



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ιατρική απεικόνιση: Μια συγκριτική έρευνα τριών τεχνικών για την διόρθωση της φωτεινότητας και της αντίθεσης ιατρικών εικόνων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Γεώργιος Παπαδόπουλος

Επιβλέπων : Γεώργιος Ματσόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Ματσόπουλο , Επίκουρο Καθηγητή-Ε.Μ.Π, για τις συμβουλές και την υποστήριξη του κατά τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας, αλλά και του φοιτητικού βίου μου γενικότερα, καθώς και τον Θοδωρή Οικονομόπουλο για την καθοδήγηση και την πολύτιμη συνεισφορά του στη διεκπεραίωση της εργασίας αυτής.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής: Διονύσιος – Δημήτριος Κουτσούρης και Νικόλαος Ουζούνογλου Καθηγητές Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους.

Ευχαριστώ όλους μου τους φίλους που στάθηκαν δίπλα μου σε όλες τις δυσκολίες, για την πολύτιμη βοήθεια, τη συμπαράστασή τους, και για τις μοναδικές στιγμές που ζήσαμε, που έκαναν όλα αυτά τα χρόνια αξέχαστα.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την κατανόηση και την ηθική στήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Γενικά, τεχνικές διόρθωσης φωτεινότητας και αντίθεσης εικόνων χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές της ιατρικής απεικόνισης. Πιο συγκεκριμένα η χρήση τους κρίνεται απαραίτητη όταν πρέπει να συγκριθούν ιατρικά δεδομένα που έχουν αποκτηθεί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, κυρίως εξαιτίας των διαφορετικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την απόκτηση των δεδομένων αυτών. Πολλές τεχνικές έχουν δοκιμαστεί σε αυτό το πεδίο, από απλά φίλτρα διόρθωσης μέχρι πιο πολύπλοκες αναδρομικές τεχνικές. Αυτή η εργασία θα παρουσιάσει ένα συγκριτικό έλεγχο τριών τέτοιων τεχνικών και πιο συγκεκριμένα των **Contrast Stretching**, της Μεθόδου **Robust Film Correction** του Ruttimann και της **Boxcar Filtering** (Φίλτρο Boxcar). Οι τρεις αυτές τεχνικές εφαρμόστηκαν σε ένα σύνολο από 60 ζεύγη εικόνων χωρισμένο σε τρία υποσύνολα με σκοπό να αξιολογηθεί η απόδοση των συγκρινόμενων τεχνικών σε πλήθος εικόνων με διακυμάνσεις στα επίπεδα φωτεινότητας και αντίθεσης. Ο ποιοτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε με οπτική επιθεώρηση των διορθωμένων εικόνων με σκοπό να εκτιμηθούν οι διαφορές μεταξύ αυτών και των εικόνων αναφοράς. Αντίθετα, ο ποσοτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε με τη σύγκριση των τιμών κάποιων συγκεκριμένων μετρήσιμων χαρακτηριστικών των εικόνων, με τιμές αναφοράς που προέκυψαν βάση στατιστικής μελέτης. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής θα εξεταστούν εκτενέστερα στην συνέχεια της εργασίας.

Λέξεις-Κλειδιά:

Διόρθωση φωτεινότητας, Διόρθωση αντίθεσης, Robust Film Correction, Contrast Stretching, Boxcar Filtering, Μετρήσιμα χαρακτηριστικά, Συντελεστής συσχέτισης, Ψηφιακή αφαιρετική τεχνική

ABSTRACT

Contrast and brightness correction are often required in many medical imaging applications, especially when comparing medical data acquired over different time periods, due to dissimilarities in the acquisition process. Numerous methods have been proposed in this field, ranging from simple correction filters to more complicated recursive techniques. This paper presents a comprehensive comparison of three methods for correcting the contrast and brightness of medical images, namely, Contrast Stretching, Ruttimann's Robust Film Correction and Boxcar Filtering. The three methods were applied to a total of 60 image pairs, divided into three sets, in order to evaluate the performance of the compared methods on images with different levels of contrast, brightness and combinational contrast and brightness variations. Qualitative evaluation was performed by means of visual assessment on the corrected images in order to estimate the deviations relative to the reference data. Quantitative evaluation was performed by pair-wise statistical evaluation on all image pairs in terms of specific features of merit based on widely used metrics. Following qualitative and quantitative analysis, it was deduced that the Robust Film Correction Method systematically outperformed the other two methods in comparison in most cases on average.

Keywords: Contrast Correction, Brightness Correction, Robust Film Correction, Contrast Stretching, Boxcar Filter, Features of Merit, Statistical Relevance, Digital Subtraction Radiography

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 6 |
| 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ..... | 9 |
| 2.1 Συλλογή δεδομένων | 9 |
| 2.2 Επιλογή Μεθόδων | 11 |
| 3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ..... | 12 |
| 3.1 Robust Film Correction Method | 12 |
| 3.2 Contrast Stretching | 13 |
| 3.3 Boxcar Filtering | 14 |
| 3.4 Τεχνικές αξιολόγησης | 16 |
| 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | 18 |
| 4.1 Ποιοτικός έλεγχος..... | 19 |
| 4.2 Ποσοτικός έλεγχος..... | 29 |
| 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ | 37 |
| 6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ | 44 |
| 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 45 |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας αντικειμενικός συγκριτικός έλεγχος, μεταξύ δύο η περισσότερων ιατρικών εικόνων, είναι συχνά απαραίτητη προϋπόθεση για την αντιμετώπιση προβλημάτων με τα οποία ασχολείται η Ιατρική επιστήμη. Οι γιατροί, για παράδειγμα, αξιολογούν πολλές φορές την εξέλιξη παθολογικών καταστάσεων, εξετάζοντας και συγκρίνοντας δεδομένα που συλλέγονται από την περιοχή που εμφανίζεται η ασθένεια, σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, εστιάζοντας σε διαφορετικές λεπτομέρειες κάθε φορά. Έτσι τους δίνεται η δυνατότητα να εντοπίσουν και να αναγνωρίσουν χαρακτηριστικά τα οποία σχετίζονται με συγκεκριμένες παθήσεις, αξιολογώντας παράλληλα την αποτελεσματικότητα της εκάστοτε θεραπευτικής μεθόδου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με απλή παρατήρηση των δύο εικόνων από τον θεράποντα γιατρό είτε με τη βοήθεια ειδικών λογισμικών σχεδιασμένων για αυτό το λόγο. Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται η ψηφιακή αφαιρετική τεχνική, κατά την οποία οι εικόνες ευθυγραμμίζονται ψηφιακά με τον μετασχηματισμό συγκεκριμένων ζευγών συντεταγμένων (το σύνολο των οποίων είναι γνωστό από πριν) και στην συνέχεια η μια αφαιρείται από την άλλη, με αποτέλεσμα η εικόνα που παράγεται μετά την επεξεργασία να επισημαίνει και να τονίζει τις διαφορές σε επιλεγμένα σημεία.

Ιδανικά οι συγκρινόμενες εικόνες θα έπρεπε να εμφανίζουν τις ίδιες ιδιότητες όσον αφορά στην φωτεινότητα και στην αντίθεση ώστε να διευκολύνεται η διαδικασία και στις δύο περιπτώσεις. Παρόλα αυτά τις περισσότερες φορές δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο, ακόμα και όταν συγκρίνουμε δεδομένα που έχουν συλλεχθεί με την ίδια ακριβώς μέθοδο. Υπάρχουν διάφοροι αστάθμητοι παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία συλλογής, ειδικά όταν αυτή πραγματοποιείται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Μερικούς από τους παράγοντες αυτούς αποτελούν η γωνία λήψης της εικόνας, η παρουσία θορύβου καθώς και διάφοροι άλλοι που σχετίζονται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται. Η αξιολόγηση με την βοήθεια λογισμικού γίνεται κυρίως μέσω των ψηφιακών αφαιρετικών ακτινογραφιών. Η μέθοδος αυτή είναι άκρως αποτελεσματική γιατί εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία σε διαφορές που παρατηρούνται στη φωτεινότητα και την αντίθεση. Όταν αφαιρούνται δύο εικόνες οι οποίες εμφανίζουν μεγάλη απόκλιση στα επίπεδα φωτεινότητας και αντίθεσης το αποτέλεσμα της αφαίρεσης μπορεί να αλλοιωθεί σημαντικά από ανεπιθύμητα δεδομένα στις περιοχές που εμφανίζονται οι διακυμάνσεις

αυτές. Σε αυτήν την περίπτωση η εξαγωγή συμπεράσματος από την παρατήρηση της εικόνας που παράγεται παρουσιάζει κινδύνους, καθώς ο ειδικός θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμήσει ποιο από τα δεδομένα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και ποιο όχι.

Ως εκ τούτου πολλές διορθωτικές τεχνικές έχουν δοκιμαστεί σε αυτό το πεδίο, οι περισσότερες εκ των οποίων εστιάζουν στην διόρθωση της αντίθεσης των αρχικών εικόνων. Σε γενικές γραμμές οι τεχνικές αυτές μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

α) Τεχνικές οι οποίες επεμβαίνουν απευθείας στην εικόνα εξετάζοντας τις τιμές των pixels των εικόνων.

β) Τεχνικές οι οποίες επεμβαίνουν μόνο στο ιστόγραμμα των εικόνων.

Στην πρώτη κατηγορία εμπίπτουν απλές τεχνικές όπως η κανονικοποίηση και το φιλτράρισμα, οι οποίες υστερούν συνήθως σε ακρίβεια από άλλες πολυπλοκότερες. Είναι όμως κατά κανόνα αρκετά γρηγορότερες και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπου η ταχύτητα είναι το ζητούμενο. Η δεύτερη κατηγορία περιέχει πιο πολύπλοκες τεχνικές οι οποίες βασίζονται κυρίως στην αθροιστική συνάρτηση κατανομής και την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Οι συναρτήσεις αυτές εξάγονται συνήθως από το ιστόγραμμα των προς επεξεργασία εικόνων. Μία τέτοια προσέγγιση είναι και η Robust Film Correction από τον Ruttiman καθώς και οι Histogram Equalization, Histogram Shaping και η Histogram Flattening. Οι μέθοδοι αυτές μας παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια υστερώντας όμως αισθητά σε ταχύτητα, γεγονός που τις καθιστά πολύτιμες κυρίως σε εφαρμογές της Ιατρικής όπως οι ψηφιακές ακτινογραφίες. Ο πρωταρχικός στόχος μιας διορθωτικής τεχνικής είναι να εξομαλύνει τις διαφορές στα επίπεδα φωτεινότητας και αντίθεσης μεταξύ της υπό διόρθωση εικόνας και της εικόνας αναφοράς. Η εργασία αυτή θα προσπαθήσει να πραγματοποιήσει μία σύγκριση τριών τέτοιων διορθωτικών τεχνικών και από τις δύο κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα θα εξεταστούν οι Contrast Stretching, Boxcar Filtering και η Μέθοδος Robust Film Correction του Ruttiman. Οι τεχνικές αυτές εφαρμόστηκαν σε ένα σύνολο 60 ζευγών εικόνων. Οι εικόνες αυτές χωρίστηκαν σε τρία υποσύνολα ανάλογα με τη διακύμανση που παρουσίαζαν στα επίπεδα φωτεινότητας, αντίθεσης ή και τα δύο συνδυαστικά. Η αξιολόγηση των μεθόδων πραγματοποιήθηκε με ποιοτικά αλλά και ποσοτικά κριτήρια. Ποιοτικά με απλή οπτική αποτίμηση των

διορθωμένων εικόνων και ποσοτικά συγκρίνοντας τις τιμές συγκεκριμένων μετρήσιμων χαρακτηριστικών με τιμές αναφοράς που προέκυψαν βάση στατιστικής μελέτης.

Η εργασία είναι χωρισμένη σε τρία τμήματα. Το πρώτο περιγράφει τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή των δεδομένων της έρευνας. Εξετάζει επίσης τους αλγορίθμους των διορθωτικών τεχνικών καθώς και την μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση τους. Το δεύτερο θα παρουσιάσει τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής ενώ το τρίτο και το τελευταίο αναλύει τα αποτελέσματα αυτά καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Συλλογή δεδομένων

Ένα σύνολο 60 ζευγών εικόνων χωρισμένο σε 3 υποσύνολα με κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των τριών τεχνικών. Το κάθε ζεύγος αποτελείται από την εικόνα αναφοράς και την υπο διόρθωση εικόνα προϊόν επεξεργασίας της πρώτης. Το πρώτο υποσύνολο περιλαμβάνει οδοντιατρικές ακτινογραφίες οι οποίες παρουσιάζουν διακυμάνσεις μόνο στα επίπεδα αντίθεσης. Η αντίθεση της υπο διόρθωση εικόνας μεταβλήθηκε από -50% μέχρι και +50% ανά διαστήματα 5%. Δημιουργήθηκαν έτσι 20 ζεύγη εικόνων. Το δεύτερο υποσύνολο περιέχει φωτογραφίες του αμφιβληστροειδούς πάνω σε διάταξη συζευγμένου φορτίου (CCD) με διακυμάνσεις μόνο πάνω στα επίπεδα φωτεινότητας. Εδώ τα 20 ζεύγη εικόνων δημιουργήθηκαν με μεταβολή της φωτεινότητας από -100% μέχρι και +100% ανά διαστήματα των 10%. Τέλος το τρίτο υποσύνολο αποτελείται από 20 ζεύγη εικόνων από αξονικές τομογραφίες στην περιοχή του γόνατος. Εκεί πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονη μεταβολή στην αντίθεση και τη φωτεινότητα με το ίδιο εύρος όπως έγινε και παραπάνω ανά ίσα διαστήματα 5% και 10% αντίστοιχα. Όλες οι μεταβολές πραγματοποιήθηκαν χειροκίνητα με τη βοήθεια ενός λογισμικού πακέτου σχεδιασμένου για την επεξεργασία εικόνων το (GIMP) , τροποποιώντας την εικόνα αναφοράς κάθε συνόλου όπως περιγράφηκε από πάνω.

