TEXNETSON TO BE NOT TO BE

Εθνικό Μετσοβίο Πολυτέχνειο

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Επικοινώνιων, Ηλέκτρονικής Και Συστημάτων Πληροφορικής

Εξαγωγή Γεωμετρικής Πληροφορίας από Απεικονίσεις με Φθορά και Θόρυβο: Ειδικές Εφαρμογές στην Αρχαιολογία και την Ιατρική

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Άγγελος-Σαβέριος Σ. Σκέμπρης

Αθήνα, Δεκέμβριος 2012

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

LON PONE WAS TO STATE OF THE PARTY OF THE PA

Εθνικό Μετσοβίο Πολυτέχνειο

Σχολή Ηλέκτρολογων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογίστων

Τομέας Επικοινώνιων, Ηλέκτρονικής Και Συστημάτων Πληροφορικής

Εξαγωγή Γεωμετρικής Πληροφορίας από Απεικονίσεις με Φθορά και Θόρυβο: Ειδικές Εφαρμογές στην Αρχαιολογία και την Ιατρική

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΓΓΕΛΟΣ-ΣΑΒΕΡΙΟΣ ΣΚΕΜΠΡΗΣ

Συμβουλευτική Επιτροπή: Η. Κουκούτσης

Ε. Καγιάφας

Δ. Κουτσούρης

Εγκρίθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή την 19^η Δεκεμβρίου 2012

 Η. Κουκούτσης Επικ. Καθηγητής	Ελ. Καγιάφας Καθηγητής ΕΜΠ	Δ. Κουτσούρης Καθηγητής ΕΜΠ
 Β. Λούμος Καθηγητής ΕΜΠ	 Κ. Παπαοδυσσεύς Αναπλ. Καθ. ΕΜΠ	 ΜΠ. Ιωαννίδου Καθηγήτρια ΕΜΠ
	 Χ. Αναγνωστόπουλος Επικ. Καθηγητής Πανεπιστήμιο Αιγαίου	

Αθήνα, Δεκέμβριος 2012

(Υπογραφή)

.....

ΑΓΓΕΛΟΣ-ΣΑΒΕΡΙΟΣ Σ. ΣΚΕΜΠΡΗΣ

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

Copyright © 2012 Άγγελος-Σαβέριος Σ. Σκέμπρης (Συγγραφέας)

Copyright © 2012 Ηλίας Κουκούτσης

Copyright © 2012 Κωνσταντίνος Παπαοδυσσεύς

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 τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Περίληψη

Η διατριβή αυτή απαρτίζεται από δύο μέρη.

Στην πρώτη ενότητα, μελετάται η περαιτέρω ανάπτυξη ενός αλγορίθμου αυτόματης ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων με βάση το περίγραμμα των κομματιών του θραυσμένου αντικειμένου. Ο αλγόριθμος αυτός αναπτύχθηκε από τους Κ. Παπαοδυσσέα, Α. Παναγόπουλο, Μ. Έξαρχο, Κ. Τριανταφύλλου, Δ. Φραγκούλη και Δ. Ντούμα και δημοσιεύτηκε στο διεθνές περιοδικό IEEE Trans. On Signal Processing το 2002 (IEEE Trans. On Signal Processing, 50 (6), 1277-1288, 2002, by Papaodysseus C., Panagopoulos Th., Exarhos M., Triantafillou C., Fragoulis D., Doumas C.). Η περαιτέρω ανάπτυξη του αλγορίθμου αφορά την διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης του χρωματικού και του θεματικού περιεχομένου των κομματιών που αποτελούν το θραυσμένο αντικείμενο (θραυσμάτων ή κονιαμάτων), με σκοπό την επιβεβαίωση ή απόρριψη προτάσεων συνενώσεων θραυσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή της αρχικής μορφής του αλγορίθμου ανακατασκευής της εικόνας. Στην αρχική μορφή του αλγορίθμου ανακατασκευής γίνεται χρήση μόνο της πληροφορίας που προκύπτει από το περίγραμμα των θραυσμάτων. Ο βελτιωμένος αλγόριθμος εφαρμόστηκε αρχικά στην ανακατασκευή ενός απλού εμπορικού παιχνιδιού ανακατασκευής εικόνας (puzzle), ώστε να διερευνηθεί σε θεωρητικό επίπεδο η αποτελεσματικότητά του σε άριστης ποιότητας εικόνα και σε θραύσματα που δεν έχουν υποστεί αλλοίωση του σχήματος τους λόγω καταπόνησης και ηλικιακής φθοράς. Στη συνέχεια, έγινε εφαρμογή του βελτιωμένου αλγορίθμου στην πραγματική περίπτωση της ανακατασκευής των θραυσμένων τοιχογραφιών που ευρέθησαν στην αρχαιολογική ανασκαφή στο Ακρωτήρι της Σαντορίνης.

Στη δεύτερη ενότητα της διατριβής, περιγράφεται η δυνατότητα εφαρμογής τεχνικών κατάτμησης εικόνας (image segmentation) σε ακτινογραφίες (οι οποίες είναι εικόνες ιδιαίτερα χαμηλής ποιότητας), με σκοπό τον σαφή προσδιορισμό της απεικονισθείσας προβολής ενός ειδικού ήλου ή, απλά, καρφιού, το οποίο είναι κατασκευασμένο από ειδικό, ελαφρά εύκαμπτο κράμα τιτανίου και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα συχνά στις εγχειρίσεις κλειστών ενδομυελικών ηλώσεων. Οι συγκεκριμένες χειρουργικές επεμβάσεις προτιμώνται στις εγχειρίσεις αποκατάστασης μακρών, θραυσμένων οστών (μηρών, βραχιόνων, κλπ). Με χρήση τεχνικών αναγνώρισης σχημάτων και προτύπων, εξήχθη η μέγιστη δυνατή χρήσιμη πληροφορία από την προβολή των καρφιών αυτού στην ακτινογραφική εικόνα. Η πληροφορία χρησιμοποιείται, στη συνέχεια, για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης και του σχήματος του ήλου, καθώς και του προσανατολισμού του ήλου σε σχέση με το θραυσμένο οστούν, στο εσωτερικό του οποίου τοποθετείται ο ήλος χειρουργικά. Έτσι, καθίσταται δυνατή η στερέωση του ήλου στο οστούν με χρήση βιδών και η ολοκλήρωση της χειρουργικής διαδικασίας, ακόμη και αν ο ήλος έχει ελαφρά παραμορφωθεί κατά την εισαγωγή του στο εσωτερικό του οστού.

Λέξεις-Κλειδιά: Αναγνώριση προτύπων, ανακατασκευή θραυσμένων αντικειμένων, χρωματικό περιεχόμενο, θεματικό περιεχόμενο, ακτινογραφία, κατάτμηση εικόνας, αναγνώριση σχήματος, κλειστή ενδομυελική ήλωση.

Abstract

This PhD thesis is divided into two parts.

In the first part, the further development of an automated fragmented object reconstruction algorithm is presented. This algorithm uses information extracted from the outline of the fragmented object pieces and was developed by Papaodysseus C., Panagopoulos Th., Exarhos M., Triantafillou C., Fragoulis D., Doumas C. and presented in the international journal IEEE Trans. On Signal Processing το 2002 (IEEE Trans. On Signal Processing, 50(6), 1277-1288, 2002. The further development of this algorithm involves the potential use of the chromatic and the thematic content of the fragments that constitute the object, in order to confirm or reject the proposals for potential matches that are the result of the application of the initial form of the fragmented object reconstruction algorithm. In the initial version of the reconstruction algorithm, only the information extracted from the fragment outline is used. The improved algorithm was initially applied in the reconstruction of a simple commercial jigsaw puzzle, in order to ascertain the effectiveness of the algorithm in excellent quality images and in fragments that have not been degraded due to wear and the passage of time. Then, the improved algorithm was applied in the real-life case of the reconstruction of fragmented wall-paintings that were unearthed during the archaeological excavation of the Akrotiri site in Santorini.

In the second part of the thesis, the application of image segmentation techniques in radiology images (which are low quality images) is presented, in order to accurately determine the depicted projection of a special nail, which is constructed out of a special slightly flexible titanium alloy, and is used in closed intramedullary nailing surgical procedures. These particular procedures are used in treating long fragmented or broken bones (hip bone, tibia fractures, etc). Using shape and pattern recognition techniques, the maximum geometric information from the x-ray projection of these nails was extracted. This information will be then used for the exact determination of the position and the shape of the nail, as well as the orientation of the nail with regard to the fragmented bone, in the interior of which the nail is surgically inserted. Thus, the fixation of the nail with the use of screws is accomplished and the surgical procedure is completed, even if the nail has been slightly deformed during its insertion in the bone interior.

Keywords: Pattern recognition, fragmented object reconstruction, chromatic content, thematic content, radiology images, image segmentation, shape recognition, closed intramedullary nailing.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	15
ΜΕΡΟΣ Α'	17
Κεφάλαιο Α.Ι.: Εισαγωγή	19
Α.Ι.1. Πρόλογος	19
Α.Ι.2. Περιγραφή του προβλήματος	20
Α.Ι.3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση αλγορίθμων επίλυσης εμπορικών παζλ	23
Α.Ι.4. Περιγραφή της μεθοδολογίας	29
Α.Ι.5. Προ-επεξεργασία των εικόνων των κομματιών	34
Α.Ι.6. Το σύστημα αυτομάτου ταιριάσματος κονιαμάτων με χρήση του	
περιγράμματος μόνο	39
Κεφάλαιο Α.ΙΙ.: Εξαγωγή και χρήση του χρωματικού περιεχομένου του	
περιγράμματος των κομματιών	<u>55</u>
Α.ΙΙ.1. Εξαγωγή του χρωματικού περιεχομένου	55
Α.Π.2. Σύγκριση των χρωματικών περιεχομένων των κομματιών στην	
περιοχή της συνένωσης	57
Α.ΙΙ.3. Κριτήρια απόδοσης χρωματικής διαφοράς αλυσίδων	59
Κεφάλαιο Α.ΙΙΙ.: Εξαγωγή των θεματικών στοιχείων που αντιστοιχούν σε κάθε	
συνένωση.	<u>63</u>
Α.ΙΙΙ.1. Περιγραφή της μεθοδολογίας	63
Α.ΙΙΙ.2. Προ-επεξεργασία των εικόνων	66
Α.ΙΙΙ.3. Ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων κοντά στο άκρο του κομματιού	
με βάση το χρωματικό περιεχόμενο	71
Α.ΙΙΙ.4. Επιλογή αλγορίθμου κατάτμησης	73
Α.ΙΙΙ.5. Εφαρμογή του αλγορίθμου κατάτμησης	76
Α.ΙΙΙ.6. Το σύστημα εξαγωγής των ορίων των θεματικών στοιχείων	78
Α ΙΙΙ 7 Εξαγωνή των ακμών των θεματικών στοινείων	80

Κεφάλαιο Α.ΙV.: Εφαρμογή των αλγορίθμων	<u>85</u>
Α.Ι.Ν.1. Εφαρμογή του αλγορίθμου ταιριάσματος κομματιών με βάση το	
σχήμα	85
Α.ΙV.2. Εφαρμογή του αλγορίθμου υπολογισμού των χρωματικών διαφορών	
για την απόρριψη ανεπιτυχών συνενώσεων	88
A.IV.3. Υλοποίηση προσαρμοστικού (adaptive) κατωφλίου για το	
χρωματικό κριτήριο	95
Α.ΙV.4. Εφαρμογή του αλγορίθμου απόρριψης συνενώσεων με βάση το	
θεματικό περιεχόμενο	99
Α.ΙV.5. Εφαρμογή των σχετικών κριτηρίων για την απόρριψη των	
ανεπιτυχών συνενώσεων	102
Κεφάλαιο Α. V.: Σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλες εφαρμογές	
χρωματικών κριτηρίων για παζλ.	107
Α.V.1. Εισαγωγή	
Α.V.2. Υλοποίηση του αλγορίθμου	
Κεφάλαιο Α.VI.: Γενικά Συμπεράσματα	<u>115</u>
Βιβλιογραφία Α' Μέρους	<u>121</u>
ПАРАРТНМА А.1	<u>123</u>
<u>ПАРАРТНМА А.2</u>	<u>125</u>
MEPOΣ B'	127
Κεφάλαιο Β.Ι.: Εισαγωγή	<u>129</u>
Β.Ι.1. Πρόλογος	129
Β.Ι.2. Σύντομη ιστορία της τεχνικής των ενδομυελικών ηλώσεων	133
Β.Ι.3. Σύντομη περιγραφή της εγχειρητικής διαδικασίας	135
Β.Ι.4. Δυσκολίες της εγχειρητικής διαδικασίας	138
Β.Ι.5. Προσεγγίσεις στο σχεδιασμό συστημάτων υποβοήθησης των	
ενδομυελικών ηλώσεων	139
Β.Ι.6. Βιβλιογραφική ανάλυση αλγορίθμων κατάτμησης ιατρικής εικόνας	143
Β.Ι.7 Ακτίνες Χ	164
<u>Κεφάλαιο Β.ΙΙ.: Πειραματικά δεδομένα – Προ-επεξεργασία</u>	175
Β.ΙΙ.2 Προ-επεξεργασία των εικόνων	

Β.ΙΙ.3 Αφαίρεση θορύβου	179
Β.ΙΙ.4 Ενίσχυση αντίθεσης	181
Κεφάλαιο Β.ΙΙΙ.: Κατάτμηση της εικόνας	<u>185</u>
Β.ΙΙΙ.1 Εισαγωγή	185
Β.ΙΙΙ.2 Χρωματική απόσταση από το σημείο εκκίνησης	185
Β.ΙΙΙ.3 Ανίχνευση ακμών	187
Β.ΙΙΙ.4 Εξαγωγή του καρφιού με χρήση τεχνικής προσαύξησης περιοχής	191
Κεφάλαιο Β.ΙV.: Εξαγωγή γεωμετρικής πληροφορίας από την περιοχή του	
καρφιού.	<u>195</u>
Β.ΙV.1 Εξαγωγή και αρίθμηση του περιγράμματος	195
Β.ΙV.2 Αντιμετώπιση ορθών γωνιών	197
Β.ΙV.3 Εύρεση των σημείων καμπής του περιγράμματος	199
Β.ΙV.4 Βελτιστοποίηση της θέσης των σημείων καμπής	209
Κεφάλαιο Β. V.: Εξαγωγή γεωμετρικής πληροφορίας από τις οπές του καρφιού	<u>215</u>
Β. V.1 Ανίχνευση των οπών του καρφιού	215
Β. V.2 Αρίθμηση του περιγράμματος των οπών	216
Β. V.3 Προσέγγιση των οπών με ελλείψεις	219
Β. V.4 Παραλλαγές στον αλγόριθμο προσέγγισης της τρύπας με έλλειψη	228
<u>Κεφάλαιο Β.VI.: Επίλογος</u>	239
Βιβλιογραφία Β' Μέρους	<u>241</u>
ПАРАРТНМА В.1	251

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα Α.1. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας εφαρμογής του συνολικού αλγορίθμου ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων	33
Σχήμα Α.2. Εικόνα του ολοκληρωμένου παζλ	35
Σχήμα Α.3. Σαρωμένα κομμάτια του παζλ πριν το διαχωρισμό και τον καθαρισμό τους	35
Σχήμα Α.4. Ένα μεμονωμένο κομμάτι (α) και η αντίστοιχη «καθαρισμένη» εικόνα του χωρίς φόντο (β)	36
Σχήμα Α.5. Φωτογραφία ενός κομματιού που ανεσκάφη στο Ακρωτήρι	36
Σχήμα Α.6. Το κομμάτι του Σχήματος Α.5 στο «απόλυτο» σύστημα αναφοράς του, με τους αντίστοιχους άξονες (x,y).	37
Σχήμα Α.7. Εικόνες ενός καθαρισμένου κομματιού του παζλ (α) και του αντίστοιχου μαύρου περιγράμματος (β)	38
Σχήμα Α.8. Εικόνες ενός καθαρισμένου κομματιού της Σαντορίνης (α) και του αντίστοιχου μαύρου περιγράμματος (β)	38
Σχήμα Α.9. Εικόνες ενός κομματιού (α), του αντίστοιχου μαύρου (β) και του περιγράμματός του (γ)	40
Σχήμα Α.10(α) Απαρίθμηση των εικονοστοιχείων της μάσκας 3x3. Το C είναι το κεντρικό εικονοστοιχείο της μάσκας, το οποίο ανήκει στο περίγραμμα	42
Σχήμα Α.10(β). Απεικόνιση των γωνιών όλων των εικονοστοιχείων της μάσκας 3x3 με κέντρο το C	42
Σχήμα Α.11. Τμήμα 1: Εικονοστοιχεία #1, #2, #3. Τμήμα 2: Εικονοστοιχεία #4, #5, #6, #7, #8. Τμήμα 3: Εικονοστοιχεία #9, #10, #11, #12	43
Σχήμα Α.12. Απεικόνιση του βέλτιστου σχήματος που ταιριάζει σε ένα περίγραμμα. Με μαύρο φαίνεται το περίγραμμα του κομματιού, ενώ με γκρι φαίνεται το βέλτιστο σχήμα που ταιριάζει σε αυτό	43
Σχήμα Α.13. Απεικόνιση μίας «σταθερής» και μίας «περιστρεφόμενης» αλυσίδας, οι οποίες ανήκουν σε δύο διαφορετικά κομμάτια. Τα εικονοστοιχεία με μαύρο ανήκουν στη σταθερή αλυσίδα, ενώ αυτά με ανοιχτό γκρι ανήκουν στην «περιστρεφόμενη» αλυσίδα. Τα εικονοστοιχεία με σκούρο γκρι συνδέουν τα δύο τελευταία εικονοστοιχεία των δύο αλυσίδων (η «γραμμή φραγμού»)	45
Σχήμα Α.14. Ολόκληρα τα περιγράμματα δύο κομματιών Α και Β. Ανοιχτό γκρι: Τα εικονοστοιχεία που ανήκουν και στα δύο κομμάτια. Σκούρο γκρι: τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στο κενό ανάμεσα στα δύο κομμάτια	47
Σχήμα Α.15. Ένα κομμάτι του παζλ (α) και το αντίστοιχο χρωματικό περιεχόμενο (β) που αποδόθηκε στο περίγραμμά του	56
Σχήμα Α.16. Ένα κομμάτι από τη Σαντορίνη (α) και το αντίστοιχο χρωματικό περιεχόμενο που αποδόθηκε στο περίγραμμά του (β)	56
Σγήμα Α.17. Σγηματική απεικόνιση του γώρου απεικόνισης γρωμάτων HSV	60

Σχήμα A.18. Μία συνένωση δύο κομματιών παζλ () και ένα παράδειγμα συνέχειας του θεματικού περιεχομένου (β). Με πράσινο (Α) φαίνεται η εφαπτόμενη σε μία γραμμή ενός θεματικού στοιχείου, ενώ με κόκκινο (Β) φαίνεται η αντίστοιχη	
εφαπτόμενη της γραμμή από την άλλη μεριά του σπασίματος των κομματιών	64
Σχήμα Α.19. Μία συνένωση δύο κομματιών της Σαντορίνης (α) και ένα παράδειγμα συνέχειας του θεματικού περιεχομένου (β). Με πράσινο (Α) φαίνεται η εφαπτόμενη σε μία γραμμή ενός θεματικού στοιχείου, ενώ με κόκκινο (Β) φαίνεται η αντίστοιχη εφαπτόμενη της γραμμή από την άλλη μεριά του σπασίματος των κομματιών.	64
Σχήμα Α.20. Λεπτομέρεια συνένωσης. Με πράσινο (Α) φαίνεται η εφαπτόμενη σε μία γραμμή ενός θεματικού στοιχείου, ενώ με κόκκινο φαίνεται η αντίστοιχη εφαπτόμενη της γραμμή από την άλλη μεριά του σπασίματος των κομματιών. Με μοβ και κυανό φαίνονται οι αντίστοιχες εφαπτόμενες κοντά στο σπάσιμο των κομματιών.	65
Σχήμα Α.21. Ένα κομμάτι του παζλ πριν (α) και μετά (β) από την εφαρμογή του φίλτρου αριθμητικού μέσου	68
Σχήμα Α.22. Εικόνα ενός κομματιού της Σαντορίνης πριν (α) και μετά (β) από την εφαρμογή του προσαρμοστικού φίλτρου τύπου Wiener	70
Σχήμα Α.23. (α) Η φιλτραρισμένη εικόνα ενός κομματιού του παζλ. (β) Η λωρίδα των εικονοστοιχείων που πρόσκεινται στο εξωτερικό όριο του κομματιού	72
Σχήμα Α.24. (α) Η φιλτραρισμένη εικόνα ενός κομματιού της Σαντορίνης. (β) Η λωρίδα των εικονοστοιχείων που πρόσκεινται στο εξωτερικό όριο του κομματιού	73
Σχήμα Α.25. Εικόνα ενός κομματιού του παζλ. (α) Αρχική εικόνα. (β) Η φιλτραρισμένη λωρίδα. (γ) Τα εικονοστοιχεία της φιλτραρισμένης λωρίδας ομαδοποιημένα σε δύο σύνολα	79
Σχήμα Α.26. Εικόνα ενός κομματιού της Σαντορίνης. (α) Αρχική εικόνα. (β) Η φιλτραρισμένη λωρίδα. (γ) Τα εικονοστοιχεία της φιλτραρισμένης λωρίδας ομαδοποιημένα σε δύο σύνολα	79
Σχήμα Α.27. Τα όρια των θεματικών στοιχείων των Σχημάτων Α.25(α) και Α.26 (β)	82
Σχήμα Α.28. Δύο κομμάτια που ανήκουν στο ίδιο θεματικό στοιχείο	84
Σχήμα Α.29. Δύο κομμάτια του παζλ που ταιριάζουν μεταζύ τους	
Σχήμα Α.30. Τα κομμάτια του Σχήματος Α.29 στη βέλτιστη θέση ταιριάσματος, όπως αυτή προσδιορίστηκε από το πρόγραμμα ταιριάσματος κομματιών με βάση το σχήμα	86
Σχήμα Α.31. Συνένωση δύο κομματιών της Σαντορίνης όπου η φθορά εμποδίζει την επιτυχημένη εφαρμογή του κριτηρίου ταιριάσματος με βάση το χρωματικό περιεχόμενο των κομματιών	94
Σχήμα Α.32. Τέσσερα παραδείγματα στατιστικής συμπεριφοράς του συνόλου των χρωματικών διαφορών ανάμεσα σε δύο κομμάτια	97
Σχήμα Α.33. Ιστογράμματα των διαφορών των κλίσεων των ορίων των θεματικών στοιχείων για το παζλ (α) και τη Σαντορίνη (β)	100

Σχήμα Α.34. Γραφήματα ROC για τους αλγόριθμους απόρριψης συνενώσεων με βάση το χρωματικό περιεχόμενο (κόκκινο), το χρωματικό και θεματικό περιεχόμενο (μοβ) και με χρήση του αλγόριθμου συγχώνευσης εικόνας (μπλε) για το παζλ (α) και τη Σαντορίνη (β). Ξεκινώντας από αριστερά, οι τιμές του κατωφλίου γίνονται πιο αυστηρές	113
Σχήμα Β.1. Παράδειγμα κατάγματος μηριαίου οστού, το οποίο έχει σταθεροποιηθεί με χρήση ενδομυελικού ήλου	131
Σχήμα Β.2. Ακτινογραφία ενός γόνατου με καρφί υποστήριζης οστών στο οστό της κνήμης	132
Σχήμα Β.3. Η τομή και το σημείο εισόδου του ενδομυελικού ήλου που χρησιμοποιείται για τη θεραπεία του κατάγματος της κνήμης	136
Σχήμα Β.4. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας εισαγωγής και σταθεροποίησης ενδομυελικού ήλου	137
Σχήμα Β.5. Το φαινόμενου μερικού όγκου. (a) Ιδανική εικόνα. (β) Προκύπτουσα εικόνα.	147
Σχήμα Β.6. Μέθοδοι με βάση τα χαρακτηριστικά των εικονοστοιχείων της εικόνας. (α) Ιστόγραμμα με τρεις προφανείς τάζεις. (β) Προσαύζηση περιοχής. (γ) Δισδιάστατος χώρος χαρακτηριστικών	152
Σχήμα Β.7. Κατάτμηση μίας μαγνητικής τομογραφίας εγκεφάλου. (α) Αρχική εικόνα. (β) Κατάτμηση με χρήση του αλγορίθμου Κ-μέσων. (γ) Κατάτμηση με χρήση του αλγορίθμου Κ-μέσων με ένα πρότερο τυχαίο πεδίο Μαρκώφ	157
Σχήμα Β.8. Εξαγωγή του εσωτερικού τείχους της αριστερής κοιλίας από μία μαγνητική τομογραφία με χρήση ενεργών περιγραμμάτων. (α) Αρχική εικόνα. (β) Αρχικό ενεργό περίγραμμα και το τελικό αποτέλεσμα της σύγκλισης	160
Σχήμα Β.9. Επίδειζη της παραμόρφωσης με χρήση άτλαντα. Από αριστερά προς τα δεζιά: (a) Εικόνα πρότυπο. (β) Τελική εικόνα. (γ) Παραμορφωμένο πρότυπο	162
Σχήμα Β.10. Κατάτμηση ψηφιακής μαστογραφίας. (α) Ψηφιακή μαστογραφία και όριο του ακτινολόγου για έναν κακοήθη όγκο, η παρουσία του οποίου έχει επιβεβαιωθεί μέσω βιοψίας. (β) Αποτέλεσμα του αλγορίθμου υδατοσυσσώρευσης. (γ) Ύποπτες περιοχές, όπως αυτές προσδιορίστηκαν από μία αυτοματοποιημένη μέθοδο	164
Σχήμα Β.11. (α) Μέρος ακτινογραφίας. Τα βέλη καταδεικνύουν εικονοστοιχεία με διαφορετικές τιμές από τα υπόλοιπα της περιοχής τους λόγω της παρουσίας θορύβου τύπου βολής. (β) Αγγειογράφημα με ισχυρή παρουσία θορύβου τύπου αλατοπίπερου.	173
Σχήμα Β.12. Φωτογραφία ενός ενδομυελικού ήλου μαζί με τις αντίστοιχες βίδες σταθεροποίησής του	
Σχήμα Β.13. Ακτινογραφία του καρφιού, η οποία είχε εκτυπωθεί σε κανονικό χαρτί και, στη συνέχεια, σαρώθηκε για να ψηφιοποιηθεί	176
Σχήμα Β.14. Ακτινογραφία καρφιού απευθείας ψηφιοποιημένη από το ακτινογραφικό μηχάνημα	176
Σχήμα Β.15. Αποκομμένη εικόνα του σώματος του καρφιού	177

Σχήμα Β.16. (a) Η ψηφιακή φωτογραφία του καρφιού, όπως αυτή προέκυψε από τη σάρωση της εκτυπωμένης φωτογραφίας. (β) Η φωτογραφία του καρφιού, μετά από τη μετατροπή της σε εικόνα κλίμακας του γκρι (gray-scale)	179
Σχήμα Β.17. (α) Η αρχική εικόνα του καρφιού. (β) Η ίδια εικόνα μετά από την εφαρμογή φίλτρου αριθμητικού μέσου	181
Σχήμα Β.18. Ιστόγραμμα της εικόνας του καρφιού. (α) Πριν από το τέντωμα (β) Μετά από το τέντωμα.	183
Σχήμα Β.19. Εικόνα του καρφιού (α) Πριν από το τέντωμα του ιστογράμματος (β) Μετά από το τέντωμα του ιστογράμματος	183
Σχήμα B.20. (α) Εικόνα του καρφιού με το σημείο εκκίνησης. (β) Χάρτης των διαφορών των τιμών του γκρι σε σχέση με το σημείο εκκίνησης. Με μπλε είναι τα εικονοστοιχεία με τιμές παρόμοιες με αυτή του εικονοστοιχείου εκκίνησης. Με κόκκινο είναι τα εικονοστοιχεία που έχουν πολύ διαφορετική τιμή από το σημείο εκκίνησης	186
Σχήμα Β.21. Η εικόνα του χάρτη των χρωματικών αποστάσεων του σημείου εκκίνησης από όλα τα υπόλοιπα σημεία της αρχικής εικόνας	188
Σχήμα Β.22. Η εικόνα του χάρτη των χρωματικών αποστάσεων των εικονοστοιχείων της εικόνας από το σημείο εκκίνησης, μετά από την εφαρμογή των κατωφλίων	189
Σχήμα Β.23. (a) Το αποτέλεσμα της ανίχνευσης των ακμών της εικόνας. (β) Το αποτέλεσμα του μορφολογικού κλεισίματος της εικόνας	191
Σχήμα Β.24. (α) Η αρχική εικόνα του καρφιού. (β) Η περιοχή που προέκυψε μετά από τη χρήση του αλγορίθμου προσαύζησης περιοχής	194
Σχήμα Β.25. Παραδείγματα απορριπτέων συνδυασμών εικονοστοιχείων. (α) Παράδειγμα «πλοκαμιού», το οποίο ξεφεύγει από το κυρίως σώμα της εικόνας κατά πολύ. Με κυανό φαίνονται τα εικονοστοιχεία που θα επιλεγούν τελικώς για το περίγραμμα. (β) Παράδειγμα «κόλπου». Ο αλγόριθμος αγνόησε το μεμονωμένο εικονοστοιχείο και διεύρυνε ελαφρώς το κενό ώστε να είναι σαφέστερο	197
Σχήμα Β.26. Διαγραφή ορθής γωνίας. (α) Πριν τη διόρθωση. (β) Μετά από τη διόρθωση. Το εικονοστοιχείο που αντιστοιχεί στην ακμή της γωνίας δεν αποτελεί πλέον μέρος του περιγράμματος	199
Σχήμα Β.27. Κομμάτι του περιγράμματος σε μεγέθυνση. Η κόκκινη και η μπλε διακεκομμένη γραμμή δείχνουν τις LS ευθείες που προσεγγίζουν βέλτιστα τα σημεία του περιγράμματος εκατέρωθεν του τρέχοντος σημείου (ώχρα). (α) Περίπτωση μικρής γωνίας ανάμεσα στις δύο γραμμές. (β) Περίπτωση μεγάλης γωνίας ανάμεσα στις δύο γραμμές.	201
Σχήμα Β.28. Παράδειγμα του πίνακα γωνιών που προκύπτει με χρήση του αλγορίθμου εντοπισμού των σημείων καμπής	
Σχήμα Β.29. Λεπτομέρεια του γραφήματος των τιμών της γωνίας που απεικονίζει ένα μικρότερο τοπικό μέγιστο.	203
Σχήμα Β.30. Απόκριση εζόδου του φίλτρου που χρησιμοποιήθηκε για την εζομάλυνση του σήματος της γωνίας	205
Σχήμα Β.31. Το σήμα των τιμών της γωνίας μετά από το φιλτράρισμα	206

Σχήμα Β.32. Τα σημεία καμπής που ανιχνεύτηκαν για μία συγκεκριμένη εικόνα	207
Σχήμα Β.33. Οι θέσεις των σημείων καμπής που εντοπίστηκαν για τη συγκεκριμένη εικόνα (κυανά τετράγωνα με αρίθμηση)	208
Σχήμα Β.34. Πρώτη εκτίμηση για το σχήμα του περιγράμματος του καρφιού. Με κίτρινο τετράγωνο σημειώνονται οι αρχικές εκτιμήσεις για τις θέσεις των σημείων καμπής	210
Σχήμα Β.35. Οι αρχικές (κίτρινο) και οι βέλτιστες (μαύρο) θέσεις των σημείων καμπής	214
Σχήμα Β.36. Ο χάρτης κατάτμησης του Σχήματος Β.19. Με λευκό σημειώνονται τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στην περιοχή του ενδιαφέροντος (καρφί), με μαύρο τα εικονοστοιχεία του φόντου, ενώ με κυανό και μοβ, αντίστοιχα, τα εικονοστοιχεία που σχηματίζουν τα περιγράμματα των δύο τρυπών	218
Σχήμα Β.37. Τρύπα ενός καρφιού σε μεγέθυνση μαζί με το κέντρο βάρους της	222
Σχήμα Β.38. Ένα περίγραμμα μίας τρύπας (κόκκινο) περιεστραμμένο και μετατοπισμένο ώστε να συμπίπτει με την αρχική εκτίμηση της ιδανικής έλλειψης (πράσινο)	225
Σχήμα Β.39. Προσέγγιση μίας από τις τρύπες με τη βέλτιστη έλλειψη. Με μπλε φαίνονται τα σημεία του περιγράμματος της τρύπας, ενώ με κόκκινο η έλλειψη που την προσεγγίζει βέλτιστα	227
Σχήμα Β.40. Προσέγγιση τρύπας από έλλειψη με το κέντρο ελεύθερο. Με κόκκινο φαίνεται το κέντρο της τρύπας, ενώ με κίτρινο το κέντρο της έλλειψης που την προσεγγίζει βέλτιστα	230
Σχήμα Β.41. Εικόνα που δείχνει το καρφί με μεγάλη γωνία περιστροφής σε σχέση με το διαμήκη άζονά του. Οι τρύπες έχουν χάσει το ελλειπτικό σχήμα τους	231
Σχήμα Β.42. Ταίριασμα των μερών της τρύπας από τις αντίστοιχες βέλτιστες ελλείψεις. Τα σημεία που φαίνονται στο κέντρο του σχήματος είναι τα εξής: Το συνολικό κέντρο της τρύπας (κόκκινο), το κέντρο της βέλτιστης έλλειψης του αριστερού τμήματος (κυανό) και το κέντρο της βέλτιστης έλλειψης του δεξιού τμήματος (λευκό)	236

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας Α.Ι. Κατηγοριοποίηση μεθόδων επίλυσης παζλ	25
Πίνακας Α.ΙΙ. Ποσοστά απόρριψης και επιτυχίας για τα διάφορα κριτήρια απόρριψης ανεπιτυχών συνενώσεων. Εφαρμογή: Παζλ	91
Πίνακας Α.ΙΙΙ. Η τιμές του κριτηρίου 7 για διαφορετικές τιμές του α για το παζλ. PQ=3	91
Πίνακας Α.ΙV. Ποσοστά απόρριψης και επιτυχίας για τα διάφορα κριτήρια απόρριψης ανεπιτυχών συνενώσεων. Εφαρμογή: Σαντορίνη	92
Πίνακας Α.V. Εφαρμογή του συνδυασμού των κριτηρίων για την εφαρμογή του παζλ	103
Πίνακας Α.VI. Εφαρμογή του συνδυασμού των κριτηρίων για την εφαρμογή της Σαντορίνης	104
Πίνακας Α.VII. Αποτελέσματα εφαρμογής του κριτηρίου συγχώνευσης εικόνων για το παζλ	110
Πίνακας Α.VIII. Αποτελέσματα της εφαρμογής του κριτηρίου συγχώνευσης εικόνων για τα κομμάτια της Σαντορίνης	110
Πίνακας Α.ΙΧ. Πίνακας ευρεθεισών συνενώσεων για το παζλ	126
Πίνακας Β.Ι. Λάθη προσέγγισης των τρυπών των εικόνων που είχαμε στη διάθεσή μας.	228
Πίνακας Β.Η. Τιμές λάθους ταιριάσματος για την παραλλαγή του αλγορίθμου με ελεύθερο κέντρο ταιριάσματος της έλλειψης με την τρύπα	230
Πίνακας Β.ΙΙΙ. Λάθη προσέγγισης του αντίστοιχου μέρους της ιδανικής έλλειψης για τα δύο τμήματα της κάθε τρύπας	235

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

ΜΕΡΟΣ Α'

Βελτίωση αλγορίθμου αυτόματης ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων με χρήση του χρωματικού και θεματικού περιεχομένου των κονιαμάτων Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Κεφάλαιο Α.Ι.: Εισαγωγή

Α.Ι.1. Πρόλογος

Σε αυτό το πρώτο μέρος του κειμένου αναλύεται το κομμάτι της εργασίας που αφορά στη βελτίωση ενός αλγορίθμου αυτόματης ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για έναν αλγόριθμο που παρουσιάστηκε από τους Papaodysseus C., Panagopoulos Th., Exarhos M., Triantafillou C., Fragoulis D., Doumas C., το 2002 στη δημοσίευση με τίτλο «Contour-shape based reconstruction of fragmented 1600 B.C. wall paintings». Η εν λόγω δημοσίευση παρουσιάστηκε στο έγκριτο περιοδικό ΙΕΕΕ Trans. On Signal Processing, 50 (6), 1277-1288. Στη δημοσίευση αυτή, παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος αυτόματης ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων με χρήση πληροφοριών του περιγράμματος των κομματιών μόνο. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία στην περίπτωση της ανακατασκευής των θραυσμένων τοιχογραφιών που βρέθηκαν στις ανασκαφές του Ακρωτηρίου της Σαντορίνης.

Η επιτυχημένη εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού άνοιξε το δρόμο για την περαιτέρω βελτίωση του και την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την πιο αποτελεσματική εφαρμογή του σε πραγματικά προβλήματα ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων. Για τη βελτίωση αυτή, κρίθηκε απαραίτητη η εξαγωγή περαιτέρω πληροφορίας από το σύνολο των διαθεσίμων δεδομένων και, συγκεκριμένα, η εξαγωγή και η χρήση της πληροφορίας που περιέχεται στο χρωματικό και το θεματικό περιεχόμενο των επιμέρους κομματιών που αποτελούν το θραυσμένο αντικείμενο. Σκοπός της εργασίας που παρουσιάζεται στο παρόν κείμενο ήταν η διερεύνηση του βέλτιστου τρόπου εξαγωγής της πληροφορίας αυτής, καθώς και η εξέταση πιθανών τρόπων εκμετάλλευσης της τελευταίας για την πιο αποτελεσματική εφαρμογή του αρχικού αλγορίθμου. Τελικός στόχος ήταν, προφανώς, η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων, η χρήση του οποίου θα είναι εύκολη, φιλική προς το χρήστη αλλά και τόσο αποτελεσματική, ώστε το εν λόγω σύστημα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επικουρικό εργαλείο για την ανακατασκευή θραυσμένων αντικειμένων, στις περιπτώσεις όπου η φύση του προβλήματος όχι μόνο επιτρέπει αλλά και απαιτεί τη χρήση τέτοιων εργαλείων.

Στο παρόν μέρος θα ξεκινήσουμε με μία σύντομη περιγραφή των πτυχών του προβλήματος, ώστε να μπορεί ο αναγνώστης να κατανοήσει τη νοοτροπία πίσω από τη

μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Στη συνέχεια, θα γίνει μία αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας αυτής και θα ακολουθήσει η βιβλιογραφική έρευνα που σχετίζεται με το πρόβλημα, καθώς και μία σύντομη ανάλυση του αλγορίθμου ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων με χρήση του περιγράμματός τους, εφόσον η κατανόηση της φύσης του αλγορίθμου αυτού αποτελεί το θεμέλιο λίθο πάνω στον οποίο βασίστηκε η μεθοδολογία βελτίωσης του αλγορίθμου με χρήση του χρωματικού και του θεματικού περιεχομένου. Έπειτα, θα περιγραφεί η εφαρμογή της μεθοδολογίας τόσο για το χρωματικό, όσο και για το θεματικό περιεχόμενο στα σύνολα των δοκιμαστικών και των πραγματικών δεδομένων και θα ολοκληρώσουμε με την παρουσίαση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την εφαρμογή αυτή.

Α.Ι.2. Περιγραφή του προβλήματος

Ο αλγόριθμος στον οποίο εστιάζεται η εργασία αυτή αναπτύχθηκε με σκοπό την ενίσχυση της προσπάθειας ανακατασκευής των τοιχογραφιών που ανακαλύφθηκαν κατά τις ανασκαφές του Ακρωτηρίου της Σαντορίνης. Η ανακάλυψη των τοιχογραφιών αυτών αποτελεί εύρημα εξαιρετικής σημασίας για την ιστορική ανάλυση των πρώιμων πολιτισμών που αναπτύχθηκαν στο χώρο του Αιγαίου πελάγους και όχι μόνο. Σύμφωνα με διακεκριμένους αρχαιολόγους, οι τοιχογραφίες αυτές αποτελούν μέρος του συνόλου των μεγαλύτερων αρχαιολογικών ανακαλύψεων στον κόσμο. Τις ανασκαφές ξεκίνησε ο καθηγητής Μαρινάτος, ενώ σήμερα συνεχίζονται υπό την εποπτεία του καθηγητή Χρήστου Ντούμα. Όπως συνέβη με τους αρχαιολογικούς θησαυρούς που ανακαλύφθηκαν στην Πομπηία και στο Herculaneum, οι τοιχογραφίες της Θήρας διατηρήθηκαν σε πολύ καλή κατάσταση λόγω της επικάλυψης από τη στάγτη που προήλθε από την έκρηξη ενός ηφαιστείου. Γενικά μιλώντας, οι τοίχοι που ήταν διακοσμημένοι με τις τοιχογραφίες δεν στέκονται πλέον, καθώς κατέρρευσαν μαζί με την ζωγραφισμένη πρόσοψή τους πριν από την ηφαιστειακή έκρηξη λόγω των ιδιαίτερα ισχυρών σεισμών που προηγήθηκαν της έκρηξης. Έτσι, οι τοιχογραφίες διαλύθηκαν σε πολλά κομμάτια, τα οποία βρέθηκαν αναμεμειγμένα με τα κομμάτια από άλλες τοιχογραφίες. Η ανακατασκευή των τοιχογραφιών από τα επιμέρους κομμάτια τους είναι μία εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία, η οποία συχνά απαιτεί πολλούς μήνες, ή ακόμα και χρόνια εργασίας από εξειδικευμένο προσωπικό. Επομένως, η ανάπτυξη ενός συστήματος, το οποίο θα συμβάλλει στην αυτόματη ανακατασκευή των τοιχογραφιών αυτών είναι θεμελιώδους σημασίας για την αρχαιολογική αυτή έρευνα, αλλά και για πολλές άλλες, οι οποίες αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της ανακατασκευής μίας εικόνας από ανασκαμμένα κομμάτια τους (Papaodysseus κ. α., 2002).

Το πρόβλημα που σκοπεύουμε να επιλύσουμε με τον αλγόριθμο που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια μπορεί να συσχετιστεί με την αυτόματη επίλυση γρίφων που περιλαμβάνουν την ανακατασκευή τεμαχισμένων εικόνων, οι οποίοι είναι περισσότερο γνωστοί με την κοινή ονομασία «παζλ» (jigsaw puzzle). Όπως θα φανεί όμως από τα επόμενα, η αυτόματη επίλυση των παζλ παρουσιάζει δραστικές και θεμελιώδεις διαφορές από το πρόβλημα της αυτόματης ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων και, ειδικότερα, των τοιχογραφιών. Οι βασικότερες διαφορές είναι οι εξής:

- 1. Δεν υπάρχει πρότερη γνώση σχετικά με το σχήμα του κάθε κομματιού. Επομένως, δεν μπορεί κανείς να κάνει υποθέσεις σχετικά με την ύπαρξη των «σημείων σπασίματος» της καμπύλης του περιγράμματος των κομματιών αυτών. Στην πραγματικότητα, οι καμπύλες που αποτελούν το περίγραμμα πολλών από τα κομμάτια δεν έχουν τέτοια σημεία. Ως συνέπεια, η κατάτμηση της καμπύλης του περιγράμματος σε «πλευρές», όπως γίνεται σε πολλούς αλγορίθμους αυτόματης επίλυσης παζλ δεν μπορεί να εκτελεστεί. Το ίδιο συμβαίνει και με την ανίχνευση των γωνιών, στην οποία βασίζονται πολλοί από τους αλγορίθμους.
- 2. Δεν υπάρχουν κομμάτια τα οποία να μπορούν να θεωρηθούν «κομμάτια περιγράμματος» της συνολικής εικόνας, δηλαδή κομμάτια των οποίων τουλάχιστον μία πλευρά είναι εντελώς ευθύγραμμη. Επομένως, η κλασική στρατηγική επίλυσης παζλ που περιλαμβάνει την εκκίνηση της επίλυσης με την ανακατασκευή του περιγράμματος είναι άνευ νοήματος στην περίπτωση των τοιχογραφιών, γεγονός που συνεπάγεται ότι η αυτόματη ανακατασκευή θραυσμένων αντικειμένων δεν μπορεί να επιλυθεί με κάποια από τις τεχνικές επίλυσης του προβλήματος του περιπλανώμενου πωλητή (traveling salesman problem).
- 3. Το μέγεθος και το σχήμα των κομματιών παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην περίπτωση των τοιχογραφιών από ότι στην περίπτωση των παζλ. Επομένως, δεν είναι δυνατόν να γίνει διαχωρισμός των κομματιών σε «τύπους» κομματιών, τεχνική στην οποία βασίζονται πολλοί αλγόριθμοι επίλυσης παζλ.
- 4. Διάφορα τυπικά χαρακτηριστικά των καμπυλών που χαρακτηρίζουν τα κομμάτια του παζλ, όπως καμπυλότητα της πλευράς, κυρτότητα / κοιλότητα, ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των γωνιών κλπ, δεν μπορούν να συνεισφέρουν στην επίλυση του

- παρόντος προβλήματος, καθώς αναμένουμε, με σχετική σιγουριά, ότι θα υπάρχουν κενά ανάμεσα σε προσκείμενα κομμάτια των τοιχογραφιών λόγω φθοράς.
- 5. Δεν υπάρχει πρότερη γνώση σχετικά με το περιεχόμενο της εικόνας προς ανακατασκευή.
- 6. Δεν υπάρχει απαραίτητα μοναδική λύση σχετικά με το ταίριασμα δύο κομματιών.
- 7. Λόγω των πιθανών κενών ανάμεσα σε προσκείμενα κομμάτια των τοιχογραφιών, χρησιμοποιήθηκε ένας ειδικός αλγόριθμος ταιριάσματος των κομματιών, ο οποίος να λαμβάνει υπόψη τα κενά αυτά κατά τη διάρκεια του ταιριάσματος δύο κομματιών. Ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζεται στα επόμενα.
- 8. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι πολύ συχνά κατά τη διάρκεια της ανασκαφής τα κομμάτια πολλών τοιχογραφιών ανακαλύπτονται αναμεμειγμένα, λόγω της κατάρρευσης περισσοτέρων του ενός ορόφου στην ίδια περιοχή. Καθώς οι όροφοι αυτοί μπορεί να περιείχαν περισσότερες της μίας τοιχογραφίας, στο σύνολο των κομματιών μίας τοιχογραφίας μπορεί να περιλαμβάνονται και κομμάτια από άλλες τοιχογραφίες με εντελώς διαφορετική θεματολογία.

Επομένως, θα μπορούσε να πει κανείς ότι η αυτόματη επίλυση ενός παζλ αποτελεί μία «υποπερίπτωση» του προβλήματος που αντιμετωπίζεται με τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή.

Ο αλγόριθμος αυτόματης ανακατασκευής, τη βελτίωση του οποίου πραγματεύεται η εργασία αυτή, έκανε, μέχρι τώρα, χρήση μόνο της πληροφορίας που μπορεί να εξαχθεί από το περίγραμμα των κομματιών των θραυσμένων τοιχογραφιών. Λόγω των χαρακτηριστικών που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, η συγκεκριμένη, ολοκληρωμένη και πλήρως αυτοματοποιημένη ανακατασκευή μίας τοιχογραφίας με χρήση μόνο του αλγορίθμου αυτού είναι πάρα πολύ δύσκολη. Αντίθετα, πρωταρχικός στόχος του αλγορίθμου ανακατασκευής είναι ο προσδιορισμός πιθανών επιτυχών συνενώσεων μεταξύ κομματιών, ώστε ο συντηρητής ή ο αρχαιολόγος που είναι εργάζεται στην ανακατασκευή να επισπεύσει την ολοκλήρωση της εργασίας του εξετάζοντας μόνο συνενώσεις οι οποίες έχουν καταγραφεί ως πιθανές από το ολοκληρωμένο σύστημα και να μην σπαταλάει το χρόνο του εξετάζοντας όλες τις πιθανές συνενώσεις που θα μπορούσαν να προκύψουν από ένα σύνολο κομματιών. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί, ότι μία και μόνο τοιχογραφία μπορεί να αποτελείται από ένα σύνολο εκατοντάδων ή και χιλιάδων κομματιών, γεγονός που καθιστά την εξαντλητική εξέταση όλων των πιθανών συνενώσεων από μη πρακτική έως αδύνατη.

Εκ των πραγμάτων, το ακαθόριστο σχήμα των κομματιών που μπορεί να προκύψουν από μία θραυσμένη τοιχογραφία συνεπάγεται ότι αν χρησιμοποιηθεί μόνο η πληροφορία του περιγράμματος του κάθε κομματιού, για κάθε ζεύγος κομματιών το πιθανότερο είναι ότι θα υπάρχουν περισσότερες της μίας πιθανές θέσεις ταιριάσματος. Μάλιστα, εάν τα κομμάτια είναι αρκετά μεγάλα και χωρίς κάποιο χαρακτηριστικό σχήμα, το πλήθος των πιθανών συνενώσεων μπορεί να είναι της τάξεως του 10^3 . Καθώς κάθε μία τέτοια πιθανή συνένωση θα πρέπει να εξεταστεί από το χρήστη του συστήματος, είναι εύκολο να φανταστεί κανείς ότι η πρακτικότητα του συστήματος σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αρκετά περιορισμένη.

Το βασικό ζητούμενο της παρούσας εργασίας είναι ο περιορισμός του πλήθους των πιθανών συνενώσεων που προκύπτουν από τον αλγόριθμο ανακατασκευής με βάση το περίγραμμα. Για να επιτευχθεί αυτό, εξάγεται επιπλέον πληροφορία από το ίδιο το κομμάτι και, συγκεκριμένα, εξάγεται πληροφορία σχετικά με το χρωματικό και το θεματικό περιεχόμενο του κάθε κομματιού. Οι σχετικές πληροφορίες χρησιμοποιούνται, μέσω της εφαρμογής καταλλήλων κριτηρίων, για την απόρριψη όσο το δυνατόν περισσοτέρων πιθανών συνενώσεων, οι οποίες, ενώ πληρούν τα κριτήρια ταιριάσματος με βάση το περίγραμμα, δεν πληρούν τα αντίστοιχα κριτήρια ταιριάσματος με βάση το χρωματικό ή / και το θεματικό περιεχόμενο.

Έτσι, η προσέγγιση που παρουσιάζεται στα ακόλουθα θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μία απόπειρα για την εξαγωγή της μέγιστης δυνατής χρήσιμης πληροφορίας από το περίγραμμα του κομματιού και από το χρωματικό και το θεματικό του περιεχόμενο, ώστε να επιτευχθεί η ανακατασκευή της αρχικής εικόνας ή του αρχικού αντικειμένου. Με τη μέθοδο που παρουσιάζεται εδώ, ο αρχικός αλγόριθμος ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων, ο οποίος έκανε χρήση μόνο της πληροφορίας του περιγράμματος του κομματιού, βελτιώνεται ώστε να κάνει χρήση και της πληροφορίας που περιλαμβάνεται στο χρωματικό και στο θεματικό περιεχόμενο των κομματιών.

Α.Ι.3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση αλγορίθμων επίλυσης εμπορικών παζλ

Λόγω του έντονου συσχετισμού που παρουσιάζει ο αλγόριθμος ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων τους αλγορίθμους ανακατασκευής παζλ, είναι σκόπιμο σε αυτό το σημείο να προβούμε σε μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυριοτέρων εργασιών που

έχουν παρουσιαστεί στον τομέα αυτό. Ο λόγος για τον οποίο εστιάζουμε περισσότερο σε αυτό το ερευνητικό πεδίο αυτό, αν δεν έχει γίνει ήδη σαφής από τα παραπάνω, θα εξηγηθεί περαιτέρω στην περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την βελτίωση του αλγορίθμου ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων. Αν και τα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων επίλυσης παζλ μας ενδιαφέρουν περισσότερο, η μεθοδολογία αυτόματης ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων άπτεται και άλλων γνωστικών πεδίων. Για εκτενέστερη βιβλιογραφική ανάλυση των άλλων πεδίων, ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει στο Papaodysseus κ.α. (2002).

Οι Radack και Badler (1982) αρχικά έδωσαν έναν συνοπτικό ορισμό στο πρόβλημα επίλυσης παζλ δύο διαστάσεων: «Δεδομένου ενός συνόλου απλά συνδεδεμένων περιοχών στο επίπεδο (δηλαδή περιγραμμάτων των κομματιών ενός παζλ), περιστρέφουμε και μετατοπίζουμε κάθε κομμάτι ώστε τα κομμάτια αυτά να ενωθούν σε μία περιοχή στο επίπεδο, χωρίς σημαντικά κενά ή κομμάτια που αλληλοκαλύπτονται». Όμως, ο ορισμός αυτός δεν αναφέρεται καθόλου στις πληροφορίες που μπορούν να εξαχθούν από την υφή και το χρώμα των κομματιών. Εδώ, ως επιστημονικό πρόβλημα, το πρόβλημα επίλυσης του παζλ μπορεί να οριστεί ως εξής: Έστω το σύνολο κομματιών $S_P = \{P_0, P_1, ..., P_{N-1}\}$, όπου P_i είναι το κομμάτι υπ' αριθμόν i $(i \in \{0,1,...,N-1\})$ και έχει τις ιδιότητες του κλειστού συνόρου και της συμπαγούς υφής. Για κάθε P_i πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα P_i $(i \neq j, i, j \in \{0,1,...,N-1\})$ τέτοιο ώστε ένα μέρος του συνόρου του P_i είναι πανομοιότυπο με ένα μέρος του συνόρου του P_i και η υφή και το χρωματικό περιεχόμενο κοντά σε αυτά τα δύο μέρη των συνόρων είναι εξαιρετικά παρόμοια, δηλαδή τα P_i και P_i είναι γειτονικά κομμάτια (ή μπορούν να ενωθούν). Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να βρούμε τα γειτονικά κομμάτια για κάθε P_k ($k \in \{0,1,...,N-1\}$) και να ενώσουμε όλα τα κομμάτια του S_P σε ένα μεγάλο κομμάτι.

Η επίλυση παζλ με χρήση υπολογιστή περιλαμβάνει μια σειρά διεργασιών που σχετίζονται με διάφορες εφαρμογές της μηχανικής όρασης: περιγραφή σχήματος, εξαγωγή χαρακτηριστικών και ευρεστικό ταίριασμα. Ως συνέπεια, είναι μια πρόκληση που έχει απασχολήσει πολλούς διακεκριμένους ερευνητές. Οι Freeman και Garder είναι οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με το πρόβλημα και τα αποτελέσματα τους παραμένουν θεμελιώδη σε αυτόν τον ερευνητικό τομέα. Λόγω των περιορισμών στις γλώσσες προγραμματισμού, στην ανάλυση των ψηφιοποιητών και στα μηχανήματα απεικόνισης, οι δύο ερευνητές κατάφεραν να λύσουν το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που εξήγαγαν από το σύνορο των κομματιών. Από τότε, έχουν προταθεί πολλοί αλγόριθμοι. Οι Radack και Badler (1982)

πρότειναν έναν αλγόριθμο αναπαράστασης σχημάτων που ήταν ικανός να ταιριάξει τα σύνορα διδιάστατων παζλ αποτελεσματικά. Η διαδικασία αυτή έκανε χρήση ενός συστήματος πολικών συντεταγμένων, το οποίο είγε ως σημεία αναφοράς τα σημεία που η καμπυλότητα παρουσίαζε ελάχιστα ή μέγιστα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να γρησιμοποιηθεί για τη γενική αναπαράσταση και το ταίριασμα συνοριακών καμπύλων. Οι Webster, LaFollette και Stafford (1991) πρότειναν κρίσιμα σημεία ισθμού για την επίλυση των παζλ. Η λύση τους αναφέρεται σε κοινά εμπορικά παζλ. Οι ισθμοί και τα κρίσιμα σημεία ισθμών είναι πολύ αποτελεσματικά χαρακτηριστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επίλυση των παζλ. Οι Kosiba, Devaux, Balasubramanian, Gandhi και Kasturi (1994) εξήγαγαν ένα νέο σύνολο χαρακτηριστικών βασισμένων στο σχήμα και στο χρώμα εμπορικών παζλ. Η δουλειά των Yao, Shao, Tamaki και Kato (1997) είναι μια προεργασία στην απόπειρα επίλυσης των παζλ με χρήση υπολογιστή. Στην εργασία αυτή τονίστηκαν τα προβλήματα της έρευνας των Freeman και Garder και προτάθηκε η λεπτή κατάτμηση της συνοριακής καμπύλης των εμπορικών παζλ. Υπάρχουν, επίσης, και αρκετές εργασίες που ασχολούνται με την επίλυση παζλ με χρήση ρομπότ, στις οποίες παρουσιάζονται αλγόριθμοι για την επίλυση ολοκλήρου του παζλ και για το επιμέρους ταίριασμα των κομματιών, πάντα με γρήση πληροφορίας που περιέχεται στο σύνορο του κομματιού (π.χ. Burdea και Wolfson, 1989, Hirota και Ohto, 1986).

Όλες οι σχετικές εργασίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν από τον τύπο της πληροφορίας που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος και από το αν ο στόχος επίλυσης ήταν κανονικά παζλ. Οι σχετικές κατηγορίες φαίνονται στον Πίνακα Α.Ι, όπου παρουσιάζονται οι σχετικές εργασίες που δημοσιεύτηκαν μέχρι το 2000.

Πίνακας Α.Ι. Κατηγοριοποίηση μεθόδων επίλυσης παζλ

Ερευνητές	Κανονικό παζλ	Χρησιμοποιεί πληροφορία συνόρου κομματιού	Χρησιμοποιεί πληροφορία χρωμάτων ή υφής
Freeman και Garder (1964)	Όχι	Ναι	Όχι
Radack και Badler (1982)	Όχι	Ναι	Όχι
Webster και άλλοι	Ναι	Ναι	Όχι
Kosiba και άλλοι (1994)	Ναι	Ναι	Ναι
Υαο και άλλοι (1997)	Ναι	Nai	Όχι
Chung και άλλοι (1998)	Ναι	Ναι	Ναι

Η δουλειά των Freeman και Garder και των Radack και Badler δεν ασχολείται με κανονικά παζλ. Όμως, όλες οι μέθοδοι χρησιμοποίησαν την πληροφορία που περιέχεται στο

σύνορο του κάθε κομματιού. Οι μέθοδοι των Kosiba και άλλων, και των Chung και άλλων (1998) χρησιμοποίησαν χρωματική πληροφορία. Όπως στη μέθοδο του Kosiba, οι Chung και άλλοι πρότειναν την επίλυση του προβλήματος με χρήση της πληροφορίας που εμπεριέχεται στο σχήμα και στο χρώμα το κομματιού. Κατά τη μέθοδο αυτή, η απόσταση δύο σημείων που βρίσκονται πάνω στις συνοριακές καμπύλες ως τη γραμμή που ορίζεται από δύο γειτονικά γωνιακά σημεία χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση του σχήματος. Υπάρχουν επίσης και απόπειρες για την επίλυση του προβλήματος αυτού με τη χρήση νευρωνικών δικτύων (π.χ. Suganthan, 1999) αλλά τα αποτελέσματα δεν είναι πολύ ικανοποιητικά.

Υπάρχουν δύο στρατηγικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την επίλυση του προβλήματος αυτού από τον υπολογιστή: αυτή που ξεκινάει από την κορυφή και αυτή που ξεκινάει από τη βάση. Η μεθοδολογία που ξεκινάει από την κορυφή είναι πολύ παρόμοια με τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζεται ένα παζλ. Συνήθως, για την παραγωγή ενός παζλ, μια μεγάλη φωτογραφία κόβεται σε πολυάριθμα μικρά ασύμμετρα κομμάτια με χρήση κάποιον κανόνων κοπής. Για ένα οποιοδήποτε κομμάτι-μέλος του S_P , το σχήμα του γειτονικού του κομματιού μπορεί να προσδιοριστεί με χρήση των κανόνων κοπής. Ο Glassner (2002) χρησιμοποίησε αυτή την προσέγγιση. Πήρε μια φωτογραφία ολόκληρης της εικόνας του παζλ και στη συνέχεια ζωγράφισε ασύμμετρα κομμένα κομμάτια στο Adobe Photoshop. Στη συνέχεια, τα κομμάτια διαχωρίστηκαν και διασκορπίστηκαν από ένα πρόγραμμα, το οποίο όμως διατήρησε τον προσανατολισμό του κάθε κομματιού. Ακολούθησε η απόπειρα ανασυγκρότησης του παζλ. Επειδή το παζλ που προέκυψε με τον τρόπο αυτό δεν είναι ένα κοινό παζλ όπως αυτά που πωλούνται στα καταστήματα, η μέθοδος αυτή δεν περιλαμβάνεται στον Πίνακα Α.Ι.

Η μεθοδολογία που ξεκινάει από τη βάση και κινείται προς την κορυφή εστιάζεται στην εύρεση ενός γειτονικού κομματιού για ένα συγκεκριμένο κομμάτι που ανήκει στο S_P με χρήση πληροφορίας που εμπεριέχεται στο σχήμα και στην υφή του κομματιού. Οι εργασίες που αναφέρονται στον Πίνακα χρησιμοποιούν αυτή την προσέγγιση. Γενικά μιλώντας, οι κανόνες κοπής δεν παρέχονται στον παίκτη ενώ, λόγω του γεγονότος ότι η μεθοδολογία αυτή είναι παρόμοια με τη διαδικασία χειροκίνητης επίλυσης του παζλ, η προσέγγιση αυτή τείνει να είναι και η πιο δημοφιλής.

Οι περισσότερες μέθοδοι χρησιμοποιούν μόνο την πληροφορία που εμπεριέχεται στο σχήμα του κομματιού και κάποια κατηγοριοποίηση των κομματιών ανάλογα με το είδος του σχήματος τους για την εφαρμογή ενός ευρύτερου αλγόριθμου επίλυσης παζλ. Καθώς σε αυτή την εργασία γρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ταιριάσματος κομματιών με βάση το

περίγραμμα τους που αναπτύχθηκε από τους Papaodysseus κ. α. (2002), η εξέταση των λεπτομερειών των μεθόδων ταιριάσματος με βάση το περίγραμμα ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

Παρόλα αυτά, ορισμένες μέθοδοι κάνουν χρήση και της χρωματικής πληροφορίας που περιέχεται στα κομμάτια ώστε να έχουν ένα επιπλέον κριτήριο ταιριάσματος των κομματιών. Συγκεκριμένα, μια πρώτη προσέγγιση έγινε από τους Kosiba, Devaux, Balasubramanian, Gandhi και Kastur (1994), οι οποίοι εξήγαγαν χρωματική πληροφορία δειγματοληπτικά κατά μήκος του συνόρου των κομματιών. Κάθε δείγμα προκύπτει από ένα παράθυρο κοντά στο σύνορο του κομματιού, ενώ η αντιστοίχηση των δειγμάτων των κομματιών προς ταίριασμα γίνεται με χρήση της εφαπτόμενης του συνόρου στο σημείο κοντινότερα στο παράθυρο δειγματοληψίας. Οι Chung, Fleck και Forsyth (1998) ακολουθούν την ίδια νοοτροπία δειγματοληψίας με παράθυρα εφαπτόμενα στο σύνορο του κομματιού και στη συνέχεια ορίζουν μια συνάρτηση κόστους, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη διαφορά των ιστογραμμάτων ανάμεσα στα παράθυρα, μέσα στα οποία έγινε η δειγματοληψία. Αν και αμφότερες οι εργασίες ισχυρίζονται πως έχουν καλά αποτελέσματα, το γεγονός ότι έχουν δημοσιευτεί σε συνέδρια περιορίζει την λεπτομέρεια με την οποία αναλύονται οι μέθοδοι τους και, ως συνέπεια, καθιστά την εφαρμογή τους για λόγους σύγκρισης αδύνατη.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των Yao και Shao (2003), κατά την οποία επίσης χρησιμοποιείται χρωματική πληροφορία. Η διαφορά της εργασίας αυτής σε σχέση με τις προηγούμενες είναι η ακόλουθη. Στις δύο εργασίες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, τα χρωματικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται είναι ο μέσος όρος και η διασπορά των τιμών απόχρωσης, εμποτισμού και έντασης (hue, saturation and intensity) για κάθε κομμάτι ή για τα παράθυρα δειγματοληψίας κατά μήκος της καμπύλης του συνόρου. Στην εργασία των Yao και Shao, πέρα από τις διαφορές στη μεθοδολογία ταιριάσματος του σχήματος των κομματιών, οι οποίες δε μας αφορούν εδώ, χρησιμοποιούνται τεχνικές συγχώνευσης εικόνας (image merging) για την εξακρίβωση του χρωματικού ταιριάσματος δύο κομματιών που πιθανώς ταιριάζουν. Οι τεχνικές αυτές κάνουν χρήση του κριτηρίου διαχωρισμού που χρησιμοποιείται από την τεχνική Otsu (1980) για τον αυτόματο προσδιορισμό του κατωφλίου διαχωρισμού με βάση κριτήρια ελαχίστων τετραγώνων.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα προσέγγιση είναι αυτή των Nielsen, Drewsen και Hansen (2008). Στην εργασία αυτή, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν μόνο το χρωματικό περιεχόμενο για να συγκρίνουν δύο κομμάτια μεταξύ τους όσον αφορά στο ταίριασμα. Η προσέγγισή

τους βασίζεται στη θεώρηση μίας λωρίδας πλάτους ενός εικονοστοιχείου ακριβώς πάνω στο περίγραμμα των κομματιών. Για κάθε κομμάτι, εξάγονται οι λωρίδες που αντιστοιχούν στις πλευρές των κομματιών αυτών και, στη συνέχεια, συγκρίνονται μεταξύ τους για πιθανό ταίριασμα. Η σύγκριση βασίζεται στη συνέλιξη των κομματιών αυτών με έναν τελεστή παρόμοιο με τον τελεστή του Sobel για την ανίχνευση ακμών σε μία εικόνα. Η ιδέα είναι ότι όταν δύο κομμάτια δεν ταιριάζουν, αυτό ισοδυναμεί με την παρουσία μίας ακμής εικόνας στη συγχωνευμένη λωρίδα που αποτελείται από τις λωρίδες των εικονοστοιχείων που προήλθαν από τα περιγράμματα των κομματιών αυτών. Κατά τα άλλα, δεν γίνεται κάποιος έλεγχος για το ταίριασμα του σχήματος των κομματιών αυτών. Η προσέγγιση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και όταν όλα τα κομμάτια του παζλ έχουν ακριβώς το ίδιο σχήμα, ακόμα και όταν το σχήμα αυτό είναι ένα απλό (ορθογώνιο) παραλληλόγραμμο. Για την εφαρμογή του αλγορίθμου σε πραγματικά παζλ, όμως, οι συγγραφείς είναι αναγκασμένοι να προχωρήσουν σε μία ανίχνευση των γωνιών των κομματιών, ώστε να προσδιορίσουν τα άκρα της κάθε λωρίδας που θα συγκριθεί με τις υπόλοιπες. Καθώς στην περίπτωσή μας δεν γίνεται κάποια σχετική ανάλυση των κομματιών ανάλογα με το σχήμα (δηλαδή τα κομμάτια δε χωρίζονται σε υποκατηγορίες ανάλογα με το σχήμα τους), αλλά και λόγω του γεγονότος ότι τέτοιος διαχωρισμός δεν μπορεί να γίνει στην περίπτωση των κομματιών της Σαντορίνης, ο αλγόριθμος αυτός δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωσή μας για λόγους σύγκρισης. Εν πάση περιπτώσει, τα αποτελέσματα που αναφέρουν οι συγγραφείς στην εργασία τους είναι, σύμφωνα πάντα με τους συγγραφείς, ελαφρώς χειρότερα από αυτά των Υαο και Shao κατά την εφαρμογή σε πραγματικά παζλ.

Εκτός όμως από το χρωματικό περιεχόμενο, στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση και του θεματικού περιεχομένου των κομματιών του παζλ για την εξακρίβωση ή απόρριψη πιθανών σημείων ταιριάσματος. Από όλες τις τεχνικές επίλυσης παζλ που διερευνήθηκαν, σε καμία δε γίνεται χρήση του θεματικού περιεχομένου. Παρόλα αυτά, Η μεθοδολογία των Υαο και Shao χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο για να διαπιστώσουμε την ακρίβεια της μεθοδολογίας ταιριάσματος με βάση το χρωματικό / θεματικό κριτήριο που εφαρμόστηκε σε αυτή την εργασία σε σχέση με τις πιο πρόσφατες έρευνες επίλυσης παζλ, οι οποίες όμως, σημειωτέον, κάνουν χρήση κριτηρίων που περιλαμβάνουν εξέταση του σχήματος και του χρώματος των κομματιών και όχι του θεματικού τους περιεχομένου.

Α.Ι.4. Περιγραφή της μεθοδολογίας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο αλγόριθμος ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων με βάση το περίγραμμα των κομματιών παρουσιάζει ορισμένα κοινά γαρακτηριστικά με τους αλγορίθμους που γρησιμοποιούνται για την αυτόματη επίλυση παζλ. Και στις δύο περιπτώσεις προβλημάτων, ο κυρίως αλγόριθμος εξετάζει με κάποιο τρόπο το περίγραμμα των κομματιών και προσπαθεί, με κάποιο τρόπο, να εξάγει ορισμένα χαρακτηριστικά του σχήματος του περιγράμματος του κομματιού. Στη συνέχεια, τα γαρακτηριστικά που εξήγθησαν συγκρίνονται μεταξύ τους ώστε να γίνει μία εκτίμηση σχετικά με το πώς θα μπορούσαν να ταιριάξουν μεταξύ τους δύο συγκεκριμένα κομμάτια με βάση το σχήμα του περιγράμματός τους. Στην περίπτωση των μεθόδων αυτόματης επίλυσης παζλ, οι πιθανές συνενώσεις που προκύπτουν με τον τρόπο αυτό εξετάζονται αναλυτικά με διάφορους τρόπους και μεθοδολογίες ώστε να προκύψουν πιθανές τελικές εκτιμήσεις σχετικά με το σχήμα της ολοκληρωμένης και πλήρως ανακατασκευασμένης εικόνας. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην περίπτωση της ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων, κάτι τέτοιο είναι αρκετά δυσκολότερο λόγω των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν στην περιγραφή του προβλήματος και, κυρίως, λόγω της έλλειψης πρότερης γνώσης σχετικά με την αρχική μορφή του θραυσμένου αντικειμένου, το οποίο στην περίπτωσή μας είναι η τοιχογραφία.

Και στις δύο περιπτώσεις, υπάρχει μία σοβαρή πιθανότητα να προκύψουν από το σύστημα πολλές πιθανές συνενώσεις οι οποίες, αν και μπορεί να είναι έγκυρες με βάση το κριτήριο σύγκρισης του περιγράμματος του κομματιών, μπορεί να μην ανταποκρίνονται, τελικώς, σε πραγματικές συνενώσεις. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην περίπτωση ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων το πρόβλημα αυτό είναι ακόμη εντονότερο, καθώς, από τη μία, τα κομμάτια δεν έχουν συγκεκριμένο σχήμα ενώ, από την άλλη, πρέπει να ληφθεί υπόψη η πιθανή φθορά που μπορεί να έχουν υποστεί τα κομμάτια λόγω του χρόνου και της διαδικασίας με την οποία έγινε η θραύση του αρχικού αντικειμένου.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι, λοιπόν, η βελτίωση του αλγορίθμου ανακατασκευής μέσω του περιορισμού του πλήθους των πιθανών συνενώσεων που μπορούν να προκύψουν με βάση το κριτήριο ταιριάσματος του περιγράμματος των κομματιών. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να γίνει αν ληφθεί υπόψη και εξεταστεί κάποιο πιθανό ταίριασμα του χρωματικού ή / και του θεματικού περιεχομένου των κομματιών, ιδιαίτερα κοντά στην περιοχή πιθανού ταιριάσματος των περιγραμμάτων των κομματιών.

Σε αυτό ακριβώς το σημείο είναι που οι ομοιότητες των εφαρμογών της αυτόματης ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων και της αυτόματης ανακατασκευής του παζλ μας εξυπηρετούν. Εφόσον η αυτόματη ανακατασκευή του παζλ αποτελεί μία «υποπερίπτωση» των δυνατών εφαρμογών του αλγορίθμου αυτόματης ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων, οποιεσδήποτε αλλαγές / βελτιώσεις στον τελευταίο αλγόριθμο θα πρέπει να λειτουργούν με σχετική επιτυχία και κατά την εφαρμογή του στην ανακατασκευή ενός παζλ. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε η αρχική εφαρμογή των βελτιώσεων σε ένα εμπορικό παζλ, ώστε να διαπιστωθεί η εγκυρότητα και η αποτελεσματικότητά τους και, στη συνέχεια, οι μετατροπές αυτές χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση μίας πραγματικής εφαρμογής του αλγορίθμου ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων, δηλαδή στην περίπτωση της ανακατασκευής των θραυσμένων τοιχογραφιών του Ακρωτηρίου της Σαντορίνης. Με τον τρόπο αυτό, η αυτόματη ανακατασκευή του παζλ προσέφερε το υπόβαθρο για την θεωρητική μελέτη της απόδοσης των βελτιώσεων, ενώ η εφαρμογή στην ανακατασκευή των τοιχογραφιών του Ακρωτηρίου προσέφερε τη δυνατότητα μελέτης της απόδοσης του βελτιωμένου αλγορίθμου σε μία πραγματική περίπτωση.

Επομένως, η ανάλυση της μεθοδολογίας που ακολουθεί μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: τη μελέτη της απόδοσης του βελτιωμένου αλγορίθμου στην περίπτωση του παζλ και τη μελέτη της πιο ουσιώδους εφαρμογής του βελτιωμένου αλγορίθμου στην πραγματική περίπτωση της ανακατασκευής των τοιχογραφιών. Σε κάθε σημείο της περιγραφής της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, θα τονίζονται οι σχετικές ομοιότητες και διαφορές που παρουσίασαν οι δύο εφαρμογές καθώς και το πώς οι ομοιότητες και οι διαφορές αυτές επηρέασαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Σε αυτό το σημείο θα ήταν σκόπιμο να προσδιορίσουμε τον «αλγόριθμο» επίλυσης απλών παζλ που χρησιμοποιεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος. Η επίλυση παζλ είναι μία πνευματική άσκηση, στην οποία επιδιδόμαστε συνήθως ξεκινώντας από την παιδική μας ηλικία ώστε να αναπτυχθούν κάποια συγκεκριμένα τμήματα του εγκεφάλου μας και, ιδιαίτερα, αυτά που αφορούν στην αντίληψη των χρωμάτων και των σχημάτων, αλλά και αυτά που έχουν να κάνουν με τη μαθηματική επίλυση προβλημάτων. Σε πρώιμο στάδιο, τα παζλ τα οποία επιλύει ένα παιδί περιλαμβάνουν λίγα κομμάτια και σχετικά απλή θεματολογία, ενώ καθώς ο ανθρώπινος εγκέφαλός αναπτύσσεται, αποκτά τη δυνατότητα να επιλύει πιο πολύπλοκα παζλ, με μεγαλύτερο αριθμό κομματιών και πιο σύνθετα και πολύπλοκα θεματικά στοιχεία. Ανεξαρτήτως του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του παζλ, όμως, υπάρχουν τρία βασικά χαρακτηριστικά βήματα που ακολουθούνται κατά τη διάρκεια επίλυσης ενός παζλ από τον άνθρωπο:

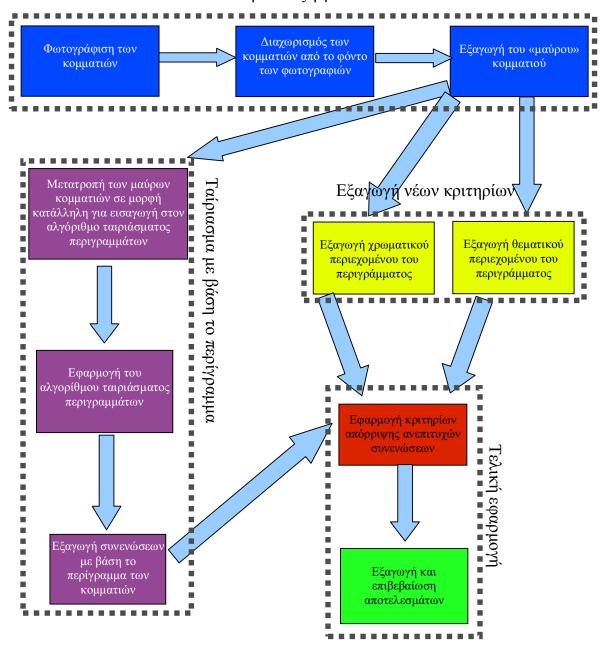
- 1. Εξέταση του σχήματος των κομματιών: Το πρώτο στοιχείο που εξετάζει κανείς όταν προσπαθεί να αποφασίσει εάν δύο κομμάτια ταιριάζουν μεταξύ τους είναι συνήθως το σχήμα των κομματιών αυτών. Αυτό συμβαίνει επειδή, σε αντίθεση με το χρωματικό ή το θεματικό περιεχόμενο των κομματιών, το ακριβές ταίριασμα του σχήματος των κομματιών αποτελεί πάντα απαραίτητη προϋπόθεση για το ταίριασμα των κομματιών. Από την άλλη, υπάρχουν συχνά περιπτώσεις όπου το χρωματικό και το θεματικό περιεχόμενο των κομματιών μπορεί να μην είναι καθοριστικά σχετικά με το κατά πόσο ταιριάζουν δύο κομμάτια ή όχι. Η πρωταρχική σημασία του σχήματος στην επίλυση ενός παζλ φαίνεται από το γεγονός ότι, σχεδόν στο σύνολο της βιβλιογραφίας αλλά και των περιπτώσεων της πραγματικής ζωής, οι αλγόριθμοι επίλυσης παζλ έχουν ως πρώτο βήμα τον προσδιορισμό και την ανακατασκευή του περιγράμματος της εικόνας του παζλ, καθώς τα κομμάτια που ανήκουν στο περίγραμμα ξεχωρίζουν άμεσα από τα υπόλοιπα λόγω του γεγονότος ότι έχουν μία πλευρά η οποία είναι εντελώς ευθεία.
- 2. Εξέταση του χρωματικού περιεχομένου των κομματιών: Εφόσον διαπιστωθεί (ή, μάλλον, δεν αποκλειστεί) πιθανό ταίριασμα των κομματιών με βάση το σχήμα τους, εξετάζεται το περιεχόμενο τους. Σε πρώτο στάδιο εξετάζεται το γενικότερο χρωματικό περιεχόμενό τους, καθώς η εξέταση αυτή είναι πιο στοιχειώδης και λιγότερο λεπτομερής από την εξέταση του θεματικού περιεχομένου και, επομένως, μπορεί να γίνει με μεγαλύτερη ταχύτητα. Εάν το χρώμα των κομματιών βρεθεί πως είναι παρόμοιο κοντά στο σημείο ταιριάσματος, τότε τα κομμάτια εξετάζονται και από την πλευρά του θεματικού περιεχομένου.
- 3. Εξέταση του θεματικού περιεχομένου των κομματιών: Η εξέταση του θεματικού περιεχομένου των κομματιών γίνεται συνήθως τελευταία, καθώς η εξέταση αυτή πολλές φορές περιλαμβάνει και αναγνώριση του θεματικού στοιχείου που περιέχεται στο κομμάτι και σύγκριση του στοιχείου αυτού με την συνολική εικόνα του παζλ, για να διαπιστωθεί η τελική θέση του κομματιού με βάση την ευρύτερη ανακατασκευασμένη εικόνα. Η σύγκριση του θεματικού περιεχομένου μπορεί να περιλαμβάνει την αναγνώριση του στοιχείου που απεικονίζεται, εάν το κομμάτι περιέχει ένα επαρκές ποσοστό του θεματικού στοιχείο ώστε το τελευταίο να αναγνωριστεί πλήρως από τον άνθρωπο, ή την απλή ένταξη του κομματιού σε μία ομάδα κομματιών, τα οποία περιέχουν μέρη ενός μεγαλύτερου αντικειμένου, το οποίο όμως δεν είναι άμεσα αναγνωρίσιμο από ένα μεμονωμένο κομμάτι. Σε οποιαδήποτε περίπτωση, η διαδικασία αυτή αποτελεί συνήθως το πιο χρονοβόρο

μέρος του αλγορίθμου, καθώς είναι και η πιο πολύπλοκη, ιδιαίτερα όταν έχουμε να κάνουμε με παζλ που αποτελούνται από μεγάλο αριθμό κομματιών, στην οποία περίπτωση τα κομμάτια είναι συνήθως πολύ μικρά σε μέγεθος και το κάθε κομμάτι περιέχει ένα πολύ μικρό μέρος της μεγαλύτερης εικόνας, οπότε το θεματικό τους περιεχόμενο είναι και πιο δύσκολα αναγνωρίσιμο.

