ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

Διερεύνηση αλγορίθμων για την ανίχνευση παραμορφώσεων από νέφη σημείων επίγειου σαρωτή laser

Διπλωματική Εργασία

Αναγνωστόπουλος Βασίλης - Θάνος

Επιβλέπων

Τσακίρη Μαρία, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2013

© Αθήνα, 2013 Αναγνωστόπουλος Βασίλης - Θάνος

Το κείμενο αυτό έχει γραφτεί σε XƎLaTeX.
Αυτό το κείμενο διανέμεται σύμφωνα με τους όρους της άδειας Creative Commons Attribution - ShareAlike Unported 3.0.
Εν συντομία: Είστε ελεύθεροι να διανέμετε και να τροποποιήσετε αυτό το κείμενο εφόσον αναφέρετε τον δημιουργό του και διατηρήσετε την ίδια άδεια χρήσης.
Το παρόν έγγραφο διανέμεται με την ελπίδα ότι θα είναι χρήσιμο, αλλά χωρίς καμία εγγύηση, χωρίς ακόμη και την έμμεση εγγύηση εμπορευσιμότητας ή καταλληλότητας για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό.
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Εξώφυλλο: Εικόνα από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής

Αυτή η σελίδα έχει αφεθεί κενή σκόπιμα

Ευχαριστίες

Στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, η οποία συντάχθηκε στο πλαίσιο των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, είχα τη βοήθεια και τη συμπαράσταση ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθένα ξεχωριστά.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κύρια Μαρία Τσακίρη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές της που συνέβαλαν στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους συμφοιτητές μου Κωνσταντίνο Καραϊσκο, τον Κωνσταντίνο Μπαλάση και την Ιουλία Μάρκου οι οποίοι με βοήθησαν στην διαδικασία των μετρήσεων. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δήμητρα Γάλλου για την πολύτιμη βοήθεια της σε μερικές μεταφράσεις από την αγγλική βιβλιογραφία.

Περίληψη

Η διαχρονική παρακολούθηση και ο έλεγχος της κινηματικής συμπεριφοράς των παραμορφώσεων αποτελεί ένα από τα πεδία εφαρμογής της γεωδαισίας και απαιτεί μια τεχνική μέτρησης δεδομένων η οποία θα περιλαμβάνει πολλές επιθυμητές ιδιότητες, όπως η αξιοπιστία, η ακρίβεια, το χαμηλό κόστος και η ευκολία στην χρήση. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι οι οποίες ενσωματώνουν μερικές από αυτές τις ιδιότητες. Οι παραδοσιακές γεωδαιτικές τεχνικές μετρούν τις τρισδιάστατες συντεταγμένες ενός προφανούς σημείου αναφοράς ή σύγκρισης, κάτι που τις καθιστά αντιοικονομικές μιας και για μεγάλα ή σύνθετα αντικείμενα θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα πυκνό δίκτυο από σημεία. Οι επίγειοι σαρωτές είναι σύγχρονα γεωδαιτικά όργανα τα οποία έχουν πολλά συγκριτικά πλεονεκτήματα όπως οι τρισδιάστατες μετρήσεις, η απομακρυσμένη και χωρίς επαφή συλλογή δεδομένων καθώς και δυνατότητα συλλογής πυκνής πληροφορίας (νέφη σημείων). Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία για την ανίχνευση παραμορφώσεων που περιγράφτηκε για τις κλασσικές μεθόδους δεν μπορεί να εφαρμοστεί πιστά στα δεδομένα σάρωσης από τους επίγειους σαρωτές μιας και τα μεμονωμένα σημεία των επαναλαμβανόμενων σαρώσεων δεν αναφέρονται ακριβώς στην ίδια θέση.

Οι συγκρίσεις των δεδομένων σάρωσης μπορούν να ταξινομηθούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία γίνεται σύγκριση απ' ευθείας των σαρώσεων. Στην δεύτερη κατηγορία γίνεται σύγκριση του νέφους σημείων με μία επιφάνεια και στην τρίτη κατηγορία τα νέφη σημείων που λαμβάνονται από τον σαρωτή μοντελοποιούνται και συγκρίνονται οι επιφάνειες που προκύπτουν από τις σαρώσεις. Η παρούσα διπλωματική ασχολείται με την πρώτη κατηγορία όπου τα παραγόμενα νέφη συγκρίνονται απ' ευθείας.