Η λήψη της εικόνας αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο σύνολο (οδοντιατρική ακτινογραφία) πραγματοποιήθηκε με τον εξής τρόπο: Η κάτω γνάθος του ασθενή τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο στη συσκευή ώστε να μπορεί και αυτή αλλά και η πλάκα της ακτινογραφίας να μετακινούνται οριζόντια και κάθετα σε σχέση με την κεντρική δέσμη των ακτίνων Χ. Έτσι κατέστη δυνατή η λήψη ακτινογραφιών υπό γωνία 0,3 και 6 μοιρών. Η δέσμη προσέπιπτε κάθετα στον μακρύ άξονα της οδοντοστοιχίας έτσι ώστε να μην υπάρχει επικάλυψη στις παρακείμενες επιφάνειες των δοντιών. Η ακτινογραφία μετατράπηκε σε ψηφιακή μορφή με την χρήση του ψηφιακού σαρωτή Agfa Arcus II δημιουργώντας ένα αρχείο εικόνας 8 bit σε κλίμακα του γκρι. Η απόσταση του αντικειμένου από τον φακό εστίασης του ακτινογράφου και την πλάκα της ακτινογραφίας ήταν 40 και 0.5 cm αντίστοιχα. Το μέγεθος της ακτινογραφίας in vitro ήταν 428x312 pixels.

Η λήψη της εικόνας αναφοράς του δεύτερου συνόλου έγινε με τη βοήθεια του IMAGEnet 1024, το οποίο είναι ένα ψηφιακό σύστημα επεξεργασίας εικόνας με δυνατότητα λήψης, ανάλυσης καθώς και αποθήκευσης της εικόνας. Ψηφιακές εικόνες μεγέθους 500x500 pixels χωρίς απόχρωση του ερυθρού, με μέγεθος pixel 10μm τραβήχτηκαν με χρήση φωτογραφικής μηχανής CCD (διάταξης συζευγμένου φορτίου) τοποθετημένη πάνω σε ένα TOPCON TRC-501X, με δυνατότητα λήψης υπό κλίση μέχρι 50 μοίρες από απόσταση 39mm. Η χρήση ενός πράσινου φίλτρου ήταν απαραίτητη ώστε να μην έχουν τα αιμοφόρα αγγεία του αμφιβληστροειδούς ερυθρή απόχρωση.

Τέλος η τρίτη εικόνα αναφοράς προέκυψε από μία τρισδιάστατη αναπαράσταση του γόνατος την βοήθεια μίας υπολογιστικής τομογραφίας. Το μέγεθος της ήταν 512x512 pixels.

Όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες συνοψίζονται στον πρώτο πίνακα.

| ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Σύνοψη των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα | | | | |
|---|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--|
| Σύνολο δεδομένων | Σύνολο ζευγών εικόνων | Τύπος εικόνας | Μέγεθος εικόνας (pixels) | Απόκλιση στην φωτεινότητα και την αντίθεση της επεξεργασμένης εικόνας |
| 1 ^ο | 20 | Οδοντιατρική ακτινογραφία | 428x310 | Μόνο αντίθεση ($\pm 50\%$, 5% διαστήματα) |
| 2 ^ο | 20 | Ψηφιακή φωτογραφία αμφιβληστροειδούς | 500x500 | Μόνο φωτεινότητα ($\pm 100\%$, 10% διαστήματα) |
| 3 ^ο | 20 | Υπολογιστική τομογραφία γόνατος | 512x512 | Αντίθεση ($\pm 50\%$, 5% διαστήματα) και φωτεινότητα ($\pm 100\%$, 10% διαστήματα) |

2.2 Επιλογή Μεθόδων

Σε γενικές γραμμές τέτοιου είδους αλγόριθμοι μπορούν να τοποθετηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες. Αυτούς που δρουν απευθείας και μεταβάλλουν τις τιμές των pixels των υπό διόρθωση εικόνων και αυτούς που εστιάζουν αποκλειστικά στο ιστόγραμμα τους. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει απλές τεχνικές όπως φίλτρα ή μεθόδους που μεταβάλλουν την απόχρωση της εικόνας. Τέτοιες τεχνικές υστερούν σημαντικά σε ακρίβεια αλλά η ταχύτητά τους τις καθιστά πολύ χρήσιμες σε εφαρμογές που απαιτούν μικρό χρόνο εκτέλεσης. Σε αντίθεση η πλειοψηφία των τεχνικών που χρησιμοποιούν το ιστόγραμμα, αποτελούνται συνήθως από πολύπλοκους αλγορίθμους οι οποίοι προσφέρουν μεν υψηλότερη ακρίβεια, υστερούν όμως αισθητά σε ταχύτητα. Οι περισσότερες ιατρικές εφαρμογές πάντως χρησιμοποιούν τεχνικές από τη δεύτερη κατηγορία καθώς η υψηλή ακρίβεια αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση.

Σε μια προσπάθεια να αξιολογηθούν τεχνικές και από τις δύο κατηγορίες στην εργασία αυτή εξετάστηκαν εκτενώς τρεις τέτοιες τεχνικές και συγκεκριμένα οι Contrast Stretching , Boxcar Filtering και η Μέθοδος Robust Film Correction Ruttiman . Οι δύο πρώτες ανήκουν στην πρώτη κατηγορία ενώ η Robust Film Correction αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνικής η οποία χρησιμοποιεί το ιστόγραμμα της εικόνας. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των τριών αυτών τεχνικών.

3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ

3.1 Robust Film Correction Method

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω η Robust Film Correction δημιουργήμα του Ruttimann δρα απευθείας στο ιστόγραμμα των υπό διόρθωση εικόνων. Χρησιμοποιεί την αθροιστική συνάρτηση κατανομής για να πραγματοποιήσει υποδειγματοληψία, με σκοπό την ανάπλαση του ιστογράμματος και οδηγό το ιστόγραμμα της εικόνας αναφοράς. Η μέθοδος δε χρησιμοποιεί παραμέτρους συνεπώς η απόδοση της εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά της εικόνας. Ουσιαστικά ο αλγόριθμος αυτός είναι μια απλή συνάρτηση ευθυγράμμισης. Υποθέτοντας ότι οι υποκείμενες εικόνες αναπαρίστανται από G τιμές των επιπέδων του γκρι, το συγκεντρωτικό άθροισμα μέχρι την τιμή t μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (1):

$$S^t = \sum_{i=1}^t H(i), t \in [1, G] \quad (1)$$

όπου $H(i)$ είναι η τιμή στο ιστόγραμμα της εικόνας για την απόχρωση που αντιστοιχεί στη τιμή i ή πιο απλά ο συνολικός αριθμός των pixels της εικόνας που έχουν τιμή i . Η S είναι μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση της ακέραιας μεταβλητής t . Αυτό σημαίνει ότι για μια οποιαδήποτε τιμή στην κλίμακα του γκρι εάν $t_1 < t_2$ τότε $S^{t_1} < S^{t_2}$. Το συγκεντρωτικό άθροισμα των ιστογραμμάτων της εικόνας αναφοράς και της υπό διόρθωση εικόνας μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από την εξίσωση (2) ως εξής:

$$S_R^m = \sum_{i=1}^m H_R(i) \text{ and } S_F^n = \sum_{j=1}^n H_F(j), \quad (2)$$

$$\text{με τα } m, n \in [1, G]$$

όπου τα H_R και H_F τα ιστογράμματα των δύο εικόνων αντιστοίχως. Ο βασικός στόχος αυτής της μεθόδου είναι να ορίσει μια χαρτογράφηση από το m επίπεδο του γκρι της H_R στο n επίπεδο της H_F ικανοποιώντας την ακόλουθη συνθήκη:

$$S_F^{n-1} < S_R^m \leq S_F^n \quad (3)$$

Για όλα τα $n \in [1, G]$ και για $S_F^0 = 0$. Επιπροσθέτως, μπορεί να αποδειχθεί ότι για κάθε $m \in [1, G]$ υπάρχει ένα και μοναδικό $n \in [1, G]$ το οποίο ικανοποιεί την συνθήκη (3). Πρακτικά η Robust Film Correction Method λειτουργεί σαν κάποιου είδους ακολουθία. Για κάθε επίπεδο n στο υπό επεξεργασία ιστόγραμμα το υψηλότερο επίπεδο m στο ιστόγραμμα της εικόνας αναφοράς είναι τέτοιο ώστε το συγκεντρωτικό άθροισμα μέχρι το m να είναι ίσο ή μικρότερο από αυτό του n και αυστηρά μεγαλύτερο από αυτό του $n-1$. Έτσι δημιουργείται μία αντιστοιχία μεταξύ κάθε n και m επιπέδου στις δύο εικόνες. Η αντιστοιχία αυτή ορίζει ουσιαστικά την απαιτούμενη μετατροπή του επιπέδου του γκρι ώστε να διορθώσουμε την αντίθεση. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε απόχρωση του γκρι.

3.2 Contrast Stretching

Η Contrast Stretching γνωστή και ως κανονικοποίηση είναι μια φαινομενικά απλή τεχνική για τη διόρθωση της φωτεινότητας και της αντίθεσης εικόνων. Δρά επεκτείνοντας η περιορίζοντας το εύρος των τιμών της έντασης (της φωτεινότητας και της αντίθεσης κάθε pixel της εικόνας) σε ένα επιθυμητό διάστημα. Η μέθοδος είναι γραμμική καθώς μια αυστηρώς γραμμική συνάρτηση εφαρμόζεται πάνω στα pixels της υπό διόρθωση εικόνας για να επιτευχθεί η επιθυμητή αλλαγή. Η Contrast Stretching είναι μία μέθοδος που έχει καθιερωθεί και χρησιμοποιείται ευρέως εξαιτίας της απλότητας και της υψηλής ταχύτητας εκτέλεσης της. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα πεδία εκτός της ιατρικής απεικόνισης όπως στην επεξεργασία σημάτων. Οποιαδήποτε ψηφιοποιημένη εικόνα I μπορεί να κανονικοποιηθεί, με χρήση της ακόλουθης εξίσωσης (4), η οποία υπολογίζει τις νέες κανονικοποιημένες τιμές $I_N(x, y)$ για κάθε pixel (x, y) της αρχικής.

$$I_N(x, y) = \left(I(x, y) - I^{MIN} \right) \frac{(I_C^{MAX} - I_C^{MIN})}{(I^{MAX} - I^{MIN})} + I_C^{MIN} \quad (4)$$

Όπου, I^{MIN} και I^{MAX} είναι η ελάχιστη και μέγιστη τιμή της έντασης της I αντίστοιχα, ενώ I_C^{MIN} και I_C^{MAX} είναι τα επιθυμητά μέγιστα και ελάχιστα της κανονικοποιημένης εικόνας. Για εικόνες με G τιμές για την ένταση του γκρι και $I^{MIN}, I^{MAX}, I_C^{MIN}, I_C^{MAX} \in [1, G]$, η παραγόμενη εικόνα I_N είναι η κανονικοποιημένη εκδοχή της πρωτότυπης εικόνας I . Για να αποφύγουμε τον υπερκορεσμό θέτουμε $I_N(x, y) = 0$ όταν η εξίσωση (4) μας δίνει αρνητικό αποτέλεσμα ($I_N(x, y) < 0$) και ομοίως $I_N(x, y) = G$ όταν η $I_N(x, y)$ μας δίνει τιμή μεγαλύτερη του G . Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για τη βελτίωση της αντίθεσης θέτοντας $I_C^{MIN} = 0$ και $I_C^{MAX} = G$ όπου $G = 256$ στις εικόνες με αποχρώσεις του γκρι.

Στην περίπτωση μας τώρα η επιθυμητή κανονικοποιημένη εικόνα θα πρέπει να ταιριάζει σε φωτεινότητα και αντίθεση με την εικόνα αναφοράς. Με άλλα λόγια το εύρος τιμών της έντασης θα πρέπει να προσαρμοστεί σε εκείνο της εικόνας αναφοράς. Συνεπώς τα επιθυμητά ελάχιστα και μέγιστα της διορθωμένης εικόνας καθορίζονται από την ελάχιστη και μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή της εικόνας αναφοράς I_R^{MIN} και I_R^{MAX} . Έχουμε δηλαδή $I_C^{MIN} = I_R^{MIN}$ και $I_C^{MAX} = I_R^{MAX}$. Σαν αποτέλεσμα η εξίσωση (4) μπορεί να εκφραστεί όπως φαίνεται στην (5) για να υπολογιστούν οι νέες τιμές $I_C(x, y)$ για κάθε pixel (x, y) για την διορθωμένη εικόνα I_C τροποποιώντας την επεξεργασμένη εικόνα I_F ως εξής:

$$I_C(x, y) = \left(I_F(x, y) - I_F^{MIN} \right) \frac{(I_R^{MAX} - I_R^{MIN})}{(I_F^{MIN} - I_F^{MAX})} + I_R^{MIN} \quad (5)$$

όπου I_F^{MIN} και I_F^{MAX} είναι η μέγιστη και η ελάχιστη καταγεγραμμένη τιμή της ήδη επεξεργασμένης εικόνας.