Φυσικά, κατά τη διάρκεια ανακατασκευής ενός παζλ ο χρήστης εξετάζει πρακτικά κάθε κομμάτι και με τους τρεις τρόπους (σχηματικά, χρωματικά, θεματικά) ώστε να καταλήξει σε μία απόφαση σχετικά με το πιθανό ταίριασμα των κομματιών. Επίσης, είναι σκόπιμο να ληφθεί υπόψη ότι όταν έχουμε να κάνουμε με παζλ με μεγάλο πλήθος κομματιών, πολλές φορές ο χρήστης δεν παίρνει τελικές αποφάσεις σχετικά με το ταίριασμα ή όχι κάποιον κομματιών πριν να ανακατασκευαστεί επαρκώς ένα σημαντικό μέρος του παζλ. Ο λόγος για αυτό είναι ότι πολλές φορές υπάρχουν κομμάτια, για τα οποία λόγω ομοιότητας σχήματος ή χρωματικού / θεματικού περιεχομένου ο χρήστης δεν μπορεί να αποφανθεί τελεσίδικα σχετικά με το κατά πόσο ταιριάζουν ή όχι. Στην περίπτωση αυτή, τα κομμάτια συχνά ταξινομούνται σε ομάδες, μέσα από τις οποίες είναι πιο πιθανό να προκύψει η τελική συνένωσή τους. Η σημασία του γεγονότος αυτού για τις εφαρμογές που εξετάζονται εδώ θα φανεί αργότερα, οπότε θα εξετάσουμε και την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων που παρουσιάζονται και θα τους συγκρίνουμε με αλγορίθμους άλλης νοοτροπίας.

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε σε μία σχηματική απεικόνιση του συνολικού αλγορίθμου που εξετάστηκε για τις εν λόγω εφαρμογές. Θα ξεκινήσουμε με ένα διάγραμμα, το οποίο περιγράφει σχηματικά την ακολουθία των ενεργειών που ακολουθήθηκε για τις δύο εφαρμογές. Σημειωτέον ότι η γενική μεθοδολογία δε διαφέρει για τις δύο εφαρμογές· οι διαφορές στην πράξη παρουσιάστηκαν κυρίως σε λειτουργικές λεπτομέρειες, όπως διαφορές στην προγραμματιστική υλοποίηση και στην ταξινόμηση των αποτελεσμάτων. Οι διαφορές στην πρακτική εφαρμογή αναφέρονται σαφώς στο κείμενο.

Προ-επεξεργασία



Σχήμα Α.1. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας εφαρμογής του συνολικού αλγορίθμου ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων.

Στο Σχήμα Α.1 φαίνεται μία απεικόνιση των διαφόρων σταδίων εφαρμογής του συνολικού προτεινόμενου αλγορίθμου ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων, ο οποίος κάνει χρήση τόσο του αλγορίθμου ανακατασκευής με βάση το περίγραμμα των κομματιών, όσο και των τροποποιήσεων που αφορούν στη χρήση του χρωματικού και του θεματικού

περιεχομένου για την περαιτέρω βελτίωση των αποτελεσμάτων του πρώτου. Τα στάδια που απεικονίζονται με το ίδιο χρώμα ανήκουν στην ίδια θεματική ενότητα. Χονδρικά μιλώντας και όπως φαίνεται και από το σχήμα, τα στάδια που αποτελούν τον αλγόριθμο μπορούν να χωριστούν στα ακόλουθα:

- 1. Προ-επεξεργασία κομματιών
- 2. Εφαρμογή αλγορίθμου ταιριάσματος με βάση το περίγραμμα μόνο
- 3. Εξαγωγή και υπολογισμός κριτηρίων απόρριψης με βάση το χρωματικό και το θεματικό περιεχόμενο
- 4. Τελική εφαρμογή όλων των κριτηρίων, εξαγωγή των αποτελεσμάτων και επιβεβαίωση αυτών

Η σειρά με την οποία απαριθμούνται τα προαναφερθέντα βήματα είναι και αυτή με την οποία τα βήματα αυτά εφαρμόζονται στην πράξη. Ο λόγος για αυτό θα γίνει προφανής όταν ο αναγνώστης φτάσει το κεφάλαιο με τα αποτελέσματα. Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή του κάθε βήματος ξεχωριστά.

Α.Ι.5. Προ-επεξεργασία των εικόνων των κομματιών

Οσον αφορά στο παζλ, το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε είχε διαστάσεις 22 x 16 cm και 50 κομμάτια, ενώ κάθε κομμάτι είχε διαστάσεις περίπου 4,5 x 3 cm. Τα κομμάτια απλώθηκαν σε τυχαίους προσανατολισμούς πάνω στην επιφάνεια του σαρωτή και σαρώθηκαν με ανάλυση 150 DPI με τρία διαφορετικά χρώματα φόντου, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία του καθαρισμού και της απομόνωσης των κομματιών από το φόντο (Σχήματα Α.2 και Α.3). Στη συνέχεια, οι εικόνες που περιείχαν τα διάφορα σύνολα από κομμάτια διασπάστηκαν ώστε να έχουμε μόνο μία εικόνα ανά κομμάτι.



Σχήμα Α.2. Εικόνα του ολοκληρωμένου παζλ.



Σχήμα Α.3. Σαρωμένα κομμάτια του παζλ πριν το διαχωρισμό και τον καθαρισμό τους.

Κάθε τέτοιο κομμάτι, στη συνέχεια, «καθαρίστηκε», δηλαδή απομονώθηκε από το φόντο της αντίστοιχης εικόνας του. Η διαδικασία αυτή διετελέσθη με χρήση εμπορικών προγραμμάτων επεξεργασίας εικόνας (και, συγκεκριμένα, το Paint Shop Pro, έκδοση 7.0 της Jasc Software) για λόγους απλότητας και ταχύτητας. Φυσικά, η αυτοματοποίηση της

διαδικασίας αυτής με κάποιον τυπικό αλγόριθμο κατάτμησης εικόνας μπορεί να υλοποιηθεί σχετικά άμεσα, εάν προκύψει αντίστοιχη ανάγκη (όπως, για παράδειγμα, στην περίπτωση της ολοκλήρωσης του συστήματος σε κάποιο εμπορικό πακέτο). Έτσι, προέκυψε η τελική εικόνα κάθε κομματιού, η οποία θεωρήθηκε πώς είναι και η τελική μορφή των δεδομένων εισόδου του συστήματος (Σχήμα Α.4(β)).



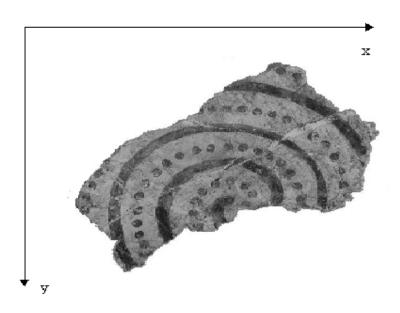
Σχήμα Α.4. Ένα μεμονωμένο κομμάτι (α) και η αντίστοιχη «καθαρισμένη» εικόνα του χωρίς φόντο (β).

Για την αντίστοιχη εφαρμογή του αλγορίθμου στην ανακατασκευή των τοιχογραφιών του Ακρωτηρίου, τα κομμάτια φωτογραφήθηκαν τοποθετημένα σε ένα τελάρο με λεπτή άμμο και μια χρωματική κλίμακα, ώστε στη συνέχεια να υπάρχει η δυνατότητα διόρθωσης των χρωμικών αλλοιώσεων που μπορεί να προκύψουν από τις διαφορετικές συνθήκες φωτογράφησης (Σχήμα Α.5).



Σχήμα Α.5. Φωτογραφία ενός κομματιού που ανεσκάφη στο Ακρωτήρι.

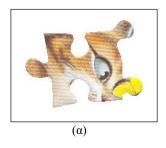
Στη συνέχεια, αφού κάθε εικόνα πέρασε από την κατάλληλη επεξεργασία ώστε να ρυθμιστούν τα χρώματα της, αφαιρέθηκε το φόντο της άμμου, της χρωματικής κλίμακας και του τελάρου με χρήση καταλλήλων αλγορίθμων κατάτμησης και εμπορικών προγραμμάτων επεξεργασίας εικόνας. Έτσι, η τελική εικόνα ήρθε σε μια μορφή όπου το κομμάτι βρίσκεται απομονωμένο και με τυχαίο προσανατολισμό μέσα σε ένα λευκό φόντο. Εάν θεωρήσουμε ένα σύστημα αξόνων πάνω σε αυτή τη θέση του κομματιού στη φωτογραφία, έχουμε το «απόλυτο σύστημα αναφοράς» του κάθε κομματιού (Σχήμα Α.6).

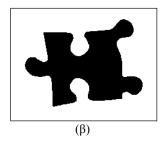


Σχήμα Α.6. Το κομμάτι του Σχήματος Α.5 στο «απόλυτο» σύστημα αναφοράς του, με τους αντίστοιχους άξονες (x,y).

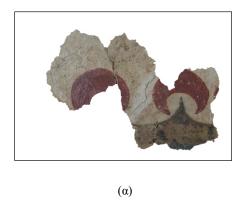
Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι φωτογραφίες τόσο των κομματιών του παζλ όσο και των κομματιών της Σαντορίνης περιείχαν και ένα χάρακα μέσα. Ο χάρακας αυτός μας επέτρεψε να ρυθμίσουμε τα μεγέθη των δύο συνόλων φωτογραφιών, ώστε οι ψηφιακές φωτογραφίες να έχουν την ίδια κλίμακα, δηλαδή την ίδια αντιστοιχία εικονοστοιχείων ανά εκατοστό. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίσαμε η ανάλυση και το μέγεθος των δύο συνόλων φωτογραφιών θα είναι τέτοια, ώστε όλα τα σχετικά προγράμματα θα μπορούν να εκτελεστούν με είσοδο οποιαδήποτε εικόνα από οποιοδήποτε από τα δύο σύνολα φωτογραφιών χωρίς σοβαρές μετατροπές, αλλά και ότι τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την εκτέλεση των προγραμμάτων θα είναι συγκρίσιμα, τουλάχιστον όσον αφορά το μέγεθος.

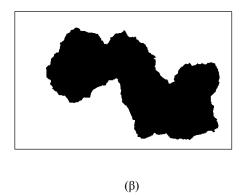
Στη συνέχεια, κάθε καθαρισμένη φωτογραφία κομματιού χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του αντίστοιχου «μαύρου» κομματιού (Σχήματα Α.7 και Α.8). Το «μαύρο» κομμάτι είναι μία φωτογραφία του κομματιού ιδίου μεγέθους με την αρχική φωτογραφία, στην οποία κάθε έγχρωμο εικονοστοιχείο του αρχικού κομματιού έχει αντικατασταθεί από ένα μαύρο εικονοστοιχείο, ενώ κάθε εικονοστοιχείο του φόντου έχει αντικατασταθεί από ένα λευκό εικονοστοιχείο. Ως συνέπεια, η εικόνα του μαύρου κομματιού αντί για εκατομμύρια χρώματα έχει μόνο δύο: το λευκό και το μαύρο. Η εικόνα του μαύρου κομματιού χρησιμοποιήθηκε τόσο για την εφαρμογή του αλγορίθμου ταιριάσματος με βάση το περίγραμμα, όσο και για την εξαγωγή των απαραιτήτων πληροφοριών για τον υπολογισμό των κριτηρίων ταιριάσματος με βάση το χρωματικό και το θεματικό περιεχόμενο. Οι διαδικασίες αυτές θα διευκρινιστούν στη συνέχεια του κειμένου.





Σχήμα Α.7. Εικόνες ενός καθαρισμένου κομματιού του παζλ (α) και του αντίστοιχου μαύρου περιγράμματος (β).





Σχήμα Α.8. Εικόνες ενός καθαρισμένου κομματιού της Σαντορίνης (α) και του αντίστοιχου μαύρου περιγράμματος (β).

Α.Ι.6. Το σύστημα αυτομάτου ταιριάσματος κονιαμάτων με χρήση του περιγράμματος μόνο

Α.Ι.6.i. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη ανάλυση του συστήματος ταιριάσματος κονιαμάτων με χρήση της πληροφορίας που εξάγεται από το περίγραμμα τους. Ο αλγόριθμος αυτός υπάρχει στην ολοκληρωμένη και αναλυτική μορφή του στη δημοσίευση Papaodysseus C., Panagopoulos Th., Exarhos M., Triantafillou C., Fragoulis D., Doumas C., 2002, Contour-shape based reconstruction of fragmented 1600 B.C. wall paintings. IEEE Trans. On Signal Processing, 50 (6), 1277-1288.

Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται χρησιμοποιήθηκε για το ταίριασμα των κομματιών του puzzle, με τις παραμέτρους του ρυθμισμένες με τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει και ένας αριθμός «ανεπιτυχών» πιθανών συνενώσεων. Ο λόγος για αυτό είναι ο εξής: αν και το σύστημα μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να επιτύχουμε σχεδόν τέλειο ταίριασμα των κομματιών, ένας αριθμός ανεπιτυχών συνενώσεων είναι επιθυμητός, ώστε να μπορέσουμε να διαπιστώσουμε την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων απόρριψης συνενώσεων με βάση το χρωματικό και το θεματικό περιεχόμενο. Χωρίς τις ανεπιτυχείς αυτές συνενώσεις, η πρακτική εφαρμογή των αλγορίθμων απόρριψης με βάση το χρωματικό και το θεματικό περιεχόμενο θα ήταν άνευ νοήματος, καθώς δε θα υπήρχε ικανός αριθμός συνενώσεων προς απόρριψη ώστε να επιβεβαιώσουμε την αποτελεσματικότητά τους.

Α.Ι.6.ii. Περαιτέρω προ-επεξεργασία των κομματιών

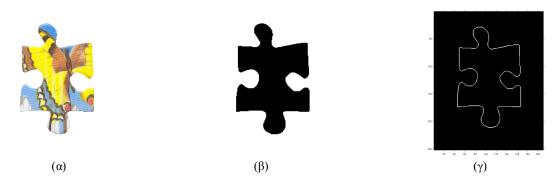
Κάθε κομμάτι φωτογραφήθηκε και καθαρίστηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και, στη συνέχεια, εξήχθη το περίγραμμα του. Όμως, για την κατάλληλη εφαρμογή του αλγορίθμου ταιριάσματος των κομματιών το περίγραμμα του κομματιού πρέπει να έχει μία συγκεκριμένη μορφή, για την εξαγωγή της οποίας οι τυπικοί αλγόριθμοι ανίχνευσης ακμών κρίθηκαν ακατάλληλοι. Όπως θα φανεί και από την ανάλυση που ακολουθεί, για την εφαρμογή του αλγόριθμου ταιριάσματος με βάση το περίγραμμα, το περίγραμμα του κάθε κομματιού πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

1. Κάθε εικονοστοιχείο του περιγράμματος πρέπει να έχει ακριβώς δύο

γειτονικά εικονοστοιχεία.

- 2. Δεν επιτρέπονται μεμονωμένα εικονοστοιχεία ή ομάδες εικονοστοιχείων.
- 3. Δεν επιτρέπεται ο σχηματισμός ορθής γωνίας από τριάδες εικονοστοιχείων.

Για να εξασφαλιστεί η ικανοποίηση των συνθηκών αυτών, δημιουργήθηκε κατάλληλο λογισμικό, το οποίο εξάγει το περίγραμμα εξασφαλίζοντας ότι ικανοποιούνται και οι τρεις αυτές συνθήκες. Το λογισμικό αυτό έκανε χρήση της μαύρης εικόνας του κάθε κομματιού και από αυτή εξήγαγε το σχετικό περίγραμμα (Σχήμα Α.9).



Σχήμα Α.9. Εικόνες ενός κομματιού (α), του αντίστοιχου μαύρου (β) και του περιγράμματός του (γ).

Α.Ι.6.iii. Περιστροφή των περιγραμμάτων

Ας θεωρήσουμε δύο προσκείμενα κομμάτια. Εφόσον ο προσανατολισμός τους στο απόλυτο σύστημα αναφοράς τους είναι τελείως τυχαίος, για να διαπιστώσουμε εάν ταιριάζουν ή όχι πρέπει να περιστρέψουμε με κατά κανόνα τυχαίο τρόπο τουλάχιστον το ένα από τα δύο κομμάτια. Για αυτό το λόγο, κατασκευάζονται τα περιγράμματα του κάθε κομματιού που αντιστοιχούν σε όλους τους πιθανούς προσανατολισμούς που προκύπτουν από την περιστροφή του κομματιού κατά αριθμό μοιρών ίσο με STEP. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό, εάν θεωρήσουμε ότι STEP = 1°, τότε θα πρέπει να εφαρμόσουμε 360 περιστροφές πάνω στο αρχικό περίγραμμα γύρω από το κέντρο του απολύτου συστήματος αναφοράς του κομματιού αυτού, γεγονός που μας δίνει 360 περιγράμματα για κάθε κομμάτι. Παρατηρούμε πως, εφόσον κάθε κομμάτι μπορεί να θεωρηθεί συμπαγές σώμα, η περιστροφή γύρω από ένα σημείο διαφορετικό από το κέντρο βάρους του είναι ένας συνδυασμός παράλληλης μετατόπισης και περιστροφής γύρω από το κέντρο του

συστήματος αναφοράς, δηλαδή γύρω από την αρχή των αξόνων. Για την περιστροφή γύρω από την αρχή των αξόνων, χρησιμοποιούμε τον γνωστό τύπο

$$\begin{bmatrix} Y \\ X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ x \end{bmatrix}$$

Η άμεση εφαρμογή της εξίσωσης αυτής, όμως, προκαλεί την παραβίαση των τριών συνθηκών που ορίστηκαν πρωτύτερα. Για να το αποφύγουμε αυτό, σχηματίστηκε μια «εικονική» εκλέπτυνση όλων των εικονοστοιχείων, με αποτέλεσμα ένα πιο πυκνό πλέγμα συντεταγμένων. Στη συνέχεια, η περιστροφή εφαρμόστηκε στο πυκνότερο αυτό πλέγμα, έχοντας ως αποτέλεσμα, μετά από εφαρμογή κατάλληλου λογισμικού, εικόνες των περιγραμμάτων που ικανοποιούν τις απαραίτητες συνθήκες.

Α.Ι.6.iv. Διαχωρισμός του περιγράμματος σε τμήματα

Στη συνέχεια, το περίγραμμα του κομματιού χωρίζεται σε τμήματα ως εξής:

Πάνω από το περίγραμμα περνάει μια μάσκα 3x3, όπου στο κέντρο της βρίσκεται κάθε φορά ένα εικονοστοιχείο του περιγράμματος. Κάθε στοιχείο της μάσκας είναι αριθμημένο, όπως φαίνεται στο Σχήμα A.10(α). Η μάσκα αυτή χρησιμοποιείται για την αρίθμηση των εικονοστοιχείων του περιγράμματος, σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

Σαρώνουμε με την μάσκα την εικόνα που περιέχει το περίγραμμα του κομματιού οριζοντίως, μέχρι να συναντήσουμε το πρώτο εικονοστοιχείο του περιγράμματος. Το εικονοστοιχείο αυτό αποτελεί και το πρώτο της αρίθμησης μας. Μέσα στη μάσκα που είναι τοποθετημένη με κέντρο το εικονοστοιχείο αυτό, όμως, θα πρέπει να περιέχεται και ένα εικονοστοιχείο του περιγράμματος στη θέση 1 ή 2, αφού ξεκινήσαμε από την πάνω αριστερά «γωνία» του περιγράμματος. Το εικονοστοιχείο αυτό γίνεται το δεύτερο εικονοστοιχείο του περιγράμματος μας με ωρολογιακή φορά. Στη συνέχεια η μάσκα μετατοπίζεται ώστε να έχει ως κέντρο το 2° εικονοστοιχείο και το εικονοστοιχείο που βρίσκεται μέσα στη μάσκα, ανήκει στο περίγραμμα και δεν αποτελεί το εικονοστοιχείο #1 ονομάζεται εικονοστοιχείο #3 του περιγράμματος και ούτω καθ' εξής μέχρι να αριθμηθεί ολόκληρο το περίγραμμα.

Εφόσον το περίγραμμα αριθμηθεί σύμφωνα με την ωρολογιακή φορά, στη συνέχεια χωρίζεται σε τμήματα με τον ακόλουθο τρόπο (Σχήμα Α.11): Τα εικονοστοιχεία #1 και #2 ανήκουν στο πρώτο τμήμα. Εάν το εικονοστοιχείο #3 είναι συγγραμμικό με τα #1 και #2

και τα εικονοστοιχεία #2, #3 και #4 είναι και αυτά συγγραμμικά, τότε το εικονοστοιχείο #3 ανήκει στο τμήμα #1.

Το πλήθος των τμημάτων αλλάζει (δηλαδή έχουμε καινούργιο τμήμα) όταν τα εικονοστοιχεία #(m-1), #m και #(m+1) δεν είναι συγγραμμικά. Παρατηρούμε ότι το πρώτο εικονοστοιχείο του κάθε τμήματος θα μπορούσε κάλλιστα να ανήκει και στο προηγούμενο τμήμα (για παράδειγμα, στο Σχήμα Α.11 το εικονοστοιχείο #4 μπορεί να ανήκει στο τμήμα #1 και στο τμήμα #2, ενώ το εικονοστοιχείο #9 μπορεί να ανήκει στο τμήμα #2 ή στο τμήμα #3). Γενικά, με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται εδώ κάθε τέτοιο εικονοστοιχείο θεωρείται ότι είναι το πρώτο εικονοστοιχείο του τμήματος με το μεγαλύτερο απόλυτο αριθμητικό.

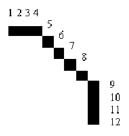
Κάθε φορά που έχουμε αλλαγή τμήματος, έστω στο εικονοστοιχείο #m, ορίζουμε και τη σχετική γωνία μεταξύ του παρόντος και του επομένου τμήματος ως τη μοναδική κυρτή γωνία μεταξύ του εικονοστοιχείου #(m+1) σε σχέση με το εικονοστοιχείο #(m-1), σύμφωνα με τον πίνακα απολύτων γωνιών των εικονοστοιχείων της μάσκας 3x3 με κέντρο το εικονοστοιχείο C, όπως φαίνεται στο Σχήμα Α.10(β). Επίσης, για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ορίζεται και η απόλυτη γωνία του κάθε τμήματος, η οποία είναι η γωνία που σχηματίζει το τμήμα αυτό με τους άξονες (x, y) του απολύτου συστήματος αναφοράς του κομματιού αυτού. Η διαδικασία κατάτμησης του περιγράμματος σε τμήματα ολοκληρώνεται όταν όλα τα εικονοστοιχεία του περιγράμματος έχουν ανατεθεί σε ένα τμήμα.

6	7	8
5	C	1
4	3	2

Σχήμα Α.10(α) Απαρίθμηση των εικονοστοιχείων της μάσκας 3x3. Το C είναι το κεντρικό εικονοστοιχείο της μάσκας, το οποίο ανήκει στο περίγραμμα.

135	90	45
180	С	0
-135	-90	-45

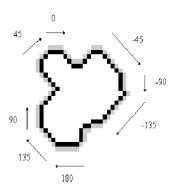
Σχήμα Α.10(β). Απεικόνιση των γωνιών όλων των εικονοστοιχείων της μάσκας 3x3 με κέντρο το C.



Σχήμα Α.11. Τμήμα 1: Εικονοστοιχεία #1, #2, #3. **Τμήμα 2:** Εικονοστοιχεία #4, #5, #6, #7, #8. **Τμήμα 3:** Εικονοστοιχεία #9, #10, #11, #12.

Α.Ι.6.ν. Ορισμός των παραμέτρων βέλτιστου ταιριάσματος

Ας θεωρήσουμε ότι το ένα από τα δύο περιγράμματα των κομματιών είναι το σταθερό περίγραμμα και ας ορίσουμε κατά σύμβαση το βέλτιστο σχήμα που ταιριάζει σε αυτό (Σχήμα Α.12). Για κάθε εικονοστοιχείο του περιγράμματος, έχουμε μια ένα-προς-ένα αντιστοιχία με κάθε εικονοστοιχείο του σχήματος αυτού. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι στο πρώτο εικονοστοιχείο του κάθε τμήματος ταιριάζουν δύο εικονοστοιχεία, καθώς για τη διαδικασία αυτή και μόνο, το πρώτο εικονοστοιχείο του τμήματος m θεωρούμε πως ανήκει και στο τμήμα m-1.



Σχήμα Α.12. Απεικόνιση του βέλτιστου σχήματος που ταιριάζει σε ένα περίγραμμα. Με μαύρο φαίνεται το περίγραμμα του κομματιού, ενώ με γκρι φαίνεται το βέλτιστο σχήμα που ταιριάζει σε αυτό.

A.I.6.vi. Οι έννοιες της «σταθερής» και της «περιστρεφόμενης» αλυσίδας

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε δύο κομμάτια και θέλουμε να αποφασίσουμε εάν τα περιγράμματα τους ταιριάζουν και, εάν ναι, σε ποιο σημείο. Για να το καταφέρουμε αυτό, προχωρούμε ως εξής:

Το ένα κομμάτι επιλέγεται αυθαίρετα να είναι το σταθερό και τοποθετείται στο απόλυτο σύστημα αναφοράς του, το οποίο ονομάζεται «σταθερό κομμάτι». Στη συνέχεια, θεωρούμε ένα μήκος σύγκρισης μετρημένο σε εικονοστοιχεία, ας πούμε $COMP_LEN = 250$ εικονοστοιχεία. Αρχικά, θεωρούμε μία ομάδα συνεχόμενων εικονοστοιχείων μήκους $COMP_LEN$, η οποία ξεκινάει από το εικονοστοιχείο #1 του περιγράμματος. Η ομάδα αυτή των εικονοστοιχείων του σταθερού περιγράμματος ονομάζεται «σταθερή αλυσίδα».

Στη συνέχεια, εξετάζουμε το κομμάτι προς σύγκριση (που ονομάζεται «περιστρεφόμενο») σε ένα συγκεκριμένο προσανατολισμό. Κατασκευάζουμε ένα μέρος του περιγράμματος του περιστρεφόμενου κομματιού γύρω από το σταθερό ως εξής:

- Το τελευταίο εικονοστοιχείο, έστω #Μ, του περιστρεφόμενου κομματιού τοποθετείται στην <u>Θ</u>έση <u>Τ</u>έλειου <u>Τ</u>αιριάσματος του εικονοστοιχείου #1 του σταθερού κομματιού, ας πούμε στη θέση ΘΤΤ1.
- Στη συνέχεια, ένας αριθμός ακόλουθων εικονοστοιχείων, έστω (k-1), του περιστρεφόμενου κομματιού τοποθετούνται στο απόλυτο σύστημα αναφοράς του σταθερού κομματιού με παράλληλη μετατόπιση.
- Η παράλληλη μετατόπιση του περιστρεφόμενου κομματιού, το οποίο ονομάζουμε κομμάτι Β, στο απόλυτο σύστημα αναφοράς του σταθερού κομματιού, έστω Α, ολοκληρώνεται όταν το εικονοστοιχείο #k του περιγράμματος Β ικανοποιεί μία από τις παρακάτω συνθήκες:
 - α) Ας θεωρήσουμε την ευθεία που ορίζεται από τη μέση απόλυτη γωνία των τελευταίων L εικονοστοιχείων της σταθερής αλυσίδας. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τη γραμμή που είναι κάθετη σε αυτή την ευθεία και διέρχεται από το τελευταίο εικονοστοιχείο της σταθερής αλυσίδας και ονομάζουμε τη γραμμή αυτή «γραμμή φραγμού». Τότε, σταματούμε την κατασκευή της περιστρεφόμενης αλυσίδας στο σημείο που η τελευταία τέμνει τη γραμμή φραγμού (Σχήμα Α.13). Μία συνεπής επιλογή θα ήταν να θέσουμε το L ίσο με COMP_LEN. Η μεθοδολογία αυτή όμως δίνει εξίσου αποτελεσματικά αποτελέσματα και για μικρότερες τιμές του L, αρκεί το L είναι μεγαλύτερο

- από ένα ελάχιστο όριο LB_L . Μια καλή επιλογή είναι $LB_L = 0.45*COMP\ LEN$.
- b) Εάν το k είναι μεγαλύτερο από έναν αριθμό εικονοστοιχείων EXC_LEN και δεν έχει ικανοποιηθεί η συνθήκη α)· τότε σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε ότι εκ των πραγμάτων, τα δύο περιγράμματα δεν ταιριάζουν για αυτή τη θέση και προσανατολισμό των κομματιών Α και Β. Μια καλή επιλογή φαίνεται να είναι EXC_LEN = 2*COMP_LEN. Εδώ τονίζεται ότι, αν και η απαίτηση αυτή θα μπορούσε αρχικά να θεωρηθεί κριτήριο ταιριάσματος, στην πραγματικότητα δεν είναι. Η απαίτηση αυτή τίθεται με σκοπό την επιτάχυνση της διαδικασίας. Θα μπορούσε κανείς να αυξήσει την τιμή του EXC_LEN αυθαίρετα ή να μη χρησιμοποιήσει καθόλου τέτοιο όριο. Η επιλογή αυτή έγινε αφότου εκτεταμένα πειράματα έδειξαν ότι όταν το k γίνεται μεγαλύτερο από 1,2*COMP_LEN, τότε τα κομμάτια παραβίαζαν τα κριτήρια ταιριάσματος σε κάθε περίπτωση.



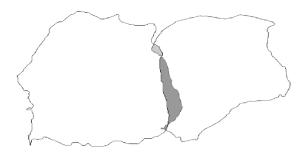
Σχήμα Α.13. Απεικόνιση μίας «σταθερής» και μίας «περιστρεφόμενης» αλυσίδας, οι οποίες ανήκουν σε δύο διαφορετικά κομμάτια. Τα εικονοστοιχεία με μαύρο ανήκουν στη σταθερή αλυσίδα, ενώ αυτά με ανοιχτό γκρι ανήκουν στην «περιστρεφόμενη» αλυσίδα. Τα εικονοστοιχεία με σκούρο γκρι συνδέουν τα δύο τελευταία εικονοστοιχεία των δύο αλυσίδων (η «γραμμή φραγμού»).

Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί και για άλλους προσανατολισμούς των περιστρεφόμενων αλυσίδων, όπως περιγράφεται σε μετέπειτα παράγραφο.

Επαναλαμβάνοντας της διαδικασία αυτή και εάν M είναι ο συνολικός αριθμός εικονοστοιχείων περιγράμματος του περιστρεφόμενου κομματιού, ενώ N είναι ο συνολικός αριθμός εικονοστοιχείων του περιγράμματος του σταθερού κομματιού, τότε κατασκευάζουμε με τη σειρά περιστρεφόμενες αλυσίδες, ξεκινώντας κάθε φορά από το εικονοστοιχείο #(M-j), j=1,2,...,M-1, γύρω από τις σταθερές αλυσίδες #(M-j), #(M-j)

Α.Ι.6.νιί. Το πρώτο κριτήριο ταιριάσματος εμβαδού

Το πρώτο κριτήριο ταιριάσματος είναι ένα μάλλον τυπικό μαθηματικό κριτήριο, κατά το οποίο θεωρούμε ότι ένα μέτρο ταιριάσματος σχημάτων μεταξύ της σταθερής αλυσίδας μήκους COMP LEN και της περιστρεφόμενης αλυσίδας μεταβλητού μήκους είναι ο αριθμός των εικονοστοιχείων που περιβάλλεται από τις δύο αυτές αλυσίδες και από την αλυσίδα των εικονοστοιχείων που συνδέει τα τελευταία εικονοστοιχεία της σταθερής και της περιστρεφόμενης αλυσίδας (Σχήμα Α.14). Παρατηρείστε πως σε αυτό το σημείο καταμετρούμε και τα εικονοστοιγεία που ανήκουν στο κενό ανάμεσα στα δύο κομμάτια και αυτά που ανήκουν στα κομμάτια. Στη μέτρηση, όμως, δεν περιλαμβάνονται τα εικονοστοιχεία της σταθερής αλυσίδας και τα εικονοστοιχεία της περιστρεφόμενης αλυσίδας που βρέθηκαν ότι ανήκουν στη Θέση Τέλειου Ταιριάσματος. Επομένως, θεωρούμε ότι τα περιγράμματα των δύο κομματιών, έστω Α και Β αντίστοιχα, ταιριάζουν στα εικονοστοιχεία #P_A και #P_B αντίστοιχα εάν ο αριθμός των εικονοστοιχείων που περιβάλλονται από τις αλυσίδες που ορίστηκαν προηγουμένως είναι μικρότερος από ένα κατώφλι, το οποίο θα ονομάσουμε ΜΑΧ AREA. Η κατάλληλη επιλογή του ΜΑΧ AREA εξαρτάται από το βαθμό φθοράς που έχουν υποστεί τα κομμάτια, καθώς και από τον αριθμό COMP LEN και την ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση των φωτογραφιών των κομματιών. Στην ακραία περίπτωση όπου δεν έχουμε καθόλου φθορά, μπορούμε να επιλέξουμε μία πολύ μικρή τιμή για το MAX AREA. Με τέτοια επιλογή θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε τη μεθοδολογία αυτή για την επίλυση puzzle με κομμάτια που ταιριάζουν τέλεια. Στο αρχαιολογικό πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε στην περίπτωση αυτή (δηλαδή την ανακατασκευή των τοιχογραφιών της Σαντορίνης), όμως, πρέπει να επιλεχθεί ένας αριθμός για το ΜΑΧ ΑREA, ο οποίος να είναι αρκετά μεγαλύτερος, ώστε να λάβουμε υπόψη την αισθητή φθορά που έχουν υποστεί τα ευρεθέντα κομμάτια.



Σχήμα Α.14. Ολόκληρα τα περιγράμματα δύο κομματιών Α και Β. Ανοιχτό γκρι: Τα εικονοστοιχεία που ανήκουν και στα δύο κομμάτια. Σκούρο γκρι: τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στο κενό ανάμεσα στα δύο κομμάτια.

Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι ο αριθμός MAX_AREA αναφέρεται στη βέλτιστη περίπτωση όπου τα προσκείμενα κομμάτια έχουν το σωστό προσανατολισμό στο χώρο. Εφόσον ο αρχικός προσανατολισμός των κομματιών στο απόλυτο σύστημα αναφοράς τους είναι τυχαίος, θα πρέπει να εφαρμοστεί ένα πλήθος καταλλήλων περιστροφών στο περιστρεφόμενο κομμάτι πριν αποπειραθούμε να εφαρμόσουμε το κριτήριο αυτή. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο. Παρατηρείστε ότι, ακόμα και για το σωστό προσανατολισμό του περιστρεφόμενου κομματιού, καθώς αυξάνει η τιμή του MAX_AREA, υπάρχει μια μη-μηδενική πιθανότητα να προκύψει ένα λανθασμένο ταίριασμα μεταξύ δύο αλυσίδων.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι για ένα δεδομένο σύνολο κομματιών και μια δεδομένη τιμή του COMP_LEN είναι δυνατό να επιλέξουμε τιμές του MAX_AREA που ελαχιστοποιούν την πιθανότητα λανθασμένων ταιριασμάτων. Για να μειώσουμε τις περιπτώσεις λανθασμένου ταιριάσματος ανάμεσα σε κάποιο σταθερό και κάποιο περιστρεφόμενο κομμάτι ακόμα περισσότερο, έχουν χρησιμοποιηθεί δύο ακόμα κριτήρια, τα οποία βασίζονται στην πληροφορία που περιέχεται στο περίγραμμα των κομματιών. Τα κριτήρια αυτά περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους.

A.I.6.viii. Το δεύτερο κριτήριο ταιριάσματος εμβαδού

Ας υποθέσουμε ότι το πρώτο κριτήριο ταιριάσματος εμβαδού ικανοποιείται για τα κομμάτια Α και B στα εικονοστοιχεία με θέσεις $\#P_A$ και $\#P_B$, αντίστοιχα, για μια συγκεκριμένη περιστρεφόμενη αλυσίδα. Εάν πρόκειται για μια θέση πραγματικού

ταιριάσματος, δεν πρέπει να υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των δύο κομματιών, δηλαδή όλα τα εικονοστοιχεία που περικλείονται από τη σταθερή και την περιστρεφόμενη αλυσίδα πρέπει να κείτονται στο κενό ανάμεσα στα δύο κομμάτια. Επομένως, θα μπορούσε κανείς να θέσει ως δεύτερο κριτήριο ταιριάσματος την ικανοποίηση της συνθήκης αυτής. Όμως, στην πράξη, υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις από την τέλεια απεικόνιση των κομματιών λόγω ατελειών των διαδικασιών φωτογράφησης και επεξεργασίας των εικόνων. Έτσι, ως δεύτερο κριτήριο ταιριάσματος, απαιτείται ο αριθμός των εικονοστοιχείων που περικλείονται από τη σταθερή και την περιστρεφόμενη αλυσίδα και κείτονται εντός του κενού ανάμεσα στα δύο κομμάτια να είναι ένα συγκεκριμένο ποσοστό, έστω GP, του συνολικού αριθμού εικονοστοιχείων που περικλείονται. Εκτεταμένα πειράματα έδειξαν πως, για τις συγκεκριμένες συνθήκες φωτογράφησης και τη συγκεκριμένη διαδικασία επεξεργασίας εικόνας που ακολουθήθηκε, μια καλή επιλογή θα ήταν GP= 0,997. Προφανώς, η ακριβείς τιμές των GP και MAX_AREA θα πρέπει να ρυθμίζονται ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

Α.Ι.6.ix. Το τρίτο κριτήριο ταιριάσματος εμβαδού

Τα εκτεταμένα πειράματα που έγιναν έδειξαν ότι, για τις συγκεκριμένες συνθήκες φωτογράφησης και διαδικασίες επεξεργασίας των εικόνων, μια καλή επιλογή είναι LBP = 0.996.

Α.Ι.6.χ. Το κριτήριο «διαφοράς αθροίσματος γωνιών»

Είναι δυνατό να αποδειχθεί πως, εάν ορίσουμε την ποσότητα «άθροισμα γωνιών» SA οποιασδήποτε καμπύλης ως

τότε, εάν θεωρήσουμε το μέγιστο εμβαδόν E που περικλείεται από ένα τυχόν ζεύγος σταθερής και περιστρεφόμενης αλυσίδας, η διαφορά του αθροίσματος των γωνιών των δύο αλυσίδων έχει κάποια μέγιστη τιμή που εξαρτάται από το E. Ας ονομάσουμε τη μέγιστη τιμή αυτή μ_{max} . Πιο συγκεκριμένα, εάν d είναι η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των άκρων της σταθερής αλυσίδας και θέσουμε L=EXC LEN, τότε

$$\mu_{\text{max}} = \sqrt{d^2 + \left(\frac{2*E}{d}\right)^2} \arctan\left(\frac{2*E}{d^2}\right) + \left(L - \sqrt{d^2 + \left(\frac{2*E}{d^2}\right)^2}\right) \frac{\pi}{2}$$

Επομένως, για να αποφασίσουμε εάν τα κριτήρια εμβαδού που αναφέρθηκαν προηγουμένως θα εφαρμοστούν για ένα ζεύγος αλυσίδων που έχουν αρχική θέση τα εικονοστοιχεία $\#P_A$ και $\#P_B$, εφαρμόζουμε πρώτα το κριτήριο της διαφοράς του αθροίσματος των γωνιών. Συγκεκριμένα, εάν τα αθροίσματα των γωνιών της σταθερής και της περιστρεφόμενης αλυσίδας διαφέρουν περισσότερο από την ποσότητα μ_{max} , τότε εκ των πραγμάτων τα δύο περιγράμματα αυτά δεν ταιριάζουν για τις θέσεις και τους προσανατολισμούς αυτούς των κομματιών A και B. Τονίζεται σε αυτό το σημείο ότι η απαίτηση η διαφορά των γωνιών των δύο αλυσίδων να είναι αρκετά μικρή δεν αποτελεί ικανή συνθήκη για να μας εξασφαλίσει το ταίριασμα των δύο κομματιών.

Παρατηρούμε, επίσης, πως εφόσον ο προσανατολισμός του περιστρεφόμενου κομματιού στο απόλυτο σύστημα αναφοράς του είναι απολύτως τυχαίος, για να ελέγξουμε το ταίριασμα δύο κομματιών A και B, πρέπει να εφαρμόσουμε τα προαναφερθέντα κριτήρια εμβαδού για όλες τις πιθανές αλυσίδες που σχηματίζονται για κάθε πιθανό ζεύγος εικονοστοιχείων $\#P_A$ και $\#P_B$ και για κάθε πιθανό προσανατολισμό του σταθερού και του περιστρεφόμενου κομματιού που προκύπτει από την περιστροφή βήματος STEP μοιρών. Πιο συγκεκριμένα, το περιστρεφόμενο κομμάτι B πρέπει να περιστραφεί κατά STEP μοίρες και, για κάθε περιστροφή, πρέπει να εκτελεστούν M*N υπολογισμοί εμβαδών και συγκρίσεις. Έτσι, για να εξαντληθούν όλοι οι πιθανοί προσανατολισμοί του

περιστρεφόμενου κομματιού πρέπει να εκτελεστούν $\frac{360}{STEP}*M*N$ υπολογισμοί και συγκρίσεις. Για να έχουμε ακριβές ταίριασμα, το STEP πρέπει να είναι αρκετά μικρό, δηλαδή $STEP \leq 1^\circ$, που έχει ως αποτέλεσμα τρομερή κατανάλωση χρόνου. Εφαρμόζοντας όμως το κριτήριο διαφοράς του αθροίσματος των γωνιών, επιτυγχάνεται η δραστική μείωση του συνολικού αριθμού υπολογισμών εμβαδών και αντιστοίχων συγκρίσεων. Συγκεκριμένα, στην πράξη επιτυγχάνεται μία μείωση του συνολικού χρόνου σύγκρισης δύο κομματιών κατά ένα παράγοντα ίσο με είκοσι (20), ή, αντίστοιχα, έχουμε μείωση του συνολικού χρόνου σύγκρισης στο 5% της αρχικής τιμής του.

Α.Ι.6.χί. Εφαρμογή της μεθοδολογίας

Το σύστημα που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή των προαναφερθέντων κριτηρίων ταιριάσματος λειτουργεί ως εξής:

Αρχικά υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των εικονοστοιχείων του περιγράμματος για όλα τα κομμάτια. Η εφαρμογή της μεθόδου ξεκινάει με το κομμάτι που έχει το μεγαλύτερο αριθμό εικονοστοιχείων στο περίγραμμα του, το οποίο ονομάζεται και κομμάτι «αναφοράς», και στη συνέχεια το κομμάτι αυτό ελέγχεται για ταίριασμα με όλα τα υπόλοιπα κομμάτια του συνόλου μας με τη σειρά. Με άλλα λόγια, θεωρούμε πως το κομμάτι αναφοράς είναι το σταθερό, ενώ όλα τα υπόλοιπα με τη σειρά θεωρούνται πως είναι τα περιστρεφόμενα. Για κάθε ζεύγος σταθερού και περιστρεφόμενου κομματιού, εφαρμόζεται η ακόλουθη διαδικασία, η οποία αποτελείται από τέσσερα, το πολύ, βήματα.

Βήμα 1: Για ένα συγκεκριμένο περιστρεφόμενο κομμάτι, εφαρμόζεται αρχικά η μεθοδολογία σχηματισμού των αλυσίδων. Για το δεδομένο προσανατολισμό του κομματιού, το σύστημα, ξεκινώντας κάθε φορά από το εικονοστοιχείο $\#(M_k - j)$ $j = 0,1,2,...,M_k - 1$ του περιστρεφόμενου κομματιού, κατασκευάζει τις περιστρεφόμενες αλυσίδες γύρω από τη σταθερή αλυσίδα που αποτελείται από τα εικονοστοιχεία $\#\ell$,..., $\# \operatorname{mod}_N(\ell + \operatorname{COMP_LEN} - 1)\ell = 2,...,N$, όπου M_k είναι ο αριθμός των εικονοστοιχείων του περιγράμματος του περιστρεφόμενου κομματιού #k, ενώ N είναι ο αριθμός των εικονοστοιχείων του κομματιού αναφοράς.

Βήμα 2: Για τον προσανατολισμό του περιγράμματος του περιστρεφόμενου κομματιού στο απόλυτο σύστημα αναφοράς του, και για κάθε ζεύγος αλυσίδων που ξεκινάνε από τα εικονοστοιχεία ℓ , j αντίστοιχα, εφαρμόζεται το προαναφερθέν κριτήριο

διαφοράς του αθροίσματος των γωνιών. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται το άθροισμα των γωνιών για τη σταθερή και την περιστρεφόμενη αλυσίδα, έστω SA_f και SA_r , και εάν $abs \left(SA_f - SA_r\right) > \mu_{\max}$, τότε θεωρούμε ότι, εκ των πραγμάτων, τα δύο κομμάτια δεν ταιριάζουν σε αυτή τη θέση για αυτό τον προσανατολισμό. Αντίθετα, εάν $abs \left(SA_f - SA_r\right) \le \mu_{\max}$, τότε συνεχίζουμε με το Βήμα 3 που περιγράφεται ακολούθως.

Βήμα 3: Υπολογίζεται το πλήθος των εικονοστοιχείων που περικλείονται από τις δύο αλυσίδες $E_{\ell,j}$, καθώς και το πλήθος των εικονοστοιχείων που κείτονται στο κενό ανάμεσα στα δύο κομμάτια, $G_{\ell,j}$. Εάν το $E_{\ell,j}$ είναι μικρότερο από ένα κατώφλι T και το $G_{\ell,j}$ ικανοποιεί το δεύτερο κριτήριο ταιριάσματος, τότε το σύστημα θεωρεί ότι τα δύο εν λόγω κομμάτια πιθανώς να ταιριάζουν στο ζεύγος εικονοστοιχείων (ℓ,j) . Η τιμή του T μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως: Ας υποθέσουμε ότι η θέση (ℓ,j) είναι πράγματι μια θέση ταιριάσματος των δύο κομματιών. Τότε, $T = MAX_{AREA} + Q_R$, όπου το MAX_AREA επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ληφθεί υπόψη η φθορά των κομματιών, όπως περιγράφηκε στα προηγούμενα και το Q_R είναι το λάθος λόγω της κβαντοποίησης της περιστροφής. Μία καλή εκτίμηση για τη μέγιστη τιμή του Q_R αποτελεί η τιμή

$$\max(Q_R) = \frac{1}{2} COMP_{LEN^2} \tan\left(\frac{STEP}{2}\right)$$

όπου STEP είναι το βήμα της περιστροφής. Στην περίπτωση μας επιλέχθηκε η τιμή $STEP=1^\circ$, επομένως $T_1=MAX_{AREA}+0.0044COMP_{LEN^2}$. Έτσι, εάν για ένα ζεύγος εικονοστοιχείων (ℓ,j) ισχύει πως $E_{\ell,j} \leq T_1$, και εάν το $G_{\ell,j}$ ικανοποιεί το δεύτερο κριτήριο ταιριάσματος εμβαδού, τότε ελέγχουμε εάν ικανοποιείται το τρίτο κριτήριο ταιριάσματος εμβαδού. Εάν ικανοποιείται και το τρίτο κριτήριο, τότε το σύστημα αποφασίζει τελικά ότι τα δύο κομμάτια μπορεί να ταιριάζουν στη θέση αυτή. Διαφορετικά, εάν δεν ικανοποιείται κάποιο από τα προαναφερθέντα κριτήρια ταιριάσματος εμβαδού, το σύστημα αποφασίζει ότι δεν υπάρχει δυνατό ταίριασμα μεταξύ του κομματιού αναφοράς και του συγκεκριμένου προσανατολισμού του περιστρεφόμενου κομματιού στη θέση (ℓ,j) . Με άλλα λόγια, εάν υπάρχει ταίριασμα μεταξύ των δύο κομματιών στη θέση (ℓ,j) , με βάση τα χαρακτηριστικά του περιγράμματος τους και μόνο, τότε το ζεύγος εικονοστοιχείων που αντιστοιχεί στη θέση αυτή ανήκει στο τελικό σύνολο πιθανών θέσεων ταιριάσματος που προτείνει το σύστημα.

Βήμα 4: Τέλος, τα τρία προαναφερθέντα βήματα επαναλαμβάνονται για όλους τους πιθανούς προσανατολισμούς του περιστρεφόμενου κομματιού που προκύπτουν από την περιστροφή του με βήμα περιστροφής $STEP = 1^{\circ}$.

Κάθε περιστρεφόμενο κομμάτι που προτείνεται από το σύστημα ως πιθανό ταίριασμα με το κομμάτι αναφοράς, μαζί με το ίδιο το κομμάτι αναφοράς, ενώνονται στη θέση (ℓ,j) με χρήση κατάλληλου κώδικα της C. Το σύνθετο κομμάτι που προκύπτει, το οποίο αποτελείται από τα δύο ενωμένα κομμάτια, χρησιμοποιείται ως είσοδος σε ένα εργαλείο επεξεργασίας εικόνας. Με αυτό τον τρόπο, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εποπτεύσει την πρόταση του συστήματος και να αποφασίσει σχετικά με την ορθότητα της. Εφόσον επιβεβαιωθεί η ύπαρξη κάποιας συνένωσης, το σύνθετο κομμάτι που προέκυψε χρησιμοποιείται πλέον ως το νέο σταθερό κομμάτι. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με συγκρίσεις του νέου σταθερού κομματιού με τα υπόλοιπα περιστρεφόμενα, μέχρι να μην υπάρχουν άλλες συνενώσεις. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτει ένα συσσωμάτωμα ταιριασμένων κομματιών. Εάν υπάρχουν και άλλα κομμάτια, τα οποία δεν έχει βρεθεί ότι ταιριάζουν με κάποιο τρόπο με το συσσωμάτωμα αυτό, η διαδικασία επαναλαμβάνεται με σταθερό κομμάτι το κομμάτι που έχει το μεγαλύτερο μήκος περιγράμματος και δεν ανήκει σε κάποιο από τα συσσωματώματα που έχουν ήδη δημιουργηθεί, μέχρι να εξαντληθούν τα κομμάτια που υπάρχουν διαθέσιμα.

Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται η περιγραφή του αλγορίθμου ταιριάσματος κομματιών με βάση το περίγραμμά τους. Όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, ο αλγόριθμος αυτός είναι σχεδιασμένος με βάση το γεγονός ότι ανάμεσα στα κομμάτια ενός θραυσμένου αντικειμένου δεν υπάρχει απαραίτητα τέλειο ταίριασμα. Η ατέλεια του ταιριάσματος αυτή οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα κομμάτια έχουν υποστεί φθορά λόγω του θρυμματισμού του αρχικού ολοκληρωμένου αντικειμένου, αλλά και στο γεγονός ότι η διαδικασία ψηφιοποίησης των εικόνων των κομματιών εισάγει ανεπιθύμητες παρεμβολές στην εικόνα των κομματιών. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι, λόγω των παραχωρήσεων που αναγκαστικά πρέπει να γίνουν στην απαίτηση δύο κομμάτια να ταιριάζουν τέλεια, είναι πιθανόν το σύστημα να δώσει περισσότερες από μία πιθανές θέσεις ταιριάσματος για το κάθε ζεύγος κομματιών. Η διαδικασία επιβεβαίωσης των θέσεων ταιριάσματος, η οποία επιτελείται από το χρήστη του συστήματος, είναι αρκετά χρονοβόρα και ο χρόνος που απαιτείται για την περαίωση της είναι ευθέως ανάλογος με τον αριθμό των πιθανών συνενώσεων που πρέπει να εξεταστούν για κάθε ζεύγος κομματιών που εξετάζεται για ταίριασμα. Επομένως, η μείωση του αριθμού πιθανών συνενώσεων με χρήση περαιτέρω πληροφορίας που μπορεί να εξαχθεί από κάθε κομμάτι θα αυξήσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την ευχρηστία του συστήματος, καθώς θα μειώσει αντίστοιχα το χρόνο που απαιτείται για την επιβεβαίωση των πιθανών συνενώσεων που προτείνει τελικά το σύστημα. Η διαδικασία εξαγωγής και χρήσης του χρωματικού περιεχομένου των κομματιών για την απόρριψη πιθανών ανεπιτυχών συνενώσεων παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

<u>Κεφάλαιο Α.ΙΙ.: Εξαγωγή και χρήση του χρωματικού</u> περιεχομένου του περιγράμματος των κομματιών

Α.ΙΙ.1. Εξαγωγή του χρωματικού περιεχομένου

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία εξαγωγής της απαραίτητης πληροφορίας για την εφαρμογή των κριτηρίων απόρριψης συνενώσεων με βάση το χρωματικό περιεχόμενο των κομματιών. Αν και θα περιγραφεί η γενική μεθοδολογία, αξίζει να σημειωθεί ότι, λόγω του γεγονότος ότι το τμήμα αυτό του συνολικού συστήματος αναπτύχθηκε αφότου είχε ολοκληρωθεί η ανάπτυξη του αλγορίθμου ταιριάσματος με βάση το σχήμα του περιγράμματος, η δομή των σχετικών προγραμμάτων βασίστηκε εν πολλοίς στον τρόπο αποθήκευσης και επεξεργασίας των δεδομένων από το πρώτο μέρος του αλγορίθμου. Σε περίπτωση κατασκευής ενός ολοκληρωμένου αυτόνομου συστήματος ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων, η τελική ακολουθία, με την οποία διεξάγονται οι διάφορες διεργασίες, μπορεί να είναι διαφορετική ώστε να επιτευχθεί μία πιο αποτελεσματική και πιο απλή υλοποίηση του ολοκληρωμένου αλγορίθμου.

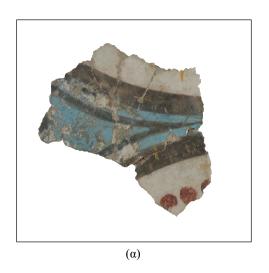
Όπως και στο προηγούμενο στάδιο του αλγορίθμου, έτσι και εδώ το πρώτο μας βήμα είναι η εξαγωγή του περιγράμματος του κομματιού από το μαύρο κομμάτι. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με αυτή που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Με χρήση κατάλληλα ανεπτυγμένου λογισμικού, χρησιμοποιήσαμε το μαύρο κομμάτι για την εξαγωγή των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων του περιγράμματος του κομματιού. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες αυτές και το αρχικό κομμάτι βρίσκουμε το χρωματικό μέσο όρο της περιοχής γύρω από κάθε ένα από τα εικονοστοιχεία του περιγράμματος, ο οποίος αποδίδεται στο εικονοστοιχείο αυτό. Αυτό γίνεται με χρήση καταλλήλου προγράμματος σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο πρόγραμμα για κάθε εικονοστοιχείο που ανήκει στο περίγραμμα, βρίσκει το χρωματικό μέσο όρο από την περιοχή (2P+1) x (2Q+1) που έχει ως κέντρο το εικονοστοιχείο αυτό. Η έξοδος του προγράμματος αυτού είναι ένας πίνακας 3xN, όπου N το μήκος του περιγράμματος του κομματιού, ενώ κάθε γραμμή περιέχει μια από τις χρωματικές συνιστώσες (R, G ή B) που αποδόθηκαν τελικά σε κάθε εικονοστοιχείο του περιγράμματος. Στα Σχήματα Α.15 και

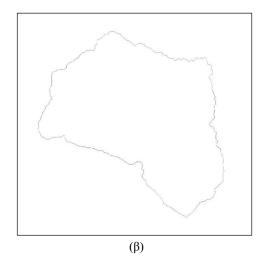
Α.16 φαίνονται κομμάτια των δύο εφαρμογών και τα αντίστοιχο χρώματα που απεδόθησαν σε κάθε ένα από τα εικονοστοιχεία των περιγραμμάτων τους.





Σχήμα Α.15. Ένα κομμάτι του παζλ (α) και το αντίστοιχο χρωματικό περιεχόμενο (β) που αποδόθηκε στο περίγραμμά του.





Σχήμα Α.16. Ένα κομμάτι από τη Σαντορίνη (α) και το αντίστοιχο χρωματικό περιεχόμενο που αποδόθηκε στο περίγραμμά του (β).

Ο πίνακας αυτός, σε συνδυασμό με τον πίνακα με τις συντεταγμένες του περιγράμματος, έχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό των χρωματικών διαφορών. Για λόγους εξοικονόμησης χώρου αλλά και λειτουργικότητας, οι σχετικές πληροφορίες που εξήχθησαν δεν αποθηκεύτηκαν σε ξεχωριστό αρχείο στο σκληρό δίσκο. Αντίθετα, για κάθε ζεύγος κομματιών που εξετάζαμε, υπολογίζαμε το χρωματικό περιεχόμενο του περιγράμματος, το χρησιμοποιούσαμε για τους σχετικούς υπολογισμούς και στη συνέχεια το αφαιρούσαμε από τη μνήμη. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγουμε την αποθήκευση ενός μεγάλου αριθμού αρχείων και η όλη διαδικασία απλοποιήθηκε αισθητά.

Αυτό, όμως, έχει ως συνέπεια ότι κάθε φορά που εκτελείται το πρόγραμμα σύγκρισης των συνενώσεων με βάση το χρωματικό περιεχόμενο, η διαδικασία εξαγωγής του περιγράμματος πρέπει να επαναλαμβάνεται. Η επιλογή αυτή είναι καθαρά λειτουργικής φύσεως και αφορά στην ισορροπία που θέλουμε να έχουμε μεταξύ του χρόνου εκτέλεσης των προγραμμάτων σύγκρισης και του διαθέσιμου αποθηκευτικού χώρου στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή όπου εκτελείται η εφαρμογή. Καθώς για κάθε ζεύγος κομματιών που συγκρίνονται η διαδικασία εξαγωγής του χρωματικού περιεχομένου εκτελείται μόνο μία φορά και, λαμβάνοντας υπόψη ότι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εκτέλεση του αλγορίθμου εξαγωγής του χρωματικού περιεχομένου δύο κομματιών δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο, θεωρήθηκε σκόπιμο να μην αποθηκεύεται η σχετική πληροφορία στο σκληρό δίσκο.

Α.ΙΙ.2. Σύγκριση των χρωματικών περιεχομένων των κομματιών στην περιοχή της συνένωσης

Η διαδικασία υπολογισμού του χρωματικού περιεχομένου στην περιοχή του περιγράμματος του κομματιού επαναλαμβάνεται για κάθε περιστρεφόμενο κομμάτι για το οποίο έχουμε πληροφορίες στο αρχείο που έχουμε πάρει ως έξοδο από τον αλγόριθμο ταιριάσματος με βάση το περίγραμμα. Σκοπός μας, στη συνέχεια, είναι ο υπολογισμός μίας ποσότητας, την οποία θα ονομάζουμε στο εξής διαφορά, η οποία περιγράφει την τελική χρωματική διαφορά μεταξύ δύο κομματιών σε μια περιοχή πιθανής συνένωσης.

Όπως περιγράφηκε και στο σχετικό κεφάλαιο, κατά τη σύγκριση των περιγραμμάτων των κομματιών για τον προσδιορισμό πιθανού ταιριάσματος με βάση το σχήμα τους εξετάζονται τμήματα του περιγράμματος τα οποία ονομάζονται αλυσίδες. Εάν τα σχήματα των αλυσίδων αυτών ικανοποιούν τα σχετικά κριτήρια ταιριάσματος, τότε η συνένωση καταγράφεται ως πιθανή. Αφού η σύγκριση των κομματιών έχει επικεντρωθεί στις περιοχές του περιγράμματος που αντιστοιχούν στις συγκεκριμένες αλυσίδες, δε μπορεί να βγάλει κανείς συμπέρασμα για τη συμπεριφορά του περιγράμματος των κομματιών στις υπόλοιπες περιοχές. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε σκόπιμο η σύγκριση των κομματιών με βάση το χρωματικό – αλλά και το το θεματικό – περιεχόμενο να γίνεται και αυτή στην περιοχή των αλυσίδων.

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του συντελεστή χρωματικής διαφοράς που θα αποδοθεί τελικά σε κάθε μία από τις πιθανές συνενώσεις. Για τον υπολογισμό του συντελεστή αυτού χρησιμοποιήθηκαν 8 διαφορετικά κριτήρια. Ο λόγος για τη χρήση πολλών διαφορετικών κριτηρίων είναι ο εξής: Λόγω του γεγονότος ότι ο αλγόριθμος ταιριάσματος περιγραμμάτων με βάση το σχήμα δεν δίνει πάντα ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά στη θέση ταιριάσματος και τον προσανατολισμό των κομματιών (δηλαδή, δύο κομμάτια που ταιριάζουν με μία συγκεκριμένη θέση και προσανατολισμό μπορεί κάλλιστα να βρεθούν πως ταιριάζουν και με θέσεις και προσανατολισμούς που έχουν κοντινές, αλλά όχι ίδιες, τιμές με αυτές που αντιστοιχούν στη βέλτιστη θέση ταιριάσματος) αλλά και λόγω της πιθανής φθοράς που μπορεί να παρουσιάζουν τα κομμάτια από τη διαδικασία διάσπασης του αρχικού ολοκληρωμένου αντικειμένου ή τη διαδικασία ψηφιοποίησης των φωτογραφιών τους, είναι λογικό να περιμένει κανείς ότι δε θα υπάρχει αντιστοιχία 1-1 ανάμεσα στα εικονοστοιχεία της αλυσίδας του σταθερού κομματιού και τα εικονοστοιχεία της αλυσίδας του περιστρεφόμενου κομματιού. Επομένως, μία απλή παράθεση των χρωματικών τιμών των εικονοστοιχείων των δύο αλυσίδων μπορεί να δώσει ανακριβή, ή ακόμα και λανθασμένα αποτελέσματα. Επίσης, το γεγονός ότι το περιεχόμενο των κομματιών μπορεί να μην αποτελείται από μονοχρωματικές περιοχές (όπως στην περίπτωση του παζλ) ή τα χρώματα των περιοχών μπορεί να έχουν αλλοιωθεί με απρόβλεπτο τρόπο λόγω φθοράς (όπως στην περίπτωση της εφαρμογής της Σαντορίνης) δυσχεραίνει την άμεση σύγκριση των χρωμάτων των εικονοστοιχείων των αλυσίδων, καθώς οι παράγοντες αυτοί μπορεί να ευθύνονται για πιθανές διαφοροποιήσεις στο χρωματικό περιεχόμενο των κομματιών ακόμα και στις μικρές αποστάσεις που μεσολαβούν γύρω από την περιοχή του ορίου των κομματιών.

Έτσι, κρίθηκε σκόπιμο να δοκιμαστούν διαφορετικοί τρόποι σύγκρισης του χρωματικού περιεχομένου των αλυσίδων για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά του συστήματος με χρήση διαφορετικών κριτηρίων απόδοσης των χρωματικών διαφορών. Αν και οι δοκιμές για διαφορετικούς τύπους κριτηρίων δεν ήταν εξαντλητικές, καθώς οι πιθανοί τρόποι αριθμητικής απόδοσης των χρωματικών διαφορών είναι, ουσιαστικά, άπειροι, τα κριτήρια που δοκιμάστηκαν δίνουν μία πολύ καλή ιδέα σχετικά με τη συμπεριφορά του συστήματος με χρήση διαφορετικών τρόπων απόδοσης των χρωμάτων και των διαφορών τους για κάθε αλυσίδα εικονοστοιχείων. Όπως θα φανεί και στα επόμενα, οι παράγοντες που επηρεάζουν τα χρώματα των κομματιών της εκάστοτε εφαρμογής μπορεί να επηρεάσουν το σύστημα με τέτοιο τρόπο, ώστε ακόμα και θεωρητικώς πιο ακριβή κριτήρια να μην δίνουν την ιδανική συμπεριφορά που θα περίμενε κανείς.

Α.ΙΙ.3. Κριτήρια απόδοσης χρωματικής διαφοράς αλυσίδων

Χρησιμοποιήθηκαν 8 διαφορετικά κριτήρια για την απόδοση της χρωματικής διαφοράς μεταξύ των διαφορετικών αλυσίδων. Σε κάθε περίπτωση, η σύγκριση έγινε με εξέταση των χρωματικών τιμών των εικονοστοιχείων ένα-προς-ένα από τη μια αλυσίδα στην άλλη, οπότε στο τέλος πήραμε το μέσο όρο των διαφορών για όλα τα εικονοστοιχεία. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την απόδοση της χρωματικής διαφοράς των αλυσίδων είναι τα εξής:

1. Απόλυτες διαφορές: Υπολογίστηκε η απόλυτη διαφορά του κάθε εικονοστοιχείου της σταθερής αλυσίδας με το αντίστοιχο εικονοστοιχείο της περιστρεφόμενης αλυσίδας για κάθε χρωματική συνιστώσα. Επομένως, έχουμε:

$$d_{ij}^{k} = \frac{1}{3L} \sum_{A=1}^{L_{A}} \left| R_{Sn} - R_{Pn} \right| + \left| G_{Sn} - G_{Pn} \right| + \left| B_{Sn} - B_{Pn} \right|$$

Όπου: d_{SP}^k είναι η χρωματική διαφορά που αποδίδεται στην συνένωση με αριθμό k μεταξύ του σταθερού κομματιού i και του περιστρεφόμενου κομματιού j, $i \neq j$, L_A είναι το μήκος της αλυσίδας,

 R_{Sn} , G_{Sn} , B_{Sn} είναι οι τρεις χρωματικές συνιστώσες του εικονοστοιχείου n της σταθερής αλυσίδας,

 R_{Pn} , G_{Pn} , B_{Pn} είναι οι τρεις χρωματικές συνιστώσες του αντίστοιχου εικονοστοιχείου n της περιστρεφόμενης αλυσίδας.

2. Τετραγωνισμένο μήκος του διανύσματος διαφοράς: Θεωρούμε πως κάθε χρωματική συνιστώσα του κάθε εικονοστοιχείου αποτελεί και μια από τις συνιστώσες ενός διανύσματος στον R_3 χώρο, δηλαδή αν \vec{T}_{Sn} είναι το διάνυσμα που αντιστοιχεί στο notó εικονοστοιχείο της σταθερής αλυσίδας, τότε: $\vec{T}_{Sn} = R_{Sn}\vec{i} + G_{Sn}\vec{j} + B_{Sn}\vec{k}$. Σε αυτή την περίπτωση, παίρνουμε το τετραγωνισμένο μήκος του διανύσματος της διαφοράς, δηλαδή: $d_{ij}^k = \frac{1}{L_A} \sum_{n=1}^{L_A} (R_{Sn} - R_{Pn})^2 + (G_{Sn} - G_{Pn})^2 + (B_{Sn} - B_{Pn})^2$

Το τετράγωνο του μήκους του διανύσματος μας δίνει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα από το μήκος του διανύσματος.

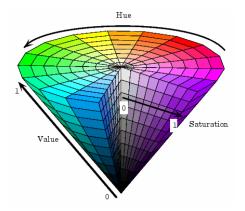
3. <u>Γωνία θ μεταξύ δύο διανυσμάτων</u>: Σε αυτή την περίπτωση, τα διανύσματα που αντιστοιχούν σε εικονοστοιχεία τα οποία έχουν παρόμοιο χρωματικό περιεχόμενο θα είναι σχεδόν παράλληλα, δηλαδή η γωνία θ ανάμεσά τους θα είναι μικρή. Επίσης, από χρωματικής άποψης, εικονοστοιχεία με παράλληλα διανύσματα έχουν

παρόμοιο χρωματικό περιεχόμενο. Για παράδειγμα, ας παρατηρήσουμε τα ακόλουθα πιθανά εικονοστοιχεία:



Παρατηρούμε ότι η παραλληλία των διανυσμάτων που προκύπτουν με τυχαίες χρωματικές συνιστώσες συνεπάγεται διαφορετικό ποσό άσπρου στο τελικό χρώμα των εικονοστοιχείων αυτών. Τέτοια εναλλαγή χρωμάτων θα μπορούσε κάλλιστα να προκύψει λόγω φθοράς στα χρώματα ενός συγκεκριμένου κομματιού, οπότε, σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, αλλαγές στα χρώματα των εικονοστοιχείων λόγω «ξεθωριάσματος» θα μας δώσουν μικρή τελική συνιστώσα διαφοράς. Φυσικά, το χρωματικό παράδειγμα που δίνεται εδώ είναι ακραία περίπτωση.

4. Απόλυτες διαφορές στην απεικόνιση HSV (Hue – Saturation – Value): Το κριτήριο αυτό είναι εν πολλοίς παρόμοιο με το κριτήριο 1, μόνο που σε αυτή την περίπτωση τα χρώματα της εικόνας μας εκφράζονται με την απεικόνιση HSV αντί για την RGB που είχαμε προηγουμένως. Ο λόγος για αυτό είναι να εξετάσουμε μήπως σε κάποιο άλλο σύστημα απεικόνισης των χρωμάτων οι χρωματικές διαφορές είναι πιο σαφείς. Για να αποκτήσουμε μια αίσθηση της χρωματικής κλίμακας HSV, παρατίθεται το Σχήμα Α.17, το οποίο δείχνει την αντιστοιχία των χρωμάτων σε αυτή την κλίμακα:



Σχήμα Α.17. Σχηματική απεικόνιση του χώρου απεικόνισης χρωμάτων HSV.

Επομένως, ο τύπος που μας δίνει την τελική συνιστώσα της χρωματικής διαφοράς γίνεται:

$$d_{ij}^{k} = \frac{1}{3L} \sum_{A=1}^{L_{A}} |H_{Sn} - H_{Pn}| + |S_{Sn} - S_{Pn}| + |V_{Sn} - V_{Pn}|$$

Όπου: d_{SP}^k είναι η χρωματική διαφορά που αποδίδεται στην συνένωση με αριθμό k μεταξύ του σταθερού κομματιού i και του περιστρεφόμενου κομματιού j, $i \neq j$,

 L_A είναι το μήκος της αλυσίδας,

 H_{Sn} , S_{Sn} , V_{Sn} είναι οι τρεις χρωματικές συνιστώσες του εικονοστοιχείου \mathbf{n} της σταθερής αλυσίδας

 H_{Pn} , S_{Pn} , V_{Pn} είναι οι τρεις χρωματικές συνιστώσες του αντίστοιχου εικονοστοιχείου n της περιστρεφόμενης αλυσίδας.

5. Τετραγωνισμένο μήκος του διανύσματος διαφοράς των συνιστωσών HSV: Αυτό το κριτήριο είναι παρόμοιο με το δεύτερο κριτήριο, μόνο που εδώ παίρνουμε το διάνυσμα που σχηματίζεται από τις συνιστώσες HSV που αναπαριστούν το χρώμα του εκάστοτε εικονοστοιχείου. Η τιμή της διαφοράς δίνεται πλέον από τον τύπο:

$$d_{ij}^{k} = \frac{1}{L_{A}} \sum_{n=1}^{L_{A}} (H_{Sn} - H_{Pn})^{2} + (S_{Sn} - S_{Pn})^{2} + (V_{Sn} - V_{Pn})^{2}$$

Η ερμηνεία των συμβόλων είναι ίδια με αυτήν του κριτηρίου 4.

- 6. <u>Γωνία θ μεταξύ δύο διανυσμάτων σε απεικόνιση HSV</u>: Το κριτήριο αυτό ακολουθεί την ίδια νοοτροπία με το κριτήριο 3, μόνο που οι συνιστώσες του διανύσματος σχηματίζονται, όπως και στα προηγούμενα 2 κριτήρια, από τις συνιστώσες HSV που απεικονίζουν το γρώμα του κάθε εικονοστοιχείου.
- 7. Απόλυτες διαφορές στην απεικόνιση YCbCr: Η χρωματική αυτή απεικόνιση αποτελείται από τρεις συνιστώσες: τη συνιστώσα Υ, η οποία είναι η φωτεινότητα του σήματος, ενώ οι συνιστώσες Cb και Cr είναι οι χρωματικές συνιστώσες, οι οποίες καταδεικνύουν τη διαφορά του εκάστοτε εικονοστοιχείου από κάποιες τιμές αναφοράς που προκύπτουν από τον ορισμό του αντιστοίχου πεδίου χρωμάτων RGB. Η νοοτροπία πίσω από τη χρωματική αναπαράσταση αυτή είναι ότι η αναπαράσταση RGB δεν είναι αποτελεσματική αναπαράσταση των χρωμάτων, καθώς οι τρεις συνιστώσες περιέχουν πολλή πλεονάζουσα πληροφορία. Το πρότυπο αναπαράστασης αυτό αποτελεί μία πιο κατανοητή αναπαράσταση της ίδιας χρωματικής πληροφορίας και χρησιμοποιείται συχνά στην αναπαράσταση αρχείων βίντεο, λόγω των βελτιωμένων δυνατοτήτων συμπίεσης που προσφέρει. Στην περίπτωσή μας, ακολουθήθηκε το πρότυπο που χρησιμοποιείται για την

αναπαράσταση εικόνων σε μορφή MPEG-2. Ο σχετικός τύπος που μας δίνει την τελική τιμή για τη χρωματική διαφορά μεταξύ δύο αλυσίδων γίνεται: $d_{ij}^{\,k} = \frac{1}{3L_A} \sum_{n=1}^{L_A} \left| Y_{\mathit{Sn}} - Y_{\mathit{Pn}} \right| + \left| Cb_{\mathit{Sn}} - Cb_{\mathit{Pn}} \right| + \left| Cr_{\mathit{Sn}} - Cr_{\mathit{Pn}} \right|$

8. Τετραγωνισμένο μήκος του διανύσματος διαφοράς των συνιστωσών YCbCr: Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, αντί για το μέσο όρο των απολύτων διαφορών χρησιμοποιούμε το τετραγωνισμένο μήκος του διανύσματος διαφοράς των συνιστωσών στο χρωματικό πεδίο YCbCr:

$$d_{ij}^{k} = \frac{1}{L_{A}} \sum_{n=1}^{L_{A}} (Y_{Sn} - Y_{Pn})^{2} + (Cb_{Sn} - Cb_{Pn})^{2} + (Cr_{Sn} - Cr_{Pn})^{2}$$

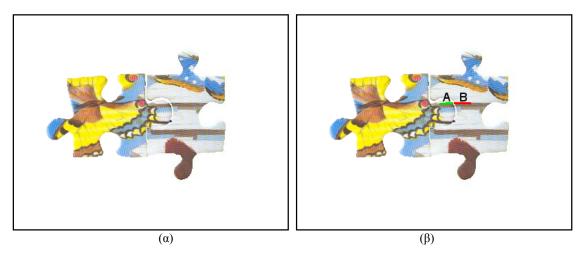
Τα κριτήρια αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τους αντίστοιχους υπολογισμούς και για τις δύο εφαρμογές. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη βιβλιογραφία πολλές φορές η απεικόνιση HSV απαντάται και ως HSB (όπου B η φωτεινότητα – brightness) ή HSL (όπου L είναι πάλι η φωτεινότητα – luminance).

Κεφάλαιο Α.ΙΙΙ.: Εξαγωγή των θεματικών στοιχείων που αντιστοιχούν σε κάθε συνένωση.

Α.ΙΙΙ.1. Περιγραφή της μεθοδολογίας

Στο σημείο αυτό προχωρούμε στην περιγραφή του αλγορίθμου εξαγωγής των θεματικών στοιχείων από το περιεχόμενο των κομματιών. Το θεματικό περιεχόμενο των κομματιών είναι το τρίτο χαρακτηριστικό που εξετάζει ο άνθρωπος για να διαπιστώσει κατά πόσο δύο κομμάτια ταιριάζουν κατά τη διάρκεια επίλυσης ενός κοινού παζλ. Το κριτήριο αυτό συχνά εφαρμόζεται τελευταίο, καθώς απαιτεί δυσκολότερες πνευματικές διεργασίες (όπως π.χ. η αναγνώριση αντικειμένων από ένα μέρος του) αλλά και επειδή είναι το κριτήριο που μπορεί να εφαρμοστεί με μεγαλύτερη αυστηρότητα, ιδιαίτερα στις συγκεκριμένες εφαρμογές. Η σημασία του γεγονότος αυτού θα φανεί αργότερα.

Η νοοτροπία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του κριτηρίου αυτού είναι σχετικά απλή: Για κάθε κομμάτι των εφαρμογών για τις οποίες υλοποιήθηκαν οι σχετικοί αλγόριθμοι, εξετάζουμε το θεματικό περιεγόμενο των κομματιών σε μία περιοχή κοντά στα όρια τους. Ως «θεματικό περιεχόμενο» εδώ εννοούμε τα συγκεκριμένα όρια μεταξύ θεματικών στοιχείων και περιοχών ή τα όρια συγκεκριμένων σχημάτων (πχ γραμμών, κυκλικών δίσκων ή άλλων σχημάτων). Το περιεχόμενο αυτό, στη συνέχεια, προσεγγίζεται με κάποιες γεωμετρικές καμπύλες, με σκοπό την εύρεση της κλίσης των καμπυλών αυτών κοντά στην περιοχή του ορίου. Σε θεωρητικό επίπεδο, τα κομμάτια τα οποία ταιριάζουν τέλεια μεταξύ τους θα πρέπει να παρουσιάζουν κάποια συνέγεια των θεματικών στοιγείων που περιέχονται σε αυτά και διακόπτονται από τη γραμμή του σπασίματος. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε μία γραμμή, η οποία περιέγεται σε ένα κομμάτι και συνεχίζεται στο γειτονικό του μετά από το «σπάσιμο» των κομματιών. Είτε η γραμμή αυτή είναι ευθεία είτε είναι καμπύλη, στην περιοχή του ορίου των κομματιών οι εφαπτόμενες της γραμμής εκατέρωθεν του ορίου θα πρέπει να έχουν πρακτικά ίση κλίση. Στην περίπτωση που η γραμμή αυτή παρουσιάζει αυξημένη καμπυλότητα, όμως, οι εφαπτόμενες εκατέρωθεν του ορίου θα παρουσιάζουν κάποια διαφορά στην κλίση, για την οποία ευθύνεται η ασυνέχεια που εισήγαγε το «σπάσιμο» του κομματιού. Ακόμα, όμως και στην περίπτωση αυτή, η διαφορά στις κλίσεις των εφαπτόμενων αυτών θα πρέπει να είναι σχετικά μικρή (βλέπε Σχήματα Α.18, Α.19 και Α.20).

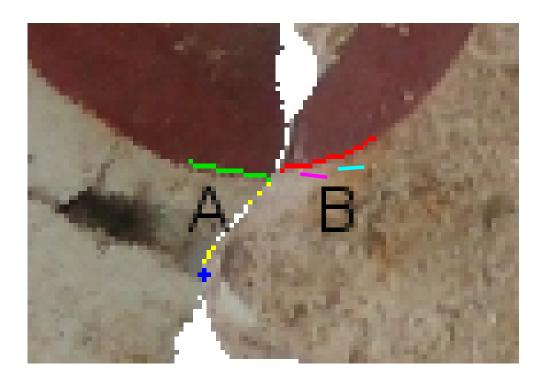


Σχήμα Α.18. Μία συνένωση δύο κομματιών παζλ () και ένα παράδειγμα συνέχειας του θεματικού περιεχομένου (β). Με πράσινο (Α) φαίνεται η εφαπτόμενη σε μία γραμμή ενός θεματικού στοιχείου, ενώ με κόκκινο (Β) φαίνεται η αντίστοιχη εφαπτόμενη της γραμμή από την άλλη μεριά του σπασίματος των κομματιών.





