

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τίτλος διπλωματικής

Συγγραφέας:
Κωστινούδης Ευάγγελος

Επιβλέπων Καθηγητής:
Θεοχάρης Ιωάννης

Επιβλέπων Υποψήφιος Διδάκτορας:
Χαδουλός Χρήστος

Απρίλιος, 2021

Thesis Title in english

Author:
Kostinoudis Evangelos

Supervisor professor:
Theocharis Ioannis

Supervisor PhD Student:
Chadoulos Christos

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Θεοχάρη Ιωάννη και τον υποψήφιο διδάκτορα Χαδουλό Χρήστο για την καθοδήγηση, την βοήθεια και τις συμβουλές τους για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Οι εξελίξεις στη μυχανική μάθηση και συγκεκριμένα στην κατάτμηση εικόνων μέσω αυτής επιτρέπουν να λυθεί αυτόματα το πρόβλημα της κατάτμησης ιατρικών απεικονίσεων, το οποίο είναι χρονοβόρο και μπορεί να υλοποιηθεί μόνο από ειδικούς. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζονται τρεις μέθοδοι μυχανικής μάθησης κατάτμησης ιατρικών απεικονίσεων και συγκεκριμένα απεικονίσεων μαγνητικής τομογραφίας γονάτων. Οι ανατομικές δομές που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα οστά και οι χόνδροι. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν τόσο για την εκπαίδευση όσο για την αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων προέρχονται από το Osteoarthritis Initiative Zuse Institute Berlin. Το αποτέλεσμα των μεθόδων (συντελεστής ομοιότητας Dice) για ετικέτα των χόνδρων κυμαίνοταν μεταξύ 0.82-0.85 και για την ετικέτα των οστών γύρω στο 0.96.

Abstract

Recent developments in machine learning and in particular in image segmentation using machine learning allows the problem of medical image registration, which is time consuming and only implemented by experts, to be solved. In this diploma thesis, three medical image segmentaion methods are presented using machine learing and in particular magnetic resonance imaging images of knees. The anatomical structures used are bones and cartilage. The data used for both training and evaluation of the proposed methods come from the Osteoarthritis Initiative Zuse Institute Berlin. The result of the methods (Dice similarity coefficient) for the cartilage label ranged between 0.82-0.85 and for the bone label around at 0.96.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή	11
1.1 Διατύπωση του προβλήματος	11
1.1.1 Κατάτυπη βάση ατλάντων	11
1.1.2 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	11
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	13
2.1 Πλαίσιο συγχώνευσης κατηγοριών βασισμένο σε γράφους	13
2.2 Ελάχιστα απόλυτος τελεστής συρρίκνωσης και επιλογή	13
2.3 Καταχώρηση εικόνας	14
2.3.1 Μέση διαφορά τετραγώνων	15
2.3.2 Αλγόριθμος προσαρμοστικής στοχαστικής απότομης καθόδου	16
2.3.3 Αγχύγραμμος μετασχηματισμός (Affine transform)	17
2.3.4 Γραμμική παρεμβολή	19
2.3.5 Χώρος κλίμακας Gauss (Gaussian scale-space)	19
2.3.6 Δειγματοληψία συντεταγμένων εικόνας	20
2.3.7 Μάσκα εικόνας	21
2.4 Μέτρα αξιολόγησης	21
2.4.1 Συντελεστής ομοιότητας Dice	22
2.4.2 Δείκτης δομικής ομοιότητας	22
2.5 Προεπεξεργασία δεδομένων	24
2.5.1 Αντιστοίχιση ιστογράμματος	25
2.5.2 Απαλοιφή θορύβου εικόνας μέσω ροής της καμπυλότητας (curvature flow)	26
2.6 Διασταυρωμένη επικύρωση (Cross-validation)	26
2.6.1 Αφήνων ένα έξω διασταυρωμένη επικύρωση (Leave-one-out cross-validation)	27
3 Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος	28
3.1 Δεδομένα	28
3.2 Προεπεξεργασία δεδομένων	29
3.2.1 Απαλοιφή θορύβου εικόνας μέσω ροής της καμπυλότητας	29
3.2.2 Αντιστοίχιση ιστογράμματος	32
3.3 Καταχώρηση απεικονίσεων	34
3.4 Επιλογή ατλάντων	42
3.5 Μέθοδοι κατάτυπης	42
3.5.1 Μέθοδος 1: Αραιή μέθοδος βασισμένη σε τιμήματα .	43

3.5.2	Μέθοδος 2: Ταξινόμηση αραιής αναπαράστασης	45
3.5.3	Κατάτυπηση βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς	48
4	Πειράματα και αποτελέσματα	51
4.1	Τρόπος αξιολόγησης και σύγκρισης	51
4.2	Λεπτομέρειες υλοποίησης	51
4.3	Επιλογή παραμέτρων	51
4.3.1	Παραμετρος λ του ελάχιστα απόλυτου τελεστή συρρίκνωσης και επιλογής	52
4.3.2	Τμήμα αναζήτησης	56
4.3.3	Τμήμα χαρακτηριστικών	63
4.3.4	Αριθμός ατλάντων	69
4.4	Σύγκριση μεθόδων	75
4.4.1	Σύγκριση απόδοσης	75
4.4.2	Σύγκριση χρόνου εκτέλεσης	79
5	Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία	82
5.1	Συμπεράσματα	82
5.2	Μελλοντική εργασία	82
	Βιβλιογραφία	83

Κατάλογος σχημάτων

1	Μετατόπιση, περιστροφή, αλλαγή κλίμακας και στρέβλωση ενός τετραγώνου.	18
2	Χώρος κλίμακας Gauss για διάφορες τιμές του t	20
3	Γραμμικός μετασχηματισμός αντιστοίχισης ιστογράμματος μίας εικόνας για τέσσερα άκρα.	25
4	Τομή απεικόνισης γονάτου χωρίς και με την χρήση της απαλοιφής θορύβου μέσω ροής της καμπυλότητας.	30
5	Τομή απεικόνισης γονάτου χωρίς και με την χρήση της απαλοιφής θορύβου μέσω ροής της καμπυλότητας.	31
6	Τομή απεικόνισης γονάτου χωρίς και με την χρήση της απαλοιφής θορύβου μέσω ροής της καμπυλότητας.	32
7	Ιστογράμματα σταθερής απεικόνισης και κινούμενης προινής και μετά την αντιστοίχιση	33
8	Τομή απεικονίσεων σταθερή και κινούμενης εικόνας προινής και μετά την αντιστοίχιση ιστογράμματος.	34
9	Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.	36
10	Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.	37
11	Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.	38
12	Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.	39
13	Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.	40
14	Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.	41
15	Διάγραμμα ροής της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα (SPBM).	44
16	Διάγραμμα ροής της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης (SRC).	47
17	Μεταβολή της παραμέτρου λ της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα του παρασκευίου.	53
18	Μεταβολή της παραμέτρου λ της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα των οστών.	53
19	Μεταβολή της παραμέτρου λ της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα των χόνδρων.	54

20	Μεταβολή της παραμέτρου λ της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα του παρασκενίου.	55
21	Μεταβολή της παραμέτρου λ της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των οστών.	55
22	Μεταβολή της παραμέτρου λ της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των χόνδρων.	56
23	Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα του παρασκενίου.	57
24	Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα των οστών.	58
25	Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα των χόνδρων.	58
26	Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα του παρασκενίου.	59
27	Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των οστών.	60
28	Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των χόνδρων.	60
29	Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της μεθόδου κατάτυπησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα του παρασκενίου.	61
30	Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της μεθόδου κατάτυπησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των οστών.	62
31	Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της μεθόδου κατάτυπησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των χόνδρων.	62
32	Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα του παρασκενίου.	63
33	Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα των οστών.	64
34	Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα των χόνδρων.	64
35	Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα του παρασκενίου.	65
36	Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των οστών.	66

37	Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των χόνδρων.	66
38	Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου κατάτυπησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα του παρασκενίου.	67
39	Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου κατάτυπησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των οστών.	68
40	Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου κατάτυπησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των χόνδρων.	68
41	Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα του παρασκενίου.	69
42	Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα των οστών.	70
43	Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα των χόνδρων.	70
44	Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα του παρασκενίου.	71
45	Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των οστών.	72
46	Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των χόνδρων.	72
47	Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου κατάτυπησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα του παρασκενίου.	73
48	Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου κατάτυπησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των οστών.	74
49	Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου κατάτυπησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των χόνδρων.	74
50	Για όλες τις μεθόδους η τιμή του συντελεστή ομοιότητας Dice για την ετικέτα του παρασκενίου.	76
51	Για όλες τις μεθόδους η τιμή του συντελεστή ομοιότητας Dice για την ετικέτα των οστών.	76

52	Για όλες τις μεθόδους η τιμή του συντελεστή ομοιότητας Dice για την ετικέτα των χόνδρων.	77
53	Το χειρότερο (αριστερά), μέσο (μέση) και καλύτερο (δεξιά) αποτέλεσμα, βάση της ετικέτας των χόνδρων, για την αραιή μέθοδο βασισμένη σε τμήματα.	78
54	Το χειρότερο (αριστερά), μέσο (μέση) και καλύτερο (δεξιά) αποτέλεσμα, βάση της ετικέτας των χόνδρων, για τη μέθοδο ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης.	78
55	Το χειρότερο (αριστερά), μέσο (μέση) και καλύτερο (δεξιά) αποτέλεσμα, βάση της ετικέτας των χόνδρων, για τη μέθοδο κατάτμησης βασισμένης σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς.	79
56	Ο χρόνος εκτέλεσης της προεπεξεργασίας και της καταχώρησης των ατλάντων για όλες τις μεθόδους.	80
57	Ο χρόνος εκτέλεσης της κατάτμησης (χωρίς την προεπεξεργασία, την καταχώρηση, αξιολόγηση και αποθήκευση των αποτελεσμάτων) για όλες τις μεθόδους.	81
58	Ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης ολόκληρης της διαδικασίας της κατάτμησης για όλες τις μεθόδους.	81

Κατάλογος πινάκων

1	Χαρακτηριστικά δεδομένων OAI ZIB.	28
2	Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή της παραμέτρου λ.	52
3	Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος αναζήτησης της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα.	56
4	Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος αναζήτησης της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης.	59
5	Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος αναζήτησης για τη μέθοδο κατάτμησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς.	61
6	Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος χαρακτηριστικών της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα.	63
7	Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης.	65
8	Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος χαρακτηριστικών για τη μέθοδο κατάτμησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς.	67
9	Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του αριθμού των ατλάντων της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα.	69
10	Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης.	71
11	Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του αριθμού των ατλάντων για τη μέθοδο κατάτμησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορία από ειδικούς.	73
12	Μέσος όρος και διάμεσος του συντελεστή ομοιότητας Dice για όλες τις μεθόδους και ετικέτες.	77

1 Εισαγωγή

1.1 Διατύπωση του προβλήματος

Η κατάτυπηση είναι η διαδικασία διαμέρισης μίας εικόνας σε διάφορα ουσιαστικά τμήματα. Σκοπός της κατάτυπησης είναι η απλοποίηση ή/και η αλλαγή της αναπαράστασης της εικόνας σε κάτι που είναι πιο σημασιολογικά σημαντικό και είναι πιο εύκολο να αναλυθεί. Πιο συγκεκριμένα, η κατάτυπηση εικόνας είναι η διαδικασία ανάθεσης μίας ετικέτας σε κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας έτσι ώστε τα εικονοστοιχεία με την ίδια ετικέτα να έχουν ίδια χαρακτηριστικά.

Στην ιατρική απεικόνιση αυτά τα τμήματα αντιστοιχούν συχνά σε διαφορετικές κατηγορίες ιστών, οργάνων, παθολογίες ή άλλες βιολογικά σχετιζόμενες δομές. Η αυτοματοποιημένη κατάτυπηση ιατρικών απεικονίσεων μπορεί να βοηθήσει τους γιατρούς επιταχύνοντας τη διαδικασία διάγνωσης. Η καθημερινή δημιουργία πληθώρας ιατρικών απεικονίσεων καθιστά τη χειροκίνητη κατάτυπηση από ειδικούς όλο και δυσκολότερη, λόγο του χρονικού διαστήματος που χρειάζεται η ανάλυση. Επομένως, η ανάπτυξη αξιόπιστων, σταθερών και ακριβών τεχνικών για την αυτοματοποιημένη κατάτυπηση ιατρικών απεικονίσεων αποτελεί μία σημαντική πρόκληση.

1.1.1 Κατάτυπηση βάση ατλάντων

Η κατάτυπηση απεικονίσεων βάση ατλάντων αποτελεί την διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιούνται απεικονίσεις που έχουν κατανευθεί από κάποιον ειδικό, ούτως ώστε να επιτευχθεί η κατάτυπηση της νέας απεικόνισης. Οι μέθοδοι αυτοί συνήθως απαιτούν την χρήση καταχώρησης εικόνας (image registration) με σκοπό την ευθυγράμμιση του ή των ατλάντων στην εικόνα-απεικόνιση που πρόκειται να κατανευθεί [1].

1.1.2 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Στην διπλωματική εργασία εφαρμόστηκαν μέθοδοι κατάτυπησης ιατρικών απεικονίσεων βάση ατλάντων με χρήση υπχανικής μάθησης [2] [3] [4]. Οι απεικονίσεις αφορούν μαγνητικές τομογραφίες σε γόνατα και

οι περιοχές κατάτμησης αποτελούνται από τους αρθρικούς χόνδρους και τα οστά. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το Osteoarthritis Initiative Zuse Institute Berlin (OAI ZIB). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατάτμηση περιοχών του εγκεφάλου.

2 Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Πλαίσιο συγχώνευσης κατηγοριών βασισμένο σε γράφους

Το πλαίσιο συγχώνευσης κατηγοριών βασισμένο σε γράφους (Graph-Based Framework for Label Fusion) προτάθηκε από το [2] ως μία μέθοδος μέσω της οποίας μπορούν να παραχθούν πολλές υπάρχουσες μέθοδοι συγχώνευσης κατηγοριών.

Έστω το ζεύγος $\{(I_i, L_i), i = 1, \dots, n\}$ όπου I_i είναι η απεικόνιση ενός άτλαντα, L_i ο χάρτης των κατηγοριών της αντίστοιχης απεικόνισης και n το σύνολο των άτλαντων. Δοθείσας μία απεικόνιση I , δημιουργείται ο σταθμισμένος γράφος G_i μεταξύ των εικονοστοιχείων x της δοθείσας εικόνας I και του εικονοστοιχείου y της απεικόνισης του άτλαντα I_i , μαζί με τα αντίστοιχα βάροντα $w_i(x, y)$, για $(x, y) \in \Omega^2$, όπου Ω ο χώρος των απεικονίσεων. Με τη δημιουργία των βαρών του γράφου, η συγχώνευση των κατηγοριών γίνεται για κάθε x της απεικόνισης εισόδου I σύμφωνα με το τύπο:

$$L(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{y \in \Omega} w_i(\mathbf{x}, y) L_i(y)}{\sum_{i=1}^n \sum_{y \in \Omega} w_i(\mathbf{x}, y)}, \forall \mathbf{x} \in \Omega \quad (1)$$

L είναι ο χάρτης των κατηγοριών της απεικόνισης εισόδου I .

2.2 Ελάχιστα απόλυτος τελεστής συρρίκνωσης και επιλογή

Ο ελάχιστα απόλυτος τελεστής συρρίκνωσης και επιλογής (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator, Lasso) [5] είναι μία μέθοδος παλινδρόμησης. Παλινδρόμηση είναι η μέθοδος πρόβλεψης της συμπεριφοράς μίας μεταβλητής βασισμένη σε μία ή περισσότερες άλλες μεταβλητές. Έστω οι παρατηρήσεις $(\mathbf{x}_i, y_i), i = 1, \dots, N$, όπου $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})$ οι p μεταβλητές εισόδου και y_i η μεταβλητή εισόδου για την i -οστή παρατηρηση. Αν $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p)^T$ και $\hat{\alpha}$ τα αποτέλεσματα της παλινδρόμησης (συντελεστές παλινδρόμησης) τότε ο τελεστής ορίζεται ως:

$$(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{i=1}^N \left(y_i - \alpha - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} \right)^2 \right\} \text{ subject to } \sum_{j=1}^p |\beta_j| \leq t \quad (2)$$

Το $t \geq 0$ είναι παράμετρος συντονισμού. Για κάθε τιμή του t η λύση για το α είναι $\hat{\alpha} = \bar{y}$ (όπου \bar{y} είναι η μέση τιμή του y). Επίσης μπορούμε να υποθέσουμε χωρίς την απώλεια της γενίκευσης ότι $\hat{\alpha} = 0$ ώστε να εξαλειφθεί το α . Έστω $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N)^T$ και $y = (y_1, \dots, y_N)^T$ τότε η (2) μπορεί να γραφτεί ως:

$$\hat{\beta} = \operatorname{argmin} \left\{ \frac{1}{N} \|(\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta)\|_2^2 \right\} \text{ subject to } \|\beta\|_1 \leq t \quad (3)$$

Όπου η p -οστή νόρμα του $x = (x_1, \dots, x_n)$ ορίζεται ως:

$$\|x\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{1/p}$$

Η εξίσωση (3) μπορεί να γραφτεί επίσης με την χρήση του πολλαπλασιαστή Lagrange ως:

$$\hat{\beta} = \operatorname{argmin} \left\{ \frac{1}{N} \|(\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta)\|_2^2 + \lambda \|\beta\|_1 \right\} \quad (4)$$

Πολλές φορές οι στήλες του \mathbf{X} κανονικοποιούνται, δηλαδή ισχύει:

$$\sum_{j=1}^p \frac{x_{ij}}{N} = 0, \quad \sum_{j=1}^p \frac{x_{ij}^2}{N} = 1$$

2.3 Καταχώρηση εικόνας

Καταχώρηση εικόνας (image registration) είναι η διαδικασία μετασχηματισμού διαφορετικών δεδομένων σε ένα σύστημα συντεταγμένων. Η διαδικασία αυτή επιδιώκει μέσω του μετασχηματισμού αυτού, την επικάλυψη των κοινών χαρακτηριστικών των δεδομένων. Τα δεδομένα

μπορεί να είναι πολλαπλές φωτογραφίες, δεδομένα από διαφορετικούς αισθητήρες, ώρες, βάθη και οπτικές [6]. Στις ιατρικές απεικονίσεις επιδιώκεται μέσω του μετασχηματισμού, αντίστοιχα εικονοστοιχεία των απεικονίσεων να αναπαριστούν όμοια βιολογικά σημεία.

Συνήθως στις μεθόδους καταχώρησης εικόνας η μία εικόνα παραμένει σταθερή κατά την διαδικασία της καταχώρησης και η άλλη-άλλες μετασχηματίζονται. Η εικόνα που παραμένει σταθερή αποκαλείται εικόνα αναφοράς ή απλά σταθερή εικόνα. Οι εικόνες που μετασχηματίζονται ονομάζονται εικόνες καταχώρισης ή κινούμενες εικόνες.

Η βασική διαδικασία της καταχώρησης εικόνας αποτελείται από την ανίχνευση χαρακτηριστικών, την ευθυγράμμιση χαρακτηριστικών από την κινούμενη εικόνα στην σταθερή, εκτίμηση παραμέτρων συναρτήσεων χαρτογράφησης, την δειγματοληψία και τον μετασχηματισμό εικόνας. Οι μέθοδοι καταχώρισης εικόνας είναι μοναδικές για κάθε πρόβλημα και δεν υπάρχει κοινή τεχνική καταχώρισης εικόνας που να είναι ισάξια αποτελεσματική σε κάθε πρόβλημα που εφαρμόζεται [7]. Για παράδειγμα υπάρχουν μέθοδοι που βασίζονται στην ένταση των εικόνων και μέθοδοι που βασίζονται σε χαρακτηριστικά τους.

2.3.1 Μέση διαφορά τετραγώνων

Στην οικογένεια των μεθόδων που βασίζονται στην ένταση των εικόνων, η μέτρηση της ομοιότητας μεταξύ της κινούμενης και της σταθερής εικόνας αποτελεί ένα δομικό στοιχείο της καταχώρησης εικόνας. Η μέτρηση αυτή αξιολογεί την καταλληλότητα του μετασχηματισμού και χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η παράγωγος της αξιολόγησης, ούτως ώστε να χρησιμοποιηθούν από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Η επιλογή της μετρικής βασίζεται στο εκάστοτε πρόβλημα που επιχειρεί να λύσει

Η μέση διαφορά τετραγώνων υπολογίζει τον μέσο όρο των τετραγώνων της διαφορά της έντασης για κάθε εικονοστοιχείο μεταξύ της σταθερής και της κινούμενης εικόνας. Η μετρική αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι η ένταση όμοιων σημείων είναι η ίδια και στις δύο εικόνες και έχει την ίδια κατανομή και στις δύο εικόνες. Αυτό σημαίνει ότι και οι δύο εικόνες έχουν την ίδια μορφή.

Η μέση διαφορά τετραγώνων ορίζεται ως:

$$MSSD(I_F, I_M) = \frac{1}{|\Omega_F|} \sum_{\mathbf{x}_i \in \Omega_F} (I_F(\mathbf{x}_i) - I_M(\mathbf{T}(\mathbf{x}_i)))^2$$

Όπου I_F η σταθερή εικόνα, I_M η κινούμενη εικόνα, \mathbf{T} ο μετασχηματισμός της διαδικασίας της καταχώρησης, $\Omega_F \subset \mathbb{R}^D \mapsto \mathbb{R}$ το πεδίο ορισμού της σταθερής εικόνα και $|\Omega_F|$ ο αριθμός των εικονοστοιχείων της σταθερής εικόνας.

2.3.2 Αλγόριθμος προσαρμοστικής στοχαστικής απότομης καθόδου

Ο Αλγόριθμος προσαρμοστικής στοχαστικής απότομης καθόδου (Adaptive Stochastic Gradient Descent, ASGD) [8] είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιείται ώστε να υπολογιστούν οι βέλτιστες παραμετρούς του μετασχηματισμού. Χρησιμοποιεί μία επαναληπτική διαδικασία ώστε να υπολογίσει τις βέλτιστες παραμέτρους.

Έστω $F(x) : \Omega_F \subset \mathbb{R}^D \mapsto \mathbb{R}$ η σταθερή εικόνα, $M(x) : \Omega_M \subset \mathbb{R}^D \mapsto \mathbb{R}$ η κινούμενη εικόνα και $\mathbf{T}(x, \mu) : \Omega_F \times \mathbb{R}^P \mapsto \Omega_M$ παραμετροποιημένος μετασχηματισμός συντεταγμένων, όπου $\mu \in \mathbb{R}^P$ αναπαριστά το διάνυσμα των παραμέτρων του μετασχηματισμού. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι:

$$\hat{\mu} = \underset{\mu}{\operatorname{argmin}} \mathcal{C}(F, M \circ \mathbf{T})$$

Όπου \mathcal{C} είναι μία συνάρτηση αξιολόγησης (όπως η μέση διαφορά τετραγώνων 2.3.1). Η $\hat{\mu}$ είναι η παραμετρος που ελαχιστοποιεί την συνάρτηση κόστους, επομένως μπορούμε να γράψουμε την συνάρτηση αυτή $\mathcal{C}(\mu) \equiv \mathcal{C}(F, M \circ \mathbf{T})$.

