



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΟΔΟΝΤΙΑΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΑΖΑΡΟΣ Χ. ΖΑΧΑΡΙΑ

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

Αθήνα, Ιούνιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΟΔΟΝΤΙΑΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΑΖΑΡΟΣ Χ. ΖΑΧΑΡΙΑ

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 12^η Ιουνίου 2013

.....
Γ. Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ουζούνογλου Επ.
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2013

.....
Λάζαρος Χ. Ζαχαρία

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

Copyright© Λάζαρος Χ. Ζαχαρία, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Η τμηματοποίηση κατέχει σημαντική θέση στην ιατρική απεικόνιση γιατί έχει ως στόχο την επιτυχή εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από μια εικόνα και την χρήση τους για την δημιουργία πλάνου θεραπείας ή ακόμη και για καθοδήγηση σε χειρουργικές επεμβάσεις.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση μιας ολοκληρωμένης μεθόδου τμηματοποίησης οδοντιατρικών δεδομένων, η οποία μπορεί να τμηματοποιεί επιτυχώς τα δεδομένα με την λιγότερη παρέμβαση του χρήστη. Κατα την δημιουργία της προτεινόμενης μεθόδου μελετήθηκαν διάφοροι αλγόριθμοι τμηματοποίησης όπως η ανίχνευση ακμών, η watershed κατάτμηση, η κατάτμηση με υφή και τα snakes. Από αυτούς έγινε κατάλληλος συνδυασμός της ανίχνευσης ακμής και του snake, για την δημιουργία του βέλτιστου αποτελέσματος που μπορεί να ληφθεί και βάση αυτών στηρίχθηκε η υλοποίηση του τελικού αλγορίθμου.

Τα δεδομένα που καλείται η προτεινόμενη μέθοδος να τμηματοποιήσει, έχουν ιδιαίτερη δυσκολία, λόγω του ότι είναι οδοντιατρικά δεδομένα. Για αυτό το λόγο όλες οι μέθοδοι αδυνατούν να τμηματοποιήσουν ικανοποιητικά τα δεδομένα και έτσι η δημιουργία μιας πιο αξιόπιστης και ευσταθής μεθόδου τμηματοποίησης ήταν αναγκαία. Τα βήματα που ακολουθεί η προτεινόμενη μέθοδος για την επιτυχή τμηματοποίηση των δεδομένων είναι τα εξής: (α) Ενίσχυση της αντίθεσης της εικόνας, (β) Εξομάλυνση της εικόνας, (γ) Ανίχνευση ακμής του επιθυμητού δοντιού για την δημιουργία της καμπύλης αρχικοποίησης, (δ) Εφαρμογή μεθόδου snake, (ε) Επεξεργασία αποτελέσματος snake.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αρχίζει με μια εισαγωγή γενικά για τη σημαντικότητα της τμηματοποίησης των εικόνων την ιατρική απεικόνιση και στην επεξεργασία εικόνας. Ακολούθως γίνεται θεωρητική αναφορά στις μεθοδολογίες τμηματοποίησης και στις γενικές μεθόδους επεξεργασίας της εικόνας. Μετά παρουσιάζεται ο τρόπος υλοποίησης και τα αποτελέσματα της κάθε μεθόδου, καθώς και της προτεινόμενης μεθόδου, συνοδευόμενα με σχόλια και συγκρίσεις. Τέλος αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου και η μελλοντική επισκόπισή της.

Λέξεις κλειδιά

Τμηματοποίηση, μορφολογική επεξεργασία, επεξεργασία εικόνας, κλίση, συναρτησοειδές ενέργειας, σηματοδότης

Abstract

Segmentation plays an important role in medical imaging because it aims for the successful extraction of useful informations from an image and their use to create treatment plan or even for guidance to surgical procedures.

The purpose of this thesis is to present a complete method for segmentation of dental data, which can successfully segment the data with as little user intervention. During the creation of the proposed method they have been studied various segmentation algorithms such as edge detection, watershed segmentation, texture segmentation and snakes. Amongst them it has been done an appropriate combination of the edge detection and the snake, to create the best result that can be obtained and based on them, has relied the creation of the final algorithm.

The data the proposed method have to segment, have much difficulty because they are dental data. For this reason, all the methods fail to segment adequately the data and thus the creation of a more reliable and stable segmentation method was necessary. The stages, the proposed method should follow for a successful segmentation of the data, are as follows: (a) contrast enhancement of the image, (b) smoothing of the image, (c) edge detection of the desired tooth to create the curve initialization (d) Application of the snake method , (e) Processing of the snake result .

This thesis begins with a general introduction to the significance of image segmentation in medical imaging and in image processing. Then it has been made a theoretical reference to the methodologies of segmentation and to the general methods of image processing. After that the implementation and the results of each method, and also of the proposed method are presented, followed by comments and comparisons. Finally there is a reference to the conclusions resulting from the application of the proposed method and its future view.

Key words

Segmentation, morphological processing, image processing, gradient, energy functionals, marker

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 υπό την επίβλεψη του κ. Γεώργιου Ματσόπουλου, επ. καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Θεόδωρο Οικονομόπουλο, για τη βοήθεια και την καθοδήγησή του. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τις αδερφές μου, τους συγγενείς μου και τους φίλους μου για τη βοήθεια και την στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	-1-
1.1. Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας.....	-1-
1.2. Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας.....	-3-
Ανασκόπηση Τεχνικών Τμηματοποίησης Εικόνων.....	-4-
2.1. Τεχνικές Τμηματοποίησης Εικόνων.....	-4-
2.1.1. Κατωφλίωση.....	-5-
2.1.2. Ανίχνευση Ακμών.....	-6-
2.1.3. Watershed Κατάτμηση.....	-8-
2.1.4. Snakes.....	-9-
2.1.5. Κατάτμηση Υφής.....	-11-
2.2. Γενικές Μέθοδοι Επεξεργασίας Εικόνας.....	-12-
2.2.1. Μορφολογικοί Τελεστές.....	-12-
2.2.2. Διαστολή (Dilation).....	-13-
2.2.3. Συστολή (Erosion).....	-13-
2.2.4. Άνοιγμα (Opening).....	-14-
2.2.5. Κλείσιμο (Closing).....	-14-
2.2.6. Μορφολογική κλίση.....	-15-
2.2.7. Top-Hat.....	-15-
2.2.8. Μετασχηματισμός Απόστασης.....	-16-
2.2.9. Morphological Reconstruction.....	-16-
2.2.10. Φίλτρο Μέσου Ορου.....	-19-
2.2.11. Median Φίλτρο.....	-19-

Μεθοδολογίες Προσέγγισης Τμηματοποίησης Ιατρικών Δεδομένων.....	-20-
3.1. Εισαγωγή.....	-20-
3.2. Προϋποθέσεις για τμηματοποίηση.....	-20-
3.3. Τεχνική Προσέγγιση.....	-21-
3.4. Μέθοδος Κατωφλίωσης.....	-22-
3.5. Μέθοδος Ανίχνευσης Ακμών.....	-23-
3.6. Μέθοδος Κατάτμησης με Υφή.....	-25-
3.7. Μέθοδος Watershed Κατάτμησης.....	-26-
3.8. Snake Μέθοδος.....	-28-
3.9. Προτεινόμενη Μέθοδος Τμηματοποίησης.....	-29-
Αποτελέσματα Τμηματοποίησης Οδοντιατρικών Δεδομένων.....	-32-
4.1. Εισαγωγή.....	-32-
4.2. Οδοντιατρικά Δεδομένα CBCT (Cone beam computed tomography).....	-32-
4.3. Μεθοδολογίες για Τμηματοποίηση Οδοντιατρικών Δεδομένων και Αποτελέσματα -34-	
4.3.1. Ενίσχυση αντίθεσης και Εξομάλυνση Εικόνας.....	-34-
4.3.2. Εφαρμογή Watershed Μεθόδου.....	-38-
4.3.3. Εφαρμογή Μεθόδου Ανίχνευσης Ακμών.....	-44-
4.3.4. Εφαρμογή Μεθόδου Κατάτμησης Υφής.....	-47-
4.3.5. Εφαρμογή Snake Μεθόδου.....	-50-
4.3.6. Προτεινόμενη Μεθόδος Τμηματοποίησης Οδοντιατρικών Δεδομένων.....	-53-
4.4. Σχόλια Αποτελεσμάτων.....	-64-

Συμπεράσματα Τμηματοποίησης Οδοντιατρικών Δεδομένων.....	-66-
5.1. Συμπεράσματα.....	-66-
5.2. Μελλοντική Επισκόπηση.....	-67-
Βιβλιογραφία.....	-71-

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1. Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Η τμηματοποίηση εικόνας (image segmentation) ορίζεται ως η διαμέριση της εικόνας στα επιμέρους τμήματα (segments) που την απαρτίζουν και υπήρξε πάντα από τα πιο σημαντικά και πιο δύσκολα προβλήματα στην επεξεργασία εικόνας και γενικότερα στην όραση υπολογιστών. Η σημαντικότητα της τμηματοποίησης της εικόνας έγκειται στο γεγονός ότι έχει ως απόλυτο στόχο να απλοποιήσει και να “αλλάξει” την εικόνα σε κάτι πιο ουσιώδες, που θα δίνει περισσότερα δεδομένα και θα είναι πιο εύκολο να το αναλύσει κανείς. Η διαχώριση των περιοχών της εικόνας μπορεί να γίνει βάση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών που διαθέτει ένα τμήμα της, όπως το χρώμα, την υφή και την φωτεινότητά της.

Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι κατάτμησης και γενικά έχουν διαχωριστεί σε region-based (βασισμένες στη περιοχή) και boundary-based (βασισμένες στο περίγραμμα). Στις region-based ανήκει το watershed και στις boundary-based ανήκουν η ανίχνευση ακμής (edge detection) και τα snakes που θα αναφερθούν πιο κάτω.

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές της τμηματοποίησης εικόνων στην καθημερινότητα. Μια από τις βασικότερες είναι η ιατρική απεικόνιση. Η ιατρική απεικόνιση έχει ως σκοπό τον εντοπισμό όγκων και άλλων παθολογιών, παροχή βοήθειας στις διαγνώσεις και στη μελέτη της ανατομικής δομής κ.α. Σχεδόν πάντα στην η ιατρική απεικόνιση πρέπει να επεξεργαστεί ένας μεγάλος όγκος δεδομένων και από αυτόν να ληφθούν όσα πιο πολλά δεδομένα γίνεται. Έτσι μέσω της τμηματοποίησης της εικόνας μπορούν να δημιουργηθούν τρισδιάστατα μοντέλα (μέσω αλγορίθμων παρεμβολής) των επιθυμητών περιοχών που εντοπίζονται στις εικόνες, για την εξαγωγή περισσότερων πληροφοριών.

Ο βασικότερος στόχος της παρούσας διπλωματικής ήταν η επίτευξη της βέλτιστης τμηματοποίησης των οδοντιατρικών εικόνων με όσο πιο αυτοματοποιημένο τρόπο μπορεί να γίνει. Τα οδοντιατρικά δεδομένα είναι εικόνες τύπου CBCT (Cone Beam Computed Tomography) τεσσάρων ασθενών πριν και μετά την υποβληθήσα εγχείρηση. Λόγω του τύπου των εικόνων, η βασικότερη παράμετρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτυχή τμηματοποίησή τους είναι η φωτεινότητα τους και έτσι αποτελεί το θεμέλιο για την επίτευξη του στόχου. Ένα μεγάλο πρόβλημα όμως είναι ότι όλα τα δόντια εκπέμπουν την ίδια φωτεινότητα και οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι μικρές, καθιστώντας έτσι ακόμη πιο δύσκολη την κατάτμησή τους και άρα την ανάγκη να βρεθεί τρόπος διαχωρισμού τους. Επίσης κάποιες εικόνες μπορούν να έχουν θόρυβο ο οποίος αλλιώνει την εικόνα και άρα πρέπει να μειωθεί πριν την επεξεργασία της.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθόδου τμηματοποίησης οδοντιατρικών δεδομένων. Στο πλαίσιο αυτό, υλοποιήθηκαν οι ακόλουθοι αλγόριθμοι τμηματοποίησης: ανίχνευση ακμών, watershed κατάτμηση, κατάτμηση με υφή και snakes. Λόγω της δυσκολίας της τμηματοποίησης του είδους των οδοντιατρικών δεδομένων και της αδυναμίας των αλγορίθμων για αυτόματη τμηματοποίηση, επιλέχθηκε τελικά ένας συνδυασμός των αλγορίθμων τμηματοποίησης. Συγκεκριμένα στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος ο οποίος ακολουθεί τα ακόλουθα βήματα: (α) Ενίσχυση της αντίθεσης της εικόνας, (β) Εξομάλυνση της εικόνας, (γ) Ανίχνευση ακμής του επιθυμητού δοντιού για την δημιουργία της καμπύλης αρχικοποίησης, (δ) Εφαρμογή μεθόδου snake, (ε) Επεξεργασία αποτελέσματος snake. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται σε τομές οδοντιατρικών δεδομένων που συλλέχθηκαν από CBCT, επιτυγχάνοντας την λιγότερη επενέργεια του χρήστη για την απομόνωση δοντιών της στοματικής κοιλότητας. Συγκεκριμένα από τις έξι παραμέτρους που χρειάζεται η μεθοδολογία να μεταβάλλει, έχουν αυτοματοποιηθεί τελίως οι τέσσερις και μια μεταβάλλεται μόνο σε πάρα πολύ δύσκολες εικόνες.

Μέσω αυτής της διαδικασίας ο οδοντίατρος θα μπορεί να δει ξεκάθαρα το επιθυμητό δόντι και ποιες αλλαγές έχουν γίνει, πριν και μετά την εγχείρηση, σε κάθε εικόνα και με βλέψη αυτό να του παρέχεται και σε 3D (τρειςδιάστατο). Οι πληροφορίες που αντλεί θα μπορούν να τον βοηθήσουν στο σχεδιασμό ενός πλάνου θεραπείας και να τον καθοδηγήσουν σε διάφορες χειρουργικές επεμβάσεις.

1.2. Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας, γίνεται αναφορά στη θεωρία και στην υλοποίηση των βασικότερων μεθόδων τμηματοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν, στον τρόπο υλοποίησης του βασικού αλγόριθμου τμηματοποίησης καθώς και στη παρουσίαση και στη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Η παρούσα διπλωματική διαρθρώνεται στα κάτωθι κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στο θεωρητικό μέρος των αλγορίθμων τμηματοποίησης και άλλων τεχνικών έτσι ώστε ο αναγνώστης να εξοικειωθεί με αυτούς τους όρους. Κυρίως αναφέρονται οι τεχνικές τμηματοποίησης με κατωφλίωση, ανίχνευση ακμών, watershed, υφή και snake που χρησιμοποιήθηκαν, τα φίλτρα μείωσης του θορύβου από την εικόνα καθώς και οι εφαρμογές των μορφολογικών τελεστών στη εικόνα.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στο πρακτικό μέρος και στον τρόπο λειτουργίας των μεθοδολογιών τμηματοποίησης των εικόνων. Συγκεκριμένα αναφέρονται η κατωφλίωση, η ανίχνευση ακμών, η watershed κατάτμηση, η κατάτμηση με υφή και τα snake. Δηλαδή παρουσιάζεται η υλοποίηση της κάθε μεθοδολογίας με την χρήση μαθηματικού υπόβαθρου, για περεταίρω κατανόηση, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μιας. Επίσης παρουσιάζεται ο τρόπος ανάπτυξης της προτεινόμενης μεθόδου και τα επί μέρους βήματά της.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται βήμα προς βήμα η σταδιακή εξέλιξη της προτεινόμενης μεθόδου με τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε κάθε βήμα, καθώς και σύγκριση και σχολιασμός μεταξύ τους έτσι ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να αντιληφθεί τον τρόπο που αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος και γιατί έγινε έτσι. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματά όλων των μεθοδολογιών και γίνεται σύγκριση μεταξύ τους για να γίνει κατανοητό, ποιές και γιατί χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο. Ακόμη γίνεται αναφορά στις σημαντικότερες παραμέτρους και κατώφλια που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και στον τρόπο που έγινε η αυτοματοποίηση των περισσότερων.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου. Επίσης παρουσιάζεται και μια μελλοντική επισκόπηση του αλγορίθμου κυρίως όσον αφορά την τρισδιάστατη παρουσίαση των αποτελεσμάτων της κατάτμησης και την εφαρμογή αυτών στην οδοντιατρική.

Κεφάλαιο 2

Ανασκόπηση Τεχνικών Τμηματοποίησης Εικόνων

2.1. Τεχνικές Τμηματοποίησης Εικόνων

Η κατάτμηση εικόνας έχει ορισθεί με διάφορους τρόπους από πολλούς. Το 1978 οι H. Barrow και J. Tenenbaum την έχουν ορίσει ως η διαδικασία τεμαχισμού μιας εικόνας σε σημασιολογικά ερμηνεύσιμες περιοχές. Το 1992 οι R. Haralick και L. Shapiro την όρισαν ως η διαμέριση μιας εικόνας σε ένα σύνολο μη επικαλυπτόμενων περιοχών, που η ένωσή τους είναι ολόκληρη η εικόνα και ο σκοπός της κατάτμησης είναι να αποσυνθέτει την εικόνα σε τμήματα που έχουν νόημα μεταξύ τους [2]. Αρκετοί άλλοι όρισαν την κατάτμηση εικόνας με τον δικό τους τρόπο, αλλά ουσιαστικά το γενικό νόημα που συμφωνούν όλοι οι ορισμοί είναι ότι η κατάτμηση εικόνας είναι η διαδικασία απομόνωσης των στοιχείων της εικόνας από το φόντο της. Το επίπεδο της λεπτομέρειας στο οποίο πραγματοποιείται η κατάτμηση εξαρτάται από το πρόβλημα που θέλουμε να επιλύσουμε.

Κατά καιρούς έχουν δημιουργηθεί αρκετοί αλγόριθμοι τμηματοποίησης οι οποίοι έχουν ως απώτερο σκοπό αυτόν ακριβώς το γενικό ορισμό. Όπως έχει προαναφερθεί, γενικά οι αλγόριθμοι τμηματοποίησης χωρίζονται κυρίως σε boundary-based (μέθοδοι edge detection

και active contours) και region-based (μέθοδοι region growing π.χ. Watershed, statistical και variational) [1]. Και τα δύο είδη χρησιμοποιούν την αντιθεση και το μέγεθος που υπάρχει στην εικόνα ως κριτήρια ομοιογένειας για την υλοποίηση της κατάτμησης. Για την ακρίβεια όμως η κατάτμηση περιλαμβάνει πέντε βασικές προσεγγίσεις [4]. Αυτές είναι:

- Οι τεχνικές κατωφλιοποίησης, οι οποίες βασίζονται στην λογική ότι τα εικονοστοιχεία (pixels) που έχουν τιμή σε ένα συγκεκριμένο εύρος ανήκουν σε ένα αντικείμενο.
- Οι boundary-based μέθοδοι, οι οποίες συνήθως ονομάζονται και edge detection γιατί βασίζονται στο ότι οι τιμές των εικονοστοιχείων αλλάζουν δραστικά μεταξύ δύο περιοχών.
- Οι region-based αλγόριθμοι, οι οποίοι υποθέτουν ότι τα γειτονικά εικονοστοιχεία μέσα στην ίδια περιοχή έχουν παρόμοιες τιμές. Έτσι χρησιμοποιώντας ένα κριτήριο ομοιογένειας μπορούμε να διαχωρίσουμε τα εικονοστοιχεία σε διάφορες περιοχές.
- Οι pixel intensity based μέθοδοι, όπου οι τιμές των εικονοστοιχείων χρησιμοποιούνται για την τμηματοποίηση της εικόνας.
- Οι μορφολογικές μέθοδοι, όπου εδώ ανήκει και το watershed το οποίο χρησιμοποιά τις κλίσεις της εικόνας για την τμηματοποίηση της εικόνας. Αυτές οι μέθοδοι ανήκουν στις μη γραμικές μεθόδους ανάλυσης της εικόνας.

Ένα βασικό ερώτημα είναι ποιός από όλους τους αλγόριθμους τμηματοποίησης είναι ο καταλληλότερος για κάθε εφαρμογή. Αυτό μπορεί να βρεθεί αν ερωτηθεί κανείς ποιο κριτήριο πρέπει να βελτιστοποιήσει για να αποκτήσει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Υπάρχουν οι χαμηλού επιπέδου ιδιότητες της εικόνας όπως η ένταση, το χρώμα, η υφή και η κίνηση, οι εγγενείς ιδιότητες όπως το βάθος και ο προσανατολισμός, οι μεσαίου επιπέδου ιδιότητες όπως η συμμετρία και το μέγεθος, καθώς και οι υψηλού επιπέδου ιδιότητες όπως τα μοντέλα αντικειμένων [2]. Με ένα συνδυασμό αυτών των ιδιοτήτων μπορούμε να επιτύχουμε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι χαμηλού επιπέδου ιδιότητες για την τμηματοποίηση μιας εικόνας και ακολούθως με τις υψηλού/μεσαίου επιπέδου ιδιότητες να επαληθευθεί ή να διορθωθεί το αποτέλεσμα [3].

2.1.1. Κατωφλίωση

Ο απλούστερος τρόπος τμηματοποίησης είναι η κατωφλίωση της εικόνας. Κατά την κατωφλίωση μια επιπέδου γκρι εικόνα μετατρέπεται σε δυαδική, επιλέγοντας ένα επιθυμητό κατώφλι έτσι ώστε οποιαδήποτε ένταση μεγαλύτερη ή ίση της τιμής του να πέρνει την τιμή 1 και οποιαδήποτε ένταση μικρότερη να πέρνει την τιμή 0. Έτσι μέσω της κατωφλίωσης μπορούμε να ξεχωρίσουμε κάποια αντικείμενα στην εικόνα τα οποία έχουν ένταση μεγαλύτερη από την τιμή του κατωφλίου. Άρα η τιμή του κατωφλίου παίζει ουσιαστικό ρόλο στην απομόνωση των επιθυμητών στοιχείων και πρέπει να επιλέγεται ανάλογα της φωτεινότητάς τους. Κατά την εύρεσή του πρέπει να βρεθούν πρώτα τα χαρακτηριστικά της τοπικής περιοχής που μας ενδιαφέρει, έτσι ώστε να επιλεγεί το κατάλληλο κατώφλι βάση αυτών [2]. Αρκετά προβλήματα όμως υπάρχουν σε αυτή την μέθοδο. Βασικό πρόβλημα είναι ότι στις περισσότερες εικόνες και ιδικά στις ιατρικές υπάρχει ανομοιόμορφος φωτισμός και θόρυβος, έτσι ώστε η μέθοδος αυτή να χάνει την αποτελεσματικότητά της και

να αστοχεί στον ακριβή εντοπισμό των επιθυμητών περιοχών. Το πρώτο μπορεί να αντιμετωπιστεί με τον διαχωρισμό της εικόνας σε υποπεριοχές και με την ενίσχυση της αντίθεσης στην εικόνα έτσι ώστε να μειωθεί η ανομοιομορφία της φωτεινότητας, ενώ το δεύτερο αντιμετωπίζεται με την χρήση φίλτρων. Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτές τις τεχνικές παρατίθενται στην συνέχεια.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι κατωφλίωσης, όπως η probabilistic μέθοδος όπου γίνονται παραμετρικές υποθέσεις σχετικά με τη κατανομή της έντασης μεταξύ αντικειμένου και φόντου και στη συνέχεια βρίσκεται το “βέλτιστο” όριο, η structural μέθοδος όπου αξιολογείται ένα εύρος κατωφλίων σε σχέση με τις δυαδικές εικόνες που προκύπτουν και τέλος η τοπική κατωφλίωση όπου η τιμή του κατωφλίου μεταβάλλεται για διάφορες περιοχές της εικόνας [2]. Πολύ γνωστή και βέλτιστη μέθοδος κατωφλίωσης είναι η μέθοδος Otsu, όπου η βασική ιδέα είναι πως οι κατηγορίες οι οποίες διαχωρίστηκαν καλά μπορούν να διακριθούν ως προς τις τιμές έντασης των εικονοστοιχείων τους και αντίστροφα, πως ένα κατώφλι που οδηγεί στον καλύτερο δυνατό διαχωρισμό ανάμεσα στις κλάσεις (διαχωρισμός των εικονοστοιχείων σε δύο ή περισσότερες ομάδες) συναρτήσει των τιμών της έντασής τους θα ήταν το βέλτιστο κατώφλι [17]. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι όλοι οι υπολογισμοί της γίνονται στο ιστόγραμμα της εικόνας, πράγμα απλό χωρίς πολύπλοκες διαδικασίες. Επειδή η κατωφλίωση δεν αρκεί για να επιτυχθεί η επιθυμητή τμηματοποίηση, η χρήση άλλων αποτελεσματικότερων τεχνικών είναι αναγκαία.

2.1.2. Ανίχνευση Ακμών

Μια πιο αποτελεσματικότερη μέθοδος από την κατωφλίωση και ένα από τα γνωστότερα προβλήματα στις απαρχές της όρασης υπολογιστών είναι το edge detection ή αλλιώς η ανίχνευση ακμών. Ως ακμή ορίζεται η καμπύλη που ακολουθά της διαδρομή της απότομης αλλαγής της έντασης της εικόνας. Απότερος στόχος της ανίχνευσης ακμών είναι η περιγραφή και η κατανόηση των αλλαγών της έντασης της φωτεινότητας μιας εικόνας έτσι ώστε να αποφεύγεται ο εντοπισμός ψευδο-ακμών. Οι ψευδο-ακμές δημιουργούνται κυρίως από την ύπαρξη θορύβου που υπάρχει στην εικόνα ο οποίος παραμορφώνει το σχήμα των μεταβολών της έντασης. Οι απότομες μεταβολές της έντασης της εικόνας συχνά οφείλονται στις φυσικές ιδιότητες των αντικειμένων όπως το βάθος, η υφή, η αντανακλαστικότητα της επιφάνειας, η μεταβολή του φωτισμού, η σκίαση και άρα ο εντοπισμός των ακμών μας δίνει στοιχεία για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου [1]. Οι ακμές είναι στενά συνδεδεμένες με τα όρια της περιοχής των αντικειμένων αφού συνήθως υπάρχει απότομη αλλαγή της φωτεινότητας σε αυτά και άρα η ανίχνευση ακμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τμηματοποίηση της εικόνας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως συνήθως στις εικόνες υπάρχει θόρυβος που επηρεάζει τα αποτελέσματα της ανίχνευσης ακμών. Ο θόρυβος μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω της ενίσχυσης της εικόνας (image enhancement). Ο στόχος της ενίσχυσης της εικόνας είναι η βελτίωση της ορατότητας και της αίσθησης των διάφορων περιοχών της εικόνας. Βασικά αυτό μπορεί να γίνει με ενίσχυση της αντίθεσης της εικόνας, απλοποίηση της εικόνας μέσω φιλτραρίσματος και εξάλειψη του θορύβου. Οι ακμές χωρίζονται σε 3 βασικά είδη: την γραμμή, το βήμα και την στέγη ή με μαθηματικούς όρους στη παράγωγο τάξης 0, 1 και 2 αντίστοιχα της Dirac συνάρτησης [1]. Η βηματική ακμή περιλαμβάνει την

μετάπτωση σε δύο επίπεδα έντασης σε απόσταση ενός εικονοστοιχείου. Επειδή όμως αυτού του είδους ακμή είναι ιδανική και δεν συναντάται συχνά λόγω του ότι οι εικόνες έχουν θόρυβο, οι ακμές μοντελοποιούνται καλύτερα με το μοντέλο της ράμπας. Την ακμή σκέπτης μπορούμε να τη δούμε ως μοντέλα γραμμής μέσα σε μια περιοχή.

Η ανίχνευση ακμών διαχωρίζεται σε 3 στάδια:

- (1) Ομαλοποίηση των εντάσεων της εικόνας μέσω φιλτραρίσματος για την καταστολή του θορύβου (για να μην ενισχυθεί από το επόμενο βήμα της παραγωγίσης) και για αποσύνθεση των ακμών στις διάφορες κλίμακες.
- (2) Παραγωγή της ομαλοποιημένης εικόνας μέσω 1ης ή 2ης τάξης παραγώγων, έτσι ώστε να ενισχυθούν οι ακμές και να γίνουν πιο εύκολα ανιχνεύσιμες.
- (3) Ανίχνευση των ακμών. Αν χρησιμοποιηθεί η 1η παράγωγος τότε οι ακμές βρίσκονται στα σημεία όπου υπάρχουν θετικές και αρνητικές κορυφές της. Αν χρησιμοποιηθεί η 2η παράγωγος τότε βρίσκονται στα σημεία όπου υπάρχουν zero-crossings (μηδενικές διελεύσεις) σε αυτήν.