3. 3 Boxcar Filtering

Υπάρχουν πολλών ειδών ψηφιακά φίλτρα τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική απεικόνιση, όπως φίλτρα που αφαιρούν θόρυβο, φίλτρα ενίσχυσης, φίλτρα συμπίεσης και πολλά άλλα. Σε πολλές περιπτώσεις τα φίλτρα αυτά είναι ενσωματωμένα σε μεγαλύτερα

και πιο πολύπλοκα συστήματα και χρησιμοποιούνται συνήθως στα αρχικά στάδια της επεξεργασίας. Ειδικότερα τα βαθυπερατά φίλτρα συναντιούνται πολύ συχνά σε εφαρμογές επεξεργασίας εικόνων. Τα βαθυπερατά φίλτρα φέρνουν την εικόνα σε μία ενδιάμεση κατάσταση, έτοιμη για περαιτέρω επεξεργασία. Στις διορθωτικές τεχνικές πιο συγκεκριμένα, τα βαθυπερατά φίλτρα χρησιμοποιούνται για να εξομαλύνουν τις απότομες διακυμάνσεις στην ένταση της φωτεινότητας σε γειτονικές περιοχές. Πιθανή αιτία τέτοιων ανωμαλιών είναι ο υπερβολικός ή μέτριος φωτισμός καθώς και οι κηλίδες και τα στίγματα που εμφανίζονται πολλές φορές στις εικόνες. Η τιμή της έντασης ενός οποιουδήποτε pixel $I_F(x, y)$ της υπό διόρθωση εικόνας I_F μπορεί να αντιστοιχηθεί στην τιμή του ομόλογου του $I_R(x, y)$ από την εικόνα αναφοράς I_R μέσω της ακόλουθης εξίσωσης (6):

$$I_C(x, y) = I_F(x, y) F_{LP} \left(\frac{I_R(x, y)}{I_F(x, y)} \right) \quad (6)$$

όπου $I_C(x, y)$ είναι η τιμή της έντασης του διορθωμένου pixel και η $F_{LP} \left(\frac{I_R(x, y)}{I_F(x, y)} \right)$ μία συνάρτηση βαθυπερατού φίλτρου. Η επιλογή των παραμέτρων του βαθυπερατού φίλτρου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα της τεχνικής. Κατά τις δοκιμές που εκτελέστηκαν σε αυτή την έρευνα προτιμήθηκε ένα Φίλτρο Boxcar . Το Φίλτρο Boxcar χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές αφαίρεσης θορύβου εξαιτίας της απλότητας και της αποτελεσματικότητας του. Το συγκεκριμένο φίλτρο είναι μια εφαρμογή που ουσιαστικά εξομαλύνει, ταχύτατα αλλά χωρίς συνέχεια. Οι τιμές της έντασης των φιλτραρισμένων pixels μια εικόνας μπορούν να υπολογιστούν μέσω της εξίσωσης (7) :

$$F_{boxcar}(x, y) = \frac{1}{N^2} \sum_{p=-N/2}^{N/2} \sum_{q=-N/2}^{N/2} I(x+p, y+q) \quad (7)$$

όπου N είναι το επιθυμητό πλάτος του παραθύρου του πυρήνα του φίλτρου. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε πυρήνας 10x10 ($N = 10$). Ουσιαστικά από την εξίσωση (7) προκύπτει ότι οι τιμές των φιλτραρισμένων pixels αντιστοιχούν στην τιμή του αριθμητικού μέσου του τμήματος της εικόνας.

3.4 Τεχνικές αξιολόγησης

Η σύγκριση των τριών τεχνικών πραγματοποιήθηκε κατά ζεύγη με τη βοήθεια συγκεκριμένων μετρήσιμων χαρακτηριστικών (MX) και την διεξαγωγή στατιστικής ανάλυσης. Όπως φαίνεται στον πίνακα 2 τα μετρήσιμα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την έρευνα ήταν τέσσερα. Αυτά τα χαρακτηριστικά βασίστηκαν κατά σειρά στην μέση τιμή της διαφοράς της έντασης μεταξύ της υπό διόρθωση εικόνας και της εικόνας αναφοράς, την διαφορά των τιμών της τυπικής απόκλισης των δύο εικόνων, την διαφορά στην μέση τιμή της αντίθεσης μεταξύ τους και τέλος την ρίζα της μέσης τετραγωνικής διαφοράς της αντίθεσης τους (CRMSD). Όλα τα μετρήσιμα χαρακτηριστικά περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω. Το πρώτο βήμα στην διαδικασία αξιολόγησης ήταν να υπολογιστούν τα μετρήσιμα αυτά χαρακτηριστικά στο σύνολο των εικόνων. Στη συνέχεια για κάθε MX και ζεύγος τεχνικών ξεχωριστά πραγματοποιήθηκε η σύγκριση με βάση μια στατιστική έρευνα φοιτητών, της δοκιμής t. Η μηδενική υπόθεση ήταν ότι οι δύο συγκρινόμενες τεχνικές δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές όσον αφορά το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό. Το περιθώριο σφάλματος ορίστηκε στο 5% στη συγκεκριμένη περίπτωση. Για να εξεταστεί ο βαθμός απόκλισης μεταξύ δύο τεχνικών χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής συσχέτισης οποίος παρουσιάζεται ακριβώς από κάτω:

$$r_{m1,m2}^i(S) = \left[1 - \frac{MX_{m2}^i(S)}{MX_{m1}^i(S)} \right] \times 100 \quad (8)$$

όπου $r_{m1,m2}^i(S)$ ορίζει τη στατιστική υπεροχή της μεθόδου $m2$ από την $m1$ με μέτρο σύγκρισης το i ($MX^i(S)$). Στην συγκεκριμένη περίπτωση παίρνουμε ως δεδομένο ότι η $m2$ ήταν ελαφρώς πιο αποδοτική από την $m1$. Με άλλα λόγια η $m2$ εμφανίζει μικρότερη τιμή όσον αφορά το συγκεκριμένο μετρήσιμο χαρακτηριστικό ή πιο απλά $MX_{m2}^i(S) < MX_{m1}^i(S)$.

Αφού υπολογίστηκαν όλα τα μετρήσιμα χαρακτηριστικά, έγινε μια εκτίμηση για τη μέση στατιστική σχετικότητα δύο τεχνικών πάνω σε όλα τα ζεύγη εικόνων κάθε συνόλου. Η εκτίμηση αυτή έγινε για τις τεχνικές στις οποίες η αρχική μας υπόθεση (περί μεγάλης ομοιότητας των αποτελεσμάτων δύο τεχνικών για ένα συγκεκριμένο MX) απορρίφθηκε. Με δεδομένο αυτό οι τεχνικές αξιολογήθηκαν ανά ζεύγη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Τα μετρήσιμα χαρακτηριστικά (MX) που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των τριών διορθωτικών τεχνικών (Contrast Stretching , Robust Film Correction, Boxcar Filtering)

| <i>MX</i> | Μετρήσιμα μέγεθη |
|--|--|
| <i>Μέσο σφάλμα έντασης(i=1)</i> | $MX^1 = \mu_{I_R} - \mu_{I_C} $ |
| <i>Τυπική απόκλιση έντασης (i=2)</i> | $MX^2 = \sigma_{I_R} - \sigma_{I_C} $ |
| <i>Μέσο σφάλμα αντίθεσης (i=3)</i> | $MX^3 = \bar{C}_R - \bar{C}_C $ |
| <i>Ρίζα της μέσης τετραγωνικής διαφοράς της αντίθεσης (i=4)</i> | $MX^4 = \sqrt{\frac{1}{H \times W} \sum_{y=1}^H \sum_{x=1}^W (c_R(x, y) - c_C(x, y))^2}$ |

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, τρία σύνολα δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογηθούν οι τρεις τεχνικές διόρθωσης φωτεινότητας και αντίθεσης. Τα 60 ζεύγη εικόνων που εξετάστηκαν στην συγκεκριμένη εργασία ταξινομήθηκαν σε αυτές τις κατηγορίες, αναλόγως με τις μεταβολές που έγιναν στη φωτεινότητα και την αντίθεση της εικόνας δοκιμής κάθε περίπτωσης. Αυτή η διαδικασία μας παρείχε ένα ευρύ φάσμα δειγμάτων ικανό για να γίνει αξιολόγηση των τριών αυτών μεθόδων συγκριτικά με τις διάφορες μεταβολές που έγιναν στην αντίθεση και την φωτεινότητα των εικόνων ξεχωριστά αλλά και συνδυαστικά.

Ένα σύνολο 20 εικόνων παράχθηκε για κάθε εικόνα αναφοράς, με τη σταδιακή μεταβολή των ιδιοτήτων αντίθεσης και φωτεινότητας η οποία πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα, με τη βοήθεια του προγράμματος GNU Image Manipulation Program (GIMP). Προκειμένου να παραχθούν οι υπό διόρθωση εικόνες που εμφανίζονται στο πρώτο σύνολο, η αντίθεση της εικόνας αναφοράς της οδοντιατρικής ακτινογραφίας μεταβλήθηκε από -50% έως +50%, ανά διαστήματα 5%. Ως αποτέλεσμα, παράχθηκαν 20 επιπλέον εικόνες. Οι νέες εικόνες είναι χωρικά ταυτόσημες με την εικόνα αναφοράς, αλλά η αντίθεση τους διαφέρει από -50% έως +50%, σε σχέση με την αντίθεση της εικόνας αναφοράς για το πρώτο σύνολο. Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιήθηκε για να παράγει τις επιπλέον εικόνες για το δεύτερο σύνολο.

Στην εικόνα αναφοράς του αμφιβληστροειδούς CCD του δεύτερου συνόλου η φωτεινότητα μεταβλήθηκε από -100% έως +100%, ανά διαστήματα 10%. Στην περίπτωση αυτή, οι 20 νέες επεξεργασμένες εικόνες εμφανίζουν διαφορές φωτεινότητας από -100% έως +100% σε σχέση με την εικόνα αναφοράς τους.

Τέλος, 20 ακόμα εικόνες δοκιμής δημιουργήθηκαν για το τρίτο σύνολο, μεταβάλλοντας σταδιακά την αντίθεση και τη φωτεινότητα της εικόνας αναφοράς CT (υπολογιστικής τομογραφίας) κατά $\pm 50\%$ ανά διαστήματα 5% και $\pm 100\%$ ανά διαστήματα 10%, αντίστοιχα. Μια πλήρης σύνοψη όλων των δοκιμών που αναλύθηκαν παραπάνω σύνολα παρουσιάζεται και πιο πάνω στον Πίνακα 1.

Η σύγκριση των τριών μεθόδων, δηλαδή των Contrast Stretching , Robust Film Correction και Boxcar Filtering, πραγματοποιήθηκε με τη σύγκριση των 60 ζευγών εικόνων από το πρώτο, δεύτερο και τρίτο σύνολο αξιολογώντας τις διορθωμένες εικόνες που παράχθηκαν σε κάθε περίπτωση.

4.1 Ποιοτικός έλεγχος

Για τις τρεις διορθωτικές τεχνικές που εξετάζονται σε αυτή την έρευνα πραγματοποιήθηκε τόσο ποιοτικός όσο και ποσοτικός έλεγχος. Ποιοτικά η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε οπτικά, με παρατήρηση των διορθωμένων εικόνων. Σε κάθε περίπτωση, οι διορθωμένες εικόνες αξιολογήθηκαν οπτικώς τοποθετούμενες δίπλα στην εκάστοτε εικόνα αναφοράς.

Ορισμένα παραδείγματα φαίνονται στα σχήματα 1, 2 και 3 για τα σύνολα 1,2 και 3 αντιστοίχως. Σε κάθε περίπτωση, η εικόνα αναφοράς και η υπό διόρθωση εικόνα (πριν την διόρθωση), παρουσιάζονται μαζί με τις διορθωμένες εικόνες που παράγονται από κάθε μια από τις τρεις συγκρινόμενες μεθόδους.

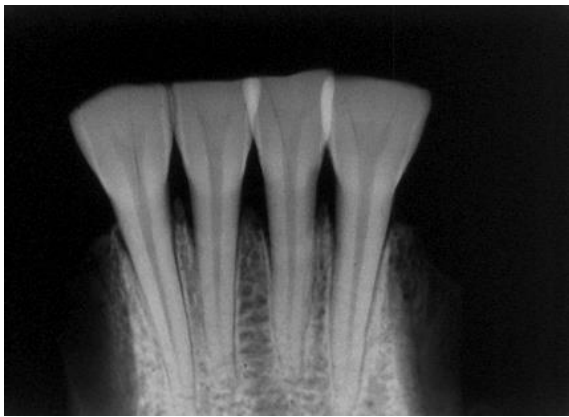
Στο σχήμα 1 εξετάζεται μια περίπτωση από το σύνολο I, όπου η υπό διόρθωση εικόνα εμφανίζει +50% διαφορά στην αντίθεση σε σχέση με την εικόνα αναφοράς.



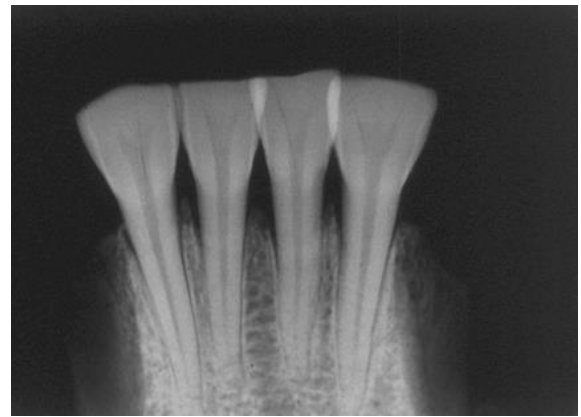
(α)



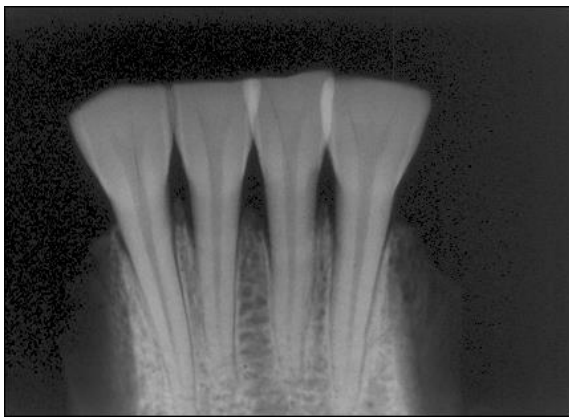
(β)



(γ)



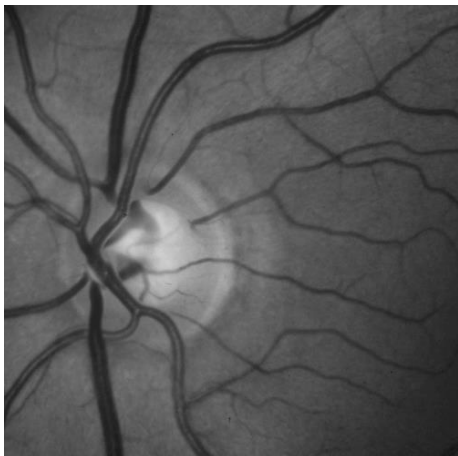
(δ)



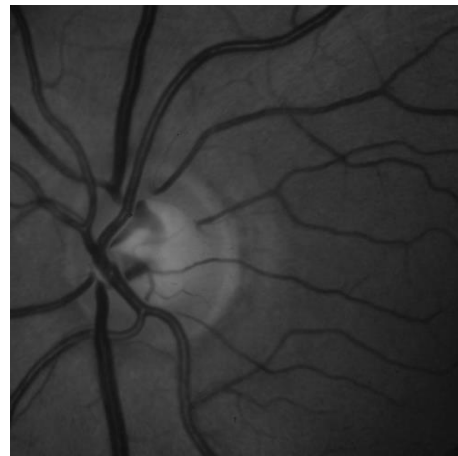
(ε)

Σχήμα 1. Παρουσίαση των τριών συγκρινόμενων τεχνικών εφαρμοσμένων πάνω σε ένα ζεύγος εικόνων από το 1ο σύνολο. Το αυθεντικό ζεύγος αποτελείται από (α) την εικόνα αναφοράς και (β) την υπό διόρθωση εικόνα. Οι διορθωμένες εικόνες με χρήση των (γ) *Contrast Stretching* , (δ) *Robust Film Correction* και (ε) *Boxcar Filtering*

Στο σχήμα 2, απεικονίζεται ένα ζεύγος από το σύνολο 2, όπου η υπό διόρθωση εικόνα έχει 100% μεταβολή φωτεινότητας σε σύγκριση με την εικόνα αναφοράς.