Ο Αλγόριθμος προσαρμοστικής στοχαστικής απότομης καθόδου οπότε ορίζεται ως:

$$\begin{aligned} \mu_{k+1} &= \mu_k - \gamma(t_k) \tilde{\mathbf{g}}_k, \quad k = 0, 1, \dots, K \\ t_{k+1} &= [t_k + f(-\tilde{\mathbf{g}}_k^T \tilde{\mathbf{g}}_{k-1})]^+ \end{aligned}$$

Όπου $[x]^+$ σημαίνει $\max(x, 0)$, f είναι μία σιγμοειδής συνάρτηση και μ_0 , t_0 και t_1 είναι ορίσματα του αλγορίθμου. \tilde{g}_k είναι προσέγγιση της παραγώγου $g \equiv \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mu}$ στο μ_k . Επίσης ο βαθμωτός συντελεστής κέρδους γ_k ορίζεται από την συνάρτηση απόσβεσης:

$$\gamma_k \equiv \gamma(k) = \frac{a}{(k + A)^a}$$

Όπου $0 < a \leq 1$ και A σταθερά ορίσματα του αλγορίθμου.

Στον αλγόριθμο αυτό, η μεταβλητή του "χρόνου" t_k εξαρτάται από το εσωτερικό γινόμενο της παραγώγου \tilde{g}_k και της προηγούμενης παραγώγου \tilde{g}_{k-1} . Αν οι παράγωγοι αυτοί σε δύο συνεχόμενα βήματα του αλγορίθμου έχουν την ίδια κατεύθυνση, τότε το εσωτερικό τους γινόμενο θα είναι θετικό. Οπότε ο "χρόνος" θα μειωθεί, που οδηγεί σε μεγάλο βήμα $\gamma(t_{k+1})$ επειδή η γ είναι γνωσίων φθίνουσα συνάρτηση. Με αυτό τον τρόπο ο αλγόριθμος της προσαρμοστικής στοχαστικής απότομης καθόδου υλοποιεί τον μπχανισμό της προσαρμοστικού βήματος.

2.3.3 Αγχίγραμμος μετασχηματισμός (Affine transform)

Ο μετασχηματισμός που θα χρησιμοποιηθεί για την διαδικασία της κατάτμησης καθορίζει το τι θεωρείται επιτυχία. Ο μετασχηματισμός αντικατοπτρίζει τον επιθυμητό τύπο μετασχηματισμού και περιορίζει τον χώρο λύσης σε αυτόν τον τύπο παραμόρφωσης.

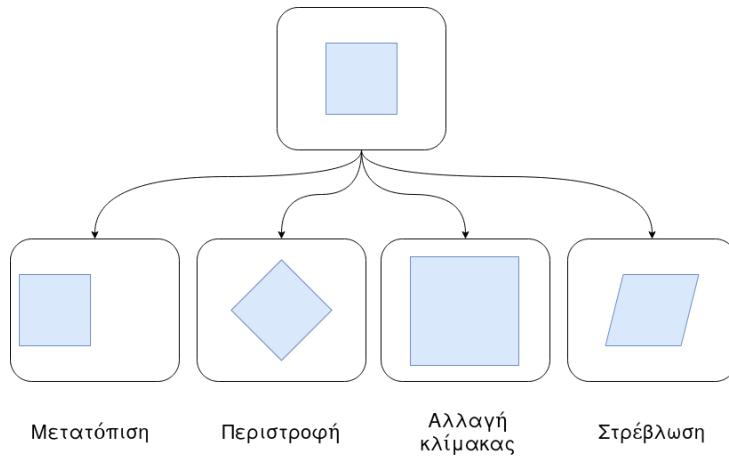
Ο βαθμός ελευθερίας του μετασχηματισμού είναι ίσος με τον αριθμό των παραμέτρων του. Με άλλα λόγια, ο βαθμός ελευθερίας του μετασχηματισμού είναι ίσος με τη διάσταση του χώρου αναζήτησης. Επίσης είναι ανάλογος με την υπολογιστική πολυπλοκότητα του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Ο αγχίγραμμος μετασχηματισμός (Affine transform) είναι ένας γεωμετρικός μετασχηματισμός που διατηρεί τις γραμμές και τον παραλληλισμό (αλλά όχι απαραίτητα αποστάσεις και γωνίες). Οι ιδιότητες του μετασχηματισμού είναι:

1. Διατηρεί τις ευθείες και τον λόγο αυτών.
2. Διατηρεί τον παραλληλισμό: δύο ή περισσότερες ευθείες που είναι παράλληλες μεταξύ τους, συνεχίζουν να είναι παράλληλες μετά τον μετασχηματισμό.

3. Διατηρεί ισομετρίες μέσω μεταφορών.
4. Διατηρεί την κυρτότητα συνόλων: ένα κυρτό σετ συνεχίζει να είναι κυρτό μετά τον μετασχηματισμό. Επιπλέον, τα ακραία σημεία του αρχικού σετ αντιστοιχίζονται στα ακραία σημεία του μετασχηματισμένου σετ.

Ο αγχίγραμμος μετασχηματισμός πραγματοποιεί μετατόπιση, περιστροφή, αλλαγή κλίμακας και στρέβλωση.



Σχήμα 1: Μετατόπιση, περιστροφή, αλλαγή κλίμακας και στρέβλωση ενός τετραγώνου.

Έστω $F(x) : \Omega_F \subset \mathbb{R}^D \mapsto \mathbb{R}$ η σταθερή εικόνα, $M(x) : \Omega_M \subset \mathbb{R}^D \mapsto \mathbb{R}$ η κινούμενη εικόνα και $T_\mu(x) : \Omega_F \times \mathbb{R}^P \mapsto \Omega_M$ παραμετροποιημένος μετασχηματισμός συντεταγμένων, όπου $\mu \in \mathbb{R}^P$ αναπαριστά το διάνυσμα των παραμέτρων του μετασχηματισμού. Επίσης P είναι ο βαθμός ελευθερίας του μετασχηματισμού.

Ο αγχίγραμμος μετασχηματισμός ορίζεται ως:

$$T_\mu(x) = A(x - c) + t + c$$

Όπου t είναι το διάνυσμα μετατόπισης και c το κέντρο περιστροφής. Επίσης, ο πίνακας A πραγματοποιεί την περιστροφή, αλλαγή κλίμακας και στρέβλωση. Το διάνυσμα παραμέτρων μ θα αποτελείται από τα στοιχεία a_{ij} του πίνακα A και το διάνυσμα μετατόπισης t . Στις δύο διαστάσεις ο μετασχηματισμός έχει έξι βαθμούς ελευθερίας, ενώ στις τρεις έχει δώδεκα.

2.3.4 Γραμμική παρεμβολή

Κατά την διαδικασία του υπολογισμού της μετρικής αξιολόγησης της κατάτμησης (όπως στη 2.3.1), συγκρίνονται οι τιμές των αντίστοιχων σημείων της σταθερής εικόνας και των μετασχηματισμένων της κινούμενης. Αυτά τα μετασχηματισμένα σημεία της κινούμενης εικόνας μπορεί να μην ανήκουν στο πλέγμα της εικόνας. Γι' αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητη η παρεμβολή των σημείων αυτών.

Η γραμμική παρεμβολή υπολογίζει τον σταθμισμένο μέσο όρο των γειτονικών εικονοστοιχείων, χρησιμοποιώντας την απόσταση ως το βάρος.

2.3.5 Χώρος κλίμακας Gauss (Gaussian scale-space)

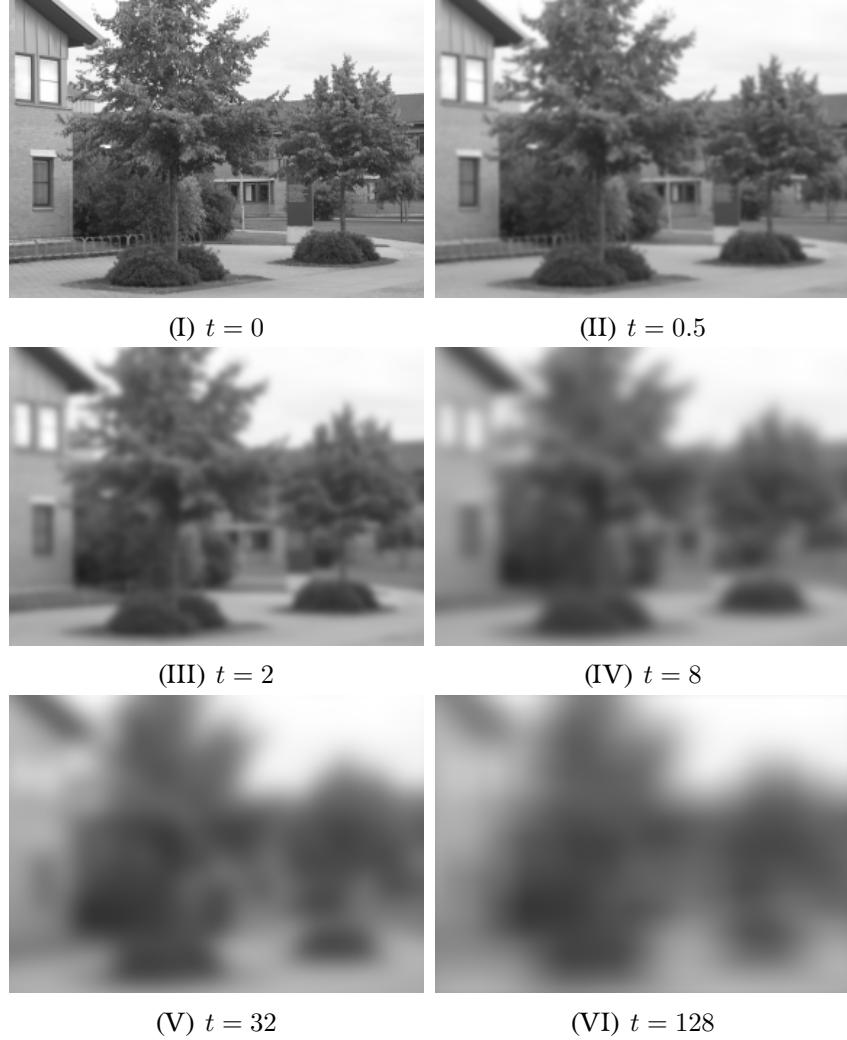
Ένα πρόβλημα που συναντάται όσο αυξάνεται ο χώρος αναζήτησης της κατάτμησης, είναι ότι υπάρχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να καταλήξει η βελτιστοποίηση σε κάποιο τοπικό ελάχιστο, με αποτέλεσμα να μην είναι καλό το αποτέλεσμα της. Ένας τρόπος να αυξηθεί η πιθανότητα να βρεθεί το ολικό ελάχιστο είναι να χρησιμοποιηθεί μία ιεραρχική διαδικασία κατά την οποία η πληροφορία των εικόνων θα αυξάνεται από τα αρχικά προς τα τελικά στάδια.

Ο χώρος κλίμακας Gauss (Gaussian scale-space) είναι ένας τρόπος να επιτευχθεί το παραπάνω αποτέλεσμα [9]. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τον πυρήνα Gauss για να μειώσει την πληροφορία μίας εικόνας. Ο πυρήνας Gauss ορίζεται για τρεις διαστάσεις ως:

$$g(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi t} e^{-\frac{(x^2+y^2+z^2)}{t}} \quad (5)$$

Όπου $\sqrt{2t}$ είναι η τυπική απόκλιση του πυρήνα και t το επίπεδο του χώρου κλίμακας. Ο πυρήνας αυτός συνελίσεται με μία εικόνα ώστε να μειωθεί η πληροφορία της. Αυτό γίνεται σε πολλαπλά ιεραρχικά στάδια, στα οποία αρχικά η τιμή του t είναι μεγάλη και μειώνεται σε κάθε στάδιο. Ιδανικά με αυτήν την μέθοδο, οι εικόνες θα έχουν ένα ελάχιστο στο αρχικό ιεραρχικό επίπεδο, το οποίο θα είναι κοντά στο επιθυμητό ολικό ελάχιστο. Επειτα σε κάθε στάδιο αφού αυξάνεται η πληροφορία, το ελάχιστο ιδανικά θα τείνει όλο και πιο κοντά στο ολικό.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η ίδια εικόνα για διάφορες τιμές του t . Από το σχήμα αυτό, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή του t τόσο μειώνεται και η πληροφορία στην εικόνα.



Σχήμα 2: Χώρος κλίμακας Gauss για διάφορες τιμές του t .

2.3.6 Δειγματοληψία συντεταγμένων εικόνας

Κατά την διαδικασία της αξιολόγησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διαδικασία της δειγματοληψίας συντεταγμένων εικόνας ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάζεται για την αξιολόγηση. Στην διαδικασία αυτή επιλέγονται τυχαίες συντεταγμένες (σημεία στον χώρο της

εικόνας) με ομοιόμορφη κατανομή, ώστε να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση. Μέσω παρεμβολής των συντεταγμένων αυτών δημιουργείται η νέα δειγματοληπτημένη εικόνα.

2.3.7 Μάσκα εικόνας

Αν μία εικόνα (είτε σταθερή, είτε κινούμενη) έχει περιοχές στις οποίες δεν υπάρχουν χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία μάσκα εικόνας, ώστε μην να συμπεριληφθούν οι περιοχές αυτές στην διαδικασία της κατάτυπσης. Η μάσκα εικόνας είναι μία δυαδική εικόνα, η οποία υποδεικνύει εάν ένα εικονοστοιχείο θα συμπεριληφθεί στην διαδικασία της κατάτυπσης. Το μέγεθος της μάσκας είναι ίδιο με το μέγεθος της εικόνας που θα εφαρμοστεί, ώστε να υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ των εικονοστοιχείων της εικόνας και των εικονοστοιχείων της μάσκας. Επομένως, κάθε εικονοστοιχείο της μάσκας δηλώνει εάν το αντίστοιχο εικονοστοιχείο της εικόνας θα χρησιμοποιηθεί στην κατάτυπση.

2.4 Μέτρα αξιολόγησης

Τα μέτρα αξιολόγησης χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν το αποτέλεσμα της κατάτυπσης. Συγκρίνουν το αποτέλεσμα της κατάτυπσης με το επιθυμητό αποτέλεσμα, ούτως ώστε να παράξουν μία αριθμητική αναπαράσταση της ποιότητας της κατάτυπσης. Με αυτόν το τρόπο μπορούν να συγκριθούν διαφορετικοί αλγόριθμοι κατάτυπσης και διαφορετικές τιμές για τον ίδιο αλγόριθμο.

Η επιλογή του μέτρου ή των μέτρων αξιολόγησης έχει μεγάλη σημασία για την δημιουργία και τον συντονισμό (επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών) του μοντέλου επειδή, είναι το μέτρο που θα χρησιμοποιηθεί για την επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου. Η επιλογή αυτή ταυτίζεται με την επιθυμητή συμπεριφορά του τελικού μοντέλου. Για παράδειγμα, αν το επιθυμητό μοντέλο πρέπει να έχει όσο είναι δυνατόν πιο λίγα αληθή αρνητικά, τότε πρέπει να επιλεχθεί και το ανάλογο μέτρο αξιολόγησης που να ικανοποιεί τον περιορισμό αυτό.

2.4.1 Συντελεστής ομοιότητας Dice

Ο συντελεστής ομοιότητας Dice είναι μία μετρική που εκτιμά την ομοιότητα μεταξύ δύο συνόλων [10]. Είναι γνωστός επίσης και ως δείκτης Sørensen–Dice, συντελεστής Dice και F1 σκορ. Ο συντελεστής ομοιότητας Dice ορίζεται ως:

$$DSC = \frac{2|X \cap Y|}{|X| + |Y|} \quad (6)$$

Όπου X και Y είναι σύνολα, $|x|$ είναι ο αριθμός των στοιχείων του συνόλου x και \cap δηλώνει την τομή δύο συνόλων.

Στην αξιολόγηση της κατάτμησης εικόνας τα παραπάνω σύνολα αποτελούνται από το σύνολο των εικονοστοιχείων που ανήκουν σε μία κλάση. Επομένως ο συντελεστής αυτός υπολογίζει το ποσοστό των σημείων μίας κλάσης που επικαλύπτονται. Η μέγιστη τιμή του συντελεστή είναι 1 και η ελάχιστη 0.

2.4.2 Δείκτης δομικής ομοιότητας

Ο δείκτης δομικής ομοιότητας [11] (Structural SIMilarity index, SSIM) είναι μία μετρική της ομοιότητας δύο εικόνων. Χρησιμοποιεί τις σύγκρισεις της φωτεινότητας, της αντίθεσης και της δομής των εικόνων. Κατά την δημιουργία μίας εικόνας η φωτεινότητα των αντικειμένων της εικόνας εξαρτάται από τον φωτισμό και την ανακλαστικότητα των αντικειμένων αυτών, αλλά και από την δομή τους. Γι' αυτό τον λόγο είναι επιθυμητό να διαχωριστεί η επίδραση της φωτεινότητας έτσι ώστε η δομή να είναι ανεξάρτητη από την φωτεινότητα. Επομένως μπορεί να οριστεί η δομική πληροφορία της εικόνας ως τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων της που είναι ανεξάρτητα από την φωτεινότητα και την αντίθεση.

Η φωτεινότητα ενός σήματος ορίζεται ως:

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (7)$$

Όπου x είναι το σήμα και N ο αριθμός των στοιχείων του. Αν οι τιμές των εικονοστοιχείων μίας εικόνας τοποθετηθούν σε ένα διάνυσμα

τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος (7) για τον υπολογισμό της φωτεινότητας αλλά και των παρακάτω τύπων. Για να αφαιρεθεί η επίδραση της φωτεινότητας στο σήμα θα πρέπει να ισχύει:

$$\sum_{i=1}^N x_i = 0$$

Η αντίθεση της σήματος-εικόνας εκτιμάτε με την διακύμανση του σήματος:

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \right)}$$

Για να αφαιρεθεί και η επίδραση της αντίθεσης θα πρέπει να κανονικοποιηθεί το σήμα, δηλαδή να διαιρεθεί με την διακύμανση του ώστε να έχει μοναδιαία διακύμανση. Επομένως

$$\hat{x} = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x}$$

Όπου \hat{x} είναι το κανονικοποιημένο σήμα. Η σύγκριση της φωτεινότητας δύο εικόνων x και y ορίζεται ως:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (8)$$

Η σταθερά C_1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποφευχθεί υπολογιστική αστάθεια για μικρές τιμές του παρανομαστή. Η σύγκριση της αντίθεσης ορίζεται ως:

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (9)$$

Όπου η σταθερά C_2 χρησιμοποιείται επίσης για την υπολογιστική σταθερότητα. Επειδή η συσχέτιση των κανονικοποιημένων σημάτων \hat{x} και \hat{y} είναι ίδια με την συσχέτιση των μη κανονικοποιημένων σημάτων, μπορεί να οριστεί η σύγκριση της δομής (που είναι ανεξάρτητη από την φωτεινότητα και την αντίθεση) ως:

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x \sigma_y + C_3} \quad (10)$$

Όπου η σταθερά C_3 χρησιμοποιείται επίσης για την υπολογιστική σταθερότητα και σ_{xy} είναι η συνδιακύμανση των σημάτων και ορίζεται ως:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$$

Τέλος, χρησιμοποιώντας τις συγκρίσεις της φωτεινότητας, της αντίθεσης και της δομής ((8), (9) και (10) αντίστοιχα), ο τύπος του δείκτης δομικής ομοιότητας ορίζεται ως:

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (11)$$

Οι τιμές α , β και γ χρησιμοποιούνται για να ορίσουν την επίδραση κάθε σύγκρισης.

2.5 Προεπεξεργασία δεδομένων

Η προεπεξεργασία των δεδομένων αποτελεί ένα από τα πιο βασικά βήματα της μηχανικής μάθησης. Σε αυτό το βήμα τα δεδομένα αναλύονται και επεξεργάζονται ούτως ώστε η διαδικασία της μάθησης να είναι πιο αποτελεσματική. Αν τα δεδομένα περιέχουν περιττές και ασυσχέτιστες πληροφορίες για το πρόβλημα που χρησιμοποιούνται, τότε δυσκολεύονται την διαδικασία της μάθησης. Το ίδιο ισχύει και για αφερέγγυα και θορυβώδη δεδομένα. Επίσης στην προεπεξεργασία μπορεί να αυξηθεί η σημαντικότητα μερικών χαρακτηριστικών των δεδομένων.

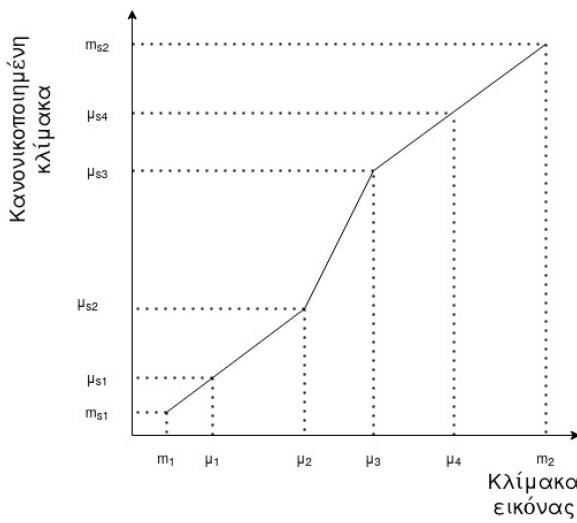
Στη περίπτωση όπου τα δεδομένα αποτελούνται από εικόνες-απεικονίσεις, σκοπός της προεπεξεργασίας είναι να παραχθεί μία νέα εικόνα-απεικόνιση που θα έχει καλύτερα αποτελέσματα στην μάθηση από αυτά της αρχικής. Πιο αναλυτικά, σκοπεύει στην εξάλειψη της αθέμιτης διαστρέβλωσης των εικόνων, στην αύξηση της σημαντικότητας μερικών χαρακτηριστικών τους και στον γεωμετρικός μετασχηματισμό τους [12].

2.5.1 Αντιστοίχιση ιστογράμματος

Η αντιστοίχιση ιστογράμματος (histogram matching) είναι ένας μετασχηματισμός της εικόνας κατά τον οποίο το ιστόγραμμα της εικόνας αντιστοιχίζεται με ένα άλλο ιστόγραμμα το οποίο μπορεί να προέρχεται από άλλη εικόνα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους αλγόριθμους. Ο αλγόριθμος που θα παρουσιαστεί περιγραφικά παρακάτω βασίζεται στο [13].

Ο αλγόριθμος πραγματοποιεί γραμμικούς μετασχηματισμούς για διάφορα τιμήματα του ιστογράμματος των εικόνων. Αρχικά υπολογίζεται τα τιμήματα αυτά μέσω προκαθορισμένων τιμών της συνάρτησης αθροιστικής κατανομής. Έπειτα υπολογίζεται για κάθε άκρο τον μέσο όρο των αντίστοιχων τιμών. Τέλος μετασχηματίζεται γραμμικά τις τιμές κάθε εικόνας, για κάθε διάστημα, από το αρχικό διάστημα της εικόνας, στο τελικό διάστημα που υπολογίστηκε με τον μέσο όρο.