Η ανίχνευση ακμών χρησιμοποιεί γραμμικές και μη γραμμικές μεθόδους. Στην γραμμική ανίχνευση ακμών η ομαλοποίηση και η παραγωγή μπορούν να γίνουν σε ένα στάδιο μέσω της συνέλιξης της εικόνας με την παράγωγο του πυρήνα ομαλοποίησης. Η πιο γνωστή γραμμική μέθοδος είναι η LoG (Laplacian of Gaussian) η οποία χρησιμοποιήθηκε για την καλύτερη γραμμική ανίχνευση ακμών. Το Gaussian φίλτρο δίνει την βέλτιστη συμπακτότητα στον χώρο και στην συχνότητα και ο τελεστής Laplacian είναι γραμμικός και ισοτροπικός, 2ης τάξης διαφορικός τελεστής. Λόγο του λαπλασιανού τελεστή, οι ακμές βρίσκονται στα zero-crossings της LoG. Βασικό πρόβλημα της LoG είναι ότι για να έχει επιτυχημένη ανίχνευση πρέπει να τηρούνται κάποια κριτήρια στην εικόνα. Συγκεκριμένα, η ένταση της εικόνας πρέπει να είναι τοπικά γραμμική και παράλληλη στα zero-crossings και η εικόνα να είναι γραμμική στην γραμμή των zero-crossings, πράγματα που δεν ισχύουν πάντα. Στη μη γραμμική ανίχνευση ακμών χρησιμοποιούνται κυρίως μορφολογικοί τελεστές. Πιο συγκεκριμένα μπορούν να ληφθούν οι ακμές μέσω της αφαίρεσης μεταξύ της διαστολής (dilation) και της συστολής (erosion) [1]. Επίσης η ανίχνευση ακμών μπορεί να γίνει εφικτή με την χρήση του μη γραμμικού Laplacian τελεστή του οποίου τα zero-crossings δίνουν τις τοποθεσίες των ακμών.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ανίχνευσης ακμών αλλά γενικά μπορούν να τις ενταχθούν σε δύο κατηγορίες. Υπάρχουν οι μέθοδοι που μετράνε την ένταση της ακμής, όπως η Sobel, η Prewitt και η Roberts οι οποίες συγκεκριμένα ψάχνουν για ακμές στα μέγιστα της κλίσης της εικόνας και υπάρχουν οι μέθοδοι που ανιχνεύουν τα zero-crossings όπως η προαναφερθήσα LoG και η Canny η οποία θεωρείται από τις καλύτερες σε σχέση με τις υπόλοιπες, γιατί επηρεάζεται λιγότερο από την ύπαρξη θορύβου. Αυτό συμβαίνει γιατί εντοπίζει τα zero-crossings της 2ης παραγωγού της εικόνας ακολουθώντας τη κλίση της, μετά μέσω διπλής κατωφλίωσης εντοπίζει τις “δυνατές” και τις “αδύνατες” ακμές και τέλος στην έξοδο συμπεριλαμβάνει μαζί με τις “δυνατές” ακμές μόνο όσες “αδύνατες” είναι συνδεδεμένες με “δυνατές” ακμές.

2.1.3. Watershed Κατάτμηση

Μια από τις διασημότερες και αποτελεσματικότερες τεχνικές τμηματοποίησης είναι το watershed. Η μέθοδος αυτή γενικά ανήκει στις topographic region growing (τοπογραφική ανάπτυξη περιοχών) μεθόδους τμηματοποίησης της εικόνας και συγκεκριμένα στις μορφολογικές μεθόδους [5]. Είναι ο πρώτος αλγόριθμος που προέρχεται από την τοπογραφική σκοπιά. Η όλη βάση αυτής της τεχνικής είναι ότι βλέπει κανείς την εικόνα σαν ένα γεωγραφικό τοπίο το οποίο πλημμυρίζεται από νερό και απομένουν τα watersheds (ή watershed lines), τα οποία είναι οι γραμμές των κορυφών των βουνών και των φραγμάτων που συσσωρεύουν το νερό στις λεκκάνες τους. Ένας ακόμη πιο σωστός τρόπος να το φανταστεί κάποιος είναι ότι τα τοπικά ελάχιστα του τοπίου έχουν τρύπες από τις οποίες εισέρχεται νερό στο χώρο, πλημμυρίζοντας την τοπογραφία στο σύνολό της από κάτω προς τα πάνω. Στα σημεία όπου συναντάται νερό από δύο διαφορετικές πηγές ο αλγόριθμος τοποθετεί φράγμα για τον διαχωρισμό τους. Έτσι συνεχίζεται αυτή η διαδικασία μέχρι να φτάσει τις κορυφές της εικόνας όπου σταματά. Αυτό που απομένει είναι ο διαχωρισμός της εικόνας από τα watersheds που δημιουργήθηκαν [5]. Απλούστερα η όλη διαδικασία αποσκοπεί στον διαχωρισμό των catchment basins από τα watersheds. Τα catchment basins θεωρητικά ορίζονται ως το σύνολο των σημείων όπου θα περάσει μια σταγόνα νερού μέχρι να φτάσει στο τοπικό ελάχιστο μιας περιοχής της εικόνας [1].

Ο αλγόριθμος αυτός είναι ευρέως διαδεδομένος και κυρίως στη τμηματοποίηση ιατρικών εικόνων λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων του. Καταρχάς είναι απλός και πολύ διαισθητικός για να το καταλάβει κάποιος, επίσης μπορεί να εντοπίσει εύκολα τις ακμές ανεξαρτήτως της έντασής τους και τα περιγράμματα των περιοχών, λόγω του ότι χρησιμοποιά τα τοπικά ελάχιστα και έτσι δεν “ξεγελιέται” εύκολα ακόμα και αν δεν υπάρχουν “δυνατές” ακμές στη περιοχή [5]. Επειδή η όλη διαδικασία του watershed εφαρμόζεται στη κλίση της εικόνας που θα τμηματοποιηθεί, αυτό οδηγά στο μεγαλύτερο μειονέκτημα της μεθόδου το οποίο είναι η υπερ-κατάτμηση, η οποία καθιστά το αποτέλεσμα της μεθόδου ουσιαστικά άχρηστο. Κυρίως αν εφαρμοστεί απευθείας στη κλίση της εικόνας, έστω και αν η εικόνα επεξεργαστεί πιο πριν, είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα υπάρξει υπερ-κατάτμηση λόγω του μεγάλου πλήθους των catchment basins που υπάρχουν σε αυτό [1]. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση των σηματοδευτών (markers). Με τον όρο σηματοδευτές, εννοείται μια γνωστή περιοχή από ενωμένα εικονοστοιχεία τα οποία βρίσκονται μέσα στην επιθυμητή περιοχή. Οι σηματοδευτές χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τον αριθμό των catchment basins και άρα έμμεσα αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της υπερ-κατάτμησης. Η εύρεσή τους αποτελεί ίσως το πιο δύσκολο στάδιο της όλης διαδικασίας, γιατί βάση των σηματοδευτών που εξάγονται, λαμβάνονται διαφορετικά αποτελέσματα. Μετά την εύρεση των σηματοδευτών πρέπει να εισαχθούν στη κλίση της εικόνας ως τα καινούργια ελάχιστα της (minima), από τα οποία θα αρχίζει η διαδικασία του πλημμυρισμού και άρα τώρα είναι εφικτή η επιθυμητή κατάτμηση της εικόνας. Για μια επιτυχής κατάτμηση χρειάζονται δύο είδη σηματοδευτών, οι Εσωτερικοί Σηματοδευτές (Inside Markers) οι οποίοι επιβάλλονται ως τα μοναδικά ελάχιστα της εικόνας και οι Εξωτερικοί Σηματοδευτές (Outside Markers) οι οποίοι αντιπροσωπεύουν το υπόβαθρο της εικόνας και εξάγονται μέσω πλημμυρισμού της εικόνας με ελάχιστα τους Εσωτερικούς Σηματοδευτές [1].

Γενικά το watershed αποτελείται από τρία στάδια:

- (1) Μη-Γραμμικό Φιλτράρισμα: Σε αυτό το στάδιο γίνεται η προεπεξεργασία της εικόνας, δηλαδή η απομάκρυνση του θορύβου από την εικόνα έτσι ώστε να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα, ενδυνάμωση των ακμών της, απλοποίηση και ομαλοποίησή της. Στόχος δηλαδή είναι να γίνει μείωση του θορύβου και όποιας άλλης αχρείαστης πληροφορίας που υπάρχει και γενικά να ετοιμαστεί η εικόνα για την κατάτμηση. Κατάλληλα φίλτρα για αυτόν τον σκοπό είναι τα ASF (alternative sequential filters) που θα αναλυθούν μεταγενέστερα.
- (2) Εξαγωγή Χαρακτηριστών: Εδώ γίνεται εξαγωγή των χαρακτηριστικών της απλοποιημένης εικόνας όπως ανίχνευση ακμών, εξαγωγή των σηματοδευτών και η επεξεργασία αυτών. Το μέγεθος και το σχήμα των σηματοδευτών δεν παίζουν κανένα ρόλο και η επιλογή τους μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια όπως η αντίθεση, το εμβαδόν και ο συνδυασμός των δύο, ο οποίος αντιστοιχά στον όγκο.
- (3) Ανίχνευση Περιγράμματος Περιοχών: Στο στάδιο αυτό γίνεται αλλαγή της ομοιοπίας της εικόνας με την επιβολή των Εσωτερικών Σηματοδευτών (Inside Markers) ως τα μοναδικά ελάχιστα της εικόνας, υπέρθεση των σ (Inside/Outside) και εφαρμογή του μετασχηματισμού watershed για τον εντοπισμό των περιγραμμάτων. Τα περιγράμματα βρίσκονται καταναγκαστικά ανάμεσα στους Inside-Outside Σηματοδευτές.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιά το watershed για την κατάτμηση όπως το immersion, το flooding και το rainfalling. Το πιο διαδεδομένο είναι το flooding αλλά το rainfalling είναι υπολογιστικά πιο γρήγορο. Το watershed, λόγω της ιδιαίτερης λογικής που χρησιμοποιά έχει εφαρμοστεί με επιτυχία ακόμα και στην ιατρική απεικόνιση και θεωρείται από τους καλύτερους αλγόριθμους τμηματοποίησης.

2.1.4. Snakes

Μια από τις πιο εξελιγμένες τεχνικές για την ανίχνευση των περιγραμμάτων των αντικειμένων σε μια εικόνα είναι τα snakes, επίσης γνωστά ως και ενεργά περιγράμματα (active contours). Χρησιμοποιούνται ευρέως στο χώρο της όρασης υπολογιστών και γενικά στην επεξεργασία εικόνων. Ως snake ορίζεται μια καμπύλη που τοποθετείται στον χώρο της εικόνας και αρχίζει να κινείται (εξελίσσεται) βάση της επιρροής εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται σε αυτή. Οι δυνάμεις αυτές ασκούνται στη καμπύλη με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να πάρει το σχήμα του περιγράμματος του επιθυμητού αντικειμένου [9]. Άρα η καμπύλη κινείται με τέτοιο τρόπο μέσα στην εικόνα, ώστε να βελτιστοποιήσει κάποια ενέργεια, η οποία ενέργεια μας δίνει μια εκτίμηση του πόσο κοντά βρίσκεται η καμπύλη στο επιθυμητο αποτέλεσμα. Έτσι παραμορφώνοντας την καμπύλη στο σχήμα του περιγράμματος του αντικειμένου πρέπει η ενέργεια να πέρνει το ελάχιστό της και η καμπύλη να παραμένει σε αυτό [6]. Η άσκηση των δυνάμεων που ανταποκρίνονται σε αυτά τα δεδομένα (δηλαδή να μπορούν να καθοδηγήσουν την καμπύλη κατάλληλα ώστε να πάρει την μορφή του επιθυμητού περιγράμματος) μπορούν να καθοριστούν από την ύπαρξη ακμής, από την στατιστική διαφοροποίηση της εικόνας μετά την καμπυλη (όπως ένταση

φωτεινότητας, υφή, χρώμα), από την ομαλότητα του σχήματος της καμπύλης και από προηγούμενη γνώση (π.χ. σχήμα, υφή, ένταση, τοποθεσία) [1].

Για την ελαχιστοποίηση συναρτησιακών που αποσκοπούν στην επιθυμητή ελαχιστοποίηση κάποιας ενέργειας, χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς οι ΜΔΕ (μερικές διαφορικές εξισώσεις). Τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους είναι αρκετά όπως καλύτερη και πιο διαισθητική μαθηματική μοντελοποίηση, εκμετάλλευση φυσικών μεγεθών και φαινομένων, έχουν γερά θεμέλια από τα Εφαρμοσμένα Μαθηματικά και υψηλή ακρίβεια και ευστάθεια των αλγορίθμων που εφαρμόζουν. Τα snakes χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές όπως για ανίχνευση ακμών, για μοντελοποίηση σχημάτων, για τμηματοποίηση της εικόνας και για ανίχνευση κίνησης.

Γενικά υπάρχουν δύο γνωστά είδη snakes, τα παραμετρικά ενεργά περιγράμματα (parametric active contours) και τα γεωμετρικά ενεργά περιγράμματα (geometric active contours), στα οποία χωρίζονται σύμφωνα με την παρουσίαση και την εφαρμογή τους. Τα παραμετρικά ενεργά περιγράμματα είναι παλαιότερη τεχνική από τα γεωμετρικά ενεργά περιγράμματα και έχουν δημιουργηθεί πολλές εφαρμογές βάση αυτών, για λύση προβλημάτων εκτίμησης σχημάτων. Τα γεωμετρικά ενεργά περιγράμματα είναι μεταγενέστερες και πιο πρόσφατες τεχνικές και δημιουργήθηκαν για την αντιμετώπιση των τοπολογικών αλλαγών κατά την διάρκεια της εξέλιξης της καμπύλης [8].

Συγκεκριμένα στα παραμετρικά ενεργά περιγράμματα γίνεται κίνηση της καμπύλης παραμετρικά σύμφωνα με την Lagrangian προσέγγιση. Συνθέτουν παραμετρικές καμπύλες μέσα στην εικόνα και αυτές μπορούν να κινηθούν προς την κατεύθυνση που βρίσκονται οι επιθυμητές ακμές. Επίσης στα παραμετρικά ενεργά περιγράμματα η κίνηση της καμπύλης γίνεται μέσω της κίνησης των σημείων, αυτό μπορεί να θεωρηθεί και ως πολυκλιμακωτές διαστολές από τα αρχικά σημεία, λογική που βασίζεται στην αρχή του Huygens [1]. Οι δυνάμεις που χρησιμοποιούνται για την κίνηση της καμπύλης προς τις ακμές ονομάζονται δυναμικές δυνάμεις (potential forces), οι οποίες μαζί με τις δυνάμεις πίεσης (pressure forces) διαμορφώνουν τις εξωτερικές δυνάμεις (external forces) που εφαρμόζονται στην καμπύλη. Υπάρχουν επίσης και οι εσωτερικές δυνάμεις (internal forces), οι οποίες εφαρμόζονται για να συγκρατούν την καμπύλη ενωμένη και να αποφεύγεται το υπερβολικό λύγισμά της [9]. Οι εσωτερικές δυνάμεις χωρίζονται σε ελαστικές (elastic) και καμπτικές (bending). Οι ελαστικές δυνάμεις όμως μπορούν να προκλέσουν ανεπιθύμητες συρρικνώσεις και οι καμπτικές δυνάμεις μπορούν να ομαλοποιήσουν αυτά τα προβλήματα. Μεγάλο μειονέκτημά των παραμετρικών ενεργών περιγραμμάτων είναι ότι δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν τις τοπολογικές αλλαγές που παρουσιάζει η εικόνα κατά την διάρκεια της εξέλιξής τους. Επίσης για να λειτουργήσουν βέλτιστα πρέπει να τοποθετούνται αρχικά κοντά στο επιθυμητό περίγραμμα αλλιώς είναι πολύ πιθανόν να ληφθούν ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

Τα γεωμετρικά ενεργά περιγράμματα παρουσιάζονται έμμεσα ως level sets 2D συναρτήσεων απόστασης τα οποία εξελίσσονται σύμφωνα με την Eulerian προσέγγιση. Είναι βασισμένα στην εξέλιξη των καμπύλων μέσω τεχνικών επιπεδοσυνόλων (level sets). Δημιουργήθηκαν για να ξεπεραστεί το πρόβλημα που έχουν τα παραμετρικά ενεργά περιγράμματα σχετικά με τις τοπολογικές αλλαγές και τα αριθμητικά προβλήματα που

προκαλεί η Lagrangian προσέγγιση, άρα υπερτερούν λόγο αριθμητικής ευρωστίας. Αυτό γίνεται εφικτό λόγω της χρήσης των επιπεδοσυνόλων. Επίσης ένα άλλο πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να επεκταθούν και σε μεγαλύτερες διαστάσεις. Υπάρχουν πολλά κοινά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων από μαθηματικής άποψης και η ακαμψία είναι ένα από αυτά. Αυτό οφείλεται κυρίως λόγω του ότι πολλές τεχνικές που εφαρμόστηκαν στα παραμετρικά ενεργά περιγράμματα παλαιότερα, χρησιμοποιήθηκαν μετέπειτα στα γεωμετρικά ενεργά περιγράμματα.

2.1.5. Κατάτμηση Υφής

Η υφή αποτελεί άλλο ένα σημαντικό κεφάλαιο της επεξεργασίας εικόνας, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στην όραση υπολογιστών και συγκεκριμένα στην διεργασία και κατανόηση του χαμηλού επιπέδου όρασης. Ανήκει στις region-based τεχνικές και οι εφαρμογές που προσφέρει είναι αρκετές σε διάφορους τομείς όπως επίβλεψη υλικών, αυτόματες αποφάσεις, διαγνώσεις σε βϊοιατρικές εικόνες, αναγνώριση ποιότητας εδάφους στις γεωεπιστήμες, παρασκευή/ αναγνώριση στη ναυπηγική, δημιουργία γραφικών στους υπολογιστές, αποκατάσταση τοιχογραφιών κ.α. Η κατάτμηση μέσω υφής συνήθως συμπεριλαμβάνει συνδιασμό των τεχνικών εξαγωγής υφής μαζί με κατάλληλους αλγόριθμους τμηματοποίησης [12].

Οι μέθοδοι ανίχνευσης και περιγραφής της υφής χωρίζονται σε στατιστικές, οι οποίες επιτρέπουν το χαρακτηρισμό της υφής ως ομαλής, τραχιάς, κοκώδους κ.α., σε γεωμετρικές/δομικές, οι οποίες μελετούν τις διατάξεις των τεξτονίων (textons) της εικόνας και σε ενεργειακές/πολυκαναλικές [17]. Οι στατιστικές μέθοδοι περιλαμβάνουν μοντέλα γραμμικής πρόβλεψης με τη χρήση λευκού γκαουσιανού θόρυβου όπως τα 2D AutoRegressive MovingAverage (ARMA), στα οποία γίνεται σύνθεση εικόνων τυχαίας υφής και η κατάτμηση/ταξινόμηση γίνεται αναλύοντας το λάθος πρόβλεψης, Gibbs/Markov τυχαία πεδία (ή 2D στοχαστικές ανεξίξεις) κατάλληλα για σύνθεση, ταξινόμηση και κατάτμηση, τυχαία σύνολα/τοπικές κατανομές μεγέθους (Random sets/Granulometries) στα οποία εκτελείται σύνθεση των εικόνων τυχαίας υφής με διαστολή 2D σημειακών ανεξίξεων με τυχαία δομικά στοιχεία και ταξινόμηση εικόνων υφής μέσω ανάλυσης ιστογραμμάτων μεγέθους από φίλτρα ανοίγματος/κλεισίματος σε πολλαπλές κλίμακες και πίνακες συνύπαρξης. Οι γεωμετρικές/δομικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τα τεξτόνια (textons) που είναι τα θεμελιώδη στοιχεία στην στιγμιαία (preattentive) όραση και στην αντίληψη της υφής και τα οποία θα αναλυθούν πιο κάτω, τα ντετερμινιστικά φράκταλ τα οποία συνθέτουν εικόνες υφής με τυχαία fractals και τις ταξινομούν μέσω των διαφορών τους στην fractal διάσταση, διαγράμματα voronoi και γραμματικά μοντέλα. Οι ενεργειακές/πολυκαναλικές μέθοδοι περιέχουν γραμμικά φίλτρα, scale-spaces, AM-FM μοντέλα και ενέργειες Gabor, η χρήση των 2D Gabor φίλτρων γίνεται γιατί κανονποιούν την αρχή της Αβεβαιότητας και η ανάλυση/μοντελοποίηση της υφής υλοποιείται με την χρήση πολλών ζωνοπερατών φίλτρων. [1].

Όπως προαναφέρθηκε τα τεξτόνια είναι από τα θεμέλια στην αντίληψη της υφής. Συγκεκριμένα ο ορισμός αυτός προήλθε από τον ο Bela Julesz, ο οποίος εισήγαγε τα τεξτόνια. Σύμφωνα με αυτόν υπάρχουν δύο είδη όρασης, η στιγμιαία (preattentive) όραση και η προσεκτική (attentive). Η διαφορά στα δύο είδη όρασης έγκειται στο χρόνο που

δίνεται στον παρατηρητή να παρακολουθήσει τα δείγματα. Στη στιγμιαία όραση γίνεται παράλληλη,στιγμιαία εξέταση του δείγματος καλύπτοντας μεγάλο οπτικό πεδίο. Αντιθέτως στην προσεκτική όραση γίνεται σειριακή έρευνα, με προσοχή και με βήματα 50 msec σε περιορισμένο διάφραγμα. Βάση του Bela Julesz, η στιγμιαία όραση κατευθύνει την προσεκτική όραση σε θέσεις όπου υπάρχουν διαφορές στο είδος ή στον αριθμό των τεξτονίων αλλά αγνοεί τις σχέσεις μεταξύ των χωρικών τους θέσεων. Επειδή ήταν αναγκαία η ομαδοποίηση των τεξτονίων δημιουργήθηκαν 3 βασικές κατηγορίες, τα προσανατολισμένα Blobs στα οποία υπάγονται τα παραλληλόγραμμα, οι ελλείψεις, τα ευθύγραμμα τμήματα με συγκεκριμένα χρώματα, οι γωνιακές κατευθύνσεις, τα πάχη και τα μήκη, τα Terminators δηλαδή τα άκρα των ευθύγραμμων τμημάτων και τα Crossings ευθύγραμμων τμημάτων.

Η τμηματοποίηση μέσω της υφής μπορεί να επιτευχθεί γενικά μέσω της Maximum Likelihood μεθόδου, όπου πρέπει να εντοπιστεί ο κατάλληλος διαχωρισμός της εικόνας έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η πιθανότητα της μεθόδου. Μια άλλη μέθοδος τμηματοποίησης μέσω υφής, είναι η τμηματοποίηση με τη χρήση του Normalized Cut το οποίο προέρχεται από την θεωρία των γράφων. Σε αυτή την μέθοδο υπολογίζεται ένας πίνακας με βάρη από τις τοπικές πληροφορίες και βάση αυτού γίνεται διαχωρισμός των περιοχών, αντίστοιχος του διαχωρισμού των κόμβων του γράφου. Επειδή η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται από τα βάρη ,η ανανεωση των βαρών και η εκ νέου τμηματοποίηση της εικόνας θα επιφέρει πιο σωστά αποτελέσματα [10]. Για την επίτευξη της τμηματοποίησης έχουν δημιουργηθεί αλγόριθμοι που συνδιάζουν την υφή με άλλα δεδομένα (π.χ. χρώμα, φωτεινότητα) έτσι ώστε να πλησιάσουν πιο κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

2.2. Γενικές Μέθοδοι Επεξεργασίας Εικόνας

Για την επιτυχή τμηματοποίηση μιας εικόνας χρειάζονται διεργασίες πριν την εισαγωγή της σε ένα αλγόριθμο τμηματοποίησης (όπως τους προαναφερθέντες), καθώς και μετά την εξαγωγή της. Οι διεργασίες αυτές (π.χ. φιλτράρισμα, ενίσχυση της αντίθεσης, μορφολογική επεξεργασία), αποσκοπούν στην μείωση των σφαλμάτων του εκάστοτε αλγορίθμου και στη βελτίωση του αποτελέσματος.

2.2.1. Μορφολογικοί Τελεστές

Οι μορφολογικοί τελεστές επηρεάζουν το σχήμα, τη δομή ή την μορφή του αντικειμένου στο οποίο εφαρμόζονται. Αρχικά εφαρμόστηκαν σε δυαδικές εικόνες, αλλά στην συνέχεια επεκτάθηκαν και σε επιπέδου γκρι. Η επέκταση αυτή έγινε εφικτή όταν τα πραγματικά σήματα (κατ'επέκταση και οι επιπέδου γκρι εικόνες) θεωρήθηκαν ως ένα σύνολο κατωφλιοποιημένων σημάτων τα οποία αποκτούνται με την κατωφλιοποίηση του σήματος σε όλα τα πλάτη του. Έτσι η προέκταση των μορφολογικών τελεστών υλοποιείται αρχικά με την ανάλυση του σήματος σε όλα τα κατωφλιοποιημένα δυαδικά σήματα του, μετά γίνεται η εφαρμογή του τελεστή σε όλα και έπειτα γίνεται η σύνθεση του καινούργιου μορφοποιημένου σήματος με υπέρθεση όλων των μετατρεμένων δυαδικών σημάτων [1]. Αυτοί οι μορφολογικοί τελεστές ανήκουν στην οικογένεια των επιπέδων μορφολογικών τελεστών. Μια σημαντική ιδιότητα αυτής της οικογένειας τελεστών είναι ότι μπορούν να επεξεργαστούν και δυαδικά και πραγματικά σήματα.

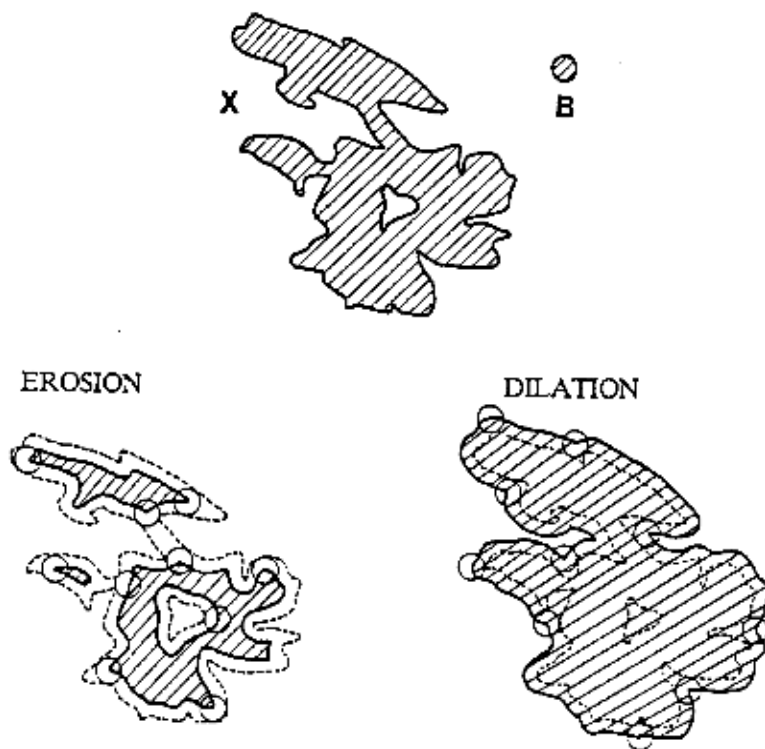
Στις μορφολογικές διεργασίες συνήθως υπάρχει ένα δομικό στοιχείο (structuring element) το οποίο εφαρμόζεται στην αρχική εικόνα και βάση αυτού οι τιμές των εικονοστοιχείων αλλάζουν ανάλογα με τις τιμές των γειτονικών εικονοστοιχείων. Από αυτό εξαρτάται ο βαθμός και η φύση της ομαλοποίησης. Συγκεκριμένα το δομικό στοιχείο είναι ένας πίνακας που περιέχει 0 και 1 οποιασδήποτε διάστασης. Γενικά το δομικό στοιχείο είναι απλού γεωμετρικού σχήματος και μεγέθους μικρότερου από το σχήμα το οποίο θα επεξεργαστεί. Υπάρχουν διάφορα σχήματα δομικών στοιχείων που μπορούν να εφαρμοστούν, τα πιο γνωστά είναι το τετράγωνο, ο σταυρός, ο δίσκος και η γραμμή. Οι μορφολογικοί τελεστές έχουν διάφορες εφαρμογές. Απλές εφαρμογές τους είναι το φιλτράρισμα, η ανίχνευση χαρακτηριστικών, η λέπτυνση, η ενίσχυση της αντίθεσης κ.α. Εφαρμογές πιο υψηλού επιπέδου είναι η τμηματοποίηση, η ανάλυση σχήματος και κίνησης, καθώς και η ανίχνευση αντικειμένων.

