



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Επιτάχυνση Σημειακών Μεθόδων Ευθυγράμμισης  
Δεδομένων Χρησιμοποιώντας Κάρτες Γραφικών Γενικού  
Σκοπού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βαρνάβας Α. Βαρνάβα**

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

Αθήνα, Μάρτιος 2017





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Επιτάχυνση Σημειακών Μεθόδων Ευθυγράμμισης  
Δεδομένων Χρησιμοποιώντας Κάρτες Γραφικών Γενικού  
Σκοπού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βαρνάβας Α. Βαρνάβα**

**Επιβλέπων :** Γιώργος Ματσόπουλος  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1 Μαρτίου 2017

.....  
Γ. Ματσόπουλος  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....  
Κ. Νικήτα  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017

.....

**Βαρνάβας Α. Βαρνάβα**

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

Copyright © Βαρνάβας Α. Βαρνάβα, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Η ιατρική τεχνολογία αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια, αφού καθημερινά νέες τεχνολογίες είναι διαθέσιμες και βοηθούν τους γιατρούς παγκοσμίως να βελτιώνουν την ζωή των πολιτών και να σώζουν ζωές. Ένα σημαντικό μέρος της ιατρικής τεχνολογίας είναι η απεικόνιση των ιατρικών δεδομένων, τα οποία βοηθούν στη διάγνωση διαφόρων ασθενειών και σε επιστημονικές μελέτες για εξεύρεση θεραπειών. Αυτά τα ψηφιακά ιατρικά δεδομένα απεικόνισης, μπορούν πλέον να συγκρίνονται και να συνδυάζονται για την καλύτερη εκμετάλλευση των πληροφοριών που λαμβάνονται με τις διάφορες απεικονιστικές τεχνικές. Προκύπτει λοιπόν πολλές φορές η ανάγκη, να συγκριθούν δεδομένα που λήφθηκαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, για να διαφανεί η εξέλιξη των ασθενειών και τα αποτελέσματα των θεραπειών ενός ασθενή. Επιπλέον μπορούν να συγκριθούν εικόνες σε επιλεγμένες ομάδες του πληθυσμού για ερευνητικούς σκοπούς και για την βελτιστοποίηση των ιατρικών τεχνικών. Η ευθυγράμμιση αυτών των δεδομένων κρίνεται λοιπόν αναγκαία και χρειάζεται να είναι γρήγορη, ακριβής και αποτελεσματική.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται τεχνικές σημειακής ευθυγράμμισης για την ευθυγράμμιση ιατρικών δεδομένων, με ευρέως γνωστούς αλγόριθμους. Αυτοί οι αλγόριθμοι όμως έχουν περιορισμούς κατά την εφαρμογή τους σε συμβατικές μονάδες κεντρικής επεξεργασίας, λόγω κυρίως της πολυπλοκότητας τους και της μεγάλης μνήμης που απαιτείται για να εκτελεστούν. Για να αποφύγουμε τα προβλήματα αυτά, υλοποιούμε το πρόγραμμα ευθυγράμμισης με την βοήθεια του προγραμματιστικού μοντέλου CUDA (Compute Unified Device Architecture). Στα πλαίσια αυτής της εργασίας περιγράφεται η διαδικασία της ευθυγράμμισης, οι γεωμετρικοί περιγραφητές, το προγραμματιστικό μοντέλο CUDA και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση του προγράμματος ευθυγράμμισης με κάθετα διανύσματα και με FPFH (Fast Point Feature Histograms) στην γραφική μονάδα επεξεργασίας. Η ευθυγράμμιση επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλου γεωμετρικού μετασχηματισμού, που εξομαλύνει τις γεωμετρικές αποκλίσεις ανάμεσα στα δεδομένα. Ο μετασχηματισμός προκύπτει με την ταύτιση σημείων μεταξύ των δυο συνόλων δεδομένων. Η ταύτιση γίνεται εφικτή μέσω της σύγκρισης των σημείων με βάση τους γεωμετρικούς περιγραφητές, οι οποίοι περιέχουν πληροφορίες για τις γεωμετρικές ιδιότητες της περιοχής γύρω από κάθε σημείο. Έτσι τα σημεία περιγράφονται μοναδικά. Το προγραμματιστικό μοντέλο CUDA έχει εφευρεθεί από την NVIDIA και με την εκμετάλλευσή του, καλύπτεται η ανάγκη για γρηγορότερους υπολογισμούς. Το μοντέλο αυτό ανήκει στην οικογένεια του GPGPU (General Purpose Computing on Graphics Processing Units), δηλαδή γίνεται εφικτή η εκτέλεση προγραμμάτων γενικής χρήσης σε γραφικές μονάδες επεξεργασίας, που είναι πιο γρήγορες από τις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας. Η συνολική διαδικασία που ακολουθείται στην ευθυγράμμιση ιατρικών εικόνων με τη χρήση των δύο γεωμετρικών περιγραφητών αναπτύσσεται λεπτομερώς. Γίνεται παραλληλοποίηση των υπολογισμών εξαγωγής των περιγραφητών και μελέτη για τις παραμέτρους που εισάγονται στο πρόγραμμα για την βελτιστοποίησή του. Στο τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα ευθυγράμμισης ιατρικών απεικονιστικών δεδομένων με CPU και GPU και διαφαίνεται η σημαντικότητα του μοντέλου CUDA.

## Λέξεις κλειδιά

Ευθυγράμμιση, γεωμετρικοί περιγραφητές, NVIDIA CUDA, κάθετα διανύσματα, ιστογράμματα, νέφος σημείων, παραλληλισμός, γραφική μονάδα επεξεργασίας, GPGPU

# Abstract

Medical technology is rapidly developing in the recent years, since everyday new technologies are available and help doctors worldwide to improve the lives of citizens and to save lives. An important part of medical technology is the depiction of medical data, which helps in diagnosing diseases and in finding cures and new treatments. These digital medical data can now be compared and combined for better exploitation of the information that is collected from various acquisition methods. So the need for comparing data taken from different time periods emerges, so that the evolution of diseases or the results of a patient's treatments become transparent. Also, images taken from selected groups of people can be compared for research purposes and the optimization of medical practices. The alignment of these data therefore appears necessary and it needs to be fast, accurate and effective.

In this thesis point alignment techniques are used in order to align medical data, with the use of well-known algorithms. However these algorithms have limitations when applied to conventional central processing units, mainly due to their complexity and the large memory space required to run. To avoid these problems, we implement the alignment program with the help of the integrated programming model CUDA (Compute Unified Device Architecture). This thesis describes the alignment process, geometric descriptors, the programming model CUDA and the procedure followed for the implementation of the alignment program, with normal vectors and FPFH (Fast Point Feature Histograms) descriptors, in the graphics processing unit. The alignment is achieved by suitable geometric transformation, which normalizes the geometrical differences between the data. The transformation occurs by matching points between the two data sets. The identification is made possible through the comparison of the points on the basis of geometrical descriptors, which contain information on the geometric properties of the area around each point. Therefore the points are described individually. The CUDA programming model was invented by NVIDIA and by taking advantage of this model the need for faster calculations is met. This model belongs to the family of GPGPU (General Purpose Computing on Graphics Processing Units), meaning that it becomes possible to perform general-purpose programs in graphic processing units, which is faster than the CPUs. The overall procedure followed in the alignment of medical images using both geometric descriptors is discussed in detail. Parallelization of the descriptors export calculations and study of the parameters entered in the program for its optimization, are made in this thesis. In the end, the results of the alignment of medical imaging data with CPU and GPU are shown and the importance of the CUDA model is revealed.

## Keywords

Registration, geometric descriptors, NVIDIA CUDA, normals, histograms, point cloud, parallelism, GPU, GPGPU

# Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον Δρ. Γιώργο Ματσόπουλο Αν. Καθηγητή Ε.Μ.Π για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο και σημαντικό θέμα. Μεγάλες ευχαριστίες αποδίδω επίσης, στον υποψήφιο Δρ. Αντώνη Σάββα για τη αδιάκοπη στήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της περιόδου εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, οφείλω μεγάλη ευγνωμοσύνη, για όλη την βοήθεια και στήριξη που έλαβα κατά την διάρκεια των σπουδών μου, στην οικογένεια μου, στους φίλους και συμφοιτητές μου.



# Περιεχόμενα

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>IV</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	<b>V</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	<b>VII</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας .....	1
<b>2 Η ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ CUDA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Ορισμός.....	3
2.2 Συγκρίσεις.....	5
2.3 Εμβάθυνση στο μοντέλο CUDA .....	7
2.4 Πλεονεκτήματα.....	13
2.5 Περιορισμοί.....	13
2.6 Χαρακτηριστικά εκδόσεων.....	13
<b>3 ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>17</b>
3.1 Εισαγωγή – Ορισμός.....	17
3.2 Μέθοδοι Ευθυγράμμισης Δεδομένων.....	18
3.2.1 Διαστάσεις Γεωμετρικού Μετασχηματισμού.....	19
3.2.2 Είδος Γεωμετρικού Μετασχηματισμού.....	19
3.2.2.1 Συμπαγής.....	20
3.2.2.2 Τύπου Affine.....	20
3.2.2.3 Προβολικός.....	21
3.2.2.4 Καμπυλόγραμμος.....	21
3.2.3 Η Βάση της Ευθυγράμμισης.....	21
3.2.3.1 Εξωγενή Χαρακτηριστικά.....	22
3.2.3.2 Ενδογενή Χαρακτηριστικά.....	23
3.2.3.2.1 Μέθοδοι με Βάση τα Σημεία.....	23
3.2.3.2.2 Μέθοδοι Τμηματοποίησης.....	25
3.2.3.2.3 Μέθοδοι Βασιζόμενες στη Φωτεινότητα.....	26
3.2.4 Περιοχή Εφαρμογής του Μετασχηματισμού.....	27
3.2.5 Κατηγορίες δεδομένων.....	28
3.2.6 Το Υποκείμενο της Ευθυγράμμισης.....	28
3.2.7 Το Αντικείμενο της Ευθυγράμμισης.....	28
3.2.8 Αυτοματοποίηση και Διαδραστικότητα.....	28
3.2.9 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης και Τεχνικές Αναζήτησης.....	28
3.3 Κριτήρια Αξιολόγησης Τεχνικών Ευθυγράμμισης.....	29
3.3.1 Συνάρτηση Επιτυχίας.....	30
3.3.1.1 Άθροισμα της Απόλυτης Διαφοράς Χρωματικών Πυκνοτήτων.....	30
3.3.1.2 Συντελεστής Συσχέτισης Χρωματικών Πυκνοτήτων.....	31
3.3.1.3 Διαφορά Εντροπίας.....	31
3.3.1.4 Συντελεστής Αμοιβαίας Πληροφορίας.....	31
3.3.2 Αποτίμηση Τεχνικών Ευθυγράμμισης.....	32
3.3.2.1 Ακρίβεια (Precision and Accuracy).....	32
3.3.2.2 Ευρωστία-Ευστάθεια.....	32

3.3.2.3 Αξιοπιστία.....	32
3.3.2.4 Απαιτήσεις και Ανάγκες - Αλγοριθμική Πολυπλοκότητα.....	32
3.3.2.5 Κλινική Χρησιμότητα.....	33
<b>4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗΣ ΜΕ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΤΕΣ.....</b>	<b>35</b>
4.1 Εισαγωγή .....	35
4.2 Μεθοδολογία Ευθυγράμμισης Βασισμένη σε Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.....	36
4.2.1 Γεωμετρικοί Περιγραφητές (Feature Descriptors).....	36
4.2.1.1 Γεωμετρικός Περιγραφητής Κάθετων Διανυσμάτων (Normals).....	37
4.2.1.2 Fast Point Feature Histograms (FPFH).....	39
4.2.2 Εύρεση Σημειακών Αντιστοιχιών (Correspondence Estimation).....	41
4.2.3 Απόρριψη Λανθασμένων Σημειακών Αντιστοιχιών (Correspondence Rejection).....	43
4.2.4 Υπολογισμός και Εφαρμογή του Μετασχηματισμού.....	45
4.2.5 Συνάρτηση Μέτρησης Σφάλματος.....	47
<b>5 ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΣΤΗΝ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ.....</b>	<b>49</b>
5.1 Εισαγωγή.....	49
5.2 Μεθοδολογία ευθυγράμμισης με γεωμετρικούς περιγραφητές.....	50
5.3 Υπολογισμός κάθετων διανυσμάτων (Normals) στην GPU.....	51
5.3.1 Εύρεση γειτονικών σημείων για τα υπό εξέταση σημεία.....	52
5.3.2 Υπολογισμός κέντρου βάρους και πίνακα συνδιασποράς.....	53
5.3.3 Υπολογισμός ιδιοτιμών, ιδιοδιανυσμάτων και αντιστροφή φοράς κάθετου διανύσματος.....	56
5.4 Υπολογισμός FPFH στην GPU.....	57
5.4.1 Εύρεση γειτονικών σημείων για τα υπό εξέταση σημεία – FPFH.....	58
5.4.2 Υπολογισμός SPFH.....	59
5.4.3 Υπολογισμός FPFH.....	62
5.5 Αποκλίσεις λόγω περιορισμών έκδοσης CUDA και κάρτας γραφικών....	63
5.6 Βέλτιστη ακτίνα αναζήτησης γειτόνων.....	66
5.6.1 Ακτίνα για Normals.....	66
5.6.2 Ακτίνα για FPFH.....	71
5.7 Ευθυγράμμιση και αποτελέσματα συγκρίσεων.....	76
5.8 Συμπεράσματα.....	81
<b>6 ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>85</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>87</b>

# Κατάλογος εικόνων

ΣΧΗΜΑ 1 : ΛΟΓΟΤΥΠΟ NVIDIA CUDA.....	3
ΣΧΗΜΑ 2 : ΛΟΓΟΤΥΠΟ GPGPU.....	3
ΣΧΗΜΑ 3 : ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ NVIDIA, GeFORCE 88000 (G80), ΜΕΤΡΗΜΕΝΟ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ CPU ΔΥΟ ΠΥΡΗΝΩΝ (2.66 GHz), ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΟ ΣΕ ΠΟΛΥΠΛΟΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ GPGPU.....	4
ΣΧΗΜΑ 4 : ΠΡΑΞΕΙΣ ΚΙΝΗΤΗΣ ΥΠΟΔΙΑΣΤΟΛΗΣ (ΜΟΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΠΛΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ) ΑΝΑ ΔΕΥΤΕΡΟΛΕΠΤΟ ΓΙΑ ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ (CPU) ΚΑΙ ΓΙΑ ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ (GPU).....	5
ΣΧΗΜΑ 5 : ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΗ ΜΝΗΜΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ (CPU) ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ (GPU) ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΑΣΜΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΕΟΤΕΡΩΝ ΕΚΔΟΣΕΩΝ.....	6
ΣΧΗΜΑ 6 : Η ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ (GPU), ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ (CPU), ΠΟΥ ΑΦΙΕΡΩΝΕΙ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	6
ΣΧΗΜΑ 7 : ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ CUDA ΔΟΜΕΙΤΑΙ ΜΕ ΤΕΤΟΙΟ ΤΡΟΠΟ ΕΤΣΙ ΩΣΤΕ ΝΑ ΕΠΙΤΡΕΠΕΙ ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΚΛΙΜΑΚΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑ, ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΟ ΥΛΙΚΟ (HARDWARE).....	8
ΣΧΗΜΑ 8 : ΔΥΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΛΕΓΜΑ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΔΥΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΠΛΟΚ ΝΗΜΑΤΩΝ.....	10
ΣΧΗΜΑ 9 : ΙΕΡΑΡΧΙΑ ΜΝΗΜΗΣ.....	11
ΣΧΗΜΑ 10 : ΕΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ.....	12
ΣΧΗΜΑ 11 : ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΕΙ Η ΚΑΘΕ ΕΚΔΟΣΗ.....	14
ΣΧΗΜΑ 12 : ΠΡΑΞΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΕΙ Η ΚΑΘΕ ΕΚΔΟΣΗ.....	15
ΣΧΗΜΑ 13 : ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΜΕ ΤΕΣΣΕΡΑ ΒΗΜΑΤΑ. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΩΝ, ΤΑΥΤΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΟΥΣ ΑΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΙΣ, ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ, ΑΝΑΔΕΙΓΜΑΤΟΛΕΙΨΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ.....	18
ΣΧΗΜΑ 14 : ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ, ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΑΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΙΣ.....	19
ΣΧΗΜΑ 15 : ΕΙΔΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	20
ΣΧΗΜΑ 16 : (Α) ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΓΚΕΦΑΛΟΥ ΤΗΣ ΙΑΕΑ (ΔΙΕΘΝΗΣ ΈΝΩΣΗ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ), (Β) ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΓΚΕΦΑΛΟΥ.....	21
ΣΧΗΜΑ 17 : ΣΤΕΡΕΟΣΤΑΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	22
ΣΧΗΜΑ 18 : FIDUCIAL MARKERS ΕΠΕΜΒΑΤΙΚΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΑ ΣΤΟ ΚΡΑΝΙΟ ΤΟΥ ΑΣΘΕΝΗ .....	23
ΣΧΗΜΑ 19 : ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΑΝΑΤΟΜΙΚΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΓΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΥΠΟ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ (FLOATING IMAGE) ΜΕ ΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (REFERENCE IMAGE) .....	24
ΣΧΗΜΑ 20 : ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ CT ΚΑΙ PET ΓΙΑ ΕΞΕΤΑΣΗ ΑΣΘΕΝΗ ΜΕ ΚΑΡΚΙΝΟ.....	25
ΣΧΗΜΑ 21 : ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΚΑΤΑΤΜΗΣΗ, ΤΗΣ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΙ ΜΕΣΑΙΑΣ ΕΙΚΟΝΑΣ (SEGMENTATION BASED REGISTRATION). ΔΕΞΙΑ Η ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΜΕΝΗ ΕΙΚΟΝΑ .....	26
ΣΧΗΜΑ 22 : ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΟΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΙΚΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΕΙΚΟΝΑ.....	27
ΣΧΗΜΑ 23 : ΚΑΘΕΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ (NORMALS) ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΣΤΙΣ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ.....	37

ΣΧΗΜΑ 24 : ΣΗΜΕΙΑΚΑ ΝΕΦΗ ΜΕ ΚΑΘΕΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ ΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΦΟΡΩΝ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΣΦΑΙΡΑ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ (NORMAL SPHERE) .....	38
ΣΧΗΜΑ 25 : ΣΗΜΕΙΑΚΑ ΝΕΦΗ ΜΕ ΚΑΘΕΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΦΟΡΩΝ ΠΡΟΣ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΣΦΑΙΡΑ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ (NORMAL SPHERE) .....	39
ΣΧΗΜΑ 26 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΓΩΝΙΩΝ $\alpha$ , $\phi$ , $\theta$ ΕΝΟΣ ΖΕΥΓΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ $p_s$ ΚΑΙ $p_t$ , ΜΑΖΙ ΜΕ ΤΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΚΑΘΕΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ ΤΟΥΣ $n_s$ ΚΑΙ $n_t$ , ΣΕ ΕΝΑ ΑΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ $u, v, w$ .....	40
ΣΧΗΜΑ 27 : ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΜΕΡΟΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΚΑΘΕ SPFH ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΟΥ ΤΕΛΙΚΟΥ FPFH ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ $p_Q$ . ΟΙ ΓΕΙΤΟΝΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΕΙ Η ΑΚΤΙΝΑ ΕΝΩΝΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ $p_Q$ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΤΑΙ ΤΟ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ SPFH. ΚΑΘΕ ΓΕΙΤΟΝΙΚΟ ΣΗΜΕΙΟ $p_k$ , ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΑ ΙΔΙΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ, ΣΥΝΔΕΕΤΑΙ ΜΕ ΤΑ ΓΕΙΤΟΝΙΚΑ ΤΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΤΑ ΕΚΑΣΤΟΤΕ SPFH. ΟΙ ΜΑΥΡΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΥΠΟΔΗΛΩΝΟΥΝ ΣΥΝΔΕΞΕΙΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΕΙ ΔΥΟ ΦΟΡΕΣ.....	41
ΣΧΗΜΑ 28 : ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΤΟ KD-TREE ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΓΙΑ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΜΟΡΦΗ ΔΥΑΔΙΚΟΥ ΔΕΝΤΡΟΥ ΚΑΙ ΣΤΑ ΔΕΞΙΑ Η ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΧΩΡΟΥ ΜΕ ΤΗΝ KNN ΜΕΘΟΔΟ. ....	42
ΣΧΗΜΑ 29 : ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΗΜΕΙΑΚΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΩΝ ΓΙΑ ΔΥΟ ΝΕΦΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ RANSAC.....	44
ΣΧΗΜΑ 30 : ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΗΜΕΙΑΚΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΩΝ ΓΙΑ ΔΥΟ ΝΕΦΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ RANSAC.....	45
ΣΧΗΜΑ 31 : ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗΣ ΜΕ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΤΕΣ.....	50
ΣΧΗΜΑ 32 : ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ.....	52
ΣΧΗΜΑ 33 : ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ.....	53
ΣΧΗΜΑ 34 : ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΟΣ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΕΠΕΙΤΑ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΒΑΡΟΥΣ .....	54
ΣΧΗΜΑ 35 : ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΚΑ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΣΥΝΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ .....	55
ΣΧΗΜΑ 36 : ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΤΕΛΙΚΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΝΕΦΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣ ΕΞΕΤΑΣΗ.....	56
ΣΧΗΜΑ 37 : ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ FPFH.....	57
ΣΧΗΜΑ 38 : ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥΣ ΑΠΟ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ.....	59
ΣΧΗΜΑ 39 : ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ SPFH.....	61
ΣΧΗΜΑ 40 : ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ FPFH ΓΙΑ ΤΟ ΝΕΦΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΠΡΟΣ ΕΞΕΤΑΣΗ.....	63
ΣΧΗΜΑ 41 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΡΩΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX 750 Ti.....	67
ΣΧΗΜΑ 42 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΡΩΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX TITAN X.....	67
ΣΧΗΜΑ 43 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX 750 Ti.....	68

ΣΧΗΜΑ 44 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX TITAN X.....	68
ΣΧΗΜΑ 45 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX 750 Ti, ΜΕ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΜΕΝΗ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑ.....	69
ΣΧΗΜΑ 46 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX TITAN X, ΜΕ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΜΕΝΗ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑ.....	70
ΣΧΗΜΑ 47 : ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX 750 Ti, ΜΕ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΜΕΝΗ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑ.....	70
ΣΧΗΜΑ 48 : ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX TITAN X, ΜΕ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΜΕΝΗ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑ.....	71
ΣΧΗΜΑ 49 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΡΩΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ FPFH ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX 750 Ti.....	73
ΣΧΗΜΑ 50 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΡΩΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ FPFH ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX TITAN X.....	73
ΣΧΗΜΑ 51 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ FPFH ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX 750 Ti.....	74
ΣΧΗΜΑ 52 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ FPFH ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX TITAN X.....	74
ΣΧΗΜΑ 53 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ FPFH ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX 750 Ti, ΜΕ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΜΕΝΗ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑ.....	75
ΣΧΗΜΑ 54 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΕΥΤΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ FPFH ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX TITAN X, ΜΕ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΜΕΝΗ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑ.....	75
ΣΧΗΜΑ 55 : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΕΛΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΚΑΘΕΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΕ CPU (PCL) ΚΑΙ GPGPU.....	76
ΣΧΗΜΑ 56 : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΚΑΘΕΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΕ CPU (PCL) ΚΑΙ GPGPU.....	77
ΣΧΗΜΑ 57 : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΧΡΟΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΚΑΘΕΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΕ CPU (PCL) ΚΑΙ GPGPU.....	77

ΣΧΗΜΑ 58 : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΕΛΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ <b>FRFH</b> ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΕ CPU (PCL) ΚΑΙ GPGPU .....	78
ΣΧΗΜΑ 59 : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ <b>FRFH</b> ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΕ CPU (PCL) ΚΑΙ GPGPU .....	79
ΣΧΗΜΑ 60 : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΧΡΟΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ <b>FRFH</b> ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΕ CPU (PCL) ΚΑΙ GPGPU .....	79
ΣΧΗΜΑ 61 : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΧΡΟΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΔΥΟ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΤΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΕ CPU (PCL) ΚΑΙ GPGPU ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ.....	81
ΣΧΗΜΑ 62 : ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑΚΑ ΝΕΦΗ ΤΟΥ ΑΣΘΕΝΗ #1, ΠΡΙΝ (ΠΡΑΣΙΝΟ) ΚΑΙ ΜΕΤΑ (ΚΟΚΚΙΝΟ) ΤΗΝ ΕΓΧΕΙΡΗΣΗ ΤΟΥ.....	82
ΣΧΗΜΑ 63 : ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑΚΑ ΝΕΦΗ ΤΟΥ ΑΣΘΕΝΗ #1, ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ <b>FRFH</b> (79.43% ΒΕΛΤΙΩΣΗ).....	83
ΣΧΗΜΑ 64 : ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑΚΑ ΝΕΦΗ ΤΟΥ ΑΣΘΕΝΗ #1, ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ (77.04% ΒΕΛΤΙΩΣΗ) .....	83

## Κατάλογος πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 : ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΥΡΕΣΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΤ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 2, ΜΕ ΑΚΤΙΝΑ 1 CM ΣΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX 750 Ti.....	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 : ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΥΡΕΣΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΤ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 2, ΜΕ ΑΚΤΙΝΑ 1 CM ΣΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX TITAN X.....	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 : ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΥΡΕΣΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ FPFH ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΤ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 2, ΜΕ ΑΚΤΙΝΑ 1 CM ΣΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX 750 Ti.....	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 : ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΥΡΕΣΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ FPFH ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΤ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 2, ΜΕ ΑΚΤΙΝΑ 1 CM ΣΤΗΝ ΚΑΡΤΑ ΓΡΑΦΙΚΩΝ NVIDIA GeForce GTX TITAN X.....	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 : ΠΡΩΤΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΚΑΘΕΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΥΟ ΚΑΡΤΕΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ.....	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 : ΠΡΩΤΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ FPFH ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΥΟ ΚΑΡΤΕΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ.....	72





# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η επιτάχυνση των σημειακών μεθόδων ευθυγράμμισης ιατρικών απεικονιστικών δεδομένων. Υπάρχει πλήθος τρόπων ευθυγράμμισης τόσο σε CPU όσο και σε GPU. Όμως ακόμα δεν υπάρχει μια καθαρά ανώτερη προσέγγιση όσον αφορά όλες τις παραμέτρους των ευθυγραμμίσεων. Δηλαδή, αν μια προσέγγιση είναι πολύ γρήγορη, τότε μάλλον κάνει υποδειγματοληψία, ενώ αν είναι πολύ ακριβής τότε παίρνει αρκετό χρόνο. Πάντα δηλαδή, θυσιάζεται μια πτυχή για την βελτίωση των υπολοίπων. Στην εργασία αυτήν λοιπόν λύνεται αυτό το πρόβλημα καθώς ο χρόνος εκτέλεσης, η ακρίβεια και η βελτίωση ευθυγράμμισης είναι σε πλεονέκτημα. Δεν αφήνονται πίσω δεδομένα που δεν θα χρησιμοποιηθούν, βρίσκονται οι καλύτερες παράμετροι προγράμματος για την καλύτερη ακρίβεια και χρησιμοποιείται η πλατφόρμα CUDA σε συνδυασμό με νέες προσεγγίσεις παραλληλισμού που καθιστούν την όλη διαδικασία πολύ γρήγορη. Επίσης το πρόγραμμα είναι ευέλικτο αφού χρησιμοποιεί πολύ λίγη προσωρινή μνήμη κατά την εκτέλεση και μπορεί να τρέξει σε όλες τις κάρτες γραφικών της NVIDIA χωρίς κανένα πρόβλημα.

Αναλύονται φυσικά στην εργασία, οι τρόποι με τους οποίους ευθυγραμμίζονται τα δεδομένα και το εργαλείο που χρησιμοποιούμε για την επιτάχυνση αυτών των μεθόδων, η CUDA. Έτσι μπορεί ο αναγνώστης να κατανοήσει τον πολύ μεγάλο όγκο των υπό εξέταση δεδομένων και το μεγάλο υπολογιστικό κόστος που έχουν οι συμβατικές μέθοδοι. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τέτοιες μέθοδοι μπορεί να χρησιμοποιούν και τεχνικές υποδειγματοληψίας των δεδομένων, όμως η απώλεια της διαθέσιμης πληροφορίας μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες στην ακρίβεια. Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάζεται αλγόριθμος υπολογισμού του γεωμετρικού περιγραφητή κάθετων διανυσμάτων και του γεωμετρικού περιγραφητή FPFH με την βοήθεια της CUDA για την διασφάλιση σημαντικής ακρίβειας στην ευθυγράμμιση των υπό εξέταση δεδομένων και πραγματοποιείται σύγκριση χρόνου τερματισμού και ακρίβειας με τις συμβατικές κεντρικές μονάδες επεξεργασίας.

## 1.2 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Στο **κεφάλαιο 2** αναλύεται η πλατφόρμα για παράλληλους υπολογισμούς γενικού σκοπού CUDA (Compute Unified Device Architecture), η οποία έχει εφευρεθεί από την NVIDIA και με τη χρήση της γίνεται δυνατή η δραματική αύξηση της υπολογιστικής απόδοσης, ως αποτέλεσμα της εκμετάλλευσης της ισχύος που είναι ικανή να προσφέρει η μονάδα επεξεργασίας γραφικών. Στο **κεφάλαιο 3** γίνεται ανάλυση των μεθόδων ευθυγράμμισης δεδομένων και παρουσιάζονται οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται. Αναφέρονται επίσης τα κριτήρια με βάση τα οποία γίνεται ταξινόμηση των μεθόδων αυτών. Επίσης παρουσιάζονται οι συναρτήσεις επιτυχίας και τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιεί μια τεχνική ευθυγράμμισης ώστε να εφαρμοστεί στην πράξη.

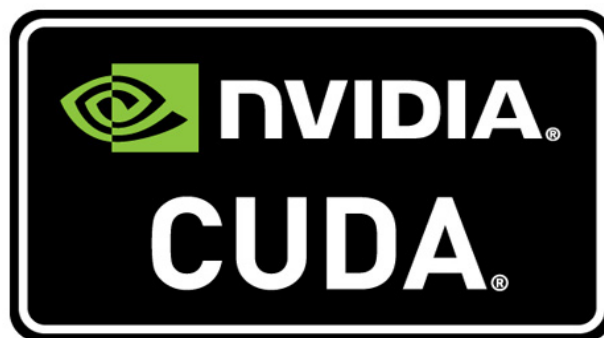
Στο **κεφάλαιο 4** παρατίθενται οι μέθοδοι ευθυγράμμισης τρισδιάστατων σημειακών νεφών, με την χρήση γεωμετρικών περιγραφητών. Αναλύονται τα επιμέρους βήματα της μεθοδολογίας αυτής, τα οποία είναι ο υπολογισμός των γεωμετρικών περιγραφητών, η εύρεση αντίστοιχων σημείων, η απόρριψη λανθασμένων αντίστοιχων σημείων, ο υπολογισμός και η εφαρμογή του μετασχηματισμού και η επιλογή της συνάρτησης σφάλματος. Επιπρόσθετα, εξετάζονται εκτενώς οι γεωμετρικοί περιγραφητές και ο τρόπος κατασκευής τους.

Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η συνολική ροή της διαδικασίας που ακολουθείται στην επιτάχυνση της ευθυγράμμιση ιατρικών εικόνων με τη χρήση των γεωμετρικών περιγραφητών. Αναλύεται ο τρόπος παραλληλοποίησης του αλγορίθμου υπολογισμού των περιγραφητών, ο οποίος εκτελείται στις πολυνηματικές, γραφικές μονάδες επεξεργασίας. Παρουσιάζεται επίσης, η μελέτη για τις βέλτιστες παραμέτρους που εισάγονται στον αλγόριθμο και μας δίνουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Τέλος παρατίθεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της εκτέλεσης ευθυγράμμισης με περιγραφητές στην CPU και με τον αλγόριθμο παραλληλισμού. Στο **κεφάλαιο 6** σχολιάζονται και αναφέρονται πιθανές επεκτάσεις και μελλοντικές βελτιώσεις στην εκμετάλλευση των γραφικών μονάδων επεξεργασίας, για την ευθυγράμμιση ιατρικών απεικονιστικών δεδομένων.

# 2 Η υπολογιστική πλατφόρμα CUDA

## 2.1 Ορισμός

Η πλατφόρμα CUDA (Compute Unified Device Architecture) είναι μια υπολογιστική πλατφόρμα παράλληλης επεξεργασίας και μοντέλο διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών (API) που δημιουργήθηκε από την Nvidia [1]. Η πλατφόρμα CUDA είναι ένα στρώμα λογισμικού που δίνει άμεση πρόσβαση στα εικονικά σύνολα εντολών μια μονάδας επεξεργασίας γραφικών (Graphics Processing Unit - GPU) και τα παράλληλα υπολογιστικά στοιχεία της, για την εκτέλεση των υπολογιστικών πυρήνων [2]. Επιτρέπει στους προγραμματιστές λογισμικού και μηχανικούς λογισμικού να χρησιμοποιήσουν μια μονάδα επεξεργασίας γραφικών, με την δυνατότητα CUDA, για επεξεργασίες γενικού σκοπού, μια προσέγγιση που ονομάζεται GPGPU (επεξεργασία γενικού σκοπού με την χρήση γραφικών μονάδων). Έτσι αυξάνεται δραματικά η υπολογιστική απόδοση, λόγω της εκμετάλλευσης της ισχύος που είναι ικανή να προσφέρει η μονάδα επεξεργασίας γραφικών. Εκατομμύρια μονάδες επεξεργασίας γραφικών πωλούνται ανά το κόσμο, επιτρέποντας σε επιστήμονες και προγραμματιστές να αξιοποιούν τις προοδευτικές εφαρμογές της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Η μεγάλη ζήτηση που έχει δημιουργηθεί για υψηλής ευκρίνειας γραφικά τριών διαστάσεων και εφαρμογές πολύ υψηλών απαιτήσεων σε πραγματικό χρόνο έχει συμβάλει στην εξέλιξη της προγραμματιζόμενης μονάδας επεξεργασίας γραφικών. Το γεγονός αυτό έχει συμβάλει στο να γίνει μια μονάδα υψηλής παραλληλοποίησης με απίστευτα βελτιωμένες ταχύτητες μνήμης και εντυπωσιακές υπολογιστικές δυνατότητες.

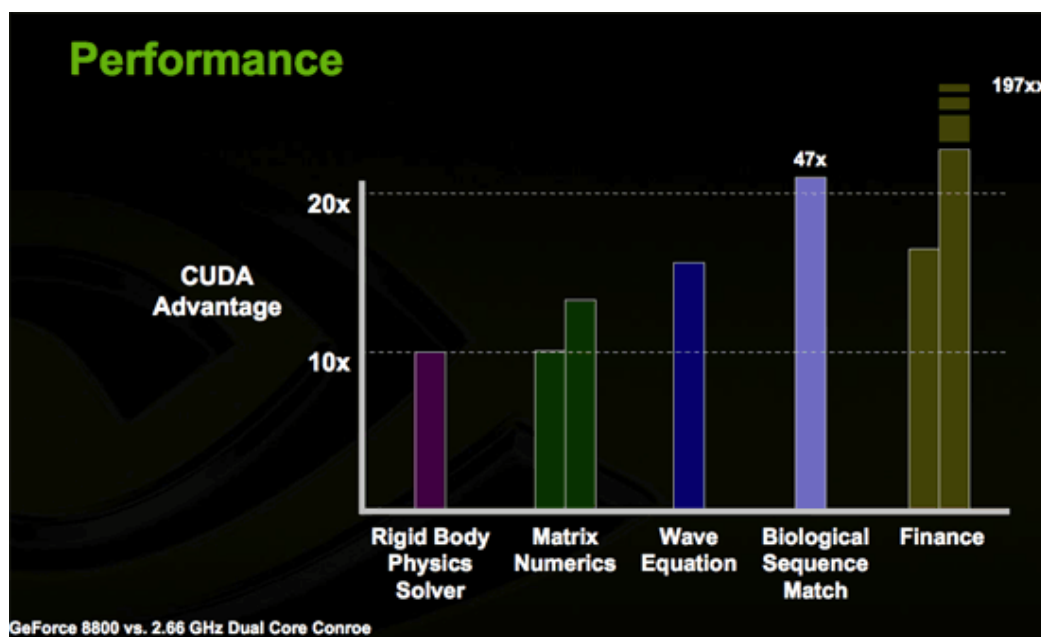


Σχήμα 1 : Λογότυπο nVIDIA CUDA



Σχήμα 2 : Λογότυπο GPGPU

Η πλατφόρμα αυτή έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με γλώσσες προγραμματισμού, όπως C, C++ και Fortran. Αυτή η προσβασιμότητα καθιστά ευκολότερο για τους ειδικούς στον παράλληλο προγραμματισμό να χρησιμοποιήσουν τους πόρους των GPU, σε αντίθεση με προηγούμενες διεπαφές (API) όπως τα Direct3D και OpenGL, τα οποία απαιτούσαν προηγμένες δεξιότητες στον προγραμματισμό γραφικών. Επίσης, η CUDA υποστηρίζει προγραμματιστικά πλαίσια, όπως τα OpenACC και OpenCL [2]. Όταν συστήθηκε για πρώτη φορά από την Nvidia, τα αρχικά του ονόματος CUDA αντιπροσώπευαν τις λέξεις Compute Unified Device Architecture [3], αλλά η Nvidia στη συνέχεια σταμάτησε την χρήση του ακρωνύμιου.



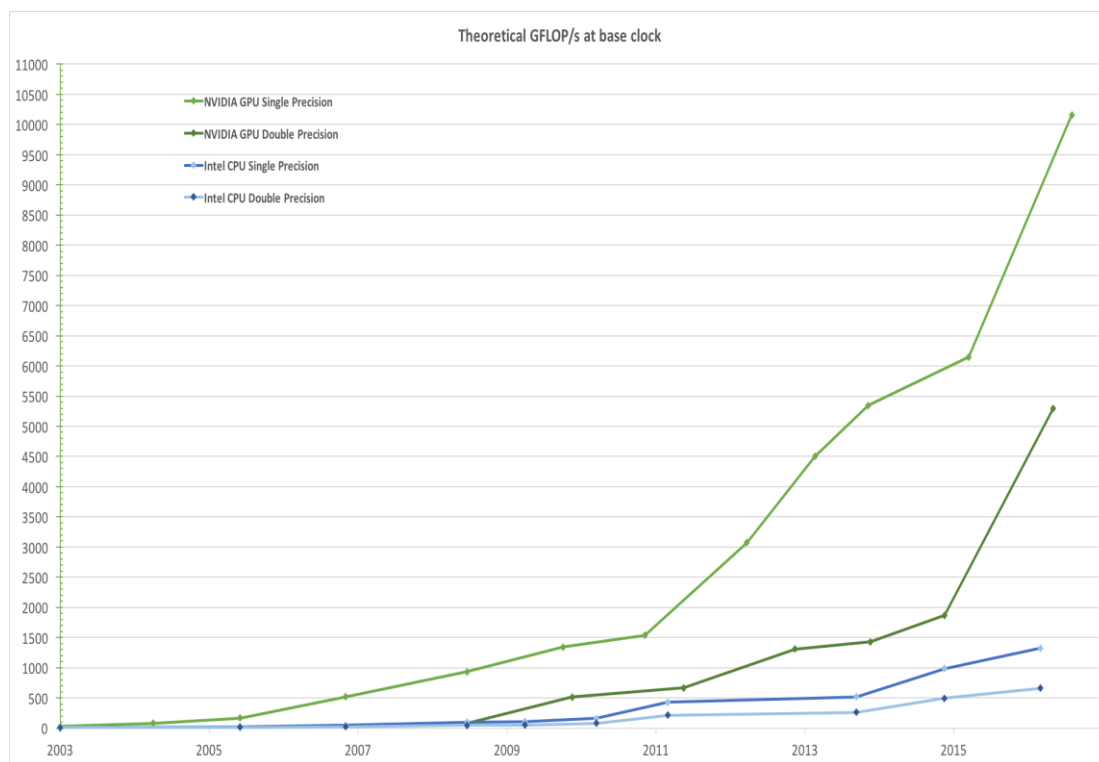
Σχήμα 3 : Πλεονέκτημα του μοντέλου της nVIDIA, GeForce 88000 (G80), μετρημένο σε πολλαπλάσια σε σχέση με CPU δύο πυρήνων (2.66 GHz), εφαρμοσμένο σε πολύπλοκες εφαρμογές με την χρήση GPGPU

Υπόβαθρο λοιπόν της CUDA είναι η μονάδα επεξεργασίας γραφικών (GPU) που, ως ένας εξειδικευμένος επεξεργαστής του υπολογιστή, εξετάζει τα αιτήματα των υπολογισμών που χρειάζονται για την υψηλή ανάλυση 3D πραγματικού χρόνου. Μέχρι το 2012, οι GPU είχαν εξελιχθεί σε μεγάλου βαθμού παράλληλα συστήματα πολλών πυρήνων που επιτρέπουν πολύ αποτελεσματικό χειρισμό των μεγάλων μπλοκ δεδομένων. Αυτή η υλοποίηση είναι πιο αποτελεσματική από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας γενικής χρήσης (CPU) για αλγόριθμους σε καταστάσεις όπου η επεξεργασία μεγάλων τμημάτων δεδομένων γίνεται παράλληλα, όπως: ο αλγόριθμος σπρωξίματος - επανεικετοποίησης μέγιστης ροής (push-relabel maximum flow algorithm), οι αλγόριθμοι γρήγορης ταξινόμησης μεγάλων λιστών, οι γρήγοροι δισδιάστατοι μετασχηματισμοί κυματιδίων και οι προσομοιώσεις μοριακής δυναμικής. Το πλεονέκτημα της χρήσης της CUDA φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 3 και σε επιπρόσθετους τομείς, με μια απλή σύγκριση επίδοσης της κάρτας γραφικών της nVIDIA, GeForce 88000 (G80) και μιας CPU δύο πυρήνων (2.66 GHz), με το πλεονέκτημα να φτάνει και τα 197 πολλαπλάσια στην περίπτωση των εφαρμογών στην οικονομία. Η σύγκριση αυτή υποβαθμίζει κιόλας το πλεονέκτημα της CUDA, αφού

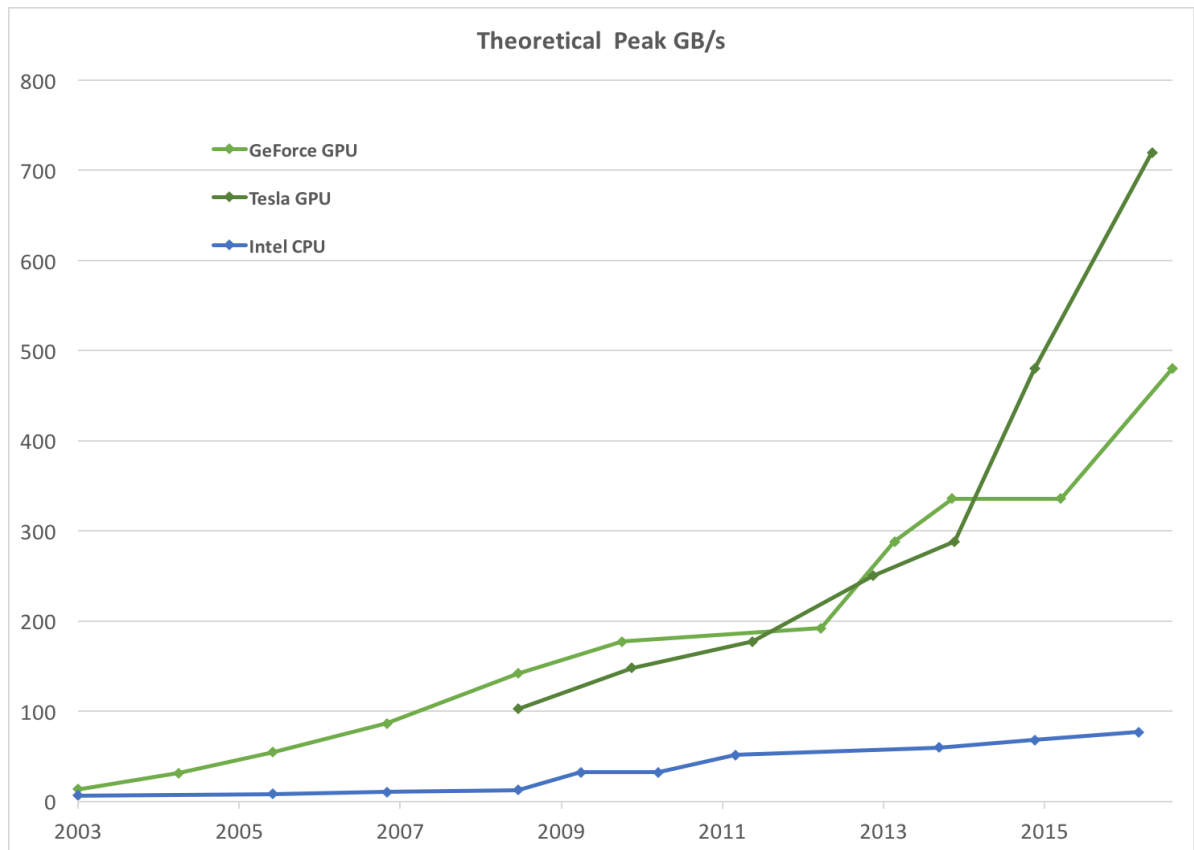
όπως φαίνεται και στο επόμενο υποκεφάλαιο, οι πιο πρόσφατες εκδόσεις της είναι απλησίαστες σε απόδοση.