Σχήμα A.19. Μία συνένωση δύο κομματιών της Σαντορίνης (α) και ένα παράδειγμα συνέχειας του θεματικού περιεχομένου (β). Με πράσινο (Α) φαίνεται η εφαπτόμενη σε μία γραμμή ενός θεματικού στοιχείου, ενώ με κόκκινο (Β) φαίνεται η αντίστοιχη εφαπτόμενη της γραμμή από την άλλη μεριά του σπασίματος των κομματιών.



Σχήμα Α.20. Λεπτομέρεια συνένωσης. Με πράσινο (Α) φαίνεται η εφαπτόμενη σε μία γραμμή ενός θεματικού στοιχείου, ενώ με κόκκινο φαίνεται η αντίστοιχη εφαπτόμενη της γραμμή από την άλλη μεριά του σπασίματος των κομματιών. Με μοβ και κυανό φαίνονται οι αντίστοιχες εφαπτόμενες κοντά στο σπάσιμο των κομματιών.

Για κάθε κομμάτι που χρησιμοποιήθηκε στις δύο εφαρμογές εξήχθησαν οι συντεταγμένες των εικονοστοιχείων που αποτελούσαν ακμή θεματικού στοιχείου κοντά στην άκρη του περιγράμματος του κομματιού. Για να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος χωρίζεται σε τρία στάδια:

- 1. Την προ-επεξεργασία της εικόνας των κομματιών, ώστε να απομακρυνθεί ο θόρυβος που μπορεί να υπάρχει στην εικόνα λόγω της διαδικασίας ψηφιοποίησης της εικόνας των κομματιών (στην περίπτωση του παζλ) ή λόγω της φθοράς που υπέστησαν τα κομμάτια από την διαδικασία κατακερματισμού του αρχικού αντικειμένου.
- 2. Την ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων κοντά στο άκρο του κάθε κομματιού με βάση το χρώμα τους και την εξαγωγή των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν στα όρια των θεματικών στοιχείων που προκύπτουν από την ομαδοποίηση αυτή.
- 3. Τον υπολογισμό των εφαπτόμενων ευθειών που αντιστοιχούν στα όρια των θεματικών στοιχείων.

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε λεπτομερώς κάθε ένα από τα επιμέρους στάδια αυτά και θα δούμε τις διαφορές που προέκυψαν στην υλοποίησή τους για τα δύο σύνολα δεδομένων που είχαμε στη διάθεσή μας (για τα κομμάτια του παζλ και τα κομμάτια της Σαντορίνης).

Α.ΙΙΙ.2. Προ-επεξεργασία των εικόνων

Η προ-επεξεργασία των εικόνων που είχαμε στη διάθεσή μας ήταν απαραίτητη για την απομάκρυνση της παρουσίας του θορύβου που υπήρχε στις εικόνες αυτές. Ο θόρυβος αυτός επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία ομαδοποίησης των εικονοστοιχείων με βάση το χρωματικό περιεχόμενό τους, γεγονός που με τη σειρά του επηρεάζει την ορθή εξαγωγή των ορίων των θεματικών στοιχείων. Για το λόγο αυτό, εξετάστηκε μία πληθώρα τεχνικών προ-επεξεργασίας των έγχρωμων εικόνων, με σκοπό την απομάκρυνση του θορύβου σε βαθμό τέτοιο, ώστε να επιτευχθεί η σωστή ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων με βάση το χρώμα.

Λόγω της αρκετά διαφορετικής φύσης του θορύβου των δύο εικόνων, οι τεχνικές που επιλέχθηκαν τελικά είναι διαφορετικές για τους δύο τύπους εικόνων. Στην περίπτωση του παζλ, η παρουσία του θορύβου οφειλόταν κυρίως στη φύση της διαδικασίας ψηφιοποίησης των εικόνων. Για το λόγο αυτό, μετά από αρκετές δοκιμές επιλέχθηκε το φιλτράρισμα των εικόνων των κομματιών του παζλ με ένα φίλτρο αριθμητικού μέσου (median filtering). Τα φίλτρα αριθμητικού μέσου έχουν την ιδιότητα να απομακρύνουν πολύ καλά θόρυβο τύπου αλατοπίπερου (salt-and-pepper), ενώ παράλληλα διατηρούν σχετικά ανέπαφες τις ακμές των αντικειμένων που περιέχονται στην εικόνα.

Η διαδικασία φιλτραρίσματος μίας εικόνας με χρήση φίλτρου αριθμητικού μέσου είναι σχετικά απλή: Για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας, εντοπίζουμε τις τιμές των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στη γειτονιά του εικονοστοιχείου αυτού. Η «γειτονιά» του εικονοστοιχείου μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση μίας μάσκας, δηλαδή ενός πίνακα, ο οποίος περιέχει τις τιμές των εικονοστοιχείων αυτών. Για παράδειγμα, ας θεωρήσομε ένα εικονοστοιχείο της εικόνας με συντεταγμένες (x,y) και τιμή του γκρι που υποδηλώνεται από το σύμβολο V(x,y).

V(x-1,y-1)	V(x,y-1)	V(x+1,y-1)
V(x-1,y)	V(x,y)	V(x+1,y)
V(x-1,y+1)	V(x,y+1)	V(x+1,y+1)

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το μέγεθος της μάσκας είναι 3x3. Το μέγεθος και το σχήμα της μάσκας μπορούν να επιλεχθούν αυθαίρετα, αν και, προφανώς, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της μάσκας, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση που θα υποστεί τελικά η εικόνα μας. Ας υποθέσουμε ότι οι τιμές ενός εικονοστοιχείου και της γειτονιάς του είναι οι εξής:

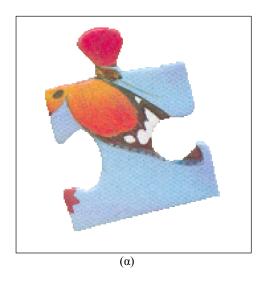
81	82	81
85	83	87
84	112	85

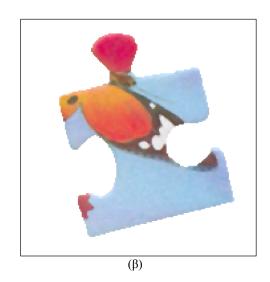
Σε αυτή την περίπτωση, η εφαρμογή του φίλτρου θα είχε ως αποτέλεσμα την αριθμητική ταξινόμηση των τιμών του πίνακα αυτού κατά αύξουσα τιμή (δηλαδή (81, 81, 82, 83, 84, 85, 85, 87, 112) και την αντικατάσταση του της τιμής του εικονοστοιχείου V(x,y) με το 84, το οποίο είναι ο αριθμητικός μέσος της ακολουθίας. Παρατηρούμε ότι, παρά την παρουσία μίας τιμής αρκετά μεγαλύτερης από το μέσο όρο των τιμών του πίνακα (δηλαδή την τιμή 112 του εικονοστοιχείου V(x,y+1), η τελική τιμή του εικονοστοιχείου V(x,y) δεν επηρεάζεται από την ακραία αυτή τιμή. Η περίπτωση αυτή είναι τυπικό παράδειγμα ενός εικονοστοιχείου το οποίο, αν και περιέχει στη γειτονιά του θόρυβο, μετά από το φιλτράρισμα θα έχει αποκτήσει τιμή που είναι πολύ κοντινότερη σε αυτή των υπολοίπων εικονοστοιχείων της γειτονιάς, χωρίς να έχει επηρεαστεί ουσιαστικά από την παρουσία του θορύβου.

Καθώς οι έγχρωμες εικόνες περιέχουν την απαραίτητη πληροφορία για την απεικόνιση όχι μόνο της έντασης της φωτεινότητας, αλλά και των χρωμάτων της εικόνας, η εφαρμογή των σχετικών φίλτρων έγινε ξεχωριστά για κάθε ένα από τα τρία επίπεδα χρώματος (κόκκινο, πράσινο και μπλε), τα οποία απαρτίζουν μία έγχρωμη εικόνα στην αναπαράσταση RGB, ενώ στη συνέχεια τα φιλτραρισμένα χρωματικά επίπεδα συνδυάστηκαν για να ανασυγκροτηθεί η φιλτραρισμένη πλέον έγχρωμη εικόνα. Η τεχνική αυτή, η οποία είναι γνωστή και ως Περιθωριακό Διανυσματικό Φιλτράρισμα Αριθμητικού

Μέσου (Vector Marginal Median Filtering) έχει ορισμένα πλεονεκτήματα και ορισμένα μειονεκτήματα. Το βασικό της μειονέκτημα είναι πως υπό ορισμένες συνθήκες και σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να εμφανιστούν εικονοστοιχεία με λανθασμένα χρώματα στην τελική εικόνα μας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συμπεριφορά του θορύβου ενδέχεται να μην είναι παρόμοια και στις τρεις χρωματικές συνιστώσες της εικόνας, με αποτέλεσμα ενώ σε μία ή δύο από τις χρωματικές συνιστώσες το φίλτρο να επιλέξει ως τελικό αποτέλεσμα διαφορετικό εικονοστοιχείο από ότι στις υπόλοιπες. Από την άλλη, το βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής είναι ότι είναι πολύ εύκολη στην υλοποίηση, η υλοποίησή της είναι εξαιρετικά γρήγορη και παρουσιάζει εξαιρετικά αποτελέσματα στην αφαίρεση του θορύβου. Σε σχετικές έρευνες που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία (Vertan, Malciu, Buzuloiu & Popescu, 1996, Morillas, Gregori & Sapena, 2011) φαίνεται πως, παρά τα μειονεκτήματά της, η τεχνική δίνει αποτελέσματα συγκρίσιμα με αυτά πιο πολύπλοκων τεχνικών διανυσματικού φιλτραρίσματος αριθμητικού μέσου. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την απλότητα της υλοποίησης και τις εξαιρετικά αποτελέσματα όσον αφορά στην απομάκρυνση του θορύβου πιστεύουμε πως αιτιολογεί επαρκώς την επιλογή μας για τη χρήση της τεχνικής αυτής.

Ένα παράδειγμα της σχετικής εφαρμογής της τεχνικής αυτής με μέγεθος μάσκας 3x3 φαίνεται στο Σχήμα Α.21.





Σχήμα Α.21. Ένα κομμάτι του παζλ πριν (α) και μετά (β) από την εφαρμογή του φίλτρου αριθμητικού μέσου.

Όπως βλέπουμε και από το Σχήμα Α.21, η εφαρμογή του φίλτρου απομάκρυνε σε ικανοποιητικό βαθμό την παρουσία του θορύβου, ενώ ταυτόχρονα είχαμε και ελάχιστη αλλοίωση των ακμών των θεματικών στοιχείων που περιέχονται στο κομμάτι αυτό.

Στην περίπτωση των κομματιών της Σαντορίνης, η διαφορετική φύση του θορύβου έκανε την εφαρμογή του φίλτρου αριθμητικού μέσου λιγότερο αποτελεσματική, οπότε επιλέχθηκε, τελικώς, η χρήση ενός βαθυπερατού προσαρμοστικού φίλτρου τύπου Wiener δύο διαστάσεων. Η χρήση του φίλτρου αυτού βασίζεται στον υπολογισμό των τοπικών στατιστικών χαρακτηριστικών της περιοχής γύρω από το κάθε εικονοστοιχείο. Συγκεκριμένα, αρχικά υπολογίζεται η μέση τιμή και η διασπορά των τιμών εικονοστοιχείων σε μία περιοχή η μεγέθους ΜχΝ γύρω από το κάθε εικονοστοιχείο α(n₁, n₂):

$$\mu = \frac{1}{NM} \sum_{n_1, n_2 \in \eta} \alpha(n_1, n_2)$$

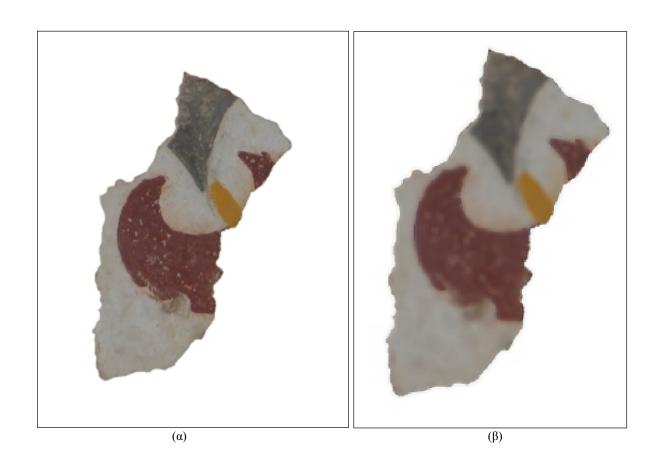
$$\sigma^{2} = \frac{1}{NM} \sum_{n_{1}, n_{2} \in \eta} \alpha_{2}(n_{1}, n_{2}) - \mu^{2}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η εκτίμηση της νέας τιμής του εικονοστοιχείου ως:

$$b(n_1, n_2) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2} (\alpha(n_1, n_2) - \mu)$$

Στην περίπτωση αυτή το v^2 είναι η διασπορά του θορύβου. Εάν η φύση του θορύβου δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή (όπως συμβαίνει στην περίπτωσή μας), τότε χρησιμοποιείται η μέση τιμή όλων των τοπικών διασπορών της περιοχής. Όπως φαίνεται και από τις σχετικές εξισώσεις, όταν η διασπορά στην περιοχή ενός εικονοστοιχείου είναι μεγάλη σε σχέση με αυτή του θορύβου ($\sigma^2 >> v^2$), τότε το φίλτρο που εφαρμόζεται εξομαλύνει σε μικρότερο βαθμό την τιμή του αντίστοιχου εικονοστοιχείου. Όταν η διασπορά στην περιοχή του εικονοστοιχείου είναι συγκρίσιμη με την εκτίμηση της διασποράς του θορύβου, τότε ο κυρίαρχος όρος που επηρεάζει την τελική τιμή του εικονοστοιχείου αυτού είναι ο μέσος όρος των γειτονικών εικονοστοιχείων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το φίλτρο να εξομαλύνει περισσότερο τις περιοχές στις οποίες οι διακυμάνσεις των τιμών των εικονοστοιχείων οφείλονται στο θόρυβο και λιγότερο τις περιοχές όπου οι

διακυμάνσεις οφείλονται στην αλλαγή χρώματος των εικονοστοιχείων λόγω της εναλλαγής των θεματικών στοιχείων. Έτσι, έχουμε καλύτερη διατήρηση της οξύτητας των ακμών των αντικειμένων της εικόνας από ότι θα είχαμε με την εφαρμογή ενός κοινού βαθυπερατού φίλτρου (όπως, πχ, ένα φίλτρο μέσου όρου) αντιστοίχου μεγέθους (Lim, 1990). Μία καλή επιλογή για το μέγεθος της σχετικής μάσκας της περιοχής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των σχετικών στατιστικών ποσοτήτων είναι το 5x5 ή 7x7. Η εφαρμογή του φίλτρου αυτού σε ένα κομμάτι της Σαντορίνης φαίνεται στο Σχήμα Α.22.



Σχήμα Α.22. Εικόνα ενός κομματιού της Σαντορίνης πριν (α) και μετά (β) από την εφαρμογή του προσαρμοστικού φίλτρου τύπου Wiener.

Η επιλογή αυτού του τύπου φίλτρου για τα κομμάτια της Σαντορίνης βασίστηκε στην επιθυμία μας να αλλοιώσουμε τις ακμές των θεματικών στοιχείων όσο το δυνατόν λιγότερο γίνεται. Σε ορισμένα κομμάτια, όμως, η παρουσία του θορύβου λόγω της φθοράς των κομματιών είναι τόσο έντονη, που το προσαρμοστικό φίλτρο τύπου Wiener δεν απομάκρυνε αρκετά ικανοποιητικά το θόρυβο από την εικόνα. Στις περιπτώσεις αυτές,

βρέθηκε ότι η χρήση ενός απλού βαθυπερατού φίλτρου τύπου μέσου όρου (averaging filter) προσέφερε καλύτερα αποτελέσματα, με αντίστοιχο κόστος, βέβαια, την απώλεια της οξύτητας των ακμών. Όπως θα δούμε αργότερα, δεν απαιτείται ο εντοπισμός των ακμών να είναι τόσο ακριβής, οπότε, στις περιπτώσεις αυτές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένα απλό φίλτρο μέσου όρου μεγέθους μάσκας 3x3 ή ακόμα και 5x5.

Τέλος, οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι οι τιμές για τα μεγέθη των μασκών που παρατίθενται τόσο για την περίπτωση του παζλ όσο και για την περίπτωση της Σαντορίνης δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων. Παρόλα αυτά, σε μεμονωμένες περιπτώσεις κομματιών μπορεί να απαιτείται λιγότερο ή περισσότερο έντονο φιλτράρισμα της εικόνας. Στις περιπτώσεις αυτές η ρύθμιση των σχετικών παραμέτρων επαφίεται από τη διακριτική ικανότητα του χρήστη.

A.III.3. Ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων κοντά στο άκρο του κομματιού με βάση το χρωματικό περιεχόμενο

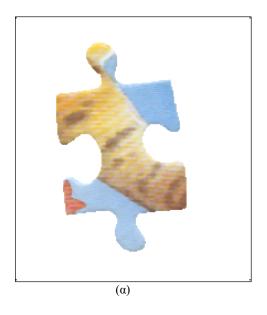
Εφόσον ολοκληρώσαμε την προεπεξεργασία των εικόνων, το επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός των ορίων των θεματικών στοιχείων που πρόσκεινται στο άκρο του κάθε κομματιού. Πρώτο μέλημα για την επίτευξη του σκοπού αυτού είναι ο εντοπισμός των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων που σχηματίζουν την περιοχή του κομματιού που βρίσκεται αμέσως εντός του εξωτερικού ορίου του κομματιού. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα θεματικά στοιχεία που βρίσκονται στην περιοχή αυτή είναι αυτά που θεωρούμε ότι θα συνεχίζονται και στο επόμενο κομμάτι.

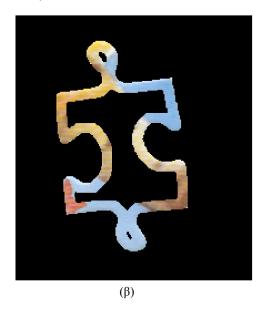
Αρχικά πήραμε το μαύρο περίγραμμα κάθε κομματιού (μιλάμε για το συμπαγές περίγραμμα, όχι μόνο το όριο του περιγράμματος) και σε αυτό εφαρμόστηκε μια διαδικασία διάβρωσης (erosion) με ένα δομικό στοιχείο (structuring element) σχήματος δίσκου με ακτίνα 10 εικονοστοιχεία για το παζλ και 30 για τα κομμάτια της Σαντορίνης. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία της δυαδικής διάβρωσης ως μορφολογικό μετασχηματισμό, δείτε το Παράρτημα Α.

Επειδή η διαδικασία της διάβρωσης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της συνοχής του μαύρου κομματιού, σκόπιμο είναι να εξασφαλίσουμε ότι στο αποτέλεσμα που πήραμε από τη διαδικασία διάβρωσης δεν υπάρχουν «τρύπες», δηλαδή μεμονωμένα εικονοστοιχεία με τιμή διαφορετική από αυτή του υπόλοιπου κομματιού. Έτσι,

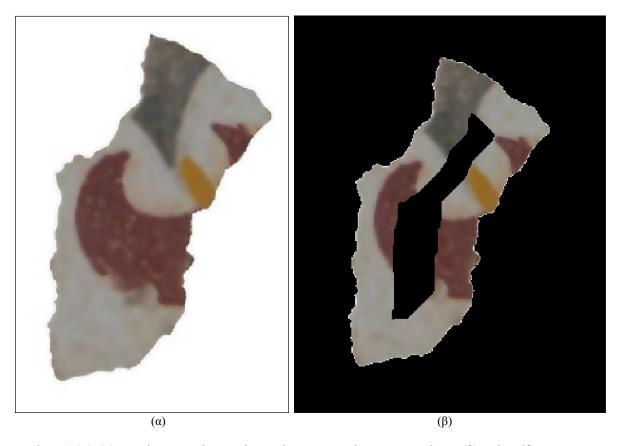
οποιεσδήποτε «τρύπες» εμφανίστηκαν στο περίγραμμα κλείστηκαν μέσω της μορφολογικής διαδικασίας bwmorph με δείκτη "majority" του MATLAB, η οποία όταν εφαρμοστεί σε μία μαυρόασπρη εικόνα, όπως αυτή του μαύρου κομματιού, θέτει την τιμή κάθε εικονοστοιχείου ίση με την τιμή της πλειοψηφίας των εικονοστοιχείων που βρίσκονται γύρω του.

Με αυτό τον τρόπο καταλήξαμε να έχουμε μια μικρότερη συμπαγή έκδοση του περιγράμματος του κάθε κομματιού. Η έκδοση αυτή αφαιρέθηκε από το κανονικό περίγραμμα και τα εικονοστοιχεία που προέκυψαν ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας μας δίνουν το μέρος του περιγράμματος του κομματιού που δείχνει από ποια εικονοστοιχεία της έγχρωμης φωτογραφίας του κομματιού θα εξάγουμε το θεματικό περιεχόμενο. Έτσι, για κάθε κομμάτι προέκυψε μια «ζώνη» κοντά στην άκρη του περιγράμματος του έγχρωμου κομματιού, πάνω στην οποία σημειώθηκαν οι συντεταγμένες των εικονοστοιχείων των ορίων των θεματικών στοιχείων (Σχήματα Α.23 και Α.24).





Σχήμα Α.23. (α) Η φιλτραρισμένη εικόνα ενός κομματιού του παζλ. (β) Η λωρίδα των εικονοστοιχείων που πρόσκεινται στο εζωτερικό όριο του κομματιού.



Σχήμα Α.24. (α) Η φιλτραρισμένη εικόνα ενός κομματιού της Σαντορίνης. (β) Η λωρίδα των εικονοστοιχείων που πρόσκεινται στο εξωτερικό όριο του κομματιού.

Α.ΙΙΙ.4. Επιλογή αλγορίθμου κατάτμησης

Σκοπός μας, στη συνέχεια, είναι να προσδιορίσουμε τα όρια του κάθε θεματικού στοιχείου που περιέχεται στη λωρίδα αυτή του κάθε κομματιού. Η διαδικασία αυτή ισοδυναμεί, στην ουσία, με την κατάτμηση της εικόνας του κομματιού σε θεματικές περιοχές, κάθε μία εκ των οποίων αντιπροσωπεύει ένα θεματικό στοιχείο. Κατάτμηση μίας εικόνας είναι ο διαχωρισμός της εικόνας σε περιοχές με βάση κάποιο χαρακτηριστικό της εικόνας, όπως, πχ, το χρώμα η ένταση του γκρι (για τις μαυρόασπρες εικόνες). Η αναλυτική παρουσίαση τεχνικών κατάτμησης έγχρωμων εικόνων είναι πέρα από τους σκοπούς του μέρους αυτού, οπότε θα περιοριστούμε στην ανάλυση των τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις τεχνικές κατάτμησης εικόνας, δείτε το μέρος Β' της διατριβής αυτής, το οποίο ασχολείται εκτενέστερα με την ανάλυση και την εφαρμογή τεχνικών κατάτμησης εικόνας.

Υπάρχουν αρκετές τεχνικές κατάτμησης έγχρωμης εικόνας, ανάλογα με την εικόνα και τις ανάγκες τις εφαρμογής, αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση μας ενδιαφέρει μία απλή κατάτμηση των περιοχών της εικόνας με βάση το χρώμα, καθώς θεωρούμε ότι τα θεματικά στοιχεία που περιέχονται στην εικόνα είναι απλά, ενιαία και σχετικά μονοχρωματικά, οπότε οι σχετικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αντίστοιχα απλές.

Μία από τις βασικές τεχνικές κατάτμησης εικόνας είναι η ομαδοποίηση (clustering). Η νοοτροπία πίσω από την τεχνική αυτή είναι απλή: Εάν θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα συγκεκριμένο αριθμό από περιοχές στην εικόνα μας, ομαδοποιούμε τα εικονοστοιχεία της εικόνας με βάση κάποιο κριτήριο έτσι, ώστε κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας να ανήκει σε κάποια από τις ομάδες αυτές. Τα βασικά ζητούμενα στη διαδικασία αυτή είναι δύο: η αναγνώριση του αριθμού των ομάδων και ο εντοπισμός του κριτηρίου που θα μας δώσει ικανοποιητική ομαδοποίηση.

Η αναγνώριση του αριθμού των ομάδων στις οποίες θα χωριστούν τα εικονοστοιχεία μίας εικόνας επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τον τύπο της τεχνικής ομαδοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί. Εν συντομία, θα μπορούσε κανείς να πει ότι οι τεχνικές ομαδοποίησης χωρίζονται σε αυτόματες τεχνικές (unsupervised) και σε τεχνικές με επίβλεψη από το χρήστη (supervised). Οι αυτόματες τεχνικές έχουν το πλεονέκτημα ότι, σε θεωρητικό επίπεδο τουλάχιστον, δεν απαιτούν την ανάμειξη του χρήστη και μπορούν να διεκπεραιωθούν εξ ολοκλήρου από τον υπολογιστή. Οι σχετικοί αλγόριθμοι περιλαμβάνουν κάποιον τρόπο εκτίμησης του πλήθους των περιοχών της εικόνας, με βάση την οποία γίνεται η ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων. Οι τεχνικές που απαιτούν επίβλεψη του χρήστη προσπαθούν να διαχωρίσουν με το βέλτιστο δυνατό τρόπο (σύμφωνα, πάντα, με κάποιο μαθηματικό κριτήριο) τα εικονοστοιχεία της εικόνας σε τόσες ομάδες (σύνολα) όσες επιλέξει εκ των προτέρων ο χρήστης.

Αν και, σε θεωρητικό επίπεδο, οι αυτόματες τεχνικές θα περίμενε κανείς να είναι πιο εύχρηστες, στην πράξη οφείλουμε να λάβουμε υπόψη ότι, όσο αυτοματοποιημένη και αν είναι κάποια τεχνική, για κάθε εφαρμογή απαιτείται ο ορισμός κάποιων παραμέτρων ευαισθησίας του αλγορίθμου. Επίσης, οι τεχνικές αυτές μπορούν, κατά κανόνα, να εφαρμοστούν σε εικόνες του ίδιου είδους, για ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων, ενώ εάν αλλάξει ο τύπος της εικόνας συχνά πρέπει να αλλάξουν αντίστοιχα και οι παράμετροι των αλγορίθμων. Επίσης, η αξιοπιστία των τεχνικών αυτών, ιδιαίτερα στην περίπτωση των έγχρωμων εικόνων, είναι στις περισσότερες περιπτώσεις αμφισβητήσιμη, γεγονός που συνεπάγεται ότι κάποια τελική επίβλεψη του αποτελέσματος από το χρήστη είναι απαραίτητη.

Από την άλλη, οι τεχνικές που λειτουργούν με επίβλεψη από το χρήστη απαιτούν, ουσιαστικά, μόνο τον προσδιορισμό του πλήθους των ομάδων και τη μετατροπή της εικόνας σε μία μορφή όπου τα χαρακτηριστικά των εικονοστοιχείων, με βάση τα οποία θα γίνει η ομαδοποίηση, να εκφράζονται με τέτοιο μαθηματικό τρόπο ώστε να επιτρέπεται η ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων με βάση κάποιο υπολογιστικό κριτήριο. Επίσης, υπάρχουν πολλοί υπολογιστικοί αλγόριθμοι ομαδοποίησης δεδομένων με επίβλεψη, οι μαθηματικές ιδιότητες των οποίων έχουν αναλυθεί εκτενώς, ενώ, παράλληλα, οι υλοποιήσεις των αλγορίθμων αυτών έχουν ωριμάσει σε βαθμό που η εκτέλεση τους να είναι πολύ γρήγορη και αποτελεσματική, ακόμα και για μεγάλο αριθμό επαναλήψεων.

Λόγω της ποικιλίας του θεματικού περιεχομένου των κομματιών της εφαρμογής του παζλ, αλλά και της ασταθούς φύσης και έντασης της φθοράς που έχουν υποστεί τα κομμάτια της Σαντορίνης, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης με επίβλεψη από το χρήστη. Οι βασικοί λόγοι για την επιλογή αυτοί ήταν οι εξής: Τα κομμάτια τόσο του παζλ όσο και της Σαντορίνης παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία· στην περίπτωση του παζλ λόγω του θεματικού περιεχομένου, ενώ στην περίπτωση της Σαντορίνης λόγω του περιεχομένου αλλά και της φθοράς που έχουν υποστεί. Έτσι, η εκτίμησή μας ήταν ότι η επίβλεψη του χρήστη θα ήταν απαραίτητη έτσι και αλλιώς, οπότε το πλεονέκτημα εφαρμογής ενός αυτόματου αλγορίθμου κατάτμησης δεν έχει τόσο μεγάλη βαρύτητα. Επίσης, οι αλγόριθμοι με επίβλεψη υπάρχουν ευρέως διαθέσιμοι σε πολύ αποτελεσματικές υλοποιήσεις, οι οποίες επιτρέπουν την εκτέλεση μεγάλων αριθμών επαναλήψεων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, δίνοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα και απαιτώντας μικρότερο χρονικό διάστημα εκτέλεσης.

Τελικώς, επιλέχθηκε ο ευρέως διαδεδομένος αλγόριθμος ομαδοποίησης k-means. Ο αλγόριθμος αυτός είναι μία μέθοδος ανάλυσης ομαδοποιήσεων (clusters), η οποία έχει ως σκοπό το διαχωρισμό v παρατηρήσεων σε k ομάδες και κατά την οποία κάθε παρατήρηση ανήκει στην ομάδα με το κοντινότερο μέσο όρο. Πιο αναλυτικά, δεδομένου ενός συνόλου παρατηρήσεων $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, ..., \mathbf{x}_n)$, όπου κάθε παρατήρηση είναι ένα πραγματικό διάνυσμα δ διαστάσεων, ο αλγόριθμος k-means προσπαθεί να ομαδοποιήσει τις v παρατηρήσεις σε k (όπου k < v) σύνολα $\mathbf{S} = \{S_1, S_2, ..., S_k\}$ έτσι, ώστε να ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγωνισμένων διαφορών εντός της κάθε ομάδας, δηλαδή η ποσότητα

$$arg \min_{S} \sum_{i=1}^{k} \sum_{x_{j} \in S_{i}} ||x_{j} - \mu_{i}||^{2}$$
,

όπου μ_i είναι ο μέσος όρος του S_i . (Για περισσότερες πληροφορίες, ανατρέξτε στη βιβλιογραφία που παρουσιάζεται στο Μέρος B').

Α.ΙΙΙ.5. Εφαρμογή του αλγορίθμου κατάτμησης

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου k-means στην κατάτμηση μίας έγχρωμης εικόνας, δύο είναι οι πτυχές που πρέπει να εξεταστούν. Η πρώτη είναι η επιλογή του πλήθους των συνόλων (clusters) των εικονοστοιχείων της εικόνας. Η επιλογή αυτή μπορεί να γίνει αυτόματα (με την εφαρμογή πιο προηγμένων υλοποιήσεων του αλγορίθμου) ή από το χρήστη. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, λόγω της φύσεως των εφαρμογών και της ποικιλομορφίας των εικόνων των κομματιών, προτιμήθηκε ο προσδιορισμός του πλήθους των συνόλων από το χρήστη. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εξετάζει (μέσω επισκόπησης) τόσο το αργικό κομμάτι, όσο και το αποτέλεσμα της διαδικασίας κατάτμησης και να αναθεωρήσει, εάν κρίνει σκόπιμο, την επιλογή αυτή. Αν και η διαδικασία αυτή αυξάνει το χρόνο επεξεργασίας του κάθε κομματιού, η επισκόπηση από το χρήστη δίνει τη δυνατότητα για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα, η οποία προκύπτει από πιο «έξυπνες» επιλογές του αριθμού των συνόλων. Στην περίπτωσή μας, ο αριθμός των συνόλων ουσιαστικά αντιστοιχεί στο πλήθος των θεματικών στοιχείων που απεικονίζονται στο εκάστοτε κομμάτι. Επανειλημμένες δοκιμές και στα δύο σύνολα των κομματιών έδειξαν ότι η συντριπτική πλειοψηφία των κομματιών μπορεί να κατατμηθεί ικανοποιητικά με τη χρήση 2-4 ομάδων εικονοστοιχείων ανάλογα με το κομμάτι. Αυτό σημαίνει ότι ο γρόνος επεξεργασίας του κάθε κομματιού είναι πολύ μικρός, καθώς, αφενός, είναι πολύ μικρός ο αριθμός των πιθανών ομαδοποιήσεων που πρέπει να εξεταστούν ενώ, από την άλλη, η υλοποίηση του αλγορίθμου k-means που χρησιμοποιήθηκε (η οποία είναι αυτή που περιέχεται στο ΜΑΤLAΒ) είναι πάρα πολύ αποτελεσματική και τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι σχεδόν άμεσα διαθέσιμα στο χρήστη για επισκόπηση, όταν χρησιμοποιείται ένας σύγχρονος υπολογιστής.

Η δεύτερη βασική πτυχή της εφαρμογής του αλγορίθμου αυτού είναι ο τρόπος αναπαράστασης της χρωματικής πληροφορίας που περιέχεται στα εικονοστοιχεία της εικόνας. Ο τρόπος αναπαράστασης της πληροφορίας είναι βασικός, καθώς από αυτόν εξαρτάται η ανάδειξη ή όχι των διαφορών μεταξύ των χρωμάτων διαφορετικών

εικονοστοιχείων και συνεπώς, η σωστή ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων με βάση τα χαρακτηριστικά τους. Ο πιο κλασικός τρόπος αναπαράστασης των έγχρωμων εικόνων είναι η αναπαράσταση RGB ή κόκκινο (Red), πράσινο (Green) και μπλε (Blue). Στην αναπαράσταση αυτή, το χρώμα του κάθε εικονοστοιχείου αναπαρίσταται από τρεις συνιστώσες, η κάθε μία από τις οποίες αντιπροσωπεύει το βαθμό στον οποίο το αντίστοιχο βασικό χρώμα περιέχεται στο τελικό χρώμα του εικονοστοιχείου. Η πρόσθεση των τριών χρωματικών σε διαφορετικούς βαθμούς μας δίνει το τελικό χρώμα που επιθυμούμε, οπότε για το λόγο αυτό η αναπαράσταση RGB ονομάζεται και αθροιστικό μοντέλο χρωμάτων. Άλλοι τρόποι αναπαράστασης των χρωμάτων είναι:

- η CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Key), ένα αφαιρετικό μοντέλο χρωμάτων, το οποίο χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στις εκτυπώσεις,
- η HSV (Hue-Saturation-Value), η οποία παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο,
- η L*a*b*, ένα σύστημα αναπαράστασης χρωμάτων που είναι ανεξάρτητο από τη συσκευή προβολής και χρησιμοποιείται ως σύστημα αναφοράς,
- η YCbCr, ένα σύστημα αναπαράστασης των χρωμάτων που χρησιμοποιείται κυρίως στη μετάδοση σημάτων βίντεο, κατά το οποίο η φωτεινότητα του σήματος (το άχρωμο μέρος) χωρίζεται από το έγχρωμο για την πιο αποτελεσματική μετάδοση του σήματος.

Εκτός από τα συστήματα αναπαράστασης των χρωμάτων που παρουσιάζονται εδώ, υπάρχουν και πολλά άλλα τα οποία μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο ευρέως διαδεδομένα. Η αναλυτική εξέταση του κάθε συστήματος αναπαράστασης είναι πέρα από τους σκοπούς του κειμένου αυτού· θα αναφέρουμε απλώς ότι κάθε σύστημα αναπαράστασης έχει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και ιδιότητες.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το μοντέλο αναπαράστασης χρωμάτων RGB είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο. Η αναπαράσταση ενός χρώματος με χρήση του μοντέλου αυτού εξαρτάται και από τον τύπο της συσκευής στην οποία γίνεται η αναπαράσταση· αυτό σημαίνει ότι η απεικόνιση ενός χρώματος με τις ίδιες συνιστώσες RGB μπορεί να διαφέρει από συσκευή απεικόνισης σε συσκευή απεικόνισης (δηλαδή από οθόνη σε οθόνη). Το σύστημα αυτό, όμως, δεν ανταποκρίνεται στη διαισθητική αντίληψη των χρωμάτων του ανθρωπίνου ματιού. Αυτό σημαίνει ότι μεγάλες διαφορές στα χρώματα που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι μπορεί να μην αντιστοιχούν σε ανάλογα μεγάλες διαφορές στις τιμές

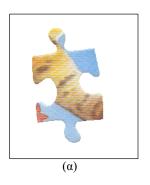
των τριών συνιστωσών. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώθηκε από σχετικές δοκιμές με τον αλγόριθμο k-means και την αναπαράσταση των χρωμάτων σε μορφή RGB, όπου οι ομαδοποιήσεις των χρωμάτων με βάση τις τιμές RGB δεν αντιστοιχούσαν και σε παρόμοια ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων με βάση το αντιληπτό χρωματικό τους περιεχόμενο.

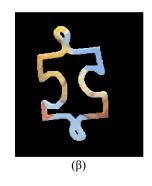
Για το λόγο αυτό, έγιναν εκτενείς δοκιμές ομαδοποίησης των εικονοστοιχείων με βάση τις τιμές τους στα διάφορα συστήματα αναπαράστασης των χρωμάτων. Τελικώς, στην περίπτωση του παζλ, πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα προέκυψαν με τη χρήση της αναπαράστασης YCbCr και ομαδοποίηση των στοιχείων με βάση τις τιμές των συνιστωσών Cb και Cr, οι οποίες είναι οι συνιστώσες που περιέχουν τη χρωματική πληροφορία στην αναπαράσταση αυτή (η συνιστώσα Υ περιέχει την πληροφορία που σχετίζεται με τη φωτεινότητα του εκάστοτε εικονοστοιχείου). Για την περίπτωση της Σαντορίνης, χρησιμοποιήθηκε η ίδια αναπαράσταση, μόνο που συμπεριλήφθηκε και η συνιστώσα της φωτεινότητας κατά την ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων. Η επιπλέον πληροφορία κρίθηκε απαραίτητη λόγω του γεγονότος ότι τα κομμάτια της Σαντορίνης είχαν επηρεαστεί αρκετά από τη φθορά, από τη μία, ενώ από την άλλη τα χρώματα των κομματιών ήταν αρκετά περιορισμένα σε χρωματικό εύρος ενώ, πολλές φορές, τα πιο σκούρα χρώματα είχαν δημιουργηθεί με βάση τα πιο ανοιχτά χρώματα, οπότε το σύστημα δε μπορούσε να διαχωρίσει ανάμεσα στις φωτεινές και σκοτεινές εκφάνσεις του ιδίου χρώματος.

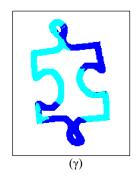
Α.ΙΙΙ.6. Το σύστημα εξαγωγής των ορίων των θεματικών στοιχείων

Σε αυτό το σημείο προχωρούμε με την ανάλυση της υλοποίησης του αλγορίθμου κατάτμησης που επιλέχθηκε στο σύστημα εξαγωγής των ορίων των θεματικών στοιχείων. Όπως αναφέρθηκε και στα ανωτέρω, έχουμε πλέον στη διάθεσή μας τη φιλτραρισμένη εικόνα με την εξωτερική λωρίδα που αντιστοιχεί στην περιοχή του κομματιού κοντά στο άκρο του περιγράμματός του. Στη συνέχεια, μετατρέπουμε την εικόνα αυτή στην αναπαράσταση YCbCr και εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο ομαδοποίησης k-means στα εικονοστοιχεία της εικόνας που ανήκουν στη λωρίδα αυτή. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγουμε να ομαδοποιήσουμε τα εικονοστοιχεία τα οποία δεν ανήκουν στην περιοχή που μας ενδιαφέρει (δηλαδή αυτά που δεν ανήκουν στο κομμάτι και αυτά που ανήκουν στο εσωτερικό του κομματιού). Για την ομαδοποίηση αυτή, κάθε εικονοστοιχείο θεωρήθηκε ως μία μέτρηση μίας ανεξάρτητης μεταβλητής δύο διαστάσεων, όπου η κάθε διάσταση περιείχε

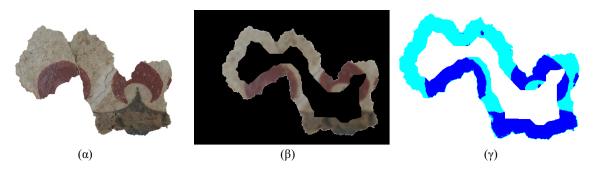
τη χρωματική συνιστώσα Cb ή Cr που αντιστοιχεί στο εικονοστοιχείο αυτό. Για να εξασφαλίσουμε ότι ο αλγόριθμος βρίσκει κάθε φορά τη βέλτιστη ομαδοποίηση, ορίσαμε κάθε ομαδοποίηση να εκτελείται 10 φορές και να επιλέγεται τελικώς η ομαδοποίηση με τη χαμηλότερη συνολική διασπορά εντός των ομάδων. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής για ένα τυπικό κομμάτι του παζλ φαίνονται στο Σχήμα Α.25 και για τα κομμάτια της Σαντορίνης στο Σχήμα Α.26.







Σχήμα Α.25. Εικόνα ενός κομματιού του παζλ. (α) Αρχική εικόνα. (β) Η φιλτραρισμένη λωρίδα. (γ) Τα εικονοστοιχεία της φιλτραρισμένης λωρίδας ομαδοποιημένα σε δύο σύνολα.



Σχήμα Α.26. Εικόνα ενός κομματιού της Σαντορίνης. (α) Αρχική εικόνα. (β) Η φιλτραρισμένη λωρίδα. (γ) Τα εικονοστοιχεία της φιλτραρισμένης λωρίδας ομαδοποιημένα σε δύο σύνολα.

Μία άλλη επιλογή ομαδοποίησης των θεματικών στοιχείων θα μπορούσε να είναι η ομαδοποίηση με βάση το χρωματικό περιεχόμενο και τις συντεταγμένες των εικονοστοιχείων. Μία τέτοια υλοποίηση θα μας έδινε ομαδοποιήσεις με ανά θεματικό στοιχείο της λωρίδας, αλλά στην περίπτωση αυτή ο χρήστης θα έπρεπε κάθε φορά να μετράει το πλήθος των θεματικών στοιχείων της εικόνας ώστε να χρησιμοποιήσει τον αριθμό των εικονοστοιχείων ως είσοδο στον αλγόριθμο ομαδοποίησης.

Α.ΙΙΙ.7. Εξαγωγή των ακμών των θεματικών στοιχείων

Εφόσον τα θεματικά στοιχεία έχουν ομαδοποιηθεί, μπορούμε να εξάγουμε τα όρια του κάθε θεματικού στοιχείου. Για να γίνει αυτό, αρχικά θεωρούμε όλα τα εικονοστοιχεία, χωρισμένα στις σχετικές ομάδες. Στη συνέχεια, σημειώνουμε ως άκρα τα εικονοστοιχεία στην περιοχή των οποίων έχουμε αλλαγή ομάδας. Για να περιορίσουμε των αριθμό των εικονοστοιχείων που αποτελούν ακμές του εκάστοτε θεματικού στοιχείου, βρίσκουμε σε κάθε μετάβαση μόνο τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στην ομάδα με μεγαλύτερο αύξοντα αριθμό, οπότε τελικώς έχουμε τα μισά εικονοστοιχεία από ότι είχαμε προηγουμένως.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την ενεργή παρέμβαση του χρήστη. Λόγω της σχετικά πολύπλοκης θεματολογίας των εικόνων του παζλ και της παρουσίας της φθοράς στις εικόνες της Σαντορίνης, συχνά προκύπτουν αλυσίδες ακμών οι οποίες είτε δεν αντιστοιχούν σε πραγματικές ακμές εικονοστοιχείων, είτε έχουν πολύπλοκα σχήματα, τα οποία δυσχεραίνουν τον εντοπισμό των εφαπτόμενων ευθειών που θα εξάγουμε τελικά. Το πλήθος των ειδών των παθολογικών περιπτώσεων είναι σχετικά μεγάλο και είναι σχετικά δύσκολο να προβλεφθούν όλες ώστε να αυτοματοποιηθεί πλήρως η διαδικασία εξαγωγής των εφαπτόμενων στα θεματικά στοιχεία. Για το λόγο αυτό, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να σβήσει με το χέρι οποιοδήποτε εικονοστοιχείο από αυτά που έχουν σημειωθεί ως ακμές. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης μπορεί να παρέμβει και να διορθώσει χειροκίνητα τις παθολογικές περιπτώσεις.

Ένα παράδειγμα μίας τέτοιας περίπτωσης είναι όταν υπάρχει στην εικόνα ένα θεματικό στοιχείο, το οποίο έχει δύο ακμές που τελειώνουν κοντά στο όριο του κομματιού (όπως, για παράδειγμα, οι κόκκινες ημισέληνοι του Σχήματος Α.24. Στην περίπτωση αυτή, το πρόγραμμα θα θεωρήσει ότι όλα τα εικονοστοιχεία ανήκουν σε ένα μόνο θεματικό στοιχείο, ενώ εμείς επιθυμούμε να σχηματιστούν ουσιαστικά δύο αλυσίδες ακμών, μία για κάθε πλευρά του αντικειμένου. Για να αντιμετωπιστεί η περίπτωση αυτή, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να «σπάσει» την ενιαία ομάδα ακμών σε δύο, οπότε το πρόγραμμα θα εντοπίσει δύο αλυσίδες ακμών που τελειώνουν κοντά στο άκρο του κομματιού, μία για κάθε πλευρά του αντικειμένου. Άλλες παθολογικές περιπτώσεις περιλαμβάνουν ομάδες ακμών που εντοπίστηκαν ως ξεχωριστές ομάδες λόγω της παρουσίας φθοράς στο κομμάτι ή θεματικά στοιχεία τα οποία εφάπτονται στο άκρο του κομματιού, χωρίς όμως τελικά να ολοκληρώνουν κάποια μετάβαση στο προσκείμενο κομμάτι. Οι περιπτώσεις αυτές είναι δύσκολο να περιγραφούν ή να αναλυθούν με όρους αναλυτικής γεωμετρίας λόγω του μεγάλου πλήθους τους. Για το λόγο αυτό, αντί να προβούμε σε μία απόπειρα ανάλυσης

όλων των παθολογικών περιπτώσεων, επιλογή που θα οδηγούσε στην ανάπτυξη μακρού και αναξιόπιστου (λόγω του μεγάλου πλήθους των ειδών των περιπτώσεων) κώδικα, επιλέξαμε να δώσουμε στο χρήστη τη δυνατότητα να επέμβει άμεσα στη διαμόρφωση του χάρτη των ακμών και να διορθώσει με το χέρι τις παθολογικές περιπτώσεις. Η διαδικασία αυτή είναι σχετικά σύντομη και εκτελείται μία φορά για κάθε κομμάτι· στην περίπτωση του παζλ, τα κομμάτια που απαιτούσαν παρέμβαση από το χρήστη ήταν ελάχιστα, λόγω της καλής συμπεριφοράς του αλγορίθμου κατάτμησης, ενώ στην περίπτωση της Σαντορίνης η παρουσία της φθοράς σε ορισμένα κομμάτια κατέστησε την παρέμβαση του χρήστη πιο απαραίτητη.

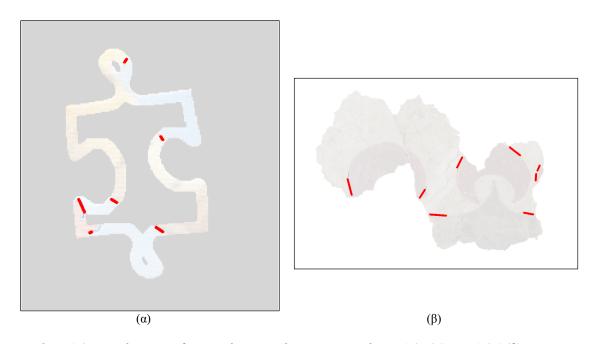
Μετά την ολοκλήρωση των διορθωτικών παρεμβάσεων από το χρήστη, προβαίνουμε σε πιο αυτοματοποιημένες διορθωτικές ενέργειες. Σε πρώτο στάδιο, διαγράφονται όλες οι ακμές που βρίσκονται πολύ κοντά στο άκρο του κομματιού. Για το παζλ, το όριο της ελάχιστης επιτρεπτής απόστασης είναι 1,5 εικονοστοιχείο από το κοντινότερο εικονοστοιχείο του περιγράμματος του κομματιού, ενώ το αντίστοιχο κατώφλι για την περίπτωση της Σαντορίνης ήταν 3. Ο λόγος για την ενέργεια αυτή είναι απλός: Στην περιοχή πολύ κοντά στο άκρο του κομματιού, στην μεν περίπτωση του παζλ τα χρώματα των εικονοστοιχείων μπορεί να έχουν αλλοιωθεί από τη διαδικασία ψηφιοποίησης των κομματιών, στη δε περίπτωση της Σαντορίνης πολλά από τα κομμάτια είχαν φθαρεί αισθητά από τη διαδικασία θραύσης της τοιχογραφίας. Επομένως, τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στην περιοχή πολύ κοντά στο άκρο του κομματιού δεν αποτελούν αξιόπιστους δείκτες του σχήματος του θεματικού στοιχείου και, για το λόγο αυτό, δεν περιλαμβάνονται στη διαδικασία εξαγωγής των ορίων των θεματικών στοιχείων.

Σε δεύτερο στάδιο, διαγράφονται όλες οι ομάδες ακμών που αποτελούνται από υπερβολικά λίγα ή υπερβολικά πολλά εικονοστοιχεία. Ως ελάχιστο πλήθος εικονοστοιχείων για το σχηματισμό ορίων θεματικών στοιχείων στην περίπτωση του παζλ θεωρήσαμε το 4, ενώ για τη Σαντορίνη επιλέχθηκε το 10, ενώ ως μέγιστο επιτρεπτό πλήθος ακμών επιλέχθηκε το διπλάσιο της ακτίνας του δομικού στοιχείου που χρησιμοποιήθηκε για το σχηματισμός της εξωτερικής λωρίδας των κομματιών (2x10 για το παζλ και 2x30 για τη Σαντορίνη). Με τον τρόπο αυτό, απομακρύνονται οι πολύ μικρές ομάδες εικονοστοιχείων, η παρουσία των οποίων οφειλόταν συνήθως στη φθορά των κομματιών ή σε ατελή ομαδοποίηση των αντιστοίχων εικονοστοιχείων, καθώς και οι υπερβολικά μεγάλες ομάδες εικονοστοιχείων, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε πολύπλοκα θεματικά στοιχεία ή σε θεματικά στοιχεία που περιέχονται σε πολύ μεγάλο βαθμό εντός της λωρίδας των εικονοστοιχείων που πρόσκειται στο άκρο του κομματιού. Επανειλημμένες δοκιμές σε

πολλά κομμάτια έδειξαν ότι οι παθολογικές περιπτώσεις αυτές οδηγούσαν σε αποτυχημένες εξαγωγές των ορίων των θεματικών στοιχείων.

Μία τρίτη απαίτηση που τέθηκε για τη διατήρηση μίας ομάδας ακμών ως πιθανού ορίου θεματικού στοιχείου ήταν τουλάχιστον ένα από τα εικονοστοιχεία της ομάδας να βρίσκεται σε μία συγκεκριμένη απόσταση κοντά στο όριο του κομματιού. Τα σχετικά κατώφλια που επιλέχθηκαν, με μονάδα μήκους το πλάτος ενός εικονοστοιχείου, ήταν το 3 για το παζλ και το 5 για τη Σαντορίνη. Η απαίτηση αυτή τέθηκε ώστε να αποκλειστούν οι ομάδες ακμών που αντιστοιχούν σε θεματικά στοιχεία που περιέχονται στο εσωτερικό του κομματιού, τα οποία, όμως, δεν συνεχίζονται στο προκείμενο κομμάτι.

Από εδώ και πέρα, η διαδικασία είναι σχετικά απλή: Για κάθε ομάδα εικονοστοιχείων που πληροί τα ανωτέρω κριτήρια, εντοπίζεται η ευθεία που τα προσεγγίζει βέλτιστα με την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων και οι παράμετροί της αποθηκεύονται σε ένα σχετικό αρχείο για χρήση από τον αλγόριθμο απόρριψης ανεπιτυχών συνενώσεων με βάση το θεματικό περιεχόμενο. Τα αποτελέσματα της εξαγωγής των ορίων των θεματικών στοιχείων για τα κομμάτια των Σχημάτων Α.25 και Α.26 φαίνονται στο Σχήμα Α.27:

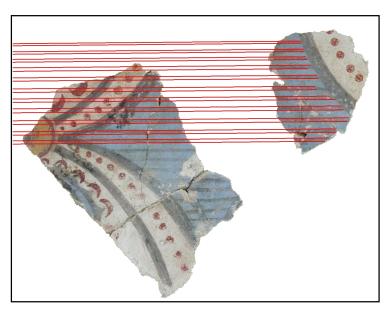


Σχήμα Α.27. Τα όρια των θεματικών στοιχείων των Σχημάτων Α.25(α) και Α.26 (β).

Όπως αναφέραμε, για κάθε κομμάτι που εφαρμόστηκε η ανωτέρω διαδικασία, σημειώθηκαν οι συντεταγμένες των εικονοστοιχείων, τα οποία αποτελούσαν όρια των

θεματικών στοιχείων που «διακόπτονταν» από το σπάσιμο του κομματιού. Συνολικά εξήχθησαν 1478 λωρίδες θεματικών στοιχείων για τις δύο εφαρμογές (566 για το παζλ και 912 για τη Σαντορίνη). Σε κάθε κομμάτι μπορεί να αντιστοιχούν από μηδέν έως και 46 σύνολα συντεταγμένων θεματικών στοιχείων. Η εφαρμογή του αλγορίθμου αντιστοίχισης και σύγκρισης της κλίσης των λωρίδων αυτών επεξηγείται στο επόμενο κεφάλαιο.

Αν και θα μπορούσε να ισχυριστεί κάποιος ότι θα ήταν πλεονεκτικότερο να χρησιμοποιηθεί το σύνολο του περιεχομένου του κομματιού και όχι το θεματικό περιεγόμενο κοντά στα άκρα του περιγράμματος για την εξαγωγή των θεματικών στοιχείων αυτών, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι δε μπορούμε να θεωρήσουμε κάποια πρότερη γνώση σχετικά με το περιεχόμενο των κομματιών και να διατηρήσουμε ταυτόχρονα την ευρεία εφαρμοσιμότητα των αλγορίθμων. Εντούτοις, στα πλαίσια της ενίσχυσης της προσπάθειας ανακατασκευής των τοιχογραφιών του Ακρωτηρίου της Σαντορίνης, εξετάστηκε και η εφαρμογή πιο εξειδικευμένων αλγορίθμων, οι οποίοι με χρήση κάποιων συγκεκριμένων θεματικών στοιχείων μπορούν να βοηθήσουν την προσπάθεια ανακατασκευής. Για παράδειγμα, σε έναν από τους χώρους εκσκαφής του Ακρωτηρίου βρέθηκε ένα σύνολο από κομμάτια μίας τοιχογραφίας, τα οποία έχουν ως θεματικό περιεχόμενο ένα πλέγμα παραλλήλων γαλάζιων και μαύρων ευθειών. Το πλέγμα αυτό αποτελείτο από ένα μεγάλο αριθμό παραλλήλων ευθειών, οι οποίες όμως παρουσίαζαν κάποιες διακυμάνσεις στο πάχος τους. Με εξέταση των διακυμάνσεων αυτών και με χρήση καταλλήλων στατιστικών μεθόδων, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος, με τη χρήση του οποίου μπορούμε να διαπιστώσουμε κατά πόσο δύο κομμάτια, τα οποία μπορεί να μην είναι καν γειτονικά, μπορεί να αποτελούν μέρη του ιδίου προτύπου (Σχήμα Α.28).



Σχήμα Α.28. Δύο κομμάτια που ανήκουν στο ίδιο θεματικό στοιχείο.

Με χρήση ενός τέτοιου και άλλων αλγορίθμων εξειδικευμένων για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, μπορεί κανείς να εξάγει ακόμα περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την πιθανή θέση και τον προσανατολισμό των κομματιών στην ανακατασκευασμένη τοιχογραφία. Οι αλγόριθμοι αυτοί, βεβαίως, δεν μπορούν να εφαρμοστούν ευρύτερα στην ανακατασκευή θραυσμένων αντικειμένων, καθώς κάνουν χρήση της πληροφορίας που έχει εξαχθεί από συγκεκριμένα θεματικά στοιχεία, τα οποία είναι πιθανότατα μοναδικά στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Παρόλα αυτά, τέτοιοι αλγόριθμοι μπορούν να αποτελέσουν ένα ακόμα χρήσιμο εργαλείο ενίσχυσης της προσπάθειας ανακατασκευής. Οι λεπτομέρειες σχετικά με τους αλγόριθμους που αναπτύχθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματά τους θα αναφερθούν σε άλλη εργασία (Papaodysseus et al., 2006, Fragoulis et al., 2005).

Κεφάλαιο Α.ΙV.: Εφαρμογή των αλγορίθμων

A.IV.1. Εφαρμογή του αλγορίθμου ταιριάσματος κομματιών με βάση το σχήμα

Όσον αφορά στο παζλ, σε πρώτο στάδιο, τα κομμάτια απομονώθηκαν από το φόντο της φωτογραφίας τους και καθαρίστηκαν, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο που αφορά στην προ-επεξεργασία των κομματιών. Στη συνέχεια, εξήχθη το αντίστοιχο μαύρο περίγραμμα του κάθε κομματιού, το οποίο μετατράπηκε στη δυαδική μορφή που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα του Linux. Κάθε κομμάτι που δεν άνηκε στο περίγραμμα του παζλ χρησιμοποιήθηκε ως σταθερό και έτρεξε με κάθε ένα από τα υπόλοιπα κομμάτια (συμπεριλαμβανομένων και των κομματιών που ανήκαν στο περίγραμμα). Από το διαχωρισμό αυτό προκύπτει το σύνολο των «σταθερών» κομματιών (όσα κομμάτια ανήκουν στο περίγραμμα) και το σύνολο των «περιστρεφόμενων» κομματιών (όλα τα κομμάτια του παζλ).

Έτσι, για κάθε σταθερό κομμάτι προέκυψε ένα αρχείο συνενώσεων, το οποίο περιέχει όλες της πιθανές συνενώσεις με κάθε περιστρεφόμενο κομμάτι. Τελικώς, έχουμε 24 αρχεία σταθερών κομματιών, όπου το καθένα περιέχει 49 πιθανούς συνδυασμούς κομματιών (το εκάστοτε σταθερό με κάθε ένα από τα περιστρεφόμενα). Τα σχετικά αρχεία με τις συνενώσεις στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι σε ένα πρόγραμμα, το οποίο ομαδοποιεί συνενώσεις που ανήκουν στην ίδια οικογένεια (δηλαδή όπου πρόκειται για την ίδια συνένωση που έγινε δεκτή για διαφορετικές γωνίες), οπότε μειώθηκε και το πλήθος των συνενώσεων. Τελικά, ο μέσος όρος των συνενώσεων που αντιστοιχεί σε σταθερό κομμάτι του παζλ είναι 1760, δηλαδή περίπου 36 συνενώσεις ανά ζεύγος κομματιών.

Για να μπορέσουμε να επιβεβαιώσουμε την απόδοση του προγράμματος ταιριάσματος με βάση το σχήμα των κομματιών, αλλά και για να σχηματίσουμε ένα μέτρο για την αποτίμηση των αποτελεσμάτων των διαφόρων αλγορίθμων, εντοπίσαμε τις επιτυχημένες συνενώσεις που αντιστοιχούν στο κάθε σταθερό κομμάτι. Αυτό έγινε με τη χρήση ειδικά ανεπτυγμένου λογισμικού, το οποίο διαβάζει το αρχείο των πιθανών συνενώσεων που αποτελεί την έξοδο του προγράμματος ταιριάσματος κομματιών με βάση το σχήμα και, με χρήση των αντιστοίχων εικόνων, απεικονίζει στην οθόνη κάθε μία από τις πιθανές συνενώσεις. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αυτό δέχεται ως είσοδο τις

συντεταγμένες του σημείου ταιριάσματος στα συστήματα αναφοράς του σταθερού και του περιστρεφόμενου κομματιού αντίστοιχα, καθώς και τη γωνία περιστροφής του περιστρεφόμενου κομματιού, για την οποία κατεγράφη η πιθανή συνένωση και απεικονίζει τη συνένωση αυτή στην οθόνη (Σχήμα Α.29 και Α.30).





Σχήμα Α.29. Δύο κομμάτια του παζλ που ταιριάζουν μεταξύ τους.



Σχήμα Α.30. Τα κομμάτια του Σχήματος Α.29 στη βέλτιστη θέση ταιριάσματος, όπως αυτή προσδιορίστηκε από το πρόγραμμα ταιριάσματος κομματιών με βάση το σχήμα.

Τελικώς, το πρόγραμμα του Linux βρήκε επιτυχώς 91 από τις 98 σωστές συνενώσεις που υπήρχαν (Παράρτημα 2, Πίνακας Α.ΙΧ). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι αν και σε ορισμένες περιπτώσεις μία συνένωση μπορεί να μη βρέθηκε όταν ένα συγκεκριμένο

κομμάτι χρησιμοποιήθηκε ως σταθερό και ένα άλλο ως περιστρεφόμενο, η ίδια συνένωση βρέθηκε επιτυχώς όταν οι ρόλοι των κομματιών αντεστράφησαν. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιήθηκε το κομμάτι 32 ως σταθερό, δε βρέθηκε επιτυχημένη συνένωση με το κομμάτι 24, το οποίο ταιριάζει με το 32. Όμως, όταν χρησιμοποιήθηκε το κομμάτι 24 ως σταθερό, η αντίστοιχη συνένωση με το κομμάτι 32 βρέθηκε. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε «κακό» καθαρισμό των κομματιών από τα αρχικά δεδομένα, είτε σε ατέλειες στην υλοποίηση του αλγορίθμου ταιριάσματος με βάση το σχήμα. Οι αριθμοί αυτοί δείχνουν το εξαιρετικά υψηλό ποσοστό εύρεσης σωστών συνενώσεων που παρουσιάζει το πρόγραμμα εύρεσης συνενώσεων με βάση το σχήμα των κομματιών (93%).

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και στην περίπτωση των κομματιών της Σαντορίνης, μόνο που οι παράμετροι του προγράμματος ταιριάσματος αλλάχθηκαν, ώστε να ληφθεί υπόψη το μεγαλύτερο μέγεθος των κομματιών αυτών. Συγκεκριμένα, το μέγιστο εμβαδόν επικάλυψης διπλασιάστηκε (και έγινε 132 εικονοστοιχεία, από 66 που ήταν για το παζλ), ενώ το επιτρεπτό εμβαδόν ανάμεσα σε κάθε συνένωση έγινε και αυτό λίγο μεγαλύτερο (170 εικονοστοιχεία από 140). Το μήκος των αλυσίδων σύγκρισης και στις δύο εφαρμογές ήταν 81 εικονοστοιχεία. Επειδή όμως τα κομμάτια της Σαντορίνης ήταν αρκετά μεγαλύτερα σε μέγεθος, από τη μία, ενώ από την άλλη τα κομμάτια αυτά δεν ανήκαν όλα στο ίδιο αντικείμενο (δηλαδή προέρχονταν από διαφορετικές τοιχογραφίες), τα κομμάτια έτρεξαν ανά 2 ή ανά 3 και όχι όλα μαζί, ενώ ακόμα και στις περιπτώσεις που έτρεξαν πάνω από 2 κομμάτια στο ίδιο πρόγραμμα, τα αποτελέσματα το προγράμματος ταιριάσματος χωρίστηκαν ανά ζεύγος κομματιών για να έχουμε ομοιομορφία στη δομή των αποτελεσμάτων. Λόγω του μεγάλου εύρους του μεγέθους των κομματιών της Σαντορίνης, το πλήθος των πιθανών συνενώσεων που από ζεύγος σε ζεύγος κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως και 6000, οπότε ο μέσος όρος του αριθμού των συνενώσεων δεν έχει νόημα ως ποσότητα στην περίπτωση αυτή.

Σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε ότι τα κομμάτια της Σαντορίνης έλαβαν νέα αρίθμηση, για λόγους συμβατότητας και ευκολίας εφαρμογής των προγραμμάτων. Συνολικά, είχαμε 78 κομμάτια, τα οποία σχημάτιζαν συνολικά 52 επιτυχημένες συνενώσεις.

A.IV.2. Εφαρμογή του αλγορίθμου υπολογισμού των χρωματικών διαφορών για την απόρριψη ανεπιτυχών συνενώσεων.

Εφόσον έχουμε πλέον στην κατοχή μας τα σχετικά αρχεία με τις πιθανές συνενώσεις με βάση το σχήμα των κομματιών, μπορούμε να προχωρήσουμε στην υλοποίηση του αλγορίθμου υπολογισμού των χρωματικών διαφορών των κομματιών στην περιοχή της πιθανής συνένωσης που εντόπισε ο αλγόριθμος. Για κάθε τέτοια πιθανή συνένωση, βρίσκουμε την αλυσίδα των εικονοστοιχείων που ξεκινάει από το εικονοστοιχείο που βρίσκεται κοντινότερα στο σημείο συνένωσης. Η αλυσίδα αυτή έχει μήκος ίδιο με το μήκος αλυσίδας που επιλέξαμε κατά την εκτέλεση του προγράμματος ταιριάσματος περιγραμμάτων του Linux, το οποίο ήταν 81 εικονοστοιχεία και στις δύο εφαρμογές. Στη συνέχεια, βρίσκουμε την αλυσίδα που έχει τον ίδιο αριθμό εικονοστοιχείων και ίσο μήκος καμπύλης στο σταθερό κομμάτι. Η αντιστοιγία των εικονοστοιγείων από τη μια αλυσίδα στην άλλη υπολογίστηκε με βάση το μήκος της κάθε αλυσίδας. Για κάθε εικονοστοιχείο της περιστρεφόμενης αλυσίδας, υπολογίστηκε το μήκος που έχει η καμπύλη γραμμή της αλυσίδας μέχρι το εικονοστοιχείο αυτό. Στη συνέχεια, βρήκαμε στην σταθερή αλυσίδα το εικονοστοιχείο το οποίο μας δίνει ίδιο μήκος καμπύλης με το αντίστοιχο μήκος της περιστρεφόμενης αλυσίδας. Θεωρούμε, βεβαίως, ότι εάν το ταίριασμα είναι τέλειο, οι δύο αλυσίδες έχουν ίδια μήκη. Έτσι εξασφαλίζουμε ότι τα εικονοστοιχείων των αλυσίδων που θα συγκριθούν αντιστοιχούν ένα προς ένα μεταξύ τους και ότι δεν θα συγκριθούν αλυσίδες διαφορετικού μήκους, κάτι που θα μπορούσε να μας δώσει ανακριβή αποτελέσματα.

Ο αλγόριθμος ταιριάσματος με βάση το σχήμα δεν δίνει πάντα την πιο ακριβή δυνατή θέση ταιριάσματος· αυτό οφείλεται, εν μέρει, στην επιλογή μας να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο με πιο χαλαρά κριτήρια, ώστε να έχουμε ικανοποιητικό πλήθος «ανεπιτυχών» συνενώσεων για τις δοκιμές μας, αλλά και στο γεγονός ότι τα κομμάτια της Σαντορίνης δεν ταιριάζουν πάντα απόλυτα με βάση το σχήμα λόγω της φθοράς που έχουν υποστεί. Έτσι, για να αντιμετωπίσουμε το φαινόμενο αυτό, ιδιαίτερα στην περίπτωση του παζλ, όπου είναι πιο έντονο λόγω της εκ των πραγμάτων αυστηρότερης φύσης του ταιριάσματος, οι σχετικές συγκρίσεις των χρωματικών αλυσίδων δεν εκτελέστηκαν μόνο στη συγκεκριμένη πιθανή θέση ταιριάσματος των δύο κομματιών, αλλά σε ένα εύρος ±5 εικονοστοιχείων εκατέρωθεν της θέσης ταιριάσματος. Από το σύνολο των διαφορών που προέκυψαν για τις διάφορες αυτές θέσεις, κρατάμε σε κάθε περίπτωση τη μικρότερη, καθώς αυτή είναι πιο πιθανό να αντιστοιχεί στην σωστή θέση ταιριάσματος. Με τον τρόπο αυτό, αντιμετωπίστηκαν οι περιπτώσεις στις οποίες η ελαφριά σχετική μετατόπιση των

κομματιών μπορεί να έδινε τιμή χρωματικής διαφοράς μεγαλύτερη από την πραγματική (ή βέλτιστη) τιμή. Η τροποποίηση αυτή μας επιτρέπει να θέσουμε ακόμα αυστηρότερα κριτήρια απόρριψης, καθώς στις περιπτώσεις όπου έχουμε σωστές συνενώσεις, το πρόγραμμα θα δώσει ακόμα μικρότερη τιμή διαφοράς ανάμεσα σε δύο κομμάτια, ενώ στις περιπτώσεις των λανθασμένων συνενώσεων, δε θα έχουμε κάποια αισθητή βελτίωση. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση της Σαντορίνης, λόγω της φθοράς που παρατηρείται κοντά στα περιθώρια πολλών κομματιών, είχαμε το αντίθετο αποτέλεσμα: η τροποποίηση αυτή βελτίωσε τις τιμές της χρωματικής διαφοράς πολλών λανθασμένων συνενώσεων, οι οποίες έδιναν σχετικά χαμηλή τιμή της χρωματικής διαφοράς λόγω του γεγονότος ότι υπήρχε σοβαρός βαθμός φθοράς κοντά στα άκρα και των δύο κομματιών. Αυτό, τελικώς, δυσχέρανε το διαχωρισμό των σωστών συνενώσεων από τις λανθασμένες, οπότε αποφασίσαμε να μην εφαρμόσουμε την τροποποίηση αυτή στην περίπτωση της Σαντορίνης.

Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της τελικής διαφοράς, με βάση τα κριτήρια που περιγράφηκαν στο αντίστοιχο κεφάλαιο, που θα αποδοθεί στη συγκεκριμένη συνένωση, αποθηκεύονται οι απαραίτητες πληροφορίες: Η διαφορά της συνένωσης, ο αύξων αριθμός της συνένωσης, οι συντεταγμένες του σημείου συνένωσης στο σταθερό και το περιστρεφόμενο κομμάτι αντίστοιχα, καθώς και η γωνία συνένωσης. Οι πληροφορίες αυτές θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την εφαρμογή των κριτηρίων απόρριψης των ανεπιτυχών συνενώσεων.

Για την εφαρμογή του χρωματικού κριτηρίου απόρριψης, για κάθε σύνολο χρωματικών διαφορών που προέκυψε μεταξύ δύο κομματιών θέσαμε ένα κατώφλι, το οποίο κάθε περίπτωση ήταν ίσο με: $k_{ij} = \overline{d}_{ij} - \sigma_{ij} / \alpha$, όπου k_{ij} είναι το κατώφλι απόρριψης για τις συνενώσεις μεταξύ του σταθερού κομματιού i και του περιστρεφόμενου κομματιού j (με $i \neq j$), \overline{d}_{ij} είναι ο μέσος όρος των διαφορών μεταξύ των δύο κομματιών για το συγκεκριμένο κριτήριο απόδοσης διαφοράς, σ_{ij} είναι η τυπική απόκλιση που παρουσιάζουν οι διαφορές των δύο κομματιών και α είναι ένας σταθερός πραγματικός αριθμός. Όποιες συνενώσεις είχαν τιμή διαφοράς μεγαλύτερη από k_{ij} απορρίπτονταν ως ανεπιτυχείς. Το κριτήριο αυτό είναι ένα σχετικό κριτήριο, δηλαδή από το σύνολο των συνενώσεων μεταξύ των δύο κομματιών θα μας δώσει τις πιθανότερες σε σχέση το σύνολο αυτό. Η σημασία αυτού του γεγονότος θα φανεί αργότερα. Ο αριθμός α εξαρτάται από το είδος του κριτηρίου με βάση το οποίο αποδόθηκαν οι χρωματικές διαφορές, αλλά και από τη βαρύτητα που θα δώσουμε στο αν θέλουμε να έχουμε υψηλό ποσοστό απόρριψης με αυξημένη πιθανότητα απόρριψης

σωστών συνενώσεων ή χαμηλότερο ποσοστό απόρριψης με αυξημένη πιθανότητα αποδοχής των σωστών συνενώσεων.

Τα ποσοστά επιτυχίας και απόρριψης που προέκυψαν από την εφαρμογή των κριτηρίων υπολογισμού της διαφοράς και του κατωφλίου, μαζί με τις αντίστοιχες τιμές του α, φαίνονται στους Πίνακες Α.ΙΙ, Α.ΙΙΙ και Α.ΙV. Πρέπει να σημειωθεί, εδώ, ότι οι τιμές αυτές αναφέρονται στην εφαρμογή του χρωματικού κριτηρίου απόρριψης μόνο και οι τιμές του α είναι ενδεικτικές. Τα αποτελέσματα παρατίθενται μόνο για να επιδειχθεί η αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου κριτηρίου και όχι η γενικότερη αποτελεσματικότητα του συστήματος (το οποίο περιλαμβάνει και ταυτόχρονη εφαρμογή του κριτηρίου απόρριψης με βάση το θεματικό περιεχόμενο).

Πίνακας Α.Η. Ποσοστά απόρριψης και επιτυχίας για τα διάφορα κριτήρια απόρριψης

ανεπιτυχών συνενώσεων. Εφαρμογή: Παζλ.

		Τιμή των Ρ και Q							
Κριτήριο		3	5	7	9	11	13		
Κριτήριο 1	α	2,4	3	3	2,8	3	3		
	% απόρριψης	62,68	59,58	59,60	60,30	59,24	59,32		
	% επιτυχίας	100,00	100,00	100,00	96,62	96,62	92,13		
	α	2,6	3,4	3,3	3,3	3,3	3,3		
Κριτήριο 2	% απόρριψης	59,06	55,43	55,72	55,19	54,89	54,86		
	% επιτυχίας	100,00	100,00	98,87	97,75	97,75	95,50		
	α	3,2	2,7	3,1	3,2	2,6	2,8		
Κριτήριο 3	% απόρριψης	57,84	60,10	58,11	57,91	60,45	59,40		
	% επιτυχίας	100,00	100,00	98,87	97,75	96,62	95,50		
Κριτήριο 4	α	3,3	2,6	2,3	2,4	3,7	3,7		
	% απόρριψης	59,98	62,49	64,20	63,38	58,14	57,56		
	% επιτυχίας	100.00	98.87	96.62	96.62	96.62	95.50		
	α	2,9	2,5	4,5	3	3,3	3,4		
Κριτήριο 5	% απόρριψης	59.35	60.80	53.55	57.63	56.38	55.84		
	% επιτυχίας	95.50	95.50	94.38	93.25	93.25	91.01		
	α	3,8	3,3	2,9	3,8	3,8	3,3		
Κριτήριο 6	% απόρριψης	57.21	58.66	59,75	57,23	57,24	58,36		
	% επιτυχίας	98,87	98,87	97,75	96,62	95,50	92,13		
Κριτήριο 7	α	1,7	2,2	3,8	1,9	2,4	3,2		
	% απόρριψης	69,40	63,43	57,18	66,46	62,33	58,60		
	% επιτυχίας	100,00	100,00	100,00	98,87	98,87	98,87		
	α	2,3	2,6	2,6	3,5	2,8	2,7		
Κριτήριο 8	% απόρριψης	61,25	58,22	58,86	54,44	57,22	57,56		
	% επιτυχίας	98,88	98,87	97,75	97,75	96,62	95,50		

Πίνακας Α.ΙΙΙ. Η τιμές του κριτηρίου 7 για διαφορετικές τιμές του α για το παζλ. PQ=3

		• -	<u> </u>				1 2			
α	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
% απόρριψης	83,64	80,63	78,19	75,93	74,04	72,30	70,73	69,40	68,06	67,00
% επιτυχίας	85,39	92,13	93,25	94,38	96,62	97,75	97,75	100,00	100,00	100,00

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα κομμάτια της Σαντορίνης ήταν:

Πίνακας Α.ΙV. Ποσοστά απόρριψης και επιτυχίας για τα διάφορα κριτήρια απόρριψης

ανεπιτυχών συνενώσεων. Εφαρμογή: Σαντορίνη.

	Τιμή των Ρ και Q							
Κριτήριο		9	11	13	15	17		
Κριτήριο 1	α	3,1	3,3	3,8	3,8	3,8		
	% απόρριψης	55,21	54,45	52,80	52,66	52,44		
	% επιτυχίας	92,3	92,30	94,23	94,23	94,23		
	α	2,8	2,4	2,3	2,2	2,8		
Κριτήριο 2	% απόρριψης	52,77	54,76	56,44	57,62	52,42		
	% επιτυχίας	94,23	94,23	94,23	94,23	94,23		
	α	5,8	6,2	7,5	6	6,7		
Κριτήριο 3	% απόρριψης	49,74	49,26	48,27	49,73	49,03		
	% επιτυχίας	82,69	80,76	80,76	78,84	78,84		
Κριτήριο 4	α	2,5	3,9	3,6	2,2	2,2		
	% απόρριψης	63,14	57,22	58,12	63,99	64,88		
	% επιτυχίας	84,61	86,53	86,53	84,61	84,61		
	α	2,9	3,9	3,8	3,9	4		
Κριτήριο 5	% απόρριψης	55,67	52,48	52,86	52,11	51,28		
	% επιτυχίας	88,46	90,38	88,46	88,46	88,46		
Κριτήριο 6	α	2,4	2,9	4	2,9	3,9		
	% απόρριψης	61,99	59,06	55,20	58,61	54,91		
	% επιτυχίας	80,76	80,76	82,69	82,69	82,69		
	α	3,2	4,4	3,3	3,3	3,4		
Κριτήριο 7	% απόρριψης	58,18	55,01	57,80	57,92	57,74		
	% επιτυχίας	92,30	94,23	94,23	94,23	94,23		
	α	3,1	2,7	2,4	2,4	2,4		
Κριτήριο 8	% απόρριψης	51,93	53,90	56,12	55,85	54,95		
	% επιτυχίας	94,23	94,23	94,23	94,23	94,23		

Σε αυτό το σημείο, μπορούμε να κάνουμε ορισμένες παρατηρήσεις με βάση τα προκαταρκτικά αυτά αποτελέσματα:

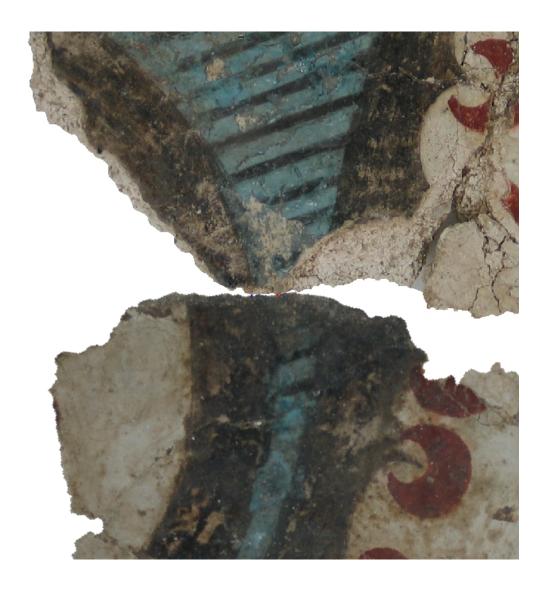
1. Όσον αφορά στην εφαρμογή του παζλ, όλα τα κριτήρια φαίνονται να δίνουν αρκετά υποσχόμενα αποτελέσματα, από πλευράς ποσοστού απόρριψης και ποσοστού επιτυχίας. Δε θα προβούμε σε κάποια τελεσίδικη απόφαση, ακόμα, καθώς οι συνθήκες που οδήγησαν στα αποτελέσματα αυτά μπορεί να μεταβληθούν με την ταυτόχρονη εφαρμογή του θεματικού κριτηρίου, οπότε τα τελικά συμπεράσματα

σχετικά με τη βέλτιστη επιλογή κριτηρίου θα πρέπει να εξαχθούν όταν έχουν εφαρμοστεί και τα δύο κριτήριο. Όπως βλέπουμε και από το σχετικό πίνακα, μόνο η εφαρμογή του χρωματικού κριτηρίου μας επιτρέπει να απορρίψουμε τουλάχιστον τις μισές, πολλές φορές και περισσότερες, από τις συνενώσεις, χωρίς να έχουμε σοβαρή απώλεια στην ακρίβεια της εφαρμογής. Υπενθυμίζεται ότι τα ποσοστά που παρατίθενται δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα· καθώς το πλήθος των πιθανών συνενώσεων είναι πολύ μεγαλύτερο από το πλήθος των επιτυχών συνενώσεων, βλέπουμε ότι μία τιμή 1% για το ποσοστό απόρριψης μπορεί να αντιστοιχεί σε δεκάδες ή εκατοντάδες συνενώσεις, ενώ μία τιμή 1% για το ποσοστό επιτυχίας αντιστοιχεί σε μία ή δύο συνενώσεις. Το γεγονός αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν αποφασίζει ο χρήστης εάν θα δώσει μεγαλύτερη έμφαση στην ακρίβεια της εφαρμογής του αλγορίθμου ή στο χρόνο που θα γλιτώσει εξετάζοντας πιθανώς ανεπιτυχές συνενώσεις.

