

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΚΑΛΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ



Μεταπτυχιακή διατριβή

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΤΗΣ ΚΟΡΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ ΤΗΣ ΙΡΙΔΑΣ ΤΩΝ ΜΑΤΙΩΝ ΜΕΣΩ ΚΑΜΕΡΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Τσαππαρέλλας Κυριάκος

Λεμεσός -2013

ΕΝΤΥΠΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ

Μεταπτυχιακή διατριβή

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ
ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΤΗΣ ΚΟΡΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ ΤΗΣ ΙΡΙΔΑΣ ΤΩΝ
ΜΑΤΙΩΝ ΜΕΣΩ ΚΑΜΕΡΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ**

Παρουσιάστηκε από

Τσαπαρέλλας Κυριάκος

Επιβλέπων καθηγητής

[ιδιότητα και όνομα]

Μέλος επιτροπής _____

[ιδιότητα και όνομα]

Μέλος επιτροπής

[ιδιότητα και όνομα]

Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

9/2013

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Τσαπαρέλλας Κυριάκος , 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της μεταπτυχιακής διατριβής από το Τμήμα Πολυμέσων και Γραφικών Τεχνών του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Περίληψη

Σε αυτήν την εργασία έχουν επιλεγθεί να υλοποιηθούν και να αξιολογηθούν 2 σημαντικοί αλγόριθμοι από την βιβλιογραφία για ανίχνευση της περιφέρειας της ίριδας σε πραγματικό χρόνο. Μετά από τροποποιήσεις ο πρώτος αλγόριθμος παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια όσο αφορά τον εντοπισμό του κέντρου της ίριδας με αρκετά καλές ταχύτητες. Ωστόσο ο δεύτερος αλγόριθμος παρουσιάζει ψηλά ποσοστά στην εύρεση της σωστής ακτίνας της κυκλικής περιφέρειας της ίριδας με χαμηλές όμως ταχύτητες. Ένας συνδυασμός των δυο έχει προταθεί και υλοποιηθεί σε αυτήν την εργασία. Ο συνδυασμός έδειξε ότι ανεβάζει σε πολύ ψηλά επίπεδα την ακρίβεια αλλά με κόστος την πτώση της ταχύτητας. Τέλος, γίνεται μια σύγκριση των αλγορίθμων που αξιολογήθηκαν εδώ με τους πιο σύγχρονους και σχετικούς αλγορίθμους. Κάποιες από τις μεθόδους έδειξαν συγκριτικά πολύ ψηλά αποτελέσματα ακρίβειας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.Εισαγωγή.....	6
2.Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	9
3. Μεθοδολογία Αξιολόγησης Αλγορίθμων.....	11
3.1 Μετρικές Αξιολόγησης.....	11
3.2 Βάση Αξιολόγησης.....	12
3.3 Υλοποίηση Αλγορίθμων-Εκτέλεση.....	13
4. Αλγόριθμος1- Ισόφωτες Καμπύλες.....	14
4.1 Περιγραφή της βασικής μεθόδου.....	14
4.2 Αποτελέσματα-Παραμετροποιήσεις-Τροποποιήσεις-Συζήτηση...16	
4.3 Τελικά Αποτελέσματα Αναζήτησης κέντρου - Συζήτηση.....	21
5. Αλγόριθμος 2 – Μέθοδος Daugman.....	24
5.1 Περιγραφή της βασικής μεθόδου.....	24
5.2 Αποτελέσματα-Παραμετροποιήσεις-Τροποποιήσεις-Συζήτηση....	25
5.3 Τελικά Αποτελέσματα Αναζήτησης κέντρου (x_0, y_0) - Συζήτηση.	28
6. Αλγόριθμος 3 – Daugman + Ισόφωτες καμπύλες.....	31
6.1 Περιγραφή της μεθόδου- Αποτελέσματα.....	31
7. Τελικά συγκριτικά αποτελέσματα.....	34
8. Επίλογος/Τελικά Συμπεράσματα.....	35
9. Βιβλιογραφία.....	36

1.Εισαγωγή

Η ικανότητα της ακριβούς και γρήγορης ανίχνευσης της ίριδας και της κόρης των ματιών δίνει την δυνατότητα για ανάπτυξη και αξιοποίηση πολλών χρήσιμων εφαρμογών και συστημάτων. Η παρακολούθηση της κίνησης των ματιών μπορεί να αξιοποιηθεί για την δημιουργία συστημάτων αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπου και υπολογιστή [1][2]. Διάφορα συστήματα έχουν αναπτυχθεί για την εξασφάλιση μιας πιο ασφαλούς και προσεκτικής πορείας με το αυτοκίνητο, παρακολουθώντας την συμπεριφορά των ματιών του οδηγού [3] . Αρκετές μελέτες έγιναν για την ανάπτυξη λειτουργικών συστημάτων και εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιήσουν άτομα με αναπηρίες δίνοντας εντολές κινώντας τα μάτια. [4] Έχει αποδειχθεί πως η ίριδα αποτελεί ένα πολύ αξιόπιστο βιομετρικό χαρακτηριστικό για την αναγνώριση και ταυτοποίηση ανθρώπου κάτι που είναι πολύ χρήσιμο σε συστήματα ασφαλείας. [5][8] Για αυτό τον λόγο ένα μεγάλο μέρος της σχετικής βιβλιογραφίας έχει αφιερωθεί στην μελέτη για ανάπτυξη συστημάτων τα οποία θα μπορούν να εξάγουν με ταχύτητα και ακρίβεια την ψηφιακή αναπαράσταση της ανθρώπινης ίριδας για την ταυτοποίηση ενός προσώπου. [6][7].

Το πρόβλημα του αυτοματοποιημένου εντοπισμού της ίριδας εσωκλείετε στο γενικότερο κλάδο της επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας και της μηχανικής όρασης, πεδία που έχουν γνωρίσει μεγάλη ακμή τα τελευταία χρόνια. Η ανάγκη για αυτοματοποιημένη ανάλυση και επεξεργασία μιας εικόνας για την εξαγωγή συμπερασμάτων ίσως είναι πιο μεγάλη από ποτέ. Αυτή η ανάγκη είναι άμεσο προϊόν της ανάπτυξης της τεχνολογίας που πλέον παρέχει τις δυνατότητες για την δημιουργία εφαρμογών που στο παρελθόν δεν ήταν εφικτές. Διάφορα σημαντικά προβλήματα στο πεδίο της μηχανικής όρασης, όπως η ανίχνευση και αναγνώριση προσώπου, έχουν απασχολήσει διαχρονικά την επιστημονική κοινότητα και αρκετά από αυτά έχουν επιλυθεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Ωστόσο η φύση που διέπει το πρόβλημα της ακριβούς ανίχνευσης της ίριδας των ματιών καθιστά δύσκολη την εύρεση εύρωστων μεθόδων και συστημάτων για την επίλυση του προβλήματος αυτού και παραμένει ακόμη ένα ανοικτό προς βελτίωση θέμα. Το μικρό μέγεθος και η τοποθεσία της ίριδας των ματιών είναι ίσως οι πιο σημαντικοί παράγοντες που κάνουν δύσκολή την ακριβούς ανίχνευσή της από διάφορα συστήματα. Η ίριδα μπορεί πολλές φορές να επισκιάζεται σε μεγάλο βαθμό (ακόμη και εντελώς) από τα βλέφαρα, τις βλεφαρίδες ή ακόμη και από μέρος των μαλλιών του ατόμου που βρίσκετε μπροστά στα μάτια. Επίσης ο φωτισμός του εξωτερικού περιβάλλοντος συχνά δημιουργεί πολύ δυνατές αντανακλάσεις στην περιοχή της κόρης των ματιών πράγμα που μπορεί να αλλοιώσει την μορφή και την ποιότητα της ψηφιακής της αναπαράστασης. Αυτές και άλλες δυσκολίες έχουν αποτελέσει την αιτία για την εισήγηση και την δημιουργία διάφορων εξειδικευμένων συστημάτων με εξειδικευμένο εξοπλισμό και προδιαγραφές, όπως δυνατό και γρήγορο υπολογιστικό επεξεργαστή, κάμερες με πολύ υψηλή ποιότητα και ανάλυση , χρήση υπέρυθρων ή ήμι-υπέρυθρων ακτινοβολιών, χρήση κινητού εξοπλισμού όπως head mounted display, έτσι ώστε η ανίχνευση της ίριδας να είναι επιτυχής με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα (π.χ. [9] ,[10]). Αυτό δικαιολογείται κυρίως από το γεγονός ότι διαχρονικά η επιστημονική

κοινότητα και όχι μόνο, επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη τεχνολογιών που θα επέτρεπαν την λεπτομερή ψηφιακή εξαγωγή και αναπαράσταση της ίριδας για την ταυτοποίηση ενός ατόμου, μια τεχνολογία με πολλές και άμεσες εφαρμογές (π.χ σε συστήματα ασφαλείας). Για την επιτυχής λειτουργία όμως μιας τέτοιας τεχνολογίας χρειάζεται η εξαγωγή της ίριδας με μεγάλη ψηφιακή λεπτομέρεια, σε ελεγχόμενο περιβάλλον και συχνά με μεγάλη ταχύτητα (σε περίπτωση που δεν δύναται η συνεργασία του ατόμου) κάτι που δεν θα μπορούσε να είναι εφικτό χωρίς κάποιο εξειδικευμένο σύστημα. Επίσης λόγω του ότι στο παρελθόν η πρόσβαση σε συσκευές με ικανοποιητικές υπολογιστικές ικανότητες δεν αποτελούσε ακόμη προσωπική υπόθεση, δεν δινόταν τόση πολύ σημασία στην ανάπτυξη εύρωστων αλγορίθμων κατάλληλοι να εκτελεστούν σε όλες τις συσκευές αλλά περισσότερο η προσοχή στρεφόταν στην δημιουργία της ίδιας της συσκευής με ειδικό εξοπλισμό κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, αναλόγως της περίπτωσης. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας όμως, ειδικότερα την τελευταία δεκαετία έχει αυξήσει τις δυνατότητες αλλά συνάμα και τις ανάγκες για την δημιουργία εφαρμογών με την χρήση ήδη εύκολα προσβάσιμων τεχνολογιών από το ευρύτερο κοινό όπως τον φορητό προσωπικό υπολογιστή. Ιδιαίτερα μετά την ενσωμάτωση των γνωστών έξυπνων κινητών (smart-phones) στην καθημερινότητα του ανθρώπου έχει αυξηθεί κατακόρυφα το ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα για ανάπτυξη αλγορίθμων και μεθόδων που να μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα από αυτές τις συσκευές χωρίς να προϋποθέτουν κάποιο άλλο εξειδικευμένο εξοπλισμό. Η μεγάλη πρόκληση πλέον στις μέρες μας δεν είναι κατά πόσο μπορεί να αναπτυχτεί μια τεχνολογία που να μπορεί να φέρει εις πέρας μια συγκεκριμένη εργασία αλλά, κατά πόσο μπορούν να αναπτυχθούν εύρωστοι αλγόριθμοι κατάλληλοι να φέρουν εις πέρας αυτήν την εργασία με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες (π.χ. PCs, smart-phones, tablets) οι οποίες είναι προσβάσιμες από το ευρύτερο κοινό.

Η υπολογιστική δύναμη των κινητών μας συσκευών όσο και οι ικανότητες τους αυξάνονται μέρα με την μέρα δίνοντας κίνητρο σε πολλούς ερευνητές να ασχοληθούν και να προτείνουν μεθόδους και αλγορίθμους για την δημιουργία εφαρμογών που θα μπορούν να ενσωματωθούν και να εκτελεστούν άμεσα από αυτές τις συσκευές. Ωστόσο παρά την ραγδαία τους τεχνολογική εξέλιξη ακόμη οι υπολογιστικές τους δυνατότητες διακυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα περιορίζοντας σε μεγάλο βαθμό το πλήθος των πιθανών εφαρμογών και λειτουργιών που μπορούν να εκτελεστούν. Επίσης η ποιότητα της ενσωματωμένης κάμερας και η περιορισμένη μνήμη αποτελούν κρίσιμους παράγοντες που μπορούν να περιορίσουν ακόμη περισσότερο την αποδοτικότητα κάποιων εφαρμογών, όπως της ανίχνευσης της ίριδας.

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη την μεγάλη εμπορικότητα των κινητών συσκευών που έχουν αποκτήσει αλλά ταυτόχρονα και όλα τα περιοριστικά μέτρα που τις διακατέχουν, η δημιουργία ενός αλγορίθμου κατάλληλου για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης εργασίας-εφαρμογής σε αυτού του είδους τις συσκευές, αποτελεί πολύ μεγάλη πρόκληση. *Απώτερος σκοπός λοιπόν αυτής της εργασίας είναι να απαντήσει στο ερώτημα κατά πόσο είναι εφικτή η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για την ανίχνευση και παρακολούθηση της κόρης και της ίριδας των ματιών κατάλληλος για την εφαρμογή του από τεχνολογίες χαμηλού επιπέδου όπως οι κινητές συσκευές. Ο αλγόριθμος αυτός θα πρέπει να έχει ικανοποιητικά επίπεδα ακρίβειας και ταχύτητας για εκτέλεση του σε πραγματικό χρόνο, χαρακτηριστικά που όπως*

θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο, θα αποτελέσουν τα κύρια κριτήρια της αξιολόγησης των αλγορίθμων που έχουν επιλεχθεί για ανάπτυξη και ανάλυση.