## 2.2 Συγκρίσεις

Στα πιο κάτω σχήματα, απεικονίζεται για κεντρικές μονάδες επεξεργασίας και μονάδες επεξεργασίας γραφικών, η εξέλιξη με το πέρασμα του χρόνου στην εκτέλεση πράξεων αριθμών κινητής υποδιαστολής μονής και διπλής ακρίβειας και στο εύρος ζώνης για την πρόσβαση στη μνήμη τους. Όπως φαίνεται στα σχήματα αυτά, τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη είναι εντυπωσιακή και το χάσμα ανάμεσα σε GPU και CPU διευρύνεται συνεχώς. Εξ αρχής υπήρχε ένα χάσμα ανάμεσα στις δύο μονάδες επεξεργασίας, αλλά φαίνεται ότι μεγαλώνει εκθετικά πλέον, όπως και εκθετική είναι και η ανάπτυξη της γραφικής μονάδας επεξεργασίας. Ειδικά στην περίπτωση των πράξεων κινητής υποδιαστολής, με τις οποίες ασχοληθήκαμε και στην παρούσα διπλωματική εργασία, μπορεί να ειπωθεί ότι η εξέλιξη αυτή είναι εκπληκτική. Τέτοιες πράξεις μεγάλης ακρίβειας, θα αποτελούν πολύ σημαντικό εργαλείο για τον προγραμματισμό στα χρόνια που ακολουθούν, όπως είναι και σήμερα. Με τον χρόνο εκτέλεσής τους να είναι σημαντικά μειωμένος, μπορούμε να διαχειριζόμαστε και να εκμεταλλευόμαστε μεγαλύτερο μέγεθος δεδομένων και να εκτελούνται αλγόριθμοι, που θα είχαν ανεπίτρεπτο υπολογιστικό κόστος στην περίπτωση της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας. Η εξέλιξη στη πρόσβαση μνήμης δεν μένει και πίσω φυσικά, αφού τα προγράμματα που εκτελούνται με την βοήθεια της γραφικής μονάδας επεξεργασίας, απολαμβάνουν ευκολία σε αυτόν τον τομέα και δεν υπάρχουν καθυστερήσεις.

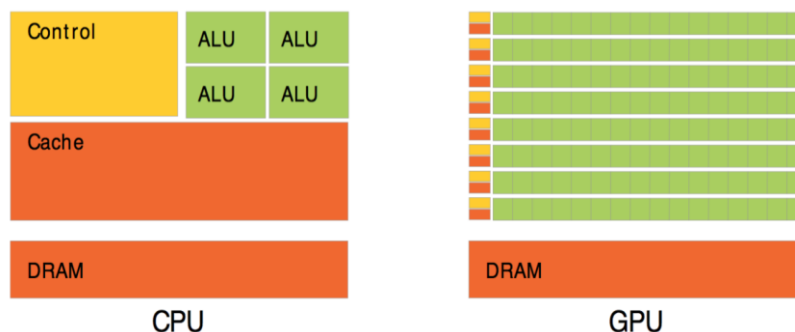


Σχήμα 4 : Πράξεις κινητής υποδιαστολής (μονής και διπλής ακρίβειας) ανά δευτερόλεπτο για κεντρικές μονάδες επεξεργασίας (CPU) και για μονάδες επεξεργασίας γραφικών (GPU)



Σχήμα 5 : Εύρος ζώνης πρόσβασης στη μνήμη για διάφορες κεντρικές μονάδες επεξεργασίας (CPU) και διάφορες μονάδες επεξεργασίας γραφικών (GPU) με το πέρασμα του χρόνου και παράγωγή νεότερων εκδόσεων

Αυτές οι μεγάλες διαφορές οφείλονται στο γεγονός ότι, οι μονάδες επεξεργασίας γραφικών λόγω της φύσης του σκοπού τους (επεξεργασία γραφικών), μπορούν να εκτελέσουν πολύ πιο απαιτητικούς υπολογισμούς μέσω της παραλληλοποίησης των πράξεων που επιτυγχάνεται. Κατασκευάζονται με περισσότερες μονάδες υλικού (τρανζίστορ) αφιερωμένες στην επεξεργασία δεδομένων σε αντίθεση με την CPU που τις αναθέτει στην προσωρινή αποθήκευση δεδομένων αλλά και σε ελέγχους ροής. Η διαφορά κατασκευής φαίνεται και σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 6 : Η διαφορά της μονάδας επεξεργασίας γραφικών (GPU), σε σχέση με την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU), που αφιερώνει περισσότερα τρανζίστορ στην επεξεργασία δεδομένων

Η μονάδα επεξεργασίας γραφικών σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να γίνεται δυνατή η επίλυση προβλημάτων που έχουν να κάνουν με παράλληλους υπολογισμούς σε δεδομένα δηλαδή, το ίδιο πρόγραμμα να εκτελείται για κάθε στοιχείο από τα δεδομένα και έτσι να υπάρχει μικρότερη απαίτηση για περίπλοκους ελέγχους ροής δεδομένων. Επίσης, αφού το πρόγραμμα εκτελείται για μεγάλο αριθμό στοιχείων και κάθε στοιχείο έχει μεγάλη αριθμητική ένταση, οι προσβάσεις στην μνήμη προκαλούν καθυστέρηση. Αυτό αντί να λύνεται με πολλές προσωρινές αποθηκεύσεις, αντισταθμίζεται με υπολογισμούς.

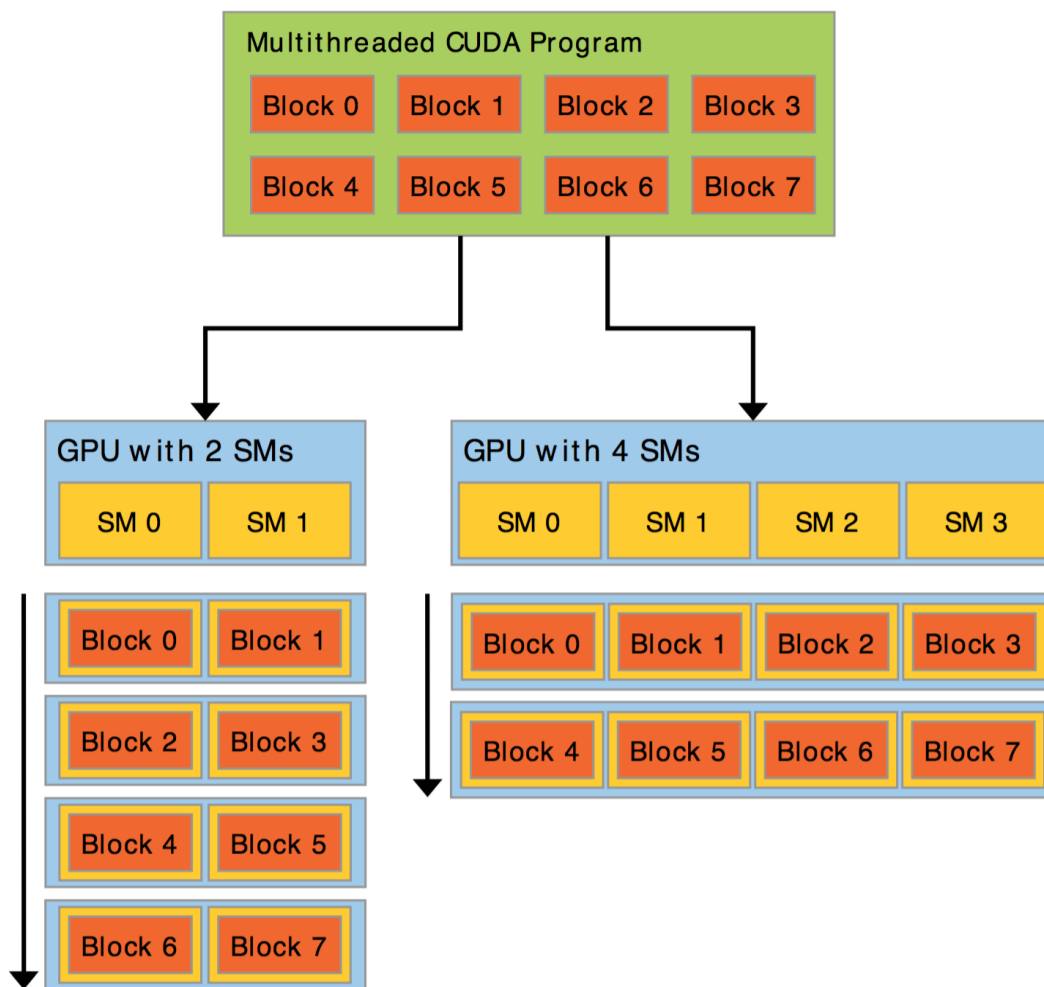
Τα παράλληλα νήματα επεξεργασίας είναι αυτά που κάνουν την παράλληλη επεξεργασία δεδομένων εφικτή και αποτελεσματική, αφού σε κάθε νήμα αντιστοιχίζεται στοιχείο δεδομένων. Οι εφαρμογές με μεγάλο πλήθος δεδομένων έχουν το περισσότερο κέρδος από αυτήν την υλοποίηση των υπολογισμών. Μερικά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών που προηγουμένως υπέφεραν από μη ικανοποιητικούς χρόνους εκτελέσεων και τεχνικές υποδειγματολειψίας είναι: η επεξεργασία τρισδιάστατων γραφικών, η κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση βίντεο, κλιμάκωση εικόνας, στερεοσκοπική όραση και αναγνώριση προτύπων. Επίσης, μεγάλος αριθμός αλγορίθμων εκτός του φάσματος των εφαρμογών πολυμέσων, είναι εφικτό να επιταχύνουν το χρόνο εκτέλεσής τους με την εκμετάλλευση της παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων, όπως για παράδειγμα στα πεδία της υπολογιστικής βιολογίας, γενικής επεξεργασίας σημάτων, προσομοιώσεων φυσικής και υπολογιστικών οικονομικών.

## 2.3 Εμβάθυνση στο μοντέλο CUDA

Η ραγδαία αύξηση στον αριθμό των πυρήνων των κεντρικών μονάδων επεξεργασίας και των γραφικών μονάδων επεξεργασίας, έχει κάνει τα κοινότυπα ολοκληρωμένα κυκλώματα, πράγμα του παρελθόντος, αφού πλέον χρησιμοποιούνται μόνο τα παράλληλα συστήματα, τα οποία συνεχίζουν να κλιμακώνονται ακολουθώντας το νόμο του Moore. Ο αυξημένος αριθμός των πυρήνων θα πρέπει να οδηγήσει στον σχεδιασμό εφαρμογών λογισμικού που κλιμακώνουν τον παραλληλισμό τους, για να έχουμε την πλήρη εκμετάλλευση του πλεονεκτήματος αυτού που πλέον έχουμε στη διάθεση μας.

Ένας προγραμματιστής που γνωρίζει τις κοινές γλώσσες προγραμματισμού μπορεί πολύ εύκολα να ανακαλύψει και να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες του προγραμματιστικού μοντέλου CUDA. Με απλό τρόπο και μέσω επεκτάσεων που εφαρμόζονται σε αυτές τις γλώσσες, ο προγραμματιστής μαθαίνει τις βασικές έννοιες (ιεραρχία νημάτων, μοιραζόμενη μνήμη, φράγμα συγχρονισμού) που κάνουν το μοντέλο αυτό κλιμακωτό. Ο προγραμματιστής κατασκευάζει το πρόγραμμα του έτσι ώστε τα δεδομένα και τα νήματα να είναι παράλληλα στην μικρότερη λογική μονάδα αλλά και στις μεγαλύτερες λογικές μονάδες που αποτελούνται από πολλές μικρές. Έτσι φαίνεται η γενική προσέγγιση που έχει αυτό το μοντέλο. Διαχωρίζεται το πρόγραμμα σε μικρότερα κομμάτια, διατηρώντας τη γλωσσική εκφραστικότητα, και εκτελούνται παράλληλα μέσω ανάθεσης τους σε ένα συγκεκριμένο αριθμό (μπλοκ) νημάτων. Κάθε τέτοιο μπλοκ υλοποιείται σε οποιοδήποτε επεξεργαστή μέσα στη γραφική μονάδα επεξεργασίας ενώ η σειρά εκτέλεσης είναι τυχαία, χωρίς όμως να επηρεάζεται η σημασιολογία του προγράμματος.

Το πρόγραμμα εκτελείται ανεξαρτήτως του αριθμού πυρήνων της γραφικής μονάδας επεξεργασίας που διαθέτει προγραμματιστής (κάλυψη μεγάλου εύρους της αγοράς) και μόνο το σύστημα εκτέλεσης χρειάζεται να γνωρίζει το φυσικό αριθμό πυρήνων. Οι γραφικές μονάδες επεξεργασίας με μεγαλύτερο πλήθος πολυπύρηνων επεξεργαστών, αυτόματα εκτελούν το οποιοδήποτε πρόγραμμα σε μικρότερο χρονικό διάστημα από άλλες μονάδες με χαμηλότερο αριθμό πολυπύρηνων επεξεργαστών, αφού οι γραφικές μονάδες επεξεργασίας σχεδιάζονται γενικά με γνώμονα μια σειρά από πολυπύρηνους επεξεργαστές ροής (Streaming Multiprocessors). Ένα πολυνηματικό πρόγραμμα καταμερίζεται σε μπλοκ από νήματα τα οποία εκτελούνται ανεξάρτητα το ένα με το άλλο [4]. Η δόμηση αυτή φαίνεται σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 7 : Το μοντέλο CUDA δομείται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να επιτρέπει αυτόματη κλιμάκωση και προσαρμοστικότητα, ανεξάρτητα από το υποκείμενο υλικό (hardware)

Με τη χρήση κάποιου βοηθητικού προσδιοριστή, δίνεται η δυνατότητα στον προγραμματιστή να καθορίσει τις διάφορες προγραμματιστικές λειτουργίες ως πυρήνες (kernels). Όταν ο χρήστης αποφασίσει να εκτελέσει ένα kernel έχει την δυνατότητα να αποφασίσει για τον αριθμό νημάτων που θα χρησιμοποιηθούν και τον αριθμό των μπλοκ (και πάλι μέσω βοηθητικού προσδιοριστή). Κάθε νήμα που τρέχει έχει μια ταυτότητα, ένα μοναδικό αναγνωριστικό αριθμό, η οποία μέσω μιας

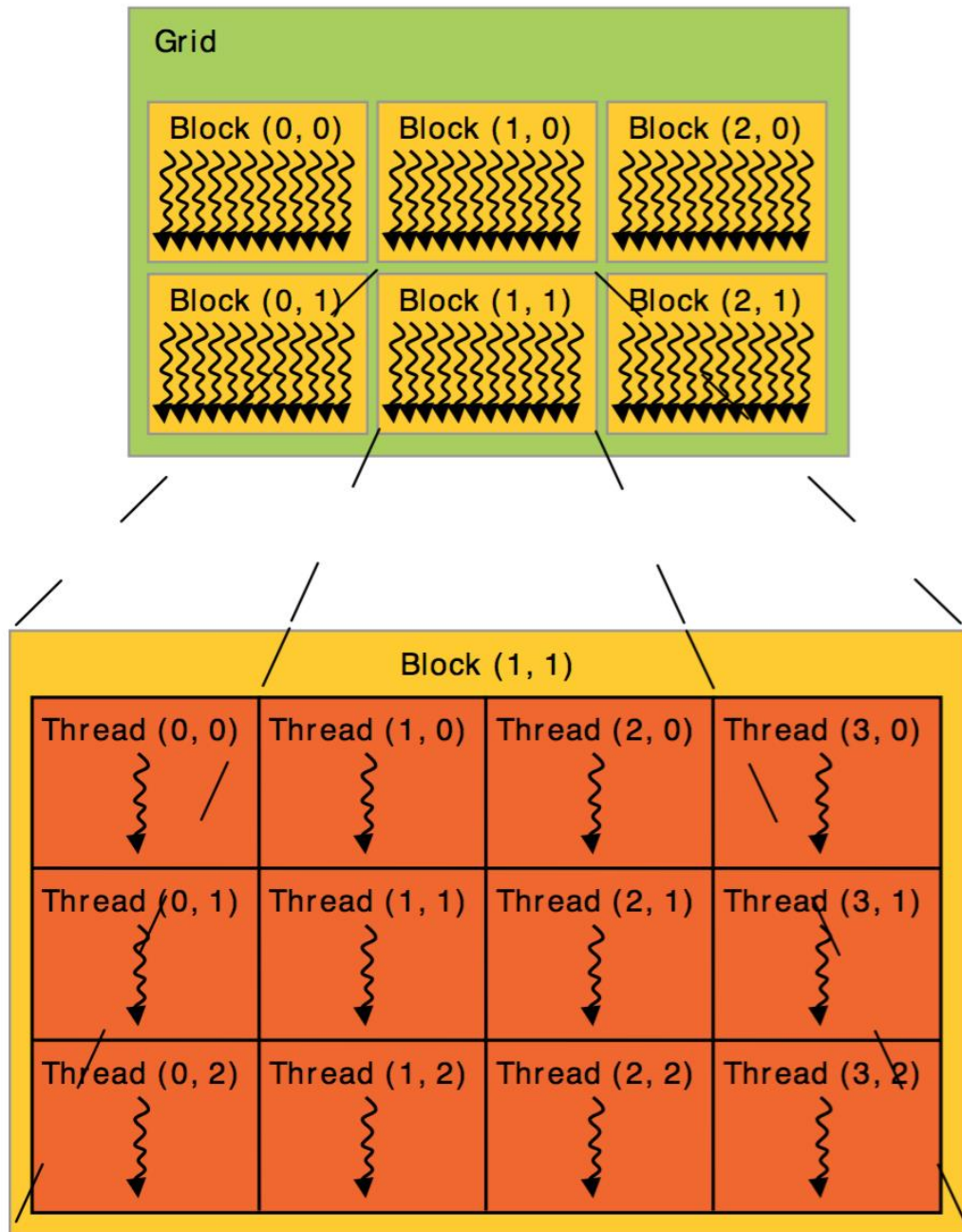


προκαθορισμένης βοηθητικής μεταβλητής που δίνεται από τη προγραμματιστική πλατφόρμα, διατίθεται στον χρήστη για αξιοποίηση.

Η βοηθητική μεταβλητή πρόσβασης είναι ένα διάνυσμα τριών στοιχείων. Καθιστά δυνατή τη χρήση δεικτών νήματος διαφόρων διαστάσεων και έτσι σχηματίζει μονοδιάστατα, δυσδιάστατα και τρισδιάστατα μπλοκ νημάτων. Παρέχεται ένας πρακτικός τρόπος κλήσης και χρήσης στοιχείων, που βοηθά πολύ στην υλοποίηση που επιθυμεί να επιτύχει ο προγραμματιστής. Ο δείκτης νήματος συνδέεται με την ταυτότητα πολύ απλά. Σε μονοδιάστατο μπλοκ νημάτων, ο δείκτης είναι ίσος με την ταυτότητα. Σε δυσδιάστατο μπλοκ  $(X, Y)$  και δυσδιάστατο δείκτη νήματος  $(x, y)$ , η ταυτότητα είναι  $x + (y * X)$ . Παρομοίως στις τρεις διαστάσεις, η ταυτότητα είναι  $x + (y * X) + (z * X * Y)$ .

Υπάρχει όριο στο πλήθος των νημάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάθε μπλοκ, λόγω των περιορισμών μνήμης του πυρήνα επεξεργαστή που εκτελείται το κάθε μπλοκ. Όμως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλά μπλοκ (ίσου αριθμού νημάτων) στην εκτέλεση ενός kernel, αυξάνοντας έτσι τον συνολικό αριθμό νημάτων στο γινόμενο του αριθμού των μπλοκ επί το πλήθος νημάτων μέσα στα μπλοκ.

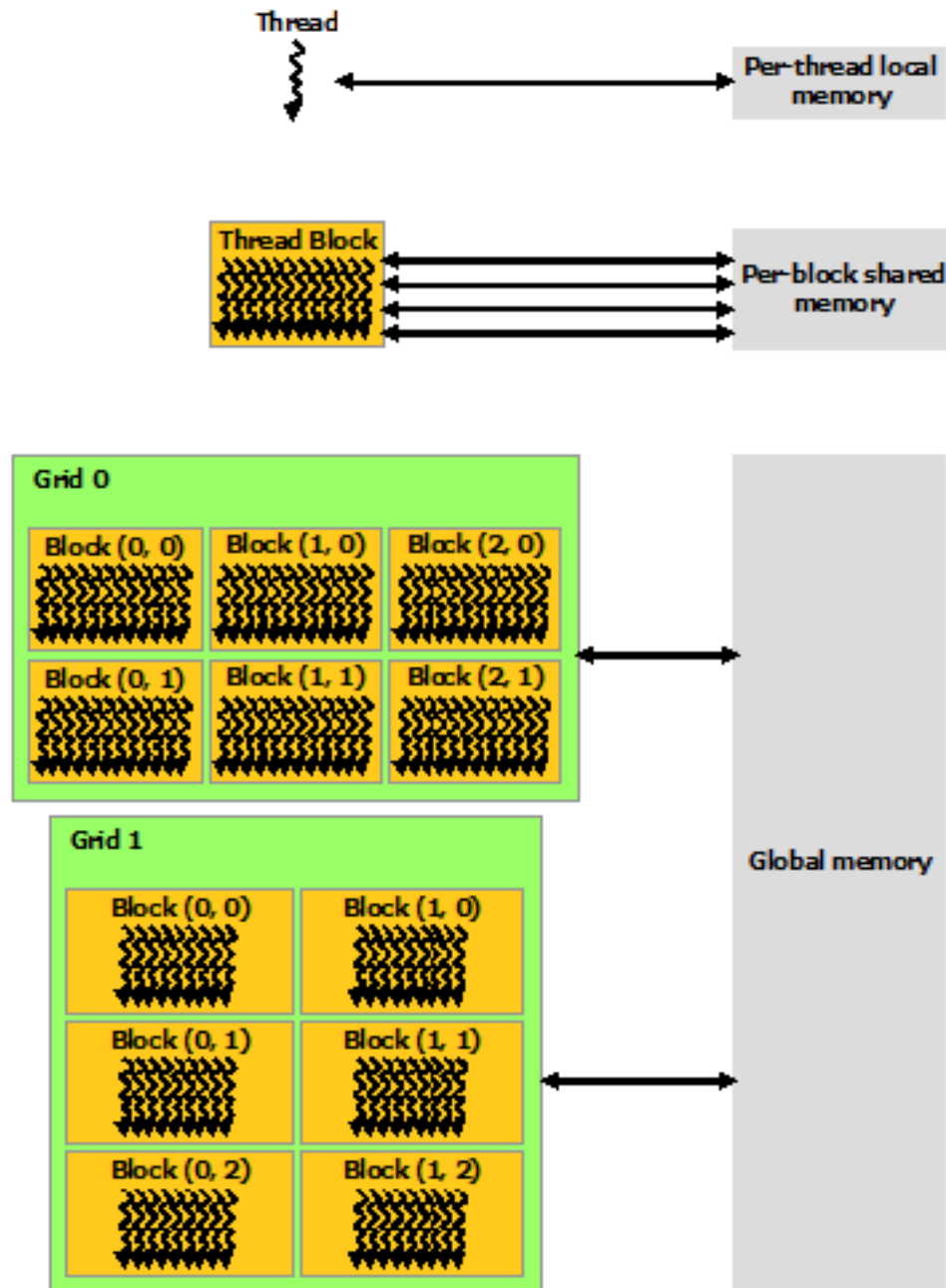
Ένα πλέγμα αποτελείται από ένα ορισμένο αριθμό μπλοκ νημάτων. Ο αριθμός αυτός, λόγω των φυσικών περιορισμών που έχει (πλήθος επεξεργαστών συστήματος) ή το μέγεθος των δεδομένων επεξεργασίας, είναι περιορισμένος. Τα μπλοκ οργανώνονται σε μονοδιάστατα, δυσδιάστατα και τρισδιάστατα πλέγματα. Ένα παράδειγμα δυσδιάστατου πλέγματος που αποτελείται από δυσδιάστατα μπλοκ νημάτων φαίνεται στο σχήμα 8. Εισάγονται επίσης και δύο ακόμα προκαθορισμένες βοηθητικές μεταβλητές από τη προγραμματιστική πλατφόρμα της CUDA. Ο αναγνωριστικός αριθμός ταυτότητας του μπλοκ νημάτων που ανήκει το κάθε νήμα και το πλήθος των νημάτων του μπλοκ. Τα μπλοκ νημάτων τρέχουν ανεξάρτητα και εκτελούνται με τυχαία σειρά, παράλληλα ή σειριακά. Παρέχεται έτσι η δυνατότητα να εκτελούνται με οποιαδήποτε σειρά και σε κάθε αριθμό πυρήνων. Εδώ φαίνεται η ευκολία με την οποία ένας προγραμματιστής μπορεί να κλιμακώσει τον κώδικα του σε οποιοδήποτε πλήθος πυρήνων. Τα νήματα μέσα στα μπλοκ συνεργάζονται και έχουν πρόσβαση σε κοινά δεδομένα, εκμεταλλευόμενα την παρεχόμενη κοινή μνήμη που για λόγους είναι πολύ γρήγορης απόκρισης αφού, βρίσκεται δίπλα σε κάθε πυρήνα επεξεργαστή.



Σχήμα 8 : Δυσδιάστατο πλέγμα αποτελούμενο από δυσδιάστατο μπλοκ νημάτων

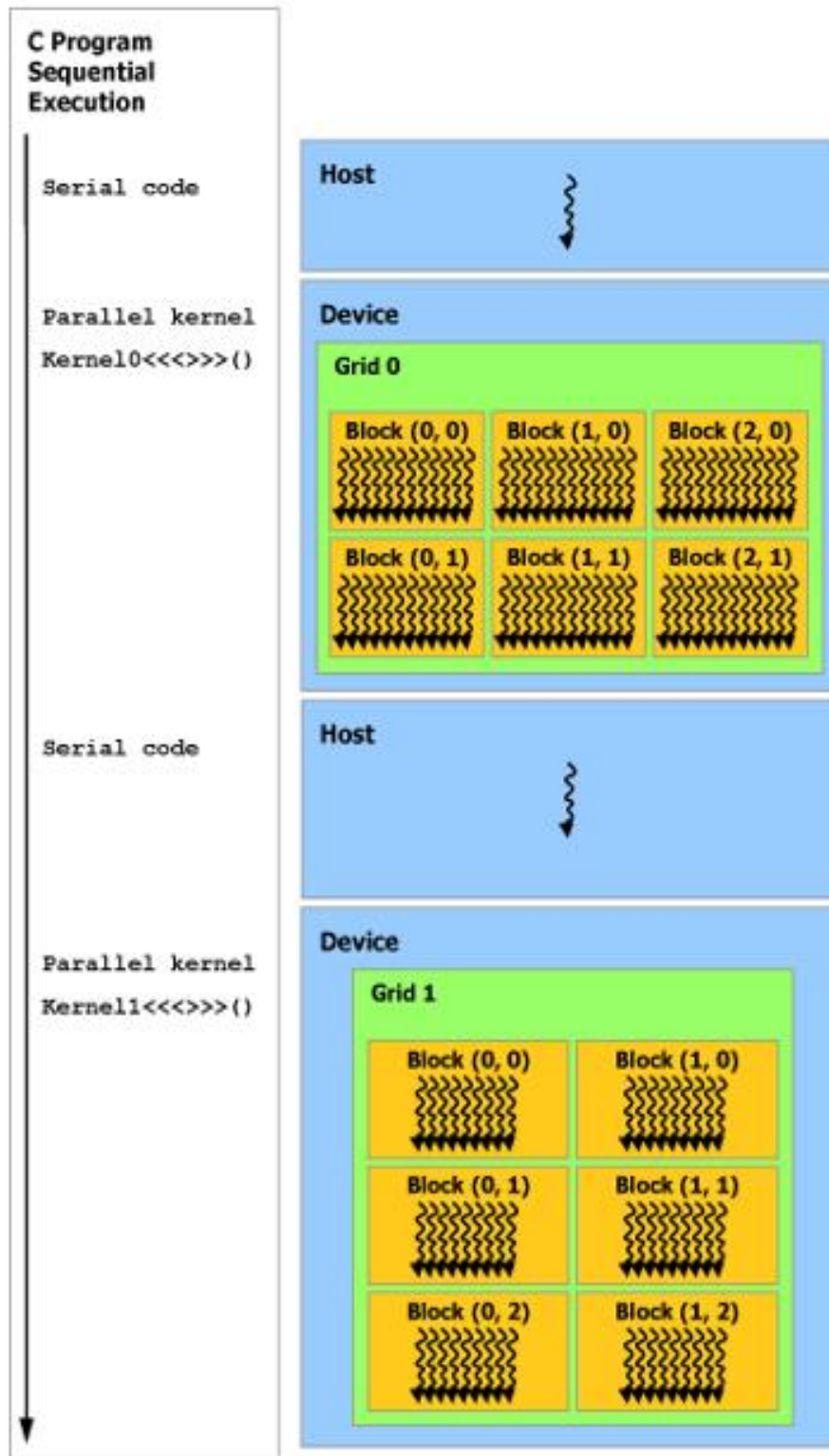
Τα νήματα πρέπει να συγχρονίζονται, για να συντονίζεται ως αποτέλεσμα η είσοδος/έξοδος τους στη μοιραζόμενη μνήμη. Για αυτό τον σκοπό καθορίζονται σημεία συγχρονισμού μέσα στον kernel και πάλι με την βοήθεια των προκαθορισμένων λειτουργιών της προγραμματιστικής πλατφόρμας. Στα σημεία συγχρονισμού, τα νήματα που περιλαμβάνονται στο μπλοκ είναι υποχρεωμένα να αναστέλλουν την λειτουργία τους και παράλληλα να αναμένουν όλα τα υπόλοιπα νήματα να φτάσουν στο σημείο αυτό, προτού συνεχίσουν την εκτέλεση τους. Επιπρόσθετα, αναφερόμενοι στην ιεραρχία μνήμης της CUDA, κάθε νήμα, εκτός από την πρόσβαση στον καθολικό χώρο μνήμης, έχει πρόσβαση σε προσωπική τοπική μνήμη και κάθε μπλοκ κατέχει μοιραζόμενη μνήμη προσβάσιμη από όλα τα νήματα του. Παρακάτω φαίνεται και

σχηματικά αυτή η ιεραρχία που καθορίζεται από το προγραμματιστικό μοντέλο CUDA.



Σχήμα 9 : Ιεραρχία μνήμης

Με την εκμετάλλευση του προγραμματιστικού μοντέλου αυτού λοιπόν, κατασκευάζονται ειδικές προγραμματιστικές λειτουργίες (kernel), αφού διαμοιραστεί το αρχικό πρόγραμμα, όπου είναι εφικτό, σε υποπρογράμματα που σκοπό έχουν την εκτέλεση τους στην κάρτα γραφικών. Αυτό γίνεται συμπληρωματικά στην εκτέλεση του υπόλοιπου προγράμματος που υλοποιείται στους παραδοσιακούς επεξεργαστές. Ως αποτέλεσμα έχουμε εντυπωσιακές υπολογιστικές δυνατότητες με χαρακτηριστικά βελτιωμένες ταχύτητες [5]. Αυτή η εναλλαγή στις διαδικασίες του προγράμματος που εκτελούνται στη γραφική μονάδα επεξεργασίας και στις διαδικασίες που εκτελούνται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας φαίνονται και στο σχήμα 10.



Σχήμα 10 : Ετερογενής προγραμματισμός

## 2.4 Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της CUDA είναι πάρα πολλά και παρακάτω αναφέρονται μερικά από τα πιο σημαντικά της. Αρχικά, είναι εφικτό να έχουμε διάσπαρτα διαβάσματα, δηλαδή ο κώδικας μπορεί να διαβάσει αυθαίρετες διευθύνσεις στη μνήμη. Οι μνήμες που έχει στην διάθεση της η πλατφόρμα, διαφέρουν όπως είναι φυσικό σε κάθε έκδοση. Μπορεί να διαθέτει ενιαία εικονική μνήμη (CUDA 4.0 και άνω) ή και ενιαία μνήμη (CUDA 6.0 και άνω). Επίσης, η CUDA διαθέτει σε όλες τις εκδόσεις της μια γρήγορη κοινόχρηστη περιοχή μνήμης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα νήματα ταυτόχρονα [6]. Μέσω της πλατφόρμας, δύνανται ακόμη ταχύτερες λήψεις και διαβάσματα από και προς τη GPU. Τέλος υπάρχει πλήρης υποστήριξη πράξεων ακεραίων και δυαδικών ψηφίων.

## 2.5 Περιορισμοί

Παρά όλα τα καλά που απολαμβάνουμε από την εκμετάλλευση αυτής της πλατφόρμας, δεν είναι δυνατό να μην υπάρχουν και περιορισμοί. Καταρχήν, η CUDA δεν υποστηρίζει το πλήρες πρότυπο C, καθώς τρέχει κωδικό ξενιστή μέσω του μεταγλωττιστή C ++, το οποίο κάνει κάποιον έγκυρο κώδικα C (αλλά άκυρο C ++ ) να αποτύχει στην μεταγλώττιση [7][8]. Δεύτερο, η διαλειτουργικότητα της με γλώσσες απεικόνισης όπως είναι η OpenGL είναι μονής κατεύθυνσης αφού, η OpenGL έχει πρόσβαση στην εγγεγραμμένη μνήμη CUDA αλλά η CUDA δεν έχει πρόσβαση στη μνήμη της OpenGL. Τρίτο, η αντιγραφή μεταξύ μνήμης ξενιστή και μνήμης συσκευής μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα, ένα χτύπημα στην απόδοση που οφείλεται στο εύρος ζώνης διαύλου του συστήματος και σε λανθάνουσα κατάσταση (αυτό μπορεί να μετριάσει εν μέρει με την ασύγχρονη μεταφορά μνήμης). Τέταρτο, τα νήματα πρέπει να τρέχουν σε ομάδες των 32 τουλάχιστον για βέλτιστη απόδοση, με τον συνολικό αριθμό των νημάτων να αριθμούνται στις χιλιάδες. Πέμπτο και σημαντικό, σε αντίθεση με την OpenCL, οι GPU με CUDA είναι διαθέσιμες μόνο από την Nvidia [9] και δεν υπάρχει εξομοιωτής ή εφεδρική λειτουργία στις σύγχρονες αναθεωρήσεις της πλατφόρμας. Επίσης ένας σωστός κώδικας C / C ++ μπορεί μερικές φορές να επισημανθεί και να μην επιτρέπεται να μεταγλωττιστεί λόγω τεχνικών βελτιστοποίησης που ο μεταγλωττιστής επιβάλλεται να χρησιμοποιήσει. Ακόμη, μια ενιαία διαδικασία πρέπει να εκτελείται εξαπλωμένη σε πολλούς ξένους χώρους μνήμης, σε αντίθεση με άλλα περιβάλλοντα εκτέλεσης γλώσσας C, ενώ ο χειρισμός εξαίρεσης (interrupt handler) δεν υποστηρίζεται στον κώδικα CUDA, λόγω της μειωμένης απόδοσης που θα είχε, με τις πολλές χιλιάδες παράλληλα νήματα να είναι σε λειτουργία. Τέλος, οι πράξεις αριθμών κινητής υποδιαστολής έχουν πολλούς περιορισμούς αναλόγως της έκδοσης της CUDA που χρησιμοποιείται και εμφανίζονται διακυμάνσεις σε τέτοιους υπολογισμούς, ανάλογα με το ποια έκδοση χρησιμοποιείται και ποια κάρτα γραφικών [10].

## 2.6 Χαρακτηριστικά εκδόσεων

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται μερικά από τα χαρακτηριστικά εκδόσεων σε μορφή πινάκων και η εξέλιξη της υποστήριξης βασικών εργαλείων πράξεων σε σχέση με το πέρασμα του χρόνου και τις διαφορετικές εκδόσεις της πλατφόρμας [11].

Feature support (unlisted features are supported for all compute abilities)	Compute ability (version)										
	1.0	1.1	1.2	1.3	2.x	3.0	3.2	3.5, 3.7, 5.0, 5.2	5.3	6.x	
Integer atomic functions operating on 32-bit words in global memory	No	Yes									
atomicExch() operating on 32-bit floating point values in global memory											
Integer atomic functions operating on 32-bit words in shared memory	No	Yes									
atomicExch() operating on 32-bit floating point values in shared memory											
Integer atomic functions operating on 64-bit words in global memory											
Warp vote functions											
Double-precision floating-point operations	No	Yes									
Atomic functions operating on 64-bit integer values in shared memory	No	Yes									
Floating-point atomic addition operating on 32-bit words in global and shared memory											
_ballot()											
_threadfence_system()											
_syncthreads_count(), _syncthreads_and(), _syncthreads_or()											
Surface functions											
3D grid of thread block											
Warp shuffle functions	No			Yes							
Funnel shift	No				Yes						
Dynamic parallelism	No					Yes					
Half-precision floating-point operations: addition, subtraction, multiplication, comparison, warp shuffle functions, conversion	No								Yes		
Atomic addition operating on 64-bit floating point values in global memory and shared memory	No									Yes	

Σχήμα 11 : Χαρακτηριστικά που υποστηρίζει η κάθε έκδοση

Ένα τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά είναι οι ατομικές πράξεις ακεραίων και αριθμών κινητής υποδιαστολής, που χρησιμοποιούμε και στην παρούσα διπλωματική. Όπως φαίνεται στους δύο πίνακες, με την εξέλιξη των αρχιτεκτονικών, η υποστήριξη για τέτοιου είδους πράξεις μεγαλώνει και διευκολύνει τους προγραμματιστές, αφού πολλά προγράμματα χρησιμοποιούν αυτές τις πράξεις. Προσφέρεται αυξημένη ακρίβεια πράξεων, ιδίως με τις πρόσφατες αρχιτεκτονικές, που έχουν την ευχέρεια των ατομικών πράξεων με αριθμούς κινητής υποδιαστολής διπλής ακρίβειας.

Ακόμα ένα σημαντικό και πολυσυζητημένο χαρακτηριστικό είναι ο δυναμικός παραλληλισμός. Αυτή η ιδιότητα της CUDA επιτρέπει στον προγραμματιστή να παραλληλοποιήσει ακόμα περισσότερο τον κώδικα του αφού μπορεί να εκτελεί πυρήνες μέσα σε άλλους πυρήνες, λύνοντας το πρόβλημα χρονικής καθυστέρησης που δημιουργούν οι θεμελιώδεις βρόχοι επαναλήψεων.

<b>Data Type</b>	<b>Operation</b>	<b>Supported since</b>	<b>Supported since for Global Memory</b>	<b>Supported since for Shared Memory</b>
16-bit integer	general operations			
32-bit integer	atomic functions		1.1	1.2
64-bit integer	atomic functions		1.2	2.0
16-bit floating point	addition, subtraction, multiplication, comparison, warp shuffle functions, conversion	5.3		
32-bit floating point	atomicExch()		1.1	1.2
32-bit floating point	atomic addition		2.0	2.0
64-bit floating point	general operations	1.3		
64-bit floating point	atomic addition		6.0	6.0

*Σχήμα 12 : Πράξεις δεδομένων που υποστηρίζει η κάθε έκδοση*





# 3 Ευθυγράμμιση δεδομένων

## 3.1 Εισαγωγή – Ορισμός

Η εξέλιξη σε τομείς της τεχνολογίας που εμπεριέχουν ως βασικό εργαλείο την εκμετάλλευση των δεδομένων που λαμβάνονται από τις εικόνες υψηλής ευκρίνειας και λειτουργικότητας, έχει ως επακόλουθο την αυξανόμενη επιθυμία για την εύρεση της βέλτιστης ευθυγράμμισης δεδομένων. Στον κλάδο της ιατρικής απεικόνισης, η ευθυγράμμιση δεδομένων είναι ένας μεγάλος παράγοντας της προόδου που σημειώνεται στην απεικόνιση.

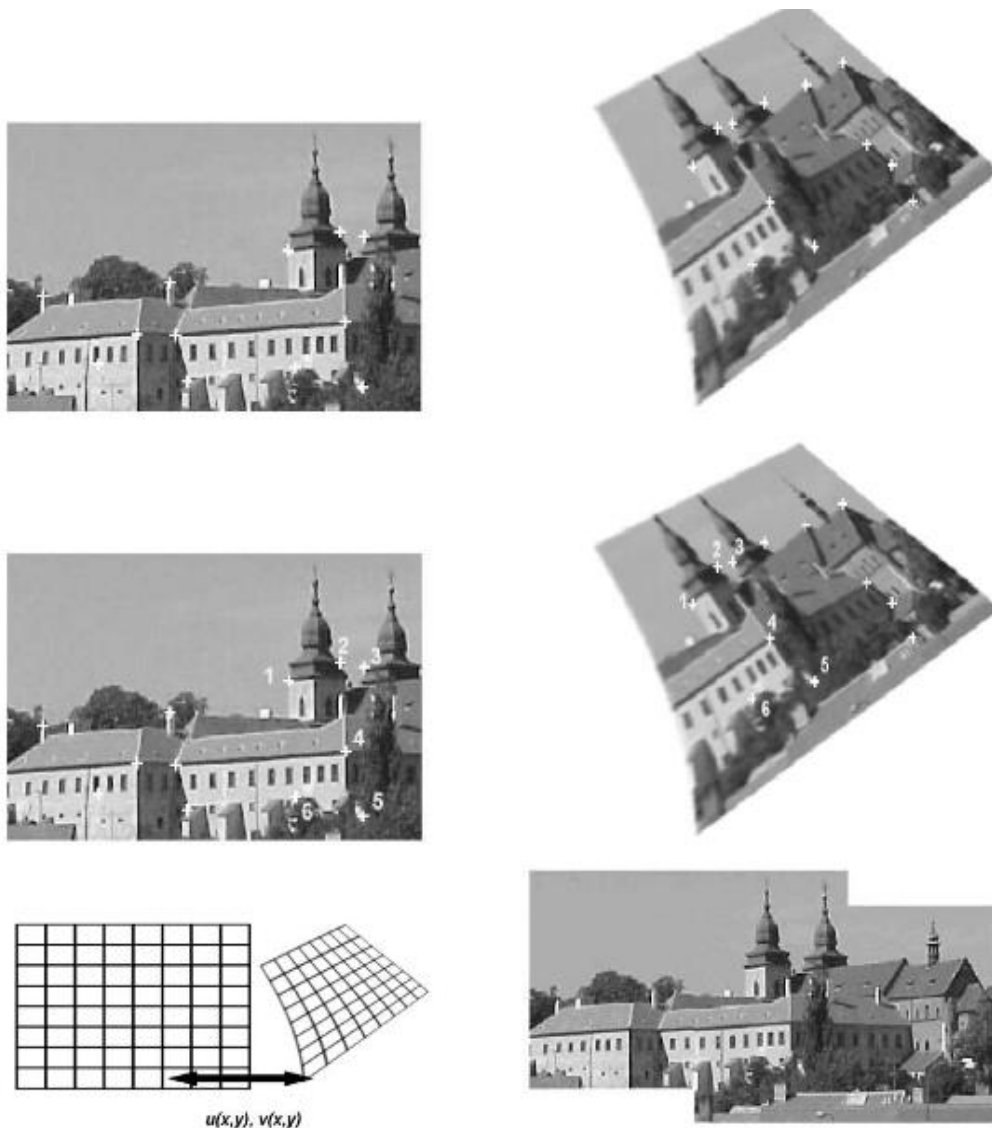
Λαμβάνονται βελτιωμένες ως προς την λεπτομέρεια τομογραφίες (MRI, CT, PET) αφού, οι διαφορές μεταξύ των εικόνων που έχουν ληφθεί από τον ίδιο ασθενή σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, δίνουν σημαντικές ανατομικές πληροφορίες. Σε πολλούς τομείς της ιατρικής, η εκτίμησή των πληροφοριών αυτών κρίνεται απαραίτητη και συμβάλλει καθοριστικά στην παρακολούθηση της εξέλιξης των ασθενειών αλλά και στο πόσο αποτελεσματική είναι μια θεραπεία που λαμβάνει ένας ασθενής. Η ευθυγράμμιση δεδομένων έχει συμβάλει επίσης, στον καλύτερο συνδυασμό των δεδομένων που λαμβάνονται από διαφορετικές απεικονιστικές τεχνικές και κρίνεται αναγκαία σε περιπτώσεις χωρικής μετατόπισης των εικόνων. Η χωρική μετατόπιση μπορεί να συμβεί όταν ο ασθενής κινηθεί, ακόμα και ακούσια, λόγω της αναπνοής και καρδιακής λειτουργίας.