- 2. Οι τιμές των P και Q που δίνουν τα βέλτιστα αποτελέσματα διαφέρουν για τις δύο εφαρμογές. Συγκεκριμένα, για την εφαρμογή του παζλ βλέπουμε ότι τα βέλτιστα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με τιμές για τα P και Q ίσες με 3 ή 5, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την εφαρμογή της Σαντορίνης είναι γύρω στο 13 με 15, ανάλογα με το κριτήριο. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο για δύο λόγους: Πρώτον, η εφαρμογή της Σαντορίνης περιλαμβάνει, κατά κανόνα, κομμάτια τα οποία είναι πολύ μεγαλύτερα από την εφαρμογή του παζλ. Δεύτερον, τα κομμάτια της Σαντορίνης έχουν υποστεί ένα σοβαρό βαθμό φθοράς, η οποία έχει αλλοιώσει το χρωματικό περιεχόμενο των κομματιών, οπότε είναι λογικό να περιμένει κανείς ότι θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το χρωματικό περιεχόμενο σε μία ευρύτερη περιοχή κοντά στο περίγραμμα του κομματιού, ώστε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, για την εφαρμογή της Σαντορίνης παρατίθενται τα αποτελέσματα για τιμές των P και Q μεγαλύτερες από 9, καθώς οι μικρότερες τιμές έδιναν σαφώς χειρότερα αποτελέσματα.
- 3. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του παζλ είναι ελαφρώς καλύτερα από τα αντίστοιχα της Σαντορίνης, ιδιαίτερα όσον αφορά τα ποσοστά των επιτυχημένων συνενώσεων. Και πάλι, το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της φθοράς που έχουν υποστεί τα κομμάτια της Σαντορίνης. Αυτό έχει ως συνέπεια ότι, ανεξαρτήτων των κριτηρίων που θα εφαρμοστούν για την εξέταση του ταιριάσματος των κομματιών, υπάρχει πάντα μία πιθανότητα συνενώσεις που γίνονται δεκτές μετά από ανθρώπινη εποπτεία (μέσω εξέτασης του ευρύτερου γρωματικού ή θεματικού

περιεχομένου του κομματιού ή άλλων παραγόντων, όπως πχ ότι είναι η πιο πιθανή συνένωση μέσα σε ένα περιορισμένο σύνολο κομματιών) να απορρίπτονται από τα σχετικά προγράμματα του υπολογιστή.

Για να θεμελιώσουμε ακόμα περισσότερο την τρίτη παρατήρηση σχετικά με τα αποτελέσματα, παραθέτουμε ένα παράδειγμα μίας συνένωσης της Σαντορίνης που απερρίφθη με βάση το χρωματικό ταίριασμα των κομματιών (Σχήμα Α.31):



Σχήμα Α.31. Συνένωση δύο κομματιών της Σαντορίνης όπου η φθορά εμποδίζει την επιτυχημένη εφαρμογή του κριτηρίου ταιριάσματος με βάση το χρωματικό περιεχόμενο των κομματιών.

Όπως μπορεί να δει κανείς στο Σγήμα Α.31, το ένα από τα δύο κομμάτια έχει υποστεί σοβαρή φθορά κοντά στην περιοχή της συνένωσης. Παρατηρούμε, επίσης, ότι η φθορά αυτή επηρέασε το επιφανειακό επίπεδο του εν λόγω κομματιού, ενώ αντίθετα το σχήμα του κομματιού δεν επηρεάστηκε σε τόσο μεγάλο βαθμό. Αν και ο αλγόριθμος ταιριάσματος με βάση το σχήμα των κομματιών έδωσε τη συνένωση αυτή ως πιθανή, βλέπουμε ότι ο αλγόριθμος απόρριψης συνενώσεων με βάση την έλλειψη ταιριάσματος του χρωματικού περιεχομένου δικαιολογημένα απέρριψε τη συνένωση αυτή ως ανεπιτυχή. Ο ειδικευμένος τεχνικός-αρχαιολόγος που θα εξέταζε τα κομμάτια αυτά, μέσω της εξέτασης του ευρύτερου χρωματικού και θεματικού περιεχομένου, μπορεί να κατέληγε στο συμπέρασμα ότι τα κομμάτια αυτά τελικά ταιριάζουν. Όμως, είναι λογικό να περιμένει κανείς ότι ένας αυτοματοποιημένος αλγόριθμος που εξετάζει το χρωματικό περιεχόμενο των κομματιών αυτών κοντά στην περιοχή ταιριάσματος δε θα έκανε δεκτή την συνένωση αυτή. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο ακόλουθο πόρισμα: <u>Ανεξαρτήτως των</u> αποτελεσμάτων που δίνουν οι αυτόματοι αλγόριθμοι σχετικά με την πιθανότητα ταιριάσματος δύο κομματιών, η ανθρώπινη επίβλεψη των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος απόρριψης ανεπιτυχών συνενώσεων με βάση το γρωματικό περιεγόμενο μπορεί, με σγετική ασφάλεια, να μειώσει σε πολύ μεγάλο βαθμό το χρόνο που καταναλώνει η επίβλεψη αυτή.

A.IV.3. Υλοποίηση προσαρμοστικού (adaptive) κατωφλίου για το χρωματικό κριτήριο

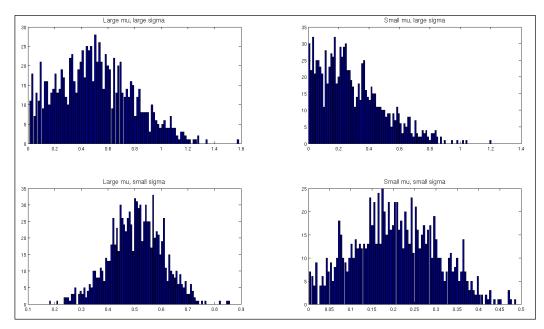
Όπως παρατηρούμε από τους ανωτέρω πίνακες, οι χρωματικές διαφορές ανάμεσα στις αλυσίδες των εικονοστοιχείων των κομματιών αναδεικνύονται καλύτερα με την αναπαράσταση στο διάστημα χρωμάτων YCbCr.

Ένα βασικό ζήτημα με την υλοποίηση των χρωματικών κριτηρίων που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα είναι η επιλογή του παράγοντα α, με τον οποίο διαιρούμε την τυπική απόκλιση των διαφορών για να θέσουμε την τιμή του κατωφλίου για το σύνολο των συνενώσεων ανάμεσα στα ζεύγη των κομματιών. Όπως υλοποιήθηκαν τα σχετικά κριτήρια, η επιλογή της τιμής του α είναι ενιαία για όλα τα ζεύγη σύγκρισης των κομματιών. Αν και σε αρχικό επίπεδο κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο ώστε να έχουμε καλύτερο έλεγχο πάνω στη διαδικασία εξέτασης της συμπεριφοράς των διαφορετικών

κριτηρίων, θα ήταν σκόπιμο να αναπτύξουμε ένα δυναμικό ή προσαρμοστικό (adaptive) τρόπο υπολογισμού του σχετικού κριτηρίου για κάθε ζεύγος κομματιών. Η τιμή ενός τέτοιου κατωφλίου θα πρέπει να προσαρμόζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται ανάμεσα σε διαφορετικά κομμάτια με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τα γενικότερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα κομμάτια που συγκρίνονται.

Ας δούμε, όμως, τι χαρακτηριστικά περιμένουμε να παρουσιάζονται κατά τη σύγκριση δύο κομματιών όσον αφορά το πιθανό χρωματικό ταίριασμα μεταξύ τους. Υπενθυμίζουμε ότι, όταν αναφερόμαστε στο χρωματικό ταίριασμα δύο κομματιών, στην ουσία αναφερόμαστε στις χρωματικές διαφορές που παρουσιάζουν οι αντίστοιχες αλυσίδες των εικονοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την διαπίστωση του ταιριάσματος ή όχι των κομματιών με βάση το σχήμα τους και όχι στο γενικότερο χρωματικό περιεχόμενο των κομματιών.

Ας θεωρήσουμε το σύνολο των πιθανών συνενώσεων με βάση το σχήμα που μπορεί να έχουν προκύψει για δύο κομμάτια. Θα διαχωρίσουμε, αρχικά δύο περιπτώσεις: την περίπτωση όπου ο μέσος όρος των χρωματικών διαφορών είναι σχετικά χαμηλός, δηλαδή τα κομμάτια έχουν σχετικά παρόμοια χρώματα κοντά στο περίγραμμά τους, και την περίπτωση όπου ο μέσος όρος των χρωματικών διαφορών είναι σχετικά υψηλός, δηλαδή τα κομμάτια διαφέρουν αρκετά ως προς τα χρώματα του περιγράμματός τους. Αντίστοιχα, θα διαχωρίσουμε και σε δύο άλλες περιπτώσεις, ανάλογα με τη συμπεριφορά της τυπικής απόκλισης των διαφορών των κομματιών. Εξετάζουμε την τυπική απόκλιση επειδή είναι ένα μέγεθος άμεσα συγκρίσιμο με το μέσο όρο των κομματιών. Έτσι, το σύνολο των χρωματικών διαφορών δύο κομματιών μπορεί να παρουσιάζει μία σχετικά μεγάλη τυπική απόκλιση, γεγονός που συνεπάγεται ότι τα κομμάτια ταιριάζουν χρωματικά σε ορισμένες περιπτώσεις και αποκλίνουν σε άλλες, ή μικρή τυπική απόκλιση, γεγονός που συνεπάγεται ότι, για τις διαθέσιμες πιθανές συνενώσεις, ισχύει πως τα κομμάτια ταιριάζουν σε παρόμοιο βαθμό. Ένα υποθετικό παράδειγμα των σχετικών περιπτώσεων φαίνεται στο Σγήμα Α.32.



Σχήμα Α.32. Τέσσερα παραδείγματα στατιστικής συμπεριφοράς του συνόλου των χρωματικών διαφορών ανάμεσα σε δύο κομμάτια.

Έτσι, λοιπόν, όταν το σύνολο των συνενώσεων παρουσιάζει υψηλό μέσο όρο, τα κομμάτια διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους όσον αφορά στο χρωματικό τους περίγραμμα. Επειδή περιμένουμε η επιτυχημένη συνένωση (εάν υπάρχει στο σύνολο αυτό) να έχει τιμή αρκετά χαμηλότερη από το μέσο όρο, μπορούμε να θέσουμε ένα σχετικά υψηλό κατώφλι, ώστε να απορριφθούν όσο το δυνατότερο περισσότερες ανεπιτυχείς συνενώσεις. Αντίστοιχα, όταν το σύνολο των συνενώσεων παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, αυτό σημαίνει ότι τα κομμάτια αυτά ταιριάζουν χρωματικά σε ορισμένα σημεία, ενώ σε άλλα διαφέρουν. Αυτό σημαίνει ότι και στην περίπτωση αυτή μπορούμε να θέσουμε ένα υψηλό κατώφλι, καθώς περιμένουμε ότι μία πιθανή επιτυχημένη συνένωση θα απέχει αρκετά από το μέσο όρο των συνενώσεων των κομματιών.

Στην περίπτωση όπου ο μέσος όρος του συνόλου των συνενώσεων είναι χαμηλός, αυτό σημαίνει ότι τα κομμάτια δε διαφέρουν πολύ μεταξύ τους σε σχέση με το περίγραμμά τους. Αυτό συνεπάγεται ότι πρόκειται για κομμάτια τα οποία παρουσιάζουν παρόμοια χρώματα στην περιοχή του περιγράμματος και ο υπολογιστής – όπως και ο άνθρωπος – δυσκολεύεται να διαχωρίσει τα δύο κομμάτια με βάση το χρώμα στην περιοχή των συνενώσεων που έχουν προκύψει με βάση το σχήμα. Επομένως, το κατώφλι θα πρέπει να είναι πιο χαλαρό ώστε να εξασφαλίσουμε ότι μία πιθανή επιτυχημένη συνένωση θα γίνει αποδεκτή. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση όπου το σύνολο των πιθανών συνενώσεων για το ζεύγος αυτό παρουσιάζει μικρή διακύμανση, γεγονός που συνεπάγεται ότι οι

συνενώσεις που προέκυψαν για το ζεύγος παρουσιάζουν παρόμοια χρωματικά χαρακτηριστικά. Και στην περίπτωση αυτή είναι σκόπιμο το κατώφλι να είναι πιο χαλαρό, καθώς είναι πιο πιθανό η επιτυχημένη συνένωση να βρίσκεται κοντά στο μέσο όρο του συνόλου.

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση αυτή, μπορούμε να προχωρήσουμε στον ορισμό ενός δυναμικού κατωφλίου, το οποίο θα προσαρμόζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν οι συνενώσεις του κάθε ζεύγους κομματιών. Στην περίπτωσή μας, χρησιμοποιήσαμε το κατώφλι που ορίζεται από τον τύπο:

$$T = \mu_{i,j} - 3,6 \cdot \sigma_{i,j} \cdot (\mu_{i,j} - \sigma_{i,j})$$
, όπου

 $\mu_{i,j}$ είναι ο μέσος όρος του συνόλου των διαφορών για το ζεύγος κομματιών (i,j), με $i\neq j$, $\sigma_{i,j}$ είναι η τυπική απόκλιση του ίδιου συνόλου.

Το κατώφλι αυτό παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά που επιθυμούμε: Όταν η τιμή του $\mu_{i,j}$ είναι σχετικά μεγάλη, ο παράγοντας που αφαιρείται από το μέσο όρο είναι μεγαλύτερος, ενώ όταν η τιμή του $\sigma_{i,j}$ είναι μικρή, το κατώφλι είναι πιο κοντά στο μέσο όρο του συνόλου. Η τιμή 3,6 προέκυψε πειραματικά. Σημειωτέον ότι η υλοποίηση αυτή του κατωφλίου βασίζεται στην θεώρηση ότι οι τιμές των μ και σ αναφέρονται σε τιμές διαφορών που προέκυψαν από εικονοστοιχεία των οποίων οι τιμές στα αντίστοιχα χρωματικά διαστήματα έχουν κανονικοποιηθεί σε κυμαίνονται από το 0 μέχρι το 1.

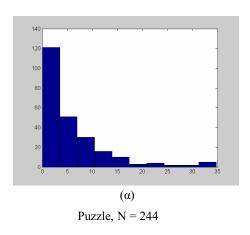
Η εφαρμογή του κατωφλίου αυτού για το κριτήριο 7, το οποίο έδινε τα καλύτερα αποτελέσματα, μας επέτρεψε να πετύχουμε ένα μέγιστο όρο απόρριψης 78,17% για την εφαρμογή του παζλ, δίνοντας έτσι μία βελτίωση της τάξης του 12,6% σε σχέση με την προηγούμενη τιμή (69,4%), η οποία είχε προκύψει χωρίς τη χρήση δυναμικού κατωφλίου. Για την εφαρμογή της Σαντορίνης, δεν είχαμε κάποια σοβαρή βελτίωση στις τιμές των ποσοστών απόρριψης (59%) και επιτυχίας (94,23%), λόγω της κακής κατάστασης των κομματιών.

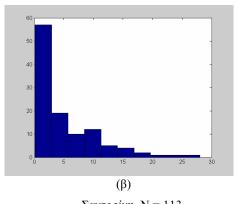
A.IV.4. Εφαρμογή του αλγορίθμου απόρριψης συνενώσεων με βάση το θεματικό περιεχόμενο

Για την εφαρμογή του κριτηρίου απόρριψης ανεπιτυχών συνενώσεων χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα που εξήχθησαν με τη διαδικασία που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο Α.ΙΙΙ. Για κάθε επιτυχημένη συνένωση εξετάστηκε η παρουσία λωρίδων κοντά στην περιοχή της συνένωσης, καθώς και η κλίση των λωρίδων αυτών, όπου αυτές βρέθηκαν. Για τον υπολογισμό της κλίσης χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι: α) προσέγγιση του συνόλου των σημείων της λωρίδας με τη βέλτιστη ευθεία κατά την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων (LS) και υπολογισμός της κλίσης της ευθείας αυτής και β) προσέγγιση του συνόλου των σημείων με πολυώνυμο τρίτου βαθμού (πάλι με την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων) και υπολογισμός της κλίσης του πολυωνύμου στο άκρο που βρίσκεται κοντινότερα στην άκρη του περιγράμματος. Ο λόγος για τους δύο τύπους υπολογισμών είναι απλός: Εάν το θεματικό στοιχείο παρουσιάζει μικρή καμπυλότητα, η LS ευθεία θα μας δώσει μια καλή εκτίμηση της κλίσης του στοιχείου αυτού. Εάν το θεματικό στοιχείο παρουσιάζει μεγάλη καμπυλότητα, η κλίση του πολυωνύμου στην άκρη του στοιχείου θα μας δώσει μια εκτίμηση της κλίσης στο σημείο ταιριάσματος, που είναι και το σημείο που μας ενδιαφέρει. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η LS ευθεία υπολογίστηκε αναλυτικά, ενώ το αντίστοιγο πολυώνυμο υπολογίστηκε με γρήση της κατάλληλης εντολής του MATLAB.

Το δύσκολο μέρος της διαδικασίας είναι η εύρεση των αντίστοιχων θεματικών στοιχείων για κάθε επιτυχημένη συνένωση. Ο λόγος για την δυσκολία είναι ο εξής: ο αλγόριθμος εύρεσης συνενώσεων με βάση το σχήμα δεν δίνει πάντοτε το βέλτιστο ταίριασμα των δύο κομματιών. Σε πολλές περιπτώσεις το ευρεθέν σημείο ταιριάσματος απείχε αρκετά εικονοστοιχεία από το βέλτιστο. Έτσι, στις περιπτώσεις αυτές είναι δύσκολο να βρεθεί η ακριβής αντιστοιχία μεταξύ των θεματικών στοιχείων, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν περισσότερα από ένα στοιχεία στην ίδια συνένωση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα σε αρκετές περιπτώσεις το πρόγραμμα να μη βρει το θεματικό στοιχείο του περιστρεφόμενου κομματιού που όντως αντιστοιχεί στο σταθερό κομμάτι, αλλά βρέθηκε ως αντίστοιχο περιστρεφόμενο κάποιο άλλο στοιχείο, το οποίο βρίσκονταν κοντά στο σωστό. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις, ενώ υπάρχουν στα κομμάτια θεματικά στοιχεία τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση της γωνίας ταιριάσματος, αυτά τα στοιχεία δεν περιλαμβάνονται στις αλυσίδες που βρέθηκαν να ταιριάζουν σχηματικά.

Για κάθε επιτυχημένη συνένωση, εξετάστηκαν οι κλίσεις των λωρίδων των θεματικών στοιχείων που είχαν τουλάχιστον μια άκρη πάνω στην άκρη των περιγραμμάτων και των δύο κομματιών. Συνολικά, προέκυψαν 244 αντιστοιχίες θεματικών στοιχείων για το παζλ και 113 για τα κομμάτια της Σαντορίνης. Για να αποκτήσουμε μια αίσθηση της συμπεριφοράς των διαφορών των γωνιών των θεματικών στοιχείων, για κάθε συνένωση βρήκαμε τη μικρότερη διαφορά ανάμεσα στις δύο κλίσεις που αντιστοιχούν στο θεματικό στοιχείο του σταθερού κομματιού (την LS ευθεία και το spline) και στις δύο κλίσεις που αντιστοιχούν στο θεματικό στοιχείο του περιστρεφόμενου κομματιού. Τα ιστογράμματα του Σχήματος Α.33 προέκυψαν από τα τελικά δεδομένα των δύο εφαρμογών:





Σαντορίνη, Ν = 113

Σχήμα Α.33. Ιστογράμματα των διαφορών των κλίσεων των ορίων των θεματικών στοιχείων για το παζλ (α) και τη Σαντορίνη (β).

Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα, η συντριπτική πλειοψηφία των στοιχείων και των δύο εφαρμογών παρουσιάζει ελάχιστη διαφορά στις κλίσεις μικρότερη από τις 17.5 μοίρες περίπου.

Υπενθυμίζουμε ότι οι διαφορές που απεικονίζονται στα δύο διαγράμματα δεν βρέθηκαν όλες από το σύστημα και πολλές από αυτές σημειώθηκαν με εποπτεία από το χρήστη. Και στις δύο εφαρμογές μόνο ένα 40% των στοιχείων που ταιριάζουν βρέθηκε αυτόματα από το πρόγραμμα, είτε επειδή τα εν λόγω στοιχεία δεν περιλαμβάνονταν στις αλυσίδες σύγκρισης, είτε επειδή υπήρχαν περισσότερα από ένα στοιχεία του περιστρεφόμενου κομματιού που συνέπιπταν με κάποιο στοιχείο του σταθερού κομματιού (ή αντίστροφα). Λόγω της φύσεως των εφαρμογών και της έλλειψης απόλυτης ακρίβειας του προγράμματος ταιριάσματος με βάση το περίγραμμα, αυτά τα δύο θέματα, δε μπορούν να επιλυθούν ολοκληρωτικά με τελείως αυτοματοποιημένο τρόπο. Παρόλα αυτά, τα

θεματικά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν με κάποιο αυτοματοποιημένο τρόπο για την απόρριψη ανεπιτυχών συνενώσεων. Επίσης, πολλά (περίπου τα μισά) από τα ταιριάσματα των θεματικών στοιχείων των κομματιών της Σαντορίνης έγιναν με χρήση των «κιτρινάδων», δηλαδή των κίτρινων σημαδιών που είχαν βάλει οι συντηρητές για να προσδιορίσουν κομμάτια που ταιριάζουν μεταξύ τους. Χωρίς αυτές τις κιτρινάδες, ο αριθμός των διαθέσιμων θεματικών στοιχείων που υπάρχουν ανάμεσα στα κομμάτια και μπορούν να χρησιμοποιηθούν πέφτει δραματικά.

Όσον αφορά το θεματικό κριτήριο, τα προβλήματα που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους κάνουν τον αυτοματοποιημένο έλεγχο των κλίσεων και της αντιστοιχίας σύμπτωσης των θεματικών στοιχείων σχεδόν αδύνατο να υλοποιηθεί χωρίς σοβαρά προβλήματα αξιοπιστίας. Για αυτό το λόγο, υιοθετήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση: Για κάθε συνένωση, ελέγζαμε μόνο για την παρουσία ή την απουσία θεματικών στοιχείων στην αλυσίδα υπό εξέταση. Εάν και στις δύο αλυσίδες περιλαμβάνονται θεματικά στοιχεία σε οποιαδήποτε θέση ή απουσιάζουν θεματικά στοιχεία και από τις δύο, τότε η συνένωση γίνεται δεκτή. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγουμε το πρόβλημα της αντιστοίχισης των θεματικών στοιχείων και ιδιαίτερα των περιπτώσεων που υπάρχουν πάνω από ένα στοιχεία σε μικρή μεταξύ τους απόσταση, καθώς η σωστή αντιστοίχιση των στοιχείων θα ήταν εξαιρετικά αναξιόπιστη, ιδιαίτερα αν λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι το πρόγραμμα ταιριάσματος περιγραμμάτων δε δίνει πάντοτε το βέλτιστο ταίριασμα αλλά δίνει πολλές φορές ταιριάσματα σε σημεία τα οποία απέχουν από το βέλτιστο αρκετά εικονοστοιγεία (μέγρι και 10 εικονοστοιγεία ανάλογα με την εφαρμογή). Σημειωτέον ότι για να αυξήσουμε την αξιοπιστία της εφαρμογής, για το θεματικό κριτήριο δόθηκε και ένα περιθώριο μερικών εικονοστοιχείων εκατέρωθεν των άκρων των αλυσίδων (4 για το παζλ, 10 για τη Σαντορίνη), μέσα στο οποίο ελέγγουμε για την παρουσία θεματικών στοιχείων. Με αυτό τον τρόπο αυξήθηκε αισθητά η αξιοπιστία της εφαρμογής αυτού του κριτηρίου.

Η μεμονωμένη εφαρμογή του θεματικού κριτηρίου μας δίνει ποσοστά απόρριψης της τάξεως του 50% και στις δύο εφαρμογές, με ποσοστά επιτυχίας πάνω από 97%. Όπως και στην περίπτωση της εφαρμογής του χρωματικού κριτηρίου, η τιμή αυτή είναι ενδεικτική και θα πρέπει τελικά να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του συνδυασμού και των δύο κριτηρίων για να διαπιστώσουμε την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Α.ΙV.5. Εφαρμογή των σχετικών κριτηρίων για την απόρριψη των ανεπιτυχών συνενώσεων

Εφόσον, πλέον, διαπιστώσαμε την αποτελεσματικότητα των επιμέρους αλγορίθμων, μπορούμε να προχωρήσουμε στην εφαρμογή του συνδυασμού των αλγορίθμων αυτών στο σύνολο των συνενώσεων των δύο εφαρμογών για να διαπιστώσουμε τη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Όπως παρατηρήσαμε στην Παράγραφο Α.ΙV.ΙΙ, μόνο ένα περιορισμένο πλήθος κριτηρίων απόρριψης με βάση το χρωματικό περιεχόμενο έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα και στις δύο εφαρμογές. Αυτά ήταν τα κριτήρια με αύξοντα αριθμό 1, 2, 7 και 8. Τα περισσότερα από τα υπόλοιπα κριτήρια έδωσαν ικανοποιητικά (και, σε ορισμένες περιπτώσεις, καλύτερα) αποτελέσματα στην εφαρμογή του παζλ, αλλά δε συμπεριφέρθηκαν το ίδιο καλά στην εφαρμογή της Σαντορίνης. Επομένως, θα παρουσιάσουμε μόνο τα αποτελέσματα που σχετίζονται με τα κριτήρια που φάνηκαν να αποδίδουν ικανοποιητικά και στις δύο εφαρμογές.

Προχωρούμε τώρα στην ανάλυση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του συνδυασμού των κριτηρίων στις δύο εφαρμογές. Τα κριτήρια εφαρμόστηκαν και στις δύο εφαρμογές σε δύο συνδυασμούς: Πρώτα το χρωματικό και μετά το θεματικό και αντίστροφα. Λόγω της φύσεως του χρωματικού κριτηρίου, η σειρά με την οποία εφαρμόζονται τα κριτήρια παίζει ρόλο στα αποτελέσματα. Όπως αναλύθηκε και στις προηγούμενες Παραγράφους, το χρωματικό κριτήριο βασίζεται στην απόρριψη των συνενώσεων στις οποίες τα κομμάτια ταιριάζουν χρωματικά λιγότερο από ένα κατώφλι, το οποίο προσδιορίζεται για κάθε ζεύγος κομματιών με βάση το σύνολο των συνενώσεων που προέκυψαν για το ζεύγος αυτό. Εάν εφαρμοστεί πρώτα το θεματικό κριτήριο, τότε απομένουν λιγότερες πιθανές συνενώσεις για την εξαγωγή των στατιστικών στοιχείων που είναι απαραίτητα για το χρωματικό κριτήριο. Στην περίπτωση αυτή είναι πιθανό να αλλάξει και η τιμή του κατωφλίου, καθώς πολλές από τις συνενώσεις που απορρίφθηκαν μπορεί να αντιστοιχούν σε συνενώσεις στις οποίες τα κομμάτια ταιριάζουν περισσότερο ή λιγότερο από χρωματική άποψη. Για αυτό το λόγο, έγιναν δοκιμές και με τους δύο συνδυασμούς των κριτηρίων.

Όπως και προηγουμένως, σε κάθε περίπτωση έχουμε να λάβουμε υπόψη δύο τελικά ποσοτικά αποτελέσματα: το μέσο ποσοστό απόρριψης των ανεπιτυχών συνενώσεων και το μέσο ποσοστό σωστών δεκτών αποτελεσμάτων. Προφανώς, όσο αυστηρότερο είναι το κριτήριο απόρριψης, τόσο πιθανότερο είναι τελικά να απορριφθούν και κάποιες σωστές

συνενώσεις. Το βέλτιστο είναι βεβαίως να είναι και τα δύο ποσοστά όσο το δυνατόν υψηλότερα, όμως η βαρύτητα που θα έχει το κάθε ένα από τα δύο μάλλον εξαρτάται τελικά από το χρήστη, καθώς τα δύο κριτήρια έχουν διαφορετική επίδραση στο τελικό χρόνο που θα χρειαστεί ο χρήστης για την πλήρη ανακατασκευή του θραυσμένου αντικειμένου.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το κάθε κριτήριο απόδοσης των χρωματικών διαφορών σε συνδυασμό με το θεματικό κριτήριο φαίνονται στους Πίνακες Α. V και Α. VI. Για κάθε εφαρμογή φαίνονται τα αποτελέσματα για τα διαφορετικά κριτήρια για τις τιμές των P και Q που βρέθηκαν να δίνουν βέλτιστα αποτελέσματα όταν το χρωματικό κριτήριο εφαρμόστηκε μεμονωμένα. Όσον αφορά στις τιμές της παραμέτρου α, αυτές αφορούν τις περιπτώσεις όλων κριτηρίων πλην του κριτηρίου 7 και παρατίθενται για λόγους σύγκρισης. Για την περίπτωση που εφαρμόστηκε πρώτα το χρωματικό και μετά το θεματικό κριτήριο χρησιμοποιήθηκε η τιμή που αναγράφηκε στον Πίνακα Α.ΙΙΙ, ενώ στην περίπτωση που εφαρμόστηκε πρώτα το θεματικό και ύστερα το χρωματικό κριτήριο, έγινε εκ νέου διερεύνηση για τον εντοπισμό της αντίστοιχης βέλτιστης τιμής

Πίνακας Α. V. Εφαρμογή του συνδυασμού των κριτηρίων για την εφαρμογή του παζλ.

Κριτήριο	Χρωματ	τικό - Θεματικό	Θεματικό - Χρωματικό		
	α / PQ	2,4 / 3	α / PQ	4,9 / 3	
Κριτήριο 1	% απόρριψης	78,31	% απόρριψης	74,95	
	% επιτυχίας	98.87	% επιτυχίας	98.87	
	α / PQ	2,6 / 3	α / PQ	2,6 / 3	
Κριτήριο 2	% απόρριψης	76.41	% απόρριψης	77.17	
	% επιτυχίας	98.87	% επιτυχίας	97.75	
Κριτήριο 7	α / PQ	-/3	α / PQ	-/3	
	% απόρριψης	86.90	% απόρριψης	79.36	
	% επιτυχίας	98.87	% επιτυχίας	98,87	
	α / PQ	2,3 / 3	α / PQ	2,4 / 3	
Κριτήριο 8	% απόρριψης	77,60	% απόρριψης	77,49	
	% επιτυχίας	97,75	% επιτυχίας	97,75	

Πίνακας Α. VI. Εφαρμογή του συνδυασμού των κριτηρίων για την εφαρμογή της

Σαντορίνης.

Κριτήριο	Χρωματ	τικό - Θεματικό	Θεματικό - Χρωματικό		
	α/PQ	3,8 / 13	α/PQ	3,7 / 13	
Κριτήριο 1	% απόρριψης	73,08	% απόρριψης	75,68	
	% επιτυχίας	94,23	% επιτυχίας	90,38	
	α/PQ	2,2 / 15	α/PQ	5,3 / 15	
Κριτήριο 2	% απόρριψης	75,16	% απόρριψης	71,31	
	% επιτυχίας	94,23	% επιτυχίας	94,23	
	α/PQ	- / 15	α/PQ	-/13	
Κριτήριο 7	% απόρριψης	75,31	% απόρριψης	78,48	
	% επιτυχίας	94,23	% επιτυχίας	88,46	
	α/PQ	2,4 / 13	α/PQ	4 / 13	
Κριτήριο 8	% απόρριψης	74,13	% απόρριψης	72,64	
	% επιτυχίας	94,23	% επιτυχίας	94,23	

Γενικά, παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Α) Σε γενικό επίπεδο τα αποτελέσματα του παζλ ήταν καλύτερα από αυτά της Σαντορίνης, γεγονός αναμενόμενο αν λάβουμε υπόψη τη φθορά που έχουν υποστεί τα κομμάτια της Σαντορίνης.
- Β) Σε αμφότερες τις δύο εφαρμογές καλύτερα αποτελέσματα όταν εφαρμόσαμε πρώτα το χρωματικό και στη συνέχεια το θεματικό κριτήριο. Ο λόγος για αυτό το φαινόμενο έγκειται στο γεγονός ότι το χρωματικό κριτήριο βασίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά του πλήθους των διαφορών που προέκυψαν για κάθε κομμάτι. Το θεματικό κριτήριο αποκλείει πολλές από τις συνενώσεις αυτές με βάση την παρουσία ή όχι θεματικών στοιχείων, οπότε τα στατιστικά χαρακτηριστικά αυτά αλλοιώνονται με τρόπο απρόβλεπτο. Για το λόγο αυτό, είναι πιο αξιόπιστο να εφαρμόζεται πρώτα το χρωματικό κριτήριο, οπότε ο αλγόριθμος έχει στη διάθεσή του περισσότερα δείγματα για τον σχηματισμό των απαραιτήτων ποσοτήτων που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του κατωφλίου απόρριψης των ανεπιτυχών συνενώσεων.
- Γ) Εξετάζοντας τους Πίνακες Α.Ι, Α.ΙΙΙ, Α.ΙV και Α.V, παρατηρούμε ότι το χρωματικό κριτήριο που δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα και στις δύο εφαρμογές είναι το κριτήριο 7, δηλαδή απόρριψη των συνενώσεων με βάση το μέσο όρο των απολύτων διαφορών των

αλυσίδων στο χρωματικό χώρο YCbCr. Συγκεκριμένα, με ταυτόχρονη χρήση του κριτηρίου απόρριψης με βάση το θεματικό περιεχόμενο, παρατηρούμε ότι έχουμε ποσοστά απόρριψης της τάξης του 75-86% (ανάλογα με την εφαρμογή), με αντίστοιχα ποσοστά αποδοχής σωστών συνενώσεων της τάξης του 95% και άνω. Επομένως, η εφαρμογή του συνδυασμού αυτού των κριτηρίων βελτιώνει σε πολύ μεγάλο βαθμό την απόδοση του αρχικού αλγορίθμου ταιριάσματος με βάση το σχήμα των κομματιών και οδηγεί σε μία πολύ πιο αποτελεσματική υλοποίηση του ολοκληρωμένου συστήματος.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

<u>Κεφάλαιο Α.V.: Σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλες</u> εφαρμογές χρωματικών κριτηρίων για παζλ.

Α. V.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγόριθμου χρωματικού ταιριάσματος που παρουσιάζεται στη δημοσίευση: "A shape and image merging technique to solve jigsaw puzzles", των Feng-Hui Yao, Gui-Feng Shao, που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Pattern Recognition Letters 24 (2003) 1819–1835, της Elsevier. Η συγκεκριμένη δημοσίευση παρουσιάζει έναν αλγόριθμο ανακατασκευής παζλ, ο οποίος, εκτός από πληροφορίες για το σχήμα των κομματιών, χρησιμοποιεί και στοιχεία για το χρωματικό περιεχόμενο των κομματιών κοντά στην ακμή του κάθε κομματιού για να εξασφαλίσει μεγαλύτερη πιθανότητα σωστών συνενώσεων. Θα παρουσιάσουμε σύντομα το μέρος του αλγορίθμου που αφορά το χρωματικό ταίριασμα και θα δούμε πώς τα αποτελέσματα εφαρμογής του εν λόγω αλγορίθμου συγκρίνονται με αυτά που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Σημειωτέον ότι ο αλγόριθμος αυτός δε χρησιμοποιεί καθόλου το θεματικό περιεχόμενο των κομματιών για την απόρριψη πιθανών συνενώσεων.

Στον αλγόριθμο της εν λόγω δημοσίευσης, για κάθε κομμάτι εξήχθησαν τα εικονοστοιχεία που ανήκουν σε μια λωρίδα πάχους 20 εικονοστοιχείων και μήκους όσο το μήκος της ακμής στην οποία τα εικονοστοιχεία αυτά πρόσκεινται. Η λωρίδα αυτή δεν είναι ακριβώς πάνω στο περίγραμμα, αλλά απέχει μια απόσταση περίπου 10 εικονοστοιχείων από την άκρη του περιγράμματος, για να αποφευχθεί η παρουσία θορύβου από τη διαδικασία ψηφιοποίησης των εικόνων των κομματιών. Στη συνέχεια, κάθε τέτοια λωρίδα κατατμήθηκε σε τμήματα πλάτους 10 εικονοστοιχείων, τα οποία δεν επικαλύπτονται μεταξύ τους (αν και στο συγκεκριμένο σημείο δεν είναι φοβερά σαφής η διατύπωση του κειμένου).

Οι συγγραφείς της εν λόγω δημοσίευσης βασίζονται σε μία μεθοδολογία που είχε δημιουργήσει ο Ν. Otsu (1980) για την ποσοτικοποίηση του «ταιριάσματος» δύο περιοχών μίας εικόνας με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους. Συγκεκριμένα, για κάθε ζεύγος αντιστοίχων λωρίδων δύο πιθανώς ταιριασμένων κομματιών, υπολογίζεται η ποσότητα η, που ονομάζεται "separability", η οποία μας δείχνει κατά πόσο αυτά τα δύο τμήματα

αποτελούν ή όχι διαφορετικά μέρη της ίδιας εικόνας (μετά από τη συνένωση τους). Η ποσότητα η ορίζεται ως εξής:

$$\eta = \sum_{f=1}^{\xi} \sigma_f^2 / \sum_{f=1}^{\xi} \sigma_{Tf}^2$$

$$\sigma_f^2 = n_1 (\overline{P}_{1f} - \overline{P}_{mf}) + n_2 (\overline{P}_{2f} - \overline{P}_{mf})$$

$$\sigma_{Tf}^2 = \sum_{i=1}^{n} (P_{if} - \overline{P}_{mf})$$

Επεξήγηση των ποσοτήτων:

 ξ είναι το πλήθος των χρωματικών συνιστωσών της εικόνας (π.χ. 3 για αναπαράσταση σε RGB)

 $\overline{P}_{\rm lf}$, $\overline{P}_{\rm lf}$, και $\overline{P}_{\rm mf}$ είναι η μέση τιμή της χρωματικής συνιστώσας f στο τμήμα 1, στο τμήμα 2 και στο συγχωνευμένο τμήμα, αντίστοιχα (όπου, στην περίπτωσή μας, τμήμα 1 είναι το σταθερό και τμήμα 2 το περιστρεφόμενο),

 n_1 και n_2 είναι το πλήθος των εικονοστοιχείων στο κάθε τμήμα αντίστοιχα,

 σ_{T}^2 είναι η διασπορά της χρωματικής συνιστώσας f.

Η τιμή της ποσότητας η βρίσκεται στο διάστημα (0,1], ενώ μπορούμε να ορίσουμε και μια ποσότητα $\rho=1-\eta$, η οποία μας δείχνει κατά πόσο τα δύο τμήματα 1 και 2 σχηματίζουν μέρη του ιδίου τμήματος μετά από τη συνένωση, δηλαδή κατά πόσο ταιριάζουν χρωματικά. Όσο πιο κοντά στο 1 βρίσκεται η τιμή του ρ , τόσο πιο πιθανό είναι τα δύο τμήματα των λωρίδων αυτών να ταιριάζουν.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η λωρίδα που αντιστοιχεί σε κάθε ακμή χωρίζεται σε τμήματα. Το πλήθος των τμημάτων εξαρτάται από το μήκος της λωρίδας και το πλάτος που έχουμε επιλέξει για το κάθε τμήμα (στην περίπτωση της δημοσίευσης 10). Αν υποθέσουμε ότι έχουν προκύψει ζ τέτοια τμήματα για το ζεύγος των δύο λωρίδων, τότε ο συνολικός βαθμός ταιριάσματος των δύο λωρίδων είναι: $\overline{\rho} = \frac{1}{\zeta} \sum_{i=0}^{\zeta-1} \rho_i$, δηλαδή ο μέσος όρος ταιριάσματος μεταξύ όλων των τμημάτων στα οποία χωρίστηκαν οι δύο λωρίδες.

Α.V.2. Υλοποίηση του αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος που αναφέρθηκε υλοποιήθηκε για τις δύο εφαρμογές της περίπτωσης μας. Τα προγράμματα που υπήρχαν διαθέσιμα τροποποιήθηκαν κατάλληλα έτσι ώστε να γίνουν οι κατάλληλοι υπολογισμοί και να υπολογιστεί πλέον η ποσότητα p που μας δίνει το κατά πόσο οι δύο αλυσίδες σύγκρισης ταιριάζουν χρωματικά. Το θεματικό κριτήριο δεν εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση, ώστε να γίνει πιο σαφής η βελτίωση που προσφέρει στα συνολικά αποτελέσματα του αλγορίθμου.

Στην περίπτωση των δυο εφαρμογών μας, δεν υλοποιήθηκε το μέρος του αλγόριθμου που εξάγει τη λωρίδα μέσα σε ένα περιθώριο 10 εικονοστοιχείων από την ακμή. Ο λόγος για αυτό είναι ότι το μέγεθος των κομματιών του παζλ δεν επιτρέπει τέτοια μετατόπιση, καθώς είναι ήδη πολύ μικρά και τέτοια μετατόπιση θα μας έδινε εσφαλμένο χρωματικό προφίλ.

Για να μπορέσουμε να δοκιμάσουμε την απόδοση του αλγορίθμου χωρίς τον προβληματισμό για τις σταθερές που επιλέχθηκαν, ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε για διαφορετικά μεγέθη τμημάτων. Πλέον τα τμήματα ήταν τετράγωνα σε μέγεθος (μεγέθους PxQ, με P=Q) και όχι παραλληλόγραμμα όπως στην εφαρμογή της δημοσίευσης. Το μήκος της εκάστοτε λωρίδας της δημοσίευσης εξισώθηκε με το μήκος των αλυσίδων που είχαμε στην περίπτωση μας. Κάθε λωρίδα κατατμήθηκε στα σχετικά τμήματα, ενώ το πλήθος των τμημάτων που αντιστοιχούν σε κάθε λωρίδα εξαρτάται, προφανώς, από το μέγεθος του εκάστοτε τμήματος. Στη συνέχεια, για κάθε πιθανή συνένωση υπολογίστηκε η ποσότητα $\overline{\rho}$, η οποία αποθηκεύτηκε για την εφαρμογή των κριτηρίων απόρριψης.

Αφού αποθηκεύτηκαν τα σχετικά αποτελέσματα, εφαρμόστηκαν τα σχετικά κριτήρια με τρόπο παρόμοιο με τις προηγούμενες εφαρμογές. Σε αυτή την περίπτωση, ορίσαμε ένα κατώφλι για την ποσότητα $\overline{\rho}$, το οποίο σηματοδοτεί εάν μια συνένωση γίνεται δεκτή ή όχι με βάση τη συνδεσιμότητα των αλυσίδων της. Έγιναν σχετικές δοκιμές τόσο για την αναπαράσταση RGB και για την αναπαράσταση HSV. Όπως και προηγουμένως, αφού βρέθηκε ο συνδυασμός PQ που μας δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, στη συνέχεια έγινε περαιτέρω διερεύνηση για να βρεθεί η τιμή του κατωφλίου, το οποίο θα ονομάσουμε t, για την οποία παίρνουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες Α.VII και Α.VIII:

Πίνακας Α. VII. Αποτελέσματα εφαρμογής του κριτηρίου συγχώνευσης εικόνων για το

παζλ.

PQ		3	5	7	9	11	13	
RGBCOMP	t	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
	% απόρριψης	79,79	84,32	76,15	69,15	61,80	55,90	
	% επιτυχίας	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
HSVCOMP	t	0,6	0,7	0,7	0,75	0,75	13	
	% απόρριψης	63,67	72,63	65,58	71,45	66,60	50,24	
	% επιτυχίας	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Πίνακας Α. VIII. Αποτελέσματα της εφαρμογής του κριτηρίου συγχώνευσης εικόνων για

τα κομμάτια της Σαντορίνης.

PQ		9	11	13	15	17	
	t	0,6	0,6	0,6	0,6	0,65	
RGBCOMP	% απόρριψης	40,11	39,83	39,60	39,33	45,83	
	% επιτυχίας	94,23	96,15	98,07	98,07	94,23	
	t	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
HSVCOMP	% απόρριψης	41,95	41,35	40,97	39,41	38,14	
	% επιτυχίας	92,30	92,30	90,38	92,30	94,23	

Μετά από μελέτη των αποτελεσμάτων, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

Α) Το κριτήριο που παρουσιάστηκε στη δημοσίευση που αναφέρθηκε προηγουμένως έδωσε εξαιρετικά αποτελέσματα στην περίπτωση του παζλ: Για την αναπαράσταση RGB, το ποσοστό απόρριψης ήταν 84,32%, με ποσοστό σωστών αποτελεσμάτων 100%, με PQ = 5. Η τιμή του t που μας έδωσε βέλτιστα αποτελέσματα ήταν το 0,6. Για την αναπαράσταση σε HSV, είχαμε επίσης υψηλό ποσοστό αποδοχής σωστών συνενώσεων (100%), αλλά με χαμηλότερο ποσοστό απόρριψης (72,6%), με βέλτιστη τιμή για το t ίση με 0,7.

B) Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη Σαντορίνη ήταν αρκετά κατώτερα από ότι στο puzzle. Με τιμή 0,6 για το thresh στην RGB αναπαράσταση, είχαμε ποσοστό απόρριψης 39,60% με ποσοστό σωστών συνενώσεων 98,07%. Από εκεί και πέρα όμως το ποσοστό σωστών συνενώσεων πέφτει ραγδαία, χωρίς σοβαρή αύξηση του ποσοστού απόρριψης. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την αναπαράσταση σε HSV είναι σχετικά χειρότερα, καθώς

έχουμε παρόμοια ποσοστά απόρριψης με αισθητά χαμηλότερα ποσοστά αποδοχής επιτυχών συνενώσεων.

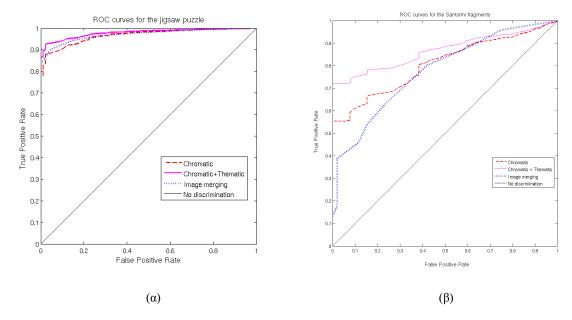
Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι ενώ στο παζλ είχαμε πολύ καλά αποτελέσματα, στην περίπτωση της Σαντορίνης τα αποτελέσματα ήταν μάλλον μέτρια. Ο λόγος για αυτή τη διαφορά είναι κατά πάσα πιθανότητα η φθορά που υπάρχει στα κομμάτια της Σαντορίνης, η οποία επηρεάζει πολύ το σχετικά ευαίσθητο κριτήριο που παρουσιάζεται στη δημοσίευση των Υαο και Shao. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα ευρήματα των εν λόγω ερευνητών, οι οποίοι αναφέρουν ότι στην περίπτωση που η εικόνα του παζλ είναι μια φυσική φωτογραφία, τα αποτελέσματα του αλγορίθμου είναι λανθασμένα. Επίσης, αναφέρουν ότι για να αποδώσει καλά ο αλγόριθμος πρέπει οι φωτογραφίες να είναι υψηλής ανάλυσης (από 600 dpi και άνω). Στην περίπτωση των κριτηρίων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, όμως, δεν είχαμε κανένα περιορισμό στον τύπο της εικόνας (η εικόνα θα μπορούσε κάλλιστα να είναι μια κοινή φωτογραφία), ενώ η ανάλυση των κομματιών ήταν αρκετά χαμηλή (150 dpi), γεγονός που προσδίδει ακόμα μεγαλύτερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα μας.

Ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των σχετικών δοκιμών είναι ότι ο αλγόριθμος συγχώνευσης εικόνας που δοκιμάστηκε είναι εξαιρετικά ευαίσθητος στην επιλογή του κατωφλίου για την ποσότητα . Συγκεκριμένα, μία μεταβολή της τάξεως του 5% στην τιμή του κατωφλίου έχει συχνά ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση / αύξηση του ποσοστού απόρριψης κατά 8-10%, με ταυτόχρονη αύξηση / μείωση του ποσοστού σωστών συνενώσεων που έγιναν τελικά αποδεκτές. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η επιλογή του κατωφλίου θα πρέπει να είναι πολύ προσεκτική, καθώς μία μικρή διαφοροποίηση από την βέλτιστη τιμή μπορεί να επηρεάσει αισθητά την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Καθώς σε μία ρεαλιστική εφαρμογή είναι πιθανό να εφαρμοστούν, σε αρχικό επίπεδο τουλάχιστον, πιο συντηρητικές εκτιμήσεις για την τιμή του κατωφλίου, είναι λογικό να περιμένει κανείς ότι στην πράξη τα αποτελέσματα του αλγορίθμου αυτού μπορεί να μην είναι τόσο καλά όσο θα περιμέναμε.

Η ευαισθησία του αλγορίθμου αυτού στην επιλογή της τιμής του κατωφλίου γίνεται ακόμα πιο σαφής εάν συγκρίνουμε τα γραφήματα ROC (Receiver operating characteristic) που προκύπτουν από τις εφαρμογές του αλγορίθμου συγχώνευσης εικόνας και του προτεινόμενου αλγορίθμου με χρήση του θεματικού περιεχομένου για διαφορετικά κατώφλια. Τα γραφήματα αυτά, τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά στις ιατρικές μελέτες αποτελεσματικότητας διαγνωστικών μεθόδων, μας δείχνουν τη σχέση ανάμεσα στα ποσοστό ορθής απόρριψης συνενώσεων και το ποσοστό λανθασμένης απόρριψης

συνενώσεων (δηλαδή το ποσοστό των συνενώσεων που έπρεπε να γίνουν δεκτές αλλά απερρίφθησαν) πάνω σε ένα σύστημα αξόνων, όπου η τετμημένη (x) αντιστοιχεί στο πρώτο ενώ η τεταγμένη (y) αντιστοιχεί στο δεύτερο, αντίστοιχα. Στην ιδανική περίπτωση, θέλουμε το ποσοστό σωστών απορρίψεων συνενώσεων (True Positive Rate) να είναι κοντά στο 1 (που αντιστοιχεί στο 100%), ενώ αντίστοιχα το ποσοστό λανθασμένων απορρίψεων συνενώσεων (δηλαδή η απόρριψη σωστών συνενώσεων – False Positive Rate) να είναι κοντά στο 0. Ο συνδυασμός των δύο απαιτήσεων αντιστοιχεί στην πάνω αριστερά γωνία του γραφήματος (δηλαδή στο σημείο (0,1)). Το εγγύτερο σημείο του γραφήματος στο σημείο (0,1) αντιστοιχεί στα βέλτιστα αποτελέσματα που μπορούμε να επιτύχουμε με την επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου. Επειδή όμως η επιλογή του κατωφλίου δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων και εξαρτάται από την εφαρμογή, διεξάγουμε τις ίδιες δοκιμές για διάφορα κατώφλια και εξετάζουμε τη συμπεριφορά των γραφημάτων.

Σύμφωνα με τη σχετική θεωρία (Fawcett, 2004), το γράφημα που περικλείει το μεγαλύτερο εμβαδόν ανάμεσα στη γραμμή x=0, x=1 και τον άξονα x'x αντιστοιχεί και στο σύστημα που είναι πιο εύρωστο όσον αφορά την επιλογή κατωφλίου. Παρατηρώντας το Σχήμα $A.34(\alpha)$, βλέπουμε ότι η εφαρμογή της τεχνικής συγχώνευσης εικόνας υπερέχει ελαφρώς του προτεινόμενου χρωματικού μας κριτηρίου αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματική από το συνδυασμό θεματικού και χρωματικού κριτηρίου που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή. Στην περίπτωση των κομματιών της Σαντορίνης (Σχήμα $A.34(\beta)$), όπου η φθορά των κομματιών είναι καθοριστικός παράγοντας, βλέπουμε πώς τόσο το χρωματικό μας κριτήριο από μόνο του όσο και ο συνδυασμός χρωματικού και θεματικού κριτηρίου παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από τον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε από τους Υαο και Shao.



Σχήμα Α.34. Γραφήματα ROC για τους αλγόριθμους απόρριψης συνενώσεων με βάση το χρωματικό περιεχόμενο (κόκκινο), το χρωματικό και θεματικό περιεχόμενο (μοβ) και με χρήση του αλγόριθμου συγχώνευσης εικόνας (μπλε) για το παζλ (α) και τη Σαντορίνη (β). Ξεκινώντας από αριστερά, οι τιμές του κατωφλίου γίνονται πιο αυστηρές.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι η εφαρμογή της τεχνικής συγχώνευσης εικόνας που παρουσιάστηκε στην εργασία των Υαο και Shao δεν περιορίζει σημαντικά το πλήθος των πιθανών συνενώσεων που θα χρειαστεί να εξεταστούν τελικά από το χρήστη. Ακόμα, όμως, και αν συνδυάσουμε το κριτήριο συγχώνευσης εικόνων με το θεματικό κριτήριο που παρουσιάστηκε προηγουμένως, έχουμε 5-7% χαμηλότερο ποσοστό απόρριψης για το ίδιο ποσοστό επιτυχίας με αυτό που επετεύχθη με τη χρήση του κριτηρίου 7 που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη Παράγραφο.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή του εν λόγω αλγορίθμου μπορεί να μην ενδείκνυται σε ρεαλιστικές περιπτώσεις, καθώς τα αποτελέσματα του εξαρτώνται έντονα από το περιεχόμενο του αντικειμένου που ανακατασκευάζεται και από την κατάσταση των κομματιών που το αποτελούν.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Κεφάλαιο Α. VI.: Γενικά Συμπεράσματα

Στο πρώτο μέρος της διδακτορικής αυτής διατριβής παρουσιάστηκε ένα σύστημα ανακατασκευής θραυσμένων αντικειμένων δύο διαστάσεων με βάση το χρωματικό και το θεματικό περιεχόμενό τους. Οι αλγόριθμοι που υλοποιήθηκαν συνδυάστηκαν με το μέρος του συστήματος που εξάγει τις πιθανές συνενώσεις των κομματιών του θραυσμένου αντικειμένου με βάση το σχήμα (Papaodysseus κ.α., 2002). Στη συνέχεια, για να διαπιστωθεί η λειτουργικότητα και η ακρίβεια του συστήματος, οι σχετικοί αλγόριθμοι εφαρμόστηκαν για την εύρεση των πιθανών συνενώσεων των κομματιών ενός εμπορικού παζλ (jigsaw puzzle) και για την εύρεση των πιθανών συνενώσεων κομματιών που προήλθαν από θραυσμένες τοιχογραφίες που ανεσκάφησαν στο Ακρωτήρι της Σαντορίνης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση της πληροφορίας που εμπεριέχεται τόσο στο χρωματικό, όσο και στο θεματικό περιεχόμενο των κομματιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον αποτελεσματικό περιορισμό των πιθανών λανθασμένων συνενώσεων που προκύπτουν με βάση το ταίριασμα του σχήματος των κομματιών μόνο. Σημειώνεται ότι είναι η πρώτη φορά που χρησιμοποιείται το θεματικό περιεχόμενο σε έναν αλγόριθμο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακατασκευή παζλ ή θραυσμένων αντικειμένων.

Υπενθυμίζουμε, σε αυτό το σημείο, ότι βασικός στόχος του αλγορίθμου απόρριψης ανεπιτυχών συνενώσεων με βάση το χρωματικό και το θεματικό περιεχόμενο είναι η εξαγωγή και η χρήση της πληροφορίας που περιέχεται στο περιεχόμενο του κάθε κομματιού για την απόρριψη συνενώσεων, οι οποίες είναι πιθανόν να είναι ανεπιτυχείς. Όπως και με την περίπτωση του αλγορίθμου ταιριάσματος με βάση το σχήμα του περιγράμματος, έτσι και εδώ πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι είναι πολύ δύσκολο να εξασφαλιστεί η απόλυτη επιτυχία και ακρίβεια του συστήματος. Στην αδυναμία αυτή συνεισφέρουν, κυρίως, τρία βασικά αίτια:

1. Το χρωματικό περιεχόμενο των κομματιών συχνά δεν είναι σταθερό, δηλαδή το περιεχόμενο των κομματιών, ιδιαίτερα κοντά στις ακμές τους, δεν είναι μονοχρωματικό. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει σοβαρή πιθανότητα μία μετάβαση που φαίνεται σταδιακή όταν εξετάζει κανείς το ολοκληρωμένο αντικείμενο να διακοπεί ή να γίνει πιο απότομη όταν μεσολαβήσει το «σπάσιμο» ανάμεσα στα κομμάτια. Το πρόβλημα αυτό είναι υπαρκτό και στις δύο εφαρμογές που εξετάστηκαν, για διαφορετικούς όμως λόγους. Στην περίπτωση του παζλ, όπου το περιεχόμενο του

αρχικού αντικειμένου ήταν μία σχετικά «ρεαλιστική» φωτογραφία, η σταδιακή μετάβαση ανάμεσα στα απεικονιζόμενα αντικείμενα συχνά διακόπτεται από το σπάσιμο του κομματιού, οπότε καταλήγουμε με δύο κομμάτια με σχετικά παρόμοιο, αλλά όχι πανομοιότυπο, χρωματικό περιεχόμενο κοντά στις ακμές των δύο κομματιών που προέκυψαν. Στην περίπτωση της εφαρμογής στα κομμάτια που βρέθηκαν κατά την ανασκαφή του Ακρωτηρίου, προέκυπταν συχνά κομμάτια τα οποία, ενώ ήταν σαφές μέσω εποπτείας ότι ταίριαζαν, ο διαφορετικός βαθμός και τύπος φθοράς που είχαν υποστεί καθιστούσε το χρωματικό περιεχόμενό τους αρκετά έως πολύ διαφορετικό.

- 2. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου ταιριάσματος με βάση το περίγραμμα έδιναν συχνά θέσεις ταιριάσματος στις οποίες τα κομμάτια δεν είχαν απόλυτα σωστή σχετική τοποθέτηση. Ως αποτέλεσμα, πιθανές μεταβάσεις του χρωματικού και του θεματικού περιεχομένου με συγκεκριμένη θέση πάνω σε ένα κομμάτι μπορεί να μην ευθυγραμμίζονταν σωστά με τις αντίστοιχες μεταβάσεις και θέσεις στο άλλο κομμάτι. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αυξημένη πιθανότητα απόρριψης συνενώσεων, οι οποίες όμως ήταν σωστές από πλευράς χρωματικού / θεματικού περιεχομένου και θα γινόταν δεκτές εάν είχε γίνει απόλυτα σωστά η τοποθέτηση των κομματιών.
- 3. Γενικά μιλώντας, υπάρχει πάντα μία μη-αμελητέα πιθανότητα το σπάσιμο των κομματιών να γίνει παράλληλα με την ακμή κάποιου θεματικού στοιχείου των κομματιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ένα κομμάτι να περιέχει εξ ολοκλήρου το θεματικό στοιχείο αυτό, ενώ το άλλο να μην περιέχει κανένα μέρος του στοιχείου αυτού και, παρόλα αυτά, τα κομμάτια αυτά να ταιριάζουν στην πραγματικότητα. Η υπολογιστική αντιμετώπιση αυτών των σπανίων, αλλά υπαρκτών, περιπτώσεων είναι πρακτικά αδύνατη.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις αυτές και επισκοπώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, συμπεραίνουμε ότι:

Α) Ο αλγόριθμος ταιριάσματος με βάση το περίγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί άνετα για την αυτόματη ανακατασκευή παζλ. Εάν επιλεχθούν κατάλληλα ποσοτικά κριτήρια για το ταίριασμα των περιγραμμάτων, ο αλγόριθμος μπορεί να δώσει έναν πολύ μικρό αριθμό

πιθανών συνενώσεων με βάση το περίγραμμα και, σε συνδυασμό με ένα αλγόριθμο λογικής για την επιλογή του ταιριάσματος των κομματιών, η αυτόματη ανακατασκευή ενός εμπορικού (off-the-shelf) παζλ είναι κατά πάσα πιθανότητα επιτεύξιμη. Υπενθυμίζουμε ότι στην περίπτωση μας τα κριτήρια ήταν πιο «χαλαρά» για να έχουμε και τις λανθασμένες συνενώσεις για εξετάσουμε τη συμπεριφορά των αλγορίθμων απόρριψης συνενώσεων με βάση το χρωματικό και το θεματικό κριτήριο.

- Β) Όσον αφορά τα χρωματικά κριτήρια απόρριψης, είναι φανερό ότι τα κριτήρια απόδοσης διαφορών που είναι υπερβολικά ακριβή και ευαίσθητα στην επιλογή των παραμέτρων πάσχουν σε απόδοση όταν εισάγουμε και τον παράγοντα φθορά στις φωτογραφίες των κομματιών. Αυτό σημαίνει ότι το κριτήριο που θα επιλέξουμε τελικώς θα πρέπει να είναι αρκετά «ανθεκτικό», ώστε να μην επηρεάζεται εύκολα από τη φθορά. Αυτό μπορεί να συνεπάγεται όμως ελαφρά μικρότερες επιδόσεις στις ιδανικές περιπτώσεις. Ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε φαίνεται να είναι πιο εύρωστος στη συμπεριφορά του, καθώς βασίζεται στην εξέταση των συνενώσεων των κομματιών με βάση τη σχέση ανάμεσα στα συγκρινόμενα κομμάτια: Από κάθε ζεύγος κομματιών κρατάμε μόνο τις πιο πιθανές συνενώσεις σε σχέση με το σύνολο των συνενώσεων για το ζεύγος αυτό. Αντίθετα, στον αλγόριθμο των Υαο και Shao οι συνενώσεις απορρίπτονται με βάση ένα απόλυτο κατώφλι για ολόκληρη την εφαρμογή. Αυτό, όμως, προϋποθέτει ότι στις σωστές συνενώσεις υπάρχει και μεγάλος βαθμός χρωματικής ταύτισης των κομματιών, πράγμα που πιθανόν να μην ισχύει σε εφαρμογές όπου υπάρχει φθορά στα χρώματα των κομματιών.
- Γ) Αν και στα σημεία που έχουμε σωστό ταίριασμα κομματιών περιμένουμε τη συνέχεια των θεματικών στοιχείων προσδοκία που επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στην πράξη ένα κριτήριο που ελέγχει εντελώς αυτόματα αυτή τη συνέχεια, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν περισσότερα του ενός θεματικά στοιχεία σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Παρόλα αυτά, ο γενικός έλεγχος παρουσίας ή απουσίας θεματικών στοιχείων που παρουσιάστηκε εδώ μας δίνει αισθητή βελτίωση των αποτελεσμάτων και αποτελεί ένα ισχυρό βοήθημα για τη βελτίωση της απόδοσης του συνολικού αλγορίθμου, καθώς αυξάνει κατά πολύ το ποσοστό απόρριψης, ενώ δεν έδωσε λανθασμένα αποτελέσματα σε καμία περίπτωση.
- Δ) Στις εφαρμογές που παρουσιάστηκαν, οι δύο ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων ήταν το ποσοστό απόρριψης και το ποσοστό των σωστών

συνενώσεων που έγιναν τελικά αποδεκτές. Το ποια από τις δύο ποσότητες φέρει μεγαλύτερη βαρύτητα, όμως, είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί, καθώς εξαρτάται από τη φύση και το μέγεθος της εφαρμογής. Μεγαλύτερο ποσοστό απόρριψης σημαίνει αντίστοιχα μικρότερο αριθμό συνενώσεων που θα χρειαστεί να ελεγχθούν τελικά από το χρήστη. Αντίστοιχα, ένα μεγαλύτερο ποσοστό αποδοχής σωστών συνενώσεων συνεπάγεται και αυτό μια πιθανή μείωση του αριθμού των ελέγχων που θα χρειαστεί να κάνει ο χρήστης, για διαφορετικούς όμως λόγους και σε διαφορετικό σημείο εφαρμογής του καθολικού αλγορίθμου ανακατασκευής.

Ε) Οι δύο εφαρμογές (παζλ και Σαντορίνη) παρουσίασαν ένα αριθμό διαφορών:

- Ι) Τα κομμάτια του παζλ ήταν αρκετά μικρότερα από αυτά της Σαντορίνης
- ΙΙ) Τα κομμάτια του παζλ ταίριαζαν πολύ καλύτερα μεταξύ τους με βάση το περίγραμμα από αυτά της Σαντορίνης, γεγονός που συνεπάγεται μικρότερο αριθμό πιθανών συνενώσεων από τα κομμάτια της Σαντορίνης.
- ΙΙΙ) Τα κομμάτια της Σαντορίνης σε πολλές περιπτώσεις είχαν υποστεί σοβαρή αλλοίωση στα χρώματα και το θεματικό περιεχόμενό τους λόγω φθοράς.

Οι διαφορές αυτές δυσχεραίνουν την επιλογή των σχετικών παραμέτρων για μια τρίτη εφαρμογή. Οι τελικές τιμές των παραμέτρων αυτών θα πρέπει να επιλεχθούν αφού λάβει ο χρήστης υπόψη το μέγεθος των κομματιών, την παρουσία φθοράς και το βαθμό ταιριάσματος των περιγραμμάτων των κομματιών (ποσότητα που και αυτή με τη σειρά της είναι δύσκολο να εκτιμηθεί). Πάντως, είναι πολύ πιθανό μια ρεαλιστική εφαρμογή να παρουσιάζει χαρακτηριστικά που τείνουν περισσότερο σε αυτά της Σαντορίνης παρά σε αυτά του παζλ που εξετάσαμε.

Στ) Τελικά, πάντως, η εφαρμογή των αλγορίθμων που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα μας κάνει να πιστεύουμε ότι μπορούμε να περιμένουμε άνετα μια βελτίωση της τάξης του 75-80% στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την επιτυχή ανακατασκευή ενός αντικειμένου με χρήση του συνολικού συστήματος που παρουσιάστηκε, χωρίς σοβαρή απώλεια της αξιοπιστίας της εφαρμογής (Skembris, Papaodysseus, Koukoutsis, 2012)

Από το σημείο αυτό, υπάρχουν διάφορες κατευθύνσεις προς τις οποίες θα μπορούσε να κινηθεί κανείς ερευνητικά. Μία πρώτη σκέψη είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός

ευρεστικού αλγορίθμου (heuristic algorithm), για το σχηματισμό του ολοκληρωμένου ανακατασκευασμένου αντικειμένου με βάση τις πιθανές συνενώσεις που έγιναν τελικά δεκτές από το ολοκληρωμένο σύστημα ταιριάσματος κομματιών με βάση το περίγραμμα, το χρωματικό και το θεματικό περιεχόμενο. Ένας τέτοιος αλγόριθμος πιθανόν να κάνει χρήση ασαφούς λογικής (fuzzy logic), λόγω της έλλειψης σαφών κριτηρίων με βάση τα οποία θα μπορεί να κριθεί εάν είναι επιτυχημένη ή όχι μία συνένωση ή ένα σύμπλεγμα συνενώσεων. Μία δεύτερη σκέψη είναι η χρήση της τρισδιάστατης πληροφορίας που περιέχεται στα άκρα των κομματιών για τον περαιτέρω περιορισμό των ανεπιτυχών συνενώσεων που γίνονται δεκτές με βάση το σχήμα των κομματιών.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Βιβλιογραφία Α' Μέρους

- Burdea G. C., Wolfson H. J. (1989). Solving Jigsaw Puzzles by a Robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(6), 752-764.
- Chung, M.G., Fleck, M.M., Forsyth, D. (1998). Jigsaw puzzle solver using shape and color. Proceedings of ICSP '98. Fourth International Conference on Signal Processing, Beijing, China, 12–16 October.
- Fawcett T. (2004). *ROC Graphs: Notes and Practical Considerations for Researchers*. Technical report. Palo Alto, USA: HP Laboratories.
- Freeman, H., Garder, L. (1964). Apictorial jigsaw puzzles: The computer solution of a problem in pattern recognition. *IEEE Transactions on Electronic Computers*. 13, 118–127.
- Fragoulis D., Skembris A., Papaodysseus C., Rousopoulos P., Panagopoulos Th., Triantafyllou C., Vlachopoulos A., Doumas C. (2005). Origins and Application of Geometry in the Thera Prehistoric Civilization Ca. 1650 BC. *Centaurus*, 47(4), 316-340,.
- Glassner, A. (2002). Putting the pieces together. IEEE Computer Graphics and Applications, 22(3), 76-86.
- Hirota K., Ohto Y. (1986), Image Recognition in Jigsaw Puzzle Assembly Robot Systems, Bull. Coll. Eng., Hosei Univ., Japan, 87-93, May.
- Kosiba, D.A., Devaux, P.M., Balasubramanian, S., Gandhi, T.L., Kasturi, R. (1994). An automatic jigsaw puzzle solver. *Proceedings of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition*, I, October 9–13, Jerusalem, Israel.
- Lim, Jae S., (1990), *Two-Dimensional Signal and Image Processing*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, p. 548, ISBN:0-13-935322-4
- Morillas S., Gregori V. Sapena A. (2011) Adaptive Marginal Median Filter for Colour Images, *Sensors* 11(3): 3205-3213; DOI:10.3390/s110303205
- Nielsen, R. T, Drewsen, P., Hansen, K. (2008). Solving jigsaw puzzles using image features. Pattern Recognition Letters 29, 1924-1933
- Otsu, N. (1980). An automatic threshold selection method based on discriminant and least squares criteria. Transactions of IEICE *J63-D*(4), 349–356

- Papaodysseus C., Fragoulis D. K, Panagopoulos M, Panagopoulos Th., Rousopoulos P., Exarhos M., Skembris A. (2006). Determination of the Method of Construction of 1650 B.C. Wall Paintings. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 28(9), 1361-1371.
- Papaodysseus C., Panagopoulos Th., Exarhos M., Triantafillou C., Fragoulis D., Doumas C. (2002). Contourshape based reconstruction of fragmented 1600 B.C. wall paintings. *IEEE Trans. On Signal Processing*, 50(6), 1277-1288.
- Radack, G.M., Badler, N.I. (1982). Jigsaw puzzle matching using a boundary-centered polar encoding. Computer Graphics and Image Processing, 19, 1–17.
- Shapiro, L. G. Stockman, G. C. (2001). Computer Vision. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Skembris A. S., Papaodysseus C., Koukoutsis E. (2012). 2D fragmented object reconstruction with the use of the chromatic and thematic content. *Pattern Analysis & Applications*, 15(2), 1-14, doi:10.1007/s10044-011-0251-9
- Suganthan, P.N. (1999). Solving jigsaw puzzles using Hopfield neural networks. *Proceedings of the International Conference on Neural Networks*, Washington, DC, USA, 10–16 July 1999.
- Vertan, M., Malciu, V., Buzuloiu, V., Popescu V. (1996) Median Filtering Techniques for Vector Valued Signals, in Proc. IEEE Int. Conf. on Image Proc. ICIP' 96, vol. 1, pp. 977-980. DOI: 10.1109/ICIP.1996.559664
- Webster, R. W., LaFollette, P. S., Stafford, R. L. (1991). Isthmus critical points for solving jigsaw puzzles in computer vision. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 21(5), 1271–1278.
- Yao, F. H., Shao, G. F., Tamaki, A., Kato, K. (1997). Recovery of connection relationships among twodimensional objects. *Journal of the Information Processing Society of Japan 38*(4), 746–761.
- Yao, F. H., Shao, G. F., Yamada, H., Kato, K. (2002). Solving the jigsaw puzzles by the computer (Part I)— Jigsaw pieces extraction, corner point detection, and piece classification and recognition. Journal of the Information Processing Society of Japan 43(5), 1492–1504.
- Yao, F. H., Shao, G. F. (2003). A shape and image merging technique to solve jigsaw puzzles. *Pattern Recognition Letters* 24(12), 1819–1835.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.1

Επεξήγηση της διάβρωσης

Στη δυαδική μορφολογία, μία εικόνα θεωρείται ως ένα υποσύνολο ενός ευκλείδειου χώρου \mathbb{R}^d ή του πλέγματος ακεραίων \mathbb{Z}^d , για κάποια διάσταση d. Η βασική ιδέα της διάβρωσης στους δυαδικούς μορφολογικούς μετασχηματισμούς είναι ότι σαρώνουμε την εικόνα με ένα απλό, προκαθορισμένο σχήμα και εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με το πως το σχήμα αυτό ταιριάζει με τα σχήματα της εικόνας. Το δοκιμαστικό σχήμα αυτό ονομάζεται «δομικό στοιχείο» και αποτελεί και το ίδιο μία δυαδική εικόνα (δηλαδή ένα υποσύνολο του χώρου ή του πλέγματος) (Shapiro και Stockman, 2001).

Έστω E ένας ευκλείδειος χώρος ή ένα πλέγμα ακεραίων, και A μία δυαδική εικόνα στο E. Η διάβρωση της δυαδικής εικόνας A από το δομικό στοιχείο B ορίζεται ως:

$$A\Theta B = \{ z \in E \mid B_z \subseteq A \},$$

όπου Β_z είναι η μετατόπιση του Β κατά το διάνυσμα z, δηλαδή,

$$B_z = \{b + z \mid b \in B\} \forall z \in E$$

Όταν το δομικό στοιχείο B έχει κάποιο κέντρο (πχ είναι κυκλικός δίσκος ή ένα τετράγωνο, τότε το αποτέλεσμα της διάβρωσης της εικόνας A από το B μπορεί να θεωρηθεί ως ο γεωμετρικός τόπος των σημείων στα οποία μπορούμε να τοποθετήσουμε το B και αυτό να εξακολουθεί να βρίσκεται εξ ολοκλήρου εντός της εικόνας A. Για παράδειγμα, το αποτέλεσμα της διάβρωσης ενός τετραγώνου πλευράς 10, με κέντρο την αρχή των αξόνων, από ένα δίσκο ακτίνας 2, με κέντρο επίσης την αρχή των αξόνων, είναι ένα τετράγωνο πλευράς 6 με κέντρο την αρχή των αξόνων.

Παράδειγμα

Έστω ένας πίνακας Α μεγέθους 13 * 13 και ένα δομικό στοιχείο Β μεγέθους 5 * 1:

						A								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0		
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0		
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0		
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0		
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

Υποθέτοντας ότι η αρχή των αξόνων του Β είναι στο κέντρο το Β, για κάθε εικονοστοιχείο του Α υπερθέτουμε το Β, ώστε το κέντρο του Β να συμπίπτει με το συγκεκριμένο εικονοστοιχείο. Εάν ο πίνακας Β περιέχεται εξ ολοκλήρου από το Α, κρατάμε το εικονοστοιχείο αυτό, διαφορετικά το σβήνουμε. Έτσι, το αποτέλεσμα της διαδικασίας διάβρωσης του Α από το Β θα είναι:

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Έτσι, μόνο όταν το Β περιέχεται ολόκληρο μέσα στο Α κρατάμε την τιμή του αντιστοίχου εικονοστοιχείου, διαφορετικά το εικονοστοιχείο αυτό σβήνεται ή, διαφορετικά, διαβρώνεται.

ПАРАРТНМА А.2



Σχήμα Α.35. Το πλήρως ανακατασκευασμένο παζλ, με την αρίθμηση που ανατέθηκε στα κομμάτια.

Πίνακας Α.ΙΧ. Πίνακας ευρεθεισών συνενώσεων για το παζλ

Σταθερό κομμάτι	Περ/νο κομμάτι	# Συνένω σης								
<u>11</u>	2	11	10	261	12	322	19	639		
<u>12</u>	3	X	11	307	13	389	20	X		
<u>13</u>	4	46	5	47	12	149	14	167	21	322
14	6	125	13	361	15	X	22	731		
<u>15</u>	7	144	14	347	16	397	23	524		
<u>16</u>	8	198	15	431	17	472	24	744		
<u>19</u>	11	245	18	567	20	630	27	885		
<u>20</u>	12	279	19	X	21	528	28	777		
<u>21</u>	13	451	20	819	22	869	29	1210		
22	14	301	21	539	23	572	30	818		
<u>23</u>	15	474	22	X	24	864	31	1175		
24	16	X	23	871	25	957	32	1216		
<u>27</u>	19	562	26	846	28	948	35	1228		
<u>28</u>	20	717	27	988	29	1122	36	1461		
<u>29</u>	21	546	28	812	30	897	37	1166		
<u>30</u>	22	927	29	1276	31	1332	38	1794		
<u>31</u>	23	931	30	1236	32	1259	39	1627		
32	24	X	31	1318	33	1350	40	1748		
<u>35</u>	27	847	34	1142	36	1172	43	1460		
<u>36</u>	28	647	35	902	37	919	44	1087		
<u>37</u>	29	1272	36	1713	38	1796	45	2050	46	2087
<u>38</u>	30	879	37	1121	39	1211	47	1404		
<u>39</u>	31	1149	38	1473	40	1528	48	1794		
<u>40</u>	32	896	39	1116	41	1183	49	1370		

ΜΕΡΟΣ Β'

Εξαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών ήλου (καρφιού) που χρησιμοποιείται σε επεμβάσεις κλειστών ενδομυελικών ηλώσεων από θορυβώδεις ακτινογραφικές απεικονίσεις

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Κεφάλαιο Β.Ι.: Εισαγωγή

Β.Ι.1. Πρόλογος

Οι διαγνωστικές απεικονίσεις αποτελούν ένα ανεκτίμητο εργαλείο στην υπηρεσία της Ιατρικής. Η μαγνητική τομογραφία (Magnetic Resonance Imaging - MRI), η αξονική τομογραφία (Computerized Tomography - CT), η ψηφιακή μαστογραφία και άλλες τεχνικές παρέχουν αποτελεσματικά τη δυνατότητα της μη διεισδυτικής χαρτογράφησης της ανατομίας ενός ασθενούς. Οι τεχνολογικές καινοτομίες αυτές έχουν αυξήσει σημαντικά την ιατρική γνώση σχετικά με την ανατομία του ανθρωπίνου σώματος, είτε αυτό είναι υγιές είτε πάσχει από κάποια ασθένεια, και αποτελούν σημαντικό εργαλείο για τη διάγνωση και το σχεδιασμό της θεραπείας.