Στο Σχήμα 3 φαίνεται η διαδικασία τους γραμμικού μετασχηματισμού μίας εικόνας. Οι τιμές της εικόνας μετασχηματίζονται γραμμικά από τον οριζόντιο άξονα στον κάθετο. Στο παραδειγμα αυτό υπάρχουν τέσσερα διαστήματα, όπου $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ είναι τα άκρα του αρχικού διαστήματος και $m_{s1}, m_{s2}, m_{s3}, m_{s4}$ τα άκρα του τελικού. m_1, m_2 είναι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή αντίστοιχα της εικόνας και m_{s1}, m_{s2} ίδια άκρα για το αποτέλεσμα της αντιστοίχισης ιστογράμματος.



Σχήμα 3: Γραμμικός μετασχηματισμός αντιστοίχισης ιστογράμματος μίας εικόνας για τέσσερα άκρα.

2.5.2 Απαλοιφή θιρύβου εικόνας μέσω ροής της καμπυλότητας (curvature flow)

Η ροή της καμπυλότητας (curvature flow) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απαλοιφή του θιρύβου. Συγκεκριμένα, σε μία μία εικόνα χρησιμοποιούνται οι καμπύλες που σχηματίζονται από τα εικονοστοιχεία που έχουν την ίδια τιμή (φωτεινότητα εικονοστοιχείου). Οι καμπύλες αυτές εξελίσσονται [14] μέσω της μερικής διαφορικής εξίσωσης:

$$I_t = \kappa |\nabla I| \quad (12)$$

Όπου I είναι η εικόνα και κ η καμπυλότητα. Η καμπυλότητα μίας καμπύλης γ ορίζεται ως:

$$\kappa = \frac{\|\gamma' \times \gamma''\|}{\|\gamma'\|^3}$$

Όπου το σύμβολο x' δηλώνει την παράγωγο της συνάρτησης x ως προς τον χρόνο. Επίσης $\|v\|$ είναι η ευκλείδεια νόμημα του διανύσματος v .

Αυτή η τεχνική για την απαλοιφή του θιρύβου έχει το πλεονέκτημα ότι διατηρεί τα αιχμηρά όρια της εικόνας ενώ ταυτόχρονα εξομαλύνει τα υπόλοιπα σημεία. Επειδή οι ροή των καμπύλων τείνει προς την εξάλειψη των ορίων, η υπερβολική χρήση της τεχνικής θα οδηγήσει στην εξάλειψη της πληροφορίας στην εικόνα.

2.6 Διασταυρωμένη επικύρωση (Cross-validation)

Σύμφωνα με το [15], διασταυρωμένη επιτίρηση (Cross-validation) είναι μια στατιστική μέθοδος αξιολόγησης και σύγκρισης των αλγορίθμων μάθησης διαιρώντας τα δεδομένα σε δύο τμήματα. Το ένα χρησιμοποιείται για την εκμάθηση ή την εκπαίδευση ενός μοντέλου και το άλλο χρησιμοποιείται για την επικύρωση του μοντέλου. Ο σκοπός της διασταυρωμένης επικύρωσης είναι μέσω αυτής να αξιολογηθεί η δυνατότητα του μοντέλου να πραγματοποιεί σωστές προβλέψεις για δεδομένα που δεν χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του. Έτσι μπορεί να κριθεί η ικανότητα του μοντέλου να γενικεύει (ικανότητα πρόβλεψης του σε ανεξάρτητα δεδομένα).

2.6.1 Αφήνω ένα έξω διασταυρωμένη επικύρωση (Leave-one-out cross-validation)

Η μέθοδος αφήνω ένα έξω διασταυρωμένης επικύρωσης (Leave-one-out cross-validation) είναι μία μέθοδος διασταυρωμένης επικύρωσης κατά την οποία χρησιμοποιείται μία παρατίρηση από το σύνολο των δεδομένων για την επικύρωση του μοντέλου και οι υπόλοιπες για την εκπαίδευση του. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου κάθε παρατίρηση του συνόλου δεδομένων έχει χρησιμοποιηθεί για την επικύρωση. Αν m είναι ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεών, τότε η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται m φορές.

3 Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος. Όπως προαναφέρθηκε, το πρόβλημα αφορά την κατάτυπηση ιατρικών απεικονίσεων βάση ατλάντων με χρήση μεθόδων μηχανικής μάθησης. Οι ιατρικές απεικονίσεις αποτελούνται από απεικονίσεις μαγνητικής τομογραφίας γονάτων.

3.1 Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν τόσο για την εκπαίδευση των μοντέλων όσο και για την αξιολόγηση τους προέρχονται από το OAI ZIB. Συγκεκριμένα τα δεδομένα αυτά αποτελούνται από απεικονίσεις μαγνητικής τομογραφίας γονάτων μαζί με τις αντίστοιχες κατατυπήσεις τους. Η κατάτυπηση έχει γίνει χειροκίνητα από ειδικούς. Οι κλάσεις της κατάτυπησης αποτελούνται από τα οστά, τους χόνδρους και το υπόβαθρο. Χρησιμοποιήθηκαν 46 από τα 507 δείγματα που διατίθενται. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν καλύπτουν όλο το φάσμα του βαθμού οστεοαρθρίτιδας. Στον Πίνακας 1 απαριθμούνται κάποια χαρακτηριστικά των δεδομένων της βάσης OAI ZIB.

MRI scanner	Siemens 3T Trio
MRI sequence	DESS
Acquisition plane	Sagittal
Image resolution in mm	0.36×0.36×0.7
Timepoints	Baseline

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά δεδομένων OAI ZIB.

Οι κλάσεις-ετικέτες των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατάτυπηση μαζί με την τιμή τους είναι:

0. Υπόβαθρο
1. Οστό
2. Χόνδρος

3.2 Προεπεξεργασία δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε και στο 2.5, σκοπός της προεπεξεργασίας είναι να παραχθεί μία νέα εικόνα-απεικόνιση που θα έχει καλύτερα αποτελέσματα στην μάθηση από αυτά της αρχικής. Με τις μεθόδους που παρουσιάζονται παρακάτω επιθυμείτε να υπάρξει το αποτέλεσμα αυτό που θα βοηθήσει στην διαδικασία την εκμάθησης.

3.2.1 Απαλοιφή θορύβου εικόνας μέσω ροής της καμπυλότητας

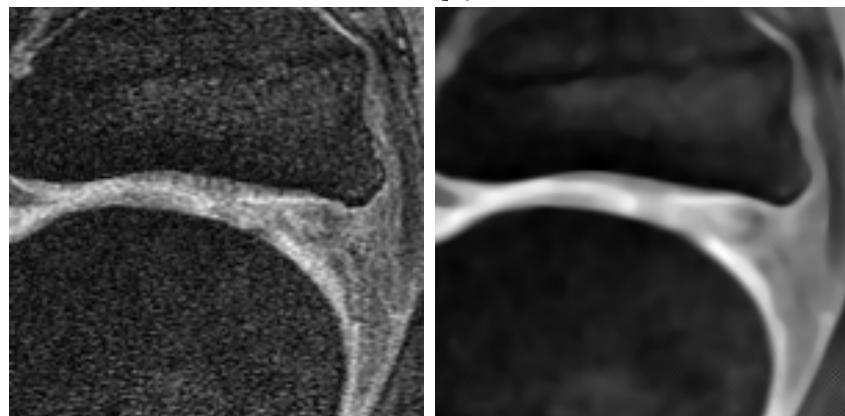
Κατά την προεπεργασία των απεικονίσεων χρησιμοποιήθηκε αρχικά η απαλοιφή θορύβου εικόνας μέσω ροής της καμπυλότητας (2.5.2). Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η μύωση του θορύβου στις απεικονίσεις και η διατήρηση-τόνωση των αιχμηρών σημείων (σημείων που διαχωρίζονται οι διάφορες ανατομικές περιοχές) των απεικονίσεων.

Η τιμή που χρησιμοποιήθηκε για το χρονικό βήμα είναι $t = 0.04$ (από την εξίσωση (12)) και η μέθοδος επαναλήφθηκε δέκα φορές. Στα Σχήμα 4, Σχήμα 5 και Σχήμα 6 παρουσιάζονται απεικονίσεις του ίδιου γόνατου, από διάφορες οπτικές γωνίες, χωρίς και με την χρήση της απαλοιφής θορύβου. Από τα σχήματα αυτά φαίνεται ότι ο θόρυβος έχει μειωθεί αρκετά. Επίσης είναι εμφανές ότι οι ακμές των καμπυλών έχουν διατηρηθεί και σε μερικές περιπτώσεις έχουν αυξηθεί μετά τη χρήση της μεθόδου.



(I) Αρχική απεικόνιση

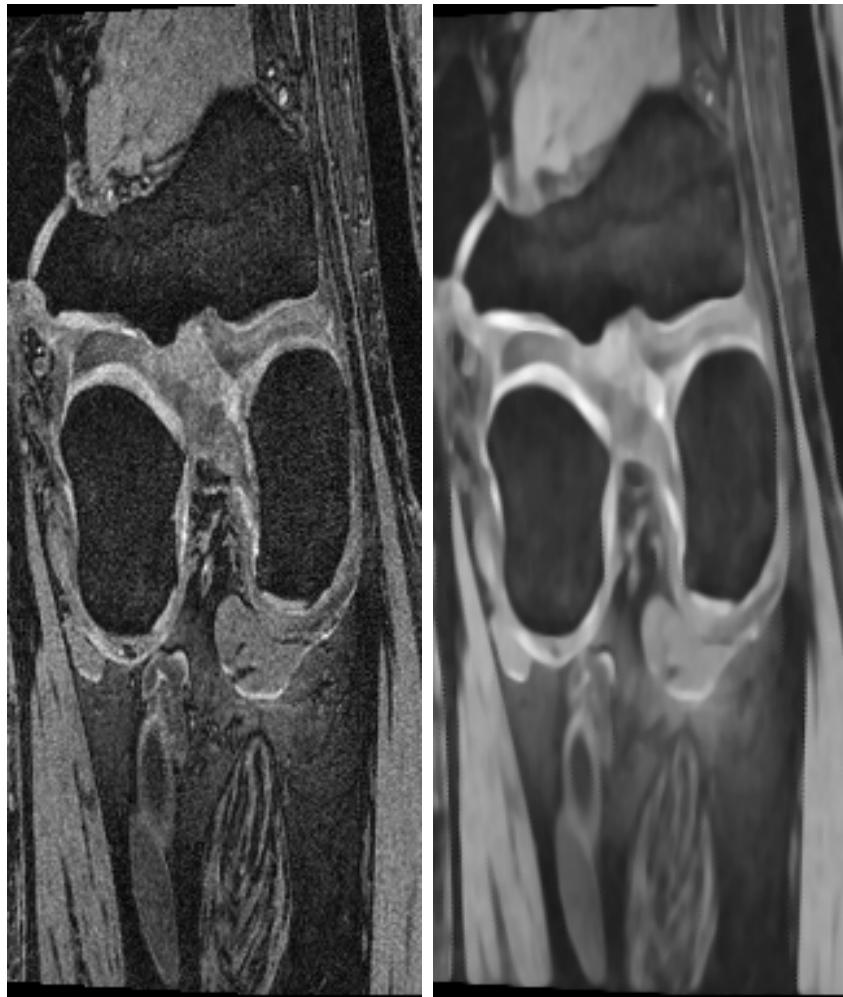
(II) Απεικόνιση με απαλοιφή θορύβου



(III) Μεγέθυνση της αρχικής απεικόνισης

(IV) Μεγέθυνση της απεικόνισης με απαλοιφή θορύβου

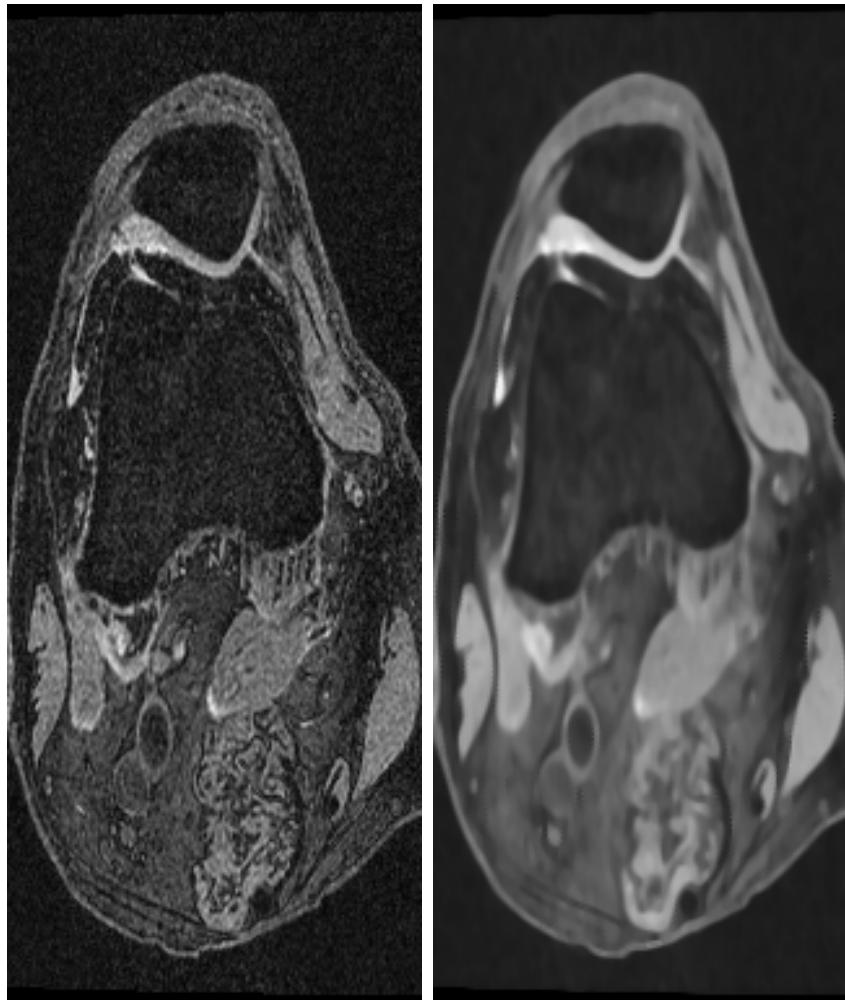
Σχήμα 4: Τομή απεικόνισης γονάτου χωρίς και με την χρήση της απαλοιφής θορύβου μέσω ροής της καμπυλότητας.



(I) Αρχική απεικόνιση

(II) Απεικόνιση με απαλοιφή θορύβου

Σχήμα 5: Τομή απεικόνισης γονάτου χωρίς και με την χρήση της απαλοιφής θορύβου μέσω ροής της καμπυλότητας.



(I) Αρχική απεικόνιση

(II) Απεικόνιση με απαλοιφή θορύβου

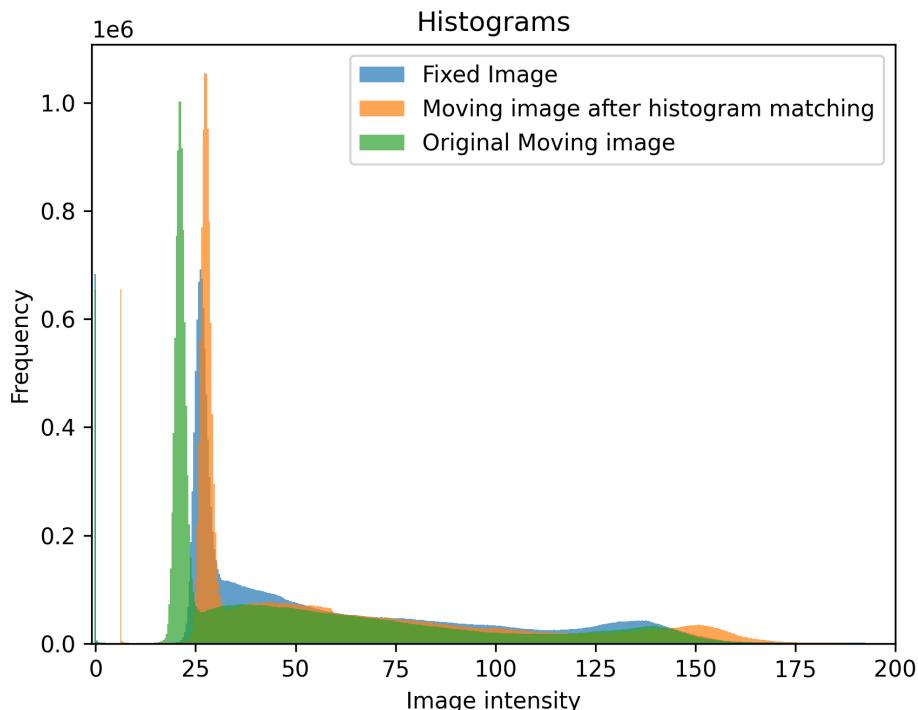
Σχήμα 6: Τομή απεικόνισης γονάτου χωρίς και με την χρήση της απαλοιφής θορύβου μέσω ροής της καμπυλότητας.

3.2.2 Αντιστοίχιση ιστογράμματος

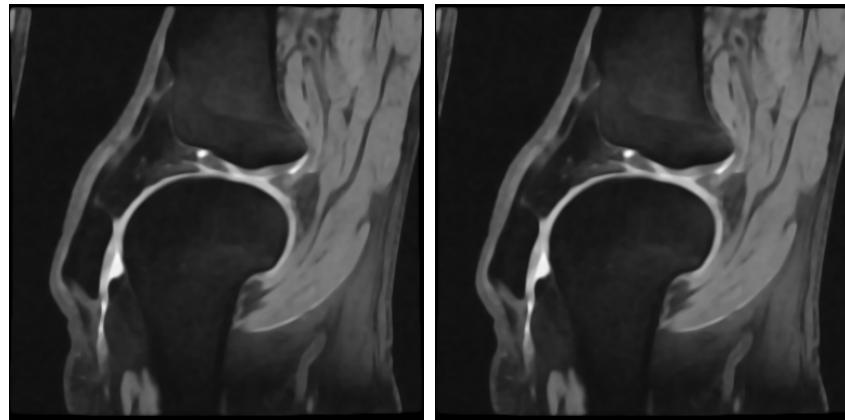
Έπειτα από την απαλοιφή του θορύβου χρησιμοποιήθηκε η αντιστοίχιση ιστογράμματος (2.5.1). Το ιστόγραμμα της κινούμενης απεικόνισης αντιστοιχίστηκε με το ιστόγραμμα της σταθερής απεικόνισης. Σκοπός του μετασχηματισμού αυτού είναι οι απεικονίσεις να έχουν την ίδια φωτεινότητα για τις αντίστοιχες βιολογικές περιοχές των γονάτων στην σταθερή και στην κινούμενη απεικόνιση.

Αν και οι απεικονίσεις προέρχονται από το ίδιο μοντέλο μαγνητικού τομογράφου, μπορούν να παρουσιάζουν μεταβολές στην φωτεινότητα τους. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η αντιστοίχιση ιστογράμματος.

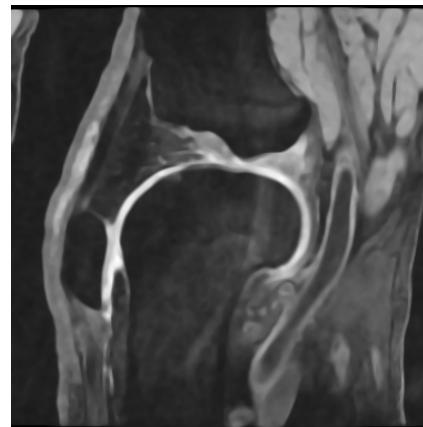
Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα μίας απεικόνισης πριν και μετά την διαδικασία της αντιστοίχισης. Επίσης παρουσιάζεται και το ιστόγραμμα της σταθερής απεικόνισης. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι η μεγάλη ακμή της κινούμενης απεικόνισης μετακινήθηκε προς την ακμή της σταθερής. Επίσης παρατηρείται ολόκληρη η καμπύλη της κινούμενης απεικόνισης να ακολουθεί την μεταβολή της ακμής της. Ακόμα από το Σχήμα 8 δεν μπορεί να παρατηρηθεί με το μάτι διαφορά στην απεικόνιση της κινούμενης εικόνας πριν και μετά την αντιστοίχιση του ιστογράμματος. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο αφού η μεταβολή του ιστογράμματος δεν είναι μεγάλη όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Ιστογράμματα σταθερής απεικόνισης και κινούμενης πριν και μετά την αντιστοίχιση



(I) Κινούμενη απεικόνιση πριν της (II) Κινούμενη απεικόνιση πριν αντιστοίχιση ιστογράμματος της αντιστοίχιση ιστογράμματος



(III) Σταθερή απεικόνιση

Σχήμα 8: Τομή απεικονίσεων σταθερή και κινούμενης εικόνας πριν και μετά την αντιστοίχιση ιστογράμματος.

3.3 Καταχώρηση απεικονίσεων

Πριν την κατάτμηση των απεικονίσεων είναι απαραίτητο να καταχωριθούν οι απεικονίσεις των ατλάντων που θα χρησιμοποιηθούν για την κατάτμηση της σταθερής απεικόνισης. Άτλας είναι ο συνδυασμός μίας απεικόνισης και του αντίστοιχου χάρτη των ετικετών της απεικόνισης. Όπως αναφέρθηκε στο 2.3, μέσω της καταχώρησης επιδιώκεται τα κοινά χαρακτηριστικά των δύο απεικονίσεων (σταθερή και κινούμενη) να επικαλυφθούν. Με αυτό τον τρόπο αντίστοιχα εικονοστοιχεία των δύο απεικονίσεων θα αναπαριστούν όμοια βιολογικά σημεία.

Για την διαδικασία την καταχώρησης χρησιμοποιήθηκε ο αγχύραμμος μετασχηματισμός (Affine transform) (2.3.3). Επίσης η μέτρηση της ομοιότητας των δύο απεικονίσεων έγινε με την μέση διαφορά τετραγώνων (2.3.1), με την υπόθεση ότι όμοια βιολογικά σημεία στις απεικονίσεις έχουν την ίδια φωτεινότητα. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε ώστε να βρεθούν οι βέλτιστες παράμετροι είναι ο αλγόριθμος προσαρμοστικής στοχαστικής απότομης καθόδου (ASGD) (2.3.2). Η παρεμβολή των σημείων των απεικονίσεων έγινε με γραμμική παρεμβολή (2.3.4). Χρησιμοποιήθηκε δειγματοληψία (2.3.6) 80% του συνολικού αριθμού των εικονοστοιχείων μίας απεικόνισης για να μειωθεί ο χρόνος υπολογισμού που απαιτείται για την καταχώρηση.