Συγκεκριμένα ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση των αλγορίθμων *α'*) του εγγύτερου γείτονα, *β'*) της εγγύτερης επιφάνειας, *γ'*) του εγγύτερου κάθετου διανύσματος, και *δ'*) του αλγόριθμου σύγκρισης με βάση τον ICP. Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκαν τόσο προσομοιωμένα όσο και πραγματικά δεδομένα και φάνηκε ότι είναι δυνατή η ανίχνευση παραμορφώσεων της τάξης των 9 mm. Όλοι οι αλγόριθμοι ήταν σε θέση να εντοπίσουν τις παραμορφώσεις αλλά αυτός που είχε το μικρότερο σφάλμα και ήταν ο πιο ακριβής ήταν ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας. Αντιθέτως ο αλγόριθμος του ICP ήταν ο πιο αποτελεσματικός στην εξάλειψη του θορύβου.

Abstract

The continuous monitoring of deformation behaviour is one of the fields of geodesy and requires a measurement technique that includes many desirable properties, such as reliability, accuracy, low cost and ease of use. There are many methods which incorporate some of these properties. The traditional surveying techniques measure the three-dimensional coordinates of a reference point, making them uneconomic for a large or complex objects. Terrestrial laser scanners (TLS) are modern geodetic instruments that have many advantages such as tree-dimensional measurements, remote and non-contact data collection capabilities and dense collection of information (point clouds). In general, the procedure for detecting deformations described for the conventional methods can not be applied to the data collected from a terrestrial scanner because the individual points of the repeated scans are not mentioned exactly to the same position.

The comparison of the data from TLS can be classified into 3 major categories. The first category is a direct comparison of scans. The second category is a comparison between the point cloud and a surface and in the third category the points clouds obtained by the scanner are modelled and the resulting surfaces are compared. This thesis deals with the first category.

Specifically, the aim of this thesis is to explore the algorithms of (i) the nearest neighbour, (ii) the nearest surface, (iii) the nearest vertical vector, and (iv) an algorithm based on ICP. For the evaluation of the algorithms both simulated and real data was used and it has been shown that it is possible to detect deformation of 9 mm. All algorithms were able to detect the deformations but the algorithm of the nearest surface had the smallest error and it was the most accurate algorithm. However the algorithm of the ICP was the most effective in eliminating the noise.

Περιεχόμενα

Περίληψη **v**

Abstract **vii**

Περιεχόμενα **ix**

Κατάλογος εικόνων **xiii**

Κατάλογος σχημάτων **xiv**

Κατάλογος πινάκων **xxiv**

1 Εισαγωγή **1**
1.1 Σκοπός και στόχοι της εργασίας 2
1.2 Δομή της εργασίας 3

I Θεωρητικό υπόβαθρο **5**

2 Επίγειοι σαρωτές λέιζερ **7**
2.1 Εισαγωγή 7
2.2 Τρόπος λειτουργίας επίγειων σαρωτών 7
2.2.1 Σάρωση με την μέθοδο της μέτρησης διαφοράς χρόνου (Time of flight- TOF) 9
2.2.2 Σάρωση με την μέθοδο της διαφοράς φάσης (Phase shift) 10
2.2.3 Ακρίβεια 12
2.3 Πλεονεκτήματα των σαρωτών 13
2.4 Ο σαρωτής ScanStation 2 15
2.5 Νέφη σημείων 17
2.5.1 Δενδροειδές δομές δεδομένων 19
2.5.2 Οκταδική δενδροειδείς δομή 19
2.5.3 Δενδροειδή δομή δεδομένων k-d 21
2.5.4 Συνένωση των νεφών σημείων 25
2.5.5 Συνένωση νεφών σημείων με αντιστοιχία σημείων 26