Το ολοένα και αυξανόμενο πλήθος και μέγεθος των ιατρικών εικόνων που προκύπτουν από τις τεχνικές αυτές έχουν κάνει απαραίτητη τη χρήση υπολογιστών για την επεξεργασία των δεδομένων και την ανάλυση της πληροφορίας που περιέχουν. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση υπολογιστικών αλγορίθμων για την αυτόματη αναγνώριση σκιαγράφηση ανατομικών δομών και άλλων περιοχών που μπορεί να παρουσιάζουν ενδιαφέρον γίνεται ένα όλο και πιο σημαντικό εργαλείο στην αυτοματοποίηση συγκεκριμένων ακτινολογικών διαγνώσεων.

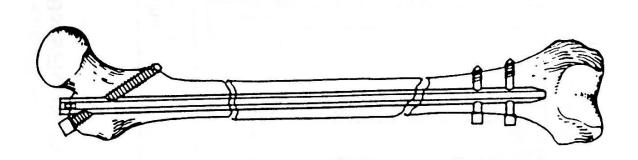
Απώτερος σκοπός των τεχνικών αυτών είναι η ανάπτυξη αναίμακτων διαγνωστικών μεθόδων, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την όσο το δυνατόν ακριβέστερη απεικόνιση δομών του σώματος και πιθανών αλλοιώσεων που αυτές μπορεί να έχουν υποστεί λόγω κάποιας πάθησής τους. Επίσης, οι διαγνωστικές αυτές μέθοδοι συχνά χρησιμοποιούνται στην αναγνώριση αντικειμένων που είναι ξένα προς το σώμα του ασθενή, τα οποία είτε έχουν εισέλθει μέσα στο σώμα μέσω κάποιου τραυματισμού είτε έχουν τοποθετηθεί εσκεμμένα για λόγους θεραπείας (πχ κάποιος βηματοδότης καρδιάς ή κάποια μεταλλική πλάκα σταθεροποίησης οστών).

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των τεχνικών ιατρικής απεικόνισης είναι η μεγάλη ποικιλία που χαρακτηρίζει τους μηχανισμούς σχηματισμού των ιατρικών εικόνων. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο εύρος τεχνικών, οι οποίες πολλές φορές βασίζονται σε εντελώς διαφορετικές απεικονιστικές διεργασίες. Μερικά παραδείγματα τέτοιων τεχνικών είναι: τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια, οι ακτινογραφίες, η απεικόνιση

μαγνητικού συντονισμού (γνωστή και ως μαγνητική τομογραφία ή MRI – Magnetic Resonance Imaging), η πυρηνική ιατρική, η φωτοακουστική απεικόνιση, η θερμογραφία μαστών (γνωστή και ως Ψηφιακή Υπέρυθρη Απεικόνιση ή DII – Digital Infrared Imaging), η αξονική τομογραφία και οι υπέρηχοι. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνικές απεικόνισης βασίζονται σε εντελώς διαφορετικούς μηχανισμούς για το σχηματισμό της εικόνας, γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό εικόνων εντελώς διαφορετικής φύσης.

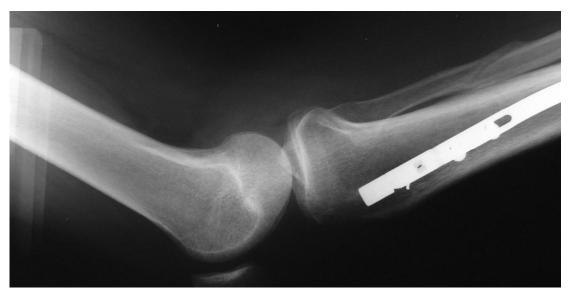
Η ποικιλομορφία αυτή των ιατρικών απεικονίσεων οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών διαφορετικών τεχνικών επεξεργασίας ιατρικής εικόνας, οι οποίες τεχνικές συχνά είναι εξειδικευμένες με βάση το μηχανισμό σχηματισμού της ιατρικής εικόνας και τη φύση της προκύπτουσας εικόνας. Η εξειδίκευση αυτή των τεχνικών έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεμονωμένων τεχνικών επεξεργασίας και κατάτμησης εικόνας για την ανίχνευση συγκεκριμένων στοιχείων στις εικόνες αυτές. Οι τεχνικές αυτές, όμως, σπανίως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερους του ενός τύπου εικόνας, ακριβώς λόγω της διαφορετικής φύσης των εικόνων που αναφέρθηκαν. Έτσι, μία τεχνική για την προεπεξεργασία (πχ την αύξηση της αντίθεσης) μίας αξονικής τομογραφίας δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί (τουλάχιστον χωρίς σοβαρές αλλαγές) για την προεπεξεργασία της εικόνας που προέκυψε από έναν υπέρηχο. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην πολλαπλή διακλάδωση των ερευνητικών ροών που αφορούν στην επεξεργασία των ιατρικών εικόνων, συχνά με βάση τον τύπο της ιατρικής απεικόνισης, αλλά και με βάση το όργανο ή την παθολογία που εξετάζεται.

Στη συγκεκριμένη εργασία εστιάσαμε στην προεπεξεργασία (pre-processing) και την κατάτμηση (segmentation) ακτινογραφικών εικόνων. Πιο συγκεκριμένα, στόχος μας ήταν να μπορέσουμε να εξάγουμε τη μέγιστη δυνατή πληροφορία από ακτινογραφίες ήλων (καρφιών) υποστήριξης οστών. Τα καρφιά αυτά χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε επεμβάσεις αποκατάστασης καταγμάτων οστών, οι οποίες ονομάζονται κλειστές ενδομυελικές ηλώσεις (Σχήμα Β.1).



Σχήμα Β.1. Παράδειγμα κατάγματος μηριαίου οστού, το οποίο έχει σταθεροποιηθεί με χρήση ενδομυελικού ήλου.

Απώτερος σκοπό μας είναι ο ακριβής προσδιορισμός της γωνίας περιστροφής και καταβύθισης του καρφιού σε σχέση με κάποιο γνωστό σύστημα αναφοράς (Σχήμα Β.2). Η επίτευξη του σκοπού αυτού θα σήμαινε τη δυνατότητα ανάπτυξης ενός εξειδικευμένου συστήματος (expert system), το οποίο θα επέτρεπε στον χειρούργο ιατρό να προσδιορίσει με ακρίβεια τη θέση και την περιστροφή του καρφιού σε σχέση με τα οστά του ασθενή κατά της διάρκεια της επέμβασης τοποθέτησης του οστού, καθώς η πληροφορία αυτή, όπως θα δούμε στη συνέχεια, είναι απαραίτητη για τη σταθεροποίηση του καρφιού σε σχέση με τα οστά του ασθενή. Επίσης, ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να παράσχει στον θεράποντα ιατρό σημαντική πληροφορία σχετικά με τη θέση και την παραμόρφωση του καρφιού κατά την πορεία πώρωσης του κατάγματος με σκοπό την ορθή μετεγχειρητική εκτίμηση της πορείας αποκατάστασης του οστού του ασθενούς.



Σχήμα Β.2. Ακτινογραφία ενός γόνατου με καρφί υποστήριξης οστών στο οστό της κνήμης.

Αν και απέχουμε μακράν από τη διαμόρφωση μίας τελικής εικόνας για τη μορφή ενός τέτοιου συστήματος, μία πιθανή ακολουθία των σταδίων λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος θα μπορούσε να είναι η εξής:

- Προ-επεξεργασία της ακτινογραφίας του οστού που υποστηρίζεται από το καρφί για τη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας.
- Κατάτμηση και διαχωρισμός της ακτινογραφίας στις περιοχές που αναπαριστούν το καρφί και τις περιοχές που απεικονίζουν το οστό που το περιβάλλει.
- Χρήση της πληροφορίας που εξήχθη κατά τη διαδικασία της κατάτμησης, σε συνδυασμό με ένα τρισδιάστατο μοντέλο του καρφιού για τον εντοπισμό του προσανατολισμού, της γωνίας καταβύθισης και της γωνίας περιστροφής του καρφιού σε σχέση με το οστό, με σκοπό την εξαγωγή της απαραίτητης πληροφορίας για τη σταθεροποίηση του οστού κατά τη διάρκεια της επέμβασης.
- Κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου του κοινού συστήματος οστού-καρφιού για την λεπτομερή απεικόνιση του καρφιού και της πορείας αναδόμησης του οστού που υποστηρίζεται από αυτό.

Η παρούσα εργασία εστιάζεται στις πρώτες δύο βαθμίδες λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, ενώ οι επόμενες δύο θα καλυφθούν από άλλες εργασίες. Συγκεκριμένα, όσον αφορά την κατάτμηση της ακτινογραφίας, θα εστιάσουμε στην κατάτμηση των ακτινογραφιών μεμονωμένων καρφιών (χωρίς την παρουσία οστού), ώστε να μπορέσουμε

να διαμορφώσουμε μία μεθοδολογία εξαγωγής της πληροφορίας από τις απεικονίσεις των καρφιών χωρίς να χρειάζεται να λάβουμε υπόψη πιθανές παραμορφώσεις ή θόρυβο που μπορεί να εισέρχονται στην εικόνα της ακτινογραφίας λόγω της παρουσίας του οστού. Από τη στιγμή που θα δημιουργηθεί η σχετική μεθοδολογία εξαγωγής της πληροφορίας από τις μεμονωμένες εικόνες των καρφιών, η κατάτμηση ακτινογραφιών που περιέχουν τόσο το καρφί όσο και το οστό που υποστηρίζεται από αυτό είναι μία σχετικά γραμμική διαδικασία, λόγω της μεγάλης διαφοράς έντασης που παρουσιάζει το καρφί σε σχέση με το οστό μέσα στην ακτινογραφία.

Β.Ι.2. Σύντομη ιστορία της τεχνικής των ενδομυελικών ηλώσεων.

Η ιστορία της χρήσης της τεχνικής της ενδομυελικής ήλωσης για τη θεραπεία των καταγμάτων των μακρών οστών (με τον όρο «μακρά» εννοούμε κυρίως τα οστά των άκρων, π.χ. το βραχιόνιο ή το μηριαίο) είναι μακρά και εκτεταμένη. Από τα πρώτα ιστορικά καταγεγραμμένα παραδείγματα στο Μεξικό του 16ου αιώνα, έχει σημειωθεί σημαντική εξέλιξη στα σχέδια, στα υλικά και στις βασικές επιστημονικές αρχές, με αποτέλεσμα την αποδοχή της τεχνικής ως μία βιώσιμη επιλογή θεραπείας καταγμάτων με υψηλά ποσοστά επιτυχίας τις τελευταίες δεκαετίες. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι παράλληλα με αυτή την εξέλιξη στα σχέδια, τις μεθόδους και τις αρχές της τεχνικής έχει παρατηρηθεί και αντίστοιχη εξέλιξη στις τεχνικές αναισθησίας και τις ασηπτικές τεχνικές, γεγονός που επέτρεψε τη συστηματική εγχειρητική φροντίδα των καταγμάτων.

Οι πρώτες καταγεγραμμένες αναφορές χρήσης ενδομυελικών συσκευών αποδίδονται στον Bernardino de Sahagun, έναν ανθρωπολόγο του 16ου αιώνα, ο οποίος ταξίδεψε στο Μεξικό ως μέλος της αποστολής του Hernando Cortes (Farill, 1952). Ο De Sahagun παρακολούθησε Αζτέκους ιατρούς καθώς οι τελευταίοι τοποθετούσαν ξύλινα ραβδιά στα μυελικά κανάλια ασθενών με κατάγματα των μακρών οστών που δεν είχαν πωρωθεί. Άλλες ενδομυελικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν πριν από τον 20ο αιώνα έτειναν να εφαρμόζονται σε ασθενείς με μη-πωρωμένα κατάγματα και όχι σε ασθενείς με οξέα κατάγματα μακρών οστών.

Από τα μέσα του 19ου αιώνα μέχρι και την πρώτη δεκαετία του 20ου, οι περισσότερες περιστάσεις χρήσης ενδομυελικών ήλων σε μη-πωρωμένα κατάγματα περιελάμβαναν τη χρήση πασσάλων από ελεφαντόδοντο, καθώς είχε παρατηρηθεί ότι οι πάσσαλοι από ελεφαντόδοντο απορροφούνται από το ανθρώπινο σώμα σε αντίθεση με τα

μεταλλικά εμφυτεύματα, τα οποία περιβάλλονται από ινώδες υλικό (Bircher, 1886, Konig, 1913). Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1890, ο Gluck κατέγραψε την πρώτη χρήση μίας συναρμοσμένης ενδομυελικής συσκευής (Gluck, 1890). Η συσκευή αυτή αποτελείτο από ένα ενδομυελικό καρφί από ελεφαντόδοντο, το οποίο είχε τρύπες στο άκρο του, μέσα από τις οποίες μπορούσαν να περαστούν κάθετα στο καρφί μικρότερα καρφιά-πάσσαλοι από ελεφαντόδοντο για να σταθεροποιηθεί τη θέση του μεγάλου καρφιού.

Κατά τη διάρκεια του Α' Παγκοσμίου Πολέμου, ο Hey Groves από την Αγγλία ανέφερε τη χρήση μεταλλικών ράβδων για τη θεραπεία πληγών από σφαίρες (Hey Groves, 1914). Οι ράβδοι αυτές περάστηκαν εντός της μυελικής κοιλότητας μέσω μίας τομής που έγινε πάνω από το σημείο του κατάγματος. Η τεχνική αυτή φάνηκε να παρουσιάζει υψηλά ποσοστά μολύνσεων και δεν έγινε ευρέως αποδεκτή. Έπρεπε να μεσολαβήσει η αναφορά του Smith-Petersen το 1931 για επιτυχή χρήση καρφιών από ανοξείδωτο ατσάλι για τη θεραπεία καταγμάτων του αυχένα του μηριαίου οστού, ώστε η εφαρμογή των ενδομυελικών εμφυτευμάτων να αρχίσει να διαδίδεται με ραγδαίους ρυθμούς (Smith-Petersen, 1931).

Ο Gerhard Küntscher γεννήθηκε στη Γερμανία το 1900 και θεωρείται ο θεμελιωτής της τεχνικής των ενδομυελικών ηλώσεων. Η πρώιμη ενασχόλησή του με τις ενδομυελικές συσκευές ήταν αποτέλεσμα της εργασίας του με το καρφί τύπου Smith-Petersen για τη θεραπεία καταγμάτων του αυχένα του μηριαίου οστού. Το αρχικό ενδομυελικό καρφί του είχε σχήμα V., ήταν φτιαγμένο από ανοξείδωτο ατσάλι και εισάγονταν στο κόκκαλο ορθόδρομα. Ο Küntscher ανέφερε πρώτη φορά τη χρήση του καρφιού σχήματος V το 1940 και πρότεινε ότι το καρφί λειτουργούσε ως εσωτερικός νάρθηκας, ο οποίος δημιουργούσε μία ελαστική ένωση με την εσωτερική μυελική κοιλότητα (Küntscher, 1940). Η ευθυγράμμιση των οστών επιτυγχάνονταν με χρήση πολλαπλών ιμάντων σταθεροποίησης, ενώ για την απεικόνιση των οστών χρησιμοποιείτο ακτινοσκόπηση χαμηλής αντίθεσης, με την οθόνη στερεωμένη στο κεφάλι του χειρούργου. Ο Küntscher πίστευε ότι η σωστή εισαγωγή του καρφιού του θα επέτρεπε την άμεση και λειτουργική κινητοποίηση του ασθενή.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '50 αναπτύχθηκαν και παρουσιάστηκαν δύο σημαντικές τεχνικές. Το 1942 ο Fischer είχε αναφέρει στη γερμανική βιβλιογραφία τη χρήση ενδομυελικών αυλακώσεων για την αύξηση της επιφάνειας επαφής ανάμεσα στο καρφί και το οστό που το δέχεται, με σκοπό τη βελτίωση της σταθερότητας του κατάγματος (Fischer & Maatz, 1942). Όμως, χρειάστηκε να περάσει μία ακόμα δεκαετία και να παρουσιάσει ο Küntscher τα εύκαμπτα εργαλεία αυλάκωσης για να εδραιωθεί η ιδέα αυτή. Ο Fischer πίστευε επίσης ότι η αυλάκωση σε συνδυασμό με ένα καρφί μεγαλύτερης

διαμέτρου θα ενίσχυε τη σταθερότητα των καταγμάτων μέσω της αύξησης της επιφάνειας επαφής.

Επίσης, πίστευε ότι αν και η ενδομυελική αγγειακή παροχή αίματος καταστρεφόταν μέσω αυτής της τεχνικής, το περιόστεο και οι περιβάλλοντες ιστοί θα προωθούσαν την αναδόμηση του οστού σε βαθμό ικανό ώστε να επιτευχθεί πώρωση. Άλλη μία τεχνική που χρησιμοποιείται σήμερα και παρουσιάστηκε τη δεκαετία του 50 είναι η εφαρμογή εγκάρσιων βιδών για την ενίσχυση της σταθερότητας της κατασκευής. Οι Modny και Bambara (1953) παρουσίασαν το εγκάρσια σταθεροποιημένο ενδομυελικό καρφί το 1953. Το καρφί αυτό είχε σχήμα σταυρού, με πολλαπλές τρύπες κατά μήκος του καρφιού, οι οποίες επέτρεπαν την τοποθέτηση βιδών σε ορθή γωνία μεταξύ τους. Οι Modny και Lewert (1986) αργότερα ανέφεραν εξαιρετικά αποτελέσματα σε 261 κατάγματα του μηριαίου οστού που θεραπεύτηκαν με χρήση του καρφιού αυτού.

Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών '40 και '50, πολλοί χειρούργοι εγκατέλειψαν τις παλιές τεχνικές φθοροσκόπησης, όπως η φθοροσκόπηση με οθόνη στερεωμένη στο κεφάλι, λόγω των πιθανών παρενεργειών που είχαν αυτές τόσο στο χειρούργο όσο και στον ασθενή. Αυτό ανάγκασε τους χειρούργους να υιοθετήσουν ανοιχτές τεχνικές ήλωσης. Η ανάπτυξη τεχνικών αύξησης της αντίθεσης ακτινολογικών εικόνων τη δεκαετία του '60 επέτρεψε στους χειρούργους να υιοθετήσουν εκ νέου κλειστές τεχνικές ήλωσης, με πολύ μικρότερο κίνδυνο τόσο για τον ασθενή όσο και για το χειρούργο.

Β.Ι.3. Σύντομη περιγραφή της εγχειρητικής διαδικασίας

Σε αυτό το σημείο θα περιγράψουμε εν συντομία την χειρουργική επέμβαση της κλειστής ενδομυελικής ήλωσης ώστε να αποκτήσουμε μία γενική εικόνα της διαδικασίας, των δυσκολιών της και των προβλημάτων, των οποίων την επίλυση καλούμαστε να εξυπηρετήσουμε με το προτεινόμενο σύστημα. Θα χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα την εφαρμογή της επέμβασης στην κνήμη, τα κατάγματα της οποίας αντιμετωπίζονται συχνά με την τεχνική αυτή (Kelc & Kranjc, 2005) Σημειωτέον ότι υπάρχουν πολλές παραλλαγές τόσο σε χαρακτηριστικά της επέμβασης, όπως το σημείο εισαγωγής του καρφιού, το μήκος του καρφιού, το σχήμα της εγκάρσιας διατομής του κ.α., όσο και στον τύπο του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί αλλά και στο αν θα χρησιμοποιηθεί αυλάκωση του οστού ή όχι. Οι τελικές λεπτομέρειες της εφαρμογής εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι μπορεί να είναι αντικειμενικοί (π.χ. η φύση του κατάγματος, η οποία συνήθως εξαρτάται από το ποσό

της ενέργειας που απορροφήθηκε από το οστό) ή υποκειμενικοί (καθώς στην αμερικανική ιατρική βιβλιογραφία προτιμώνται άλλες τεχνικές από ότι στην ευρωπαϊκή). Σκοπός μας εδώ είναι να δούμε τα βασικά στοιχεία της διαδικασίας και να κατανοήσει ο αναγνώστης τα σημεία στα οποία οι τεχνικές απεικονίσεων που παρουσιάζονται στη διατριβή αυτή μπορούν να φανούν χρήσιμες.

Στην περίπτωση του παραδείγματος μας εξετάζουμε την ενδομυελική ήλωση κατάγματος της κνήμης, κατά την οποία η εισαγωγή του καρφιού γίνεται μέσω του απομακρυσμένου άκρου του μηριαίου (δηλαδή από τη μεριά του γονάτου). Η επέμβαση διαφοροποιείται ανάλογα με το αν θα χρησιμοποιηθεί αυλάκωση ή όχι, απόφαση που εξαρτάται από τη φύση του κατάγματος και την απαιτούμενη σταθεροποίηση του οστού.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, κάνουμε την αρχική τομή στο μέσο του συνδέσμου της επιγονατίδας, αν και μπορούμε επίσης να την κάνουμε στην έσω πλευρά της. Στην περίπτωση αυτή, το γόνατο μπορεί να παραμείνει σχεδόν τεντωμένο κατά τη διάρκεια της επέμβασης. Στα μη-αυλακωμένα καρφιά, η τομή πρέπει να έχει μήκος 2-3cm, ενώ αν το καρφί είναι αυλακωμένο, η τομή πρέπει να είναι διπλάσιου μήκους, ώστε να μπορούμε να απομακρύνουμε τους περιβάλλοντες μαλακούς ιστούς από τη μέση για να τρυπανίσουμε το μυελικό κανάλι. Ανοίγουμε τη δίοδο για το μυελικό κανάλι με ένα σουβλί ή τρυπάνι μέσα από το βολβώδες της κνήμης. Το σημείο εισαγωγής πρέπει να βρίσκεται ακριβώς στην προέκταση του μυελικού καναλιού (Σχήμα Β.1).



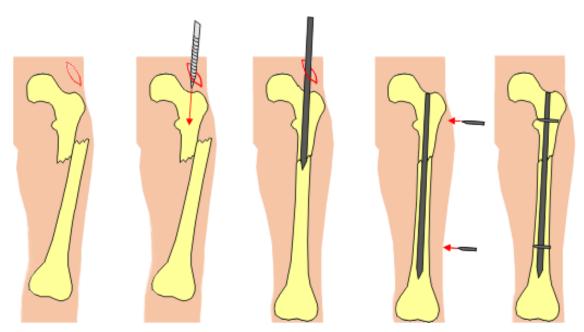
Σχήμα Β.3. Η τομή και το σημείο εισόδου του ενδομυελικού ήλου που χρησιμοποιείται για τη θεραπεία του κατάγματος της κνήμης.

Όταν εισάγουμε συμπαγή καρφιά χωρίς κατευθυντήριο συρμάτινο νήμα, χρησιμοποιούμε την ακμή του καρφιού για να νιώσουμε τη θέση του απομακρυσμένου

τμήματος του οστού. Όταν τρυπανίζουμε ή τοποθετούμε κούφια καρφιά, εντοπίζουμε το απομακρυσμένο τμήμα του οστού με τη χρήση κατευθυντήριου σύρματος, ενώ στη συνέχεια περνάμε το σύρμα μέσα από το καρφί και το χρησιμοποιούμε για να οδηγήσουμε το καρφί στη σωστή του θέση.

Τρυπανίζουμε ή αυλακώνουμε το μυελικό κανάλι στον επιθυμητό βαθμό χρησιμοποιώντας ένα σύρμα με αμβλυμμένη ακμή για καθοδήγηση. Τα καρφιά μεγαλύτερης διαμέτρου εξασφαλίζουν περισσότερη σταθερότητα, αλλά ο τρυπανισμός καταστρέφει το εσωτερικό, μαλακό οστό και τα αιμοφόρα αγγεία στα οποία λαμβάνει χώρα η αιμοποίηση και ο τρυπανισμός σε υπερβολικό βαθμό μπορεί να προκαλέσει το θάνατο του οστού. Επομένως, απαιτείται κάποιος συμβιβασμός, ενώ το υπερβολικό αυλάκωμα δε χρησιμοποιείται πλέον. Τα περισσότερα κνημιαία κατάγματα σταθεροποιούνται με τη χρήση ενδομυελικών καρφιών διαμέτρου 9-10mm, ενώ το αυλάκωμα γίνεται σε διάμετρο κατά περίπου 1-2mm μεγαλύτερη από τη διάμετρο του καρφιού. Όταν εισάγουμε συμπαγή (μη-αυλακωμένα) καρφιά δεν τρυπανίζουμε το μυελικό κανάλι.

Για να αποφύγουμε το υπερβολικό αυλάκωμα του μυελικού καναλιού, τοποθετούμε ειδικές βίδες για να εξασφαλίσουμε τη διατήρηση της σωστής θέσης και γωνίας περιστροφής μέχρι το τέλος της αποκατάστασης του οστού (Σχήμα Β.4).



Σχήμα Β.4. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας εισαγωγής και σταθεροποίησης ενδομυελικού ήλου.

Για να εξασφαλίσουμε ότι τα τμήματα του οστού έχουν σωστή επαφή μεταξύ τους και δεν απομακρύνθηκαν κατά την εισαγωγή του καρφιού μέσα από το εγγύς τμήμα και στη

συνέχεια μέσα από το απομακρυσμένο τμήμα, εισάγουμε το καρφί μέσα και από τα δύο τμήματα του οστού και κλειδώνουμε το καρφί πάνω στο απομακρυσμένο τμήμα του οστού εισάγοντας τουλάχιστον δύο εγκάρσιες βίδες. Στη συνέχεια, τραβάμε το καρφί πάλι λίγο προς τα έξω ώστε τα τμήματα του οστού να έρθουν σε καλή επαφή μεταξύ τους και σταθεροποιούμε και το εγγύς τμήμα του οστού πάνω στο καρφί χρησιμοποιώντας επιπλέον βίδες. Είναι σημαντικό κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας να μην αφήσουμε τμήμα του καρφιού να ξεχωρίζει από το πάνω μέρος της κνήμης, γιατί τότε θα προκληθεί φλεγμονή της κλείδωσης του γονάτου.

Η εγχειρητική διαδικασία στην περίπτωση θεραπείας καταγμάτων του μηριαίου ή του βραχιόνιου οστού είναι αντίστοιχη.

Β.Ι.4. Δυσκολίες της εγχειρητικής διαδικασίας

Το δυσκολότερο μέρος της εγχειρητικής διαδικασίας που περιγράφτηκε στην προηγούμενη παράγραφο είναι το «κλείδωμα» της θέσης του καρφιού πάνω στο οστό και ιδιαίτερα το κλείδωμα του καρφιού στο απομακρυσμένο τμήμα του οστού. Το «απομακρυσμένο κλείδωμα» (distal locking), δηλαδή η εισαγωγή των πλευρικών βιδών που θα εξασφαλίσουν τη σταθεροποίηση του καρφιού πάνω στο οστό και την αποτροπή της περιστροφής και της μετακίνησης του καρφιού είναι μία ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία και θεωρείται το δυσκολότερο μέρος της επέμβασης (Skjeldal & Backe, 1987). Ο λόγος για αυτή τη δυσκολία είναι ότι το καρφί παραμορφώνεται κατά αρκετά χιλιοστά κατά την εισαγωγή του στο μυελικό κανάλι καθώς εισάγεται στο οστό, καθώς το σχήμα του καρφιού συμμορφώνεται με το σχήμα του μυελικού καναλιού. Αποτέλεσμα της παραμόρφωσης αυτής είναι ότι η ακριβής θέση των αξόνων των τρυπών που αντιστοιχούν στο απομακρυσμένο μέρος του οστού δεν μπορούν να προσδιοριστεί εκ των προτέρων.

Για να μπορέσει να εντοπίσει το κατάλληλο σημείο εισόδου και να ευθυγραμμίσει την ευθεία του τρυπανιού με τους άξονες των τρυπών του καρφιού, ο χειρούργος κατά κανόνα πρέπει να λάβει πολλαπλές εμπρόσθιες, οπίσθιες και πλάγιες ακτινογραφικές απεικονίσεις του οστού με το καρφί μέσα του χρησιμοποιώντας ένα φορητό ακτινογραφικό μηχάνημα (γνωστό και ως C-arm από το σχήμα που διαγράφει το κινητό τμήμα του μηχανήματος που φέρει τον πομπό των ακτίνων X). Το τρύπημα του οστού με το τρυπάνι

προχωράει σταδιακά και κάθε πρόοδος που σημειώνεται επιβεβαιώνεται εκ νέου με νέες ακτινογραφίες.

Μόλις σχηματιστεί η πρώτη τρύπα που ευθυγραμμίζεται με την τρύπα του καρφιού που αντιστοιχεί στο απομακρυσμένο τμήμα του οστού, εισάγεται και σταθεροποιείται η αντίστοιχη βίδα. Οι επιπλοκές που μπορεί να παρουσιαστούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής περιλαμβάνουν την ανεπαρκή σταθεροποίηση, την επίτευξη κακής στροφικής θέσης, το ράγισμα του οστού, τη διάτρηση των τοιχωμάτων του φλοιού του οστού και την αποδυνάμωση του οστού λόγω πολλαπλών ή υπερβολικά μεγάλων τρυπών. Στη σχετική βιβλιογραφία αναφέρεται πως η άμεση έκθεση του χειρούργου και του ασθενή σε ακτινοβολία ακτίνων Χ ανά επέμβαση με τη χρήση της διαδικασίας αυτής μπορεί να έχει διάρκεια από 3 έως 30 λεπτά της ώρας, εκ των οποίων το 31%-51% αναλώνονται στο απομακρυσμένο κλείδωμα του καρφιού, ανάλογα με την ανατομία του ασθενή και την ικανότητα του χειρούργου (Skjeldal & Backe, 1987).

Από τα ανωτέρω γίνεται σαφές ότι συστήματα τα οποία επιτρέπουν στο χειρούργο να εντοπίζει τη θέση και τον προσανατολισμό των αξόνων των τρυπών του με ακρίβεια και χωρίς την εκτεταμένη έκθεση του ιδίου και του ασθενούς σε δυνητικά επικίνδυνες δόσεις ακτινοβολίας όχι μόνο μειώνουν τους κινδύνους από την ακτινοβολία που δέχονται οι παρόντες στο χειρουργείο κατά τη διάρκεια της επέμβασης, αλλά μειώνουν και τον κίνδυνο ακούσιων περαιτέρω τραυματισμών στα οστά του ασθενή.

Β.Ι.5. Προσεγγίσεις στο σχεδιασμό συστημάτων υποβοήθησης των ενδομυελικών ηλώσεων.

Οι δυσκολίες που παρουσιάζει η εφαρμογή της τεχνικής των ενδομυελικών ηλώσεων οδήγησαν στην ανάπτυξη διαφόρων τεχνικών για την υποβοήθηση των χειρούργων κατά τη διάρκεια της επέμβασης. Γενικά μιλώντας, οι τεχνικές αυτές χωρίζονται σε τεχνικές με τη χρήση υπολογιστή και τεχνικές χωρίς χρήση του υπολογιστή.

Οι τεχνικές χωρίς τη χρήση υπολογιστή περιλαμβάνουν συσκευές που στερεώνονται στο εγγύς μέλος του οστού (Skjeldal & Backe, 1987), τη στερεοσκοπική προβολή των ακτινογραφιών (Ohe κ.α., 1997) και μηχανικούς οδηγούς (Krettek κ.α., 1999). Οι τεχνικές που περιλαμβάνουν τη χρήση υπολογιστή (τεχνικές τύπου CIS – Computer Integrated Surgery) χωρίζονται σε τεχνικές που κάνουν χρήση του υπολογιστή για να προσφέρουν πιο

εξελιγμένες απεικονίσεις ή ακόμα και τον αυτόματο υπολογισμό της επιθυμητής τροχιάς του τρυπανιού και τεχνικές που περιλαμβάνουν τη χρήση αυτόματων ρομποτικών συστημάτων για τη διάνοιξη της τρύπας.

Είτε γίνεται χρήση του υπολογιστή είτε όχι, ο κάθε τύπος τεχνικής χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ενώ κανένας τύπος τεχνικής δεν έχει καταφέρει να πάρει τη θέση ενός ευρέως διαδεδομένου προτύπου. Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να λάβει κανείς υπόψη όταν εξετάζει μία τέτοια τεχνική είναι πολλά και περιλαμβάνουν το κόστος ανάπτυξης ή εφαρμογής της τεχνικής, τη διαθεσιμότητα τον τύπο και το κόστος του εξοπλισμού που απαιτεί η τεχνική αυτή, την ευκολία εφαρμογής της, την ανάγκη παρουσίας ή όχι εξειδικευμένου προσωπικού για την εφαρμογή (π.χ. παρουσία ειδικευμένου τεχνικού ή εφαρμογή απευθείας από τον χειρούργο), την εφαρμοσιμότητα της τεχνικής σε ένα μεγάλο εύρος περιπτώσεων κ.α.. Φυσικά τα χαρακτηριστικά αυτά πρέπει να εξεταστούν σε αντιπαραβολή με τα εκτιμώμενα οφέλη που θα έχουμε από την εφαρμογή της τεχνικής αυτής (π.χ. μεγαλύτερη ασφάλεια για τον ασθενή, μικρότερη έκθεση σε ακτινοβολία, μικρότερη διάρκεια της επέμβασης κλπ).

Η ενδελεχής εξέταση των χαρακτηριστικών και των πλεονεκτημάτων ή των μειονεκτημάτων των διαφόρων τεχνικών ξεπερνάει τους σκοπούς της διατριβής αυτής, καθώς δεν είμαστε σε θέση να παρουσιάσουμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποβοήθησης της τεχνικής των ενδομυελικών ηλώσεων. Θα κάνουμε μία σύντομη αναφορά στις τεχνικές κατάτμησης και εξαγωγής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του καρφιού και των προβολών των τρυπών από τις ακτινογραφικές απεικονίσεις, οι οποίες τεχνικές παρουσιάζονται κάποιες από τα ολοκληρωμένα ή πρώιμα συστήματα που έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία για να αποκτήσουμε μία ιδέα των τεχνικών αυτών, χωρίς όμως να εισέλθουμε σε λεπτομέρειες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των ολοκληρωμένων συστημάτων υποβοήθησης της διαδικασίας της ενδομυελικής ήλωσης.

Για παράδειγμα, στο Yaniv & Joskowicz (2005) παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα αυτόματης διάνοιξης τρυπών με τη χρήση ενός εξειδικευμένου ρομπότ. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει ένα ρομπότ που στερεώνεται είτε στο οστό του ασθενή είτε στην κεφαλή του καρφιού και με τη χρήση μίας ή δύο ακτινογραφικών λήψεων κάνει μία εκτίμηση της θέσης των τρυπών του καρφιού και με κατάλληλους υπολογισμούς της θέσης της κάμερας σε σχέση με το καρφί και της παραμόρφωσης της εικόνας που μπορεί να προκύψει από το φυσικό μηχανισμό της εκπομπής και ανίχνευσης των ακτίνων X, ανιχνεύει και ανοίγει αυτόματα τις απαραίτητες τρύπες για τις βίδες στερέωσης του καρφιού. Για τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιείται ένα σύνολο γεωμετρικών οδηγών που έχουν ως

σκοπό την παροχή της απαραίτητης πληροφορίας για την εξαγωγή των διαφόρων παραμέτρων απεικόνισης και θέσης του οστού. Στην περίπτωση αυτή, οι ακμές του σώματος του καρφιού θεωρούνται ότι είναι παράλληλες ευθείες και εντοπίζονται με χρήση του τρισδιάστατου μετασχηματισμού Hough., ενώ οι τρύπες εντοπίζονται με χρήση μίας παραλληλόγραμμης μάσκας που σαρώνει το διαμήκη άξονα του καρφιού. Οι τρύπες εντοπίζονται με βάση τις ακμές που περιέχονται ανάμεσα στα ανιχνευθέντα άκρα του σώματος του καρφιού. Στην εργασία αυτή δε δίνονται λεπτομέρειες σχετικά με τις τεχνικές προεπεξεργασίας ή εξαγωγής των ακμών του καρφιού που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ για την εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των προβολών των τρυπών αναφέρεται πώς είναι απαραίτητη μία αρχική τοποθέτηση του συστήματος απεικόνισης με γωνία εκπομπής σχεδόν παράλληλη του άξονα των τρυπών, καθώς διαφορετικά το σύστημα μπορεί να δώσει λανθασμένες εκτιμήσεις των προβολών και απαιτείται παρέμβαση από τον τεχνικό.

Σε ένα άλλο, αντίστοιχο ρομποτικό σύστημα (Viant κ.α., 1995) τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καρφιού εξάγονται από τον χειριστή του συστήματος με απευθείας σημείωση πάνω στην εικόνα, ενώ στο Υαο κ.α., (2000) χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Hough τόσο για τον εντοπισμό των ακμών του καρφιού όσο και για τον εντοπισμό των προβολών των τρυπών. Αξίζει να σημειωθεί, πάντως, ότι στα ρομποτικά συστήματα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία η επιτυχία των αλγορίθμων προ-επεξεργασίας των ακτινογραφικών εικόνων, κατάτμησης και εντοπισμού των τρυπών του καρφιού θεωρείται σχετικά δεδομένη και δε δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα σε αυτή, ούτε γίνεται εκτενής επαλήθευση της υπόθεσης ότι το σύστημα θα αναγνωρίσει με επιτυχία τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καρφιού, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με διαφορετικά επίπεδα ή είδη θορύβου.

Από τις ελάχιστες δημοσιεύσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας που πραγματεύονται ενδελεχώς το πρόβλημα της εξαγωγής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του καρφιού και των προβολών των τρυπών από ακτινογραφικές εικόνες, αξίζει να σημειωθούν δύο. Στην Neatpisarnvanit & Suthakorn, (2006) γίνεται αναγνώριση του εξωτερικού σχήματος του καρφιού με χρήση μετασχηματισμού Hough και στη συνέχεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των προβολών εξάγονται με χρήση ανάλυσης Blob, μίας μεθόδου που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό συσσωματωμάτων εικονοστοιχείων σε μία εικόνα. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν κανονικές φωτογραφίες καρφιού, οι οποίες τροποποιήθηκαν κατάλληλα ώστε η απεικόνιση του καρφιού να προσομοιάζει την απεικόνιση που θα λάμβανε κανείς εάν χρησιμοποιούσε ακτινογραφικό μηχάνημα.

Στην Kamarianakis, Bulliev & Pallikarakis (2010) αναλύονται διάφοροι αλγόριθμοι εντοπισμοί και εξαγωγής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των προβολών των τρυπών. Στην εργασία αυτή θεωρείται δεδομένο ότι οι ακμές και τα κέντρα των τρυπών έχουν εντοπιστεί με επιτυχία, ενώ για την εφαρμογή των αλγορίθμων τίθενται περιορισμοί σχετικά με το εύρος των προσδοκώμενων τιμών που μπορεί να πάρουν οι σχετικές γεωμετρικές παράμετροι. Σε αυτή την εργασία οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν δημιουργήθηκαν με χρήση εικονικών μοντέλων των καρφιών, ειδικών εργαλείων προσομοίωσης ακτινογραφικών απεικονίσεων, καθώς και εικονικών μοντέλων του οστού και του περιβάλλοντος ιστού σε συνδυασμό με εκτιμήσεις σχετικά με την απορρόφηση των ακτίνων X των υλικών και ουσιών που υποβάλλονται σε ακτινογράφηση. Οι συγγραφείς καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των τρυπών με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων είναι ακριβέστερη και υπολογιστικά συντομότερη από άλλες αντίστοιχες μεθόδους.

Κατά τη γνώμη μας, η χρήση του μετασχηματισμού Hough., ο οποίος εφαρμόζεται στις περισσότερες περιπτώσεις στη βιβλιογραφία για τον εντοπισμό των ακμών του καρφιού, δεν αποτελεί αξιόπιστη επιλογή. Όπως φαίνεται στις εικόνες που παραθέτουν οι ερευνητές, ο μετασχηματισμός δεν δίνει ιδιαίτερα ακριβή αποτελέσματα, ενώ για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτείται μεγάλος αριθμός υπολογισμών με αντίστοιχη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Επίσης, σε περίπτωση παραμόρφωσης του καρφιού κατά την εισαγωγή του στο οστό ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί να δώσει εξαιρετικά αναξιόπιστα, έως και λανθασμένα, αποτελέσματα. Επιπλέον, η χρήση τεχνητά διαμορφωμένων εικόνων, είτε η διαμόρφωση γίνεται με τεχνητή αλλοίωση μέσω χρήσης προγραμμάτων επεξεργασίας εικόνας από τους ερευνητές είτε με χρήση προσομοιώσεων των ακτινογραφικών απεικονίσεων, θέτει την αξιοπιστία του συστήματος και την εφαρμοσιμότητά του σε πραγματικές περιπτώσεις υπό αμφισβήτηση.

Β.Ι.6. Βιβλιογραφική ανάλυση αλγορίθμων κατάτμησης ιατρικής εικόνας

Β.Ι.6.i. Εισαγωγή

Για την ανάλυση ιατρικών εικόνων με χρήση υπολογιστή, είναι απαραίτητη η εξαγωγή της χρήσιμης πληροφορίας από τις σχετικές εικόνες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κατάλληλοι αλγόριθμοι οι οποίοι επιτρέπουν το διαχωρισμό της εικόνας σε διαφορετικές θεματικές περιοχές, ανάλογα με ορισμένα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Οι αλγόριθμοι αυτοί, που ονομάζονται αλγόριθμοι κατάτμησης εικόνας, παίζουν ζωτικό ρόλο σε πολυάριθμες εφαρμογές βιοϊατρικής απεικόνισης, όπως είναι η ποσοτικοποίηση του όγκου διαφόρων ιστών (Larie & Abukmeil, 1998), η διάγνωση (Taylor, 1995), ο εντοπισμός παθολογικών καταστάσεων (Zijdenbos & Dawant, 1994), η μελέτη ανατομικών δομών (Worth, Makris, Caviness & Kennedy, 1997), ο σχεδιασμός θεραπείας (Khoo κ.α., 1997) και η εγχείρηση με χρήση υπολογιστή (Grimson κ.α., 1997).

Αυτό το μέρος παρέχει μια επισκόπηση μερικών από τις πιο πρόσφατες μεθόδους κατάτμησης, είτε αυτές κάνουν χρήση του υπολογιστή ως βοήθημα είτε είναι πλήρως αυτοματοποιημένες. Θα περιγράψουμε εν συντομία μεθόδους από την πιο πρόσφατη σχετική βιβλιογραφία, καθώς η εκτεταμένη ανάλυση της κάθε μεθόδου είναι πέρα από τους σκοπούς του κειμένου αυτού, ενώ οι αναγνώστες παραπέμπονται σε άλλες πηγές για περαιτέρω πληροφορίες. Θα εστιάσουμε στην εισαγωγή του αναγνώστη στις πιο δημοφιλείς παρούσες μεθόδους κατάτμησης ιατρικής εικόνας και τα διάφορα θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Αν και θα αναφερθούμε στις πιο κοινές τεχνικές ακτινολογικής απεικόνισης της ανατομίας, οι περισσότερες από τις έννοιες που θα παρουσιάσουμε εφαρμόζονται και σε άλλες τεχνικές απεικόνισης.

Επίσης, σκόπιμο είναι να αναφέρουμε ότι, παρόλο που έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι κατάτμησης που αναφέρονται σε εικόνες συγκεκριμένου τύπου ή συγκεκριμένων οργάνων του σώματος, σχεδόν όλες βασίζονται, σε κάποιο βαθμό, σε κάποια από τις τεχνικές κατάτμησης που θα παρουσιαστούν στο μέρος που ακολουθεί. Για το λόγο αυτό, αποφασίσαμε να εστιάσουμε μόνο στις βασικές μεθόδους κατάτμησης εικόνας και όχι σε εξειδικευμένες τεχνικές που απευθύνονται σε μεμονωμένες εφαρμογές.

Β.Ι.6.ii. Βασικές έννοιες – ορισμοί

Θα ξεκινήσουμε με την ορολογία που θα χρησιμοποιηθεί στο κείμενο αυτό και θα περιγράψουμε και κάποια βασικά θέματα που προκύπτουν στην διαδικασία της κατάτμησης ιατρικών εικόνων.

Μια εικόνα είναι ένα σύνολο μετρήσεων στο δισδιάστατο (2Δ) ή τρισδιάστατο (3Δ) χώρο. Στις ιατρικές εικόνες, οι μετρήσεις αυτές (ή «επίπεδα έντασης») μπορούν να είναι η απορρόφηση των ακτίνων σε μια ακτινογραφία, η ακουστική πίεση σε ένα υπερηχογράφημα ή το εύρος των ραδιοκυμάτων σε μια μαγνητική τομογραφία. Εάν σε κάθε θέση της εικόνας έχει γίνει μόνο μια μέτρηση, τότε η εικόνα ονομάζεται βαθμωτή ή μονόμετρη. Εάν έχουν γίνει περισσότερες από μία μετρήσεις (όπως, για παράδειγμα, σε μια μαγνητική τομογραφία διπλής ηχούς) τότε η εικόνα ονομάζεται διανυσματική ή πολυκάναλη. Οι τιμές της εικόνας μπορούν να έχουν συνεχές πεδίο ορισμού, όπως στο φιλμ μιας ακτινογραφίας, ή διακριτό, όπως σε μια μαγνητική τομογραφία. Στις ψηφιακές εικόνες 2Δ, η θέση της κάθε μέτρησης ονομάζεται εικονοστοιχείο ή pixel, ενώ στις εικόνες 3Δ ονομάζονται ογκοστοιχεία ή νοxel. Για λόγους απλότητας, θα χρησιμοποιήσουμε τον όρο «εικονοστοιχείο» και για τις δύο περιπτώσεις.

Γενικά, η κατάτμηση εικόνας ορίζεται ως η διαδικασία διαχωρισμού μιας εικόνας σε μη-αλληλοεπικαλυπτόμενες περιοχές, οι οποίες είναι ομογενείς με βάση κάποιο χαρακτηριστικό, όπως το χρωματικό επίπεδο ή η υφή (Haralick & Shapiro, 1985, Gonzalez & Woods, 1992, Pal & Pal, 1993). Εάν θεωρήσουμε ολόκληρη την εικόνα ως πεδίο ορισμού Ω , τότε η κατάτμηση της εικόνας συνίσταται στον προσδιορισμό των συνόλων $S_k \subset \Omega$, η ένωση των οποίων αποτελεί ολόκληρο το πεδίο Ω . Έτσι, τα σύνολα τα οποία θα προκύψουν από την κατάτμηση πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση:

$$Q = \bigcup_{k=1}^{K} S_k$$

όπου $S_k \bigcap S_j = \varnothing$ για $k \neq j$, και το κάθε S_k πρέπει να είναι συνδεδεμένο. Στην ιδανική περίπτωση, η μέθοδος κατάτμησης εντοπίζει τα σύνολα των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν σε διακριτές ανατομικές δομές ή περιοχές ενδιαφέροντος στην εικόνα.

Εάν αρθεί ο περιορισμός της συνδεσιμότητας των περιοχών, τότε ο προσδιορισμός των συνόλων S_k ονομάζεται κατάταξη εικονοστοιχείων και τα σύνολα ονομάζονται πλέον τάξεις (classes). Η κατάταξη εικονοστοιχείων, όπως και η κλασική κατάτμηση της εικόνας, είναι συχνά ένας επιθυμητός στόχος στις ιατρικές εικόνες, ειδικά όταν έχουμε ασύνδετες

περιοχές που ανήκουν στην ίδια τάξη ιστού που θέλουμε να αναγνωρίσουμε. Ο προσδιορισμός του συνολικού αριθμού τάξεων K στην κατάταξη εικονοστοιχείων αποτελεί ένα δύσκολο πρόβλημα (Langan, Modestino & Zang, 1998). Συχνά, η τιμή του K θεωρείται γνωστή με βάση πρότερη γνώση της ανατομίας που εξετάζεται. Για παράδειγμα, στην κατάτμηση εικόνων μαγνητικής τομογραφίας του εγκεφάλου, μια κοινή πρακτική είναι να θεωρούμε ότι K=3, όπου οι τρεις τάξεις αντιστοιχούν στη γκρίζα ύλη, τη λευκή ύλη και το εγκεφαλονωτιαίο υγρό (Rajapakse, Giedd & Rapoport, 1997).

Η διαδικασία του χαρακτηρισμού (labeling) συνίσταται στην ανάθεση μίας λογικής ονομασίας σε κάθε περιοχή ή τάξη που προέκυψε και μπορεί να εκτελεστεί ξεχωριστά από την κατάτμηση αυτή καθ' εαυτή. Κατά τη διαδικασία αυτή αντιστοιχούμε το δείκτη k του συνόλου S_k σε έναν ανατομικό προσδιορισμό. Στην ιατρική απεικόνιση, οι χαρακτηρισμοί (ή labels) είναι συνήθως προφανείς και μπορούν να ανατεθούν μέσω της εποπτείας ενός γιατρού ή τεχνικού. Ο αυτοματοποιημένος χαρακτηρισμός με χρήση υπολογιστή είναι επιθυμητός σε περιπτώσεις όπου οι αντιστοιχίες αυτές δεν είναι προφανείς, καθώς και σε περιπτώσεις πλήρως αυτοματοποιημένων συστημάτων. Μια τυπική περίπτωση που περιλαμβάνει το χαρακτηρισμό μίας περιοχής είναι η περίπτωση της ψηφιακής μαστογραφίας, στην οποία η εικόνα χωρίζεται σε διακριτές περιοχές και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως υγιείς ή ιστοί που περιέχουν κάποιον όγκο.

Σε αυτό το κείμενο εξετάζουμε και μεθόδους οι οποίες σκιαγραφούν μία ή περισσότερες δομές σε μια εικόνα, είτε αυτές βασίζονται σε κλασικές τεχνικές κατάτμησης είτε σε τεχνικές ταξινόμησης εικονοστοιχείων. Αν και δε θα εξετάσουμε συγκεκριμένες μεθόδους χαρακτηρισμού, θα παρουσιάσουμε μερικές τεχνικές που επιτρέπουν ταυτόχρονα την κατάτμηση και το χαρακτηρισμό. Δύο άλλοι τομείς που δε θα εξετάσουμε εδώ αλλά συγγενεύουν στενά με την κατάτμηση εικόνας είναι η ανίχνευση χαρακτηριστικών και η εκτίμηση κίνησης. Η ανίχνευση χαρακτηριστικών ασχολείται με τον προσδιορισμό της παρουσίας (ή της απουσίας) κάποιας ιδιότητας της εικόνας, ενώ η κατάτμηση γενικώς θεωρεί ότι η ιδιότητα αυτή είναι σίγουρα παρούσα και προσπαθεί να εντοπίσει επακριβώς της περιοχές της εικόνας που παρουσιάζουν την ιδιότητα αυτή. Για παράδειγμα, οι μέθοδοι ανίχνευσης ακμών (edge detection) μπορούν να εντοπίσουν τη θέση των ακμών σε μια εικόνα αλλά, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία, οι μέθοδοι αυτοί δεν εξάγουν απαραίτητα και την περιοχή ενδιαφέροντος από την εικόνα. Παρ' όλα αυτά, η ανίχνευση ακμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους ως μέρος ενός αλγορίθμου κατάτμησης. Οι μέθοδοι εκτίμησης κίνησης συχνά περιλαμβάνουν την εφαρμογή αλγορίθμων κατάτμησης σε εικόνες που σχηματίζουν μια χρονική ακολουθία. Θεωρούμε ότι αυτή η

εφαρμογή της κατάτμησης αποτελεί έναν ξεχωριστό κλάδο έρευνας και δεν περιλαμβάνουμε σχετικές μεθόδους στο κείμενο αυτό.

Β.Ι.6.iii. Διαστάσεις

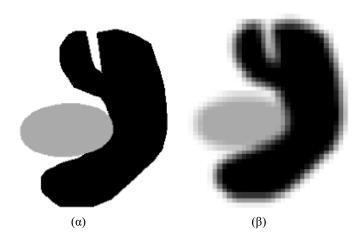
Ο αριθμός των διαστάσεων στις οποίες εφαρμόζονται οι τεχνικές κατάτμησης αφορούν το κατά πόσο οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται σε μια εικόνα με δισδιάστατο (2Δ) ή τρισδιάστατο (3Δ) πεδίο ορισμού. Οι μέθοδοι που εξετάζουν αποκλειστικά τα χρωματικά επίπεδα της εικόνας είναι ανεξάρτητες από το πεδίο ορισμού της εικόνας. Αντίθετα, ορισμένες μέθοδοι όπως τα παραμορφώσιμα μοντέλα (deformable models), τα τυχαία πεδία Markov (MRF) και η προσαύξηση περιοχής (region growing) χρησιμοποιούν χωρική πληροφορία και επομένως μπορεί να λειτουργούν διαφορετικά ανάλογα με τον αριθμό των διαστάσεων της εικόνας. Γενικά, οι μέθοδοι 2Δ εφαρμόζονται σε εικόνες 2Δ, ενώ οι μέθοδοι 3Δ εφαρμόζονται σε εικόνες 3Δ. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όμως, οι μέθοδοι 2Δ μπορούν να εφαρμοστούν κατ' εξακολούθηση σε τομές μίας εικόνας 3Δ (Pham, Prince, Dagher & Xu, 1997, Ge κ.α., 1996). Αυτό μπορεί να συμβεί για λόγους πρακτικότητας, όπως η ευκολία υλοποίησης, η χαμηλότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα και οι μειωμένες απαιτήσεις μνήμης. Επιπλέον, ορισμένες δομές ορίζονται πιο εύκολα με χρήση τομών 2Δ.

Μία ιδιάζουσα περίπτωση που προκύπτει σε ορισμένες περιπτώσεις κατάτμησης ιατρικών εικόνων είναι η σκιαγράφηση περιοχών σε μη-ευκλείδειο χώρο, όπως ο χωρισμός του εγκεφαλικού φλοιού σε μέρη (Rademacher, Galaburda, Kennedy, Filipek & Caviness, 1992, Sandor & Leahy, 1997). Στην περίπτωση αυτή έχουμε κατάτμηση πάνω σε μια επιφάνεια μετρήσεων. Αφού μια επιφάνεια είναι ένα αντικείμενο 2Δ το οποίο έχει αναδιπλωθεί στο 3Δ χώρο, η κατάτμηση αυτή δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί άμεσα ούτε μια τεχνικές 2Δ ούτε με τεχνικές 3Δ. Η μοντελοποίηση των χωρικών χαρακτηριστικών κατά μήκος μιας επιφάνειας είναι πολύ πιο δύσκολη από ότι σε μια απλή επίπεδη εικόνα λόγω της άτακτης δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται από τις αναπαραστάσεις πλέγματος και λόγω της ανάγκης υπολογισμού γεωδαιτικών γραμμών (Khaneja, Miller, Grenander 1998). Αυτός ο τομέας έρευνας γνωρίζει άνθιση και τα προκαταρκτικά αποτελέσματα είναι εξαιρετικά ενθαρρυντικά, ιδιαίτερα για τη μελέτη της εγκεφαλικής δομής και λειτουργίας.

Β.Ι.6.iv. Χαλαρή κατάτμηση και Φαινόμενα Μερικού Όγκου

Τα φαινόμενα μερικού όγκου προκύπτουν όταν πολλαπλοί τύποι ιστών συνεισφέρουν στη διαμόρφωση του χρώματος ή της απόχρωσης του γκρι ενός εικονοστοιχείου, που έχει ως αποτέλεσμα τη θόλωση των ακμών των οργάνων που απεικονίζονται. Το Σχήμα Β.5 δείχνει πώς η διαδικασία δειγματοληψίας μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα μερικού όγκου, τα οποία δυσκολεύουν τον προσδιορισμό των δομών. Στο (β) βλέπουμε πως είναι δύσκολο να προσδιορίσουμε τα όρια των δύο αντικειμένων. Τα φαινόμενα μερικού όγκου εμφανίζονται συχνά στις ιατρικές εικόνες και ιδιαίτερα στις αξονικές και μαγνητικές τομογραφίες 3Δ, στις οποίες η ανάλυση δεν είναι ισοτροπική και, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι αρκετά χαμηλή κατά μήκος ενός από τους άξονες της εικόνας. Η χαμηλή ανάλυση συχνά αγνοείται στην πρώιμη βιβλιογραφία που ασχολείται με την κατάτμηση εικόνων μαγνητικών τομογραφιών αλλά πρόσφατα αναπτύχθηκαν όχι μόνο βελτιωμένες μέθοδοι που αντιμετωπίζουν τα φαινόμενα μερικού όγκου, αλλά και τεχνικές απεικόνισης με υψηλή ανάλυση.

Η πιο κοινή προσέγγιση στην αντιμετώπιση των φαινομένων μερικού όγκου είναι η παραγωγή κατατμήσεων που επιτρέπουν στις περιοχές ή τις τάξεις να αλληλοκαλύπτονται οι τεχνικές αυτές ονομάζονται «χαλαρές» κατατμήσεις (soft segmentation).



Σχήμα Β.5. Το φαινόμενου μερικού όγκου. (α) Ιδανική εικόνα. (β) Προκύπτουσα εικόνα.

Οι τυπικές τεχνικές χρησιμοποιούν «σκληρή» κατάτμηση (hard segmentation), κατά την οποία εφαρμόζεται μια δυαδική απόφαση σχετικά με το κατά πόσο ένα εικονοστοιχείο ανήκει ή όχι στο αντικείμενο που μας ενδιαφέρει. Οι χαλαρές κατατμήσεις, από την άλλη,

διατηρούν περισσότερες από τις πληροφορίες της αρχικής εικόνας επιτρέποντας κάποια αβεβαιότητα σχετικά με τη θέση των ακμών του αντικειμένου.

Στις μεθόδους κατάταξης εικονοστοιχείων, η έννοια της χαλαρής κατάτμησης προκύπτει από τη γενίκευση μιας «χαρακτηριστικής συνάρτησης» του συνόλου. Η χαρακτηριστική συνάρτηση είναι απλώς μια συνάρτηση η οποία καταδεικνύει κατά πόσο ένα εικονοστοιχείο βρίσκεται εντός ή εκτός του αντίστοιχου συνόλου. Για μια θέση $j \in I$, η χαρακτηριστική συνάρτηση $\chi_k(j)$ του συνόλου S_k ορίζεται ως εξής:

$$\chi_k(j) = \begin{cases}
1, & \text{εάν } j \in S_k \\
0, & \text{διαφορετικά}
\end{cases}$$

Μπορούμε να γενικεύσουμε τις χαρακτηριστικές συναρτήσεις και να τις κάνουμε «συναρτήσεις υπαγωγής» (membership functions) (Zadeh, 1965), οι οποίες δεν παίρνουν απαραίτητα δυαδικές τιμές. Οι συναρτήσεις υπαγωγής $m_k(j)$ υπόκεινται στους ακόλουθους περιορισμούς:

$$0 \le m_k(j) \le 1$$
, για κάθε j,k
$$\sum_{k=1}^K m_k(j) = 1$$
, για κάθε j

Η τιμή μιας συγκεκριμένης συνάρτησης $m_k(j)$ μπορεί να θεωρηθεί ως η συνεισφορά της τάξης k στη θέση j. Επομένως, στα σημεία όπου οι τιμές υπαγωγής είναι μεγαλύτερες από το μηδέν για δύο ή περισσότερες τάξεις, αυτές οι τάξεις αλληλοκαλύπτονται. Αντίθετα, εάν η συνάρτηση υπαγωγής έχει τιμή 1 για κάποιες τιμές των j και k, τότε η τάξη k είναι η μοναδική τάξη που συνεισφέρει στη θέση j. Οι συναρτήσεις υπαγωγής μπορούν να προκύψουν με τη χρήση αλγορίθμων ασαφούς ομαδοποίησης και ταξινόμησης (Pham & Prince, 1999, Herndon, Lancaster, Toga & Fox, 1996) ή στατιστικών αλγορίθμων, στην οποία περίπτωση οι συναρτήσεις υπαγωγής είναι συναρτήσεις πιθανότητας (Liang, 1993). Επίσης, οι συναρτήσεις υπαγωγής μπορούν να προκύψουν και ως εκτιμήσεις κλασμάτων μερικού όγκου (Choi, Hanynor & Kim, 1991). Οι χαλαρές κατατμήσεις που βασίζονται σε συναρτήσεις υπαγωγής μπορούν να μετατραπούν εύκολα σε σκληρές κατατμήσεις με ανάθεση του εικονοστοιχείου στην τάξη με τη μεγαλύτερη τιμή υπαγωγής.

Β.Ι.6.ν. Χρωματικές ανομοιογένειες

Μια σοβαρή δυσκολία που προκύπτει συγνά κατά την κατάτμηση εικόνων μαγνητικών τομογραφιών είναι το «φαινόμενο χρωματικής ανομοιογένειας» (Simmons, Tofts, Barker & Arridge, 1994, Sled & Pike, 1998), το οποίο προκαλεί την εμφάνιση μιας σκιάς πάνω στην εικόνα. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόδοση των μεθόδων που θεωρούν ότι η χρωματική τιμή μίας τάξης ιστού είναι σταθερή μέσα στην εικόνα. Αν και οι βελτιώσεις στην τεχνολογία των απεικονιστικών συσκευών έχουν μειώσει την εμφάνιση και την ένταση του φαινομένου αυτού, οι ανομοιογένειες παραμένουν ένα σοβαρό πρόβλημα, ιδιαίτερα σε εικόνες που προκύπτουν με τη χρήση επιφανειακών πηνίων. Πολλές προσεγγίσεις έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την κατάτμηση ιστών παρά την παρουσία γρωματικών ανομοιογενειών. Μερικές μέθοδοι προτείνουν ένα προκαταρκτικό φιλτράρισμα της εικόνας με σκοπό την αφαίρεση της ανομοιογένειας πριν την κατάτμηση (Dawant, Zijidenbos & Margolin, 1993, Meyer, Peyton & Pipe, 1995, Brinkmann, Manduca & Robb, 1998, Sled, Zijdenbos & Evans, 1998). Όμως, οι μέθοδοι, οι οποίες περιλαμβάνουν ταυτόχρονη κατάτμηση και εκτίμηση της ανομοιογένειας, προσφέρουν το πλεονέκτημα της δυνατότητας χρήσης της ενδιάμεσης πληροφορίας που προκύπτει από την κατάτμηση.

Υπάρχουν δύο δημοφιλείς προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση των ανομοιογενειών στις μεθόδους που διενεργούν ταυτόχρονα κατάτμηση. Η πρώτη προσέγγιση υποθέτει ότι η μέση χρωματική ένταση κάθε ιστού παρουσιάζει μεταβολές στο χώρο και πως αυτές οι μέσες εντάσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους (Rajapakse, Giedd & Rapoport. 1997, Pappas, 1992). Η δεύτερη προσέγγιση μοντελοποιεί τις ανομοιογένειες ως ένα πεδίο πολλαπλασιαστικού κέρδους (multiplicative gain field) (Pham & Prince, 1999) ή ως ένα πεδίο προστιθέμενης σταθεράς (additive bias field) στο λογάριθμο της εικόνας (Wells, Grimson, Kikins & Jolesz, 1996, Held κ.α., 1997). Δεν είναι σαφές το ποια από τις δύο μεθόδους έχει ως αποτέλεσμα πιο ακριβή μοντέλα των αποτελεσμάτων των ανομοιογενειών, αν και η δεύτερη προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα των χαμηλότερων υπολογιστικών απαιτήσεων. Η δεύτερη προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την αφαίρεση ανομοιογενειών μέσω απλού πολλαπλασιασμού της εικόνας με το αντίστροφο του εκτιμώμενου πεδίου κέρδους.

Β.Ι.6.νι. Αλληλεπίδραση

Η ισορροπία μεταξύ της ανάγκης αλληλεπίδρασης της εφαρμογής με το χρήστη και των επιδόσεων είναι ένα σοβαρό θέμα σε κάθε εφαρμογή κατάτμησης. Η αλληλεπίδραση με το χρήστη μπορεί να αυξήσει την ακρίβεια της εφαρμογής, καθώς επιτρέπει την εκμετάλλευση της γνώσης του χειριστή. Για μελέτες μεγάλων πληθυσμών, όμως, αυτό μπορεί να είναι κουραστικό και χρονοβόρο. Ο τύπος της αλληλεπίδρασης που εφαρμόζεται στις διάφορες μεθόδους κατάτμησης μπορεί να κυμαίνεται από την εντελώς χειροκίνητη σκιαγράφηση μιας ανατομικής δομής ως την επιλογή του σημείου εκκίνησης για έναν αλγόριθμο προσαύξησης περιοχής. Οι διαφορές σε αυτούς τους τύπους αλληλεπίδρασης βρίσκονται στο ποσό του χρόνου και της προσπάθειας που απαιτείται, καθώς και στο ποσό εκπαίδευσης που πρέπει να λάβει ο χειριστής. Οι μέθοδοι που βασίζονται στην αλληλεπίδραση με το χειριστή είναι ευάλωτες από πλευράς αξιοπιστίας. Παρ' όλα αυτά, ακόμα και οι αυτοματοποιημένες μέθοδοι κατάτμησης κατά κανόνα απαιτούν κάποιες αρχικές παραμέτρους, οι τιμές των οποίων μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση τους (Davenport, Bezdek & Hathaway, 1988).

Β.Ι.6.νιί. Επαλήθευση

Για να ποσοτικοποιήσουμε την απόδοση μιας μεθόδου κατάτμησης είναι απαραίτητο να κάνουμε πειράματα επαλήθευσης. Η επαλήθευση εκτελείται συνήθως με ένα από δύο διαφορετικά μοντέλα αληθείας. Η πιο άμεση προσέγγιση για την επαλήθευση είναι να συγκρίνουμε τις αυτοματοποιημένες κατατμήσεις με αυτές που προέκυψαν χειροκίνητα (Wust κ.α., 1998). Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο χαρακτηρίζεται από τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, αλλά δεν εγγυάται και τη δημιουργία ενός αλάνθαστου μοντέλου αληθείας, καθώς η απόδοση του χειριστή μπορεί να υποφέρει και αυτή από σφάλματα. Η άλλη κοινή προσέγγιση στην επαλήθευση των μεθόδων κατάτμησης είναι μέσω της χρήσης φυσικών (Lei & Sewchand, 1992) ή υπολογιστικών (Collins κ.α., 1998) αναπαραστάσεων. Οι φυσικές αναπαραστάσεις προσφέρουν μια ακριβή περιγραφή της διαδικασίας απεικόνισης αλλά γενικά δε δίνουν ρεαλιστικά μοντέλα της ανατομίας. Οι υπολογιστικές αναπαραστάσεις μπορούν να αναπαραστήσουν την ανατομία σχετικά ρεαλιστικά, αλλά συνήθως προσομοιώνουν την απεικονιστική διαδικασία με χρήση απλοποιημένων μοντέλων.

Όταν έχουμε διαθέσιμο ένα μοντέλο αληθείας πρέπει να ορίσουμε ένα μέτρο, το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε για να ποσοτικοποιήσουμε την ακρίβεια της μεθόδου. Η επιλογή του μέτρου αυτού εξαρτάται από την εφαρμογή και μπορεί να βασιστεί σε πληροφορίες της περιοχής, όπως τον αριθμό των εικονοστοιχείων που ταξινομήθηκαν εσφαλμένα, ή πληροφορίες των ορίων της περιοχής, όπως η απόσταση από το πραγματικό όριο της περιοχής (Chalana & Kim, 1997). Μια μελέτη πάνω στο θέμα παρουσιάστηκε στο Zhang, (1996).

Β.Ι.6.νιιί. Μέθοδοι

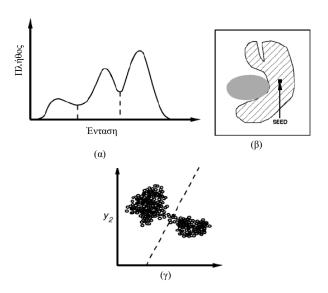
Υπάρχουν διάφορες κοινές προσεγγίσεις που έχουν εμφανιστεί στην πρόσφατη βιβλιογραφία πάνω στην κατάτμηση ιατρικών εικόνων. Θα ξεκινήσουμε με τον ορισμό της κάθε μεθόδου, θα δώσουμε μια εποπτική εικόνα της υλοποίησης της και θα αναλύσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της. Αν και κάθε τεχνική περιγράφεται ξεχωριστά, πολλές φορές για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων χρησιμοποιούνται πολλές τεχνικές μαζί.

Θα χωρίσουμε της μεθόδους κατάτμησης σε 8 κατηγορίες: (α) Μεθόδους κατωφλίου (thresholding), (β) μεθόδους προσαύξησης περιοχής (region growing), (γ) ταξινομητές (classifiers), (δ) μεθόδους ομαδοποίησης (clustering), (ε) μοντέλα τυχαίων πεδίων Μαρκώφ (MRF models), (στ) τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks), (ζ) παραμορφώσιμα μοντέλα (deformable models) και (η) μεθόδους με χρήση άτλαντα (atlas guided). Από της μεθόδους που θα αναλύσουμε σε αυτό το κεφάλαιο, οι μέθοδοι κατωφλίου, ταξινομητών, ομαδοποίησης και MRF μπορούν να θεωρηθούν ως μέθοδοι ταξινόμησης εικονοστοιχείων.

Υπάρχουν αρκετές έρευνες πάνω στην κατάτμηση κανονικών εικόνων (Haralick & Shapiro, 1985, Pal & Pal, 1993). Αρκετές έρευνες επικεντρώθηκαν συγκεκριμένα στην κατάτμηση εικόνων μαγνητικών τομογραφιών (Zijdenbos & Dawant, 1994, Brinkmann, Manduca & Robb 1998, Clarke κ.α., 1995). Επίσης, υπάρχουν και αρκετές άμεσες συγκρίσεις διαφορετικών μεθόδων κατάτμησης εικόνων μαγνητικών τομογραφιών (Vaidyanathan κ.α., 1995, Hall κ.α., 1992).

Β.Ι.6.ix. Μέθοδοι κατωφλίου

Οι μέθοδοι κατωφλίου χρησιμοποιούνται για την κατάτμηση μονόμετρων εικόνων μέσω του δυαδικού διαχωρισμού των χρωματικών εντάσεων της εικόνας. Το Σχήμα Β.6(α) δείχνει το ιστόγραμμα μίας μονόμετρης εικόνας που περιέχει τρεις διαφορετικές τάξεις, που αντιστοιχούν σε τρία διαφορετικά είδη ιστού. Η διαδικασία προσδιορισμού κατωφλίου περιλαμβάνει τον υπολογισμό της χρωματικής τιμής, που ονομάζεται κατώφλι, η οποία χωρίζει τις επιθυμητές τάξεις. Στη συνέχεια, η κατάτμηση επιτυγχάνεται με την ομαδοποίηση όλων των εικονοστοιχείων που έχουν χρωματική τιμή μεγαλύτερη από το κατώφλι σε μία τάξη και όλων των υπολοίπων σε μια άλλη τάξη. Δύο πιθανά κατώφλια τιμής φαίνονται στο Σχήμα Β.5(α) στις κοιλάδες του ιστογράμματος. Πολλές φορές μπορεί να χρειαστεί να υπολογίσουμε περισσότερα από ένα κατώφλια, στην οποία περίπτωση μιλάμε και μέθοδο πολλαπλών κατωφλιών.



Σχήμα **Β.6.** Μέθοδοι με βάση τα χαρακτηριστικά των εικονοστοιχείων της εικόνας. (a) Ιστόγραμμα με τρεις προφανείς τάζεις. (β) Προσαύζηση περιοχής. (γ) Δισδιάστατος χώρος χαρακτηριστικών.

Ο υπολογισμός κατωφλίου είναι μια απλή αλλά αποτελεσματική μέθοδος για να εκτελέσουμε κατάτμηση εικόνων στις οποίες οι διαφορετικές δομές παρουσιάζουν χρωματική αντίθεση ή άλλα ποσοτικοποιήσιμα χαρακτηριστικά. Η κατάτμηση γίνεται

συνήθως με χρήση αλληλεπίδρασης, αν και υπάρχουν και αυτοματοποιημένες μέθοδοι (Sahoo, Soltani & Wong, 1988). Ο προσδιορισμός του κατωφλίου γίνεται και αυτός συνήθως με χρήση αλληλεπίδρασης και κυρίως με βάση την εποπτική εκτίμηση της κατάτμησης που προκύπτει από το χειριστή.

Ο προσδιορισμός κατωφλίου χρησιμοποιείται συχνά ως το πρώτο βήμα μιας μεθόδου επεξεργασίας εικόνας (Singleton & Prohost, 1997, Gordon, Webber, Adachi, Christoforou, 1996). Έχει εφαρμοστεί στην ψηφιακή μαστογραφία, στην οποία συνήθως έχουμε δύο τάξεις ιστών παρούσες – τον υγιή ιστό και τον όγκο (Polakowski κ.α., 1997, Cheng, Lui & Freimanis, 1998). Οι βασικότεροι περιορισμοί των μεθόδων αυτών είναι ότι από τη μία, στην απλούστερη μορφή τους, παράγονται μόνο δύο τάξεις και, από την άλλη, δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε πολυκάναλες εικόνες. Επίσης, ο προσδιορισμός κατωφλίου κατά κανόνα δε λαμβάνει υπόψη τα χωρικά χαρακτηριστικά της εικόνας. Το χαρακτηριστικό αυτό κάνει τη μέθοδο αυτή να είναι ευαίσθητη σε θόρυβο και χρωματικές ανομοιογένειες, οι οποίες μπορούν να προκύψουν σε εικόνες μαγνητικής τομογραφίας. Και τα δύο φαινόμενα αυτά αλλοιώνουν αισθητά το ιστόγραμμα της εικόνας, γεγονός που κάνει το διαχωρισμό ακόμα πιο δύσκολο. Για τους λόγους αυτούς, έχουν προταθεί παραλλαγές στο κλασικό προσδιορισμό κατωφλίου για ιατρικές εικόνες, οι οποίες κάνουν χρήση πληροφορίας που βασίζεται σε τοπικές χρωματικές εντάσεις (Li, Kallergi, Clarke, Jain & Clark, 1995) και τη συνδεσιμότητα (Lee, Hun, Ketter, & Unser, 1998). Μια εποπτική μελέτη των τεχνικών κατωφλίου μπορεί να βρεθεί στο Sahoo, Soltani & Wong, (1988).

Β.Ι.6.χ. Προσαύξηση περιοχής

Η προσαύξηση περιοχής είναι μια τεχνική για την εξαγωγή μιας περιοχής, η οποία είναι συνδεδεμένη, από την εικόνα με βάση κάποια προκαθορισμένα κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά μπορούν να βασίζονται σε πληροφορίες σχετικά με το χρωματικό περιεχόμενο ή/και τις ακμές που υπάρχουν στην εικόνα. Στην απλούστερη της μορφή, η τεχνική της προσαύξησης περιοχής απαιτεί ένα σημείο εκκίνησης, το οποίο επιλέγεται από το χειριστή, και στη συνέχεια εξάγει όλα τα εικονοστοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα με το σημείο εκκίνησης με βάση κάποια κριτήρια. Για παράδειγμα, ένα πιθανό κριτήριο μπορεί να είναι να αυξάνουμε την περιοχή μέχρι να συναντήσουμε μία ακμή στην εικόνα. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα Β.6(β), όπου η προσαύξηση περιοχής έχει χρησιμοποιηθεί για να εξάγουμε μία από της δομές του Σχήματος Β.5(α).

Όπως και οι τεχνικές κατωφλίου, έτσι και η προσαύξηση περιοχής χρησιμοποιείται σπάνια από μόνη της. Στην πραγματικότητα, αποτελεί συνήθως μέρος μιας σειράς διεργασιών επεξεργασίας εικόνας, ειδικά για τη σκιαγράφηση μικρών, απλών δομών όπως είναι οι όγκοι και οι κακώσεις (Gibbs, Buckley, Blackband & Horsman, 1996, Pohlman, Powell, Obuchowski, Chilcote & Broniatowski, 1996). Το βασικό μειονέκτημα της προσαύξησης περιοχής είναι ότι απαιτεί την αλληλεπίδραση με το χρήστη για να οριστεί το σημείο εκκίνησης. Έτσι, για κάθε περιοχή που θέλουμε να εξάγουμε είναι απαραίτητο να ορίσουμε ένα σημείο εκκίνησης. Οι αλγόριθμοι διάσπασης-και-συγχώνευσης (split-andmerge) είναι παρεμφερείς με την προσαύξηση περιοχής, αλλά δεν απαιτούν σημείο εκκίνησης (Manousakas, Undrill, Cameron & RedpatH., 1998). Η προσαύξηση περιοχής μπορεί να είναι επίσης ευαίσθητη στην παρουσία θορύβου, στην οποία περίπτωση παρουσιάζονται φαινόμενα όπως τρύπες στις εξαγχθείσες περιοχές ή ακόμα και ασυνέχειες. Από την άλλη, τα φαινόμενα μερικού όγκου μπορούν να κάνουν τις περιοχές να συνδεθούν ή και να συγχωνευθούν. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, έχει προταθεί ένας ομοτοπικός αλγόριθμος προσαύξησης περιοχής, ο οποίος διατηρεί την τοπολογία μεταξύ της αρχικής περιοχής και της εξαγόμενης περιοχής (Mangin κ.α., 1995). Επίσης, έχουν αναπτυχθεί και τεχνικές ανάλογες με την προσαύξηση περιοχής που κάνουν χρήση ασαφούς λογικής (Udupa & Samarasekera, (1996).).

Β.Ι.6.χί. Ταξινομητές

Οι μέθοδοι ταξινόμησης είναι τεχνικές αναγνώρισης προτύπων, οι οποίες προσπαθούν να τεμαχίσουν το πεδίο τιμών της εικόνας με χρήση δεδομένων με γνωστούς χαρακτηρισμούς (Bezdek, Hall & Clarke, 1993, Schalkoff, 1992). Το πεδίο τιμών μπορεί να προκύψει από την εφαρμογή οποιασδήποτε συνάρτησης πάνω στην εικόνα, με πιο κοινή περίπτωση το πεδίο τιμών να είναι οι χρωματικές εντάσεις της εικόνας. Το ιστόγραμμα της εικόνας, όπως φαίνεται στο Σχήμα Β.6(α), είναι ένα παράδειγμα ενός μονοδιάστατου πεδίου τιμών. Στο Σχήμα Β.6(γ) φαίνεται ένα πεδίο τιμών 2Δ με δύο προφανείς τάξεις. Ένα τέτοιο πεδίο τιμών μπορεί να προκύψει από μια μαγνητική τομογραφία διπλής ηχούς, στην οποία ο ένας άξονας παριστάνει τις εντάσεις της εικόνας με την πυκνότητα των πρωτονίων, ενώ ο άλλος άξονας παριστάνει τις εντάσεις της εικόνας T_2 . Όλα τα εικονοστοιχεία που έχουν τα

σχετικά χαρακτηριστικά τους στην αριστερή μεριά της τομής θα ομαδοποιηθούν σε μία τάξη.

Οι ταξινομητές ανήκουν στις μεθόδους που απαιτούν επίβλεψη, καθώς απαιτούν δεδομένα «εκπαίδευσης», τα οποία εισάγονται με το χέρι και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την αυτόματη κατάτμηση των νέων δεδομένων. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους τα εκπαιδευτικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις μεθόδους ταξινόμησης. Ο ταξινομητής κ-κοντινότερων-γειτόνων είναι η γενικότερη τέτοια προσέγγιση, στην οποία το εικονοστοιχείο ταξινομείται στην ίδια τάξη με την πλειοψηφία των κ-κοντινότερων δεδομένων εκπαίδευσης. Ο ταξινομητής κ-κοντινότερων-γειτόνων θεωρείται ένας μη-παραμετροποιημένος ταξινομητής, καθώς δεν υπάρχει κάποια πρότερη θεώρηση σχετικά με τη στατιστική φύση των δεδομένων. Ένας άλλος μη-παραμετροποιημένος ταξινομητής είναι το παράθυρο Πάρζεν, στο οποίο η ταξινόμηση γίνεται μέσω μιας διαδικασία αποφάσεων με βάρη μέσα σε ένα προκαθορισμένο παράθυρο του πεδίου τιμών, το οποίο έχει ως κέντρο του την ένταση των μη-χαρακτηρισμένων εικονοστοιχείων.

