3.4 Ιατρική Εκπαίδευση

Στο τομέα της Νευροεπιστήμης και της Ψυχολογίας, η παρακολούθηση του οφθαλμού παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις επιδόσεις ανάγνωσης, την επεξεργασία κειμένου και την επηρροή της ανάγνωσης κειμένου με συναισθηματικό περιεχόμενο. Οι πληροφορίες που παρέχονται από την οπτική προσοχή και την παρακολούθηση

των οφθαλμών είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την ανάλυση των δεδομένων και τη δημιουργία προτύπων σε σχέση με τις οφθαλμικές δραστηριότητες, σε συνδυασμό με τη μνήμη [40].

Στον τομέα της Ψυχολογίας, οι ερευνητές μπορούν να μετρήσουν και να συσχετίσουν την οπτική προσοχή με επιπλέον παραμέτρους, για να μελετήσουν τη λειτουργία του εγκεφάλου. Η έρευνα στην οπτική προσοχή μπορεί να εφαρμοστεί σε φυσιολογικούς πληθυσμούς και σε συγκεκριμένα υποκείμενα που έχουν διαφορετικά πρότυπα συμπεριφοράς ή διαφορετικό είδος ψυχικών διαταραχών για τη συγκριτική μελέτη τους.

Με τη μελέτη της προλεγόμενης τεχνολογίας θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει ένα πρώτο βήμα για την τη δημιουργία ενός εξελιγμένου συστήματος παρακολούθησης του βλέμματος με τη χρήση της μπροστινής κάμερας από έξυπνο κινητό τηλέφωνο. Για την αποδοτική υλοποίηση έγινε χρήση των αξιόπιστων αλγορίθμων ανίχνευσης και παρακολούθησης, προσφέροντας παράλληλα ευχαριστή εμπειρία στο χρήστη. Σε αυτά τα πλαίσια έγινε η υλοποίηση μιας εφαρμογής σε συσκευές με λογισμικό Android για την ανίχνευση οφθαλμών, της παρακολούθησης του βλέμματος και της καταγραφής του βλεφαρίσματος από έξυπνο κινητό τηλέφωνο, με τη χρήση εξελιγμένων έξυπνων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αποτελεί μια ευέλικτη λύση για τη δυναμική παρακολούθηση του οφθαλμού από την κάμερα σε πραγματικό χρόνο.

3 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία και η ανάπτυξη της πρακτικής εφαρμογής της παρούσας διπλωματικής εργασίας βασίστηκε στη βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Ο συνδιασμός της καταγραφής των οφθαλμικών κινήσεων με την ανίχνευση και παρακολούθηση του βλέμματος για τη μέτρηση της οπτικής προσοχής του χρήστη, ενσωματώθηκε σε μία εφαρμογή (EyeTrackerDemo) για την οφθαλμική ιχνηλάτιση που αναπτύχθηκε για κινητά τηλέφωνα Android με τη χρήση της μπροστινής κάμερας.

Αρχικά, η διαδικασία υλοποίησης της εφαρμογής που ανιχνεύει βασικές παραμέτρους μέτρησης της οπτικής προσοχής, όπως η θέση του βλέμματος στην οθόνη και η συχνότητα του βλεφαρίσματος αποτέλεσαν βασικό άξονα της διαδικασίας με σκοπό τη συλλογή δεδομένων από ανθρώπους-υποκείμενα. Η ανάπτυξη της εφαρμογής υλοποιήθηκε με τη χρήση σύγχρονων ερευνητικών εργαλείων και βιβλιοθηκών εντοπισμού των οφθαλμών.

Στη συνέχεια, η εφαρμογή του κινητού τηλεφώνου Android δοκιμάστηκε σε ανθρώπινα υποκείμενα για το σκοπό της έρευνας και της συλλογής δεδομένων με τη χρήση ενός απλού τηλεφώνου και της μπροστινής κάμερας του κινητού.

Η ταξινόμηση των δεδομένων και η εξαγωγή των συμπερασμάτων επετεύχθει με τη βοήθεια υπολογιστικών διεργασιών με τις μεθόδους ταξινόμησης και τη χρήση βιβλιοθηκών οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων, τόσο για την κατηγοριοποίηση της θέσης του βλέμματος, όσο και για τη μέτρηση της οπτικής προσοχής.

3.1 Ερευνητικά εργαλεία

Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από μία εφαρμογή υλοποιημένη σε Android Studio για τον εντοπισμό των οφθαλμών και την ανίχνευση και παρακολούθηση της θέσης του βλέμματος στην οθόνη, καθώς και την καταγραφή των βλεφαρισμάτων σε πραγματικό χρόνο. Ο υλικοτεχνικός εξοπλισμός αποτελείται από ένα απλό κινητό τηλέφωνο και τη χρήση της μπροστινής κάμερας.

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε αποτελείται από τη διαδικασία ενσωμάτωσης έξυπνων αλγορίθμων ανίχνευσης προσώπου από τη μπροστινή κάμερα του κινητού, την ανίχνευση και καταγραφή των εντοπισμένων επιθυμητών σημείων του προσώπου με σκοπό τη συλλογή δεδομένων, την κατηγοριοποίηση και την ταξινόμηση των σημείων καταγραφής και την τελική οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

3.1.1 Βιβλιοθήκες Ανίχνευσης προσώπου

Οι τεχνικές ανίχνευσης των οφθαλμών για τη μέτρηση της οπτικής προσοχής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση υπάρχουσων βιβλιοθηκών που έχουν τη δυνατότητα να ενσωματωθούν στην πλατφόρμα του Android Studio. Η χρήση αυτών των εφαρμογών σε μια κινητή συσκευή έχει το πλεονέκτημα ότι το λειτουργικό σύστημα Android Studio είναι δωρεάν και παράλληλα, δίνει τη δυνατότητα της χρήσης εξελιγμένων βιβλιοθηκών για την ανίχνευση του προσώπου.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν διάφορες βιβλιοθήκες αναγνώρισης προσώπου όπως

OpenCV, Google Cloud Vision API και Firebase ML kit και δοκιμάστηκαν οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι ανίχνευσης βλέμματος.

OpenCV

Η βιβλιοθήκη OpenCV (Open Source Computer Vision [13], είναι από τις πιο χρήσιμες βιβλιοθήκες για την επεξεργασία εικόνας και την παρακολούθηση της κόρης του οφθαλμού, ιδιαίτερα σε φορητές συσκευές, όπως τα κινητά τηλέφωνα και τα tablet.

Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη, αφού ενσωματωθεί επιτυχώς στο περιβάλλον του Android Studio, έχει τη δυνατότητα του εντοπισμού και της ανίχνευσης του προσώπου από καρτέ εικόνων σε πραγματικό χρόνο. Ο εντοπισμός των επιθυμητών στοιχείων επιτυγχάνεται με τον αλγόριθμο ανίχνευσης προσώπου και του ταξινομητή Haar που είναι βασισμένος σε χαρακτηριστικά του προσώπου σε διαδοχική μορφή.

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί ως είσοδο ένα πλαίσιο λήψης εικόνας από την κάμερα του κινητού τηλεφώνου Android. Έπειτα, τα πλαίσια εικόνας RGB μετατρέπονται σε πλαίσια εικόνας στην κλίμακα απόχρωσης του γκρι για να χρησιμοποιείται μόνο ο παράγοντας της φωτεινότητας με σκοπό την αναζήτηση διαφορετικών χαρακτηριστικών του προσώπου (π.χ φρύδια, μάτια, στόμα).

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εντοπίζει γρήγορα και αποδοτικά τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, αλλά η υλοποίηση ήταν υπολογιστικά δαπανηρή για την ανίχνευση χαρακτηριστικών με μεγαλύτερη λεπτομέρεια (θέση του βλέμματος - κόρη οφθαλμού). Έτσι, ενώ ο εντοπισμός του προσώπου και των οφθαλμών επιτυγχάνεται με σχετική ακρίβεια, τα αποτελέσματα δεν ήταν αισιόδοξα για την ανίχνευση του βλέμματος με την ίδια ακρίβεια σε σχέση με τις υπόλοιπες βιβλιοθήκες. Η επιπλέον επεξεργασία εικόνας για την επιτυχή ανίχνευση του βλέμματος ήταν υπολογιστικά απαιτητική, χωρίς να αυξάνει τα επίπεδα της απόδοσης και της ακρίβειας ανίχνευσης του βλέμματος.

Για αυτό το λόγο η χρήση της βιβλιοθήκης OpenCV παρότι δοκιμάστηκε, δεν αξιοποιήθηκε για την τελική υλοποίηση της εφαρμογής λόγω της χαμηλότερης απόδοσης ανίχνευσης ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με οπτικό θόρυβο της εικόνας, της παρωχημένης χρήσης της και της δυσχρηστίας της σε επίπεδο εφαρμογής.

Cloud vision API

Το Cloud vision api [12], που χρησιμοποιείται για την ανάλυση εικόνων δοκιμάστηκε για την υλοποίηση της προτεινόμενης εφαρμογής.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από τη συγκεκριμένη υπηρεσία βασίζονται στη μηχανική μάθηση και υποστηρίζονται από πλαίσια ανάπτυξης λογισμικού όπως το Tensorflow. Με αυτό τον τρόπο οι προγραμματιστές έχουν τη δυνατότητα να υλοποιούν εξελιγμένα μοντέλα computer vision και ενσωμάτωσης ισχυρών μοντέλων μηχανικής μάθησης με την εύκολη χρήση ενός REST API.

Οι αλγόριθμοι του Cloud vision έχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης προσώπων σε συνδυασμό με τον εντοπισμό των βασικών χαρακτηριστικών. Επιπρόσθετα διαθέτουν λειτουργίες της ανίχνευσης και ταξινόμησης αντικειμένων και γνωστών αξιοθέατων, της ανίχνευσης και εξαγωγής κειμένου και του εντοπισμού

βίαιου περιεχομένου σε εικόνα. Το API μπορεί να αξιοποιηθεί από οποιαδήποτε πλατφόρμα κινητού ή υπολογιστικού σύννεφου.

Η χρήση της δοκιμαστικής έκδοσης API είναι δωρεάν για 1000 εικόνες το μήνα και η ενσωμάτωση στο Android Studio είναι μια εύκολη διαδικασία για τη χρήση της υπηρεσίας ανίχνευσης προσώπων. Η βιβλιοθήκη Google vision API ενσωματώθηκε στο Android Studio, δοκιμάστηκε και μπορεί να ανιχνεύσει πρόσωπα και μάτια με αρκετά καλά ποσοστά ακρίβειας, ωστόσο ο περιορισμός ως προς τον αριθμό ανάλυσης των εικόνων για οικονομικούς λόγους αποτέλεσε ανασταλτικό παράγοντα χρήσης της υπηρεσίας της Google.

Firestore ML kit

Η χρήση της βιβλιοθήκης Firestore ML kit με Android είναι η καλύτερη επιλογή όσον αφορά την ανίχνευση προσώπου επειδή παρέχει καλύτερη απόδοση για επεξεργασία εικόνας σε πραγματικό χρόνο. Στην τελική εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε Firestore ML kit, λόγω της ευχρηστίας στην ενσωμάτωση στην εφαρμογή κινητού, της συνέχους εξέλιξης των αλγορίθμων που διαθέτει και της μεγαλύτερης ακρίβειας ως προς την εξαγωγή των χαρακτηριστικών, λόγω της συνεχούς βελτιστοποίησης από την μηχανική μάθηση των αλγορίθμων της Google. Επιπλέον διαθέτει ένα επιπλέον χαρακτηριστικό μέτρησης της προσοχής με την πληροφορία της πιθανότητας οι οφθαλμοί να είναι ανοιχτοί ή κλειστοί. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό αποτελεί παράμετρο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό μέτρησης είναι η δυνατότητα ερμηνείας και της σχετικής ανταπόκρισης των εκφράσεων του προσώπου του χρήστη, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον για την εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων.

Στον Πίνακα 1 παρατίθενται μια συγκριτική επισκόπηση των τριών βιβλιοθηκών που δοκιμάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, με τις πληροφορίες που παρέχει η κάθε βιβλιοθήκη και την ευκολία ένταξης στην πλατφόρμα του Android Studio.

	OpenCV	Cloud Vision	Firestore ML Kit
Περιοχή των οφθαλμών	✓	✓	✓
Θέση του βλέμματος		✓	✓
Πιθανότητα ανοιχτού οφθαλμού			✓
Ευκολία ένταξης στην εφαρμογή		✓	✓

Πίνακας 1: Συγκριτική πειραματική αξιολόγηση των τριών βιβλιοθηκών.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε απομονώνει την περιοχή ενδιαφέροντος (ΑΟΙ), δηλαδή, την περιοχή του προσώπου και προσδιορίζει την περιοχή των οφθαλμών γύρω από το πρόσωπό τους. Τα δεδομένα παρέχονται από τη χρήση της βιβλιοθήκης Firestore ML kit και καταγράφονται σε κάθε πιθανή αλλαγή των οφθαλμών με συγκεκριμένο χρόνο. Οι δυνατότητες που παρέχονται μέσω της χρήσης του API για την ανίχνευση του προσώπου απαριθμούνται παρακάτω.

1. Η αναγνώριση και ο εντοπισμός των χαρακτηριστικών του προσώπου.

2. Η λήψη των συντεταγμένων των χαρακτηριστικών του προσώπου, όπως μάτια, τα αυτιά, τα μάγουλα, τη μύτη και το στόμα
3. Η απόκτηση περιγράμματος των χαρακτηριστικών των ανιχνευμένων προσώπων, σε συνδυασμό με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε κάθε πρόσωπο.
4. Η αναγνώριση των εκφράσεων του προσώπου.
5. Ο προσδιορισμός έκφρασης προσώπου και η πιθανότητα ανοιχτών ματιών για κάθε οφθαλμό.
6. Η παρακολούθηση προσώπων σε χαρέ βίντεο σε πραγματικό χρόνο και όχι μόνο από στατική εικόνα.
7. Η επεξεργασία του χαρέ βίντεο σε πραγματικό χρόνο, όπου η ανίχνευση του προσώπου που πραγματοποιείται στη συσκευή είναι αρκετά γρήγορη.

3.2 Έρευνα σε ανθρώπινα υποκείμενα

Ένα υποκείμενο ανθρώπου είναι ένα ζωντανό άτομο για το οποίο ένας ερευνητής (επαγγελματίας ή φοιτητής) διεξάγει έρευνα και αποτελεί αντικείμενο μελέτης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των κανονισμών 45 CFR 46. Οι πληροφορίες λαμβάνονται μέσω της παρέμβασης ή της αλληλεπίδρασης με το άτομο ή μέσω των ιδιωτικών πληροφοριών που παρέχονται από το άτομο με σκοπό τη χρήση, τη μελέτη και την ανάλυση τους για ερευνητικούς σκοπούς [7].