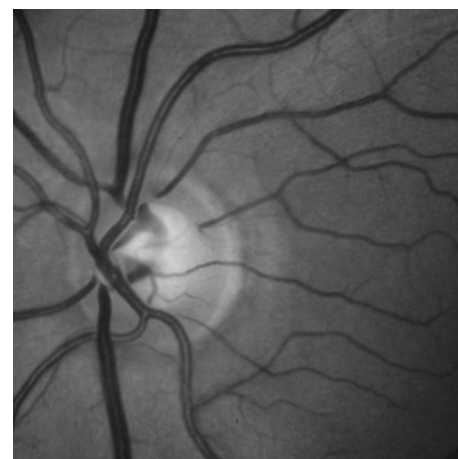
(α)



(β)



(γ)



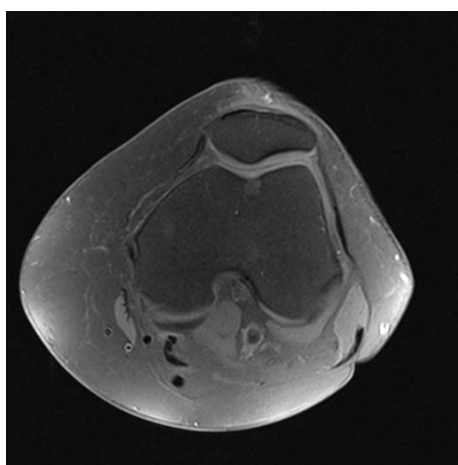
(δ)



(ε)

Σχήμα 2. Παρουσίαση των τριών συγκρινόμενων τεχνικών εφαρμοσμένων πάνω σε ένα ζεύγος εικόνων από το 2ο σύνολο. Το αυθεντικό ζεύγος αποτελείται από (α) την εικόνα αναφοράς και (β)την υπό διόρθωση εικόνα. Οι διορθωμένες εικόνες με χρήση των (γ) *Contrast Stretching* , (δ) *Robust Film Correction* και (ε) *Boxcar Filtering*

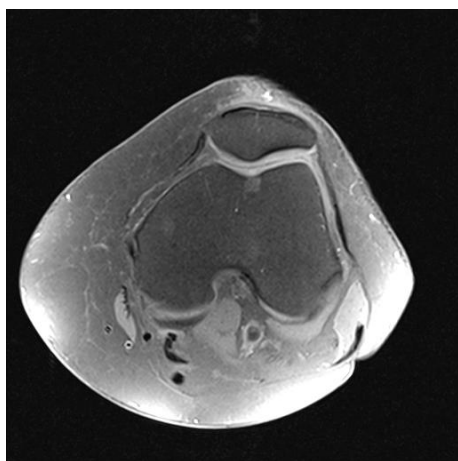
Τέλος, στο σχήμα 3 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα από το σύνολο 3, όπου η υπό διόρθωση εικόνα είναι 90% φωτεινότερη από την εικόνα αναφοράς και έχει επίσης 45% αύξηση αντίθεσης από την εικόνα αναφοράς.



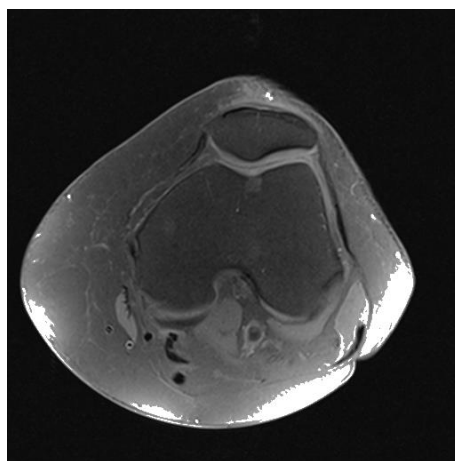
(α)



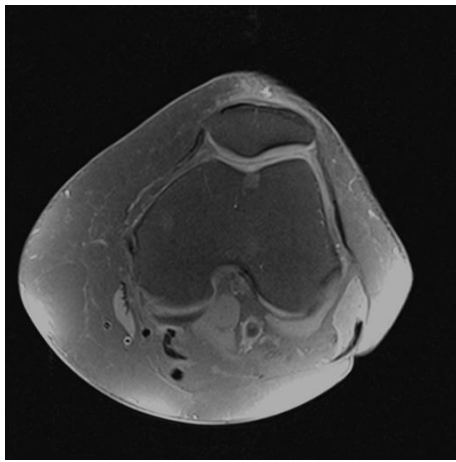
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 3. Παρουσίαση των τριών συγκρινόμενων τεχνικών εφαρμοσμένων πάνω σε ένα ζεύγος εικόνων από το 3ο σύνολο. Το αυθεντικό ζεύγος αποτελείται από (α) την εικόνα αναφοράς και (β) την υπό διόρθωση εικόνα. Οι διορθωμένες εικόνες με χρήση των (γ) Contrast Stretching , (δ) Robust Film Correction και (ε) Boxcar Filtering

Σε κάθε περίπτωση, οι διορθωμένες εικόνες απεικονίζονται για την Contrast Stretching μέθοδο στο Σχήμα 1 (γ), Σχ. 2. (γ), Σχ. 3. (γ), για την Robust Film Correction Method (Σχ. 1 (δ), Σχ. 2. (δ), Σχ. 3. (δ)) και την Boxcar Filtering (Εικ. 1 (ε), Σχ. 2. (ε), Σχ. 3 (ε)).

Όλα τα απεικονιζόμενα παραδείγματα διαθέτουν αρκετά ακραίες περιπτώσεις με μεγάλες διαφορές στην αντίθεση και στην φωτεινότητα ανάμεσα στην εικόνα αναφοράς και την υπό διόρθωση εικόνα. Ακόμη και σε τέτοιες ακραίες περιπτώσεις, ωστόσο, είναι αρκετά δύσκολο να συγκρίνουμε την απόδοση των τριών τεχνικών διόρθωσης μέσω οπτικής επιθεώρησης και μόνο. Από τα γραφήματα 1,2 και 3 μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι και οι τρεις τεχνικές αποφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Είναι δύσκολο όμως να πει κανείς ποια από τις τρεις κρίνεται αποδοτικότερη. Σαν αποτέλεσμα, σε μια προσπάθεια να γίνει πιο αποτελεσματική η αξιολόγηση των τριών τεχνικών μέσω οπτικής επιθεώρησης, δημιουργήθηκαν εικόνες οι οποίες απεικονίζουν τις διαφορές μεταξύ των διορθωμένων και των εικόνων αναφοράς. Οι εικόνες αυτές δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια της ψηφιακής αφαιρετικής τεχνικής (Digital Subtraction Radiography). Κάθε τέτοια εικόνα I_{diff} προκύπτει σε κάθε περίπτωση θεωρώντας την απόλυτη τιμή της διαφοράς των ομόλογων

pixels (x, y) από την εικόνα αναφοράς (I_R) και την διορθωμένη εικόνα (I_C) όπως φαίνεται παρακάτω στην εξίσωση (5).

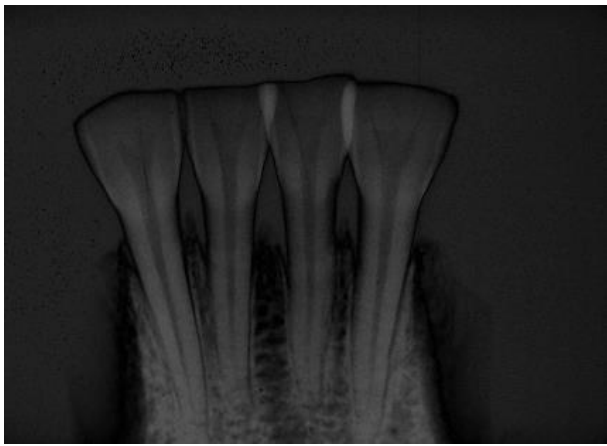
$$I_{diff}(x, y) = |I_R(x, y) - I_C(x, y)| \quad (9)$$

Οι εικόνες προϊόντα ψηφιακής αφαίρεσης για τα παραδείγματα που απεικονίζονται στα σχήματα 1,2 και 3 παρουσιάζονται στα σχήματα 4,5 και 6 αντιστοίχως. Με την χρήση της της συγκεκριμένης τεχνικής αρκετές από τις διαφορές που παρουσίαζαν οι εικόνες αναφοράς και οι διορθωμένες εικόνες αποκαλύφθηκαν και κατέστη δυνατό να γίνουν αντιληπτές με γυμνό μάτι. Σε γενικές γραμμές όταν χρησιμοποιούνται τέτοιες τεχνικές, όπως αυτή που περιγράφεται παραπάνω, όσο πιο σκοτεινή είναι η εικόνα που προκύπτει τόσο αποτελεσματικότερη κρίνεται και η τεχνική διόρθωσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4 οι Contrast Stretching αλλά και Boxcar Filtering εμφανίζουν κάποιες ανεπιθύμητες διαφορές στο φόντο των εικόνων αυτών (σχ.4 (β) και σχ.5(γ) αντίστοιχα). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η ένταση στο φόντο των διορθωμένων εικόνων των δύο αυτών τεχνικών, διαφέρει ελαφρώς από την επιθυμητή ένταση στο φόντο της εικόνας αναφοράς. Η Robust Film Correction από την άλλη παρουσιάζει μεν ελαφρές αποκλίσεις στον εμπροσθεν μέρος της εικόνας όπως φαίνεται στο σχ.4(δ), φαίνεται όμως να υπερτερεί σε γενικές γραμμές των άλλων δύο τεχνικών. Ο ισχυρισμός αυτός μπορεί να επαληθευθεί και από τον υπολογισμό της τιμής μέσης έντασης των εικόνων αυτών I_{diff} ύψους H και πλάτους W pixels. Η τιμή αυτή μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (10) όπως φαίνεται παρακάτω:

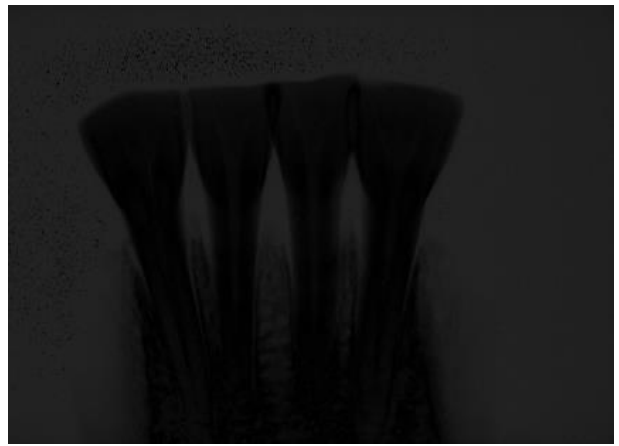
$$\mu_{I_{diff}} = \frac{1}{H \times W} \sum_{y=1}^H \sum_{x=1}^W I_{diff}(x, y) \quad (10)$$

Προκύπτει ότι η τιμή $\mu_{I_{diff}}$ είναι ευθέως ανάλογη με τον όγκο των ανεπιθύμητων διαφορών μεταξύ της επεξεργασμένης και της εικόνας αναφοράς και ως εκ τούτου αντιστρόφως ανάλογη με την ποιότητα της επεξεργασίας. Κάνοντας χρήση της παραπάνω εξίσωσης λάβαμε τα εξής αποτελέσματα: Η Robust Film Correction κρίνεται αποτελεσματικότερη (4.624), ακολουθούμενη από την Boxcar Filtering (5.784), ενώ αισθητά πίσω βρίσκεται η Contrast Stretching (21.924). Η αξιολόγηση με χρήση της τιμής $\mu_{I_{diff}}$ πραγματοποιήθηκε

και για τα παραδείγματα που απεικονίζονται στα σχ. 5 και 6. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5, δεν μπορεί κάποιος να καταλήξει στο ποια τεχνική έχει επιφέρει το καλύτερο αποτέλεσμα καθώς όλες δείχνουν να έχουν δράσει αρκετά ικανοποιητικά ακόμα και μετά την παρατήρηση των νέων εικόνων I_{diff} . Παρόλα αυτά ο υπολογισμός της τιμής $\mu_{I_{diff}}$ δείχνει ότι και σε αυτή την περίπτωση η Robust Film Correction (0.376) υπερτερεί των άλλων δύο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα βέβαια η σειρά αλλάζει στη συνέχεια καθώς ακολουθεί από κοντά η Contrast Stretching (0.389), ενώ λιγότερο αποτελεσματική και με αρκετά μεγάλη διαφορά εμφανίζεται η Boxcar Filtering (2.535). Τέλος όσον αφορά στο σχήμα 6 είναι εμφανές ότι η Contrast Stretching αποτυγχάνει πλήρως στο συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων. Οι άλλες δύο τώρα εμφανίζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα εξαιρουμένων κάποιων αξιοσημείωτων αποκλίσεων στο κάτωθι μέρος των εικόνων οι οποίες οφείλονται πιθανότατα σε υπερκορεσμό των διορθωμένων εικόνων. Ο υπολογισμός των τιμών $\mu_{I_{diff}}$ επιβεβαιώνει αυτό που παρατηρήσαμε και εμφανίζει και πάλι πρώτη τη Robust Film Correction Method (1.615) ακολουθούμενη από την Boxcar Filtering(2.088), ενώ όπως φαίνεται και με γυμνό μάτι η Contrast Stretching κρίνεται πλήρως αποτυχημένη όσον αφορά την συγκεκριμένη εικόνα αναφοράς με $\mu_{I_{diff}} = 20.037$.