Ο χώρος κλίμακας Gauss (Gaussian scale-space) (2.3.5) χρησιμοποιήθηκε ούτως ώστε να υπάρχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να μην καταλήξει η βελτιστοποίηση σε κάποιο ολικό ελάχιστο. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα στάδια. Η τυπική απόκλιση του πυρήνα (5) για κάθε στάδιο ορίζεται από τον τύπο:

$$\sigma = \frac{f}{2}s \quad (13)$$

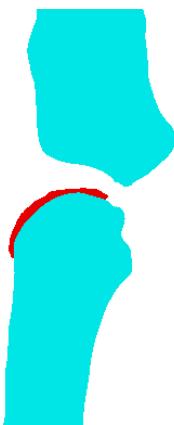
Όπου f αναπαριστά το επίπεδο μείωσης της πληροφορίας και έχει τιμές για κάθε στάδιο 8, 4, 2, 1 αντίστοιχα. s είναι η απόσταση των εικονοστοιχείων της απεικόνισης για κάθε διάσταση (μπορεί να βρεθεί στον Πίνακας 1).

Τέλος χρησιμοποιήθηκε μάσκα (2.3.7) για την κινούμενη εικόνα. Η μάσκα αυτή αποτελείται από όλα τα εικονοστοιχεία της απεικόνισης που δεν ανήκουν στο υπόβαθρο. Με αυτόν τον τρόπο συνεισφέρουν μόνο τα εικονοστοιχεία των απεικονίσεων που ανήκουν σε βιολογικές ομάδες που πρόκειται να κατανευμούν.

Στα Σχήμα 9, Σχήμα 11 και Σχήμα 13 παρουσιάζονται οι ετικέτες δύο απεικονίσεων πριν την καταχώρηση. Στα Σχήμα 10, Σχήμα 12 και Σχήμα 14 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ετικέτες μετά την καταχώρηση. Από τα σχήματα αυτά παρατηρείται ότι οι αντίστοιχες ετικέτες ανάμεσα στις δύο απεικόνισης έχουν επικαλυφθεί αρκετά αλλά όχι τελείως. Αυτό οφείλεται στον αγχύραμμο μετασχηματισμό που μπορεί να εφαρμόσει μετατόπιση, περιστροφή, αλλαγή κλίμακας και στρέβλωση. Ακόμα στο γεγονός ότι η μορφολογία την δύο γονάτων δεν είναι ίδια.



(I) Σταθερή απεικόνιση



(II) Κινούμενη απεικόνιση



(III) Σταθερή και κινούμενη

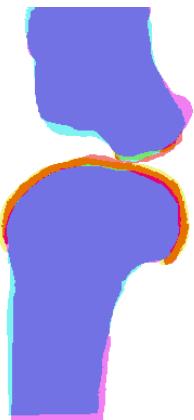
Σχήμα 9: Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.



(I) Σταθερή απεικόνιση

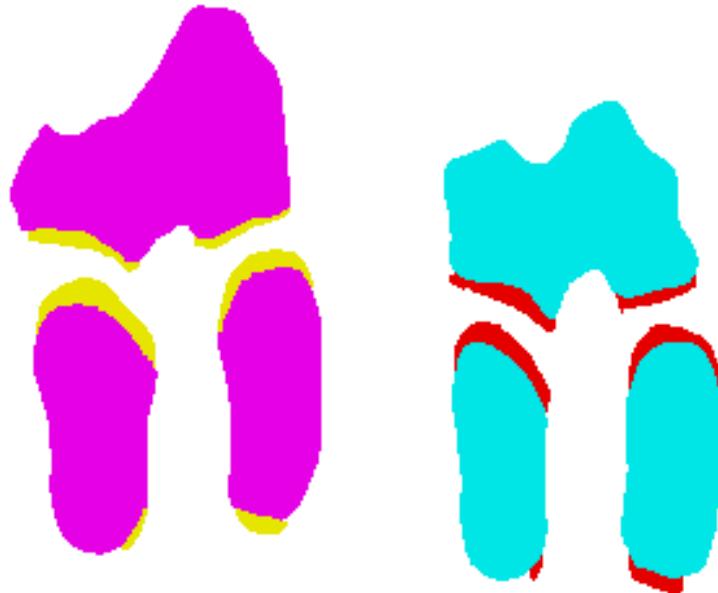


(II) Κινούμενη απεικόνιση



(III) Σταθερή και κινούμενη

Σχήμα 10: Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.



(I) Σταθερή απεικόνιση

(II) Κινούμενη απεικόνιση

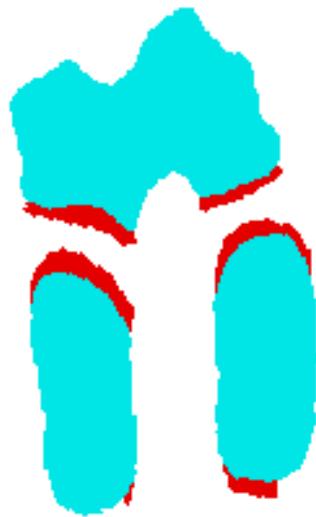


(III) Σταθερή και κινούμενη

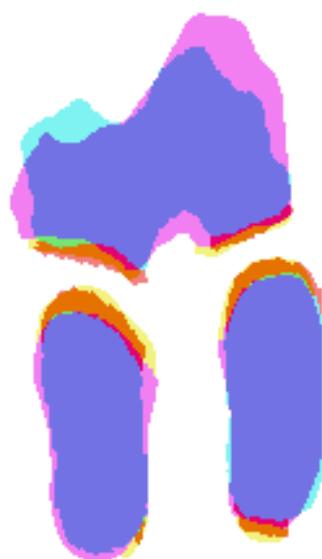
Σχήμα 11: Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.



(I) Σταθερή απεικόνιση

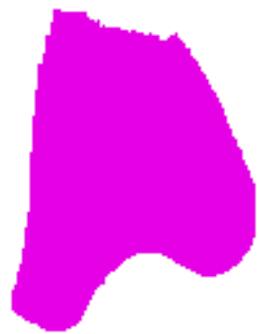


(II) Κινούμενη απεικόνιση



(III) Σταθερή και κινούμενη

Σχήμα 12: Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.



(I) Σταθερή απεικόνιση



(II) Κινούμενη απεικόνιση



(III) Σταθερή και κινούμενη

Σχήμα 13: Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.



(I) Σταθερή απεικόνιση



(II) Κινούμενη απεικόνιση



(III) Σταθερή και κινούμενη

Σχήμα 14: Τομή απεικονίσεων σταθερής και κινούμενης απεικόνισης και του συνδυασμού τους μετά την καταχώρηση.

3.4 Επιλογή ατλάντων

Έπειτα από την καταχώρωση των ατλάντων επιλέγεται ένα υποσύνολο τους για να χρησιμοποιηθεί στην κατάτμηση. Αυτό γίνεται ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται. Ως μετρική για την επιλογή αυτή χρησιμοποιείται η μέση διαφορά τετραγώνων των εικονοστοιχείων των απεικονίσεων που δεν ανίκουν στο παρασκήνιο. Συγκεκριμένα αν I είναι η σταθερή απεικόνιση, I_i και L_i μία κινούμενη απεικόνιση και οι επικέτες της αντίστοιχα για τον i -οστό άτλαντα. Τα στοιχεία της κινούμενης εικόνας που δεν ανίκουν στο παρασκήνιο είναι:

$$p_i = \{\mathbf{x} | \mathbf{x} \in L_i, L_i > 0\}$$

Οι επικέτες L_i έχουν την τιμή 0 για το παρασκήνιο και για τις υπόλοιπες ακέραιους μεγαλύτερους του 0. Έχοντας τα στοιχεία αυτά η μετρική ορίζεται ως:

$$mse_i = \frac{1}{|p_i|} \sum_{\mathbf{x} \in p_i} (I(\mathbf{x}) - I_i(\mathbf{x}))^2 \quad (14)$$

Όπου $|p_i|$ είναι ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μετρικής.

Έχοντας υπολογίσει την μετρική για όλους τους άτλαντες μέσω της (14), αν ο επιθυμητός αριθμός ατλάντων είναι N , τότε επιλέγονται οι N άτλαντες με την μικρότερη τιμή.

3.5 Μέθοδοι κατάτμησης

Για την κατάτμηση των απεικονίσεων χρησιμοποιήθηκαν τρεις μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατάτμηση απεικονίσεων μαγνητικής τομογραφίας του εγκεφάλου [2] [3] [4]. Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται αυτές οι τρεις μέθοδοι (κάθε μέθοδος σε ένα υποκεφαλαίο).

3.5.1 Μέθοδος 1: Αραιή μέθοδος βασισμένη σε τμήματα

Η αραιή μέθοδος βασισμένη σε τμήματα (Sparse Patch-Based Method, SPBM) βασίζεται στο [2].

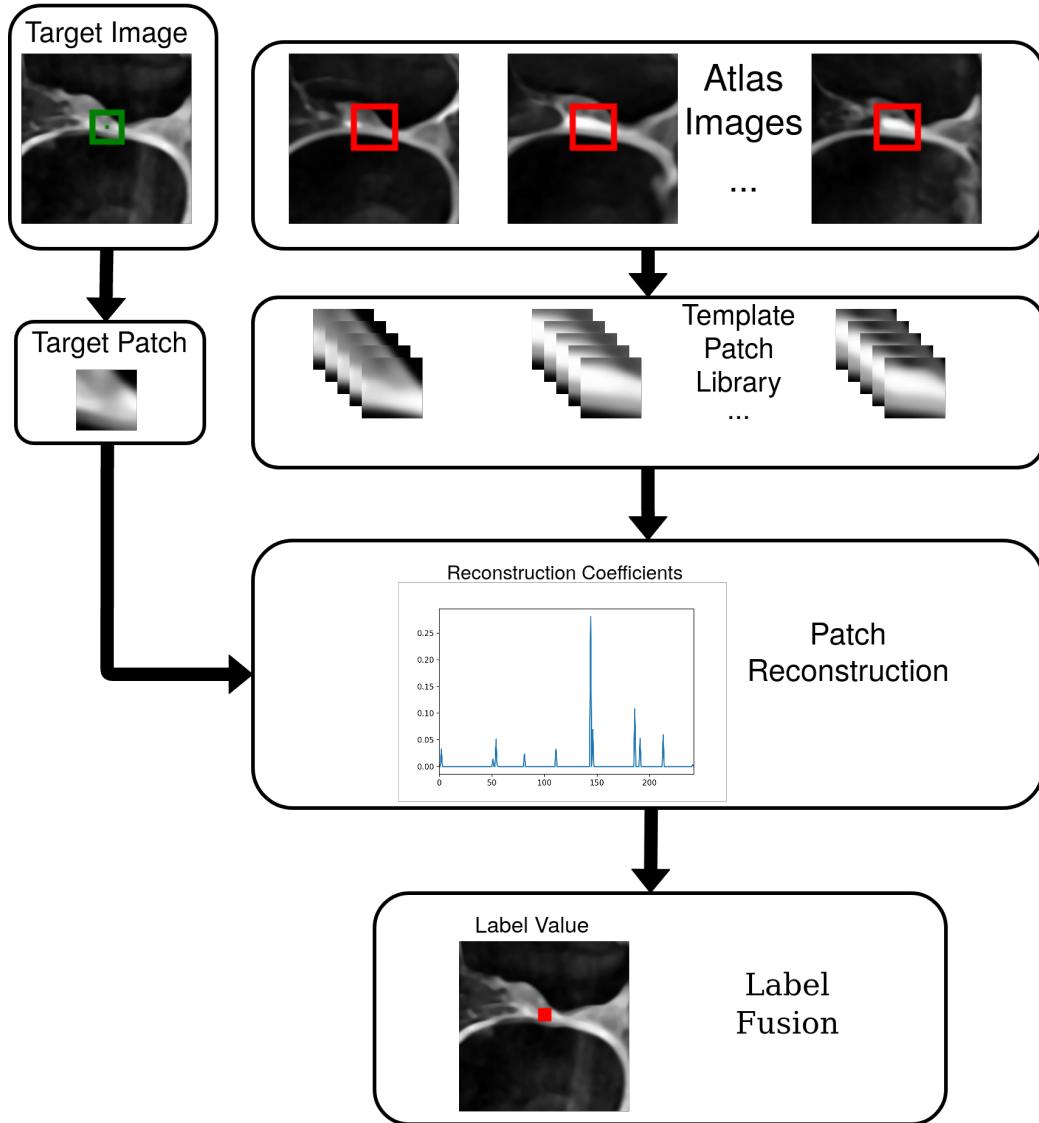
Περιγραφή

Αρχικά, για κάθε εικονοστοιχείο της απεικόνισης προς κατάτυπον ορίζεται η στοιχειώδης περιοχή (patch) (η περιοχή μέσα στο πράσινο τετράγωνο στο Σχήμα 15 στο Target Image) η οποία είναι μία κυβική περιοχή γύρω από το εικονοστοιχείο προς καταχώρηση (πράσινη τελεία μέσα στο προηγούμενο τετράγωνο).

Έπειτα, για το αντίστοιχο εικονοστοιχείο των ατλάντων ορίζεται η περιοχή αναζήτησης ως μία κυβική περιοχή γύρω από το εικονοστοιχείο αυτό (κόκκινα τετράγωνα στο Σχήμα 15 στο Atlas Images). Για κάθε εικονοστοιχείο μέσα στη περιοχή αναζήτησης εξάγεται τα patches, με τον ίδιο τρόπο που έγινε στην απεικόνιση προς κατάτυπον, και με αυτά τα patches δημιουργεί τη βιβλιοθήκη πρότυπων στοιχειώδη περιοχών (template patch library) (Template Patch Library στο Σχήμα 15).

Με τη βιβλιοθήκη αυτή πραγματοποιεί ανοικοδόμηση του patch της απεικόνισης προς καταχώρηση μέσω αραιής γραμμικής υπέρθεσης των patches της βιβλιοθήκης. Έπειτα χρησιμοποιεί τους συντελεστές της ανοικοδόμησης (Patch Reconstruction στο Σχήμα 15) ως βάρον γραφήματος, ώστε να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο συγχώνευσης κατηγοριών βασισμένο σε γράφους (2.1) (Label Fusion στο Σχήμα 15).

SPBM Method Overview



Σχήμα 15: Διάγραμμα ροής της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα (SPBM).

Ανάλυση

Έστω το ζεύγος $\{(I_i, L_i), i = 1, \dots, n\}$ όπου I_i είναι η απεικόνιση ενός άτλαντα, L_i ο χάρτης των κατηγοριών της αντίστοιχης απεικόνισης και n το σύνολο των ατλάντων. Για κάθε εικονοστοιχείο προς καταχώρωση x της απεικόνισης προς καταχώρωση I και κάθε εικονοστοιχείο $y \in N_i(x)$ σε κάθε άτλαντα I_i , είναι επιθυμητό τα βάρον (συντελεστές

ανοικοδόμησης) $w_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ να βελτιστοποιηθούν βάση της αραιής αναπαράστασης. $N_i(\mathbf{x})$ είναι η περιοχή αναζήτησης τους άτλαντα I_i .

Ακόμα, έστω $A_y^i \triangleq \text{col}(\{I_i(\mathbf{y}' | \mathbf{y}' \in P_{I_i}(\mathbf{y})\})$ η βιβλιοθήκη πρότυπων στοιχειώδην περιοχών και $b_x \triangleq \text{col}(\{I(\mathbf{x}' | \mathbf{x}' \in P_I(\mathbf{y})\})$ διάνυσμα και $P_I(\mathbf{x})$, $P_{I_i}(\mathbf{y})$ patches της απεικόνισης I και I_i γύρο από τα εικονοστοιχεία \mathbf{x} και \mathbf{y} αντίστοιχα. Επίσης col είναι ένας τελεστής που ευθυγραμμίζει όλα τα στοιχεία ενός συνόλου σε ένα διάνυσμα στήλης. Ο συντελεστής ανοικοδόμησης $w_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ υπολογίζεται από την παρακάτω συνάρτηση:

$$\underset{\{w_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})\}}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \left\| \sum_{i=1}^n \sum_{\mathbf{y} \in N_i(\mathbf{x})} A_y^i w_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - b_x \right\|_2^2 + \lambda \sum_{i=1}^n \sum_{\mathbf{y} \in N_i(\mathbf{x})} |w_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})| \quad (15)$$

Με την συνάρτηση (15) επιθυμούμε την ανοικοδόμηση του διανύσματος b_x της σταθερής εικόνας από το διάνυσμα A_y^i των ατλάντων. Ο πρώτος όρος ελαχιστοποιεί το σφάλμα ανοικοδόμησης ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιείται ώστε να επιτευχθεί αραιή λύση. Η παραμέτρος λ χρησιμοποιείται για να ελέγξει την συνεισφορά κάθε όρου και επομένως και το πόσο αραιό θα είναι το αποτέλεσμα. Η συνάρτηση (15) μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τον ελάχιστα απόλυτο τελεστή συρρίκνωσης και επιλογής (2.2).

Έπειτα, αφού έχει υπολογιστεί ο συντελεστής ανοικοδόμησης $w_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, χρησιμοποιείται η εξίσωση (1) του πλαισίου συγχώνευσης κατηγοριών, για να παραχθεί η ετικέτα $L(\mathbf{x})$ για το εικονοστοιχείο \mathbf{x} . Η διαδικασία του πλαισίου συγχώνευσης κατηγοριών επαναλαμβάνεται για κάθε ετικέτα των δεδομένων εκτός του υποβάθρου. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$. Αν όλες οι τιμές αυτές είναι μικρότερες του 0.5, τότε επιλέγεται για το εικονοστοιχείο \mathbf{x} η ετικέτα του παρασκευής. Άλλιώς επιλέγεται η ετικέτα με την μεγαλύτερη τιμή. Ολόκληρη η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε εικονοστοιχείο $\mathbf{x} \in \Omega$ της σταθερής απεικόνισης, όπου Ω ο χώρος των απεικονίσεων.

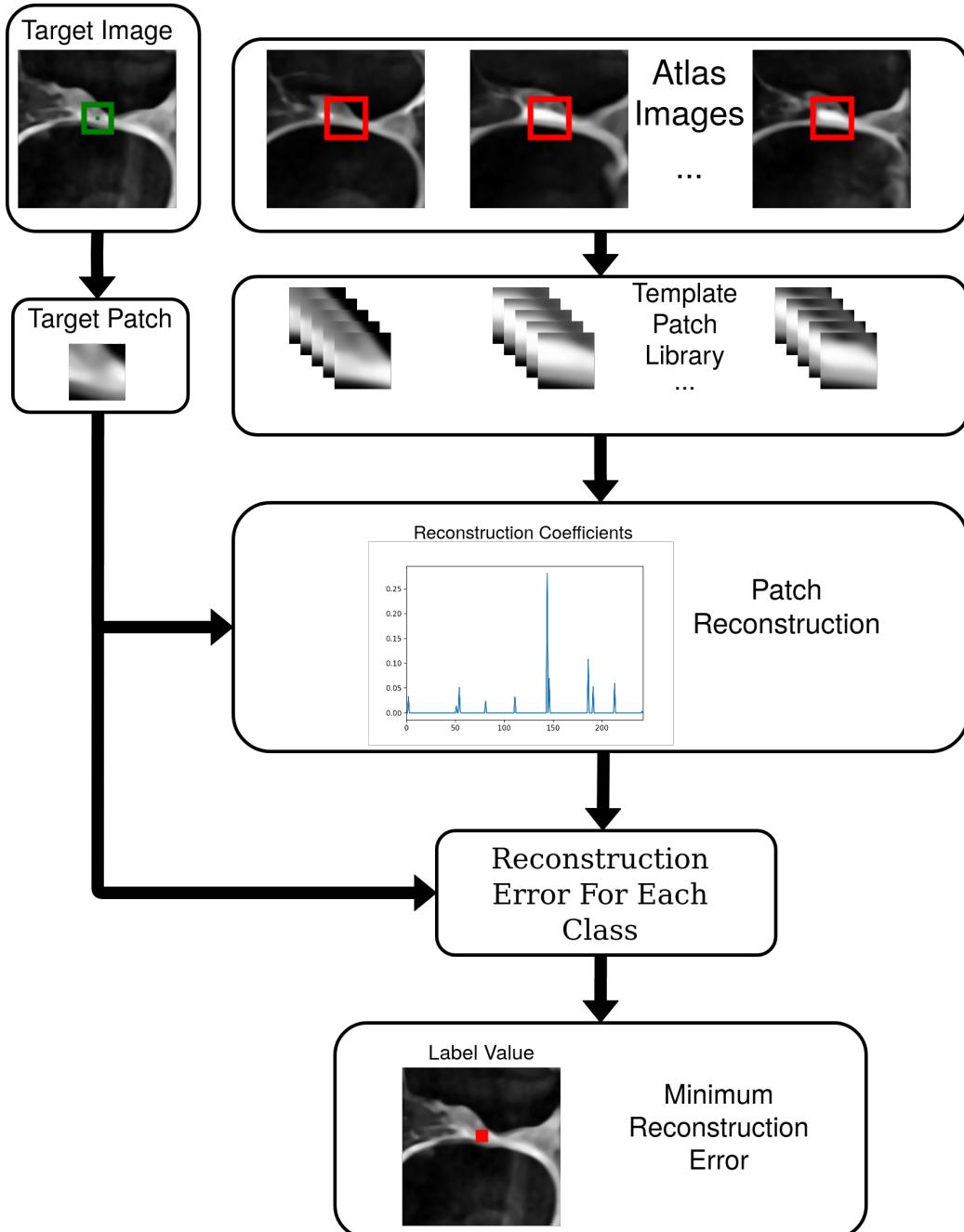
3.5.2 Μέθοδος 2: Ταξινόμηση αραιής αναπαράστασης

Η μέθοδος ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης (Sparse Representation Classification, SRC) βασίζεται στο [3] και χρησιμοποιεί μία βιβλιοθήκη

πρότυπων τημάτων ως προκαθορισμένο λεξικό. Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο, τα τημάτα γύρο από κάθε εικονοστοιχείο της σταθερής απεικόνισης ανοικοδομούνται με αραιή γραφική υπέρθεση των τημάτων των ατλάντων (δημιουργία βιβλιοθήκης πρότυπων τημάτων). Η κατηγορία-ετικέτα του εικονοστοιχείου προς ταξινόμηση καθορίζεται από το σφάλμα ανοικοδόμησης για κάθε κατηγορία.

Περιγραφή

SRC Method Overview



Σχήμα 16: Διάγραμμα ροής της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης (SRC).

Τα βήματα για τη δημιουργία της βιβλιοθήκης πρότυπων τμημάτων

είναι τα ίδια με την αραιή μέθοδος βασισμένη σε τμήματα (3.5.1). Οι συντελεστές $w_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ ανοικοδόμησης υπολογίζονται μέσω της (15).

Για ευκολία η συνάρτηση (15) μπορεί να γραφτεί ως:

$$\underset{w_{\mathbf{x}}}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \|Aw_{\mathbf{x}} - b_{\mathbf{x}}\|_2^2 + \lambda \|w_{\mathbf{x}}\|_1 \quad (16)$$

Όπου $w_{\mathbf{x}} \triangleq \text{col}(w_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) | \mathbf{y} \in N_i(\mathbf{x}), i \in 1, \dots, n)$ και $A \triangleq \text{row}(A_y^i | \mathbf{y} \in N_i(\mathbf{x}), i \in 1, \dots, n)$. Ο τελεστής row ευθυγραμμίζει όλα τα διανύσματα κατά γραμμές, οπότε το A είναι πίνακας.