2.5.6 Επαναληπτικός αλγόριθμος του πλησιέστερου σημείου 27
2.5.7 Παραλλαγές του ICP 30
2.5.8 Συνένωση με χρήση γεωμετρικών χαρακτηριστικών 32
2.6 Χρήση επίγειων σαρωτών στην παρακολούθηση παραμορφώσεων . . 32
2.6.1 Γενικά 32
2.6.2 Ανίχνευση παραμορφώσεων σε τεχνικά έργα 35
2.6.3 Ανίχνευση αλλαγών με την χρήση octree 38
2.6.4 Ανάλυση κατολισθήσεων 39

3 Ανίχνευση παραμορφώσεων από νέφη σημείων 43
3.1 Εισαγωγή 43
3.2 Συνένωση νεφών σε κοινό σύστημα αναφοράς 43
3.3 Αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα 44
3.4 Αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας 46
3.5 Αλγόριθμός του εγγύτερου κάθετου διανύσματος 48
3.6 Σύγκριση επιφανειών 51
3.7 Αλγόριθμός σύγκρισης με βάση τον ICP 54
3.8 Λογισμικό 56
3.8.1 CloudCompare 56
3.8.2 Point Cloud Library 57
3.8.3 Cyclone 59
3.9 Ανάπτυξη κώδικα 61
3.9.1 Αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα 61
3.9.2 Αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας 62
3.9.3 Αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος 63
3.9.4 Αλγόριθμος σύγκρισης με βάση τον ICP 63

II Μετρήσεις και αποτελέσματα 65

4 Μετρήσεις και αποτελέσματα 67
4.1 Εισαγωγή 67
4.2 Προσομοιωμένα δεδομένα 67
4.3 Δορυφορική κεραία (Luxor) 70
4.3.1 Σάρωση κεραίας 71
4.3.2 Επεξεργασία των νεφών σημείων 75
4.3.3 Μέγεθος παραμορφώσεων 78
4.3.4 1ο πείραμα 81
4.3.5 2ο πείραμα 88
4.3.6 3ο πείραμα 91
4.3.7 4ο πείραμα 95

5 Συμπεράσματα και προτάσεις **99**
5.1 Εισαγωγή 99
5.2 Συμπεράσματα 99
5.3 Συλλογή δεδομένων 99
5.3.1 Διαδικασία επεξεργασίας 100
5.3.2 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων 100
5.4 Προτάσεις 102
5.4.1 Προτάσεις που αφορούν την μελλοντική διερεύνηση του προβλήματος 102

Βιβλιογραφία **104**

III Παραρτήματα **113**

Α' Αναλυτικά αποτελέσματα **115**
Α'.1 Προσομοιωμένα δεδομένα 115
Α'.2 1ο πείραμα 122
Α'.3 2ο πείραμα 135
Α'.4 3ο πείραμα 148
Α'.5 4ο πείραμα 162

Β' Κώδικας σε C++ **177**

Κατάλογος Εικόνων

2.1 Νέφος σημείων από επίγειο σαρωτή 8
2.2 Επίγειοι σαρωτές που χρησιμοποιούν την μέθοδο TOF 10
2.3 Επίγειοι σαρωτές που χρησιμοποιούν την μέθοδο της διαφοράς φάσης 12
2.4 Στόχοι σήμανσης 27
2.5 Στόχοι σήμανσης από το όργανο Scanstation 2 της Leica 27
3.1 Στιγμιότυπο από το CloudCompare 58
4.1 Η δορυφορική κεραία 70
4.2 Η δορυφορική κεραία με την πλαστελίνη προσκολλημένη 71
4.3 Στόχος για την σύνδεση των σαρώσεων κατά την διαδικασία της σάρωσης. 72
4.4 Ο σαρωτής εν λειτουργία 74
4.5 Το παχύμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την διαστατολόγηση των πλαστελινών 79
4.6 Η λευκή πλαστελίνη 79
4.7 Η μπλέ πλαστελίνη 80
4.8 Η κίτρινη πλαστελίνη 80