(α)



(β)

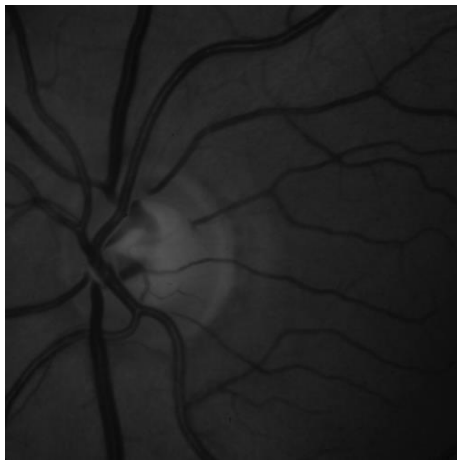


(γ)



(δ)

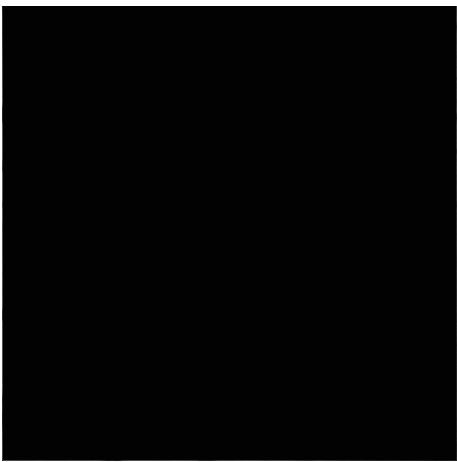
Σχήμα 4. Αποτελέσματα έπειτα από εφαρμογή της ψηφιακής αφαιρετικής τεχνικής, για ένα συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων από το 1ο σύνολο. Απεικονίζεται η απόλυτη διαφορά μεταξύ των εικόνων αναφοράς και (α) της υπό διόρθωσης εικόνας και των διορθωμένων εικόνων με χρήση των τεχνικών (β) *Contrast Stretching* (γ) *Robust Film Correction* και (δ) *Boxcar Filtering*



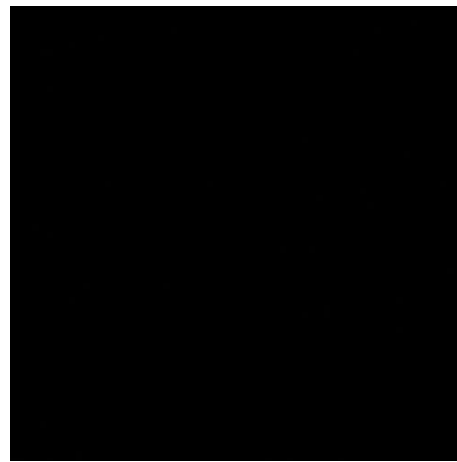
(α)



(β)

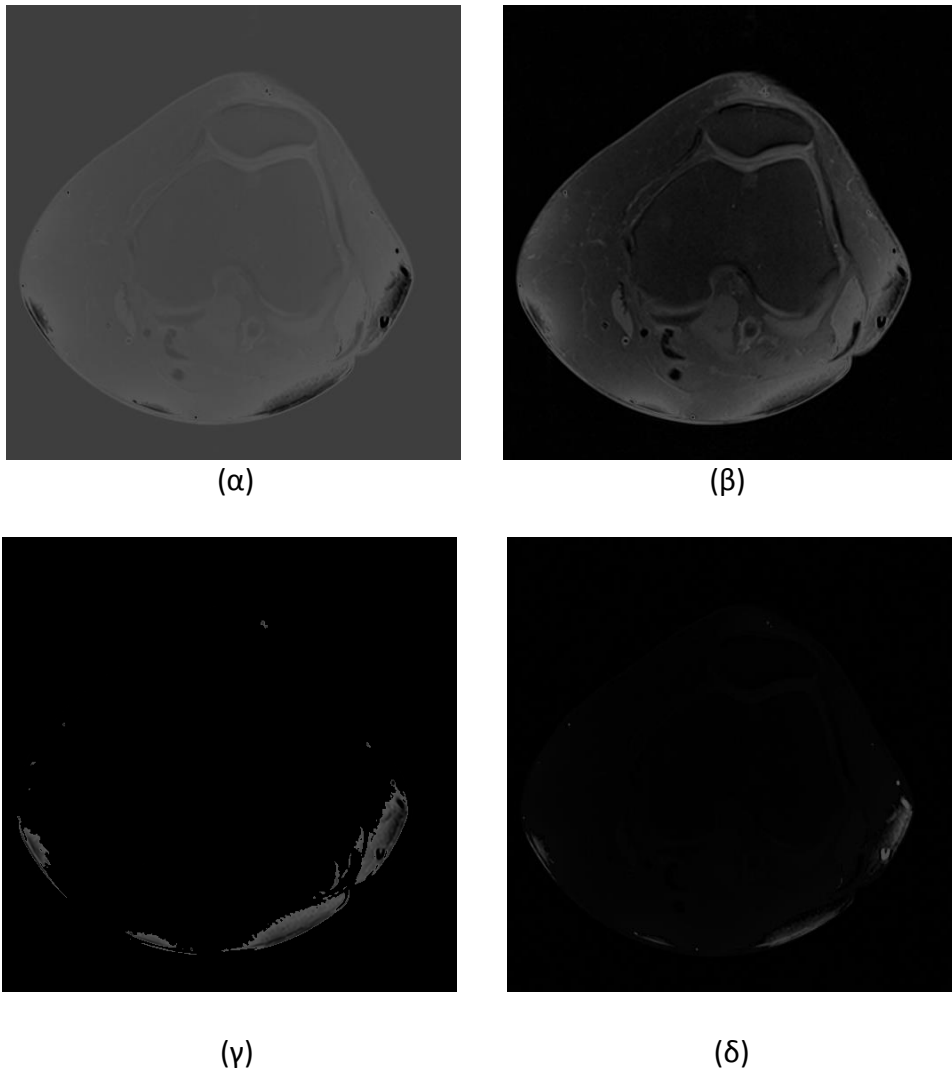


(γ)



(δ)

Σχήμα 5. Αποτελέσματα έπειτα από εφαρμογή της ψηφιακής αφαιρετικής τεχνικής, για ένα συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων από το 2ο σύνολο. Απεικονίζεται η απόλυτη διαφορά μεταξύ των εικόνων αναφοράς και (α) της υπό διόρθωσης εικόνας και των διορθωμένων εικόνων με χρήση των τεχνικών (β) Contrast Stretching (γ) Robust Film Correction και (δ) Boxcar Filtering



Σχήμα 6. Αποτελέσματα έπειτα από εφαρμογή της ψηφιακής αφαιρετικής τεχνικής για ένα συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων από το 3ο σύνολο. Απεικονίζεται η απόλυτη διαφορά μεταξύ των εικόνων αναφοράς και (α) της υπό διόρθωση εικόνας και των διορθωμένων εικόνων με χρήση των τεχνικών (β) *Contrast Stretching* (γ) *Robust Film Correction* και (δ) *Boxcar Filtering*

4.2 Ποσοτικός έλεγχος

Όπως μπορεί να φανεί και από τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου που έγινε παραπάνω, η αξιολόγηση μίας τεχνικής με απλή παρατήρηση της διορθωμένης εικόνας μπορεί πολλές φορές να μην είναι αποτελεσματική. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή οι διαφορές μεταξύ δύο εικόνων μπορεί να είναι αμυδρές, με αποτέλεσμα να μην γίνονται εύκολα αντιληπτές με γυμνό μάτι. Επιπλέον η αξιολόγηση με βάση την παρατήρηση μπορεί να χαρακτηριστεί υποκειμενική κατά κάποιο τρόπο λαμβάνοντας υπόψη τον ανθρώπινο παράγοντα. Για τον λόγο αυτό η αξιολόγηση των τεχνικών με κριτήρια ποσοτικά αυτή τη φορά κρίνεται απαραίτητη αν θέλουμε η έρευνα μας να χαρακτηριστεί αξιόπιστη. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω ο ποσοτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε βασιζόμενος στην μεθοδολογία στατιστικής ανάλυσης όπως φαίνεται και από την εξίσωση(8). Εξετάστηκε δηλαδή η στατιστική διαφορά των τιμών των τεσσάρων μετρήσιμων χαρακτηριστικών μεταξύ κάθε πιθανού συνδυασμού δύο εκ των τριών τεχνικών. Ως εκ τούτου πρακτικά ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε ανά ζεύγη. Τα 4 ΜΧ που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα παρουσιάστηκαν προηγουμένως στον πίνακα 2 και ακολουθεί πιο αναλυτική περιγραφή τους παρακάτω.

Το πρώτο από τα τέσσερα μετρήσιμα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν αποτελεί το μέσο σφάλμα της έντασης μεταξύ των δύο εικόνων.

Το μετρήσιμο χαρακτηριστικό αυτό χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές της ιατρικής απεικόνισης. Εξ' ορισμού το συγκεκριμένο μετρήσιμο χαρακτηριστικό μας παρέχει μία καλή αναπαράσταση της φωτεινότητας μιας εικόνας. Σε γενικές γραμμές η μέση καταγεγραμμένη τιμή της έντασης μίας εικόνας είναι ανάλογη της φωτεινότητας της εικόνας. Η μέση τιμή της έντασης μίας εικόνας I με ύψος H και πλάτος W pixels μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της εξίσωσης (11).

$$\mu_I = \frac{1}{H \times W} \sum_{y=1}^H \sum_{x=1}^W I(x, y) \quad (11)$$

Χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση υπολογίστηκαν η μέση τιμή της έντασης για τις εικόνες αναφοράς και κάθε εικόνας που προέκυψε από την επεξεργασία. Το μέσο σφάλμα μεταξύ της εικόνας αναφοράς και μίας από τις επεξεργασμένες εικόνες μπορεί να οριστεί ως η απόλυτη τιμή της διαφοράς της μέσης τιμής της έντασης τους όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση (12):

$$MX^1 = \left| \mu_{I_R} - \mu_{I_C} \right| \quad (12)$$

όπου, μ_{I_R} είναι η μέση τιμή της έντασης της εικόνας αναφοράς και μ_{I_C} της διορθωμένης εικόνας. Το συγκεκριμένο MX αποτέλεσε το βασικό κριτήριο της μεθοδολογίας στατιστικής ανάλυσης που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Όσο μικρότερη προκύπτει η τιμή του συγκεκριμένου MX τόσο περισσότερο ταιριάζουν οι εξεταζόμενες εικόνες όσον αφορά στην ένταση τους.

Ένα άλλο πολύ αν όχι εξίσου σημαντικό μετρήσιμο χαρακτηριστικό που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα μας, ήταν το σφάλμα στην τυπική απόκλιση της τιμής της έντασης μεταξύ των εξεταζόμενων εικόνων. Για κάθε ζεύγος εικόνων η τυπική απόκλιση σ_{I_R} και σ_{I_C} της εικόνας αναφοράς και της επεξεργασμένης εικόνας αντίστοιχα, υπολογίστηκαν όπως προκύπτει από την εξίσωση (13).

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{1}{H \times W} \sum_{y=1}^H \sum_{x=1}^W (I(x, y) - \mu_I)^2} \quad (13)$$

Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό και από τον τίτλο της, η τυπική απόκλιση αναπαριστά την μέση τιμή της απόκλισης που παρουσιάζει η ένταση της εικόνας. Συνεπώς, το συγκεκριμένο μετρήσιμο μέγεθος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εικόνας που επηρεάζουν την αντίθεση της. Ο βαθμός στον οποίο διαφέρουν οι δύο εικόνες όσον αφορά την αντίθεση υπολογίζεται και εδώ από την απόλυτη τιμή της διαφοράς τους:

$$MX^2 = \left| \sigma_{I_R} - \sigma_{I_C} \right| \quad (14)$$

Μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι μικρές τιμές για το συγκεκριμένο μετρήσιμο μέγεθος παραπέμπουν σε επιτυχώς επεξεργασμένες εικόνες με μικρές διακυμάνσεις στην αντίθεση. Το MX^2 υπολογίστηκε για όλες τις διαθέσιμες εικόνες καθώς και για τις τρεις συγκρινόμενες τεχνικές.