Ευθυγράμμιση ορίζεται λοιπόν ως, η διαδικασία κατά την οποία υπολογίζεται ένας γεωμετρικός μετασχηματισμός, που όταν εφαρμοστεί είναι εφικτή η εξομόλυνση των γεωμετρικών αποκλίσεων ανάμεσα σε διαφορετικές απεικονίσεις του ίδιου αντικειμένου ή και ανάμεσα σε απεικονίσεις διαφορετικών αντικειμένων. Η μία εικόνα χρησιμεύει ως εικόνα αναφοράς και η άλλη εικόνα ευθυγραμμίζεται. Σε κάθε μέθοδο ευθυγράμμισης, προκύπτει ένας μετασχηματισμός, τέτοιος ώστε η μετασχηματισμένη εικόνα και η εικόνα αναφοράς να περιέχουν την ίδια ανατομική πληροφορία στην ίδια θέση. Υπάρχει μεγάλος αριθμός μεθοδολογιών ευθυγράμμισης, αφού τα προβλήματα που πρέπει να λυθούν είναι ποικιλόμορφα και ακόμα δεν έχει βρεθεί μέθοδος που θα εφαρμόζεται ανεξαρτήτως των ιδιομορφιών της κάθε περίπτωσης. Όμως, όλες οι τεχνικές ευθυγράμμισης, όσο διαφορετικές και να είναι η μία από την άλλη, συνίστανται όλες από ένα γεωμετρικό μετασχηματισμό, μία συνάρτηση ομοιότητας ή σφάλματος και μία διαδικασία βελτιστοποίησης.

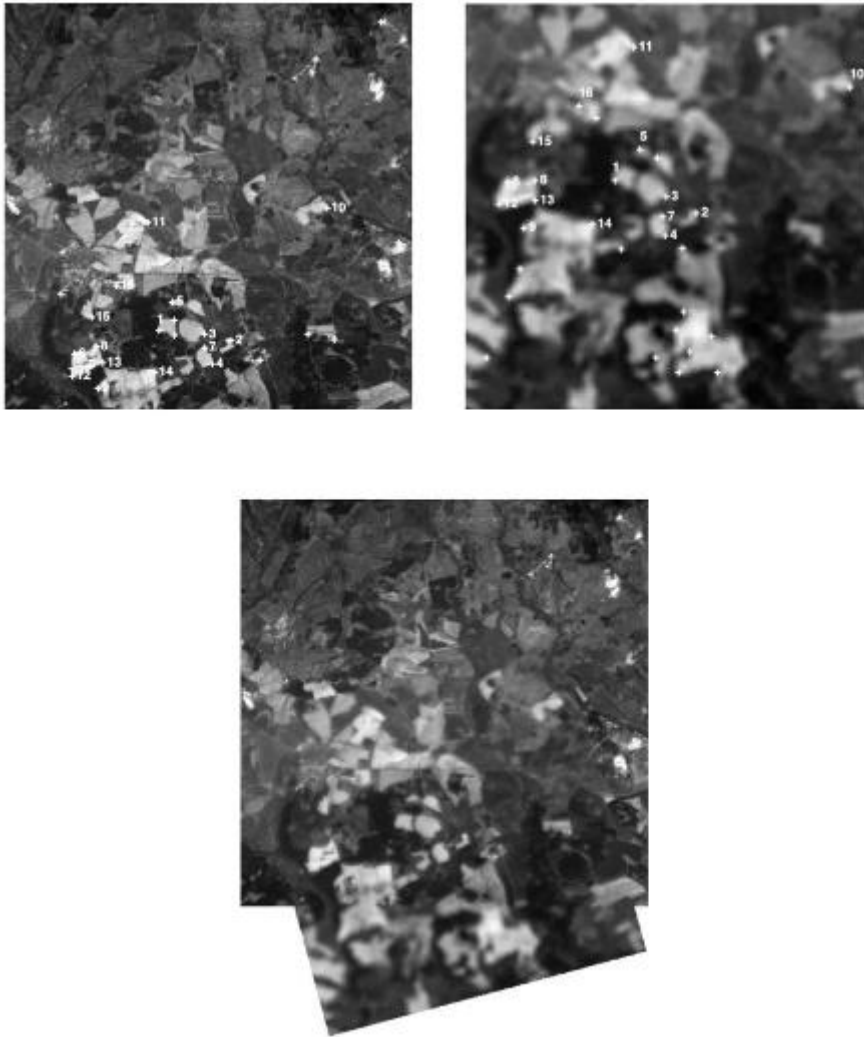
Με σκοπό να ευθυγραμμίσουμε μία εικόνα σε σχέση με μία άλλη εικόνα αναφοράς, ακολουθούμε μια συγκεκριμένη διαδικασία επαναλήψεων. Μετασχηματίζουμε την υπό ευθυγράμμιση εικόνα, εφαρμόζοντας το γεωμετρικό μετασχηματισμό που προκύπτει από τις παραμέτρους που λαμβάνουμε από την μέθοδο βελτιστοποίησης της κάθε επανάληψης. Με κάθε επανάληψη, οι παράμετροι, μετά τον υπολογισμό του κριτηρίου ομοιότητας ή του σφάλματος μεταξύ εικόνας αναφοράς και εικόνας μετασχηματισμού, επανεκτιμούνται. Οι τελικές παράμετροι του μετασχηματισμού που θα εφαρμοστούν στη εικόνα, είναι αυτές που μεγιστοποιούν την τιμή της συνάρτησης ομοιότητας (ή ελαχιστοποιούν την τιμή της συνάρτησης σφάλματος).

### 3.2 Μέθοδοι Ευθυγράμμισης Δεδομένων

Σε αυτή την ενότητα αναπτύσσεται ο καθορισμός του τρόπου ευθυγράμμισης, που έχει να κάνει με την εφαρμοζόμενη μέθοδο και το είδος του προβλήματος που μας απασχολεί. Έτσι έχουμε μια ταξινόμηση των μεθόδων ευθυγράμμισης σύμφωνα με διάφορα σχετικά κριτήρια [12] - [16]. Στα δύο σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται ευθυγραμμίσεις εικόνων με την χρήση αμετάβλητων περιγραφητών.



Σχήμα 13 : Ευθυγράμμιση εικόνων με τέσσερα βήματα. Ανίχνευση χαρακτηριστικών γνωρισμάτων, ταύτιση χαρακτηριστικών με τους αμετάβλητους περιγραφείς, μοντέλο μετασχηματισμού, αναδειγματολειτουργία και μετατροπή της εικόνας



Σχήμα 14 : Ευθυγράμμιση εικόνων με βάση τα χαρακτηριστικά τους, χρησιμοποιώντας αμετάβλητους περιγραφείς

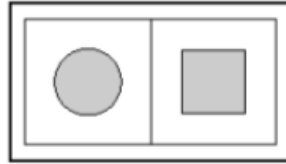
### 3.2.1 Διαστάσεις Γεωμετρικού Μετασχηματισμού

Ο μετασχηματισμός δύναται να έχει πολλές διαστάσεις, αναλόγως των διαστάσεων των εξεταζόμενων δεδομένων. Είναι δυσδιάστατος όταν τα δεδομένα είναι τομές του ίδιου επιπέδου ή εικόνες προβολών. Για ευθυγράμμιση άλλων τρισδιάστατων συνόλων είναι τρισδιάστατος. Ο χρόνος μπορεί να αποτελέσει μια επιπλέον διάσταση σε περιπτώσεις που έχουμε χρονικές ακολουθίες εισόδου. Δηλαδή, αν έχουμε ακολουθίες δυσδιάστατων εικόνων εφαρμόζεται τρισδιάστατος μετασχηματισμός.

### 3.2.2 Είδος Γεωμετρικού Μετασχηματισμού

Γεωμετρικός μετασχηματισμός ορίζεται ως το μαθηματικό μοντέλο που θα μεταλλάξει την προς ευθυγράμμιση εικόνα και μπορεί να είναι άκαμπτος, εύκαμπτος, συμπαγής, ελαστικός. Ο βαθμός ελαστικότητας του μας δείχνει αν είναι συμπαγής, τύπου affine, προβολικός ή καμπυλόγραμμος και η διαφορά των τύπων αυτών φαίνεται στο σχήμα 15, ενώ αναλύονται και ξεχωριστά στα επόμενα υποκεφάλαια. Γενικά για την αντιμετώπιση περιπτώσεων ύπαρξης ανατομικών διαφορών που πιθανόν να

εμφανιστούν μεταξύ διαφορετικών εικόνων, εφαρμόζονται καμπυλόγραμμοι γεωμετρικοί μετασχηματισμοί και περιορίζονται σε μεθόδους ευθυγράμμισης ενδογενών χαρακτηριστικών.



Αρχική εικόνα

	<i>Συμπαγής</i>	<i>Affine</i>	<i>Προβολικός</i>	<i>Καμπυλόγραμμος</i>
Ολικός				

Σχήμα 15 : Είδη γεωμετρικού μετασχηματισμού

### 3.2.2.1 Συμπαγής

Το μέγεθος και το σχήμα των προς ευθυγράμμιση αντικειμένων παραμένουν αμετάβλητα και διατηρούνται ίδιες οι διαστάσεις και οι γωνίες, με αυτόν τον μετασχηματισμό, ο οποίος αναλύεται σε δύο συνιστώσες, την περιστροφή και την μετατόπιση, και είναι ευρέως αποδεκτός [17]. Προτιμάται πολύ αφού κλιμακώνεται και υλοποιείται εύκολα σε σύγκριση με τους υπόλοιπους. Αυτό γιατί, μόνο τρεις παραμέτροι υπολογίζονται για την περιστροφή και άλλοι τρεις για την μετατόπιση.

### 3.2.2.2 Τύπου Affine

Αυτός ο μετασχηματισμός σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μην αλλοιώνονται τα σημεία και να διατηρούνται οι ευθείες γραμμές και τα επίπεδα. Κατά την εφαρμογή του, υπάρχει πιθανότητα να προκληθεί μεταβολή στις γωνίες και στα μήκη του αντικειμένου, ενώ αντίθετα οι ευθείες γραμμές του θα μετασχηματιστούν κρατώντας ταυτόχρονα αναλλοίωτη την παραλληλία τους και ως αποτέλεσμα το σχήμα θα αλλάξει. Με την χρήση ενός γραμμικού μετασχηματισμού και μίας μετατόπισης, μπορεί να προσδιοριστεί ο γεωμετρικός μετασχηματισμός τύπου affine. Ο μετασχηματισμός αυτός χρησιμοποιείται ευρέως και πάλι αφού σε περιπτώσεις που η παραγόμενη πληροφορία περιέχει πληθώρα γεωμετρικών παραμορφώσεων είναι η καταλληλότερη επιλογή.

### 3.2.2.3 Προβολικός

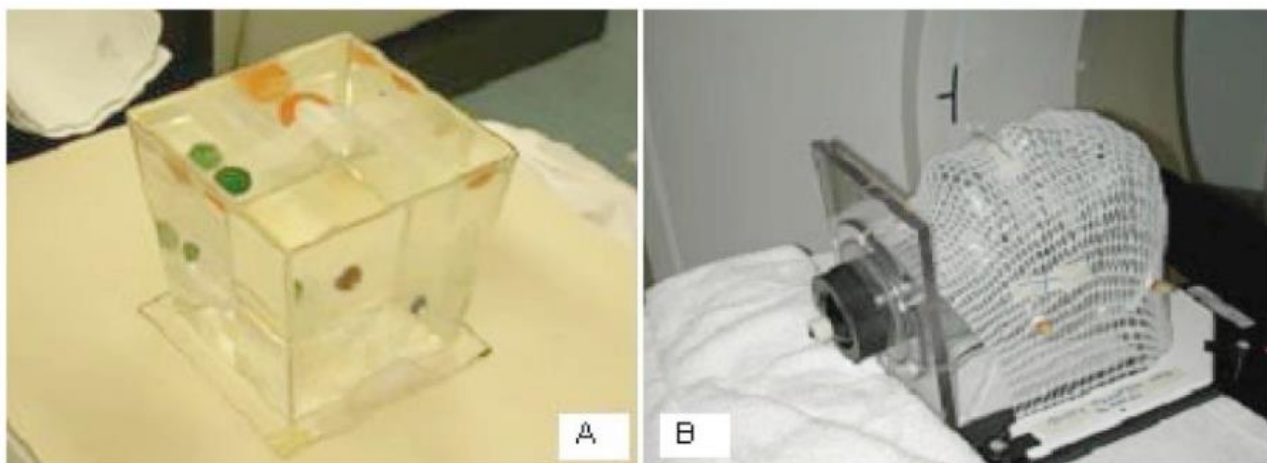
Ορίζεται σαν ένας γραμμικός μετασχηματισμός που χρησιμοποιεί μία επιπλέον διάσταση. Μετασχηματίζει μία ευθεία γραμμή, παράγοντας μία καινούργια, χωρίς να είναι κατ' ανάγκην παράλληλες [18]. Δεν χρησιμοποιείται πολύ συχνά και συνήθως, πραγματοποιεί ευθυγραμμίσεις εικόνων τρισδιάστατων συνόλων δεδομένων τομογραφίας ή ακτινών X. Σε περιπτώσεις που οι καμπυλόγραμμοι γεωμετρικοί μετασχηματισμοί, λόγω αυξημένης πολυπλοκότητας ή μεγάλου πλήθους παραμέτρων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τότε χρησιμοποιείται αυτός ως αντικαταστάτης.

### 3.2.2.4 Καμπυλόγραμμος

Ο μετασχηματισμός αυτός δεν διαθέτει μορφή σταθερών πινάκων αλλά προσδιορίζεται αλγεβρικά με εξίσωση εν αντιθέσει με τους υπόλοιπους. Οι ευθείες γραμμές μετατρέπονται σε καμπύλες και συνήθως είναι μορφής πολυωνύμου, ενώ το πλήθος των παραμέτρων που προσδιορίζονται είναι ανάλογο της τάξης των πολυωνύμων. Αντίστοιχα έχει χειρότερη ή καλύτερη ακρίβεια και λιγότερη ή περισσότερη πολυπλοκότητα [19].

## 3.2.3 Η Βάση της Ευθυγράμμισης

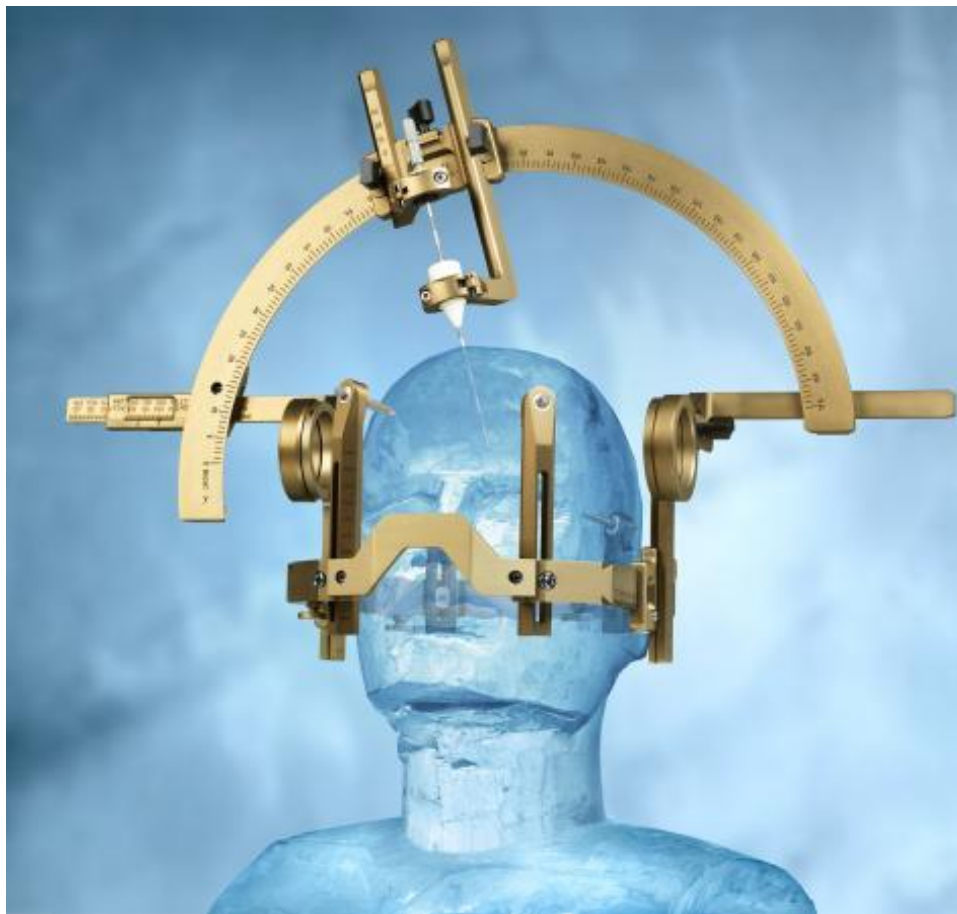
Εδώ διαχωρίζουμε τις μεθόδους ευθυγράμμισης σε δύο βασικές υποκατηγορίες. Από τη μία έχουμε τη χρήση ενδογενών χαρακτηριστικών για την ταύτιση των εικόνων, όπως την αντιστοίχιση των σημείων των εικόνων ή της μέση τοπικής φωτεινότητας τους ή και γραμμών και επιπέδων τους. Από την άλλη έχουμε την χρήση εξωγενών χαρακτηριστικών για την ταύτιση των εικόνων, όπου χρησιμοποιούμε τεχνητά αντικείμενα, όπως του σχήματος 16, σε συνδυασμό με την ανατομική πληροφορία των υπό απεικόνιση περιοχών [20][21].



Σχήμα 16 : (A) Πλαίσιο εγκεφάλου της ΙΑΕΑ (Διεθνής Ένωση Ατομικής Ενέργειας), (B) Ανθρωπομορφικό πλαίσιο εγκεφάλου

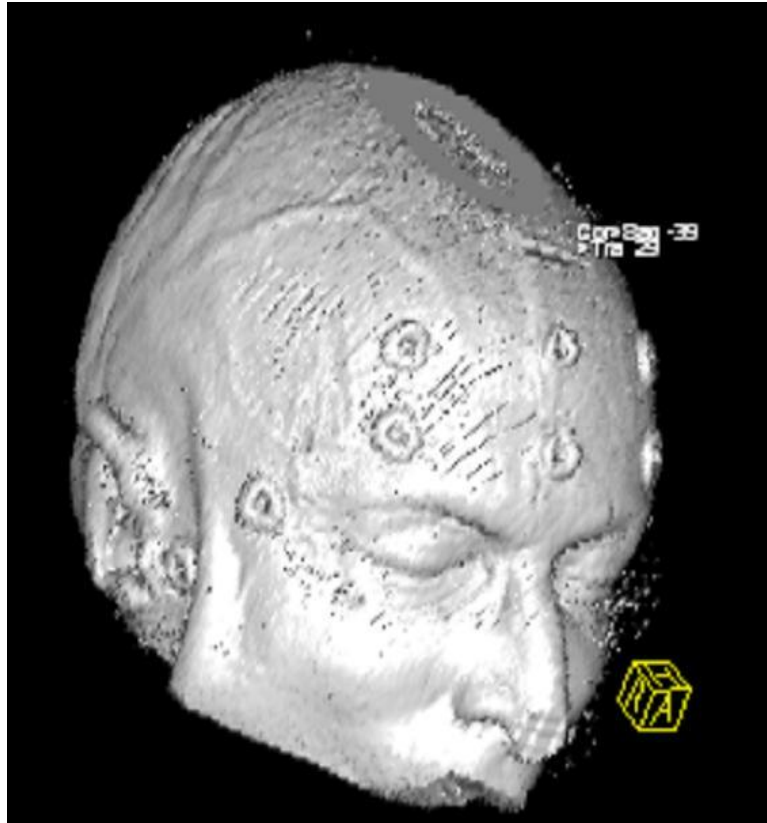
### 3.2.3.1 Εξωγενή Χαρακτηριστικά

Τα αντικείμενα που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των εξωτερικά υποβοηθούμενων μεθόδων, αναφέρονται και ως *fiducial markers* [22] και φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε ανεξάρτητα από την απεικονιστική τεχνική που θα εφαρμοστεί, να εντοπίζονται εύκολα στις εικόνες. Η ευθυγράμμιση γίνεται μετά με τον εντοπισμό και την εκμετάλλευση των σημαδιών αυτών μέσα στις εικόνες. Μία τέτοια κατασκευή είναι το στερεοστατικό πλαίσιο, απεικονίζεται στο σχήμα 17, που εφαρμόζεται και βιδώνεται στο κεφάλι του ασθενή και εξασφαλίζει αρκετά υψηλή ακρίβεια [23].



Σχήμα 17 : Στερεοστατικό πλαίσιο

Οι εξωτερικά υποβοηθούμενες τεχνικές ευθυγράμμισης είναι πολύ γρήγορες και ικανοποιητικά ακριβείς, αφού δεν χρησιμοποιούν πολύπλοκους αλγορίθμους βελτιστοποίησης που θα καθυστερούσαν σημαντικά, οι παράμετροι ευθυγράμμισης τους υπολογίζονται εύκολα και χρησιμοποιούν συμπαγή μετασχηματισμό, ο οποίος επιδέχεται μόνο περιστροφές και μετατοπίσεις. Όμως, η ανάγκη προετοιμασίας του ατόμου και η ανάγκη αλληλεπίδρασης μαζί του αλλά και η επεμβατική τοποθέτηση αυτών των συσκευών, είναι βασικά μειονεκτήματα της όλης διαδικασίας. Υπάρχουν φυσικά εξαιρέσεις όπου δεν χρειάζεται επεμβατική τοποθέτηση, όπως είναι τα πλαίσια συγκράτησης κεφαλιού, τα εξατομικευμένα πλαίσια αφρού, σημάδια τα οποία εφαρμόζονται και προσκολλώνται στην επιφάνεια του δέρματος και οι οδοντιατρικοί προσαρμογείς [24], [25].



Σχήμα 18 : Fiducial markers επεμβατικά τοποθετημένα στο κρανίο του ασθενή

### 3.2.3.2 Ενδογενή Χαρακτηριστικά

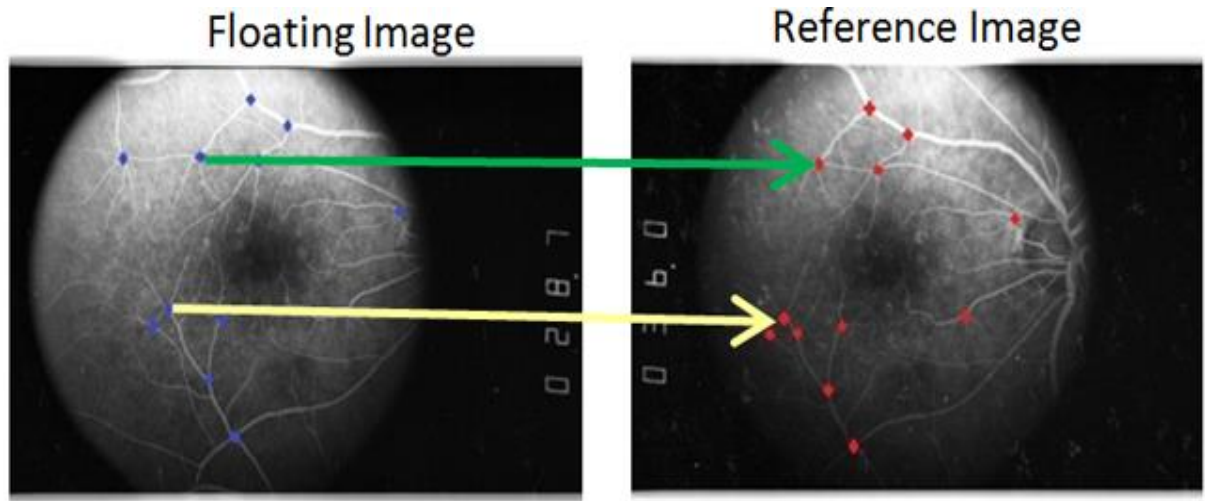
Η ευθυγράμμιση βασισμένη σε ενδογενή χαρακτηριστικά, υλοποιείται εξάγοντας τα δεδομένα από τις εικόνες, χωρίς την βοήθεια εφαρμοζόμενου τεχνητού αντικειμένου. Η ευθυγράμμιση αυτού του τύπου χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες μεθόδων, με βάση τα λαμβανόμενα υπόψη χαρακτηριστικά για την ταύτιση τους. Οι κατηγορίες αυτές αναλύονται παρακάτω.

#### 3.2.3.2.1 Μέθοδοι με Βάση τα Σημεία

Σε αυτή την μέθοδο χρησιμοποιούμε ανατομικά διακριτικά σημεία (ορόσημα) για την ταύτιση των εικόνων, τα οποία διακρίνονται εύκολα από τον χρήστη του λογισμικού, αφού αποτελούν ευδιάκριτα και ακριβή εντοπισμένα σημεία της μορφολογίας της ορατής ανατομίας [26]. Επίσης, ως ορόσημα είναι δυνατόν να χαρακτηριστούν και εύκολα ανιχνεύσιμα γεωμετρικά χαρακτηριστικά σημεία όπως είναι οι γωνίες και τα τοπικά ακρότατα. Τέτοια σημεία όμως είναι δυσεύρετα και για αυτό είναι και λιγιστά με συνέπεια να περιοριζόμαστε σε ένα συμπαγή μετασχηματισμό παρά να χρησιμοποιούμε κάποιο πολυπλοκότερο. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι γρήγορες και παραγωγικές αφού η δουλειά τους είναι εύκολη, με την ελαχιστοποίηση απλών μεγεθών, όπως είναι η μέση απόσταση μεταξύ ταυτόσημων σημείων, αλλά, και λόγω του μικρού αριθμού οροσήμων. Επίσης τα ορόσημα μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στην υλοποίηση άλλων μεθόδων. Ένα παράδειγμα είναι οι αλγόριθμοι ευθυγράμμισης όπου κατά την υλοποίηση της βελτιστοποίησης εμφανίζουν ευαισθησία σε τοπικά

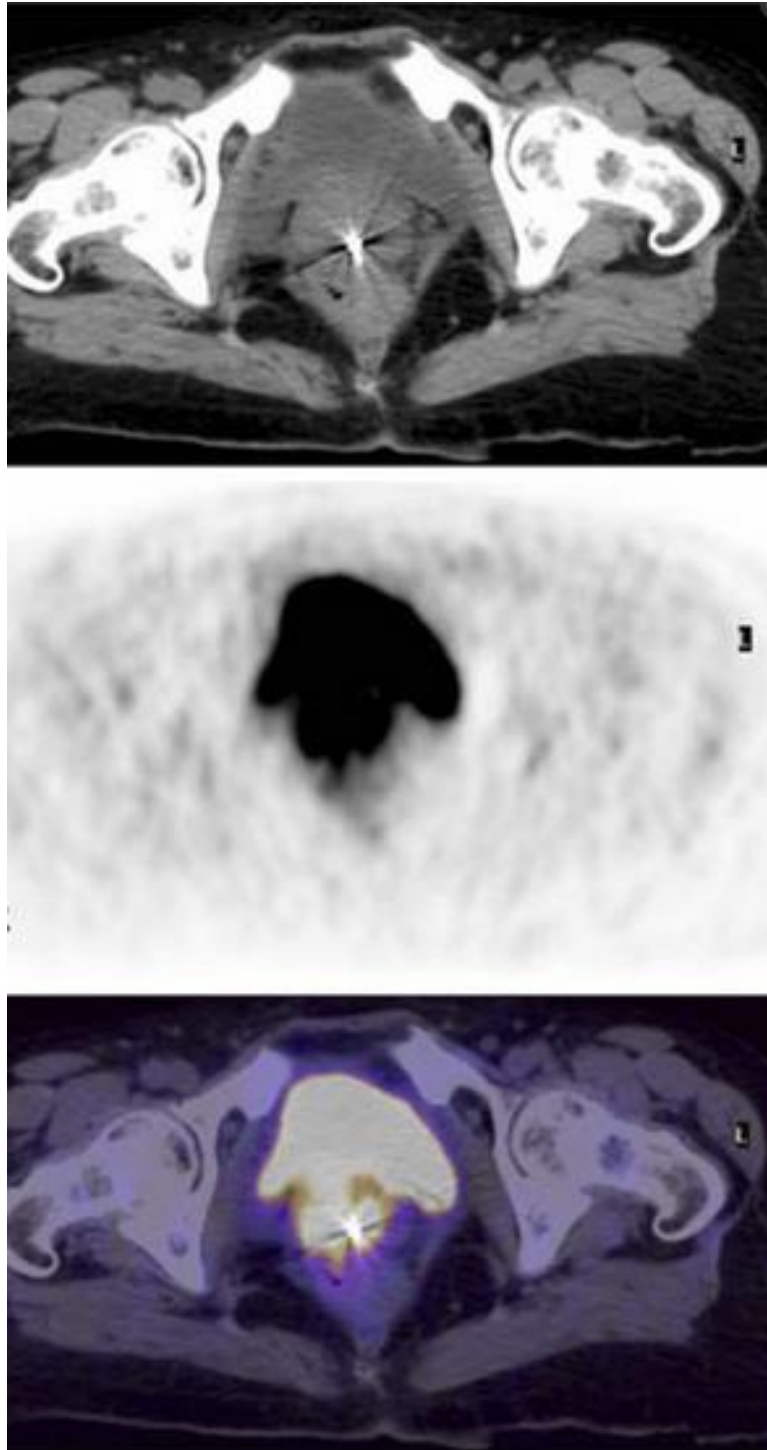


ελάχιστα ή μέγιστα ακρότατα [27]. Η εκμετάλλευση των οροσίων, όπως στα σχήματα 19 και 20, περιορίζει τις αστοχίες, μειώνει τον χρόνο αναζήτησης και αυξάνει την ταχύτητα αναζήτησης. Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι, οι μέθοδοι ευθυγράμμισης που υλοποιούνται με την βοήθεια ανατομικών διακριτικών σημείων, εφαρμόζονται σε κάθε πρόβλημα και σε κάθε εικόνα.



Σχήμα 19 : Εντοπισμός ανατομικών διακριτικών σημείων για υλοποίηση ευθυγράμμισης της υπό ευθυγράμμιση εικόνας (floating image) με την εικόνα αναφοράς (reference image)



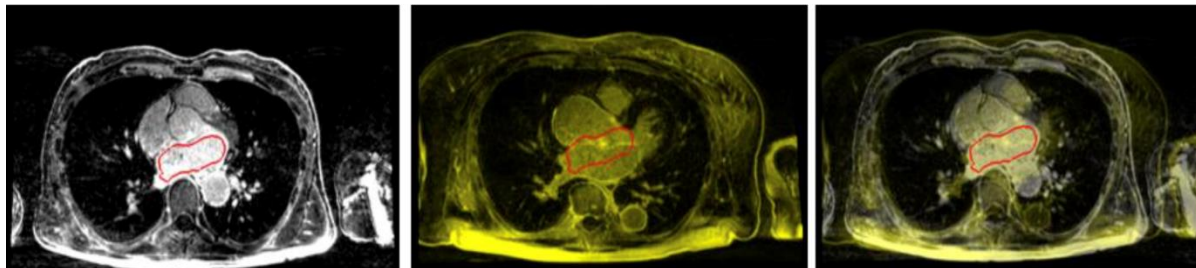


*Σχήμα 20 : Ευθυγράμμιση εικόνων CT και PET για εξέταση ασθενή με καρκίνο*

#### 3.2.3.2.2 Μέθοδοι Τμηματοποίησης

Η ευθυγράμμιση με μεθόδους τμηματοποίησης, αποτελείται από δύο βασικά βήματα, που φαίνονται και στο σχήμα 21. Πρώτα, τμηματοποιούνται οι εικόνες και μετά ταυτίζονται τα τμήματα που τμηματοποιήθηκαν. Από αυτή την αυτόματη διαδικασία συνήθως προκύπτουν διάφορα σημεία, καμπύλες και επιφάνειες των εικόνων. Ο χρήστης μπορεί να παρέμβει για καθοδήγηση της διαδικασίας, για να παραχθούν

συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αν το επιθυμεί. Οι μέθοδοι υπό τις οποίες προκύπτουν οι διάφορες καμπύλες ή αντίστοιχα επιφάνειες ως χαρακτηριστικά, αποτελούν δύο βασικές κατηγορίες και είναι μέθοδοι βασισμένες είτε σε άκαμπτο μοντέλο είτε σε εύκαμπτο μοντέλο [28], [29].



Σχήμα 21 : Ευθυγράμμιση με βάση τη κατάτμηση, της αριστερά και μεσαίας εικόνας (Segmentation based Registration). Δεξιά η ευθυγραμμισμένη εικόνα

Οι μέθοδοι άκαμπτου μοντέλου εξάγουν τις καταλληλότερες και ανατομικά ίδιες δομές, κυρίως επιφάνειες, που προκύπτουν από τις δύο εικόνες υπό επεξεργασία για να ευθυγραμμίσουν εικόνες ίδιας πηγής. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται πολύ στην κλινική πρακτική. Αυτή η κατηγορία προτιμάται ιδιαίτερος αφού, υπάρχει ευκολία στην εκτέλεση του σταδίου κατάτμησης της εικόνας και έχει σημαντικά μειωμένο υπολογιστικό κόστος. Ακόμα δύο λόγοι για αυτή την προτίμηση, είναι η επιτυχία της μεθόδου Head-Hat και της ταχείας μεθόδου ταύτισης Chamfer [30].

Οι μέθοδοι εύκαμπτου μοντέλου, χρησιμοποιούν επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία εξάγουν μια δομή από τη πρώτη εικόνα και την παραμορφώνουν ελαστικά για να την ταυτίσουν με την αντίστοιχη της δομή στη δεύτερη εικόνα. Αυτές οι μέθοδοι είναι καλύτερες στην ευθυγράμμιση εικόνων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές και στην ευθυγράμμιση με άτλαντα (η μία εικόνα είναι δημιουργημένη από μία βάση συλλογής απεικονιστικών δεδομένων) αλλά, διατίθεται μόνο η δυνατότητα υπολογισμού καμπυλόγραμμου μετασχηματισμού μεταξύ των εικόνων και όχι ολικού, συμπαγούς ή τύπου affine μετασχηματισμού.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτών των μεθόδων, είναι το γεγονός πως η ακρίβεια της ευθυγράμμισης επηρεάζεται πολύ, από την ακρίβεια στο ενδιάμεσο στάδιο της τμηματοποίησης πριν από τη τελική ευθυγράμμιση αλλά, σχεδόν πάντοτε είναι αυτοματοποιημένες διαδικασίες και μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις ανατομικές περιοχές και απεικονιστικές τεχνικές.

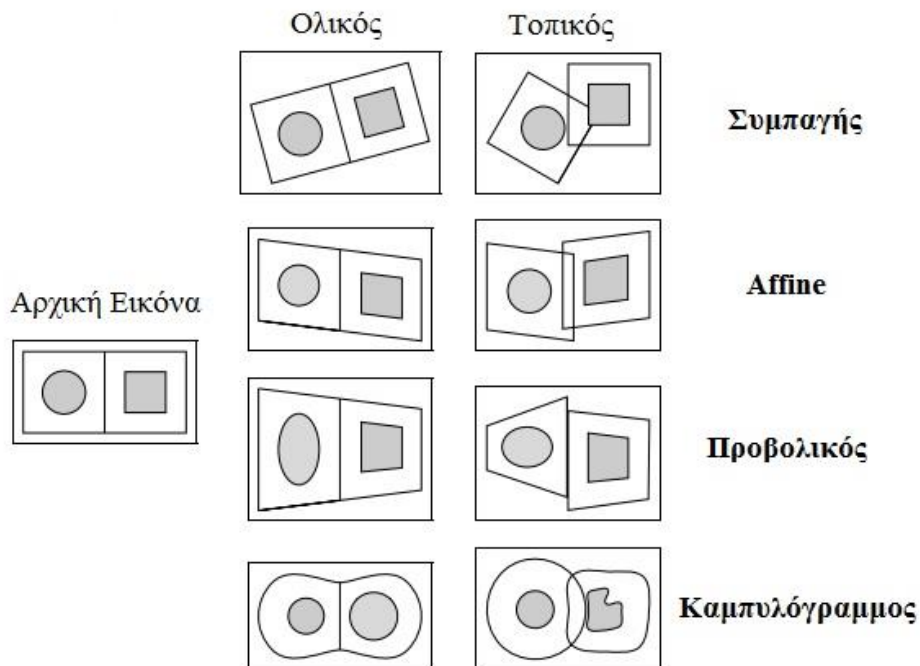
### 3.2.3.2.3 Μέθοδοι Βασιζόμενες στη Φωτεινότητα

Η υλοποίησή των μεθόδων αυτών διαφέρει πολύ σε σχέση με τις υπόλοιπες. Εξαρτάται από τις φωτεινότητες των εικονοστοιχείων της εξεταζόμενης εικόνας και δεν γίνεται τμηματοποίηση της εικόνας και ούτε υποδειγματοληψία της πληροφορίας και του ποσοστού των δεδομένων. Οι μέθοδοι αυτοί διακρίνονται σε δύο προσεγγίσεις. Η μέθοδος των κύριων αξόνων και η μέθοδος των ροπών χρησιμοποιούν υλοποιούνται με την πρώτη προσέγγιση, στην οποία γίνεται περιορισμός των επιπέδων του γκρι των εικονοστοιχείων της εικόνας, τα οποία αντιστοιχούνται σε ένα σύνολο διανυσμάτων. Οι ροπές μηδενικής και πρώτης τάξης της κάθε εικόνας ευθυγραμμίζουν το κέντρο

βάρους των εικόνων και των κύριων αξόνων, τα οποία ευθυγραμμίζουν τις εικόνες [31]. Αυτές οι μέθοδοι είναι γρήγορες, απλές και εφαρμόζονται αυτόματα, αλλά υστερούν σε ακρίβεια. Σε περίπτωση που η ακρίβεια δεν παίζει τόσο ρόλο, όπως είναι η εφαρμογή των μεθόδων αυτών ως βήμα προ-ευθυγράμμισης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετά αλλά, σε περίπτωση που δεν εξάγει αποδεκτά αποτελέσματα, είναι αναγκαίο να τμηματοποιηθεί η εικόνα [32]. Οι αρχικές εικόνες παρέχουν το εκατό τοις εκατό της πληροφορίας που φέρουν. Στην δεύτερη προσέγγιση στις μεθόδους, μας παρέχεται αυξημένη ακρίβεια με μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος, αφού χρησιμοποιείται η πλήρης εικόνα. Παλαιότερα, η χρήση τέτοιων μεθόδων χαρακτηριζόταν απαγορευτική από πλευράς υπολογιστικού κόστους, αλλά πλέον με την κατασκευή εντυπωσιακών γρήγορων υπολογιστικών συστημάτων, το κόστος αυτό έχει περιοριστεί.

### 3.2.4 Περιοχή Εφαρμογής του Μετασχηματισμού

Ανάλογα με την περιοχή εφαρμογής του, ένας μετασχηματισμός ονομάζεται τοπικός ή ολικός και η διαφορά φαίνεται και σχηματικά παρακάτω. Εάν εφαρμόσουμε τοπικό μετασχηματισμό τότε πολύ δύσκολα μπορούμε να λάβουμε την αρχική εικόνα πίσω αντιστρέφοντας την διαδικασία. Ειδικά σε περιπτώσεις συμπαγών, τύπου affine ή προβολικών μετασχηματισμών, δεν συστήνεται η εφαρμογή τοπικού μετασχηματισμού λόγω των ασυνεπειών (κενά, σχισμές) που προκύπτουν στη μετασχηματισμένη εικόνα στα όρια των περιοχών εφαρμογής.



Σχήμα 22 : Παράδειγμα εφαρμογής δισδιάστατων ολικών και τοπικών μετασχηματισμών στην υπό εξέταση εικόνα

### **3.2.5 Κατηγορίες δεδομένων**

Ανάλογα με τη προέλευση των δεδομένων διαχωρίζουμε τις τεχνικές σε τρεις θεμελιώδεις κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται οι τεχνικές που ευθυγραμμίζουν ιατρικά σύνολα δεδομένων τα οποία παράχθηκαν από την ίδια πηγή ή είναι ίδιου τύπου και ονομάζονται μονοτροπικές (Mono-Modal) και χρησιμοποιούνται για περιπτώσεις παρακολούθησης της πορείας κάποιων ασθενειών, για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας θεραπειών και ακόμη για τεχνικές ψηφιακής αφαιρετικής ακτινογραφίας. Η δεύτερη κατηγορία τεχνικών ευθυγράμμισης είναι οι πολυτροπικές (Multi-Modal) και επεξεργάζονται δεδομένα προερχόμενα από διαφορετικές πηγές λήψης. Εφαρμόζονται στην σύνθεση ή την σύντηξη ιατρικών δεδομένων. Στην τρίτη κατηγορία τεχνικών ευθυγράμμισης το υπό ευθυγράμμιση ιατρικό σύνολο δεδομένων είναι ένας ιατρικός άτλαντας, δηλαδή προέρχεται από μία βάση συλλογής απεικονιστικών δεδομένων προϊόν διαφορετικών πηγών λήψεων.

### **3.2.6 Το Υποκείμενο της Ευθυγράμμισης**

Το υποκείμενο της ευθυγράμμισης καθορίζεται από την προέλευση των ιατρικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την ευθυγράμμιση. Τα δεδομένα αυτά ανήκουν στον ίδιο ασθενή (Intra-Subject) ή σε διαφορετικά άτομα (Inter-Subject). Υπάρχει επίσης η πιθανότητα, το δεύτερο σύνολο της ευθυγράμμισης να προέρχεται από τον ιατρικό άτλαντα (Subject to Atlas), μια βάση συλλογής ιατρικών απεικονιστικών δεδομένων.

### **3.2.7 Το Αντικείμενο της Ευθυγράμμισης**

Το αντικείμενο της ευθυγράμμισης καθορίζεται από την περιοχή ενδιαφέροντος στην ανατομία του ασθενή. Πολλές μέθοδοι ευθυγράμμισης στοχεύουν σε συγκεκριμένη ανατομική περιοχή ή έχουν βελτιστοποιηθεί για συγκεκριμένη περιοχή.

### **3.2.8 Αυτοματοποίηση και Διαδραστικότητα**

Το πόσο μεγάλο ρόλο παίζει ο χρήστης στην ευθυγράμμιση είναι προφανώς κάτι που είναι σημαντικό και διαχωρίζει τις τεχνικές περαιτέρω. Οι τεχνικές μπορεί να είναι χειροκίνητες (Manual), ημιαυτόματες (Semi-Automatic) και αυτόματες (Automatic). Στην χειροκίνητη ευθυγράμμιση, ο χρήστης ελέγχει πλήρως την διαδικασία με την βοήθεια λογισμικού που ενημερώνει τον χρήστη για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η τρέχουσα ευθυγράμμιση. Στην δεύτερη κατηγορία ημιαυτόματης ευθυγράμμισης, ο χρήστης περιορίζεται στην αρχικοποίηση και στην απόρριψη ή αποδοχή προτεινόμενων λύσεων. Στην τρίτη κατηγορία της αυτόματης διαδικασίας ευθυγράμμισης ο χρήστης εισάγει δεδομένα στους αλγόριθμους και πληροφορίες που ανάκτησης των δεδομένων.

### **3.2.9 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης και Τεχνικές Αναζήτησης**

Μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι οι διαδικασίες οι οποίες πρέπει να ακολουθηθούν, με τη συμβολή των τιμών των συναρτήσεων ομοιότητας ή συναρτήσεων σφάλματος, για τον υπολογισμό νέων κάθε φορά παραμετρικών τιμών του αλγοριθμικού

μετασχηματισμού ευθυγράμμισης. Σκοπός της όλης διαδικασίας είναι οι νέες παραμετρικές τιμές που έχουν προκύψει να εξασφαλίζουν βελτιωμένη ακρίβεια μετά την υλοποίηση του μετασχηματισμού των δεδομένων. Το στάδιο του υπολογισμού των συγκεκριμένων παραμέτρων είναι υψηλής προτεραιότητας. Για το προσδιορισμό του μετασχηματισμού ευθυγράμμισης στη περίπτωση του ολικού συμπαγή χρειάζεται ο υπολογισμός έξι παραμετρικών τιμών, ενώ για τους υπόλοιπους, απαιτούνται εκατοντάδες μέχρι και χιλιάδες τέτοιες τιμές. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης κατηγοριοποιούνται ως απευθείας μέθοδοι ή προσεγγιστικές μέθοδοι και μέθοδοι αναζήτησης.