2.2.2. Διαστολή (Dilation)

Μαζί με τη συστολή (erosion) αποτελούν τα θεμέλια της μορφολογικής επεξεργασίας. Η διαστολή επεκτείνει τα αντικείμενα της εικόνας και παράλληλα κλείνει τις τύπες που υπάρχουν (Σχήμα 3.1). Γι'αυτό το λόγο είναι επεκτατικό φίλτρο. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι η διαστολή τοποθετεί το δομικό στοιχείο στην εικόνα και το μετακινεί μέσα σε αυτή με τρόπο παρόμοιο της συνελιξης [14]. Συγκεκριμένα η διαστολή προσθέτει εικονοστοιχεία στα περιγράμματα των αντικειμένων. Ο αριθμός των εικονοστοιχείων που προστίθενται εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του δομικού στοιχείου. Στους επίπεδους μορφολογικούς τελεστές η διαστολή ενός σήματος ορίζεται είτε ως το σημειακό supremum των μετατοπισμένων (προς τα εμπρός) εκδοχών του σήματος με όλα τα σημεία του δομικού στοιχείου, είτε ως κινούμενο supremum του σήματος μέσα στο κινούμενο αναποδογυρισμένο δομικό στοιχείο [1]. Στις επιπέδου γκρι εικόνες η διαστολή τοποθετεί το δομικό στοιχείο στο κάθε εικονοστοιχείο και η τιμή του προσδιορίζεται επιλέγοντας την μέγιστη τιμή της εικόνας από την περιοχή που ταυτίζεται με το δομικό στοιχείο.

2.2.3. Συστολή (Erosion)

Η συστολή είναι το δυαδικό συμπλήρωμα η διαστολή. Η διαδικασία που εκτελεί είναι παρόμοια με τη διαστολή, μόνο που αυτό αντί να επεκτείνει τα αντικείμενα της εικόνας, τα μικρώνει, κόβοντας παράλληλα της κορυφές των περιγραμμάτων των σχημάτων και γι'αυτό το λόγο είναι μη επεκτατικό φίλτρο (Σχήμα 3.1). Συγκεκριμένα η συστολή αφαιρεί εικονοστοιχεία από τα περιγράμματα των αντικειμένων. Ο αριθμός των εικονοστοιχείων που αφαιρούνται εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του δομικού στοιχείου. Αντίστοιχα με τη διαστολή, η συστολή στους επίπεδους μορφολογικούς τελεστές ορίζεται είτε ως το σημειακό infimum αντίθετα μετατοπισμένων εκδοχών του σήματος με όλα τα σημεία του δομικού στοιχείου, είτε ως το κινούμενο infimum του σήματος μέσα στο κινούμενο δομικό στοιχείο. Στις επιπέδου γκρι εικόνες η συστολή τοποθετεί το δομικό στοιχείο στο κάθε εικονοστοιχείο και η τιμή του προσδιορίζεται επιλέγοντας την ελάχιστη τιμή της εικόνας από την περιοχή που ταυτίζεται με το δομικό στοιχείο.



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα συστολής (erosion) και διαστολής (dilation)

Με τον συνδιασμό της διαστολής και της συστολής γίνεται η δημιουργία δύο βασικών μορφολογικών φίλτρων, του ανοίγματος και του κλεισίματος. Η εξομάλυνση που προκαλούν αυτά τα δύο μορφολογικά εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος του δομικού στοιχείου. Παρόλο που και τα δύο περιέχουν τη διαστολή και τη συστολή, τα αποτελέσματά που παράγουν είναι γενικά διαφορετικά.

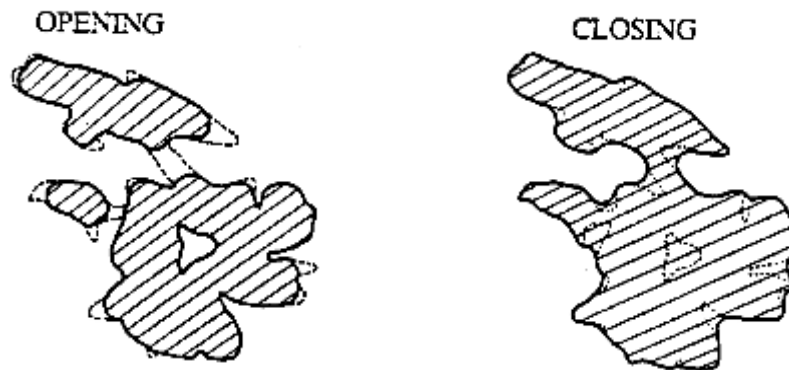
2.2.4. Ανοιγμα (Opening)

Με το να εφαρμοστεί διαστολή σε ένα σήμα το οποίο υπέστη ήδη συστολή δεν δίνει το αρχικό σήμα, αλλά ένα σήμα που φιλτραρίστηκε από το φίλτρο ανοίγματος. Με την χρήση των ορισμών που δόθηκαν πιο πάνω για τη διαστολή και τη συστολή, το άνοιγμα ορίζεται ως το supremum των κινούμενων infima. Το άνοιγμα κόβει τις κορυφές του σήματος όπου δεν μπορούν να περιέχουν το δομικό στοιχείο, αντίστοιχα με την εφαρμογή του σε σχήμα εξομαλύνει τα ακρωτήρια του περιγράμματος του σχήματος και εξαλείφει τις μικρές προεξοχές (Σχήμα 3.2). Επίσης ανήκει στα μη επεκτατικά φίλτρα.

2.2.5. Κλείσιμο (Closing)

Με το να αλλάξει η σειρά εφαρμογής της διαστολής και της συστολής, δηλαδή να εφαρμοστεί συστολή σε ένα σήμα που υπέστη ήδη διαστολή, αυτό δίνει το μορφολογικό φίλτρο κλεισίματος. Βάση των ορισμών της διαστολής και της συστολής, το κλείσιμο ορίζεται ως το infimum των κινούμενων suprema. Το κλείσιμο γεμίζει τις κοιλάδες του

σήματος στο οποίο δεν “χωράει” το δομικό στοιχείο και αντίστοιχα με την εφαρμογή του σε σχήμα κλείνει τους κόλπους του περιγράμματος και να γεμίζει τις τρύπες που έχει το σχήμα (Σχήμα 3.2). Επίσης ανήκει στα επεκτατικά φίλτρα.



Σχήμα 3.2: Παράδειγμα εφαρμογής ανοίγματος (opening) και κλεισίματος (closing)

2.2.6. Μορφολογική κλίση

Με την χρήση της διαστολής και της συστολής μπορούν να δημιουργηθούν διάφορες άλλες μορφολογικές εργασίες εκτός από το άνοιγμα και το κλείσιμο. Μια από αυτές είναι η μορφολογική κλίση. Η μορφολογική κλίση μιας εικόνας, υπολογίζεται από την αφαίρεση της διαστολής της εικόνας με τη συστολή της. Αυτό είναι εφικτό λόγω του ότι η διαστολή αυξάνει το πάχος κάποιων περιοχών της εικόνας ενώ η συστολή το μειώνει. Έτσι με την αφαίρεση των δύο γίνεται υπερτονισμός των περιγραμμάτων ανάμεσα στις περιοχές και άρα ενίσχυση των ακμών. Το αποτέλεσμα αυτό μοιάζει να έχει δημιουργηθεί από την χρήση της πρώτης παραγωγού στην εικόνα και έτσι ονομάστηκε μορφολογική κλίση [17].

2.2.7. Top-Hat

Ο μετασχηματισμός αυτός χρησιμοποιείται στην επεξεργασία της εικόνας για την εξαγωγή χαρακτηριστικών της. Επίσης χρησιμοποιείται στην εξίσωση του φόντου, στην ενίσχυση της αντίθεσης της εικόνας, στην απομάκρυνση αντικειμένων από μια εικόνα κ.α. Στον Top-Hat μετασχηματισμό γίνεται είτε η αφαίρεση του αρχικού σήματος με το άνοιγμα του εαυτού του, το οποίο ονομάζεται και ως white Top-Hat transform, ή η αφαίρεση του κλεισίματος του σήματος με το αρχικό σήμα, το οποίο ονομάζεται και ως black Top-Hat ή bottom-hat transform. Με τον πρώτο τρόπο λαμβάνονται ως αποτελέσματα της επεξεργασίας, οι κορυφές του σήματος που δεν μπορούν να περιέχουν το δομικό στοιχείο. Λόγω του ότι το αρχικό σήμα είναι πάντα μεγαλύτερο ή ίσο του ανοίγματός του, αυτό εγκυάται ότι θα έχει τις κορυφές του σήματος με κατάλληλη επιλογή του δομικού στοιχείου. Παρόμοια με τον δεύτερο τρόπο λαμβάνονται ως αποτελέσματα της επεξεργασίας οι κοιλάδες του σήματος όπου δεν “χωράει” το δομικό στοιχείο και λόγω του ότι το κλείσιμο ενός σήματος είναι πάντα μεγαλύτερο ή ίσο του σήματος, αυτό εγκυάται ότι με αυτό τον τρόπο (μέσω κατάλληλης επιλογής του δομικού στοιχείου) μπορούν να ληφθούν οι κοιλάδες του σήματος.

2.2.8. Μετασχηματισμός Απόστασης

Χρησιμοποιείται σε δυαδικές εικόνες κυρίως για να ξεχωρίσει τα αντικείμενα της εικόνας από το background της. Υπάρχουν δύο είδη, ο εξωτερικός μετασχηματισμός απόστασης (Outer Distance Transform) και ο εσωτερικός μετασχηματισμός απόστασης (Inner Distance Transform). Στον εξωτερικό μετασχηματισμό απόστασης γίνονται διαστολές του περιγράμματος του σχήματος σε διάφορες κλίμακες δίσκων, αυτό εναλλαχτικά μπορεί κανείς να το δει ως την δημιουργία κυμάτων που απορρέουν προς το υπόβαθρο. Στον εσωτερικό μετασχηματισμό απόστασης γίνονται συστολές του περιγράμματος του σχήματος, έτσι ώστε να μπορεί κανείς να μετρήσει τις αποστάσεις των σημείων του σχήματος από το υπόβαθρο. Ο μετασχηματισμός απόστασης έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην ανάλυση της εικόνας και στην όραση υπολογιστών. Εφαρμογές του μετασχηματισμού απόστασης περιλαμβάνουν εξομάλυνση, σκελετοποίηση, κατάτμηση, περιγραφή σχημάτων, ανίχνευση και αναγνώριση αντικειμένων κ.α. Ο μετασχηματισμός απόστασης είναι ένας συμπαγής τρόπος παρουσίασης πολυκλιμακωτών διαστολών και συστολών από κυρτά δομικά στοιχεία των οποίων το σχήμα εξαρτάται από την νόρμα που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της απόστασης. Η πιο γνωστή μέθοδος που χρησιμοποιείται στο μετασχηματισμό απόστασης είναι η Ευκλείδεια (euclidean) απόσταση. Άλλες μέθοδοι είναι ο cityblock μετασχηματισμός απόστασης, ο chessboard μετασχηματισμός απόστασης και ο quasi-euclidean μετασχηματισμός απόστασης.

2.2.9. Morphological Reconstruction

Η μορφολογική ανακατασκευή (morphological reconstruction) της εικόνας ανήκει στους τελεστές της εικόνας που ονομάζονται γεωδειακοί (geodesic), λόγω της στενής σύνδεσης που υπάρχει με τη γεωδειακή διαστολή και γεωδειακή συστολή. Είναι ένας χρήσιμος και ισχυρός μορφολογικός μετασχηματισμός που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τα σχήματα που υπάρχουν σε μια εικόνα. Η μορφολογική ανακατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή σημαδεμένων περιοχών, για την εύρεση φωτεινών περιοχών που περιτριγυρίζονται από σκοτεινά εικονοστοιχεία, για την απομάκρυνση αντικειμένων από το περίγραμμα της εικόνας, για να γεμίσει τρύπες μέσα στα αντικείμενα και για πολλές άλλες διαδικασίες. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει δύο εικόνες και ένα δομικό στοιχείο, σε αντίθεση με άλλες μορφολογικές μεθόδους που περιλαμβάνουν μια εικόνα και ένα δομικό στοιχείο. Συγκεκριμένα η μορφολογική ανακατασκευή εικόνας επεξεργάζεται μια εικόνα που ονομάζεται Marker (εικόνα σήμανσης ή σημαδευτής), βάση των χαρακτηριστικών μιας άλλης εικόνας που ονομάζεται Mask (μάσκα). Ο σημαδευτής βασικά περιέχει τα σημεία εκκίνησης του μετασχηματισμού και η μάσκα τους περιορισμούς του μετασχηματισμού, ενώ το δομικό στοιχείο καθορίζει την συνδετικότητα που υπάρχει. Υπάρχουν δύο είδη ανακατασκευής, το άνοιγμα ανακατασκευής και το κλείσιμο ανακατασκευής, αλλά το πιο διαδεδομένο και αυτό που θα αναλυθεί πιο κάτω είναι το άνοιγμα ανακατασκευής.

Άνοιγμα Ανακατασκευής (Reconstruction opening):

Ανήκει στα δυκτιακό άνοιγμα (lattice opening) γιατί είναι αυξάνον, μη επεκτατικό και ταυτοδύναμο. Στο άνοιγμα ανακατασκευής οι κορυφές στην εικόνα του σημαδευτή υποδεικνύουν τις τοποθεσίες όπου θα αρχίσει η διαδικασία της ανακατασκευής και οι κορυφές αυτές αρχίζουν να διαστελλονται ενώ ταυτόχρονα εξαναγκάζονται να παραμένουν μέσα στο επιλεγμένο σχήμα της μάσκας [15]. Είναι γνωστή μέθοδος ειδικά στις δυαδικές εικόνες όπου γίνεται εξαγωγή των αντικειμένων τα οποία μαρκάρονται. Έτσι εισάγεται ο σημαδευτής, ο οποίος μπορεί να αποτελείται από ένα σημείο ή από χαρακτηριστικά σύνολα που υπάρχουν μόνο μέσα στο επιθυμητό αντικείμενο και η μάσκα, η οποία είναι η εικόνα αναφοράς (ή σύνδεση συνεχτικών συνειστώσεων) και λαμβάνονται στην έξοδό του μόνο οι συνειστώσεις που τέμνονται από τον σημαδευτή. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής που την κάνει ιδιαίτερη είναι ότι μπορεί να δώσει μεγάλες συνειστώσεις στην έξοδό της μόνο από την γνώση μιας μικρής περιοχής μέσα σε αυτές. Κεντρική θέση για την δημιουργία του ανοίγματος ανακατασκευής κατέχει η γεωδεδισιακή διαστολή, γνωστή και ως διαστολή υπό συνθήκη (conditional dilation), όπου σε αυτή γίνεται διαστολή του σημαδευτή ακολουθούμενη από την τομή του με τη μάσκα για να εξασφαλίζεται ότι η επέκταση του σημαδευτή γίνεται μέσα στους επιθυμητούς περιορισμούς. Με την συνεχή επανάληψη της διαστολής υπό συνθήκης στο όριο της αποκτάται το άνοιγμα ανακατασκευής [16].

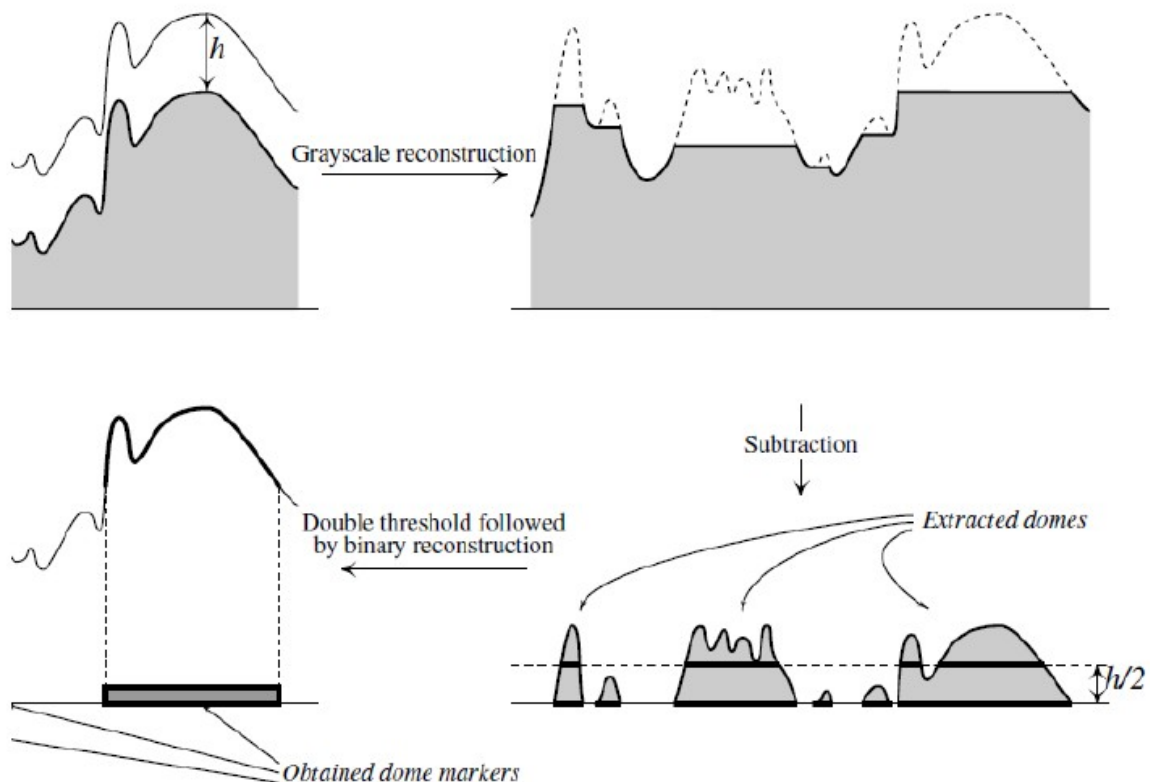
Για την επέκταση του ανοίγματος ανακατασκευής από δυαδικές (binary) εικόνες σε επιπέδου γκρι (gray-scale) εικόνες γίνεται απλά η χρήση της επιπέδου γκρι διαστολής υπό συνθήκη. Όπως στο δυαδικό άνοιγμα ανακατασκευής γίνεται εξαγωγή των συνειστώσεων που είναι μαρκαρισμένες, έτσι στο επιπέδου γκρι άνοιγμα ανακατασκευής γίνεται εξαγωγή των κορυφών της μάσκας που είναι μαρκαρισμένες. Βασικά το επιπέδου γκρι άνοιγμα ανακατασκευής ανακατασκευάζει τις φωτεινές περιοχές της μάσκας που περιέχουν τον σημαδευτή. Το άνοιγμα ανακατασκευής γενικά εξαρτάται από την επιλογή του σημαδευτή. Γενικά υπάρχουν δύο κατηγορίες σημαδευτών, (i) οι βασισμένοι στο μέγεθος (size-based) σημαδευτές, όπου ο σημαδευτής είναι συστολή της μάσκας με ένα δομικό στοιχείο (συνήθως δίσκος) και (ii) οι βασισμένοι στην αντίθεση (contrast-based) σημαδευτές, όπου ο σημαδευτής επιλέγεται ως η διαφορά μιας σταθεράς από την μάσκα. Στους βασισμένους στο μέγεθος σημαδευτές παραμένουν τα αντικείμενα που έχουν οριζόντιο μήκος μεγαλύτερο από το πλάτος του δομικού στοιχείου π.χ. ακτίνα του δίσκου, ενώ στους βασισμένους στην αντίθεση σημαδευτές οι κορυφές που ξεπερνούν την σταθερά κόβονται, μετά το άνοιγμα ανακατασκευής [1].

Το άνοιγμα ανακατασκευής και το κλείσιμο ανακατασκευής αποδείχτηκαν να είναι πολύ χρήσιμα, ειδικά στην απλοποίηση της εικόνας επειδή μπορούν να αφαιρέσουν μικρά μέρη της χωρίς να επηρεάσουν τα μεγάλα αντικείμενα της. Έχουν δημιουργηθεί διάφορες εφαρμογές της μορφολογικής ανακατασκευής της εικόνας οι οποίες χαρακτηρίζονται από την επιλογή του σημαδευτή και της μάσκας. Μερικές από αυτές είναι:

(i) Φιλτράρισμα με opening-reconstruction: Μέσω της ανακατασκευής μπορούν να φιλτραριστούν οι δυαδικές εικόνες, έτσι ώστε να φεύγουν οι περιοχές που δεν χωράνε το

δομικό στοιχείο που επιλέγεται, ενώ ταυτόχρονα οι υπόλοιπες να παραμένουν άθικτες. Αυτό μπορεί να γίνει εφικτό αν ανακατασκευαστεί η εικόνα επιλέγοντας το άνοιγμά της με ένα δομικό στοιχείο ως σημαδευτή.

(ii) Εξαγωγή Δομών/Λεκάνων (Dome/Basin): Για την εξαγωγή κορυφών ενός σήματος που έχουν ύψος μεγαλύτερο μιας σταθεράς χρησιμοποιείται το άνοιγμα ανακατασκευής. Η διαδικασία για να ληφθούν αυτές οι κορυφές, οι οποίες ονομάζονται δομές (domes), είναι ότι αρχικά λαμβάνεται ως σημαδευτής η εικόνα αφαιρεμένη κατά μια σταθερά, έπειτα γίνεται το άνοιγμα ανακατασκευής της, όπου λαμβάνει ένα σήμα με κοιλάδες και οροπέδια (αφου ο σημαδευτής περιορίζεται να μην ξεπεράσει την σταθερά) και τέλος την ανακατασκευασμένη (με αυτή την μέθοδο) εικόνα, την αφαιρεί από την αρχική της και έχει στη έξοδο ένα σήμα με τις δομές (Σχήμα 3.3). Αυτή η μέθοδος εξαγωγής κορυφών είναι σαφώς καλύτερη από τις κορυφές που αποκτώνται αφαιρώντας ένα σήμα με το άνοιγμά του (Top-Hat), γιατί λαμβάνονται οι κορυφές χωρίς να εφαρμόζεται κανένα κριτήριο μεγέθους ή σχήματος και οι κορυφές εξάγονται βάση του ύψους τους και όχι αν δεν μπορούν να περιέχουν το επιλεγμένο δομικό στοιχείο [16]. Συνεπώς τα αποτελέσματα με αυτή την μέθοδο είναι καλύτερα από αυτά της μεθόδου Top-Hat. Αντίστοιχα για την εξαγωγή των κοιλάδων του σήματος ορισμένου ύψους χρησιμοποιείται το κλείσιμο ανακατασκευής. Η διαδικασία είναι η αντίστοιχη των δομών, δηλαδή η εικόνα προστίθεται με μια σταθερα, η νέα εικόνα λαμβάνεται ως σημαδευτής και γίνεται το κλείσιμο ανακατασκευής της. Έπειτα γίνεται αφαίρεση της ανακατασκευασμένης εικόνας με την αρχική, όπου λαμβάνονται στη έξοδό της οι λεκάνες (basins) της εικόνας.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα εξαγωγή δομών μιας εικόνας

(iii) Watershed segmentation: Οι δομές και οι λεκάνες που προαναφέρθηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημαδευτές για την watershed διαδικασία. Συγκεκριμένα η

ανακατασκευή της εικόνας χρησιμοποιείται για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της υπερκατάτμησης που υπάρχει στο watershed, στο στάδιο της αλλαγής της ομοιοπίας της εικόνας, όπου βάση αυτής γίνεται εύρεση των Εσωτερικών Σημαδευτών (Inside Markers).

(iv) Alternative Sequential Filters (ASF): Ανήκουν στα μη γραμμικά φίλτρα εξομάλυνσης, όπου η εξομάλυνση γίνεται σταδιακά από την μικρότερη κλιμακα του δομικού στοιχείου μέχρι την μεγαλύτερη. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι ότι καταστέλουν επιτυχώς τον θόρυβο και αυτό γίνεται χωρίς να επιρρεάζουν τα περιγράμματα των αντικειμένων της εικόνας. Τα ASF φίλτρα αποτελούνται από διαδοχικά ανοίγματα ανακατασκευής και κλεισίματα ανακατασκευής. Ως σημαδευτής χρησιμοποιείται η συστολή της εικόνας αναφοράς του κάθε βήματος από ένα δομικό στοιχείο, το οποίο κλιμακώνεται σε κάθε στάδιο του φίλτρου. Ως μάσκα χρησιμοποιείται η ίδια η εικόνα στο πρώτο στάδιο και ακολούθως λαμβάνονται τα φιλτραρίσματα που υπέστη η εικόνα, στο αμέσως προηγούμενο βήμα. Αυτά τα φίλτρα δεν αφαιρούν συχνότητες ή σχήματα (όπως κάνουν τα γραμμικά φίλτρα και τα median φίλτρα αντίστοιχα) αλλά αυτό που κάνουν είναι να αφαιρούν και να συνδέουν επίπεδες ζώνες (flat zones). Για παράδειγμα το άνοιγμα ανακατασκευής αφαιρεί φωτεινές περιοχές της εικόνας που είναι μικρότερες του δομικού στοιχείου και την κάνει πιο ομοιόμορφη. Αντίστοιχα το κλείσιμο ανακατασκευής αφαιρεί σκοτεινές περιοχές μικρότερες του δομικού στοιχείου, κάνοντας έτσι το background πιο ομοιόμορφο [1].

2.2.10. Φίλτρο Μέσου Ορου

Υπάρχουν τέσσερα είδη φίλτρων Μέσου Ορου. Το φίλτρο του αριθμητικού μέσου, το φίλτρο του γεωμετρικού μέσου, το φίλτρο του αρμονικού μέσου και το φίλτρο του αντι-αρμονικού μέσου όρου. Το πιο γνωστό και πιο απλό από τα τέσσερα, είναι το φίλτρο του αριθμητικού μέσου. Σε αυτό το φίλτρο η τιμή του κάθε εικονοστοιχείου είναι η μέση τιμή της γειτονίας του εικονοστοιχείου (τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται μέσα σε ένα γνωστό παράθυρο). Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα αν δημιουργηθεί ένα χωρικό φίλτρο διαστάσεων $n \times m$ (n και m περιττοί αριθμοί) του οποίου όλα τα στοιχεία του είναι $1/nm$. Το αποτέλεσμα αυτού του φίλτρου είναι η καταστολή του θορύβου μέσω της θόλωσης της εικόνας [17].

2.2.11. Median Φίλτρο

Το median φίλτρο ανήκει στα μη γραμμικά φίλτρα και χρησιμοποιείται για την καταστολή του θορύβου κατά την προεπεξεργασία της εικόνας. Προτιμάται η χρήση του στις εικόνες, λόγω του ότι διατηρεί τις ακμές των σχημάτων μετά το φιλτράρισμα της εικόνας. Μπορεί να εξαλήψει με επιτυχία ειδικά τον “salt and pepper” θόρυβο (θόρυβος που αποτελείται από μέγιστες και ελάχιστες τιμές φωτεινότητας). Χρησιμοποιεί ένα παράθυρο και υπολογίζει την τιμή του εκάστοτε εικονοστοιχείου σύμφωνα με τις τιμές των γειτονικών του. Βασικά η νέα τιμή του εικονοστοιχείου είναι η τιμή του εικονοστοιχείου που βρίσκεται στο μέσο, αν όλες οι τιμές τοποθετηθούν κατά αυξουσα σειρά. Γι'αυτό τον λόγο το παράθυρο συνίσταται να έχει περιττό αριθμό καταχωρήσεων. Το median ισοδυναμεί με τον συνδιασμό του ανοίγματος και του κλεισίματος, χρησιμοποιώντας δομικό στοιχείο μισού μεγέθους από το παράθυρο που χρησιμοποιείται στο median [1].