Έχοντας υπολογίσει τους συντελεστές ανοικοδόμησης (το διάνυσμα $w_{\mathbf{x}}$ στην συνάρτηση (16)) μέσω του ελάχιστα απόλυτου τελεστή συρρίκνωσης και επιλογής (2.2), το σφάλμα ανοικοδόμησης για κάθε κλάση ορίζεται ως:

$$r_j(b_{\mathbf{x}}) = \|b_{\mathbf{x}} - A^j w_{\mathbf{x}}^j\| \quad (17)$$

Όπου A^j και $w_{\mathbf{x}}^j$ είναι τα A και $w_{\mathbf{x}}$ αντίστοιχα που σχετίζονται με την ετικέτα j . Δηλαδή τα στοιχεία των A και $w_{\mathbf{x}}$ που δεν ανήκουν στην κατηγορία-ετικέτα j έχουν την τιμή 0 ή με άλλα λόγια δεν συνεισφέρουν στον υπολογισμό του σφάλματος ανοικοδόμησης.

Τέλος, η τελική ετικέτα v του εικονοστοιχείου προς ταξινόμηση ορίζεται ως:

$$v = \underset{j}{\operatorname{argmin}} (r_j(b_{\mathbf{x}})) , j = 0, \dots, C$$

Όπου C είναι ο μεγαλύτερος αριθμός ετικέτας. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε εικονοστοιχείο $\mathbf{x} \in \Omega$ της σταθερής απεικόνισης, όπου Ω ο χώρος των απεικονίσεων.

3.5.3 Κατάτμη βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς

Η κατάτμη βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς (Patch-Based Segmentation using Expert Priors, PBSEP) βασίζεται στο [4]. Η μέθοδος αυτή αρχικά επιλέγει τα τμήματα των ατλάντων, γύρω από το εικονοστοιχείο προς κατάτμη, που ξεπερνούν

ένα επίπεδο ομοιότητας σε σχέση με το τμήματα της σταθερής απεικόνισης, γύρω από το εικονοστοιχείο προς κατάτυπση, βάση απλών στατιστικών, όπως φωτεινότητα και αντίθεση. Έπειτα, συγκρίνει τα τμήματα αυτά. Με την σύγκριση αυτή εξάγει μία μετρική ομοιότητας των τμημάτων, ώστε να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο συγχώνευσης κατηγοριών βασισμένο σε γράφους (2.1).

Για την μετρική της ομοιότητας χρησιμοποιούνται οι όροι της φωτεινότητας και της αντίθεσης του δείκτη δομικής ομοιότητας (2.4.2). Οι σταθερές της εξίσωσης (11) είναι $\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 0$. Οπότε η μετρική ορίζεται ως:

$$ss = \frac{2\mu_i\mu_{s,j}}{\mu_i^2 + \mu_{s,j}^2} \frac{2\sigma_i\sigma_{s,j}}{\sigma_i^2 + \sigma_{s,j}^2} \quad (18)$$

Όπου μ_i και σ_i είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα του τμήματος γύρω από το εικονοστοιχείο προς κατάτυπση. Επίσης, $\mu_{s,j}$ και $\sigma_{s,j}$ είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του τμήματος γύρω από το εικονοστοιχείο j του άτλαντα s .

Η επιλογή τμημάτων και η μετρική ομοιότητας ορίζονται από την εξίσωση:

$$w(x_i, x_{s,j}) = \begin{cases} \exp\left(\frac{-\|P(x_i) - P(x_{s,j})\|_2^2}{h}\right) & \text{if } ss > th \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

Όπου $P(x_i)$ αναπαριστά ένα κυβικό τμήμα γύρω από το εικονοστοιχείο x_i . Τα x_i και $x_{s,j}$ είναι εικονοστοιχεία της σταθερής εικόνας στη θέση i και του άτλαντα s στη θέση j αντίστοιχα. Τα τμήματα που επιλέγονται έχουν τιμή για την μετρική ομοιότητας της εξίσωσης (18) μεγαλύτερη της σταθεράς th . Η παραμέτρος απόσβεσης h ορίζει την συνεισφορά των τμημάτων και ορίζεται ως:

$$h = \underset{x_{x,j}}{\operatorname{argmin}} \|P(x_i) - P(x_{s,j})\|_2 + \epsilon$$

Το ϵ χρησιμοποιείται για υπολογιστική σταθερότητα της εξίσωσης (19) και είναι μία μικρή σταθερά.

Έπειτα, αφού έχει αφού έχει γίνει η επιλογή τμημάτων και έχουν υπολογιστεί τα βάρον $w(x_i, x_{s,j})$ για $j \in N(x_i)$, όπου $N(x_i)$ αναπαριστά ένα

κυβικό τμήμα γύρο από το εικονοστοιχείο x_i , χρησιμοποιείται η εξίσωση (1) του πλαισίου συγχώνευσης κατηγοριών για να παραχθεί η ετικέτα $L(x_i)$ για το εικονοστοιχείο x_i . Αν όλα τα βάρον $w(x_i, x_{s,j})$ έχουν τιμή 0, τότε επιλέγεται η ετικέτα του παρασκηνίου αυθαίρετα. Διαφορετικά, η διαδικασία του πλαισίου συγχώνευσης κατηγοριών επαναλαμβάνεται για κάθε ετικέτα των δεδομένων εκτός του υποβάθμου. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$. Αν όλες οι τιμές αυτές είναι μικρότερες του 0.5, τότε επιλέγεται για το εικονοστοιχείο x_i η ετικέτα του παρασκηνίου. Άλλιώς επιλέγεται η ετικέτα με την μεγαλύτερη τιμή. Ολόκληρη η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε εικονοστοιχείο $x_i \in \Omega$ της σταθερής απεικόνισης, όπου Ω ο χώρος των απεικονίσεων.

4 Πειράματα και αποτελέσματα

4.1 Τρόπος αξιολόγησης και σύγκρισης

Για τις μεθόδους που προτάθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο αρχικά, θα επιλεγούν οι καλύτερες παραμετροί τους και έπειτα θα συγκριθούν μεταξύ τους. Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για την παραπάνω διαδικασία παρουσιάστηκαν στο 3.1. Επίσης ως μετρική του αποτελέσματος χρησιμοποιείται ο συντελεστής ομοιότητας Dice (2.4.1) που ορίζεται από την εξίσωση (6). Η μετρική αυτή υπολογίζεται για κάθε ετικέτα των δεδομένων.

Επίσης, για κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκε η διασταυρωμένη επικύρωση αφήνων ένα έξω (2.6.1). Η επιλογή αυτή έγινε ούτως ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητα του μοντέλου να πραγματοποιεί σωστές προβλέψεις για δεδομένα που δεν χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του.

4.2 Λεπτομέρειες υλοποίησης

Η υλοποίηση των μεθόδων έγινε στις γλώσσες προγραμματισμού *Python 3* και *Cython*. Συγκεκριμένα, για την διαχείριση και επεξεργασία των απεικονίσεων χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο *Simple ITK*. Για την καταχώριση των απεικονίσεων χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο *Simple Elastix*. Οι μέθοδοι κατάτμησης υλοποιήθηκαν σε *Cython* για λόγους υπολογιστικής ταχύτητας. Τέλος, το εργαλείο *SPAMS* χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του ελάχιστα απόλυτου τελεστή συρρίκνωσης και επιλογής (2.2).

4.3 Επιλογή παραμέτρων

Οι παραμετροί που είναι κοινοί για όλες τις μεθόδους είναι:

1. Ο αριθμός των ατλάντων που χρησιμοποιείται στην κατάτμηση.
2. Το τμήμα αναζήτησης στους άτλαντες.
3. Το τμήμα γύρο από κάθε εικονοστοιχείο προς κατάτμηση. Θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως τμήμα χαρακτηριστικών.

Ακόμα, η αραιή μέθοδος βασισμένη σε τιμήματα (3.5.1) και η μέθοδος ταξινόμησης αραιής αναπταράστασης (3.5.2) έχουν την παραμετρο λ του ελάχιστα απόλυτου τελεστή συρρίκνωσης και επιλογής.

4.3.1 Παραμετρος λ του ελάχιστα απόλυτου τελεστή συρρίκνωσης και επιλογής

Αρχικά, επιλέγεται η καλύτερη τιμή της παραμέτρου λ του ελάχιστα απόλυτου τελεστή συρρίκνωσης και επιλογής. Η παραμετρος αυτή ελέγχει την συνεισφορά του σφάλματος ανοικοδόμησης σε σχέση με τον όρο της πρώτης νόρμας που χρησιμοποιείται ώστε να επιτευχθεί αραιή λύση.

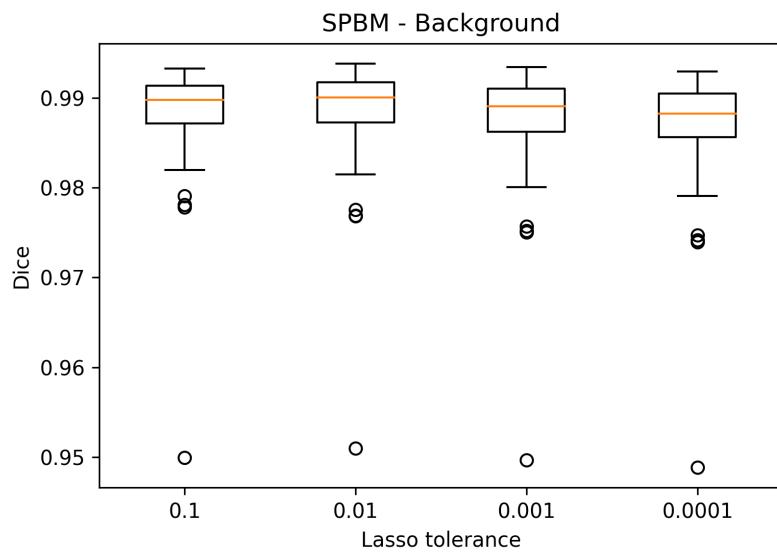
Αραιή μέθοδος βασισμένη σε τιμήματα

Στην αραιή μέθοδο βασισμένη σε τιμήματα η παραμετρος αυτή υπάρχει στην εξίσωση (15). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παρουσιάζονται στον Πίνακας 2.

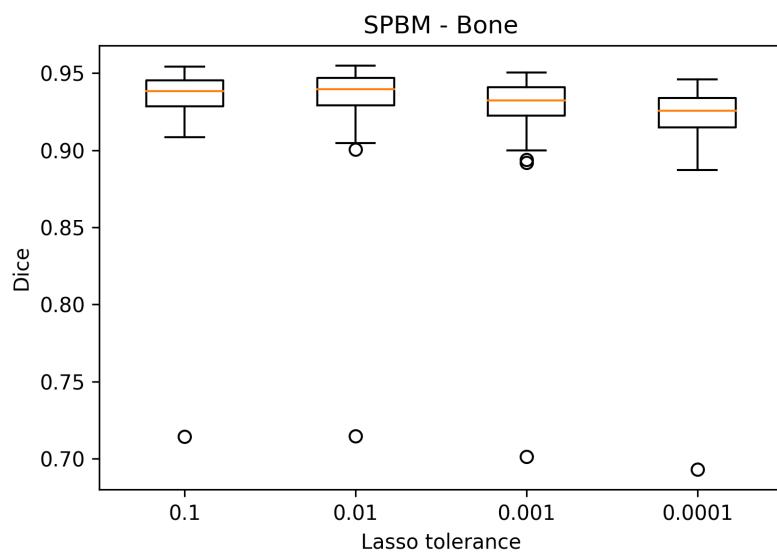
Αριθμός ατλάντων	4
Τιμήμα αναζήτησης	[5,5,5]
Τιμήμα χαρακτηριστικών	[3,3,3]

Πίνακας 2: Παραμετροι που παραμένουν σταθεροι για την επιλογή της παραμέτρου λ.

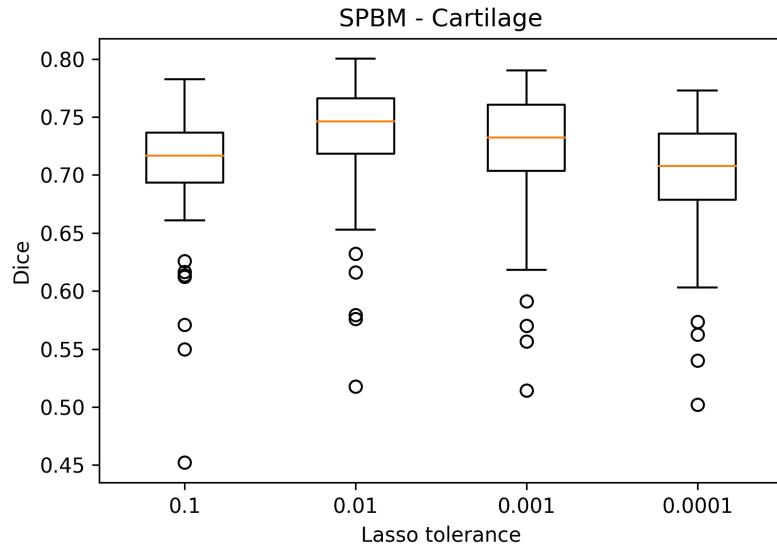
Στα Σχήμα 17, Σχήμα 18 και Σχήμα 19 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για τις τιμές της παραμέτρου λ που χρησιμοποιήθηκαν. Από τα Σχήμα 17 και Σχήμα 18 παρατηρείται ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις τιμές του συντελεστή. Στο Σχήμα 19 για τιμή λ = 0.01 παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή. Για το λόγο αυτό επιλέχτηκε η τιμή λ = 0.01.



Σχήμα 17: Μεταβολή της παραμέτρου λ της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την επικέτα του παρασκηνίου.



Σχήμα 18: Μεταβολή της παραμέτρου λ της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την επικέτα των οστών.

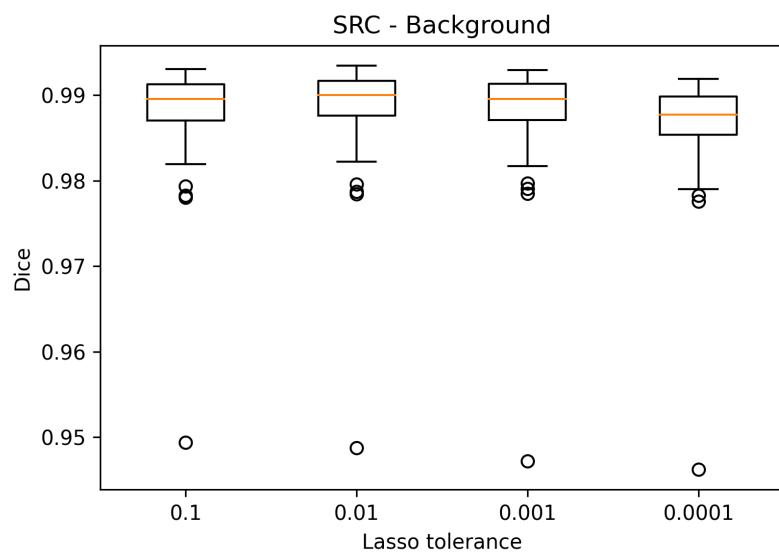


Σχήμα 19: Μεταβολή της παραμέτρου λ της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την επικέτα των χόνδρων.

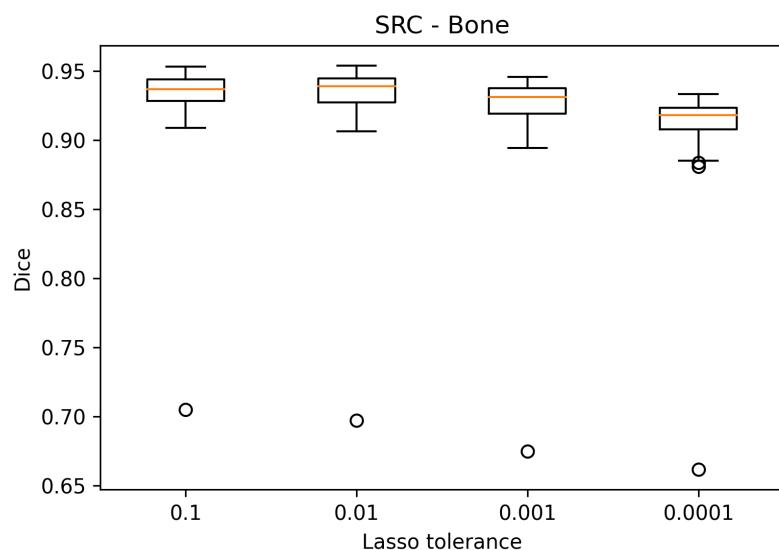
Ταξινόμηση αραιής αναπαράστασης

Στην μέθοδο ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης η παράμετρος αυτή υπάρχει στην εξίσωση (16). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παρουσιάζονται στον Πίνακας 2 και είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην αραιή μέθοδο βασισμένη σε τμήματα.

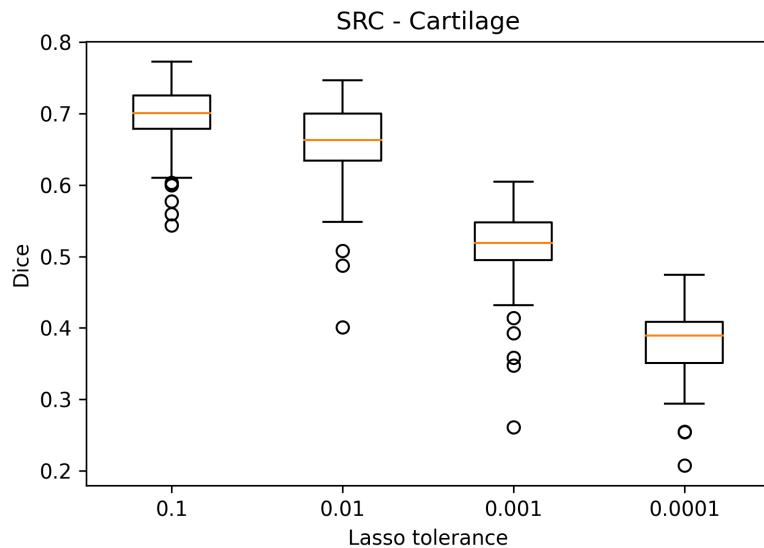
Στα Σχήμα 20, Σχήμα 21 και Σχήμα 22 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για τις τιμές της παραμέτρου λ που χρησιμοποιήθηκαν. Παρατηρείται, ιδίως στο Σχήμα 22, ότι για μικρότερες τιμές της παραμέτρου λ το αποτέλεσμα είναι καλύτερο. Γι' αυτό το λόγο, επιλέχτηκε η τιμή $\lambda = 0.1$.



Σχήμα 20: Μεταβολή της παραμέτρου λ της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα του παρασκηνίου.



Σχήμα 21: Μεταβολή της παραμέτρου λ της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των οστών.



Σχήμα 22: Μεταβολή της παραμέτρου λ της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των χόνδρων.

4.3.2 Τμήμα αναζήτησης

Αραιή μέθοδος βασισμένη σε τμήματα

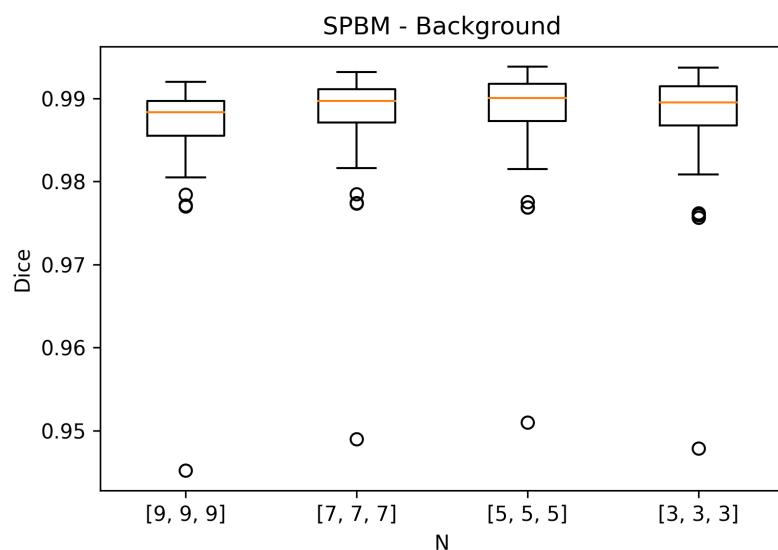
Τα πειράματα για την επιλογή του τμήματος αναζήτησης έγιναν με τις σταθερές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακας 3.

Παραμέτρος λ	0.01
Αριθμός ατλάντων	4
Τμήμα χαρακτηριστικών	[3,3,3]

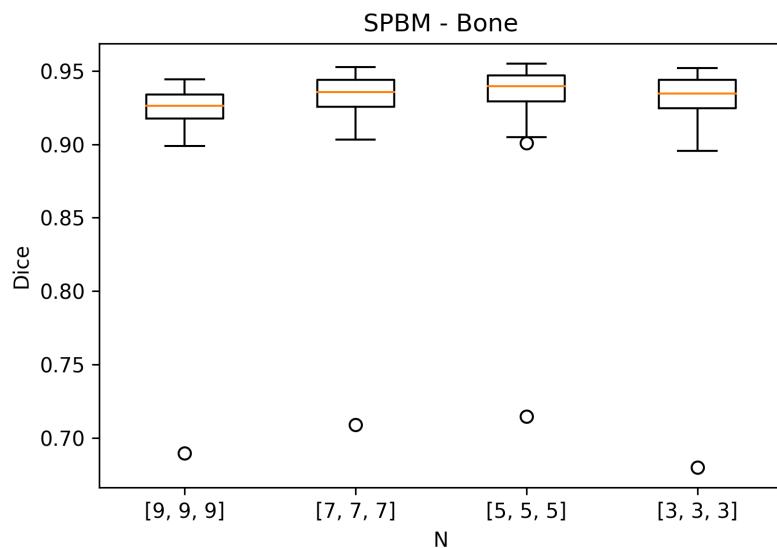
Πίνακας 3: Παραμέτροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος αναζήτησης της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα.