Στην προκειμένη μελέτη, τα χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν για τη συλλογή των δεδομένων είναι η περιοχή του οφθαλμού, η θέση της κόρης του οφθαλμού και η συχνότητα βλεφαρίσματος. Στην έρευνα, η αναζήτηση έτοιμων συνόλων δεδομένων δεν ικανοποιεί τα κριτήρια μελέτης για κάθε περίπτωση. Στη συγκεκριμένη προσέγγιση προτιμήθηκε η υλοποίηση εφαρμογής και η πειραματική εξερεύνηση για τη συλλογή των δεδομένων. Μετά από έρευνα στα δημοσιευμένα σύνολα δεδομένων για την καταγραφή του βλέμματος [2], κανένα δεν πληρούσε τα επιθυμητά χαρακτηριστικά μελέτης της προσέγγισης που ακολουθήθηκε για τη μέτρηση της οπτικής προσοχής. Η περιορισμένη πρόσβαση, η έλλειψη βασικών στοιχείων μελέτης, όπως η συχνότητα βλεφαρίσματος αποτέλεσε ανασταλτικό παράγοντα για τη χρήση έτοιμων συνόλων δεδομένων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Παράλληλα, η υλοποίηση εφαρμογής για την συλλογή των επιθυμητών χαρακτηριστικών για τη μέτρηση της οπτικής προσοχής, θεωρήθηκε πιο δημιουργική διαδικασία και ευκαιρία για ολοκληρωμένη κατανόηση των ζητημάτων που προκύπτουν από την υλοποίηση του συστήματος. Επιπρόσθετα, ήταν επιθυμητό να ακολουθηθεί ολόκληρη η διαδικασία καταγραφής και μελέτης με την προσέγγιση του πειραματισμού με βάση τα ανθρώπινα υποκείμενα και τις ανάγκες τους, που αποτελεί ιδιαίτερα ελκυστικό κομμάτι της έρευνας. Με αυτό τον τρόπο υπήρξε η δυνατότητα της προσθήκης των μεταβλητών της συνολικής εμπειρίας του χρήστη για τη συλλογή των δεδομένων.

Γι' αυτούς τους λόγους στην προκειμένη διπλωματική δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο έτοιμο σύνολο δεδομένων καταγραφής βλέμματος για την ανάλυση και την επεξεργασία τους.

Η δημιουργία της συλλογής δεδομένων για την επεξεργασία έγινε με άξονα την έρευνα σε ανθρώπινα υποκείμενα. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από εθελοντές πληρώντας όλα τα κριτήρια και τις απαιτήσεις της έρευνας σε ανθρώπινα υποκείμενα ως προς την επεξεργασία και την αποθήκευση των δεδομένων, με την ενημέρωση και τη συγκατάθεση των εθελοντών και με πλήρη σεβασμό στην ιδιωτικότητα και την προστασία ευαίσθητων πληροφοριών.

Η καταγραφή των δεδομένων για κάθε οφθαλμό περιελάμβανε τα εξής στοιχεία που παρέχονται από τη χρήση της βιβλιοθήκης Firebase ML Kit.

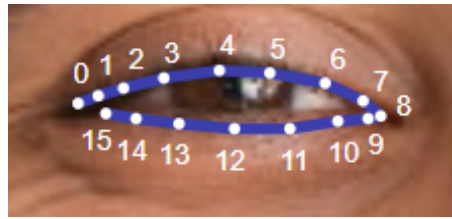
- Αναγνωριστικό προσώπου με αύξοντα αριθμό
- Τεταρτημόριο θέσης της οθόνης που κοιτάει ο οφθαλμός, χωρισμένο σε πάνω αριστερά, πάνω δεξιά, κάτω δεξιά και κάτω αριστερά
- Χρονική στιγμή καταγραφής
- Πιθανότητα κάθε οφθαλμός να είναι ανοιχτός (1 ανοιχτό, 0 κλειστό)
- Καταγραφή πιθανού βλεφαρίσματος των οφθαλμών που προκύπτει με τον έλεγχο της πιθανότητας που εξάγει ο αλγόριθμος
- 16 σημεία καταγραφής προσδιορισμού της θέσης του κάθε οφθαλμού με συντεταγμένες της οθόνης του κινητού
- Κεντρική θέση βλέμματος του κάθε οφθαλμού με συντεταγμένες της οθόνης του κινητού
- Καταγραφή των συνολικών βλεφαρισμάτων που έγιναν για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που κοιτούσε στο αντίστοιχο τεταρτημόριο

Στον παρακάτω σύνδεσμο δίνεται πρόσβαση στα δεδομένα που συλλέχθηκαν και καταγράφηκαν, υπο την μορφή Javascript Object Notation (json), για την αποτελεσματικότερη επεξεργασία τους και είναι διαθέσιμα στον παρακάτω σύνδεσμο με τη μορφή Comma Separated Values (csv). GazeDatasetChamou, [1].

Τα δεκαέξι σημεία που καταγράφονται για την περιοχή του κάθε οφθαλμού απεικονίζονται στην Εικόνα 4 για την κατανόηση και των σημείων που ανιχνεύει και την απαρίθμηση των σημείων του κάθε οφθαλμού.

3.3 Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων

Η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων έγινε με τη βοήθεια των επιστημονικών αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και των βιβλιοθηκών οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4: Τα δεκαέξι σημεία καταγραφής της περιοχής του οφθαλμού

3.3.1 Ταξινόμηση και συσχέτιση των δεδομένων

Ο προσδιορισμός της θέσης του βλέμματος στην οθόνη χωρισμένη σε τέσσερα τεταρτημόρια εντάσσεται σε ένα από τα προβλήματα ταξινόμησης. Στους τομείς της μηχανικής μάθησης και της στατιστικής τα προβλήματα ταξινόμησης έχουν τη δυνατότητα να προσδιορίσουν με αποδοτικό τρόπο τα παρατηρούμενα δεδομένα σε συγκεκριμένα υποσύνολα. Ο συγκεκριμένος προσδιορισμός προκύπτει βάσει των δεδομένων καταγραφής τα οποία προέρχονται και αποτελούνται από παρατηρήσεις, που ήδη γνωρίζουμε τα υποσύνολα στα οποία αντιστοιχούν. Συνεπώς τα συγκεκριμένα δεδομένα παρατήρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εκπαίδευσης για την εκπαίδευση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η ευρέως γνωστή βιβλιοθήκη SciPy για την αποδοτική ταξινόμηση και την κατηγοριοποίηση της θέσης του βλέμματος στην οθόνη. Η SciPy είναι μια βιβλιοθήκη επιστημονικών υπολογιστών ανοιχτού κώδικα για τη γλώσσα προγραμματισμού Python. Με τη χρήση της συγκεκριμένης βιβλιοθήκης, η μοντελοποίηση και η επίλυση επιστημονικών προβλημάτων γίνεται με μεγάλη ταχύτητα και εκπληκτική ακρίβεια. Η βιβλιοθήκη περιλαμβάνει αλγορίθμους βελτιστοποίησης, ολοκλήρωσης, παρεμβολής, προβλήματα ιδιοτιμής, αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις κ.α. Επίσης, αποτελεί δομικό λίθο για τις μεταγενέστερες επιστημονικές βιβλιοθήκες υψηλότερου επιπέδου όπως η scikit-learn.

Οι μέθοδοι ταξινόμησης αποτελούν μοναδικά χαρακτηριστικά επεξεργασίας δεδομένων της μηχανικής μάθησης και επιτρέπουν την εκτέλεση ταξινόμησης σε δυαδικές ή πολλαπλές κλάσεις, ειδικότερα στην ταξινόμηση της θέσης του βλέμματος στην οθόνη του κινητού. Με την ταξινόμηση σε καθορισμένες θέσεις της οθόνης δίνεται η δυνατότητα μέτρησης της οπτικής προσοχής του χρήστη για μια δεδομένη εικόνα, με συγκεκριμένο περιεχόμενο. Σε συνδυασμό με την ανάλυση του βλεφαρίσματος που ανιχνεύθηκε την συγκεκριμένη χρονική περίοδο, είναι εφικτή η ανάλυση της προσοχής του χρήστη για την εκάστοτε περίπτωση.

Ειδικότερα, ο ταξινομητής που προτιμήθηκε για την κατηγοριοποίηση των δεδομένων ήταν ο αλγόριθμος του δέντρου αποφάσεων, ενώ δοκιμάστηκαν οι αλγόριθμοι SVM, Naive Bayes, MLP, Logistic Regression και Random Forest. Ο αλγόριθμος του δέντρου αποφάσεων ανήκει στην κατηγορία των εποπτευόμενων αλγορίθμων της μηχανικής μάθησης και τα δέντρα ταξινόμησης χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των δειγμάτων σε διακριτές κλάσεις, Decision Tree Classifier. Χρησιμοποιεί ένα δυαδικό γράφημα δέντρων, όπου κάθε κόμβος

έχει δύο θυγατρικούς κόμβους για κάθε δείγμα. Οι τιμές των δειγμάτων παρουσιάζονται στο γράφημα ως φύλλα δέντρων. Η ταξινόμηση επιτυγχάνεται ξεκινώντας από το ριζικό κόμβο και με την ταξινόμηση του δείγματος μέσω κόμβων, οδηγείται στα τελικά φύλλα του δέντρου. Σε κάθε κόμβο λαμβάνεται μία απόφαση για την ταξινόμηση του ενδιάμεσου κόμβου απογόνων. Η διαδικασία απόφασης περιλαμβάνει μία διαδικασία εύρεσης των βέλτιστων κανόνων σε κάθε εσωτερικό κόμβο του δέντρου για το επιλεγμένο δείγμα.

Στον κλάδο της ανάλυσης αποφάσεων, τα δέντρα αποφάσεων αποτελούν ένα δημοφιλές εργαλείο και παρέχουν την οπτική αναπαράσταση κάθε απόφασης.

Για την εύρεση της συσχέτισης των μεταβλητών, όσον αφορά τον αριθμό βλεφαρισμάτων και τη θέση του βλέμματος διεξήχθη στατιστικό τεστ ελέγχου Pearson, Kendall και Spearman. Οι συντελεστές μέτρησης της γραμμικής συσχέτισης των προλεγόμενων ελέγχων κυμαίνονται από $[-1, 1]$, με θετική συσχέτιση για > 0 και αρνητική συσχέτιση για < 0 . Επιπλέον, τα δεδομένα που προέκυψαν παρατηρήθηκαν και μελετήθηκαν πειραματικά, με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων, όσον αφορά την μέτρηση της οπτικής προσοχής σε σχέση με το περιεχόμενο του κειμένου.

3.3.2 Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων

Η ανάλυση των δεδομένων παρακολούθησης των οφθαλμών απαιτεί τον σχολιασμό και την οπτικοποίηση των περιοχών ενδιαφέροντος (AOI) για την ερμηνεία της ανθρώπινης συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων έχει σκοπό την ομαδοποίηση των δεδομένων παρακολούθησης των οφθαλμών που καταγράφηκαν ανάλογα με τη θέση του στην οθόνη.

Για την απεικόνιση των βασικών διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι στατιστικές βιβλιοθήκες απεικόνισης της Python, με στόχο την καλύτερη ανάπαρσταση και την κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι η Plotly και η Seaborn που επιτυγχάνουν απεικόνιση υψηλής στατιστική ανάλυση και είναι ευρέως διαδεδομένες στο κλάδο της στατιστικής και της επιστημονικής ανάλυσης δεδομένων. Για την οπτικοποίηση, χρησιμοποιήθηκαν οι χάρτες θερμότητας, για την μέτρηση της οπτικής προσοχής και για την εύρεση της συσχέτισης μεταξύ των εξεταζόμενων παραμέτρων, τα διαγράμματα διασποράς για τον προσδιορισμό της θέσης του βλέμματος και της περιοχής των οφθαλμών, την οπτικοποίηση του διαγράμματος του δέντρου απόφασης της ταξινόμησης του βλέμματος στην οθόνη του κινητού.

Στη συνέχεια αναφέρονται η ολοκλήρωση της ανάπτυξης και της υλοποίησης της εφαρμογής με τους προτεινόμενους αλγόριθμους και τα εργαλεία, με βάση τη μεθοδολογία που αναφέρθηκε.

4 Σχεδιασμός και Υλοποίηση

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της εφαρμογής εφαρμόστηκε με βάση τη μεθοδολογία που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3. Αποτελεί το κρίσιμο μέρος της διπλωματικής καθώς αποδείχθηκε το πιο πολυπαραγοντικό κομμάτι της παρούσας εργασίας, λόγω της ανίχνευσης ειδικότερων απαιτήσεων και τις επεξεργασίας των δεδομένων από τις εικόνες των οφθαλμών.

Η εφαρμογή μπορεί να εγκατασταθεί με απλό τρόπο σε κινητό τηλέφωνο Android και τα δεδομένα που καταγράφονται, αποθηκεύονται στο κινητό τηλέφωνο για την μελλοντική ανάκτηση και την επεξεργασία τους.

Οι κύριοι άξονες στους οποίους βασίστηκε ο σχεδιασμός πειραμάτων ήταν:

- Αποκλειστική χρήση της μπροστινής κάμερας κινητού τηλεφώνου, χωρίς την παρέμβαση επιπλέον εξειδικευμένων εργαλείων (π.χ γυαλιά με ενσωματωμένη κάμερα, κάμερα υπερύθρων) για την επίτευξη καλύτερης εμπειρίας του χρήστη.
- Χρήση κινητού τηλεφώνου με μοναδική προϋπόθεση την εστίαση στην οθόνη, χωρίς ο χρήστης να αλληλεπιδρά με περίπλοκους τρόπους με το κινητό.
- Απλοποιημένη αλληλεπίδραση του χρήστη με το κινητό τηλέφωνο, με σταθερή θέση του κινητού και του χρήστη, για την αποδοτικότερη συλλογή δεδομένων για τον περιορισμό απόσπασης της προσοχής.

4.1 Υλικοτεχνικός εξοπλισμός

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ως κύριος εξοπλισμός είναι ένα κινητό τηλέφωνο τύπου Android με τις εξής βασικές προαπαιτήσεις.

- καλή ανάλυση μπροστινής κάμερας 2MP
- μεγάλη οθόνη, για να είναι ευδιάκριτη η αλλαγή του βλέμματος
- καλό επεξεργαστή για την εκτέλεση της εφαρμογής, με API version 28.

Το κινητό τηλέφωνο που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη και τα πειράματα που διεξήχθησαν διέθετε όλα τα κριτήρια που παρατίθενται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Τα χαρακτηριστικά της συσκευής που εγκαταστάθηκε και εκτελέστηκε η εφαρμογή

Μπροστινή κάμερας	2M P, f /2.4
Μέγεθος οθόνη	5.0inches
Ανάλυση οθόνης	1080x1920pixels
CPU	Quad-core 2.3 GHz
GPU	Adreno 330
RAM	3 GB

4.2 Σχεδίαση

Το σύστημα ανίχνευσης και καταγραφής του βλέμματος υλοποιήθηκε ως εφαρμογή σε περιβάλλον πλατφόρμας Android Studio με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Java, για το λόγο ότι η παρούσα μελέτη στόχευσε σε φορητές συσκευές. Η κύρια βιβλιοθήκη που χρησιμοποιήθηκε, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 είναι η Firebase ML Kit.

4.2.1 Ενσωμάτωση της βιβλιοθήκης στο Android

Για την ενσωμάτωση του Application Programming Interface (API) Firebase ML Kit απαιτείται η σύνδεση του Android με την εξωτερική της Google Firebase, που αποτελεί εργαλείο ενσωματωμένο στο Android Studio με σκοπό την ανάπτυξη του λογισμικού και των εφαρμογών με τη βοήθεια εργαλείων της Google. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα αξιοποίησης των αλγορίθμων ανιχνευτών για την αναγνώριση του προσώπου, μεταξύ άλλων υπηρεσιών που προσφέρει.

Διαμόρφωση του ανιχνευτή προσώπου

Οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για τον ανιχνευτή προσώπου στο αντικείμενο `FirebaseVisionFaceDetectorOptions` συμπεριλαμβάνουν

1. Λειτουργία της απόδοσης.

Οι επιλογές στην προκειμένη ρύθμιση είναι “Γρήγορη απόδοση” / “Ακριβής απόδοση” (προεπιλογή “Γρήγορη απόδοση”).