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογίες Προσέγγισης Τμηματοποίησης Ιατρικών Δεδομένων

3.1. Εισαγωγή

Η κεντρική ιδέα αυτού του κεφαλαίου είναι η περεταίρω ανάπτυξη στην υλοποίηση και στον τρόπο λειτουργίας των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για την τμηματοποίηση ιατρικών δεδομένων. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στην κατωφλίωση, στην ανίχνευση ακμών, στην watershed κατάτμηση, στην κατάτμηση με υφή και στα Snakes. Επίσης αναλυεται η διαδικασία που ακολουθεί η κάθε μεθοδολογία και γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους. Τέλος αναλύεται ο τρόπος που αναπτύχθηκε ο τελικός αλγόριθμος τμηματοποίησης καθώς και η σταδιακή υλοποίησή του.

3.2. Προϋποθέσεις για τμηματοποίηση

Όλες οι μεθοδολογίες θα αναπτυχθούν πιο κάτω έχουν ως στόχο την υλοποίηση ενός βέλτιστου αλγόριθμου ο οποίος να έχει τα εξής γνωρίσματα:

- (1) Ακρίβεια: Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου πρέπει να είναι όσο πιο καλύτερα και κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα γίνεται και να εφαρμόζεται με επιτυχία σε όλα τα δεδομένα.
- (2) Αυτοματοποίηση: Ο αλγόριθμος πρέπει να δέχεται όσο το δυνατό πιο λίγες παραμέτρους, για να είναι εύκολη η χρήση του από χρήστες που δεν είναι γνώστες του αντικειμένου. Άρα είναι αναγκαία η εύρεση τρόπων αυτοματοποίησης όσο περισσότερων παραμέτρων γίνεται.
- (3) Ευστάθεια: Ο αλγόριθμος πρέπει να δίνει τα ίδια αποτελέσματα όσες φορές και να χρησιμοποιηθεί στην ίδια εικόνα και όχι κάθε φορά που χρησιμοποιείται να δίνει διαφορετικό αποτέλεσμα.

3.3. Τεχνική Προσέγγιση

Ο βασικότερος στόχος της τμηματοποίησης είναι η επιτυχής εξαγωγή χρήσιμης πληροφορίας από μια εικόνα. Αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κεφάλαιο της ιατρικής απεικόνισης γιατί μέσω αυτής μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη απεικόνιση των περιοχών, να δοθεί περισσότερη έμφαση σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της εικόνας και να χρησιμοποιηθούν διάφοροι μετασχηματισμοί για την καλύτερη παρουσίαση του επιθυμητού αντικειμένου. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας εφαρμόστηκαν αρχικά τέσσερις διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις για την τμηματοποίηση ιατρικών δεδομένων. Η κατωφλίωση δεν εφαρμόζεται ως ξεχωριστή μεθοδος τμηματοποίησης, αλλά επεξηγείται ο τρόπος λειτουργίας της γιατί υπάρχει μέσα σε όλες τις άλλες μεθόδους. Άρα οι μέθοδοι που εφαρμόζοστηκαν είναι:

- 1) Κατωφλίωση
- 2) Τμηματοποίηση μέσω Ανίχνευσης Ακμών
- 3) Τμηματοποίηση μέσω Υφής
- 4) Τμηματοποίηση μέσω Watershed
- 5) Τμηματοποίηση μέσω Snake

Όλες οι μεθοδολογίες (εκτός η κατάτμηση με υφή) έχουν το ίδιο αρχικό στάδιο. Την ενίσχυση της αντίθεσης της εικόνας και την εξομάλυνσή της.

Η ενίσχυση της αντίθεσης γίνεται μέσω των Top-Hat και Bottom-Hat μετασχηματισμών σύμφωνα με την εξής εξίσωση:

$$\text{ench}(f) = (\text{tophat}(f) + f) - \text{bottomhat}(f) \quad (3.1)$$

$$\text{όπου } \text{tophat}(f) = f - f \circ B \quad (3.2)$$

$$\text{bottomhat}(f) = f \bullet B - f \quad (3.3)$$

Η εξομάλυνση μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση διάφορων φίλτρων όπως το φίλτρο μέσου όρου, το median φίλτρο, το Gaussian φίλτρο και το ASF φίλτρο. Το στάδιο της

εξομάλυνσης είναι πολύ σημαντικό γιατί από αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα του αλγορίθμου.

Το επιθυμητό φίλτρο πρέπει να τηρεί τα εξής:

- Να καταστέλει σε ικανοποιητικό βαθμό τον θόρυβο.
- Να μην θολώνει πάρα πολύ την εικόνα.
- Να απλοποιεί την εικόνα όσο καλύτερα γίνεται.
- Να μην επηρεάζει τα περιγράμματα των αντικειμένων της εικόνας.

Το φίλτρο που ικανοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό τις πιο πάνω απαιτήσεις είναι το ASF φίλτρο και γι' αυτό και χρησιμοποιείται και στις μεθόδους τμηματοποίησης, καθώς και στον τελικό αλγόριθμο τμηματοποίησης.

3.4. Μέθοδος Κατωφλίωσης

Η κατωφλίωση αποτελεί μια από τις βασικότερες τεχνικές τμηματοποίησης και είναι ιδιαίτερα σημαντική στην επεξεργασία και ανάλυση εικόνων. Η κατωφλίωση μπορεί να γίνει συγκρίνοντας κάποιες ιδιότητες της εικόνας όπως χρωματική πυκνότητα, υφή κ.α. Υπάρχουν δύο βασικά είδη: η ολική κατωφλίωση και η τοπική (ή προσαρμοζόμενη) κατωφλίωση. Στην ολική κατωφλίωση χρησιμοποιείται σταθερό κατώφλι για όλη την εικόνα (σχέση (3.4)) και για να έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα πρέπει οι κατανομές της έντασης των αντικειμένων και του υπόβαθρου να είναι διακριτές σε μεγάλο βαθμό, πράγμα που στις περισσότερες εικόνες δεν ισχύει. Στην τοπική κατωφλίωση η τιμή του κατωφλίου εξαρτάται από τις τοπικές ιδιότητες της εικόνας (σχέση (3.5)). Συνήθως μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για αυτού του είδους κατωφλίωσης, είναι ο υπολογισμός του κατωφλίου σε κάθε εικονοστοιχείο βάση των ιδιοτήτων της γειτονίας του. Η τοπική κατωφλίωση εφαρμόζεται όταν το επίπεδο της πυκνότητας του υπόβαθρου δεν είναι σταθερό και τα αντικείμενα παρουσιάζουν μεταβολές μέσα στην εικόνα [18]. Κατά την κατωφλίωση συνήθως γίνεται ανάλυση του ιστογράμματος της εικόνας για την επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου και τα στοιχεία της εικόνας κατατάσσονται σε 0 και 1, δημιουργώντας έτσι μια δυαδική εικόνα. Όπως έγινε κατανοητό και προηγουμένος η επιτυχία της κατωφλίωσης εξαρτάται εξ' ολοκλήρου από την επιλογή του κατωφλίου.

$$\text{Ολική Κατωφλίωση:} \quad g(x,y) = \begin{cases} 1, & f(x,y) > t \\ 0, & f(x,y) \leq t \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\text{Τοπική Κατωφλίωση:} \quad g(x,y) = \begin{cases} 1, & f(x,y) > t_{xy} \\ 0, & f(x,y) \leq t_{xy} \end{cases} \quad (3.5)$$

Μια πιο γενική μορφή της ολικής καταφλίσωσης είναι η χρήση πολλαπλών καταφλίσων. Για παράδειγμα, για να εξαχθούν τα αντικείμενα της εικόνας που η έντασή τους ανήκει σε ένα ευρος τιμών $[T1, T2]$, χρησιμοποιείται η διπλή καταφλίσωση:

$$g(x,y) = \begin{cases} 0, & f(x,y) < T1 \\ 1, & T1 \leq f(x,y) \leq T2 \\ 0, & f(x,y) > T2 \end{cases} \quad (3.6)$$

3.5. Μέθοδος Ανίχνευσης Ακμών

Όπως προαναφέρθηκε, για την επιτυχημένη ανίχνευση ακμών υπάρχουν τρία στάδια. Η ομαλοποίηση, η παραγωγή και ο εντοπισμός των ακμών. Η ομαλοποίηση είναι πολύ σημαντικό στάδιο για την ανίχνευση ακμών, γιατί αν δεν απομακρυνθεί ο θόρυβος από την εικόνα θα ενισχυθεί από τη παραγωγή που ακολουθεί μετά και θα αλλοιώσει περισσότερο την εικόνα, καθιστώντας έτσι ακόμη πιο δύσκολη την ανίχνευση των ακμών. Επίσης μπορεί να είναι είτε γραμμική (π.χ. Gaussian) ή μη γραμμική (π.χ. μορφολογική). Για την καταστολή του θορύβου (ιδικά στη γραμμική παραγωγή) συνήθως χρησιμοποιείται η Gaussian συνάρτηση η οποία συνελίσσεται με την εικόνα:

$$G(x,y) = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3.7)$$

$$f_{\sigma} = f * G(x,y) \quad (3.8)$$

(Η ομαλοποίηση της εικόνας μπορεί να επιτευχθεί και με την χρήση άλλων φίλτρων όπως τα ASF, median, μέσου όρου κ.α.)

Στο επόμενο στάδιο πρέπει να γίνει η παραγωγή στην οποία υπολογίζεται είτε η 1η ή η 2η παράγωγος της εικόνας, για να ενισχυθούν οι ακμές της και κατόπιν γίνεται ο εντοπισμός τους. Δηλαδή πρόκειται για μια τοπική διαδικασία που εξάγει από την εικόνα όλα τα πιθανά σημεία που αποτελούν πιθανούς υπονηφίους για να επιλεγούν ως σημεία ακμών. Η απόφαση (που γίνεται στο τελικό στάδιο) αν ένα σημείο είναι σημείο ακμής, αλλάζει ανάλογα με τον κάθε αλγόριθμο που χρησιμοποιείται. Γενικά ισχύει ότι αν έγινε η χρήση της 1ης παραγώγου τότε οι ακμές βρίσκονται στα σημεία όπου υπάρχουν θετικές και αρνητικές κορυφές της, ενώ αν έγινε χρήση της 2ης παραγώγου τότε οι ακμές βρίσκονται στα σημεία όπου υπάρχουν zero-crossings σε αυτήν. Η κλίση μιας εικόνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί η ισχύς και η διεύθυνση μιας ακμής, γιατί δείχνει πάντα προς τη διεύθυνση του μεγαλύτερου ρυθμού μεταβολής της εικόνας, στην οποία συνήθως υπάρχουν ακμές. Όπως και στην ομαλοποίηση, η παραγωγή μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική.

1) Γραμμική παραγωγή: Στη γραμμική παραγωγή υπάρχουν γραμμικές συνελίξεις, πράγμα που δίνει την δυνατότητα (μέσω της αντιμεταθετικής και της επιμεριστικής ιδιότητας), η ομαλοποίηση και η παραγωγή να πραγματοποιούνται σε ένα στάδιο αντί σε

δύο. Αυτό γίνεται εφικτό με συνέλιξη της εικόνας με την παράγωγο του πυρήνα ομαλοποίησης. Οι πρώτοι τελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση ακμών και εφαρμόζουν την 1η παράγωγο για να ενισχύσουν τις ακμές της εικόνας, είναι οι τελεστές Roberts, Prewitt και Sobel. Η βασική ιδέα της χρήσης τους ήταν να χρησιμοποιήσουν διακριτές προσεγγίσεις για τις γραμμικές μερικές παραγώγους της εικόνας με την συνέλιξη της εικόνας με μάσκες ενίσχυσης ακμής. Ακολούθως παρουσιάζονται οι μάσκες των τριών τελεστών:

$$\text{Roberts:} \quad \begin{array}{cc} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{array} \quad \begin{array}{cc} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{array} \quad (3.9)$$

$$\text{Prewitt:} \quad \begin{array}{ccc} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \quad \begin{array}{ccc} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{array} \quad (3.10)$$

$$\text{Sobel:} \quad \begin{array}{ccc} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{array} \quad \begin{array}{ccc} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{array} \quad (3.11)$$

Ο Roberts τελεστής έχει το μειονέκτημα ότι χρησιμοποιεί 2x2 μάσκες, οι οποίες δεν θεωρούνται τόσο χρήσιμες για τον υπολογισμό διευθύνσεων των ακμών, όσο οι 3x3 μάσκες των άλλων τελεστών. Επίσης η Sobel μέθοδος υπερτερεί από την Prewitt λόγω του ότι χρησιμοποιεί τιμή βάρους ίση με 2 για την κεντρική θέση, πράγμα που δίνει στην Sobel μέθοδο και την δυνατότητα εξομάλυνσης της εικόνας. Παρατηρείται ότι το άθροισμα των συντελεστών όλων των μασκών έχει τιμή ίση με μηδέν, έτσι ώστε να δίνουν μηδενική απόκριση σε περιοχές της εικόνας με σταθερή ένταση [17].

Πιο προχωρημένες τεχνικές που λαμβάνουν υπ'όψη τον θόρυβο και τη φύση των ακμών είναι η LoG και η Canny μέθοδος. Η LoG μέθοδος μπορεί να υπολογιστεί είτε με την συνέλιξη της εικόνας με την Gaussian συνάρτηση και έπειτα με τον λαπλασιανό τελεστή ή με την απευθείας συνέλιξη με την λαπλασιανή της Gaussian (LoG):

$$\text{LoG} = \nabla^2 (G * f) = (\nabla^2 G) * f = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} * \left(2 - \frac{(x^2+y^2)}{\sigma^2}\right) / 2\pi\sigma^4 \quad (3.12)$$

Ο LoG τελεστής χρησιμοποιεί τη συνάρτηση Gauss η οποία προκαλεί θόλωση της εικόνας με συνέπεια την ελάττωση του θορύβου, είναι εξαρτημένη από την κλίμακα μέσω του σ και είναι ομαλή στο πεδίο του χώρου και της συχνότητας. Επίσης εφαρμόζει τη λαπλασιανή, η οποία είναι ισότροπη και άρα ανταποκρίνεται σε μεταβολές της έντασης σε κάθε διεύθυνση της μάσκας.

Η μέθοδος του Canny υπερτερεί σε σχέση με τις άλλες μεθόδους γιατί προσπαθεί να υλοποιήσει τρεις στόχους. Να εντοπίσει ακμές που είναι όσο πιο κοντά γίνεται στις πραγματικές (δηλαδή μείωση σφαλμάτων), οι ακμές που εντοπίζονται να έχουν ελάχιστη απόσταση από τις πραγματικές και να επιστρέφει μόνο ένα σημείο για το κάθε σημείο της πραγματική ακμής. Γενικά η όλη μέθοδος αποτελείται από τρία στάδια. Αρχικά γίνεται εξομάλυνση της εικόνας με την συνάρτηση Gauss, ακολούθως εντοπίζονται τα zero-crossings της 2ης κατευθυντήριας παραγώγου στην κατεύθυνση της κλίσης (αφού όπως προαναφέρθηκε οι ακμές εντοπίζονται πάνω στην κατεύθυνση της κλίσης) και τέλος από τα zero-crossings που εντοπίστηκαν επιλέγονται ως ακμές όσα είναι συνδεδεμένα (δηλαδή γίνεται ανάλυση συνδεσιμότητας) και η “δύναμη” της ακμής τους περνά από την διπλή κατωφλίωση [1]. Έτσι (όπως αναφέρθηκε και στο Κεφ.2), η μέθοδος του Canny ξεγελιέται πιο δύσκολα από την ύπαρξη θορύβου

2) Μη-Γραμμική παραγωγή: Στη μη γραμμική παραγωγή γίνεται κυρίως χρήση μορφολογικών τελεστών. Βασικά με τον συνδιασμό της διαστολής και της συστολής έχουν δημιουργηθεί αρκετοί τελεστές ακμής. Ο πιο γνωστός από αυτούς υλοποιείται με την αφαίρεση της διαστολής της εικόνας με τη συστολή της, δηλαδή:

$$\text{edge}(f) = (f \oplus B) - (f \ominus B) \quad (3.13)$$

Αυτός ο τελεστής συμπεριφέρεται συμμετρικά στην εικόνα και στο υπόβαθρό της. Ακόμη ένας τελεστής ακμής ο οποίος συμπεριφέρεται σαν μη γραμμικό Laplacian (γι'αυτό και πήρε αυτή την ονομασία) και άρα οι ακμές εντοπίζονται από τα zero-crossings του, είναι ο εξής:

$$\text{edge}(f) = (f \oplus B) - (f \ominus B) - 2f \quad (3.14)$$

Για καλύτερα αποτελέσματα με αυτούς τους τελεστές, πρέπει να προηγείται μια ομαλοποίηση στην εικόνα (γραμμική ή μη γραμμική).

Όπως θα φανεί και στα αποτελέσματα του κεφάλαιου 4, κατά την εφαρμογή της μεθόδου στα δεδομένα, δεν γίνεται απευθείας εφαρμογή της ανίχνευσης ακμών στην εικόνα αλλά εφαρμόζεται σε μια κατωφλιωμένη εικόνα. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί ο εντοπισμός ανεπιθύμητων ακμών. Η κατωφλίωση της εικόνας γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμείνει μόνο το επιθυμητό δόντι στην δυαδική εικόνα και να ανιχνευθεί αυτό.

3.6. Μέθοδος Κατάτμησης με Υφή

Η κατάτμηση των ιατρικών εικόνων μπορεί να γίνει με την γνώση της υφής της εικόνας. Μέσω της υφής είναι δυνατή να τμηματοποιηθεί η εικόνα γιατί τα δόντια έχουν διαφορετική υφή από το υπόβαθρο. Η μέθοδος κατάτμησης με υφή γίνεται εφικτή με την χρήση της εντροπίας (entropy), η οποία παίζει σημαντικό ρόλο για να δημιουργηθεί μια εικόνα υφής (Σχήμα 4.21). Η εντροπία είναι ένα στατιστικό μέτρο της τυχαιότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό της υφής. Άρα η τεχνική αυτή ανήκει στις στατιστικές μεθόδους ανίχνευσης και περιγραφής της υφής, οι οποίες αναφέρθηκαν στο

Κεφ.2. Για την δημιουργία της εικόνας υφής χρησιμοποιείται ένας πίνακας $n \times n$ (n : περιττός αριθμός), όπου γίνεται υπολογισμός της εντροπίας του κάθε εικονοστοιχείου, στην εκάστοτε γειτονιά του βάσει αυτού του πίνακα. Η εντροπία ορίζεται ως:

$$\text{sum}(p * \log_2(p)) \quad (3.15)$$

όπου p : μεταβλητή που περιέχει μετρήσεις από το ιστόγραμμα τις εικόνας

Επίσης η χρήση της εντροπίας είναι γνωστή στην ανάλυση υφής, μέσω της τεχνικής maximum entropy random field (MERF). Η τεχνική αυτή βασίζεται στην πολλαπλή ανάλυση φίλτρων με την μέγιστη εντροπία, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή χαρακτηριστικών υφής σε διάφορες κατευθύνσεις και κλίμακες. Η κατανομή πιθανότητάς της μπορεί να θεωρηθεί ως κατανομή Gibbs.

Με την χρήση της εντροπίας για την δημιουργία της εικόνας υφής, τα αντικείμενα της εικόνας με διαφορετική υφή ξεχωρίζουν καλύτερα το ένα από το άλλο. Έτσι με μια κατωφλίωση μπορεί να ληφθεί το περίγραμμα του επιθυμητού δοντιού.

3.7. Μέθοδος Watershed Κατάτμησης

Σύμφωνα με τα προηγούμενα στη watershed κατάτμηση λαμβάνονται υπόψιν τρία είδη σημείων. Τα σημεία που ανήκουν στο ελάχιστο της εικόνας, τα σημεία που αν τοποθετηθεί μια σταγόνα νερού αυτή θα κυλήσει προς κάποιο ελάχιστο (δηλαδή τα catchment basins) και τα σημεία όπου αν τοποθετηθεί μια σταγόνα νερού, αυτή έχει ίσες πιθανότητες να κυλήσει σε περισσότερα από ένα ελάχιστα (δηλαδή οι watershed γραμμές). Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, ο στόχος του watershed είναι μέσω της διαδικασίας του πλημμυρισμού, να προσδιοριστούν τα watersheds, τα οποία αποτελούν τα περιγράμματα που θα εξαχθούν από τον αλγόριθμο. Επίσης αναφέρθηκε ότι η watershed κατάτμηση αποτελείται από τρία στάδια. Την προεπεξεργασία της εικόνας, την εξαγωγή χαρακτηριστικών της εικόνας και την αλλαγή της ομοιοπίας/εφαρμογή μετασχηματισμού watershed.

Το στάδιο της προεπεξεργασίας της εικόνας είναι μεγάλης σημασίας, αφού από αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Σε αυτό το στάδιο γίνεται μη γραμμικό φιλτράρισμα της εικόνας για την ομαλοποίηση και την απλοποίησή της, έτσι ώστε ο θόρυβος και αχρείαστη πληροφορία να απομακρύνονται και η εικόνα να αποτελείται κυρίως από μεγάλες ομοιόμορφες περιοχές. Επίσης κάποιες φορές γίνεται και ενδυνάμωση των ακμών για την καλύτερη λειτουργία του αλγορίθμου. Για το μη γραμμικό φιλτράρισμα της εικόνας συνήθως χρησιμοποιούνται τα ASF φίλτρα (όπως προαναφέρθηκε) λόγω του ότι καταστέλουν επιτυχώς τον θόρυβο χωρίς να επηρεάζουν τα περιγράμματα των αντικειμένων της εικόνας. Τα ASF φίλτρα, που αναλύθηκαν πιο πάνω, αποτελούνται από επαναλαμβανόμενα ανοίγματα ανακατασκευής και κλεισίματα ανακατασκευής με αυξανόμενη κλίμακα (t):

$$\text{ASF}(f) = f' = \beta_t \alpha_t \dots \beta_2 \alpha_2 \beta_1 \alpha_1 (f) \quad (3.16)$$

$$\alpha_t(f) = \rho^-(f \ominus tB | f) : \text{άνοιγμα ανακατασκευής (reconstruction opening)}$$

$$\beta_t(f) = \rho^+(f \oplus tB | f) : \text{κλείσιμο ανακατασκευής (reconstruction closing)}$$

Στο επόμενο στάδιο γίνεται η ανίχνευση των χαρακτηριστικών της εικόνας, στο οποίο διεξάγεται μια πιο σοβαρή επεξεργασία της εικόνας. Ο στόχος αυτού του σταδίου είναι η εξαγωγή μικρών ομοιογενών περιοχών από την εικόνα οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν ως σηματοδευτές. Η επιλογή αυτών των σηματοδευτών αποτελεί την πιο δύσκολη διεργασία και ανάλογα με την μέθοδο που επιλέγεται για την εξαγωγή τους έχουμε διαφορετικά αποτελέσματα του αλγορίθμου. Υπάρχουν δύο είδη σηματοδευτές, οι Εσωτερικοί Σηματοδευτές που σχετίζονται με τα αντικείμενα που μας ενδιαφέρουν και οι Εξωτερικοί Σηματοδευτές που σχετίζονται με το υπόβαθρο της εικόνας. Από τα τρία κριτήρια επιλογής των σηματοδευτών (αντίθεση, εμβαδόν και όγκος) συνήθως χρησιμοποιείται το κριτήριο της αντίθεσης, για την εύρεση των Εσωτερικών Σηματοδευτών. Σε αυτή την περίπτωση, μια από τις καλύτερες μεθόδους εύρεσης των Εσωτερικών Σηματοδευτών είναι μέσω της εξαγωγής Δομών/Λεκάνων. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν γίνονται υποθέσεις για το σχήμα και το μέγεθος των περιοχών (όπως θα γινόταν με την χρήση της Top-Hat μεθόδου), αφού χρησιμοποιεί σταθερά έντασης (h) έτσι ώστε η εξαγωγή να γίνεται βάση του ύψους. Ο Εσωτερικός Σηματοδευτής πρέπει να περιβάλλεται από σημεία μεγαλύτερου ύψους και τα σημεία του να είναι συνδεδεμένα και να έχουν την ίδια τιμή έντασης. Γι'αυτό για την επιλογή των Εσωτερικών Σηματοδευτών προτιμάται η χρήση της εξαγωγής λεκάνων, ακολουθούμενη με κατωφλίωσή του σε επίπεδο που εξαρτάται από το h :

$$\text{Inside Marker} = \text{threshold}(\rho^+(f \oplus tB | f) - f) \quad (3.17)$$

Για την επιτυχή κατάτμηση της εικόνας χρειάζονται και οι Εξωτερικοί Σηματοδευτές. Η εύρεση των Εξωτερικών Σηματοδευτών γίνεται με την επιβολή των Εσωτερικών Σηματοδευτών ως ελάχιστα της εικόνας και εφαρμογή του watershed μετασχηματισμού (σχέση (3.18)). Τα watersheds που προκύπτουν αποτελούν τους Εσωτερικούς Σηματοδευτές. Έπειτα γίνεται ένωση των σηματοδευτών, για να βρεθεί ο τελικός σηματοδευτής (Final Marker) που θα χρησιμοποιηθεί για την κατάτμηση (σχέση (3.19)). Επίσης σε αυτό το στάδιο γίνεται και υπολογισμός της μορφολογικού κλίσης της εικόνας μέσω της αφαίρεσης της διαστολής της εικόνας με τη συστολή της (σχέση (3.13)).

$$\text{Outside Marker} = \text{WS}(f' | \text{Inside Marker}) \quad (3.18)$$

$$\text{Final Marker} = \text{Inside Marker} \cup \text{Outside Marker} \quad (3.19)$$

Τέλος έχουμε το στάδιο της αλλαγής της ομοιοπίας και εφαρμογής μετασχηματισμού watershed. Σε αυτό το στάδιο, αρχικά γίνεται αλλαγή της τοπολογίας της κλίσης με την χρήση του τελικού σηματοδευτή που υπολογίστηκε προηγουμένως. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφ.2, αυτό γίνεται για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της υπερ-κατάτμησης. Ακολούθως γίνεται πλημμυρισμός στη νέα κλίση, αποκτώντας έτσι την τελική κατάτμηση watershed.

$$\text{WS}(|\nabla f'| | \text{Final Marker}) \quad (3.20)$$

3.8. Snake Μέθοδος

Όπως προαναφέρθηκε, τα snakes αποτελούν μια από τις πιο προηγμένες τεχνικές για τον εντοπισμό περιγραμμάτων αντικειμένων μέσα σε μια εικόνα. Έτσι καταρχάς, για αρχικοποίηση του αλγορίθμου, του δίνεται ως είσοδος μια προσέγγιση του περιγράμματος του αντικειμένου. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος παραμορφώνει με τέτοιο τρόπο την καμπύλη ώστε να προσεγγίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την επιθυμητή μορφή του περιγράμματος. Η παραμόρφωση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων, ενώ παράλληλα η καμπύλη διατηρεί την συνοχή της και την ομαλότητά της. Γενικά οι δυνάμεις αυτές καθορίζονται από τα ζητούμενα χαρακτηριστικά στοιχεία της εικόνας, που συνήθως ένα από αυτά είναι οι ακμές της.