Μία πιο κατανοητή αναπαράσταση της αντίθεσης μια εικόνας, μπορεί να επιτευχθεί υπολογίζοντας την μέση (ή ολική) τιμή της αντίθεσης της εικόνας. Η ολική αντίθεση μιας εικόνας I είναι ουσιαστικά ο μέσος όρος των τιμών $c(x, y)$ της αντίθεσης όλων των pixels μιας εικόνας και υπολογίζεται ως εξής:

$$\bar{C} = \frac{1}{H \times W} \sum_{y=1}^H \sum_{x=1}^W c(x, y) \quad (15)$$

Η τιμή $c(x, y)$ της αντίθεσης ενός συγκεκριμένου pixel με συντεταγμένες (x, y) υπολογίζεται με τον εξής τρόπο:

$$c(x, y) = \frac{lv(x, y)}{lm(x, y)} \quad (16)$$

Για κάθε pixel (x, y) μίας εικόνας „ οι ποσότητες $lv(x, y)$ και $lm(x, y)$ υπολογίζονται ακολούθως:

$$lm(x, y) = \frac{1}{(2m+1)^2} \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-m}^m I(x+k, y+l) \quad (17)$$

$$lv(x, y) = \frac{1}{(2m+1)^2} \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-m}^m [I(x+k, y+l) - lm(x, y)]^2$$

όπου $I(x+k, y+l)$ είναι η ένταση του pixel με συντεταγμένες $(x+k, y+l)$ και $(2m+1)^2$ είναι μία σταθερά η οποία αντιπροσωπεύει το μέγεθος ενός τετραγωνικού μπλοκ από pixels. Στην περίπτωση μας προτιμήθηκαν μπλοκ διαστάσεων 5x5 (δηλ. $m=2$). Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (15) υπολογίστηκε η μέση τιμή της αντίθεσης της εικόνας αναφοράς αλλά και κάθε διορθωμένης εικόνας που προέκυψε και για τις τρεις τεχνικές που εξετάζονται. Σε κάθε περίπτωση η απόκλιση μεταξύ τη εικόνας αναφοράς και της

διορθωμένης εικόνας μπορεί να υπολογιστεί από την απόλυτη τιμή της διαφοράς της μέσης τιμής της αντίθεσης των δύο εικόνων:

$$MX^3 = |\bar{C}_R - \bar{C}_C| \quad (18)$$

όπου, \bar{C}_R και \bar{C}_C είναι η μέση τιμή της εικόνας αναφοράς και της διορθωμένης εικόνας αντίστοιχα. Όπως ισχύει και με όλα τα προηγούμενα MX όσο μικρότερη είναι η τιμή του τόσο πιο επιτυχημένη θεωρείται η διαδικασία διόρθωσης.

Το τέταρτο και τελευταίο μετρήσιμο μέγεθος που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα είναι το CRMSD (Contrast Root Mean Square Distance- Ρίζα της μέσης τετραγωνικής διαφοράς της αντίθεσης). Το κριτήριο αυτό αποτελεί μια παραλλαγή της τυπικής απόκλισης (Root Mean Square Deviation) η οποία χρησιμοποιείται γενικά για να υπολογίσει την διαφορά μεταξύ δύο διανυσμάτων. Το CRMSD μεταξύ της διορθωμένης εικόνας και της εικόνας αναφοράς με ύψος H και πλάτος W ορίζεται όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση (19) :

$$MX^4 = \sqrt{\frac{1}{H \times W} \sum_{y=1}^H \sum_{x=1}^W (c_R(x, y) - c_C(x, y))^2} \quad (19)$$

όπου οι ποσότητες $c_R(x, y)$ και $c_C(x, y)$ συμβολίζουν την ένταση ενός συγκεκριμένου ριxel με συντεταγμένες (x, y) στις δύο εικόνες. Με τη βοήθεια της παραπάνω εξίσωσης μπορούν να υπολογιστούν τα CRMSD για όλα τα ζεύγη εικόνων. Όπως και σε όλα τα παραπάνω MX και εδώ μικρότερες τιμές σημαίνουν μικρότερες αποκλίσεις μεταξύ της εικόνας αναφοράς και της επεξεργασμένης εικόνας και συνεπώς υψηλότερη ποιότητα στην διόρθωση.

Χρησιμοποιώντας τα τέσσερα μετρήσιμα μεγέθη που περιγράφηκαν παραπάνω έγινε σύγκριση των τριών τεχνικών για την απόδοση τους πάνω σε όλα τα ζεύγη εικόνων από τα τρία σύνολα ανά δύο. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες 3-5 σε κατηγορίες ανάλογα με το μετρήσιμο χαρακτηριστικό που χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά. Για την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων της σύγκρισης αυτής

χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένα σύμβολα τα οποία υποδεικνύουν ποια τεχνική υπερέχει κάθε φορά. Πιο συγκεκριμένα το σύμβολο “+” δίπλα σε μια μέτρηση υποδηλώνει ότι η πρώτη μέθοδος υπερέχει ποιοτικά της δεύτερης, ενώ το σύμβολο “-” υποδηλώνει ακριβώς το αντίθετο. Το “*” μας πληροφορεί ότι δύο συγκρινόμενες μέθοδοι δεν παρουσιάζουν εμφανείς διαφορές στη συγκεκριμένη κατηγορία. Όπως μπορεί κανείς εύκολα να διαπιστώσει, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή στους πίνακες τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ των δύο τεχνικών. Ο πίνακας 3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα σχετικά με το πρώτο μετρήσιμο μέγεθος (MX^1) αυτό του μέσου σφάλματος της έντασης της εικόνας. Με άλλα λόγια στο πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τριών αυτών τεχνικών με βάση την απόδοση τους στην βελτίωση της φωτεινότητας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Μέση τιμή της διαφοράς στην απόδοση βάση του MX^1 για τις τρεις συγκρινόμενες μεθόδους: Contrast Stretching (CS), Robust Film Correction (RFC) και Boxcar Filtering (BF)

| Ζεύγος τεχνικών | 1^ο σύνολο (οδοντιατρικές ακτινογραφίες) | 2^ο σύνολο (φωτογραφίες αμφιβληστροειδούς) | 3^ο σύνολο (υπολογιστικές τομογραφίες γόνατος) |
|------------------------|--|--|--|
| CS/RFC | 71.489- | * | 29.912- |
| CS/BF | 26.135- | 88.187+ | 7.390- |
| RFC/BF | 66.580+ | 88.810+ | 55.405+ |

Όπως φαίνεται από τον πίνακα η Robust Film Correction Method υπερτερεί σε γενικές γραμμές των άλλων δύο τεχνικών και στα τρία σύνολα εικόνων. Πιο συγκεκριμένα, υπερτερεί εμφανώς της Contrast Stretching στα σύνολα 1 και 3 ενώ στο 2 οι δύο τεχνικές έχουν παρόμοια απόδοση ενώ εμφανίζεται σημαντικά καλύτερη της Boxcar Filtering και στα 3 σύνολα εικόνων.

Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν για το δεύτερο μετρήσιμο μέγεθος MX^2 αυτό της μέσης στατιστικής. Όπως φαίνεται και εδώ η Robust Film Correction Method υπερτερεί στη σύγκριση των άλλων δύο τεχνικών σε όλα σχεδόν τα σύνολα εικόνων. Όσον αφορά τις άλλες δύο τεχνικές η Boxcar Filtering εμφανίζεται ανώτερη της Contrast Stretching στα σύνολα 1 και 3 υστερεί όμως σημαντικά στο δεύτερο σύνολο με εικόνα αναφοράς την φωτογραφία του αμφιβληστροειδούς.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Μέση τιμή της διαφοράς στην απόδοση βάση του MX^2 για τις τρεις συγκρινόμενες μεθόδους: Contrast Stretching (CS), Robust Film Correction (RFC) και Boxcar Filtering (BF)

| Ζεύγος τεχνικών | 1^ο σύνολο (οδοντιατρικές ακτινογραφίες) | 2^ο σύνολο (φωτογραφίες αμφιβληστροειδούς) | 3^ο σύνολο (υπολογιστικές τομογραφίες γόνατος) |
|------------------------|---|---|---|
| CS/RFC | * | 82.793- | 49.705- |
| CS/BF | 61.232- | 91.650+ | 20.310- |
| RFC/BF | 1.112+ | 99.040+ | * |

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης λαμβάνοντας σαν μέτρο σύγκρισης την μέση τιμή της διαφοράς της αντίθεσης (MX^3). Είναι σαφές ότι και εδώ η τεχνική που εμφανίζει σε γενικές γραμμές καλύτερη ποιότητα στην διόρθωση των εικόνων είναι η Robust Film Correction Method. Υπερτερεί της Contrast Stretching στα σύνολα 2 και 3 ενώ για το πρώτο δεν υπάρχει σαφής ένδειξη για το ποια είναι καλύτερη και της Boxcar Filtering στο δεύτερο με το αποτέλεσμα στα υπόλοιπα δύο να είναι αμφίρροπο. Από τις δύο εναπομείναντες η Contrast Stretching κρίνεται ελαφρώς καλύτερη της Boxcar Filtering καθώς υστερεί μεν στο σύνολο 3 αλλά υπερέρχει σημαντικά στο σύνολο 2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Μέση τιμή της διαφοράς στην απόδοση βάση του MX^3 για τις τρεις συγκρινόμενες μεθόδους: Contrast Stretching (CS), Robust Film Correction (RFC) και Boxcar Filtering (BF)

| Ζεύγος τεχνικών | 1^ο σύνολο (οδοντιατρικές ακτινογραφίες) | 2^ο σύνολο (φωτογραφίες αμφιβληστροειδούς) | 3^ο σύνολο (υπολογιστικές τομογραφίες γόνατος) |
|------------------------|---|---|--|
| CS/RFC | * | 53.045- | 18.504- |
| CS/BF | * | 97.480+ | 14.230- |
| RFC/BF | * | 99.362+ | * |

Το τελευταίο μετρήσιμο χαρακτηριστικό με βάση το οποίο αξιολογήθηκαν οι τρεις τεχνικές ήταν το CRMSD (MX^4). Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αυτής αναπαρίστανται στο πίνακα 6, μόνο που εδώ δεν μπορεί να αποφανθεί κάποιος με σιγουριά για το ποια είναι η καλύτερη τεχνική. Αντιθέτως μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι η Boxcar Filtering υστερεί σημαντικά των άλλων δύο πράγμα που φαίνεται από το μέγεθος των τιμών στα σύνολα 1 και 2. Όσον αφορά τις άλλες δύο, το γεγονός ότι η διαφορά τους στο σύνολο 3 είναι πολύ μικρή, σε συνδυασμό με τη φαινομενική τους 'ισοπαλία' στα πρώτα δύο σύνολα μας κάνει να τις θεωρούμε το ίδιο αποτελεσματικές.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6: Μέση τιμή της διαφοράς στην απόδοση βάση του MX^3 για τις τρεις συγκρινόμενες μεθόδους: Contrast Stretching (CS), Robust Film Correction (RFC) και Boxcar Filtering (BF)

| Ζεύγος τεχνικών | 1^ο σύνολο (οδοντιατρικές ακτινογραφίες) | 2^ο σύνολο (φωτογραφίες αμφιβληστροειδούς) | 3^ο σύνολο (υπολογιστικές τομογραφίες γόνατος) |
|------------------------|---|---|---|
| CS/RFC | * | 52.988- | 18.472- |
| CS/BF | * | 97.529+ | 14.151- |
| RFC/BF | * | 99.382+ | * |

Εξετάζοντας τώρα συνολικά τις τρεις τεχνικές βάση της απόδοσης τους και στα τρία σύνολα εικόνων και λαμβάνοντας υπόψη και τα 4 MX τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση τους, είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς ότι η Robust Film Correction Method υπερέχει αισθητά των άλλων δύο τεχνικών. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τον πίνακα 7 όπου καταγράφεται σε ποιες περιπτώσεις η συγκεκριμένη τεχνική ήταν στατιστικά

καλύτερη, χειρότερη η ισάξια των άλλων δύο. Όπως βλέπουμε δεν υστερεί σε καμία από τις 12 περιπτώσεις που εξετάστηκαν, αντίθετα εμφανίζεται ανώτερη σε 7 και 8 από τις 12 κατηγορίες της Contrast Stretching και Boxcar Filtering αντίστοιχα. Στις υπόλοιπες των περιπτώσεων οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν δεν ήταν ικανές να μας οδηγήσουν σε ασφαλές συμπέρασμα, χωρίς όμως το γεγονός αυτό να αμφισβητεί στο ελάχιστο το αποτέλεσμα του ποσοτικού ελέγχου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Συνολικός συγκριτικός έλεγχος της Robust Film Correction Method και των δύο άλλων μεθόδων με βάση όλα τα ΜΧ εφαρμοσμένα και στα τρία σύνολα δεδομένων. Αριθμός κατηγοριών στις οποίες η της Robust Film Correction Method υπερτερούσε, υστερούσε ή ήταν στατιστικά ισάξια των Contrast Stretching και Boxcar Filtering αντίστοιχα

| <i>RFC vs. Συγκρινόμενη μέθοδος</i> | <i>Καλύτερη</i> | <i>Χειρότερη</i> | <i>Ισάξια</i> (Δεν προκύπτει ασφαλές συμπέρασμα) |
|--|------------------------|-------------------------|--|
| <i>vs. CS</i> | 7 | 0 | 5 |
| <i>vs. BF</i> | 8 | 0 | 4 |

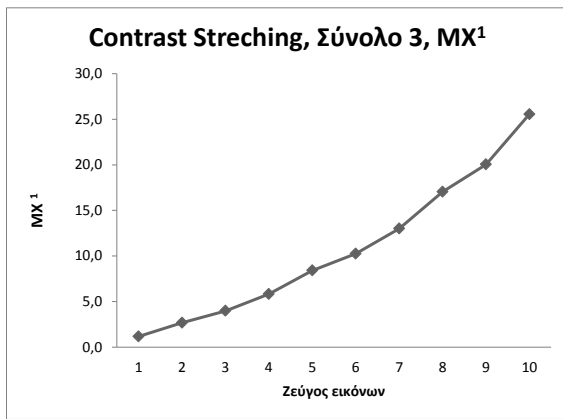
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα του ποιοτικού και ποσοτικού ελέγχου που παρουσιάστηκαν εκτενώς στην παραπάνω ενότητα της εργασίας, μας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η αποτελεσματικότερη μέθοδος από τις τρεις συγκρινόμενες ήταν η Robust Film Correction. Η διαπίστωση αυτή δεν μπορεί να αμφισβητηθεί. Στο κομμάτι αυτό της εργασίας, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών, εξετάζοντας όμως διαφορετικές πτυχές τους. Θα εστιάσουμε κυρίως στις ιδιότητες, τα δυνατά αλλά και τα αδύνατα σημεία των τριών συγκρινόμενων τεχνικών. Μία διαφορετική πτυχή των τεχνικών που εξετάστηκε ήταν η συνέχεια-συνέπεια τους. Για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη απόδοσης των τριών τεχνικών η οποία απεικονίζει την συμπεριφορά και την απόδοσή τους (λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ΜΧ που χρησιμοποιήθηκαν) κατά την επεξεργασία 10 ζευγών εικόνων από το τρίτο σύνολο. Στα συγκεκριμένα ζεύγη εικόνων η μεταβολή της αντίθεσης και της φωτεινότητας από την εικόνα αναφοράς στη διορθωμένη εικόνα κυμάνθηκε από +5% έως +50% και από +10% έως +100% αντίστοιχα. Για την δημιουργία της καμπύλης απόδοσης χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια ζεύγη και για τις τρεις τεχνικές. Όπως φαίνεται στα σχήματα 6,7,8 και 9 τα ζεύγη τοποθετήθηκαν σε αύξουσα σειρά όσον αφορά στη διακύμανση που εμφανίζουν (δηλ. Το 1^ο ζεύγος παρουσιάζει +5% αντίθεση +10% φωτεινότητα ενώ το 10^ο ζεύγος +50% αντίθεση και +100% φωτεινότητα).