Οι απευθείας μέθοδοι χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα δεδομένα των παραμέτρων, υπολογίζουν αυτόματα και εξαρτώνται από τη φύση του μετασχηματισμού. Οι προσεγγιστικές μέθοδοι αναζητούν τα σημεία ακροτάτων στη συνάρτηση επιτυχίας της ευθυγράμμισης για να πάρουν ως αποτέλεσμα τις παραμέτρους. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, λόγω της μη ομαλής μαθηματικής συμπεριφοράς που υπάρχει στη συνάρτηση επιτυχίας, εκτελείται εξαντλητική αναζήτηση σε όλο τον παραμετρικό χώρο και έτσι αυξάνεται το υπολογιστικό κόστος κατά πολύ. Για αυτό τον λόγο, χρησιμοποιείται βελτιστοποίηση που αναζητά τα ακρότατα της συνάρτησης επιτυχίας. Ένα ακόμα εμπόδιο είναι η πιθανότητα η διαδικασία αυτή να παγιδευτεί σε τοπικό ακρότατο αντί ολικό. Έτσι, ακολουθούνται δύο διαφορετικές τεχνικές προσέγγισης βέλτιστης λύσης. Στην πρώτη τεχνική γίνεται λήψη, από το χώρο των ανεξάρτητων μεταβλητών, τυχαίων σημείων και ακολούθως υπολογίζεται ένα πλήθος τοπικών ακροτάτων και αν η συνάρτηση επιτυχίας είναι συνάρτηση μέτρησης σφάλματος ή συνάρτηση ομοιότητας, επιλέγεται το αντίστοιχο ακρότατο με τη χαμηλότερη ή υψηλότερη τιμή. Στη δεύτερη τεχνική με βήμα πεπερασμένου πλάτους κάθε φορά, λαμβάνεται ένα τοπικό ακρότατο στην εκάστοτε θέση και ταυτόχρονα συγκρίνεται η τιμή της συνάρτησης επιτυχίας για εντοπισμό της καλύτερης [33]. Οι μέθοδοι ολικής βελτιστοποίησης υστερούν στη σύγκλιση της περιοχής ολικού ακροτάτου με σχετική ακρίβεια. Τις περισσότερες φορές, η υλοποίηση μεθόδου τοπικής βελτιστοποίησης μετά την μέθοδο ολικής βελτιστοποίησης λειτουργεί καταλυτικά στην εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Μερικές από τις μεθόδους ολικής βελτιστοποίησης είναι η μέθοδος προσομοίωσης ανάκτησης (Simulated Annealing) [34], οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms), οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), η μέθοδος απαγόρευσης αναζήτησης και η μέθοδος διακλάδωσης και φραγής (Branch and Bound). Μερικές από τις μεθόδους τοπικής βελτιστοποίησης είναι η μέθοδος Downhill-Simplex [35], η μέθοδος Powell [36], η μέθοδος Quasi-Newton [19] και η μέθοδος συζυγών κλίσεων (Conjugate Gradient).

### **3.3 Κριτήρια Αξιολόγησης Τεχνικών Ευθυγράμμισης**

Η εικόνα που ευθυγραμμίζεται, μετασχηματίζεται σε κάθε επανάληψη, ανάλογα με τις παράμετρος που υπολογίζονται στην επαναληπτική διαδικασία και έτσι αλλάζει η μορφή της κατάλληλα. Στη συνέχεια με βάση προκαθορισμένα κριτήρια, συγκρίνεται με την εικόνα αναφοράς. Αυτά τα κριτήρια είναι ο βαθμός ομοιότητας ή απόκλιση των δύο εικόνων, που υπολογίζονται με την βοήθεια των συναρτήσεων ομοιότητας ή σφάλματος. Υπάρχει μεγάλος αριθμός συναρτήσεων τέτοιων και η επιλογή συνάρτησης κάθε φορά εξυπηρετεί τις εκάστοτε εφαρμογές. Αυτή η συνάρτηση έχει

να κάνει πολύ με τη μεθοδολογία ευθυγράμμισης που θα ακολουθηθεί και το είδος των δεδομένων που χρησιμοποιείται.

### 3.3.1 Συνάρτηση Επιτυχίας

Οι συναρτήσεις επιτυχίας είναι συναρτήσεις μέτρησης απόστασης ή συναρτήσεις ομοιότητας. Η προσπάθεια ελαχιστοποίησης της τιμής που προκύπτει από τη μέτρηση απόστασης, χρησιμοποιείται ως μέτρο επιτυχίας στις περιπτώσεις που η ευθυγράμμιση στηρίζεται στα ζεύγη αντίστοιχων σημείων. Αυτή η υλοποίηση βασίζεται συνήθως στη χρήση προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων με σκοπό την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος MSE το οποίο ορίζεται ως εξής :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|r_i'' - T(r_i)\|^2 \quad (1)$$

με  $r_i$  και  $r_i''$  να ορίζονται ως  $(x_i, y_i, z_i)$  και  $(x_i'', y_i'', z_i'')$  και παράλληλα να εκφράζουν τα αντίστοιχα ζεύγη σημείων στο προς ευθυγράμμιση σύνολο δεδομένων και στο σύνολο δεδομένων αναφοράς αντίστοιχα, ενώ  $T(r_i)$  είναι ο μετασχηματισμός της εικόνας στην εικόνα αναφοράς. Στις περιπτώσεις που ως μέτρο επιτυχίας της ευθυγράμμισης είναι κάποια συνάρτηση ομοιότητας, αυτό γίνεται μέσω της επίτευξης της μέγιστης τιμής. Μία τέτοια συνάρτηση εκφράζει κάποια μορφή συσχετισμού μεταξύ των εικόνων, η οποία στηρίζεται στις τιμές των χρωματικών πυκνοτήτων των στοιχείων της εικόνας. Η σχέση μεγιστοποίησης ορίζεται ως εξής :

$$T = \underset{T}{\operatorname{argmax}} [O(I_T(r), I_R(r))] \quad (2)$$

με  $I_T(r)$  να είναι η μετασχηματισμένη εικόνα και  $I_R(r)$  η εικόνα αναφοράς.

#### 3.3.1.1 Άθροισμα της Απόλυτης Διαφοράς Χρωματικών Πυκνοτήτων

Το άθροισμα της απόλυτης διαφοράς χρωματικών πυκνοτήτων ορίζεται ως εξής [37] :

$$C_{AD}(r) = \sum_r |I_R(r) - I_T(r)| \quad (3)$$

Η συνάρτηση ομοιότητας αυτή είναι ιδιαίτερα επιρρεπής στην παρουσία θορύβου. Ο θόρυβος αυτός δεν ακολουθεί κανονική κατανομή και δεν είναι σε θέση να διαχειριστεί δεδομένα τα οποία παρουσιάζουν τοπικές χρωματικές μεταβολές ή προέρχονται από διαφορετικές απεικονιστικές μεθόδους. Μια άλλη εκδοχή αυτής της συνάρτησης είναι το άθροισμα των διαφορών τετραγώνων και εκφράζεται ως εξής :

$$C_{SAD}(r) = \sum_r |I_R(r) - I_T(r)|^2 \quad (4)$$

### 3.3.1.2 Συντελεστής Συσχέτισης Χρωματικών Πυκνοτήτων

Η εξίσωση του συντελεστή συσχέτισης χρωματικών πυκνοτήτων ορίζεται ως εξής :

$$CC(I_R, I_T) = \left| \frac{\sum_r [I_T(r) - \bar{I}_T][I_R(r) - \bar{I}_R]}{\sqrt{\sum_r [I_T(r) - \bar{I}_T]^2} \sqrt{\sum_r [I_R(r) - \bar{I}_R]^2}} \right| \quad (5)$$

με  $\bar{I}_T, \bar{I}_R$  να δηλώνουν αντίστοιχα τη μέση τιμή των εικόνων  $I_T(r)$  και  $I_R(r)$ .

Το εύρος των τιμών του συντελεστή συσχέτισης κυμαίνεται από μηδέν έως μονάδα. Η μέγιστη συσχέτιση μεταξύ των δύο εικόνων προκύπτει όταν η τιμή του συντελεστή κοντεύει στην μονάδα. Ο συντελεστής συσχέτισης διατηρείται αναλλοίωτος όταν ο μετασχηματισμός ευθυγράμμισης είναι γραμμικός. Ισχύει δηλαδή το εξής :

$$CC(a_1 I_T + b_1, a_2 I_R + b_2) = CC(I_T, I_R) \quad (6)$$

Ο συντελεστής παρουσιάζει ταυτόχρονα αντοχή στην οποιαδήποτε αυξομείωση της αντίθεσης και της φωτεινότητας στις εικόνες. Όμως, αν τα απεικονιστικά δεδομένα εισόδου είναι αποτέλεσμα διαφορετικών μεθόδων απεικόνισης τότε, η τιμή της χρωματικής πυκνότητας που θα δοθεί σε αυτά από την εκάστοτε τεχνική θα διαφέρει. Φυσικό επακόλουθο είναι να παρουσιάζεται αδυναμία στη υλοποίηση ευθυγράμμισης με βάση το συντελεστή συσχέτισης. Επίσης, αν υπάρξει ένα βήμα προεπεξεργασίας των απεικονιστικών δεδομένων, η προαναφερθείσα μέθοδος είναι εφικτή.

### 3.3.1.3 Διαφορά Εντροπίας

Η εντροπία υπάγεται στα κριτήρια της ευθυγράμμισης που βασίζονται στα ιστογράμματα των εικόνων. Έστω ότι  $I$  η τιμή των χρωματικών πυκνοτήτων των στοιχείων μίας εικόνας και η οποία δύναται να θεωρηθεί τυχαία μεταβλητή με κατανομή  $P(I = k)$ , τότε η εντροπία ( $H$ ) της εικόνας συναρτήσει της διαφοράς των χρωματικών πυκνοτήτων  $I_D$  μεταξύ της μετασχηματισμένης και της αναφοράς εικόνας, εκφράζεται από την εξής σχέση :

$$H(I_D) = - \sum_{k=0}^{G-1} P(I_D = k) \log_2 P(I_D = k) \quad (7)$$

με τη μεταβλητή  $G$  να ορίζεται ως το πλήθος των επιπέδων του γκρι (συνήθως 256).

### 3.3.1.4 Συντελεστής Αμοιβαίας Πληροφορίας

Ο συντελεστής αμοιβαίας πληροφορίας περιγράφει το ποσό πληροφορίας που περιέχει η μία εικόνα  $I_R$  από την άλλη  $I_T$ . Είναι ένας δείκτης του βαθμού εξάρτησης των δύο υπό σύγκριση εικόνων  $I_T$  και  $I_R$ . Περιγράφεται από την εξής σχέση :

$$MI(I_T, I_R) = - \sum_{k=0}^{G-1} \sum_{l=0}^{G-1} P(I_T = k, I_R = l) \log_2 \frac{P(I_T = k, I_R = l)}{P(I_T = k)P(I_R = l)} \quad (8)$$

Παρουσιάζει πλήρη ανεξαρτησία από τον οποιοδήποτε θόρυβο, στις μεταβολές των φωτεινοτήτων των εικόνων και στις αλλαγές των αντιθέσεων τους. Χρησιμοποιείται σε δισδιάστατα, τρισδιάστατα απεικονιστικά δεδομένα χωρίς να επηρεάζει το γεγονός μεθόδου προέλευσης και η εκμετάλλευσή του για ευθυγράμμιση, μπορεί να υλοποιηθεί σε προβλήματα εφαρμογής συμπαγούς και μη μετασχηματισμού [19]. Είναι μία πλήρως αυτόματη διαδικασία.

### 3.3.2 Αποτίμηση Τεχνικών Ευθυγράμμισης

Εδώ παρατίθενται διάφορα κριτήρια τα οποία καθορίζουν τι πρέπει να ληφθεί υπόψη και να ικανοποιηθεί από την εκάστοτε μέθοδο ευθυγράμμισης, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί [19].

#### 3.3.2.1 Ακρίβεια (Precision and Accuracy)

Όταν ένας αλγόριθμος ευθυγράμμισης υλοποιείται για ένα συγκεκριμένο δεδομένο εισόδου, το σφάλμα που προκύπτει είναι ιδιότητα του συστήματος. Αυτό ορίζεται ως ακρίβεια (Precision). Το συστηματικό σφάλμα έχει δύο μορφές. Μπορεί να ταυτίζεται με το σφάλμα ολόκληρου του συστήματος ευθυγράμμισης ή να πηγάζει από επιμέρους παράγοντες (π.χ. σφάλμα μεθόδου βελτιστοποίησης). Ο όρος ακρίβεια (Accuracy) αφορά το άμεσο σφάλμα. Δεν ανήκει στις ιδιότητες του συστήματος. Μπορεί να χαρακτηριστεί ως ποιοτικό ή ποσοτικό σφάλμα και αυτό καθορίζεται από το πως υπολογίζεται. Όταν καθορίζεται με οπτικό έλεγχο από ειδικούς είναι ποιοτικό. Όταν προκύπτει από στατιστικές μεθόδους είναι ποσοτικό.

#### 3.3.2.2 Ευρωστία-Ευστάθεια

Ευρωστία (Robustness) ορίζεται ως, η ικανότητα μίας μεθόδου να παράγει όσο το δυνατό καλύτερα αποτελέσματα υπό την παρουσία θορύβου. Χαρακτηρίζεται και ως ευστάθεια, πράγμα που δηλώνει την ικανότητα των μικρών αλλαγών στην είσοδο να προκαλούν μικρές διαταραχές στην έξοδο.

#### 3.3.2.3 Αξιοπιστία

Μέσω αυτού του όρου βλέπουμε κατά πόσο είναι ικανός ένας αλγόριθμος να λειτουργήσει όπως αναμένεται, όταν εφαρμοστεί φυσικά σε ένα ικανοποιητικό πλήθος κλινικών δεδομένων.

#### 3.3.2.4 Απαιτήσεις και Ανάγκες - Αλγοριθμική Πολυπλοκότητα

Εδώ παρατίθενται δύο κριτήρια τα οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Οι πολύπλοκοι αλγόριθμοι ευθυγράμμισης με ειδικευση στην επίλυση των πολύπλοκων παραμορφώσεων, έχουν απαιτήσεις και ανάγκες αρκετά αυξημένες σε σχέση με αντίστοιχες περιπτώσεις εφαρμογής συμπαγούς μετασχηματισμού και επίσης ένας αλγόριθμος ευθυγράμμισης, προοριζόμενος για κλινικές εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, επιβάλλεται να είναι γρήγορος χωρίς να μειώνεται η ακρίβειά του, να είναι αποδοτικός και κυρίως να μην είναι απαιτητικός σε πόρους.



### 3.3.2.5 Κλινική Χρησιμότητα

Κάθε μέθοδος ευθυγράμμισης θα πρέπει να σχεδιάζεται από τη βάση με γνώμονα την κλινική χρησιμότητα της και τα συγκριτικά της πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπάρχουσες τεχνικές. Πρέπει να είναι φθηνότερη, ευκολότερη και αποτελεσματικότερη από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο που εφαρμόζεται ήδη.

Γενικά κάθε ερευνητής επιλέγει προσωπικά την μέθοδο ευθυγράμμισης, επιλέγοντας ποια κριτήρια παίζουν μεγαλύτερο ρόλο για τον ίδιο, αφού όλα είναι αδύνατο να ικανοποιηθούν.



# 4 Μέθοδοι ευθυγράμμισης με γεωμετρικούς περιγραφητές

## 4.1 Εισαγωγή

Στην ευθυγράμμιση ιατρικών δεδομένων υπάρχει η επιτακτική ανάγκη για υψηλή ακρίβεια. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από μια πληθώρα απεικονιστικών συστημάτων. Η επίτευξη της υψηλής ακρίβειας επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση όλων των διαθέσιμων σημείων. Σε τέτοιες μεθόδους, η τεχνική ευθυγράμμισης είναι καθολική. Γίνεται εκμετάλλευση όλων των σημειακών συντεταγμένων ή των αντίστοιχων τιμών της έντασης φωτεινότητας των σημείων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το υπολογιστικό κόστος και ο χρόνος υλοποίησης. Οι μέθοδοι αυτοί συμπεριφέρονται πολύ αποτελεσματικά και με υψηλή ακρίβεια σε δυσδιάστατα δεδομένα. Ταυτόχρονα όμως παρουσιάζουν μεγάλη δυσκολία στην αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας των τρισδιάστατων προβλημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι ευθυγράμμισης με την χρήση των τιμών της φωτεινότητας των σημείων αποτυγχάνουν, σε περιπτώσεις που η πηγή λήψης τους διαφέρει λόγω της πιθανής διαφορετικής πληροφορίας των τιμών έντασης. Ακόμη και τα δεδομένα τα οποία παράχθηκαν από το ίδιο απεικονιστικό σύστημα δεν είναι κατάλληλα για τέτοιου είδους τεχνικές ευθυγράμμισης. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη λήψη. Η πολυπλοκότητα των πράξεων για τη συγκεκριμένη υλοποίηση καθιστά την ευθυγράμμιση με φωτεινότητα, αναποτελεσματική. Για αυτό αναπτύχθηκαν προηγμένοι αλγόριθμοι για την υλοποίηση σημειακών τεχνικών τρισδιάστατης ευθυγράμμισης.

Η όλη μεθοδολογία αρχίζει από τη μετατροπή των ιατρικών δεδομένων σε νέφη σημείων. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται μία αντιστοίχιση σημείων στα υπό εξέταση νέφη και υπολογίζεται κατάλληλος γεωμετρικός μετασχηματισμός, ο οποίος μετά τη χρήση του εξασφαλίζει την ελάχιστη δυνατή χωρική απόκλιση των δύο τρισδιάστατων δομών. Ο γεωμετρικός μετασχηματισμός που θα προκύψει είναι αντιπροσωπευτικός και αποτελεσματικός για να εφαρμοστεί και να ευθυγραμμίσει τα αρχικά δεδομένα. Τα στάδια που ακολουθούνται σε κάθε περίπτωση περιγραφητή είναι τα ίδια, με τη μόνη διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων να είναι το είδος του. Ο γεωμετρικός περιγραφητής κωδικοποιεί τις γεωμετρικές ιδιότητες μίας προκαθορισμένης περιοχής γύρω από το υπό εξέταση σημείο και εξασφαλίζει τη μοναδική περιγραφή του, διαχωρίζοντας το έτσι από τα υπόλοιπα σημεία του τρισδιάστατου νέφους. Η απόσταση και οι γωνίες μεταξύ κάθετων διανυσμάτων αποτελούν πιθανές επιλογές από ένα μεγάλο πλήθος εκμεταλλεύσιμων γεωμετρικών ιδιοτήτων.

## 4.2 Μεθοδολογία Ευθυγράμμισης Βασισμένη σε Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά

Η ευθυγράμμιση με τους παραχθέντες γεωμετρικούς περιγραφητές αρχίζει με την είσοδο των δύο τρισδιάστατων σημειακών νεφών, το υπό ευθυγράμμιση και το σημειακό νέφος αναφοράς. Τα νέφη παράγονται από την μετατροπή των ιατρικών απεικονιστικών δεδομένων. Στη συνέχεια, έχουμε την διαδικασία κατά την οποία ελαχιστοποιείται η διαφορά των δύο νεφών, με τη περιστροφή ή μετακίνηση του υπό ευθυγράμμιση νέφους σημείων ως προς το νέφος αναφοράς. Η σύγκριση των γεωμετρικών περιγραφητών του κάθε σημείου για κάθε νέφος, έχει ως αποτέλεσμα την εύρεση των ταυτόσημων σημείων μεταξύ των νεφών. Υπάρχει όμως η πιθανότητα μερικές από τις αντιστοιχίσεις σημείων να είναι λανθασμένες. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούμε μία επαναληπτική μέθοδο γνωστή ως RANSAC (Random Sample Consensus) για την απόρριψη τους. Οι ορθές αντιστοιχίσεις λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων ενός συμπαγούς μετασχηματισμού. Υπολογίζεται δηλαδή, ένας πίνακας που περιέχει στις κατάλληλες θέσεις τα στοιχεία για τη περιστροφή και τη μετατόπιση που θα εφαρμοστεί στο υπό ευθυγράμμιση τρισδιάστατο σημειακό νέφος.

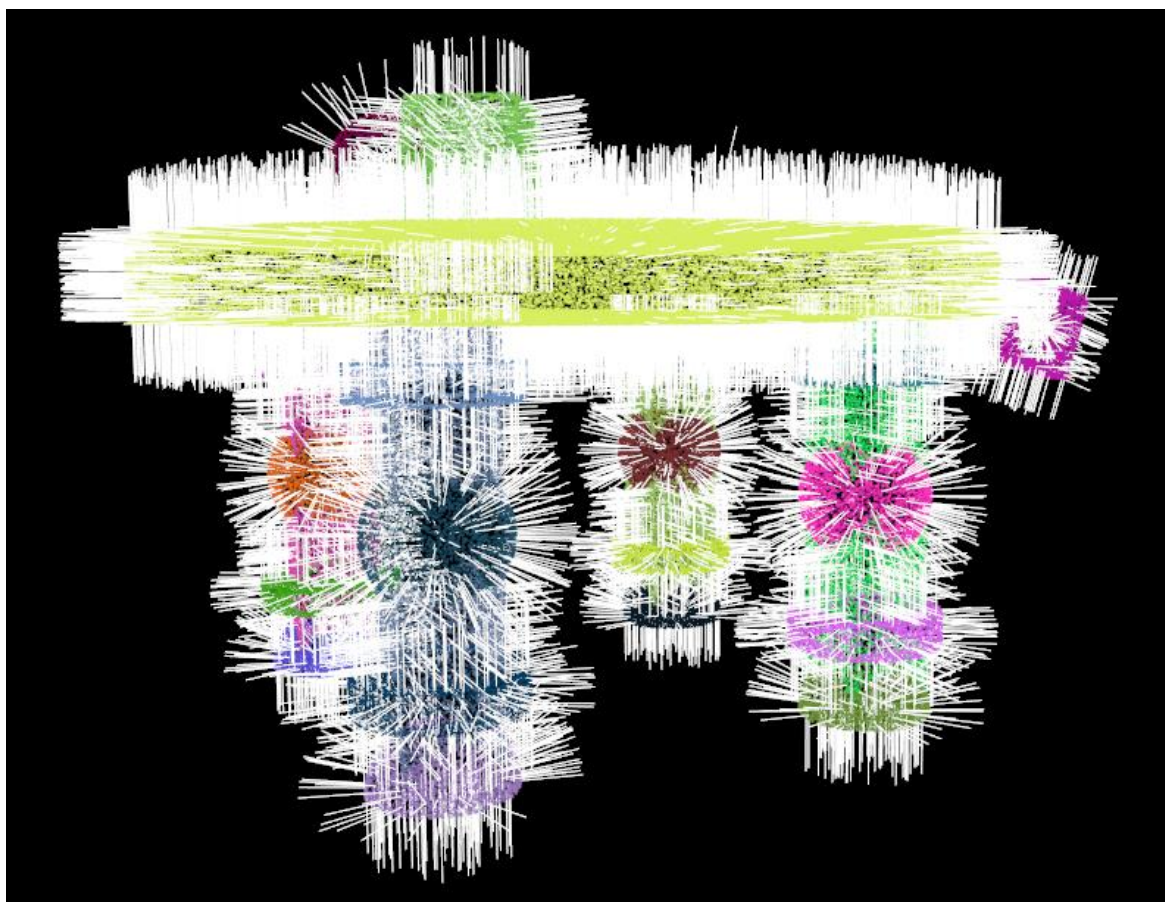
### 4.2.1 Γεωμετρικοί Περιγραφητές (Feature Descriptors)

Χρειάζεται ένας μοναδικός τρόπος περιγραφής για κάθε σημείο μέσα στα δύο νέφη, για να δημιουργηθεί ένα σύνολο ταυτισμένων σημείων και η μοναδικότητα δεν επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μόνο τις χωρικές συντεταγμένες του σημείου. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις διαδοχικών σαρώσεων δύο σημεία έχουν την ίδια θέση στο χώρο, αλλά παράλληλα ανήκουν σε διαφορετικές επιφάνειες και όταν εξετάζονται ως προς τα γειτονικά τους σημεία παρέχουν εντελώς διαφορετική πληροφορία. Επίσης, το χρώμα, η ένταση και η υφή που αποκτούν τα σημεία από τις διάφορες τεχνικές δημιουργίας τους, είναι ανεπαρκές επίσης στη διασφάλιση ενός ξεχωριστού τρόπου καθορισμού του σημείου. Μια λύση για την αντιπροσωπευτική περιγραφή ενός σημείου αποτελεί ο τοπικός γεωμετρικός περιγραφητής (Local Feature Descriptor). Αυτό επιτυγχάνει μέσω της εκμετάλλευσης του γειτονικού χώρου του σημείου, επιλέγοντας από πολλές γεωμετρικές ιδιότητες όπως είναι η απόσταση, οι γωνίες μεταξύ κάθετων διανυσμάτων και η σχετική θέση. Αυτές οι ιδιότητες κωδικοποιούνται και καθορίζουν τον γεωμετρικό περιγραφητή, εξασφαλίζεται μία χαρακτηριστική και λεπτομερής περιγραφή του χώρου γύρω από το σημείο και διασφαλίζεται η μοναδικότητά του σημείου.

Υπάρχει μεγάλο πλήθος γεωμετρικών περιγραφητών (ολικών ή τοπικών) που προκύπτει από τον αντίστοιχα μεγάλο εκμεταλλεύσιμο αριθμό γεωμετρικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών. Ο ολικός περιγραφητής υπολογίζεται για όλο το εύρος του σημειακού νέφους και εφαρμόζεται συνήθως σε περιπτώσεις όπως αυτή της τρισδιάστατης αναγνώρισης αντικειμένων. Στη περίπτωση των τοπικών περιγραφητών, συχνά χρησιμοποιούμενων στις τεχνικές ευθυγράμμισης, υπολογίζεται ένας για κάθε σημείο του νέφους.

#### 4.2.1.1 Γεωμετρικός Περιγραφητής Κάθετων Διανυσμάτων (Normals)

Ο τοπικός γεωμετρικός περιγραφητής κάθετων διανυσμάτων είναι εύκολος για εφαρμογή και απαραίτητος για την εφαρμογή πιο σύνθετων περιγραφητών. Το κάθετο διάνυσμα (normal) ενός σημείου στην επιφάνεια αποτελεί το γεωμετρικό περιγραφητή κάθετων διανυσμάτων και η όλη διαδικασία υπολογισμού του στηρίζεται στους γείτονες του υπό εξέταση σημείου  $p_q$ . Επιλέγεται κατάλληλη περιοχή γύρω από ένα σημείο και βρίσκονται τα κοντινότερα γειτονικά σημεία  $P^k$  που ανήκουν σε αυτή. Αυτά με τη σειρά τους εξάγουν τη γεωμετρία της επιφάνειας που περιβάλλει το σημείο  $p_q$  [38]. Το κάθετο διάνυσμα του κάθε σημείου αντιστοιχεί στο κάθετο διάνυσμα πάνω σε ένα επίπεδο που εφάπτεται στην επιφάνεια που περιέχει το σημείο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 23 : Κάθετα διανύσματα (Normals) σε διάφορα σημεία στις υπό εξέταση επιφάνειες αντικειμένων

Το επίπεδο  $\Pi$  περιγράφεται χρησιμοποιώντας ένα σημείο  $x$  και ένα κάθετο διάνυσμα  $\vec{n}$ . Κατά τον υπολογισμό του επιπέδου και των παραμέτρων του πρέπει να διασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των αποστάσεων των σημείων  $p_i \in P^k$  από το επίπεδο  $\Pi$ . Ισχύει η σχέση :

$$\min \sum_{i=1}^k d_i(p_i, \Pi)^2 \quad (9)$$

όπου  $k$  είναι ο αριθμός των γειτόνων του υπό εξέταση σημείου  $p_q$ . Η απόσταση  $d_i$  εκφράζεται ως :

$$d_i = (p_i - x) \cdot \vec{n} \quad (10)$$

Για το σύνολο των σημείων  $P^k$  θα υπολογιστεί το κέντρο βάρους και ακολούθως θα εξισωθεί με το σημείο  $x$ . Η σχέση η οποία εφαρμόζεται είναι :

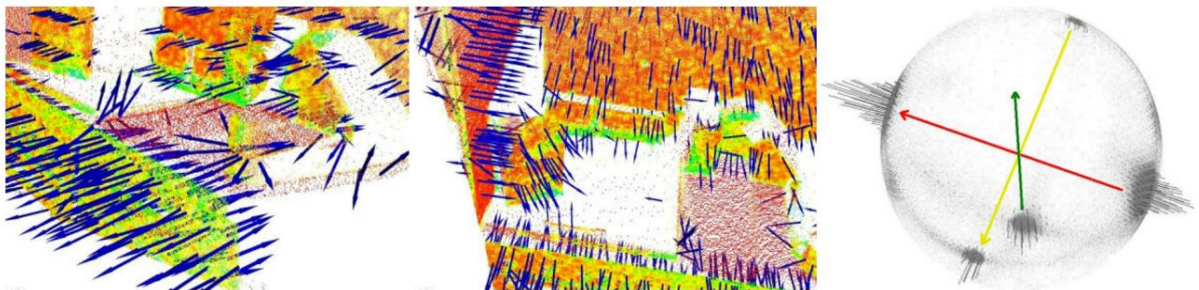
$$x = \bar{p} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k p_i \quad (11)$$

Το διάνυσμα  $\vec{n}$  δύναται να ευρεθεί εξάγοντας τις ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα  $C \in R^{3 \times 3}$  του  $P^k$ . Ο πίνακας  $C$  ικανοποιεί τα εξής :

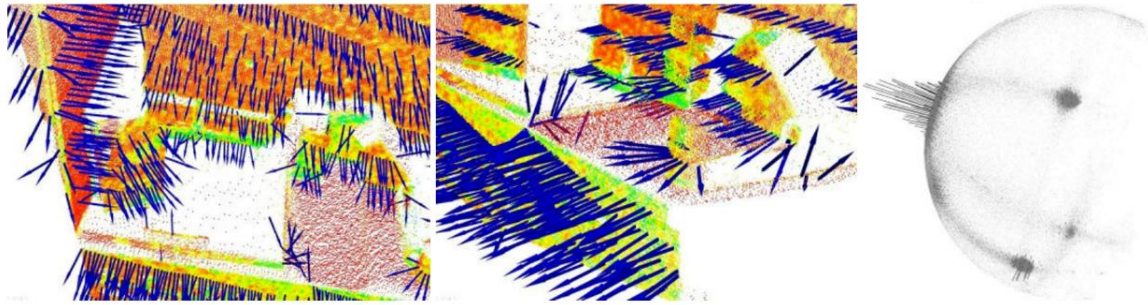
$$C = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \xi_i \cdot (p_i - \bar{p}) \cdot (p_i - \bar{p})^T \quad (12)$$

$$C \cdot \vec{v}_j = \lambda_j \cdot \vec{v}_j \text{ όπου } j \in \{0,1,2\}$$

όπου το  $\xi_i$  είναι συνήθως μονάδα και αντιπροσωπεύει το βάρος του σημείου  $p_i$ . Οι πραγματικοί αριθμοί  $\lambda_j$  περιγράφουν τις ιδιοτιμές του συμμετρικού πίνακα  $C$ . Το ιδιοδιάνυσμα  $\vec{v}_0$  αντιστοιχίζεται στη μικρότερη ιδιοτιμή  $\lambda_0$ , με  $0 \leq \lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2$ , και αποτελεί τη λύση για το ζητούμενο μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα  $\vec{n} = \{n_x, n_y, n_z\}$ . Το πρόσημο μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό, λόγω της αδυναμίας που παρουσιάζεται στο σαφή καθορισμό ενός μαθηματικού τρόπου υπολογισμού του και έτσι εμφανίζεται ανομοιομορφία προσανατολισμού μεταξύ των διανυσμάτων σε ολόκληρο το εύρος του τρισδιάστατου νέφους σημείων και το γεγονός αυτό συνυπολογίζεται στα αρνητικά της χρήσης της μεθόδου ανάλυσης κυρίων συνιστωσών (Principal Component Analysis - PCA). Η σφαίρα κάθετων διανυσμάτων (Normal Sphere or Extended Guassian Image) είναι υπεύθυνη για τη συγκεντρωτική παρουσίαση των φορών όλων των  $\vec{n}_i$  για να γίνει αντιληπτή η απροσδιόριστη συμπεριφορά στις φορές τους. Αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα των φορών είναι η εκμετάλλευση ενός γνωστού σημείου παρατήρησης  $v_p$ . Η εφαρμογή της λύσης και τα αποτελέσματα που επιφέρει, φαίνονται με την σύγκριση των δύο επόμενων σχημάτων.



Σχήμα 24 : Σημειακά νέφη με κάθετα διανύσματα απροσδιόριστου προσανατολισμού φορών και η αντίστοιχη σφαίρα κάθετων διανυσμάτων (Normal Sphere)



Σχήμα 25 : Σημειακά νέφη με κάθετα διανύσματα ομοιόμορφου προσανατολισμού φερών προς το σημείο παρατήρησης και η αντίστοιχη σφαίρα κάθετων διανυσμάτων (Normal Sphere)

Η σχέση η οποία ακολουθεί καθορίζει τον προσανατολισμό των διανυσμάτων  $\vec{n}_i$  προς το γνωστό σημείο παρατήρησης  $v_p$  είναι:

$$\vec{n}_i \cdot (v_p - p_i) > 0 \quad (13)$$

Η ορθά προσανατολισμένη εύρεση των κάθετων διανυσμάτων κρίνεται καίρια. Ο γεωμετρικός περιγραφητής κάθετων διανυσμάτων δεν είναι τίποτα άλλο από ένα πίνακα διαστάσεων  $(3 \times 1)$  με τιμές του να ταυτίζονται με τις συντεταγμένες του κάθετου διανύσματος :

$$\vec{n}_i = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

#### 4.2.1.2 Fast Point Feature Histograms (FPFH)

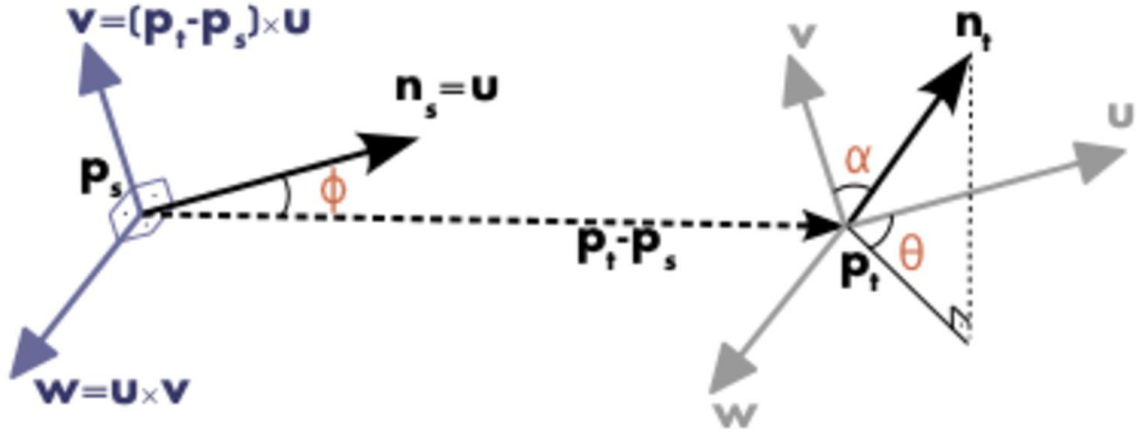
Ο τοπικός γεωμετρικός περιγραφητής FPFH είναι ένας εξελιγμένος περιγραφητής και δεν οδηγεί σε λανθασμένες αντιστοιχίσεις μεταξύ των νεφών, αφού δεν στερεί σημαντική ακρίβεια και λεπτομέρεια όπως, τον απλούστερο περιγραφητή κάθετων διανυσμάτων. Στη βάση του γίνεται επίσης χρήση των κάθετων διανυσμάτων όμως, τα κενά που εμφανίζονταν στον προηγούμενο περιγραφητή λόγω απλότητας, καλύπτονται. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες μίας περιοχής που περιβάλλει κάποιο σημείο  $p_i$ , η οποία καθορίζεται από μία σφαίρα ακτίνας  $r$  και κέντρο το σημείο  $p_i$ , υπολογίζονται και εκφράζονται σε ένα ιστόγραμμα πολλών διαστάσεων. Οι διαφορές που προκύπτουν στις διευθύνσεις των κάθετων διανυσμάτων του σημείου και των γειτόνων του, κωδικοποιούνται σε ένα σύνολο γωνιών  $\alpha, \varphi, \theta$  και απαρτίζουν τα θεμελιώδη συστατικά στη σύσταση του επιθυμητού ιστογράμματος [38][39].

Αρχικά καθορίζεται ένα αμετάβλητο σύστημα συντεταγμένων  $u, v, w$  για το εκάστοτε ζεύγος σημείων :

$$u = n_s, v = u \times \frac{(p_t - p_s)}{\|p_t - p_s\|_2}, w = u \times v \quad (15)$$



Το σημείο  $p_s$  ορίζεται ως σημείο πηγής και το σημείο  $p_t$  ως σημείο προορισμού. Το σημείο πηγής έχει την ελάχιστη διαμορφωμένη γωνιά μεταξύ του κάθετου διανύσματος του και της ευθείας που το συνδέει με το σημείο προορισμού.



Σχήμα 26 : Γραφική απεικόνιση των γωνιών  $\alpha, \varphi, \theta$  ενός ζεύγους σημείων  $p_s$  και  $p_t$ , μαζί με τα αντίστοιχα κάθετα διανύσματα τους  $n_s$  και  $n_t$ , σε ένα αμετάβλητο σύστημα συντεταγμένων  $u, v, w$

Οι γωνίες  $\alpha, \varphi, \theta$  κωδικοποιούν τις διαφορές των διευθύνσεων των κάθετων διανυσμάτων  $n_s$  και  $n_t$ , για τα αντίστοιχα σημεία  $p_s$  και  $p_t$  στο σταθερό σύστημα συντεταγμένων  $u, v, w$  ως εξής:

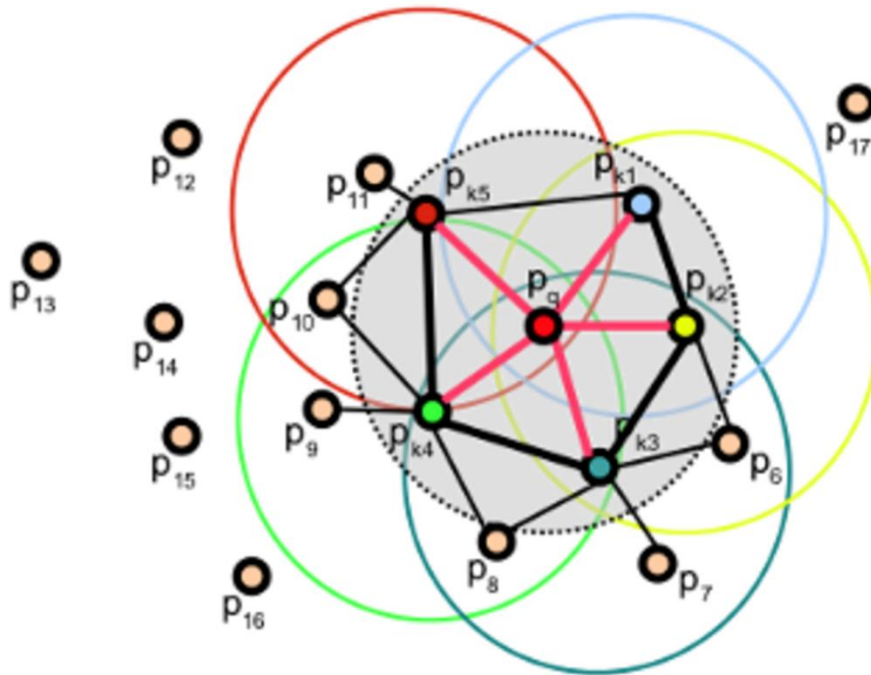
$$\alpha = v \cdot n_t, \varphi = u \cdot \frac{(p_t - p_s)}{d}, \theta = \tan^{-1}(w \cdot n_t, u \cdot n_t) \quad (16)$$

όπου  $d = \|p_t - p_s\|_2$  αποτελεί την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των σημείων πηγής και προορισμού. Λόγω της εξάρτησης της με την απόσταση από το σημείο παρατήρησης, αφού αυξάνεται όσο πιο μακριά βρίσκεται από αυτό, χαρακτηρίζεται ως δευτερεύον παράγοντας.

Το ιστόγραμμα Simplified Point Feature Histogram (SPFH) ενός σημείου  $p_q$  και μίας περιοχής που καθορίζεται από κάποια σφαίρα, με ακτίνα  $r$  και κέντρο το  $p_q$ , δομείται από τον εκάστοτε υπολογισμό του συνόλου των γωνιών  $\alpha, \varphi, \theta$  για κάθε ζεύγος σημείων  $p_q$  και  $p_k$ , το οποίο  $p_k$  ορίζεται ως γειτονικό σημείο του  $p_q$  μέσα στην υπό εξέταση περιοχή. Για να υπολογιστεί το Fast Point Feature Histograms (FPFH) του σημείου  $p_q$  πρέπει να προστεθεί στο ήδη υπολογισμένο SPFH ο μέσος όρος των SPFH, πολλαπλασιασμένων με συντελεστή βάρους, του κάθε γειτονικού σημείου  $p_k$ . Το εκάστοτε SPFH που θα ευρεθεί επιβάλλεται να υπακούει στα ίδια κριτήρια που εφαρμόστηκαν στο αρχικό σημείο  $p_q$ . Ο συντελεστής βάρους  $\omega_k$  προσδιορίζεται από την απόσταση που χωρίζει το υπό εξέταση σημείο  $p_q$  με το γειτονικό του  $p_k$ . Η εξίσωση υπολογισμού είναι:

$$FPFH(p_q) = SPFH(p_q) + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{\omega_k} \cdot SPFH(p_k) \quad (17)$$





Σχήμα 27 : Διάγραμμα των περιοχών που λαμβάνουν μέρος στον υπολογισμό του κάθε SPFH για το σχηματισμό του τελικού FPFH του σημείου  $p_q$ . Οι γείτονες της περιοχής που καθορίζει η ακτίνα ενώνονται με το σημείο  $p_q$  και υπολογίζεται το αντίστοιχο SPFH. Κάθε γειτονικό σημείο  $p_k$ , κάτω από τα ίδια κριτήρια, συνδέεται με τα γειτονικά του και προσδιορίζονται τα εκάστοτε SPFH. Οι μαύρες γραμμές υποδηλώνουν συνδέσεις που έχουν πραγματοποιηθεί δύο φορές.

Για να υλοποιηθεί το ιστόγραμμα SPFH του σημείου  $p_q$ , γίνεται ισάριθμος διαχωρισμός, με ίσα διαστήματα, του χώρου τιμών που καλύπτει το κάθε σύνολο υπολογισμένων γωνιών  $\alpha, \varphi, \theta$ . Το ένα διάστημα του ιστογράμματος SPFH ταυτίζεται με τον πλήθος των εμφανίσεων ενός συγκεκριμένου συνδυασμού τιμών των γωνιών. Το ιστόγραμμα έχει πλήθος διαστημάτων  $x^y$ , όταν για  $y$  σύνολα γωνιών  $\alpha, \varphi, \theta$  έχει  $x$  ίσα διαστήματα που δύναται να καλύψουν όλο το εύρος τιμών.

#### 4.2.2 Εύρεση Σημειακών Αντιστοιχιών (Correspondence Estimation)

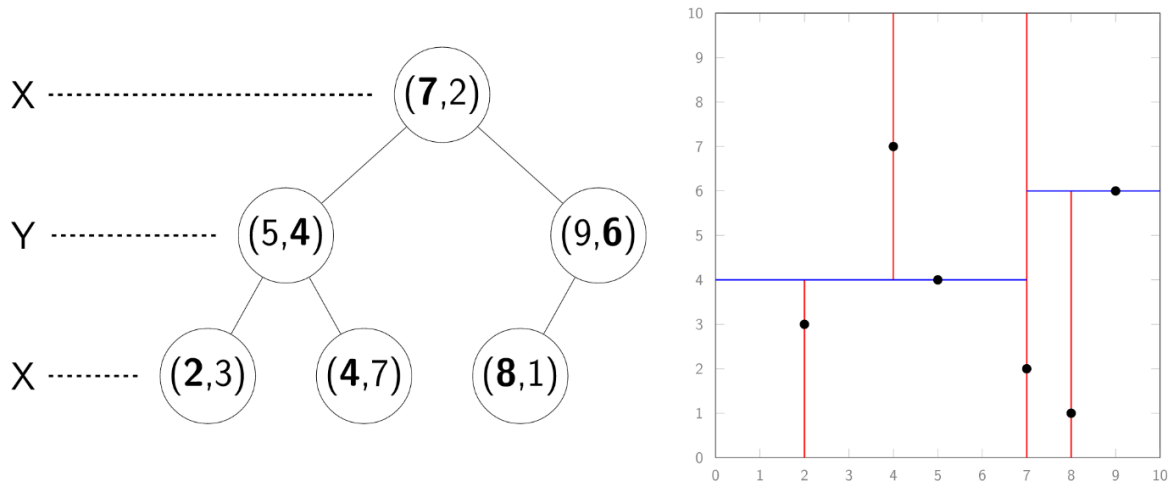
Το επόμενο στάδιο της διαδικασίας ευθυγράμμισης των τρισδιάστατων σημειακών νεφών είναι η ταυτοποίηση όμοιων σημείων μεταξύ των νεφών. Η μεθοδολογία αντιστοίχισης στηρίζεται στους εξαγόμενους περιγραφητές των σημείων και αυτοί θα καθορίσουν ποια στοιχεία των νεφών θεωρούνται όμοια. Οι δύο ευρέως αποδεκτές και χρησιμοποιούμενες κατηγορίες μεθόδων αντιστοίχισης είναι οι μέθοδοι εξαντλητικής αναζήτησης (Brute Force Matching) και οι μέθοδοι αναζήτησης  $k$  – κοντινότερων γειτόνων ( $k$ -Nearest Neighbor Search).