Τα snakes πρέπει να υλοποιούν, όσο γίνεται, τρεις στόχους. Να είναι όσο πιο ακριβείς γίνεται, δηλαδή το αποτέλεσμα να είναι όσο πιο κοντά στο επιθυμητό, να είναι όσο πιο ευσταθής γίνεται, δηλαδή όσες φορές και να επαναληφθεί ο αλγόριθμος το αποτέλεσμα του πρέπει να είναι το ίδιο και να είναι όσο πιο αποτελεσματικός γίνεται, δηλαδή να βελτιώνει την καμπύλη που του δίνεται για αρχικοποίηση [18]. Η παραμόρφωση της καμπύλης γίνεται προς την κατεύθυνση ελαχιστοποίησης ενός συναρτησοειδούς ενέργειας E_{snake} (σχέση (3.21)), μέχρι αυτή να εντοπίσει το σχήμα του περιγράμματος (όπου σε αυτό η E_{snake} είναι ελάχιστη) και η καμπύλη “κλειδώνει” πάνω σε αυτό. Η ενέργεια αυτή αποτελείται κυρίως από δύο συνιστώσες, την εσωτερική συνιστώσα E_{int} και την εξωτερική συνιστώσα E_{ext} . Η E_{int} περιλαμβάνει του όρους που ελέγχουν την ελαστικότητα και συνέχεια του snake. Η E_{ext} αποτελείται από δύο συνιστώσες, την E_{image} που περιλαμβάνει τις δυνάμεις που έλκουν την καμπύλη προς τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της εικόνας (γραμμές, ακμές κ.α) και από την E_{con} η οποία αποτελείται από τις δυνάμεις των εξωτερικών περιορισμών που είναι υπεύθυνες για την τοποθέτηση της καμπύλης κοντά στα επιθυμητά ελάχιστα.

$$\begin{aligned} E_{snake}^* &= \int_0^1 E_{snake}(C(s)) ds \\ &= \int_0^1 (E_{int}(C(s)) + E_{image}(C(s)) + E_{con}(C(s))) ds \end{aligned} \quad (3.21)$$

$C(s) = (x(s), y(s))$: παραμετρική καμπύλη
s: μήκος τόξου

Το μοντέλο του snake που εφαρμόζεται στα δεδομένα μπορεί να ανιχνεύσει τα επιθυμητά αντικείμενα, χωρίς να χρησιμοποιεί τη κλίση της εικόνας για όρο τερματισμού, αλλά αντί αυτού χρησιμοποιεί όρους που σχετίζονται με τη επιθυμητή τμηματοποίηση της εικόνας. Άρα με αυτό το μοντέλο μπορεί να γίνει ανίχνευση των αντικειμένων των οποίων τα περιγράμματα δεν ορίζονται απαραίτητα από τη κλίση, όπως γίνεται στα κλασσικά snakes. Σε αυτή την περίπτωση η ελαχιστοποίηση του συναρτησοειδούς ενέργειας βασίζεται στην κατάτμηση [22].

Το συναρτησοειδές ενέργειας ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{snake}} = & \mu \cdot \text{Length}(C) + \nu \cdot \text{Area}(\text{inside}(C)) \\
 & + \lambda_1 \int_{\text{inside}(C)} |u_0(x, y) - c_1|^2 dx dy \\
 & + \lambda_2 \int_{\text{outside}(C)} |u_0(x, y) - c_2|^2 dx dy,
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Στην σχέση (3.22) οι παράμετροι μ , ν , λ_1 και λ_2 είναι θετικές σταθερές, οι δύο πρώτοι όροι αποτελούν όρους κανονικοποίησης (μήκος και εμβαδόν της καμπύλης C) και οι άλλοι δύο είναι οι όροι που πρέπει να ελαχιστοποιηθούν και αντιστοιχούν στο εσωτερικό και το εξωτερικό του επιθυμητού αντικειμένου. Όπως παρατηρείται αν η καμπύλη βρίσκεται στο εσωτερικό του αντικειμένου τότε ο όρος του εσωτερικού σχεδόν μηδενίζεται, ενώ ο όρος του εξωτερικού αυξάνεται. Το αντίθετο ισχύει αν η καμπύλη βρίσκεται στο εξωτερικό του επιθυμητού αντικειμένου. Άρα συμπεραίνεται ότι και οι δύο ελαχιστοποιούνται στο περίγραμμα του αντικειμένου, όπου προς αυτό θα κινηθεί η καμπύλη.

Τα snakes παρέχουν μια ενιαία αντιμετώπιση για διάφορα προβλήματα της όρασης υπολογιστών, τα οποία αντιμετωπίστηκαν διαφορετικά στο παρελθόν. Ακμές, γραμμές και περιγράμματα εντοπίζονται με το ίδιο αλγόριθμο πράγμα που δίδει τις δυνατότητες και τις προοπτικές που έχουν.

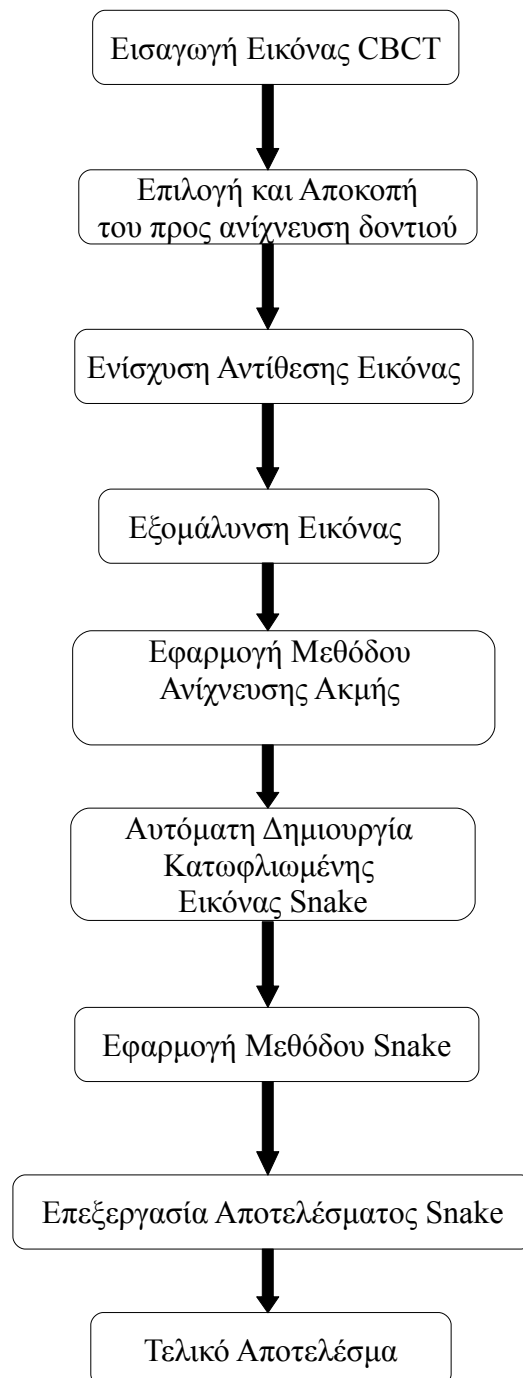
3.9. Προτεινόμενη Μέθοδος Τμηματοποίησης

Λόγω των αδυναμιών της τμηματοποίησης των οδοντιατρικών δεδομένων και της αδυναμίας των αλγορίθμων για ικανοποιητικά αποτελέσματα, προτιμήθηκε ο συνδυασμός των μεθόδων τμηματοποίησης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως για την δημιουργία ενός αλγορίθμου που δίνει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση. Οι δύο καλύτερες μέθοδοι που μπορούν να συνδιαστούν για την υλοποίηση του αλγορίθμου είναι η μέθοδος ανίχνευσης ακμών και η μέθοδος snake.

Ο τρόπος που μπορούν να συνδιαστούν αυτές οι δύο μέθοδοι είναι να χρησιμοποιηθεί η ανίχνευση ακμών για να βελτιστοποιηθεί το αποτέλεσμα του snake. Αυτό γίνεται λόγω του ότι το snake αποδίδει καλύτερα από όλες τις προαναφερθείσες μεθόδους και άρα αυτή η μέθοδος πρέπει να έχει κύριο ρόλο στον αλγόριθμο. Συγκεκριμένα η ανίχνευση ακμών χρησιμοποιείται για να βελτιώσει μειονεκτήματα που παρουσιάζει το snake. Ένα μειονέκτημα που αναφέρθηκε στο Κεφ.2 κατά την θεωρητική ανάλυση του snake, είναι ότι η αρχικοποιημένη καμπύλη, για να λειτουργήσει βέλτιστα ο αλγόριθμος, πρέπει να τοποθετείται κοντά στο επιθυμητό περίγραμμα αλλιώς είναι πολύ πιθανόν να ληφθούν ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Αυτό μπορεί να συμβεί γιατί είναι δύσκολο να εξασφαλιστεί ότι η διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να υπολογίσει το ολικό ελάχιστο της ενέργειας, έτσι ώστε πολλές φορές να υπολογίζεται η μορφή του περιγράμματος που αντιστοιχεί σε κάποιο τοπικό ελάχιστο, πράγμα που οδηγεί σε λάθη του αλγορίθμου.

Άρα η δημιουργία μιας καμπύλης που να βρίσκεται όσο πιο κοντά γίνεται στο επιθυμητό δόντι είναι αναγκαία για να δίνει ο αλγόριθμος το βέλτιστο αποτέλεσμά του. Σε αυτό ακριβώς το σημείο γίνεται χρήση της μεθόδου ανίχνευσης ακμών για βελτίωση του αποτελέσματος. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται η ανίχνευση ακμών για την δημιουργία μιας βέλτιστης μάσκας που θα εφαρμοστεί στο snake, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να λαμβάνει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα από το snake, κάθε φορά που χρησιμοποιείται.

Τα βήματα του αλγορίθμου παρουσιάζονται ένα-ένα στο πιο κάτω μπλοκ διάγραμμα (block diagramm):



Όπως φαίνεται και από το μπλοκ διάγραμμα, αρχικά εισάγεται στον αλγόριθμο η CBCT εικόνα. Έπειτα ο χρήστης επιλέγει την επιθυμητή περιοχή στην οποία θα γίνει η τμηματοποίηση. Ακολούθως γίνεται προεπεξεργασία της νέας εικόνας, η οποία αποτελείται από το στάδιο της ενίσχυσης της αντίθεσης της επιλεγμένης περιοχής, μέσω των Top-Hat και Bottom-Hat μετασχηματισμών με βάση τη σχέση (3.1) και από το στάδιο της εξομάλυνσης που επιτυγχάνεται με την χρήση των ASF φίλτρων βάση της σχέσης (3.16) με $t = 2$. Μετά γίνεται ανίχνευση ακμής του δοντιού για την δημιουργία της αρχικοποιημένης καμπύλης που χρειάζεται ως είσοδο η snake μέθοδος για να λειτουργήσει. Επίσης ο αλγόριθμος δημιουργεί και μια κατωφλιωμένη εικόνα του δοντιού την οποία χρησιμοποιεί το snake για να παραμορφώσει την καμπύλη στην εικόνα και για να ορίσει τον όρο τερματισμού του. Το κατώφλι της δημιουργείται με τη χρήση της σχέσης (4.4). Έπειτα γίνεται εκτέλεση της μεθόδου snake. Τέλος, το αποτέλεσμα του snake επεξεργάζεται επιπλέον από τον χρήστη μέσω opening και closing και με συνδιασμό της διαδικασίας επιλογής του μέγιστου εμβαδού, δημιουργείται το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα Τμηματοποίησης Οδοντιατρικών Δεδομένων

4.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μεθόδων όπως εφαρμόστηκαν χρονολογικά και έπειτα γίνεται αναφορά στον τρόπο που αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος, στην σταδιακή υλοποίησή του, καθώς και στη παρουσίαση των αποτελεσμάτων του. Γίνεται ανάλυση των σημαντικότερων παραμέτρων του και ο τρόπος χειρισμού τους στα μετέπειτα στάδια, για την (όσο γίνεται) αυτοματοποίησή του. Τα αποτελέσματα της κάθε μεθόδου συγκρίνονται και σχολιάζονται έτσι ώστε να γίνει κατανοητός ο τρόπος με το οποίο εξελίχθηκε ο αλγόριθμος αυτός. Η ανασκόπηση του αλγορίθμου αρχίζει με μια αναφορά στον τύπο των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν.

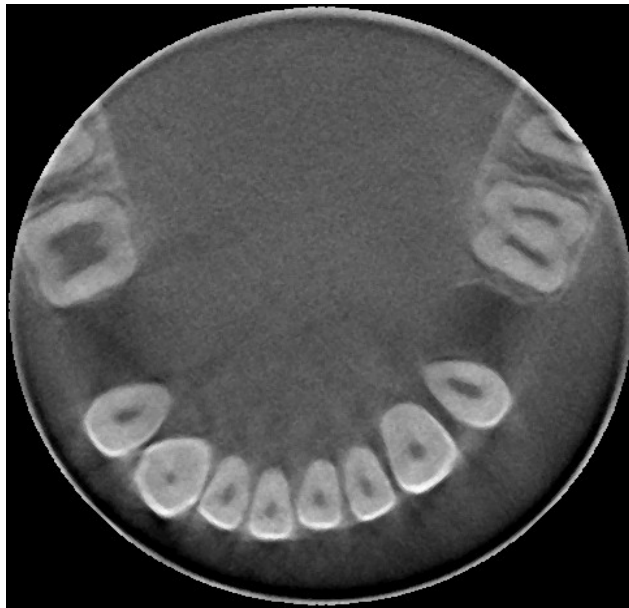
4.2. Οδοντιατρικά Δεδομένα CBCT (Cone beam computed tomography)

Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος είναι αξονικές δοντιών τύπου CBCT. Συγκεκριμένα υπάρχουν 120 εικόνες πριν την εγχείρηση του κάθε ασθενους και 120 μετά

την εγχείρηση, για τέσσερις συνολικά ασθενείς. Η CBCT δημιουργήθηκε λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για ταχεία απεικόνιση σε συνδυασμό με την ικανότητα να καλύπτει μεγάλη περιοχή σάρωσης σε μία μόνο περιστροφή του βραχίονα και για να αντιμετωπίσει κάποιους περιορισμούς της συμβατικής CT. Η εισαγωγή της CBCT ειδικά για την απεικόνιση της γναθοπροσωπικής περιοχής έφερε επανάσταση στην διάγνωση, στον σχεδιασμό της θεραπείας και γενικά στη καθοδήγηση διάφορων χειρουργικών επεμβάσεων (ειδικά στη γναθοχειρουργική). Λόγω της αυξανόμενης πρόσβασης σε αυτού του είδους τη τεχνολογία, η CBCT χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο στην οδοντιατρική σε όλους του τομείς της (π.χ ορθοδοντική), όπου υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της καλής γναθοπροσωπικής απεικόνισης που παρέχει, της διευκόλυνσης της μετάβασης των οδοντιατρικών δεδομένων από 2D σε 3D, την δυνατότητα παροχής πιο ακριβή διαγνώσεων αλλά και την ικανότητα καθοδήγησης και αξιολόγησης σε χειρουργικές επεμβάσεις [19]. Η CBCT στην οδοντιατρική έχει τα πλεονεκτήματα ότι παρέχει υψηλή ανάλυση και μικρή παραμόρφωση στην εικόνα.

Όπως αναφέρει και στο όνομά της (cone beam) η τεχνολογία αυτή βασίζεται σε ένα σχήμα κώνου ακτίνων X που κατευθύνονται σε ένα επίπεδο 2D ανιχνευτή. Κατά την διάρκεια της σάρωσης, ο σαρωτής περιστρέφεται γύρω από το κεφάλι του ασθενούς, παράγοντας περίπου 600 2D εικόνες. Έπειτα το λογισμικό της σάρωσης συλλέγει τα δεδομένα και στη συνέχεια ανασυνθέτει τις εικόνες σε 3D. Άρα η CBCT παρέχει σε μεγάλη ανάλυση ολόκληρη την γναθοπροσωπική περιοχή μόνο με ένα πέρασμα του σαρωτή, σε σύγκριση με τη συμβατική CT όπου πολλαπλές “φέτες” στοιβάζονται για να ληφθεί μόνο μια εικόνα. Επίσης η CBCT λόγω του κώνικου σχήματος των ακτίνων X, παράγει πιο εστιασμένη δέσμη η οποία έχει σημαντικά λιγότερες ακτίνες διασποράς σε σχέση με τη συμβατική CT με αποτέλεσμα να γίνεται καλύτερη χρήση των ακτίνων και να μειώνεται η ακτινοβολία που χρειάζεται για την σάρωση [21].

Γενικά υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ της CBCT και της CT όσον αφορά στην απόκτηση των δεδομένων, στην μέθοδο ανακατασκευής της εικόνας, στην ανάλυση της εικόνας και στην δόση ακτινοβολίας που εκπέμπεται στον ασθενή. Ακόμη, από κατασκευαστικής άποψης, η CBCT είναι φθινότερη και έχει μικρότερο μέγεθος. Υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα της CBCT, όπως η αυξημένη ευαισθησία σε αντικείμενα κίνησης και στην έλλειψη κατάλληλου προσδιορισμού της οστικής πυκνότητας. Διάφορες εφαρμογές της CBCT στην οδοντιατρική υπάρχουν στην ορθοδοντική τοποθέτηση εμφυτευμάτων, στην γναθοχειρουργική, στη διάγνωση παθολογιών των σιαγόνων, στην ένδειξη της τοποθεσίας των ανατομικών δομών κ.α [20].



Σχήμα 4.1: Παράδειγμα δεδομένων CBCT

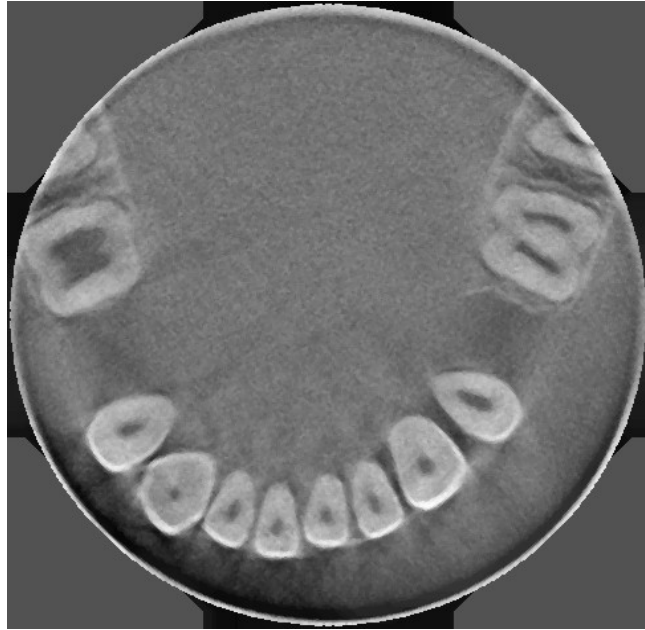
4.3 Μεθοδολογίες για Τμηματοποίηση Οδοντιατρικών Δεδομένων και Αποτελέσματα

4.3.1. Ενίσχυση αντίθεσης και Εξομάλυνση Εικόνας

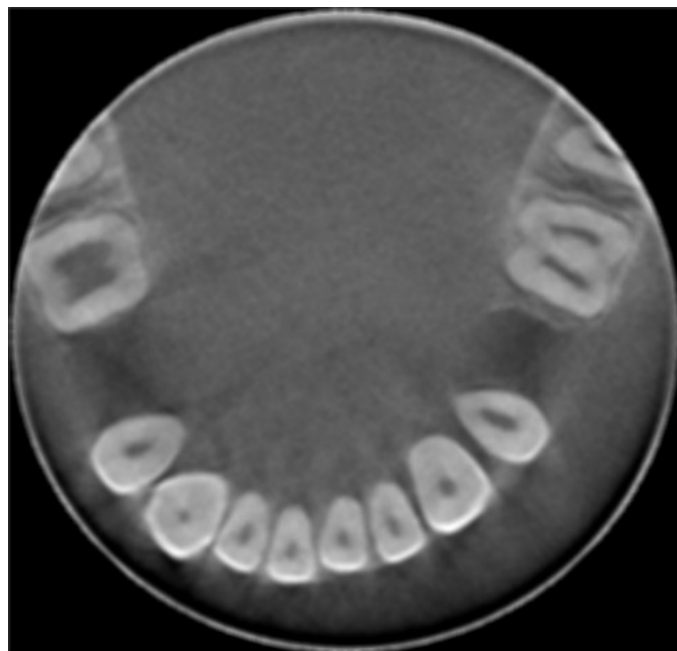
Αρχικό στάδιο σε όλες σχεδόν τις μεθόδους, καθώς και στην προτεινόμενη μέθοδο αποτελεί η ενίσχυση της αντίθεσης και η εξομάλυνση της εικόνας.

Η ενίσχυση της αντίθεσης πραγματοποιείται μέσω του Top-Hat και Bottom-Hat μετασχηματισμού βάσει της εξίσωσης (3.1). Παράδειγμα της εφαρμογής της ενίσχυσης της αντίθεσης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.

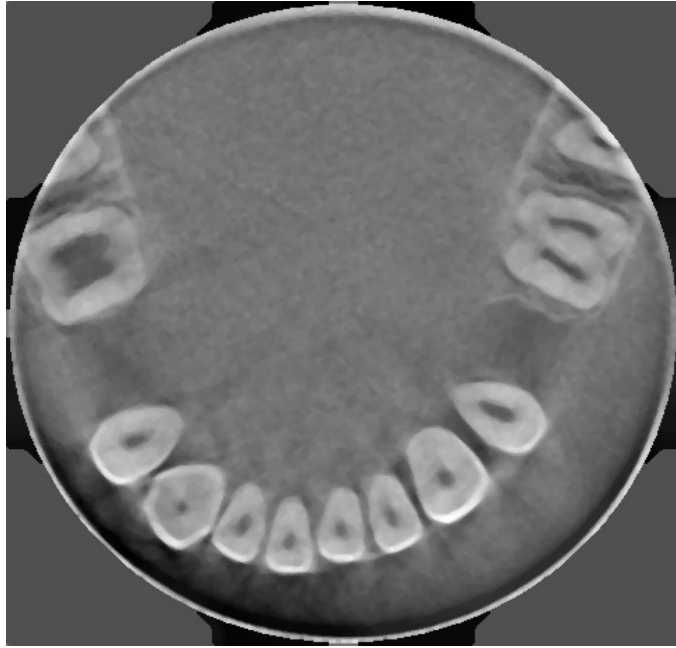
Η εξομάλυνση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση διάφορων φίλτρων. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του κάθε φίλτρου, με σκοπό να επιλεγεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για τον αλγόριθμο. Τα φίλτρα στα οποία έγιναν δοκιμές είναι το φίλτρο μέσου όρου, το median φίλτρο, το Gaussian φίλτρο και το ASF φίλτρο. Ακολούθως στα Σχήματα 4.3 – 4.6 δίνονται παραδείγματα των αποτελεσμάτων από το κάθε φίλτρο.



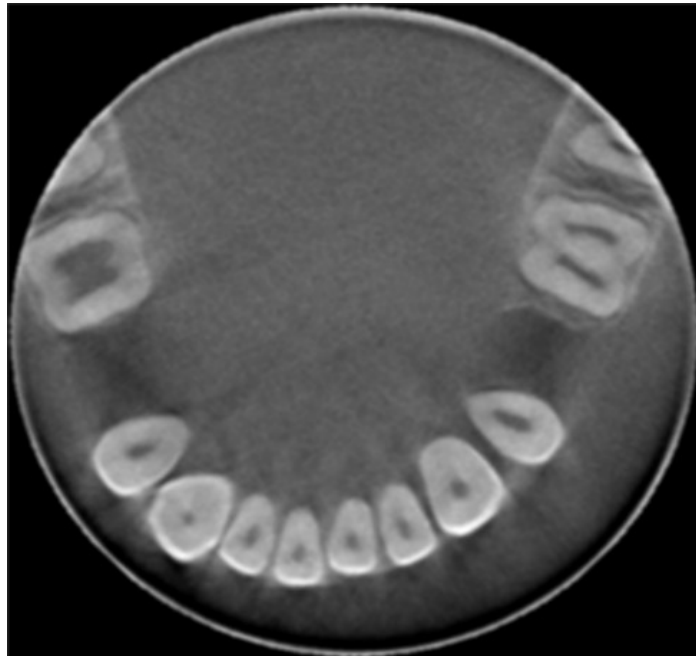
Σχήμα 4.2: Ενίσχυση αντίθεσης της εικόνας



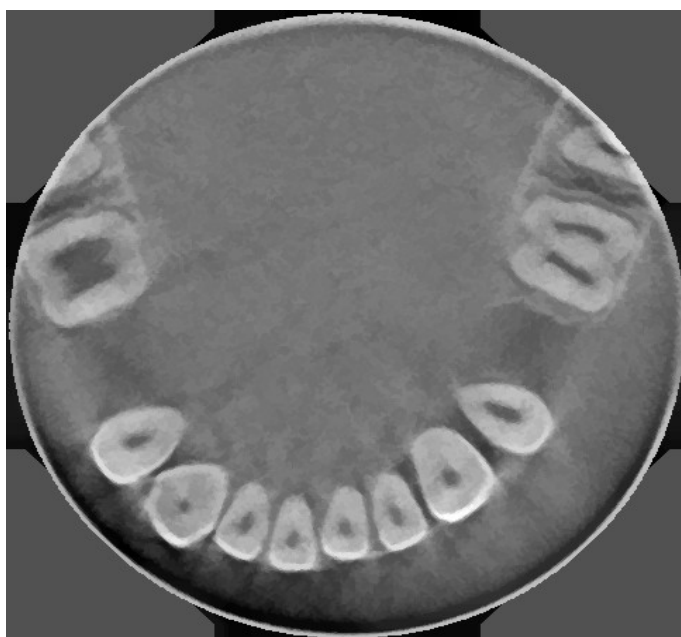
Σχήμα 4.3: 5x5 Φίλτρο Μέσου Όρου



Σχήμα 4.4: 5x5 Median Φίλτρο



Σχήμα 4.5: 5x5 Gaussian φίλτρο με $\sigma = 1.5$



Σχήμα 4.6: ASF φίλτρο με $t = 2$

Απ' ότι φαίνεται στο Σχήμα 4.3 και στο Σχήμα 4.5, το φίλτρο μέσου όρου και το Gaussian φίλτρο προσδίδουν στην εικόνα μεγάλο βαθμό θόλωσης δημιουργώντας έτσι φτωχά αποτελέσματα, προκειμένου να απομακρύνουν τον θόρυβο και να την απλοποιήσουν, πράγμα που είναι ανεπιθύμητο και που τις καθιστά ανίκανες να χρησιμοποιηθούν στον αλγόριθμο. Το median φίλτρο (Σχήμα 4.4) έχει σαφώς καλύτερα αποτελέσματα από τις δύο προηγούμενες, αλλά σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του ASF φίλτρου (Σχήμα 4.6), το ASF φίλτρο υπερτερεί λόγω του ότι το median φίλτρο έχει μικρή θόλωση σε σχέση με αυτό.

Η θόλωση είναι γενικά ανεπιθύμητη διότι μεταβάλλει τα περιγράμματα των δοντιών της εικόνας, κάνοντας έτσι την απομόνωση του δοντιού που θέλει ο χρήστης και γενικά την όλη διαδικασία της τμηματοποίησης, ακόμη πιο δύσκολη διαδικασία. Αυτό συμβαίνει γιατί τα δεδομένα από την φύση τους είναι ήδη δύσκολα να τμηματοποιηθούν, αφού τα δόντια βρίσκονται πολύ κοντά το ένα με το άλλο και όλα εκπέμπουν τη ίδια φωτεινότητα. Έτσι με την εφαρμογή φίλτρου που προσδίδει θόλωση στην εικόνα και γενικά επηρεάζει τα περιγράμματα των δοντιών, η διαδικασία της τμηματοποίησης δυσκολεύει περισσότερο, επειδή χάνονται μικρές σκοτεινές περιοχές μεταξύ των δοντιών, οι οποίες βοηθούν πάρα πολύ στη επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Άρα η επιλογή του ASF φίλτρου είναι η καλύτερη αφού πληρεί, σε μεγάλο βαθμό, τις απαιτήσεις που πρέπει να τηρεί το φίλτρο του αλγορίθμου.