Ένας ταξινομητής που χρησιμοποιείται συχνά με παραμέτρους είναι ο ταξινομητής μέγιστης πιθανότητας ή ταξινομητής *Bayes*. Εδώ έχουμε την υπόθεση ότι οι εντάσεις των εικονοστοιχείων είναι ανεξάρτητα δείγματα από ένα μείγμα κατανομών πιθανοτήτων, συνήθως κανονικών. Το μείγμα αυτό, το οποίο ονομάζεται μοντέλο πεπερασμένου μείγματος, δίνεται από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$f(y_j;\theta,\pi) = \sum_{k=1}^{K} \pi_k f_k(y_j;\theta_k)$$

όπου y_j είναι η χρωματική ένταση του εικονοστοιχείου j και f_k είναι μία από της συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας, παραμετροποιημένη από τη θ_k , με $\theta = [\theta_I, ..., \theta_K]$. Οι μεταβλητές π_k είναι συντελεστές ανάμιξης, οι οποίοι ρυθμίζουν τη συνεισφορά της κάθε συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, ενώ $\pi = [\pi_I, ..., \pi_K]$. Τα δεδομένα εκπαίδευσης συλλέγονται μέσω αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από κάθε στοιχείο του μοντέλου μείγματος και κατάλληλης εκτίμησης της κάθε θ_k . Για μείγματα Γκαουσιανών μεταβλητών, αυτό σημαίνει την εκτίμηση K-μέσων όρων, συνδιασπορών και συντελεστών ανάμιξης. Η ταξινόμηση νέων δεδομένων προκύπτει με την ανάθεση του κάθε εικονοστοιχείου στην τάξη με τη μεγαλύτερη ύστερη πιθανότητα. Όταν τα δεδομένα ανήκουν πραγματικά σε ένα πεπερασμένο Γκαουσιανό μείγμα κατανομών, τότε ο ταξινομητής μέγιστης πιθανότητας αποδίδει καλά και είναι ικανός να δώσει μια χαλαρή κατάτμηση που αποτελείται από τις

ύστερες πιθανότητες. Άλλοι παραμετροποιημένοι και μη ταξινομητές παρουσιάζονται στο Zijdenbos & Dawant, (1994).

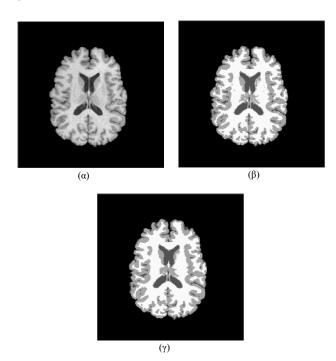
Η χρήση των τυπικών ταξινομητών προϋποθέτει ότι οι δομές που θα κατατμηθούν έχουν διακριτά και ποσοτικοποιήσιμα γαρακτηριστικά. Επειδή τα δεδομένα εκπαίδευσης μπορεί να έχουν συσχετιστεί και με συγκεκριμένους χαρακτηρισμούς, οι ταξινομητές μπορούν να μεταφέρουν τους γαρακτηρισμούς αυτούς στα νέα δεδομένα, εφόσον κάθε χαρακτηρισμός είναι επαρκώς διακριτός και στο πεδίο τιμών. Επειδή δεν είναι αναδρομικοί, οι ταξινομητές είναι σχετικά αποτελεσματικοί από υπολογιστικής άποψης και, σε αντίθεση με τις μεθόδους κατωφλίου, μπορούν να εφαρμοστούν σε πολυκάναλες εικόνες (Vannier, 1985). Ένα μειονέκτημα των ταξινομητών είναι ότι γενικώς δεν κάνουν μοντελοποίηση στο χώρο. Αυτή η αδυναμία έχει αντιμετωπιστεί σε πρόσφατες έρευνες που επεκτείνουν τη χρήση ταξινομητών στην κατάτμηση εικόνων που έχουν φθαρεί από χρωματικές ανομοιογένειες (Wells, Grimson, Kikins & Jolesz, 1996). Οι πληροφορίες από την περιοχή και τη γεωμετρία της δομής χρησιμοποιήθηκαν, επίσης, σε μία προσέγγιση ταξινόμησης που έγινε στο Kapur, Grimson, Kikinis & Wells (1998). Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η απαίτηση της χειροκίνητης αλληλεπίδρασης για την εξαγωγή των δεδομένων εκπαίδευσης. Τα εκπαιδευτικά δεδομένα μπορούν να εξαγθούν για κάθε εικόνα που θέλουμε να εξετάσουμε, αλλά αυτό μπορεί να είναι χρονοβόρο και κουραστικό. Από την άλλη, η χρήση του ίδιου συνόλου εκπαιδευτικών δεδομένων για ένα μεγάλο αριθμό εικόνων μπορεί να οδηγήσει σε αναξιόπιστα δεδομένα, που δε λαμβάνουν υπόψη τους τις ανατομικές και σωματικές διαφορές ανάμεσα σε διαφορετικούς ασθενείς.

Β.Ι.6. κιί. Ομαδοποίηση

Οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης είναι παρόμοιοι σε λειτουργία με τους ταξινομητές, χωρίς όμως τη χρήση «εκπαιδευτικών» δεδομένων. Επομένως, πρόκειται για ανεπιτήρητες μεθόδους. Για να αντισταθμίσουν την έλλειψη εκπαιδευτικών δεδομένων, οι μέθοδοι ομαδοποίησης εξετάζουν εναλλάξ και κατ' επανάληψη τη χωρισμένη εικόνα και τις χαρακτηριστικές ιδιότητες της κάθε τάξης. Κατά μία έννοια, οι μέθοδοι ομαδοποίησης εκπαιδεύουν τον εαυτό τους χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα δεδομένα.

Τρεις κοινοί αλγόριθμοι ομαδοποίησης είναι: ο αλγόριθμος *K*-μέσων (*K-means*) ή ISODATA (Coleman & Andrews, 1979), ο αλγόριθμος ασαφών *c*-μέσων (*fuzzy c-means*)

(Bezdek, Hall & Clarke, 1993) και ο αλγόριθμος ελαχιστοποίησης πιθανότητας-προσδοκίας (expectation-minimization, ή EM) (Lei & Sewchand, 1992, Liang Z, MacFall & Harrington, 1994). Ο αλγόριθμος Κ-μέσων ομαδοποιεί τα δεδομένα υπολογίζοντας μια μέση γρωματική ένταση για κάθε τάξη και γωρίζοντας την εικόνα κατατάσσοντας κάθε εικονοστοιχείο στην τάξη με τον κοντινότερο μέσο (Jain & Dubes, 1988). Το Σχήμα Β.7(β) δείχνει το αποτέλεσμα της εφαρμογής του αλγορίθμου αυτού σε μία εικόνα μαγνητικής τομογραφίας, η οποία φαίνεται στο Σχήμα Β.7(α). Εδώ υποθέσαμε ότι έχουμε τρεις τάξεις, οι οποίες αντιπροσωπεύουν (από το σκούρο γκρι ως το λευκό του Σχήματος Β.7(β)) το εγκεφαλονωτιαίο υγρό, τη φαιά ουσία και τη λευκή ουσία αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος ασαφών c-μέσων αποτελεί μια γενίκευση του αλγορίθμου K-μέσων, που επιτρέπει χαλαρές κατατμήσεις και είναι βασισμένος στη θεωρία ασαφών συνόλων (ZadeH., 1965). Ο αλγόριθμος ΕΜ χρησιμοποιεί τις ίδιες αρχές ομαδοποίησης με τη θεώρηση όμως ότι τα δεδομένα ακολουθούν ένα μοντέλο Γκαουσιανού μίγματος (βλέπε προηγούμενη εξίσωση). Εδώ έχουμε τον κατ' επανάληψη υπολογισμό των υστέρων πιθανοτήτων και μεγιστοπίθανων εκτιμήσεων των μέσων, των συνδιασπορών και των συντελεστών ανάμιξης του μοντέλου του μίγματος.



Σχήμα Β.7. Κατάτμηση μίας μαγνητικής τομογραφίας εγκεφάλου. (a) Αρχική εικόνα. (β) Κατάτμηση με χρήση του αλγορίθμου Κ-μέσων. (γ) Κατάτμηση με χρήση του αλγορίθμου Κ-μέσων με ένα πρότερο τυχαίο πεδίο Μαρκώφ.

Αν και οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης δεν απαιτούν δεδομένα εκπαίδευσης, για την εφαρμογή τους είναι απαραίτητη μια αρχική κατάτμηση (ή, αντίστοιχα, αρχικές παράμετροι). Ο αλγόριθμος ΕΜ παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες από τους αλγορίθμους Κ-μέσων και ασαφών c-μέσων (Davenport, Bezdek & Hathaway, 1988). Όπως οι μέθοδοι ταξινομητών, οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης δεν εκμεταλλεύονται άμεσα τις χωρικές πληροφορίες και, επομένως, μπορούν να δείξουν ευαισθησία στο θόρυβο και τις χρωματικές ανομοιογένειες. Αυτή η έλλειψη μοντέλου στο χώρο, όμως, τους δίνει σοβαρό προβάδισμα όσον αφορά στην ταχύτητα υπολογισμού (Hebert, 1997). Επίσης, οι έρευνες πάνω στη βελτίωση της ευρωστίας των αλγορίθμων ομαδοποίησης σε σχέση με τις χρωματικές ανομοιογένειες που παρουσιάζονται στις μαγνητικές τομογραφίες έχουν επιδείξει μεγάλη επιτυχία (Rajapakse, Giedd & Rapoport, 1997, Herndon, Lancaster, Toga & Fox, 1996). Η ανοχή στο θόρυβο μπορεί να βελτιωθεί με την ενσωμάτωση των μοντέλων ΜRF, όπως περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

Β.Ι.6.χίϊι. Μοντέλα Τυχαίων Πεδίων Μαρκώφ

Η χρήση των μοντέλων τυχαίων πεδίων Μαρκώφ (Markov Random Fields, MRF) από μόνη της δεν είναι μια μέθοδος κατάτμησης, αλλά είναι ένα στατιστικό μοντέλο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους κατάτμησης. Τα MRF χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μοντέλων των χωρικών αλληλεπιδράσεων ανάμεσα σε γειτονικά ή κοντινά εικονοστοιχεία. Αυτοί οι χωρικοί συσχετισμοί παρέχουν ένα μηχανισμό για τη μοντελοποίηση μιας ποικιλίας ιδιοτήτων της εικόνας (Li, 1995). Στις ιατρικές απεικονίσεις χρησιμοποιούνται, συνήθως, επειδή τα περισσότερα εικονοστοιχεία ανήκουν στην ίδια τάξη με τα γειτονικά. Σε μαθηματικούς όρους, αυτό συνεπάγεται ότι οποιαδήποτε ανατομική δομή αποτελείται από μόνο ένα εικονοστοιχείο έχει πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης σε ένα μοντέλο MRF.

Τα MRF εντάσσονται συχνά στους αλγόριθμους ομαδοποίησης, όπως ο αλγόριθμος Κ-μέσων, με χρήση ενός πρότερου μοντέλου τύπου Bayes (Rajapakse, Giedd & Rapoport, 1997, Pappas, 1992, Held κ.α., 1997). Η τελική κατάτμηση προκύπτει με τη μεγιστοποίηση της ύστερης πιθανότητας της κατάτμησης, δοθέντων των δεδομένων της εικόνας. Η μεγιστοποίηση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με επαναληπτικές μεθόδους, όπως οι τρόποι εξαρτημένης επανάληψης (Besag, 1986) ή η προσομοιωμένη ανόπτηση (simulated annealing) (Geman & Geman, 1984).

Μια δυσκολία που σχετίζεται με τα μοντέλα MRF είναι η κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων που ελέγχουν την ισχύ των χωρικών αλληλεπιδράσεων (Li, 1995). Μια επιλογή που αντιστοιχεί σε πολύ ισχυρές χωρικές αλληλεπιδράσεις μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μια υπερβολικά ομαλή κατάτμηση και απώλεια σημαντικών λεπτομερειών δομής. Επίσης, οι μέθοδοι MRF συνήθως χρησιμοποιούν αλγορίθμους που είναι υπολογιστικά απαιτητικοί. Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, τα MRF χρησιμοποιούνται ευρέως όχι μόνο για τη μοντελοποίηση των τάξεων της κατάτμησης, αλλά και για τη μοντελοποίηση των χρωματικών ανομοιογενειών, οι οποίες προκύπτουν στις εικόνες των μαγνητικών τομογραφιών (Held κ.α., 1997), καθώς και για τη μοντελοποίηση των ιδιοτήτων υφής, που είναι χρήσιμη για την κατάτμηση ψηφιακών μαστογραφιών (Chen & Lee, 1997).

Β.Ι.6.χίν. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

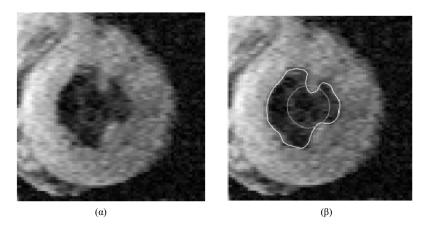
Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (TNN) είναι παράλληλα δίκτυα υπολογιστικών στοιχείων ή κόμβων, τα οποία προσομοιώνουν τη βιολογική μάθηση. Κάθε κόμβος ενός TNN είναι ικανός να εκτελέσει ένα στοιχειώδη υπολογισμό. Η μάθηση επιτυγχάνεται μέσω της προσαρμογής των συντελεστών που σχετίζονται με τις συνδέσεις ανάμεσα στους κόμβους. Περισσότερες πληροφορίες για τα νευρωνικά δίκτυα υπάρχουν στις (Clark, 1991) και (Haykin, 1994).

Τα ΤΝΝ αντιπροσωπεύουν ένα πρότυπο παράδειγμα εκμάθησης για τις μηχανές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διάφορους τρόπους για την κατάτμηση εικόνας. Πιο συχνά χρησιμοποιούνται στην κατάτμηση ιατρικών εικόνων ως ταξινομητές (Hall κ.α., 1992, Gelenbe, Feng & Krishnan, 1996), στους οποίους οι συντελεστές προσδιορίζονται με τη χρήση εκπαιδευτικών δεδομένων, ενώ στη συνέχεια το ΤΝΝ χρησιμοποιείται για την κατάτμηση νέων εικόνων. Τα ΤΝΝ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν χωρίς επιτήρηση ως μέθοδοι ομαδοποίησης (Bezdek, Hall & Clarke. 1993, Reddick, Glass, Cook, Elkin & Deaton, 1997), καθώς και για τα παραμορφώσιμα μοντέλα (Reddick, Glass, Cook, Elkin & Deaton, 1997, Vilarino, Brea, Cabello & Pardo, 1998). Λόγω των πολλών συνδέσεων που χρησιμοποιούνται σε ένα νευρωνικό δίκτυο, η χωρική πληροφορία μπορεί εύκολα να

ενταχθεί στη διαδικασία ταξινόμησης. Αν και τα TNN είναι από τη φύση τους παράλληλα, η λειτουργία τους συνήθως προσομοιώνεται από έναν τυπικό σειριακό υπολογιστή, γεγονός που αναιρεί το υπολογιστικό πλεονέκτημά τους.

Β.Ι.6.χν. Παραμορφώσιμα Μοντέλα

Τα παραμορφώσιμα μοντέλα είναι τεχνικές μοντελοποίησης βασισμένες σε μηχανικές αρχές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη σκιαγράφηση των ορίων των περιοχών με χρήση κλειστών παραμετρικών καμπυλών ή επιφανειών που παραμορφώνονται υπό την επήρεια εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων. Για να αποτυπώσουμε την ακμή ενός αντικειμένου σε μια εικόνα, μια κλειστή καμπύλη ή επιφάνεια πρέπει πρώτα να τοποθετηθεί κοντά στην επιθυμητή ακμή και στη συνέχεια να εφαρμόσουμε μια επαναληπτική διαδικασία χαλάρωσης. Οι εσωτερικές δυνάμεις υπολογίζονται από το εσωτερικό της καμπύλης ή της επιφάνειας για να εξασφαλίσουμε ότι το όριο παραμένει ομαλό και μετά από την παραμόρφωση. Οι εξωτερικές δυνάμεις προκύπτουν συνήθως από την εικόνα, ώστε να αναγκάσουμε την καμπύλη ή την επιφάνεια να ταυτιστεί με το επιθυμητό αντικείμενο. Στο Σχήμα Β.8 φαίνεται ένα παράδειγμα εφαρμογής ενός παραμορφώσιμου μοντέλου δύο διαστάσεων, ή «ενεργού περιγράμματος», σε μια εικόνα μαγνητικής τομογραφίας της καρδιάς. Στο Σχήμα Β.8(β), το ενεργό περίγραμμα αρχικοποιήθηκε ως κύκλος και στη συνέχεια του επετράπη να παραμορφωθεί ώστε να ταυτιστεί με το εσωτερικό όριο της αριστερής κοιλίας.



Σχήμα **Β.8.** Εξαγωγή του εσωτερικού τείχους της αριστερής κοιλίας από μία μαγνητική τομογραφία με χρήση ενεργών περιγραμμάτων. (a) Αρχική εικόνα. (β) Αρχικό ενεργό περίγραμμα και το τελικό αποτέλεσμα της σύγκλισης.

Τα παραμορφώσιμα μοντέλα έχουν εφαρμοστεί ευρέως στην κατάτμηση ιατρικών εικόνων. Ένας τομέας στον οποίο χρησιμοποιούνται συχνά είναι η αναπαράσταση του εγκεφαλικού φλοιού από εικόνες μαγνητικής τομογραφίας (Davatzikos & Bryan, 1996, McInerney & Terzopoulos, 1997, Xu, Pham, Prince, Etemad & Yu, 1998). Τα παραμορφώσιμα μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατάτμηση καρδιακών εικόνων (Bardinet, Cohen & Ayache, 1998), των οστών σε αξονικές τομογραφίες (Neumann & Lorenz, 1998) και των υπερήχων (MikiC., Krucinski & Thomas, 1998). Η δυναμική φύση των παραμορφώσιμων μοντέλων τα καθιστά εξαιρετικά κατάλληλα σε περιπτώσεις παρακολούθησης κίνησης, οι οποίες είναι κοινές στην απεικόνιση με χρήση υπερήχων.

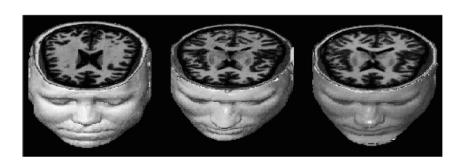
Τα κύρια πλεονεκτήματα των παραμορφώσιμων μοντέλων είναι η ικανότητα τους να παράξουν άμεσα κλειστές παραμετρικές καμπύλες ή επιφάνειες από τις εικόνες, καθώς και η ενσωμάτωση του περιορισμού ομαλότητας, ο οποίος τα κάνει ανεκτικά στο θόρυβο και τις πλαστές ακμές. Ένα μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν την παρέμβαση του γρήστη για την τοποθέτηση του αρχικού μοντέλου και την επιλογή των καταλλήλων παραμέτρων. Ο περιορισμός της ευαισθησίας των μοντέλων στην αρχικοποίηση είναι ένας τομέας έρευνας, ο οποίος έχει επιδείξει πολλές επιτυχίες (Cohen, 1991, Caselles, Catte, Coll & Dibos, 1993, Malladi, Sethian & Vemuri, 1995, Xu & Prince, 1998). Τα τυπικά παραμορφώσιμα μοντέλα συνήθως παρουσιάζουν φτωγή σύγκλιση με τα κοίλα άκρα. Η δυσκολία αυτή μπορεί να αντιμετωπιστεί εν μέρει με τη χρήση δυνάμεων πίεσης (Cohen, 1991) και άλλων τροποποιημένων μοντέλων εξωτερικών δυνάμεων (Xu & Prince, 1998). Μια άλλη σημαντική επέκταση των παραμορφώσιμων μοντέλων είναι η προσαρμοστικότητα της τοπολογίας των μοντέλων με τη γρήση πεπλεγμένης αναπαράστασης αντί για την αναλυτική παραμετροποίηση (Caselles, Catte, Coll & Dibos, 1993, Malladi, Sethian & Vemuri, 1995, McInerney & Terzopoulos, 1995). Μια εποπτική εικόνα της χρήσης των παραμορφώσιμων μοντέλων στην ανάλυση της ιατρικής εικόνας μπορεί να βρεθεί στο McInerney & Terzopoulos, (1996).

Β.Ι.6.χνί. Μέθοδοι με χρήση άτλαντα

Οι μέθοδοι με χρήση άτλαντα αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την κατάτμηση ιατρικών εικόνων, όταν υπάρχει ένας άτλαντας ή αντίστοιχο πρότυπο. Ο άτλαντας παράγεται μέσω της συγκέντρωσης και οργάνωσης ανατομικής πληροφορίας που σχετίζεται

με τη δομή που θέλουμε να ανιχνεύσουμε. Στην ουσία, οι μέθοδοι με χρήση άτλαντα είναι παρόμοιες με τους ταξινομητές, με τη διαφορά ότι υλοποιούνται στο χωρικό πεδίο της εικόνας αντί για το πεδίο τιμών.

Η τυπική μέθοδος με χρήση άτλαντα αντιμετωπίζει την κατάτμηση της εικόνας ως ένα πρόβλημα αντιστοίχισης (για αναλυτική παρουσίαση τεχνικών αντιστοίχισης δείτε στο (Maintz & Viergever, 1998)). Αρχικά βρίσκουμε έναν μετασχηματισμό ένα-προς-ένα, ο οποίος αντιστοιχεί μια πρωτύτερα διαχωρισμένη εικόνα στην εικόνα της οποίας την κατάτμηση θέλουμε να επιτύχουμε. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται συχνά «παραμόρφωση του άτλαντα». Η παραμόρφωση μπορεί να γίνει με γραμμικούς μετασχηματισμούς (Talairach & Tournoux, 1988, Lancaster κ.α., 1997, Rajarethinam κ.α., 1996), αλλά, λόγω της ανατομικής διαφοροποίησης, συχνά χρησιμοποιούνται συνδυασμοί γραμμικών και μηγραμμικών μετασχηματισμών (Sandor & Leahy, 1997, Collins, Holmes, Peters & Evans, 1995, Davatzikos, 1996, Christensen, Joshi & Miller, 1997). Ένα παράδειγμα παραμόρφωσης άτλαντα για μία μαγνητική τομογραφία του εγκεφάλου φαίνεται στο Σχήμα Β.9. Λόγω του γεγονότος ότι ο άτλαντας έχει υποστεί ήδη κατάτμηση, όλη η ανατομική πληροφορία μεταφέρεται στην εικόνα που εξετάζουμε.



Σχήμα Β.9. Επίδειζη της παραμόρφωσης με χρήση άτλαντα. Από αριστερά προς τα δεζιά: (a) Εικόνα πρότυπο. (β) Τελική εικόνα. (γ) Παραμορφωμένο πρότυπο.

Οι μέθοδοι με χρήση άτλαντα έχουν εφαρμοστεί κυρίως στην απεικόνιση του εγκεφάλου με χρήση μαγνητικής τομογραφίας για την κατάτμηση διαφόρων δομών (Collins, Holmes, Peters & Evans, 1995), καθώς και για την εξαγωγή του όγκου του εγκεφάλου από απεικονίσεις του εγκεφάλου (Aboutanos & Dawant, 1997). Ένα πλεονέκτημα των μεθόδων με χρήση άτλαντα είναι ότι οι χαρακτηρισμοί των περιοχών μεταφέρονται κατά τη διάρκεια της κατάτμησης. Επίσης, παρέχουν και ένα τυποποιημένο σύστημα για την μελέτη μορφομετρικών ιδιοτήτων (Thompson, Toga, 1997, Joshi, Miller & Grenander, 1997). Ακόμα και με τις μη-γραμμικές μεθόδους κατάτμησης, όμως, η ακριβής

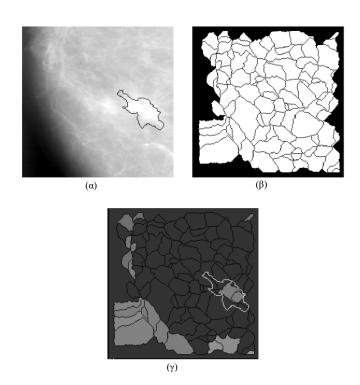
εύρεση της κατάτμησης πολύπλοκων δομών είναι δύσκολη, λόγω της ανατομικής διαφοροποίησης. Έτσι, οι μέθοδοι με χρήση άτλαντα είναι γενικώς πιο κατάλληλες για την κατάτμηση των δομών που είναι σταθερές μέσα στον πληθυσμό που μελετάται. Μία μέθοδος που βοηθάει στη μοντελοποίηση της ανατομικής διαφοροποίησης είναι η χρήση πιθανολογικών ατλάντων (Thompson, Toga, 1997), αλλά αυτοί απαιτούν επιπλέον χρόνο και χρήση για τη συσσώρευση των δεδομένων. Μία άλλη μέθοδος είναι η χρήση στοιχείων σημειωμένων με το χέρι για τον περιορισμό του μετασχηματισμού (Davatzikos, 1996).

Β.Ι.6.χνίι. Αλλες Προσεγγίσεις

Η εφαρμογή μοντέλου είναι μία μέθοδος κατάτμησης που συνήθως αντιστοιχεί ένα απλό γεωμετρικό σχήμα, όπως μια έλλειψη ή μια παραβολή σε στοιχεία της εικόνας (Pathak, Grimm, Chalana & Kim, 1998). Η τεχνική αυτή είναι εξειδικευμένη για τη δομή που μελετάται, αλλά εφαρμόζεται εύκολα και μπορεί να δώσει καλά αποτελέσματα, όταν το μοντέλο είναι κατάλληλο. Μία πιο γενική προσέγγιση είναι το ταίριασμα καμπύλων τρίτου βαθμού ή επιφανειών (Bae, Giger, Chen & Kahn, 1993) στα στοιχεία. Η βασική δυσκολία με την εφαρμογή μοντέλων είναι ότι τα στοιχεία της εικόνας πρέπει να εξαχθούν πριν γίνει η εφαρμογή του μοντέλου.

Ο αλγόριθμος υδατοσυσσώρευσης (watershed) χρησιμοποιεί έννοιες από την ανίχνευση ακμών και τη μαθηματική μορφολογία (Gonzalez & Woods, 1992) για την κατάτμηση των εικόνων σε ομοιογενείς περιοχές (Vincent & Soille, 1991). Η μέθοδος αυτή συνήθως υποφέρει από την υπερ-κατάτμηση, η οποία προκύπτει όταν η εικόνα χωρίζεται σε έναν υπερβολικά μεγάλο αριθμό περιοχών. Έτσι, οι αλγόριθμοι υδατοσυσσώρευσης στις ιατρικές απεικονίσεις ακολουθούνται συνήθως από ύστερη επεξεργασία για την συγχώνευση ξεχωριστών περιοχών που ανήκουν στην ίδια δομή (Sijbers κ.α., 1997).

Στο Σχήμα Β.10 φαίνεται ένα παράδειγμα, όπου μια μαστογραφία έχει χωριστεί αρχικά σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών με χρήση ενός αλγορίθμου υδατοσυσσώρευσης. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ένας στατιστικός ταξινομητής (Priebe, Marchette & Rogers, 1997) για να προσδιορίσουμε ποιες περιοχές περιέχουν μικροασβεστώματα. Αυτό το βήμα της ταξινόμησης εφαρμόζεται συνήθως με βάση της ιδιότητες υφής της εικόνας. Παρατηρούμε, επίσης, ότι η τέλεια σκιαγράφηση των ασβεστωμάτων και των σχετικών χαρακτηριστικών στις μαστογραφίες είναι δύσκολη αλλά συχνά δεν είναι απαραίτητη, καθώς ο βασικός στόχος μας είναι η ανίχνευση.



Σχήμα Β.10. Κατάτμηση ψηφιακής μαστογραφίας. (a) Ψηφιακή μαστογραφία και όριο του ακτινολόγου για έναν κακοήθη όγκο, η παρουσία του οποίου έχει επιβεβαιωθεί μέσω βιοψίας. (β) Αποτέλεσμα του αλγορίθμου υδατοσυσσώρευσης. (γ) Ύποπτες περιοχές, όπως αυτές προσδιορίστηκαν από μία αυτοματοποιημένη μέθοδο.

Β.Ι.7 Ακτίνες Χ

Β.Ι.7.i. Εισαγωγή

Στη συνέχεια του κειμένου θα κάνουμε μία σύντομη περιγραφή του μηχανισμού παραγωγής και ανίχνευσης ακτίνων Χ. Είναι σκόπιμο να προβούμε στην περιγραφή αυτή, καθώς η γνώση των μηχανισμών παραγωγής και ανίχνευσης των ακτίνων θα μας επιτρέψει να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο σχηματισμού των εικόνων που θέλουμε να επεξεργαστούμε, καθώς και τα πιθανά προβλήματα που θα αντιμετωπίσουμε κατά την επεξεργασία αυτή.

Η Ακτινοβολία X (η οποία αποτελείται από ακτίνες X) είναι μία μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι ακτίνες X έχουν μήκη κύματος με εύρος από 10 έως

0,01 νανόμετρα, τα οποία αντιστοιχούν σε συχνότητες εύρους από 30 petahertz έως 30 exahertz $(3x10^{16}\ Hz\ έως\ 3x10^{19}\ Hz)$ και ενέργειες φωτονίων από 120 eV έως 120 keV. Έχουν μικρότερο μήκος κύματος από τις υπεριώδεις ακτίνες· οι ακτίνες με ενέργεια φωτονίων από 0.12 έως 12 keV χαρακτηρίζονται ως «μαλακές» ακτίνες X, ενώ οι ακτίνες με ενέργεια φωτονίου από 12 έως 120 keV χαρακτηρίζονται ως «σκληρές» ακτίνες X, λόγω της διατρητικής ικανότητάς τους. Σε πολλές γλώσσες, οι ακτίνες X ονομάζονται και ακτίνες **Röntgen**, από τον Wilhelm Conrad Röntgen, στον οποίο αποδίδεται η ανακάλυψή τους και ο οποίος τις ονόμασε ακτίνες X για να δείξει ότι πρόκειται για έναν άγνωστο τύπο ακτινοβολίας (Novelline, 1997).

Οι ακτίνες X χρησιμοποιούνται κυρίως στη διαγνωστική ακτινογραφία και στην κρυσταλλογραφία. Ως εκ τούτου, ο όρος ακτίνες X χρησιμοποιείται στην ξένη βιβλιογραφία μετωνυμικά για αναφορές τόσο στις ακτινογραφίες που προκύπτουν με τη χρήση της μεθόδου αυτής, όσο και στη μέθοδο αυτή καθαυτή. Οι ακτίνες X αποτελούν μία μορφή ιονίζουσας ακτινοβολίας και, επομένως, μπορούν να έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στους έμβιους οργανισμούς.

Β.Ι.7.ii. Ιατρική φυσική

Οι ακτίνες Χ παράγονται από ένα σωλήνα ακτίνων Χ. Αυτός είναι ένας σωλήνας κενού αέρος, στον οποίο χρησιμοποιείται μία υψηλή τάση για να επιταχυνθούν σε υψηλές ταχύτητες τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από μία θερμή κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια υψηλής ταχύτητας συγκρούονται με ένα μεταλλικό στόχο, την άνοδο, δημιουργώντας τις ακτίνες Χ (Whaites & Roderick, 2002). Στους σωλήνες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ακτίνων Χ για ιατρική χρήση, ο στόχος είναι συνήθως κατασκευασμένος από βολφράμιο (74W) ή από ένα κράμα βολφραμίου (95%) και ρηνίου (75Re), το οποίο είναι πιο ανθεκτικό στις ρωγμές. Μερικές φορές χρησιμοποιείται το μολυβδαίνιο (42Mo) στις πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως όταν απαιτούνται μαλακές ακτίνες Χ στις μαστογραφίες.

Η μέγιστη ενέργεια των φωτονίων που παράγονται κατά την εκπομπή ακτίνων X σε keV είναι περιορισμένη από την ενέργεια του προσπίπτοντος ηλεκτρονίου, η οποία εξαρτάται από την τάση στα άκρα του σωλήνα· έτσι, ένας σωλήνας με διαφορά δυναμικού 80 kV δεν μπορεί να παράξει ακτίνες με ενέργεια μεγαλύτερη από 80 keV. Όταν τα

ηλεκτρόνια χτυπούν την άνοδο, οι ακτίνες Χ παράγονται μέσω δύο διαφορετικών ατομικών διεργασιών:

- Φθορισμός ακτίνων Χ: Εάν το ηλεκτρόνιο έχει αρκετή ενέργεια, μπορεί να εκτοπίσει ένα τροχιακό ηλεκτρόνια από τις εσωτερικές στοιβάδες των ατόμων του μετάλλου της ανόδου και, ως αποτέλεσμα, ηλεκτρόνια από ανώτερα ενεργειακά επίπεδα πληρώνουν το κενό που προκύπτει και εκπέμπονται φωτόνια ακτίνων Χ. Η διαδικασία αυτή παράγει ένα διακριτό φάσμα συχνοτήτων ακτίνων Χ, το οποίο χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες φασματικές γραμμές. Οι φασματικές γραμμές που προκύπτουν εξαρτώνται από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο στόχος (άνοδος) και, για το λόγο αυτό, ονομάζονται χαρακτηριστικές γραμμές. Συνήθως, οι γραμμές αυτές αντιστοιχούν σε μεταβάσεις από εξωτερικές στοιβάδες στη στοιβάδα Κ (οπότε οι αντίστοιχες γραμμές ονομάζονται γραμμές Κ), στη στοιβάδα L (γραμμές L) και ούτω καθ' εξής.
- Ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung): Η ακτινοβολία αυτή παράγεται από τα ηλεκτρόνια, καθώς αυτά διασκορπίζονται από το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο κοντά στους πυρήνες ατόμων με υψηλό ατομικό αριθμό. Οι ακτίνες αυτές έχουν συνεχές φάσμα. Η ένταση των ακτίνων Χ αυξάνει γραμμικά καθώς μειώνεται η συχνότητα των φωτονίων που παράγονται από τα ηλεκτρόνια που έχουν διασκορπιστεί, όπου το 0 της έντασης αντιστοιχεί στα ηλεκτρόνια που έχουν διατηρήσει όλη την κινητική ενέργεια που απέκτησαν από τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του σωλήνα.

Έτσι, η ακτινοβολία που παράγεται από έναν σωλήνα αποτελείται από το συνεχές φάσμα της ακτινοβολίας πέδησης, το οποίο τείνει προς το 0 όσο πλησιάζουμε στην ενέργεια που αντιστοιχεί στην τάση του σωλήνα, μαζί με τα τοπικά μέγιστα που οφείλονται στις χαρακτηριστικές γραμμές. Οι τάσεις που χρησιμοποιούνται στους σωλήνες παραγωγής διαγνωστικών ακτίνων X, οι οποίες περιορίζουν και τη μέγιστη ενέργεια των φωτονίων των ακτίνων, έχουν εύρος από 20 έως 150 kV περίπου.

Στις ιατρικές εφαρμογές διάγνωσης, οι ακτίνες Χ χαμηλής ενέργειας (μαλακές) είναι συνήθως ανεπιθύμητες, αφού απορροφώνται πλήρως από το σώμα, αυξάνοντας έτσι τη συνολική δόση που λαμβάνει ο ασθενής. Για το λόγο αυτό, τοποθετούνται λεπτά φύλλα από κάποιο μέταλλο (συχνά αλουμίνιο, αλλά μπορεί και άλλα υλικά) πάνω από το παράθυρο από το οποίο εξέρχονται οι ακτίνες. Με τον τρόπο αυτό οι ακτίνες χαμηλότερης ενέργειας φιλτράρονται και απομακρύνονται από τη δέσμη. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται σκλήρυνση

της δέσμης. Αμφότερες οι διεργασίες παραγωγής ακτίνων X είναι εξαιρετικά χαμηλής απόδοσης (~1%), οπότε για να παραχθεί επαρκής ροή ακτίνων απαιτείται η μετατροπή μεγάλου ποσού ενέργειας σε θερμότητα, η οποία πρέπει να απαχθεί από το σωλήνα. Λόγω του μικρού μήκους κύματός τους, τα φωτόνια των ακτίνων X που χρησιμοποιούνται στις ιατρικές εφαρμογές τείνουν να συμπεριφέρονται περισσότερο ως σωματίδια και λιγότερο ως κύματα.

Οι ακτινογραφίες που προκύπτουν με χρήση των ακτίνων Χ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό ενός μεγάλου εύρους παθολογιών. Για τη λήψη μίας ακτινογραφίας των οστών, εκπέμπονται παλμοί ακτίνων Χ μικρής διάρκειας μέσα από το σώμα προς ένα ακτινογραφικό φιλμ, το οποίο βρίσκεται πίσω από το στόχο. Τα κόκαλα απορροφούν τα περισσότερα φωτόνια μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, καθώς έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ηλεκτρονίων. Οι ακτίνες που δεν απορροφώνται μετατρέπουν το φωτογραφικό φιλμ από λευκό σε μαύρο, αφήνοντας μία λευκή σκιά των οστών πάνω στο φιλμ.

Για να παραχθεί μία αναλυτική εικόνα του καρδιοαγγειακού συστήματος, συμπεριλαμβανομένων και των αρτηριών και των φλεβών, αρχικά λαμβάνεται μία εικόνα της ανατομικής περιοχής για την οποία ενδιαφερόμαστε. Στη συνέχεια, λαμβάνεται μία δεύτερη εικόνα της ίδιας περιοχής αφότου έχει εισαχθεί με ένεση κάποιο ιωδιούχο υλικό υψηλής αντίθεσης στα αιμοφόρα αγγεία της περιοχής αυτής. Οι δύο εικόνες που προκύπτουν αφαιρούνται ψηφιακά, οπότε μένει μία εικόνα που περιέχει μόνο το ιωδιούχο υλικό, καθώς αυτό κινείται μέσα από τα αιμοφόρα αγγεία. Ο ακτινολόγος ή ο χειρούργος συγκρίνει την εικόνα αυτή με εικόνες από φυσιολογικές ανατομίες για να προσδιορίσει εάν υπάρχει κάποια δυσλειτουργία ή κάποια έμφραξη του αγγείου.

Β.Ι.7.iii. Ανιχνευτές

Φωτογραφική πλάκα. Η ανίχνευση των ακτίνων Χ βασίζεται σε διάφορες μεθόδους. Οι πιο γνωστές μέθοδοι είναι η φωτογραφική πλάκα, το φιλμ ακτίνων Χ μέσα σε κασέτα και οι επιφάνειες σπανίων γαιών. Ανεξάρτητα από το υλικό που χρησιμοποιείται για την αποτύπωση της εικόνας, όλες οι μέθοδοι χαρακτηρίζονται με τη συλλογική ονομασία «Δέκτες Εικόνας».

Πριν από την έλευση των υπολογιστών και την ψηφιακή απεικόνιση, η βασική μέθοδος ανίχνευσης ακτίνων Χ ήταν η χρήση μίας φωτογραφικής πλάκας. Οι εικόνες παράγονταν απευθείας πάνω σε πλάκες του γυαλιού, οι οποίες στη συνέχεια αντικαταστάθηκαν από φιλμ για την παραγωγή των εικόνων μέσα στα νοσοκομεία. Πλέον η χρήση των φιλμ έχει αντικατασταθεί από τις ακτινογραφίες με χρήση υπολογιστή και τις ψηφιακές ακτινογραφίες, αν και η τεχνολογία των φιλμ χρησιμοποιείται ακόμα σε ορισμένες εφαρμογές των ακτινογραφιών (πχ την επιθεώρηση συγκολλήσεων αρμών).

Οι φωτογραφικές πλάκες που περιέχουν το φιλμ είναι ευαίσθητες στις ακτίνες X, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή της εικόνας. Το μέρος του σώματος του ασθενή που θα ακτινογραφηθεί τοποθετείται ανάμεσα στην πηγή των ακτίνων και το δέκτη της εικόνας για να παραχθεί η σκιά της εσωτερικής δομής του συγκεκριμένου μέρους του σώματος. Οι ακτίνες X εμποδίζονται (απορροφώνται) από τους πυκνούς ιστούς, όπως τα οστά, και περνούν πιο εύκολα μέσα από τους μαλακούς ιστούς. Οι περιοχές όπου χτυπούν οι ακτίνες X σκουραίνουν κατά τη διαδικασία εμφάνισης του φιλμ, κάνοντας τα οστά να φαίνονται πιο λευκά από τον περιβάλλοντα μαλακό ιστό. Καθώς η διαδικασία αυτή απαιτεί μεγάλο χρόνο έκθεσης για τον ασθενή, δημιουργήθηκαν φίλτρα ενίσχυσης. Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν την έκθεση του ασθενή σε μικρότερες δόσεις, καθώς ενισχύουν τα αποτελέσματα των ακτίνων X, ώστε αυτά να αποτυπωθούν με μεγαλύτερη ένταση πάνω στα φωτογραφικά φιλμ, τα οποία τοποθετούνται ακριβώς δίπλα στα φίλτρα αυτά.

Συχνά χρησιμοποιούνται μίγματα αντίθεσης που περιέχουν βάριο ή ιώδιο, τα οποία δεν είναι διαπερατά από τις ακτίνες Χ. Τα μίγματα αυτά μπορούν να εισέλθουν στο σώμα μέσω της γαστρεντερικής οδού (στην περίπτωση του βαρίου) ή να εισαχθούν στις αρτηρίες ή στις φλέβες μέσω ένεσης για τον τονισμό των αγγείων αυτών. Τα μίγματα αντίθεσης περιέχουν στοιχεία με υψηλούς ατομικούς αριθμούς (όπως και τα οστά), τα οποία ουσιαστικά εμποδίζουν τη διέλευση της ακτινοβολίας και επιτρέπουν σε όργανα, τα οποία προηγουμένως ήταν διαπερατά, να αποτυπωθούν πιο έντονα. Τα σύγχρονα μίγματα αντίθεσης είναι βελτιωμένα, ώστε ο κίνδυνος πρόκλησης αλλεργικού σοκ στον ασθενή να είναι εξαιρετικά χαμηλός (αντίστοιχος με το ποσοστό αλλεργίας των ασθενών στην πενικιλλίνη).

Οι φωτογραφικές πλάκες περνούν σταδιακά στο παρελθόν των ακτινογραφικών μεθόδων, καθώς έχουν αντικατασταθεί πλέον από ψηφιακές μεθόδους απεικόνισης. Βασικά πλεονεκτήματα των σύγχρονων μεθόδων ψηφιακής απεικόνισης είναι το γεγονός ότι δε βασίζονται στη χρήση του ασημιού (το οποίο είναι ένα μη-ανανεώσιμο υλικό), καθώς και το γεγονός ότι η ψηφιακή απεικόνιση δε χρειάζεται τον ειδικό εξοπλισμό εμφάνισης του

φιλμ. Παρ' όλα αυτά, η αποτύπωση των ακτινογραφιών σε φιλμ εξακολουθεί να είναι μία από τις βασικότερες μεθόδους απεικόνισης.

Ψηφιακές μέθοδοι απεικόνισης. Μία ολοένα και πιο δημοφιλής μέθοδος απεικόνισης περιλαμβάνει τη χρήση της φωτοδιεγερμένης φωταύγειας, η οποία αναπτύχθηκε από την εταιρεία Fuji στη δεκαετία του '80. Στα σύγχρονα νοσοκομεία χρησιμοποιείται μία πλάκα από φωτοδιεγέρσιμο φώσφορο (photostimulable phosphor plate – PSP) στη θέση των φωτογραφικών φιλμ. Μετά από την εκπομπή των ακτίνων X, τα διεγερμένα ηλεκτρόνια του φωσφόρου παραμένουν «παγιδευμένα» μέσα σε «χρωματικά κέντρα» στο κρυσταλλικό πλέγμα, μέχρι να διεγερθούν από μία ακτίνα λέιζερ που σαρώνει την επιφάνεια της πλάκας. Το φως που παράγεται από τη διέγερση του λέιζερ συλλέγεται από ένα σωλήνα φωτοπολλαπλασιασμού και το προκύπτον σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακή εικόνα με τη χρήση υπολογιστή. Από τη χρήση του υπολογιστή προκύπτει και η ονομασία υπολογιστική ακτινογραφία (ή, πιο συχνά, ψηφιακή ακτινογραφία). Η πλάκα του φωσφόρου μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, καθώς μπορεί εύκολα να «διαγραφεί» μέσω της έκθεσής της σε λευκό φως σχετικά χαμηλής έντασης. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη χρήση των υπαρχόντων μηχανημάτων παραγωγής ακτίνων Χ χωρίς κάποια ειδική μετατροπή.

Μία άλλη μέθοδος ψηφιακής απεικόνισης περιλαμβάνει τη χρήση ανιχνευτών ημιαγωγών. Τα φωτόνια των ακτίνων Χ μετατρέπονται σε ζευγάρια ηλεκτρονίων-οπών εντός του ημιαγωγού, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης του ρεύματος και την ανίχνευση της παρουσίας των ακτίνων. Οι ανιχνευτές αυτοί ονομάζονται και «ανιχνευτές σταθερής κατάστασης». Η πρακτική εφαρμογή τους στις ιατρικές απεικονίσεις ξεκίνησε μέσα στη δεκαετία του '90. Αυτή τη στιγμή χρησιμοποιείται το σελήνιο για τους ανιχνευτές μεγάλης επιφάνειας που χρησιμοποιούνται στις μαστογραφίες και στις ακτινογραφίες στήθους, ενώ οι πιο καινούργιες μέθοδοι κάνουν χρήση ανιχνευτών πυριτίου ολίσθησης (silicon drift detectors – SDD), οι οποίοι παράγονται με συμβατικές μεθόδους κατασκευής ημιαγωγών. Οι ανιχνευτές ολίσθησης πυριτίου είναι φθηνότεροι, έχουν μεγαλύτερη διακριτική ισχύ και δε χρειάζονται ειδικές διατάξεις για την ψύξη τους.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών μεγάλων διατάξεων κατέστησε δυνατό το σχεδιασμό συστημάτων ανίχνευσης, τα οποία κάνουν χρήση μίας οθόνης σπινθηρισμού (scintillator screen) για να μετατρέψουν τις ακτίνες X σε ορατή ακτινοβολία, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρικά σήματα μέσω ενός κοινού ανιχνευτή. Αυτοί οι έμμεσοι Ανιχνευτές Επίπεδου Πλαισίου (Flat Panel Detectors - FPD) χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως σε ιατρικές, οδοντιατρικές, κτηνιατρικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Η τεχνολογία

των διατάξεων είναι μία παραλλαγή των οθονών TFT που χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως οι φορητοί υπολογιστές. Η διάταξη αποτελείται από ένα φύλλο γυαλιού, το οποίο είναι επικαλυμμένο με ένα λεπτό στρώμα πυριτίου. Σε μικροσκοπική κλίμακα, το πυρίτιο έχει εντυπωθεί με εκατομμύρια από τρανζίστορ. Αυτά τα τρανζίστορ λεπτού φιλμ (Thin Film Transistors – TFT) είναι συνδεδεμένα με μία φωτοδίοδο· κάθε μία από τις φωτοδιόδους αυτές αποτελεί ένα εικονοστοιχείο της εικόνας. Τα φωτόνια που συγκρούονται με τη φωτοδίοδο μετατρέπονται σε ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, τα οποία δημιουργούν μία ροή ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία ανιχνεύεται και μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα και τελικά σε ψηφιακή εικόνα από έναν υπολογιστή. Αν και το πυρίτιο έχει εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, δεν απορροφάει τις ακτίνες Χ ιδιαίτερα αποτελεσματικά. Για το λόγο αυτό, οι ακτίνες Χ προσπίπτουν πρώτα σε σπινθηροβόλα υλικά, τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν τα φωτόνια των ακτίνων Χ σε φωτόνια οπτικής ακτινοβολίας. Τα οπτικά φωτόνια, στη συνέχεια, ανιχνεύονται από τη διάταξη με τις φωτοδιόδους.

Β.Ι.8 Επεξεργασία ακτινογραφιών με τη χρήση υπολογιστή

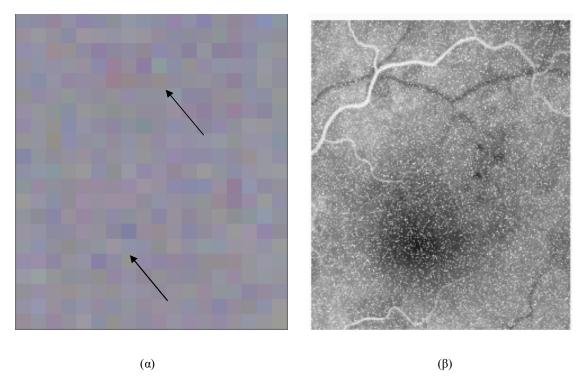
Όπως είδαμε από τα ανωτέρω, τα σύγχρονα ακτινογραφικά μηχανήματα έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ακτινογραφίες τόσο στην κλασική μορφή του φωτογραφικού φιλμ, όσο και σε απευθείας ψηφιακή μορφή. Οι εικόνες που προκύπτουν από τις ακτινογραφίες, είτε αυτές έχουν προέλθει από ψηφιοποίηση (σάρωμα) φωτογραφικού φιλμ, είτε από απευθείας ανίχνευση σε ψηφιακή μορφή, είναι σχεδόν στο σύνολό τους μονοχρωματικές, δηλαδή τα επίπεδα της έντασης απεικονίζονται από αποχρώσεις του γκρι. Όμως, σε αμφότερες τις δύο περιπτώσεις, ο η φύση του μηχανισμού παραγωγής των ακτίνων και της διαδικασία ανίχνευσης από τους δέκτες εικόνας προκαλούν κάποια προβλήματα όσον αφορά στην επεξεργασία των ακτινογραφιών με χρήση κλασικών αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας. Τα βασικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε όταν επεξεργαζόμαστε ακτινογραφίες είναι τα εξής (Shapiro & Stockman, 2001):

1. Θόρυβος: Το γεγονός ότι οι στις συχνότητες των ακτίνων X τα φωτόνια τείνουν να συμπεριφέρονται περισσότερο ως σωματίδια και λιγότερο ως κύματα προκαλεί την έντονη παρουσία θορύβου. Ο θόρυβος αυτός συνήθως λαμβάνει δύο μορφές:

- (α) **Θόρυβος τύπου** βολής (shot noise). Ιδιαίτερα στα φωτεινότερα σημεία της εικόνας, ο θόρυβος που συνοδεύει την πληροφορία προκαλείται συνήθως από κβαντικές διακυμάνσεις, δηλαδή από τις διαφορετικές τιμές του αριθμού των φωτονίων που ανιχνεύονται για ένα συγκεκριμένο επίπεδο έκθεσης του ανιχνευτή. Η ένταση του θορύβου αυτού αυξάνεται με μη-γραμμικό τρόπο καθώς αυξάνεται η ένταση του φωτός που γτυπάει τον ανιγνευτή, ενώ θεωρούμε ότι η τιμή του θορύβου σε κάποιο εικονοστοιχείο της εικόνας είναι ανεξάρτητη από τις τιμές του θορύβου σε άλλα εικονοστοιχεία (Σχήμα Β.11(α)). Εκτός όμως από το θόρυβο που προκαλείται λόγω της διακύμανσης του πλήθους των φωτονίων που χτυπάνε τον ανιχνευτή, θόρυβος τύπου βολής μπορεί να προκληθεί και από το γεγονός ότι οι σύγχρονοι ανιχνευτές εικόνας αποτελούνται από συστοιχίες από φωτοευαίσθητες διόδους ή τρανζίστορ, στοιχεία δηλαδή που άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα όταν τα χτυπάει φως. Τα στοιχεία αυτά ακόμα και όταν δεν άγουν επιτρέπουν σε μία πολύ μικρή ποσότητα ρεύματος να περνάει από μέσα τους (το λεγόμενο ρεύμα διαρροής ανάστροφης πόλωσης – reverse bias leakage current). Σε ορισμένα από αυτά τα στοιχεία το ρεύμα αυτό έχει υψηλότερη τιμή και αυτό ανιχνεύεται ως θόρυβος, ιδιαίτερα στα σκοτεινότερα σημεία της εικόνας.
- (β) Θόρυβος τύπου αλατοπίπερου (salt-and-pepper noise):. Ο τύπος θορύβου αυτός χαρακτηρίζεται από την παρουσία μεμονωμένων εικονοστοιχείων, τα οποία έχουν τιμή έντασης πολλή μεγαλύτερη ή πολύ μικρότερη από αυτές των άλλων εικονοστοιχείων της τοπικής περιοχής. Στην ακραία περίπτωση, τα εικονοστοιχεία αυτά μπορεί να είναι τελείως λευκά ή τελείως μαύρα· σε πολλές περιπτώσεις όμως, τα εικονοστοιχεία αυτά δε λαμβάνουν τη μέγιστη ή την ελάχιστη δυνατή τιμή του γκρι, αλλά παίρνουν κάποια τιμή που είναι απλά πολύ υψηλότερη ή πολύ χαμηλότερη από αυτές των άλλων εικονοστοιχείων της τοπικής περιοχής (Σχήμα Β.11(β)). Ο θόρυβος αυτός μπορεί να προκληθεί από διάφορες αιτίες, όπως λάθη στην μετάδοση των δυαδικών τιμών των εικονοστοιχείων, λάθη κατά τη μετατροπή των αναλογικών τιμών του ρεύματος σε ψηφιακές, κατασκευαστικές ατέλειες κ.α. Στις ακτινογραφίες είναι αρκετά πιο έντονος, λόγω της μεγάλης μεγάλης ενέργειας που χαρακτηρίζει τα φωτόνια που ανιχνεύονται. Ο τύπος αυτός θορύβου μας αφορά ιδιαίτερα, καθώς μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση ψευδών ακμών κατά την εφαρμογή αλγορίθμων ανίχνευσης ακμών πάνω στην εικόνα μας.
- 2. Αντίθεση (Contrast): Η αντίθεση μίας εικόνας εξαρτάται από δύο παράγοντες: (α) Το εύρος (ή διαφορά) μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του γκρι των

εικονοστοιχείων της εικόνας και (β) τον αριθμό των διαφορετικών τιμών (ή αποχρώσεων του γκρι) που μπορούν να πάρουν τα εικονοστοιχεία. Εικόνες με υψηλή αντίθεση, ή μικρό εύρος, περιέχουν λιγότερα γκρι εικονοστοιχεία και περισσότερα εικονοστοιχεία με τιμές προς το λευκό ή το μαύρο, ενώ οι ενδιάμεσες τιμές τείνουν να είναι μικρότερες σε πλήθος. Αντίθετα, οι εικόνες χαμηλής αντίθεσης, ή μεγάλου εύρους, τείνουν να έχουν περισσότερα εικονοστοιχεία με αποχρώσεις του γκρι και λιγότερα εικονοστοιχεία με πιο ακραίες τιμές, ενώ υπάρχει και μεγαλύτερο πλήθος πιθανών τιμών για τα εικονοστοιχεία της εικόνας. Οι εικόνες που προκύπτουν από την ψηφιοποίηση των φιλμ ή την απευθείας καταγραφή των ακτινογραφιών τείνουν να έχουν χαμηλή αντίθεση, γεγονός που δυσχεραίνει την κατάτμησή τους σε διακριτές περιοχές.

3. Ψηφιοποίηση: Ένα άλλο πρόβλημα εμφανίζεται κατά τη μετατροπή των ακτινογραφιών από αναλογικά φωτογραφικά φιλμ σε ψηφιακές εικόνες. Το πρόβλημα αυτό έχει να κάνει με την αυτόματη ρύθμιση της φωτεινότητας και της αντίθεσης της εικόνας από τα όργανα ψηφιοποίησης, τα οποία είναι, συνήθως κοινοί σαρωτές (scanners) του εμπορίου. Το λογισμικό που διαχειρίζεται την ψηφιοποίηση της εικόνας είναι, συνήθως, ρυθμισμένο ώστε να κάνει αυτόματες διορθώσεις στη φωτεινότητα ή στην αντίθεση της εικόνας, σύμφωνα με κάποια υπολογιστικά κριτήρια. Αν και σκοπός των δημιουργών του λογισμικού είναι η βελτίωση της ποιότητας της εικόνας, το γεγονός ότι κάθε εικόνα που θα ψηφιοποιηθεί θα υποστεί διαφορετική επεξεργασία από τους αλγορίθμους το λογισμικού επηρεάζει την τελική ομοιομορφία των διαθέσιμων εικόνων. Αν και το πρόβλημα αυτό δεν είναι τόσο έντονο, οφείλουμε να το λάβουμε υπόψη μας πριν αποπειραθούμε να εφαρμόσουμε τους σχετικούς αλγόριθμους σε εικόνες που έχουν προέλθει από διαφορετικά ακτινογραφικά μηχανήματα ή από διαφορετικούς σαρωτές.



Σχήμα Β.11. (α) Μέρος ακτινογραφίας. Τα βέλη καταδεικνύουν εικονοστοιχεία με διαφορετικές τιμές από τα υπόλοιπα της περιοχής τους λόγω της παρουσίας θορύβου τύπου βολής. **(β)** Αγγειογράφημα με ισχυρή παρουσία θορύβου τύπου αλατοπίπερου.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, χρειάστηκε να εφαρμοστούν κατάλληλες τεχνικές προεπεξεργασίας των εικόνων, οι οποίες θα περιγραφούν αφότου παρουσιάσουμε τα δεδομένα που είχαμε στη διάθεσή μας.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

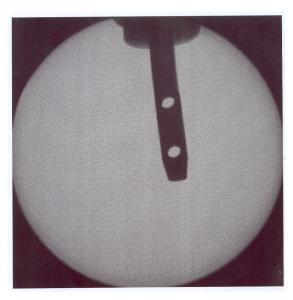
Κεφάλαιο Β.ΙΙ.: Πειραματικά δεδομένα – Προ-επεξεργασία

Β.ΙΙ.1 Εισαγωγή

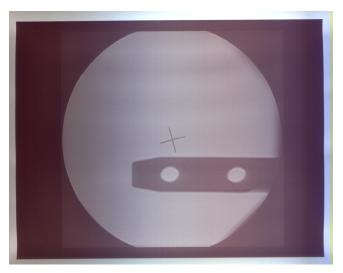
Τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το πρώτο στάδιο ανάπτυξης του αλγορίθμου κατάτμησης των ακτινογραφιών του καρφιού ήταν ακτινογραφίες του καρφιού, όπου το καρφί ήταν τοποθετημένο σε διάφορες γωνίες καταβύθισης και περιστροφής. Στη διάθεσή μας υπήρχαν δύο σύνολα ακτινογραφιών. Το πρώτο σύνολο ήταν ακτινογραφίες οι οποίες είχαν τυπωθεί σε κανονικό χαρτί και οι οποίες, στη συνέχεια, σαρώθηκαν σε αναλύσεις 150 και 300 DPI (dots per inch) με χρήση ενός κοινού σαρωτή του εμπορίου (Agfa Snapscan e25). Το δεύτερο σύνολο αποτελείτο από απευθείας ψηφιακές ακτινογραφίες του καρφιού, όπως αυτές εξήχθησαν από το ακτινογραφικό μηχάνημα. Στα Σχήματα Β.12, Β.13 και Β.14 φαίνονται μία φωτογραφία του κανονικού καρφιού, ένα δείγμα των σαρωμένων ακτινογραφιών και ένα δείγμα από τις ψηφιακές ακτινογραφίες, αντίστοιχα.



Σχήμα Β.12. Φωτογραφία ενός ενδομυελικού ήλου μαζί με τις αντίστοιχες βίδες σταθεροποίησής του.



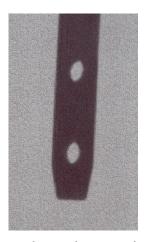
Σχήμα Β.13. Ακτινογραφία του καρφιού, η οποία είχε εκτυπωθεί σε κανονικό χαρτί και, στη συνέχεια, σαρώθηκε για να ψηφιοποιηθεί.



Σχήμα Β.14. Ακτινογραφία καρφιού απευθείας ψηφιοποιημένη από το ακτινογραφικό μηχάνημα.

Στη συνέχεια, για λόγους πρακτικότητας και ευκολίας, από κάθε εικόνα που είχε προκύψει για τα δύο σύνολα ακτινογραφιών δημιουργήθηκε μία μικρότερη εικόνα, η οποία περιείχε μόνο το κυρίως σώμα του καρφιού αποκομμένο από το γενικότερο υπόβαθρο της ακτινογραφίας. Αυτό έγινε για να αποκτήσουμε εικόνες οι οποίες ήταν αφενός μικρότερες σε μέγεθος, γεγονός που μείωνε την κατανάλωση της μνήμης του υπολογιστή, ενώ αφετέρου περιείχαν όλη τη σημαντική πληροφορία που απαιτείτο για την ανάπτυξη των σχετικών αλγορίθμων. Για να παραχθούν οι μικρότερες αυτές εικόνες χρησιμοποιήθηκαν

εμπορικά προγράμματα επεξεργασίας εικόνας, τα οποία είχαν τη δυνατότητα αποκοπής (crop) μέρους της εικόνας. Ένα παράδειγμα μίας τέτοιας μικρότερης εικόνας φαίνεται στο Σχήμα Β.15.



Σχήμα Β.15. Αποκομμένη εικόνα του σώματος του καρφιού.

Όπως φαίνεται από τις σχετικές φωτογραφίες, το κυρίως σώμα του καρφιού χαρακτηρίζεται, εκτός από το σώμα και την ακμή σχήματος κόλουρου κώνου, από δύο οπές. Στις οπές αυτές μπορεί να εισαχθούν, εάν απαιτείται, επιπλέον σταθεροποιητικές βίδες, οι οποίες θα ενισχύσουν ακόμα περισσότερο τη σταθερότητα του καρφιού πάνω στο οστό.

Βασικός στόχος μας σε αυτό το στάδιο είναι η επιτυχής κατάτμηση της εικόνας και ο διαχωρισμός της στις περιοχές που αντιστοιχούν το καρφί και τις περιοχές που αντιστοιχούν στο φόντο. Στη συνέχεια, θέλουμε να μπορέσουμε να αναγνωρίσουμε ορισμένα χαρακτηριστικά της εικόνας, όπως το μήκος της προβολής, η γωνία καταβύθισης ή περιστροφής σε σχέση με το επίπεδο προβολής και άλλα στοιχεία, τα οποία θα επιτρέψουν σε ένα γιατρό να προσδιορίσει με ακρίβεια τη σχετική θέση του καρφιού πάνω στο οστό χωρίς την ανάγκη χειρουργικής επέμβασης. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, είναι απαραίτητη κατ' αρχήν η κατάτμηση της εικόνας του καρφιού και, στη συνέχεια, ο προσδιορισμός των σχετικών περιοχών και η ποσοτικοποίηση ορισμένων στοιχείων των περιοχών αυτών.

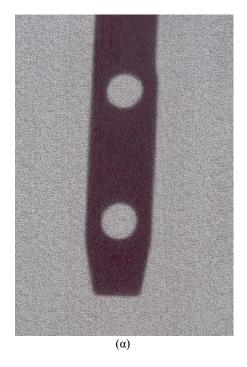
Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή του αλγορίθμου κατάτμησης, όμως, θα προβούμε σε μία περιγραφή των σταδίων προεπεξεργασίας των εικόνων. Η προεπεξεργασία αυτή είναι απαραίτητη, ώστε να ενισχυθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν στην Παράγραφο Β.Ι.8.

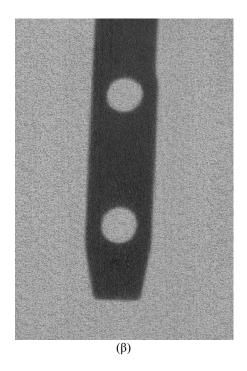
Β.ΙΙ.2 Προ-επεξεργασία των εικόνων

Στην περίπτωση των ακτινογραφιών που είχαμε στη διάθεσή μας, το πρώτο βήμα ήταν η μετατροπή των «έγχρωμων» εικόνων των ακτινογραφιών σε εικόνες με κλίμακα του γκρι (gray-scale). Αυτό ήταν ένα καθαρά διαδικαστικό βήμα, καθώς, για λόγους ακρίβειας και για να μη χάσουμε πληροφορία κατά τη διάρκεια της μετατροπής των εκτυπωμένων εικόνων σε ψηφιακή μορφή, οι εκτυπωμένες φωτογραφίες σαρώθηκαν ως έγχρωμες (παρά το γεγονός ότι υπήρχε σχετικά λίγη χρωματική πληροφορία). Στη συνέχεια, οι «έγχρωμες» φωτογραφίες μετατράπηκαν σε φωτογραφίες απεικόνισης με χρήση τιμών του γκρι. Αυτή είναι μία τυπική διαδικασία, η οποία επιτελείται άμεσα από σχεδόν όλα τα σύγχρονα εμπορικά προγράμματα επεξεργασίας εικόνας. Στην περίπτωσή μας, χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη εντολή του ΜΑΤLAB (rgb2gray), η οποία μετατρέπει την τιμή ενός έγχρωμου εικονοστοιχείου σύμφωνα με τον τύπο:

$$V(x,y) = 0.2989 * R(x,y) + 0.5870 * G(x,y) + 0.1140 * B(x,y)$$

όπου V(x,y), R(x,y), G(x,y), B(x,y) είναι οι τιμές του γκρι, της κόκκινης, της πράσινης και της μπλε συνιστώσας, αντίστοιχα, για το εικονοστοιχείο με συντεταγμένες (x,y). Στην περίπτωσή μας για τη μετατροπή των εικόνων χρησιμοποιήθηκε κλίμακα του γκρι με 256 διακριτές τιμές (8) μπιτ ανά εικονοστοιχείο). Στο Σχήμα B.16 φαίνεται ένα παράδειγμα μίας εικόνας, όπως αυτή προέκυψε μετά από τη σάρωση (α) , μαζί με την ίδια εικόνα μετά από τη μετατροπή της σε εικόνα κλίμακας γκρι (β) .





Σχήμα B.16. (α) Η ψηφιακή φωτογραφία του καρφιού, όπως αυτή προέκυψε από τη σάρωση της εκτυπωμένης φωτογραφίας. (β) Η φωτογραφία του καρφιού, μετά από τη μετατροπή της σε εικόνα κλίμακας του γκρι (gray-scale).

Β.ΙΙ.3 Αφαίρεση θορύβου

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το πρώτο βασικό βήμα πριν την εξαγωγή της απαραίτητης πληροφορίας από τις ακτινογραφικές εικόνες είναι η κατάλληλη προεπεξεργασία τους, ώστε οι εικόνες να έρθουν σε μία μορφή, η οποία να διευκολύνει την εξαγωγή της πληροφορίας. Το πρώτο βήμα ήταν η αντιμετώπιση του θορύβου, ο οποίος χαρακτηρίζει τις εικόνες αυτές. Η πιο κλασική διαδικασία αφαίρεσης θορύβου από εικόνες είναι το φιλτράρισμα της εικόνας με ένα κατάλληλο φίλτρο. Μία πρώτη επιλογή θα ήταν ένα φίλτρο μέσου όρου (averaging filter), το οποίο αντικαθιστά την τιμή του κάθε εικονοστοιχείου με το μέσο όρο των τιμών των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στη γειτονιά του εικονοστοιχείου αυτού. Με τον τρόπο αυτό, οποιεσδήποτε τιμές των εικονοστοιχείων διαφέρουν πολύ από την τιμή του μέσου όρου της περιοχής αντικαθίστανται από τιμές που είναι πιο κοντά στο μέσο όρο της περιοχής. Ένα βασικό πρόβλημα που προκύπτει από την εφαρμογή ενός τέτοιου φίλτρου είναι ότι πιθανές ακμές των αντικειμένων που απεικονίζονται στην εικόνα χάνουν τη σαφήνειά τους, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η σαφής αναγνώριση των ακμών αυτών. Για το λόγο αυτό,

ιδιαίτερα στην περίπτωση του θορύβου τύπου αλατοπίπερου, χρησιμοποιείται συνήθως ένας άλλος τύπος φίλτρου, ο οποίος ονομάζεται φίλτρο αριθμητικού μέσου (median filter).

Η διαδικασία φιλτραρίσματος μίας εικόνας με χρήση φίλτρου αριθμητικού μέσου είναι σχετικά απλή: Για κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας, εντοπίζουμε τις τιμές των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στη γειτονιά του εικονοστοιχείου αυτού. Η «γειτονιά» του εικονοστοιχείου μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση μίας μάσκας, δηλαδή ενός πίνακα, ο οποίος περιέχει τις τιμές των εικονοστοιχείων αυτών. Για παράδειγμα, ας θεωρήσομε ένα εικονοστοιχείο της εικόνας με συντεταγμένες (x,y) και τιμή του γκρι που υποδηλώνεται από το σύμβολο V(x,y), καθώς και τα προσκείμενα εικονοστοιχεία σε αυτό:

V (x-1, y-1)	V(x, y-1)	V (x+1, y-1)
V(x-1, y)	V(x, y)	V(x+1, y)
V(x-1, y+1)	V(x, y+1)	V(x+1,y+1)

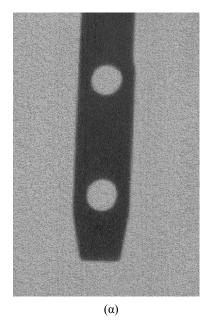
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το μέγεθος της μάσκας είναι 3x3. Το μέγεθος και το σχήμα της μάσκας μπορούν να επιλεχθούν αυθαίρετα, αν και, προφανώς, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της μάσκας, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση που θα υποστεί τελικά η εικόνα μας. Ας υποθέσουμε ότι οι τιμές ενός εικονοστοιχείου και της γειτονιάς του είναι οι εξής:

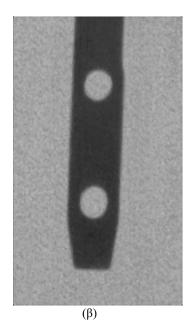
81	82	81
85	83	87
84	112	85

Σε αυτή την περίπτωση, η εφαρμογή του φίλτρου θα είχε ως αποτέλεσμα την αριθμητική ταξινόμηση των τιμών του πίνακα αυτού κατά αύξουσα τιμή (δηλαδή (81, 81, 82, 83, 84, 85, 85, 87, 112) και την αντικατάσταση του της τιμής του εικονοστοιχείου V(x,y) με το 84, το οποίο είναι ο αριθμητικός μέσος της ακολουθίας. Παρατηρούμε ότι, παρά την παρουσία μίας τιμής αρκετά μεγαλύτερης από το μέσο όρο των τιμών του πίνακα (δηλαδή την τιμή 112 του εικονοστοιχείου με συντεταγμένες (x,y+1), η τελική τιμή του εικονοστοιχείου V(x,y) δεν επηρεάζεται από την ακραία αυτή τιμή. Η περίπτωση αυτή είναι τυπικό παράδειγμα ενός εικονοστοιχείου το οποίο, αν και περιέχει στη γειτονιά του θόρυβο, μετά από το φιλτράρισμα θα έχει αποκτήσει τιμή που είναι πολύ κοντινότερη σε αυτή των

υπολοίπων εικονοστοιχείων της γειτονιάς, χωρίς να έχει επηρεαστεί ουσιαστικά από την παρουσία του θορύβου.

Στο Σχήμα Β.17 φαίνεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου αριθμητικού μέσου στην περίπτωσή μας. Σημειωτέον ότι η μάσκα που χρησιμοποιήθηκε είχε μέγεθος 5x5, ενώ για την εφαρμογή του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε ένα έτοιμο σχετικό πρόγραμμα γραμμένο σε γλώσσα ΜΑΤLAB.





Σχήμα Β.17. (α) Η αρχική εικόνα του καρφιού. **(β)** Η ίδια εικόνα μετά από την εφαρμογή φίλτρου αριθμητικού μέσου.

Β.ΙΙ.4 Ενίσχυση αντίθεσης

Το άλλο βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε όταν επεξεργαζόμαστε ακτινογραφίες είναι η σχετικά χαμηλή αντίθεση που έχουν οι εικόνες αυτές. Η χαμηλή αντίθεση είναι ένα πρόβλημα που μας αφορά για διάφορους λόγους· οι δύο βασικότεροι είναι οι εξής: (α) οι ακμές των αντικειμένων της εικόνας είναι λιγότερο σαφείς και (β) είναι πιο δύσκολο να ανιχνεύσει κανείς και να διαχωρίσει τις περιοχές ενδιαφέροντος από το φόντο της εικόνας.

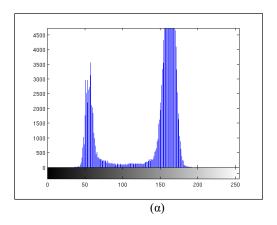
Υπάρχουν διάφορες τεχνικές ενίσχυσης της αντίθεσης ή της σαφήνειας της εικόνας, ανάλογα με τον τύπο και τα προβλήματα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη εικόνα. Οι τεχνικές αυτές περιγράφονται συνήθως με την ονομασία ενίσχυση εικόνας (image enhancement). Έχει αναπτυχθεί μία πλειάδα τυπικών τεχνικών ενίσχυσης εικόνας, ανάλογα

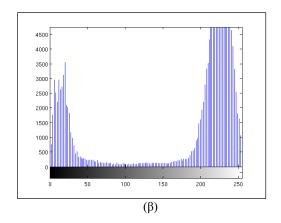
με τα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε στο συγκεκριμένο τύπο εικόνας· τα προβλήματα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν τη χαμηλή αντίθεση, την υπερβολικά χαμηλή ή υψηλή φωτεινότητα της εικόνας, την εξισορρόπηση χρωμάτων (σε έγχρωμες φωτογραφίες), καθώς και άλλα προβλήματα που μπορεί να παρουσιάζονται ανάλογα με το μηχανισμό και τις συνθήκες λήψης της εικόνας.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το πρόβλημα της χαμηλής αντίθεσης έχει να κάνει με τη μικρή, σχετικά, διαφορά των τιμών των εικονοστοιχείων του αντικειμένου που μας ενδιαφέρει (του καρφιού) από τις τιμές των εικονοστοιχείων του φόντου. Ένας κλασσικός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού είναι το «τέντωμα» του ιστογράμματος της εικόνας (histogram stretching). Υπενθυμίζεται ότι το ιστόγραμμα μίας εικόνας είναι ένα διάγραμμα που δείχνει το πλήθος των εικονοστοιχείων που έχει μία συγκεκριμένη τιμή του γκρι, για κάθε μία από τις τιμές του γκρι που χρησιμοποιήθηκαν.

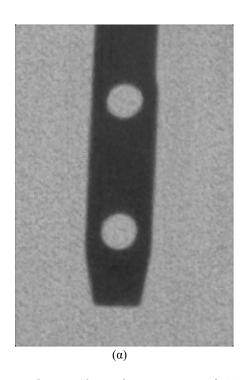
Η διαδικασία του τεντώματος του ιστογράμματος είναι, στην ουσία, ένας μετασχηματισμός (transform) της εικόνας, κατά τον οποίο, αρχικά, προσδιορίζονται μία νέα ελάχιστη και μέγιστη τιμή που μπορούν να λάβουν τα εικονοστοιχεία της εικόνας σύμφωνα με κάποιο κριτήριο. Στη συνέχεια, οι υπάρχουσες τιμές των εικονοστοιχείων της εικόνας αντιστοιχούνται σε νέες τιμές έτσι ώστε η νέα μέγιστη και η νέα ελάχιστη τιμή των εικονοστοιχείων της εικόνας να αντιστοιχούν στα όρια που προσδιορίστηκαν προηγουμένως, ενώ οι ενδιάμεσες τιμές μεταβάλλονται κατά ένα παράγοντα ίσο με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για τη μεταβολή της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα το «τέντωμα» του ιστογράμματος και την αύξηση της αντίθεσης.

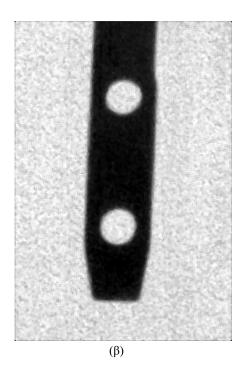
Στην περίπτωσή μας, οι νέα ελάχιστη και μέγιστη τιμή των εικονοστοιχείων αντιστοιχούν στο κάτω 1% και στο άνω 1% των συνολικών τιμών των εικονοστοιχείων. Αυτό σημαίνει ότι η νέα ελάχιστη τιμή είναι τέτοια, ώστε το πλήθος των εικονοστοιχείων που έχουν τιμή πάνω από τη νέα ελάχιστη να αποτελούν το 99% του συνολικού πλήθους των εικονοστοιχείων, ενώ το αντίστοιχο ισχύει για τη νέα μέγιστη τιμή. Επομένως, το ακραίο 2% (1% από την πάνω μεριά και 1% από την κάτω μεριά) των τιμών του ιστογράμματος αποκόπηκε, ενώ οι τιμές των υπολοίπων εικονοστοιχείων κατανεμήθηκαν στο ιστόγραμμα εκ νέου, ώστε να καταλαμβάνουν ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος τιμών. Στο Σχήμα Β.18(α) φαίνεται το ιστόγραμμα της εικόνας πριν και μετά από την εφαρμογή του μετασχηματισμού, ενώ στο Σχήμα Β.19 φαίνεται η εικόνα πριν και μετά από την εφαρμογή του μετασχηματισμού.





Σχήμα Β.18. Ιστόγραμμα της εικόνας του καρφιού. (α) Πριν από το τέντωμα (β) Μετά από το τέντωμα.





Σχήμα Β.19. Εικόνα του καρφιού (α) Πριν από το τέντωμα του ιστογράμματος (β) Μετά από το τέντωμα του ιστογράμματος.

Όπως παρατηρούμε από τις εικόνες, μετά από το τέντωμα του ιστογράμματος η διαφορά της έντασης του αντικειμένου που μας ενδιαφέρει, δηλαδή του καρφιού, από το φόντο της εικόνας είναι πολύ μεγαλύτερη, ενώ παράλληλα οι ακμές του αντικειμένου έχουν διατηρηθεί ανέπαφες. Παρατηρούμε, επίσης, ότι είναι αρκετά πιο έντονη και η παρουσία του θορύβου. Θα μπορούσαμε, σε αυτό το σημείο, εάν επιθυμούσαμε να ξαναφιλτράρουμε

την εικόνα μας ώστε να απομακρυνθεί ακόμα περισσότερο ο θόρυβος. Όμως, δεδομένου ότι έχουμε πετύχει το βασικό σκοπό μας, δηλαδή την αύξηση της αντίθεσης, στο βαθμό που το αντικείμενο είναι πλέον σαφώς διαχωρισμένο από το υπόβαθρο, δεν είναι απαραίτητο να ξαναϋποβάλουμε την εικόνα στη διαδικασία αυτή, καθώς αυτό θα αύξανε τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο, ενώ παράλληλα θα αλλοίωνε τις ακμές του αντικειμένου χωρίς να έχουμε κάποιο επιπλέον κέρδος όσον αφορά την κατάτμηση της εικόνας. Παρ' όλα αυτά, εάν κριθεί απαραίτητο, η εικόνα της ακτινογραφίας που περιέχει το οστό μαζί με το καρφί μπορεί να υποβληθεί εκ νέου σε φιλτράρισμα για την απομάκρυνση του θορύβου.

Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται το κεφάλαιο της προ-επεξεργασίας της εικόνας. Προχωρούμε στην ανάλυση και την επεξήγηση των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν για την κατάτμηση της εικόνας και την εξαγωγή του αντικειμένου που μας ενδιαφέρει και της σχετικής πληροφορίας που το συνοδεύει.