Κατά την διάρκεια εξαντλητικής αναζήτησης ο περιγραφητής του σημείου του υπό ευθυγράμμιση νέφους, εξετάζεται μέσω σύγκρισης με όλο το σύνολο περιγραφητών του νέφους αναφοράς. Στη συνέχεια, ο περιγραφητής του νέφους αναφοράς που θα παρουσιάσει την μικρότερη απόκλιση από τον υπό εξέταση περιγραφητή, θα καθορίσει

μία αντιστοιχία σημείων στα σημειακά νέφη. Η συγκεκριμένη μέθοδος κρίνεται πολύ χρονοβόρα και καθόλου αποδοτική ως αποτέλεσμα της πολυπλοκότητας ( $O(n^2)$ ).

Στη δεύτερη κατηγορία επιβάλλεται η χρήση μίας δενδροειδούς δομής δεδομένων, της kD-Tree (k-Dimensional tree), η οποία αξιοποιείται πολύ σε όλο το εύρος της επιστήμης των υπολογιστών με σκοπό τη ταξινόμηση ενός πλήθους σημείων κ - διαστάσεων. Η συγκεκριμένη δομή περιγράφεται σαν ένα δυαδικό δέντρο αναζήτησης όπου ο εκάστοτε κόμβος ταυτίζεται με ένα σημείο k-διαστάσεων. Κάτω από το κάθε κόμβο που δεν αποτελεί φύλλο του δυαδικού δέντρου, τερματικός κόμβος, εμφανίζονται ένα ή δύο καινούργια δυαδικά υποδέντρα. Κάθε καινούργιο σημείο το οποίο θα χρειαστεί να περάσει από το συγκεκριμένο κόμβο, κατά την διαδικασία ταξινόμησης, εξετάζεται για το κατά πόσο θα τοποθετηθεί στην περιοχή δεξιά του ή αριστερά του με την σύγκριση σε μία από τις συντεταγμένες τους.

Η μεθοδολογία οργάνωσης ενός συνόλου σημείων κ - διαστάσεων αρχίζει με την επιλογή ενός σημείου ρίζας για όλο το δέντρο, το οποίο βρίσκεται με την εξέταση όλου του εύρους τιμών των συντεταγμένων του πρώτου άξονα και την λήψη της τιμής που συναντάται στη μέση του. Τα σημεία στα οποία η συντεταγμένη του υπό εξέταση άξονα ήταν μικρότερη από αυτή του επιλεγμένου σημείου, μεταφέρονται στη μία πλευρά κάτω από τη ρίζα και αυτά με μεγαλύτερη τιμή στη άλλη. Στις δύο ομάδες που έχουν δημιουργηθεί πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία επιλογής σημείου για τις καινούργιες ρίζες των δύο υποδέντρων, στις αντίστοιχες πλευρές, αλλά αυτή τη φορά με υλοποίηση ταξινόμησης των τιμών των συντεταγμένων του επόμενου άξονα και επιλογή της μέσης τιμής που θα προκύψει. Το δέντρο σταματά να παράγει επίπεδα όταν στις υποομάδες που εμφανίζονται περιέχεται μόνο ένα σημείο. Ένα παράδειγμα δέντρου και της χρήσης του φαίνεται πιο κάτω.



Σχήμα 28 : Αριστερά το kd-tree κατασκευασμένο για δύο διαστάσεις σε μορφή δυαδικού δέντρου και στα δεξιά η γραφική αναπαράσταση διαχωρισμού χώρου με την kNN μέθοδο.

Το σημειακό νέφος αναφοράς εκφράζεται σε δενδροειδή μορφή. Για κάθε σημείο που ανήκει στο υπό ευθυγράμμιση νέφος πραγματοποιείται μία σάρωση για την εύρεση του πλησιέστερου σημείου στο δυαδικό δέντρο αναφοράς. Η μεθοδολογία αναζήτησης αρχίζει από τον αρχικό κόμβο και αναλόγως της συντεταγμένης που τον χαρακτηρίζει

υλοποιείται η κατάλληλη σύγκριση. Η σάρωση συνεχίζει στο δεξί υποδέντρο ή στο αριστερό, σύμφωνα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης των τιμών των συντεταγμένων. Η διαδικασία θα φτάσει στο τέλος της όταν η αναζήτηση στο δέντρο καταλήξει σε κόμβο φύλλο.

### 4.2.3 Απόρριψη Λανθασμένων Σημειακών Αντιστοιχιών (Correspondence Rejection)

Οι ανακρίβειες έχουν άμεσο αρνητικό αντίκτυπο στην ποιότητα της ευθυγράμμισης, ειδικά στην περίπτωση των ιατρικών απεικονιστικών δεδομένων. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο RANSAC (Random Sample Consensus), η εφαρμογή της οποίας φαίνεται σχηματικά στις εικόνες 29 και 30, γίνεται εφικτός ο περιορισμός σφαλμάτων μέσω της απόρριψης λανθασμένων αντιστοιχιών. Η μέθοδος αυτή προσδιορίζει παραμέτρους ενός μαθηματικού μοντέλου από ένα πλήθος παραγόμενων δεδομένων, των οποίων ένα τμήμα αποτελείται από ανακριβή δεδομένα (outliers) και χαρακτηρίζεται ως μη ντετερμινιστική, αφού μπορεί να παραδώσει λογικό αποτέλεσμα με μία συγκεκριμένη πιθανότητα ανάλογης των επαναλήψεων. Προϋπόθεση είναι ότι τα παρεχόμενα δεδομένα έχουν κατανομή που να προσεγγίζει ένα σύνολο παραμέτρων ενός μαθηματικού μοντέλου (inliers), στο οποίο τα αντίστοιχα λανθασμένα (outliers) παρουσιάζουν αδυναμία να ανήκουν. Η παραγωγή εσφαλμένων δεδομένων οφείλεται στη παρουσία υψηλού θορύβου, άστοχων μετρήσεων και μη ορθών υποθέσεων στην περιγραφή των δεδομένων. Με την εκμετάλλευση ενός μικρού συνόλου inliers, ανακαλύπτεται μία μεθοδολογία η οποία μπορεί να προσδιορίσει τις παραμέτρους ενός μαθηματικού μοντέλου που αντιπροσωπεύει με το καλύτερο δυνατό τρόπο τα δεδομένα.

Ο αλγόριθμος της επαναληπτικής διαδικασίας εκφράζεται σαν μία συνεχής επανάληψη δύο βασικών λειτουργιών που εκτελούνται σε σειρά. Η πρώτη λειτουργία υπολογίζει τους παραμέτρους του μαθηματικού μοντέλου που εξάγεται από ένα δείγμα στοιχείων των δεδομένων, του οποίου το πλήθος καθορίζεται αναλόγως της ικανότητας προσδιορισμού αντιπροσωπευτικού μοντέλου. Η δεύτερη λειτουργία εξετάζει όλο το εύρος στοιχείων των δεδομένων εισόδου για το κατά πόσο ανήκουν ή όχι στο μαθηματικό μοντέλο που έχει παραχθεί. Τα στοιχεία που αποκλίνουν από το μοντέλο σε βαθμό τέτοιο που να ξεπερνούν το κατώφλι που ορίζεται, θεωρούνται outliers και απορρίπτονται. Αυτό επανεκτελείται όσες φορές έχει προκαθοριστεί στο σύστημα, με νέο τυχαίο δείγμα και ένα καινούργιο μαθηματικό μοντέλο. Όταν η μεθοδολογία φτάσει στο τέλος της, επιλέγεται αυτό που παρουσίασε μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας στην αναζήτηση των inliers. Όλες οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν από τον αλγόριθμο επιλέγονται συνήθως μέσω πειραματισμού και στην περίπτωση του πλήθους επαναλήψεων  $k$ , γίνεται προσδιορισμός του με βάση την πιθανότητα εξαγωγής του επιθυμητού αποτελέσματος. Η μαθηματική σχέση που χρησιμοποιείται είναι :

$$k = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - w^n)} \quad (18)$$

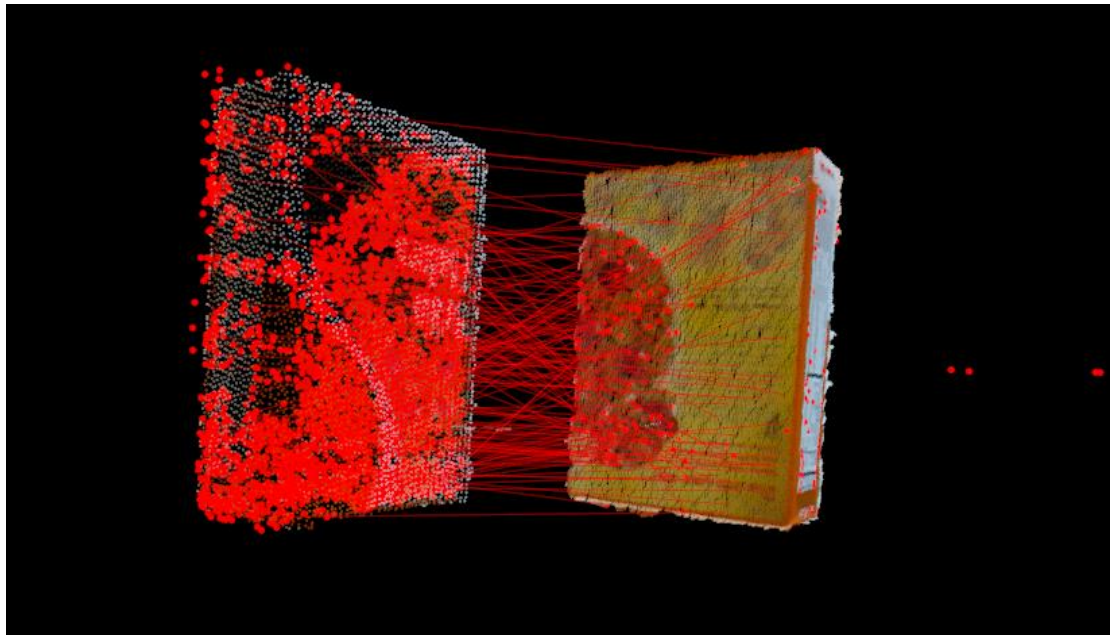
με  $n$  να δηλώνει τον αριθμό των στοιχείων που αποτελούν το δείγμα της εκάστοτε επανάληψης για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μοντέλου,  $p$  η πιθανότητα να είναι και τα  $n$  στοιχεία inliers ή αλλιώς δηλώνει την απόδοση της μεθόδου και τέλος  $w$

εκφράζει τη πιθανότητα ένα στοιχείο που ελέγχεται να προκύπτει inlier και ορίζεται και ως ο λόγος του αριθμού των inliers στο σύνολο δεδομένων προς το αριθμό των στοιχείων του.

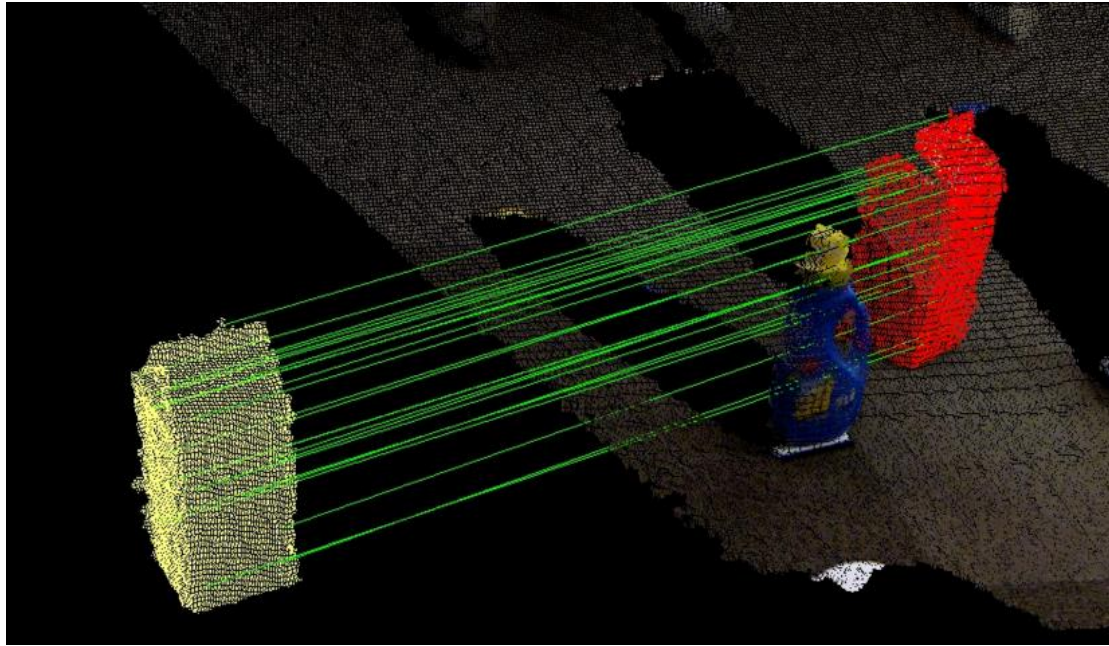
Ο αλγόριθμος για τη συγκεκριμένη υλοποίηση έχει ως δεδομένα εισόδου ένα σύνολο σημειακών αντιστοιχιών. Αρχικά επιλέγονται τρία τυχαία ζεύγη αντίστοιχων σημείων και ταυτόχρονα εξάγονται από αυτά οι πίνακες περιστροφής και μετατόπισης, οι οποίοι αποτελούν αντίστοιχα τις παραμέτρους (στροφή και μετατόπιση) του μετασχηματισμού  $(R, t)$ , με τη βοήθεια της τεχνικής SVD (Singular Value Decomposition). Στη συνέχεια, με την εκμετάλλευσή τους δύναται να υπολογιστεί ποια στοιχεία ανήκουν στην κατηγορία των inliers ή outliers με την σχέση :

$$((R \cdot p_i + t) - q_i)^2 < \varepsilon \quad (19)$$

με  $p_i$  το σημείο που βρίσκεται στο υπό ευθυγράμμιση νέφος και  $q_i$  το αντίστοιχο στο νέφος αναφοράς. Το  $\varepsilon$  δηλώνει το ανώτατο κατώφλι απόκλισης για να θεωρηθεί κάποιο ζεύγος  $\{p_i, q_i\}$  ότι ανήκει στη κατηγορία inliers. Ο αλγόριθμος εκτελείται ξανά ακολουθώντας ακριβώς τα ίδια βήματα, τόσες φορές όσες έχουν προσδιοριστεί εξαρχής και στο τέλος επικρατούν οι παράμετροι  $(R, t)$  που παρουσίασαν το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας στην εύρεση των inliers.



Σχήμα 29 : Αναπαράσταση σημειακών αντιστοιχιών για δύο νέφη σημείων πριν την εφαρμογή της μεθόδου RANSAC



Σχήμα 30 : Αναπαράσταση σημειακών αντιστοιχιών για δύο νέφη σημείων μετά την εφαρμογή της μεθόδου RANSAC

#### 4.2.4 Υπολογισμός και Εφαρμογή του Μετασχηματισμού

Τα δύο σύνολα σημειακών αντιστοιχιών  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$  και  $Q = \{q_1, \dots, q_n\}$ , με  $p_i$  και  $q_i$  αντιπροσωπεύουν ένα ζευγάρι ταυτισμένων σημείων. Η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης μέτρησης σφάλματος δύναται να επαληθεύσει τις καταλληλότερες παραμέτρους  $(R, t)$  του συμπαγούς μετασχηματισμού και ορίζεται ως :

$$E(R, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|(R \cdot p_i + t) - q_i\|^2 \quad (20)$$

Για να γίνει δυνατός ο υπολογισμός των συγκεκριμένων παραμέτρων, η όλη διαδικασία αρχίζει από τον υπολογισμό του κέντρου μάζας των δύο συνόλων ως εξής :

$$\begin{aligned} \mu_p &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \\ \mu_q &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \end{aligned} \quad (21)$$

Το υπολογισμένο κέντρο βάρους του εκάστοτε συνόλου αφαιρείται από το κάθε σημείο που ανήκει στο σύνολο :

$$\begin{aligned} P' &= \{p_i - \mu_p\} = \{p'_i\} \\ Q' &= \{q_i - \mu_q\} = \{q'_i\} \end{aligned} \quad (22)$$

Ο πίνακας περιστροφής  $R$  και ο πίνακας μετατόπισης  $t$  είναι με τέτοιο τρόπο διαμορφωμένοι έτσι ώστε να διασφαλίζεται η μικρότερη δυνατή τιμή στη συνάρτηση σφάλματος.

Έστω ο πίνακας :

$$W = \sum_{i=1}^n q'_i \cdot p_i'^T \quad (23)$$

Η ανάλυση σε ανεξάρτητες συνιστώσες (Singular Value Decomposition) του πίνακα  $W$  είναι η διάσπασή του σε τρεις πίνακες :

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$W = USV^T$$

με  $U, V$  δύο ορθογώνιοι πίνακες ( $3 \times 3$ ) :

$$\begin{aligned} U^T U &= I \\ V^T V &= I \end{aligned} \quad (25)$$

Τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα  $S$  αποτελούν τις ιδιοτιμές του πίνακα  $W$  και επιπρόσθετα ισχύει μεταξύ τους η ακόλουθη διάταξη:  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Οι στήλες του πίνακα  $V$  σχηματίζονται από τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα  $W^T W$  και οι αντίστοιχες στήλες του πίνακα  $U$  απαρτίζονται από τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα  $W W^T$ . Στις περίπτωση που ο πίνακας  $W$  χαρακτηρίζεται ως τρίτου βαθμού, η βέλτιστη λύση για την συνάρτηση μέτρησης σφάλματος προκύπτει μοναδική και υπολογίζεται με τις εξισώσεις :

$$\begin{aligned} R &= UV^T \\ t &= \mu_q - R\mu_p \end{aligned} \quad (26)$$

Ο πίνακας περιστροφής  $R$  ορίζεται σαν ένας πίνακας ( $3 \times 3$ ) και αντίστοιχα ο πίνακας μετατόπισης  $t$  σαν ένας πίνακας ( $3 \times 1$ ). Και οι δύο πίνακες αποτελούν τα κύρια συστατικά στοιχεία του συμπαγούς μετασχηματισμού ο οποίος είναι υπεύθυνος να μετασχηματίζει το εκάστοτε σημείο  $f_k = [x, y, z]^T$ , του υπό ευθυγράμμιση νέφους, σε  $f'_k = [x', y', z']^T$  με τελικό σκοπό την ευθυγράμμιση με το νέφος αναφοράς. Εφαρμόζεται η εξής μαθηματική σχέση :

$$\begin{aligned} f'_k &= R \cdot f_k + t \\ \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} &= R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (27)$$

#### 4.2.5 Συνάρτηση Μέτρησης Σφάλματος

Η επιτυχία ή αποτυχία της ευθυγράμμισης μετρείται με την συνάρτηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) στην περίπτωση των νεφών σημείων. Υπάρχουν περιπτώσεις που το πλήθος των σημείων στα δύο νέφη διαφέρει, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εύρεση των αντίστοιχων σημείων μεταξύ τους και για αυτό, γίνεται χρήση της τεχνικής εύρεσης γειτόνων, η οποία στηρίζεται στις συντεταγμένες των σημείων, για το εκάστοτε σημείο  $p_f = [x_f, y_f, z_f]^T$  του μετασχηματισμένου νέφους και βάση αυτού καθορίζεται ο πιο κοντινός γείτονας  $p_r = [x_r, y_r, z_r]^T$  στο νέφος αναφοράς. Η μαθηματική σχέση που εφαρμόζεται για τον υπολογισμό του MSE είναι :

$$MSE = \frac{1}{N_f} \sum_{i=0}^{N_f-1} \|p_f - p_r\|^2 \quad (28)$$

με  $N_f$  να δηλώνει τον αριθμό των σημείων του μετασχηματισμένου σημειακού νέφους. Το MSE είναι αντιστρόφως ανάλογο της επιτυχίας που παρουσιάζει η ευθυγράμμιση, αφού όσο μικρότερη είναι η τιμή που παράγεται από το MSE τόσο τα δύο νέφη τείνουν να ευθυγραμμιστούν καλύτερα.





# 5 Ευθυγράμμιση στην μονάδα επεξεργασίας γραφικών

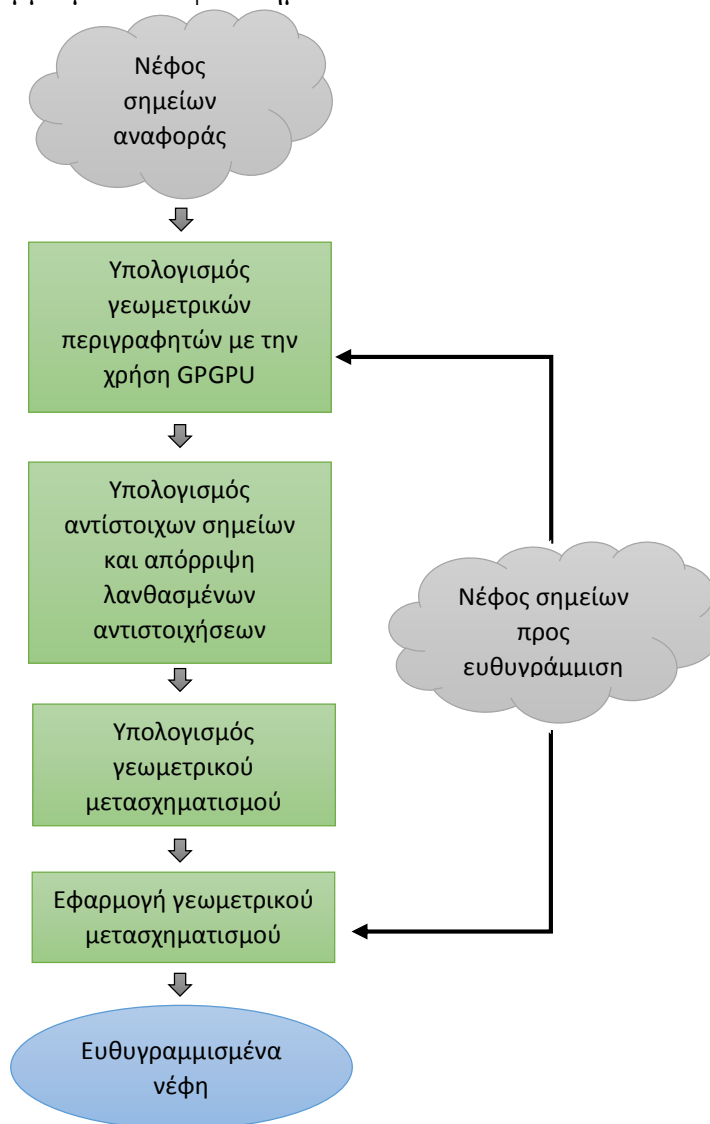
## 5.1 Εισαγωγή

Όπως έχει προαναφερθεί, η ανάγκη ευθυγράμμισης τρισδιάστατων ιατρικών απεικονιστικών δεδομένων του ίδιου ασθενούς ή διαφορετικών ασθενών σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, προκύπτει κατά την ανάλυση και επεξεργασία τους. Η ευθυγράμμιση γίνεται εφικτή μέσω των επαναληπτικών διαδικασιών βελτιστοποίησης των παραμέτρων ενός γεωμετρικού μετασχηματισμού που εφαρμόζεται στα δεδομένα. Η εκμετάλλευση των υπολογιστικών δυνατοτήτων μιας μονάδας επεξεργασίας γραφικών, εξασφαλίζει χαρακτηριστικά μειωμένο υπολογιστικό χρόνο υλοποίησης του αλγόριθμου ευθυγράμμισης με περιγραφητές, ο οποίος όταν εφαρμόζεται σε συμβατικές μονάδες επεξεργασίας τυγχάνει υποδειγματοληψίας ή παίρνει μεγάλο χρόνο για να εκτελεστεί. Έτσι παράγονται σωστότερες συγκρίσεις και καλύτεροι συνδυασμοί δεδομένων, αφού με τον χρόνο εκτέλεσης να μην αποτελεί πρόβλημα πλέον, όλα τα δεδομένα λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς και έχουμε περισσότερη ακρίβεια αποτελεσμάτων ευθυγράμμισης, με αποτέλεσμα οι γιατροί να οδηγούνται σε ορθότερες εκτιμήσεις. Η σημαντικότητα της μεταφοράς των υπολογισμών ευθυγράμμισης σε γραφικές μονάδες επεξεργασίας, δεν φαίνεται μόνο μέσω της σύγκρισης των επιδόσεων της ευθυγράμμισης μεταξύ CPU και GPU αλλά και μέσω της σύγκρισης επιδόσεων των δύο διαφορετικών γραφικών μονάδων επεξεργασίας που χρησιμοποιήσαμε. Μέσω της σύγκρισης αυτής και λόγω της πολύ μεγαλύτερης ανάπτυξης των δυνατοτήτων των GPU με το πέρασμα του χρόνου, όπως ειπώθηκε και στο κεφάλαιο 2, είναι σίγουρο ότι με την εξέλιξη των GPU η ευθυγράμμιση σε αυτές θα εδραιωθεί ως η συνήθης επιλογή, με χρόνους χωρίς αντίκρισμα και σφάλματα σχεδόν ανύπαρκτα.

Στις ενότητες που ακολουθούν, αναλύεται η συνολική ροή της διαδικασίας που ακολουθείται στην ευθυγράμμιση ιατρικών εικόνων με τη χρήση του γεωμετρικού περιγραφητή κάθετων διανυσμάτων και του γεωμετρικού περιγραφητή FPFH, η οποία χωρίζεται σε πυρήνες υπολογισμού (kernels). Γίνεται εκτενής ανάλυση του τρόπου με τον οποίο έχει πραγματοποιηθεί η παραλληλοποίηση των αλγορίθμων υπολογισμού των γεωμετρικών περιγραφητών, οι οποίοι στη συνέχεια εκτελούνται με τη βοήθεια των γραφικών μονάδων επεξεργασίας. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην επίδειξη του μεγάλου μεγέθους εκμετάλλευσης της παράλληλης φύσης των γραφικών μονάδων επεξεργασίας. Αναλύεται επίσης ο τρόπος με τον οποίο επηρεάστηκε το πρόγραμμα λόγω των περιορισμών των μοντέλων γραφικών μονάδων επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν και των εκδόσεων του προγραμματιστικού μοντέλου CUDA που ήταν διαθέσιμο. Μετά και την παρουσίαση του τρόπου εύρεσης των βέλτιστων παραμέτρων εισαγωγής του προγράμματος, ερμηνεύονται και τα αποτελέσματα των συγκρίσεων μεταξύ της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας και των δύο γραφικών μονάδων επεξεργασίας. Στο τέλος αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν.

## 5.2 Μεθοδολογία ευθυγράμμισης με γεωμετρικούς περιγραφητές

Εδώ παρουσιάζονται όλα τα στάδια της γενικής μεθοδολογίας που ακολουθείται για την ευθυγράμμιση ιατρικών απεικονιστικών δεδομένων, με τη χρήση των υπολογισμένων με GPGPU γεωμετρικών περιγραφητών. Στο παρακάτω λογικό διάγραμμα φαίνονται τα βήματα που θα πρέπει να ακολουθηθούν στη διαδικασία της εύρεσης των τελικών ευθυγραμμισμένων νεφών σημείων.



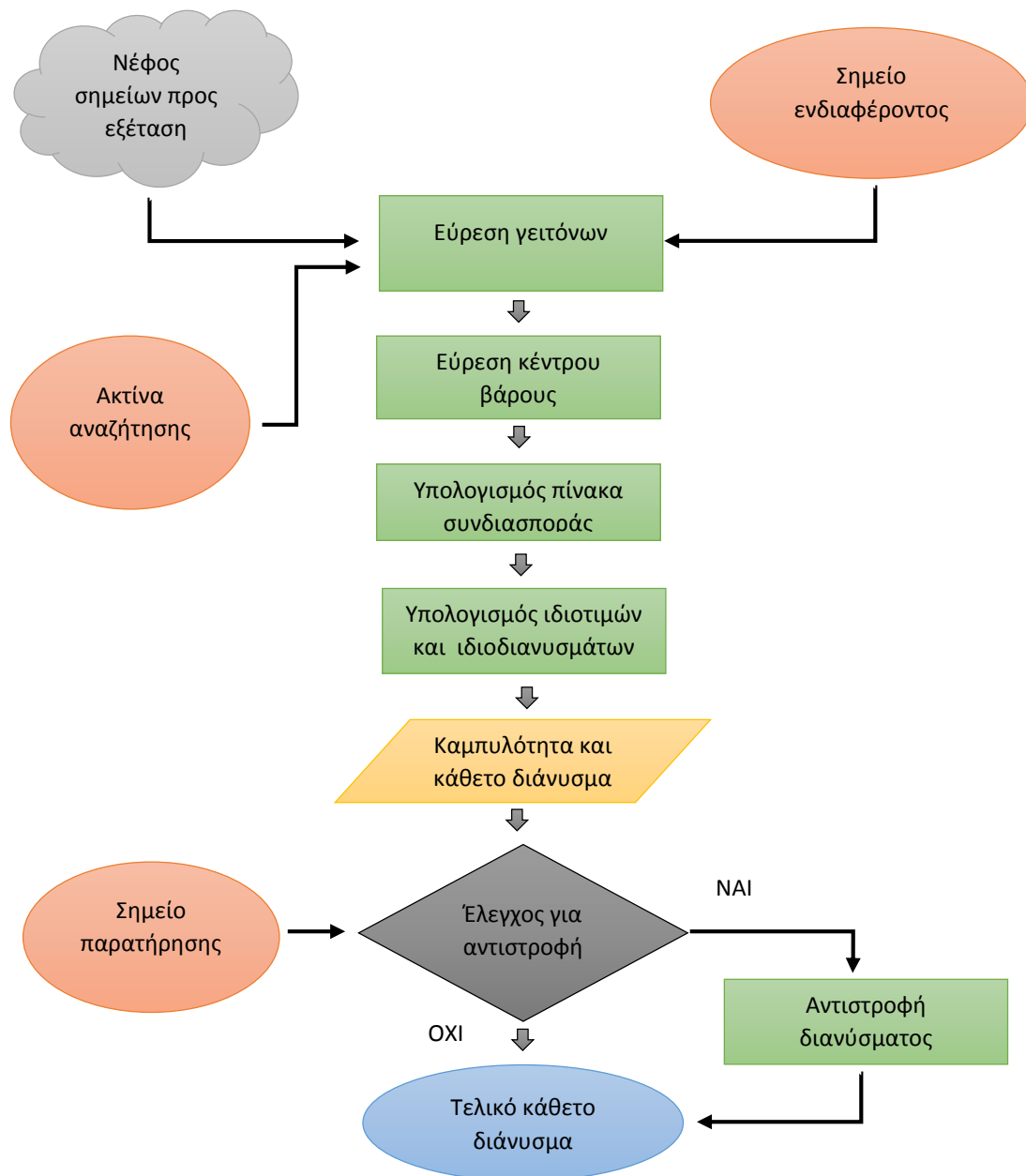
Σχήμα 31 : Λογικό διάγραμμα διαδικασίας ευθυγράμμισης με γεωμετρικούς περιγραφητές

Εισάγονται στον αλγόριθμο τα δύο νέφη σημείων και υπολογίζονται με τη βοήθεια των γραφικών μονάδων επεξεργασίας, οι γεωμετρικοί περιγραφητές για το κάθε σημείο που ανήκει στα δύο νέφη. Η σύγκριση των παραχθέντων γεωμετρικών περιγραφητών εξάγει τα ταυτόσημα σημεία. Όμως μπορεί μερικές από τις απορρέουσες αντιστοιχίσεις σημείων να είναι λανθασμένες και για αυτό τον λόγο πραγματοποιείται διαδικασία εύρεσης και απόρριψης τους. Στη συνέχεια όσες αντιστοιχίσεις κρίθηκαν ορθές λαμβάνουν μέρος στον υπολογισμό των παραμέτρων ενός συμπαγούς

μετασχηματισμού, ο οποίος εφαρμόζεται πάνω στα υπό ευθυγράμμιση ιατρικά δεδομένα, προκαλώντας την επιθυμητή μετατόπιση και περιστροφή τους. Έτσι παίρνουμε το τελικό αποτέλεσμα και κρίνουμε το ποσοστό επιτυχίας της ευθυγράμμισης. Στα επόμενα υποκεφάλαια αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται οι γεωμετρικοί περιγραφητές στις μονάδες επεξεργασίας γραφικών, αφού σε αυτό το μέρος της διαδικασίας εφαρμόζεται η παραλληλοποίηση με την βοήθεια της CUDA.

### 5.3 Υπολογισμός κάθετων διανυσμάτων (Normals) στην GPU

Ο γεωμετρικός περιγραφητής κάθετων διανυσμάτων μπορεί να θεωρείται ως ο πιο απλός περιγραφητής για τη πραγματοποίηση ευθυγράμμισης, αλλά παράλληλα αποτελεί απαραίτητο συστατικό για να είναι δυνατή η εφαρμογή άλλων πιο σύνθετων. Στο παρακάτω λογικό διάγραμμα (σχήμα 32) διακρίνεται σχηματικά η διαδικασία εύρεσης του κάθετου διανύσματος για το οποιοδήποτε σημείο, το οποίο ανήκει στο προς εξέταση σημειακό νέφος. Ο υπολογισμός του κάθετου διανύσματος για ένα σημείο ενδιαφέροντος στα δύο νέφη βασίζεται στην εύρεση των γειτόνων, αφού με την εύρεση τους, εξάγεται η γεωμετρία της επιφάνειας που περιβάλλει το σημείο. Ο υπολογισμός των κάθετων διανυσμάτων αρχίζει λοιπόν με την εύρεση γειτόνων του σημείου ενδιαφέροντος του νέφους προς εξέταση, μέσα στη καθορισμένη από τον χρήστη ακτίνα. Συνεχίζει, με τον υπολογισμό του κέντρου βάρους (Centroid) του συνόλου των γειτόνων μαζί με το κέντρο ενδιαφέροντος και η εξαγωγή του πίνακα συνδιασποράς για το σημείο ενδιαφέροντος. Τώρα έχουμε ότι χρειάζεται για την παραγωγή των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων και την εξαγωγή του κάθετου διανύσματος. Όπως πριν τελειώσει η διαδικασία ελέγχεται αν χρειάζεται αντιστροφή της φοράς του κάθετου διανύσματος, αναλόγως του σημείου παρατήρησης που δόθηκε. Σημειώνεται ότι όλα τα πιο πάνω στάδια εκτελούνται παράλληλα στην GPU και ο βαθμός παραλληλοποίησης τους δείχνεται στα επόμενα υποκεφάλαια. Επίσης σημειώνεται ότι στο πρόγραμμα περιέχεται ένας βασικός θεμελιώδης βρόχος επανάληψης, ο οποίος επαναλαμβάνεται ώσπου να εκτελεστεί για κάθε σημείο ενδιαφέροντος. Οι υπολογισμοί της εύρεσης γειτόνων, του κέντρου βάρους και του πίνακα συνδιασποράς γίνονται μέσα σε αυτό τον βρόχο. Όταν τελειώσουν αυτοί οι υπολογισμοί και οι τελικοί πίνακες συνδιασποράς αποθηκευτούν στην καθολική μνήμη, τότε εκτελείται η υπόλοιπη διαδικασία μέχρι την εύρεση του τελικού διανύσματος παράλληλα για όλα τα σημεία ενδιαφέροντος, έξω και μετά από τον βρόχο.



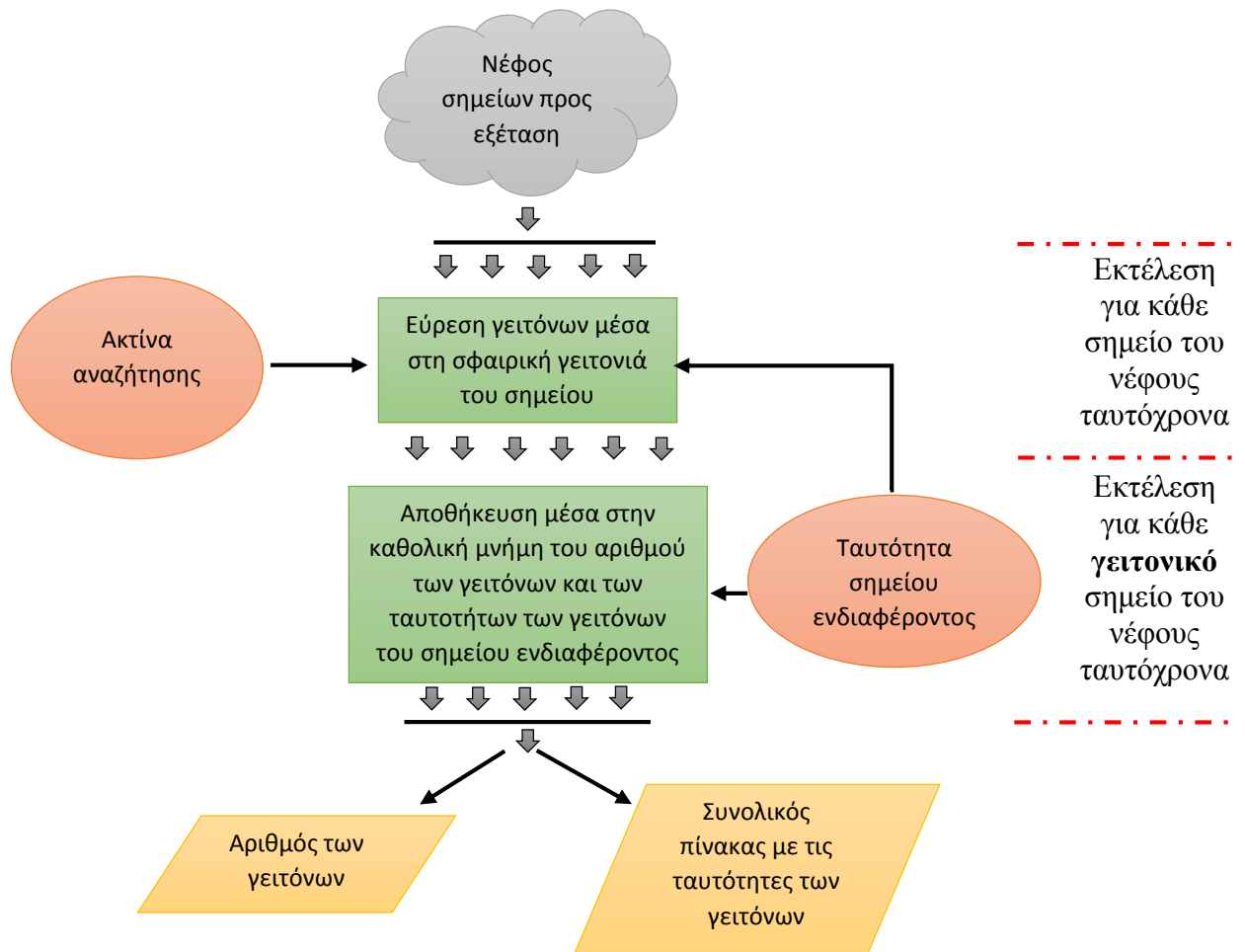
Σχήμα 32 : Λογικό διάγραμμα υπολογισμού κάθετων διανυσμάτων

### 5.3.1 Εύρεση γειτονικών σημείων για τα υπό εξέταση σημεία

Όπως ειπώθηκε και πριν, η εύρεση γειτόνων εκτελείται μέσα στον βρόχο για κάθε σημείο. Οι πληροφορίες που παράγονται, αποθηκεύονται προσωρινά μέχρι να παραχθεί ο πίνακας συνδιασποράς του σημείου ενδιαφέροντος και στην μετέπειτα επανάληψη του βρόχου, η μνήμη αυτή χρησιμοποιείται για το όφελος του επόμενου σημείου ενδιαφέροντος.

Η εύρεση των γειτόνων ξεκινά με την ανάκτηση των παραμέτρων που χρειάζεται, που είναι η ακτίνα αναζήτησης, η ταυτότητα του σημείου ενδιαφέροντος και το συνολικό νέφος. Σε μια σφαίρα της ορισμένης ακτίνας γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος αναζητούνται γείτονες με κάθε παράλληλο νήμα να είναι ένας υποψήφιος γείτονας

ταυτοχρόνως. Μόλις βρεθούν οι γείτονες, η εκτέλεση συνεχίζει μόνο για αυτούς και το σημείο ενδιαφέροντος και πάλι ταυτοχρόνως. Αποθηκεύεται ο αριθμός των γειτόνων, με την βοήθεια της συνάρτησης ατομικής πρόσθεσης (atomic add) της CUDA, και οι ταυτότητές των γειτόνων και του σημείου ενδιαφέροντος σε ένα συνολικό προσωρινό πίνακα στην καθολική μνήμη αποθήκευσης.



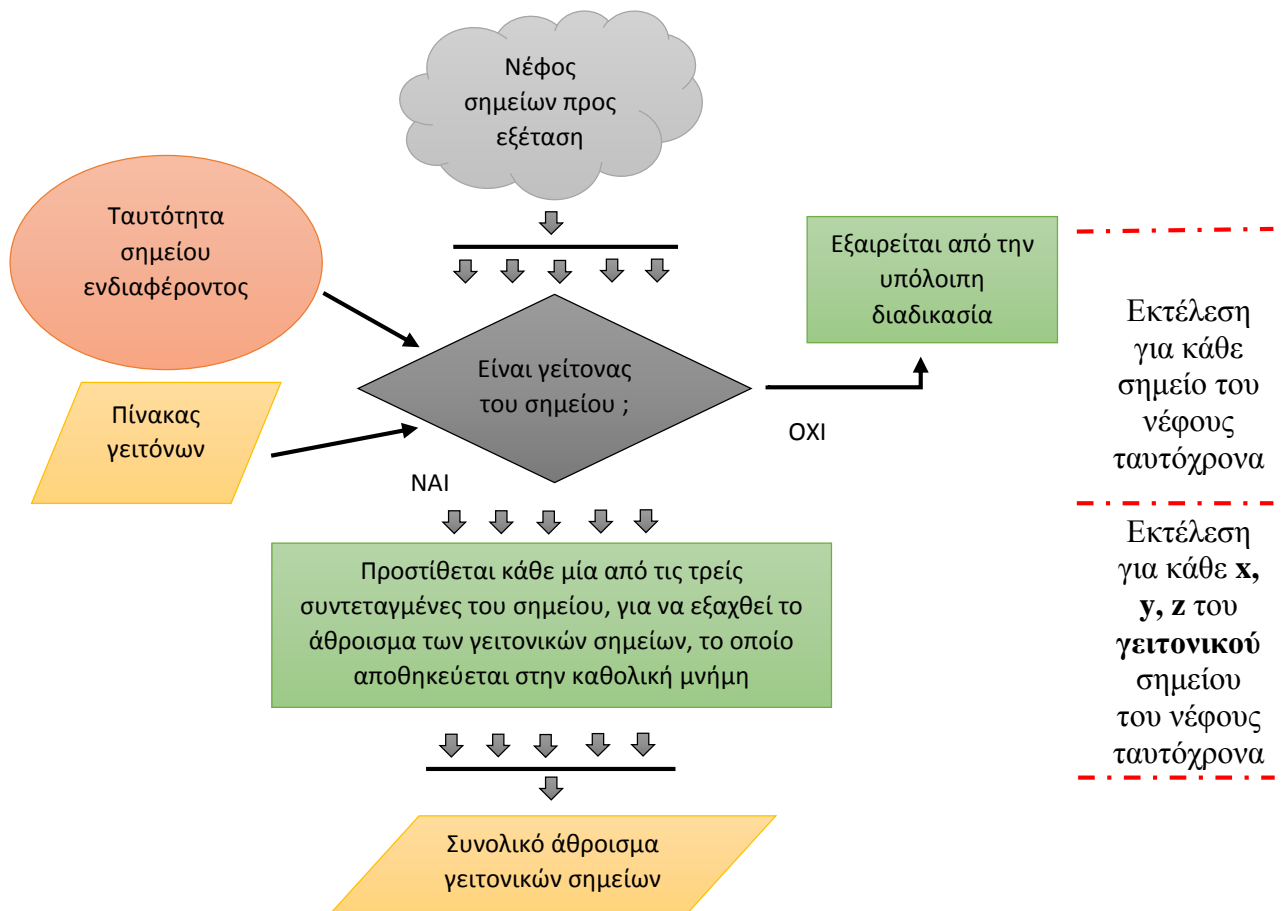
Σχήμα 33 : Λογικό διάγραμμα υπολογισμού γειτονικών σημείων

### 5.3.2 Υπολογισμός κέντρου βάρους και πίνακα συνδιασποράς

Σημειώνεται και πάλι ότι οι δύο αυτοί υπολογισμοί εκτελούνται μέσα στον βρόχο για κάθε σημείο. Οι πληροφορίες που παράγονται για τον υπολογισμό του κέντρου βάρους, αποθηκεύονται προσωρινά μέχρι να παραχθεί ο πίνακας συνδιασποράς του σημείου ενδιαφέροντος και στην μετέπειτα επανάληψη του βρόχου, η μνήμη αυτή χρησιμοποιείται για το όφελος του επόμενου σημείου ενδιαφέροντος. Αυτό δεν ισχύει για τους πίνακες συνδιασποράς οι οποίοι αποθηκεύονται συγκεντρωτικά, για κάθε σημείο του νέφους, για την μετέπειτα υλοποίηση των υπολογισμών.