2.Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ποικίλες μέθοδοι έχουν διαχρονικά προταθεί για την ανίχνευση του κέντρου και της περιφέρειας της ίριδας. Ωστόσο οι πλείστες έχουν σαν σημείο αναφοράς τον πρωταρχικό αλγόριθμο που είχε προταθεί από τον Daugman [5] και μετέπειτα αυτόν του Wildes [32]. Ο Daugman στο άρθρο του εισάγει για πρώτη φορά ένα διαφορο-ολοκληρωτικό τελεστή με σκοπό την ανίχνευση κυκλικών περιφερειών σε μια ψηφιακή εικόνα. Μια αρκετά διαφορετική προσέγγιση ανίχνευσης της περιφέρειας της ίριδας είχε προταθεί από τον Wildes σε δημοσίευμα του το 1997. Ο Wildes χρησιμοποίησε αρχικά διακριτές παραγώγους για να βρει βάση μιας μεθοδολογίας πιθανά σημεία ακμής της ίριδας και μετά εφάρμοσε τον Hough μετασχηματισμό για να βρει τις κυκλικές υποψήφιες ακμές. Ο Hough μετασχηματισμός λαμβάνει υπόψη το αρχικό σύνολο σημείων-ακμών και βρίσκει τον κύκλο-που κατά κάποιο τρόπο- ικανοποιεί τα περισσότερα σημεία.

Πολλοί ερευνητές μετέπειτα έχουν προτείνει διάφορες παραλλαγές της προσέγγισης του Wildes όσο αφορά την ανίχνευση ακμών και την χρήση του Hough μετασχηματισμού. Ο Liu και λοιποί [33] χρησιμοποίησαν την μέθοδο Canny για ανίχνευση ακμών και μετέπειτα τον Hough μετασχηματισμό, αλλά πρότειναν τρόπους απλοποιήσεις των μεθόδων για βελτίωση της ταχύτητας. Επίσης, ο Huang και λοιποί [34] για να μειώσουν την πολυπλοκότητα της μεθόδου πρότειναν μια τροποποίηση έτσι ώστε πρώτα να γίνεται η ανίχνευση της περιφέρειας της ίριδας σε μικρότερη εικόνα και μετά να χρησιμοποιήσουν αυτή την πληροφορία για να καθοδηγήσουν την εύρεση στην πρωταρχική εικόνα.

Κάποιοι ερευνητές ακολούθησαν την αρχική προσέγγιση του Wildes αλλά επιπρόσθετα πρότειναν μεθόδους για χονδρική ανίχνευση της κόρης των ματιών κάτι που θα χρησίμευε αργότερα για μεγαλύτερη ακρίβεια στην εύρεση της περιφέρειας της ίριδας. Ο Lili και Mei [35] βρίσκουν μια εκτίμηση για την τοποθεσία της ίριδας βασιζόμενη στην υπόθεση ότι υπάρχουν τρεις μεγάλες τιμές στο ιστόγραμμα της εικόνας οι οποίες αντιπροσωπεύουν την κόρη την ίριδα και τον άσπρο χιτώνα του ματιού. Στο δημοσίευμα των He and Shi [36], η αρχική εικόνα μετατρέπεται σε δυαδική μορφή για εντοπισμό της κόρης και μετέπειτα γίνεται χρήση μεθόδων ανίχνευσης ακμών και του Hough μετασχηματισμού για την εύρεση της περιφέρειας της ίριδας. Ο Feng και λοιποί [37] χρησιμοποίησαν την “coarse-to-fine” στρατηγική για να βρουν την περιφέρεια της ίριδας την οποίαν προσέγγιζαν σαν μη-πλήρες κύκλους .

Άλλοι ερευνητές επίσης επιχείρησαν να δώσουν μια χονδρική εκτίμηση της κόρης κάνοντας την υπόθεση ότι η κόρη θα αποτελεί μια ομοιόμορφη σκοτεινή (χαμηλή σε ένταση) περιοχή. Ωστόσο τέτοιου είδους μέθοδοι είναι αρκετά προβληματικές όταν έχουν να κάνουν με πραγματικές συνθήκες χωρίς την προ-επεξεργασία της αρχικής εικόνας. Μια τέτοια μέθοδο ακολούθησαν οι Tian και λοιποί [38] που αναζητούσαν στην εικόνα τα pixels που είχαν ένταση κάτω ενός συγκεκριμένου προκαθορισμένου ορίου για να εντοπίσουν κατά προσέγγιση την περιοχή της κόρης. Οι Xu και λοιποί [39] χώρισαν την εικόνα με ένα ορθογώνιο πλέγμα και χρησιμοποίησαν την ελάχιστη μέση τιμή στην ένταση του φωτισμού

για να δημιουργήσουν ένα κάτω όριο το οποίο θα χρησίμευε στην συνέχεια για την δυαδική αναπαράσταση της εικόνας και την εκτίμηση της κόρης.

Το 2020, οι Camus και Wildes [40] παρουσίασαν μια μέθοδο που δεν στηριζόταν σε μεθόδους ανίχνευσης ακμής αλλά ούτε στον Hough μετασχηματισμό. Αυτή η μέθοδος είχε περισσότερες ομοιότητες με αυτή του Daugman, στο ότι γινόταν εξίσου εύρεση των τριών παραμέτρων (x,y,r) που αντιπροσωπεύουν το κέντρο και την ακτίνα της ίριδας αντίστοιχα. Αυτή η μέθοδος ανιχνεύει την κόρη με ακρίβεια 99.5% χωρίς γυαλιά και 66.6% με γυαλιά και είναι 3.5 φορές γρηγορότερη από αυτήν του Daugman (2001) [41].

3. Μεθοδολογία Αξιολόγησης Αλγορίθμων

3.1 Μετρικές Αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων πρώτα γίνεται υπόθεση ότι η περιφέρεια της ίριδας είναι κυκλική. Αυτή η υπόθεση θα διατηρηθεί κατά την διάρκεια της εργασίας αυτής. Ωστόσο πολλές φορές η περιφέρεια της ίριδας μπορεί να μην συμπίπτει απόλυτα με το σχήμα ενός κύκλου (όπως όταν η λήψη προσώπου γίνεται από λοξή γωνιά) εντούτοις οι πλείστες μεθοδολογίες που υπάρχουν στην βιβλιογραφική αναφορά κάνουν αυτήν την υπόθεση. Πολύ λίγες είναι οι βιβλιογραφικές αναφορές που θεωρούν την ίριδα σαν ελλειπτική περιφέρεια όπου και προσπαθούν να βρουν τις παραμέτρους της [19]. Αυτό όμως έχει νόημα μόνο σε περιπτώσεις που η πολύ μεγάλη ακρίβεια στην ανίχνευση της περιφέρειας της ίριδας είναι επιθυμητή.

Θεωρώντας λοιπόν την ίριδα σαν ένα κύκλο τότε μια μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής αν είναι επιτυχής η ανίχνευση του κέντρου και της ακτίνας του αντίστοιχου κύκλου. Σε μια ψηφιακή εικόνα λοιπόν που περιέχεται η ίριδα είναι επιθυμητή η εύρεση της τριάδας (r, x_0, y_0) , όπου r αντιπροσωπεύει την ακτίνα του ζητούμενου κύκλου και (x_0, y_0) το αντίστοιχο κέντρο. Ζητούμενο λοιπόν για ένα αλγόριθμο είναι να υπολογίζει με όσο το δυνατό περισσότερη ακρίβεια αυτές τις παραμέτρους. Για να μετρήσουμε την ακρίβεια ενός αλγορίθμου συγκεκριμένες μετρικές πρέπει να οριστούν. Πριν να ορίσουμε τις μετρικές πρέπει πρώτα να διευκρινίσουμε την σημαντικότητα της αξιολόγησης του εντοπισμού του κέντρου (x_0, y_0) ξεχωριστά από την ακτίνα r . Εάν ένα αλγόριθμος έκανε μια πρόβλεψη της τριάδας (r, x_0, y_0) , όπου το κέντρο έχει προβλεφθεί αρκετά μακριά από το πραγματικό κέντρο τότε δεν υπάρχει νόημα να γίνει η αξιολόγηση και της ακτίνας μαζί δηλαδή κατά πόσο η ακτίνα είναι σωστή ή όχι. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας σύγκρισης θα ήταν χωρίς νόημα. Επίσης αν ανιχνευτεί το κέντρο σωστά τότε η ακτίνα αποκτά πλέον νόημα ανεξάρτητης μεταβλητής και θα μπορεί να αξιολογηθεί ξεχωριστά. Για αυτό τον λόγο ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στην αξιολόγηση της ακρίβεια εντοπισμού του κέντρου (x_0, y_0) για αρχή και πιο κάτω θα αναφέρουμε την μέθοδο αξιολόγησης της ακρίβειας της ακτίνας r .

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων όσο αφορά την εύρεση του κέντρου της ίριδας σε αυτό το βιβλίο θα χρησιμοποιήσουμε την μετρική *normalized error* που δίνεται από τον τύπο:

$$e = \frac{\max(d_{left}, d_{right})}{w} \quad (1)$$

Αυτή η μετρική έχει προταθεί από τους Jesorsky κ.α [20] και μετρά το μεγαλύτερο λάθος από τα δυο μάτια σε ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο. Τα d_{left} και d_{right} αντιπροσωπεύουν τις ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ του κέντρου που εκτιμήθηκε από τον αλγόριθμο και τον

πραγματικό κέντρο για το αριστερό και δεξί μάτι αντίστοιχα. Το w είναι η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των δυο πραγματικών κέντρων. Ο λόγος που γίνεται διαίρεση με το w είναι έτσι ώστε η μετρική (1) να είναι ανεξάρτητη από την απόσταση από την κάμερα στην οποία βρίσκονται τα δυο μάτια. Για την αξιολόγηση όλων των αλγορίθμων θα υπολογίζονται 4 τιμές: ο μέσος όρος του *normalized error* (= mean_e) που υπολογίζεται από όλα τα στιγμιότυπα της βάσης, και τα ποσοστά επιτυχίας για τις ακόλουθες ανισότητες $e \leq 0.25$, $e \leq 0.1$, $e \leq 0.05$. Ενδεικτικά, η μέτρηση $e \leq 0.25$ αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ του κέντρου και των γονιών του ματιού, $e \leq 0.1$ αντιστοιχεί στην περιοχή εντός της ίριδας και $e \leq 0.05$ αντιστοιχεί στην περιοχή εντός της κόρης.

Τώρα, όταν σε ένα στιγμιότυπο τα δυο κέντρα υπολογίστηκαν πολύ κοντά στα πραγματικά μόνο τότε θα έχει νόημα να αξιολογούμε την ακρίβεια της αντίστοιχης ακτίνας. Ορίζουμε λοιπόν σαν $e_r = \max(d_{left}^r, d_{right}^r)$ το μέγιστο λάθος από τα δυο μάτια αντίστοιχα με τον προηγούμενο ορισμό (1). Εδώ να σημειωθεί πως οι ευκλείδειες αποστάσεις d_{left}^r, d_{right}^r στην μια διάσταση δεν είναι τίποτε άλλο από την υπολογισμό της απόλυτης διαφοράς των τιμών της ακτίνας. Σαν μέτρο αξιολόγησης της ακτίνας λοιπόν θα υπολογίζεται ο μέσος όρος mean_ e_r από όλα τα στιγμιότυπα όπου ισχύει ότι $e \leq 0.05$.

3.2 Βάση Αξιολόγησης

Λόγω του σκοπού αυτής της εργασίας θα θέλαμε να αξιολογήσουμε τους αλγορίθμους σε μια βάση φωτογραφιών χαμηλής ανάλυσης παρόμοια με αυτής ενός κινητού. Οι φωτογραφίες αυτής της βάσης θα θέλαμε να αποτελούν στιγμιότυπα ενός βίντεο από την κάμερα και όχι φωτογραφίες που πιθανώς να παρουσίαζαν πιο ψιλή ποιότητα. Υπάρχουν αρκετές βάσεις φωτογραφιών στο διαδίκτυο οι οποίες όμως δεν προσφέρονται για την περίπτωση μας, διότι όπως διαπιστώθηκε σε όλες υπάρχει ένδειξη για τις συντεταγμένες του κύκλου χωρίς ένδειξη για την ακτίνα της περιφέρειας της ίριδας.

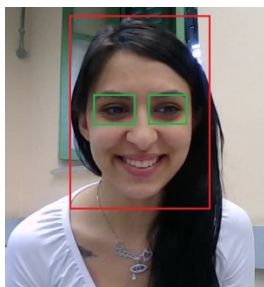
Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας λοιπόν έχει επιλεγεί να δημιουργηθεί μια βάση φωτογραφιών προς αξιολόγηση. Σε πρώτο στάδιο ζητήθηκε από 8 συνολικά άτομα να λάβουν μέρος ως εθελοντές για την δημιουργία της βάσης αυτής. Ζητήθηκε από κάθε άτομο να καθίσει μπροστά από ένα υπολογιστή (μοντέλο: HP EliteBook 8570p) όπου θα γινόταν η βιντεογράφιση των ατόμων μέσω της ενσωματωμένης κάμερας του υπολογιστή. Τα άτομα κατά την διάρκεια της βιντεογράφισης είχαν εντολές να ακολουθούν με τα μάτια και το κεφάλι ένα κινούμενο σχήμα στην οθόνη που κινείτο με προκαθορισμένη πορεία. Βιντεογραφήθηκαν 2 βίντεο διάρκειας μισού λεπτού (λήψη με 13 στιγμιότυπα ανά δευτερόλεπτο) από τον κάθε χρήστη. Ένα που περιλάμβανε ομαλές και αργές κινήσεις και ένα άλλο με πιο απότομες και γρήγορες κινήσεις. Όλα τα βίντεο (σύνολο 16) λήφθηκαν κάτω από διαφορετικές καταστάσεις όπως, διαφορετικό χώρο, χρόνο (π.χ. απόγευμα) και διαφορετική απόσταση από την κάμερα (δες πιο κάτω εικόνες). Επιλέχθηκαν 4 άτομα από των οποίων τα βίντεο επιλέχθηκαν 207 διαφορετικά στιγμιότυπα (640x480) για να δημιουργηθεί η βάση εκπαίδευσης πάνω στην οποία θα γίνονται όλες οι δοκιμές και οι τροποποιήσεις. Μετέπειτα από τα εναπομείναντα 4 άτομα επιλέχθηκαν άλλα 207

στιγμιότυπα για να δημιουργηθεί η βάση για την αξιολόγηση των τελικών αποτελεσμάτων. Στα 514 στιγμιότυπα σημειώθηκαν χειρωνακτικά ο καλύτερος κύκλος που ταίριαζε στην περιφέρεια της ίριδας από τον οποίο υπολογιζόταν το κέντρο του και η ακτίνα του.