Κατάλογος σχημάτων

2.1 Μετρήσεις με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία 9
2.2 Αρχή λειτουργίας επίγειων σαρωτών 11
2.3 Αρχή λειτουργίας επίγειων σαρωτών (2) 11
2.4 Σύγκριση των TLS με την ταχυμετρία, GNSS και φωτογραμμετρία. . . 14
2.5 Leica ScanStation 2 15
2.6 Πεδίο ορατότητας του Leica ScanStation 2 17
2.7 Νέφη σημείων από διάφορους σαρωτές 18
2.8 Δενδροειδής δομή δεδομένων 19
2.9 Ορθογώνιος πίνακας με 1000 σημεία 20
2.10 Αριστερά: Υποδιαίρεση ενός κύβου σε octants. Δεξιά: Το αντίστοιχο octree 21
2.11 Υποδιαίρεση ενός κύβου σε octants με το αντίστοιχο octree 22
2.12 Τρισδιάστατο μοντέλο με το αντίστοιχο octree 22
2.13 Ορθογώνια παραλληλόγραμμο με 1000 αντικείμενα. 23
2.14 Τρισδιάστατο μοντέλο με το αντίστοιχο k-d tree 24
2.15 Η γεωμετρία των συντεταγμένων των επίγειων σαρωτών 25
2.16 Συνένωση των νεφών σημείων 26
2.17 Σφάλμα στην αντιστοιχίση των σημείων μεταξύ των δύο σαρώσεων 29
2.18 Τα βήματα του ICP 29
2.19 Ο αλγόριθμος του Chen και του Medioni για τον υπολογισμό των παραμέτρων στροφής και μετάθεσης μεταξύ δύο νεφών σημείων 31
2.20 Ο υπολογισμός των αποστάσεων του ICP με a) σημείο προς σημείο b) σημείο προς επίπεδο 31
2.21 Ανεπεξέργαστα νέφη σημείων με ακανόνιστη και μη - ομοιόμορφη δειγματοληψία (αριστερά) και ομοιόμορφος κάνναβος (δεξιά) για διαφορετικές περιόδους μετρήσεων 36
2.22 Παραμορφώσεις που προκύπτουν από τον κάνναβο 36
2.23 Χωρισμός σε τμήματα ενός φράγματος 37
2.24 Ανάλυση παραμορφώσεων στο φράγμα 37
2.25 Παραμορφώσεις που προκύπτουν από προσαρμογή κυλίνδρου. . . . 38
2.26 Ανάλυση κατολισθήσεων από ψηφιακά μοντέλα εδάφους 40

2.27 Παραμορφώσεις σε πλαγιά βουνού όπως προέκυψαν από τοπική χρήση του αλγόριθμου ICP . . . 40
2.28 Σύγκριση νεφών σημείων με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα . . . 41

3.1 Διάγραμμα ροής για την ανίχνευση παραμορφώσεων. . . . 45
3.2 Διάγραμμα ροής για την ανίχνευση παραμορφώσεων. . . . 45
3.3 Η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του εγγύτερου γείτονα σε δύο νέφη σημείων . . . 45
3.4 Διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα . . . 46
3.5 Η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ της εγγύτερης επιφάνειας σε δύο νέφη σημείων . . . 47
3.6 Διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας . . . 47
3.7 Το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια . . . 49
3.8 Επιλογή k πλησιέστερων γειτόνων σε a) υψηλής πυκνότητας νέφος σημείου b) χαμηλής πυκνότητας νέφος σημείου . . . 50
3.9 Παράδειγμα αναζήτησης εγγύτερων σημείων με βάση την απόσταση 50
3.10 Παράδειγμα υπολογισμού των καθέτων διανυσμάτων χρησιμοποιώντας α) σωστό αριθμό εγγύτερων σημείων (αριστερά), β) λάθος αριθμό εγγυτέρων σημείων (δεξία) . . . 51
3.11 Η απόσταση από το κάθετο διάνυσμα . . . 52
3.12 Διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο του καθέτου διανύσματος . . . 52
3.13 Διάγραμμα ροής για την σύγκριση επιφανειών από νέφη σημείων . . 54
3.14 Η μετάθεση και η στροφή του αλγορίθμου ICP . . . 55
3.15 Διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο σύγκρισης με βάση τον ICP . . . 56
3.16 Το λογότυπο του CloudCompare . . . 57
3.17 Το λογότυπο της PCL . . . 58
3.18 Η υπο-ρουτίνα σύγκρισης των νεφών στο CloudCompare . . . 61
3.19 Η υπο-ρουτίνα σύγκρισης της εγγύτερης επιφάνειας στο CloudCompare . . . 63