2. Εντοπισμός των χαρακτηριστικών του προσώπου

Με επιλογές “Κανένα χαρακτηριστικό” / “Όλα τα χαρακτηριστικά”. Με την επιλογή “Όλα τα χαρακτηριστικά”, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα εντοπισμού στα εξής χαρακτηριστικά του προσώπου που ανιχνεύεται: μάτια, αυτιά, μύτη, μάγουλα, στόμα (προεπιλογή “Κανένα χαρακτηριστικό”).

3. Εντοπισμός του περιγράμματος.

Οι επιλογές είναι “Κανένα περίγραμμα” / “Όλα τα περιγράμματα” όπου γίνεται ο εντοπισμός των σημείων για το περίγραμμα των επιθυμητών χαρακτηριστικών του προσώπου που έχει ανιχνευθεί. (προεπιλογή “Κανένα περίγραμμα”).

4. Ταξινόμηση των προσώπων

Με τις επιλογές “Καμία ταξινόμηση” / “Όλες οι ταξινομήσεις” (προεπιλογή “Καμία ταξινόμηση”). Με τη συγκεκριμένη ρύθμιση παρέχεται η δυνατότητα της ταξινόμησης των προσώπων σε κατηγορίες, όπως πιθανότητα χαμογέλαστού προσώπου και πιθανότητα ανοιχτού ματιού.

5. Ενεργοποίηση παρακολούθησης προσώπου με αναγνωριστικό για τον χαρακτηρισμό το πρόσωπου που ανιχνεύεται με συγκεκριμένο αναγνωριστικό (προεπιλογή Ψευδής).

Επιπλέον, ο προγραμματιστής-χρήστης της βιβλιοθήκης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει το ελάχιστο μέγεθος των προσώπων προς ανίχνευση, σε σχέση με την εικόνα εισόδου (προεπιλογή 0.1f).

Εκτέλεση του ανιχνευτή προσώπου

Για να εκτελεστεί ο αλγόριθμος εντοπισμού προσώπου, δημιουργείται ένα αντικείμενο επεξεργασίας εικόνας `FirebaseVisionImage`, είτε από ένα αντικείμενο `Bitmap`, `media.Image`, `ByteBuffer`, `byte array` ή από ένα αρχείο της συσκευής. Το συγκεκριμένο αντικείμενο δημιουργείται από τις εικόνες που λαμβάνονται από την κάμερα του κινητού τηλεφώνου. Η εικόνα πρέπει να μετασχηματιστεί σε κάποιο από τα προλεγόμενα αντικείμενα για να είναι αξιοποιήσιμη από τον αλγόριθμο του ανιχνευτή της βιβλιοθήκης. Στη συνέχεια, το αντικείμενο χρησιμοποιείται επιτυχώς από τον ανιχνευτή της βιβλιοθήκης `FirebaseVisionFaceDetector`.

Λήψη πληροφοριών για τα πρόσωπα που έχουν ανιχνευθεί

Με τον εντοπισμό προσώπων δημιουργείται μια λίστα αντικειμένων `FirebaseVisionFace`, όπου το κάθε αντικείμενο αντιπροσωπεύει ένα πρόσωπο που έχει ανιχνευθεί. Αφού έχει διαμορφωθεί κατάλληλα ο ανιχνευτής, με αυτή τη διαδικασία είναι εύκολη η πρόσβαση στις επιθυμητές πληροφορίες που έχουν ρυθμιστεί για να εντοπίσει ο ανιχνευτής πρόσωπο και στη λήψη των συντεταγμένων των χαρακτηριστικών της εικόνας.

Ανίχνευση προσώπου σε πραγματικό χρόνο

Οι παράγοντες υλοποίησης της βιβλιοθήκης έχουν ρυθμιστεί κατάλληλα και εμφανίζουν τα ευρήματα των χαρακτηριστικών του προσώπου και των επιπλέον παραμέτρων των ανοιχτών οφθαλμών και την πιθανότητα εκφράσεων του προσώπου που ανιχνεύεται σε διάφορες καταστάσεις. Ο ανιχνευτής της εφαρμογής παραμετροποιήθηκε με τις εξής τιμές:

- Γρήγορη λειτουργία απόδοσης, για να γίνεται γρήγορη καταγραφή σε κάθε εναλλαγή που συμβαίνει στον οφθαλμό.
- Εντοπισμός όλων των χαρακτηριστικών, για να αποκτηθεί πρόσβαση στα χαρακτηριστικά του προσώπου.
- Εντοπισμός του περιγράμματος, για την πρόσβαση στις συντεταγμένες της περιοχής των οφθαλμών
- Χρήση της ταξινόμησης, για την παροχή πληροφορίας της πιθανότητας του κάθε οφθαλμού να είναι ανοιχτό.
- Ενεργοποίηση αναγνωριστικού του προσώπου, για την αναγνώριση των προσώπων που παρακολουθούνται.

Στις Εικόνες 5α', 5β', 5γ', 5δ', 5ε', 5ζ' απεικονίζονται κάποια στιγμιότυπα της πρώιμης εφαρμογής που αναπτύχθηκε για τη δοκιμή της υλοποίησης της βιβλιοθήκης `Firestore ML Kit` με τα αποτελέσματα που εξάγονται με τη χρήση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιεί. Παρατηρήθηκε ότι η ανίχνευση

των οφθαλμών εκτελείται με μεγάλη ακρίβεια καθώς η εμφάνιση και η απεικόνιση των επιπλέον παραμέτρων και χαρακτηριστικών καταγράφεται, τόσο στην ίδια την εφαρμογή, όσο και στην οθόνη του κινητού.

4.3 Υλοποίηση απλής Εφαρμογής

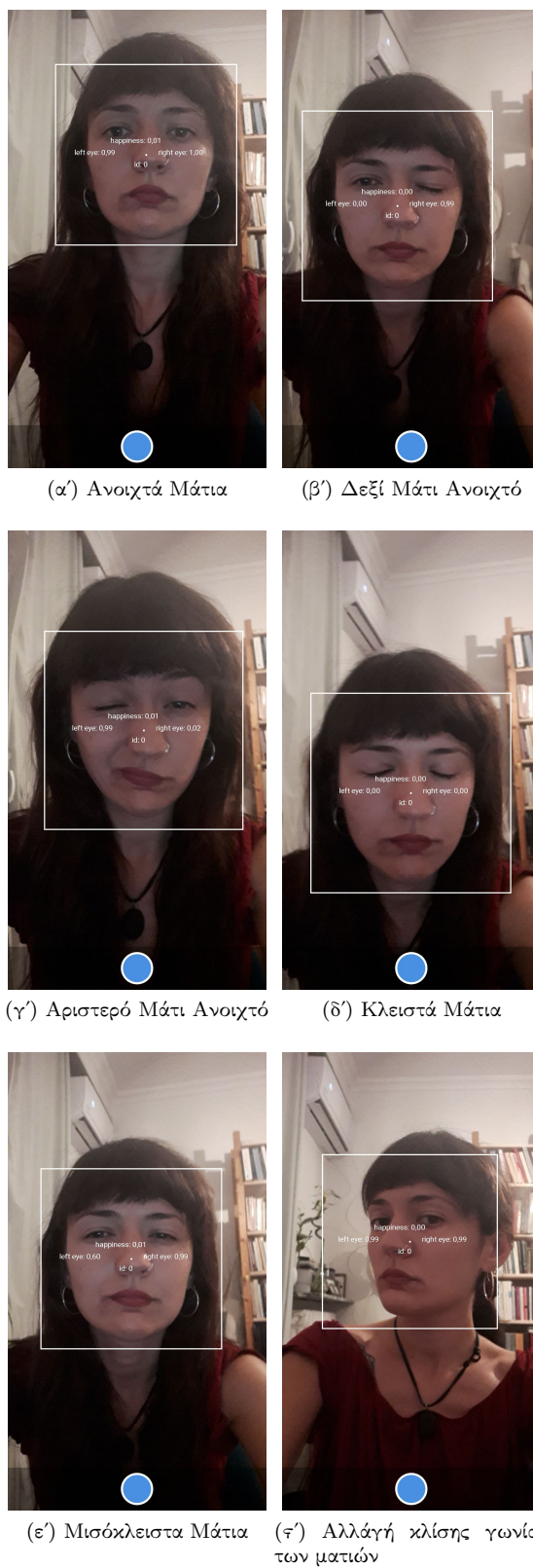
Για τη συλλογή δεδομένων στα πλαίσια της διπλωματικής υλοποιήθηκε μια απλή εφαρμογή ανίχνευσης και καταγραφής του βλέμματος με στόχο τη μέτρηση της οπτικής προσοχής και της οφθαλμικής ιχνηλάτισης.

Για την υλοποίηση της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε η μπροστινή κάμερα του κινητού, χωρίς την απεικόνιση του ειδώλου στην οθόνη, για την αποφυγή της απόσπασης της προσοχής του χρήστη από τα οπτικά καθήκοντα που υποβλήθηκε. Συνεπώς, η οθόνη του κινητού περιελάμβανε μόνο τις απαραίτητες πληροφορίες κειμένου για την καταγραφή και την μέτρηση της οπτικής προσοχής. Έχει μέγεθος περίπου 20MB και είναι διαθέσιμη με το Android Package APK που είναι διαθέσιμο στον παρακάτω σύνδεσμο, EyeTrackerAPK, [3]. Στα πλαίσια της ανάπτυξης εφαρμογών ανοιχτού κώδικα, η συγκεκριμένη υλοποίηση δημοσιεύτηκε σε πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα, [4].

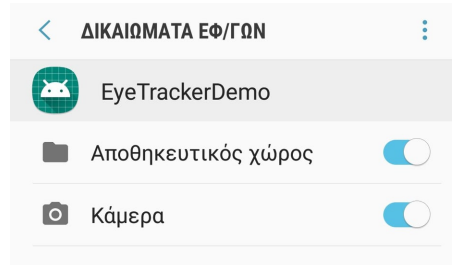
Αφού εγκατασταθεί η εφαρμογή, ζητάει άδεια πρόσβασης στην κάμερα του κινητού τηλεφώνου και στο χώρο αποθήκευσης της συσκευής για να αποθηκεύονται τα δεδομένα που καταγράφονται για την συνένωση του χρήστη για τη χρήση της κάμερας και του χώρου αποθήκευσης της συσκευής του. Τα δικαιώματα που χρησιμοποιεί η εφαρμογή απεικονίζονται στην Εικόνα 6.

Η εφαρμογή χρησιμοποιούσε μια αρχική εικόνα με τις βασικές οδηγίες σε κίτρινο χρώμα ως κεντρική οθόνη στην οποία δεν γινόταν καμία καταγραφή, παρέχοντας οδηγίες για την ολοκλήρωση των οπτικών καθήκοντων ανάγνωσης του κειμένου που επρόκειτο να εμφανιστεί. Έπειτα, εμφάνιζε το κείμενο στο επιθυμητό τεταρτημόριο για να τραβήξει το βλέμμα του χρήστη όπου γίνονται οι καταγραφές. Μετά από 15 δευτερόλεπτα επανέφερε στην αρχική εικόνα, χωρίς να πραγματοποιεί καταγραφές για την επαναφορά του βλέμματος στην κεντρική θέση. Τα κείμενα εμφανίζονται με τη σειρά που φαίνονται στην Εικόνα 7α', 7β', 7δ', 7ε', 7η'. Ο χρόνος των 15 δευτερολέπτων επιλέχθηκε για να είναι επαρκής για την πλήρη ανάγνωση των κειμένων από τους χρήστες, θα ήταν επαρκής ο αριθμός των βλεφαρισμάτων ενώ παράλληλα δε θα προκαλούσαν δυσανασχέτιση στους χρήστες η προσκόλληση στην οθόνη για περισσότερο χρόνο, κάτι το οποίο θα μείωνε σταδιακά το ενδιαφέρον τους.

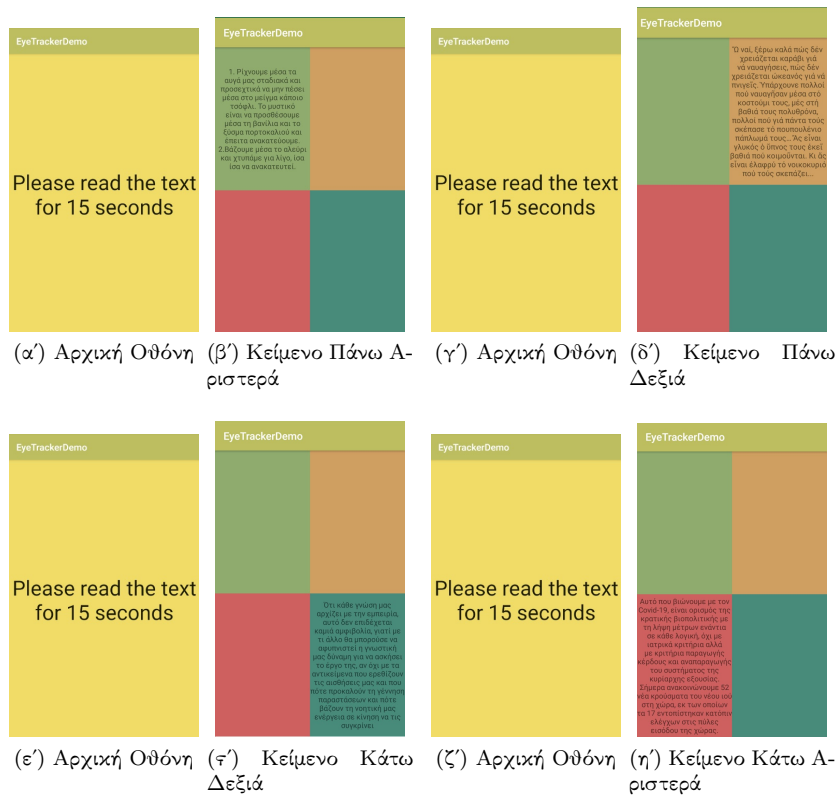
Τα κείμενα που επιλέχθηκαν διέφεραν ως προς το περιεχόμενο και το ύψος για τη μέτρηση της οπτικής προσοχής του χρήστη. Επιπρόσθετα, οι θέσεις των κειμένων ήταν συγκεκριμένες για όλους τους χρήστες και σταθερές. Το πρώτο είναι ένα απλό κείμενο οδηγιών εκτέλεσης μαγειρικής συνταγής, το δεύτερο είναι ένα ποίημα του ποιητή Αργύρη Χιόνη με ιδιαίτερα σημεία στίξης, το τρίτο αποτελεί διαχρονική φιλοσοφική προσέγγιση του Ιμμάνουελ Καντ, ενώ το τέταρτο σχολιάζει θέμα επικαιρότητας με τον ιό Covid-19. Για την επιλογή των κειμένων της εφαρμογής λήφθηκαν υπόψιν οι συμβουλές που προτάθηκαν από ψυχολόγο, μετά από σχετική συζήτηση για τη συγκεκριμένη προσέγγιση της μελέτης. Στον Πίνακα 3 επισημαίνονται τα κείμενα που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή που



Σχήμα 5: Απλή εφαρμογή της βιβλιοθήκης Firebase ML Kit



Σχήμα 6: Τα δικαιώματα πρόσβασης για τη χρήση της εφαρμογής



Σχήμα 7: Βασικά στιγμιότυπα-οθόνες της εφαρμογής EyeTrackDemo

υλοποιήθηκε.