Κεφάλαιο Β.ΙΙΙ.: Κατάτμηση της εικόνας

Β.ΙΙΙ.1 Εισαγωγή

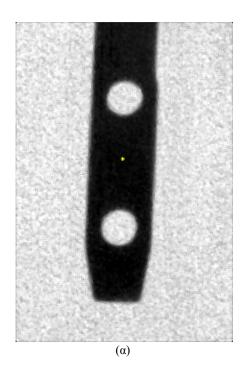
Αφού ολοκληρώσαμε την προ-επεξεργασία της εικόνας, είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στην κατάτμηση της εικόνας στις περιοχές του φόντου και του καρφιού. Όπως είδαμε και στο βιβλιογραφικό κεφάλαιο, υπάρχουν πολλές τεχνικές κατάτμησης, ανάλογα με τον τύπο της εικόνας και τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και συνδυασμοί τεχνικών, ανάλογα με την περίσταση, καθώς η χρήση ενός μόνο αλγορίθμου μπορεί να μην αρκεί για να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

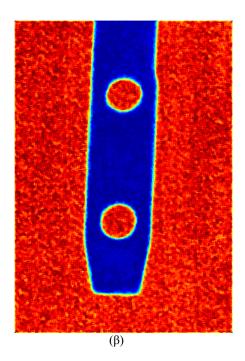
Στην περίπτωσή μας, θέλουμε ο αλγόριθμος κατάτμησης να διαχωρίσει το αντικείμενο του ενδιαφέροντος, δηλαδή το καρφί, από το φόντο της εικόνας. Επίσης, βασική απαίτησή μας είναι η περιοχή αυτή να είναι συνδεδεμένη, δηλαδή να αποτελείται από μόνο ένα αντικείμενο και να μην είναι χωρισμένη σε τμήματα. Αυτό σημαίνει ότι, εκτός από την πληροφορία της έντασης, ο αλγόριθμός μας θα πρέπει να κάνει χρήση και της χωρικής πληροφορίας. Επομένως, εκ των πραγμάτων δεν μπορούμε να κάνουμε χρήση τεχνικών κατάτμησης που δεν εξασφαλίζουν την ικανοποίηση και των δύο προϋποθέσεων, όπως, για παράδειγμα, οι τεχνικές που βασίζονται αποκλειστικά στα κατώφλια τιμών του γκρι (thresholding). Έτσι, για την εφαρμογή αυτή επιλέξαμε ένα συνδυασμό τεχνικών, ο οποίος βασίζεται στη χρήση κατωφλίου σε συνδυασμό με την ανίχνευση ακμών για τον προσδιορισμό των ορίων της περιοχής και την προσαύξηση περιοχής (region growing) για την απομόνωση της συγκεκριμένης περιοχής με εξασφάλιση της συνέχειας της. Θα προχωρήσουμε στην ανάλυση του κάθε βήματος του αλγορίθμου, μαζί με τη χρήση εικόνων για να μπορέσει ο αναγνώστης να κατανοήσει τη σκοπιμότητα του κάθε βήματος.

Β.ΙΙΙ.2 Χρωματική απόσταση από το σημείο εκκίνησης

Σε πρώτο στάδιο ο αλγόριθμος ζητάει από το χρήστη να προσδιορίσει ένα σημείο «σπόρο» (seed point), ή σημείο εκκίνησης, πάνω στο καρφί, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί τόσο για λόγους προσδιορισμού των κατωφλίων, όσο και για τον προσδιορισμό και την

προσαύξηση της περιοχής ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι απόλυτες χρωματικές διαφορές του σημείου αυτού από όλα τις τιμές όλων των υπολοίπων εικονοστοιχείων της εικόνας. Τα αποτελέσματα της διεργασίας αυτής φαίνονται στο Σχήμα Β.20, όπου το (β) δείχνει τις διαφορές με χρήση ενός χάρτη χρωμάτων 64 διαφορετικών τιμών.





Σχήμα Β.20. (α) Εικόνα του καρφιού με το σημείο εκκίνησης. (β) Χάρτης των διαφορών των τιμών του γκρι σε σχέση με το σημείο εκκίνησης. Με μπλε είναι τα εικονοστοιχεία με τιμές παρόμοιες με αυτή του εικονοστοιχείου εκκίνησης. Με κόκκινο είναι τα εικονοστοιχεία που έχουν πολύ διαφορετική τιμή από το σημείο εκκίνησης.

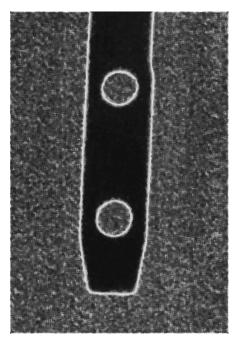
Σε αυτό το σημείο τονίζεται ότι ο χάρτης με τις διαφορές των τιμών των εικονοστοιχείων της εικόνας από την τιμή του σημείου εκκίνησης σχηματίστηκε με βάση μόνο τις διαφορές των τιμών του γκρι. Σε άλλες εφαρμογές ή σε περιπτώσεις όπου κοντά στο καρφί υπάρχουν περιοχές σχετικά υψηλής φωτεινότητας (οι οποίες μπορεί να δημιουργήθηκαν από την παρουσία οστών στην ακτινογραφία), μπορούμε να λάβουμε υπόψη μας και την απόσταση ως παράγοντα για το το σχηματισμό του χάρτη αυτού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν κρίθηκε κάτι τέτοιο απαραίτητο, καθώς οι τιμές του γκρι των εικονοστοιχείων αρκούν για το διαχωρισμό του καρφιού από τις υπόλοιπες περιοχές της εικόνας.

Β.ΙΙΙ.3 Ανίχνευση ακμών

Έχοντας πλέον το «χάρτη» των χρωματικών αποστάσεων του σημείου εκκίνησης από όλα τα υπόλοιπα σημεία της εικόνας στη διάθεσή μας προχωρούμε στην ανίχνευση των ακμών του αντικειμένου μας. Η ανίχνευση των ακμών θα μας χρησιμεύσει στον προσδιορισμό των ορίων της περιοχής του ενδιαφέροντος, καθώς θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως όρια κατά τη διαδικασία της προσαύξησης περιοχής. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνικών χρησιμοποιείται συχνά για την κατάτμηση εικόνων.

Για ανιχνεύσουμε τις ακμές, ξεκινάμε κωδικοποιώντας τις τιμές του χάρτη των χρωματικών αποστάσεων χρησιμοποιώντας 64 τιμές του γκρι και μετατρέπουμε το χάρτη αυτόν πλέον σε εικόνα. Για τη μετατροπή αυτή μας βολεύει να χρησιμοποιήσουμε την κωδικοποίηση χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του Σχήματος Β.20(β), καθώς η κωδικοποίηση αυτή έχει το πλεονέκτημά ότι οι τιμές με υψηλή φωτεινότητα (χρώματος κυανού στην εικόνα) αντιστοιχούν στις ενδιάμεσες τιμές του γκρι, οι οποίες με τη σειρά τους αντιστοιχούν στις ακμές του αντικειμένου. Από την άλλη, τα εικονοστοιχεία που απεικονίζονται με κόκκινο ή με μπλε χρώμα έχουν τιμή χρωματικής φωτεινότητας χαμηλότερη από την αντίστοιχη των εικονοστοιχείων με κυανό χρώμα, οπότε κατά τη μετατροπή της εικόνας του Σχήματος Β.20(β) σε γκρι θα αποκτήσουν χαμηλότερη τιμή από τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν στις ακμές.

Με τον τρόπο αυτό, καταφέρνουμε να τονίσουμε τις ακμές του αντικειμένου με αυτοματοποιημένο τρόπο, χωρίς να χρειάζεται να προσδιορίσουμε ευαίσθητα κατώφλια για να βρούμε το εύρος τιμών του γκρι που αντιστοιχεί στις ακμές του χάρτη. Επίσης, χρησιμοποιώντας μόνο 64 τιμές για την κωδικοποίηση αυτή έχουμε το πλεονέκτημα ότι οι διαφορές ανάμεσα στις τιμές τονίζονται περισσότερο από θα τονίζονταν εάν χρησιμοποιούσαμε μεγαλύτερο πλήθος τιμών. Το αποτέλεσμα της μετατροπής του χάρτη αυτού σε κανονική εικόνα φαίνεται στο Σχήμα Β.21.

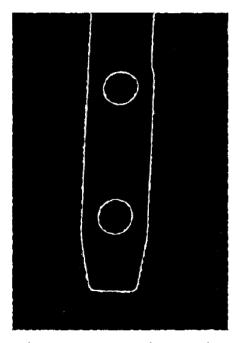


Σχήμα Β.21. Η εικόνα του χάρτη των χρωματικών αποστάσεων του σημείου εκκίνησης από όλα τα υπόλοιπα σημεία της αρχικής εικόνας.

Παρατηρούμε ότι, λόγω της φύσης της εικόνας, οι ακμές του αντικειμένου έχουν πλάτος (σε εικονοστοιχεία) αρκετά μεγαλύτερο από 1. Από τα εικονοστοιχεία της προκύπτουσας εικόνας αυτής, μας ενδιαφέρουν, επομένως, μόνο εκείνα που παρουσιάζουν χρωματική ομοιότητα με το αρχικό εικονοστοιχείο, ενώ τα υπόλοιπα μπορούμε να τα θεωρήσουμε ως εικονοστοιχεία που ανήκουν στις ακμές του αντικειμένου ή στο φόντο της εικόνας. Για να διαχωρίσουμε τα εικονοστοιχεία που μας ενδιαφέρουν (δηλαδή τις ακμές) από τα υπόλοιπα με μεγαλύτερη σαφήνεια, ορίζουμε δύο κατώφλια, ένα χαμηλό και ένα υψηλότερο. Τα εικονοστοιχεία με τιμή του γκρι χαμηλότερη από το χαμηλό κατώφλι αποκτούν την τιμή 0 (μαύρο), ενώ τα εικονοστοιχεία με τιμή μεγαλύτερη από το υψηλό κατώφλι αποκτούν την τιμή 1 (λευκό). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το χαμηλό κατώφλι που επιλέχθηκε ήταν το 0,7, ενώ το υψηλό ήταν το 0,8. Η συγκεκριμένη διεργασία ισοδυναμεί με την εφαρμογή της ακόλουθης συνάρτησης στα εικονοστοιχεία της εικόνας: όπου V'(x,y) είναι η νέα τιμή του εικονοστοιχείου, V(x,y) είναι η παλιά τιμή του εικονοστοιχείου και T_L , T_H είναι το χαμηλό και το υψηλό κατώφλι αντίστοιχα. Η επιλογή των κατωφλίων αυτών δε χρειάζεται να είναι μεγάλης ακρίβειας, καθώς οι τιμές των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν στις ακμές διαφέρουν αρκετά από αυτές του φόντου ή του αντικειμένου, ενώ αυτό που μας ενδιαφέρει τελικά είναι τα εικονοστοιχεία που απεικονίζουν το αντικείμενό μας να έχουν σαφώς διαφορετικές τιμές από αυτά που απεικονίζουν τις ακμές του. Υπενθυμίζεται, επίσης, ότι η συνάρτηση αυτή εφαρμόζεται στα

$$V'(x,y) = \begin{cases} 0, & V(x,y) < T_L \\ V(x,y), & T_L < V(x,y) < T_H \\ 1, & V(x,y) > T_H \end{cases}$$

εικονοστοιχεία του χάρτη των χρωματικών αποστάσεων και όχι τα κανονικά εικονοστοιχεία της εικόνας. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής φαίνεται στο Σχήμα Β.22.



Σχήμα Β.22. Η εικόνα του χάρτη των χρωματικών αποστάσεων των εικονοστοιχείων της εικόνας από το σημείο εκκίνησης, μετά από την εφαρμογή των κατωφλίων.

Στην εικόνα αυτή βλέπουμε ότι το αντικείμενο και το φόντο της εικόνας μας έχουν αποκτήσει τιμή 0, δηλαδή είναι μαύρα, ενώ οι ακμές του αντικειμένου έχουν αποκτήσει τιμές που αντιστοιχούν είτε σε κάποια απόχρωση του γκρι είτε στο λευκό. Επομένως, έχουμε κάνει ήδη σημαντικά βήματα για την ανίχνευση των ακμών του αντικειμένου.

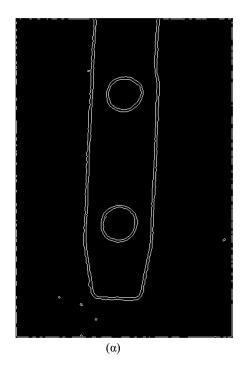
Από εδώ και πέρα τα πράγματα είναι σχετικά απλά: κρατάμε όλες τις τιμές που είναι ίσες με 0 και θέτουμε όλες τις υπόλοιπες ίσες με 1, οπότε καταλήγουμε με μία δυαδική εικόνα. Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε μία από τις καθιερωμένες τεχνικές ανίχνευσης ακμών, με κατάλληλα κατώφλια, ώστε να έχουμε μία σχετικά ευαίσθητη ανίχνευση των ακμών της εικόνας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η τεχνική Canny (1986) για την ανίχνευση των ακμών, με χαμηλό κατώφλι 0,1 και υψηλό 0,4. Επειδή, όπως αναφέρθηκε, οι ακμές ήταν σχετικά χοντρές, η εφαρμογή της μεθόδου ανίχνευσης ακμών αυτής μας έδωσε δύο όρια για τις ακμές του αντικειμένου, ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό, καθώς και

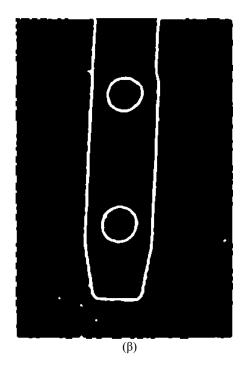
ορισμένες μεμονωμένες ακμές. Για να αντιμετωπίσουμε τα φαινόμενα αυτά, εφαρμόσαμε μία διεργασία μορφολογικού «κλείσιμου» της εικόνας (image closing).

Το κλείσιμο της εικόνας ορίζεται ως μία διαδικασία διαστολής (dilation), ακολουθούμενη από μία διαδικασία διάβρωσης (erosion). Η διαδικασία διαστολής μίας δυαδικής εικόνας A από ένα δομικό στοιχείο B ορίζεται από την πράξη συνόλων: $A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b$, όπου A_b είναι τα σημεία που προκύπτουν εάν τοποθετήσουμε στα σημεία της εικόνας A το κέντρο του δομικού στοιχείου B. Αυτό σημαίνει ότι, εάν θεωρήσουμε ότι το κέντρο το B ταυτίζεται με την αρχή των αξόνων, η διαστολή της εικόνας A από το δομικό στοιχείο B θα μας δώσει ως αποτέλεσμα το γεωμετρικό τόπο των σημείων που καλύπτονται από το B, όταν το κέντρο του B κινείται εντός της εικόνας A. Σημειωτέον ότι, για τις δυαδικές εικόνες, θεωρούμε ως σημεία της εικόνας τα εικονοστοιχεία με τιμή A (λευκό), ενώ τα υπόλοιπα σημεία θεωρούνται το φόντο της εικόνας.

Αντίστοιχα, η διαδικασία διάβρωσης μίας δυαδικής εικόνας A από ένα δομικό στοιχείο B ορίζεται ως η πράξη: $A\Theta B = \{z \in E | B_z \subseteq A\}$, όπου B_z είναι η μετατόπιση του δομικού στοιχείου B κατά ένα διάνυσμα θέσης z, δηλαδή $B_z = \{b+z|b\in E\} \forall z\in E$ και E είναι το ευκλείδειο σύστημα αναφοράς μας. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα μία εικόνα, τα σημεία της οποίας προκύπτουν όταν κατά την ταύτιση του κέντρου του B με κάθε ένα από τα εικονοστοιχεία της εικόνας A, το B κείτεται εξ ολοκλήρου εντός της εικόνας A.

Έτσι, λοιπόν, η διαδικασία μορφολογικού κλείσιμου της εικόνας θα πρέπει, αφενός, να απαλλάξει την εικόνα από τις μεμονωμένες ακμές, ενώ παράλληλα θα πρέπει να κάνει τις υπόλοιπες ακμές συμπαγείς, ώστε να μην υπάρχουν κενά. Στην περίπτωσή μας, χρησιμοποιήθηκε ένα δομικό στοιχείο σχήματος κυκλικού δίσκου ακτίνας 5 εικονοστοιχείων. Τα αποτελέσματα της διεργασίας αυτής φαίνονται στο Σχήμα Β.23.





Σχήμα Β.23. (α) Το αποτέλεσμα της ανίχνευσης των ακμών της εικόνας. **(β)** Το αποτέλεσμα του μορφολογικού κλεισίματος της εικόνας.

Αφού πλέον έχουμε ολοκληρώσει τον υπολογισμό του συμπαγούς περιγράμματος του αντικειμένου μας, είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στην εξαγωγή των συντεταγμένων του αντικειμένου από την υπόλοιπη εικόνα. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

B.III.4 Εξαγωγή του καρφιού με χρήση τεχνικής προσαύξησης περιοχής.

Η προσαύξηση περιοχής (region growing), όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι μία από τις κλασικές τεχνικές κατάτμησης εικόνας. Ο βασικός αλγόριθμος μπορεί να περιγραφεί ως εξής: ξεκινώντας από ένα σημείο εκκίνησης, εξετάζουμε τα εικονοστοιχεία που πρόσκεινται στην περιοχή ενδιαφέροντος (region of interest – ROI). Εάν τα εικονοστοιχεία αυτά πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια (όπως, πχ, να έχουν τιμή του γκρι χαμηλότερη από ένα κατώφλι), τότε η περιοχή διευρύνεται ώστε να περιλαμβάνει και τα εικονοστοιχεία αυτά. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να μην υπάρχουν εικονοστοιχεία που πρόσκεινται στην περιοχή τα οποία να ικανοποιούν τα κριτήρια που

έχουμε θέσει, ή μέχρι να εξαντληθούν τα εικονοστοιχεία της εικόνας. Με τον τρόπο αυτό, καταλήγουμε να έχουμε έναν πίνακα με τις συντεταγμένες των εικονοστοιχείων που ανήκουν στην περιοχή που μας ενδιαφέρει.

Η πιο κλασική υλοποίηση του αλγορίθμου προσαύξησης περιοχής κάνει χρήση της τεχνικής της αυτεπίκλισης (recursion). Η αυτεπίκληση είναι μία προγραμματιστική τεχνική, κατά την οποία μία συνάρτηση (function) καλεί τον εαυτό της κατ' επανάληψη μέχρι να ικανοποιηθεί μία συγκεκριμένη συνθήκη. Ένα πολύ απλό παράδειγμα μίας συνάρτησης που βασίζεται στην αυτεπίκληση είναι η συνάρτηση που μας δίνει το παραγοντικό ενός ακεραίου αριθμού:

Συνάρτηση παραγοντικό:

Είσοδος: ακέραιος v τέτοιος ώστε v >= 0

Έξοδος: $[v \times (v-1) \times (v-2) \times ... \times 1]$

- 1. Εάν το ν είναι 0, επίστρεψε 1
- 2. Διαφορετικά, επίστρεψε $[v \times \pi \alpha \rho \alpha \gamma o v \tau \iota κ \dot{o}(v-1)]$

Τέλος συνάρτησης παραγοντικού

Όπως βλέπουμε και από το παράδειγμα, ο αλγόριθμος βασίζεται στο γεγονός ότι, όσο δεν έχουμε ικανοποιήσει το κριτήριο τερματισμού (v=0), η συνάρτηση συνεχίζει να καλεί τον εαυτό της. Όταν όντως ικανοποιείται το κριτήριο τερματισμού, η συνάρτηση θα επιστρέψει την τιμή 1 στην προηγούμενη έκφανση της, η οποία με τη σειρά της θα επιστρέψει την τιμή 2 στην προηγούμενη έκφανσή της και ούτω καθ' εξής μέχρι να εκτελεστούν όλες οι εκφάνσεις της συνάρτησης.

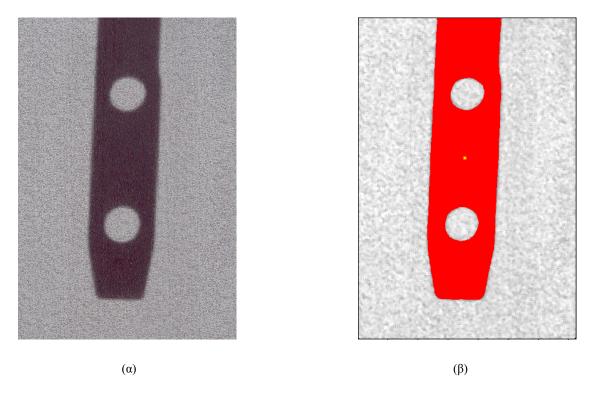
Για τη διαδικασία της προσαύξησης περιοχής, μπορούμε να ακολουθήσουμε την ίδια νοοτροπία: Καλούμε την συνάρτηση που ελέγχει εάν το εικονοστοιχείο ικανοποιεί το κριτήριο τερματισμού, η οποία με τη σειρά της ελέγχει και τα γειτονικά εικονοστοιχεία. Εάν κάποιο από αυτά τα γειτονικά εικονοστοιχεία δεν ικανοποιεί το κριτήριο τερματισμού, τότε η συνάρτηση ξανακαλεί τον εαυτό της με όρισμα το νέο εικονοστοιχείο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να μην υπάρχουν άλλα εικονοστοιχεία τα οποία δεν ικανοποιούν το κριτήριο τερματισμού της συνάρτησης (δηλαδή έχουμε εξαντλήσει όλα τα πιθανά εικονοστοιχεία που μπορεί να ανήκουν στην περιοχή μας). Η διαδικασία αυτή είναι σχετικά λιτή, αποτελεσματική και άμεση.

Όμως, η χρήση της αυτεπίκλησης υποφέρει από ένα βασικό μειονέκτημα: Υπάρχει περιορισμός στο πόσες φορές μπορεί να καλέσει η συνάρτηση τον εαυτό της. Ο

περιορισμός αυτός εξαρτάται από το λειτουργικό σύστημα και τη γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιούμε. Στην περίπτωσή μας, όπου η συνάρτηση υλοποιήθηκε με χρήση του MATLAB σε υπολογιστή με μνήμη 1 Gigabyte και λειτουργικό σύστημα Windows XP, το σύστημα επέτρεπε μέχρι 2400 κλήσεις της συνάρτησης αυτής. Το όριο αυτό δεν αρκούσε για την πλήρη κάλυψη ολόκληρης της περιοχής ενδιαφέροντος, οπότε χρειάστηκε μία εναλλακτική υλοποίηση του αλγορίθμου αυτού.

Για την υλοποίηση που εφαρμόστηκε ειδικά για την εφαρμογή αυτή, ξεκινάμε σχηματίζοντας ένα «χάρτη» των εικονοστοιχείων της εικόνας. Ο χάρτης αυτός είναι ένας βοηθητικός πίνακας με μέγεθος ίσο με το μέγεθος της εικόνας, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί για να σημειώνουμε ποια εικονοστοιχεία έχουν εξεταστεί και ποια θα εξεταστούν στην επόμενη εκτέλεση του βρόχου. Αρχικά, σημειώνουμε με 1 το σημείο που έχει επιλέξει ο χρήστης κατά την αρχή της εκτέλεσης του προγράμματος. Αυτό είναι το σημείο του οποίου η γειτονιά θα εξεταστεί για το κατά πόσο περιέχει εικονοστοιχεία που πιθανώς να ανήκουν στην περιοχή μας. Για κάθε εικονοστοιχείο που εξετάζουμε, ελέγχουμε κατά πόσο ανήκει στην περιοχή του ενδιαφέροντός μας. Το κριτήριο είναι το εικονοστοιχείο με αντίστοιχη θέση στην εικόνα που έχει προκύψει από το μορφολογικό κλείσιμο να έχει τιμή ίση με το εικονοστοιχείο που επέλεξε ο χρήστης στην αρχή του προγράμματος (δηλαδή να μην πρόκειται για εικονοστοιχείο που ανήκει στην ακμή του αντικειμένου). Εάν το εν λόγω εικονοστοιχείο ανήκει στην περιοχή ενδιαφέροντος, τότε σημειώνουμε το εικονοστοιχείο αυτό με -1 στο χάρτη μας (ώστε να μην ασχοληθούμε μαζί του άλλο) και το περιλαμβάνουμε στην τελική περιοχή ενδιαφέροντος, ενώ τα εικονοστοιχεία που είναι γειτονικά με αυτό σημειώνονται με 1, ώστε να εξεταστούν κατά την επόμενη εκτέλεση του βρόχου. Ο βρόχος επαναλαμβάνεται μέχρι να μην υπάρχουν άλλα εικονοστοιχεία προς εκτέλεση, οπότε και τερματίζεται.

Η υλοποίηση αυτή είναι σχετικά γρήγορη και με μικρές απαιτήσεις σε μνήμη. Στο Σχήμα Β.24 φαίνεται η αρχική εικόνα και η περιοχή που εξήχθη με τη χρήση του αλγορίθμου προσαύξησης περιοχής.



Σχήμα B.24. (a) Η αρχική εικόνα του καρφιού. (β) Η περιοχή που προέκυψε μετά από τη χρήση του αλγορίθμου προσαύζησης περιοχής.

Όπως βλέπουμε και από την εικόνα, η περιοχή που εξήχθη με τη χρήση όλων των ανωτέρω τεχνικών (κόκκινο) προσεγγίζει πολύ καλά την περιοχή που θέλουμε να εξάγουμε από την αρχική εικόνα. Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται το μέρος που περιγράφει τη διαδικασία της κατάτμησης της εικόνας στις περιοχές του καρφιού και του φόντου. Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφονται οι αλγόριθμοι εξαγωγής περαιτέρω πληροφορίας από την περιοχή αυτή που προέκυψε από την κατάτμηση της εικόνας. Η πληροφορία αυτή δεν είναι η μέγιστη δυνατή, αλλά είναι κάποια βασικά στοιχεία, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για πιο συγκεκριμένους υπολογισμούς σχετικά με τον προσανατολισμό του καρφιού.

<u>Κεφάλαιο Β.ΙV.: Εξαγωγή γεωμετρικής πληροφορίας από την</u> περιοχή του καρφιού.

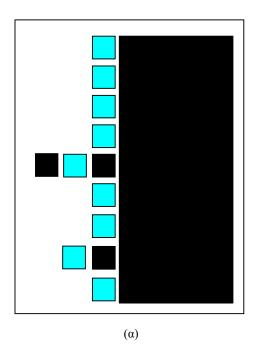
Β.ΙV.1 Εξαγωγή και αρίθμηση του περιγράμματος

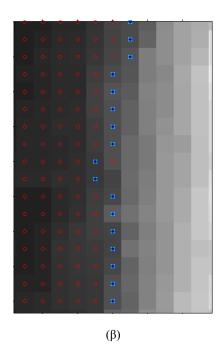
Για να μπορέσουμε να εξάγουμε κάποια χρήσιμη πληροφορία σχετικά με τη γωνία καταβύθισης του καρφιού, θα πρέπει να μπορούμε να μετρήσουμε στην εικόνα μας κάποια σχετικά μεγέθη, όπως είναι το μήκος της προβολής της εικόνας του καρφιού, η θέση των σημείων καμπής του περιγράμματος και άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη, τα οποία θα μας επιτρέψουν να εξάγουμε ορισμένα συμπεράσματα σχετικά με τον προσανατολισμό του καρφιού σε σχέση με κάποιο σύστημα αναφοράς. Το πρώτο βήμα στη διαδικασία αυτή είναι ο υπολογισμός των συντεταγμένων του περιγράμματος του καρφιού και η αρίθμηση των σημείων του.

Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ειδικός αλγόριθμος, ο οποίος κάνει γρήση των συντεταγμένων της περιοχής κατάτμησης για να υπολογίσει τις συντεταγμένες του περιγράμματος του καρφιού. Η υλοποίηση του αλγορίθμου έχει ως αρχικό βήμα τον προσδιορισμό του πρώτου σημείου του περιγράμματος, το οποίο ορίζεται αυθαίρετα ως το σημείο το οποίο βρίσκεται στην πιο πάνω και πιο αριστερή θέση της εικόνας. Αυτό μας εξασφαλίζει ότι θα ξεκινήσουμε από το περίγραμμα της περιοχής και όχι από κάποιο σημείο που πιθανώς ανήκει στα εικονοστοιχεία που σχηματίζουν τις τρύπες του καρφιού. Από το σημείο εκείνο και μετά, σχηματίζεται ένας βρόχος. Σε κάθε εκτέλεση του βρόχου, εξάγουμε αρχικά τα γειτονικά εικονοστοιχεία του τελευταίου εικονοστοιχείου που προστέθηκε στο περίγραμμα. Ας ονομάσουμε, για λόγους σαφήνειας, το πρώτο από τα γειτονικά στοιχεία αυτά Γ_I . Για κάθε ένα από τα γειτονικά αυτά εικονοστοιχεία, ελέγχουμε, σε πρώτη φάση, εάν έχουν απόσταση από το πρώτο εικονοστοιχείο του περιγράμματος μικρότερη ή ίση με $\sqrt{2}$. Εάν ναι, τότε το εικονοστοιγείο αυτό είναι πιθανό να είναι και το τελευταίο εικονοστοιχείο του περιγράμματος, γεγονός που καταγράφεται με σχετικό δείκτη. Στη συνέχεια, εξετάζουμε πόσα εικονοστοιχεία του φόντου της εικόνας γειτνιάζουν με το Γ_l . Ακολουθούν δύο έλεγχοι: Εάν το Γ_l που ελέγχουμε ανήκει στην περιοχή ενδιαφέροντος (η οποία εξήχθη κατά το προηγούμενο στάδιο του προγράμματος) και δεν αποτελεί ήδη μέλος του περιγράμματος, τότε εάν έχει από 2 έως 5 γειτονικά εικονοστοιχεία που ανήκουν στο φόντο της εικόνας, το Γ_1 ανήκει στο περίγραμμα. Από το σημείο αυτό και μετά το Γ_1

θεωρείται το τελευταίο σημείο του περιγράμματος, οπότε, εάν η απόστασή του είναι μικρότερη ή ίση από $\sqrt{2}$ από το πρώτο εικονοστοιχείο του περιγράμματος, ο βρόχος τερματίζεται. Διαφορετικά, ο βρόχος επαναλαμβάνεται και διεξάγουμε τον ίδιο έλεγχο με τρέχον σημείο το σημείο που μέχρι πρότινος ονομαζόταν Γ_I .

Εάν έγουμε περισσότερα από 5 γειτονικά εικονοστοιγεία που ανήκουν στο φόντο, τότε πρόκειται για εικονοστοιχείο που ανήκει σε ένα «πλοκάμι», το οποίο έχει προκύψει ως λάθος της διαδικασίας μορφολογικού κλεισίματος της εικόνας. Εάν έχουμε 1 γειτονικό εικονοστοιχείο που ανήκει στο φόντο, τότε πρόκειται για ένα μικρό «κόλπο» ή για ορθή γωνία, στοιχεία τα οποία δεν γίνονται αποδεκτά. Στο Σχήμα Β.25 φαίνονται αυτοί οι μη αποδεκτοί συνδυασμοί εικονοστοιγείων. Σημειωτέον ότι ο συνδυασμός που παρουσιάζεται στο (α) δεν προέκυψε σε καμία περίπτωση, αλλά υπάρχει εκεί για λόγους ασφαλείας. Εάν το Γ_1 δεν έχει κανένα γειτονικό εικονοστοιχείο που να ανήκει στο φόντο, τότε πρόκειται για σημείο που ανήκει στο εσωτερικό της περιοχής ενδιαφέροντος, οπότε αγνοείται και ο έλεγχος επαναλαμβάνεται για το γειτονικό σημείο Γ_2 του τελευταίου σημείου που προστέθηκε στο περίγραμμα. Στην περίπτωση που, για κάποιο λόγο, δε βρέθηκε κάποιο σημείο που να ικανοποιεί τα κριτήρια για συμπερίληψη στο περίγραμμα, τότε το πρόγραμμα θεωρεί ότι το τελευταίο εικονοστοιχείο που είχε προστεθεί στο περίγραμμα προστέθηκε από λάθος, οπότε σβήνεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάποιο άλλο από τα γειτονικά εικονοστοιγεία του πιο πρόσφατου εικονοστοιγείου που προστέθηκε στο περίγραμμά μας.





Σχήμα Β.25. Παραδείγματα απορριπτέων συνδυασμών εικονοστοιχείων. (a) Παράδειγμα «πλοκαμιού», το οποίο ζεφεύγει από το κυρίως σώμα της εικόνας κατά πολύ. Με κυανό φαίνονται τα εικονοστοιχεία που θα επιλεγούν τελικώς για το περίγραμμα. (β) Παράδειγμα «κόλπου». Ο αλγόριθμος αγνόησε το μεμονωμένο εικονοστοιχείο και διεύρυνε ελαφρώς το κενό ώστε να είναι σαφέστερο.

Β.ΙV.2 Αντιμετώπιση ορθών γωνιών

Ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο που μπορεί να προκύψει κατά την εξαγωγή του περιγράμματος της περιοχής ενδιαφέροντός μας είναι ο σχηματισμός ορθών γωνιών από τα εικονοστοιχεία του περιγράμματος. Οι ορθές γωνίες από τα εικονοστοιχεία του περιγράμματος μπορεί να προκύψουν σε σημεία όπου ο αλγόριθμος δε βρήκε άλλα κατάλληλα εικονοστοιχεία για να συνεχίσει το σχηματισμό του περιγράμματος. Το φαινόμενο αυτό είναι ανεπιθύμητο επειδή εισάγει περιττή πληροφορία στο περίγραμμα, η οποία μπορεί να επηρεάσει το μετέπειτα προσδιορισμό των βέλτιστων ευθειών και καμπύλων που προσεγγίζουν το περίγραμμα αυτό. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε σκόπιμο να εισαχθεί ένας επιπλέον έλεγχος, ο οποίος εξασφαλίζει την απομάκρυνση των γωνιών αυτών από τους πίνακες με τις συντεταγμένες του περιγράμματος.

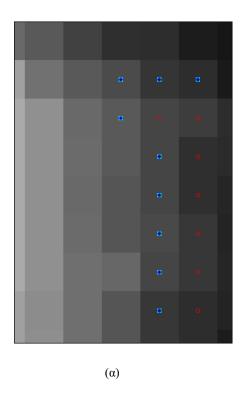
Η νοοτροπία του αλγορίθμου απομάκρυνσης των ορθών γωνιών είναι σχετικά απλή. Ας θεωρήσουμε μία περιοχή 3x3, στο κέντρο της οποίας βρίσκεται ένα από τα εικονοστοιχεία του περιγράμματός μας:

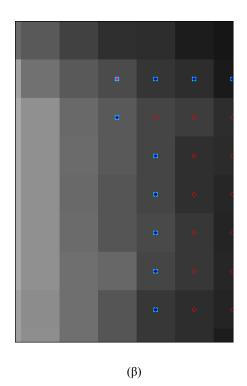
1	2	3
4	5	6
7	8	9

Οι αριθμοί υποδηλώνουν τις σχετικές θέσεις των εικονοστοιχείων. Η ύπαρξη ορθής γωνίας στο περίγραμμα της περιοχής ενδιαφέροντος συνεπάγεται ότι, πέρα από το εικονοστοιχείο 5, το οποίο ανήκει στο περίγραμμα, θα πρέπει να ανήκουν και τα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν στα ακόλουθα ζεύγη: (2,6), (6,8), (4,8), (2,4). Για παράδειγμα, εάν έχουμε μία περίπτωση όπου τα εικονοστοιχεία 2, 5 και 6 σχηματίζουν ορθή γωνία, οι τιμές του χάρτη του περιγράμματος στις σχετικές αυτές θέσεις θα πρέπει να είναι:

0	1	0
0	1	1
0	0	0

Επομένως, για να ελέγξουμε για την παρουσία ορθής γωνίας, ελέγχουμε τις τιμές των εικονοστοιχείων στις σχετικές θέσεις 2, 4, 6 και 8. Εάν βρεθούν εικονοστοιχεία σε οποιεσδήποτε δύο από τις θέσεις αυτές, τότε σχηματίζουμε τα δύο διανύσματα που αντιστοιχούν στα ευθύγραμμα τμήματα που το ένα άκρο τους είναι το κεντρικό εικονοστοιχείο και το άλλο άκρο τους είναι το εικονοστοιχείο στις θέσεις 2, 4, 6 ή 8, αντίστοιχα. Εάν το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων αυτών είναι ίσο με το μηδέν τότε τα διανύσματα είναι κάθετα μεταξύ τους, γεγονός που υποδηλώνει την παρουσία ορθής γωνίας. Αυτό συμβαίνει όταν έχουμε τιμή 1 στα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν στα ζεύγη (2, 6), (6, 8), (4, 8) και (2,4). Εάν το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων είναι διάφορο του μηδενός, τότε τα διανύσματα είναι παράλληλα μεταξύ τους, οπότε προχωράμε στο επόμενο εικονοστοιχείο. Η περίπτωση αυτή προκύπτει όταν έχουμε τιμή 1 στα εικονοστοιχεία που ανήκουν στα ζεύγη σχετικών θέσεων (2, 8) ή (4, 6). Ένα παράδειγμα περίπτωσης αντιμετώπισης ορθής γωνίας φαίνεται στο Σχήμα Β.26.





Σχήμα Β.26. Διαγραφή ορθής γωνίας. (α) Πριν τη διόρθωση. (β) Μετά από τη διόρθωση. Το εικονοστοιχείο που αντιστοιχεί στην ακμή της γωνίας δεν αποτελεί πλέον μέρος του περιγράμματος.

Β.ΙV.3 Εύρεση των σημείων καμπής του περιγράμματος

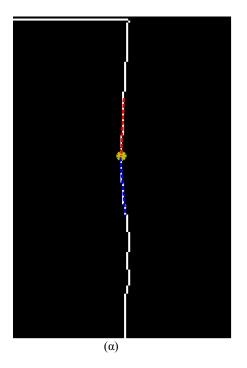
Αφού, πλέον, έχουμε το περίγραμμα της περιοχής ενδιαφέροντος σε μία λειτουργική μορφή, μπορούμε να προχωρήσουμε με την εξαγωγή περαιτέρω πληροφορίας σχετικά με την προβολή του καρφιού. Για το σκοπό αυτό, το πρώτο βήμα είναι να εντοπίσουμε τις γωνίες της προβολής του καρφιού, η θέση των οποίων θα μας δώσει πολύτιμη πληροφορία σχετικά με τη γωνία καταβύθισης του καρφιού σε σχέση με το επίπεδο της προβολής.

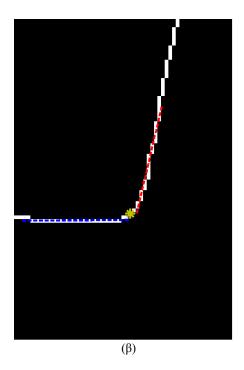
Όπως είδαμε και στο βιβλιογραφικό κεφάλαιο, υπάρχουν πολλές τεχνικές αναγνώρισης σχημάτων που χρησιμοποιούνται στις ιατρικές απεικονίσεις. Πολλές από αυτές κάνουν χρήση των παραμορφώσιμων μοντέλων για την αναγνώριση συγκεκριμένων αντικειμένων. Για τη χρήση μίας τέτοιας τεχνικής, όμως, είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός τέτοιου μοντέλου, καθώς και η υλοποίηση του σχετικού αλγορίθμου υπολογισμού της παραμόρφωσης. Οι διαδικασίες αυτές είναι εξαιρετικά χρονοβόρες, αν λάβουμε υπόψη ότι (α) δεν υπήρχε έτοιμο τέτοιο μοντέλο στη διάθεσή μας και (β) το περίγραμμα της προβολής του καρφιού είναι ένα σχετικά απλό πολύγωνο. Για το λόγο αυτό, υλοποιήθηκε ένας

εξειδικευμένος αλγόριθμος, ο οποίος βασίζεται στην αναγνώριση των γωνιών του σχήματος. Ο αλγόριθμος αυτός είναι σχετικά απλός στην υλοποίηση και η εκτέλεσή του καταναλώνει ελάχιστο χρόνο σε ένα σύγχρονο υπολογιστή.

Ξεκινάμε λαμβάνοντας υπόψη ότι έχουμε πλέον στη διάθεσή μας τους πίνακες με τις συντεταγμένες του περιγράμματος της εικόνας. Το πρώτο βήμα μας είναι να προεκτείνουμε τους πίνακες αυτούς τόσο στην αρχή, όσο και στο τέλος, προσάπτοντας ένα περιθώριο σημείων. Στην περίπτωση της αρχής του πίνακα, η προέκταση αποτελείται από έναν κατάλληλο αριθμό σημείων που ανήκουν στο τέλος του πίνακα, ενώ, αντίστοιχα, το τέλος του πίνακα προεκτείνεται ώστε να περιέχει έναν αριθμό σημείων που ανήκουν στην αρχή του πίνακα. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζουμε ότι οι υπολογισμοί που θα κάνουμε θα μπορούν να ολοκληρωθούν για το σύνολο των σημείων του περιγράμματος και δε θα αντιμετωπίσουμε προβλήματα όταν βρισκόμαστε πολύ κοντά στην αρχή ή στο τέλος των πινάκων των συντεταγμένων.

Στη συνέχεια, για κάθε σημείο του περιγράμματος (τρέχον) θεωρούμε ένα κατάλληλο αριθμό σημείων του περιγράμματος που βρίσκονται εκατέρωθεν του τρέχοντος. Για τα σημεία αυτά, υπολογίζουμε τις βέλτιστες ευθείες που τα προσεγγίζουν με την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων. Με επανειλημμένες δοκιμές βρέθηκε ότι ένα κατάλληλο μήκος για τον υπολογισμό των ευθειών αυτών είναι το EXT=30 εικονοστοιχεία. Με τη διαδικασία αυτή, καταλήγουμε με δύο ευθείες που μας δείχνουν τον προσανατολισμό του περιγράμματος πριν και μετά από το τρέχον σημείο (Σχήμα B.27(α)). Οι ευθείες αυτές είναι, προφανώς, εφαπτόμενες στο περίγραμμα του καρφιού. Στην ουσία, φυσικά, πρόκειται για ευθύγραμμα τμήματα, το ένα άκρο των οποίων είναι το εικονοστοιχείο που εξετάζουμε κάθε φορά. Για λόγους πρακτικότητας, θα αναφερόμαστε στα ευθύγραμμα τμήματα αυτά ως ευθείες, καθώς δεν μας ενδιαφέρουν τόσο οι συντεταγμένες των άκρων των τμημάτων, όσο η κλίση τους και η σχετική γωνία μεταξύ τους.



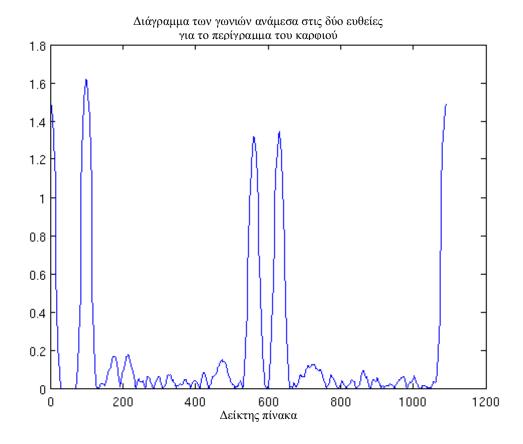


Σχήμα Β.27. Κομμάτι του περιγράμματος σε μεγέθυνση. Η κόκκινη και η μπλε διακεκομμένη γραμμή δείχνουν τις LS ευθείες που προσεγγίζουν βέλτιστα τα σημεία του περιγράμματος εκατέρωθεν του τρέχοντος σημείου (ώχρα). (α) Περίπτωση μικρής γωνίας ανάμεσα στις δύο γραμμές. (β) Περίπτωση μεγάλης γωνίας ανάμεσα στις δύο γραμμές.

Οι ευθείες αυτές ορίζουν και τη διεύθυνση δύο αντιστοίχων διανυσμάτων, έστω \vec{v}_1 και \vec{v}_2 . Στη συνέχεια, για κάθε ζεύγος διανυσμάτων (\vec{v}_1,\vec{v}_2) υπολογίζουμε τη γωνία ανάμεσα στα δύο διανύσματα με χρήση του γνωστού τύπου:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{|\vec{v}_1| \cdot |\vec{v}_2|}\right)$$

Με τον τρόπο αυτό προκύπτει ένας πίνακας τιμών για τη γωνία φ που σχηματίζουν οι δύο ευθείες για κάθε εικονοστοιχείο του περιγράμματος (Σχήμα B.28):

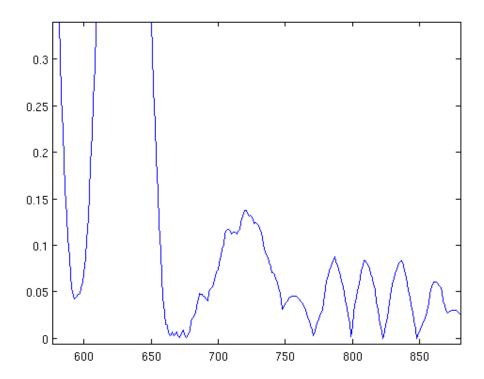


Σχήμα Β.28. Παράδειγμα του πίνακα γωνιών που προκύπτει με χρήση του αλγορίθμου εντοπισμού των σημείων καμπής.

Όπως είναι φανερό, τα σημεία στα οποία σχηματίζεται μεγάλη γωνία ανάμεσα στις δύο ευθείες έχουμε ένα τοπικό μέγιστο στην τιμή του πίνακα-διανύσματος της γωνίας. Το τοπικό αυτό μέγιστο υποδηλώνει ουσιαστικά και την παρουσία ενός σημείου καμπής στο περίγραμμα του καρφιού. Επομένως, εάν ανιχνεύσουμε την παρουσία των μεγίστων αυτών, μπορούμε να ανιχνεύσουμε και τις συντεταγμένες των σημείων καμπής του καρφιού.

Επίσης, παρατηρούμε ότι, εκτός από τα σαφή τοπικά μέγιστα με τις αναλογικά μεγάλες τιμές γωνίας, έχουμε και μία σειρά από μικρότερα, λιγότερο σαφή μέγιστα· τα μέγιστα αυτά αντιπροσωπεύουν και αυτά σημεία καμπής, όπου η αλλαγή της διεύθυνσης της εφαπτόμενης στο περίγραμμα του είναι λιγότερο σαφής, όπως, για παράδειγμα, το σημείο όπου ξεκινάει να λεπταίνει η μύτη του καρφιού. Τα σημεία αυτά είναι πιο δύσκολο να ανιχνευτούν, λόγω της μικρής τιμής της γωνίας που παρουσιάζουν και λόγω της φύσης του αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, οι κλίσεις των LS ευθειών με τις οποίες προσεγγίζουμε τις ακμές του καρφιού επηρεάζονται από την παρουσία θορύβου που αλλοιώνει σε μικρό βαθμό τη θέση των ακμών. Έτσι, τα μέγιστα που αντιστοιχούν στις μικρότερες αλλαγές

γωνίας διεύθυνσης της εφαπτόμενης δεν είναι τόσο σαφή και το πρόσημο της κλίσης της εφαπτόμενης του σχήματος αλλάζει συχνά. (Σχήμα Β.29).



Σχήμα Β.29. Λεπτομέρεια του γραφήματος των τιμών της γωνίας που απεικονίζει ένα μικρότερο τοπικό μέγιστο.

Όπως βλέπουμε και στο Σχήμα B.29, το τοπικό μέγιστο που αντιστοιχεί στην γωνία που αντιστοιχεί στην αλλαγή κλίσης της εφαπτόμενης του περιγράμματος του καρφιού που εμφανίζεται στο σημείο που τελειώνει το κυρίως σώμα του καρφιού και ξεκινάει η μύτη δεν αποτελείται από ένα σαφές μέγιστο, αλλά παρουσιάζει κάποιες μικρές διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις οφείλονται στο γεγονός ότι κοντά στο σημείο αυτό, οι βέλτιστες ευθείες που προσεγγίζουν το περίγραμμα αλλάζουν συνεχώς γωνία ανάλογα με τη θέση των ακμών του καρφιού. Το φαινόμενο αυτό δυσχεραίνει την ανίχνευση των τοπικών μεγίστων που θα μας δώσουν τις συντεταγμένες των σημείων καμπής.

Επίσης, παρατηρούμε ότι υπάρχουν και ακόμα μικρότερα τοπικά μέγιστα, τα οποία οφείλονται στις συνεχείς αλλαγές της γωνίας ανάμεσα στις εφαπτόμενες ευθείες. Τα μέγιστα αυτά δεν μας ενδιαφέρουν και οφείλονται αποκλειστικά στο γεγονός ότι οι ακμές του αντικειμένου δεν είναι καθορισμένες με μεγάλη ακρίβεια, φαινόμενο το οποίο οφείλεται στη φύση της εικόνας από την οποία προέκυψαν οι ακμές αυτές, δηλαδή την

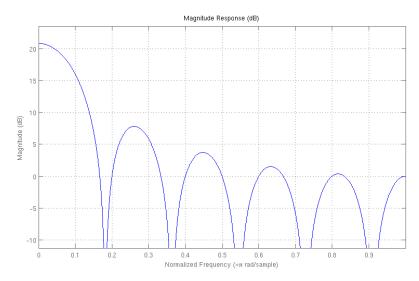
ακτινογραφία. Επομένως, είναι απαραίτητο το σήμα που προκύπτει από τον πίνακα των τιμών της γωνίας ανάμεσα στις εφαπτόμενες του περιγράμματος να υποστεί κάποια επεξεργασία για την απομάκρυνση των διακυμάνσεων που εμφανίζονται κοντά στα επιθυμητά τοπικά μέγιστα και για την απομάκρυνση των τοπικών μεγίστων που οφείλονται στην παρουσία θορύβου.

Για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκε η εξής μεθοδολογία: Αρχικά προεκτείνουμε τον πίνακα που περιέχει τις τιμές της γωνίας εκατέρωθεν των άκρων του κατά ένα πλήθος τιμών ίσο με το πλήθος των σημείων που χρησιμοποιήσαμε για τον υπολογισμό των LS ευθειών. Όπως και προηγουμένως, δημιουργήθηκε ένα διάνυσμα μήκους L + 2*EXT. Τα πρώτα ΕΧΤ σημεία του προεκτεταμένου διανύσματος πήραν τις αντίστοιχες τιμές του τέλους του πίνακα, ενώ τα τελικά EXT σημεία πήραν τις αντίστοιχες τιμές της αρχής του πίνακα. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζουμε την ανίχνευση τοπικών μεγίστων που εμφανίζονται στα ακραία αρχικά ή τελικά σημεία του αρχικού πίνακα των γωνιών.

Στη συνέχεια, φιλτράρουμε το προεκτεταμένο διάνυσμα με ένα απλό φίλτρο μέσου όρου (averaging filter) καταλλήλου μήκους. Μία κατάλληλη επιλογή για το μήκος L_f του φίλτρου βρέθηκε ότι είναι τα 11 σημεία. Η έξοδος y του φίλτρου αυτού δίνεται από τον τύπο:

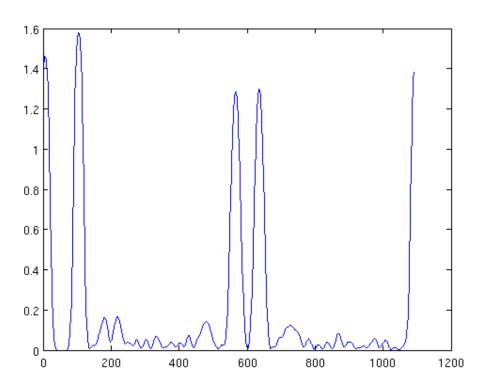
$$y(n) = \frac{1}{L_f} \sum_{k=0}^{L_f} x(n-k)$$

Το φίλτρο αυτό έχει την ακόλουθη απόκριση εξόδου (Σχήμα Β.30):



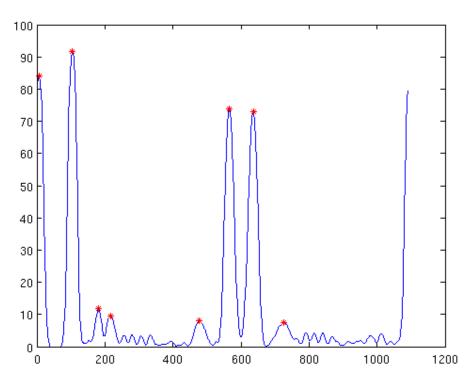
Σχήμα Β.30. Απόκριση εξόδου του φίλτρου που χρησιμοποιήθηκε για την εξομάλυνση του σήματος της γωνίας.

Όπως βλέπουμε, πρόκειται για ένα βαθυπερατό φίλτρο, το οποίο αποκόπτει τις υψηλές συχνότητες. Με άλλα λόγια, το φίλτρο αυτό αντικαθιστά κάθε τιμή του σήματος με τον μέσο όρο των προηγουμένων L_f τιμών του σήματος εισόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση των συνιστωσών που αντιστοιχούν στις υψηλές συχνότητες του σήματος, δηλαδή τις απότομες διακυμάνσεις που αντιστοιχούν στην παρουσία θορύβου και τις ανεπιθύμητες διακυμάνσεις κοντά στα τοπικά μέγιστα. Το αποτέλεσμα του φιλτραρίσματος της εικόνας φαίνεται στο Σχήμα B.31:



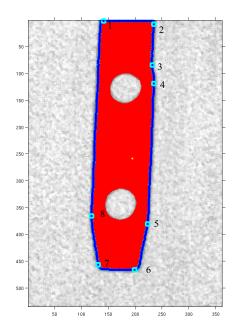
Σχήμα Β.31. Το σήμα των τιμών της γωνίας μετά από το φιλτράρισμα.

Μία σύγκριση των Σχημάτων Β.28 και Β.31 μας δείχνει ότι το σήμα που περιέχεται στο διάνυσμα της γωνίας είναι αρκετά πιο ομαλό μετά από τη χρήση του προαναφερθέντος φίλτρου. Πλέον, ο εντοπισμός των επιθυμητών σημείων καμπής είναι σχετικά εύκολος. Ο σχετικός αλγόριθμος εξετάζει τις τιμές της παραγώγου του σήματος και όπου παρατηρείται αλλαγή του προσήμου της παραγώγου με αντίστοιχη τιμή της γωνίας μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο κατώφλι, το σημείο αυτό σημειώνεται ως σημείο καμπής. Η επιλογή του κατωφλίου είναι μία λεπτή υπόθεση, καθώς το κατώφλι πρέπει να είναι αρκετά χαμηλό ώστε να ανιχνεύονται οι μικρές αλλαγές τις διεύθυνσης της εφαπτόμενης που οφείλονται στα λιγότερο έντονα χαρακτηριστικά του περιγράμματος, ενώ παράλληλα πρέπει να είναι και αρκετά υψηλό ώστε να απορρίπτονται οι αλλαγές διεύθυνσης που οφείλονται στο θόρυβο. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, επιλέχθηκε ένα κατώφλι ίσο με 6,4 μοίρες. Τα σχετικά σημεία καμπής που ανιχνεύτηκαν για μία συγκεκριμένη εικόνα φαίνονται στο Σχήμα Β.32.



Σχήμα Β.32. Τα σημεία καμπής που ανιχνεύτηκαν για μία συγκεκριμένη εικόνα.

Τα σημεία καμπής που βρίσκονταν πολύ κοντά στα άκρα του πίνακα (είτε στην αρχή είτε στο τέλος) ανιχνεύτηκαν με χρήση της μεθόδου κυκλικής προέκτασης του διανύσματος που χρησιμοποιήθηκε και σε προηγούμενες περιπτώσεις (όπως, πχ, στο φιλτράρισμα της εικόνας). Οι αντίστοιχες θέσεις των σημείων αυτών πάνω στο καρφί φαίνονται με κυανά τετράγωνα στο Σχήμα B.33:



Σχήμα Β.33. Οι θέσεις των σημείων καμπής που εντοπίστηκαν για τη συγκεκριμένη εικόνα (κυανά τετράγωνα με αρίθμηση).

Σε αυτό το σημείο οφείλουμε να κάνουμε ορισμένες παρατηρήσεις σχετικά με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου ανίχνευσης των σημείων καμπής. Η πρώτη παρατήρηση αφορά στην τιμή του κατωφλίου. Όπως παρατηρούμε και από το Σχήμα Β.33, σε ορισμένα σημεία καμπής, η αλλαγή της διεύθυνσης των εφαπτόμενων στο περίγραμμα του καρφιού είναι αρκετά μικρή και σταδιακή. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα στα σημεία καμπής 5 και 8. Επιπλέον, στην περίπτωση των σημείων 3 και 4 παρατηρούμε ότι όχι μόνο τα σημεία παρουσιάζουν πολύ μικρές αλλαγές κλίσης, αλλά βρίσκονται και αρκετά κοντά μεταξύ τους. Τα φαινόμενα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται, ορισμένες φορές, και ορισμένα «ψευδή» σημεία καμπής, ιδιαίτερα στις περιοχές των σημείων 5 και 8. Επίσης, τα σημεία 3 και 4 τείνουν να εξαφανίζονται ή να συγχωνεύονται όταν η γωνία περιστροφής του καρφιού με κέντρο το διαμήκη άξονά του είναι αρκετά μεγάλη. Για τα φαινόμενα αυτά μπορεί να γίνει ειδική πρόβλεψη στον κώδικα ανίχνευσης των σημείων καμπής, η οποία, όμως, θα πρέπει να υλοποιηθεί με βάση δεδομένα από ακτινογραφίες όπου φαίνεται το καρφί τοποθετημένο πάνω στο οστό, καθώς σχετικές ρυθμίσεις στο παρόν στάδιο μπορεί να αποβούν ακατάλληλες για τις ρεαλιστικές περιπτώσεις.

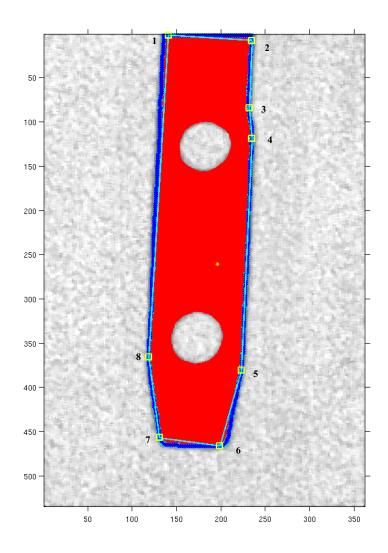
Η δεύτερη παρατήρηση αφορά στη βέλτιστη θέση των σημείων καμπής πάνω στο πραγματικό περίγραμμα του καρφιού. Παρατηρώντας πιο προσεκτικά το Σχήμα Β.33, βλέπουμε ότι οι θέσεις των σημείων 6 και 7 ορίζουν ένα ευθύγραμμο τμήμα που προσεγγίζει το περίγραμμα του καρφιού, το οποίο δεν ταυτίζεται απόλυτα με το πραγματικό

περίγραμμα. Η αιτία του φαινομένου αυτού κείτεται στο γεγονός ότι για τον υπολογισμό των θέσεων των σημείων καμπής χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος που περιγράφηκε προηγουμένως, ο οποίος εξετάζει το σήμα των τιμών της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στις εφαπτόμενες του καρφιού εκατέρωθεν κάθε σημείου του περιγράμματος. Λόγω του περιορισμού του μήκους των ευθυγράμμων τμημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της γωνίας αυτής, τα τοπικά μέγιστα των τιμών της γωνίας που ανιχνεύθηκαν μπορεί να μην αντιστοιχούν στη βέλτιστη θέση του σημείου καμπής σε σχέση με το συνολικό περίγραμμα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε άμεσα με χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της θέσης των σημείων καμπής, ο οποίος περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

Β.ΙV.4 Βελτιστοποίηση της θέσης των σημείων καμπής

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της θέσης των σημείων καμπής βασίζεται στο γεγονός ότι, πέρα από τις θέσεις των σημείων καμπής που βρήκαμε μέσω της εξέτασης του σήματος των γωνιών των εφαπτόμενων ευθειών, εξακολουθούμε να έχουμε στη διάθεσή μας και τις συντεταγμένες των εικονοστοιχείων του περιγράμματος. Αν θεωρήσουμε το περίγραμμα του καρφιού ως ένα πολύγωνο, τότε μπορούμε βελτιστοποιήσουμε τη θέση των γωνιών του πολυγώνου συγκρίνοντας τις πλευρές που προκύπτουν αν συνδέσουμε τα σημεία καμπής μεταξύ του με τις συντεταγμένες των σημείων του περιγράμματος της εικόνας. Για να το επιτύχουμε αυτό εφαρμόζουμε την ακόλουθη διαδικασία.

Εξετάζοντας τις συντεταγμένες των σημείων καμπής ανά ζεύγη, δηλαδή το σημείο υπ' αριθμόν 1 με το σημείο με αριθμό 2, το 2 με το 3, κ.ο.κ., σχηματίζουμε τα ευθύγραμμα τμήματα που συνδέουν διαδοχικά όλα τα σημεία καμπής. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτει η πρώτη εκτίμηση για το σχήμα του περιγράμματος του καρφιού, η οποία φαίνεται στο Σχήμα Β.34. Η Εικόνα αυτή φαίνεται σε μεγαλύτερο μέγεθος για να φανούν καλύτερα τα σχετικά σημεία.



Σχήμα Β.34. Πρώτη εκτίμηση για το σχήμα του περιγράμματος του καρφιού. Με κίτρινο τετράγωνο σημειώνονται οι αρχικές εκτιμήσεις για τις θέσεις των σημείων καμπής.

Όπως φαίνεται και από την εικόνα, οι θέσεις των σημείων καμπής, αν και αντιστοιχούν στα σημεία όπου οι εφαπτόμενες στο περίγραμμα παρουσιάζουν τη μέγιστη τοπική κλίση δεν είναι οι βέλτιστες δυνατές. Αυτό ισχύει περισσότερο για τα σημεία καμπής υπ' αριθμόν 1, 2, 6 και 7.

Χρησιμοποιώντας την αρχική αυτή εκτίμηση για τις θέσεις των σημείων καμπής, υπολογίζουμε το τετραγωνισμένο λάθος της προσέγγισης του κάθε ευθυγράμμου τμήματος από το αντίστοιχο σύνολο σημείων του περιγράμματος, ενώ, στη συνέχεια, αθροίζουμε όλες τις τιμές των λαθών που προκύπτουν για τα διάφορα ευθύγραμμα τμήματα. Ο σχετικός υπολογισμός περιγράφεται από τους ακόλουθους τύπους:

$$e_{i} = \sum_{k=S_{i}}^{k=E_{i}} (x_{p,i}(k-S_{i}) - x_{l,i}(k-S_{i}))^{2} + (y_{p,i}(k-S_{i}) - y_{l,i}(k-S_{i}))^{2}$$

και

$$e_T = \sum_{n=1}^{n=N} e_n$$

Στους τύπους αυτούς έχουμε τις εξής ερμηνείες για τα σύμβολα:

 e_i είναι το λάθος ανάμεσα στο ευθύγραμμο τμήμα και το κομμάτι του περιγράμματος με αριθμό i.

 e_T είναι το συνολικό λάθος προσέγγισης για το συγκεκριμένο σύνολο σημείων καμπής που εντοπίστηκαν.

 S_i και E_i είναι ο αρχικός και ο τελικός δείκτης του περιγράμματος για το κομμάτι i, αντίστοιχα. Οι δείκτες αυτοί αντιστοιχούν στις συντεταγμένες των σημείων καμπής που εντοπίστηκαν προηγουμένως.

 $x_{p,i}$, $y_{p,i}$ είναι οι συντεταγμένες του περιγράμματος για το τμήμα i.

 $x_{l,i}$, $y_{l,i}$ είναι οι συντεταγμένες των σημείων που σχηματίζουν το ευθύγραμμο τμήμα που προσεγγίζει το τμήμα i του περιγράμματος με την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων.

Ν είναι ο αριθμός των σημείων καμπής που βρέθηκαν.

Παρατηρούμε ότι για τις συντεταγμένες του τμήματος του περιγράμματος και τις αντίστοιχης LS ευθείας, οι δείκτες των σχετικών πινάκων κινούνται από το 0 μέχρι το E_i-S_i για κάθε τμήμα i. Για το τελικό ευθύγραμμο τμήμα, θέτουμε ως δείκτη αρχής S_i το δείκτη του περιγράμματος που αντιστοιχεί στο τελευταίο σημείο καμπής, ενώ ως τελικό δείκτη E_i χρησιμοποιούμε ένα εικονικό σημείο, το οποίο έχει συντεταγμένες ίδιες με αυτές του αρχικού σημείου. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζουμε ότι ο σχετικός υπολογισμός θα διεξαχθεί για το σύνολο του περιγράμματος. Αξίζει να σημειωθεί πως, επειδή σε πολλές περιπτώσεις οι ευθείες της προσέγγισης μπορεί να έχουν κλίση πολύ κοντά στις $\pm 90^\circ$, για την προσέγγιση των σημείων του περιγράμματος με την LS ευθεία χρησιμοποιούμε κάθε φορά ως ανεξάρτητη τη μεταβλητή (x ή y) που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μεταβολή για το συγκεκριμένο τμήμα του περιγράμματος. Έτσι, εάν ένα ευθύγραμμο τμήμα παρουσιάζει κλίση μεγαλύτερη από 45° ή μικρότερη από -45° , θεωρούμε το y ως ανεξάρτητη μεταβλητή,

εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό την καλή προσέγγιση της ευθείας μας και αποφεύγοντας λάθη που οφείλονται στην πεπερασμένη ακρίβεια του υπολογιστή.

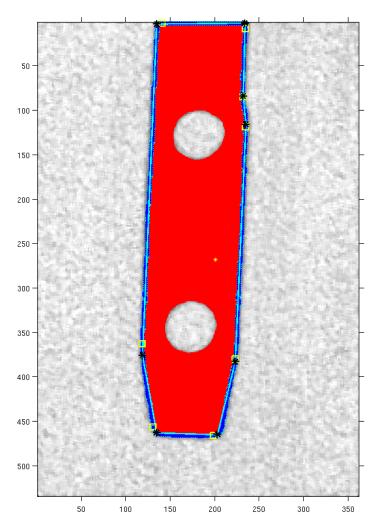
Αφού υπολογίσαμε με τον ανωτέρω τρόπο το συνολικό λάθος προσέγγισης του σχήματος του περιγράμματος του καρφιού, στη συνέχεια εφαρμόζουμε τον εξής βρόχο: Για κάθε ένα από τα σημεία καμπής που έχουμε ανιχνεύσει με τη χρήση των εφαπτόμενων ευθειών, μετατοπίζουμε ελαφρά τη θέση του, κινούμενοι πάντα πάνω στο υπάρχον περίγραμμα που έχουμε εξάγει. Για τη νέα θέση του σημείου καμπής, υπολογίζουμε εκ νέου το συνολικό λάθος προσέγγισης του σχήματος του περιγράμματος. Εάν η νέα τιμή του λάθους προσέγγισης είναι χαμηλότερη από την παλιά, κρατάμε τη νέα θέση του συγκεκριμένου σημείου καμπής και απορρίπτουμε την παλιά. Στην περίπτωση ανίχνευσης νέας βέλτιστης θέσης ενός σημείου καμπής, ο βρόχος εκτελείται από την αρχή για το σύνολο των εικονοστοιχείων, καθώς, λόγω του γεγονότος ότι τα σημεία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους από τα ευθύγραμμα τμήματα, η αλλαγή της θέσης ενός σημείου καμπής μπορεί να επηρεάσει τη συνολική τιμή του λάθος και για τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία. Αυτό σημαίνει ότι η εύρεση της νέας βέλτιστης θέσης ενός σημείου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αλυσιδωτή μετατόπιση και όλων των υπολοίπων σημείων, οπότε δικαιολογείται η εκ νέου εκτέλεση του συνολικού βρόχου.

Για να εξασφαλίσουμε ότι έχουμε βρει μία καλύτερη προσέγγιση από προηγουμένως, η μετατόπιση του κάθε σημείου καμπής γίνεται διαδοχικά για ένα περιθώριο τριών εικονοστοιχείων, ώστε ο αλγόριθμος να μην «κολλήσει» σε κάποιο τοπικό ελάχιστο του ολικού λάθους, αφού, λόγω της φύσης των υπολογισμών, ακόμα και μία μικρή μεταβολή της θέσης ενός σημείου καμπής μπορεί να μας δώσει καλύτερη τιμή για το ολικό λάθος προσέγγισης. Στην περίπτωσή μας το περιθώριο μετατόπισης τριών εικονοστοιχείων για τις θέσεις των σημείων καμπής έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ θα μπορούσε να είναι και μεγαλύτερο, με αντάλλαγμα, βεβαίως, την αντίστοιχη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου.

Ένα βασικό πλεονέκτημα του υπολογισμού του συνολικού λάθους προσέγγισης σε σχέση, για παράδειγμα, με τον υπολογισμό των επιμέρους λαθών για κάθε ένα από τα ευθύγραμμα τμήματα είναι ότι με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζουμε ότι, ακόμα και εάν η μετατόπιση ενός σημείου δώσει μεγαλύτερο λάθος προσέγγισης για ένα από τα δύο σχετικά ευθύγραμμα τμήματα που επηρεάζονται από αυτό, εάν το συνολικό λάθος προσέγγισης είναι μικρότερο, τότε η νέα θέση του εν λόγω σημείου θα γίνει αποδεκτή ως καλύτερη προσέγγιση από την προηγούμενη. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό, ας θεωρήσουμε το σημείο καμπής 7 του Σχήματος Β.34. Μία μικρή μετατόπιση του σημείου αυτού προς τα

δεξιά (κινούμενο πάνω στο περίγραμμα, πάντα) μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μία μικρή αύξηση του λάθους προσέγγισης για το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει τα σημεία 7 και 8. Όμως, είναι πολύ πιθανό η αντίστοιγη μείωση του λάθους προσέγγισης για το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει τα σημεία 6 και 7 να είναι μεγαλύτερη. Εάν θεωρούσαμε μόνο τα λάθη προσέγγισης των μεμονωμένων ευθυγράμμων τμημάτων, η μετατόπιση του σημείου 7 προς τα δεξιά δε θα γινόταν αποδεκτή. Όμως, εάν θεωρήσουμε το συνολικό λάθος προσέγγισης ολοκλήρου του περιγράμματος, βλέπουμε ότι η μετατόπιση του σημείου αυτού θα μας δώσει, συνολικά, μία καλύτερη προσέγγιση. Επίσης, η νέα θέση του σημείου καμπής μπορεί να προκαλέσει μία αντίστοιχη μεταβολή στη βέλτιστη θέση του σημείου 6 και ούτω καθ' εξής, μέχρι να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή προσέγγιση του συνόλου του περιγράμματος. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι η διαδικασία αυτή είναι δυναμική και η προσέγγιση του περιγράμματος που προκύπτει προσαρμόζεται βέλτιστα στο περίγραμμα της περιοχής της εικόνας, ανεξαρτήτως του πλήθους των σημείων καμπής. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με τα παραμορφώσιμα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στη βιβλιογραφία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση και ανίχνευση οποιοδήποτε πολυγωνικού σχήματος.

Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης των θέσεων των σημείων καμπής για το εν λόγω σχήμα φαίνεται στο Σχήμα Β.35, όπου, εκτός από τις βέλτιστες θέσεις, για λόγους σύγκρισης παρατίθενται και οι αρχικές θέσεις των σημείων καμπής που ανιχνεύτηκαν. Όπως παρατηρούμε, η προσέγγιση του περιγράμματος μετά από τη βελτιστοποίηση των θέσεων των σημείων καμπής με χρήση των πληροφοριών του περιγράμματος είναι σαφώς καλύτερη από την αρχική εκτίμηση που πήραμε με εξέταση μόνο της γωνίας των εφαπτόμενων ευθυγράμμων τμημάτων.



Σχήμα Β.35. Οι αρχικές (κίτρινο) και οι βέλτιστες (μαύρο) θέσεις των σημείων καμπής.

<u>Κεφάλαιο Β.V.: Εξαγωγή γεωμετρικής πληροφορίας από τις</u> οπές του καρφιού

Β. V.1 Ανίχνευση των οπών του καρφιού

Στο επόμενο βήμα εξαγωγής πληροφορίας από την εντοπισμένη περιοχή του καρφιού, προσπαθούμε να εξετάσουμε την παρουσία και τα χαρακτηριστικά της προβολής των δύο οπών που έχει το καρφί πάνω στην ακτινογραφική πλάκα. Οι προβολές αυτές μπορούν να μας δώσουν σημαντική πληροφορία σχετικά με τις γωνίες περιστροφής και καταβύθισης του καρφιού σε σχέση με το επίπεδο προβολής, ενώ η θέση τους μπορεί να επιβεβαιώσει εάν το καρφί έχει υποστεί κάποια παραμόρφωση ή όχι.

Το πρώτο στάδιο στη διαδικασία αυτή είναι ο εντοπισμός των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων της περιοχής του ενδιαφέροντος (δηλαδή του καρφιού), τα οποία γειτονεύουν έστω και με ένα εικονοστοιχείο που δεν ανήκει στην περιοχή του καρφιού. Αυτό σημαίνει ότι σχηματίζουμε το προσωρινό σύνολο εικονοστοιχείων T, το οποίο είναι τέτοιο ώστε:

$$T = \left\{ (x, y) | I(x, y) \in R, \sum_{k=1}^{L_N} N_k(x, y) > 0 \right\} , \text{ όπου:}$$

(x,y) είναι το ζεύγος των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων που ανήκουν στο T, I(x,y) είναι εικονοστοιχείο του χάρτη κατάτμησης της εικόνας με συντεταγμένες (x,y), R είναι η περιοχή ενδιαφέροντος που έχει προκύψει από την κατάτμηση της εικόνας, N(x,y) είναι ο πίνακας που περιέχει τις τιμές του χάρτη κατάτμησης για όσα εικονοστοιχεία που περιβάλλουν το εικονοστοιχείο με συντεταγμένες (x,y). Το πλήθος των εικονοστοιχείων αυτών L_N είναι συνήθως 8, αλλά σε περίπτωση που το εικονοστοιχείο με συντεταγμένες (x,y) βρίσκεται στο περίγραμμα της εικόνας, θα είναι μικρότερο.

 N_k είναι το υπ' αριθμόν k εικονοστοιχείο του πίνακα N.

Υπενθυμίζεται ότι ο χάρτης κατάτμησης είναι η δυαδική εικόνα που έχει προκύψει από την κατάτμηση της αρχικής εικόνας, όπου τα εικονοστοιχεία της περιοχής ενδιαφέροντος έχουν τιμή 1 (λευκό), ενώ τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στο φόντο έχουν τιμή 0 (μαύρο). Έτσι,

λοιπόν, βλέπουμε ότι το T περιέχει όλα τα εικονοστοιχεία που έχουν έστω και ένα γειτονικό εικονοστοιχείο που δεν ανήκει στην περιοχή ενδιαφέροντος R. Επομένως, εάν θεωρήσουμε το H, το σύνολο των εικονοστοιχείων που σχηματίζουν τις τρύπες του καρφιού και P το σύνολο των εικονοστοιχείων του περιγράμματος του R τότε, προφανώς, ισχύει πως:

$$H \subset T$$

και

$$H = T \setminus P$$

Αυτό σημαίνει ότι τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στο H είναι εκείνα που ανήκουν στο T και δεν ανήκουν στο P.

Δεδομένου ότι μετά από τα προηγούμενα στάδια, έχουμε στη διάθεσή μας τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στα R και P και ότι ο υπολογισμός των στοιχείων του T είναι σχετικά προφανής, η υλοποίηση του σχετικού αλγορίθμου είναι άμεση και σχετικά εύκολη. Πρέπει να δοθεί, όμως, προσοχή, στο γεγονός ότι στα στοιχεία του T ανήκουν και τα εικονοστοιχεία που σχηματίζουν ορθές γωνίες στο περίγραμμα του R, τα οποία απορρίφθηκαν κατά τον σχηματισμό του P και δεν ανήκουν σε αυτό. Για τα εικονοστοιχεία αυτά, δόθηκε ειδική μέριμνα στο σχετικό αλγόριθμο ώστε να μην συμπεριληφθούν στα στοιχεία του H.

Β. V.2 Αρίθμηση του περιγράμματος των οπών.

Πλέον έχουμε στη διάθεσή μας το H, που είναι το σύνολο που περιέχει όλα τα εικονοστοιχεία που σχηματίζουν τις τρύπες του καρφιού. Υπολογιστικά μιλώντας, το H είναι ένα διάνυσμα δύο γραμμών, το οποίο περιέχει όλα τα σχετικά ζεύγη (x, y) των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων που σχηματίζουν τις τρύπες. Όμως, τα ζεύγη αυτά δεν είναι διατεταγμένα με κάποια συγκεκριμένη μορφή, με αποτέλεσμα οι συντεταγμένες των εικονοστοιχείων που σχηματίζουν τις τρύπες να είναι ανακατεμένες χωρίς κάποια σειρά ή ομαδοποίηση. Για να μπορέσουμε να κάνουμε οποιουσδήποτε υπολογισμούς, πρέπει πρώτα να ομαδοποιήσουμε τα εικονοστοιχεία που ανήκουν σε κάθε συγκεκριμένη τρύπα και, στη συνέχεια, να τα αριθμήσουμε κατάλληλα ώστε να σχηματίζουν μία ενιαία αλυσίδα εικονοστοιχείων για κάθε τρύπα. Επίσης, για να διατηρηθεί η γενική εφαρμοσιμότητα του

αλγορίθμου, η διαδικασία αυτή θα πρέπει να γίνεται χωρίς πρότερη γνώση του πλήθους των τρυπών του καρφιού ώστε: (α) ο αλγόριθμος να μπορεί να εφαρμοστεί και για διαφορετικούς τύπους καρφιού με περισσότερες ή λιγότερες τρύπες και (β) ο αλγόριθμος να είναι εφαρμόσιμος και στην αναγνώριση διαφορετικών σχημάτων / αντικειμένων.

Ο περιορισμός της μη γνώσης του πλήθους των τρυπών κάνει την εφαρμογή αλγορίθμων ομαδοποίησης (clustering), όπως αυτοί παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο Β.Ι.6.xii, δύσκολη. Για το λόγο αυτό, αντί για κάποιο ήδη εφαρμοσμένο αλγόριθμο χρησιμοποιήσαμε μία παραλλαγή του αλγορίθμου αρίθμησης του περιγράμματος που περιγράφηκε στην Παράγραφο Β.ΙV.1, υποθέτοντας ένα άγνωστο πλήθος τρυπών της περιοχής ενδιαφέροντος.

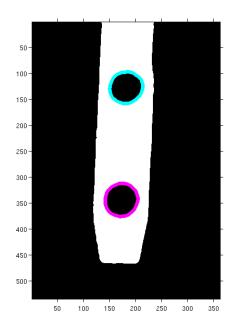
Ξεκινάμε θεωρώντας ως αρχικό εικονοστοιχείο του νέου πίνακα με τις διατεταγμένες συντεταγμένες των τρυπών το πρώτο στοιχείο του διανύσματος H. Όπως και προηγουμένως, εξετάζουμε κάθε ένα από τα γειτονικά εικονοστοιχεία του τρέχοντος στοιχείου του νέου περιγράμματος των τρυπών. Για κάθε γειτονικό εικονοστοιχείο Γ_{ν} , εάν ένας κατάλληλος αριθμός γειτόνων του Γ_{ν} έχει τιμή 0 (στο χάρτη κατάτμησης), τότε το Γ_{ν} αποτελεί το επόμενο εικονοστοιχείο της αλυσίδας της συγκεκριμένης τρύπας. Διαφορετικά, προχωράμε στο $\Gamma_{\nu+1}$. Ταυτόχρονα, διαπιστώνουμε εάν το Γ_{ν} είναι το τελευταίο εικονοστοιχείο της συγκεκριμένης τρύπας ελέγχοντας την απόστασή του από το πρώτο εικονοστοιχείο της τρύπας αυτής, όπως προηγουμένως.