Στα Σχήμα 23, Σχήμα 24 και Σχήμα 25 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για διάφορες τιμές του τμήματος αναζήτησης. Παρατηρείται, κυρίως στο Σχήμα 25, ότι για μικρότερες τιμές του τμήματος το αποτέλεσμα είναι καλύτερο. Το γεγονός αυτό δεν είναι αναμενόμενο αφού θα περίμενε κανείς, το μέγεθος του τμήματος αναζήτησης και η ποιότητα του αποτελέσματος να είναι ανάλογα μεγέθη. Μία πιθανή εξήγηση είναι ότι το αποτέλεσμα της καταχώρισης είναι αρκετά καλό ώστε, τμήματα με κεντρικό εικονοστοιχείο μακριά

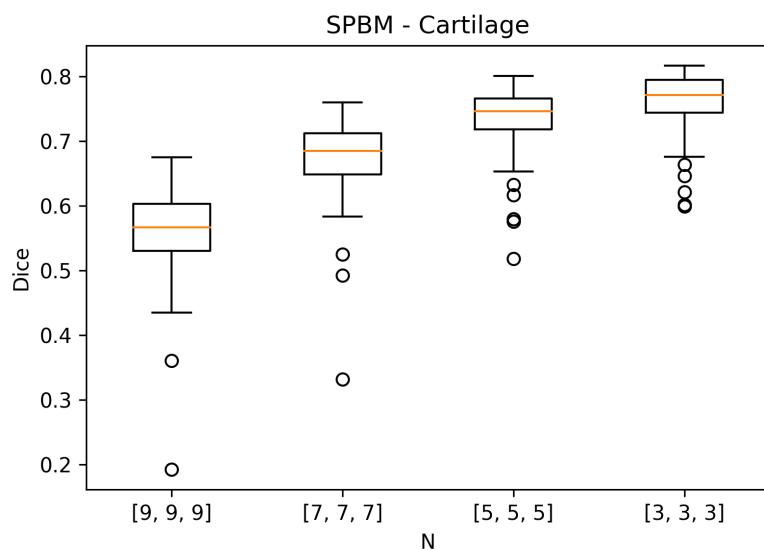
από το εικονοστοιχείο προς καταχώρηση να είναι ασυσχέτιστα με το εικονοστοιχείο αυτό, έτσι ώστε να θεωρούνται θόρυβος και να έχουν μόνο αρνητική επίδραση στο αποτέλεσμα. Η εξήγηση αυτή είναι λάθος διότι, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται στην κατάτυπη βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς. Οπότε, πιθανότατα αυτή η μέθοδος είναι πιο επιφερεπής στο θόρυβο. Για το λόγο αυτό επιλέχτηκε η τιμή [3, 3, 3] του τμήματος αναζήτησης.



Σχήμα 23: Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την επικέτα του παρασκευής.



Σχήμα 24: Μεταβολή του τυμάτος αναζήτησης της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τυμάτα για την ετικέτα των οστών.



Σχήμα 25: Μεταβολή του τυμάτος αναζήτησης της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τυμάτα για την ετικέτα των χόνδρων.

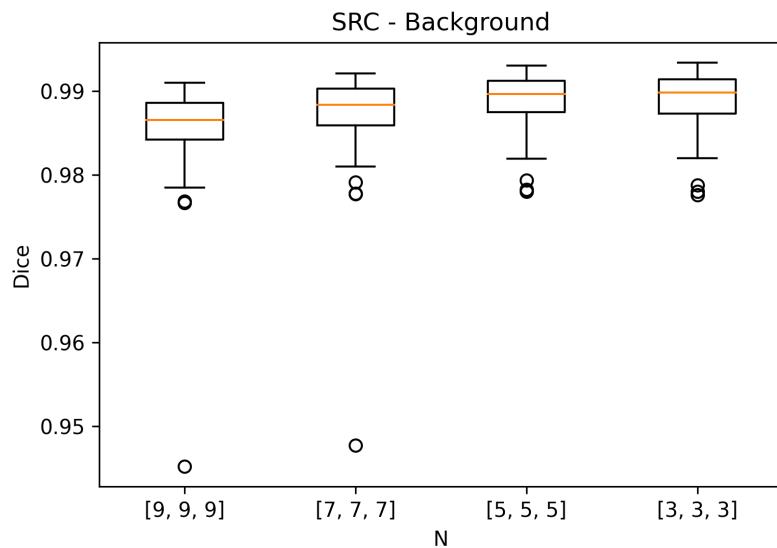
Ταξινόμηση αραιής αναπαράστασης

Τα πειράματα για την επιλογή του τμήματος αναζήτησης έγιναν με τις σταθερές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακας 4.

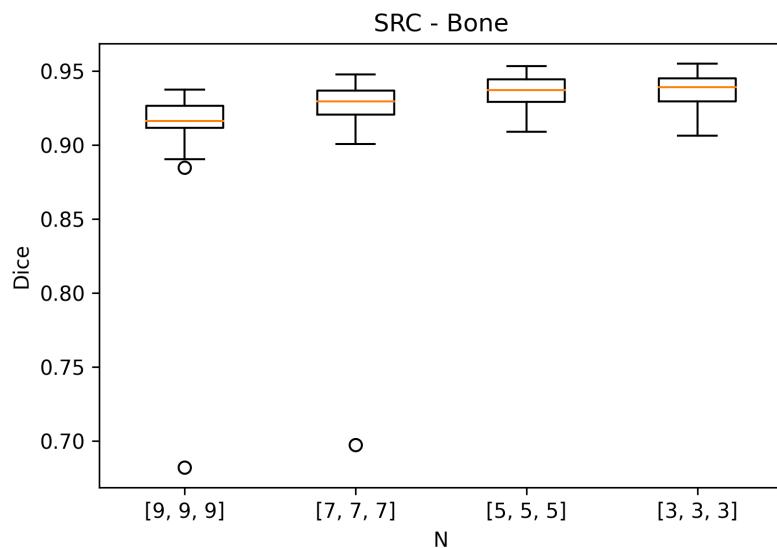
Παράμετρος λ	0.1
Αριθμός ατλάντων	4
Τμήμα χαρακτηριστικών	[3,3,3]

Πίνακας 4: Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος αναζήτησης της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης.

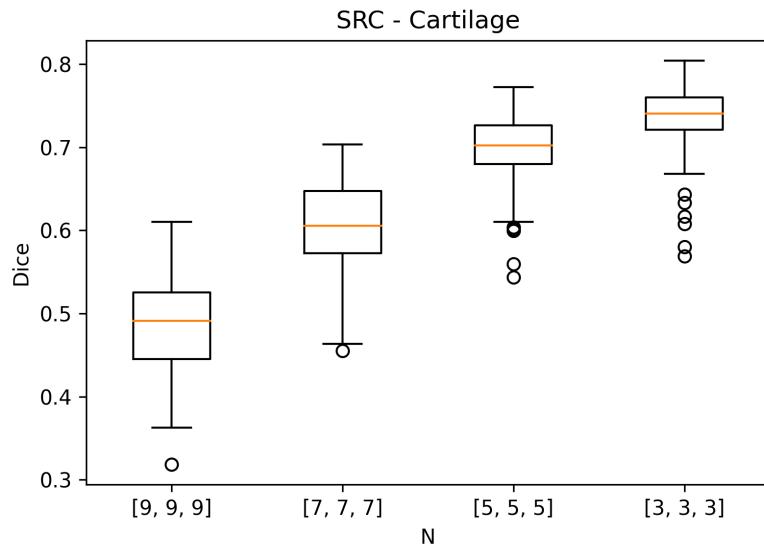
Στα Σχήμα 26, Σχήμα 27 και Σχήμα 28 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για διάφορες τιμές του τμήματος αναζήτησης. Παρατηρείται ότι το φαινόμενο που εμφανίζεται στην αραιή μέθοδος βασισμένη σε τμήματα όπου, για μικρότερες τιμές του τμήματος το αποτέλεσμα είναι καλύτερο, εμφανίζεται πιο έντονα και σε αυτή τη μέθοδο. Με τον ίδιο συλλογισμό που ακολουθήθηκε στην προηγούμενη μέθοδο, επιλέχτηκε η τιμή [3, 3, 3] του τμήματος αναζήτησης.



Σχήμα 26: Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την επικέτα του παρασκευή.



Σχήμα 27: Μεταβολή του τυμίματος αναζήτησης της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των οστών.



Σχήμα 28: Μεταβολή του τυμίματος αναζήτησης της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των χόνδρων.

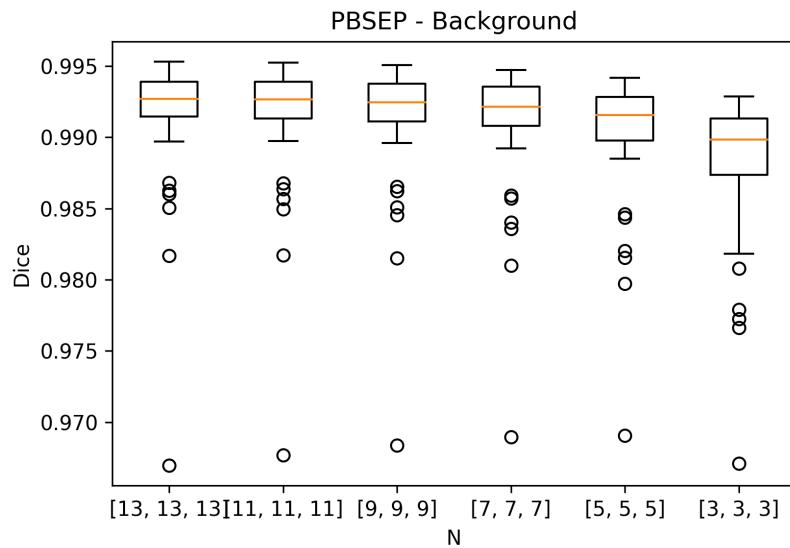
Κατάτυπη βασισμένη σε τυμίματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς

Τα πειράματα για την επιλογή του τμήματος αναζήτησης έγιναν με τις σταθερές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακας 5.

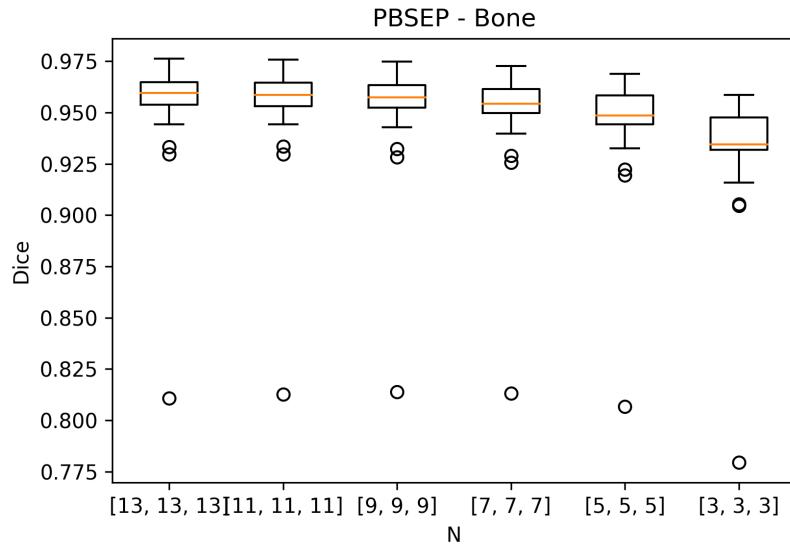
Αριθμός ατλάντων	4
Τμήμα χαρακτηριστικών	[3,3,3]

Πίνακας 5: Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος αναζήτησης για τη μέθοδο κατάτυπης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς.

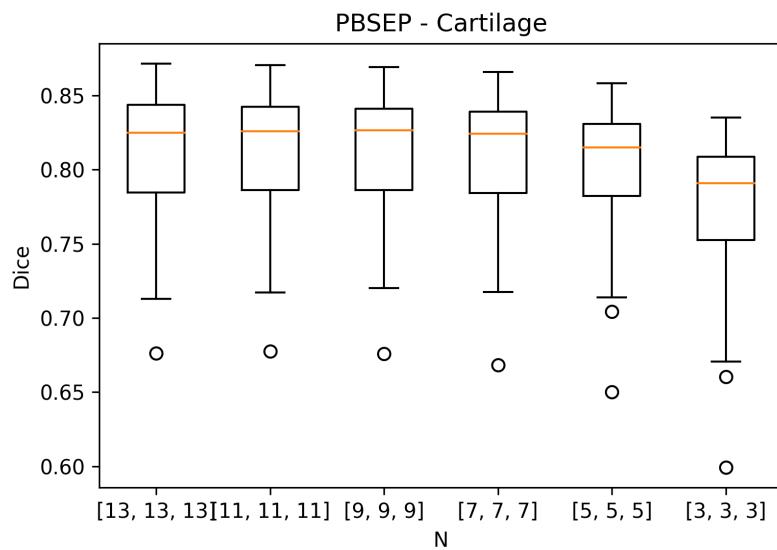
Στα Σχήμα 29, Σχήμα 30 και Σχήμα 31 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για διάφορες τιμές του τμήματος αναζήτησης. Παρατηρείται ότι για μεγαλύτερες τιμές του τμήματος αναζήτησης το αποτέλεσμα είναι καλύτερο. Όσο μεγαλώνει το τμήμα αναζήτησης η μεταβολή της απόδοσης είναι μικρότερη και για τιμή [7, 7, 7] μπαίνει. Για το λόγο αυτό και υπολογιστικής ταχύτητας επιλέχτηκε η τιμή [7, 7, 7] του τμήματος αναζήτησης.



Σχήμα 29: Μεταβολή του τμήματος αναζήτησης της μεθόδου κατάτυπης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την επιλογή του παρασκευήν.



Σχήμα 30: Μεταβολή του τιμήματος αναζήτησης της μεθόδου κατάτμησης βασισμένη σε τιμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των οστών.



Σχήμα 31: Μεταβολή του τιμήματος αναζήτησης της μεθόδου κατάτμησης βασισμένη σε τιμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των χόνδρων.

4.3.3 Τμήμα χαρακτηριστικών

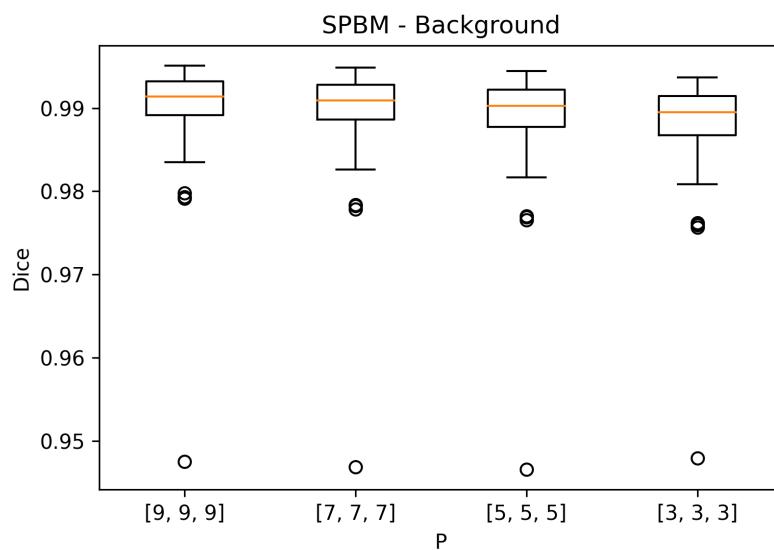
Αραιή μέθοδος βασισμένη σε τμήματα

Τα πειράματα για την επιλογή του τμήματος χαρακτηριστικών έγιναν με τις σταθερές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακας 6.

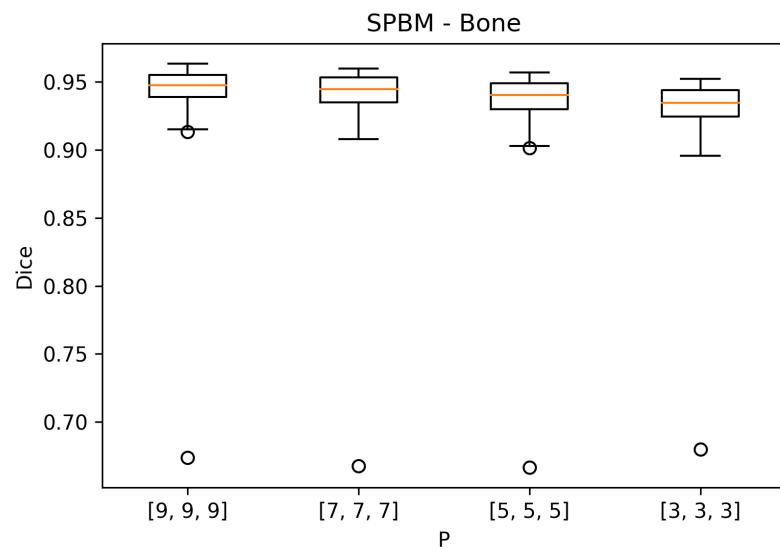
Παράμετρος λ	0.01
Αριθμός ατλάντων	4
Τμήμα αναζήτησης	[3,3,3]

Πίνακας 6: Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος χαρακτηριστικών της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα.

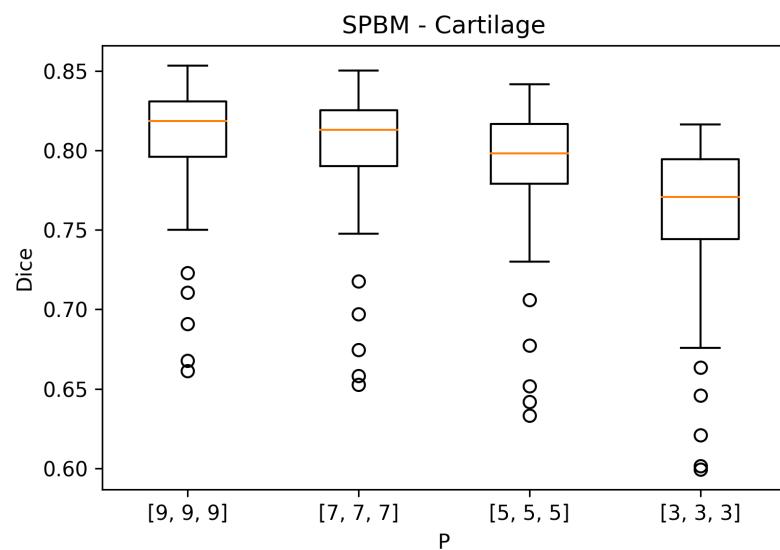
Στα Σχήμα 32, Σχήμα 33 και Σχήμα 34 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για διάφορες τιμές του τμήματος χαρακτηριστικών. Παρατηρείται, κυρίως στο Σχήμα 34, ότι για μεγαλύτερες τιμές του τμήματος χαρακτηριστικών το αποτέλεσμα είναι καλύτερο. Για το λόγο αυτό επιλέχτηκε η τιμή [9, 9, 9] του τμήματος χαρακτηριστικών.



Σχήμα 32: Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την ετικέτα του παρασκενίου.



Σχήμα 33: Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την επικέτα των οστών.



Σχήμα 34: Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τμήματα για την επικέτα των χόνδρων.

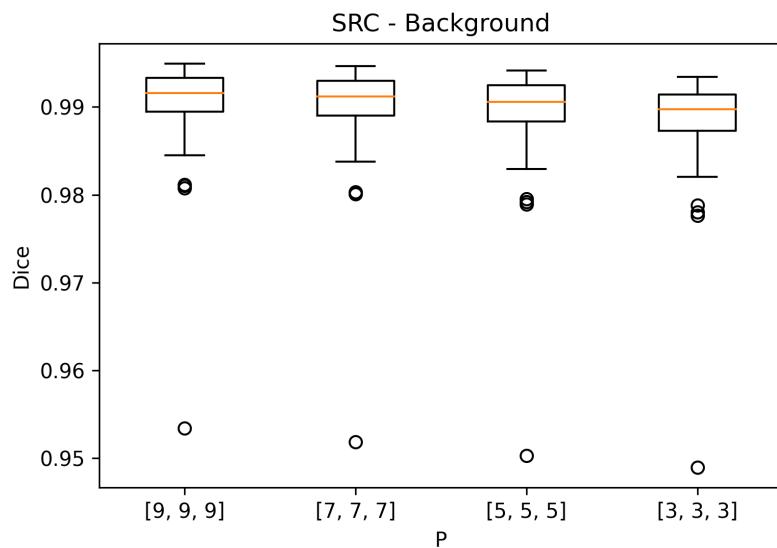
Ταξινόμηση αραιής αναπαράστασης

Τα πειράματα για την επιλογή του τμήματος χαρακτηριστικών έγιναν με τις σταθερές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακας 7.

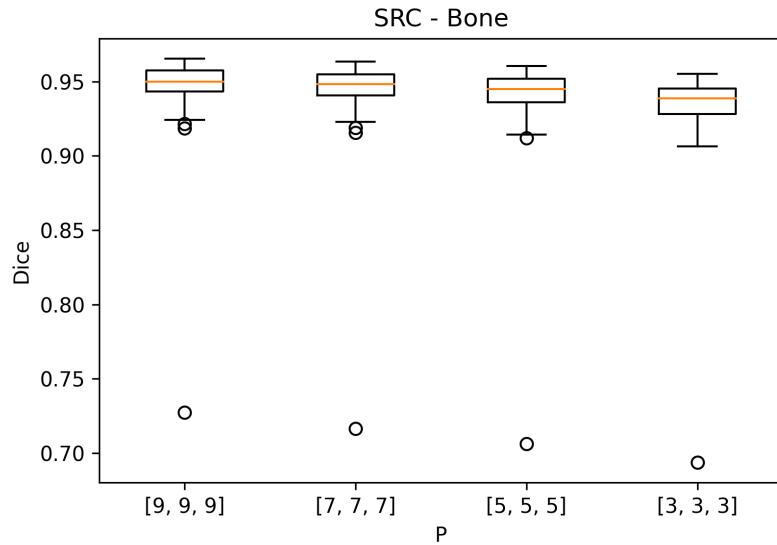
Παράμετρος λ	0.1
Αριθμός ατλάντων	4
Τμήμα αναζήτησης	[3,3,3]

Πίνακας 7: Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης.

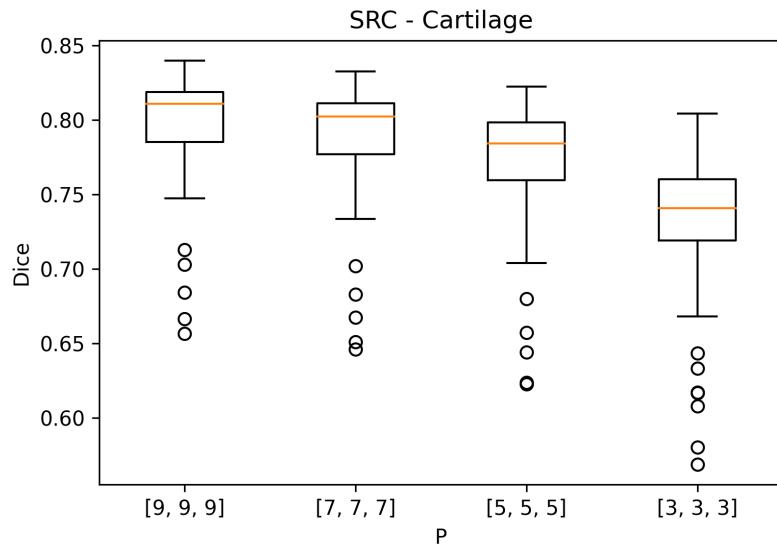
Στα Σχήμα 35, Σχήμα 36 και Σχήμα 37 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για διάφορες τιμές του τμήματος χαρακτηριστικών. Παρατηρείται, κυρίως στο Σχήμα 37, ότι για μεγαλύτερες τιμές του τμήματος χαρακτηριστικών το αποτέλεσμα είναι καλύτερο. Για το λόγο αυτό επιλέχτηκε η τιμή [9,9,9] του τμήματος χαρακτηριστικών.



Σχήμα 35: Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα του παρασκενίου.



Σχήμα 36: Μεταβολή του τιμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των οστών.



Σχήμα 37: Μεταβολή του τιμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα των χόνδρων.