Πάνω αριστερά	1. Ρίχνουμε μέσα τα αυγά μας σταδιακά και προσεχτικά να μην πέσει μέσα στο μείγμα κάποιο τσόφλι. Το μυστικό είναι να προσθέσουμε μέσα τη βανίλια και το ξύσμα πορτοκαλιού και έπειτα ανακατεύουμε.
Πάνω δεξιά	“Ω ναί, ξέρω καλά πώς δεν χρειάζεται καράβι για να ναυαγήσεις, πώς δεν χρειάζεται ωκεανός για να πνιγείς. Έπάρχουν πολλοί που ναυαγήσαν μέσα στο κοστούμι τους, μέσα στη βαθιά τους πολυθρόνα, πολλοί που για πάντα τούς σκέπασε τό πουπουλένιο πάπλωμά τους. . . “Ας είναι γλυκός ο ύπνος τους έχει βαθιά που κοιμούνται. Κι άς είναι ελαφρύ τό νοικοκυριό που τούς σκεπάζει...
Κάτω δεξιά	Ότι κάθε γνώση μας αρχίζει με την εμπειρία, αυτό δεν επιδέχεται καμιά αμφιβολία, γιατί με τι άλλο θα μπορούσε να αφυπνιστεί η γνωστική μας δύναμη για να ασκήσει το έργο της, αν όχι με τα αντικείμενα που ερεθίζουν τις αισθήσεις μας και που τότε προκαλούν τη γέννηση παραστάσεων και τότε βάζουν τη νοητική μας ενέργεια σε κίνηση να τις συγκρίνει
Κάτω αριστερά	Αυτό που βιώνουμε με τον Covid-19, είναι ορισμός της κρατικής βιοπολιτικής με τη λήψη μέτρων ενάντια σε κάθε λογική, όχι με ιατρικά κριτήρια αλλά με κριτήρια παραγωγής κέρδους και αναπαραγωγής του συστήματος της κυρίαρχης εξουσίας. Σήμερα ανακοινώνουμε 52 νέα κρούσματα του νέου ιού στη χώρα, εκ των οποίων τα 17 εντοπίστηκαν κατόπιν ελέγχων στις πύλες εισόδου της χώρας.

Πίνακας 3: Το περιεχόμενο των κειμένων που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή

Το συγκεκριμένο σύστημα καταλαμβάνει μικρό μέγεθος στη συσκευή του κινητού τηλεφώνου, με χαμηλή κατανάλωση πόρων για να είναι αποδοτικό σε φορητές συσκευές. Επιπλέον, η χρήση της εφαρμογής είναι διακριτική, ευχάριστη και φιλική προς το χρήστη καταγράφοντας την περιοχή των οφθαλμών και τη θέση του βλέμματος σε πραγματικό χρόνο, χωρίς επιπλέον παρεμβάσεις.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος. Η αξιολόγηση στοχεύει στην ορθή εξαγωγή συμπερασμάτων, σε σχέση με την επιλογή των δεικτών της οπτικής προσοχής και τη μέτρηση της ακρίβειας της υλοποίησης των αλγορίθμων ανιχνευτών.

5 Συλλογή και ανάλυση δεδομένων

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκε η συλλογή των δεδομένων, για την απαραίτητη συγκέντρωση των επιθυμητών χαρακτηριστικών από τα ανθρώπινα υποκείμενα. Τα δεδομένα καταγράφηκαν από ένα πραγματικό πείραμα ανίχνευσης και παρακολούθησης των οφθαλμών για την οπτική ιχνηλάτηση του βλέμματος και την μέτρηση της οπτικής προσοχής από εθελοντές. Διερευνήθηκε η ακρίβεια της υλοποίησης του ανιχνευτή των οφθαλμών, καθώς επίσης και η συσχέτιση της παραμέτρου του αριθμού βλεφαρισμάτων κατά την ανάγνωση κειμένων, ως παράγοντας μέτρησης της οπτικής προσοχής.

Το πιλοτικό πείραμα διεξήχθησε για την πρακτική εφαρμογή και τη δοκιμή των αλγορίθμων ανίχνευσης βλέμματος, την συλλογή δεδομένων, με σκοπό την ταξινόμηση του βλέμματος στα τέσσερα τεταρτημόρια της οθόνης του κινητού και του ελέγχου της υπόθεσης του δείκτη μέτρησης αριθμού βλεφαρισμάτων του χρήστη ως παράμετρο μέτρησης της οπτικής προσοχής.

Για τη συλλογή και την εξαγωγή των δεδομένων υλοποιήθηκε μια εφαρμογή για κινητά τηλέφωνα, όπου ο χρήστης ακολουθώντας οδηγίες για την κατεύθυνση του βλέμματος, καταγράφεται η οπτική δραστηριότητα στην οθόνη του κινητού σε πραγματικό χρόνο. Με αυτό τον τρόπο, τα δεδομένα που συλλέγονται παρέχουν πληροφορίες της θέσης των δύο οφθαλμών στην οθόνη του κινητού, της θέσης της κόρης του κάθε οφθαλμού και τη συχνότητα βλεφαρίσματος για το χρονικό διάστημα που παρατηρούσε την οθόνη.

5.1 Πρωτόκολλο Συλλογής δεδομένων

Για την αχέραια διεξαγωγή του πιλοτικού πειράματος σε ανθρώπους ακολουθήθηκε ένα πρωτόκολλο σταθερών μεταβλητών για την συλλογή των δεδομένων με βέλτιστο και αποδοτικό τρόπο.

Η πειραματική χρήση της εφαρμογής έγινε σε συνθήκες εργαστηρίου για την καλύτερη προτυποποίηση της διαδικασίας. Οι πολυπαραγοντικές συνθήκες μελέτης της ανίχνευσης του βλέμματος και της μέτρησης της οπτικής προσοχής καθίστα αναγκαία τη χρήση μερικών σταθερών μεταβλητών για την αποδοτικότερη μέτρηση.

Ο κύριος χώρος διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας ήταν ένα ήσυχο δωμάτιο με ένα γραφείο και μία καρέκλα με τεχνητό φωτισμό ηλεκτρικού λαμπτήρα. Χρησιμοποιήθηκε ένα κινητό τηλέφωνο στο οποίο είχε προεγκατασταθεί η εφαρμογή. Αρχικά το κινητό τηλέφωνο βρισκόταν σε σταθερή θέση πάνω σε ένα γραφείο, στηριζόμενο με τη βοήθεια στηρίγματος - βάσης.

Τα πειράματα έλαβαν χώρα σε συνθήκες εργαστηρίου με την τοποθέτηση του κινητού σε σταθερό σημείο με τη βοήθεια στηρίγματος, τοποθέτηση του καθίσματος σε σταθερή απόσταση από το γραφείο και το άτομο σε απόσταση 20 εκατοστά από την οθόνη του κινητού. Οι παράμετροι που άλλαζαν ήταν το ύψος και η κλίση του οφθαλμού σε σχέση με την κάμερα για αυτό το λόγο υπάρχουν και οι σχετικές διαφοροποιήσεις.

Το υποκείμενο είναι τοποθετημένο και καθήμενο απέναντι από την οθόνη ενός κινητού τηλεφώνου Android με απλή μπροστινή κάμερα και σε απόσταση 20 εκατοστών. Το πρόσωπο ήταν σταθερά κεντραρισμένο στο κέντρο της κάμερα

για την βέλτιστη καταγραφή των χαρακτηριστικών. Η φωτεινότητα, επίσης ήταν σταθερή για όλους τους συμμετέχοντες εθελοντές με επαρκή φωτισμό για την καταγραφή. Ωστόσο, λόγω της διαφοράς ύψους του κάθε εθελοντή και της γωνίας κλίσης του οφθαλμού σε σχέση με την κάμερα του κινητού, υπήρχαν διαφορές στις συντεταγμένες της θέσης της οθόνης και οι σχετικές αποκλίσεις. Επίσης οι ακούσιες κινήσεις του κεφαλιού του κάθε χρήστη είναι αδύνατον να περιοριστούν ολοκληρωτικά, συνεπώς επηρεάστηκε η απόδοση του μοντέλου.

Πριν την έναρξη της διαδικασίας οι εθελοντές ενημερώθηκαν για τις απλές οδηγίες χρήσης της εφαρμογής και τα δεδομένα που καταγράφει και αποθηκεύει στη συσκευή. Ο κάθε εθελοντής αφιέρωσε χρόνο περίπου 3 λεπτά και το πείραμα διεξαγόταν από έναν εθελοντή κάθε φορά για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των χρηστών και εξωτερικών παραγόντων. Σε αυτό το κομμάτι, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση για την απομόνωση του εθελοντή, με σκοπό τον περιορισμό πιθανών παρεμβολών από εξωτερικούς παράγοντες που θα μπορούσαν να του αποσπάσουν την οπτική προσοχή.

5.2 Συμμετέχοντες

Οι συμμετέχοντες ενημερώθηκαν πλήρως για την εξέλιξη της επεξεργασίας και του τύπου αποθήκευσης των δεδομένων και όλα τα πειράματα έγιναν με την συγκατάθεση των εθελοντών, με σεβασμό στα ευαίσθητα και προσωπικά δεδομένα των εθελοντών που χρησιμοποίησαν την εφαρμογή.

Η εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε από 7 άτομα, 4 γυναίκες και 3 άντρες από 23 έως 43 χρονών. Ένας από τους εθελοντές φορούσε γυαλιά, ενώ δύο φορούσαν φακούς επαφής κατά τη χρήση της εφαρμογής, που εν τέλει αποδείχτηκε ότι δεν επηρέασε την τελική απόδοση των αλγορίθμων ανίχνευσης. Τα κριτήρια συμμετοχής και ένταξης στο πείραμα ήταν η μέση ανάγνωση ελληνικών κειμένων από άτομα διαφόρων βαθμίδας εκπαίδευσης (δευτεροβάθμιας, τριτοβάθμιας εκπαίδευσης) με σκοπό την καταγραφή του βλέμματος και την μέτρηση της οπτικής προσοχής, με βάση το κείμενο που τους φάνηκε περισσότερο ενδιαφέρον.

Τα κείμενα που χρησιμοποιήθηκαν διέφεραν ως προς το περιεχόμενο και κυμάνθηκαν από οδηγίες συνταγής μαγειρικής, ποίημα γραμμένο με τονισμούς, φιλοσοφικό κείμενο και σχολιασμός της επικαιρότητας με αφορμή τον ιό Covid-19, όπως προαναφέρθηκε.

5.3 Διαδικασία

Οι συμμετέχοντες ενημερώθηκαν αρχικά ότι η εφαρμογή έχει πρόσβαση στην μπροστινή κάμερα του κινητού παρότι η κάμερα και η απεικόνιση του ειδώλου τους δεν εμφανίζεται στην οθόνη. Επιπλέον, έλαβαν γνώση ότι η εφαρμογή ανιχνεύει το πρόσωπο και τα μάτια των υποκειμένων, καταγράφοντας παράλληλα τις συντεταγμένες των οφθαλμών στα 16 σημεία που περιβάλλουν τον οφθαλμό καθώς και το κέντρο της θέσης του. Σημαντική προσθήκη αποτέλεσε και επισημάνθηκε, ότι η εφαρμογή καταγράφει μόνο τις συντεταγμένες της θέσης του οφθαλμού στη οθόνη και δεν υπάρχει πρόσβαση στην συνολική εικόνα του οφθαλμού και της ίριδας του χρήστη.

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας τοποθετήθηκε μια συσκευή τηλεφώνου στην οποία ήταν εγκατεστημένη η εφαρμογή ανίχνευσης του οφθαλμού και προ-στά στεκόταν το υποκείμενο μελέτης. Στη συνέχεια, τους δόθηκαν οι απλές οδηγίες ανάγνωσης του κειμένου που εμφανίζεται στην οθόνη και σε περίπτωση που ολοκληρώσουν την ανάγνωση, πριν την αυτόματη εναλλαγή οθόνης, να συνεχίσουν να κοιτάζουν το χρώμα στο οποίο εμφανίζεται το κείμενο στην κάθε περίπτωση. Αφού παρέλθει ο χρόνος εμφάνισης των τεσσάρων κειμένων, να βαθμολογήσουν τα κείμενα με βάση το ενδιαφέρον τους από το ένα έως το τέσσερα, με το ένα να αντιστοιχεί στο περισσότερο ενδιαφέρον.

Η οθόνη χωρίστηκε σε τέσσερα τεταρτημόρια με διαφορετικό χρώμα το καθένα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 8:

EyeTrackerDemo	
1. Ρίχνουμε μέσα τα αυγά μας σταδιακά και προσεχτικά να μην πέσει μέσα στο μείγμα κάποιο τσόφλι. Το μυστικό είναι να προσθέσουμε μέσα τη βανίλια και το ξύσμα πορτοκαλιού και έπειτα ανακατεύουμε.	"Ω ναι, ξέρω καλά πώς δεν χρειάζεται καράβι για να ναυαγήσεις, πώς δεν χρειάζεται ωκεανός για να πνιγείς. Υπάρχουν πολλοί που ναυαγήσαν μέσα στο κοστούμι τους, μέσ στη βαθιά τους πολυθρόνα, πολλοί που για πάντα τούς σκέπασε τό πουπουλένιο πάπλωμά τους..."
2. Βάζουμε μέσα το αλεύρι και χτυπάμε για λίγο, ίσα ίσα να ανακατευτεί.	"Ας είναι γλυκός ο ύπνος τους εκεί βαθιά που κοιμούνται. Κι άς είναι έλαφρύ τό νοικοκυριό που τούς σκεπάζει..."
Αυτό που βιώνουμε με τον Covid-19, είναι ορισμός της κρατικής βιοπολιτικής με τη λήψη μέτρων ενάντια σε κάθε λογική, όχι με ιατρικά κριτήρια αλλά με κριτήρια παραγωγής κέρδους και αναπαραγωγής του συστήματος της κυρίαρχης εξουσίας. Σήμερα ανακοινώνουμε 52 νέα κρούσματα του νέου ιού στη χώρα, εκ των οποίων τα 17 εντοπίστηκαν κατόπιν ελέγχων στις πύλες εισόδου της χώρας.	Ότι κάθε γνώση μας αρχίζει με την εμπειρία, αυτό δεν επιδέχεται καμιά αμφιβολία, γιατί με τι άλλο θα μπορούσε να αφυπνιστεί η γνωστική μας δύναμη για να ασκήσει το έργο της, αν όχι με τα αντικείμενα που ερεθίζουν τις αισθήσεις μας και που τότε προκαλούν τη γέννηση παραστάσεων και τότε βάζουν τη νοητική μας ενέργεια σε κίνηση να τις συγκρίνει

Σχήμα 8: Εικόνα εφαρμογής χωρισμένη σε τέσσερα τεταρτημόρια για την ταξινόμηση του βλέμματος

Η αρχική οθόνη έδινε αρχικές οδηγίες να διαβάσουν το κείμενο που θα εμφανιστεί για δεκαπέντε (15) δευτερόλεπτα. Έπειτα εμφανιζόταν το κείμενο με σκοπό η προσοχή του χρήστη και το βλέμμα του να οδηγηθούν στην επιθυμητή περιοχή για την καταγραφή του βλέμματος. Το κάθε κείμενο εμφανίστηκε για 15 δευτερόλεπτα, ξεκινώντας από πάνω αριστερά και ακολουθώντας τη φορά του ρολογιού. Μεταξύ των κειμένων, έκανε εμφάνιση το αρχικό κείμενο οδηγιών ανάγνωσης του

κειμένου για να είναι σαφείς οι οδηγίες για τους χρήστες- υποκείμενα της εφαρμογής. Στο κείμενο της γενικής οδηγίας δεν γίνεται καμία καταγραφή και ανίχνευση των χαρακτηριστικών του υποκειμένου που αποθηκεύονται.