Μέχρι τώρα η ακολουθία των υπολογισμών είναι ίδια με αυτήν του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για την αρίθμηση του περιγράμματος της περιοχής που αντιστοιχεί στο καρφί. Το επόμενο βήμα, όμως, διαφέρει, καθώς σε αυτό γίνεται ο έλεγχος σχετικά με το κατά πόσο το εικονοστοιχείο που βρέθηκε ως επόμενο του περιγράμματος της συγκεκριμένης τρύπας ανήκει στο σύνολο Η. Εάν ανήκει, τότε σημειώνεται ως εικονοστοιχείο της συγκεκριμένης τρύπας την οποία σχηματίζουμε αυτή τη στιγμή. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζουμε ότι ένα εικονοστοιχείο που έχει βρεθεί πως ανήκει σε μία τρύπα δε θα ξαναεξεταστεί όταν ελέγξουμε για την ύπαρξη αταξινόμητων εικονοστοιχείων. Εάν όχι, τότε έχουμε συναντήσει κάποιο εικονοστοιχείο το οποίο από λάθος έχει συμπεριληφθεί στον πίνακα Η. Στην περίπτωση που το τελευταίο εικονοστοιχείο που προστέθηκε στο περίγραμμα για τη συγκεκριμένη τρύπα είναι γειτονικό με το πρώτο, αυτό σημαίνει ότι το περίγραμμα της τρύπας αυτής έχει πλέον κλείσει, οπότε ο αλγόριθμος εξετάζει το επόμενο διαθέσιμο εικονοστοιχείο, το οποίο δεν έχει σημειωθεί πως ανήκει σε κάποια συγκεκριμένη τρύπα. Εφόσον υπάρχει τέτοιο εικονοστοιχείο, η διαδικασία επαναλαμβάνεται και σχηματίζεται στο συνδεδεμένο περίγραμμα της «νέας» τρύπας. Η

διαδικασία ολοκληρώνεται όταν δεν υπάρχουν πλέον εικονοστοιχεία που να μην έχουν ομαδοποιηθεί και ταξινομηθεί στο περίγραμμα μίας τρύπας.

Αξίζει να σημειωθεί πως, εφόσον όλα τα προηγούμενα βήματα εύρεσης των συντεταγμένων των εικονοστοιχείων που σχηματίζουν τις τρύπες έχουν εκτελεστεί σωστά, ο αλγόριθμος ομαδοποίησης και αρίθμησης των εικονοστοιχείων των περιγραμμάτων των τρυπών δεν επηρεάζεται από τη σειρά με την οποία τα εικονοστοιχεία αυτά εμφανίζονται στον πίνακα Η. Ο λόγος για αυτό είναι ότι χρησιμοποιούμε τη γειτονία στο χώρο για να εντοπίσουμε το επόμενο εικονοστοιχείο της αλυσίδας του περιγράμματος της εκάστοτε τρύπας και όχι τη σειρά με την οποία αυτά έχουν εντοπιστεί. Με τον τρόπο αυτό, ο αλγόριθμος επιτυγχάνει ταυτόχρονα την ομαδοποίηση και την ταξινόμηση (αρίθμηση) των εικονοστοιχείων του περιγράμματος της κάθε τρύπας, ανεξάρτητα από τη σειρά με την οποία αυτά εντοπίστηκαν προηγουμένως, τον προσανατολισμό του αντικειμένου ή το πλήθος των τρυπών.

Στο Σχήμα B.36 φαίνεται ο χάρτης κατάτμησης του Σχήματος B.19, με τα εικονοστοιχεία που σχηματίζουν το περίγραμμα των τρυπών σημειωμένα πάνω σε αυτόν, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή του προαναφερθέντος αλγορίθμου. Χρησιμοποιήσαμε, στην περίπτωση αυτή, το χάρτη κατάτμησης για λόγους ευκρίνειας.



Σχήμα Β.36. Ο χάρτης κατάτμησης του Σχήματος Β.19. Με λευκό σημειώνονται τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στην περιοχή του ενδιαφέροντος (καρφί), με μαύρο τα εικονοστοιχεία του φόντου, ενώ με κυανό και μοβ, αντίστοιχα, τα εικονοστοιχεία που σχηματίζουν τα περιγράμματα των δύο τρυπών.

Β. V.3 Προσέγγιση των οπών με ελλείψεις

Το επόμενο βήμα εξαγωγής πληροφορίας από την εικόνα του καρφιού που έχουμε στη διάθεσή μας είναι η προσέγγιση των τρυπών που προκύπτουν στην εικόνα με χρήση τυπικών γεωμετρικών καμπύλων. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να μας προσφέρει άμεσα ορισμένες βασικές πληροφορίες για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της προβολής των τρυπών, όπως είναι το εμβαδόν, το μήκος της προβολής, η διεύθυνση του άξονα συμμετρίας και άλλα. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σε μετέπειτα στάδια, για τον προσδιορισμό της θέσης, του προσανατολισμού και της γωνίας καταβύθισης του καρφιού σε σχέση με κάποιο γνωστό επίπεδο αναφοράς.

Στην περίπτωσή μας το γεωμετρικό πρότυπο που επιλέχθηκε είναι η καμπύλη της έλλειψης. Η επιλογή αυτή έγινε κυρίως λόγω της ομοιότητας που παρουσιάζουν οι προβολές των τρυπών με το σχήμα αυτό. Επίσης, αν θεωρήσουμε ότι η τρύπα στο πραγματικό καρφί έχει κυλινδρικό σχήμα, τότε η προβολή του σχήματος πάνω σε ένα επικλινές επίπεδο θα είναι μία έλλειψη. Αν και το σχήμα της τρύπας στο πραγματικό καρφί μπορεί να μην είναι απόλυτα κυλινδρικό αλλά να είναι ένα σχήμα που μοιάζει αρκετά με κύλινδρο, η προσέγγιση της προβολής της τρύπας με μία έλλειψη μπορεί ακόμα να δώσει άμεσα ορισμένα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τα οποία θα φανούν χρήσιμα στον προσδιορισμό της θέσης του καρφιού στο χώρο. Στο κείμενο που ακολουθεί, να παρουσιάσουμε αναλυτικά τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των βασικών χαρακτηριστικών της έλλειψης που χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση του σχήματος της κάθε τρύπας.

Υπενθυμίζεται ότι, όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη Παράγραφο, έχουμε πλέον στη διάθεσή μας τις συντεταγμένες του περιγράμματος της κάθε τρύπας σε ακολουθιακή μορφή, δηλαδή τα ζεύγη των συντεταγμένων των σημείων είναι ομαδοποιημένα ανά τρύπα και μορφή τέτοια, ώστε διαδοχικά ζεύγη συντεταγμένων να αντιστοιχούν σε προσκείμενα σημεία του περιγράμματος της τρύπας. Με τον τρόπο αυτό, μπορούμε να εργαστούμε για κάθε τρύπα ξεχωριστά, ενώ ο προσδιορισμός ενός σημείου του περιγράμματος μας επιτρέπει να γνωρίζουμε και τη σχετική θέση και το σχετικό δείκτη των υπολοίπων σημείων στον πίνακά μας.

Το πρώτο βήμα της προσέγγισης περιλαμβάνει την εκτίμηση ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών της έλλειψης. Η παραμετρική μορφή της έλλειψης με κέντρο την αρχή των αξόνων δίνεται από τις εξισώσεις:

$$x(t) = \alpha \cos(t)$$

$$y(t) = \beta \sin(t)$$
(B.V.1)

Εάν $\alpha > \beta$, τότε οι εστίες της έλλειψης βρίσκονται πάνω στον άξονα xx', που είναι και η περίπτωση που θεωρούμε. Με απαλοιφή της παραμέτρου t παίρνουμε την κανονική μορφή της εξίσωσης της έλλειψης:

$$\frac{x^2}{\alpha^2} + \frac{y^2}{\beta^2} = 1$$
 (B.V.2)

Η γενική παραμετρική μορφή μίας τυχαίας έλλειψης δίνεται από τον τύπο:

$$X(t) = X_C + \alpha \cos t \cos \varphi - \beta \sin t \sin \varphi$$

$$Y(t) = Y_C + \alpha \cos t \sin \varphi - \beta \sin t \cos \varphi$$
(B.V.3)

Στην εξίσωση αυτή, φ είναι η γωνία που σχηματίζει ο μεγάλος άξονας της έλλειψης με τον άξονα xx', ενώ $X_{C.}$, Y_{C} είναι οι συντεταγμένες του κέντρου της έλλειψης. Η μορφή αυτή προκύπτει μέσω του μετασχηματισμού:

$$\begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \end{bmatrix}$$
(B.V.4)

Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε έλλειψη στο χώρο μπορεί να περιγραφεί ως μία περιστροφή κατά φ και μετατόπιση κατά $(X_{C.}, Y_C)$ της έλλειψης που περιγράφεται από την εξίσωση (B.V.1).

Επομένως, για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε πλήρως μία τυχαία έλλειψη, χρειαζόμαστε τις τιμές για τα α , β , $X_{C.}$, $Y_{C.}$, και φ . Στην περίπτωσή μας, έχουμε μία σειρά από μετρήσεις για τις συντεταγμένες (X, Y) των σημείων της προβολής της τρύπας και θέλουμε να βρούμε τις τιμές των α , β , $X_{C.}$, $Y_{C.}$, και φ της έλλειψης που προσεγγίζει βέλτιστα τα σημεία αυτά σύμφωνα με κάποιο κριτήριο λάθους. Με άλλα λόγια, εάν θεωρήσουμε μία συνάρτηση λάθους $e(\alpha, \beta, X_{C.}, Y_{C.}, \varphi)$, ψάχνουμε να βρούμε τις τιμές των α , β , $X_{C.}$, $Y_{C.}$, και φ που θα ελαχιστοποιήσουν το e.

Η ελαχιστοποίηση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών είναι ένα κοινό πρόβλημα στο χώρο της αναγνώρισης προτύπων. Στην περίπτωσή μας, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε την υλοποίηση του MATLAB του αλγορίθμου Nelder-Mead (Nelder Mead, 1965, Lagarias, Reeds, Wright, & Wright, 1998). Υπάρχουν πολλές παραλλαγές του αλγορίθμου αυτού και άλλοι αλγόριθμοι με τους οποίους μπορούμε να επιτύχουμε το σκοπό μας, αλλά η διαθεσιμότητα και η ευκολία χρήσης της συγκεκριμένης υλοποίησης του αλγορίθμου μας οδήγησε στην επιλογή αυτή. Στην αρχική του μορφή, ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στην κατασκευή ενός simplex, το οποίο ορίζεται ως το ν-διάστατο ανάλογο του τριγώνου. Για παράδειγμα, ένα 0-simplex είναι ένα σημείο, ένα 1-simplex είναι μία γραμμή, ένα 2simplex είναι ένα τρίγωνο, ένα 3-simplex είναι ένα τετράεδρο και ένα 4-simplex είναι ένα πεντάχωρο (σε όλες τις περιπτώσεις περιλαμβάνεται και το εσωτερικό του σχήματος). Ξεκινώντας από ένα αρχικό σημείο, κατασκευάζουμε γύρω από το σημείο αυτό το αντίστοιχο simplex. Στη συνέχεια, εξετάζεται η συμπεριφορά της συνάρτησης σε κάθε μία από τις «κορυφές» του simplex αυτού, ώστε να προσδιοριστεί μία νέα τιμή, η οποία θα αντικαταστήσει την χειρότερη τιμή του υπάρχοντος simplex. Έτσι, προκύπτει ένα νέο simplex και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το μέγεθος του simplex να γίνει μικρότερο από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, το οποίο ορίζει και την ακρίβεια της προσέγγισης στη λύση.

Η επιτυχής εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Στην περίπτωσή μας, οι δύο βασικότεροι ήταν: (α) η καλή επιλογή των αρχικών τιμών για την έναρξη της προσέγγισης και (β) η επιλογή καταλλήλου μέτρου του λάθους για την επίτευξη ικανοποιητικής προσέγγισης στα υπάρχοντα σημεία.

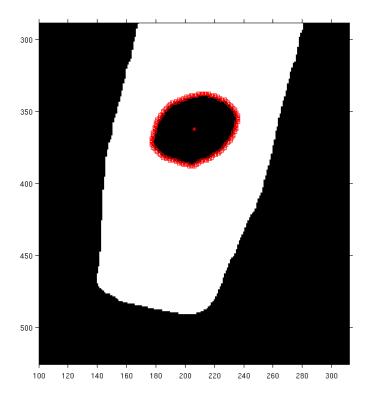
Για την επιλογή των αρχικών συνθηκών του αλγορίθμου, χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα των σημείων που είχαμε στη διάθεσή μας. Για να απλοποιήσουμε τη διαδικασία και να μειώσουμε τον υπολογιστικό χρόνο, θεωρήσαμε, αρχικά, ότι το κέντρο της βέλτιστης έλλειψης με την οποία θα προσεγγίσουμε το σχήμα της τρύπας συμπίπτει με το κέντρο βάρους του σχήματός που έχουμε στη διάθεσή μας και θεωρήσαμε ότι το κέντρο αυτό είναι σταθερό, οπότε η συνάρτηση του λάθους έγινε συνάρτηση τριών μεταβλητών, δηλαδή $e(\alpha, \beta, \varphi)$. Ω ς εκτίμηση για τα $X_{C.,}$ χρησιμοποιήσαμε τις συντεταγμένες που προκύπτουν από τον υπολογισμό του κέντρου βάρους της τρύπας:

$$X_C = \frac{1}{N_H} \sum_{i=1}^{N_H} x_i$$

και

$$Y_C = \frac{1}{N_H} \sum_{i=1}^{N_H} y_i$$

Εδώ N_H είναι το πλήθος των σημείων που σχηματίζουν τη συγκεκριμένη τρύπα και x_i , y_i είναι συντεταγμένες του υπ' αριθμόν i σημείου του περιγράμματος της τρύπας. Ένα παράδειγμα μίας τρύπας και του σημείου που προκύπτει ως κέντρο βάρους της φαίνεται στο Σχήμα B.37:



Σχήμα Β.37. Τρύπα ενός καρφιού σε μεγέθυνση μαζί με το κέντρο βάρους της.

Όσον αφορά στην αρχική εκτίμηση των τιμών των α και β, είναι εύκολο να αποδειχθεί (Παράρτημα 1) ότι η μέγιστη και η ελάχιστη απόσταση των σημείων της έλλειψης από το κέντρο αυτής είναι ίσες με α και β αντίστοιχα. Επομένως, οι αρχικές εκτιμήσεις των α και β προκύπτουν με απευθείας υπολογισμό των αποστάσεων από το κέντρο βάρους όλων των δεδομένων σημείων του περιγράμματος της τρύπας και ανάθεση της μεγαλύτερης από αυτές ως αρχική εκτίμηση της τιμής του α και της μικρότερης ως αρχικής τιμή του β. Ως αρχική εκτίμηση για τη γωνία περιστροφής φ της έλλειψης

χρησιμοποιούμε την κλίση του διανύσματος που συνδέει το κέντρο της έλλειψης με το σημείο με τη μεγαλύτερη απόσταση από το κέντρο αυτό:

$$\varphi_0 = \arctan\left(\frac{Y_{max} - Y_C}{X_{max} - X_C}\right),$$

όπου φ_0 είναι η αρχική εκτίμηση της γωνίας φ και (X_{max}, Y_{max}) είναι οι συντεταγμένες του σημείου με τη μέγιστη απόσταση από το κέντρο βάρους της τρύπας.

Αφού έχουμε, πλέον, στη διάθεσή μας αρχικές εκτιμήσεις για τα α, β και φ, χρειαζόμαστε μία κατάλληλη συνάρτηση του λάθους ανάμεσα στην ιδανική έλλειψη και το σύνολο των εικονοστοιχείων που σχηματίζουν το περίγραμμα της τρύπας, την οποία θα ελαχιστοποιήσουμε για να βρούμε το βέλτιστο ταίριασμα. Για το σχηματισμό της συνάρτησης αυτής, θα χρειαστούμε λίγο αναλυτική γεωμετρία.

Ας θεωρήσουμε τις αρχικές εκτιμήσεις α_0 , β_0 και φ_0 , για κάποια συγκεκριμένη έλλειψη που ταιριάζει σε μία από τις τρύπες του καρφιού, καθώς και το σύνολο των N_H σημείων με συντεταγμένες $(x_{H,y})$ που αποτελούν μία από τις τρύπες. Σε πρώτο στάδιο σχηματίζουμε την ιδανική έλλειψη που ταιριάζει στα σημεία μας χωρίς κάποια περιστροφή ή μετατόπιση χρησιμοποιώντας την παραμετρική εξίσωση B.V.1:

$$x_e(t) = \alpha_0 \cos(t)$$
$$y_e(t) = \beta_0 \sin(t)$$

Η έλλειψη αυτή έχει κέντρο το (0,0) και εστίες πάνω στον άξονα xx'. Η παράμετρος t θα πρέπει να ανήκει στο διάστημα $[0,2\pi]$ και να έχει επαρκώς μικρό βήμα ώστε να έχουμε αρκετή ακρίβεια στους υπολογισμούς μας. Στην περίπτωσή μας επιλέξαμε βήμα ίσο με 0,01 ακτίνια. Για να βρούμε πόσο καλά ταιριάζει η ιδανική έλλειψη με τα δεδομένα του περιγράμματος της τρύπας, πρέπει να περιστρέψουμε και να μετατοπίσουμε μία από τις δύο ελλείψεις έτσι, ώστε τα κέντρα τους και οι άξονές τους να ταυτίζονται. Για να απλοποιήσουμε τους υπολογισμούς, είναι πρακτικότερο να διατηρήσουμε σταθερή την ιδανική έλλειψη και να περιστρέψουμε και να μετατοπίσουμε τα σημεία του περιγράμματος της τρύπας, καθώς αυτό θα μας δώσει δύο ελλείψεις με κέντρο το (0,0) και μεγάλο άξονα που ταυτίζεται με τον άξονα xx'. Έτσι, λοιπόν, για κάθε σημείο του περιγράμματος της τρύπας εφαρμόζουμε τον εξής μετασχηματισμό:

$$\begin{bmatrix} x_{rH}(k) \\ y_{rH}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_0 & \sin\varphi_0 \\ -\sin\varphi_0 & \cos\varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_H(k) \\ y_H(k) \end{bmatrix}$$

Στην εξίσωση αυτή, το k υποδηλώνει τον αριθμό του σημείου και όχι κάποια παράμετρο. Με το μετασχηματισμό αυτό προκύπτει ένα νέο σύνολο σημείων, το οποίο είναι το αρχικό σύνολο σημείων με συντεταγμένες $(x_{H,,}, y_{H})$ περιεστραμμένο κατά $-\varphi_{0}$. Αυτό σημαίνει ότι το σύνολο σημείων με συντεταγμένες $(x_{rH,,}, y_{rH})$ είναι το περίγραμμα της τρύπας με μεγάλο άξονα παράλληλο με τον άξονα xx'. Στη συνέχεια, μετατοπίζουμε τα περιεστραμμένα σημεία του περιγράμματος της τρύπας ώστε το κέντρο της τρύπας να συμπίπτει με την αρχή των αξόνων:

$$\begin{bmatrix} x_{rHc} \\ y_{rHc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{rH} \\ y_{rH} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{N_H} \sum_{k=1}^{N_H} x_{rH}(k) \\ \frac{1}{N_H} \sum_{k=1}^{N_H} y_{rH}(k) \end{bmatrix}$$
(B.V.5)

Πλέον, τόσο η ιδανική έλλειψη όσο και οι συντεταγμένες του περιγράμματος της τρύπας έχουν κέντρο την αρχή των αξόνων και μεγάλο άξονα που ταυτίζεται με τον άξονα xx'.

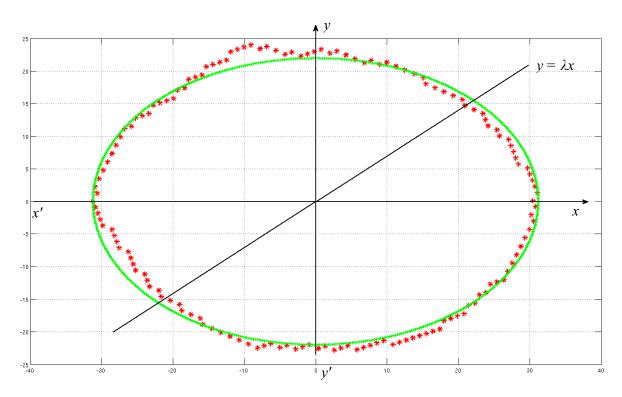
Για να υπολογίσουμε το λάθος ανάμεσα στα δύο σχήματα, εργαζόμαστε ως εξής:

Για κάθε σημείο του περιγράμματος της τρύπας, υπολογίζουμε την κλίση λ της ευθείας με εξίσωση $y=\lambda x$ που διέρχεται από το σημείο αυτό. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τις αποστάσεις όλων των σημείων της ιδανικής έλλειψης από την ευθεία αυτή χρησιμοποιώντας το γνωστό τύπο που μας δίνει την απόσταση ενός σημείου M με συντεταγμένες (x_M, y_M) από μία ευθεία ε με εξίσωση ε: $Ax + By + \Gamma = 0$ (Σχήμα B.38).

$$d(M,\varepsilon) = \frac{Ax_M + By_M + I}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

Προφανώς, στην περίπτωση αυτή $A = -\lambda$, B = 1 και $\Gamma = 0$.

Από την εφαρμογή του ανωτέρου τύπου, θα προκύψουν, προφανώς, δύο σημεία της ιδανικής έλλειψης με πολύ μικρή απόσταση από την ευθεία αυτή. Τα δύο σημεία αυτά αντιστοιχούν στα αντιδιαμετρικά σημεία της έλλειψης, στα οποία η ευθεία τέμνει την έλλειψη αυτή (Σχήμα B.38). Για να διαπιστώσουμε ποιο από τα δύο αυτά σημεία είναι αυτό που είναι κοντινότερο στο σημείο του περιγράμματος που χρησιμοποιήσαμε για να σχηματίσουμε την ευθεία με εξίσωση $y = \lambda x$, ελέγχουμε τα πρόσημα των αντιστοίχων συντεταγμένων των σημείων. Το σημείο της ιδανικής έλλειψης που μας ενδιαφέρει θα πρέπει να έχει συντεταγμένες με ίδια πρόσημα με αυτά των συντεταγμένων του σημείου του περιγράμματος.



Σχήμα Β.38. Ένα περίγραμμα μίας τρύπας (κόκκινο) περιεστραμμένο και μετατοπισμένο ώστε να συμπίπτει με την αρχική εκτίμηση της ιδανικής έλλειψης (πράσινο).

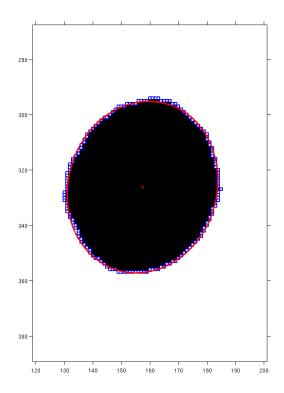
Αφού εντοπίσουμε το σημείο της ιδανικής έλλειψης $(x_n(k)y_n(k))$ που είναι κοντινότερο στο αντίστοιχο σημείο $(x_H(k)y_H(k))$ του περιγράμματος, υπολογίζουμε την απόσταση (σε εικονοστοιχεία) των δύο σημείων αυτών. Ως ολικό μέτρο του λάθους προσέγγισης για τα συγκεκριμένα α , β και φ , ορίζουμε το μέσο όρο των αποστάσεων όλων των σημείων του περιγράμματος από τα αντίστοιχα σημεία της έλλειψης:

$$e(\alpha, \beta, \varphi) = \frac{1}{N_H} \sum_{k=1}^{N_H} \sqrt{(x_n(k) - x_H(k))^2 + (y_n(k) - y_H(k))^2}$$

Προφανώς, όσο καλύτερη είναι η εκτίμηση των α , β και φ , τόσο καλύτερη θα είναι και η προσέγγιση της ιδανικής έλλειψης στο περίγραμμα της τρύπας του καρφιού και τόσο μικρότερη θα είναι η τιμή του αθροίσματος των αποστάσεων των σημείων της ιδανικής έλλειψης από τα αντίστοιχα σημεία του περιγράμματος της τρύπας.

Με τον ορισμό του μέτρου του λάθους είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στην εφαρμογή του αλγορίθμου Nelder-Mead για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $e(\alpha, \beta, \varphi)$ ως προς τις τρεις μεταβλητές αυτές. Όπως περιγράφηκε και προηγουμένως, ο αλγόριθμος αυτός, δεδομένων κάποιων αρχικών τιμών α_0 , β_0 και φ_0 , θα εφαρμόσει τις κατάλληλες μεταβολές στις τρεις μεταβλητές α , β και φ , ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση του λάθους και να βρεθεί η βέλτιστη προσέγγιση της ιδανικής έλλειψης στα σημεία του περιγράμματος με κάποια προκαθορισμένη ακρίβεια. Φυσικά, όσο μεγαλώνει η ακρίβεια που απαιτείται μεγαλώνει και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Στην περίπτωσή μας η εκτέλεση σταματάει όταν η αλλαγή στην τιμή των μεταβλητών γίνεται μικρότερη από 10^{-8} .

Όσον αφορά το μέτρο του λάθους ανάμεσα στην ιδανική έλλειψη και στο περίγραμμα της τρύπας, θα μπορούσαν να είχαν χρησιμοποιηθεί και άλλα μέτρα, όπως, πχ ο μέσος όρος των τετραγώνων των αποστάσεων για να έχουμε γρηγορότερη σύγκλιση ή κάποιος τελείως διαφορετικός τρόπος υπολογισμού του λάθους βασισμένος σε κάποια άλλη γεωμετρική προσέγγιση. Ο τρόπος που επιλέχθηκε, όμως, δίνει καλά αποτελέσματα με σχετικά μικρό χρόνο σύγκλισης. Στο Σχήμα Β.39 φαίνεται η βέλτιστη έλλειψη που προσεγγίζει μία από τις τρύπες του καρφιού, ενώ στον Πίνακα 1 φαίνονται τα λάθη προσέγγισης για τις τρύπες που εμφανίζονται στις εικόνες τόσο του συνόλου των ψηφιοποιημένων εικόνων, όσο και αυτών που προέκυψαν από απευθείας ψηφιοποίηση των ακτινογραφιών από το μηχάνημα λήψης ακτινογραφιών.



Σχήμα Β.39. Προσέγγιση μίας από τις τρύπες με τη βέλτιστη έλλειψη. Με μπλε φαίνονται τα σημεία του περιγράμματος της τρύπας, ενώ με κόκκινο η έλλειψη που την προσεγγίζει βέλτιστα.

Πίνακας Β.Ι. Λάθη προσέγγισης των τρυπών των εικόνων που είχαμε στη διάθεσή μας.

Όνομα εικόνας	Εξωτερική τρύπα	Εσωτερική τρύπα	
image_1	0.389	0.3788	
image_2	0.3891	0.5056	
image_3	0.3806	0.4178	
image_4	0.4166	0.4345	
image_5	0.4625	0.4694	
image_6	0.4299	0.4967	
image_7	0.3739	0.4143	
image_8	0.4393	0.4578	
image_9	0.4253	0.3611	
image_10	0.5036	0.5117	
digital_1	0.4148	0.5691	
digital_2	0.5091	0.4837	
digital_3	0.5866	0.4448	
digital_4	0.723	0.5365	
digital_5	0.9422	0.7008	
digital_7	1.131	0.8775	
digital_30	1.4892	1.3719	
digital_31	1.4457	1.5338	

Για να αποκτήσει ο αναγνώστης μία αίσθηση της σχέσης του λάθους με το οπτικό ταίριασμα, σημειώνουμε ότι το λάθος της βέλτιστης προσέγγισης του Σχήματος Β.39 είναι 0,4166. Συγκρίνοντας τις τιμές του πίνακα με την τιμή αυτή, βλέπουμε ότι σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις είχαμε πολύ καλή προσέγγιση της τρύπας από μία αντίστοιχη έλλειψη.

Β. V.4 Παραλλαγές στον αλγόριθμο προσέγγισης της τρύπας με έλλειψη

Με βάση τον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στα παραπάνω, μπορούμε να εφαρμόσουμε ορισμένες παραλλαγές ώστε να πετύχουμε καλύτερο ταίριασμα ανάμεσα στην ιδανική έλλειψη και στα σημεία του περιγράμματος της τρύπας του καρφιού. Μία πρώτη ιδέα είναι να επιτρέψουμε στο κέντρο της ιδανικής έλλειψης να κινείται ελεύθερα, αντί να θεωρήσουμε ότι συμπίπτει με το κέντρο της τρύπας. Αυτό σημαίνει ότι πλέον η τιμή του λάθους προσέγγισης είναι συνάρτηση πέντε μεταβλητών αντί για τρεις που ήταν

προηγουμένως, δηλαδή έχει τη μορφή $e(\alpha, \beta, X_{C.}, Y_{C.}, \varphi)$, όπου X_C και Y_C είναι οι συντεταγμένες του κέντρου της ιδανικής έλλειψης.

Υπολογιστικά μιλώντας, η μόνη διαφορά στον αλγόριθμό μας σε σχέση με προηγουμένως είναι ότι η εξίσωση Β.V.5, η οποία μας δίνει τις συντεταγμένες των σημείων της τρύπας, όταν αυτά έχουν περιστραφεί ώστε η τρύπα να έχει μεγάλο άξονα παράλληλο με το xx' και μετατοπιστεί ώστε το κέντρο της τρύπας να βρίσκεται στην αρχή των αξόνων, γίνεται:

$$\begin{bmatrix} x_{rHc} \\ y_{rHc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{rH} \\ y_{rH} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{rC} \\ Y_{rC} \end{bmatrix}$$

Στην εξίσωση αυτή, X_{rC} και Y_{rC} είναι η συντεταγμένες του κέντρου της τρύπας μετά από την εφαρμογή της αντίστροφης περιστροφής της. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ προηγουμένως θεωρούσαμε ότι το κέντρο της τρύπας και το κέντρο της ιδανικής έλλειψης συμπίπτουν, πλέον επιτρέπουμε στο κέντρο της τρύπας να μετατοπιστεί ελεύθερα κατά το ταίριασμα της τρύπας με την ιδανική έλλειψη (η οποία εξακολουθεί να έχει κέντρο το (0, 0), όπως προηγουμένως). Αυτό μεταφράζεται ως δύο επιπλέον βαθμοί ελευθερίας στο σχηματισμό της βέλτιστης έλλειψης.

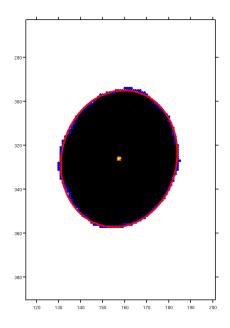
Όσον αφορά στα υπόλοιπα στοιχεία του αλγορίθμου, αυτά παραμένουν ίδια με προηγουμένως. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της παραλλαγής αυτής στις ίδιες εικόνες που είχαμε στη διάθεσή μας συνοψίζονται στον Πίνακα ΙΙ, ενώ στο Σχήμα Β.40 φαίνεται το ταίριασμα της βέλτιστης έλλειψης μαζί με νέο κέντρο που προέκυψε. Όπως βλέπουμε, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα Ι στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων έχουμε μία αισθητή βελτίωση του ταιριάσματος της βέλτιστης έλλειψης στις αντίστοιχες τρύπες. Σε πολύ λίγες περιπτώσεις είχαμε ελαφρώς χειρότερο ταίριασμα, το οποίο προφανώς οφείλεται στο ότι ο αλγόριθμος ελαχιστοποίησης της συνάρτησης του λάθους βρήκε κάποιο τοπικό ελάχιστο πολύ κοντά στο ολικό ελάχιστο της συνάρτησης του λάθους, το οποίο όμως δε μας δίνει καλύτερο ταίριασμα από ότι προηγουμένως. Καθώς οι περιπτώσεις αυτές είναι πολύ λίγες σε σχέση με τον αριθμό των περιπτώσεων στις οποίες η παραλλαγή αυτή μας έδωσε καλύτερο ταίριασμα (περίπου 11% του συνόλου) και δεδομένης της σχετικά μικρής αύξησης του υπολογιστικού χρόνου που παρατηρείται για την εφαρμογή της παραλλαγής αυτής, βλέπουμε ότι τελικά είναι σκόπιμο

να επιτρέψουμε στο κέντρο της βέλτιστης έλλειψης να κινείται ελεύθερα σε σχέση με το κέντρο της τρύπας την οποία θέλουμε να προσεγγίσουμε.

Πίνακας Β.Π. Τιμές λάθους ταιριάσματος για την παραλλαγή του αλγορίθμου με ελεύθερο

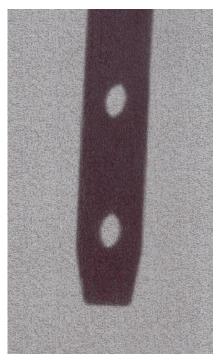
κέντρο ταιριάσματος της έλλειψης με την τρύπα.

Όνομα εικόνας	Εξωτερική τρύπα	Εσωτερική τρύπα	
image_1	0.3798	0.3719	
image_2	0.3848	0.4675	
image_3	0.3582	0.4015	
image_4	0.4079	0.4284	
image_5	0.4446	0.46	
mage_6	0.4285	0.4925	
image_7	0.3568	0.4041	
mage_8	0.3698	0.448	
mage_9	0.3721	0.3446	
mage_10	0.4942	0.4996	
digital_1	0.4527	0.5608	
digital_2	0.4863	0.4807	
digital_3	0.5675	0.4435	
digital_4	0.6985	0.5251	
digital_5	0.9435	0.6699	
digital_7	1.1224	0.8772	
digital_30	1.4762	1.4518	
digital_31	1.3439	1.5311	



Σχήμα Β.40. Προσέγγιση τρύπας από έλλειψη με το κέντρο ελεύθερο. Με κόκκινο φαίνεται το κέντρο της τρύπας, ενώ με κίτρινο το κέντρο της έλλειψης που την προσεγγίζει βέλτιστα.

Μία άλλη παραλλαγή του αλγορίθμου αυτού περιλαμβάνει το χωρισμό της τρύπας σε δύο μισά, τα οποία για λόγους απλότητας θα ονομάσουμε το «πάνω» μισό και το «κάτω» μισό, τα οποία αντιστοιχούν στα δύο σύνολα σημείων του περιγράμματος της τρύπας που σχηματίζουν την τρύπα αυτή. Σε αυτή τη μεθοδολογία προσεγγίζουμε το κάθε μισό της τρύπας από ένα τμήμα έλλειψης. Η παραλλαγή αυτή είναι πιο χρήσιμη όταν η γωνία περιστροφής του καρφιού γύρω από το διαμήκη άξονά του είναι τόσο μεγάλη, ώστε η σκιά του ενός μέρους να πέφτει πάνω στο άλλο, οπότε η τρύπα να μην μοιάζει πλέον τόσο με έλλειψη, αλλά να έχει ένα σχήμα που μοιάζει περισσότερο με συμμετρικό αμύγδαλο (Σχήμα Β.41).



Σχήμα Β.41. Εικόνα που δείχνει το καρφί με μεγάλη γωνία περιστροφής σε σχέση με το διαμήκη άξονά του. Οι τρύπες έχουν χάσει το ελλειπτικό σχήμα τους.

Στην περίπτωση αυτή οι άκρες της τρύπας εμφανίζουν ένα «σπάσιμο» μεταξύ τους λόγω της υπέρθεσης της σκιάς του πάνω μέρους πάνω στη σκιά του κάτω μέρους. Στην περίπτωση αυτή, θεωρούμε πως τα δύο μέρη είναι ελλειπτικά από μόνα τους, αλλά ο συνδυασμός τους δεν αντιστοιχεί σε έλλειψη. Εδώ παρουσιάζονται διάφορα θέματα, τα οποία δεν υπήρχαν προηγουμένως. Το βασικότερο είναι πως δεν μπορούμε να γνωρίζουμε ποιο τμήμα της έλλειψης ταιριάζει βέλτιστα στο τμήμα του περιγράμματος της τρύπας που

εξετάζουμε, καθώς δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα δύο τμήματα της τρύπας αντιστοιχούν σε μισά μίας ιδανικής έλλειψης.

Στην περίπτωση αυτή, εργαζόμαστε με ελαφρώς διαφορετικό τρόπο από ότι προηγουμένως. Αρχικά, χρησιμοποιούμε τον προηγούμενο αλγόριθμο για να βρούμε μία εκτίμηση της ιδανικής έλλειψης που προσεγγίζει βέλτιστα το σύνολο των σημείων του περιγράμματος της τρύπας. Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση αυτή, χωρίζουμε το περίγραμμα της τρύπας σε δύο μέρη, τα οποία βρίσκονται εκατέρωθεν του μεγάλου άξονα της ιδανικής έλλειψης. Σημειωτέων ότι, ενώ θεωρητικά τα δύο μέρη θα πρέπει να έχουν ίδιο αριθμό σημείων, πρακτικά η παρουσία θορύβου μπορεί να επηρεάσει τον αριθμό των σημείων που αποτελούν το κάθε «μισό» του περιγράμματος, οπότε δεν μπορούμε εκ των προτέρων να θεωρήσουμε ότι τα μισά σε πλήθος σημεία του περιγράμματος σχηματίζουν και το μισό του περιγράμματος. Προσεγγίζοντας το σύνολο του περιγράμματος της τρύπας με μία ενιαία έλλειψη, έχουμε κάποια εξασφάλιση ότι τα δύο μέρη στα οποία χωρίσαμε το περίγραμμα βρίσκονται εκατέρωθεν του μεγάλου άξονα της βέλτιστης έλλειψης, ο οποίος θεωρούμε ότι συμπίπτει με το μεγάλο άξονα της τρύπας του καρφιού.

Στη συνέχεια, θεωρούμε ότι το κάθε μέρος του περιγράμματος προσεγγίζεται από μία ιδανική έλλειψη, η οποία έχει εξίσωση (χωρίς περιστροφή και μετατόπιση):

$$x_e(t) = \alpha_0 \cos(t)$$
$$y_e(t) = \beta_0 \sin(t)$$

Εδώ, α_0 και β_0 είναι οι αρχικές εκτιμήσεις των α και β , οι οποίες προκύπτουν από την προσέγγιση ολοκλήρου του περιγράμματος της τρύπας από μία ενιαία έλλειψη. Στην περίπτωση αυτή, όμως, η παράμετρος t ανήκει σε ένα διάστημα $[t_{apx}, t_{τελ}]$, το οποίο πρέπει να προσδιορίσουμε. Επίσης, όπως προηγουμένως, θεωρούμε ότι το κέντρο του τμήματος της έλλειψης που προσεγγίζει βέλτιστα το κάθε μέρος του περιγράμματος δε συμπίπτει απαραίτητα με το κέντρο του περιγράμματος της τρύπας. Επομένως, η συνάρτηση του λάθους που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε πλέον έχει τη μορφή $e(\alpha, \beta, X_{C.}, Y_{C.}, \varphi, t_{apx}, t_{τελ})$.

Για τον υπολογισμό του λάθους εργαζόμαστε όπως και προηγουμένως, με δύο βασικές τροποποιήσεις στον αλγόριθμο. Η πρώτη είναι ότι αυτή τη φορά σχηματίζουμε και ελέγχουμε για ταίριασμα το μέρος της έλλειψης που αντιστοιχεί στο διάστημα $[t_{a\rho\chi}, t_{\taue\lambda}]$. Μία καλή αρχική εκτίμηση για τα $t_{a\rho\chi}$, $t_{\taue\lambda}$ είναι τα διαστήματα $[0, \pi]$ για το «πάνω» μέρος και $[\pi, 2\pi]$ για το «κάτω» μέρος. Η δεύτερη τροποποίηση είναι ότι θέτουμε τον περιορισμό το περίγραμμα του τμήματος της έλλειψης που προσεγγίζει βέλτιστα το αντίστοιχο τμήμα

του περιγράμματος να έχει όσο το δυνατόν παρόμοιο μήκος καμπύλης με το τμήμα του περιγράμματος της τρύπας. Έτσι, εξασφαλίζουμε ότι το τμήμα της βέλτιστης έλλειψης που προσεγγίζει το συγκεκριμένο τμήμα του περιγράμματος της τρύπας (το πάνω ή το κάτω) δε θα επικαλύπτει και το άλλο τμήμα του περιγράμματος.

Καθώς το μήκος του τμήματος της έλλειψης δεν μπορεί να υπολογιστεί σε αναλυτική μορφή παρά μόνο προσεγγιστικά, χρησιμοποιήσαμε έναν αριθμητικό τρόπο υπολογισμού: Σχηματίσαμε το μοντέλο της έλλειψης χωρίζοντας το αντίστοιχο διάστημα $[t_{αρχ}, t_{τελ}]$ χρησιμοποιώντας κατάλληλα ψιλή διαβάθμιση και, στη συνέχεια, αθροίσαμε τα μήκη των διαδοχικών ευθυγράμμων τμημάτων που συνδέουν τα σημεία του μοντέλου για το διάστημα αυτό:

$$L_{e}(t_{apx}, t_{\tau e \lambda}) = \sum_{k=2}^{N_{e}} \sqrt{(x_{e}(k) - x_{e}(k-1))^{2} + (y_{e}(k) - y_{e}(k-1))^{2}}$$

Στην εξίσωση αυτή, N_e είναι το πλήθος των σημείων που σχηματίζουν το τμήμα της έλλειψης και $x_e(1) = \alpha_0 \cos(t_{apx})$, $y_e(1) = \beta_0 \sin(t_{apx})$, $x_e(N_e) = \alpha_0 \cos(t_{tel})$, $y_e(N_e) = \beta_0 \sin(t_{tel})$. Ο τρόπος αυτός μας δίνει μία αρκετά καλή προσέγγιση του μήκους του τμήματος της έλλειψης, υπό την προϋπόθεση ότι το διάστημα $[t_{apx}, t_{tel}]$ έχει χωριστεί σε αρκετά μικρά υποδιαστήματα. Για το μήκος του τμήματος της τρύπας, εργαζόμαστε αντίστοιχα:

$$L_{sH} = \sum_{k=2}^{N_{sH}} \sqrt{(x_{sH}(k) - x_{sH}(k-1))^2 + (y_{sH}(k) - y_{sH}(k-1))^2}$$

Εδώ L_{sH} είναι το μήκος του πάνω ή του κάτω «μισού» της τρύπας, (x_{sH,y_sH}) είναι οι συντεταγμένες των αντιστοίχων σημείων του περιγράμματος για το αντίστοιχο μισό και N_{sH} είναι το πλήθος των σημείων του τμήματος αυτού του περιγράμματος.

Οι τιμές $x_{sH}(1)$, $y_{sH}(1)$, $x_{sH}(N_{sH})$, $y_{sH}(N_{sH})$ υπολογίστηκαν ως εξής: Αφού υπολογίσαμε την αρχική προσέγγιση ολοκλήρου του περιγράμματος με μία ενιαία έλλειψη, προεκτείναμε το μεγάλο άξονα της ιδανικής έλλειψης που ταιριάζει στο περίγραμμα αυτό και βρήκαμε τα σημεία του περιγράμματος της τρύπας στα οποία η ευθεία του άξονα της έλλειψης τέμνει το περίγραμμα της τρύπας. Τα σημεία αυτά χωρίζουν το περίγραμμα της τρύπας σε δύο μέρη, τα οποία δεν είναι απαραίτητα ίσα όσον αφορά στο πλήθος των σημείων που τα αποτελούν. Με κατάλληλη μετατόπιση των σχετικών τιμών εντός του

πίνακα των σημείων του περιγράμματος, προκύπτουν δύο νέοι πίνακες συντεταγμένων, των οποίων τα ακραία σημεία είναι τα σημεία τομής του άξονα της ιδανικής έλλειψης με το περίγραμμα. Οι τιμές των ακραίων σημείων αυτών είναι οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τα $x_{sH}(1)$, $y_{sH}(1)$, $x_{sH}(N_{sH})$, $y_{sH}(N_{sH})$, αντίστοιχα.

Οι υπόλοιποι υπολογισμοί διεξάγονται όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, με εξαίρεση το μέτρο του λάθους, το οποίο γίνεται:

$$e(\alpha, \beta, \varphi, X_{C}, Y_{C}, t_{\alpha\rho\chi}, t_{\tau\varepsilon\lambda}) = \frac{1}{N_{sH}} \sum_{k=1}^{N_{sH}} \sqrt{(x_{n}(k) - x_{sH}(k))^{2} + (y_{n}(k) - y_{sH}(k))^{2}} + |L_{e}(t_{\alpha\rho\chi}, t_{\tau\varepsilon\lambda}) - L_{sH}|$$

Βλέπουμε ότι το λάθος είναι πλέον συνάρτηση επτά μεταβλητών, ενώ η ελαχιστοποίησή του προϋποθέτει και την εύρεση του τμήματος της έλλειψης που έχει κατάλληλα παρόμοιο μήκος.

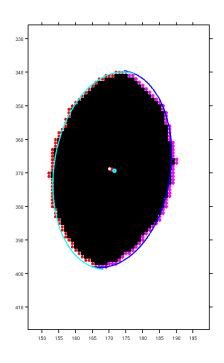
Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης αυτής δεν είναι τόσο ακριβής ή τόσο σύντομη όσο των συναρτήσεων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες περιπτώσεις. Επίσης, εδώ υποθέσαμε ότι η ελαχιστοποίηση του λάθους ταιριάσματος και της διαφοράς των μηκών είναι ισότιμες όσον αφορά στην προτεραιότητά τους. Στην πράξη, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά βάρη για τις δύο ποσότητες ανάλογα με το σε ποια από τις δύο θέλουμε να δώσουμε προτεραιότητα. Στον Πίνακα ΙΙΙ φαίνονται οι τιμές των λαθών προσέγγισης που προέκυψαν για τις διάφορες εικόνες και τα διαφορετικά τμήματα των τρυπών. Πρέπει να σημειωθεί ότι, λόγο του γεγονότος ότι το μέτρο του λάθους είναι διαφορετικό στην περίπτωση αυτή, οι τιμές αυτές δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες με τις τιμές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Στο Σχήμα Β.42 φαίνεται μία τρύπα, τα δύο μέρη του περιγράμματός της, τα αντίστοιχα τμήματα των βέλτιστων ελλείψεων που τα προσεγγίζουν, καθώς και τα κέντρα των ελλείψεων από τις οποίες προέκυψαν τα τμήματα αυτά. Όπως παρατηρούμε και από το Σχήμα αυτό, αν και το ταίριασμα των επιμέρους τμημάτων είναι αρκετά καλό, το γεγονός ότι στον υπολογισμό του λάθους συμμετέχει και ο όρος που αντιστοιχεί στη διαφορά του μήκους του μέρους του περιγράμματος από το μήκος του τμήματος της αντίστοιχης βέλτιστης έλλειψης επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα. Σε περιπτώσεις που το ταίριασμα είναι καλύτερο, υπάρχει μεγαλύτερη χαλαρότητα στο μήκος, ενώ, αντίστοιχα, όταν δεν επιτυγχάνεται «καλό» ταίριασμα του σχήματος τότε το μήκος παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις όμως, τα τελικά αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν

για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την προβολή της τρύπας πάνω στην ακτινογραφική πλάκα, καθώς διαφορετικές περιπτώσεις θα προκαλούν συγκεκριμένες συμπεριφορές των ποσοτήτων αυτών.

Πίνακας Β.ΙΙΙ. Λάθη προσέγγισης του αντίστοιχου μέρους της ιδανικής έλλειψης για τα δύο τμήματα της κάθε τρύπας.

	Εζωτερική τρύπα		Εσωτερική τρύπα	
Όνομα εικόνας	Πάνω τμήμα	Κάτω τμήμα	Πάνω τμήμα	Κάτω τμήμα
image_1	0.7901	0.3543	0.3318	0.3756
image_2	0.3927	0.4053	4.2401	3.5028
image_3	0.5479	0.4153	0.3567	0.562
image_4	0.6558	0.5268	0.6975	0.5435
image_5	0.6982	0.5581	0.6124	0.6953
image_6	0.4485	0.3996	0.5638	0.3418
image_7	0.3541	0.3592	0.6311	0.3105
image_8	0.3833	0.6468	0.5366	0.358
image_9	0.3389	0.3796	0.6306	0.3204
image_10	1.0042	0.738	0.6961	0.9615
digital_1	0.4767	0.4109	0.5362	0.4143
digital_2	1.7181	0.6216	1.0215	1.2634
digital_3	0.501	0.5106	0.4378	0.377
digital_4	0.6231	0.9557	0.4883	0.7482
digital_5	0.7318	0.8937	0.6568	0.8512
digital_7	0.9169	1.163	1.3559	1.02
digital_30	1.5754	1.3271	1.614	1.5078



Σχήμα Β.42. Ταίριασμα των μερών της τρύπας από τις αντίστοιχες βέλτιστες ελλείψεις. Τα σημεία που φαίνονται στο κέντρο του σχήματος είναι τα εξής: Το συνολικό κέντρο της τρύπας (κόκκινο), το κέντρο της βέλτιστης έλλειψης του αριστερού τμήματος (κυανό) και το κέντρο της βέλτιστης έλλειψης του δεξιού τμήματος (λευκό).

Κλείνοντας το μέρος αυτό που αφορά την εξαγωγή χρήσιμης πληροφορίας από τις προβολές των οπών του καρφιού, οφείλουμε να κάνουμε ορισμένες βασικές παρατηρήσεις σχετικά με την εφαρμοσιμότητα των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν.

Αν και στη συγκεκριμένη περίπτωση για την προσέγγιση των προβολών των τρυπών χρησιμοποιήσαμε ως πρότυπο το γεωμετρικό τόπο της έλλειψης, όλοι οι αλγόριθμοι που παρουσιάστηκαν μπορούν να εφαρμοστούν με χρήση οποιουδήποτε καλά ορισμένου προτύπου. Το πρότυπο αυτό που θα χρησιμοποιηθεί δε χρειάζεται καν να είναι αυστηρά γεωμετρικό. Οποιοδήποτε αυθαίρετο σχήμα μπορεί λειτουργήσει ως πρότυπο, υπό την προϋπόθεση ότι έχουμε μία κατάλληλη γενική περιγραφή του σχήματος αυτού. Η περιγραφή αυτή θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ορισμένες ποσότητες όπως, πχ, μήκος, πλάτος, επιφάνεια, μήκος αξόνων συμμετρίας, κλπ, η μεταβολή των οποίων θα μας επιτρέψει να ταιριάξουμε το αυθαίρετο πρότυπο με την προβολή του αντικειμένου που μας ενδιαφέρει.

Σε μία πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση, θα μπορούσε κανείς να λάβει την ακτινογραφία ενός συγκεκριμένου πρότυπου σχήματος (όπως, πχ, ένας κυκλικός δίσκος), η ανάλυση της προβολής του οποίου θα μας επέτρεπε τη γεωμετρική περιγραφή της ακτινογραφικής διαδικασίας και των χαρακτηριστικών της (όπως, πχ, η απόκλιση ή η πυκνότητα των ακτίνων). Η περιγραφή αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αντιστάθμιση των ατελειών που εμφανίζονται στις ακτινογραφίες λόγω της μη ιδανικής συμπεριφοράς των ακτινογραφικών μηχανημάτων και των μηχανισμών παραγωγής των ακτίνων. Η αντιστάθμιση αυτή των ατελειών θα μπορούσε, με τη σειρά της, να οδηγήσει στη δημιουργία αλγορίθμων προ-επεξεργασίας των ακτινογραφιών, οι οποίοι να τροποποιούν τις εικόνες που προκύπτουν από τις ακτινογραφίες με τέτοιο τρόπο, ώστε οι απεικονίσεις αυτές να είναι ακόμα πιο ακριβείς από τις παρούσες, χωρίς απαραίτητα ρύθμιση ή τροποποίηση των μηχανημάτων αυτών. Η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να οδηγήσει σε ιατρικές απεικονίσεις εξαιρετικά μεγάλης ακρίβειας, καθιστώντας έτσι τη διάγνωση ευκολότερη και ακριβέστερη.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

<u>Κεφάλαιο Β.VI.: Επίλογος</u>

Στο παρόν κείμενο παρουσιάσαμε μία μεθοδολογία προ-επεξεργασίας και εξαγωγής γεωμετρικής πληροφορίας από ακτινογραφίες μεμονωμένων ήλων υποστήριξης οστών. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου συστήματος ιατρικής απεικόνισης για την υποβοήθηση γειρούργων ορθοπεδικών κατά την τοποθέτηση ήλων υποστήριξης οστών σε επεμβάσεις κλειστής ενδομυελικής ήλωσης, καθώς και για την αναίμακτη διάγνωσης της πορείας θεραπείας ενός οστού, το οποίο έχει αποκατασταθεί με χρήση των ήλων αυτών. Οι αλγόριθμοι που παρουσιάστηκαν εφαρμόστηκαν σε μεμονωμένες εικόνες του καρφιού με σκοπό τη διαμόρφωση μίας μεθοδολογίας εξαγωγής της σχετικής πληροφορίας από κανονικές ακτινογραφίες οστών (Skembris, Koukoutsis, Papaodysseus, Kayafas, 2013) Οι αλγόριθμοι που παρουσιάστηκαν επιτρέπουν την επιτυχή κατάτμηση της ακτινογραφίας, την εξαγωγή πληροφορίας σχετικής με το σχήμα του ήλου, καθώς και πληροφορίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της θέσης, της γωνίας περιστροφής και της γωνίας καταβύθισης του ήλου σε σχέση με κάποιο γνωστό επίπεδο αναφοράς. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι εφαρμόσιμοι και σε πιο εξειδικευμένες παρατηρήσεις, όπως, πχ, η αντιστάθμιση των ατελειών των ακτινογραφικών απεικονίσεων που οφείλονται στην μη ιδανική διεργασία παραγωγής και εκπομπής των ακτίνων.

Η μελλοντική έρευνα στην κατάτμηση των ιατρικών εικόνων θα κινηθεί προς την κατεύθυνση της βελτίωσης της ακρίβειας και της μείωσης των υπολογιστικών απαιτήσεων των υπαρχουσών μεθόδων κατάτμησης, καθώς και στη μείωση της απαραίτητης αλληλεπίδρασης με το χρήστη. Η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση πρότερης πληροφορίας από τους άτλαντες και με το συνδυασμό διακριτών και συνεχών μεθόδων κατάτμησης στο χώρο. Για την αύξηση της υπολογιστικής αποτελεσματικότητας, η επεξεργασία σε πολλές κλίμακες και οι παραλληλοποιήσιμες μέθοδοι όπως τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούν πολλά υποσχόμενους τομείς. Η υπολογιστική αποτελεσματικότητα θα είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εφαρμογές επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο.

Πιθανότατα η πιο σημαντική ερώτηση σχετικά με τη χρήση της κατάτμησης εικόνας είναι οι κλινικές συνθήκες. Οι μέθοδοι κατάτμησης με χρήση υπολογιστή έχουν ήδη δείξει την χρησιμότητα τους στις ερευνητικές εφαρμογές και εφαρμόζονται πλέον όλο και περισσότερο στη διάγνωση με τη βοήθεια υπολογιστή και το σχεδιασμό ραδιοθεραπειών. Για να γίνουν αποδεκτές οι μέθοδοι κατάτμησης σε τυπικές κλινικές εφαρμογές είναι απαραίτητη εκτενής εξακρίβωση πολλών από τις μεθόδους που εφαρμόζονται. Επιπλέον, ο

ερευνητής πρέπει να μπορεί να δείξει ότι προκύπτουν σοβαρά πλεονεκτήματα από τη χρήση των μεθόδων αυτών (πχ μειωμένος εγχειρητικός κίνδυνος, μειωμένη έκθεση του ασθενούς και του χειρούργο σε ακτινοβολία, πιο ακριβής διάγνωση ή πιο πρώιμη αναγνώριση κάποιας παθολογικής κατάστασης κ.α.) σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, ώστε να δικαιολογηθεί το κόστος εκπαίδευσης και απόκτησης των μηχανημάτων που σχετίζονται με τη χρήση των μεθόδων με χρήση του υπολογιστή. Είναι μάλλον απίθανο οι αυτοματοποιημένες μέθοδοι κατάτμησης να αντικαταστήσουν τελείως τους γιατρούς, αλλά είναι πολύ πιθανό να γίνουν αναπόσπαστα εργαλεία ανάλυσης των ιατρικών εικόνων. Οι μέθοδοι κατάτμησης θα είναι ιδιαίτερα πολύτιμες σε τομείς όπως η εγχείρηση με χρήση ιατρικής εικόνας, στην οποία η ακριβής απεικόνιση της ανατομίας αποτελεί βασική προϋπόθεση.

Βιβλιογραφία Β' Μέρους

- Aboutanos G. B., Dawant B.M. (1997). Automatic brain segmentation and validation: image-based versus atlas-based deformable models. *SPIE Proceedings on Medical Imaging* 3034, 299–310.
- Bae K. T., Giger M. L., Chen C., Kahn C. E. (1993). Automatic segmentation of liver structure in CT images. *Medical Physics* 20, 71–78.
- Bardinet E., Cohen L. D., Ayache N. (1998). A parametric deformable model to fit unstructured 3D data. Computer Vision & Image Understanding 71, 39–54.
- Besag J. (1986). On the statistical analysis of dirty pictures. CVGIP: Image Understanding, 57, 359–72
- Bezdek J. C., Hall L. O., Clarke L. P. (1993). Review of MR image segmentation techniques using pattern recognition. *Medical Physics* 20, 1033–48.
- Bircher H., 1886. Eine neue Methode unmittelbarer Retention bei Fracturen der Rohrenknochen. *Arch Klin Chir.* 34, 410-22.
- Brinkmann B. H., Manduca A., Robb R. A. (1998). Optimized homomorphic unsharp masking for MR grayscale inhomogeneity correction. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 17, 161–71
- Canny, J. (1986). A Computational Approach To Edge Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8, 679-714.
- Caselles V., Catte F., Coll T., Dibos F. (1993). A geometric model for active contours. *Numerical Mathematics*, 66, 1–31.
- Chalana V., Kim Y. (1997). A methodology for evaluation of boundary detection algorithms on medical images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 16, 642–52.
- Chen C. H., Lee G. G. (1997). On digital mammogram segmentation and microcalcification detection using multiresolution wavelet analysis. *Graphical Models & Image Processing*, 59, 349–64.
- Cheng H., Lui Y. M., Freimanis R. I. (1998). A novel approach to microcalcification detection using fuzzy logic technique. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 17, 442–50.
- Choi H. S., Hanynor D. R., Kim Y. (1991). Partial volume tissue classification of multi-channel magnetic resonance images—a mixel model. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 10, 395–407.

- Christensen G. E., Joshi S. C., Miller M. I. (1997). Volumetric transformation of brain anatomy. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 16, 864–77.
- Clark J. W. (1991). Neural network modelling. Physics in Medicine & Biology, 36, 1259-317.
- Clarke L. P., Velthuizen R. P., Camacho M. A., Heine J. J., Vaidyanathan M., et al. (1995). MRI segmentation: methods and applications. *Magnetic Resonance Imaging* 13, 343–68.
- Cohen L. D. (1991). On active contour models and balloons. CVGIP: Image Understing, 53,211-18.
- Coleman G. B., Andrews H. C. (1979). Image segmentation by clustering. Proceedings IEEE 5, 773-85.
- Collins D. L., Zijdenbos A. P., Kollokian V., Sled J. G., Kabani N. J., et al. (1998). Design and construction of a realistic digital brain phantom. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 17, 463–68.
- Collins D. L., Holmes C. J., Peters T. M., Evans, A. C. (1995). Automatic 3-D model-based neuroanatomical segmentation. *Human Brain Mapping*, 3, 190–208.
- Davatzikos C. (1996). Spatial normalization of 3D images using deformable models. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 20,656–65.
- Davatzikos C., Bryan R. N. (1996). Using a deformable surface model to obtain a shape representation of the cortex. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 15, 785–95.
- Davenport J. W., Bezdek J. C., Hathaway R. J. (1988). Parameter estimation for finite mixture distributions. *Computer Mathematics Applications*, 15, 810–28
- Dawant B. M., Zijidenbos A. P., Margolin R. A.(1993). Correction of intensity variations in MR images for computer-aided tissue classification. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 12, 770–81
- Farill J. (1952). Orthopedics in Mexico. Journal of Bone & Joint Surgeons of America, 24, 506-12.
- Fischer A. W., Maatz R. (1942). Weitere Erfahrungen mit der Marknagelung nach Küntscher. Arch Klin Chir.; 203, 531.
- Ge Y., Fitzpatrick J. M., Dawant B. M., Bao J., Kessler R. M., Margolin R. (1996). Accurate localization of cortical convolutions in MR brain images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 15, 418–28
- Gelenbe E., Feng Y., Krishnan K. R. R. (1996). Neural network methods for volumetric magnetic resonance imaging of the human brain. *Proceedings IEEE*, 84, 1488–96.

- Geman S., Geman D. (1984). Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 6, 721–41
- Gibbs P., Buckley D. L., Blackband S. J., Horsman A. (1996). Tumour volume detection from MR images by morphological segmentation. *Physics in Medicine & Biology*, 41, 2437–46.
- Gluck T. (1890). Autoplastic transplantation. Implantation von Fremdkörpern. Berl Klin Wochenschr.19.
- Gonzalez R. C., Woods R. E. (1992). Digital Image Processing. Reading, MA:Addison-Wesley. 716 pp.
- Gordon C. L., Webber C. E., Adachi J. D., Christoforou N. (1996). In vivo assessment of trabecular bone structure at the distal radius from high-resolution computed tomography images. *Physics in Medicine* & *Biology*, 41, 495–508.
- Grimson W. E. L., Ettinger G. J., Kapur T., Leventon M. E., Wells W. M., et al. (1997). Utilizing segmented MRI data in image-guided surgery. *International Journal Pattern Recognition & Artificial Intelligence*, 11, 1367–97.
- Hall L. O., Bensaid A. M., Clarke L. P., Velthuizen R. P., Silbiger M. S., Bezdek J. C. (1992). A comparison of neural network and fuzzy clustering techniques in segmenting magnetic resonance images of the brain. *IEEE Transactions Neural Networks*, 3, 672–82.
- Haralick R. M., Shapiro L. G. (1985). Image segmentation techniques. *Computer Vision, Graphics & Image Proceedings*, 29, 100–32.
- Haykin S. (1994). Neural Networks: A Comprehensive Foundation. New York: Macmillan. pp. 696.
- Hebert T. J. (1997). Fast iterative segmentation of high resolution medical images. *IEEE Transactions Nuclear Science*, 44,1363–67.
- Held K., Kops E. R., Krause B. J., Wells W. M., Kikinis R., et al. (1997). Markov random field segmentation of brain MR images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 16(6), 878–86.
- Herndon R. C., Lancaster J. L., Toga A. W., Fox P. T. (1996). Quantification of white matter and gray matter volumes from T1 parametric images using fuzzy classifiers. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 6, 425–35
- Hey Groves E. W., (1914). On the application of the principle of extension to comminuted fractures of the long bone, with special reference to gunshot injuries. *British Journal of Surgery*, 2(7), 429-43.

- Jain A. K, Dubes R. C. (1988). Algorithms for Clustering Data. Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall. pp. 696
- Joshi S. C., Miller M. I., Grenander U. (1997). On the geometry and shape of brain sub-manifolds. International. Journal of Pattern Recognition & Artificial Intelligence 11, 1317–43.
- Kamarianakis, Z., Buliev I., Pallikarakis, N., 2010. "Comparison of methods for identification of oval contours on tomographic images with potential application in the image guided orthopedic surgery". *Proceedings of MEDICON*, 2010.
- Kapur T., Grimson W. E. L., Kikinis R., Wells W. M. (1998). Enhanced spatial priors for segmentation of magnetic resonance imagery. In *Proceedings of the International Conference on Medical Image* Computing & Computer Assisted Intervention, 1st, Cambridge, MA,pp. 457–68. Berlin: Springer-Verlag
- Kelc, A. Kranjc, A., (2005). Intramedullary nailing of tibial fractures. Ανακτήθηκε από τη διεύθυνση http://www.medicinski-mesecnik.com/MM_07_suplement1_november/MM_07_suplement1_imntibial-fract.pdf
- Khaneja N., Miller M. I., Grenander U. (1998). Dynamic programming generation of curves on brain surfaces. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence 20, 1260–65.
- Khoo V. S., Dearnaley D. P., Finnigan D. J., Padhani A., Tanner S. F., Leach M. O. (1997). Magnetic resonance imaging (MRI): considerations and applications in radiotheraphy treatment planning. Radiotherapy in Oncology, 42, 1–15.
- Konig F., (1913). Über die Implantation von Elfenbein zum Ersatz von Knochen und Gelenken. Nach experimentellen und klinischen Beobachtungen. *Beitr Klin Chir*, 85, 91-114.
- Krettek C., et al., (1999). A mechanical distal aiming device for distal locking in femoral nails. *Clinical Orthopaedics* 384, 267–275.
- Küntscher G. (1940). Die Marknalung von Knochenbruchen. Langenbecks. Arch Klin Chir. 200, 443-55.
- Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., Wright, P. E., 1998 "Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions," SIAM Journal of Optimization, Vol. 9 Number 1, pp. 112-147.
- Lancaster J. L., Rainey L. H., Summerlin J. L., Freitas C. S., Fox P. T., et al. (1997). Automated labeling of the human brain: a preliminary report on the development and evaluation of a forward-transform method. Human Brain Mapping, 5, 238–42.

- Langan D. A., Modestino J. W., Zhang J. (1998). Cluster validation for unsupervised stochastic model-based image segmentation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 7, 180–95.
- Larie S. M., Abukmeil S. S. (1998). Brain abnormality in schizophrenia: a systematic and quantitative review of volumetric magnetic resonance imaging studies. *Journal of Psychology*, 172, 110–20.
- Lee C., Hun S., Ketter T. A., Unser M. (1998). Unsupervised connectivity-based thresholding segmentation of midsaggital brain MR images. *Computing in Biology and Medicine* 28, 309-38.
- Lei T., Sewchand W. (1992). Statistical approach to X-ray CT imaging and its applications in image analysis.

 II. A new stochastic model-based image segmentation technique for X-ray CT image. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 11(1), 62–69.
- Li S. Z. (1995). Markov Random Field Modeling in Computer Vision. Berlin/New York: Springer-Verlag. pp. 264
- Li H. D., Kallergi M., Clarke L. P., Jain V. K., Clark R. A. (1995). Markov random field for tumor detection in digital mammography. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 14, 565–76
- Liang Z. (1993). Tissue classification and segmentation of MR images. *IEEE Engineering in Medicine & Biology*, 12, 81–85.
- Liang Z, MacFall J. R., Harrington D. P. (1994). Parameter estimation and tissue segmentation from multispectral MR images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 13, 441–49.
- Maintz J. B. A., Viergever M. A. (1998). A survey of medical image registration. *Medical Image Analysis*, 2, 1–36.
- Malladi R., Sethian J. A., Vemuri B. C. (1995). Shape modeling with front propagation: a level set approach. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 17, 158–75.
- Mangin J. F., Frouin V., Bloch I., Regis J., Krahe J., Lopez. L. (1995). From 3D magnetic resonance images to structural representations of the cortex topography using topology preserving deformations. *Journal of Mathematics in Imaging & Vision*, 5, 297–318.
- Manousakas I. N., Undrill P. E., Cameron G. G., Redpath T. W. (1998). Split-and-merge segmentation of magnetic resonance medical images: performance evaluation and extension to three dimensions. *Computing in Biomedical ResearcH.*, 31, 393–412.

- McInerney T., Terzopoulos D. (1995). Topologically adaptable snakes. In *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision*, Cambridge, MA, pp. 840–45. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.
- McInerney T., Terzopoulos D. (1996). Deformable models in medical image analysis: a survey. *Medical Image Analysis*, 1, 91–108.
- McInerney T., Terzopoulos D. (1997). Medical image segmentation using topologically adaptable surfaces. *Lecture Notes on Computing Science*, 1205, 23–32.
- Meyer C. R., Peyton H. B., Pipe J. (1995). Retrospective correction of intensity inhomogeneities in MRI. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 14, 36–41.
- Mikic I., Krucinski S., Thomas J. D. (1998). Segmentation and tracking in echocardiographic sequences: active contours guided by optical flow estimates. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 17, 274–84.
- Modny M. T., Bambara J. (1953). The perforated cruciate intramedullary nail: Preliminary report of its use in geriatric patients. *Journal of the American Geriatric Society*, 1, 579-88.
- Modny M. T., Lewert A. H., (1986) Transfixion intramedullary nail. Orthopedics Review, 15, 83-8.
- Neatpisarnvanit, C., Suthakorn, J. (2006). Intramedullary Nail Distal Hole Axis Estimation using Blob Analysis and Hough Transform". *IEEE International Conference on Robotics, Automation and Manufacturing (RAM 2006)*, Bangkok, Thailand, June 7-9, 2006.
- Nelder J. A., Mead R. (1965). A simplex method for function minimization", Computing Journal, 7, 308-313.
- Neumann A., Lorenz C. (1998). Statistical shape model based segmentation of medical images. *Computing in Medical Image Graphics*, 22, 133–43.
- Novelline, R. (1997). Squire's Fundamentals of Radiology. Harvard University Press. 5th edition.
- Ohe T. et al., (1997). Stereo fluoroscopy-assisted distal interlocking of intramedullary nails. Journal of Orthopaedic Trauma, 11(4), 300–303.
- Pal N. R., Pal S. K.. (1993). A review on image segmentation techniques. Pattern Recognition 26:1277-94
- Pappas T. N. (1992). An adaptive clustering algorithm for image segmentation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 40, 901–14.

- Pathak S. D., Grimm P. D., Chalana V., Kim Y. (1998). Pubic arch detection in transrectal ultrasound guided prostate cancer therapy. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 17, 762–71.
- Pham D. L., Prince J. L. (1999). An adaptive fuzzy c-means algorithm for image segmentation in the presence of intensity inhomogeneities. *Pattern Recognition Letters*, 20, 57–68.
- Pham D. L., Prince J. L., Dagher A. P., Xu C. (1997). An automated technique for statistical characterization of brain tissues in magnetic resonance imaging. *International Journal of Pattern Recognition & Artificial Intelligence*, 11(8), 1189–211.
- Pohlman S., Powell K. A., Obuchowski N. A., Chilcote W. A., Broniatowski S. G. (1996). Quantitative classification of breast tumors in digitized mammograms. *Medical Physics*, 23, 1337–45.
- Polakowski W. E., Cournoyer D. A., Rogers S. K., DeSimio M. P., Ruck D. W., et al. (1997). Computer-aided breast cancer detection and diagnosis of masses using difference of Gaussians and derivative-based feature saliency. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 16, 811–19.
- Priebe C. E., Marchette D. J., Rogers G. W. (1997). Segmentation of random fields via borrowed strength density estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 19, 494–99.
- Rademacher J., Galaburda A. M., Kennedy D. N., Filipek P. A., Caviness V. S. (1992). Human cerebral cortex: localization, parcellation and morphometry with magnetic resonance imaging. Journal of Cognitive Neuroscience, 4, 352–74.
- Rajapakse J. C., Giedd J. N., Rapoport J. L. (1997). Statistical approach to segmentation of single-channel cerebral MR images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 16, 176–86.
- Rajarethinam N. C., Andreasen R., Cizadlo T., Arndt S., Swayze V. W., et al. (1996). Automatic atlas-based volume estimation of human brain regions from MR images. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 20, 98–106.
- Reddick W. E., Glass J. O., Cook E. N., Elkin T. D., Deaton R. J. (1997). Automated segmentation and classification of multispectral magnetic resonance images of brain using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 16, 911–18.
- Sahoo P. K., Soltani S., Wong A. K. C. (1988). A survey of thresholding techniques. *Computer Vision, Graphics & Image Processing*, 41, 233–60.
- Sandor S., Leahy R. (1997). Surface-based labeling of cortical anatomy using a deformable atlas. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 16, 41–54.

- Schalkoff R. J. (1992). *Pattern Recognition: Statistical, Structural and Neural Approaches*. New York: Wiley & Sons. pp. 364.
- Simmons A., Tofts P. S., Barker G. J., Arridge S. R. (1994). Sources of intensity nonuniformity in spin echo images at 1.5T. *Magnetic Resonance Medicine*, 32, 121–28.
- Skembris A.S., Koukoutsis E., Papaodysseus C., Kayafas E. (2013). Geometric Feature Extraction for Precise Measurements in Intramedullary Nail images. Proceedings of the 19th Symposium IMEKO TC 4 Symposium and 17th IWADC WorkshopAdvances in Instrumentation and Sensors Interoperability July 18-19, 2013, Barcelona, Spain (under review).
- Skjeldal, S., Backe, S., (1987). Interlocking medullary nails—radiation doses in distal targeting. *Archives of Orthopaedic Trauma Surgery*, 106, 179–181.
- Sled J. G., Pike G. B. (1998). Standing-waveand RF penetration artifacts caused by elliptic geometry: an electrodynamic analysis of MRI. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 17, 653–62.
- Sled J. G., Zijdenbos A. P., Evans A. C. (1998). A nonparametric method for automatic correction of intensity nonuniformity in MRI data. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 17, 87–97.
- Shapiro L. G., Stockman, G. C. 2001. Computer Vision. Prentice-Hall. ISBN 0-13-030796-3.
- Sijbers J., Scheunders P., Verhoye M., Van Der Linden A., Van Dyck D., et al. (1997). Watershed-based segmentation of 3D MR data for volume quantization. *Magnetic Resonance Imaging*, 15, 679–88.
- Singleton H. R., Pohost G. M. (1997). Automatic cardiac MR image segmentation using edge detection by tissue classification in pixel neighborhoods. *Magnetic Resonance Medicine*, 37, 418–24.
- Smith-Petersen M. N. (1931). Intracapsular fractures of the neck of the femur. Treatment by internal fixation. *Archives of Surgery*. 23, 715-59.
- Talairach J, Tournoux P. (1988). Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain. 3-Dimensional Proportional System: An Approach to Cerebral Imaging. Ger. Thieme, Stuttgart, pp. 122
- Taylor P. (1995). Invited review: computer aids for decision-making in diagnostic radiology—a literature review. *British Journal of Radiology*, 68, 945–57.

- Thompson P., Toga A. W. (1997). Detection, visualization and animation of abnormal anatomic structure with a probabilistic brain atlas based on random vector field transformations. *Medical Image Analysis*, 1, 271–94.
- Udupa J. K, Samarasekera S. (1996). Fuzzy connectedness and object definition: theory, algorithms and applications in image segmentation. Graphics Models in Image Processing 58(3), 246–61.
- Vaidyanathan M., Clarke L. P., Velthuizen R. P., Phuphanich S., Bensaid A. M., et al. (1995). Comparison of supervised MRI segmentation methods for tumor volume determination during therapy. *Magnetic Resonance Imaging*, 13, 719–28.
- Vannier M. W., Butterfield R. L., Jordan D., Murphy W. A., Levitt R. G., Gado M. (1985). Multispectral analysis of magnetic resonance images. *Radiology*, 154, 221–24.
- Viant W. J., Phillips R., Griffiths J. G., Mohsen A. M. M. A., Cain T. J., Karpinski M. R. K., Sherman K. P., (1995). A Computer Assisted Orthopaedic System for Distal Locking of Intramedullary Nails, *Proceedings of MediMEC*.
- Vilarino D. L., Brea V. M., Cabello D., Pardo J. M. (1998). Discrete-time CNN for image segmentation by active contours. *Pattern Recognition Letters*, 19, 721–34.
- Vincent L., Soille P. (1991). Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 13, 583–98.
- Whaites E., Cawson R. (2002). *Essentials of Dental Radiography and Radiology*. Elsevier Health Sciences. pp.15–20. ISBN 044307027X
- Wells W. M., Grimson W. E. L., Kikins R., Jolesz F. A. (1996). Adaptive segmentation of MRI data. IEEE Transactions on Medical Imaging, 15, 429–42.
- Worth A. J., Makris N., Caviness V. S., Kennedy D. N. (1997). Neuroanatomical segmentation in MRI: technological objectives. *International Journal of Pattern Recognition & Artificial Intelligence*, 11, 1161–87.
- Wust P., Gellermann J., Beier J., Wegner S., Tilly W., et al. (1998). Evaluation of segmentation algorithms for generation of patient models in radiofrequency hyperthermia. *Physics in Medicine & Biology*, 43, 3295–307.

- Xu C., Pham D. L., Prince J. L., Etemad M. E., Yu D. (1998). Reconstruction of the central layer of the human cerebral cortex from MR images. In *Proceedings of the 1st International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*, Cambridge, MA, pp. 482–88.
- Xu C., Prince J. L. (1998). Snakes, shapes, and gradient vector flow. *IEEE Transactions on Image Processing*, 7, 359–69.
- Yaniv Z., Joskowicz, L. (2005). Precise Robot-Assisted Guide Positioning for Distal Locking of Intramedullary Nails. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 24(5), 624-35.
- Zadeh L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control, 8, 338-53.
- Yao, J., Taylor, R. H., Goldberg, R. P., Kumar, R., Bzostek A., Van Vorhis, R., Kazanzides P., Gueziec A., (2000). A C-Arm Fluoroscopy-Guided Progressive Cut Refinement Strategy Using a Surgical Robot. Computer Aided Surgery, 5, 373–390.
- Zhang Y. J. (1996). A survey of evaluation methods for image segmentation. *Pattern Recognition Letters*, 29, 1335–46.
- Zijdenbos A. P, Dawant B. M. (1994). Brain segmentation and white matter lesion detection in MR images. *Critical Review of Biomedical Engineering*, 22, 401–65.

ПАРАРТНМА В.1

Απόδειξη ότι η μέγιστη και η ελάχιστη απόσταση των σημείων μίας έλλειψης με κέντρο το (0,0) από το κέντρο αυτό προκύπτουν όταν $x=\alpha$ και $y=\beta$, αντίστοιχα.

Θεωρούμε τις παραμετρικές εξισώσεις μίας έλλειψης με κέντρο το (0, 0) και εστίες πάνω στον άξονα $xx'(\alpha > \beta)$:

$$x(t) = \alpha \cos(\theta)$$

$$y(t) = \beta \cos(\theta)$$

Η απόσταση ενός τυχαίου σημείου M(x, y) από το Ο δίνεται από τη σχέση:

$$L = \sqrt{(x-0)^2 + (y-0)^2}$$

Λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζει η έλλειψη ως προς τους δύο άξονές της, χρειάζεται να εξετάσουμε μόνο το ένα τεταρτημόριο της για τοπικά σημεία καμπής. Επιλέγουμε το διάστημα $t \in [0, \pi/2]$, το οποίο αντιστοιχεί στο πάνω δεξιά τεταρτημόριο της έλλειψης. Στο διάστημα αυτό, η συνάρτηση της έλλειψης είναι 1-1, οπότε, για λόγους απλότητας, μπορούμε να εξετάσουμε τα σημεία καμπής της L^2 , τα οποία, προφανώς, θα προκύπτουν στα ίδια σημεία με τα σημεία καμπής της L. Η παράγωγος της L^2 ως προς t δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{d(L^2)}{dt} = \frac{\partial(L^2)}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial(L^2)}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt}$$

$$= 2x \cdot (-\alpha \sin(t)) + 2y \cdot (\beta \cos(t))$$

$$= -2\alpha^2 \sin(t)\cos(t) + 2\beta^2 \sin(t)\cos(t)$$

$$= (\beta^2 - \alpha^2) \sin(2t)$$

Στο διάστημα $[0, \pi/2]$ η ποσότητα αυτή μηδενίζεται μόνο όταν t = 0 και $t = \pi / 2$. Τα αντίστοιχα σημεία της συνάρτησης είναι τα $(\alpha, 0)$ και $(0, \beta)$, τα οποία είναι αντιστοιχούν, προφανώς, στη μέγιστη και στην ελάχιστη απόσταση της έλλειψης από την αρχή των αξόνων.