3.3 Υλοποίηση Αλγορίθμων-Εκτέλεση

Έχουν επιλεγθεί να υλοποιηθούν και να αξιολογηθούν συνολικά τρεις αλγόριθμοι οι οποίοι θα αναλυθούν στην συνέχεια. Η υλοποίηση των αλγορίθμων έχει γίνει στο περιβάλλον Visual Studio στο οποίο έχει ενσωματωθεί η βιβλιοθήκη OpenCV σε επεξεργαστή Intel Core 2.9 GHz. Για αρχή η περιοχή που βρίσκεται το πρόσωπο υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ενσωματωμένη μέθοδο LBP-Cascades της OpenCV. Πριν την ανίχνευση του προσώπου η εικόνα σμικραίνεται κατά 70% έτσι ώστε η ανίχνευση να γίνεται ταχύτερα και μετά επαναφέρεται στις πρωταρχικές διαστάσεις(640x480). Η ταχύτητα με την οποία ανιχνεύεται το πρόσωπο είναι κατά μέσο όρο 20ms που αντιστοιχεί σε 50 στιγμιότυπα το δευτερόλεπτο. Μετά την ανίχνευση της περιοχής του προσώπου βιομετρικά χαρακτηριστικά του ανθρώπου χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της περιοχής των ματιών (δες εικόνα).



4. Αλγόριθμος1- Ισόφωτες Καμπύλες

4.1 Περιγραφή της βασικής μεθόδου

Ο αλγόριθμος που θα αναλύσουμε εδώ είναι από το πρόσφατο άρθρο “Accurate Eye Center Location through Invariant Isocentric Patterns “ του Roberto Valenti και Theo Gevers [11]. Σύμφωνα με τους συγγραφείς ο αλγόριθμος που προτείνουν παρουσιάζει πολύ καλά αποτελέσματα τόσο σε ακρίβεια αλλά και ταχύτητα. Εδώ θα περιγράψουμε και θα αναλύσουμε με λεπτομέρεια τον τρόπο με τον οποίο υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος αυτός, στην συνέχεια θα δούμε κάποιες τροποποιήσεις που έγιναν για την βελτίωση του όσο αφορά την ακρίβεια.

Το άρθρο στηρίζεται στο βασικό χαρακτηριστικό ότι οι περιφέρειες της κόρης και της ίριδας των ματιών παρουσιάζουν κατά προσέγγιση σταθερή ένταση φωτισμού (αντίστοιχα σταθερή ένταση στα συγκεκριμένα pixels). Η βασική ιδέα λοιπόν είναι η αναπαράσταση αυτού του χαρακτηριστικού με ισόφωτες καμπύλες οι οποίες είναι καμπύλες που σχηματίζονται από την ένωση των σημείων με ίση φωτεινότητα. Από την στιγμή που οι καμπύλες αυτές δεν τέμνουν η μια την άλλη μια εικόνα μπορεί να περιγραφεί πλήρως από τις ισόφωτες καμπύλες της. Επιπλέον το σχήμα αυτών των καμπύλων δεν επηρεάζεται από την περιστροφή της εικόνας ή από γραμμικές αλλαγές στον φωτισμό [12] . Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών οι καμπύλες αυτές έχουν επιτυχώς χρησιμοποιηθεί σαν χαρακτηριστικά για την ανίχνευση αντικειμένου και την τμηματοποίηση μιας εικόνας [13][14] .

Με την βοήθεια της διαφορικής γεωμετρίας έχει αποδειχθεί πως η κυρτότητα (κ) μιας ισόφωτης καμπύλης στο καρτεσιανό σημείο (x,y) δίνεται από τον τύπο:

$$\kappa = -\frac{L_y^2 L_{xx} - 2L_x L_y L_{xy} + L_x^2 L_{yy}}{(L_x^2 + L_y^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

όπου L είναι η συνάρτηση φωτισμού και L_x, L_y οι πρώτες μερικές παράγωγοι της συνάρτησης L ως προς x και y αντίστοιχα και L_{xx}, L_{yy}, L_{xy} οι αντίστοιχες δεύτερες μερικές παράγωγοι. Γνωρίζοντας την κυρτότητα της καμπύλης σε ένα συγκεκριμένο σημείο μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα του κύκλου (r) ο οποίος προσεγγιστικά συμπίπτει με την τοπική περιφέρεια της καμπύλης στο συγκεκριμένο σημείο. Η ακτίνα του κύκλου αυτού ισούται με την αντίστροφη τιμή της κυρτότητας που υπολογίσαμε από τον τύπο (1),

$$r = \frac{1}{|\kappa|} \quad (2)$$

Τώρα η βασική σκέψη και ιδέα του άρθρου είναι ότι αν υπολογιστούν όλες οι τοποθεσίες των κέντρων των αντίστοιχων κύκλων που τοπικά συμπίπτουν με τις ισόφωτες καμπύλες και αφήσουμε το κάθε ένα να αποτελέσει “ψήφο” για την πιθανή τοποθεσία του κέντρου της κόρης τότε συναθροίζοντας όλες αυτές τις ψήφους μεταξύ τους θα έχουμε μια καλή εκτίμηση για το που βρίσκεται το κέντρο αυτό. Το αποτέλεσμα όλων των ψήφων το ονόμασαν “χάρτης κέντρου” ο οποίος αναμένεται να παρουσιάζει μέγιστη τιμή κατά

προσέγγιση στο κέντρο της κόρης των ματιών. Απομένει λοιπόν για κάθε σημείο με συντεταγμένες (x,y) της ψηφιακής εικόνας να υπολογιστεί και το αντίστοιχο κέντρο της τοπικής περιφέρειας της καμπύλης. Το μέγεθος όμως της αντίστοιχης ακτίνας από μόνο του δεν μας βοηθά. Εκτός από το μέγεθος χρειαζόμαστε επιπλέον την κατεύθυνση και τον προσανατολισμό (κλίση) της αντίστοιχης διανυσματικής ακτίνας για να μπορέσουμε να βρούμε τις συντεταγμένες του αντίστοιχου κέντρου. Η κλίση της διανυσματικής ακτίνας μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της διανυσματικής παραγώγου (L_x, L_y) στο αντίστοιχο σημείο. Η διανυσματική παράγωγος όμως θα έχει πάντα κατεύθυνση προς την πιο υψηλή αλλαγή του φωτισμού (δες σχήμα) κάτι που δεν θα έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Σε αυτό το σημείο το πρόσημο της κυρτότητας (κ) μπορεί να βοηθήσει. Το πρόσημο της κυρτότητας κ θα είναι αρνητικό σε περίπτωση που η εξωτερική τοπική περιοχή του εφαπτόμενου κύκλου είναι πιο φωτεινή από την εσωτερική (Σημείωση: εδώ να αναφερθεί ότι στο άρθρο λανθασμένα αναφέρετε ότι μια τέτοια περίπτωση δημιουργεί θετικό πρόσημο). Δηλαδή στην περιφέρεια της κόρης και της ίριδας το πρόσημο θα είναι αρνητικό ενώ στις περιοχές των βλεφάρων το πρόσημο θα είναι θετικό. Πολλαπλασιάζοντας λοιπόν την μοναδιαία (δηλ. κανονικοποιημένη) διανυσματική παράγωγο με την αντίστροφη τιμή της κυρτότητας ($1/\kappa$) θα προκύψει το διάνυσμα της μετατόπισης με την σωστή κατεύθυνση (λόγω της σωστής επιρροής του πρόσημου της κυρτότητας στην κατεύθυνση της παραγώγου) με το σωστό μέγεθος και προσανατολισμό. Το διάνυσμα της μετατόπισης (Δ_x, Δ_y) (στο σημείο (x,y))μετά από πράξεις δίνεται σε καρτεσιανές συντεταγμένες από τον τύπο

$$(\Delta_x, \Delta_y) = -\frac{(L_x, L_y) \cdot (L_x^2 + L_y^2)}{L_y^2 L_{xx} - 2L_x L_y L_{xy} + L_x^2 L_{yy}} \quad (3)$$

Με το διάνυσμα της μετατόπισης μπορούμε πλέον να έχουμε μια σωστή εκτίμηση για το πιθανό κέντρο του κάθε σημείου της εικόνας.

Σε κάποιες περιπτώσεις η κυρτότητα (κ) παρουσιάζει πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες τιμές. Αυτό υποδεικνύει ότι έχουμε να κάνουμε με τοπική ευθεία ή αντίστοιχα τοπικό σημείο. Σε τέτοιες περιπτώσεις το διάνυσμα μετατόπισης (3) είτε θα είναι πολύ μεγάλο και θα βγαίνει εκτός ορίων του “χάρτη κέντρου” είτε θα είναι αρκετά μικρό για να μετακινηθεί από την θέση του. Σε τέτοιες περιπτώσεις απλά αγνοούμε το σημείο αυτό και δεν επιτρέπουμε στο κέντρο του κατά κάποιο τρόπο να δηλώσει ψήφο. Επίσης λόγω του ότι κάθε διάνυσμα μετατόπισης δίνει απλά μια εκτίμηση για το που μπορεί να είναι το κέντρο (κυρίως λόγω του ότι έχουμε να κάνουμε με διακριτές τιμές), εφαρμόζουμε την συνέλιξη του τελικού χάρτη κέντρου με την συνάρτηση Gaussian για εξομάλυνση των αποτελεσμάτων και την απομάκρυνση του ήχου. Το κέντρο με τις περισσότερες ψήφους θα αποτελέσει και το πιο πιθανό κέντρο. Η ακτίνα r θα υπολογίζεται σαν η τιμή με την πιο μεγάλη συχνότητα. Δηλαδή για κάθε διάνυσμα μετατόπιση που υπολογίζεται θα καταγράφεται και το μέγεθος της αντίστοιχης ακτίνας και στο τέλος θα επιλεγεί η πιο συχνά εμφανιζόμενη.

4.2 Αποτελέσματα-Παραμετροποιήσεις-Τροποποιήσεις-Συζήτηση

Ο κύριος τρόπος αξιολόγησης των αλγορίθμων θα είναι μέσω των ποσοστών ακριβείας του Normalized Error (e) για τις τιμές όπου $e \leq 0.25$, $e \leq 0.1$, $e \leq 0.05$ όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 3 και αυτό περισσότερο για σκοπούς σύγκρισης με άλλες μεθόδους της βιβλιογραφικής αναφοράς. Ο μέσος όρος ($mean_e$) του Normalized Error θα δίνεται εξίσου. Όλες οι παραμετροποιήσεις και τροποποιήσεις έχουν γίνει με πειραματισμούς πάνω στην βάση εκπαίδευσης μόνο (207 εικόνες). Μετά την ολοκλήρωση όλων των παραμετροποιήσεων και τροποποιήσεων τα τελικά αποτελέσματα έχουν εξαχθεί από την βάση της αξιολόγησης (207 εικόνες). Κάθε φορά που γίνεται μια σημαντική αλλαγή στην κύρια μέθοδο θα παρουσιάζονται τα νέα αποτελέσματα ως μια νέα έκδοση της αρχικής μεθόδου, μέχρι να καταλήξουμε στην τελική έκδοση, όπου θα εφαρμοστούν τα τελικά αποτελέσματα στην βάση αξιολόγησης.

Έκδοση 1 (βασική μέθοδος)

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε το διάνυσμα της μετατόπισης (3) όπως έχει περιγραφεί πιο πάνω, χρειαζόμαστε πρώτα να υπολογίσουμε όλες τις πρώτες και δεύτερες μερικές παραγώγους της ψηφιακής μας εικόνας. Στο άρθρο αναφέρεται ότι έχουν χρησιμοποιήσει την μέθοδο “fast anisotropic Gauss filtering method” που περιγράφεται στο άρθρο [15] για να υπολογίσουν της σχετικές παραγώγους. Σε αυτό το project θα χρησιμοποιηθεί ο δημοφιλής πυρήνας Sobel για να υπολογιστούν όλες οι μερικές παράγωγοι. Το μέγεθος του πυρήνα για τους υπολογισμούς θα είναι 3x3. Η ενσωματωμένη έκδοση του πυρήνα Sobel από την βιβλιοθήκη της OpenCV, περιέχει ήδη την συνέλιξη μαζί με τον πυρήνα Gaussian. Οπότε δεν χρειάζεται να κάνουμε εκ των προτέρων κάποιου είδους εξομάλυνση για απομάκρυνση του ήχου από την εικόνα. Για κάθε pixel της αντίστοιχης εικόνας υπολογίζεται το αντίστοιχο κέντρο με την βοήθεια του διανύσματος της μετατόπισης(3). Με κάθε νέο κέντρο που υπολογίζεται, ο χάρτης κέντρου αυξάνετε κατά 1 στις αντίστοιχες θέσεις του κέντρου. Μετά το πέρας της διαδικασίας ο χάρτης κέντρου εξομαλύνετε με τον Gaussian πυρήνα για την καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων. Το μέγεθος του πυρήνα εμπειρικά από τιμές 9x9 μέχρι 19x19 εμπειρικά έχει δείξει ότι δεν αλλοιώνει σημαντικά τα αποτελέσματα. Σε αυτήν την εργασία το μέγεθος 15x15 έχει επιλεγεί. Τέλος το κέντρο με τις περισσότερες ψήφους θα αποτελέσει και την τελική απάντηση για το που βρίσκεται το κέντρο της κόρης. Στον πίνακα 1 παρατίθενται τα αποτελέσματα της έκδοσης 1.