4.3.2. Εφαρμογή Watershed Μεθόδου

Στο επόμενο στάδιο γίνεται η εφαρμογή της κάθε μεθόδου. Αρχικά, ως πρώτη μέθοδος, αναπτύχθηκε η μεθοδολογία της watershed κατάτμησης. Σε αυτή την μέθοδο παρατηρήθηκε ότι κάποιες εικόνες παρουσίαζαν καλύτερα αποτελέσματα με την χρήση διαδοχικών ανοιγμάτων ανακατασκευής, αντί με την χρήση ASF φίλτρων. Κατά την διαδικασία εύρεσης των Εσωτερικών Σημαδευτών (Inside Markers), μετά από πολλές δοκιμές, αναπτύχθηκαν δύο τρόποι εύρεσής τους που και οι δύο παρουσίαζαν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον θεωρητικό τρόπο ο οποίος αναλύθηκε στο Κεφ.3. Στον πρώτο τρόπο, ο οποίος χρησιμοποιείται στις περισσότερες εικόνες, η εύρεση των Εσωτερικών Σημαδευτών γίνεται μέσω του ανοίγματος ανακατασκευής (Σχήμα 4.7), βάση της εξής εξίσωσης:

$$\text{Inside Marker} = \text{threshold} (f - \rho \cdot (f - h | f)) \quad (4.1)$$

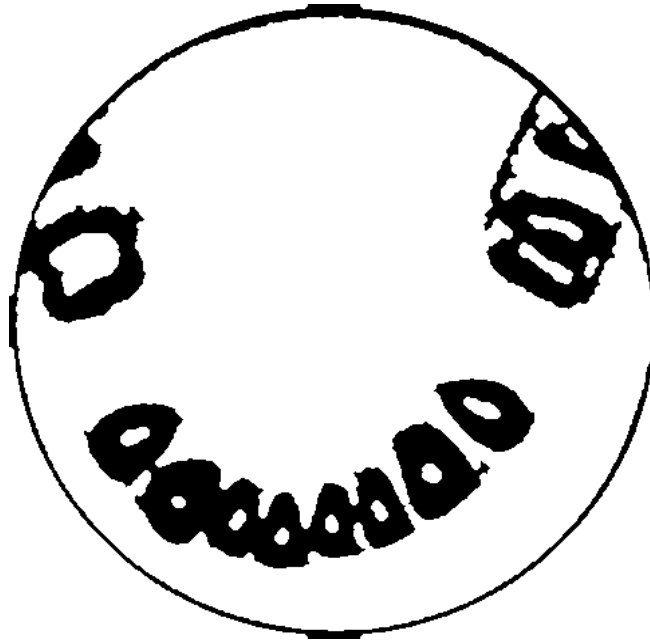
Στον δεύτερο τρόπο, ο οποίος εφαρμόζεται σε ορισμένες αλλά έχει καλά αναλόγως αποτελέσματα σε αρκετές εικόνες, η εύρεση των Εσωτερικών Σημαδευτών γίνεται με την χρήση του Top-Hat μετασχηματισμού (Σχήμα 4.8), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\text{Inside Marker} = \text{threshold} (\text{tophat}(f)) \quad (4.2)$$

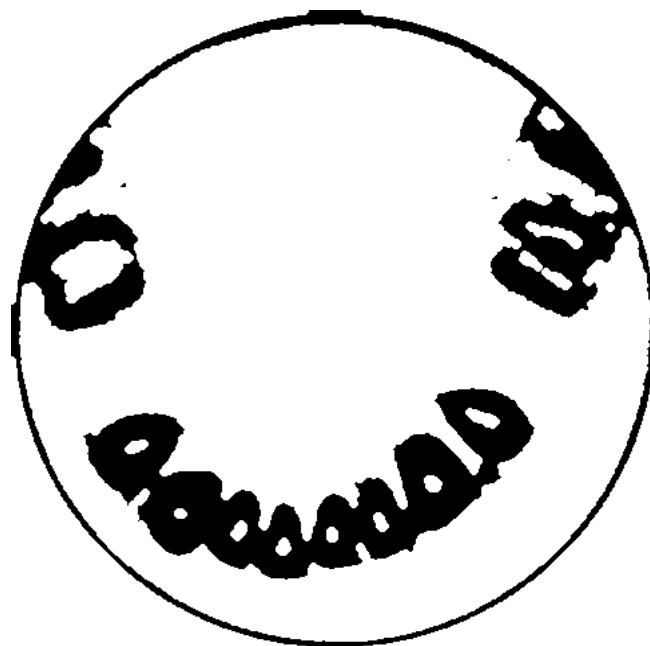
Η επιτυχία του πρώτου τρόπου εξαρτάται από την παράμετρο h και από την τιμή του κατωφλίου, ενώ η επιτυχία του δεύτερου τρόπου εξαρτάται από το μέγεθος του δομικού στοιχείου (που συνήθως είναι δίσκος) και επίσης από την τιμή του κατωφλίου που εφαρμόζεται. Στην περίπτωση χρήσης του δεύτερου τρόπου το στάδιο της ενίσχυσης παραλείπεται λόγω του ότι ο αλγόριθμος δίνει κακά αποτελέσματα.

Ακολούθως γίνεται περαιτέρω διαδικασία των Εσωτερικών Σημαδευτών, η οποία είναι κοινή και στους δύο τρόπους. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται σε αυτούς μορφολογική επεξεργασία (διαστολή και συστολή με δομικό στοιχείο διαφορετικού μεγέθους) και μετασχηματισμός απόστασης. Η επεξεργασία αυτή εφαρμόζεται για να ληφθούν όσο καλύτεροι Εσωτερικοί Σημαδευτές γίνεται, αφού παίζουν βασικό ρόλο στο αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Πιο κάτω, στο Σχήμα 4.7 και στο Σχήμα 4.8, παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα και των δύο τρόπων για την ίδια εικόνα.

Όπως φαίνεται, ο πρώτος τρόπος δίνει καλύτερους Εσωτερικούς Σημαδευτές από τον δεύτερο για την συγκεκριμένη εικόνα. Το ποιος από τους δύο πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από την φύση της εικόνας (φωτεινότητα, θόρυβος κ.α), αλλά γενικότερα συνιστάται η χρήση του πρώτου τρόπου. Διάφορες παραλλαγές που μπορούν να γίνουν στον πρώτο τρόπο έτσι ώστε να βελτιωθεί το αποτέλεσμά του (εαν δεν είναι επιθυμητό), είναι να παραληφθεί το στάδιο της ενίσχυσης της αντίθεσης ή το φιλτράρισμα να γίνεται με την χρήση διαδοχικών ανοιγμάτων ανακατασκευής, αντί του ASF φίλτρου ή και τα δύο.

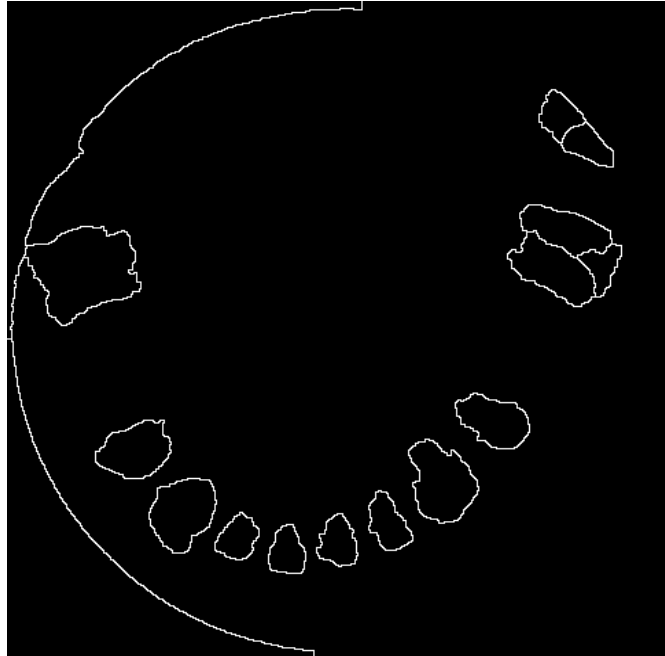


Σχήμα 4.7: Εύρεση Inside Markers με άνοιγμα ανακατασκευής (1ος τρόπος)

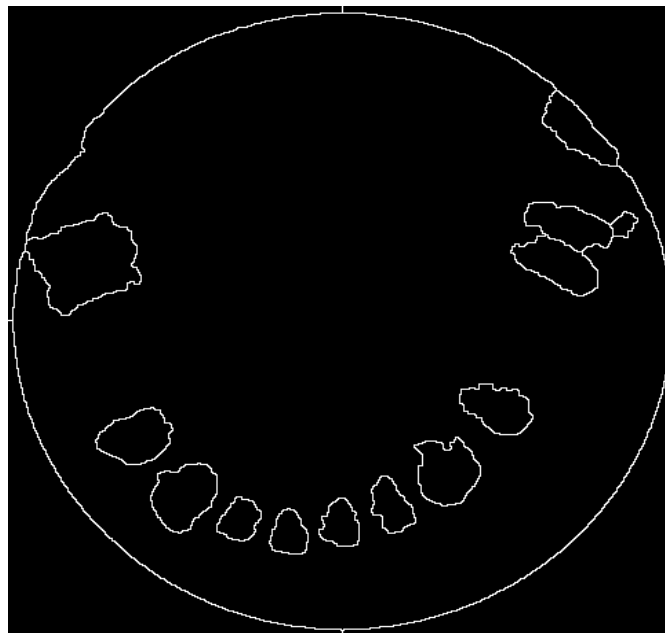


Σχήμα 4.8: Εύρεση Inside Markers με Top Hat μετασχηματισμό (2ος τρόπος)

Στη συνέχεια ο αλγόριθμος ακολουθεί τη ίδια διαδικασία και για τους δύο τρόπους, η οποία είναι αυτή που αναλύθηκε στο Κεφ.3. Δηλαδή στο επόμενο στάδιο, γίνεται εντοπισμός των Εξωτερικών Σημαδευτών (Outside Markers) με την χρήση των Εσωτερικών Σημαδευτών ως ελάχιστα της εικόνας (Σχήμα 4.9 και Σχήμα 4.10) και ακολούθως εφαρμόζεται ο watershed μετασχηματισμός σε αυτή:

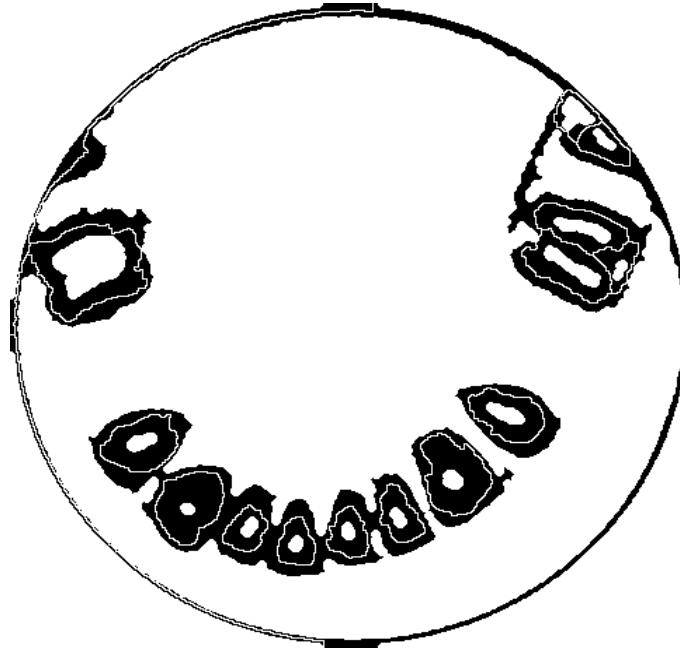


Σχήμα 4.9: Εύρεση Outside Markers του 1ου τρόπου

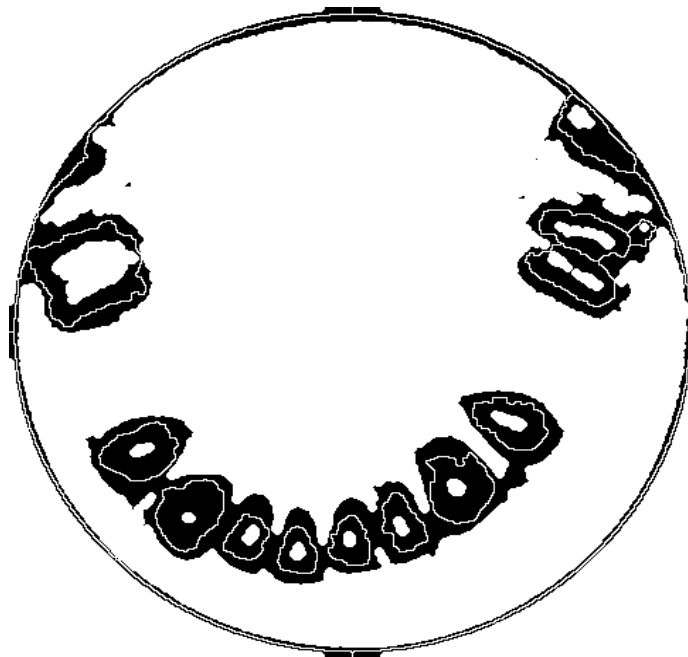


Σχήμα 4.10: Εύρεση Outside Markers του 2ου τρόπου

Ακολούθως γίνεται ένωση των Εσωτερικών και Εξωτερικών Σημαδευτών (Σχήμα 4.11 και Σχήμα 4.12), για να γίνει η εύρεση του τελικού σημαδευτή που χρησιμοποιείται στην κατάτμηση.

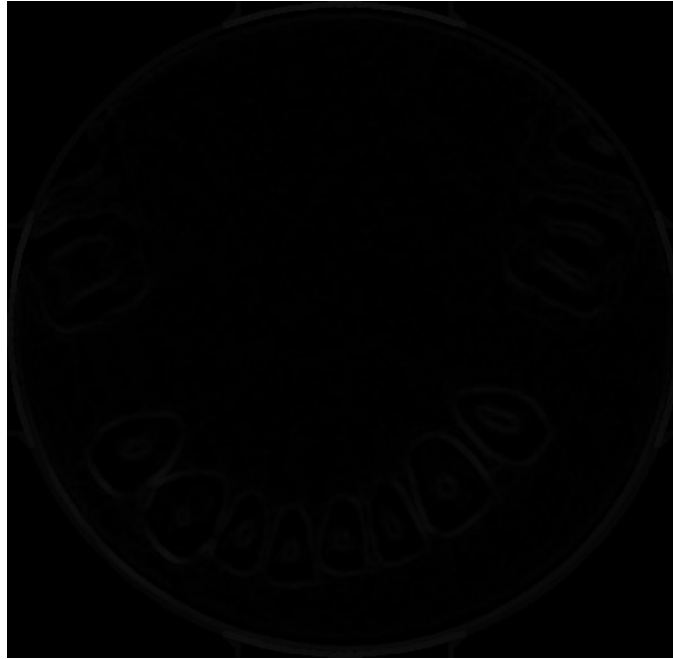


Σχήμα 4.11: Ένωση των σημαδευτών του 1ου τρόπου



Σχήμα 4.12: Ένωση των σημαδευτών του 2ου τρόπου

Έπειτα μέσω της διαστολής και της συστολής πρέπει να υπολογιστεί η μορφολογική κλίση της εικόνας, με την χρήση της σχέσης (3.13), το οποίο παρουσιάζεται ακολούθως:



Σχήμα 4.13: Μορφολογική κλίση της εικόνας

Τέλος, γίνεται αλλαγή της τοπολογίας της κλίσης της εικόνας με την χρήση του τελικού σημαδευτή που υπολογίστηκε προηγουμένως και στη συνέχεια εφαρμόζεται ο watershed μετασχηματισμός για την απόκτηση της τελικής κατάτμησης.

Παρατηρώντας τις τελικές εικόνες (Σχήμα 4.14 και Σχήμα 4.15) της watershed κατάτμησης φαίνεται ότι ο πρώτος τρόπος αποδίδει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα απ' ότι ο δεύτερος τρόπος, αλλά όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν κάποιες εικόνες που δίνουν καλύτερα αποτελέσματα με τον δεύτερο τρόπο αντί του πρώτου.

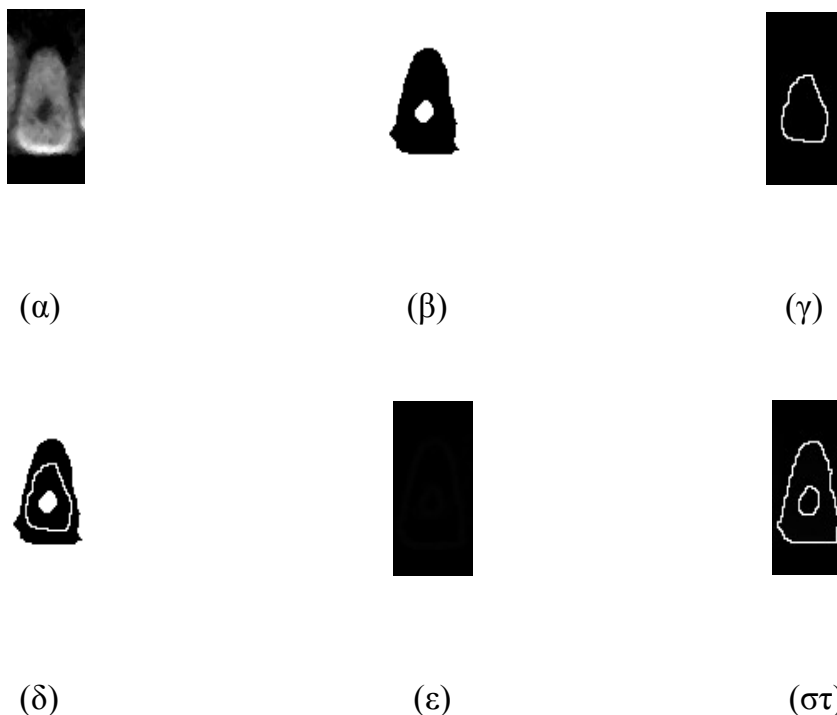


Σχήμα 4.14: Watershed αποτέλεσμα 1ης μεθόδου



Σχήμα 4.15: Watershed αποτέλεσμα 2ης μεθόδου

Λόγω του ότι ο αλγόριθμος πρέπει να τμηματοποιεί και κάθε δόντι που επιλέγει ο χρήστης να δει ξεχωριστά, η watershed μέθοδος έπρεπε να εφαρμόζεται με επιτυχία και σ'αυτό. Αυτή η απαίτηση εκπληρώθηκε σε κάποιο βαθμό όπως φαίνεται και από τις εικόνες στο Σχήμα 4.16.



Σχήμα 4.16: Εφαρμογή του watershed μετασχηματισμού σε επιλεγμένο δόντι
 (α) Επιλεγμένο δόντι, (β) Inside Markers του δοντιού, (γ) Outside Markers του δοντιού
 (δ) Ένωση Inside-Outside Markers, (ε) Μορφολογική κλίση, (στ) Watershed κατάτμηση

Επειδή όμως ο watershed μετασχηματισμός κάποιες φορές αστοχεί εντελώς, λόγω του ότι εξαρτάται πάρα πολύ από το τμήμα της τομής του δοντιού που επιλέγεται, το να βρεθούν άλλες πιο αποδοτικές και ευσταθής μέθοδοι ήταν αναγκαίο. Η εξάρτηση της απόδοσης του watershed μετασχηματισμού είναι άμεσα συνδεδεμένη με το τμήμα της τομής της εικόνας, γιατί ανάλογα με την τομή της μεταβάλλεται η τοπολογία της εικόνας και άρα και το αποτέλεσμα της μεθόδου. Άρα η watershed κατάτμηση έχει προβλήματα ευστάθειας.

4.3.3. Εφαρμογή Μεθόδου Ανίχνευσης Ακμών

Έτσι, ακολούθως έγινε ανάπτυξη της μεθόδου ανίχνευσης ακμής, η οποία είναι μια πιο σταθερή μέθοδος από την watershed κατάτμηση. Στην ανίχνευση ακμών, μετά το στάδιο της ενίσχυσης και της εξομάλυνσης, υπάρχει ένα στάδιο κατωφλίωσης ίδιο με την πρώτη μέθοδο εξαγωγής των Εσωτερικών Σημαδευτών στη μέθοδο watershed, δηλαδή όπως καταδεικνύει η σχέση (4.1). Αυτό το στάδιο γίνεται διότι με την απευθείας εφαρμογή της ανίχνευσης ακμών, ανιχνεύονται ανεπιθύμητες ακμές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.17, με την εφαρμογή οποιασδήποτε μεθόδου ανίχνευσης. Άρα γίνεται χρήση του ανοίγματος

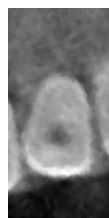
ανακατασκευής γιατί μέσω αυτού μπορεί να βρεθεί ένα κατάλληλο κατώφλι, έτσι ώστε να απομονωθεί το δόντι και να γίνει η ανίχνευση ακμών σε μια δυαδική εικόνα που περιέχει μόνο τις επιθυμητές περιοχές. Ουσιαστικά η εικόνα απλοποιείται εντελώς και η μέθοδος ανίχνευσης ακμών που χρησιμοποιείται δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο.



Σχήμα 4.17: Απευθείας εφαρμογή της μεθόδου ανίχνευσης ακμών στην εικόνα

Λόγω του ότι με την χρήση μόνο της σχέσης (4.1) δεν είναι εγγυημένο ότι θα υπάρχουν πάντα καλά αποτελέσματα από τη κατωφλίωση, χρησιμοποιείται και ένα περαιτέρω στάδιο μορφολογικής επεξεργασίας. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται συστολή και διαστολή στην εικόνα (με χρήση διαφορετικού μεγέθους δομικό στοιχείο) έτσι ώστε να ξεχωρίσει εντελώς το επιθυμητό δόντι από τα υπόλοιπα.

Στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας την γνώση των εμβαδών των αντικειμένων της εικόνας, ο αλγόριθμος επιλέγει να αφήσει στην δυαδική εικόνα μόνο το στοιχείο που έχει το μέγιστο εμβαδόν (το οποίο ουσιαστικά είναι το προς εξέταση δόντι), απομακρύνοντας από την εικόνα οτιδήποτε άλλο, έτσι ώστε να ανιχνευθεί μόνο το επιθυμητό δόντι (Σχήμα 4.18).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

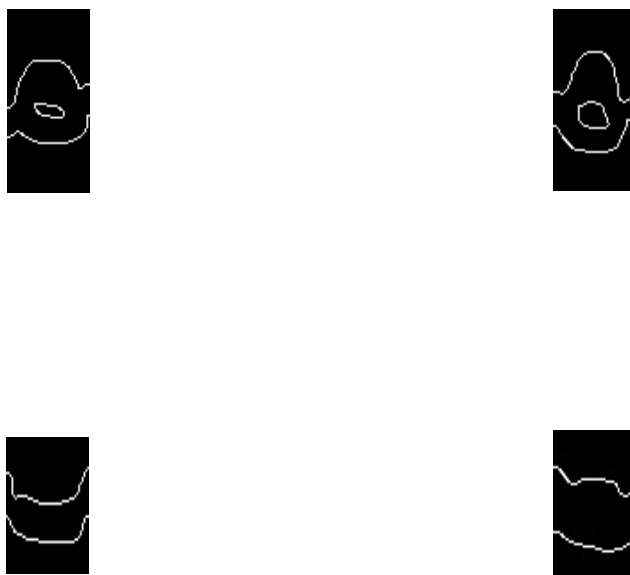
Σχήμα 4.18: Παράδειγμα απομόνωσης του επιθυμητού δοντιού
(α) Επιλεγμένο δόντι, (β) Κατωφλιωμένη εικόνα μέσω της σχέσης (4.1)
(γ) Διαχωρισμός δοντιού από τα υπόλοιπα, μέσω μορφολογικής επεξεργασίας,
(δ) Απομόνωση δοντιού με την χρήση μέγιστου εμβαδού

Τέλος χρησιμοποιείται η μέθοδος της ανίχνευσης ακμής. Η μέθοδος μπορεί να είναι οποιαδήποτε από τις προαναφερθήσες (Sobel, Prewitt, Roberts, LoG και Canny), αφού λόγω της κατωφλίωσης και της μορφολογικής επεξεργασίας απομονώνεται πλήρως το δόντι και άρα δεν παίζει πάρα πολύ μεγάλο ρόλο η μέθοδος ανίχνευσης ακμής που εφαρμόζεται. Όμως λόγω του ότι η Canny μέθοδος είναι καλύτερη από όλες τις μεθόδους (όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.3), χρησιμοποιείται αυτή για να είναι εξασφαλισμένο ότι στην έξοδο θα δίνεται το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα κάθε φορά (Σχήμα 4.19).



Σχήμα 4.19: Εφαρμογή της ανίχνευσης ακμής με την μέθοδο Canny

Μπορεί η μέθοδος ανίχνευσης ακμής να είναι μια πιο σταθερή μέθοδος από την watershed κατάτμηση, αλλά δεν εγκυάται πάντα ότι θα έχει καλά αποτελέσματα. Άρα η μέθοδος της ανίχνευσης ακμής υποφέρει από προβλήματα ακρίβειας και απόδοσης. Αυτό φαίνεται σε παραδείγματα στο Σχήμα 4.20. Επίσης κάποιες φορές, λόγω της μορφολογικής επεξεργασίας που εφαρμόζεται στο δόντι για να ξεχωρίσει από τα υπόλοιπα δόντια, το περίγραμμα του δοντιού που δίνει ως αποτέλεσμα ο αλγόριθμος ανίχνευσης ακμών, μπορεί να μην αντιστοιχεί ακριβώς στο πραγματικό (δηλαδή να είναι λίγο μικρότερο), αλλά να είναι μια πολύ καλή προσέγγιση αυτού. Έτσι, πρέπει να βρεθεί μια άλλη μέθοδος που να δίνει κάθε φορά, ακριβώς το επιθυμητό αποτέλεσμα χωρίς προσεγγίσεις.



Σχήμα 4.20: Παράδειγμα προβλημάτων ακρίβειας της μεθόδου ανίχνευσης ακμής

4.3.4. Εφαρμογή Μεθόδου Κατάτμησης Υφής

Για εκπληρωθεί η ανάγκη της εύρεσης ενός πιο ευσταθούς και ακριβή αλγόριθμου από τους δύο προηγούμενους, έγινε η σκέψη για τμηματοποίηση της εικόνας με βάση την υφή της. Η ιδέα αυτή θεμελιώθηκε στο ότι τα δόντια παρουσιάζουν διαφορετική υφή στο εξωτερικό τους, διαφορετική στο εσωτερικό τους και βέβαια διαφορετική υφή από το υπόβαθρο της εικόνας, πράγμα που αν το εκμεταλλευτεί κανείς μπορεί να εξάγει το επιθυμητο περίγραμμα του δοντιού βασισμένος σε όρους υφής. Λόγο του ότι η κατάτμηση υφής της εικόνας δεν επηρεάζεται από την ποσότητα θορύβου που υπάρχει στην εικόνα, το στάδιο της ενίσχυσης και της εξομάλυνσης μπορεί να παραληφθεί για περισσότερη απλότητα του αλγόριθμου.

Η διαδικασία για να επιτευχθεί η τμηματοποίηση με υφή είναι η εξής:

Αρχικά γίνεται χρήση της εντροπίας (entropy) για να δημιουργηθεί μια εικόνα υφής (Σχήμα 4.21), χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.15). Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, η εικόνα υφής δημιουργείται με τον υπολογισμό της εντροπίας του κάθε εικονοστοιχείου, με βάση τη γειτονιά του.



Σχήμα 4.21: Εικόνα υφής με την χρήση της εντροπίας

Ακολούθως γίνεται κατωφλίωση του Top-Hat μετασχηματισμού της εικόνας υφής, όπως στην σχέση (4.2), για να διαχωριστεί η επιθυμητή υφή του περιγράμματος του δοντιού από την ανεπιθύμητη του υπόβαθρου της εικόνας και του εσωτερικού του (εκτός της ρίζας του δοντιού), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.22.



Σχήμα 4.22: Κατωφλίωση του Top-Hat της εικόνας υφής

Στην συνέχεια, για την αφαίρεση των μικρών λευκών περιοχών που υπάρχουν στην εικόνα και την εξαγωγή της υφής του περιγράμματος του επιλεγμένου δοντιού (Σχήμα 4.23) εφαρμόζεται η τεχνική της επιλογής του μέγιστου εμβαδού, η οποία αναφέρθηκε και προηγουμένως στην ανάλυση της μεθόδου ανίχνευσης ακμής.



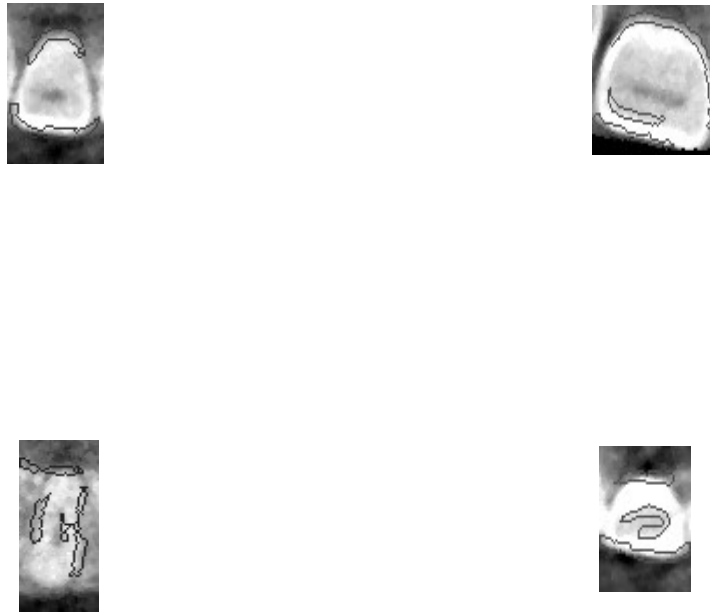
Σχήμα 4.23: Αποτέλεσμα εφαρμογής μέγιστου εμβαδού

Τέλος, αφού μέσω της υφής έγινε εξαγωγή του επιθυμητού περιγράμματος του δοντιού μένει μόνο να γίνει ανίχνευσή του (Σχήμα 4.24).