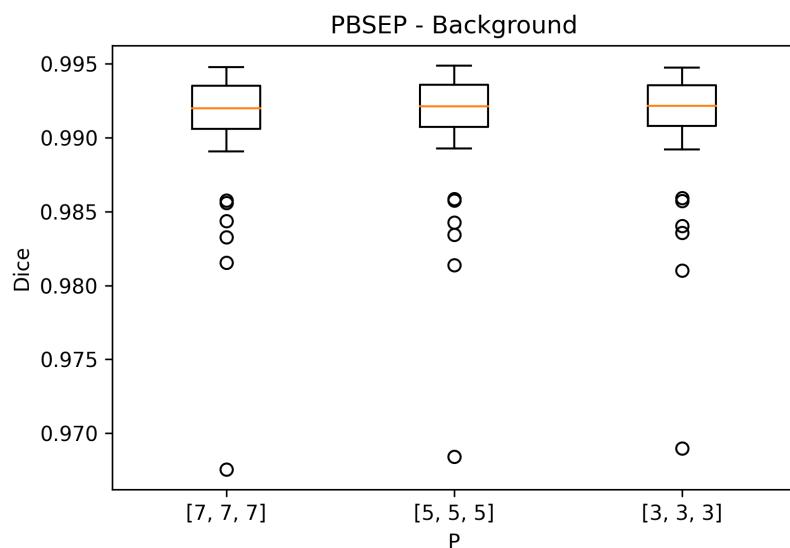
Κατάτυπη βασισμένη σε τιμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς

Τα πειράματα για την επιλογή του τμήματος χαρακτηριστικών έγιναν με τις σταθερές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακας 8.

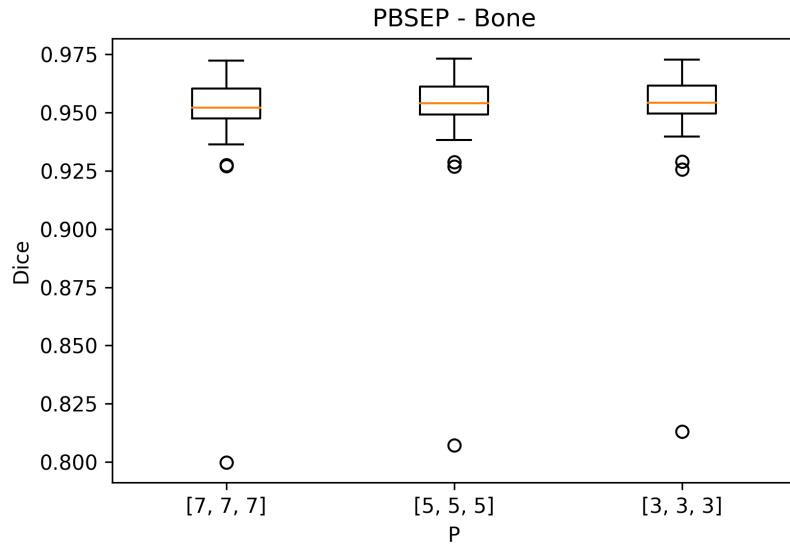
Αριθμός ατλάντων	4
Τμήμα χαρακτηριστικών	[7,7,7]

Πίνακας 8: Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του τμήματος χαρακτηριστικών για τη μέθοδο κατάτμησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς.

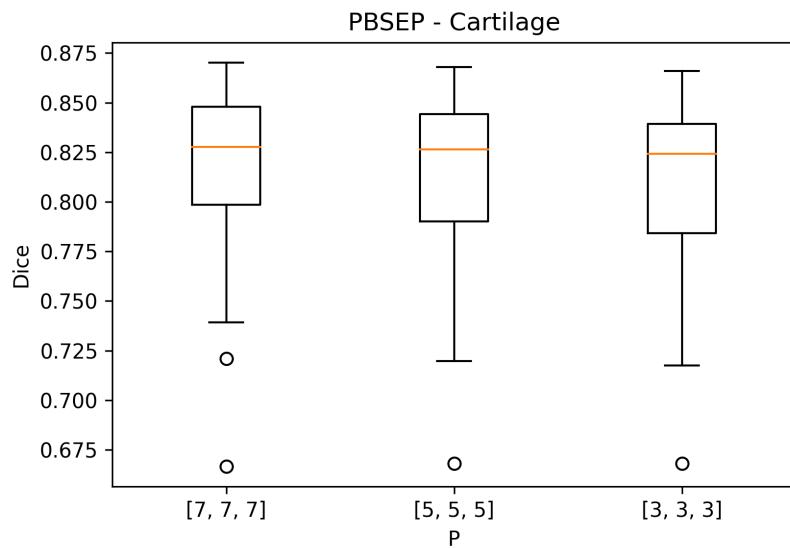
Στα Σχήμα 38, Σχήμα 39 και Σχήμα 40 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για διάφορες τιμές του τμήματος χαρακτηριστικών. Παρατηρείται ότι για όλες τις τιμές του τμήματος χαρακτηριστικών η απόδοση είναι παρόμοια. Για το λόγο αυτό και υπολογιστικής ταχύτητας επιλέχτηκε η τιμή [3, 3, 3] του τμήματος αναζήτησης.



Σχήμα 38: Μεταβολή του τμήματος χαρακτηριστικών της μεθόδου κατάτμησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα του παρασκενίου.



Σχήμα 39: Μεταβολή του τυμάτος χαρακτηριστικών της μεθόδου κατάτμησης βασισμένη σε τυμάτα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των οστών.



Σχήμα 40: Μεταβολή του τυμάτος χαρακτηριστικών της μεθόδου κατάτμησης βασισμένη σε τυμάτα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των χόνδρων.

4.3.4 Αριθμός ατλάντων

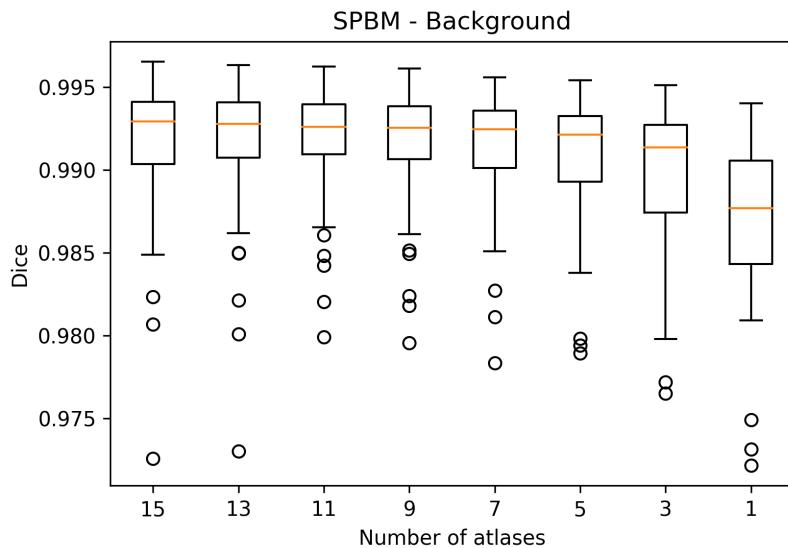
Αραιή μέθοδος βασισμένη σε τυμάτα

Τα πειράματα για την επιλογή του αριθμού των ατλάντων έγιναν με τις σταθερές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακας 9.

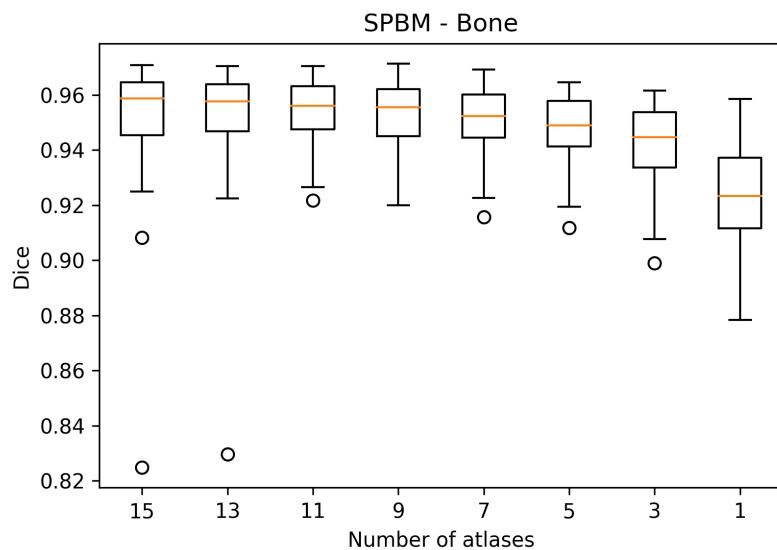
Παραμετρος λ	0.01
Τυμά αναζήτησης	[3,3,3]
Τυμά χαρακτηριστικών	[9,9,9]

Πίνακας 9: Παραμετροι που παραμένουν σταθεροι για την επιλογή του αριθμού των ατλάντων της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τυμάτα.

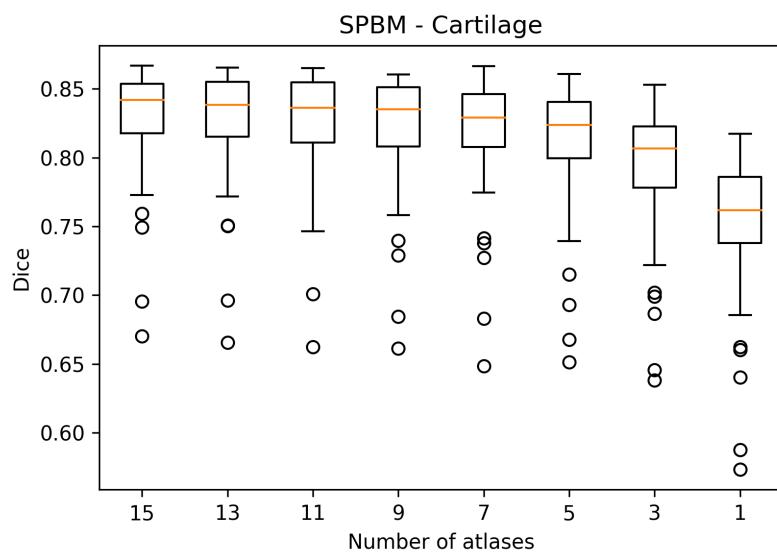
Στα Σχήμα 41, Σχήμα 42 και Σχήμα 43 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για διάφορες τιμές του αριθμού των ατλάντων. Παρατηρείται ότι για μεγαλύτερες τιμές του αριθμού των ατλάντων το αποτέλεσμα είναι καλύτερο. Επίσης, για 9 άτλαντες υπάρχει κορεσμός του αποτελέσματος. Για το λόγο αυτό επιλέχτηκε η τιμή 9 του αριθμού των ατλάντων.



Σχήμα 41: Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τυμάτα για την επιλογή των παρασκευών.



Σχήμα 42: Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τιμήματα για την επικέτα των οστών.



Σχήμα 43: Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της αραιής μεθόδου βασισμένης σε τιμήματα για την επικέτα των χόνδρων.

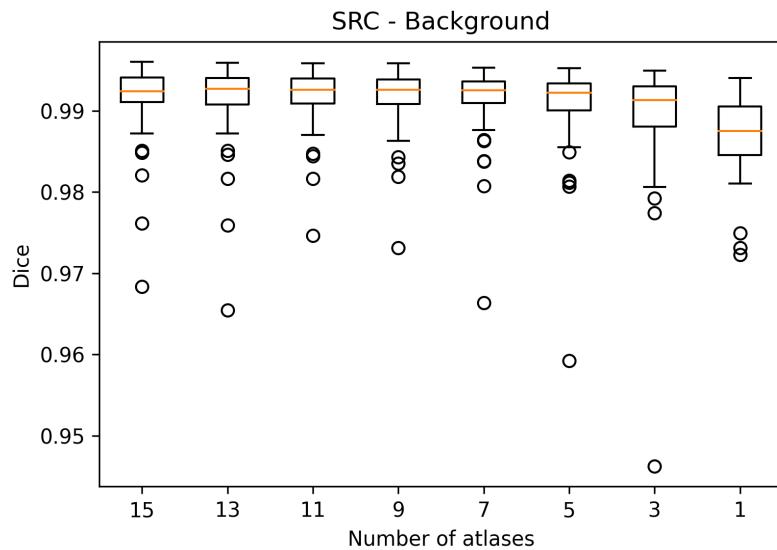
Ταξινόμηση αραιής αναπαράστασης

Τα πειράματα για την επιλογή του του αριθμού των ατλάντων έγιναν με τις σταθερές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακας 10.

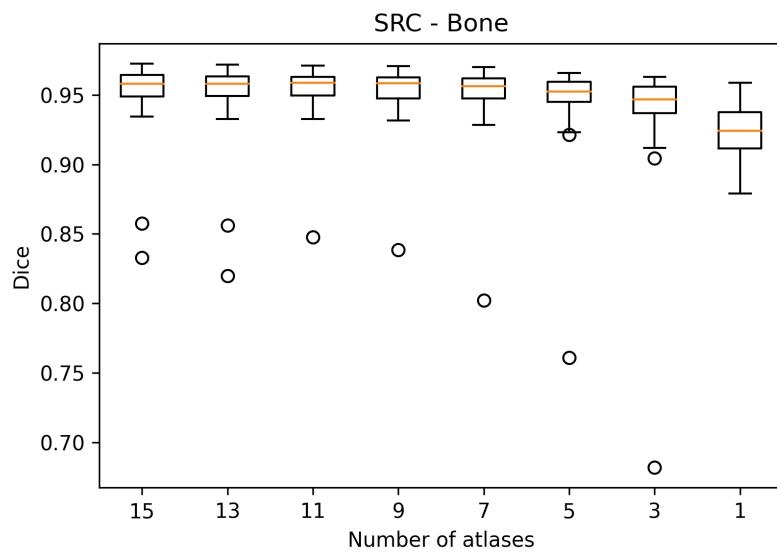
Παράμετρος λ	0.1
Τμήμα αναζήτησης	[3,3,3]
Τμήμα χαρακτηριστικών	[9,9,9]

Πίνακας 10: Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης.

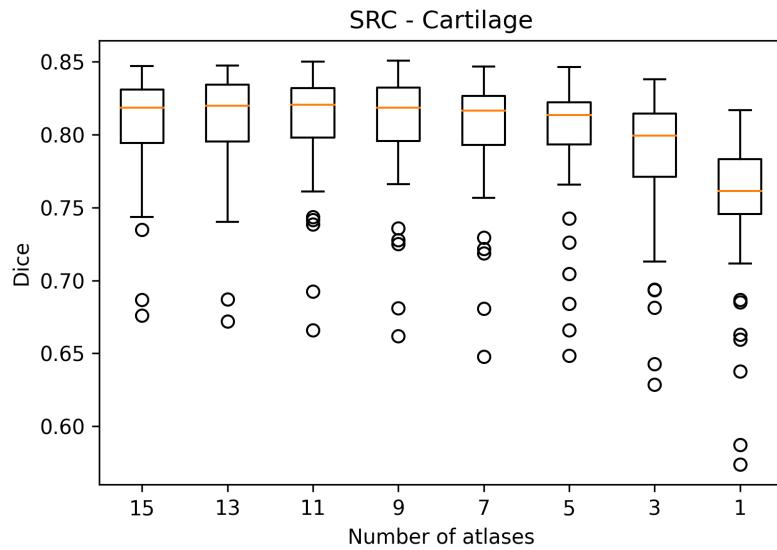
Στα Σχήμα 44, Σχήμα 45 και Σχήμα 46 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για διάφορες τιμές του αριθμού των ατλάντων. Παρατηρείται ότι για μεγάλες τιμές του αριθμού των ατλάντων το αποτέλεσμα είναι καλύτερο. Επίσης, όπως και στην αραιή μέθοδο βασισμένη σε τμήματα, για 9 άτλαντες υπάρχει κορεσμός του αποτελέσματος. Για το λόγο αυτό επιλέχτηκε η τιμή 9 του αριθμού των ατλάντων.



Σχήμα 44: Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την ετικέτα του παρασκενίου.



Σχήμα 45: Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την επικέτα των οστών.



Σχήμα 46: Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης για την επικέτα των χόνδρων.

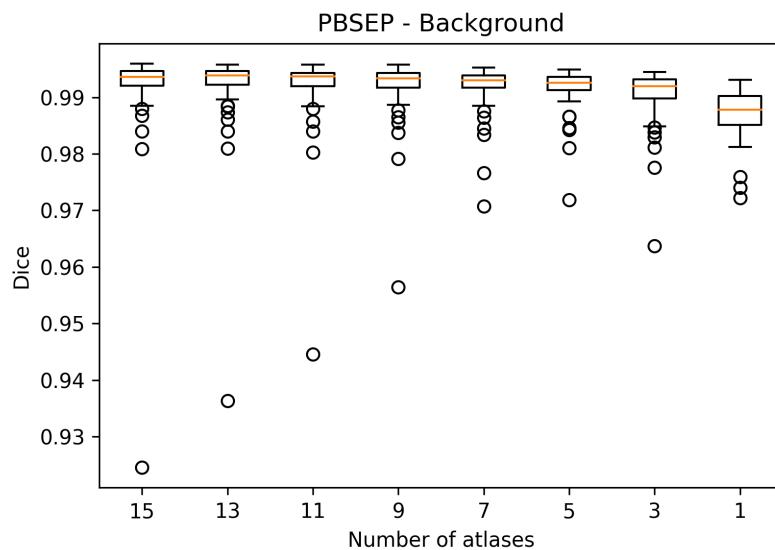
Κατάτυπη βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς

Τα πειράματα για την επιλογή του αριθμού των ατλάντων έγιναν με τις σταθερές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον Πίνακας 11.

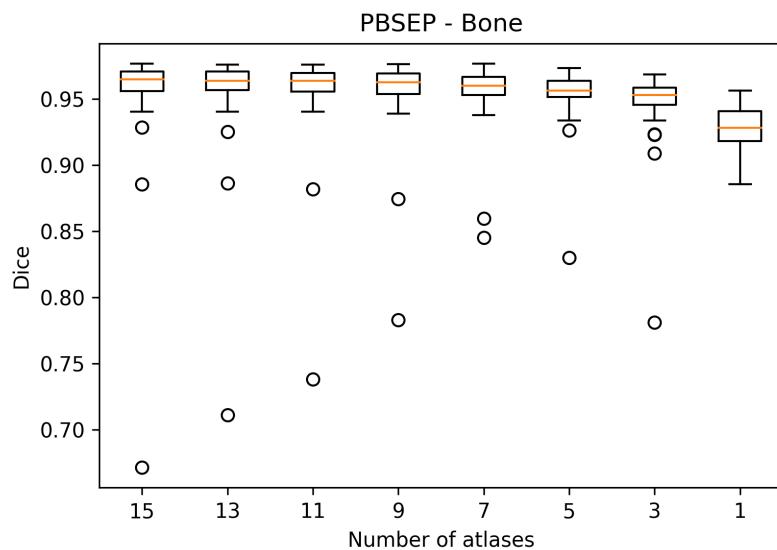
Τμήμα αναζήτησης	[7,7,7]
Τμήμα χαρακτηριστικών	[3,3,3]

Πίνακας 11: Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί για την επιλογή του αριθμού των ατλάντων για τη μέθοδο κατάτυπησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορία από ειδικούς.

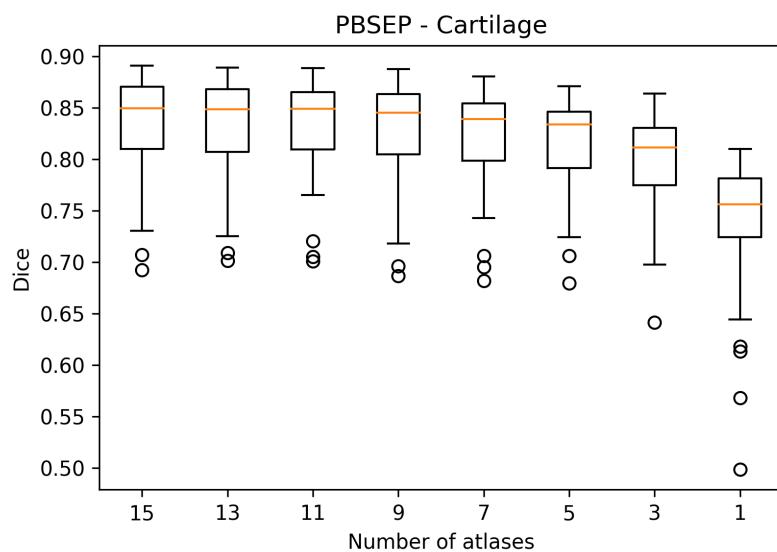
Στα Σχήμα 47, Σχήμα 48 και Σχήμα 49 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για διάφορες τιμές του αριθμού των ατλάντων. Παρατηρείται ότι για μεγαλύτερες τιμές του αριθμού των ατλάντων το αποτέλεσμα είναι καλύτερο. Επίσης, όπως και στις προηγούμενες μεθόδους, υπάρχει κορεσμός του αποτελέσματος για 9 ατλάντες. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η τιμή 9 για τον αριθμό των ατλάντων.



Σχήμα 47: Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου κατάτυπησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την επιλογή των παρασκενίου.



Σχήμα 48: Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου κατάτυπσης βασισμένη σε τμίματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των οστών.



Σχήμα 49: Μεταβολή του αριθμού των ατλάντων της μεθόδου κατάτυπσης βασισμένη σε τμίματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς για την ετικέτα των χόνδρων.

4.4 Σύγκριση μεθόδων

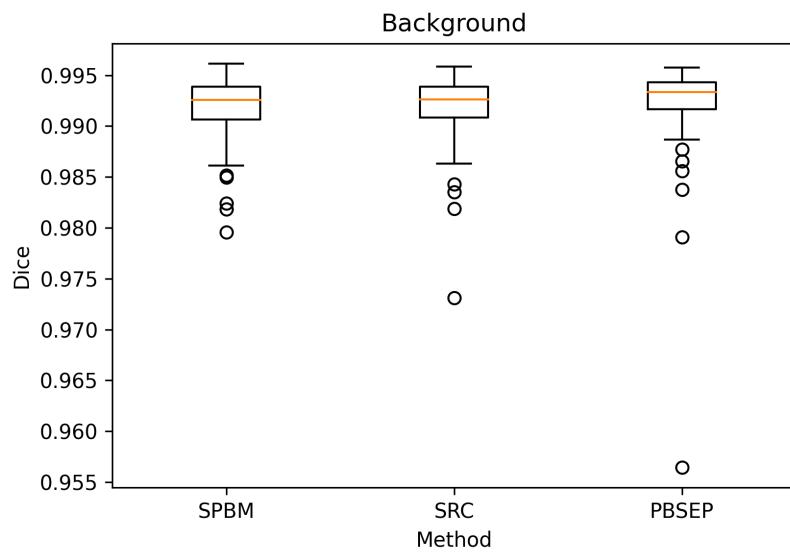
4.4.1 Σύγκριση απόδοσης

Στα Σχήμα 50, Σχήμα 51 και Σχήμα 52 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή ομοιότητας Dice για όλες τις μεθόδους. Παρατηρείται, ιδίως στο Σχήμα 52, ότι η μέθοδος κατάτμησης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς έχει το καλύτερο αποτέλεσμα. Ακόμα, παρατηρείται ότι η αραιή μέθοδος βασισμένη σε τμήματα έχει καλύτερο αποτέλεσμα στην ετικέτα των χόνδρων από την μέθοδο ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στην ετικέτα των οστών σε πιο μικρό βαθμό. Το αποτέλεσμα για την ετικέτα του παρασκενίου είναι παρόμοιο για όλες τις μεθόδους.