Έκδοση 1	$mean_e$	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
	0.103	44.5%	52.1%	93.2%

Πίνακας1 (πηγή: από τον συγγραφέα)

Έκδοση 2(τελεστής *curvedness* και πρόσημο της καμπυλότητας)

Στην προηγούμενη έκδοση κάθε σημείο της σχετικής εικόνας είχε την ίδια βαρύτητα ψήφου για τα τελικά αποτελέσματα. Ωστόσο κάποια σημεία που ανήκουν σε σχεδόν επίπεδες περιοχές δεν θα έπρεπε να έχουν την ίδια βαρύτητα με σημεία τα οποία ανήκουν σε “ισχυρές” ακμές της εικόνας. Για να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα οι συγγραφείς του άρθρου προτείνουν τον τελεστή “*curvedness*” [16] σαν ένας μηχανισμός βαρύτητας ψήφου, που δίνεται από τον τύπο:

$$curvedness = \sqrt{L_{xx}^2 + 2L_{xy}^2 + L_{yy}^2} \quad (1)$$

Ο συγκεκριμένος τελεστής στην ουσία μετρά την μεταβολή της παραγώγου της ισόφωτης καμπύλης στο αντίστοιχο σημείο. Άρα αναμένεται να δίνει χαμηλές τιμές κοντά σε επίπεδες ακμές και επιφάνειες και ψηλές τιμές κοντά σε ακμές. Στην εργασία αυτή κάθε κέντρο δηλώνει ψήφο αυξάνοντας την σχετική θέση στο χάρτη κέντρου κατά *curvedness* και όχι κατά ένα όπως στην έκδοση 1.

Γνωρίζουμε ότι το πρόσημο της κυρτότητας κ θα είναι θετικό σε περίπτωση που η εσωτερική τοπική περιοχή του εφαπτόμενου κύκλου είναι πιο φωτεινή από την εξωτερική. Στην περιφέρεια όμως της ίριδας και της κόρης των ματιών συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Η εσωτερική περιοχή των εφαπτόμενων κύκλων της ίριδας και της κόρης είναι πιο σκοτεινή από την εξωτερική. Για αυτό τον λόγο τα σημεία στα οποία το πρόσημο της κυρτότητας είναι θετικό μπορούμε απλά να τα αγνοήσουμε. Με αυτές τις δυο προαναφερθείσες τροποποιήσεις μπορούμε να δούμε από τον πίνακα 2 ότι τα αποτελέσματα έχουν βελτιωθεί αρκετά.

Έκδοση 2	<i>mean_e</i>	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
	0.0869	48.8%	71.2%	93.6%

Πίνακας2 (πηγή: από τον συγγραφέα)

Έκδοση 3(μέθοδος *mean-shift*)

Μέχρι τώρα για να υπολογιστούν οι συντεταγμένες του πιθανού κέντρου της κόρης υπολογιζόταν η πιο μεγάλη τιμή στο χάρτη κέντρου. Αντί αυτού οι συγγραφείς του άρθρου προτείνουν μια αναβάθμιση της μεθόδου χρησιμοποιώντας την μέθοδο “*mean-shift*” [17] για τον εντοπισμό του πιθανού κέντρου. Η μέθοδος *mean-shift* χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό τις πιο πιθανής τιμής ανάμεσα σε μια κατανομή πιθανοτήτων. Εδώ αν θεωρηθεί ότι ο χάρτης κέντρου αποτελεί δείγμα κάποιας κατανομής πιθανοτήτων και ότι οι τιμές στα

αντίστοιχα pixels του χάρτη αντιπροσωπεύουν πιθανότητες, τότε η μέθοδος “mean-shift” μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς πάνω στο χάρτη κέντρου για την ανεύρεση του πιο πιθανού κέντρου. Η κλασική μέθοδος για διακριτές τιμές απαιτεί τον ορισμό ενός αρχικού παραθύρου του οποίου το κέντρο μετά από αρκετές επαναλήψεις θα αρχίσει να τείνει προς την πιο πιθανή τιμή της κατανομής. Το αρχικό κέντρο αυτού του παραθύρου έχει οριστεί το σημείο με την πιο μεγάλη τιμή από τον χάρτη κέντρου, το οποίο υπολογίζεται από την έκδοση 2. Τώρα όσο αφορά τις διαστάσεις του παραθύρου αυτού οι συγγραφείς προτείνουν να χρησιμοποιηθούν 2 φορές μικρότερες διαστάσεις από τις διαστάσεις του αρχικού παραθύρου που εντοπίστηκε το μάτι (το μισό μέγεθος δηλαδή). Ωστόσο μετά από δοκιμές διαπιστώθηκε ότι 2.5 φορές μικρότερες διαστάσεις δίνει συνολικά καλύτερα αποτελέσματα. Μετά την υλοποίηση της μεθόδου “mean-shift” όπως έχει περιγραφεί εδώ τα αποτελέσματα έχουν τύχει αρκετής βελτίωσης (πίνακας 3).

Έκδοση 3	<i>mean_e</i>	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
	0.0787	54.9%	73.5%	96.9%

Πίνακας3 (πηγή: από τον συγγραφέα)

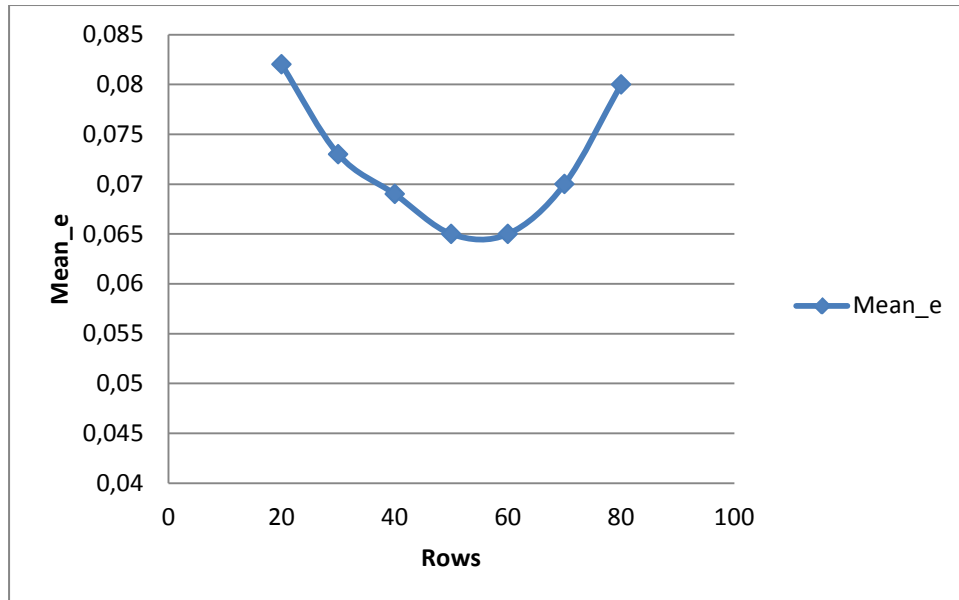
Έκδοση 4(scale-invariant)

Οι προηγούμενες εκδόσεις εφαρμόζονταν με τις διαστάσεις του παραθύρου που περιλάμβανε το μάτι. Λόγω του ότι χρειαζόμαστε όλες οι μεταβλητές να μην επηρεάζονται από το μέγεθος της εκάστοτε εικόνας, η πιο κάτω τεχνική προτείνεται. Για αρχή η εικόνα στην οποία εντοπίστηκε το μάτι αναπροσαρμόζεται σε προκαθορισμένες διαστάσεις που παραμένουν πάντοτε οι ίδιες. Μετά σταδιακά οι διαστάσεις της εικόνας μειώνονται με ένα σταθερό συντελεστή και για κάθε νέα εικόνα εφαρμόζεται η μέθοδος από την έκδοση 3. Οι τελικοί χάρτες κέντρου από την κάθε εικόνα συναθροίζονται δίνοντας τον τελικό χάρτη. Μετά με την μέθοδο “mean-shift” υπολογίζεται το πιο πιθανό κέντρο.

Στο άρθρο για κάθε νέα διάσταση της αρχικής εικόνας εφαρμόζεται και ένας πυρήνας εξομάλυνσης με τρεις διαφορετικές κλίμακες κάθε φορά για τον υπολογισμό των παραγώγων με πιο εύρωστα αποτελέσματα. Ωστόσο στην δική μας περίπτωση λόγω του ότι επιλέξαμε τον πυρήνα Sobel για υπολογισμών των παραγώγων δεν αρκεστούμε μόνο στην αλλαγή των διαστάσεων.

Στην δική μας περίπτωση η αρχική εικόνα που περιέχει το μάτι αναπροσαρμόζεται σε προκαθορισμένες διαστάσεις και μετέπειτα υπολογίζεται ο χάρτης κέντρου για τις υποδιαστάσεις με συντελεστή μείωσης 0.8,0.6 και 0.4 (άρα σύνολο 4 διαστάσεις μαζί με την αρχική). Το ερώτημα τώρα είναι ποιες διαστάσεις να επιλέξουμε σαν προκαθορισμένες. Σε αυτή την εργασία η αρχική εικόνα που περιλαμβάνει το μάτι έχει σταθερή αναλογία ως προς το μήκος και πλάτος της (5:4). Πειραματικά λοιπόν, αυξομειωνόταν ο αριθμός των

γραμμών και οι στήλες άλλαζαν ανάλογα έτσι ώστε να διατηρηθεί η αναλογία. Στην παρακάτω γραφική φαίνεται η μεταβολή του “mean normalized error” σε σχέση με την αλλαγή των γραμμών τις εικόνας.



Όπως φαίνεται και από την γραφική το mean normalized error παρουσιάζει ελάχιστη τιμή όταν οι προκαθορισμένες γραμμές οριστούν μεταξύ των ορίων 50-60. Ο τελικός αριθμός 55 έχει επιλεγεί και στον πιο κάτω πίνακα παρατίθενται τα συνολικά αποτελέσματα.

Έκδοση 4	<i>mean_e</i>	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
	0.0636	72.0%	83.1%	96.5%

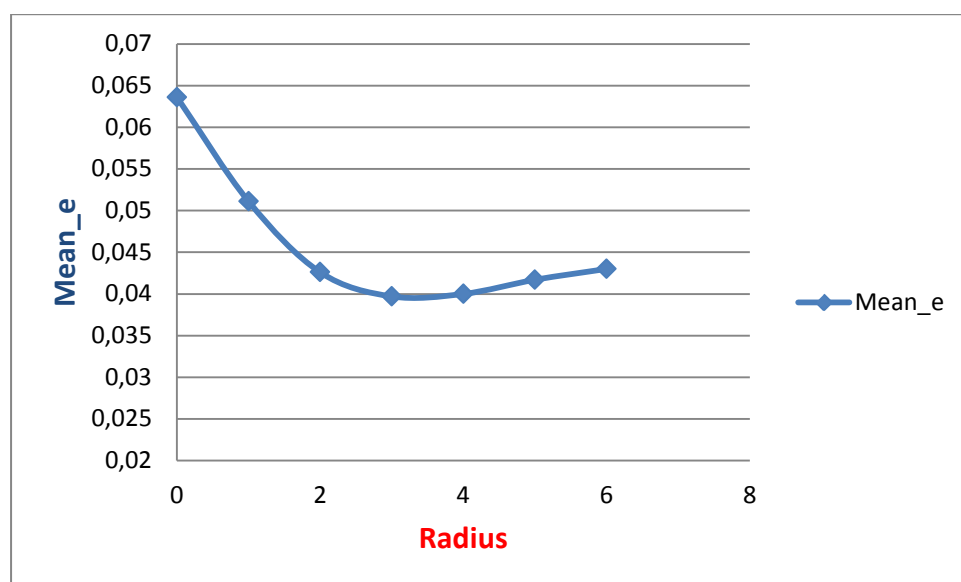
Πίνακας 4 (πηγή: από τον συγγραφέα)

Έκδοση 5 (radius restriction)

Πολλές φορές η προηγούμενη έκδοση δίνει λανθασμένα το κέντρο της κόρης στην γωνιά που σχηματίζει το μάτι . Ο λόγος είναι ότι η περιοχή αυτή έχει έντονες κυκλικές περιφερειακές αλλαγές ως προς την ένταση του φωτισμού κάτι που εύκολα μπορεί να παρουσιάσει ψηλές τιμές εφαρμόζοντας την πιο πάνω μέθοδο. Θετικό της πιο πάνω μεθόδου είναι ότι σπανίως θα παρουσιαστεί κάπου αλλού λάθος εκτός από την γωνιά των ματιών (αυτή η παρατήρηση έχει γίνει από τον συγγραφέα εμπειρικά και μόνο). Το αρνητικό όμως είναι ότι, είναι αρκετά δύσκολο κάποιος να ξεχωρίσει πότε έχουμε να κάνουμε με την γωνιά του ματιού και πότε με τον σωστό εντοπισμό της κόρης. Για να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα οι συγγραφείς έχουν προτείνει να εκπαιδεύσουν το

σύστημα με τις γνωστές μεθόδους εκμάθησης. Σε αυτήν την εργασία ωστόσο έχει προτιμηθεί να δοκιμαστεί μια άλλη μέθοδος.

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην εικασία ότι πολλές φορές αναλόγως με την κλίση του κεφαλιού του ατόμου ως προς την κάμερα, η γωνιά των ματιών σχηματίζει μια πολύ μικρή κυκλική επιφάνεια. Αυτή η κυκλική επιφάνεια έρχεται να δώσει πολλούς επιπρόσθετους λανθασμένους ψήφους στην γωνιά των ματιών σαν το πιθανόν κέντρο της. Η προτεινόμενη λύση λοιπόν είναι να αγνοήσουμε όλους τους ψήφους που προέρχονται από μικρές ακτίνες (*υπενθύμιση: το μέγεθος της ακτίνας υπολογίζεται από την αντίστροφη τιμή της κυρτότητας στο σημείο*). Τίθενται όμως δυο ερωτήματα 1) πόσο μικρή πρέπει να είναι η ακτίνα που θα απορρίψω για να βελτιωθούν το καλύτερο δυνατό τα αποτελέσματα; 2) πως θα επιλέξουμε το σωστό μέγεθος της ακτίνας από την στιγμή που αυτό εξαρτάται και από το μέγεθος της εικόνας μας την δεδομένη στιγμή; Για να αποφύγουμε το πρόβλημα της κλιμάκωσης που παρουσιάζεται στο 2^ο ερώτημα το υπολογιζόμενο μέγεθος της ακτίνας πολλαπλασιάζεται κάθε φορά με ένα συντελεστή έτσι ώστε να επαναφέρεται στο μέγεθος της αρχικής μου εικόνας και να είναι πλέον ανεξάρτητη του μεγέθους της εικόνας της δεδομένης στιγμής. Για να απαντήσουμε στο ερώτημα 1 θα τρέξουμε όλα τα αποτελέσματα της μεθόδου κάθε φορά με διαφορετικό μέγεθος ακτίνας προς απόρριψη (*σημείωση: όλοι οι άλλοι παράμετροι από την προηγούμενη έκδοση θα παραμείνουν ως έχουν*). Η πιο κάτω γραφική παράσταση υποδεικνύει την μεταβολή του mean normalized error σε σχέση με το μέγεθος της ακτίνας. Να σημειωθεί ότι εδώ το μέγεθος της ακτίνας αντιπροσωπεύει την πιο μικρή αποδεκτή τιμή για ακτίνα ενώ οι μικρότερες τιμές απορρίπτονται.