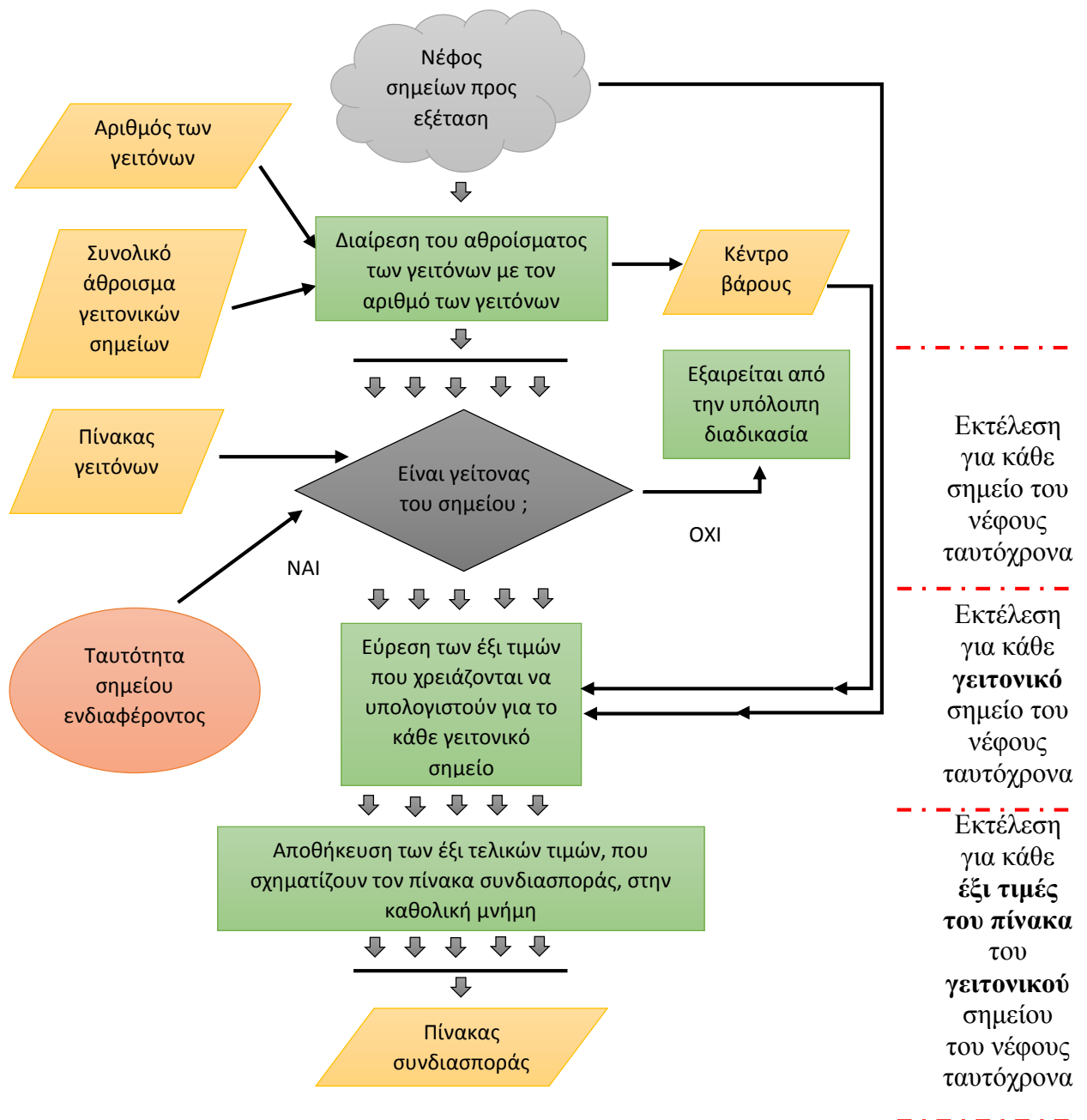
Ο υπολογισμός του κέντρου βάρους ξεκινά με τον έλεγχο γειτόνων του σημείου ενδιαφέροντος, με κάθε παράλληλο νήμα να είναι ένας υποψήφιος γείτονας και πάλι.

Όποιο σημείο είναι γείτονας προχωρά στο επόμενο στάδιο. Σε αυτό το στάδιο στον κάθε γείτονα αναθέτουμε τρία παράλληλα νήματα επεξεργασίας για κάθε χωρική συντεταγμένη του αντιστοίχως. Υπολογίζεται και αποθηκεύεται το άθροισμα των γειτονικών σημείων και του σημείου ενδιαφέροντος στην καθολική μνήμη για τον μετέπειτα υπολογισμό του κέντρου βάρους. Ο υπολογισμός που γίνεται εδώ, χρησιμοποιεί την ατομική πρόσθεση (atomic add), που είναι στη φύση της σειριακή πράξη αλλά επειδή εκτελείται μέσω του προγραμματιστικού μοντέλου CUDA και αναθέτουμε τρία νήματα για κάθε γείτονα, ο χρόνος εκτέλεσης των πράξεων που απαιτείται είναι μηδαμινός.



Σχήμα 34 : Λογικό διάγραμμα υπολογισμού αθροίσματος γειτονικών σημείων και σημείου ενδιαφέροντος, για την μετέπειτα εξαγωγή του κέντρου βάρους

Στον επόμενο πυρήνα (kernel) αρχίζουμε με τον υπολογισμό του κέντρου βάρους του σημείου ενδιαφέροντος, μέσω της διαίρεσης του αθροίσματος που βρήκαμε προηγουμένως με τον αριθμό των γειτόνων. Υπενθυμίζουμε ότι το σημείο ενδιαφέροντος σε αυτή την περίπτωση θεωρείται γείτονας του εαυτού του.

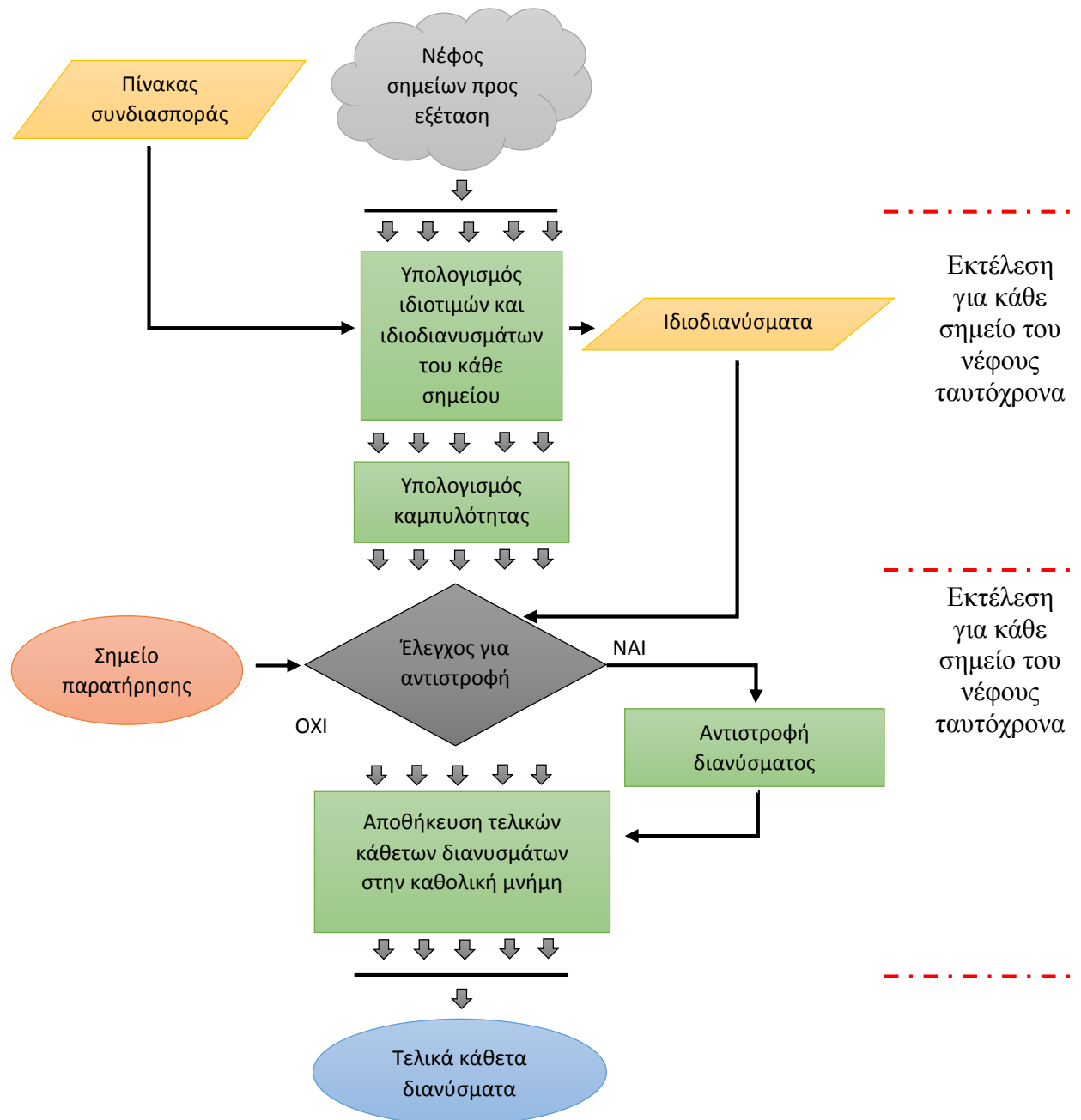


Σχήμα 35 : Λογικό διάγραμμα υπολογισμού του κέντρου βάρους κα του πίνακα συνδιασποράς του σημείου ενδιαφέροντος

Μετά την εύρεση και του κέντρου βάρους, ελέγχουμε και πάλι για τους γείτονες του σημείου ενδιαφέροντος, με κάθε παράλληλο νήμα να είναι ένας υπονήφιος γείτονας και όποιο σημείο είναι γείτονας προχωρά στο επόμενο στάδιο. Μετά για κάθε γειτονικό σημείο υπολογίζονται οι έξι τιμές που χρειάζονται για την εύρεση του τελικού πίνακα. Σε αυτή τη φάση και με την βοήθεια πάλι της ατομικής πρόσθεσης, μαζί φυσικά με την ανάθεση έξι παράλληλων νημάτων επεξεργασίας για κάθε τιμή από τις έξι που υπολογίστηκαν προηγουμένως, προστίθενται οι τιμές του κάθε γείτονα για να σχηματιστεί ο τελικός πίνακας συνδιασποράς που αποθηκεύεται στην καθολική μνήμη.

### 5.3.3 Υπολογισμός ιδιοτιμών, ιδιοδιανυσμάτων και αντιστροφή φοράς κάθετου διανύσματος

Σε αυτό τον πυρήνα, έχοντας ως δεδομένο και τον πίνακα συνδιασποράς για κάθε σημείο του νέφους, αρχίζουμε τους τελικούς υπολογισμούς. Υπενθυμίζουμε ότι αυτός ο πυρήνας βρίσκεται έξω από τον βρόχο. Εκτελείται για όλα τα σημεία προς εξέταση ταυτόχρονα, με κάθε νήμα να αντιπροσωπεύει ένα σημείο.



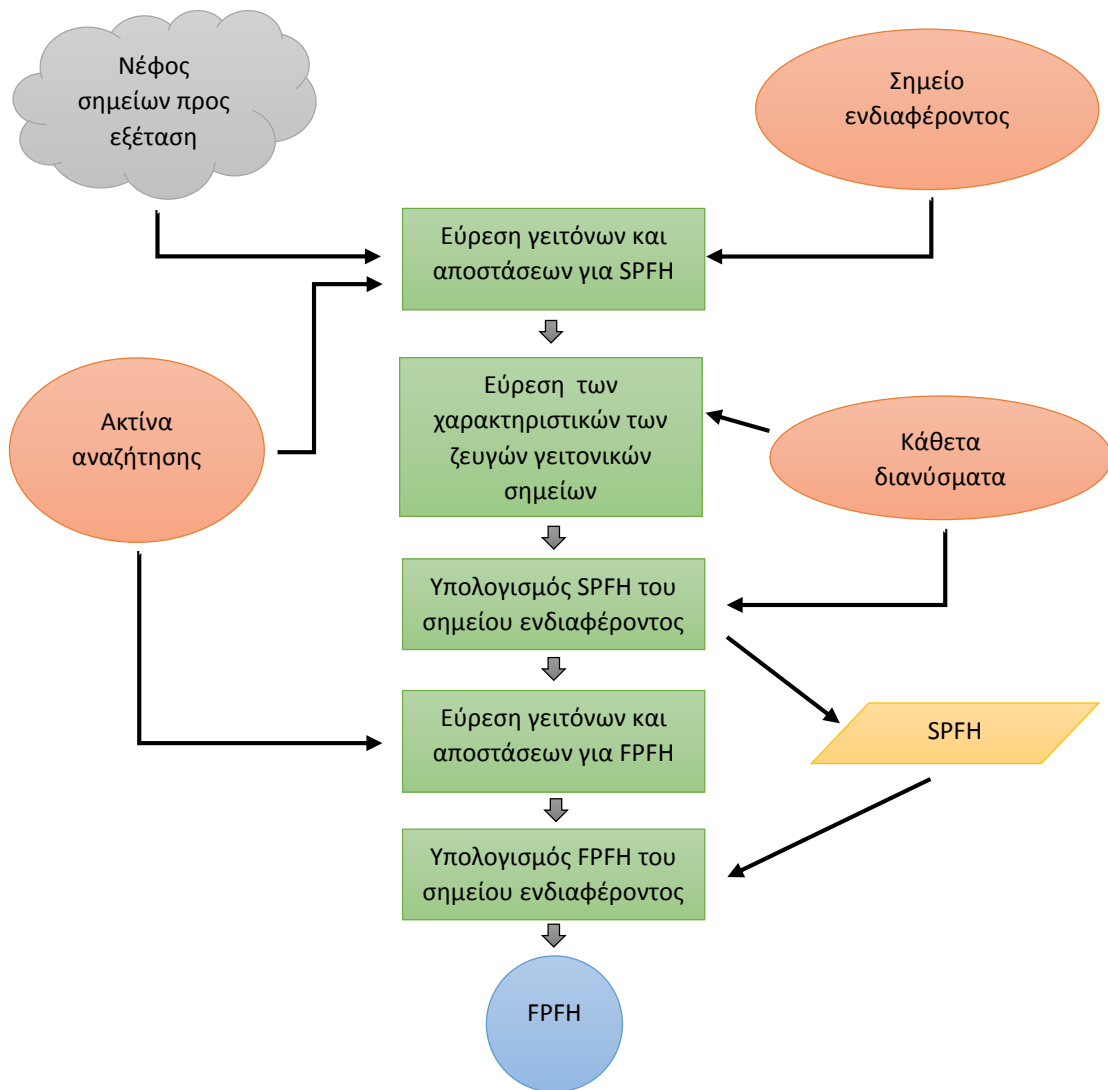
Σχήμα 36 : Λογικό διάγραμμα τελικών διαδικασιών υπολογισμού των τελικών κάθετων διανυσμάτων για το νέφος σημείων προς εξέταση



Με την ανάκτηση των πινάκων συνδιασποράς των σημείων, υπολογίζονται όλα τα ιδιοδιανύσματα και οι ιδιοτιμές τους και αποθηκεύονται προσωρινά. Υπολογίζεται η καμπυλότητα των σημείων και στην συνέχεια, με την χρήση του σημείου παρατήρησης που ορίστηκε, ελέγχεται αν χρειάζεται αντιστροφή το κάθετο διάνυσμα. Αν χρειάζεται τότε αντιστρέφεται και τελειώνει η διαδικασία με την αποθήκευση των κάθετων διανυσμάτων στην καθολική μνήμη. Έτσι αποκτούμε το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα.

## 5.4 Υπολογισμός FPFH στην GPU

Συνεχίζοντας από την προηγούμενη διαδικασία του υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων, τα οποία τώρα έχουμε ως δεδομένα, αρχίζουμε την διαδικασία υπολογισμού του γεωμετρικού περιγραφητή FPFH. Σε αυτή την διαδικασία έχουμε δύο θεμελιώδεις βρόχους επαναληπτικής εκτέλεσης, ένα για τον υπολογισμό του SPFH του κάθε σημείου προς εξέταση και ένα για τους τελικούς υπολογισμούς του FPFH του νέφους σημείων προς εξέταση.

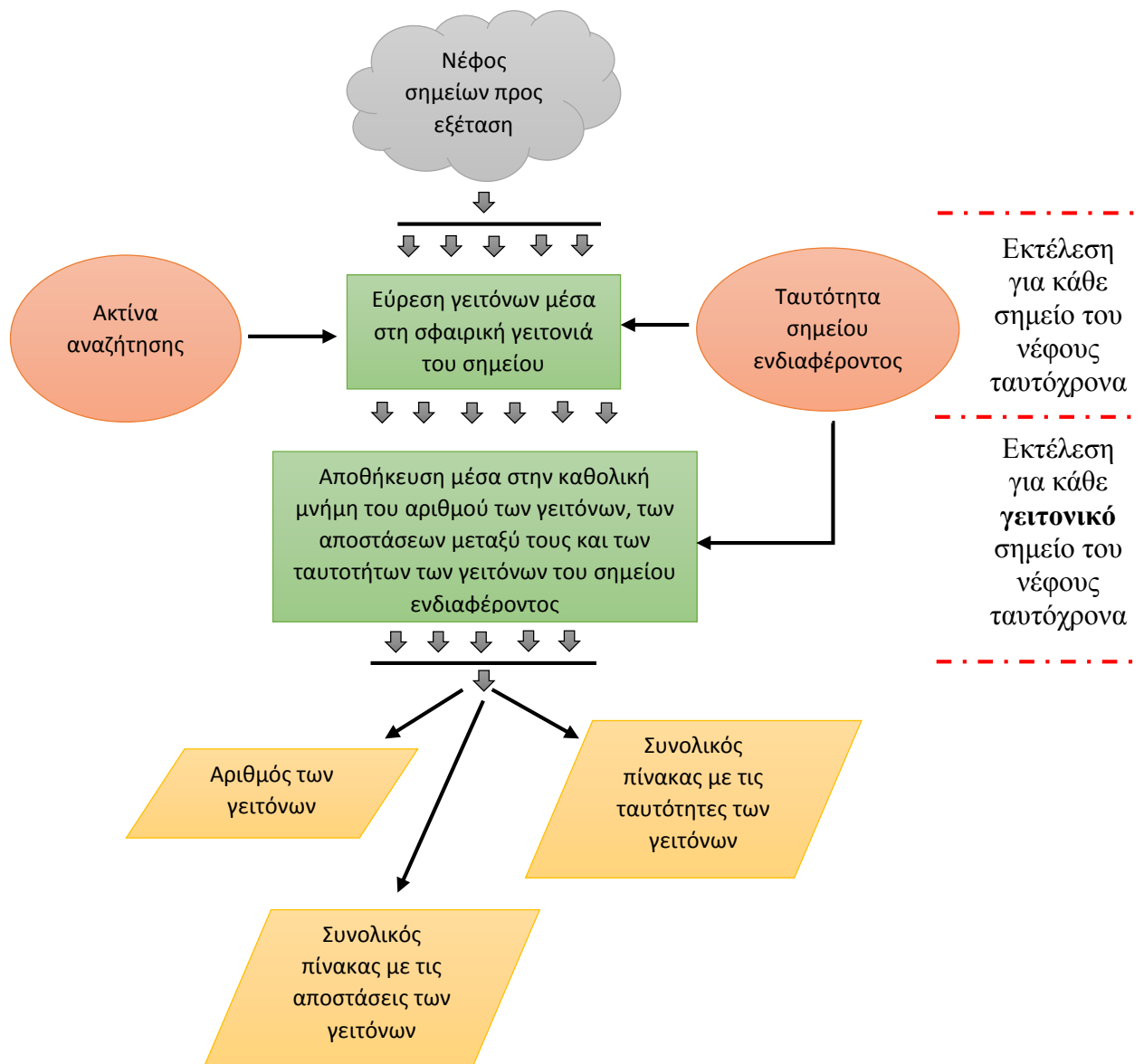


Σχήμα 37 : Λογικό διάγραμμα υπολογισμού FPFH

Παίρνοντας ως είσοδο το νέφος σημείων προς εξέταση, το νέφος κάθετων διανυσμάτων των σημείων, την ακτίνα αναζήτησης και του σημείου ενδιαφέροντος αρχίζουν οι υπολογισμοί. Πρώτα βρίσκουμε τους γείτονες και τις αποστάσεις που χρειάζονται για τον υπολογισμό του SPFH. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα τέσσερα χαρακτηριστικά ζευγών των γειτονικών σημείων και υπολογίζεται το SPFH για το νέφος των σημείων προς εξέταση, που αποθηκεύεται στην καθολική μνήμη για μετέπειτα χρήση. Βρίσκουμε γείτονες και αποστάσεις αυτή την φορά για τον FPFH και με αυτά τα δεδομένα και με τον SPFH που αποθηκεύσαμε προηγουμένως υπολογίζεται και αποθηκεύεται ο FPFH για το νέφος σημείων προς εξέταση.

#### **5.4.1 Εύρεση γειτονικών σημείων για τα υπό εξέταση σημεία – FPFH**

Η εύρεση των γειτόνων ξεκινά με τις ανάκτηση των παραμέτρων που χρειάζεται όπως προηγουμένως, που είναι η ακτίνα αναζήτησης, η ταυτότητα του σημείου ενδιαφέροντος και το συνολικό νέφος. Σε μια σφαίρα της ορισμένης ακτίνας γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος αναζητούνται γείτονες με κάθε παράλληλο νήμα να είναι ένας υποψήφιος γείτονας ταυτοχρόνως. Μόλις βρεθούν οι γείτονες, η εκτέλεση συνεχίζει μόνο για αυτούς και πάλι ταυτοχρόνως. Αποθηκεύεται ο αριθμός των γειτόνων, με την βοήθεια της συνάρτησης ατομικής πρόσθεσης (atomic add) της CUDA, και οι ταυτότητές των γειτόνων σε ένα συνολικό προσωρινό πίνακα στην καθολική μνήμη αποθήκευσης. Επίσης προσωρινά αποθηκεύονται και οι αποστάσεις μεταξύ των γειτόνων και του σημείου ενδιαφέροντος. Ακόμη μια διαφορά με την προηγούμενη διαδικασία εύρεσης γειτόνων είναι ότι, εδώ το σημείο ενδιαφέροντος δεν θεωρείται γείτονας, σε αντίθεση με πριν. Όλη αυτή η διαδικασία εκτελείται και ως μέρος της εύρεσης του SPFH αλλά και ως μέρος της τελικής διαδικασίας εύρεσης του FPFH.

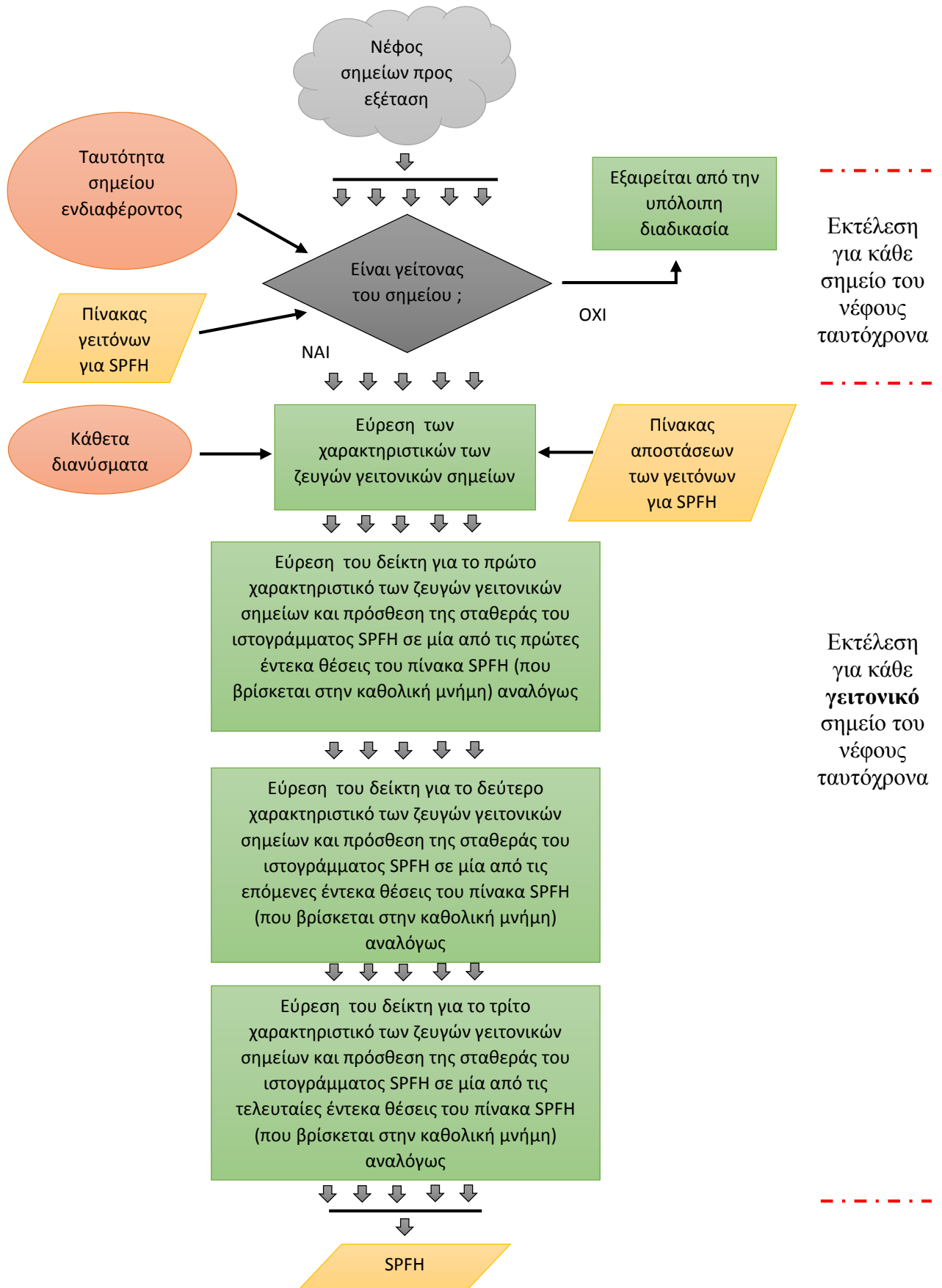


Σχήμα 38 : Λογικό διάγραμμα υπολογισμού γειτονικών σημείων και των αποστάσεων τους από το σημείο ενδιαφέροντος

#### 5.4.2 Υπολογισμός SPFH

Για την εκτέλεση αυτού του πυρήνα υπολογισμών (kernel) χρειαζόμαστε αρκετές πληροφορίες, τις οποίες υπολογίσαμε προηγουμένως. Η διαδικασία ξεκινά με την ανάκτηση της ταυτότητας του σημείου ενδιαφέροντος. Θυμίζουμε ότι η διαδικασία αυτή είναι μέρος του πρώτου θεμελιώδους βρόχου που χρησιμοποιούμε, μαζί με την εκτέλεση της διαδικασίας της εύρεσης γειτόνων. Λαμβάνοντας υπόψη κάθε σημείο του νέφους προς εξέταση και τον πίνακα γειτόνων για SPFH, προχωράμε στον έλεγχο γειτόνων του σημείου ενδιαφέροντος, με κάθε παράλληλο νήμα να είναι ένας υποψήφιος γείτονας. Όπως και πριν κάθε σημείο που δεν είναι γείτονας εξαιρείται της υπόλοιπης διαδικασίας. Στην συνέχεια, για κάθε γειτονικό σημείο ανακτάμε το κάθετο

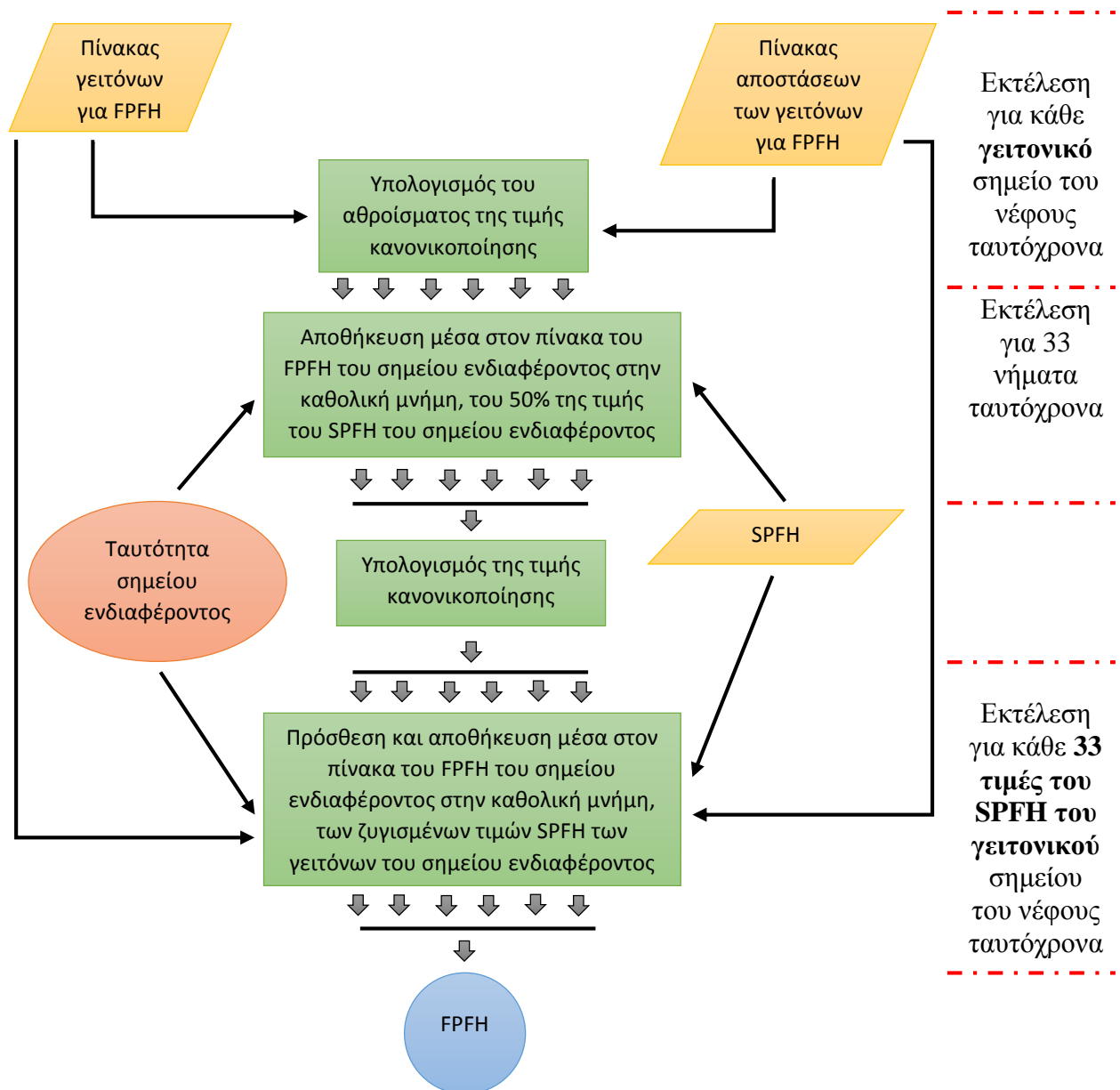
διάνυσμα και την απόσταση του από το σημείο ενδιαφέροντος, η οποία είναι και το ένα από τα τέσσερα χαρακτηριστικά ζευγών που χρησιμοποιείται επίσης και στους υπολογισμούς των υπολοίπων τριών. Με αυτά τα δεδομένα υπολογίζουμε τα υπόλοιπα τρία χαρακτηριστικά ζεύγους, με το κάθε ζεύγος να αποτελείται από το σημείο ενδιαφέροντος και τον κάθε γείτονα του. Προχωράμε με την εύρεση του δείκτη για το πρώτο χαρακτηριστικό των ζευγών γειτονικών σημείων και πρόσθεση της σταθεράς του ιστογράμματος SPFH (histogram increase) σε μία από τις πρώτες έντεκα θέσεις του πίνακα SPFH (που βρίσκεται στην καθολική μνήμη) αναλόγως. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια της συνάρτησης της ατομικής πρόσθεσης (atomic add) της CUDA. Δηλαδή, το πρώτο χαρακτηριστικό του κάθε γείτονα μας δείχνει σε ποια από τις πρώτες έντεκα θέσεις του πίνακα SPFH προστίθεται η σταθερά και με κάθε γείτονα να προσφέρει έναν δείκτη, δημιουργείται το πρώτο μέρος του πίνακα. Σημειώνεται ότι ο πίνακας SPFH είναι για όλα τα σημεία του νέφους προς εξέταση και αποθηκεύεται στη καθολική μνήμη για να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς του FPFH. Εντελώς ανάλογα λειτουργεί η διαδικασία και για τα άλλα δύο χαρακτηριστικά, με το τελικό αποτέλεσμα της εκτέλεσης του θεμελιώδες βρόχου να είναι ένας πίνακας με τριάντα τρεις τιμές για κάθε σημείο του νέφους, που αντιπροσωπεύουν το ιστόγραμμα SPFH του.



Σχήμα 39 : Λογικό διάγραμμα υπολογισμού SPFH

### 5.4.3 Υπολογισμός FPFH

Σε αυτή την φάση το πρόγραμμα εισέρχεται στον δεύτερο θεμελιώδη βρόχο επανάληψης. Πριν την εκτέλεση του παρών πυρήνα (kernel) χρειάζεται και η εκτέλεση για δεύτερη φορά της εύρεσης γειτόνων και αποστάσεων για κάθε σημείο ενδιαφέροντος. Χρησιμοποιώντας των πίνακα γειτόνων για FPFH και τον πίνακα αποστάσεων των γειτόνων για FPFH, υπολογίζεται το άθροισμα που χρειάζεται για τον μετέπειτα υπολογισμό της τιμής κανονικοποίησης. Αυτή η φάση της διαδικασίας εκτελείται μόνο για τους γείτονες του σημείου ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας μόνο τριάντα τρία παράλληλα νήματα και με την ανάκτηση της ταυτότητας του σημείου ενδιαφέροντος και του συνολικού πίνακα SPFH, βρίσκουμε το SPFH του σημείου ενδιαφέροντος, το οποίο αποτελεί την μισή τιμή του FPFH του σημείου ενδιαφέροντος. Προχωρώντας, υπολογίζεται η τελική τιμή κανονικοποίησης που χρειάζεται στη συνέχεια. Τέλος, με την βοήθεια της ατομικής πρόσθεσης και την ανάθεση τριάντα τριών παράλληλων νημάτων επεξεργασίας για κάθε SPFH γειτονικών σημείων προχωράμε στον υπολογισμό του FPFH. Αυτός επιτυγχάνεται με την πρόσθεση και αποθήκευση μέσα στον συνολικό πίνακα του FPFH, των ζυγισμένων τιμών SPFH του κάθε γείτονα του σημείου ενδιαφέροντος. Το άθροισμα αυτό αποτελεί το άλλο μισό μέρος της τιμής του FPFH. Έτσι αποκτούμε το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα, που είναι ένας πίνακας με τριάντα τρεις τιμές για κάθε σημείο του νέφους προς εξέταση, που αντιπροσωπεύει τα ιστογράμματα FPFH του νέφους προς εξέταση.



Σχήμα 40 : Λογικό διάγραμμα τελικών διαδικασιών υπολογισμού του FPFH για το νέφος σημείων προς εξέταση

## 5.5 Αποκλίσεις λόγω περιορισμών έκδοσης CUDA και κάρτας γραφικών

Σε αυτό το μέρος της διπλωματικής εργασίας, εξετάζουμε τον τρόπο με τον οποίο οι αποκλίσεις που παρουσιάστηκαν στην εκτέλεση ατομικής πρόσθεσης με αριθμούς κινητής υποδιαστολής επηρέασαν τα αποτελέσματα του προγράμματος. Όπως ειπώθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο, αυτή η συνάρτηση της CUDA διαφέρει σε ακρίβεια αναλόγως της αρχιτεκτονικής. Γενικά εάν ο κώδικας είναι πολυνηματικός και οι πράξεις αριθμών κινητής υποδιαστολής μονής ακρίβειας εκτελούνται με διαφορετική σειρά ανάμεσα σε εκτελέσεις του κώδικα, τότε δύναται το ακριβώς ίδιο εκτελέσιμο πρόγραμμα να τρέχει στο ίδιο ακριβώς σύστημα και να παράγει ελαφρώς

διαφορετικά αποτελέσματα. Μερικοί από τους λόγους είναι ότι οι πράξεις κινητής υποδιαστολής δεν είναι προσεταιριστικές, έτσι φαινομενικά καλοήθεις ανακατατάξεις (όπως οι συνθήκες ανταγωνισμού μεταξύ πολλαπλών νημάτων) μπορούν να αλλάξουν τα αποτελέσματα. Επίσης διαφορετικές αρχιτεκτονικές υποστηρίζουν διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας και στρογγυλοποίησης κάτω από διαφορετικές συνθήκες (σημαίες μεταγλωττιστή, λέξη ελέγχου αντί με βάση οδηγίες). Τέλος διαφορετικοί μεταγλωττιστές ερμηνεύουν τα γλωσσικά πρότυπα με διαφορετικό τρόπο και μερικές αρχιτεκτονικές υποστηρίζουν FMAD (fused multiply-add) ενώ μερικές άλλες όχι.

Για το σκοπό λοιπόν της εύρεσης τυχόν μεγάλου σφάλματος και ασυνέπειας στις πράξεις εκτελέστηκαν κάποιες δοκιμές. Όπως φαίνεται στους πίνακες 1 μέχρι 4, εκτελέστηκαν δοκιμές για πέντε μετασχηματισμένα νέφη με τρεις επαναλήψεις για το κάθε ένα, στις δύο μονάδες επεξεργασίας γραφικών NVIDIA GeForce GTX 750 Ti και NVIDIA GeForce GTX TITAN X. Επίσης οι δοκιμές έγιναν για την εκτέλεση ευθυγράμμισης με κάθετα διανύσματα αλλά και με FPFH, αν και η απόκλιση υπάρχει λόγω των ατομικών πράξεων που εκτελούνται κατά την εύρεση των κάθετων διανυσμάτων μόνο. Αρχικά δεν υπήρχε απόκλιση στο ποσοστό βελτίωσης που ήταν και το πρώτο σημάδι ότι και να υπάρχει απόκλιση, αυτή δεν είναι απαγορευτική. Σημειώνεται ότι το ποσοστό βελτίωσης σφάλματος που χρησιμοποιούμε ορίζεται ως :

$$\text{Ποσοστό βελτίωσης (\%)} = \frac{x_1 - x_2}{x_1} \times 100 \quad (29)$$

όπου το αρχικό σφάλμα μεταξύ του αρχικού νέφους και του μετασχηματισμού του είναι  $x_1$  και το τελικό σφάλμα μετά την εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού στο τερματισμό της διαδικασίας είναι  $x_2$ .

Στη συνέχεια συγκρίθηκαν για αυτές τις επαναλήψεις τα τελικά σφάλματα των εκτελέσεων και όπως φαίνεται υπήρχε μια μικρή διακύμανση. Εξάγοντας τον μέσο όρο και την απόκλιση των τιμών, βλέπουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις η απόκλιση είναι μικρότερη της τάξης του δέκα στην μείον ενάτη και αυτό μας καθησυχάζει γιατί γενικά για τους αριθμούς κινητής υποδιαστολής με τους οποίους ασχολούμαστε, υπάρχει συγκεκριμένη τιμή μέχρι την οποία μπορούν να είναι ακριβής και αυτή είναι τα έξι δεκαδικά ψηφία. Αυτό σημαίνει ότι για αριθμούς με επτά δεκαδικά ψηφία και περισσότερα δεν υπάρχει εγγύηση ακρίβειας των πράξεων και δεν υπάρχει κάτι που μπορούμε να διορθώσουμε εμείς. Βρισκόμαστε λοιπόν μέσα στα αποδεκτά όρια ακρίβειας και πολύ μάλιστα, αφού εκτελούμε χιλιάδες ατομικές πράξεις σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα με απόκλιση της τάξης των εννέα δεκαδικών ψηφίων και περισσότερων. Αυτή η μικρή ανακρίβεια μπορεί να διορθωθεί με την εκτέλεση πράξεων αριθμών κινητής υποδιαστολής διπλής ακρίβειας αλλά με την παρούσα αρχιτεκτονική γραφικών μονάδων επεξεργασίας που είχαμε στην διάθεση μας δεν υποστηριζόταν.