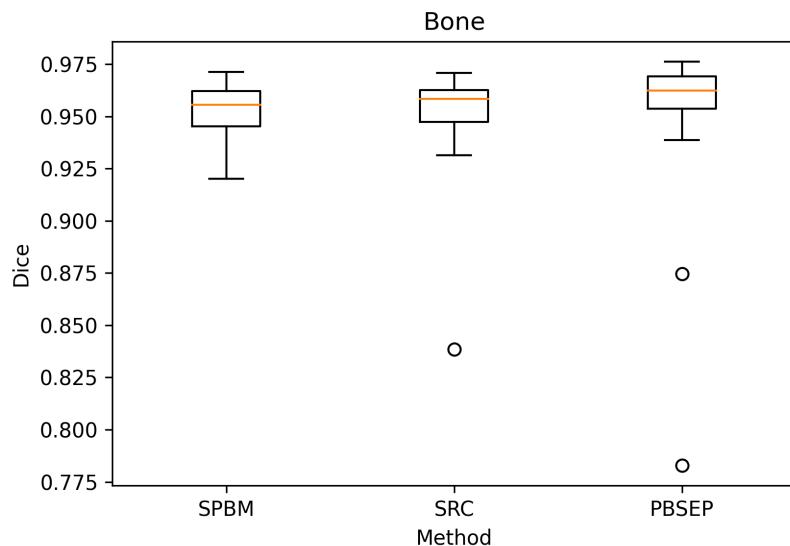
Ακόμα στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζονται πειράματα όπου το αποτέλεσμα τους είναι πολύ χειρότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα αποτελέσματα. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε απεικονίσεις που διαφέρουν σε σχέση με τους άτλαντες, είτε στη καταχώρηση και επιλογή των ατλάντων.

Στο Πίνακας 12 παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης τιμής και της διαμέσου για όλες τις ετικέτες και μεθόδους. Ο πίνακας αυτός επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου.

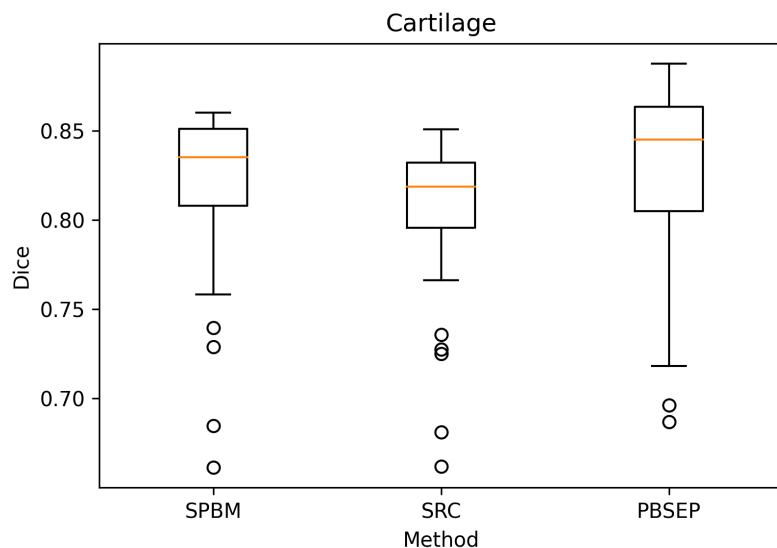
Τέλος, στα Σχήμα 53, Σχήμα 53 και Σχήμα 53 παρουσιάζεται το χειρότερο, μέσο και καλύτερο αποτέλεσμα βάση της ετικέτας των χόνδρων για κάθε μέθοδο.



Σχήμα 50: Για όλες τις μεθόδους η τιμή του συντελεστή ομοιότητας Dice για την επικέτα του παρασκηνίου.



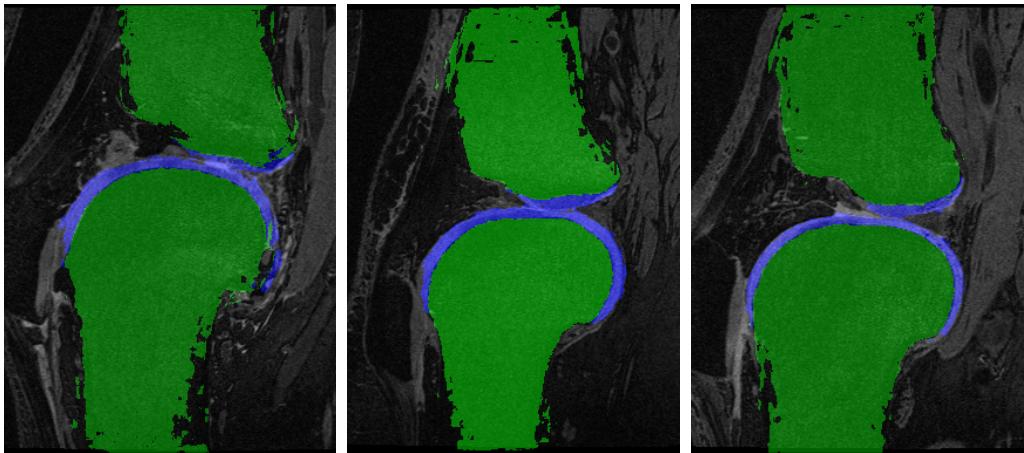
Σχήμα 51: Για όλες τις μεθόδους η τιμή του συντελεστή ομοιότητας Dice για την επικέτα των οστών.



Σχήμα 52: Για όλες τις μεθόδους η τιμή του συντελεστή ομοιότητας Dice για την επικέτα των χόνδρων.

Μέθοδος	Επικέτα	Μέσος όρος	Διάμεσος
SPBM	Παρασκήνιο	0.9914	0.9926
	Οστά	0.9521	0.9556
	Χόνδροι	0.8209	0.8352
SRC	Παρασκήνιο	0.9914	0.9926
	Οστά	0.9528	0.9585
	Χόνδροι	0.8056	0.8187
PBSEP	Παρασκήνιο	0.9916	0.9933
	Οστά	0.956	0.9624
	Χόνδροι	0.8281	0.8451

Πίνακας 12: Μέσος όρος και διάμεσος του συντελεστή ομοιότητας Dice για όλες τις μεθόδους και επικέτες.

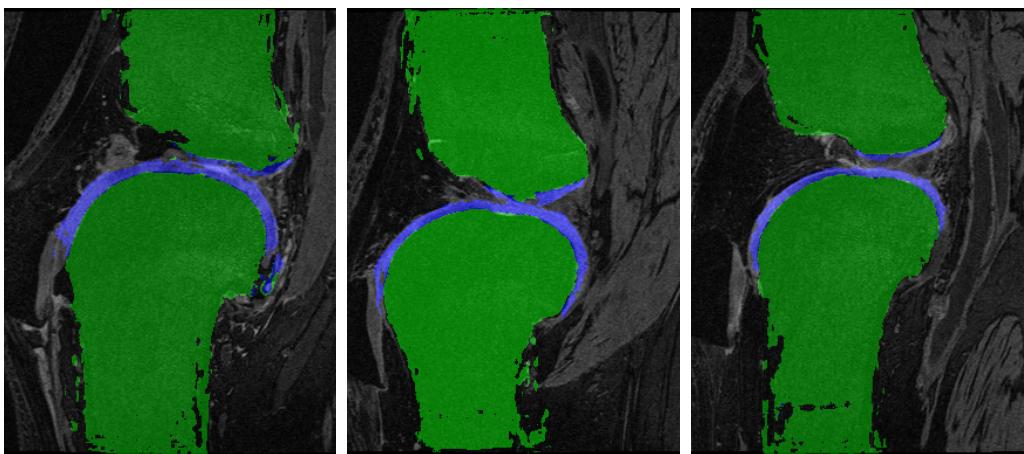


(I) Dice = 0.6614

(II) Dice = 0.8352

(III) Dice = 0.8604

Σχήμα 53: Το χειρότερο (αριστερά), μέσο (μέση) και καλύτερο (δεξιά) αποτέλεσμα, βάση της ετικέτας των χόνδρων, για την αραιή μέθοδο βασισμένη σε τυμάτα.

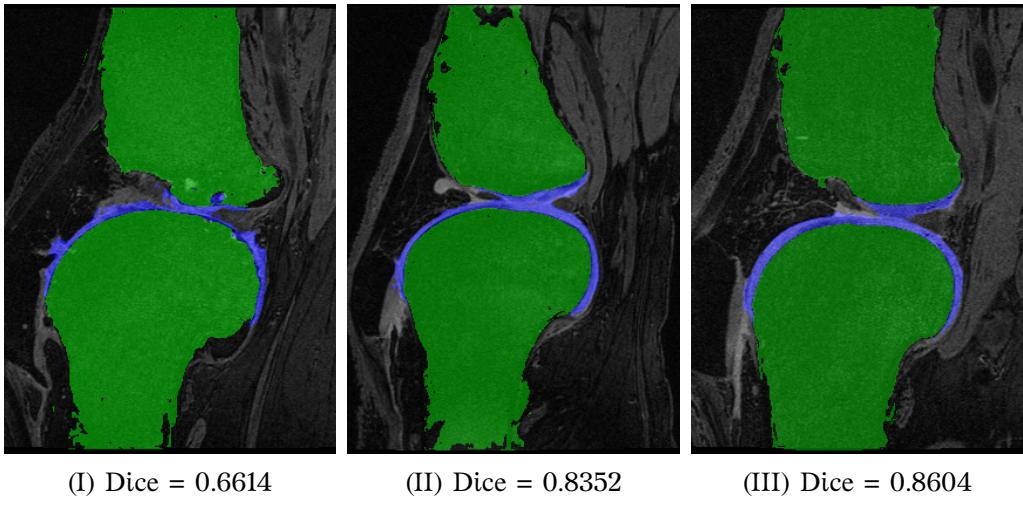


(I) Dice = 0.662

(II) Dice = 0.8187

(III) Dice = 0.8578

Σχήμα 54: Το χειρότερο (αριστερά), μέσο (μέση) και καλύτερο (δεξιά) αποτέλεσμα, βάση της ετικέτας των χόνδρων, για τη μέθοδο ταξινόμησης αραιής αναπαράστασης.



Σχήμα 55: Το χειρότερο (αριστερά), μέσο (μέση) και καλύτερο (δεξιά) αποτέλεσμα, βάση της επικέτας των χόνδρων, για τη μέθοδο κατάτυπσης βασισμένης σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς.

4.4.2 Σύγκριση χρόνου εκτέλεσης

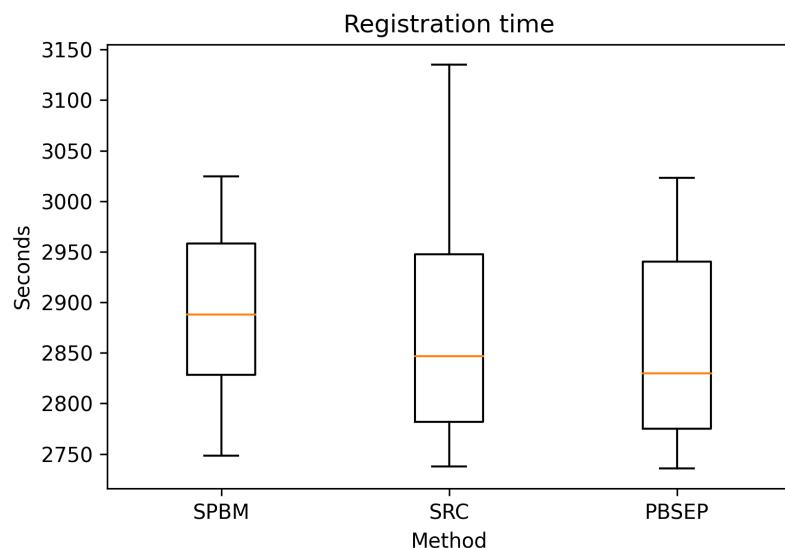
Τα πειράματα έτρεξαν σε υπολογιστή με επεξεργαστή τον *Intel(R) Core(TM) i9-7940X CPU @ 3.10GHz* και *126GB* μνήμη. Κάθε πείραμα έτρεχε σε ένα νήμα (thread) και για τον υπολογισμό των χρόνων έτρεχαν παράλληλα *14* νήματα (ένα για κάθε πείραμα).

Στο Σχήμα 56 παρουσιάζεται ο χρόνος εκτέλεσης για κάθε μέθοδο της προεπεξεργασίας (μαζί με το διάβασμα των αρχείων) και της καταχώρησης όλων των ατλάντων (*45* άτλαντες). Οι χρόνοι είναι παρόμοιοι αλλά υπάρχει μία μικρή διακύμανση. Επειδή ο κώδικας που υλοποιεί αυτό το κομμάτι για κάθε μέθοδο είναι ο ίδιος το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο.

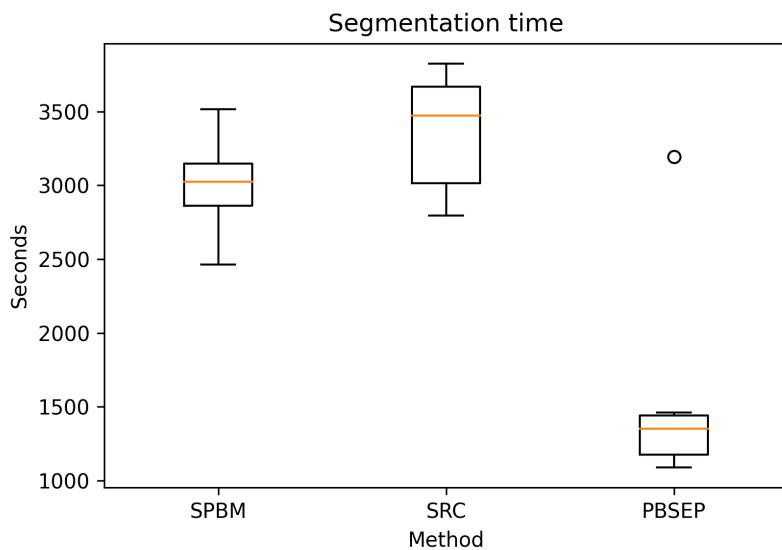
Στο Σχήμα 57 παρουσιάζεται αποκλειστικά ο χρόνος εκτέλεσης της κατάτυπσης (χωρίς ανάγνωση δεδομένων, προεπεξεργασία, καταχώρηση, αξιολόγηση και αποθήκευση του αποτελέσματος). Αρχικά, παρατηρείται ότι η μέθοδος κατάτυπσης βασισμένη σε τμήματα με τη χρήση πληροφορίας από ειδικούς είναι η πιο γρήγορη. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού είναι η πιο απλή μέθοδος αφού δεν περιλαμβάνει την επίλυση του ελάχιστα απόλυτου τελεστή συρρίκνωσης και επιλογής όπως οι άλλες μέθοδοι. Ακόμα, παρατηρείται ότι η αραιή μέθοδος βασισμένη σε τμήματα είναι πιο γρήγορη από τη μέθοδο ταξινόμησης αραιής αναπα-

ράστασης. Αυτό οφείλεται στη μοναδική διαφορά των μεθόδων δηλαδή, στον υπολογισμό της ετικέτας έχοντας τους συντελεστές ανοικοδόμησης.

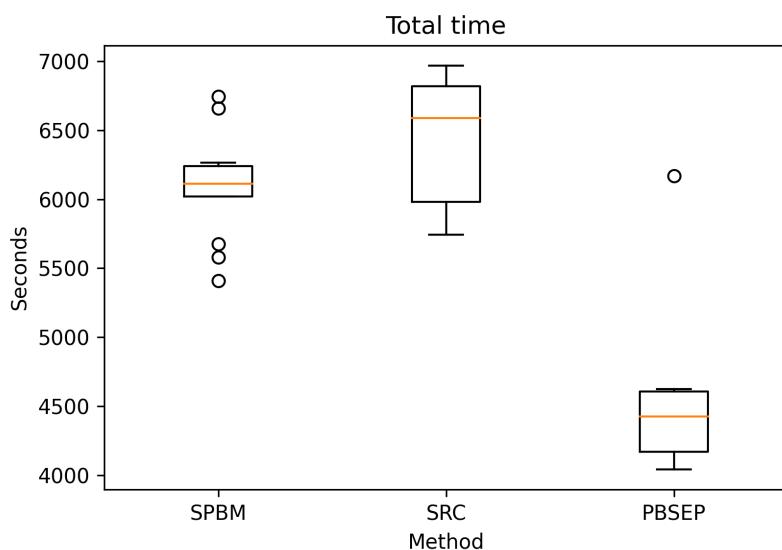
Στο Σχήμα 58 παρουσιάζεται ο χρόνος εκτέλεσης ολόκληρης της διαδικασίας της κατάτμησης για όλες τις μεθόδους. Επειδή η μόνη διαφορά στις μεθόδους είναι η διαδικασία της καταχώρησης, το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενα σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου.



Σχήμα 56: Ο χρόνος εκτέλεσης της προεπεξεργασίας και της καταχώρησης των ατλάντων για όλες τις μεθόδους.



Σχήμα 57: Ο χρόνος εκτέλεσης της κατάτμησης (χωρίς την προεπεξεργασία, την καταχώρηση, αξιολόγηση και αποθήκευση των αποτελεσμάτων) για όλες τις μεθόδους.



Σχήμα 58: Ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης ολόκληρης της διαδικασίας της κατάτμησης για όλες τις μεθόδους.

5 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

5.1 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μελετήθηκε η κατάτμηση των αρθρικών χόνδρων και οστών απεικονίσεων μαγνητικής τομογραφίας στη περιοχή των γονάτων με μεθόδους υπχανικής μάθησης. Εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι [2] [3] [4] που είχαν εφαρμοστεί στη περιοχή του εγκεφάλου. Και για τις τρεις μεθόδους χρησιμοποιήθηκε η ίδια μέθοδος προεπεξεργασίας και καταχώρησης.

Τα αποτελέσματα και των τριών μεθόδων ήταν ικανοποιητικά και εξαρτιόντουσαν κυρίως από την πολυπλοκότητα της ετικέτας (π.χ. τα αποτελέσματα για τα οστά ήταν πολύ καλύτερα σε σχέση με τα αποτελέσματα των χόνδρων σε όλες τις μεθόδους). Επίσης και στις τρεις μεθόδους υπήρχαν πειράματα που είχαν μικρές ακραίες τιμές (αρκετά κακό αποτέλεσμα σε σχέση με τα υπόλοιπα). Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην είτε στην επιλογή των ατλάντων, είτε στην καταχώρηση.

5.2 Μελλοντική εργασία

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε μόνο η κατάτμηση των αρθρικών χόνδρων και οστών. Για το λόγο αυτό θα μπορούσαν να μελετηθούν περισσότερες ανατομικές δομές στη περιοχή των γονάτων όπως ο μηνίσκος και οι σύνδεσμοι. Επίσης, η κατηγορίες που χρησιμοποιήθηκαν θα μπορούσαν να χωριστούν σε περισσότερες υποκατηγορίες (π.χ. να χωριστεί η κατηγορία του χόνδρου σε χόνδρου του μηρού και της κνήμης) ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια.

Θα μπορούσε να μελετηθεί περαιτέρω η διαδικασία της καταχώρησης και της επιλογή των ατλάντων ώστε να μειωθεί το φαινόμενο που αναφέρθηκε στο 5.1. Επίσης, θα μπορούσε να μελετηθεί περαιτέρω η προεπεξεργασία των δεδομένων επειδή, δεν δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην παρούσα διπλωματική εργασία, ώστε να βελτιωθεί το αποτέλεσμα.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Cabezas, A. Oliver, X. Lladó, J. Freixenet και M. Bach Cuadra, "A review of atlas-based segmentation for magnetic resonance brain images," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, τόμ. 104, αρθρ. 3, e158–e177, 2011, ISSN: 0169-2607. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2011.07.015>. διεύθυν.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169260711002033>.
- [2] D. Zhang, Q. Guo, G. Wu και D. Shen, *Sparse Patch-Based Label Fusion for Multi-Atlas Segmentation*, 2012.
- [3] T. Tong, R. Wolz, P. Coupé, J. V. Hajnal και D. Rueckert, "Segmentation of MR images via discriminative dictionary learning and sparse coding: Application to hippocampus labeling," *NeuroImage*, τόμ. 76, σσ. 11–23, 2013, ISSN: 1053-8119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.02.069>. διεύθυν.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811913002243>.
- [4] P. Coupé, J. V. Manjón, V. Fonov, J. Pruessner, M. Robles και D. L. Collins, "Patch-based segmentation using expert priors: Application to hippocampus and ventricle segmentation," *NeuroImage*, τόμ. 54, αρθρ. 2, σσ. 940–954, 2011, ISSN: 1053-8119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.09.018>. διεύθυν.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811910011997>.
- [5] R. Tibshirani, "Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso," *JOURNAL OF THE ROYAL STATISTICAL SOCIETY, SERIES B*, τόμ. 58, σσ. 267–288, 1994.
- [6] L. G. Brown, "A Survey of Image Registration Techniques," *ACM Computing Surveys*, τόμ. 24, σσ. 325–376, 1992.
- [7] B. Zitová και J. Flusser, "Image registration methods: a survey," *IMAGE AND VISION COMPUTING*, τόμ. 21, σσ. 977–1000, 2003.
- [8] S. Klein, J. P. W. Pluim, M. Staring και M. A. Viergever, "Adaptive stochastic gradient descent optimisation for image registration," *International Journal of Computer Vision*, σσ. 227–239, 2009.
- [9] H. Lester και S. Arridge, "A survey of hierarchical non-linear medical image registration," *Pattern Recognit.*, τόμ. 32, σσ. 129–149, 1999.
- [10] L. R. Dice, "Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species," *Ecology*, τόμ. 26, αρθρ. 3, σσ. 297–302, 1945. doi: 10.2307/1932409.

- [11] Z. Wang, A. Bovik, H. R. Sheikh και E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," *IEEE Transactions on Image Processing*, τόμ. 13, σσ. 600–612, 2004.
- [12] M. Sonka, V. Hlavac και R. Boyle, "Image pre-processing," στο *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. Boston, MA: Springer US, 1993, σσ. 56–111, ISBN: 978-1-4899-3216-7. doi: 10.1007/978-1-4899-3216-7_4. διεύθυν.: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3216-7_4.
- [13] L. G. Nyúl, J. K. Udupa και X. Zhang, "New variants of a method of MRI scale standardization," *IEEE Trans. Med. Imaging*, σσ. 143–150, 2000.
- [14] J. A. Sethian, *Advancing Interfaces: Level Set and Fast Marching Methods*, 1999.
- [15] P. Refaeilzadeh, L. Tang και H. Liu, "Cross-Validation," στο *Encyclopedia of Database Systems*, L. LIU και M. T. ÖZSU, επιμελητές. Boston, MA: Springer US, 2009, σσ. 532–538, ISBN: 978-0-387-39940-9. doi: 10.1007/978-0-387-39940-9_565. διεύθυν.: https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_565.