Όπως παρατηρούμε από την γραφική εάν απορρίψουμε όλα τα σημεία που παρουσιάζουν ακτίνα μικρότερη του 3 το mean normalized error παίρνει αρκετά χαμηλή τιμή. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα συνολικά αποτελέσματα μετά από αυτή την αλλαγή.

Έκδοση 5	$mean_e$	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
	0.0389	83.1%	97.1%	99.8%

Πίνακας5 (πηγή: από τον συγγραφέα)

4.3 Τελικά Αποτελέσματα Αναζήτησης κέντρου - Συζήτηση

Τα προηγούμενα αποτελέσματα είχαν όλα βγει από την βάση εκπαίδευσης. Τα τελικά αποτελέσματα που έγιναν πάνω στην βάση αξιολόγησης παρουσιάζονται στο πιο κάτω πίνακα. Τονίζετε πως όλες οι παράμετροι και διαδικασίες παρέμειναν αναλλοίωτες από την έκδοση 5.

Τελικά Αποτελέσματα	$mean_e$	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
	0.0397	82.8%	97.2%	99.8%

Πίνακας6 (πηγή: από τον συγγραφέα)

Από τον πιο πάνω πίνακα βλέπουμε ότι τα τελικά αποτελέσματα είναι πολύ παρόμοια με αυτά που έγιναν πάνω στη βάση εκπαίδευσης. Αυτό είναι ένα καλό σημάδι ότι τα αποτελέσματα δεν εξαρτώνται από την βάση. Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε πόσο σημαντική ήταν η μείωση του λάθους μεταξύ της έκδοσης 4 και 5. Από ότι φαίνεται η ιδέα για τον έλεγχο του μήκους της ακτίνας είναι πολύ σημαντική. Για σκοπούς σύγκρισης παραθέτουμε πιο κάτω τα αποτελέσματα από το πηγαίο άρθρο με τα δικά μας.

Μέθοδος-Πηγή	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
MIC+MS[11]	81.9%	87.1%	98.0%
MIC+ML[11]	86.1%	91.7%	97.9%
This Method	82.8%	97.2%	99.8%

Πίνακας7

Η MIC+MS είναι η μέθοδος από το άρθρο που χρησιμοποιεί την διαδικασία mean-shift για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων, ενώ η MIC+ML χρησιμοποιεί τεχνικές εκπαίδευσης μηχανής (machine learning). Από τον πίνακα μπορούμε να προσέξουμε ότι η μικρή διαφοροποίηση που έγινε στην έκδοση 5 (radius reduction) έδωσε πολύ καλύτερα αποτελέσματα από την αντίστοιχη μέθοδο MIC+MS του πηγαίου άρθρου. Επίσης τα αποτελέσματα είναι αρκετά συγκρίσιμα και με αυτά της μεθόδου MIC+ML από το άρθρο, που χρησιμοποιούν τεχνικές εκπαίδευσης. Υπάρχει λοιπόν η προσωπική πεποίθηση ότι αν χρησιμοποιηθούν μέθοδοι εκπαίδευσης στην δική μας έκδοση του αλγορίθμου τα αποτελέσματα θα παρουσιάσουν ακόμη περισσότερη ακρίβεια.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα της δικής μας μεθόδου έγιναν πάνω σε διαφορετική βάση από αυτή που χρησιμοποίησαν οι συγγραφείς του άρθρου για την αξιολόγηση (*BioID database*). Για να ήμαστε απόλυτα σωστοί βρήκαμε την βάση αυτή και εφαρμόσαμε ξανά τον ίδιο αλγόριθμο με τις ίδιες παραμέτρους. Ο πιο κάτω πίνακας παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την *BioID database*.

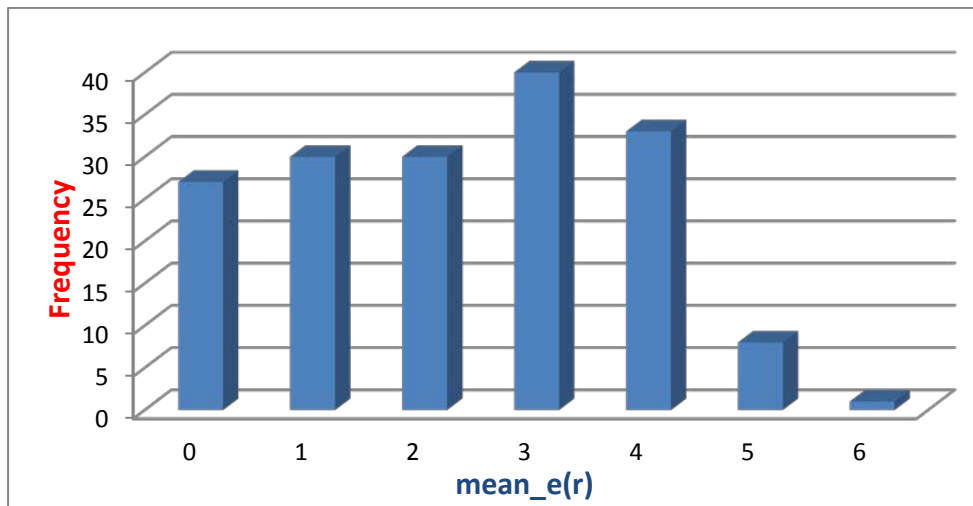
Μέθοδος-Πηγή	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
MIC+MS[11]	81.9%	87.1%	98.0%
MIC+ML[11]	86.1%	91.7%	97.9%
This Method	81.7%	96.8%	99.6%

Πίνακας8

Από τον πίνακα προκύπτει πως τα αποτελέσματα παραμένουν σχεδόν αναλλοίωτα κάτι το οποίο επιβεβαιώνει ότι η μέθοδος είναι ανεξάρτητη της βάσης. Πρέπει όμως να σημειωθεί πως οι συγγραφείς του άρθρου από τι φαίνεται χρησιμοποίησαν την ίδια βάση τόσο για εκπαίδευση όσο και για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Στην δική μας περίπτωση η εκπαίδευση και όλες οι παραμετροποιήσεις έχουν γίνει σε μια εντελώς διαφορετική βάση και η αξιολόγηση έγινε στην νέα βάση χωρίς καμία αλλαγή στις παραμέτρους. Αυτό είναι ένα σημαντικό σημείο που πιθανόν να επηρεάσει αρνητικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που είχαν οι συγγραφείς του συγκεκριμένου άρθρου.

Αξιολόγηση ακρίβειας ακτίνας r

Όπως έχουμε περιγράψει στην βασική μέθοδο η ακτίνα r θα υπολογίζεται ως η πιο συχνά εμφανιζόμενη ακτίνα. Επίσης στο κεφάλαιο της αξιολόγησης διευκρινίζεται πως το λάθος e_r θα υπολογίζεται μόνο στα στιγμιότυπα όπου θα ισχύει ότι $e \leq 0.05$. Στην τελευταία έκδοση της μεθόδου το normalized error ικανοποιεί την συνθήκη αυτή στα 169 στιγμιότυπα από τα συνολικά 207 (ποσοστό 81.7%) που αποτελείτο η βάση αξιολόγησης. Από αυτά τα στιγμιότυπα προκύπτει ο αντίστοιχος μέσος όρος $mean_{e_r} = 2,29$. Το πιο κάτω σχεδιάγραμμα συχνότητων δείχνει με περισσότερη λεπτομέρεια την κατανομή:



Από το σχεδιάγραμμα παρατηρούμε ότι η λανθασμένη υπολογιζόμενη τιμή της ακτίνας κυμαίνεται από 1 μέχρι 6 pixels. Αν ο χρήστης είναι λίγο μακριά από την κάμερα οι τιμές στο διάστημα (3-6) είναι εμφανής ότι στερούνται ακρίβειας. Στον 3^ο αλγόριθμο που θα περιγράψουμε μεταγενέστερα θα δούμε πως αυτό το λάθος θα μειωθεί.

Αξιολόγηση ταχύτητας

Όπως έχει αναφερθεί και στην αξιολόγηση των αλγορίθμων τα αποτελέσματα και η υλοποίηση των αλγορίθμων έχουν γίνει σε επεξεργαστή 2.9GHz Intel Core. Στο υπολογισμό της ταχύτητας έχει συμπεριληφθεί και ο χρόνος που χρειάζεται για την ανίχνευση του προσώπου. Με αυτά τα δεδομένα η έκδοση 3 (χωρίς το scale invariant) τρέχει κατά μέσο όρο 20ms ανά στιγμιότυπο. Αυτό αντιστοιχεί σε 50 στιγμιότυπα το δευτερόλεπτο. Η τελική έκδοση 5 (με το scale invariant) τρέχει με 31ms ανά στιγμιότυπο που αντιστοιχεί περίπου σε 32 στιγμιότυπα το δευτερόλεπτο.

Και στις δυο περιπτώσεις επιτυγχάνετε ταχύτητα πραγματικού χρόνου (που είναι και το ζητούμενο). Οι ταχύτητες αυτές είναι αρκετά ικανοποιητικές σε σχέση και με την ακρίβεια που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος. Ωστόσο αυτές οι ταχύτητες αναμένετε να επιβραδύνουν όταν η ίδια μέθοδος εκτελεστεί σε ένα πιο χαμηλής ισχύ επεξεργαστή (π.χ. smart-phone). Το αν θα διατηρήσει ταχύτητες για εφαρμογές πραγματικού χρόνου αυτό πλέον εξαρτάται από τις δυνατότητες της συσκευής. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως ο αλγόριθμος δεν έχει τύχει κάποια διαδικασία βελτιστοποίησης κάτι που θα μπορούσε να ανεβάσει τα επίπεδα ταχύτητας ακόμη πιο ψηλά.

5. Αλγόριθμος 2 – Μέθοδος Daugman

5.1 Περιγραφή της βασικής μεθόδου

Σχεδόν όλες οι μελέτες που έχουν γίνει για ανίχνευση της ίριδας έχουν σαν σημείο αναφοράς την μέθοδο του Daugman που περιγράφεται στο άρθρο του [5]. Ο Daugman ήταν από του πρώτους ερευνητές που ασχολήθηκε και ανέπτυξε συστήματα ανίχνευσης και ανάλυσης της ίριδας σαν βιομετρικό χαρακτηριστικό του ανθρώπου [18]. Στο άρθρο του ο Daugman προτείνει μια ολοκληρωμένη μέθοδο για ανίχνευση της ίριδας μέχρι την αποκωδικοποίηση της για την ταυτοποίηση ενός ατόμου. Εμείς θα περιγράψουμε και θα αναλύσουμε μόνο την μέθοδο την οποία προτείνει για ανίχνευση της ίριδας.

Έστω ότι έχουμε την συνεχή (=συνεχής συνάρτηση) εικόνα $I(\cdot, \cdot)$ που περιέχει το μάτι. Για την ανίχνευση της περιμέτρου της ίριδας που εμπεριέχεται μέσα σε αυτή την εικόνα ο Daugman πρότεινε για πρώτη φορά τον πολύ αναφερόμενο διαφορο-ολοκληρωτικό τελεστή:

$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left| G_\sigma(r) * \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r, x_0, y_0} \frac{I(x, y)}{2\pi r} ds \right| \quad (1)$$

Ο τελεστής αυτός έχει την ιδιότητα να ανιχνεύει κυκλικές ακμές που περιέχονται μέσα σε μια εικόνα. Το κάθε σημείο (x_0, y_0) της εικόνας $I(\cdot, \cdot)$ δηλώνει ψήφο για υποψήφιο κέντρο της ίριδας (εδώ γίνεται υπόθεση ότι η ίριδα είναι κυκλική) με ακτίνα r . Κάθε τέτοιο σημείο με την αντίστοιχη ακτίνα r ορίζει και μια κυκλική περιφέρεια η οποία αποτελεί και το σύνολο των σημείων πάνω στο οποίο γίνεται το ολοκλήρωμα της εικόνας μας. Το ολοκλήρωμα αυτό διαιρείται με την περίμετρο του αντίστοιχου κύκλου έτσι ώστε το αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται από το μέγεθος του κύκλου. Ο ρυθμός μεταβολής του συγκεκριμένου ολοκληρώματος σε σχέση με την μεταβαλλόμενη ακτίνα r αναμένεται να παρουσιάζει ακρότατες τιμές (ελάχιστες ή μέγιστες) κοντά σε κυκλικές περιφέρειες. Η μερική παράγωγος $\frac{\partial}{\partial r}$ ως προς την ακτίνα r έχει σαν σκοπό να μετρήσει αυτόν τον ρυθμό μεταβολής. Η συνάρτηση $G_\sigma(r)$ είναι μια οποιαδήποτε συνάρτηση εξομάλυνσης (smoothing function) εξαρτώμενη από την μεταβαλλόμενη ακτίνα r που έχει σαν σκοπό να απομακρύνει τον τυχόν θόρυβο είτε από την αρχική εικόνα είτε από τα αποτελέσματα του ρυθμού μεταβολής του ολοκληρώματος ως προς την ακτίνα (η συνάρτηση εξομάλυνσης και η διακριτή παράγωγος όντας γραμμικοί μετασχηματισμοί μπορούν να εκτελεστούν με οποιαδήποτε σειρά). Η τριάδα (r, x_0, y_0) με την μεγαλύτερη ανταπόκριση είναι και η πιο υποψήφια για την λύση του προβλήματος.