<b>NORMALS, RADIUS = 0.01, DATASET #2, NVIDIA GeForce GTX 750 Ti</b>					
ITERATION ID	FLOAT 1	FLOAT 2	FLOAT 3	FLOAT 4	FLOAT 5
1	1,75915E-06	8,3399E-08	5,91681E-07	2,47263E-08	1,15698E-07
2	1,75903E-06	8,31951E-08	5,91685E-07	2,48887E-08	1,15374E-07
3	1,75903E-06	8,31469E-08	5,91691E-07	2,47636E-08	1,15467E-07
<b>AVERAGE</b>	1,75907E-06	8,3247E-08	5,91686E-07	2,47929E-08	1,15513E-07
<b>DEVIATION</b>	6,9282E-11	1,33824E-10	5,03322E-12	8,50638E-11	1,66826E-10

Πίνακας 1 : Δοκιμές εύρεσης απόκλισης του αλγορίθμου υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων για το σετ δεδομένων 2, με ακτίνα 1 cm στην κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX 750 Ti

<b>NORMALS, RADIUS = 0.01, DATASET #2, NVIDIA GeForce GTX TITAN X</b>					
ITERATION ID	FLOAT 1	FLOAT 2	FLOAT 3	FLOAT 4	FLOAT 5
1	3,18549E-06	5,8197E-07	3,52051E-07	4,85335E-08	6,23268E-08
2	3,17872E-06	5,80556E-07	3,51448E-07	4,8354E-08	6,26738E-08
3	3,1885E-06	5,79102E-07	3,50878E-07	4,8547E-08	6,20391E-08
<b>AVERAGE</b>	3,18424E-06	5,80543E-07	3,51459E-07	4,84782E-08	6,23466E-08
<b>DEVIATION</b>	5,00902E-09	1,43405E-09	5,86577E-10	1,07743E-10	3,17811E-10

Πίνακας 2 : Δοκιμές εύρεσης απόκλισης του αλγορίθμου υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων για το σετ δεδομένων 2, με ακτίνα 1 cm στην κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX TITAN X

<b>FPFH, RADIUS = 0.01, DATASET #2, NVIDIA GeForce GTX 750 Ti</b>					
ITERATION ID	FLOAT 1	FLOAT 2	FLOAT 3	FLOAT 4	FLOAT 5
1	7,8807E-07	2,90698E-07	5,98171E-08	4,36323E-07	1,26205E-07
2	7,88703E-07	2,89505E-07	5,94467E-08	4,3573E-07	1,2631E-07
3	7,87168E-07	2,8837E-07	5,98523E-08	4,35534E-07	1,2615E-07
<b>AVERAGE</b>	7,8798E-07	2,89524E-07	5,97054E-08	4,35862E-07	1,26222E-07
<b>DEVIATION</b>	7,71418E-10	1,16412E-09	2,24702E-10	4,10809E-10	8,12917E-11

Πίνακας 3 : Δοκιμές εύρεσης απόκλισης του αλγορίθμου υπολογισμού του FPFH για το σετ δεδομένων 2, με ακτίνα 1 cm στην κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX 750 Ti

<b>FPFH, RADIUS = 0.01, DATASET #2, NVIDIA GeForce GTX TITAN X</b>					
ITERATION ID	FLOAT 1	FLOAT 2	FLOAT 3	FLOAT 4	FLOAT 5
1	8,60358E-07	1,69636E-07	9,63833E-08	3,6991E-07	5,77079E-08
2	8,61422E-07	1,69689E-07	9,54783E-08	3,69944E-07	5,765E-08
3	8,60848E-07	1,69707E-07	9,64287E-08	3,69924E-07	5,76853E-08
<b>AVERAGE</b>	8,60876E-07	1,69677E-07	9,60968E-08	3,69926E-07	5,76811E-08
<b>DEVIATION</b>	5,32552E-10	3,69098E-11	5,36089E-10	1,7088E-11	2,91812E-11

Πίνακας 4 : Δοκιμές εύρεσης απόκλισης του αλγορίθμου υπολογισμού του FPFH για το σετ δεδομένων 2, με ακτίνα 1 cm στην κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX TITAN X

## 5.6 Βέλτιστη ακτίνα αναζήτησης γειτόνων

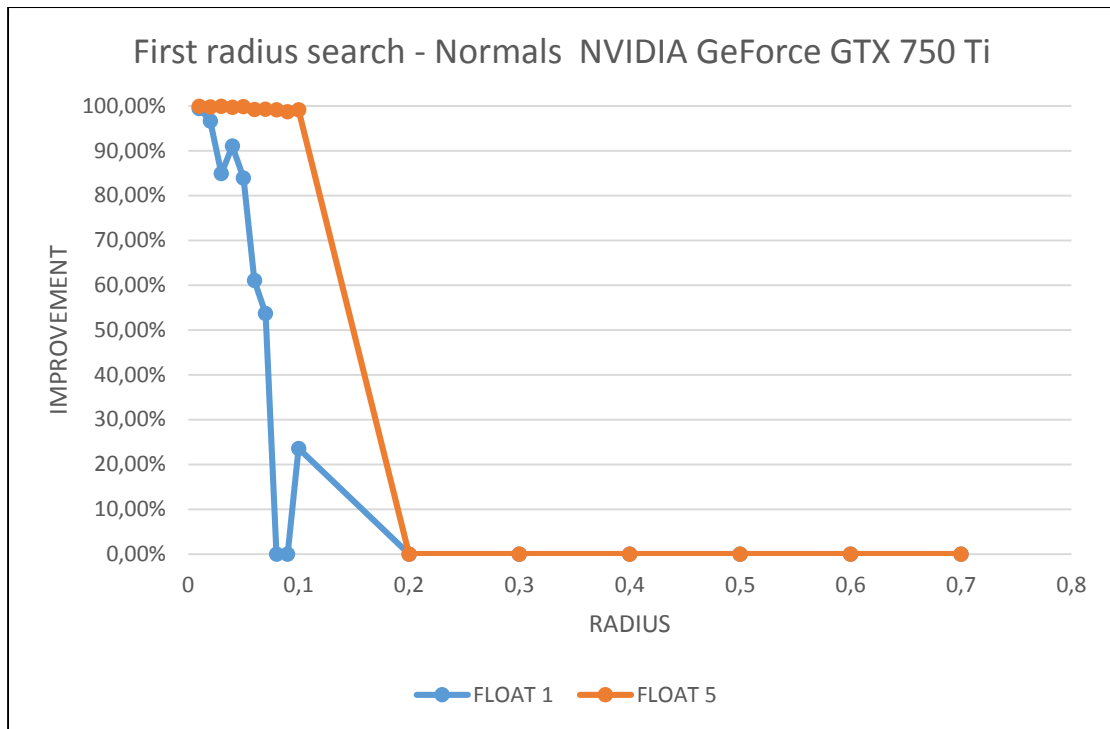
Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέξαμε την μέθοδο ακτινικής αναζήτησης γειτόνων. Ως μέρος της διαδικασίας ευθυγράμμισης έπρεπε να οριστεί μια βέλτιστη ακτίνα αναζήτησης για να έχουμε τα καλύτερα δυνατόν αποτελέσματα. Για αυτό τον σκοπό εφαρμόστηκε εξαντλητική μελέτη ανάμεσα σε δοκιμές δέκα μετασχηματισμών νέφους σημείων για την ευθυγράμμιση με κάθετα διανύσματα αλλά και με FPFH. Το αρχικό εύρος που χρησιμοποιήθηκε ήταν από 1 cm μέχρι 9 cm με βήμα 1cm [0.01 0.02 .....0.09 m ] και από 10 cm μέχρι 90 cm με βήμα 10 cm [0.1 0.2 .....0.9 m]. Ο σκοπός μας ήταν να δούμε σε μια πρώτη φάση, εκτελώντας δοκιμές σε δύο μετασχηματισμούς, σε πιο σημείο το ποσοστό βελτίωσης παίρνει τις ψηλότερες τιμές του και στην συνέχεια να επικεντρωθούμε σε μικρότερη περιοχή γύρω από αυτό το σημείο. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν και στις δύο μονάδες επεξεργασίας γραφικών NVIDIA GeForce GTX 750 Ti και NVIDIA GeForce GTX TITAN X.

### 5.6.1 Ακτίνα για Normals

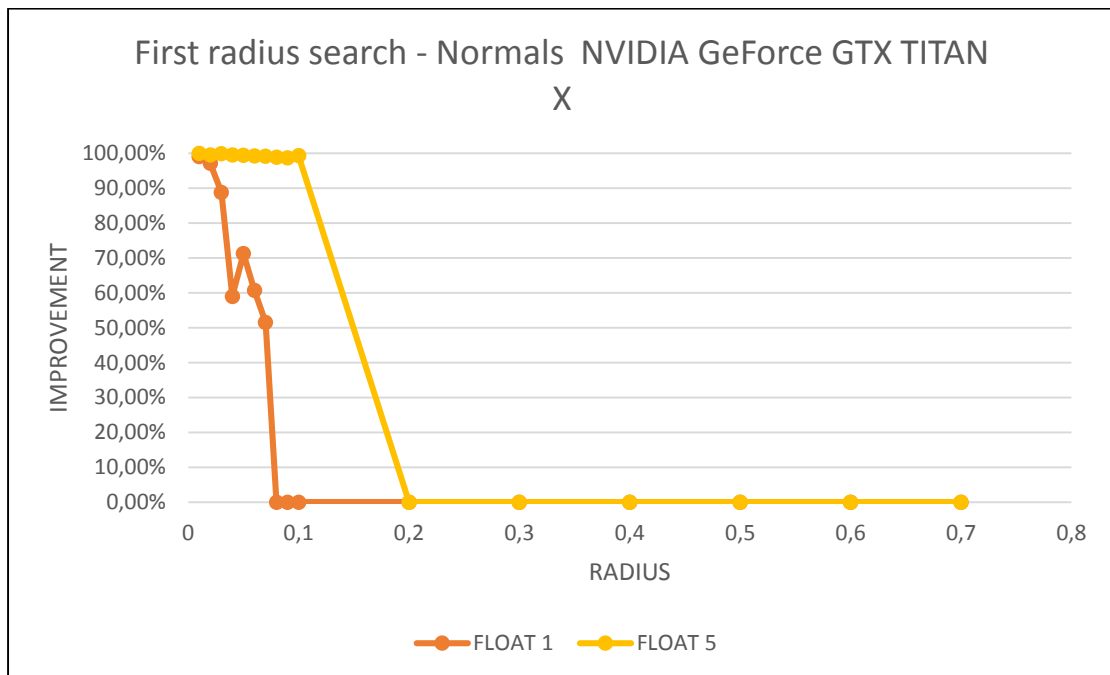
Αρχίσαμε με την αναζήτηση ακτίνας για την βέλτιστη εφαρμογή του αλγορίθμου ευθυγράμμισης με τον γεωμετρικό περιγραφητή κάθετων διανυσμάτων. Όπως διακρίνεται στον πίνακα δοκιμών, οι δύο γραφικές μονάδες επεξεργασίας προσφέρουν όμοια αποτελέσματα.

NORMALS				
RADIUS	FLOAT 1		FLOAT 5	
	750 Ti	TITAN X	750 Ti	TITAN X
0,01	99,46%	99,02%	99,96%	99,98%
0,02	96,65%	97,13%	99,81%	99,49%
0,03	84,92%	88,81%	99,91%	99,85%
0,04	91,06%	58,98%	99,71%	99,56%
0,05	83,94%	71,25%	99,86%	99,46%
0,06	61,03%	60,69%	99,22%	99,29%
0,07	53,67%	51,55%	99,30%	99,12%
0,08	0,00%	0,00%	99,13%	98,86%
0,09	0,00%	0,00%	98,70%	98,68%
0,1	23,58%	0,00%	99,13%	99,32%
0,2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,3	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,4	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,6	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,7	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Πίνακας 5 : Πρώτες δοκιμές εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγορίθμο υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων και για τις δύο κάρτες γραφικών

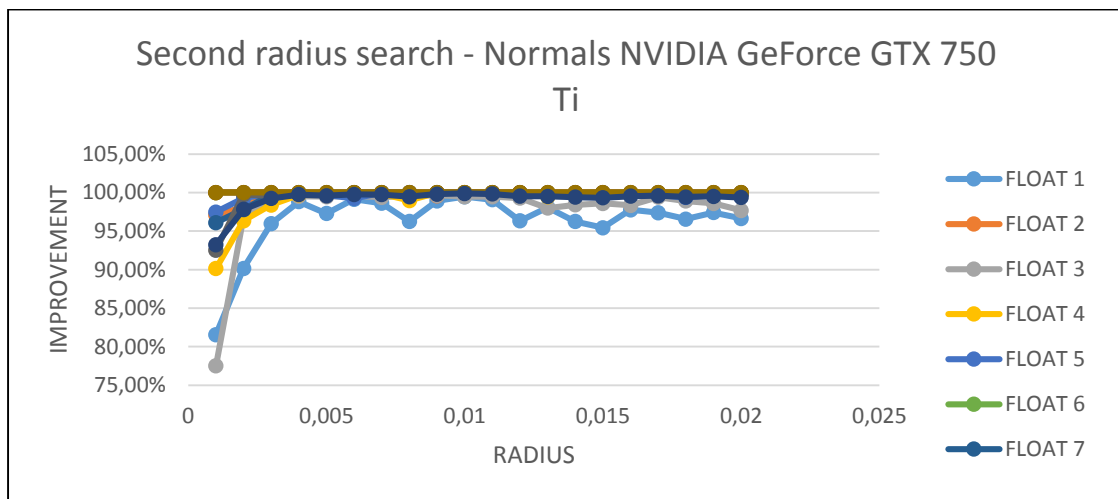


Σχήμα 41 : Γραφική παράσταση πρώτων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX 750 Ti

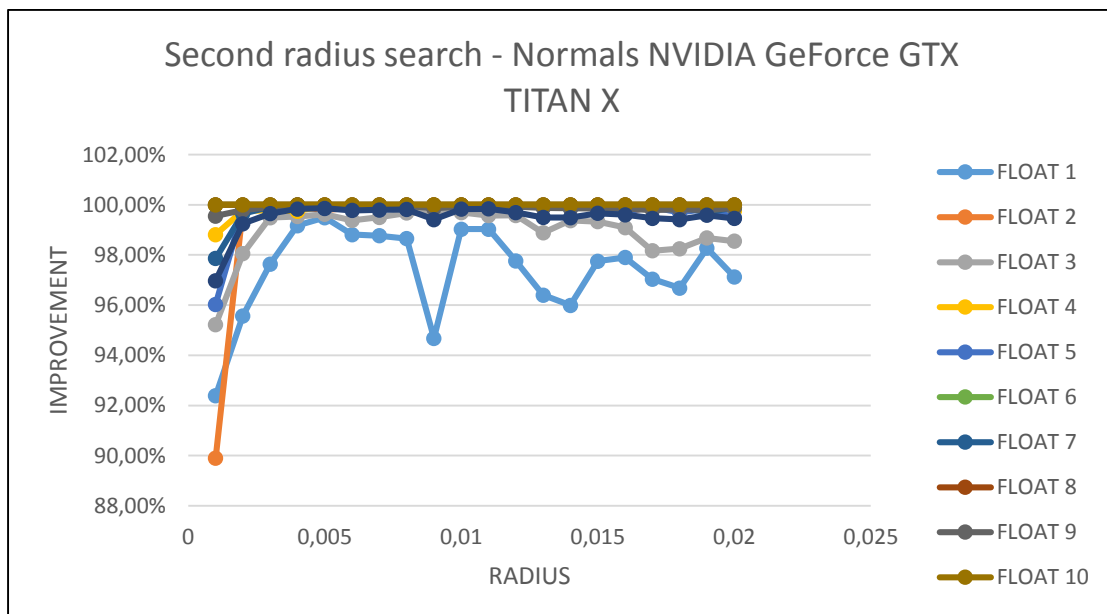


Σχήμα 42 : Γραφική παράσταση πρώτων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX TITAN X

Και στις δύο σειρές εκτελέσεων, η αναζήτηση με ακτίνα 1 cm είχε το υψηλότερο ποσοστό βελτίωσης με την ακτίνα των 2 cm να είναι στην δεύτερη θέση, όπως φαίνεται και στις δύο πιο πάνω καμπύλες. Για αυτό και επιλέξαμε στην συνέχεια το εύρος ακτίνας δοκιμών να είναι από το 1 mm μέχρι τα 2 cm, με βήμα 1 mm [0.001 0.002 .....0.02 m]. Με την αναζήτηση σε αυτό το νέο εύρος τιμών της ακτίνας, τα ποσοστά που λάβαμε είχαν πολύ κοντινές τιμές όπως αναμενόταν και κάθε ακτίνα είχε πολύ αξιόλογο ποσοστό βελτίωσης του σφάλματος. Οι γραφικές παραστάσεις που εξάχθηκαν δεν ήταν όπως φαίνεται πιο κάτω, κατατοπιστικές.

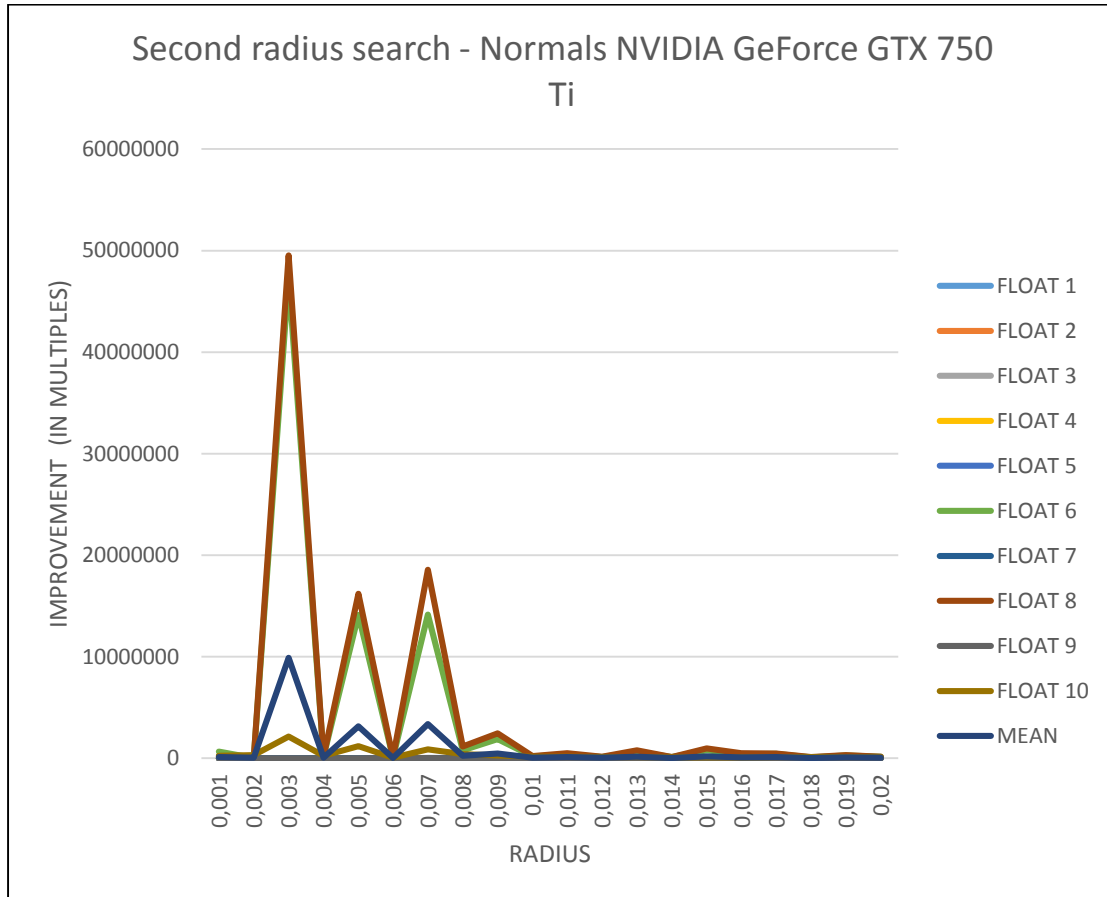


Σχήμα 43 : Γραφική παράσταση δεύτερων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX 750 Ti

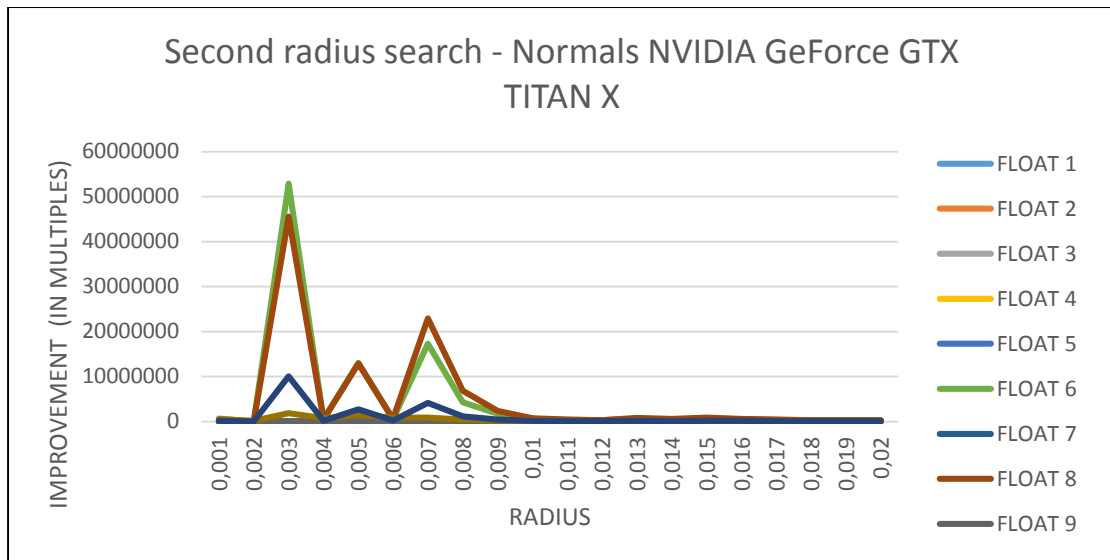


Σχήμα 44 : Γραφική παράσταση δεύτερων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX TITAN X

Για αυτό τον λόγο επιλέξαμε στην συνέχεια να συγκρίνουμε έναν άλλο δείκτη βελτίωσης για να εξακριβώσουμε την βέλτιστη ακτίνα ευκολότερα. Αυτός ο δείκτης ήταν το πηλίκο του αρχικού σφάλματος δια το τελικό σφάλμα και μας έδινε επί της ουσίας την βελτίωση του σφάλματος σε πολλαπλάσια. Όμως, πάλι παρουσιάστηκε πρόβλημα στην εύρεση της ακτίνας γιατί λόγω της πολύ μεγαλύτερης βελτίωσης που παρουσίαζαν οι μετασχηματισμοί 6, 8 και 10 από τους υπόλοιπους, δημιούργησαν αποκλίσεις στην μέση τιμή. Αυτές οι ανωμαλίες φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα.

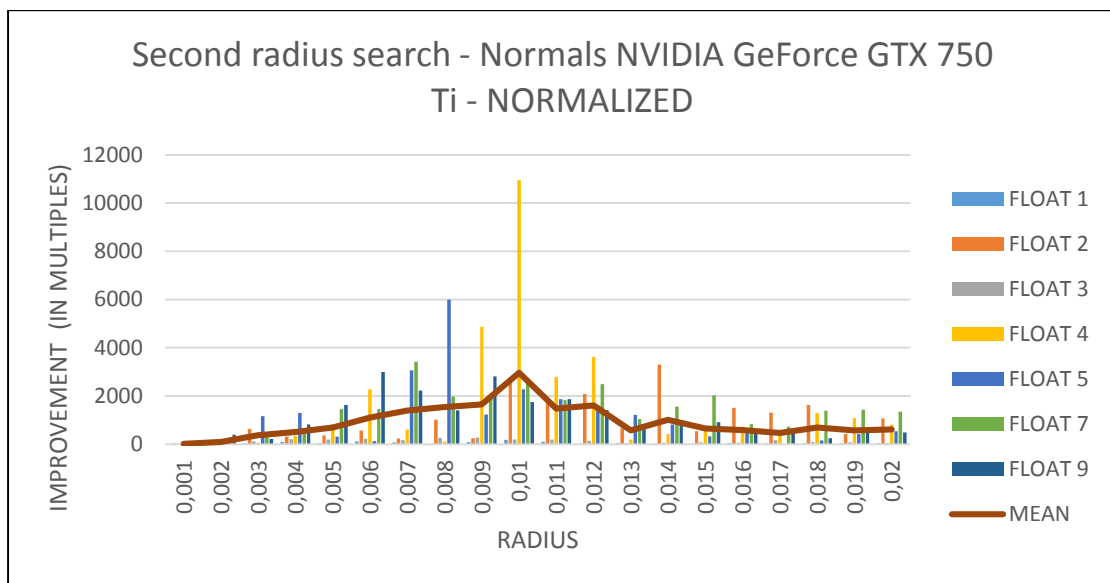


Σχήμα 45 : Γραφική παράσταση δεύτερων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX 750 Ti, με την βελτίωση του σφάλματος μετρημένη σε πολλαπλάσια

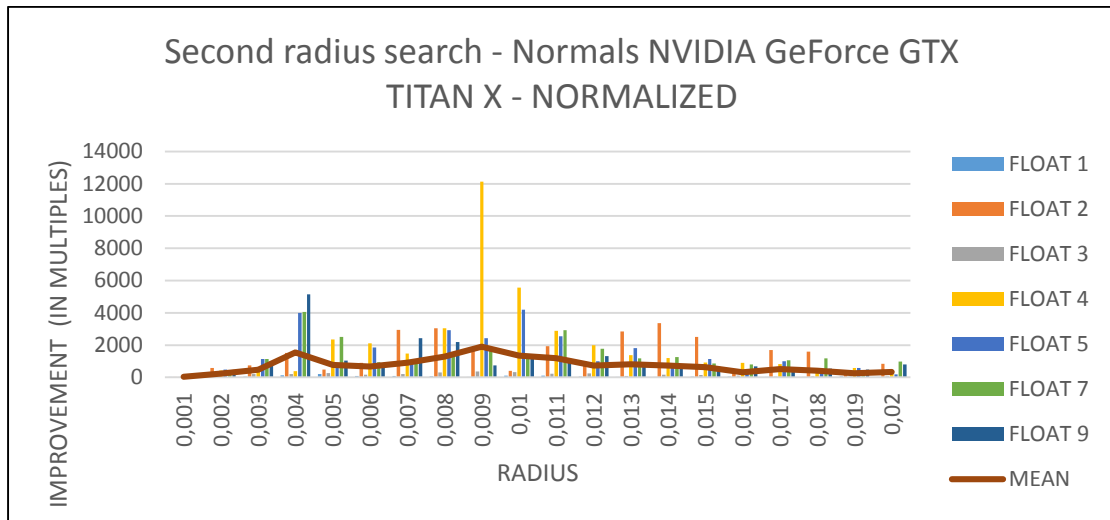


Σχήμα 46 : Γραφική παράσταση δεύτερων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX TITAN X, με την βελτίωση του σφάλματος μετρημένη σε πολλαπλάσια

Έτσι αποφασίσαμε να μην λάβουμε υπόψη τα μετασχηματισμένα νέφη 6, 8 και 10 στον τελικό καθορισμό της βέλτιστης ακτίνας. Στα τελικά σχήματα που δείχνονται ξεκαθαρίζει πλέον η βέλτιστη ακτίνα για την αναζήτηση γειτόνων με σκοπό την ευθυγράμμιση δεδομένων μέσω του γεωμετρικού περιγραφητή κάθετων διανυσμάτων. Αυτή η ακτίνα είναι το 1 cm και χρησιμοποιείται στην συνέχεια για τις εκτελέσεις ευθυγράμμισης νεφών σημείων, με κάθετα διανύσματα.



Σχήμα 47 : Βελτιωμένη γραφική παράσταση δεύτερων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX 750 Ti, με την βελτίωση του σφάλματος μετρημένη σε πολλαπλάσια



Σχήμα 48 : Βελτιωμένη γραφική παράσταση δεύτερων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού των κάθετων διανυσμάτων για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX TITAN X, με την βελτίωση του σφάλματος μετρημένη σε πολλαπλάσια

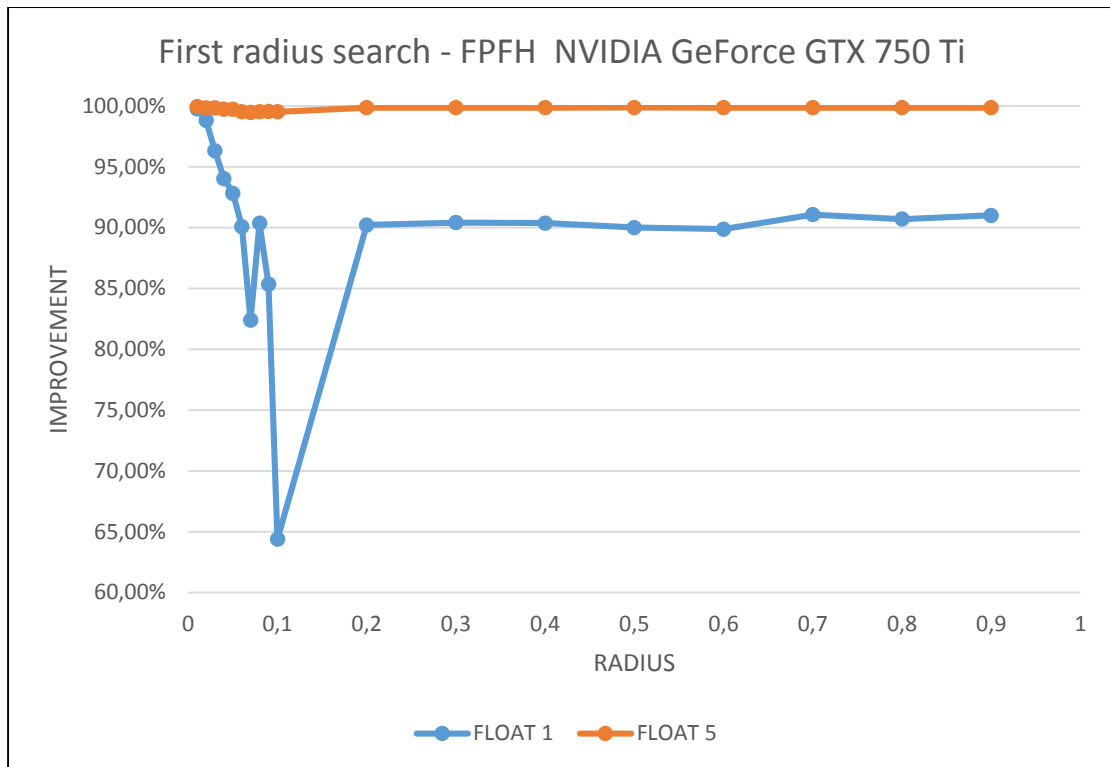
### 5.6.2 Ακτίνα για FPFH

Συνεχίσαμε με την αναζήτηση ακτίνας για την βέλτιστη εφαρμογή του αλγορίθμου ευθυγράμμισης με τον γεωμετρικό περιγραφητή FPFH. Και πάλι οι εκτελέσεις στις δύο γραφικές μονάδες επεξεργασίας προσφέρουν όμοια αποτελέσματα, γεγονός που φαίνεται αμέσως με την εξέταση των πιο κάτω αποτελεσμάτων.

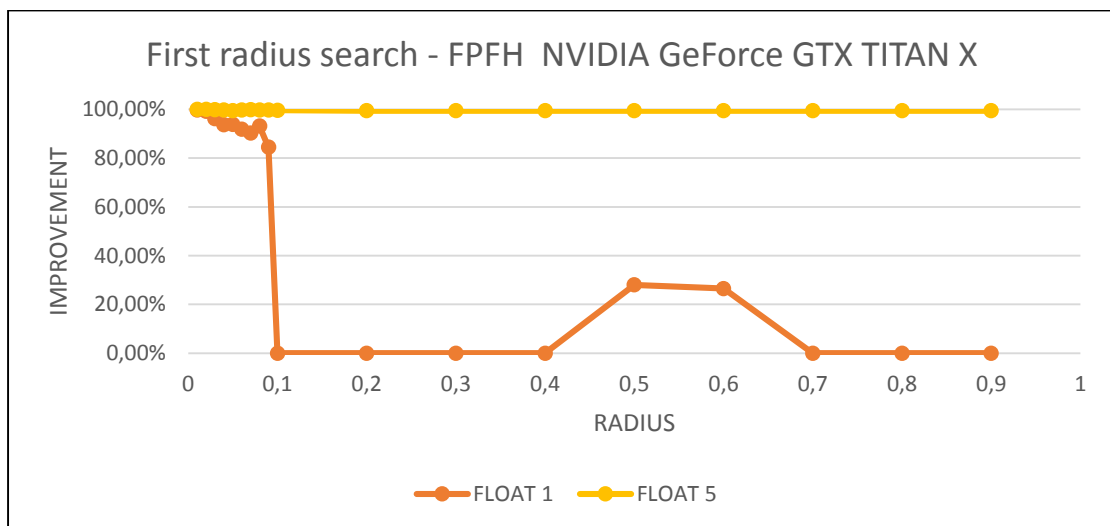
<b>FPFH</b>				
<b>RADIUS</b>	<b>FLOAT 1</b>		<b>FLOAT 5</b>	
	<b>750 Ti</b>	<b>TITAN X</b>	<b>750 Ti</b>	<b>TITAN X</b>
0,01	99,76%	99,74%	99,95%	99,98%
0,02	98,81%	99,16%	99,85%	99,96%
0,03	96,31%	96,25%	99,84%	99,92%
0,04	94,03%	93,64%	99,75%	99,76%
0,05	92,83%	93,89%	99,74%	99,42%
0,06	90,09%	91,89%	99,52%	99,75%
0,07	82,39%	90,34%	99,48%	99,81%
0,08	90,36%	93,13%	99,52%	99,69%
0,09	85,35%	84,50%	99,55%	99,71%
0,1	64,39%	0,00%	99,52%	99,64%
0,2	90,22%	0,00%	99,87%	99,45%
0,3	90,41%	0,00%	99,87%	99,47%
0,4	90,38%	0,00%	99,87%	99,44%
0,5	90,01%	28,01%	99,88%	99,45%
0,6	89,88%	26,48%	99,87%	99,42%
0,7	91,07%	0,00%	99,87%	99,46%
0,8	90,71%	0,00%	99,87%	99,42%
0,9	91,01%	0,00%	99,87%	99,47%

*Πίνακας 6 : Πρώτες δοκιμές εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού του FPFH και για τις δύο κάρτες γραφικών*





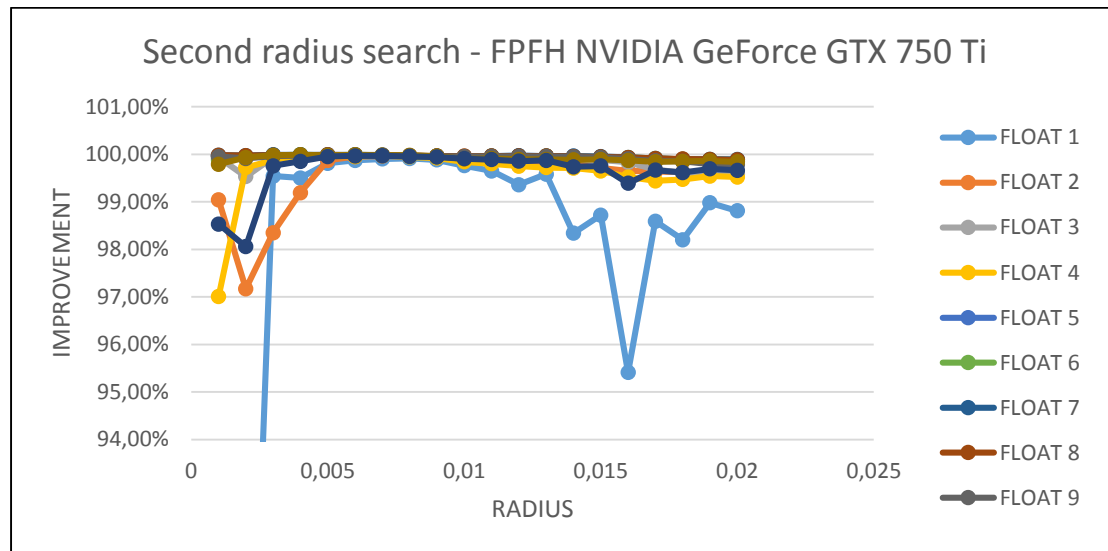
Σχήμα 49 : Γραφική παράσταση πρώτων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού του FPFH για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX 750 Ti



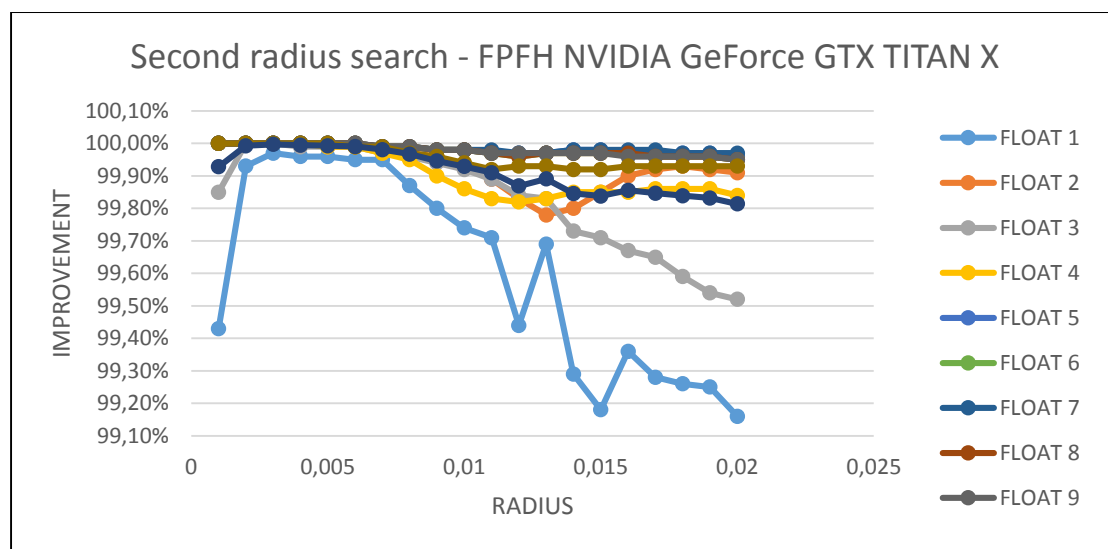
Σχήμα 50 : Γραφική παράσταση πρώτων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού του FPFH για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX TITAN X

Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια και με τις εκτελέσεις της ευθυγράμμισης με κάθετα διανύσματα αφού και πάλι η ακτίνα 1 cm είχε το υψηλότερο ποσοστό βελτίωσης και τα 2 cm πήραν την δεύτερη θέση, με την διαφορά όμως ότι στην ευθυγράμμιση με FPFH είναι ψηλότερα γενικά τα ποσοστά βελτίωσης σφάλματος, όπως αναμενόταν

αφού ο FPFH είναι πολύ καλύτερος περιγραφητής. Πάλι λοιπόν επιλέξαμε εύρος ακτίνας δοκιμών απο 1 mm έως 2 cm, με βήμα 1 mm [0.001 0.002 .....0.02 m]. Με την αναζήτηση σε αυτό το νέο εύρος τιμών της ακτίνας, τα ποσοστά που λάβαμε είχαν πολύ κοντινές τιμές όπως αναμενόταν και κάθε ακτίνα είχε πολύ αξιόλογο ποσοστό βελτίωσης του σφάλματος. Οι γραφικές παραστάσεις που εξάχθηκαν και φαίνονται πιο κάτω, δεν ήταν κατατοπιστικές, όπως και με τα κάθετα διανύσματα προηγουμένως.



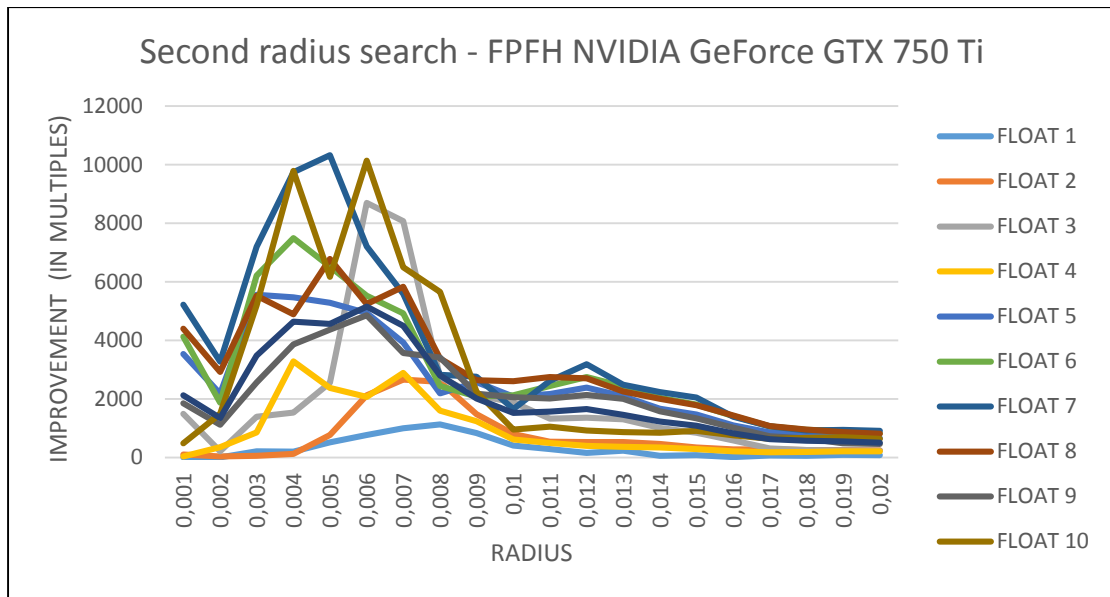
Σχήμα 51 : Γραφική παράσταση δεύτερων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού του FPFH για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX 750 Ti



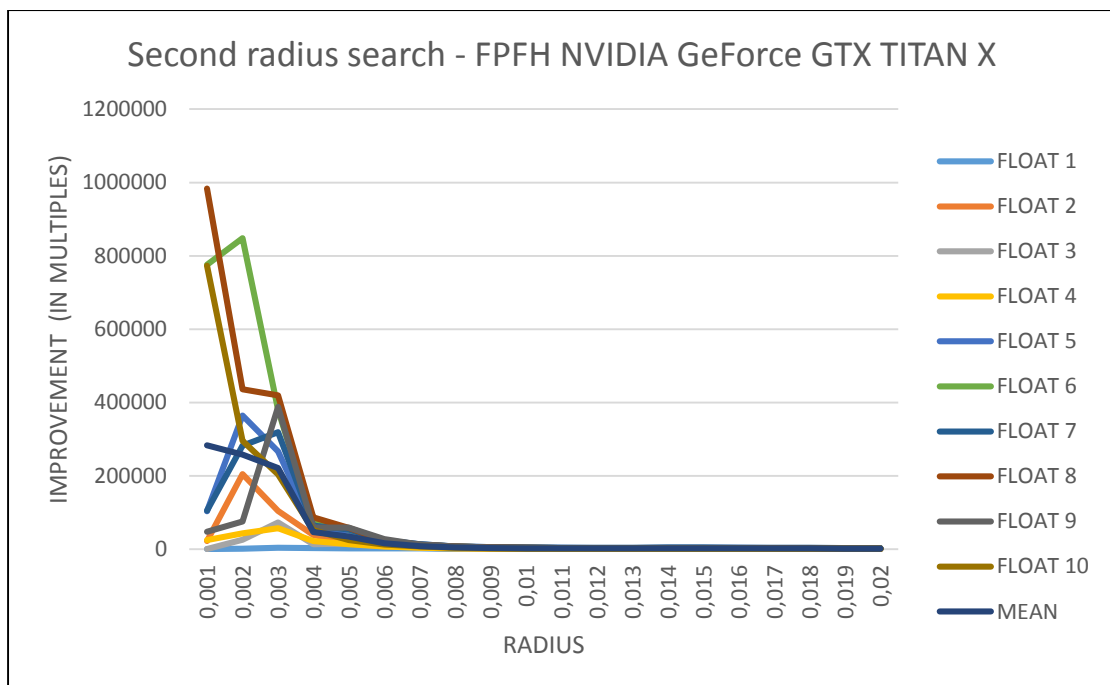
Σχήμα 52 : Γραφική παράσταση δεύτερων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού του FPFH για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX TITAN X

Για αυτό τον λόγο επιλέξαμε ξανά την σύγκριση με τον δείκτη βελτίωσης που χρησιμοποιήσαμε προηγουμένως, το πηλίκο του αρχικού σφάλματος δια το τελικό σφάλμα, δηλαδή την βελτίωση του σφάλματος σε πολλαπλάσια. Στα τελευταία

σχήματα που δείχνονται ξεκαθαρίζει πλέον η βέλτιστη ακτίνα για την αναζήτηση γειτόνων με σκοπό την ευθυγράμμιση δεδομένων μέσω του γεωμετρικού περιγραφητή FPFH. Αυτή η ακτίνα είναι τα 0.6 cm και χρησιμοποιείται στην συνέχεια για τις εκτελέσεις ευθυγράμμισης νεφών σημείων, με FPFH.



Σχήμα 53 : Γραφική παράσταση δεύτερων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού του FPFH για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX 750 Ti, με την βελτίωση του σφάλματος μετρημένη σε πολλαπλάσια.

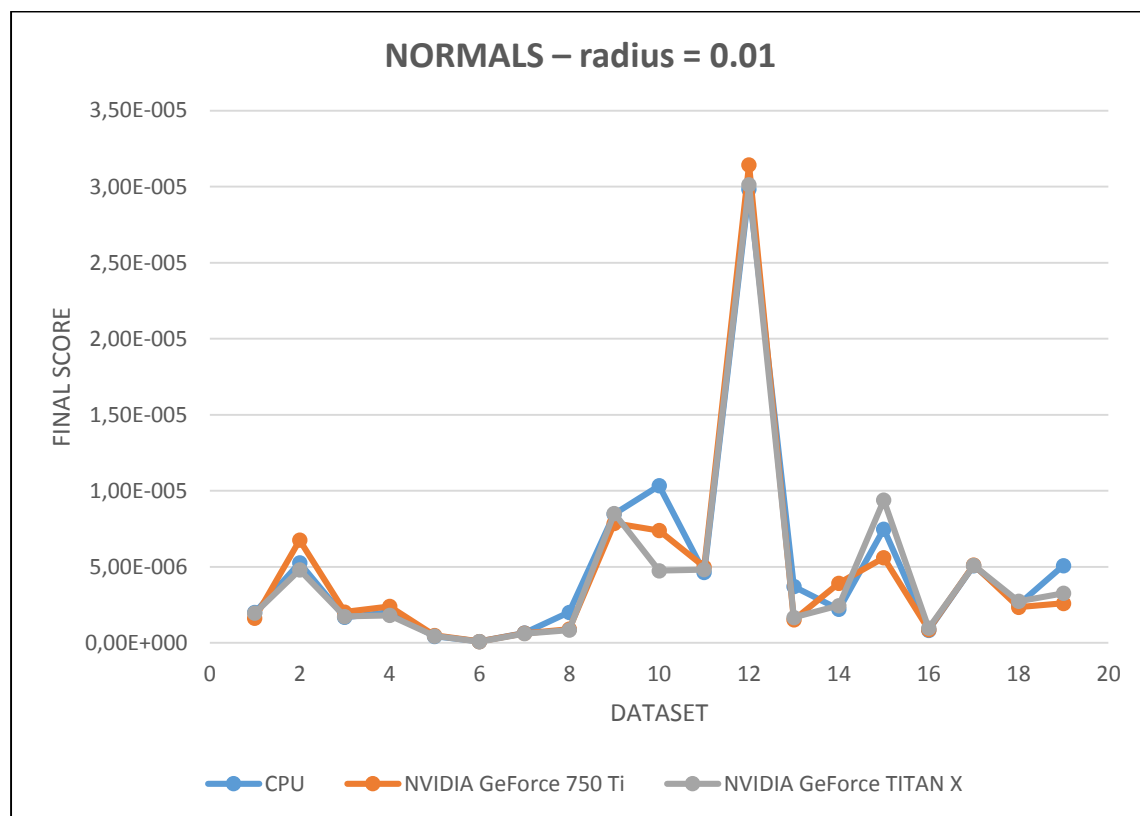


Σχήμα 54 : Γραφική παράσταση δεύτερων δοκιμών εύρεσης βέλτιστης ακτίνας για τον αλγόριθμο υπολογισμού του FPFH για την κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX TITAN X, με την βελτίωση του σφάλματος μετρημένη σε πολλαπλάσια.