Σχήμα 4.24: Ανίχνευση περιγράμματος και υπέρθεσή του στην αρχική εικόνα

Όμως όπως και στην περίπτωση του αλγορίθμου ανίχνευσης ακμής και αυτή η μέθοδος υστερεί σε θέματα ακρίβειας και απόδοσης (Σχήμα 4.25). Συγκεκριμένα, η μέθοδος κατάτμησης με υφή, αστοχεί σε μεγαλύτερο βαθμό απ'ότι η μέθοδος ανίχνευσης ακμής, καθιστώντας την έτσι ως μια μη αποδεκτή λύση του προβλήματος τμηματοποίησης. Τα προβλήματα που παρουσιάζει ο αλγόριθμος, συμβαίνουν ειδικά σε εικόνες όπου τα δόντια βρίσκονται πολύ κοντά, κάνοντας έτσι αυτή την μέθοδο να αδυνατεί να τα διαχωρίσει και να τα λαμβάνει ως ένα ή να εντοπίζει ένα μέρος του περιγράμματος του δοντιού.



Σχήμα 4.25: Παραδείγματα αστοχίας της μεθόδου τμηματοποίησης υφής

4.3.5. Εφαρμογή Snake Μεθόδου

Έτσι η αναζήτηση για ένα πιο βέλτιστο αλγόριθμο που να πληρεί τις προϋποθέσεις που δόθηκαν, οδήγησε στην χρήση πιο προηγμένων τεχνικών τμηματοποίησης της εικόνας. Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε για να δοκιμαστεί στην τμηματοποίηση των δοντιών είναι η μέθοδος των snakes. Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφ.3, τα snakes παίρνουν ως είσοδο μια καμπύλη, η οποία είναι προσέγγιση του περιγράμματος του αντικειμένου και η καμπύλη αυτή αρχίζει να “εξελίσσεται” μέσω των ασκούμενων πάνω σ’ αυτήν, εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων. Η καμπύλη κινείται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει ένα συναρτησοειδές ενέργειας και όταν αυτό φτάσει στο ελάχιστό του σημαίνει ότι εντοπίστηκε το επιθυμητό περίγραμμα. Βάση αυτής της λογικής υλοποιήθηκε και ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται στα δεδομένα και ως συναρτησοειδές ενέργειας χρησιμοποιείται αυτό της σχέσης (3.18). Εξαιτίας του συναρτησοειδούς αυτού, το snake που εφαρμόζεται διαφέρει από τα κλασσικά, λόγω του ότι η ανίχνευση των αντικειμένων γίνεται βάση της επιθυμητής κατάτμησης της εικόνας αντί βάση της κλίσης της εικόνας που χρησιμοποιείται συνήθως.

Κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου, αφού επιλεγθεί το επιθυμητό δόντι και εξομαλυνθεί η εικόνα, πρέπει να δημιουργηθεί μια μάσκα η οποία ορίζει την καμπύλη που θα κινείται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιήσει την σχέση (3.18). Η μάσκα είναι δυαδική εικόνα, που αρχικά είχε το σχήμα ορθογωνίου (Σχήμα 4.26). Η τοποθέτηση της μάσκας δεν θα έπρεπε κανονικά να παίζει ιδιέταιρο ρόλο σε μια απλή επιπέδου γκρι εικόνα, γιατί αν η

μάσκα τοποθετηθεί στο εξωτερικό του επιθυμητού αντικειμένου (μεγάλο ορθογώνιο) η καμπύλη θα κινηθεί εσωτερικά, αν τοποθετηθεί στο εσωτερικό του (μικρό ορθογώνιο) θα κινηθεί εξωτερικά. Σε αυτή την περίπτωση όμως η τοποθέτησή της αποτελεί ένα ζήτημα, γιατί αν τοποθετηθεί εξωτερικά μπορεί να ανιχνεύσει και άλλα δόντια, αν τοποθετηθεί εσωτερικά μπορεί να μην ανιχνεύσει κάποιες περιοχές του εσωτερικού του δοντιού λόγω ανομοιογενειας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.28.

Λόγω της ύπαρξης ενός σταδίου μορφολογικής επεξεργασίας που υπάρχει στο τέλος του αλγορίθμου, το οποίο θα αναλυθεί στην συνέχεια, η μάσκα προτιμάται να τοποθετείται στο εσωτερικό του δοντιού.



Σχήμα 4.26: Παράδειγμα μάσκας

Στη συνέχεια το snake, εκτός από την εξομαλυμμένη εικόνα και τη μάσκα, δέχεται σαν είσοδο μια δυαδική εικόνα, η οποία είναι το αποτέλεσμα της κατωφλίωσης της εξομαλυμμένης εικόνας (Σχήμα 4.27). Το κατώφλι επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε η φωτεινότητα του εκάστοτε δοντιού να πέρνει την τιμή 1 και το υπόβαθρο τη τιμή 0. Βάση αυτής, το snake παραμορφώνει την καμπύλη στην εικόνα και ορίζει τον όρο τερματισμού του.

Συγκεκριμένα αυτή την δυαδική εικόνα χρησιμοποιεί το snake για να υπολογίσει τις σταθερές $c1$ και $c2$ στην σχέση (3.18) και κατ' επέκταση την δύναμη από την πληροφορία της εικόνας, που έλκει την καμπύλη προς τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της. Όπως παρατηρείται η κατωφλίωση δεν είναι και η ιδανικότερη αλλά αυτό αρκεί για να ληφθούν αποδεκτά αποτελέσματα.



Σχήμα 4.27: Δυαδική εικόνα του επιλεγμένου δοντιού

Έπειτα εφαρμόζεται το snake το οποίο αρχίζει να παραμορφώνει την καμπύλη και να της δίνει την επιθυμητή μορφή του περιγράμματος (Σχήμα 4.28). Επίσης το snake δέχεται στα ορίσματά του τον αριθμό των επαναλήψεών του, όπου σε κάθε επανάληψη ελαχιστοποιεί όλο και περισσότερο τη σχέση (3.18) μέχρι να φτάσει στο ελάχιστό της, όπου πλέον η καμπύλη δεν παρουσιάζει περεταίρω αλλαγές όσες περισσότερες επαναλήψεις και να πραγματοποιηθούν.



Σχήμα 4.28: Αποτέλεσμα εφαρμογής του snake

Το αποτέλεσμα του snake είναι αρκετά καλό σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθοδολογίες αλλά για να γίνει ακόμα καλύτερο και να διορθωθούν διάφορα σφάλματα, πρέπει να περάσει από ένα στάδιο επιπλέον μορφολογικής επεξεργασίας. Σε αντίθεση με τον αλγόριθμο ανίχνευσης ακμής που εφαρμόζει συστολή και διαστολή στην εικόνα, εδώ εφαρμόζεται μορφολογικό κλείσιμο και μορφολογικό άνοιγμα, για να εξαληφθούν τυχόν σφάλματα (όπως απομάκρυνση άλλων, μη επιθυμητών περιοχών που ανιχνεύθηκαν καθώς και συγχώνευση περιοχών του δοντιού που δεν ανιχνεύθηκαν). Εφαρμόζεται το άνοιγμα και το κλείσιμο, αντί της διαστολής και της συστολής, για να μην υπάρξουν οι ίδιες επιπτώσεις στο περίγραμμα των δοντιών όπως στην περίπτωση της ανίχνευσης ακμών (δηλαδή να μην αντιστοιχεί το αποτέλεσμα ακριβώς στο πραγματικό). Για την ακρίβεια επιλέγεται, ανάλογα από το αποτέλεσμα του snake, αν θα χρησιμοποιηθεί το άνοιγμα ή το κλείσιμο ή και τα δύο,

καθώς και το μέγεθος του δομικού στοιχείου που χρησιμοποιείται σε αυτά. Στην συνέχεια γίνεται χρήση και πάλι του εμβαδού, όπου όπως προαναφέρθηκε επιλέγει να αφήσει μόνο το επιθυμητό δόντι στην δυαδική εικόνα, απομακρύνοντας ανεπιθύμητα αντικείμενα από αυτή, έτσι ώστε να ανιχνευθεί μόνο το επιθυμητό περίγραμμα του δοντιού. Παράδειγμα της βελτίωσης αυτής φαίνεται στο Σχήμα 4.29. Με αυτό τον τρόπο η μέθοδος του snake εκτός από ευστάθεια αποκτά και ακρίβεια.



Σχήμα 4.29: Τελικό αποτέλεσμα της επιπλέον επεξεργασίας για βελτίωση του αποτελέσματος

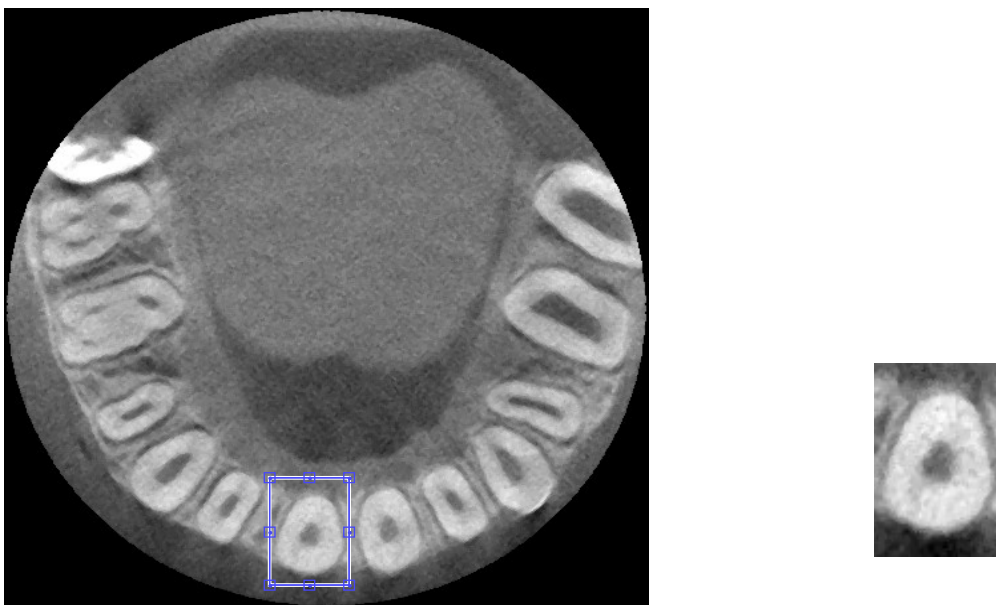
4.3.6. Προτεινόμενη Μεθόδος Τμηματοποίησης Οδοντιατρικών Δεδομένων

Από την προηγούμενη ανάλυση των μεθόδων για τμηματοποίηση οδοντιατρικών δεδομένων, φάνηκε ότι το snake δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα και άρα αποτελεί μια σίγουρη επιλογή για την ανάπτυξη του τελικού αλγορίθμου. Το μόνο πρόβλημα που παρουσιάζεται στο snake βρίσκεται στο σημείο επιλογής της μάσκας του. Όπως προαναφέρθηκε κατά την διάρκεια της ανάλυσης της snake μεθόδου, η μάσκα επιλέγεται έτσι ώστε να έχει ορθογώνιο σχήμα και αποτελεί κύριο ζήτημα η τοποθέτησή της εσωτερικά ή εξωτερικά του δοντιού (δηλαδή μεγάλο ή μικρό ορθογώνιο). Αν αυτή η μάσκα τοποθετηθεί εξωτερικά του δοντιού, λόγω του σχήματός της και της πολύ κοντινής απόστασης που έχουν τα δόντια μεταξύ τους, είναι αναπόφευκτο ότι θα ανιχνευθούν και τα περιγράμματα των άλλων δοντιών. Αν η μάσκα τοποθετηθεί εσωτερικά τότε υπάρχει πρόβλημα λόγω της ανομοιογένειας της φωτεινότητας που παρουσιάζει το δόντι στο εσωτερικό του και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κάποιες περιοχές του εσωτερικού του δοντιού να παραλείπονται και να μην ανιχνεύονται. Επίσης το μέγεθος του ορθογωνίου πρέπει να μεταβάλλεται, αφού τα μεγέθη των δοντιών είναι διαφορετικά σε κάθε εικόνα, πράγμα που κάνει αυτή την επιλογή της μάσκας να είναι ακόμα πιο δύσκολη.

Ακόμη ένα πρόβλημα που προαναφέρθηκε και αφορά την μάσκα του snake, είναι ότι η αρχικοποιημένη καμπύλη του πρέπει να βρίσκεται όσο πιο κοντά γίνεται στο προς ανίχνευση αντικείμενο για να εγκυάται ότι θα δώσει αποτελέσματα που ανήκουν σε ολικό ελάχιστο του συναρτησοειδούς ενέργειας και όχι σε τοπικό ελάχιστο.

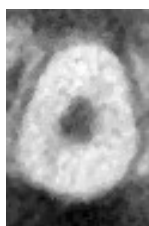
Η κεντρική ιδέα στην ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθόδου είναι, με κάποιο συνδιασμό των τεχνικών που αναπτύχθηκαν, να επιτευχθεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα κάθε φορά που εφαρμόζεται ο αλγόριθμος. Εκτός από τη μέθοδο του snake, η αμέσως επόμενη καλύτερη μέθοδος αποδείχτηκε να είναι η ανίχνευση ακμών από της προαναφερθείσες. Έτσι ο τελικός αλγόριθμος πρέπει να χρησιμοποιήσει την ανίχνευση ακμών σε συνδιασμό με το snake με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιστοποιηθεί το αποτέλεσμά του. Ο τρόπος συνδιασμού τους καθώς και τα επί μέρους στάδια της προτεινόμενης μεθόδου παρουσιάζονται στην συνέχεια αναλυτικότερα.

1) Αρχικά ο αλγόριθμος παίρνει σαν είσοδο την αρχική εικόνα και ο χρήστης επιλέγει το επιθυμητό δόντι στο οποίο θα γίνει η επεξεργασία (Σχήμα 4.30):

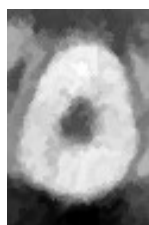


Σχήμα 4.30: Παράδειγμα επιλογής επιθυμητού δοντιού και αποκοπής του από την αρχική εικόνα

2) Όπως στις μεθόδους που αναλύθηκαν προηγουμένως, έτσι και στην προτεινόμενη μέθοδο υπάρχει ένα στάδιο προεπεξεργασίας της εικόνας, το οποίο αποτελείται από την ενίσχυση της αντίθεσής της (Σχήμα 4.31) και την εξομάλυνσή της (Σχήμα 4.32). Η ενίσχυση της αντίθεσης της εικόνας γίνεται με την χρήση των μετασχηματισμών Top-Hat και Bottom-Hat, σύμφωνα με την σχέση (3.1). Η εξομάλυνσή της επιτυγχάνεται με την εφαρμογή των ASF φίλτρων σε αυτήν.



Σχήμα 4.31: Ενίσχυση αντίθεσης της εικόνας



Σχήμα 4.32: Εξομάλυνση της εικόνας με ASF

3) Μετά από το στάδιο της ενίσχυσης της αντίθεσης και της εξομάλυνσης της εικόνας, ο αλγόριθμος προχωρά σε ένα στάδιο όπου γίνεται ανίχνευση ακμής του επιθυμητού δοντιού για την δημιουργία της βέλτιστης μάσκας που θα εφαρμοστεί στο snake. Αυτό το στάδιο ουσιαστικά συνεισφέρει στην βελτιστοποίηση της μεθόδου του snake, έτσι ώστε να εγκυάται τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα σε κάθε εφαρμογή του. Όπως αναφέρθηκε και στην μέθοδο ανίχνευσης ακμής, αρχικά γίνεται καταφλίωση του δοντιού αφού γίνει χρήση του ανοίγματος ανακατασκευής, σύμφωνα με την σχέση (4.1), έτσι ώστε το δόντι να απομονωθεί όσο καλύτερα γίνεται (Σχήμα 4.33). Στην συνέχεια εφαρμόζεται μορφολογική επεξεργασία (διαστολή και συστολή) στην δυαδική εικόνα σε συνδιασμό με την διαδικασία επιλογής του μέγιστου εμβαδού, για να παραμείνει όσο είναι δυνατόν μόνο το δόντι και να απομακρυνθούν τυχόν ανεπιθύμητα αντικείμενα που παρέμειναν μετά την καταφλίωση (Σχήμα 4.34), ώστε να μπορεί να βρεθεί η καλύτερη καμπύλη στην συνέχεια. Στο τέλος αυτού του σταδίου γίνεται ανίχνευση των ακμών με την μέθοδο Canny (Σχήμα 4.35), για να δημιουργηθεί μια πιο βελτιωμένη μάσκα (από την προηγούμενη), που θα αποτελεί την αρχικοποιημένη καμπύλη του snake.



Σχήμα 4.33: Κατωφλίωση της εικόνας, σύμφωνα με την σχέση (4.1)



Σχήμα 4.34: Επεξεργασία της εικόνας για την όσο καλύτερη απομόνωση του δοντιού γίνεται

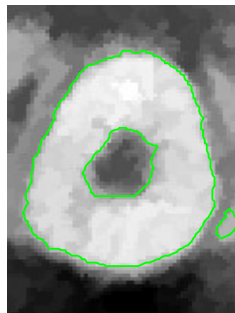


Σχήμα 4.35: Δημιουργία βέλτιστης μάσκας για το snake μέσω της ανίχνευσης ακμών

4) Στο προηγούμενο στάδιο έγινε ο υπολογισμός μιας πιο βελτιωμένης καμπύλης (αντί του ορθογωνίου), η οποία τώρα εισάγεται στο snake για να ελαχιστοποιήσει ακόμη πιο βέλτιστα την σχέση (3.18). Όπως προαναφέρθηκε το snake δέχεται ως ορίσματα την εξομαλυμμένη εικόνα (Σχήμα 4.32) πάνω στη οποία θα γίνεται η εξέλιξη της καμπύλης, την αρχικοποιημένη καμπύλη (Σχήμα 4.35) που αυτήν εξελίσει το snake, τον αριθμό επαναλήψεων του, ο οποίος επιλέγεται τόσο να μην παρουσιάζει άλλες αλλαγές σε περαιτέρω επαναλήψεις και την κατωφλιωμένη εικόνα, που όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, το snake παραμορφώνει την καμπύλη σύμφωνα με αυτή και ορίζει τον όρο τερματισμού του (Σχήμα 4.36). Έτσι το snake, αφού χρησιμοποιήσει αυτές τις παραμέτρους και ελαχιστοποιήσει στην σχέση (3.18) δίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα (Σχήμα 4.37).

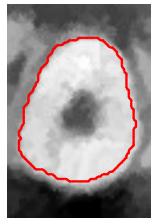


Σχήμα 4.36: Κατωφλιοποιημένη εικόνα του δοντιού



Σχήμα 4.37: Αποτέλεσμα εφαρμογής snake

5) Όμως, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.37, σε κάποιες εικόνες είναι πιθανόν να ανιχνευθούν και κάποια μικρά αντικείμενα στην εικόνα που τυγχάνουν να βρίσκονται μέσα στην μάσκα ή να μην ανιχνευθεί ακριβώς το επιθυμητό περίγραμμα, λόγω του ότι το δόντι βρίσκεται πολύ κοντά με τα άλλα. Άρα για να αντιμετωπιστούν αυτά τα θέματα και να βελτιωθεί περισσότερο το αποτέλεσμα, υπάρχει ξανά ένα στάδιο μορφολογικής επεξεργασίας, μόνο που σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζεται άνοιγμα και κλείσιμο (όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως). Στην συνέχεια γίνεται ξανά η διαδικασία επιλογής του μέγιστου εμβαδού για να απομακρυνθούν εντελώς τυχόν μικρά αντικείμενα που μπορεί να παραμείνουν μετά την μορφολογική επεξεργασία. Μετά και από την τελική επεξεργασία, ο αλγόριθμος δίνει το τελικό του αποτέλεσμα (Σχήμα 4.38).



Σχήμα 4.38: Τελικό αποτέλεσμα αλγορίθμου

Για να αποδειχτεί η αποδοτικότητα του αλγορίθμου, στην συνέχεια παρατίθεται ένα ακόμη πιο απαιτητικό παράδειγμα τμηματοποίησης (Σχήμα 4.39), όπου τα δόντια βρίσκονται πάρα πολύ κοντά μεταξύ τους, κάνοντας έτσι την τμηματοποίηση πολύ πιο δύσκολη.



(α)



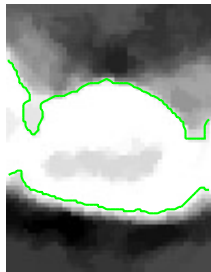
(β)



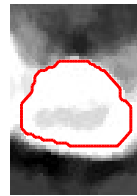
(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Σχήμα 4.39: Παράδειγμα αποδοτικότητας αλγορίθμου
(α) Αρχική εικόνα, (β) Αποτέλεσμα προεπεξεργασίας της εικόνας,
(γ) Εύρεση βέλτιστης μάσκας για το snake, (δ) Κατωφλιωμένη εικόνα για το snake,
(ε) Αποτέλεσμα εφαρμογής του snake, (στ) Τελικό αποτέλεσμα αλγορίθμου

Μέχρι τώρα αποδείχτηκε η ακρίβεια του αλγορίθμου, αφού δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα ακόμη και σε δύσκολες εικόνες. Όσον αφορά την ευστάθειά του, όσες φορές και να επαναληφθεί ο αλγόριθμος δίνει τα ίδια αποτελέσματα και δεν επηρεάζεται από το τμήμα της τομής του δοντιού που λαμβάνεται (σε αντίθεση με την μέθοδο watershed). Άρα όσον αφορά θέματα ευστάθειας, ο αλγόριθμος είναι αρκετά ευσταθής. Σε θέματα αυτοματοποίησης υπάρχει ένα πρόβλημα, αφού υπάρχουν πολλές παράμετροι που μεταβάλλονται σε κάθε εικόνα συνεχώς, τις οποίες καλείται ο χρήστης να χειρίζεται. Έτσι πρέπει να γίνει αυτοματοποίηση των περισσότερων παραμέτρων για να μπορεί ο χρήστης να εφαρμόζει τον αλγόριθμο, χωρίς να έχει ιδιαίτερες γνώσεις του τί γίνεται σε αυτόν. Ο βασικός στόχος τώρα είναι ο χρήστης να χειρίζεται όσο το δυνατό πιο λίγες παραμέτρους, για να είναι η μεθοδολογία πιο εύχρηστη και πιο ευέλικτη.

Οι παράμετροι που επιλέγεται η τιμή τους χειροκίνητα μέχρι τώρα είναι:

- η τιμή της κλίμακας του ASF φίλτρου (δηλαδή αριθμός επαναλήψεων των ανοιγμάτων ανακατασκευής και κλεισιμάτων ανακατασκευής)
- η επιλογή του κατωφλίου στο στάδιο (3) όπου χρησιμοποιείται η σχέση (4.1)
- το μέγεθος των δομικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στη διαστολή και στη συστολή κατά την μορφολογική επεξεργασία του δοντιού στο στάδιο (3)
- το επίπεδο του κατωφλίου για την δημιουργία της κατωφλιωμένης εικόνας που λαμβάνει ως όρισμα το snake στο στάδιο (4)
- ο αριθμός επαναλήψεων του snake
- τέλος ανάλογα από το αποτέλεσμα να γίνει χρήση του ανοίγματος ή του κλεισίματος ή και των δύο (με επιλεγμένη σειρά εφαρμογής), καθώς και επιλογή του μεγέθους του δομικού στοιχείου που χρησιμοποιείται σε αυτά

(i) Μετά από δοκιμές, η τιμή της κλίμακας του ASF φίλτρου αποδείχτηκε να είναι ικανοποιητική σε όλες τις εικόνες όταν $t = 2$.

(ii) Η επιλογή του κατωφλίου στο στάδιο (3) λαμβάνεται ως:

$$\text{threshold} = h/4 \quad (4.3)$$

όπου το h είναι η μέγιστη τιμή της φωτεινότητας της εκάστοτε εικόνας

(iii) Κατά την επιλογή του μεγέθους των δομικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην μορφολογική επεξεργασία του σταδίου (3), λόγω του ότι το snake χρειάζεται μια προσέγγιση της επιθυμητής καμπύλης και όχι κατ' ανάγκη την ίδια, αποφασίστηκε να δοθούν σε αυτά δύο σταθερές τιμές, οι οποίες δίνουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα στις περισσότερες εικόνες. Έτσι η συστολή χρησιμοποιεί ως δομικό στοιχείο ένα δίσκο ακτίνας $r = 2$ και η διαστολή εφαρμόζει ένα δίσκο ακτίνας $r = 1$.

(iv) Το κατώφλι που εφαρμόζεται για την δημιουργία της δυαδικής εικόνας του snake επιλέγεται ως:

$$\text{threshold} = (h + h')/3 \quad (4.4)$$

όπου το h είναι η μέγιστη τιμή της φωτεινότητας της κάθε εικόνας και το h' είναι η ελάχιστη από τις μέγιστες τιμές της φωτεινότητας της κάθε εικόνας

Όμως σε δύσκολες εικόνες όπως αυτή που δόθηκε στο παράδειγμα στο Σχήμα 4.39, η επιλογή του κατωφλίου μπορεί να χρειαστεί να γίνει χειροκίνητα ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα του αλγορίθμου.

(v) Ο αριθμός των επαναλήψεων του snake επιλέγεται αρκετά μεγάλος, ώστε ο αλγόριθμος να δίνει σίγουρα το βέλτιστο αποτέλεσμα σε όλες τις εικόνες.

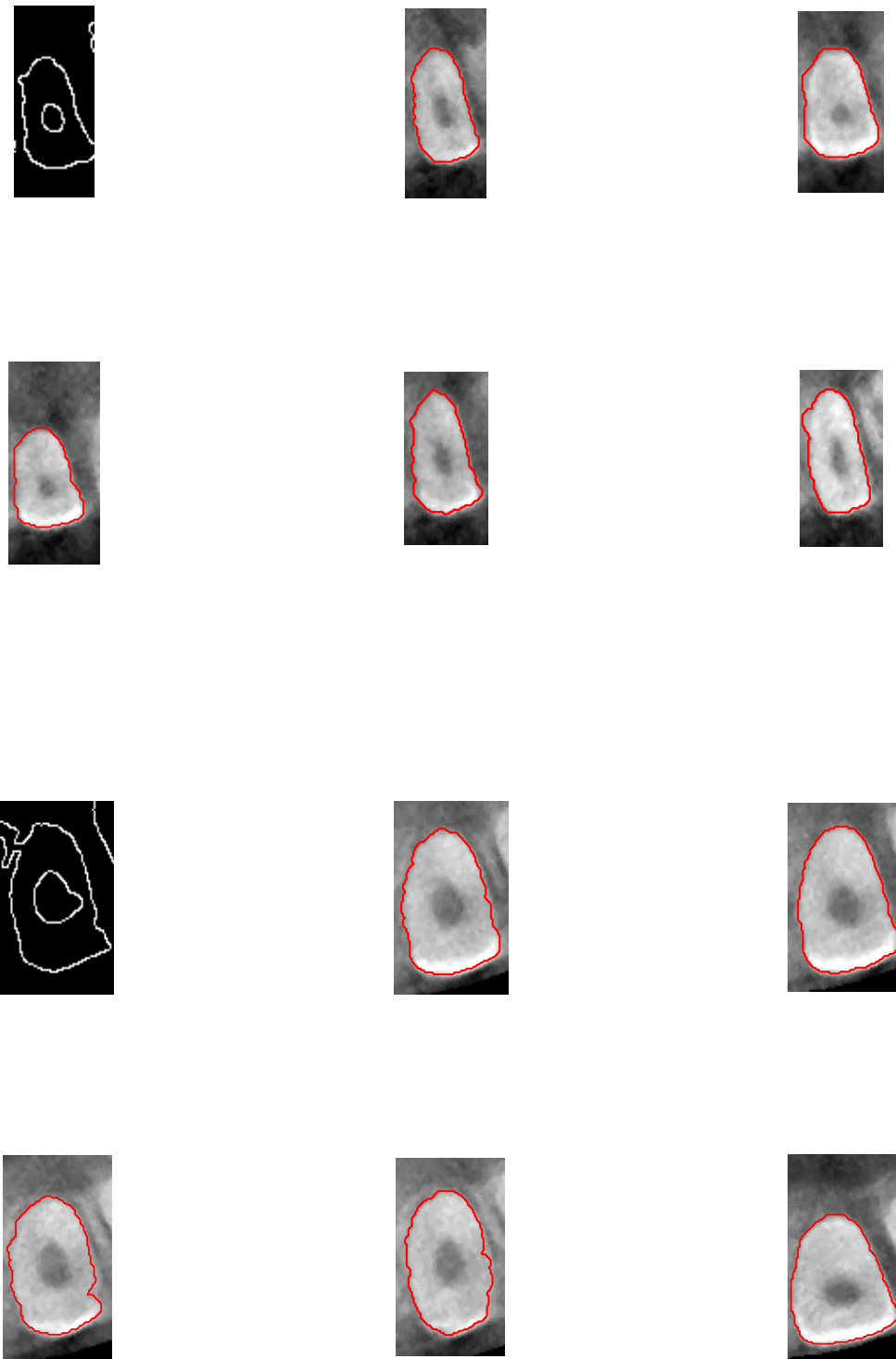
(vi) Όσον αφορά τη επιλογή της χρήσης του ανοίγματος ή/και του κλεισίματος στο αποτέλεσμα του snake, την επιλογή του μεγέθους των δομικών τους στοιχείων, καθώς και την σειρά εφαρμογής τους, αφήνονται να επιλεγούν από το χρήστη. Αυτό γίνεται γιατί το κάθε αποτέλεσμα του snake είναι μοναδικό και χρειάζεται εντελώς διαφορετική ή και καθόλου επεξεργασία για να αποκτηθεί το επιθυμητό περίγραμμα. Έτσι η αυτοματοποίηση του αλγορίθμου έχει επιτευχθεί μέχρι ενός σημείου, πράγμα που τον καθιστά πολύ πιο εύχρηστο απ'ότι ήταν προηγουμένως.