Τώρα, λόγω του ότι έχουμε να κάνουμε με διακριτές τιμές και όχι με συνεχής συναρτήσεις θέλουμε να εκφράσουμε τον τελεστή (1) σε διακριτό τύπο. Πρώτα, λόγω του ότι η διακριτή παράγωγος και η συνάρτηση εξομάλυνσης είναι γραμμικοί μετασχηματισμοί μπορούμε να αλλάξουμε την σειρά μεταξύ τους για να βρούμε την αντίστοιχη συνέλιξη. Χρησιμοποιώντας την διακριτή προσέγγιση της παραγώγου, έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial r} G_{\sigma}(r) \approx \frac{1}{\Delta r} G_{\sigma}(n\Delta r) - \frac{1}{\Delta r} G_{\sigma}((n-1)\Delta r) \quad (2)$$

όπου, Δr είναι μια μικρή ακέραια μεταβολή της ακτίνας. Έστω τώρα ότι θέλουμε να υπολογίσουμε το διακριτό κυκλικό ολοκλήρωμα από την (1) στο σταθερό σημείο (x_0, y_0) με ακτίνα $r = n\Delta r$. Με την χρήση των τριγωνομετρικών συναρτήσεων για την παραμετρική εξίσωση του κύκλου, το πιο πάνω ολοκλήρωμα μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$Int(n\Delta r, x_0, y_0) := \sum_m I[(n\Delta r \cos(m\Delta\theta + x_0), n\Delta r \sin(m\Delta\theta + y_0))] \quad (3)$$

όπου, $\Delta\theta$ αντιπροσωπεύει μια μικρή αλλαγή της γωνιάς για τον διακριτό υπολογισμό της περιφέρειας του κύκλου. Απομένει να γίνει η συνέλιξη μεταξύ του (2) και (3) και να υπολογιστεί η μέγιστη απόλυτη τιμή. Δηλαδή, ο τύπος (1) θα πάρει την τελική μορφή:

$$\max_{(n\Delta r, x_0, y_0)} \left| \frac{1}{\Delta r} \sum_k \left\{ \left(G_{\sigma}((n-k)\Delta r) - G_{\sigma}((n-k-1)\Delta r) \right) Int(k\Delta r, x_0, y_0) \right\} \right| \quad (4)$$

Ο δείκτης k στον πιο πάνω τύπο αντιπροσωπεύει την αλλαγή των θέσεων όσο αφορά την αντίστοιχη συνάρτηση εξομάλυνσης. Δηλαδή όσο περισσότερο το πλήθος των τιμών που παίρνει το k τόσο πιο μεγάλη η εξομάλυνση που θα γίνεται στα αποτελέσματα.

5.2 Αποτελέσματα-Παραμετροποιήσεις-Τροποποιήσεις-Συζήτηση

Έκδοση 1 (βασική μέθοδος)

Για την εφαρμογή του τύπου (4) πρέπει να επιλέξουμε ποια θα είναι η συνάρτηση εξομάλυνσης $G_{\sigma}(x)$. Σε αυτήν την εργασία έχει επιλεγεί η Γκαουσιανή συνάρτηση που δίνεται από τον τύπο:

$$G_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

Επίσης πρέπει να οριστεί το πλήθος k από την (4) στο οποίο η συνάρτηση εξομάλυνσης (5) θα εφαρμοστεί. Ας συμβολίσουμε το πλήθος του με $ksize$. Τότε όσο πιο μεγάλο είναι το $ksize$ τόσο πιο μεγάλη θα είναι η εξομάλυνση των αποτελεσμάτων. Ο σωστός ορισμός του $ksize$ είναι αρκετά σημαντικός για την περίπτωση μας, καθώς μεγάλες τιμές θα μας αφαιρέσουν την λεπτομέρεια από την περιφέρεια της ίριδας και μικρές τιμές θα διατηρήσουν την λεπτομέρεια της περιφέρειας της κόρης σε επίπεδα τέτοια που μπορεί να αλλοιώσει το αποτέλεσμα της εύρεσης της σωστής ακτίνας για την περιφέρεια της ίριδας. Η παράμετρος σ στην συνάρτηση (5) έχει ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με την $ksize$ καθώς

θα πρέπει να εξαρτώνται μεταξύ τους γραμμικά. Στην περίπτωση μας η παράμετρος σ έχει οριστεί σαν $\sigma = 0.3 \left(\frac{ksize}{2} - 1 \right) + 0.8$. Η πιο κάτω γραφική δείχνει την μεταβολή του mean normalized error ως προς τη μεταβολή του $ksize$.

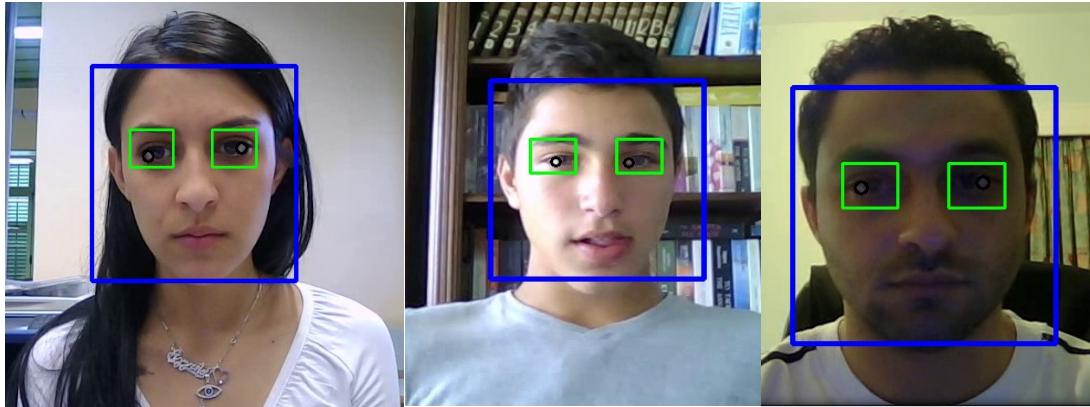


Από την γραφική προκύπτει ότι το μικρότερο λάθος επιτυγχάνεται με $ksize=5$. Πιο κάτω παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα της βασικής μεθόδου (με $ksize=5$).

Έκδοση 1	<i>mean_e</i>	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
	0.163	30.6%	35.8%	88.2%

Πίνακας1 (πηγή: από τον συγγραφέα)

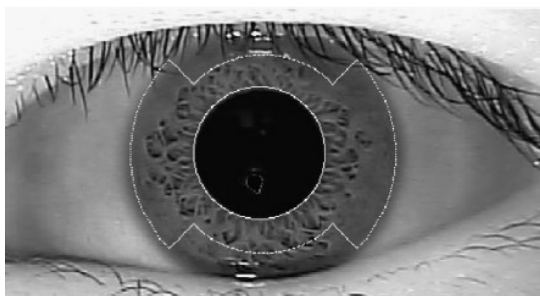
Παρατηρούμε πως γενικά τα ποσοστά έχουν αρκετά χαμηλή ακρίβεια σε σχέση με τον πρώτο αλγόριθμο. Αυτό εξηγείται από το γεγονός πως ο αλγόριθμος του Daugmann απλά ανιχνεύει περιοχές με έντονη κυκλική αλλαγή στην περιφέρεια τους, χωρίς να εκμεταλλεύεται κάποιες άλλες πληροφορίες της σχετικής περιοχής, όπως τα επίπεδα ισοφωτισμού ή την κατεύθυνση της αλλαγής του φωτισμού. Οι παρακάτω εικόνες δείχνουν λάθος αποτελέσματα της μεθόδου αυτή σε συγκεκριμένα στιγμιότυπα.



Παρατηρούμε ότι η πιο έντονη κυκλική αλλαγή σε αυτές τις περιπτώσεις παρουσιάζεται μεταξύ της γωνιάς του ματιού και της ίριδας. Όντως πρόκειται για μια περιοχή που οι κυκλικές αλλαγές στην ένταση είναι αρκετά μεγάλες. Δηλαδή ο τελεστής του Daugmann ανιχνεύει σωστά αυτή την περιοχή, αλλά δυστυχώς χωρίς περεταίρω πληροφορίες δεν μπορεί να την διακρίνει από την περιοχή της ίριδας. Ίσως να μπορούσε να βελτιωθεί αυτό το λάθος αν περιορίζαμε τον τελεστή στο να ανιχνεύει μόνο τις κυκλικές περιφέρειες των οποίων η αλλαγή στην ένταση τους να είχε διεύθυνση από τις πιο σκούρες περιοχές στις πιο ανοικτές. Κάτι που όμως δεν θα επιχειρηθεί σε αυτή την εργασία.

Έκδοση 2 (*circumference reduction*)

Πολλές φορές η περιφέρεια του ματιού δεν δημιουργεί πλήρες κύκλο λόγω του ότι αποκόπτεται από τα άνω ή κάτω βλέφαρα. Ο Daugmann προτείνει στο άρθρο του πως αντί να υπολογίζεται ολόκληρη η κυκλική περιφέρεια για τον τελεστή (4) θα ήταν καλύτερα να αποκόπτονταν κάποια μέρη της πάνω και κάτω περιφέρειας έτσι ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια της πρόβλεψης, όπως δείχνει η πιο κάτω εικόνα.



Φυσικά αυτή η εκτέλεση γίνεται με την υπόθεση πως η περιστροφή του ματιού δεν αποκλίνει αρκετά από τον οριζόντιο άξονα της φωτογραφίας, πράγμα που δεν είναι απαραίτητο πάντοτε να ισχύει. Επίσης κάποιες φορές η περιφέρεια της ίριδας δεν αποκόπτεται καθόλου από τα βλέφαρα και σε τέτοιες περιπτώσεις η πιο πάνω μετατροπή αναμένεται να μας δώσει πιο αδύνατα αποτελέσματα από την πρώτη έκδοση. Σε αυτή την

εργασία η περιφέρεια του κύκλου έχει χωριστεί σε 16 ίσα τμήματα και για την εκτέλεση της έκδοσης 2 δεν υπολογίζονται τα 2/16 της πάνω και κάτω περιφέρειας. Ο πιο κάτω πίνακας παρουσιάζει τα συνολικά αποτελέσματα μετά από αυτή την μετατροπή.

Έκδοση 2	$mean_e$	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
	0.148	30.3%	40.1%	95.5%

Πίνακας2 (πηγή: από τον συγγραφέα)

Παρατηρούμε ότι ο γενικός μέσος όρος λάθους έχει μεν μειωθεί αλλά διατηρεί ακόμη ψηλά επίπεδα ανακρίβειας. Επίσης αξίζει να σημειωθεί πως τα ποσοστά του πρώτου λάθους ($e \leq 0.05$) δεν έχουν τύχει κάποιας αλλαγής από την προηγούμενη έκδοση, κάτι που ίσως να μαρτυρεί πως η τελευταία μετατροπή δεν προσφέρεται για να βελτιώσει τα επίπεδα ακρίβειας σε πολύ μικρές αποστάσεις από το πραγματικό κέντρο αλλά περισσότερο για να μειώσει το πλήθος των λανθασμένων περιοχών που είχαν καταλογιστεί από την πρώτη έκδοση.

5.3 Τελικά Αποτελέσματα Αναζήτησης κέντρου (x_0, y_0) - Συζήτηση

Τα προηγούμενα αποτελέσματα είχαν όλα βγει από την βάση εκπαίδευσης. Τα τελικά αποτελέσματα που έγιναν πάνω στην βάση αξιολόγησης παρουσιάζονται στο πιο κάτω πίνακα. Τονίζετε πως όλες οι παράμετροι και διαδικασίες παρέμειναν αναλλοίωτες από την έκδοση 2.

Τελικά Αποτελέσματα	$mean_e$	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
	0.155	30.8%	38.7%	95.0%

Πίνακας3 (πηγή: από τον συγγραφέα)

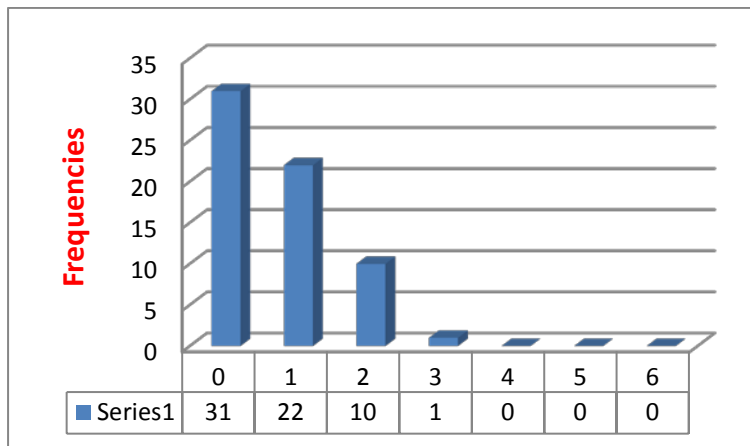
Τα αποτελέσματα είναι αρκετά παρόμοια με αυτά που βγήκαν από την βάση εκπαίδευσης. Κάτι που αξίζει να προσέξουμε είναι τα ψηλά ποσοστά που παρουσιάζει σε όλες τις περιπτώσεις το τρίτο λάθος ($e \leq 0.25$) σε σχέση με τα άλλα δυο. Από ότι φαίνεται δεν αποτελεί κάποια ιδιομορφία της βάσης (από την στιγμή που τα αποτελέσματα έχουν βγει με δυο διαφορετικές βάσεις) αλλά περισσότερο έχει να κάνει με την ίδια την μέθοδο. Μια εικασία του γιατί συμβαίνει αυτό (από εμπειρική μελέτη του συγγραφέα) έχει να κάνει με το πρόβλημα που ειπώθηκε στην έκδοση 1. Πολλές φορές δηλαδή το κέντρο της ίριδας υπολογίζεται λανθασμένα ανάμεσα στην γωνιά του ματιού και της ίριδας. Το κέντρο όμως αυτό εμπίπτει μέσα στο επιτρεπόμενο λάθος όπου $e \leq 0.25$ (μιας και το κέντρο αυτό είναι

πιο κοντά στο κέντρο της ίριδας από ότι η γωνιά του ματιού) αλλά ταυτόχρονα δεν είναι τόσο κοντά για να συγκαταλέγεται στις άλλες δυο κατηγορίες λάθους. Για να δώσουμε λίγη βαρύτητα σε αυτή την εικασία η τυπική απόκλιση της μεταβλητής *mean normalized error* έχει υπολογιστεί *standard deviation* = 0.041. Δηλαδή το *mean normalized error* παρουσιάζει μια τυπική απόκλιση από τον μέσο όρο 0.041 με τιμές στο διάστημα (0.114,0.196). Αυτό εκτός του ότι υποδεικνύει μια σταθερότητα γύρω από τον μέσο όρο, παρουσιάζει και μέγιστη τυπική απόκλιση μικρότερη του τρίτου λάθους $e \leq 0.25$. Αυτό ενδυναμώνει την θεωρία που έχει παρατηρηθεί και εμπειρικά ότι μπορεί το πλήθος των λανθασμένων εκτιμήσεων να είναι μεν μεγάλο αλλά αυτά τα λάθη παρουσιάζονται ως επί το πλείστον σε συγκεκριμένα σημεία σε απόσταση έτσι ώστε να ισχύει $e \leq 0.25$. Αυτή η παρατήρηση ίσως να είναι μια ένδειξη ότι η μέθοδος αυτή προσφέρεται για συνδυασμό με κάποιες από τις μεθόδους εκμάθησης, ώστε να αναγνωρίζει το σύστημα το πιθανόν λάθος.