4.1 Τα προσομοιωμένα δεδομένα . . . 68
4.2 Οι συνολικές παραμορφώσεις από τους 4 πρώτους αλγορίθμους . . . 68
4.2 Οι συνολικές παραμορφώσεις από τους αλγόριθμους . . . 69
4.3 Σαρώσεις της κεραίας . . . 72
4.4 Συνδεσμολογία σαρωτή . . . 73
4.5 Ορισμός αρχείου μέσα από το πρόγραμμα Cyclone . . . 74
4.6 Η γεωαναφορά των νεφών από το Cyclone . . . 75
4.7 Σαρωμένοι στόχοι . . . 76
4.8 Συνενωμένο νέφος . . . 76
4.9 Συνένωση νεφών . . . 77

4.10 Η σαρωμένη κεραία μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare 78
4.11 Ψευδείς παραμορφώσεις 81
4.12 Τα συγκρινόμενα νέφη στο 1ο πείραμα. Με άσπρο το νέφος αναφοράς και κόκκινο το συγκρινόμενο νέφος 82
4.13 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL 83
4.14 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από την PCL 83
4.15 Η λεπτή παραμόρφωση στην μπλέ πλαστελίνη 84
4.16 Σύγκριση πυκνοτήτων χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα του προγράμματος CloudCompare 84
4.17 Οι αλγόριθμοι που δεν εντόπισαν σωστά τις παραμορφώσεις στο 1ο πειράμα 85
4.18 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 300) 86
4.19 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.05 87
4.20 Διαγράμματα για τον αλγόριθμο του ICP από το 1ο πείραμα 88
4.21 Τα συγκρινόμενα νέφη στο 2ο πείραμα. Με άσπρο το νέφος αναφοράς και κόκκινο το συγκρινόμενο νέφος 88
4.22 Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα μεταξύ 1ου και 2ου πειράματος 89
4.23 Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10) μεταξύ 1ου και 2ου πειράματος 89
4.24 Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του ICP (με voxel ίσο με 0.02) μεταξύ 1ου και 2ου πειράματος 90
4.25 Όταν συγκρίνεται το παραμορφωμένο με το μη παραμορφωμένο νέφος ο εγγύτερος γείτονας φαίνεται με το γκρι βελάκι. Αντιθέτως όταν συγκρίνεται το μη παραμορφωμένο με το παραμορφωμένο νέφος, τότε ο εγγύτερος γείτονας φαίνονται με τα μαύρα βελάκια 90
4.26 Λάθος στην συνένωση 92
4.27 Τα συγκρινόμενα νέφη στο 3ο πείραμα. Με άσπρο το νέφος αναφοράς και κόκκινο το συγκρινόμενο νέφος 92
4.28 Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα μεταξύ 1ου και 3ου πειράματος 93
4.29 Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10) μεταξύ 1ου και 3ου πειράματος 93
4.30 Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του ICP (με voxel ίσο με 0.02) μεταξύ 1ου και 3ου πειράματος 94
4.31 Διόρθωση της συνένωσης 94

4.32 Σύγκριση των ιστογραμμάτων του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα μεταξύ 1ου και 3ου πειράματος 95
4.33 Τα συγκρινόμενα νέφη στο 4ο πείραμα. Με άσπρο το νέφος αναφοράς και κόκκινο το συγκρινόμενο νέφος 96
4.34 Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα μεταξύ 1ου και 4ου πειράματος 96
4.35 Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function) μεταξύ 1ου και 4ου πειράματος 97
4.36 Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10) μεταξύ 1ου και 4ου πειράματος 97
4.37 Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του ICP (με voxel ίσο με 0.02) μεταξύ 1ου και 4ου πειράματος 97
4.38 Σύγκριση των ιστογραμμάτων του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα μεταξύ 1ου και 4ου πειράματος 98