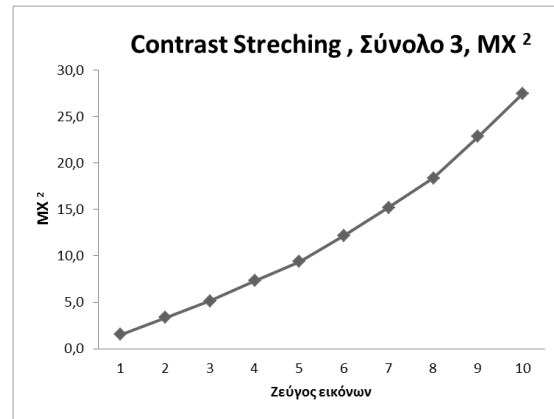
Μία από τις απλούστερες αλλά και ευρέως διαδεδομένες τεχνικές που εξετάστηκαν σε αυτή την έρευνα είναι η Contrast Stretching (ή αλλιώς κανονικοποίηση). Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως για την βελτίωση της αντίθεσης των εικόνων, καθώς μας παρέχει ένα πολύ απλό αλλά ταυτόχρονα αποτελεσματικό τρόπο να μεταβάλουμε την αντίθεση της εικόνας που μας ενδιαφέρει εντός κάποιων πλαισίων, τα οποία υπαγορεύονται από τους χρωματικούς περιορισμούς της εικόνας αναφοράς. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε δύο σκέλη. Αρχικά γίνεται σάρωση της εικόνας αναφοράς για να καθοριστούν τα όρια των τιμών της έντασης της αντίθεσης, εντός των οποίων μπορούμε να κινηθούμε και στη συνέχεια μεταβάλλουμε το εύρος της έντασης της αντίθεσης της επεξεργασμένης εικόνας, ώστε να ταυτιστεί με αυτό που βρήκαμε προηγουμένως. Όπως φαίνεται η συγκεκριμένη τεχνική δε χρησιμοποιεί κάποια παράμετρο, καθώς οι τιμές της έντασης που καθορίζουν το εύρος της (δηλ. η μέγιστη και η ελάχιστη) μπορούν να ληφθούν απευθείας από την εικόνα αναφοράς. Δυστυχώς, η κύρια εκδοχή αυτής της τεχνικής

(υπάρχουν και παραλλαγές) η οποία χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία δεν είναι τόσο αποτελεσματική για ακραίες τιμές της έντασης. Όπως φαίνεται από την εξίσωση (8) η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της έντασης για να καθορίσει το εύρος τιμών της. Εάν έστω και ένα από τα δύο όρια και στις δύο εικόνες εμφανίζει μεγάλη απόκλιση από τα υπόλοιπα αυτό θα έχει αρνητική επίδραση στην απόδοση της για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων πράγμα που αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της. Όπως είναι φυσικό έχουν προταθεί κάποιες παραλλαγές της για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων. Η βασική αρχή αυτών επιβάλλει επιπλέον εξέταση των ιστογραμμάτων των εικόνων, ώστε τα pixels των οποίων η ένταση αποκλίνει σημαντικά των υπολοίπων να αποκόπτονται και να μην επηρεάζουν την δημιουργία των ορίων.

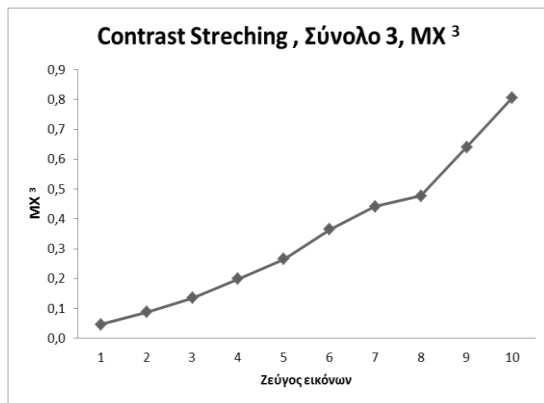
Όπως έχει προαναφερθεί όμως στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η πρωτότυπη μη βελτιωμένη εκδοχή της τεχνικής αυτής. Κρίνοντας την απόδοση αυτής αποκλειστικά μπορούμε να πούμε ότι ήταν η λιγότερο αποδοτική στο σύνολο των εικόνων. Γενικά, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η απόδοση της Contrast Stretching ήταν αντιστρόφως ανάλογη του βαθμού παραμόρφωσης της αντίθεσης και της φωτεινότητας των εικόνων. Δηλαδή όσο αυξανόταν το ποσοστό μεταβολής της αντίθεσης και της φωτεινότητας στην επεξεργασμένη εικόνα, τόσο φτωχότερη ήταν η ποιότητα της διόρθωσης που μας παρείχε. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό αρκεί να κοιτάξει κανείς το παράδειγμα που απεικονίζεται στο σχήμα 7. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο 7 (α) όσο αυξάνεται η διαφορά στην ένταση της αντίθεσης μεταξύ των εικόνων του ζεύγους τόσο αυξάνεται και η τιμή του MX^1 , γεγονός που συνεπάγεται με χαμηλότερης ποιότητας επεξεργασία. Το ίδιο συμβαίνει και για τα υπόλοιπα τρία MX όπως φαίνεται από τα υπόλοιπα γραφήματα του σχήματος 7. Με βάση τα παραδείγματα αυτά δεν θα ήταν αδόκιμο να πει κάποιος ότι η τεχνική αυτή σταματά να είναι τόσο πρακτική για αποκλίση (στο ζεύγος εικόνων) στην αντίθεση άνω του 10% και στην φωτεινότητα άνω του 20%.



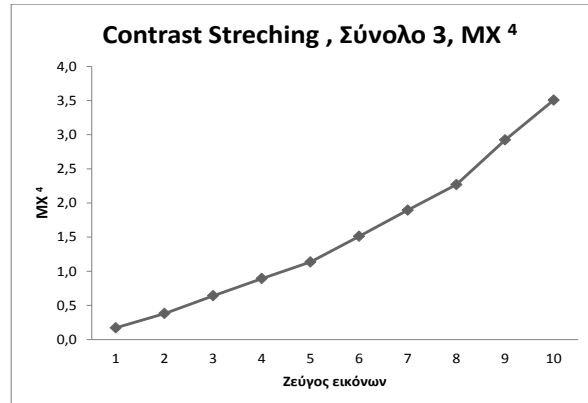
(α)



(β)



(γ)



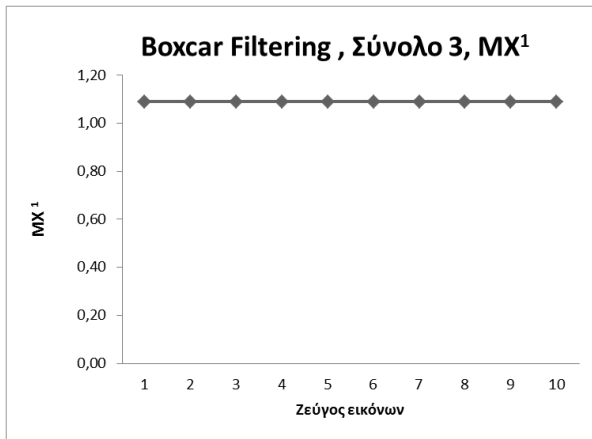
(δ)

Σχήμα 7. Καμπύλες απόδοσης της Contrast Stretching για 10 ζεύγη εικόνων από το 3^ο σύνολο. Τα ζεύγη εικόνων είναι διατεταγμένα κατά αύξουσα σειρά όσον αφορά στον βαθμό που αποκλίνει διορθωμένη εικόνα από την εικόνα αναφοράς. Από το ζεύγος με την μικρότερη απόκλιση (δλδ. το 1^ο) η φωτεινότητα και η αντίθεση της υπο διόρθωσης εικόνας αυξήθηκε κατά 5% και 10% αντίστοιχα ανά ζεύγος. Στο ζεύγος με την μεγαλύτερη απόκλιση (δλδ. το 10^ο) η φωτεινότητα αυξήθηκε κατά 50% και η αντίθεση κατά 100%. Οι καμπύλες απόδοσης αφορούν και στα τέσσερα μετρήσιμα χαρακτηριστικά (MX).

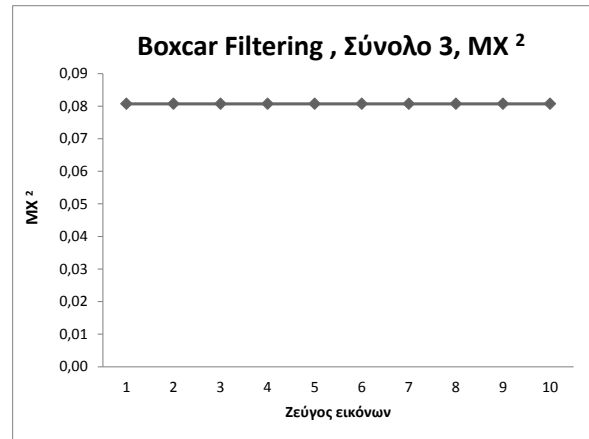
Η επόμενη, επίσης απλή φαινομενικά τεχνική που ασχοληθήκαμε σε αυτή την έρευνα ήταν η Boxcar Filtering. Όπως φαίνεται και από την εξίσωση (14), στην περίπτωση αυτή, η διορθωμένη εικόνα παράγεται ουσιαστικά μεταβάλλοντας κλιμακωτά την ένταση της υπό διόρθωση εικόνας με τη βοήθεια ενός φίλτρου. Η επιλογή του κατάλληλου φίλτρου αλλά και των παραμέτρων του, είναι πολύ σημαντική για την συγκεκριμένη τεχνική. Πρακτικά στην εξίσωση (14) μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε βαθυπερατό φίλτρο. Ο λόγος

για τους οποίους προτιμήθηκε το Φίλτρο Boxcar στην συγκεκριμένη έρευνα έχουν να κάνουν με την απλότητα αλλά και την αποτελεσματικότητα του. Όπως βλέπουμε και στη εξίσωση (15) ο ρόλος του φίλτρου αυτού είναι να αμβλύνει τις έντονες διαφορές στην ένταση της φωτεινότητας που πιθανόν να εμφανίζονται σε γειτονικά pixels θεωρώντας την μέση τιμή μιας περιοχής συγκεκριμένων διαστάσεων (πυρήνας). Ουσιαστικά η μοναδική παράμετρος που χρησιμοποιείται είναι οι διαστάσεις του πυρήνα αυτού. Γενικά το μέγεθος του πυρήνα είναι αντιστρόφως ανάλογο με την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της τεχνικής. Ωστόσο η παραδοχή αυτή γίνεται εντός κάποιων ορίων καθώς εάν επιλεγθούν πολύ μικρές διαστάσεις για τον πυρήνα είναι πιθανόν να προκύψουν ανεπιθύμητες κηλίδες στην διορθωμένη εικόνα. Στην περίπτωση μας ο πυρήνας επιλέχθηκε να είναι διαστάσεων 10×10 pixels σε μια προσπάθεια να ισορροπήσουμε ανάμεσα στην υψηλή ποιότητα διόρθωσης και τα ανεπιθύμητα ψεγάδια.

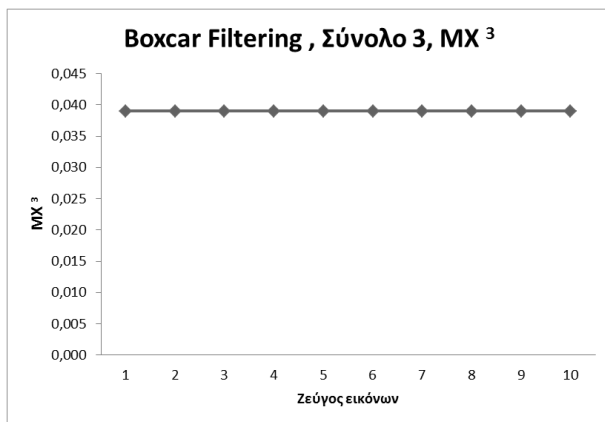
Όσον αφορά στην συνολική απόδοση της στο ευρύτερο φάσμα εικόνων η Boxcar Filtering κυμάνθηκε σε μέτρια επίπεδα ελαφρώς υψηλότερα συγκριτικά με την Contrast Stretching . Ωστόσο αυτό που είναι άξιο προσοχής σε αυτή την τεχνική είναι η σταθερότητα που επέδειξε στην απόδοση της συγκριτικά με τις άλλες δύο. Για να γίνουμε πιο σαφείς η συγκεκριμένη τεχνική παρουσίασε παρόμοια αποτελέσματα κατά την αξιολόγηση της και από τα 4 μετρικά που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης, η απόδοση της λαμβάνοντας σαν μέτρο σύγκρισης οποιοδήποτε από τα 4 ΜΧ, επηρεάστηκε λιγότερο αναλογικά με το ποσοστό μεταβολής της έντασης και της φωτεινότητας. Τα στοιχεία αυτά τα οποία επιβεβαιώνονται και από τις εικόνες του σχήματος 8 (όπου απεικονίζονται ζεύγη από το 3^ο σύνολο) μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η απόδοση της συγκεκριμένης τεχνικής εξαρτάται περισσότερο από τις παραμέτρους που θέτουμε και την μορφολογία της εικόνας αναφοράς και λιγότερο από το πόσο έντονες είναι οι αλλαγές που γίνονται στη αντίθεση και τη φωτεινότητα της υπό διόρθωση εικόνας.