Το γεγονός ότι η μέθοδος του Daugman δεν παρουσιάζει τόσο ακριβή αποτελέσματα δεν είναι και τόσο τυχαίο. Πρώτα από όλα σε αυτή την εργασία έχουμε υλοποίηση την πρωταρχική έκδοση της μεθόδου που είχε προτείνει ο Daugman το 1993. Πολλές εισηγήσεις και τροποποιήσεις της αρχικής μεθόδου ακολούθησαν διαχρονικά από διάφορους ερευνητές με διαφορετικά αποτελέσματα. Κατά δεύτερον ο Daugman όταν είχε προτείνει αυτό τον αλγόριθμο το είχε κάνει έχοντας κατά νου την δημιουργία κάποιου εξιδανικευμένου συστήματος με ειδική τεχνολογία που θα επέτρεπε να γίνει η ψηφιακή εξαγωγή της κόρης σε πολύ ψηλή ανάλυση. Η βάση μας όμως αποτελείται από εικόνες χαμηλής ανάλυσης και από διάφορες αποστάσεις κάτι για το οποίο δεν προοριζόταν αρχικά ο αλγόριθμος του Daugman. Ωστόσο η μέθοδος αυτή έχει ένα μεγάλο πλεονέκτημα όσο αφορά την ακρίβεια υπολογισμού της ακτίνας, κάτι που δεν παρουσιάζουν οι άλλες μέθοδοι και θα το δούμε με περισσότερη λεπτομέρεια στην συνέχεια.

Αξιολόγηση ακρίβειας ακτίνας r

Η μέθοδος του Daugman ελέγχει μέγιστα στον χώρο (r, x_0, y_0) . Υπενθυμίζουμε πως το λάθος e_r θα υπολογίζεται μόνο στα στιγμιότυπα όπου θα ισχύει ότι $e \leq 0.05$. Στην τελευταία έκδοση της μεθόδου το *normalized error* ικανοποιεί την συνθήκη αυτή στα 64 στιγμιότυπα από τα συνολικά 207 (ποσοστό 30.8%) που αποτελείτο η βάση αξιολόγησης. Από αυτά τα στιγμιότυπα προκύπτει ο αντίστοιχος μέσος όρος $mean_e_r = 0,70$. Το πιο κάτω σχεδιάγραμμα συχνοτήτων δείχνει με περισσότερη λεπτομέρεια την κατανομή:



Όπως φαίνεται από το σχεδιάγραμμα η μέθοδος του Daugman κάνει πολύ ακριβή πρόβλεψη της ακτίνας σε σύγκριση με την προηγούμενη μέθοδο. Κάτι το οποίο δεν αποτελεί έκπληξη μιας και η μέθοδος αυτή ελέγχει εξουθενωτικά ριχελ με ριχελ την κάθε διάσταση. Το γεγονός πως αυτή η μέθοδος παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια στην εύρεση της ακτίνας και ότι η προηγούμενη μέθοδος παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια στην εύρεση του κέντρου, δίνει μια σκέψη για τον συνδυασμό των δυο μεθόδων. Στον επόμενο αλγόριθμο θα δούμε με πιο τρόπο μπορούν να συνδυαστούν οι δυο αλγόριθμοι για να βελτιώσουν την ολική ακρίβεια.

Αξιολόγηση ταχύτητας

Όπως έχει αναφερθεί και στην αξιολόγηση των αλγορίθμων τα αποτελέσματα και η υλοποίηση των αλγορίθμων έχουν γίνει σε επεξεργαστή 2.9GHz Intel Core. Στον υπολογισμό της ταχύτητας έχει συμπεριληφθεί και ο χρόνος που χρειάζεται για την ανίχνευση του προσώπου. Με αυτά τα δεδομένα η έκδοση 2 τρέχει κατά μέσο όρο 990ms ανά στιγμιότυπο. Αυτό αντιστοιχεί περίπου σε 1 στιγμιότυπο το δευτερόλεπτο. Σίγουρα μια τέτοια ταχύτητα δεν προσφέρεται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, πόσο μάλλον σε συσκευές πιο αδύνατης ισχύς. Ο λόγος που η μέθοδος αυτή είναι τόσο αργή είναι η ψηλή του πολυπλοκότητα. Η μέθοδος του Daugman έχει κυβική πολυπλοκότητα (N^3) καθώς ανατρέχει σε ολόκληρη την δυσδιάστατη εικόνα και για κάθε σημείο της μεταβάλλεται αντίστοιχα και η ακτίνα του κύκλου. Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί για την βελτίωση της ταχύτητας στην αρχική μέθοδο του Daugman. Οι περισσότερες μέθοδοι στηρίζονται στην προσπάθεια για εφαρμογή της μεθόδου αυτή σε ένα πολύ πιο μικρό χώρο, κάτι το οποίο συνήθως βελτιώνει και την ακρίβεια. Τέτοιας μορφής είναι και η μέθοδος που προτείνουμε παρακάτω.

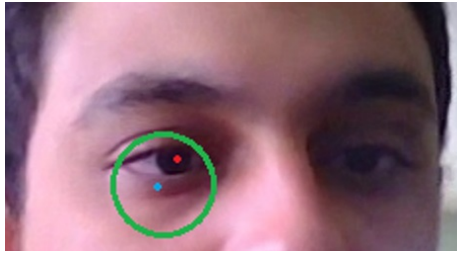
6. Αλγόριθμος 3 – Daugman + Ισόφωτες καμπύλες.

Είδαμε πως η πρώτη μέθοδος (Isocentric patterns) παρουσίαζε ψηλά ποσοστά ακρίβειας όσο αφορά την εύρεση του κέντρου, σε αρκετά γρήγορο χρόνο. Ωστόσο παρουσίαζε σχετικά χαμηλά επίπεδα ακρίβειας όσο αφορά την ακριβής εύρεση της αντίστοιχης ακτίνας. Αντιθέτως η δεύτερη μέθοδος (Daugman method) παρουσίαζε χαμηλά ποσοστά ακρίβειας όσο αφορά την εύρεση του κέντρου, σε αργό χρόνο αλλά παρουσίαζε αρκετά ψηλά ποσοστά ακρίβειας όσο αφορά την εύρεση της αντίστοιχης ακτίνας. Μια καλή σκέψη θα ήταν να βρούμε τρόπο να συνδυάσουμε τους δυο αλγορίθμους για βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Πιο κάτω θα δούμε την βασική μέθοδο που ακολουθήθηκε για τον σωστό συνδυασμό και μετέπειτα θα παρουσιαστούν τα τελικά αποτελέσματα.

6.1 Περιγραφή της μεθόδου- Αποτελέσματα

Μια πρώτη σκέψη λοιπόν θα ήταν να υπολογίζαμε με την πρώτη μέθοδο το κέντρο της ίριδας και μετέπειτα να υπολογίζαμε την αντίστοιχη ακτίνα με την δεύτερη μέθοδο. Αυτό όμως θα έχει σαν αποτέλεσμα μια μικρή βελτίωση όσο αφορά την ακτίνα και μόνο. Θα θέλαμε να εκμεταλλευτούμε τον συνδυασμό των δυο συνδυάζοντας ταυτόχρονα και τις πληροφορίες της κάθε μεθόδου για βελτίωση της ακρίβειας σε όλο τον χώρο (r, x_0, y_0) .

Στην πρώτη μέθοδο για κάθε σημείο υπολογίζαμε το διάνυσμα της μετατόπισης μαζί με την αντίστοιχη ακτίνα. Μετά για την πιο πιθανή ακτίνα παίρναμε αυτή που είχε εμφανιστεί τις περισσότερες φορές. Σε αυτή την έκδοση όμως θα παίρνουμε τον μέσο όρο όλων των ακτινών για την αντίστοιχη ακτίνα και όχι την πιο συνηθισμένη. Κάνοντας αυτή την αλλαγή να μιν μειώνουμε την ακρίβεια όσο αφορά την εύρεση της ακτίνας αλλά δημιουργούμε έτσι μια κυκλική περιοχή ασφαλείας στην οποία κατά μεγάλο βαθμό πιθανότητας συγκαταλέγεται και το πραγματικό κέντρο που γυρεύουμε (δες εικόνα 1). Αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι τα προηγούμενα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι το κέντρο που υπολογίζεται από την πρώτη μέθοδο θα είναι μέσα στα πλαίσια της ίριδας με 97.1% πιθανότητες. Και όντως έχουμε βρει το ποσοστό για το πόσες φορές η νέα κυκλική περιοχή που έχει οριστεί περιέχει και το πραγματικό κέντρο που είναι 98.7%. Στην πιο κάτω εικόνα το πραγματικό κέντρο είναι σημαδεμένο με κόκκινο χρώμα και η περιοχή που ορίζεται από την περιφέρεια με πράσινο χρώμα είναι περιοχή που έχουμε ορίσει η οποία περιλαμβάνει και το κέντρο.



Εικόνα 1.

Αυτή η νέα περιοχή που έχει οριστεί είναι πολύ πιο μικρή από την πρωταρχική που περιείχε ολόκληρο το μάτι. Τώρα η ιδέα είναι να εφαρμοστεί η μέθοδος του Daugman σε αυτή την νέα περιοχή για την εύρεση των σωστών παραμέτρων. Περιμένουμε η μέθοδος του Daugman να έχει περισσότερη ακρίβεια από πριν διότι η νέα περιοχή πλέον σπανίως περιέχει σημεία στα οποία η μέθοδος αυτή αποτύγχανε στις προηγούμενες εκδόσεις. Αναμένουμε επίσης να βελτιώσει κατά πολύ την ακρίβεια της ακτίνας. Ο πιο κάτω πίνακας δείχνει τα συνολικά αποτελέσματα για το κέντρο της ίριδας :

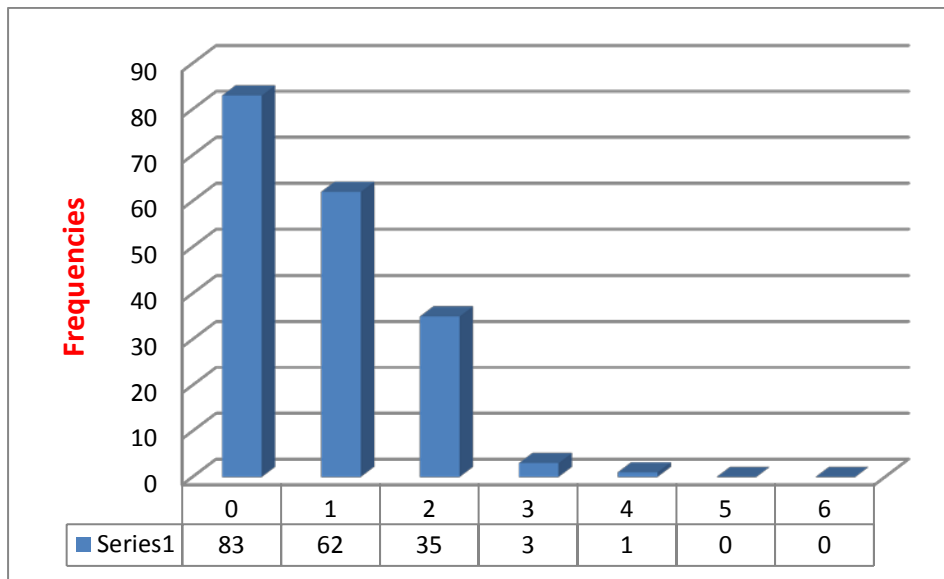
Τελικά Αποτελέσματα	$mean_e$	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
	0.0312	88.8%	96.2%	99.8%

Πίνακας1 (πηγή: από τον συγγραφέα)

Παρατηρούμε ότι σε σχέση με τα προηγούμενα αποτελέσματα υπάρχει μια μείωση στον μέσο όρο λάθους και μια αξιόλογη αύξηση στα ποσοστά ακριβείας του πρώτου λάθους. Το γεγονός ότι τα ποσοστά του δεύτερου και τρίτου λάθους παρέμειναν σχεδόν αναλλοίωτα δεν προκαλεί έκπληξη καθώς η νέα επιφάνεια που είχε οριστεί δεν αναμενόταν να περιέχει το κέντρο αν το υπολογιζόμενο κέντρο απείχε αρκετά από αυτό.