Α'.1 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας από το CloudCompare 115
Α'.2 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL 116
Α'.3 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου) . . . 117
Α'.4 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation) 118
Α'.5 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function) . 119
Α'.6 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος 120
Α'.7 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.05 121
Α'.8 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompre 122
Α'.9 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompare 122
Α'.10 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL 123
Α'.11 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από την PCL 123
Α'.12 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου) . . . 124
Α'.13 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου) 124
Α'.14 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation) 125
Α'.15 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation) . . 125
Α'.16 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function) . 126
Α'.17 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function) 126

Α'.18 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 127
Α'.19 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 10) 127
Α'.20 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 300 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 128
Α'.21 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 300) 128
Α'.22 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 129
Α'.23 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10) . . . 129
Α'.24 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 50 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 130
Α'.25 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 50) . . . 130
Α'.26 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.1 131
Α'.27 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.1 131
Α'.28 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.05 132
Α'.29 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.05 132
Α'.30 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.02 133
Α'.31 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.02 133
Α'.32 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.01 134
Α'.33 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.01 134
Α'.34 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompre 135
Α'.35 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompare 135
Α'.36 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL 136
Α'.37 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από την PCL 136
Α'.38 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου) . . . 137

Α'.39 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου) 137
Α'.40 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation138
Α'.41 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation) . . 138
Α'.42 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function) . 139
Α'.43 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function) 139
Α'.44 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 140
Α'.45 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 10) 140
Α'.46 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 300 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 141
Α'.47 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 300) 141
Α'.48 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 142
Α'.49 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10) . . . 142
Α'.50 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 50 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 143
Α'.51 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 50) . . . 143
Α'.52 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.1 144
Α'.53 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.1 144
Α'.54 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.05 145
Α'.55 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.05 145
Α'.56 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.02 146
Α'.57 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.02 146
Α'.58 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.01 147
Α'.59 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.01 147

Α'.60 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompre 148
Α'.61 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompare 148
Α'.62 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL 149
Α'.63 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από την PCL 149
Α'.64 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου) . . . 150
Α'.65 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου) 150
Α'.66 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation) 151
Α'.67 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation) . . 151
Α'.68 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function) . 152
Α'.69 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function) 152
Α'.70 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 153
Α'.71 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 10) 153
Α'.72 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 300 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 154
Α'.73 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 300) 154
Α'.74 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 155
Α'.75 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10) . . . 155
Α'.76 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 50 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 156
Α'.77 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 50) . . . 156
Α'.78 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.1 157
Α'.79 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.1 157
Α'.80 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.05 158

Α'.81 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.05 158
Α'.82 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.02 159
Α'.83 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.02 159
Α'.84 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.01 160
Α'.85 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.01 160
Α'.86 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompre 162
Α'.87 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompare 162
Α'.88 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL 163
Α'.89 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από την PCL 163
Α'.90 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου) . . . 164
Α'.91 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου) 164
Α'.92 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation) 165
Α'.93 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation) . . 165
Α'.94 Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function) . 166
Α'.95 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function) 166
Α'.96 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 167
Α'.97 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 10) 167
Α'.98 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 300 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 168
Α'.99 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 300) 168
Α'.100 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 169
Α'.101 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10) . . . 169

Α'.102 Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 50 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος 170
Α'.103 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 50) . . . 170
Α'.104 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.1 171
Α'.105 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.1 171
Α'.106 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.05 172
Α'.107 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.05 172
Α'.108 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.02 173
Α'.109 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.02 173
Α'.110 Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.01 174
Α'.111 Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.01 174

Κατάλογος πινάκων

2.1 Τεχνικά χαρακτηριστά του σαρωτή ScanStation 2 16

4.1 Περιγραφή των πειραμάτων 71
4.2 Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων στο 1ο πείραμα 86
4.3 Στατιστικά για τον αλγόριθμο του ICP 87
4.4 Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων στο 2ο πείραμα 91
4.5 Στατιστικά για τον αλγόριθμο του ICP από το 2ο πείραμα 91
4.6 Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων στο 3ο πείραμα 95
4.7 Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων στο 4ο πείραμα 98

5.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αλγορίθμων 101

A'.1 Στατιστικά για τον αλγόριθμο του ICP από το 3ο πείραμα 161
A'.2 Στατιστικά για τον αλγόριθμο του ICP από το 4ο πείραμα 175