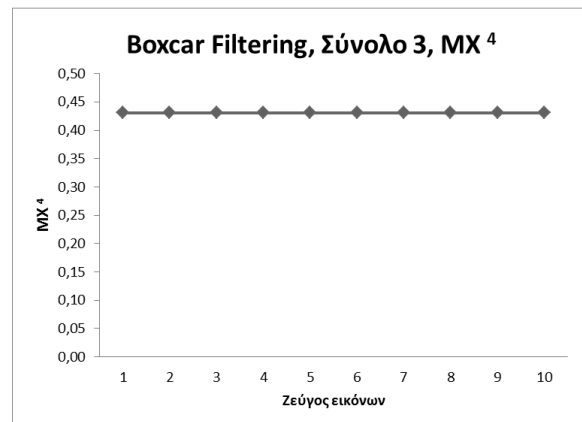
(α)



(β)



(γ)



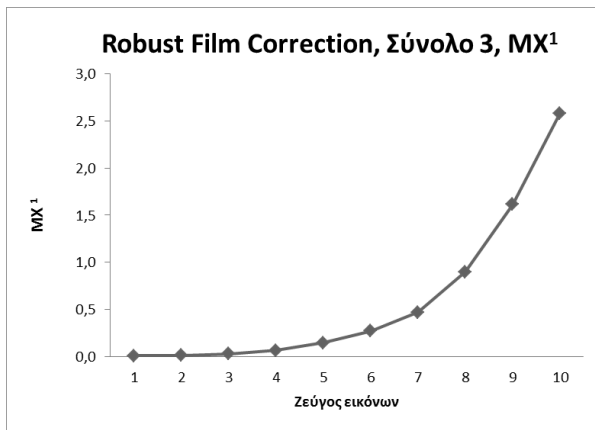
(δ)

Σχήμα 8. Καμπύλες απόδοσης της *Boxcar Filtering* για 10 ζεύγη εικόνων από το 3^ο σύνολο. Τα ζεύγη εικόνων είναι διατεταγμένα κατά αύξουσα σειρά όσον αφορά στον βαθμό που αποκλίνει διορθωμένη εικόνα από την εικόνα αναφοράς. Από το ζεύγος με την μικρότερη αποκλιση (δλδ. το 1^ο) η φωτεινότητα και η αντίθεση της υπο διόρθωσης εικόνας αυξήθηκε κατά 5% και 10% αντίστοιχα ανά ζεύγος. Στο ζεύγος με την μεγαλύτερη απόκλιση (δλδ. το 10^ο) η φωτεινότητα αυξήθηκε κατά 50% και η αντίθεση κατά 100%. Οι καμπύλες απόδοσης αφορούν και στα τέσσερα μετρήσιμα χαρακτηριστικά (MX).

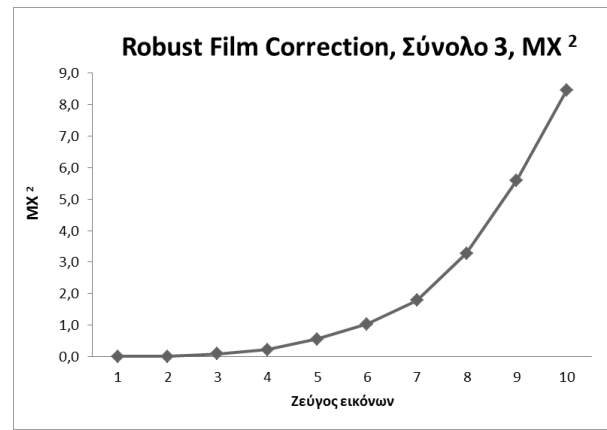
Η τελευταία τεχνική που μας απασχόλησε είναι η *Robust Film Correction* την οποία εισήγαγε για πρώτη φορά ο Ruttiman. Η τεχνική αυτή αποτελεί μία σταθερή αξία κυρίως για την διόρθωση της αντίθεσης των εικόνων. Χρησιμοποιώντας την αθροιστική συνάρτηση

κατανομής η τεχνική αυτή αλλάζει τα επίπεδα του ιστογράμματος της εικόνας προσπαθώντας να τα εξισώσει με αυτά της εικόνας αναφοράς. Ο τρόπος για να επιτευχθεί αυτό μας υποδεικνύεται από την εξίσωση (11). Γίνεται ουσιαστικά μία χαρτογράφηση των επιπέδων του ιστογράμματος με βάση το ιστόγραμμα της εικόνας αναφοράς. Μπορεί να αποδειχθεί μαθηματικά ότι η συνάρτηση που καθοδηγεί την χαρτογράφηση αυτή είναι μοναδική και εμφανίζει μονοτονία. Η μοναδικότητα αυτή μας εξασφαλίζει ότι κάθε επίπεδο στο ιστόγραμμα της επεξεργασμένης εικόνας αντιστοιχίζεται με τρόπο μοναδικό στο ομόλογο του στην εικόνα αναφοράς. Η μέθοδος δεν χρησιμοποιεί παραμέτρους και η απόδοση της εξαρτάται αυστηρά και μόνο από τα χαρακτηριστικά των δύο εικόνων.

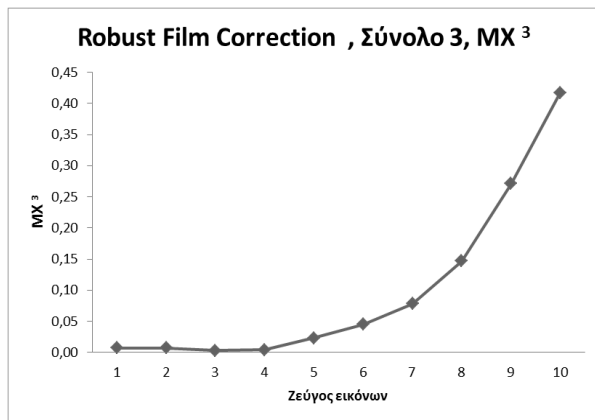
Εξαιτίας της αλγοριθμικής της μορφής η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολύ υψηλή επίδοση στις μετρήσεις που έγιναν με βάση το μετρήσιμο μέγεθος της τυπικής απόκλισης (MX^2). Αυτό πιστοποιείται και από τα αποτελέσματα της ποσοτικής αξιολόγησης που αναλύθηκαν εκτενώς παραπάνω. Ανεξάρτητα από αυτό μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος αυτή υπερτερούσε των άλλων σε γενικές γραμμές σε όλες τις κατηγορίες. Όπως και με την Contrast Stretching και εδώ παρατηρούμε ότι η απόδοση της επηρεάζεται σημαντικά από την απόκλιση των επιπέδων φωτεινότητας και αντίθεσης στο ζεύγος εικόνων και πιο συγκεκριμένα είναι και εδώ αντιστρόφως ανάλογη της διαφοράς αυτής. Θα μπορούσαμε να πούμε μάλιστα ότι ο ρυθμός με τον οποίο φθίνει η απόδοση της είναι σε κάποιες περιπτώσεις εκθετικός. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την καμπύλη στα γραφήματα του σχήματος 9. Παρόλο που η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και σε ακραίες περιπτώσεις μεταβολών (όπως το 10^ο ζεύγος στη συγκεκριμένη περίπτωση +50% σε αντίθεση και +100% σε φωτεινότητα) παρατηρούμε ότι η απόδοση της φθίνει εκθετικά από το 5^ο ζεύγος και μετά.



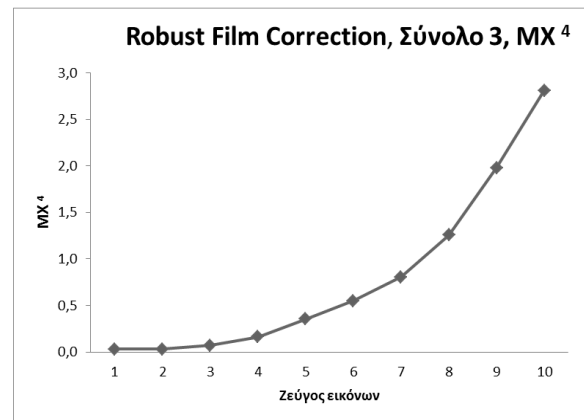
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 9. Καμπύλες απόδοσης της Robust Film Correction για 10 ζεύγη εικόνων από το 3^ο σύνολο. Τα ζεύγη εικόνων είναι διατεταγμένα κατά αύξουσα σειρά όσον αφορά στον βαθμό που αποκλίνει διορθωμένη εικόνα από την εικόνα αναφοράς. Από το ζεύγος με την μικρότερη αποκλιση (δλδ. το 1^ο) η φωτεινότητα και η αντίθεση της υπο διόρθωσης εικόνας αυξήθηκε κατά 5% και 10% αντίστοιχα ανά ζεύγος. Στο ζεύγος με την μεγαλύτερη απόκλιση (δλδ. το 10^ο) η φωτεινότητα αυξήθηκε κατά 50% και η αντίθεση κατά 100%. Οι καμπύλες απόδοσης αφορούν και στα τέσσερα μετρήσιμα χαρακτηριστικά (MX).

6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Αυτή η συγκριτική μελέτη πραγματοποιήθηκε για να αξιολογήσει την απόδοση τριών τεχνικών διόρθωσης (βελτίωσης) της φωτεινότητας και αντίθεσης ψηφιακών ιατρικών εικόνων και συγκεκριμένα των Robust Film Correction, Contrast Stretching και Boxcar Filtering. Οι τρεις αυτές τεχνικές εφαρμόστηκαν σε ένα σύνολο από 60 ζεύγη εικόνων χωρισμένο σε τρία υποσύνολα ανάλογα με την εικόνα αναφοράς, αλλά και τις μεταβολές που πραγματοποιήθηκαν πάνω σε αυτή ώστε να προκύψει η υπό διόρθωση εικόνα. Στις εικόνες του πρώτου συνόλου πραγματοποιήθηκαν μεταβολές μόνο στην αντίθεση, του δεύτερου μόνο στην φωτεινότητα ενώ του τρίτου και στα δύο συνδυαστικά. Οι διορθωμένες εικόνες που προέκυψαν αξιολογήθηκαν αρχικά ποιοτικά με οπτική επιθεώρηση και στη συνέχεια ποσοτικά με την βοήθεια των τεσσάρων ΜΧ ανά δύο. Από τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής τα οποία παρουσιάστηκαν αναλυτικά παραπάνω καθίσταται σαφές ότι η πιο αποδοτική μέθοδος είναι η Robust Film Correction.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Gottesfeld Brown L. A Survey of Image Registration Techniques. ACM Computing Surveys. 1992
- Tomasi C. Bilateral Filtering for Gray and Color *Images*. 1998
- Herold, F. Image Registration Combining Digital Radiography and Computer-Tomography Image Data. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China. 2008
- Vincent, L. Morphological grayscale reconstruction in *image* analysis: Applications and efficient algorithms. IEEE Transactions on Image Processing. 1993
- Matsopoulos GK. Medical imaging correction: a comparative study of five contrast and brightness matching methods. Comput Methods Programs Biomed. 106(3):308-27, 2012
- Economopoulos TL, Asvestas PA, Matsopoulos GK, Grondahl K, Grondahl H-G. A contrast correction method for dental images based on histogram registration. Dentomaxillofac Radiol 000: 1-14, 2010
- Cormen TH, Leiserson CE, Rivest RL, Stein C. Introduction to algorithms, second edition. MIT Press and McGraw-Hill 790-804, 2001
- Press WH, Teukolsky SA, Vetterling WT, Flannery BP. Numerical recipes in C: the art of scientific computing. 1988-1992
- Κατσάνος, Χ, Αβούρης Ν. 22 Στατιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Πειραματικών Δεδομένων Συνεργασίας
- Φωτόπουλος, Σ. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας με ιστόγραμμα. ΔΠΜΣ ΗΕΠ
- Proakis JG. Digital communications (2nd ed.). Chapter 9. McGraw-Hill, New York, 1989
- De Vries FP. Automatic, adaptive, brightness independent contrast enhancement. Signal Process. 21: 169-182, 1990

- Economopoulos TL, Asvestas PA, Matsopoulos GK, Contrast Enhancement of Images Using Partitioned Iterated Function Systems. *Im. Comp. Vis.* 28(1): 45-54, 2009
- Zacharaki EI, Matsopoulos GK, Asvestas PA, Gröndahl K, Gröndahl HG. A digital subtraction radiography scheme based on automatic multiresolution registration. *Dentomaxillofac Rad* 33: 1-14, 2004
- Casella G, Lehmann EL. *Theory of point estimation.* Springer Texts in Statistics, 1999
- Oppenheim NV, Shafer RW, Buck JR. *Discrete-time signal processing (2nd ed.).* Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1999.
- Avinash GP. Method for contrast matching of multiple images of the same object or scene to a common reference image. *Block Diagrams, App Notes, & Tools Download Medical Apps Guide*, 2007.
- Grevera GJ, Udupa JK: An objective comparison of 3-D image interpolation methods. *IEEE Trans Med Im* 17(4): 642-652, 1998.
- Ψηφιακή αφαιρετική ακτινογραφία - Γενικές αρχές – Εφαρμογή στην οδοντιατρική
 Μ.ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ, Α.ΚΟΝΔΥΛΙΔΟΥ, Ν.ΠΑΡΙΣΗΣ
 Εργαστήριο οδοντοφατνιακής Χειρουργικής, Χειρουργικής Εμφυτευματολογίας και Ακτινολογίας, Τμήμα Οδοντιατρικής του Α.Π.Θ