Αξιολόγηση ακρίβειας ακτίνας r

Σε αυτή την μέθοδο το normalized error είναι μικρότερο από 0.05 στα 184 στιγμιότυπα από τα συνολικά 207 (ποσοστό 88.8%) που αποτελείτο η βάση αξιολόγησης. Από αυτά τα στιγμιότυπα προκύπτει ο αντίστοιχος μέσος όρος $mean_{e_r} = 0,78$. Το πιο κάτω σχεδιάγραμμα συχνοτήτων δείχνει με περισσότερη λεπτομέρεια την κατανομή:



Παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα για την ακτίνα είναι πολύ παρόμοια με αυτά της μεθόδου του Daugman πράγμα λογικό μιας και είναι και η τελική μέθοδος εξακρίβωσης της ακτίνας και σε αυτή την περίπτωση.

Αξιολόγηση ταχύτητας

Αυτή η μέθοδος τρέχει κατά μέσο όρο 140ms ανά στιγμιότυπο. Αυτό αντιστοιχεί περίπου σε 7 στιγμιότυπα το δευτερόλεπτο. Από ότι βλέπουμε με την τελευταία μέθοδο καταφέραμε να ανεβάσουμε την ακρίβεια αλλά με κόστος την ταχύτητα. Αυτός ο αλγόριθμος ίσως να προσφέρεται για κάποιες εφαρμογές λόγω της καλής του ακρίβειας αλλά δεν θα μπορούσε να εκτελεστεί σε πραγματικό χρόνο, τουλάχιστον σε συσκευές χαμηλής ισχύς.

7. Τελικά συγκριτικά αποτελέσματα

Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μας μαζί με τα αποτελέσματα σχετικών ερευνών όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο άρθρο [11] για εύρεση του κέντρου της ίριδας.

Μέθοδος-Πηγή	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.25$
Method1	81.7%	96.8%	99.6%
Method2	30.8%	38.7%	95.0%
Method3	88.8%	96.2%	99.8%
MIC+MS[11]	81.9%	87.1%	98.0%
MIC+ML[11]	86.1%	91.7%	97.9%
Asteriadis[21]	74.00%*	81.70%	97.40%
Jesorsky[20]	40.00%	79.00%	91.80%
Cristinacce[22]	56.00%*	96.00%	98.00%
Turkan[23]	19.00%	73.68%	99.46%
Bai[24]	37.00%*	64.00%	96.00%
Campadelli[25]	62.00%	85.20%	96.10%
Hamouz[26]	59.00%	77.00%	93.00%
Kim[27]	n/a	96.40%	98.80%
Niu[28]	75.00%*	93.00%	98.00%*
Asadifard[29]	47.00%	86.00%	96.00%
Timm[30]	82.50%	93.40%	98.00%
Kroon[31]	65.00%*	87.00%	98.80%*

Πίνακας 2 (πηγή : [11]) *= εκτιμήθηκε από τις γραφικές του συγγραφέα

Από τον πίνακα βλέπουμε ότι η μέθοδος 1 και η μέθοδος 3 που εισηγηθήκαμε σε αυτήν την εργασία παρουσιάζουν πάρα πολύ καλά αποτελέσματα. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στο πρώτο λάθος που είναι και το πιο μικρό, για τον εντοπισμό της κόρης. Από ότι φαίνεται ο αλγόριθμος που προτείνουν στο [11] είναι συγκριτικά ίσως ο καλύτερος αλγόριθμος για να υπολογίζει με ακρίβεια το κέντρο της ίριδας, ενώ με τις δικές μας τροποποιήσεις το ποσοστό αυτό έχει ανεβεί ακόμη πιο ψηλά. Ίσως αν γινόταν κάποιος συνδυασμός για εκπαίδευση του συστήματος (που είχαμε προτείνει σε προηγούμενο κεφάλαιο) τα ποσοστά να ήταν ακόμη πιο μεγάλα.

8. Επίλογος/Τελικά Συμπεράσματα

Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας έχουμε υλοποιήσει, αναλύσει και αξιολογήσει τρεις αλγόριθμους εντοπισμού του κέντρου της ίριδας των ματιών και της ακτίνας. Η βάση αξιολόγησης επιλέχθηκε από κάμερα χαμηλής ανάλυσης για να υπάρχει συμφωνία όσο αφορά τον σκοπό της εργασίας αυτής. Οι αλγόριθμοι αυτή αξιολογήθηκαν με κριτήρια την ακρίβεια και την ταχύτητα που ίσως είναι τα πιο σημαντικά για την ανάπτυξη μια εφαρμογής σε συστήματα χαμηλής ισχύς.

Ο πρώτος αλγόριθμος που χρησιμοποιούσε ισόφωτες καμπύλες έδειξε πως έχει αρκετά καλά επίπεδα ακρίβειας όσο αφορά το κέντρο του κύκλου με πολύ καλή ταχύτητα. Κάποιες συγκεκριμένες τροποποιήσεις που έχουν προταθεί και έγιναν ανέβασαν την ακρίβεια ακόμη πιο ψηλά. Σε αυτό το σημείο έχει γίνει μια εισήγηση πως τα αποτελέσματα θα ήταν ακόμη πιο ακριβής αν συνδυάζονται με κάποια μέθοδο εκμάθησης. Αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι οι λανθασμένες εκτιμήσεις παρουσιάζονται σχεδόν πάντα στα ίδια σημεία. Ο αλγόριθμος αυτός λόγω της ακρίβειας και της ταχύτητας του θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε κάποιες εφαρμογές για ανίχνευση του κέντρου της κόρης ακόμη σε συσκευές με χαμηλή ισχύ όπως smart-phones. Φυσικά η ακρίβεια του δεν μπορεί να συγκριθεί με την ακρίβεια που παρουσιάζει ένα εξειδικευμένο σύστημα, αλλά για τους σκοπούς πολλών εφαρμογών ίσως να είναι ικανοποιητική.

Τώρα είδαμε πως ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δεν παρουσιάζει και τόσο μεγάλη ακρίβεια όσο αφορά την εύρεση του μεγέθους της ακτίνας όσο αυτός του Daugman (2^{ος} αλγόριθμος). Όπως είδαμε η μέθοδος του Daugman υπολογίζει σωστά την ακτίνα ωστόσο μειονεκτεί στην ταχύτητα και στην εύρεση του κέντρου της ίριδας.

Ο 3^{ος} αλγόριθμος, κάνει ένα συνδυασμό τον δυο με σκοπό να βελτιώσει την συνολική ακρίβεια. Είδαμε πως αυτός ο συνδυασμός έφερε το επιθυμητό αποτέλεσμα της περισσότερης ακρίβειας αλλά με κόστος της μείωσης της ταχύτητας.

Μιας και η ταχύτητα με την ακρίβεια είναι δυο μεταβλητές αντιστρόφως ανάλογες, κάποιος αναλόγως της εφαρμογής που θα ήθελε να αναπτύξει θα πρέπει να επιλέξει σε πια μεταβλητή να δώσει περισσότερη βαρύτητα.

Τέλος, οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν εδώ έχουν συγκριθεί με τις πιο σύγχρονες και είδαμε ότι είναι αρκετά ανταγωνίσιμες και σε κάποιες περιπτώσεις ξεπερνούν σε ακρίβεια τις υπόλοιπες. Ωστόσο καμιά μέθοδος ακόμη δεν βρίσκεται στο επίπεδο της εύρωστης συμπαγής μεθόδου η οποία θα μπορούσε να υλοποιηθεί για γενικές εφαρμογές και υπάρχουν ακόμη πολλά περιθώρια βελτίωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T. Hutchinson, K.P. White, W.N. Martin, K.C. Reichert, and L.A. Frey, "Human-Computer Interaction Using Eye-Gaze Input", IEEE TSMC, 19(6):1527-1534, 1989.
- [2] F. Jacob, "The use of eye movements in human-computer interaction techniques", ACM TIS, 9(93):152-169, 1991.
- [3] M. Betke, W. Mullally, "Preliminary Investigation of Real-Time Monitoring of a Driver in City Traffic", Proc. IEEE Intel. Vehicles Symp., 563-568, 2000.
- [4] De Santis, Alberto, and Daniela Iacoviello. "Robust real time eye tracking for computer interface for disabled people." Computer methods and programs in biomedicine 96.1 (2009): 1-11.
- [5] Daugman, John G. "High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence." Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on 15.11 (1993): 1148-1161.
- [6] Daugman, John G. "Biometric personal identification system based on iris analysis." U.S. Patent No. 5,291,560. 1 Mar. 1994.
- [7] Leonard Flom, Aran Safir, Iris recognition system, U.S. Patent 4,641,349, 1987.
- [8] R. Johnston, Can iris patterns be used to identify people? Los Alamos National Laboratory, Chemical and Laser Sciences Division Annual Report LA-12331-PR, June 1992, pp. 81–86.
- [9] John Daugman, How iris recognition works, IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol. 14 (1) (2004) 21–30.
- [10] Leonard Flom, Aran Safir, Iris recognition system, U.S. Patent 4,641,349, 1987.
- [11] Accurate Eye Center Location through Invariant Isocentric Patterns
- [12] J. Lichtenauer, E. Hendriks, and M. Reinders. Isophote properties as features for object detection. In CVPR, volume 2, pages 649–654, 2005.
- [13] B. Froba and A. Ernst. Face detection with the modified census transform. Aut. Face and Gest. Recog., pages 91–96, 2004.
- [14] C. Kervrann, M. Hoebeke, and A. Trubuil. Isophotes selection and reaction-diffusion model for object boundaries estimation. IJCV, 50:63–94, 2002.
- [15] J. Geusebroek, A. Smeulders, and J. van de Weijer. Fast anisotropic gauss filtering. TIP, 12, 2002.
- [16] J. Koenderink and A. J. van Doorn. Surface shape and curvature scales. Image and Vision Computing, pages 557–565, 1992.

- [17] D. Comaniciu, V. Ramesh, and P. Meer. Kernel-based object tracking. *PAMI*, 25(5):564–577, 2003.
- [18] John Daugman. Biometric personal identification system based on iris analysis. U.S. Patent No. 5,291,560, March 1994.
- [19] John Daugman, New methods in iris recognition, *IEEE Trans. Syst. Man Cyber.– B* 37 (5) (2007) 1167–1175
- [20] O. Jesorsky, K. J. Kirchbergand, and R. Frischholz. Robust face detection using the Hausdorff distance. In *Audio and Video Biom. Pers. Auth.*, pages 90–95, 1992
- [21] S. Asteriadis, N. Nikolaidis, A. Hajdu, and I. Pitas. An eye detection algorithm using pixel to edge information. In *Int. Symp. on Control, Commun. and Sign. Proc.*, 2006.
- [22] D. Cristinacce, T. Cootes, and I. Scott. A multi-stage approach to facial feature detection. In *BMVC*, pages 277–286, 2004.
- [23] M. Turkan, M. Pardas, and A. Cetin. Human eye localization using edge projection. In *Comp. Vis. Theory and App.*, 2007.
- [24] L. Bai, L. Shen, and Y. Wang. A novel eye location algorithm based on radial symmetry transform. In *ICPR*, pages 511–514, 2006.
- [25] P. Campadelli, R. Lanzarotti, and G. Lipori. Precise eye localization through a general-to-specific model definition. In *BMVC*, 2006.
- [26] M. Hamouz, J. Kittlerand, J. K. Kamarainen, P. Paalanen, H. Kalviainen, and J. Matas. Feature-based affine-invariant localization of faces. *PAMI*, 27(9):1490–1495, 2005.
- [27] S. Kim, S.-T. Chung, S. Jung, D. Oh, J. Kim, and S. Cho. Multi-scale gabor feature based eye localization. In *World Academy of Science, engineering and Technology*, 2007
- [28] Z. Niu, S. Shan, S. Yan, X. Chen, and W. Gao. 2D cascaded adaboost for eye localization. In *ICPR*, 2006
- [29] M. Asadifard and J. Shanbezadeh. Automatic adaptive center of pupil detection using face detection and cdf analysis. In *IMECS*, 2010.
- [30] F. Timm and E. Barth. Accurate eye centre localisation by means of gradients. In *VISAPP*, 2011
- [31] B. Kroon, A. Hanjalic, and S. M. Maas. Eye localization for face matching: is it always useful and under what conditions? In *CIVR*, 2008
- [32] Richard P. Wildes, Iris recognition: An emerging biometric technology, *Proc. IEEE* 85 (9) (1997) 1348-1363.
- [33] Yuanning Liu, Senmiao Yuan, Xiaodong Zhu, Qingliang Cui, A practical iris acquisition system and a fast edges locating algorithm in iris recognition, in: *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2003, pp. 166-168.
- [34] Ya-ping Huang, Si-wei Luo, En-yi Chen, An efficient iris recognition system, in: *International Conference of Machine Learning and Cybernetics*, vol. 1, November 2002, pp. 450-454.

- [35] Pan Lili, Xie Mei, The algorithm of iris image processing, in: Fourth IEEE Workshop on Automatic Identification Technologies, October 2005, pp. 134-138.
- [36] XiaoFu He, PengFei Shi, A novel iris segmentation method for hand-held capture device, in: Springer LNCS 3832: International Conference on Biometrics, January 2006, pp. 479-485.
- [37] Xinhua Feng, Chi Fang, Ziaoqing Ding, Youshou Wu. Iris localization with dual coarse-to-fine strategy, in: International Conference on Pattern Recognition, August 2006, pp. 553-556.
- [38] Qi-Chuan Tian, Quan Pan, Yong-Mei Cheng, Quan-Xue Gao, Fast algorithm and application of hough transform in iris segmentation, in: International Conference on Machine Learning and Cybernetics, volume 7, August 2004, pp. 3977-3980.
- [39] Guang Zhu Xu, ZaiFeng Zhang, YiDe Ma, Automatic iris segmentation based on local areas, in: International Conference on Pattern Recognition, August 2006, pp. 505-508.
- [40] Theodore A. Camus, Richard P. Wildes, Reliable and fast eye finding in close-up images, in: Interantional Conference on Pattern Recognition, 2002, pp. 389-394.
- [41] John Daugman, Statistical richness of visual phase information: update on recognizing persons by iris patterns, *Int. J. Comput. Vis.* 45 (1) (2001) 25-38