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία, οι επίγειοι σαρωτές (Terrestrial Laser Scanners - TLS) άρχισαν να εισέρχονται δυναμικά στην επιστήμη της τοπογραφίας. Η τεχνολογία της επίγειας σάρωσης, αποτελεί μια υποσχόμενη μέθοδο καθώς δίνει την δυνατότητα συλλογής πυκνής τρισδιάστατης πληροφορίας των αντικειμένων του χώρου υπό την μορφή νεφών σημείων. Οι επίγειοι σαρωτές λέιζερ καταγράφουν την γεωμετρία και μερικές φορές πληροφορίες υφής για τις ορατές επιφάνειες των αντικειμένων και των χώρων. Οι σαρωτές παράγουν μια ψηφιακή τρισδιάστατη απεικόνιση (νέφος σημείων) μίας επιφάνειας σε ένα συγκεκριμένο οπτικό πεδίο με μία ορισμένη αβεβαιότητα μετρήσεων. Με αυτοματοποιημένο τρόπο, μετρούν ένα μεγάλο αριθμό σημείων πάνω στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, και με αυτό το τρόπο παράγεται ένα αρχείο που περιέχει το νέφος σημείων. Το νέφος σημείων αντιπροσωπεύει το σετ των σημείων που σαρώθηκαν από την συσκευή. Τα σημεία αυτά συνήθως ορίζονται από τις καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) και αντιπροσωπεύουν κάποιου είδους επιφάνεια.

Οι επίγειοι σαρωτές είναι όργανα που δουλεύουν με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι παρόμοια με αυτή των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών (total stations) που μετρούν αποστάσεις χωρίς την χρήση ανακλαστήρα, δηλαδή χρησιμοποιώντας την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσδιορίζουν την απόσταση. Όμως υπάρχουν σημαντικές διαφορές σε ότι αφορά το μήκος κύματος που χρησιμοποιούν, στην ποσότητα και την ταχύτητα με την οποία προσλαμβάνουν δεδομένα, τις εργασίες πεδίου, την επεξεργασία των μετρήσεων, τα σφάλματα, κ.λ.π. .

Τα τελευταία χρόνια οι επίγειοι σαρωτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών από αποτυπώσεις έως και την παρακολούθηση μετακινήσεων. Η παρακολούθηση των παραμορφώσεων απαιτεί μια τεχνική μέτρησης δεδομένων η οποία θα περιλαμβάνει πολλές επιθυμητές ιδιότητες, όπως η αξιοπιστία, η ακρίβεια, το χαμηλό κόστος και η ευκολία στην χρήση. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι οι οποίες ενσωματώνουν μερικές από αυτές τις ιδιότητες, όχι όμως όλες. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες επαφής,

όπως τα παραμορφωσίμετρα (dial gauges) και οι ευθύγραμμοί μεταβλητοί διαφορικοί μετασχηματιστές (linear- variable-differential transducers-LVDTs) χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων λόγω της υψηλής τους ακριβείας στις μετρήσεις. Ωστόσο, η αδυναμία λήψης μετρήσεων από απόσταση, καθώς χρειάζονται να είναι σε επαφή με το αντικείμενο προς μέτρηση, αλλά και το γεγονός ότι οι μετρήσεις που λαμβάνουν είναι μονοδιάστατες τα καθιστούν πολλές φορές ακατάλληλα. Επιπρόσθετα, ο αριθμός των προς παρακολούθηση σημείων περιορίζεται από τον από τον αριθμό των διαθέσιμων οργάνων [21].