Άρα ο αλγόριθμος ικανοποιεί αρκετά καλά τις τρεις απαιτήσεις που δόθηκαν στη αρχή του κεφαλαίου, δηλαδή να είναι ακριβής, ευσταθής και αυτοματοποιημένος. Ένα άλλο θέμα που συζητήθηκε μετά από αυτά, είναι η μείωση της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου αφού πολλές τεχνικές εφαρμόζονται σε κάθε εικόνα, έτσι ώστε να γίνεται υπολογιστικά πιο δύσχρηστος. Αφού το snake και η προεπεξεργασία της εικόνας είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του περιγράμματος του κάθε δοντιού, πρέπει να παραμείνουν ως έχουν. Έτσι η προσοχή στράφηκε προς το στάδιο υπολογισμού της αρχικοποιημένης καμπύλης του snake.

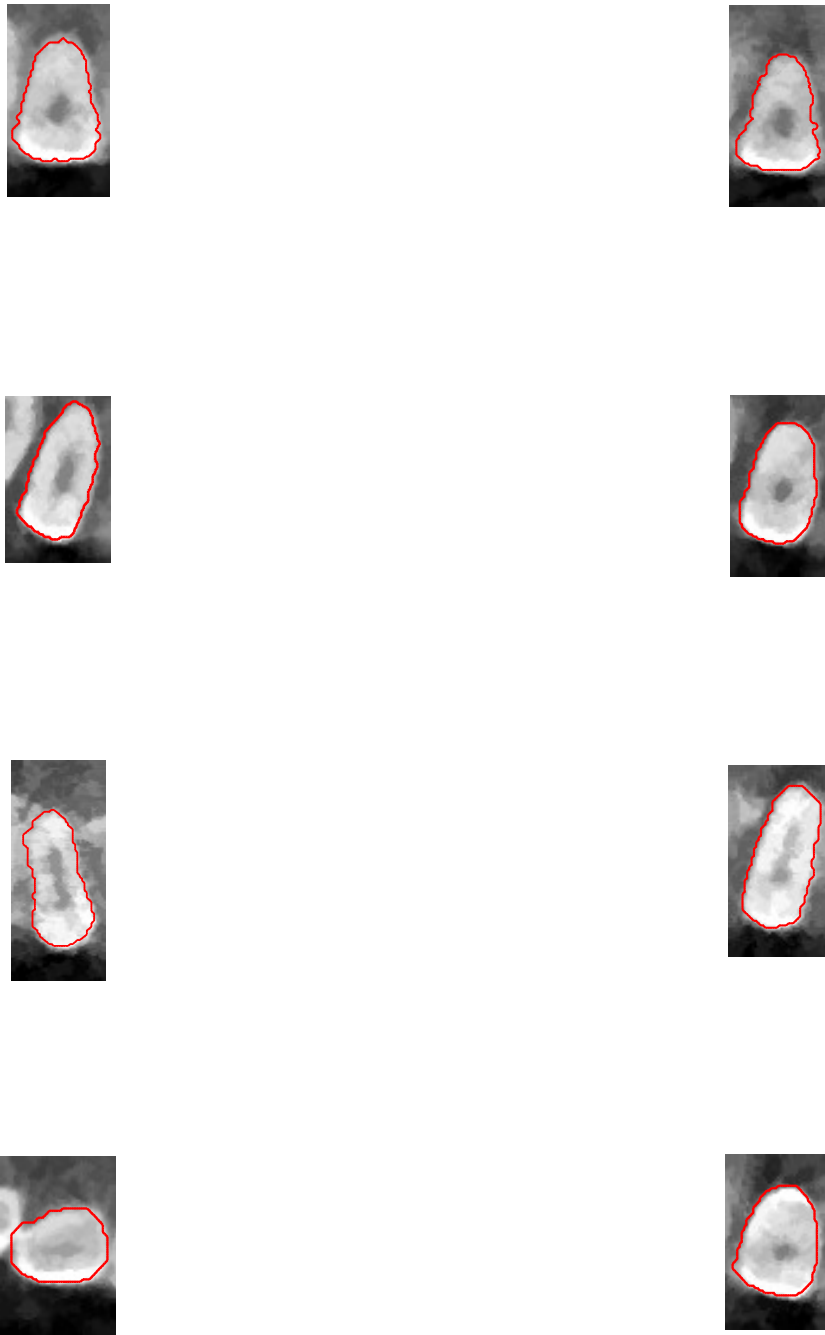
Παρατηρήθηκε ότι το snake δεν χρειάζεται ακριβώς την καμπύλη, αλλά μια προσέγγισή της είναι αρκετή για να δώσει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Επίσης παρατηρήθηκε ότι για αρκετές διαδοχικές εικόνες τα δόντια απλά αλλάζουν λίγο το σχήμα τους και το μέγεθός τους. Άρα ο υπολογισμός της καμπύλης ενός δοντιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς ως καμπύλη αρχικοποίησης και σε άλλες εικόνες, φτάνει να μην αλλάζει τελείως το μέγεθος και το σχήμα του επιθυμητού δοντιού.

Έτσι μπορούν να επιλεγθούν και να υπολογιστούν ορισμένες σταθερές μάσκες και ανάλογα από την εικόνα να χρησιμοποιείται η κατάλληλη ή να γίνεται ο υπολογισμός της καμπύλης ενός δοντιού και στα υπόλοιπα να εφαρμόζεται η ίδια καμπύλη. Παραδείγματα της χρήσης κοινής αρχικοποιημένης καμπύλης σε διάφορες “γειτονικές” εικόνες, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.40.

Έπειτα ο αλγόριθμος εφαρμόζεται στα δεδομένα τεσσάρων ασθενών των οποίων υπάρχουν εικόνες πριν και μετά την εγχείρηση. Αυτό έγινε για να δοκιμαστεί η απόδοση του αλγορίθμου. Αφού εφαρμόστηκε σε όλα τα δεδομένα (Σχήμα 4.41), αποδείχτηκε ότι ανταποκρίνεται εξίσου καλά σε όλες τις εικόνες.



Σχήμα 4.40: Εφαρμογή κοινής αρχικοποιημένης καμπύλης σε άλλες “γειτονικές” εικόνες



Σχήμα 4.41: Αποτελέσματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου στα δεδομένα τεσσάρων ασθενών πριν και μετά την εγχείρηση

4.4. Σχόλια Αποτελεσμάτων

Από την εφαρμογή των διάφορων μεθόδων παρατηρούνται από τα αποτελέσματά τους τα εξής:

- 1) Η watershed κατάτμηση είναι αρκετά ακριβής, λόγω του ότι η εικόνα παρουσιάζεται ως τοπογραφικό τοπίο το οποίο πλυμμηρίζει και έτσι υπολογίζεται αρκετά καλά το επιθυμητό περίγραμμα. Όμως αυτό είναι και το μειονέκτημά της, γιατί κάθε φορά που επιλέγεται ένα δόντι, επειδή η τομή που γίνεται δεν πάντα η ίδια, η τοπογραφία της εικόνας αλλάζει και αυτό συνεπάγεται ότι αλλάζει και το αποτέλεσμα της. Άρα η μέθοδος αυτή υστερεί πολύ σε θέματα ευστάθειας.
- 2) Η μέθοδος ανίχνευσης ακμής είναι μια πολύ πιο ευσταθής μέθοδος, αφού σε αντίθεση με την watershed μέθοδο, το αποτέλεσμα της δεν εξαρτάται από το τμήμα αποκοπής του επιθυμητού δοντιού. Όμως αυτή η μέθοδος υποφέρει από προβλήματα ακρίβειας και απόδοσης, λόγω του ότι η ανίχνευση του δοντιού βασίζεται στην φωτεινότητα της εικόνας. Έτσι ειδικά σε εικόνες όπου το επιλεγμένο δόντι βρίσκεται πολύ κοντά σε άλλα, αστοχεί εντελώς από το επιθυμητό αποτέλεσμα.
- 3) Η τμηματοποίηση με υφή είναι επίσης μια ευσταθής μέθοδος, αλλά πάσχει από πολύ σοβαρά προβλήματα ακρίβειας ειδικά σε εικόνες όπου τα δόντια είναι κοντά το ένα στο άλλο. Βασικά η αποδοσή της είναι χαμηλότερη από αυτή της μεθόδου ανίχνευσης ακμής, πράγμα που την καθιστά ως μια εντελώς μη αποδεκτή λύση για το πρόβλημα της τμηματοποίησης οδοντιατρικών δεδομένων.
- 4) Η μέθοδος του snake είναι η καλύτερη απ'όλες γιατί συνδιάζει ευστάθεια και ακρίβεια και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίηση του κύριου αλγορίθμου. Το μόνο μειονέκτημα που παρουσίαζε αυτή η μέθοδος βρισκόταν στο σημείο της δημιουργίας της αρχικοποιημένης καμπύλης. Συγκεκριμένα το ορθογώνιο που χρησιμοποιούσε ως μάσκα δεν έδινε πάντα το βέλτιστο αποτέλεσμα, αφού ήταν πολύ πιθανόν να δώσει αποτέλεσμα που αντιστοιχεί σε τοπικό ελάχιστο αντί σε ολικό ελάχιστο της ενέργειας.

Για την αντιμετώπιση του μειονεκτήματος του snake και την υλοποίηση του αλγορίθμου της προτεινόμενης μεθόδου, η ανίχνευση ακμών (η οποία είναι η αμέσως καλύτερη μέθοδος μετά το snake) χρησιμοποιείται ως η μέθοδος υπολογισμού μιας πιο βελτιωμένης καμπύλης που θα εφαρμόζει το snake για αρχικοποίηση. Με αυτό τον τρόπο ο τελικός αλγόριθμος, εκτός από την ευστάθεια που έχει εξαιτίας του snake, αποκτά και μεγαλύτερη ακρίβεια και απόδοση, καθιστώντας τον κατάλληλο για την ανίχνευση δοντιών. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αντίθεση με το ορθογώνιο που χρησιμοποιούσε το snake, τώρα με την χρήση της καμπύλης, η περίπτωση η προτεινόμενη μέθοδος να δώσει αποτέλεσμα που ανήκει σε τοπικό ελάχιστο του συναρτησοειδούς ενέργειας, σχεδόν εξαλείφεται.

Όσον αφορά την ευστάθεια της προτεινόμενης μεθόδου, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε ορισμένες εικόνες όπου τα δόντια βρίσκονται πάρα πολύ κοντά, αυτή ταλαντεύεται (ανάλογα με την τομή που λαμβάνεται κάθε φορά), αλλά δεν είναι σε τόσο βαθμό που να αποτελεί μειονέκτημα, γιατί ειδικά σε αυτές τις εικόνες ο αλγόριθμός της είναι πιο ευσταθής απ' όλες τις προαναφερθείσες μεθόδους. Εκτός από ακρίβεια και ευστάθεια, ο αλγόριθμος συνδιάζει και αυτοματοποίηση (μέχρι ενός βαθμού), έτσι ώστε η χρήση του να μην απαιτεί ιδιέταιρες γνώσεις του αντικειμένου και με αυτό τον τρόπο να γίνεται πιο προσιτός από τον χρήστη.

Η υλοποίηση του αλγορίθμου έγινε σε Matlab και C#.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα Τμηματοποίησης Οδοντιατρικών Δεδομένων

5.1. Συμπεράσματα

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, μέσα από διάφορες μεθόδους που αναλύθηκαν (ανίχνευση ακμών, watershed κατάτμηση, κατάτμηση με υφή και snakes), είναι εφικτή η δημιουργία ενός αλγορίθμου ο οποίος μπορεί να εκπληρώνει τον σκοπό αυτής της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή να αναπτυχθεί μια ολοκληρωμένη μέθοδος τμηματοποίησης που να μπορεί να τμηματοποιήσει επιτυχώς οδοντιατρικά δεδομένα. Ο αλγόριθμος αυτός πληρεί αρκετά καλά τις απαιτήσεις που δώθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου 3:

- (1) Ακρίβεια: Με τον συνδιασμό του snake και την ανίχνευση ακμών, ο αλγόριθμος δίνει αποτελέσματα τα οποία σε αρκετές εικόνες φτάνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα και σε κάποιες είναι όσο πιο κοντά σε αυτό γίνεται. Αυτό οφείλεται στην κατάλληλη προεπεξεργασία της εικόνας, την αποδοτικότητα του snake και στην βέλτιστη αρχικοποιημένη καμπύλη που δίνει η ανίχνευση ακμών. Επίσης, όπως αποδείχτηκε ο αλγόριθμος εφαρμόζεται με επιτυχία σε όλα τα δεδομένα.

- (2) Αυτοματοποίηση: Ο αλγόριθμος ελαχιστοποίησε τις παραμέτρους που δέχεται, από έξι σε μία ή και δύο, εάν σε πολύ απαιτητικές εικόνες χρειαστεί να μεταβάλει το προκαθορισμένο κατώφλι της δυαδικής εικόνας που λαμβάνεται ως όρισμα από το snake, για να ληφθούν καλύτερα αποτελέσματα. Άρα αυτή η ελαχιστοποίηση έκανε πιο εύκολη την χρήση του αλγορίθμου από χρήστες που δεν είναι απαραίτητα και γνώστες του αντικειμένου.
- (3) Ευστάθεια: Ο αλγόριθμος δίνει τα ίδια αποτελέσματα όσες φορές και να χρησιμοποιηθεί στην ίδια εικόνα, πράγμα που αποδεικνύει την ευστάθειά του. Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχει περίπτωση μόνο σε εικόνες όπου τα δόντια βρίσκονται πάρα πολύ κοντά μεταξύ τους, το αποτέλεσμα να είναι λίγο διαφορετικό σε κάθε τομή που επαναλαμβάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί λόγω τις πολύ κοντινής απόστασης των δοντιών (που πρακτικά είναι κολλητά), σε κάθε τομή αναγκαστικά κόβονται και τα διπλανά δόντια με αποτέλεσμα, ανάλογα από την τομή να χρειάζεται διαφορετική μορφολογική επεξεργασία στο αποτέλεσμα του snake.

Τα κύρια βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος για την επιτυχή κατάτμηση των οδοντιατρικών δεδομένων είναι: (α) Ενίσχυση της αντίθεσης της επιθυμητής εικόνας, (β) Εξομάλυνση της εικόνας, (γ) Ανίχνευση ακμής του επιθυμητού δοντιού για την δημιουργία της καμπύλης αρχικοποίησης του snake, (δ) Εφαρμογή μεθόδου snake, (ε) Επεξεργασία αποτελέσματος snake για απόκτηση του επιθυμητού αποτελέσματος.

Γενικά συμπεραίνεται ότι ο αλγόριθμος, ο οποίος αναλύθηκε εκτενώς πιο πάνω, αποτελεί την καλύτερη λύση για την τμηματοποίηση των δοντιών, αφού τα αποτελέσματά που δίνει είναι με μεγάλη διαφορά τα καλύτερα που μπορούσαν να επιτευχθούν με την χρήση των μεθόδων που συζητήθηκαν.

5.2. Μελλοντική Επισκόπηση

Μελλοντικά ο αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα μέρος ενός πιο μεγάλου προγράμματος επεξεργασίας εικόνας. Στο λογισμικό αυτού του προγράμματος θα υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της χρήσης αυτού του αλγορίθμου για τον βέλτιστο εντοπισμό του περιγράμματος του επιθυμητού αντικειμένου, το οποίο θα πρέπει να επιλέγεται από τον χρήστη και να αποκόπτεται από την εικόνα. Επίσης θα πρέπει να υπάρχουν διαδραστικά κουμπιά επιλογής της χρήσης του ανοίγματος ή/και του κλεισίματος, καθώς και επιλογής του δομικού στοιχείου που πρέπει να χρησιμοποιούν. Συγκεκριμένα θα πρέπει να υπάρχει επιλογή του είδους και του μεγέθους του δομικού στοιχείου, που το άνοιγμα και το κλείσιμο εφαρμόζουν αντίστοιχα και αν κάποιο από αυτά δεν θα χρησιμοποιηθεί, ο χρήστης τότε θα του βάζει απλά την τιμή μηδέν στο δομικό του στοιχείο. Κανονικά θα πρέπει να υπάρχει και δυνατότητα επιλογής όσον αφορά τη σειρά εφαρμογής του ανοίγματος και του κλεισίματος, γιατί διαφορετική σειρά εφαρμογής δίνει διαφορετικά αποτελέσματα. Επίσης, για λόγους πληρότητας, θα πρέπει να υπάρχει ακόμα μια παράμετρος που αντιστοιχεί στο κατώφλι της δυαδικής εικόνας των ορισμάτων του snake, η οποία θα είναι συνήθως προεπιλεγμένη στην επιλογή default (όπου η τιμή της υπολογίζεται αυτόματα από τον αλγόριθμο) και αν χρειαστεί ο χρήστης, σε πολύ απαιτητικές εικόνες (όπως εικόνες με δόντια πάρα πολύ

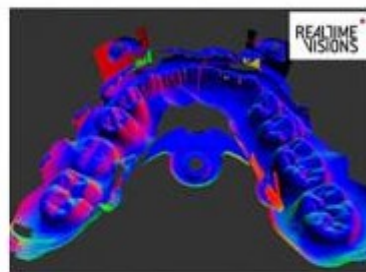
κοντινά ή με πολύ θόρυβο ή με απότομη αλλαγή της φωτεινότητας των δοντιών), να το μεταβάλλει για καλύτερα αποτελέσματα, θα μπορεί να επιλέξει να βάλει ο ίδιος μια τιμή.

Μέσω της επιτυχής τμηματοποίησης των οδοντιατρικών δεδομένων, ο αλγόριθμος θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στη 3D τμηματοποίηση των δοντιών. Για να γίνει αυτό εφικτό, πρέπει καταρχάς να γίνει κατάλληλη κατάτμηση του επιθυμητού δοντιού σε όλες τις 2D εικόνες στις οποίες υπάρχει το δόντι. Έπειτα, λαμβάνοντας όλα τα περιγράμματα του δοντιού, είναι δυνατός ο συνδυασμός τους για την δημιουργία τρισδιάστατης αναπαράστασης του δοντιού. Άρα η 3D τμηματοποίηση μπορεί να γίνει έμμεσα μέσω της 2D τμηματοποίησης και μέσω του συνδιασμού των περιγραμμάτων όλων των επιπέδων. Απλά παραδείγματα 3D τμηματοποίησης, μέσω 2D τμηματοποίησης με την χρήση του αλγορίθμου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.43. Με την χρήση καλύτερων προγραμμάτων τρισδιάστατης παρουσίασης θα μπορούν να επιτευχθούν πολύ πιο καλύτερες 3D αναπαραστάσεις των δοντιών.

Η χρήση αυτού του αλγορίθμου για την δημιουργία 3D μοντέλου του επιθυμητού δοντιού θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως σε διάφορες εφαρμογές στην οδοντιατρική. Το μοντέλο αυτό μπορεί να δώσει πολύ σημαντικές πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του επιθυμητού δοντιού τα οποία δεν φαίνονται εύκολα με το μάτι ή μέσω των CBCT εικόνων. Άρα με την γνώση που λαμβάνεται από το 3D μοντέλο, είναι δυνατό να γίνει σχεδιασμός ενός πλάνου θεραπείας ή ακόμη και να καθοδηγηθούν διάφορες χειρουργικές επεμβάσεις, όπως στην ορθοδοντική, στην χειρουργική, στην τοποθέτηση οδοντικών εμφυτευμάτων κ.α. Επίσης είναι δυνατή και η διάγνωση διάφορων ασθένειων των δοντιών χωρίς να χρειάζεται να γίνει βιοψία. Επιπλέον μέσα από την τμηματοποίηση των δοντιών και την 3D αναπαράστασή τους θα είναι δυνατή η δημιουργία εικονικών οδοντιατρικών αρθρωτήρων, αφού μόνο μηχανικοί αρθρωτήρες εφαρμόζονται ως τώρα στην οδοντιατρική (Σχήμα 4.42). Η ανάγκη της δημιουργίας των εικονικών αρθρωτήρων είναι λόγω του ότι οι μηχανικοί έχουν μικρό αριθμό βαθμών ελευθερίας, είναι λιγότερο ευέλικτοι και λιγότερο βολικοί. Έτσι οι εικονικοί αρθρωτήρες θα χρησιμοποιούνται πιο αποτελεσματικά στην κατασκευή και τη δοκιμή των αφαιρούμενων προσθετικών συσκευών (οδοντοστοιχίες), στις σταθερές προσθετικές αποκαταστάσεις (π.χ γέφυρες) και στις ορθοδοντικές συσκευές.

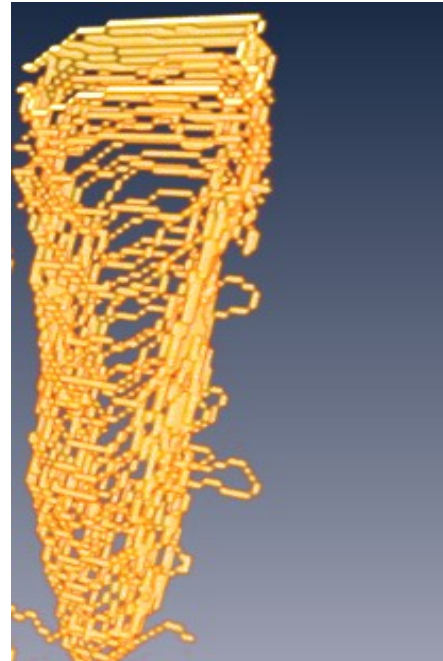
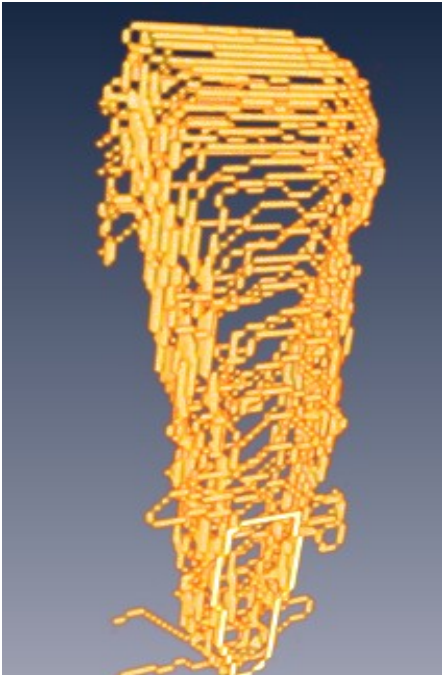


(α)



(β)

Σχήμα 4.42: (α) Μηχανικός αρθρωτήρας ,(β) Εικονικός αρθρωτήρας



Σχήμα 4.43: 3D παρουσίαση δοντιών μέσω 2D τμηματοποίησης με την χρήση του αλγορίθμου

Βιβλιογραφία

- [1] P. Maragos Image Analysis and Computer Vision Chapters 7,8,9,10,12,13,17,18
- [2] Image segmentation. (n.d.). Ανάκτηση May 9, 2013, από University of Wisconsin Madison: <http://pages.cs.wisc.edu/~dyer/cs766/slides/segmentation/segment-4up.pdf>
- [3] Jianbo Shi and Jitendra Malik (August 2000). Normalized Cuts and Image Segmentation. IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, Vol. 22, No. 8
- [4] Md. Shakowat Zaman Saker, Tan Wooi Haw and Rajasvaran Logeswaran. Morphological based technique for image segmentation. International Journal of Information Technology, Vol. 14, No.1
- [5] Krishnan Nallaperumal, Krishnaveni. K. A Multiscale Morphological Watershed Segmentation using Color Composite Gradient and Marker Extraction. INTERNATIONAL JOURNAL OF IMAGING SCIENCE AND ENGINEERING (IJISE)
- [6] Scott T. Acton and Nilanjan Ray. BIOMEDICAL IMAGE ANALYSIS: TRACKING
- [7] Tony F. Chan and Luminita A. Vese (February 2001). Active Contours Without Edges. IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, Vol. 10, No. 2
- [8] Chenyang Xu, Anthony Yezzi Jr. and Jerry L. Prince (October 2000). On the Relationship between Parametric and Geometric Active Contours. In Proc. Of 34th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, pp. 483-489
- [9] Chenyang Xu and Jerry L. Prince (March 1998). Snakes, Shapes, and Gradient Vector Flow. IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, Vol.7, No. 3
- [10] Jitendra Malik, Serge Belongie, Thomas Leung and Jianbo Shi (February 2001). Contour and Texture Analysis for Image Segmentation. International Journal of Computer Vision 43(1)
- [11] Junqing Chen, Thrasyvoulos N. Pappas, Aleksandra Mojsilovic and Bernice E. Rogowitz (October 2005). Adaptive Perceptual Color-Texture Image Segmentation. IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, Vol. 14, No. 10
- [12] Kanchan S. Deshmukh. Texture Image Segmentation using FCM. IPCSIT Vol. 25 (2012)
- [13] Slovak University of Technology in Bratislava Faculty of Informatics and Information Technologies. Digital Image Processing Lecture Morphological processing Recap & Extend

- [14] Technical University of Cluj-Napoca, Computer Science Department. Image Processing-Laboratory 7: Morphological operations on binary images
- [15] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, and Steven L. Eddins. Morphological Reconstruction. Digital Image Processing Using MATLAB
- [16] Luc Vincent (April 1993). Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms. IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, Vol. 2, No. 2, pp. 176-201
- [17] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Digital Image Processing, 3rd Edition
- [18] Κωνσταντίνα Νικήτα. Στοιχεία Επεξεργασίας Ιατρικών Εικόνων.
- [19] Bassam Hassan. Applications of Cone Beam Computed Tomography in Orthodontics and Endodontics.
- [20] Jiwanasha Manish Agrawal, Manish Suresh Agrawal, Lalita Girish Nanjannawar and Anita D. Parushetti. CBCT in Orthodontics: The Wave of Future. The Journal of Contemporary Dental Practice.
- [21] Dr. Vishwanath A. E., Dr. Sadesh Spai, Dr. Nandini S. Nelivegi and Dr. Neelima Anand. CBCT – An Advanced Diagnostic Tool for Orthodontics and Other Specialties in Dentistry – A Systematic Review
- [22] Tony F. Chan and Luminita A. Vese (2001). Active Contours Without Edges. IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, Vol. 10, No. 2