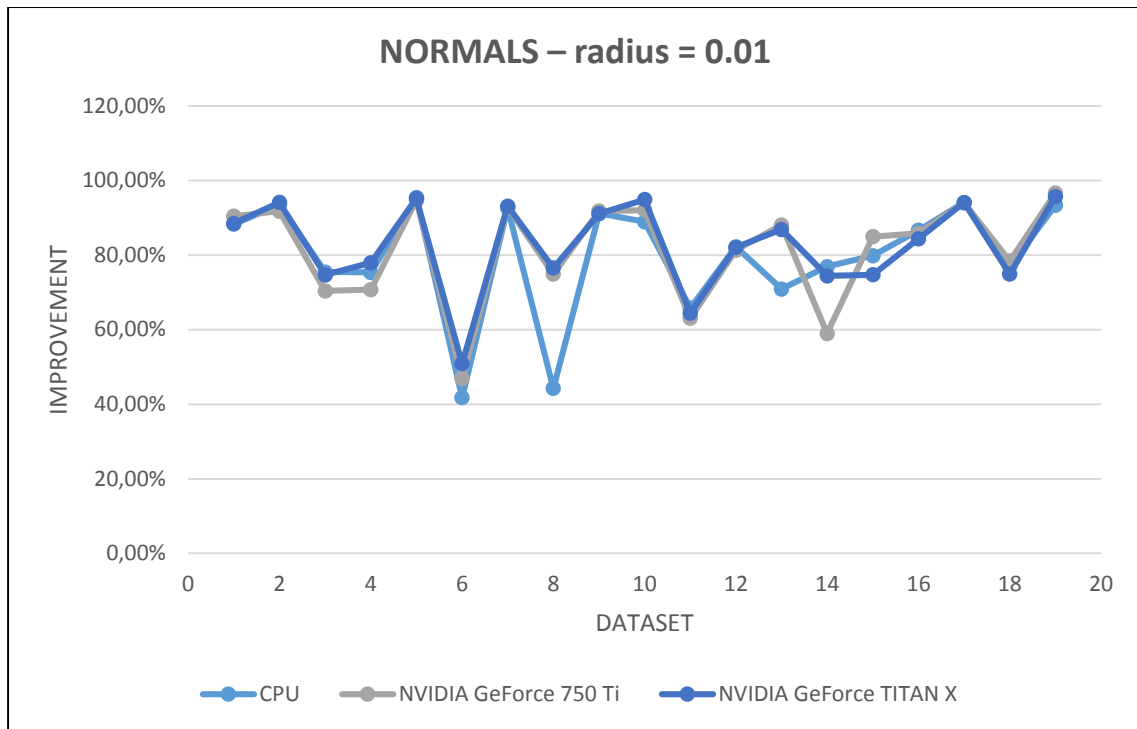
## 5.7 Ευθυγράμμιση και αποτελέσματα συγκρίσεων

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ευθυγράμμισης τόσο με κάθετα διανύσματα όσο και με FPFH. Ο συνολικός παράλληλος αλγόριθμος ευθυγράμμισης με βάση τα κάθετα διανύσματα και με FPFH, υλοποιημένος σε GPGPU, συγκρίνεται με αντίστοιχους παράλληλους κώδικες που εκτελούνται σε CPU, οι οποίοι είναι ευρέως γνωστοί στον επιστημονικό και προγραμματιστικό κόσμο και η βιβλιοθήκη που παρέχει τους συγκεκριμένους αλγόριθμους είναι η PCL (Point Cloud Library) [40].

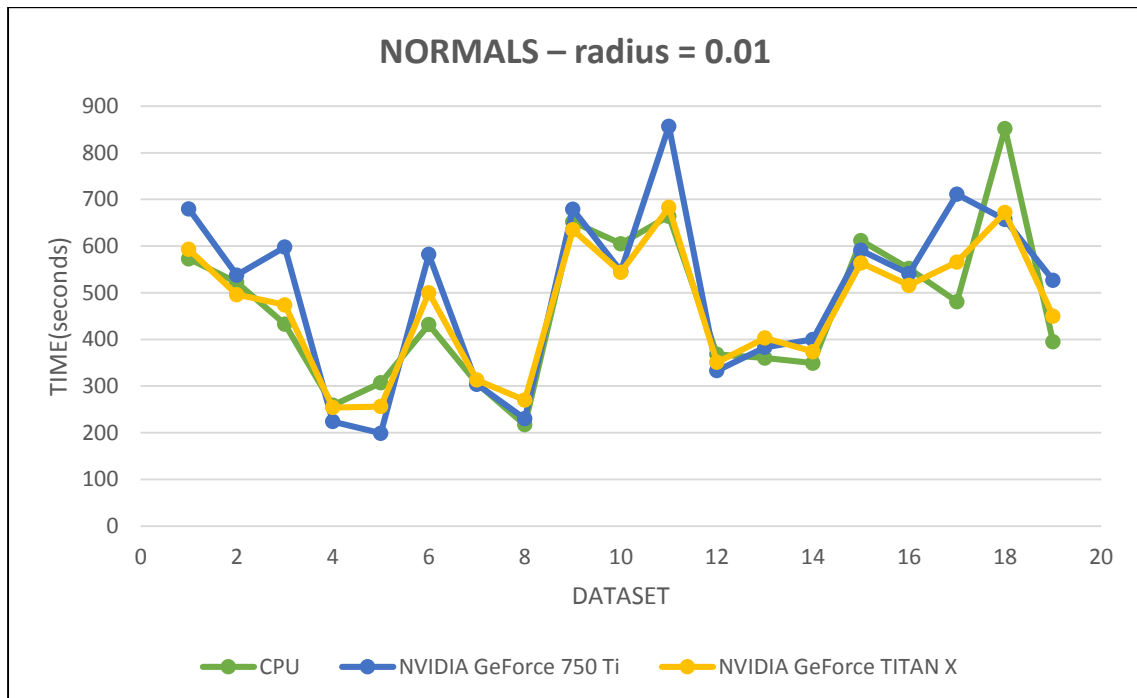
Μέσω της παραλληλοποίησης πετύχαμε σημαντική εξοικονόμηση του υπολογιστικού χρόνου που χρειάζεται για να τερματίσει ο αλγόριθμος ευθυγράμμισης, με την χρήση και των δύο γεωμετρικών περιγραφητών αλλά και καλύτερα ποσοστά βελτίωσης χωρίς την χρήση υποδειγματοληψίας. Στις προηγούμενες ενότητες εξετάσαμε βηματικά τη δημιουργία του παράλληλου αλγόριθμου εύρεσης των γεωμετρικών περιγραφητών ενώ πραγματοποιήθηκε εξαντλητική μελέτη για την αναζήτηση της βέλτιστης ακτίνας αναζήτησης. Για τα κάθετα διανύσματα χρησιμοποιήθηκε η ακτίνα 1 cm και για FPFH η ακτίνα 0.6 cm. Στα πρώτα τρία σχήματα βλέπουμε τα συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτέλεση ευθυγράμμισης με την χρήση περιγραφητών κάθετων διανυσμάτων σε CPU και GPU (NVIDIA GeForce GTX 750 Ti και NVIDIA GeForce GTX TITAN X).



Σχήμα 55 : Συγκριτικά αποτέλεσμα τελικού σφάλματος μετά την ευθυγράμμιση με βάση τα κάθετα διανύσματα μεταξύ παράλληλων αλγόριθμων σε CPU (PCL) και GPGPU

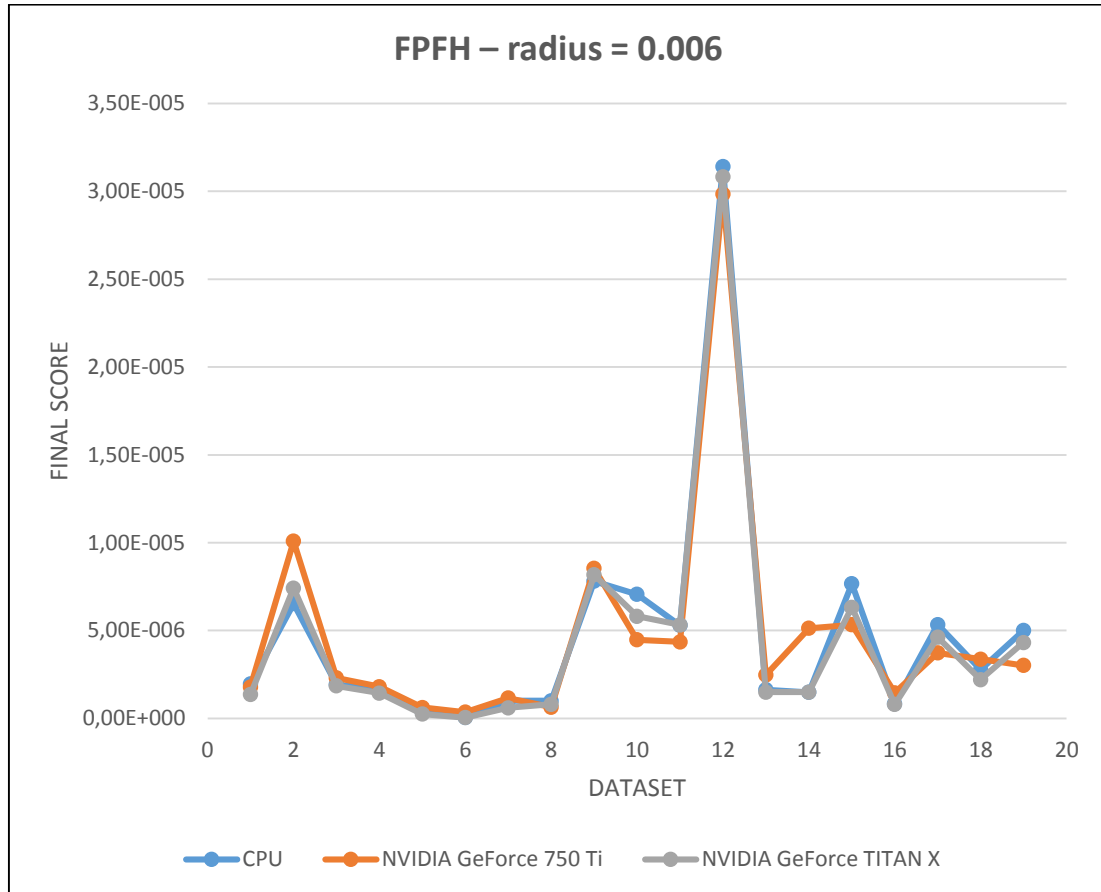


Σχήμα 56 : Συγκριτικά αποτέλεσμα ποσοστών βελτίωσης μετά την ευθυγράμμιση με βάση τα κάθετα διανύσματα μεταξύ παράλληλων αλγόριθμων σε CPU (PCL) και GPGPU

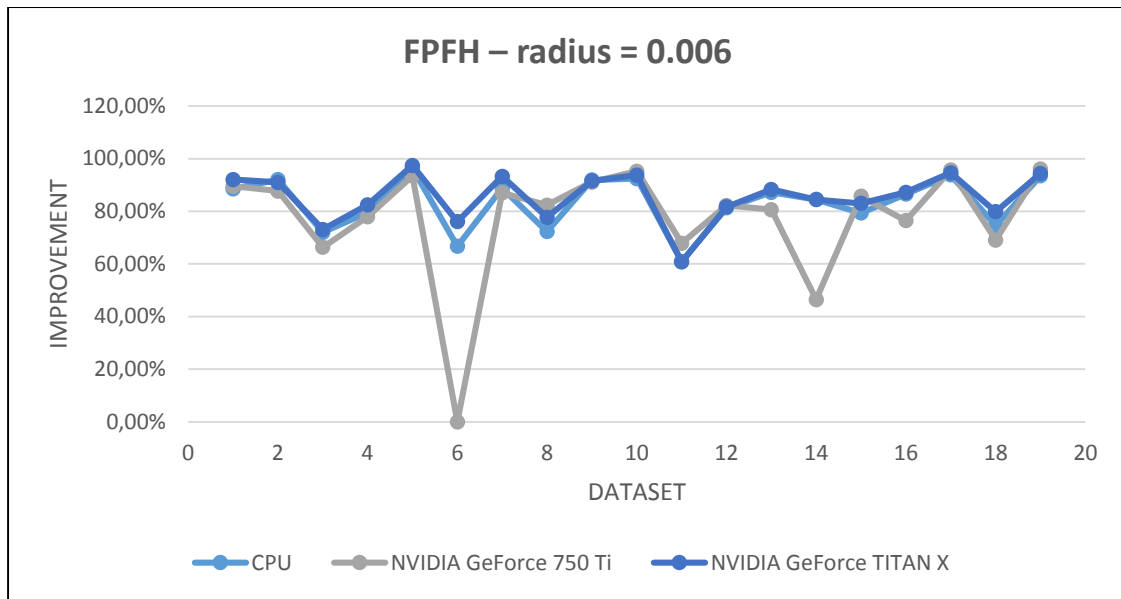


Σχήμα 57 : Συγκριτικά αποτέλεσμα χρόνων για την ευθυγράμμιση με βάση τα κάθετα διανύσματα μεταξύ παράλληλων αλγόριθμων σε CPU (PCL) και GPGPU

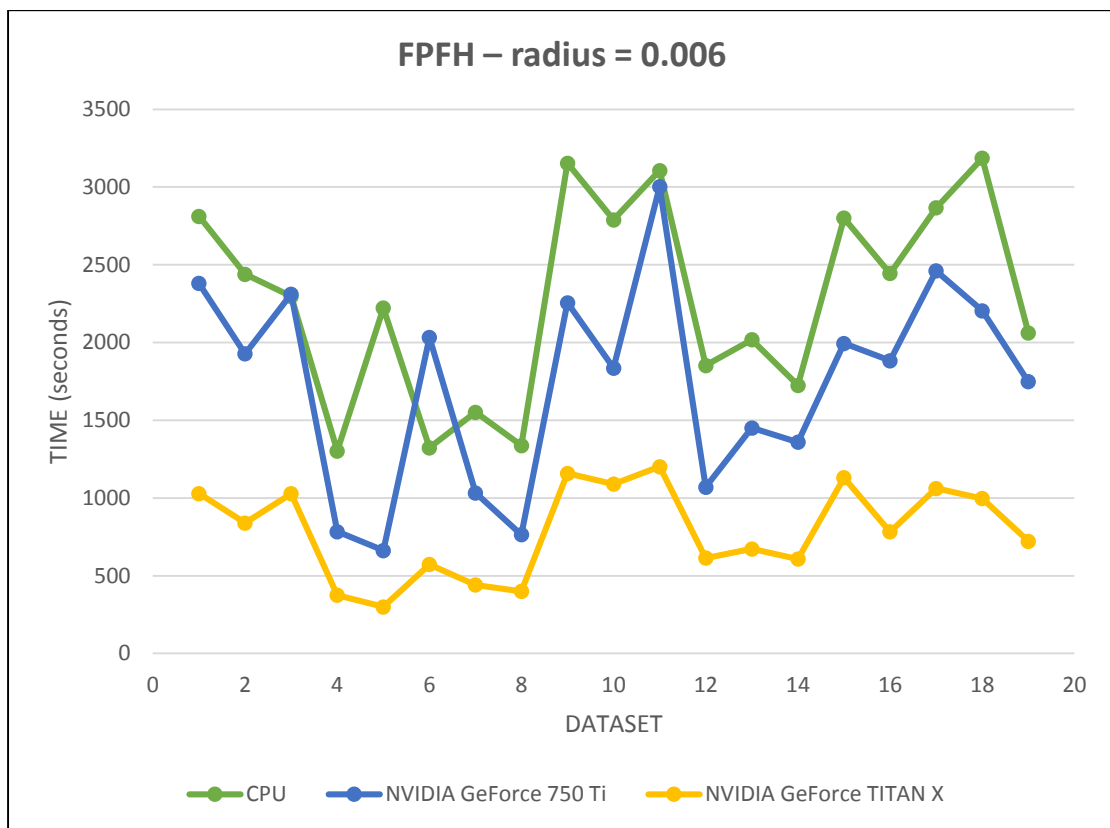
Όπως διακρίνεται από τα σχήματα, η υλοποίηση σε GPU έχει καλύτερη απόδοση σε χρόνο εκτέλεσης, ποσοστά βελτίωσης και τελικά σφάλματα. Επίσης η υλοποίηση στην πιο σύγχρονη γραφική μονάδα επεξεργασίας NVIDIA GeForce GTX TITAN X έχει και πάλι πλεονέκτημα έναντι της παλαιότερης γραφικής μονάδας επεξεργασίας NVIDIA GeForce GTX 750 Ti. Στα επόμενα τρία σχήματα διακρίνονται τα αποτελέσματα για την εκτέλεση ευθυγράμμισης με την χρήση περιγραφητών FPFH σε CPU και GPU (NVIDIA GeForce GTX 750 Ti και NVIDIA GeForce GTX TITAN X).



Σχήμα 58 : Συγκριτικά αποτέλεσμα τελικού σφάλματος μετά την ευθυγράμμιση με βάση τα FPFH μεταξύ παράλληλων αλγόριθμων σε CPU (PCL) και GPGPU



Σχήμα 59 : Συγκριτικά αποτέλεσμα ποσοστών βελτίωσης μετά την ευθυγράμμιση με βάση τα FPFH μεταξύ παράλληλων αλγόριθμων σε CPU (PCL) και GPGPU



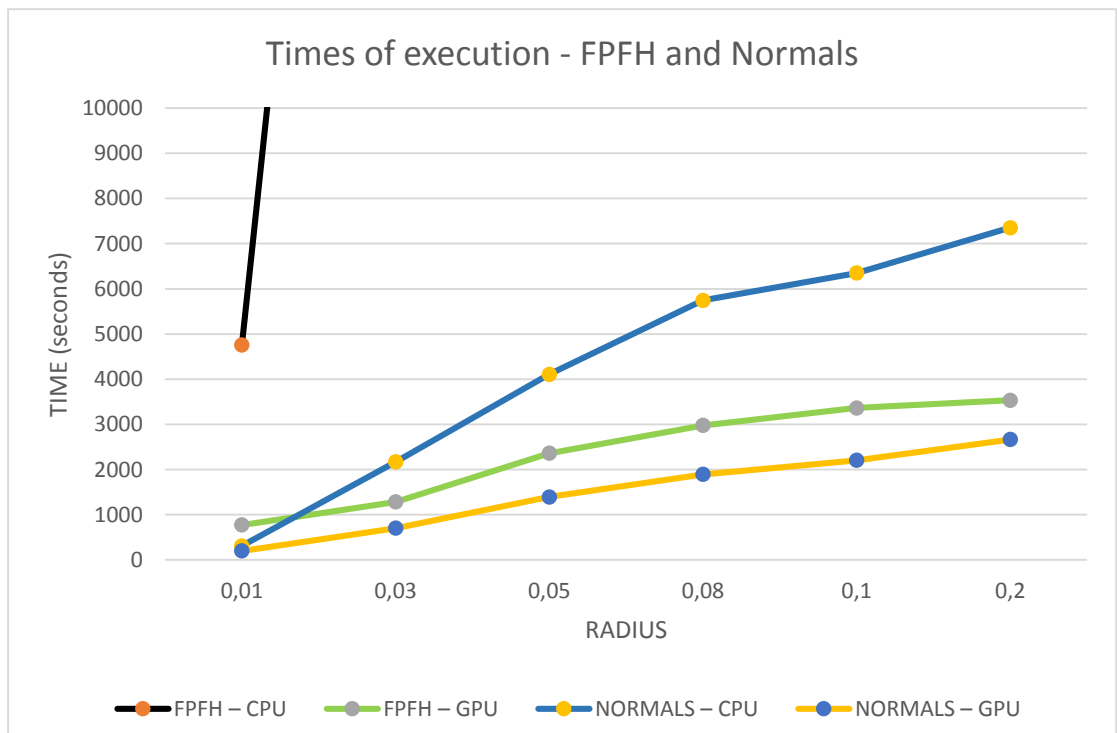
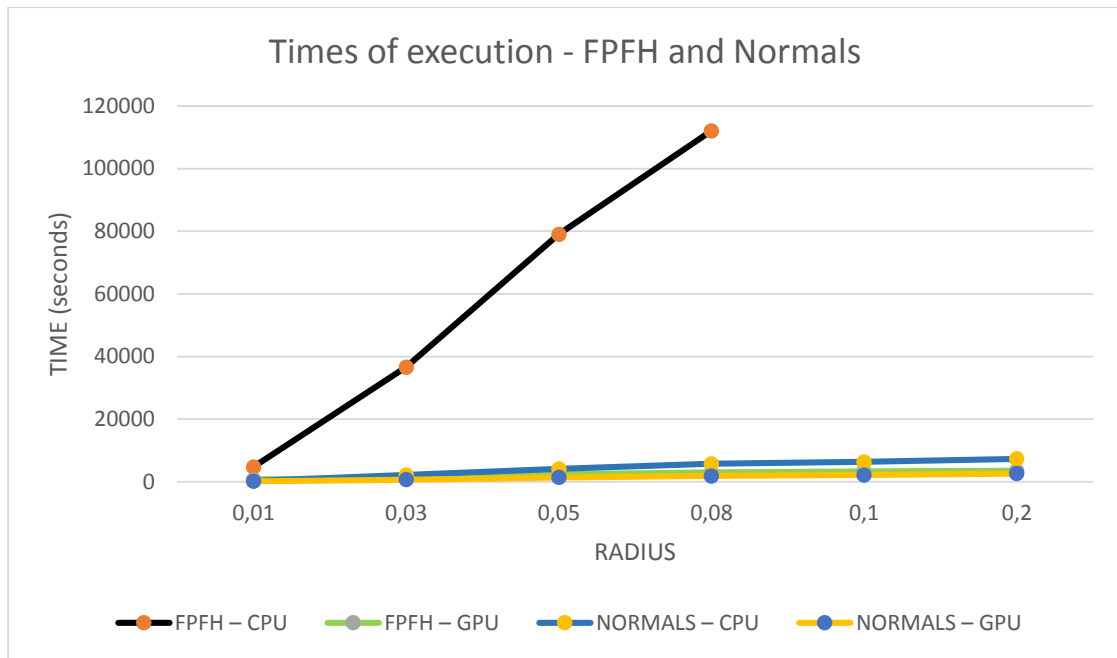
Σχήμα 60 : Συγκριτικά αποτέλεσμα χρόνων για την ευθυγράμμιση με βάση τα FPFH μεταξύ παράλληλων αλγόριθμων σε CPU (PCL) και GPGPU

Στην περίπτωση του FPFH φαίνεται ακόμα περισσότερο το πλεονέκτημα που αποκτάμε μέσω της υλοποίησης της ευθυγράμμισης με την χρήση του

προγραμματιστικού μοντέλου CUDA και των γραφικών μονάδων επεξεργασίας. Ιδίως στην περίπτωση εκτέλεσης του προγράμματος στην γραφική μονάδα επεξεργασίας NVIDIA GeForce GTX TITAN X, οι χρόνοι εκτέλεσης είναι πολύ μικρότεροι από τις άλλες δύο μονάδες και τα ποσοστά βελτίωσης είναι παρόμοια και στις πλείστες περιπτώσεις καλύτερα. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι με τον τρόπο που υλοποιήσαμε την ευθυγράμμιση, η υποδειγματοληψία δεν είναι αναγκαία και η χρήση όλων των πληροφοριών που παίρνουμε από τα δεδομένα εισόδου μας δίνει το πλεονέκτημα.

Στο τελευταίο σχήμα φαίνονται οι χρόνοι εκτέλεσης ευθυγράμμισης με τους δύο γεωμετρικούς περιγραφητές σε CPU και GPU (NVIDIA GeForce GTX 750 Ti), για διάφορες ακτίνες. Φαίνεται η απίστευτη διαφορά χρόνου εκτέλεσης που κάνει την επεξεργασία και μελλοντική ευθυγράμμιση δεδομένων σε GPU με ακόμη μεγαλύτερα μεγέθη απολύτως επιτρεπτή, αντιθέτως με την CPU που κρίνεται απαγορευτική. Συμπεραίνουμε δηλαδή ότι, με την επιλογή της οποιασδήποτε ακτίνας ως βέλτιστη σε μελλοντικές χρήσεις του προγράμματος μας, οι χρόνοι εκτέλεσης δεν θα είναι απαγορευτικοί.



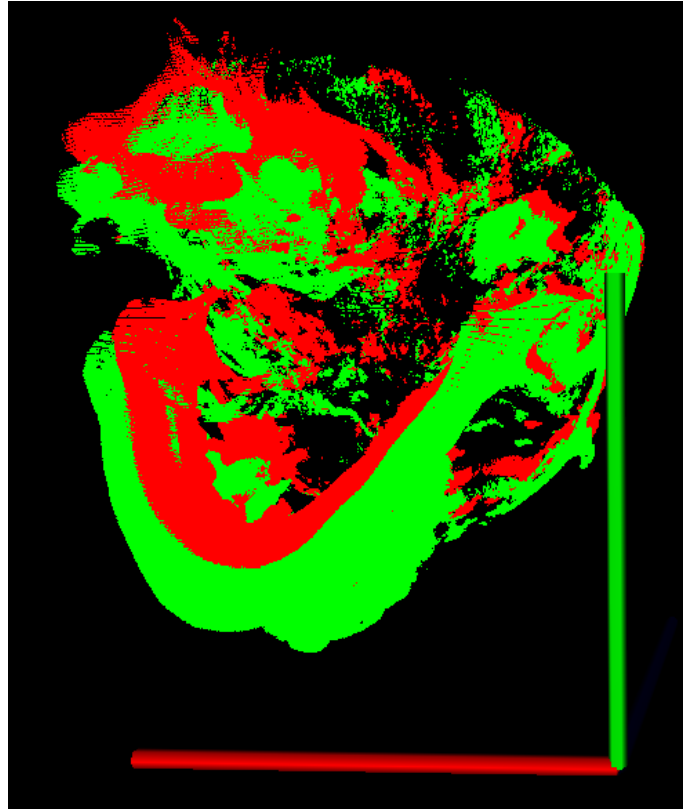


Σχήμα 61 : Συγκριτικά αποτέλεσμα χρόνων για την ευθυγράμμιση με βάση τους δύο περιγραφητές μεταξύ παράλληλων αλγόριθμων σε CPU (PCL) και GPGPU για διάφορες ακτίνες

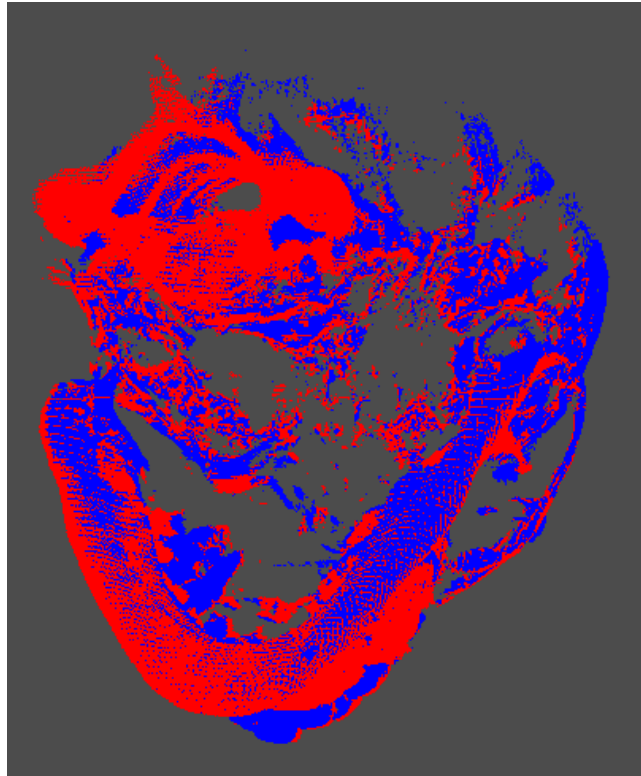
## 5.8 Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, στη παρούσα διπλωματική εργασία ο σκοπός ήταν να πραγματοποιηθεί επιτάχυνση των σημειακών μεθόδων ευθυγράμμισης δεδομένων με την χρήση καρτών γραφικών γενικού σκοπού. Δεν θέλαμε φυσικά να πραγματοποιήσουμε υποδειγματοληψία των αρχικών δεδομένων, αφού η επιτάχυνση

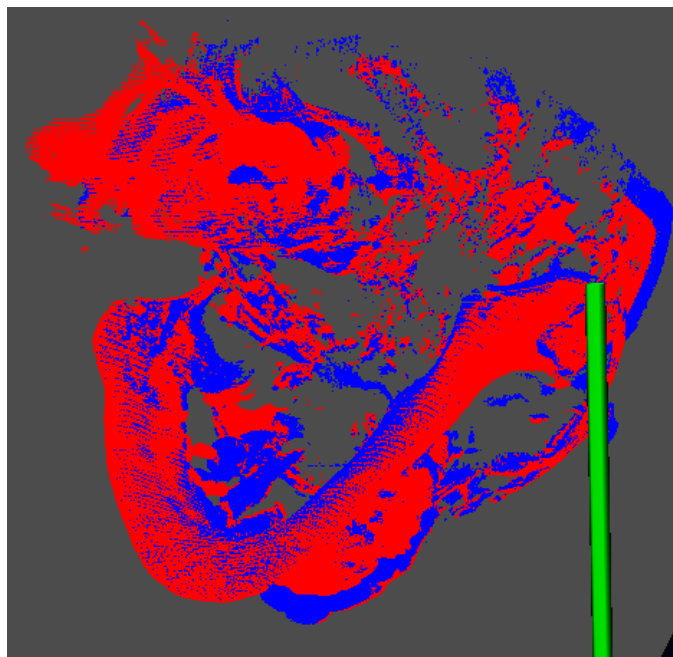
που επιθυμούσαμε και τελικά πέτυχαμε μας επέτρεψε να εκμεταλλευτούμε τον μειωμένο χρόνο εκτέλεσης. Στα τελευταία σχήματα φαίνονται τα οπτικά αποτελέσματα μιας ευθυγράμμισης με την χρήση FPFH και μιας ευθυγράμμισης με την χρήση κάθετων διανυσμάτων, εκτελεσμένων σε GPU.



*Σχήμα 62 : Τρισδιάστατα σημειακά νέφη του ασθενή #1, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) την εγχείρηση του*



*Σχήμα 63 : Τρισδιάστατα σημειακά νέφη του ασθενή #1, μετά την ευθυγράμμιση τους με την χρήση FPFH (79.43% βελτίωση)*



*Σχήμα 64 : Τρισδιάστατα σημειακά νέφη του ασθενή #1, μετά την ευθυγράμμιση τους με την χρήση κάθετων διανυσμάτων (77.04% βελτίωση)*

Μετά και την σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων στις γραφικές μονάδες επεξεργασίας και στις συμβατικές κεντρικές μονάδες επεξεργασίας, στην προηγούμενη ενότητα, διακρίνεται ξεκάθαρα ότι τα ποσοστά βελτίωσης του σφάλματος μετά τη διαδικασία

ευθυγράμμισης είναι πανομοιότυπα, με καθαρό προβάδισμα όμως των υλοποιήσεων στις GPU. Έτσι διασφαλίζονται υψηλά ποσοστά στη βελτίωση του σφάλματος χωρίς την πραγματοποίηση υποδειγματοληψίας και αισθητά μειωμένοι χρόνοι εκτέλεσης. Με τον τρόπο που υλοποιήσαμε την ευθυγράμμιση, η χρήση όλων των πληροφοριών που παίρνουμε από τα δεδομένα εισόδου μας δίνει το πλεονέκτημα έναντι της CPU. Ο απαιτούμενος χρόνος για ευθυγράμμιση σε παραδοσιακές μονάδες επεξεργασίας είναι αποτρεπτικός και καθόλου πρακτικός για τέτοια μεγέθη δεδομένων ιδίως χωρίς την χρήση υποδειγματοληψίας. Με την εκτέλεση σε πιο πρόσφατη γραφική μονάδα επεξεργασίας οι χρόνοι μειώνονται ακόμη περισσότερο και αυτό θα ισχύσει περαιτέρω με τυχόν εκτέλεση σε ακόμα πιο πρόσφατες μονάδες.

## 6 Σχόλια και μελλοντικές επεκτάσεις

Στα προηγούμενα κεφάλαια επιβεβαιώθηκε ότι ο στόχος μας είναι εφικτός και το πρόγραμμα μας επιστρέφει αξιοσημείωτα αποτελέσματα. Επαληθεύτηκε η υπολογιστική ικανότητα των γραφικών μονάδων επεξεργασίας για τον υπολογισμό των περιγραφητών κάθετων διανυσμάτων αλλά και των πολυπλοκότερων γεωμετρικών περιγραφητών FPFH. Ο χρόνος που χρειαζόταν για την εκτέλεση πράξεων σε τέτοια πλήθη σημειακών νεφών ήταν μεγάλος σε συμβατικές μονάδες επεξεργασίας, ιδίως στην περίπτωση του FPFH. Οι γραφικές μονάδες επεξεργασίας μείωσαν το χρόνο αυτό και πρόσφεραν την καλύτερη ακρίβεια ευθυγράμμισης που παράγει ο περιγραφητής FPFH. Μεγάλο ρόλο έπαιξε και η μεγάλη παραλληλοποίηση των πράξεων, με την ανάθεση πολλαπλών νημάτων επεξεργασίας, για τις πράξεις που ήταν απαραίτητες να εκτελεστούν για το κάθε σημείο.

Το πρόγραμμα μας έχει επίσης την δυνατότητα να εκτελείται σε κάθε γραφική μονάδα επεξεργασίας της NVIDIA, αφού έχει πολύ μικρές απαιτήσεις μνήμης και έτσι αποκτά την ιδιότητα της φορητότητας. Δουλεύει παντού καλά και δεν περιορίζεται σε συστήματα με συγκεκριμένες προδιαγραφές και ακόμη πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι δουλεύει και σε υποδεέστερες κάρτες γραφικών με πολύ καλά αποτελέσματα. Προφανώς οι καλύτερες κάρτες γραφικών προσφέρουν πιο γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα και αυτή είναι μια από τις εισηγήσεις μας για μελλοντικές βελτιώσεις, η χρήση δηλαδή των πιο εξελιγμένων γραφικών μονάδων επεξεργασίας για την εκτέλεση του προγράμματος. Οι πιο εξελιγμένες κάρτες γραφικών διαθέτουν μεγαλύτερο αριθμό πόρων, και θα μειώσουν τις επαναλήψεις παράλληλων υπολογισμών, μέσω της εκτέλεσης περισσότερων επαναλήψεων κάθε φορά. Αναλόγως εισαγόμαστε και την χρήση δύο ή περισσότερων γραφικών μονάδων επεξεργασίας γενικού σκοπού για ακόμη καλύτερα αποτελέσματα.

Επίσης λόγω των αποκλίσεων που εμφανίστηκαν εξαιτίας των πράξεων με αριθμούς κινητής υποδιαστολής, προτείνεται η χρήση αριθμών κινητής υποδιαστολής διπλής ακρίβειας για καλύτερα αποτελέσματα. Οι ατομικές πράξεις όμως με αριθμούς κινητής υποδιαστολής διπλής ακρίβειας υποστηρίζεται μόνο στις πιο πρόσφατες αρχιτεκτονικές γραφικών μονάδων επεξεργασίας της NVIDIA και είναι ακόμη πολύ ακριβές επιλογές αγοράς. Μια ακόμη επέκταση θα ήταν η αποθήκευση περισσότερων δεδομένων για να μην επαναλαμβάνονται οι πράξεις κάθε φορά που χρειαζόμαστε δεδομένα που δεν έχουμε, με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερο χρόνο εκτέλεσης αλλά μεγαλύτερη ανάγκη μνήμης. Αυτή η επέκταση θα θυσίαζε όμως την ιδιότητα φορητότητας του προγράμματος μας.

Μια τελευταία εισήγηση είναι να βρεθεί τρόπος να αξιοποιείται η ακρίβεια περιγραφής που προσφέρουν οι αριθμοί κινητής υποδιαστολής, χωρίς την άμεση χρήση τους και την απόκλιση που προκαλούν οι πράξεις τους. Δηλαδή, να χρησιμοποιούνται έμμεσα και να αλλάξει η δομή του τρόπου ευθυγράμμισης, όσον αφορά τα κάθετα διανύσματα περισσότερο.



## Βιβλιογραφία

- [1] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο :  
[http://www.nvidia.com/object/cuda\\_home\\_new.html](http://www.nvidia.com/object/cuda_home_new.html)  
[Πρόσβαση 10 Ιανουαρίου 2017]
- [2] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο : <http://www.tomshardware.com/reviews/nvidia-cuda-gpu,1954.html> [Πρόσβαση 10 Ιανουαρίου 2017]
- [3] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο : <http://www.anandtech.com/show/2116/8>  
[Πρόσβαση 10 Ιανουαρίου 2017]
- [4] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο : <http://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/#introduction> [Πρόσβαση 11 Ιανουαρίου 2017]
- [5] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο : <http://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/#programming-model> [Πρόσβαση 11 Ιανουαρίου 2017]
- [6] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο :  
<http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=1375527.1375572>  
[Πρόσβαση 10 Ιανουαρίου 2017]
- [7] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο :  
<https://devtalk.nvidia.com/default/topic/508479/cuda-programming-and-performance/nvcc-forces-c-compilation-of-cu-files/#entry1340190>  
[Πρόσβαση 11 Ιανουαρίου 2017]
- [8] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο : <https://stackoverflow.com/questions/15362678/c-keywords-on-cuda-c-code/15362798> [Πρόσβαση 14 Ιανουαρίου 2017]
- [9] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο : <https://developer.nvidia.com/cuda-gpus>  
[Πρόσβαση 13 Ιανουαρίου 2017]
- [10] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο :  
<https://developer.nvidia.com/sites/default/files/akamai/cuda/files/NVIDIA-CUDA-Floating-Point.pdf>  
[Πρόσβαση 15 Ιανουαρίου 2017]
- [11] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο : <http://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/#features-and-technical-specifications>  
[Πρόσβαση 10 Ιανουαρίου 2017]
- [12] B. Zitova και J. Flusser, «Image registration methods: a survey,» ELSEVIER Image and Vision Computing, τόμ. 21, pp. 977-1000, 2003
- [13] J. Maintz και M. Viergever, «A survey of medical image registration,» Elsevier Medical Image Analysis, τόμ. 2, αρ. 1, pp. 1-36, 1998
- [14] M. V. Wyawahare, D. P. M. Patil και H. K. Abhyankar, «Image Registration Techniques: an overview,» International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, τόμ. 2, αρ. 3, 2009
- [15] C. Maurer και J. Fitzpatrick, «A review of medical image registration,» Interactive Image-Guided Neurosurgery, American Association of Neurological Surgeons, pp. 17-44, 1993
- [16] P. Van den Elsen, E. Pol και M. Viergever, «Medical image matching - a review with classification,» IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, τόμ. 12, αρ. 1, pp. 26-39
- [17] P. Thevenaz, U. Ruttimann και M. Unser, «A pyramid approach to subpixel registration based on intensity,» IEEE Trans Image Process, τόμ. 7, αρ. 1, pp. 27-41, 1998.
- [18] C.-T. Hsu και R. Beuker, «Multiresolution feature-based image registration,» Procs SPIE: Visual Communications and Image Processing, τόμ. 4067, pp.

- 1490-1498, 2000.
- [19] Α. Ν. Ουζούνογλου, «Αυτόματη Ταύτιση Βιομετρικών Χαρακτηριστικών : Εφαρμογή στα Δακτυλικά Αποτυπώματα » 2011
  - [20] V. Mandava, J. Fitzpatrick, C. Maurer, R. Maciunas και G. Allen, «Registration of multimodal volume head images via attached markers,» *Proc SPIE: Medical Imaging VI: Image Processing*, τόμ. 1652, pp. 271-282, 1992.
  - [21] J. West, M. Wang, B. Dawant και J. Fitzpatrick , «Comparison and evaluation of retrospective intermodality brain image registration techniques,» *Computational Assisted Tomography*, τόμ. 21, αρ. 4, pp. 554-566, 1997.
  - [22] K. Gall και L. Verhey, «Computer-assisted positioning of radiotherapy patients using implanted radioopaque fiducials,» *Medical physics*, τόμ. 20, αρ. 4, pp. 1152-1159, 1993.
  - [23] L. Lunsford, *Modern stereostatic neurosurgery*, Boston: Martinus Nijhoff, 1988.
  - [24] Evans, S. Marrett, J. Torrescorzo, S. Ku και L. Collins, «MRI-PET correlation in three dimensions using a volume of interest (VOI) atlas,» *Journal of cerebral blood flow and metabolism*, τόμ. 11, pp. A69-A78, 1991.
  - [25] L. Laitinen, B. Liliequist, M. Fagerlund και A. Eriksson, «An adapter for computer tomography guided stereotaxis,» *Surgical neurology*, τόμ. 23, pp. 559-566, 1985.
  - [26] Evans, S. Marrett, L. Collins και T. Peters, «Anatomical-functional correlative analysis of the human brain using three dimensional imaging systems,» *Medical imaging: image processing*, τόμ. 1092, pp. 264-274, 1989.
  - [27] R. Wahl, L. Quint, R. Cieslak, A. Aisen, R. Koeppe και C. Meyer, «Anamatabolic tumor maging: fusion of FDG PET with CT or MRI to localize foci of increased activity,» *Journal of nuclear medicine*, τόμ. 34, pp. 1190-1197, 1993.
  - [28] C. Chen, C. Pelizzari, G. Chen, M. Cooper και D. Levin, «Image analysis of PET data with the aid of CT and MR images,» *Information processing in medical imaging*, pp. 601-611, 1987.
  - [29] R. Bajcsy, R. Lieberon και M. Reivich, «A computerized system for the elastic matching of deformed radiographic images to idealized atlas images,» *Journal of computer assisted tomography*, τόμ. 7, αρ. 4, pp. 618-625, 1983.
  - [30] G. Borgefors, «Hierarchical chamfer matching: a parametric edge matching algorithm,» *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, τόμ. 10, pp. 849-865, 1988.
  - [31] P. Banerjee και A. Toga, «Image alignment by integrated rotational and translational matrix,» *Physics in medicine and biology*, τόμ. 39, pp. 1969-1988, 1994.
  - [32] G. Ettinger, W. Grimson και T. Lozano-Perez, «Automatic 3D image registration for medical change detection applications,» *Applications of computer vision in medical image processing*, pp. 182-185, 1994.
  - [33] W. Press, B. Flannery, S. Teukolsky και W. Vetterling, «Numerical recipes in C,» Cambridge University Press, 1992.
  - [34] S. Kirkpatrick, C. Gelatt και M. Vecchi, «Optimization by simulated annealing,» *Science*, τόμ. 220, αρ. 4598, pp. 671-680, 1983.
  - [35] S. Jacoby, J. Kowalik και J. Pizzo, «Iterative methods for nonlinear optimization problems.,» Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1972.
  - [36] M. F. Vandermeulen και D. Suetens, «Comparative evaluation of multiresolution optimization strategies for multimodality image registration by



- maximization of mutual information,» *Med Image Anal*, τόμ. 3, αρ. 4, pp. 373-386, 1999.
- [37] T. Radcliffe, R. Rajapekshe και S. Shaler, «Pseudocorrelation: A fast, robust, absolute, gray level image alignment algorithms,» *Med Phys*, pp. 761-769, 1994.
- [38] R. B. Rusu, «Sematic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments,» Munchen, 2009.
- [39] R. B. Rusu, Z. C. Marton, N. Blodow και M. Beetz, «Persistent Point Feature Histograms for 3D Point Clouds».
- [40] [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο : <http://pointclouds.org> [Πρόσβαση 25 Ιανουαρίου 2017]