Η καταγραφή των χαρακτηριστικών αποτελείται από τη θέση που καταγράφει τη συγκεκριμένη περίοδο, από τα 16 σημεία αποτελούμενα από τις συντεταγμένες της περιοχής που ορίζει ο αλγόριθμος για τον κάθε οφθαλμό, τη κεντρική θέση των συντεταγμένων της κόρης του εκάστοτε οφθαλμού στη θέση της οθόνης, το χρόνο καταγραφής σε εποχή timestamp, την πιθανότητα το κάθε μάτι να είναι ανοιχτό με 1 ανοιχτό και 0 κλειστό, τον αριθμό βλεφαρίσματος και το αναγνωριστικό προσώπου για την καταγραφή του αριθμού των προσώπων στο καρέ.

Στο τέλος της διαδικασίας, οι εθελοντές κλήθηκαν να βαθμολογήσουν τα κείμενα που ανέγνωσαν κατά τη διάρκεια της εφαρμογής, ως προς το ενδιαφέρον του περιεχομένου, με σκοπό να εξαχθούν σχετικά συμπεράσματα με βάση την οπτική προσοχή των υποκειμένων.

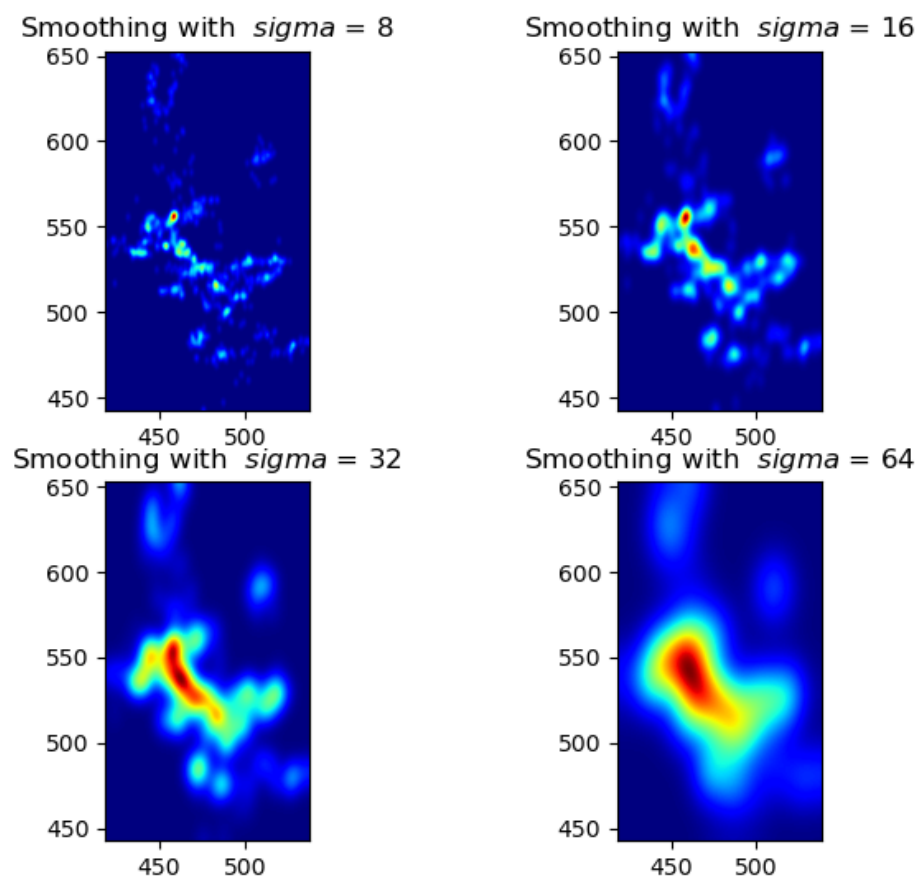
5.4 Ανάλυση δεδομένων και Αποτελέσματα

Στην συγκεκριμένη υποενότητα περιγράφεται ο τρόπος ανάλυσης των δεδομένων που συλλέχθηκαν από την πειραματική διαδικασία. Για την πλήρη κατανόηση και εξαγωγή συμπερασμάτων παρατίθενται τα σχετικά διαγράμματα, οι βοηθητικοί πίνακες και οι εικόνες.

Το σύστημα παρακολούθησης αναλύει το καρέ εικόνων που επιστρέφει η μπροστινή κάμερα, καθορίζει την περιοχή των οφθαλμών και της θέσης του βλέμματος του υποκειμένου στην οθόνη και προσδιορίζει το σημείο εστίασης σε κάθε χρονική στιγμή που το υποκείμενο εξετάζει το οπτικό καθήκον στο οποίο υποβλήθηκε. Η κεντρική θέση της κόρης εξαρτάται από το σημείο στο οποίο κατευθύνεται πάνω στην οθόνη για την ανάγνωση των κειμένων, από τη θέση και τις κινήσεις του κεφαλιού του υποκειμένου, στην απόδοση των αλγορίθμων ανίχνευσης του βλέμματος και του ολοκληρωμένου μοντέλου των οφθαλμών.

Για τη μέτρηση της κατανομής του βλέμματος στην οθόνη με τη χρήση του χάρτη θερμότητας (Heatmap) που χρησιμοποιείται ευρέως στην απεικόνιση της οπτικής προσοχής δημιουργήθηκαν οι εικόνες που απεικονίζονται στην Εικόνα 9. Τα συγκεκριμένα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με την οπτικοποίηση των συντεταγμένων πάνω στην οθόνη του κινητού του συνόλου των δεδομένων για το δεξί οφθαλμό αρχικά σε διάγραμμα διασποράς της Εικόνας 10 και την εφαρμογή του φίλτρου του Gauss με διαφορετικές τιμές για την οπτική εξομάλυνση στο διάγραμμα.

Να αναφερθεί ότι το εικονοστοιχείο 0, 0 της οθόνης του κινητού είναι το πάνω δεξιά, συνεπώς η αρχή των αξόνων αντιστοιχεί στην περιοχή πάνω δεξιά της οθόνης του κινητού. Παρατηρείται ότι υπάρχει κατανομή του βλέμματος σε ολόκληρη την οθόνη, ωστόσο η περιοχή της οθόνης που συγκέντρωσε τα περισσότερα βλέμματα όλων των χρηστών είναι η επάνω θέση της οθόνης με έμφαση δεξιά. Η συγκεκριμένη συγκέντρωση της κατανομής οφείλεται στο ότι οι χρήστες διέφεραν στα χαρακτηριστικά του ύψους, της θέσης του κεφαλιού, τις ακούσιες κινήσεις, την κλίση του κεφαλιού και των οφθαλμών ως προς την κάμερα του κινητού και γι' αυτό το λόγο οι τιμές που συνέκλιναν περισσότερο και ήταν κοινές για όλους, ήταν οι



Σχήμα 9: Κατανομή του βλέμματος του δεξί οφθαλμού όλων των χρηστών.



Σχήμα 10: Διάγραμμα διασποράς της κατανομής του βλέμματος στην οθόνη για το δεξί οφθαλμό όλων των χρηστών.

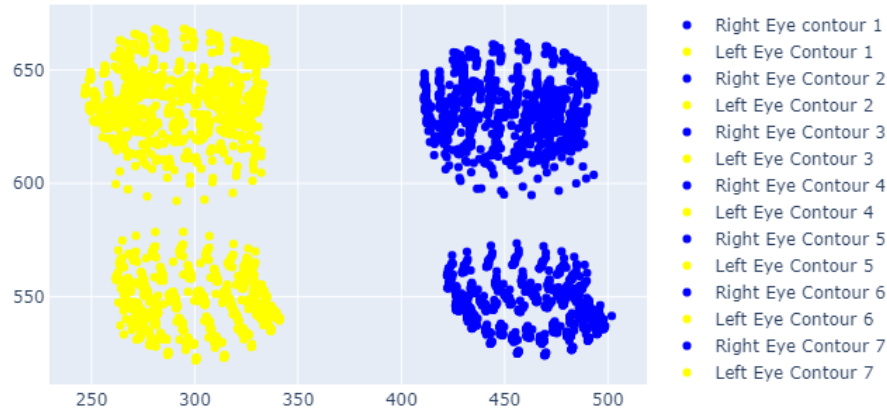
συντεταγμένες της θέσης του κέντρου με κλίση προς τα δεξιά. Το αρχικό διάγραμμα διασποράς για το σύνολο των δεδομένων που απεικονίζεται στην Εικόνα 10 έχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και δεν ήταν επαρκές για να εξαχθούν συμπεράσματα ταξινόμησης για τη θέση του βλέμματος επάνω στην οθόνη, συνεπώς προτιμήθηκε η απεικόνιση του κάθε χρήστη ξεχωριστά.

5.4.1 Ανάλυση σε διαγράμματα διασποράς

Με την καταγραφή των δεκαέξι σημείων του περιγράμματος του κάθε οφθαλμού υπάρχει η δυνατότητα απομόνωσης της περιοχής ενδιαφέροντος του οφθαλμού για περαιτέρω επεξεργασία των στοιχείων του συνόλου δεδομένων. Στην Εικόνα 11 απεικονίζονται οι συντεταγμένες των δεκαέξι σημείων για έναν τυχαίο χρήστη. Παρόμοια ήταν η απεικόνιση για τους υπόλοιπους χρήστες.

Με την καταγραφή των σημείων θέσης του βλέμματος για τον κάθε οφθαλμό και την οπτικοποίηση του σε διάγραμμα διασποράς των δεδομένων καταλήγουμε στα παρακάτω σχεδιαγράμματα για τον αριστερό και τον δεξί οφθαλμό αντίστοιχα, για έναν τυχαίο χρήστη, στην προκειμένη ο χρήστης 3, όπως απεικονίζονται στις Εικόνες 12α', 12β'. Παρατηρούμε ότι η κατανομή του βλέμματος στην οθόνη είναι διακριτή, ως προς τα τέσσερα τεταρτημόρια, με μικρή απόκλιση για την περιοχή επάνω δεξιά τη οθόνης (αρχή των αξόνων). Η συγκεκριμένη απόκλιση πιθανότατα οφείλεται στην ακούσια μικρή κίνηση του κεφαλιού κατά μήκος της οθόνης στη διάρκεια ανάγνωσης του κειμένου. Ο χρήστης για να αναγνώσει το κείμενο μετακινεί ομαλά και ακούσια το κεφάλι στη συγκεκριμένη θέση. Προσθετικά να αναφερθεί ότι στη συγκεκριμένη περιοχή ήταν το πρώτο κείμενο που εμφανίστηκε στη διάρκεια του πειράματος.

Η κατηγοριοποίηση των θέσεων των 16 σημείων του περιγράμματος των ο-



Σχήμα 11: Κατανομή των δεκαέξι σημείων της περιοχής του οφθαλμού στην οθόνη του κινητού για το χρήστη 3

φθαλμών στο διάγραμμα της διασποράς 11 παρατηρείται ότι είναι αρκετά σαφής ως προς τη θέση τους στην οθόνη σε αντίθεση με τα διαγράμματα διασποράς των θέσεων του βλέμματος στην οθόνη στις Εικόνες 12α' και 12β'. Η διαφορά που παρατηρούμε ανάμεσα στις απεικονίσεις προκύπτει για το λόγο ότι οι θέσεις των οφθαλμών και το περιγράμμά τους συνεπώς, ήταν σταθερά κατά τη διάρκεια της καταγραφής του εκάστοτε χρήστη, ενώ η θέση του βλέμματος κινούνταν σε όλο το μήκος και πλάτος της οθόνης, κατευθυνόμενο από το κείμενο ανάγνωσης.

Η οπτικοποίηση σε διαγράμματα διασποράς έχει σκοπό να διερευνήσει την δυνατότητα ταξινόμησης των οφθαλμικών δεδομένων που καταγράφηκαν για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Παρατηρώντας τα σχετικά διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ταξινόμηση των δεδομένων στη θέση της οθόνης του κινητού τηλεφώνου είναι εφικτή.

5.4.2 Ταξινόμηση

Για την ταξινόμηση των δεδομένων δοκιμάστηκαν διάφοροι ταξινομητές σε περιβάλλον Python. Ο λόγος της δοκιμής ήταν για να διερευνηθεί η κατηγοριοποίηση των δεδομένων με τη χρήση απλών ταξινομητών. Εξετάστηκαν οι αλγόριθμοι ταξινόμησης Multi-layer Perceptron (MLP), Support Vector Machine (SVM) Naive Bayes, Decision Tree, Random Forest και Logistic Regression.

Για την αρχική ταξινόμηση, χρησιμοποιήθηκε ολόκληρο το σύνολο δεδομένων καταγραφής. Τα δεδομένα χωρίστηκαν σε τυχαία δεδομένα εκπαίδευσης 70%



(α') Θέση βλέμματος αριστερού οφθαλμού για το χρήστη 3

(β') Θέση βλέμματος δεξιού οφθαλμού για το χρήστη 3

Σχήμα 12: Καταγεγραμμένη θέση του βλέμματος στην οθόνη των δύο οφθαλμών του χρήστη 3

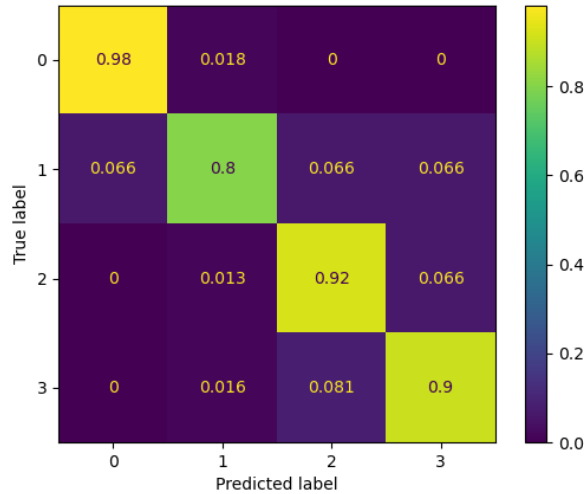
και σε δεδομένα ελέγχου 30%. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε ο κάθε ταξινομητής και ο αλγόριθμος εκπαιδεύτηκε με τα δεδομένα εκπαίδευσης εισόδου. Για τον κάθε έλεγχο έγινε πρόβλεψη στο σύνολο δεδομένων των δεδομένων ελέγχου με ακρίβεια που φαίνονται στον Πίνακα 4. Παρατηρήθηκε, ότι ο αλγόριθμος του δέντρου απόφασης εμφανίζει μεγαλύτερα ποσοστά ακρίβειας στο συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων. Παράλληλα, το δέντρο απόφασης που προέκυψε είναι αρκετά περίπλοκο με πολλαπλούς κόμβους.

	Ακρίβεια
Decision Tree	94 %
Naive Bayes	38 %
SVM	70 %
Logistic Regression	55 %
Random Forest	65 %
MLP	77 %

Πίνακας 4: Μέτρηση ακρίβειας των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης που εφαρμόστηκε στα συνολικά δεδομένα χωρίς 10-fold cross validation

Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται σε διάγραμμα confusion matrix heatmap η αξιολόγηση της απόδοσης του ταξινομητή του δέντρου απόφασης στο σύνολο των δεδομένων για την ανίχνευση θέσης βλέμματος στην οθόνη σε κανονικοποιημένη μορφή. Το συγκεκριμένο διάγραμμα προέκυψε μετά την εκπαίδευση του ταξινομητή με τα δεδομένα εκπαίδευσης εισόδου και την εφαρμογή του ταξινομητή για την πρόβλεψη της θέσης του βλέμματος στην οθόνη στα δεδομένα ελέγχου (30% του συνόλου δεδομένων). Τα διαγώνια στοιχεία αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των χαρακτηριστικών για τα οποία η προβλεπόμενη ετικέτα είναι ίση με την πραγματική ετικέτα, ενώ τα εκτός διαγώνια στοιχεία είναι εκείνα που δεν έχουν επισημανθεί

σωστά από τον ταξινομητή του δέντρου απόφασης. Παρατηρείται ότι οι υψηλές διαγώνιες τιμές του confusion matrix υποδεικνύουν σωστές προβλέψεις του μοντέλου για το σύνολο των δεδομένων.



Σχήμα 13: Κανονικοποιημένος Confusion matrix με χρήση του ταξινομητή δέντρου απόφασης για την πρόβλεψη της θέσης του βλέμματος στην οθόνη που εφαρμόστηκε στο σύνολο των δεδομένων

Στη συνέχεια, για την κατηγοριοποίηση των δεδομένων επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ταξινόμησης του δέντρου αποφάσεων Decision Tree, επειδή παρείχε τα αποτελέσματα ταξινόμησης με τη μεγαλύτερη ακρίβεια. Στα δεδομένα εφαρμόστηκε 10-fold cross validation για την προεπεξεργασία τους και για την αποφυγή του overfitting. Επιπλέον, ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε για το σύνολο των δεδομένων όλων των χρηστών ωστόσο μετά την εφαρμογή του 10-fold cross validation, η συνολική ακρίβεια ήταν επαρκής, με μέση τιμή 64% αλλά όχι ικανοποιητική.

Για την συγκριτική μελέτη της απόδοσης και της αξιολόγησης του συστήματος ανίχνευσης ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε για κάθε χρήστη ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα για κάθε μεμονωμένο χρήστη που προέκυψαν εμφάνισαν σημαντική βελτίωση, τόσο για τη θέση του βλέμματος, όσο και για τα 16 σημεία του περιγράμματος των οφθαλμών της μελέτης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5. Παρατηρείται ότι η μέτρηση της ακρίβειας μετά από 10-fold cross validation για κάθε χρήστη ήταν υψηλότερη σε σχέση με την εφαρμογή του ταξινομητή στο σύνολο των δεδομένων. Η μέση τιμή των παραμέτρων για τη ταξινόμηση κάθε μεμονωμένου χρήστη παρατηρήθηκε ότι είναι 93%, ενώ η μέση τιμή της απόδοσης της ακρίβειας των παραμέτρων της ταξινόμησης για το σύνολο των χρηστών που καταγράφησαν με την εφαρμογή του ταξινομητή είναι 64%. Η διαφορά μεταξύ μέση τιμής και

ακρίβειας για κάθε παράμετρο μέτρησης των χρηστών υποδεικνύει τη βελτιωμένη απόδοση του συστήματος με αρχική βαθμονόμηση του βλέμματος του για κάθε χρήστη ξεχωριστά, πριν την εφαρμογή του ταξινομητή του δέντρου αποφάσεων.

Συνεπώς, επειδή η συνολική ακρίβεια της προσέγγισης δεν ήταν επαρκής για το σύνολο των δεδομένων, αλλά μόνο για την εκάστοτε περίπτωση ξεχωριστά, προτείνεται η αρχική βαθμονόμηση του συστήματος με δεδομένα κάθε μεμονωμένου χρήστη, ώστε να γίνεται αποδοτική χρήση του ταξινομητή του δέντρου απόφασης στο σύστημα.

	Χρήστες							Συνολικά Δεδομένα	
	1	2	3	4	5	6	7	Μέση τιμή	Ακρίβεια
Θέση βλέμματος	91%	93%	89%	93%	85%	96%	78%	89%	66%
Περιοχή ματιού 0	94%	100%	92%	97%	94%	95%	92%	94%	56%
Περιοχή ματιού 1	95%	96%	91%	96%	93%	98%	88%	93%	61%
Περιοχή ματιού 2	94%	92%	90%	97%	91%	97%	88%	92%	61%
Περιοχή ματιού 3	96%	89%	90%	96%	89%	95%	89%	92%	62%
Περιοχή ματιού 4	96%	82%	91%	95%	89%	96%	89%	91%	66%
Περιοχή ματιού 5	95%	87%	90%	95%	89%	94%	88%	91%	66%
Περιοχή ματιού 6	95%	94%	92%	95%	92%	94%	85%	92%	66%
Περιοχή ματιού 7	95%	96%	90%	98%	94%	93%	85%	93%	66%
Περιοχή ματιού 8	95%	96%	90%	98%	92%	94%	90%	94%	65%
Περιοχή ματιού 9	96%	96%	91%	98%	92%	92%	90%	94%	63%
Περιοχή ματιού 10	95%	100%	92%	95%	94%	92%	90%	94%	70%
Περιοχή ματιού 11	96%	99%	90%	93%	91%	94%	91%	93%	65%
Περιοχή ματιού 12	95%	95%	91%	96%	94%	92%	91%	93%	62%
Περιοχή ματιού 13	96%	98%	91%	95%	91%	96%	88%	94%	69%
Περιοχή ματιού 14	95%	98%	91%	95%	92%	94%	89%	93%	63%
Περιοχή ματιού 15	96%	99%	91%	94%	93%	97%	90%	94%	63%
Μέση τιμή	95%	95%	91%	96%	91%	95%	88%	93%	64%
Διάμεση τιμή	95%	96%	91%	95%	92%	94%	89%	93%	65%

Πίνακας 5: Εφαρμογή του δέντρου απόφασης με 10-fold cross validation στο σύνολο των δεδομένων και σε κάθε χρήστη ξεχωριστά για την ταξινόμηση της θέσης του βλέμματος στην οθόνη και των 16 σημείων του περιγράμματος της περιοχής των οφθαλμών

5.4.3 Συσχέτιση με την οπτική προσοχή

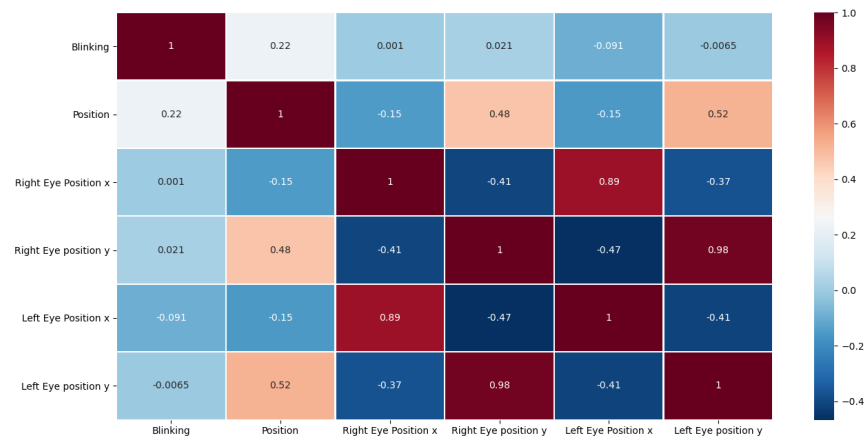
Για να βρεθεί η συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών που παρατηρήθηκαν εφαρμόστηκαν οι στατιστικοί έλεγχοι συσχέτισης του Pearson, Spearman και του Kendall με τα ακολουθία αποτελέσματα που εμφανίζονται στον Πίνακα 6. Παρατηρείται ότι οι συντελεστές συσχέτισης (correlation) του κάθε στατιστικού ελέγχου είναι κοντά στο μηδέν 0 και θετική και είναι στατιστικά σημαντικά ($p\text{-value} < 0.01$) οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι εμφανίζουν μικρή συσχέτιση μεταξύ τους έως σταθερή γιατί εμφανίζουν μικρό θετικό correlation.

Επιπλέον, για την εξακριβώση της υπόθεσης της οπτικής παραμέτρου της συχνότητας βλεφαρίσματος του οφθαλμού με το ενδιαφέρον του χρήστη για το περιεχόμενο του μηνύματος που εμφανίζεται στις διαφορετικές θέσεις της οθόνης έγινε

	Correlation	p-value
Pearson	0.22	<0.01
Spearman	0.22	<0.01
Kendall	0.2	<0.01

Πίνακας 6: Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων συσχέτισης των παραμέτρων των καταγεγραμμένων βλεφαρισμάτων με τη θέση του αντίστοιχου κειμένου στην οθόνη

απεικόνιση σε διάγραμμα heatmap, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14 με τον έλεγχο συσχέτισης του Pearson. Παρατηρήθηκε ότι οι συγκεκριμένοι παράμετροι που μελετήθηκαν δεν εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση μεταξύ τους, όπως υποδεικνύεται στο διάγραμμα heatmap. Συνεπώς, τα στατιστικά αποτελέσματα και το διάγραμμα που παρουσιάστηκε δεν εμφάνισαν κάποια πιθανή συσχέτιση, πιθανότατα λόγω του μικρού μεγέθους του δείγματος των δεδομένων που τροφοδότησαν τους ελέγχους. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα αποδεικνύεται η υψηλή συσχέτιση που εμφανίζει η εκάστοτε συντεταγμένη της οθόνης (x ή y) που αντιστοιχεί σε κάθε οφθαλμό (αριστερό - δεξί), αλλά δεν εμφανίζεται σημαντική συσχέτιση μεταξύ των βλεφαρισμάτων.



Σχήμα 14: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης της περιοχής του βλέμματος και της θέσης στην οθόνη με τον αριθμό βλεφαρισμάτων.

Οι εθελοντές - χρήστες, αφού ολοκλήρωσαν επιτυχώς την εφαρμογή, αξιολόγησαν με βαθμολογία το περιεχόμενο των κειμένων που ανέγνωσαν, ως προς το ενδιαφέρον τους, κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Η κλίμακα βαθμολόγησης είναι από το 1 – 4 με 1 να αντιστοιχεί στο χαρακτηρισμό, πολύ ενδιαφέρον ενώ το 4 να αντιστοιχεί στο λιγότερο ενδιαφέρον. Τους δόθηκε σχετική

Χρήστες	Συνταγή		Ποίημα		Φιλοσοφικό κείμενο		Σχολιασμός	
	Βαθ/γία	Βλεφ/τα	Βαθ/γία	Βλεφ/α	Βαθ/γία	Βλεφ/α	Βαθ/γία	Βλεφ/τα
1	4	0	1	1	2	1	3	2
2	4	0	1	0	2	0	3	0
3	4	2	2	8	3	5	1	10
4	3	8	1	0	2	10	4	7
5	4	1	2	0	1	0	3	0
6	4	4	1	5	3	10	2	12
7	4	0	1	1	2	1	3	0
Συνολο	27	15	9	15	15	27	19	31

Πίνακας 7: Αποτελέσματα αξιολόγησης των χρηστών ως προς το περιεχόμενο των κειμένων σε συνδυασμό με το καταγεγραμμένο σύνολο βλεφαρισμάτων

οδηγία να τα βαθμολογήσουν και ο Πίνακας 7 παραθέτει τα αποτελέσματα με το συνολικό αριθμό βλεφαρισμάτων που μετρήθηκε από τον ανιχνευτή.

Τα αποτελέσματα βαθμολόγησης έδειξαν ότι το περισσότερο ενδιαφέρον κείμενο ήταν το ποίημα (πάνω δεξιά), μετά το φιλοσοφικό κείμενο, ακολουθεί ο σχολιασμός στην επικαιρότητα και τέλος οδηγίες συνταγής μαγειρικής. Πειραματικά η καταγραφή των αριθμών βλεφαρισματος έδειξε ότι στα κείμενα της επικαιρότητας και του φιλοσοφικού κειμένου ο αριθμός των βλεφαρισμάτων αυξήθηκε. Τα συγκεκριμένα κείμενα εμφανίστηκαν τελευταία στη σειρά εμφάνισης των κειμένων και η θέση τους ήταν στο κάτω μέρος της οθόνης.

Οι παράγοντες που μπορεί να συντρέχουν που η συχνότητα βλεφαρίσματος αυξήθηκε στα τελευταία κείμενα μπορεί να είναι η κόπωση του οφθαλμού μετά την παρέλευση αρκετού χρόνου σε εστίαση οθόνης. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η δυσκολία ανάγνωσης κειμένων (φιλοσοφικών) σε λίγο χρόνο επηρεάζει τον αριθμό των βλεφαρισμάτων. Παράλληλα, η συνιστώσα του πραγματικού ενδιαφέροντος του χρήστη και η μέτρηση της οπτικής προσοχής του επηρεάζει τη συχνότητα βλεφαρίσματος, καθώς και καταλυτικό ρόλο έχει η αξιοπιστία του αλγόριθμου εύρεσης της πιθανότητας του οφθαλμού να είναι ανοιχτός κ.α για την ακριβή καταγραφή των βλεφαρισμάτων. Άλλοι λόγοι που μπορεί να συντρέχουν είναι η κόπωση του ατόμου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος και η πιθανή υπνηλία του, οι οποίοι δεν καταγράφηκαν στο συγκεκριμένο πείραμα.

Λόγω του μικρού μεγέθους του δείγματος βλεφαρισμάτων, δεν μπορούμε να εξάγουμε αξιόπιστα συμπεράσματα, όσον αφορά τη συσχέτιση με τον ενδιαφέρον του χρήστη και μόνο τη συχνότητα βλεφαρίσματος.

Συνεπώς, με τα αποτελέσματα της συσχέτισης των στατιστικών ελέγχων που οδήγησαν σε μικρή συσχέτιση των μεταβλητών βλεφαρίσματος και της θέσης του οφθαλμού στην οθόνη, σε συνδυασμό με τα δεδομένα παρατήρησης των αποτελεσμάτων, είναι αμφίβολο να εξάγουμε πιθανό συμπέρασμα για την μέτρηση της οπτικής προσοχής, μόνο με την παράμετρο του βλεφαρίσματος.

6 Συμπεράσματα και Συζήτηση

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη διερεύνηση της απόδοσης της τεχνολογίας ιχνηλάτισης των οφθαλμικών κινήσεων για την μέτρηση της οπτικής προσοχής σε ιατρικές εφαρμογές. Για το σκοπό αυτό, υλοποιήθηκε μια απλή εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου συστήματος ανίχνευσης και καταγραφής των συναφών οπτικών δεδομένων με τη χρήση της κάμερας έξυπνων κινητών τηλεφώνων Android. Η υλοποίηση και η χρήση των εργαλείων που ενσωματώθηκαν στην εφαρμογή καθώς και η μετέπειτα ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν δημιούργησαν ένα κατανοητό πλαίσιο των αναγκών που προκύπτουν και των περιορισμών που έχουν χαρτογραφηθεί στο συγκεκριμένο πεδίο έρευνας. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την μελλοντική έρευνα στον τομέα της καταγραφής του βλέμματος.

6.1 Κύρια Ευρήματα

Η ανίχνευση και η παρακολούθηση της δραστηριότητας των οφθαλμών αποδείχθηκε ότι είναι ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο της έρευνας με αξιοσημείωτες ερευνητικές ευκαιρίες υλοποίησης συστημάτων ιχνηλάτισης των οφθαλμών σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, με την παρούσα διπλωματική εργασία δρομολογήθηκε μία κατεύθυνση, όσον αφορά τη χαρτογράφηση των απαιτήσεων και των περιορισμών υλοποίησης παρόμοιων συστημάτων, τα σχετικά βήματα υλοποίησης με τη μορφή προτυποποιημένης μεθοδολογίας. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αποτέλεσε μια διακριτική, άνετη και κοινωνικά αποδεκτή μέθοδο παρακολούθησης των οφθαλμών και καταγραφής του βλέμματος για έξυπνα κινητά τηλέφωνα.

Η υλοποίηση της βιβλιοθήκης Firebase ML Kit αποδείχτηκε ότι προσφέρει υψηλά ποσοστά ακρίβειας με τη χρήση της ως ανιχνευτή σε εφαρμογές για έξυπνα κινητά τηλέφωνα. Η ενσωμάτωση και η υλοποίηση της σε εφαρμογή του Android Studio και η συνεχής βελτιστοποίηση της με τη χρήση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης της Google που χρησιμοποιεί την καταστούν ιδανικό εργαλείο ανίχνευσης των επιθυμητών χαρακτηριστικών του προσώπου. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την περαιτέρω επεξεργασία εικόνας και κατάτμησης των επιθυμητών περιοχών για την εύρεση επιπλέον οφθαλμικών παραμέτρων.

Στην τρέχουσα μελέτη, πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα δειγματοληψίας μιας ημέρας, όπου οι συμμετέχοντες χρησιμοποίησαν διαδοχικά την εφαρμογή για να συλλεχθούν τα δεδομένα καταγραφής του βλέμματος και της οπτικής προσοχής στην οθόνη του κινητού. Η πιλοτική εφαρμογή και το πείραμα καταγράφουν τις συντεταγμένες των οφθαλμών και την μέτρηση των βλεφαρισμάτων, με σκοπό τη μέτρηση της οπτικής προσοχής στην ανάγνωση ανομοιογενών κειμένων από μέσους ανθρώπους.

Η υλοποίηση του ολοκληρωμένου συστήματος και η εφαρμογή των αλγορίθμων και των εργαλείων χρησιμοποιήθηκαν παρέχουν μια κατανοητή εικόνα των αναγκών και των περιορισμών για την κατηγοριοποίηση του βλέμματος στην οθόνη του κινητού τηλεφώνου με απλές υποδομές υλικοτεχνικού εξοπλισμού.

Στην περίπτωση της ταξινόμησης του συνόλου των οπτικών δεδομένων στα τέσσερα τεταρτημόρια της οθόνης του κινητού, ο ταξινομητής του δέντρου απο-

φάσεων απέδωσε τα βέλτιστα αποτελέσματα, ενώ δοκιμάστηκαν και οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης SVM, Naive Bayes, MLP, Logistic Regression και Random Forest. Στη συνέχεια, η ταξινόμηση των δεδομένων στις περιοχές της οθόνης του κινητού τηλεφώνου έγινε σε δύο επίπεδα. Η ταξινόμηση, αρχικά διεξήχθη στο σύνολο των δεδομένων όλων των χρηστών για τον προσδιορισμό της θέσης του βλέμματος στην οθόνη του κινητού και μετέπειτα, εφαρμόστηκε για κάθε μεμονωμένο χρήστη. Τα αποτελέσματα της μέτρησης του δείκτη ακρίβειας ήταν σαφώς καλύτερα για τον κάθε χρήστη της εξατομικευμένης ταξινόμησης καθώς η ταξινόμηση είχε μεγαλύτερη ακρίβεια της τάξης 94%. Συνεπώς ο ατομικός ταξινομητής πετυχαίνει καλύτερα αποτελέσματα έναντι του συλλογικού.

Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι η πρόβλεψη των δεδομένων μετά από 10-fold cross validation που επετεύχθει παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα προσδιορισμού του βλέμματος για την υποστήριξη της λήψης απόφασης της θέσης του οφθαλμού στην οθόνη και την μέτρηση της οπτικής προσοχής για κάθε μεμονωμένο χρήστη. Συμπερασματικά, προτείνεται η αρχική βαθμονόμηση των οφθαλμών του κάθε χρήστη για την καλύτερη απόδοση του μοντέλου για την μέτρηση της οπτικής προσοχής.

Όσον αφορά τη μέτρηση της οπτικής προσοχής μπορούν να εξαχθούν σημαντικές πληροφορίες αναλύοντας τους κατάλληλους οφθαλμικούς δείκτες για την μέτρηση της. Παρατηρήθηκε ότι τα κείμενα με επίκαιρα ζητήματα και δύσκολο περιεχόμενο προσελκύουν περισσότερο το ενδιαφέρον του χρήστη προκαλώντας μεγαλύτερο αριθμό βλεφαρισμάτων. Ωστόσο, εξαιτίας του μικρού μεγέθους του δείγματος του πειράματος τα αποτελέσματα, όσον αφορά τη συσχέτιση των σχετικών παραμέτρων θέσης ενδιαφέροντος στην οθόνη και του δείκτη μέτρησης του αριθμού βλεφαρισμάτων απέδωσαν συμπεράσματα με χαμηλή θετική συσχέτιση. Επιπλέον, ο αριθμός των βλεφαρισμάτων δεν εξαρτάται μόνο από το ενδιαφέρον του χρήστη για το συγκεκριμένο περιεχόμενο αλλά επηρεάζεται από επιπλέον παράγοντες όπως τη συνολική χρονική διάρκεια παρατήρησης, τη δυσκολία ανάγνωσης δυσνόητων κειμένων σε περιορισμένο χρόνο, τη σωματική και ψυχική κόπωση των υποκειμένων, την υπνηλία, πιθανές εξωτερικές παρεμβολές και την συνολική απόδοση των αλγορίθμων καταγραφής των βλεφαρισμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και μπορεί να έχουν αποκλίσεις από το πραγματικό αριθμό βλεφαρισμάτων.

Λόγω του μικρού δείγματος των χρηστών και των συνολικών πολυπαραγοντικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη συχνότητα βλεφαρισμάτων του υποκειμένου τα συμπεράσματα εξάγονται με επιφύλλαξη. Παρόλ' αυτά μπορούν να αποτελέσουν υπόβαθρο για περαιτέρω επεξεργασία, ανάλυση και υλοποίηση του συστήματος και των δεδομένων με σκοπό την ένταξη μοντέλων ταξινομητών με αρχική βαθμονόμηση του βλέμματος του χρήστη σε ιατρικές εφαρμογές σε έξυπνα κινητά τηλέφωνα για τη μέτρηση της οπτικής προσοχής μέσω οφθαλμικών παραμέτρων. Επίσης

6.2 Περιορισμοί

Ένα αξιοπίστο σύστημα ανίχνευσης και παρακολούθησης του βλέμματος και τη κόρης του οφθαλμού προϋποθέτει την υψηλής ακρίβειας εξαγωγή των πληροφοριών που μελετώνται. Ωστόσο, όσο παρατηρήθηκε στη σχετική βιβλιογραφία και στην πειραματική υλοποίηση του συστήματος ιχνηλάτισης των οφθαλμών, τα συγκεκριμένα συστήματα υπόκεινται σε τεχνικούς ή φυσικούς περιορισμούς. Είναι

εφοδιασμένα με ιδιαίτερους περιοριστικούς παράγοντες υλοποίησης, όσον αφορά τον υλικοτεχνικό εξοπλισμό, την απόδοση των αλγορίθμων, την ηθική της συνεχούς καταγραφής και επεξεργασίας των ευαίσθητων δεδομένων του χρήστη κ.α.

Επίσης, για την ευρεία χρήση των συγκεκριμένων εργαλείων είναι σημαντική με την αύξηση της απόδοσης του συστήματος και την μείωση του κόστους για να είναι οικονομικά προσβάσιμη και αξιοποιήσιμη από τους μελετητές και από τους χρήστες. Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι η ανίχνευση του βλέμματος σε πραγματικό χρόνο αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση για την τεχνολογία της παρακολούθησης του οφθαλμού.

Κάποιοι από τους περιορισμούς που σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης είναι οι παρακάτω:

1. Η παρακολούθηση των οφθαλμών με συσκευές ανίχνευσης ακριβείας είναι αρκετά δαπανηρή και η χρήση του εξοπλισμού απαιτεί να γίνεται από εξειδικευμένους και εκπαιδευμένους ερευνητές, όταν απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός.
2. Επιπλέον, πολλές συσκευές παρακολούθησης οφθαλμού, απαιτούν από το χρήστη να παραμείνουν ακίνητοι, συνεπώς γίνονται δύσχρηστες και άβολες για το χρήστη.
3. Σημαντικό ρόλο παίζει ότι με τη συνθήκη συνεχούς παρακολούθησης των δραστηριοτήτων του ατόμου, ο χρήστης ενδέχεται να συμπεριφέρεται αφύσικα.
4. Ακόμη, παρόλους τους αλγορίθμους ανίχνευσης και την εξέλιξη τους, δεν είναι πάντα προφανές η μετάδοση και παρακολούθηση της δραστηριότητας του οφθαλμού με αξιοπιστία.
5. Η παρακολούθηση των οφθαλμών για τη διάγνωση και τη θεραπεία ασθενειών σε πληθυσμούς θα πρέπει να γίνεται μακροχρόνια για να είναι αποτελεσματική. Διαφορετικά τα αποτελέσματα που θα διεξάγονται θα είναι από μεμονωμένα πειράματα, χωρίς ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την εξέλιξη της μελέτης της νόσου.
6. Η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας θα πρέπει να είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί από το ευρύ κοινό σε ετερογενή πληθυσμό, σε διαφορετικά σχήματα προσώπου και ματιών, σε διαφορετικούς τόνους δέρματος, καθώς και σε κίνηση του κεφαλιού και του σώματος καθώς επηρεάζεται.

Συνδυαστικά, οι περιορισμοί που συνοδεύουν την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος εμποδίζουν την ταχεία εξέλιξη και την ευρεία εφαρμογή τους. Επιπλέον, με τις τωρινές γνώσεις επεξεργασίας εικόνας, οι φυσικοί γεωμετρικοί περιορισμοί καθιστούν αρκετά δύσκολη την προσέγγιση της κόρης του οφθαλμού και την μέτρηση της διαστολής της με μεγάλη ακρίβεια για την αποδοτικότερη μελέτη της οπτικής προσοχής και της οφθαλμικής ιχνηλάτισης.

6.3 Συζήτηση και Μελλοντικές προεκτάσεις

Η προτεινόμενη μελέτη ανοίγει συζήτηση για την ευρύτερη δυνατότητα εφαρμογής της ανίχνευσης σε ιατρικές εφαρμογές καθημερινής χρήσης, όσον αφορά τη βελτίωση του τρόπου ζωής του χρήστη, τη διάγνωση ασθενειών με τη μέτρηση οφθαλμικών μοτίβων οπτικής δραστηριότητας και τη θεραπεία των ασθενών.

Η εξατομικευμένη ταξινόμηση που προτείνεται βασίζεται στην βέλτιστη ταξινόμηση που πετυχαίνει ο ταξινομήτης μετά από την αρχική βαθμονόμηση του βλέμματος του χρήστη. Η συγκεκριμένη ιδιαιτερότητα οφείλεται στα ατομικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου υποκειμένου που εξαρτώνται από τους παράγοντες ύψους, τις θέσεις των οφθαλμών, τις οπτικές εκτροπές και την συνολική αστάθεια των οφθαλμοκινητικών μυών που δυσχεραίνει την οικουμενική κατηγοριοποίηση της θέσης του βλέμματος στην οθόνη.

Η δυνατότητα εκπαίδευσης των αλγορίθμων από τα δεδομένα που το ίδιο συλλέγει με τη χρήση συσκευών καθημερινής χρήσης βελτιώνει συνεχώς της απόδοσης των ολοκληρωμένων συστημάτων. Με αυτό τον τρόπο, το σύστημα μπορεί να εκπαιδευτεί από τις οφθαλμικές κινήσεις του εκάστοτε υποκειμένου και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του με τελικό στόχο την ακριβή εκτίμηση της θέσης του βλέμματος στην οθόνη και την μέτρηση της οπτικής προσοχής του χρήστη. Συνδυαστικά, η εκπαίδευση του ιδανικού συστήματος ταξινόμησης θα βασιζόταν σε μεγάλο αριθμό μεμονωμένων διαφορετικών οφθαλμικών δεδομένων για την συνολική αξιολόγηση του βλέμματος σε ετερογενή πληθυσμό, με σκοπό την υλοποίηση ισχυρού και καινοτόμου συστήματος ιχνηλάτισης των οφθαλμών σε οθόνη φορητών συσκευών.

Η ικανότητα της ανίχνευσης και παρακολούθησης του βλέμματος στη μεγάλη μεταβλητότητα των οφθαλμικών κινήσεων και παραμέτρων των διαφορετικών ανθρώπων αποτελεί μια δύσβατη περιοχή της έρευνας και αντιπροσωπεύει μια σημαντική κατεύθυνση για μελλοντική μελέτη.

Αρχικά, η διερεύνηση των ορίων των καταγεγραμμένων παραμέτρων της εφαρμογής που υλοποιήθηκε για την βέλτιστη ταξινόμηση του βλέμματος στην οθόνη θα ενίσχυε τη χαρτογράφηση πιθανής μελλοντικής προσέγγισης για την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, καθώς και τη συγκριτική αξιολόγηση με παρόμοια συστήματα παρακολούθησης των οφθαλμών.

Ο κύριος στόχος μιας μελλοντικής μελέτης και υλοποίησης ενός συστήματος παρακολούθησης του βλέμματος είναι η μείωση σε σημαντικό βαθμό των περιορισμών που ενυπάρχουν σε παρόμοια συστήματα, με σκοπό την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας σε κάποιο βαθμό. Με αυτό τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα στην επιστήμη της τεχνολογίας της Πληροφορικής να ενισχύσει ερευνητικά στη βελτίωση της υγείας του ανθρώπου και στην επιστήμη της Ιατρικής.

Η κατηγοριοποίηση του βλέμματος στην οθόνη που είναι χωρισμένη σε τέσσερα τεταρτημόρια είναι επαρκής ωστόσο, θα ήταν σκόπιμο να ενταχθεί στην ταξινόμηση του βλέμματος στην οθόνη και μία επιπλέον κατηγορία που θα χαρακτηρίζει του βλέμμα εκτός οθόνης. Για ερευνητικούς λόγους, με τη συγκεκριμένη κλάση έλλειψης βλέμματος πάνω στην οπτική σκηνή ενισχύεται η καταγραφή της έλλειψης οπτικής προσοχής του χρήστη. Επίσης, θα ήταν ενδιαφέρον η οπτική σκηνή να εναλλασσόταν με τη δομή οπτικού παιχνιδιού εμφάνισης οπτικών σημάτων ή εικόνων για την καταγραφή και παρακολούθηση της οφθαλμικής δραστηριότητας.

Επιπλέον, η αξιολόγηση του συστήματος έγινε σε πειραματικές συνθήκες γραφείου με σταθερές κινήσεις του κεφαλιού, συνεπώς θα ήταν σκόπιμο να διερευνηθεί και η απόδοση εκτίμησης των αλγορίθμων ανίχνευσης σε πραγματικές συνθήκες για την καταγραφή των ιδιαίτερων οφθαλμικών χαρακτηριστικών με ακρίβεια. Συνεπώς, η πειραματική προσέγγιση σε μη σταθερό και ελεγχόμενο περιβάλλον μπορεί να επηρεάσει την ανίχνευση των οφθαλμών καθώς εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες φωτισμού.

Παράλληλα, είναι σκόπιμο να διερευνηθεί η μέτρηση της οπτικής προσοχής με την μέτρηση επιπρόσθετων οπτικών παραμέτρων, προσθετικά με το βλεφάρισμα για την εξαγωγή συμπερασμάτων με μεγαλύτερη εγκυρότητα.

Προσθετικά με όσα αναφέρθηκαν, ο προβληματισμός της ερευνητικής κοινότητας και των χρηστών - ασθενών είναι η πιθανή παράβαση της ιδιωτικότητας και της ασφάλειας των άμεσα σχετιζόμενων υποκειμένων που μελετώνται με τη συνεχή παρακολούθηση του βλέμματος τους και την πρόσβαση της κάμερας σε συσκευές καθημερινής χρήσης. Συνεπώς, τα συγκεκριμένα συστήματα συνεχούς παρακολούθησης οφείλουν να αποδίδουν τα μέγιστα αποτελέσματα με αξιοπιστία, με πλήρη σεβασμό στα προσωπικά δεδομένα των χρηστών - ασθενών, για τη βελτίωση της καθημερινότητάς τους.

Γλωσσάρι

Android Package APK Μορφή αρχείου πακέτου που χρησιμοποιείται από το Ανδرويد, καθώς και άλλα λειτουργικά συστήματα που βασίζονται σε Ανδرويد για διανομή και εγκατάσταση εφαρμογών, παιχνιδιών και λογισμικού για κινητά. 30

Application Programming Interface (API) Σύνολο λειτουργιών και διαδικασιών που επιτρέπουν τη δημιουργία εφαρμογών που έχουν πρόσβαση στις δυνατότητες ή τα δεδομένα ενός λειτουργικού συστήματος, μιας εφαρμογής ή άλλης υπηρεσίας. 28

Comma Separated Values (csv) Οριοθετημένο αρχείο κειμένου που χρησιμοποιεί κόμμα για το διαχωρισμό τιμών. 24

Javascript Object Notation (json) Μορφή αρχείου και μορφή ανταλλαγής δεδομένων, η οποία χρησιμοποιεί κείμενο αναγνώσιμο από τον άνθρωπο για την αποθήκευση και τη μετάδοση αντικειμένων δεδομένων. 24

Multi-layer Perceptron (MLP) Κατηγορία φεεδοφορωαδ νευρωνικού δικτύου τεχνητής νοημοσύνης. 40

Support Vector Machine (SVM) Μοντέλα εποπτευόμενης μηχανικής μάθησης με αλγόριθμους που αναλύουν τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση και την ανάλυση παλινδρόμησης. 40

confusion matrix Συγκεκριμένη διάταξη πίνακα που επιτρέπει την οπτικοποίηση της απόδοσης ενός αλγορίθμου, συνήθως μιας εποπτευόμενης μάθησης. 42

cross validation , ή διασταυρωμένη επικύρωση. Τεχνικές επικύρωσης μοντέλου για την αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο τα αποτελέσματα μιας στατιστικής ανάλυσης θα γενικευτούν σε ένα ανεξάρτητο σύνολο δεδομένων. 42

overfitting Σφάλμα μοντελοποίησης που παρουσιάζεται όταν μια συνάρτηση είναι πολύ στενή για ένα περιορισμένο σύνολο σημείων δεδομένων. 42

ανίχνευση θέσης βλέμματος Διαδικασία εύρεσης και καταγραφής του σημείου της θέσης της κόρης του βλέμματος. 41

ανίχνευση οφθαλμών Διαδικασία εύρεσης και καταγραφής των σημείων που οριοθετούν τη θέση των οφθαλμών . 16, 19

δειγματοληψία Λήψη ενός τμήματος από κάποιο ευρύτερο σύνολο. 46

εστίαση Παραμονή του οφθαλμού του χρήστη σε μία συγκεκριμένη μικρή περιοχή για ένα διάστημα. 5

ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (HEΓ) Τεχνική καταγραφής της ηλεκτρικής δραστηριότητας του εγκεφάλου, που μετράται με τη χρήση ηλεκτροδίων, τα οποία είναι τοποθετημένα στο τριχωτό της κεφαλής. 15

ηλεκτροκολογραφία Τεχνική καταγραφής για τη μέτρηση του δυναμικού του κερατο-αμφιβληστροειδούς που υπάρχει μεταξύ του μπροστινού και του πίσω μέρους του ανθρώπινου οφθαλμού. 16

κόρη Κεντρική οπή στη μέση της ίριδας του οφθαλμού. 21

οπτική ιχνηλάτηση Μεθοδολογία η οποία διευκολύνει τους ερευνητές να κατανοήσουν την οπτική προσοχή μέσω ανίχνευσης και παρακολούθησης των οφθαλμών και της δραστηριότητας τους. 34

οπτική προσοχή Γνωστική διαδικασία κατά την οποία, γίνεται επιλεκτική συγκέντρωση σε μια οπτική σκηνή του περιβάλλοντος. 35

οπτικής δραστηριότητας Σύνολο διαδικασιών των οφθαλμικών κινήσεων και των οπτικών παραμέτρων που εξαρτάται από τον εγκέφαλο, που καθοδηγεί το σύστημα αντίληψης. 49

οφθαλμικής παρακολούθησης Μεθοδολογία για την αποδοτική ανίχνευση και καταγραφή των οφθαλμών. 1

οφθαλμικός ιχνηλάτης Συσκευή η οποία μετρά και καταγράφει τις κινήσεις των οφθαλμών. 18

σακκαδική κίνηση Ταχείες κινήσεις του οφθαλμού από το ένα σημείο εστίασης στο άλλο για να βοηθήσει μαζί το κομμάτι του οφθαλμού σε μια πλήρη σκηνή του τι ένα άτομο παρατηρεί. 4

στατιστική ανάλυση Ανάλυση πληροφοριών, δεδομένων κλπ. με στατιστικές μεθόδους. 26

σχεδιασμός πειραμάτων Μέθοδος εκτέλεσης πειραμάτων μεγάλης απόδοσης με το μικρότερο δυνατό κόστος. 27

σύστημα οφθαλμικής ιχνηλάτισης Ολοκληρωμένο σύνολο εργαλείων και εξοπλισμού για την ανίχνευση και παρακολούθηση των οφθαλμών και της οφθαλμικής δραστηριότητας της τεχνολογίας ιχνηλάτισης οφθαλμών. 12

Αναφορές

- [1] *GazeDatasetChamou*, 2020. https://docs.google.com/spreadsheets/d/12mTdRSKBI2mi0ndgOeI14wlmBC_Oz9WxCNdpq7YAdJE/edit?usp=sharing.
- [2] *Eye Tracker Datasets*, 2020 (accessed August 12, 2020). <https://perceptual.mpi-inf.mpg.de/research/datasets/>.
- [3] *EyeTrackerDemo APK*, 2020 (accessed August 12, 2020). <https://drive.google.com/file/d/1UdlTZbuVCd86iKlWks03LJ7hj8RGVLz-/view?usp=sharing>.
- [4] *EyeTrackerDemo on Github*, 2020 (accessed August 12, 2020). <https://github.com/havanaDimi/EyeTrackerDemo>.
- [5] *Firebase ML Kit*, 2020 (accessed August 12, 2020). <https://firebase.google.com/docs/ml-kit/android/detect-faces>.
- [6] *Gaze Pointer*, 2020 (accessed August 12, 2020). <https://www.gazept.com/>.
- [7] *Human Subject Research*, 2020 (accessed August 12, 2020). <https://grants.nih.gov/policy/humansubjects/research.htm>.
- [8] *ITU Gaze Tracker*, 2020 (accessed August 12, 2020). <https://www.eyecomtec.com/3104-itu-gaze-tracker>.
- [9] *PUPIL Labs*, 2020 (accessed August 12, 2020). <https://pupil-labs.com/products/core/>.
- [10] *Turker Gaze*, 2020 (accessed August 12, 2020). <http://turkergaze.cs.princeton.edu/>.
- [11] *XLab*, 2020 (accessed August 12, 2020). <https://www.xlabsgaze.com/>.
- [12] *Cloud Vision API documentation*, 2020 (accessed July 23, 2020). <https://cloud.google.com/vision/docs>.
- [13] *OpenCV library*, 2020 (accessed July 23, 2020). <https://opencv.org/>.
- [14] Christer Ahlstrom, Katja Kircher, and Albert Kircher. A gaze-based driver distraction warning system and its effect on visual behavior. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(2):965–973, 2013.

- [15] Ashwag Al-Shathri, Areej Al-Wabil, and Yousef Al-Ohali. Eye-controlled games for behavioral therapy of attention deficit disorders. In *International Conference on Human-Computer Interaction*, pages 574–578. Springer, 2013.
- [16] Braiden Brousseau, Jonathan Rose, and Moshe Eizenman. Accurate model-based point of gaze estimation on mobile devices. *Vision*, 2(3):35, 2018.
- [17] Malcolm Brown, Michael Marmor, Eberhard Zrenner, Mitchell Brigell, Michael Bach, et al. Iscev standard for clinical electro-oculography (eog) 2006. *Documenta ophthalmologica*, 113(3):205–212, 2006.
- [18] Zenghai Chen, Hong Fu, Wai-Lun Lo, and Zheru Chi. Strabismus recognition using eye-tracking data and convolutional neural networks. *Journal of healthcare engineering*, 2018, 2018.
- [19] Alberto De Santis and Daniela Iacoviello. A robust eye tracking procedure for medical and industrial applications. In *Advances in Computational Vision and Medical Image Processing*, pages 173–185. Springer, 2009.
- [20] Artem Dementyev and Christian Holz. Dualblink: a wearable device to continuously detect, track, and actuate blinking for alleviating dry eyes and computer vision syndrome. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 1(1):1–19, 2017.
- [21] Joy Derwenskus, Janet C Rucker, Alessandro Serra, John S Stahl, Deborah L Downey, Nancy L Adams, and R John Leigh. Abnormal eye movements predict disability in ms: two-year follow-up. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1039(1):521–523, 2005.
- [22] Andrew T Duchowski. Eye tracking methodology. *Theory and practice*, 328(614):2–3, 2007.
- [23] Ulrich Ettinger, Veena Kumari, Xavier A Chitnis, Philip J Corr, Trevor J Crawford, Dominic G Fannon, Séamus O’Ceallaigh, Alex L Sumich, Victor C Doku, and Tonmoy Sharma. Volumetric neural correlates of anti-saccade eye movements in first-episode psychosis. *American Journal of Psychiatry*, 161(10):1918–1921, 2004.
- [24] Ana García-Blanco, Ladislao Salmerón, Manuel Perea, and Lorenzo Liviannos. Attentional biases toward emotional images in the different episodes of bipolar disorder: an eye-tracking study. *Psychiatry research*, 215(3):628–633, 2014.
- [25] Karri Gillespie-Smith and Sue Fletcher-Watson. Designing aac systems for children with autism: Evidence from eye tracking research. *Augmentative and Alternative Communication*, 30(2):160–171, 2014.

- [26] Katarzyna Harezlak and Pawel Kasprowski. Application of eye tracking in medicine: A survey, research issues and challenges. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 65:176–190, 2018.
- [27] Pawel Kasprowski, Michalina Dzierzega, Katarzyna Kruk, Katarzyna Harezlak, and Erita Filipek. Application of eye tracking to support children’s vision enhancing exercises. In *Conference of Information Technologies in Biomedicine*, pages 75–84. Springer, 2016.
- [28] Foo Tun Keat, Surendra Ranganath, and YV Venkatesh. Eye gaze based reading detection. In *TENCON 2003. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region*, volume 2, pages 825–828. IEEE, 2003.
- [29] Dmitry Lagun, Cecelia Manzanares, Stuart M Zola, Elizabeth A Buffalo, and Eugene Agichtein. Detecting cognitive impairment by eye movement analysis using automatic classification algorithms. *Journal of neuroscience methods*, 201(1):196–203, 2011.
- [30] Deborah L Levy, Anne B Sereno, Diane C Gooding, and Gillian A O’Driscoll. Eye tracking dysfunction in schizophrenia: characterization and pathophysiology. In *Behavioral Neurobiology of Schizophrenia and Its Treatment*, pages 311–347. Springer, 2010.
- [31] Bin Li, Hong Fu, Desheng Wen, and WaiLun Lo. Etracker: A mobile gaze-tracking system with near-eye display based on a combined gaze-tracking algorithm. *Sensors*, 18(5):1626, 2018.
- [32] Barry R Manor and Evian Gordon. Defining the temporal threshold for ocular fixation in free-viewing visuocognitive tasks. *Journal of neuroscience methods*, 128(1-2):85–93, 2003.
- [33] Susana Martinez-Conde, Stephen L Macknik, and David H Hubel. The role of fixational eye movements in visual perception. *Nature reviews neuroscience*, 5(3):229–240, 2004.
- [34] Md Noman, Talal Bin, Md Ahad, and Atiqur Rahman. Mobile-based eye-blink detection performance analysis on android platform. *Frontiers in ICT*, 5:4, 2018.
- [35] Weiyuan Pan, Dongwook Jung, Hyo Sik Yoon, Dong Eun Lee, Rizwan Ali Naqvi, Kwan Woo Lee, and Kang Ryoung Park. Empirical study on designing of gaze tracking camera based on the information of user’s head movement. *Sensors*, 16(9):1396, 2016.
- [36] George Th Pavlidis. Do eye movements hold the key to dyslexia? *Neuropsychologia*, 19(1):57–64, 1981.
- [37] Pramodini A Punde, Mukti E Jadhav, and Ramesh R Manza. A study of eye tracking technology and its applications. In *2017 1st International Conference on Intelligent Systems and Information Management (ICISIM)*, pages 86–90. IEEE, 2017.

- [38] Kari-Jouko Räihä. Life in the fast lane: Effect of language and calibration accuracy on the speed of text entry by gaze. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*, pages 402–417. Springer, 2015.
- [39] Rachel E Scherr, Kevin D Laugero, Dan J Graham, Brian T Cunningham, Lisa Jahns, Karina R Lora, Marla Reicks, and Amy R Mobley. Innovative techniques for evaluating behavioral nutrition interventions. *Advances in Nutrition*, 8(1):113–125, 2017.
- [40] Nicholas D Smith, Fiona C Glen, Vera M Mönter, and David P Crabb. Using eye tracking to assess reading performance in patients with glaucoma: a within-person study. *Journal of Ophthalmology*, 2014, 2014.
- [41] Qian Sun, Jianhong Xia, Nandakumaran Nadarajah, Torbjörn Falkmer, Jonathan Foster, and Hoe Lee. Assessing drivers’ visual-motor coordination using eye tracking, gnss and gis: a spatial turn in driving psychology. *Journal of spatial science*, 61(2):299–316, 2016.
- [42] Po-He Tseng, Ian GM Cameron, Giovanna Pari, James N Reynolds, Douglas P Munoz, and Laurent Itti. High-throughput classification of clinical populations from natural viewing eye movements. *Journal of neurology*, 260(1):275–284, 2013.
- [43] Shuo Wang, Ming Jiang, Xavier Morin Duchesne, Elizabeth A Laugeson, Daniel P Kennedy, Ralph Adolphs, and Qi Zhao. Atypical visual saliency in autism spectrum disorder quantified through model-based eye tracking. *Neuron*, 88(3):604–616, 2015.
- [44] Stephan Wyder, Fabian Hennings, Simon Pezold, Jan Hrbacek, and Philippe C Cattin. With gaze tracking toward noninvasive eye cancer treatment. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 63(9):1914–1924, 2015.
- [45] Qing Yang, Tao Wang, Ning Su, Shifu Xiao, and Zoi Kapoula. Specific saccade deficits in patients with alzheimer’s disease at mild to moderate stage and in patients with amnesic mild cognitive impairment. *Age*, 35(4):1287–1298, 2013.