Αντιθέτως οι επίγειοι σαρωτές είναι σύγχρονα γεωδαιτικά όργανα τα οποία έχουν πολλά συγκριτικά πλεονεκτήματα όπως οι τρισδιάστατες μετρήσεις, η απομακρυσμένη και χωρίς επαφή συλλογή δεδομένων καθώς και δυνατότητα συλλογής πυκνής πληροφορίας (νέφη σημείων). Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται στην παρακολούθηση των παραμορφώσεων. Οι συγκρίσεις των δεδομένων σάρωσης μπορούν να ταξινομηθούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία γίνεται σύγκριση απ' ευθείας των σαρώσεων. Στην δεύτερη κατηγορία γίνεται σύγκριση του νέφους σημείων με μία επιφάνεια και στην τρίτη κατηγορία τα νέφη σημείων που λαμβάνονται από τον σαρωτή μοντελοποιούνται και συγκρίνονται οι επιφάνειες που προκύπτουν από τις σαρώσεις. Η παρούσα διπλωματική ασχολείται με την πρώτη κατηγορία όπου τα παραγόμενα νέφη συγκρίνονται απ' ευθείας.

Το πρώτο βήμα για την ανίχνευση των παραμορφώσεων είναι η γεωαναφορά των νεφών στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Έστω ότι υπάρχουν δύο νέφη σημείων που αποκτήθηκαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Σε διαφορετικές περιόδους μέτρησης, η θέση και προσανατολισμός των σαρώσεων δεν είναι ίδια. Κάθε νέφος σημείων έχει το δικό του τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Για να είναι δυνατή η μέτρηση των παραμορφώσεων από τις δύο περιόδους μέτρησης θα πρέπει τα δύο νέφη να γεωαναφερθούν στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται με την συνένωση τους σε κοινό σύστημα αναφοράς (co-registration ή global matching). Έπειτα είναι δυνατή η εύρεση των παραμορφώσεων με την χρησιμοποίηση κατάλληλων αλγορίθμων.

1.1 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση των αλγορίθμων για την ανίχνευση παραμορφώσεων από την πρωταρχική μορφή δεδομένων που παράγουν οι επίγειοι σαρωτές, τα νέφη σημείων.

Συγκεκριμένα οι αλγόριθμοι με τους οποίους καθίσταται δυνατή η ανίχνευση παραμορφώσεων από τα νέφη σημείων είναι ο αλγόριθμος *α'*) του εγγύτερου γείτονα, *β'*) της εγγύτερης επιφάνειας, *γ'*) του εγγύτερου κάθετου διανύσματος, και *δ'*) π αλγόριθμος σύγκρισης με βάση τον ICP. Τέλος η απόδοση των αλγορίθμων ελέγχεται με την εφαρ-

μογή τους σε προσομοιωμένα και πειραματικά δεδομένα.

Για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού, τέθηκαν οι εξής επιμέρους στόχοι:

- Βιβλιογραφική αναζήτηση για τους αλγορίθμους.
- Χρήση κατάλληλου λογισμικού για την υλοποίηση των παραπάνω αλγορίθμων.
- Δημιουργία νέου λογισμικού
- Πραγματοποίηση πειραμάτων για την αξιολόγηση των αλγορίθμων.

1.2 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική αποτελείται από πέντε κεφάλαια και η διάρθρωση της είναι η εξής:

- Στο 1ο κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στο αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η αυτή η διπλωματική εργασία, περιγράφεται ο σκοπός και οι στόχοι της και παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της.
- Στο 2ο δίνεται μια σύντομη περιγραφή των αρχών λειτουργίας στις οποίες βασίζονται οι επίγειοι σαρωτές, την διάρθρωση των παραγόμενων δεδομένων, δηλαδή τα νέφη σημείων, και τέλος παρουσιάζονται οι ήδη υπάρχουσες εφαρμογές στην ανίχνευση παραμορφώσεων στις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί οι σαρωτές
- Στο 3ο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την διπλωματική για την ανίχνευση παραμορφώσεων από τα νέφη σημείων καθώς και το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε και δημιουργήθηκε για τον σκοπό αυτό.
- Στο 4ο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι μετρήσεις ο οποίες πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των μεθοδολογιών καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυψαν.
- Στο 5ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής καθώς και οι προτάσεις για μελλοντική συνέχισης της.
- Τέλος η διπλωματική έχει δύο παραρτήματα. Στο πρώτο παράρτημα παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή την διπλωματική, ενώ στο δεύτερο παράρτημα παρουσιάζεται ο κώδικάς σε C++ που υλοποιεί τους αλγορίθμους.

Μέρος Ι

Θεωρητικό υπόβαθρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Επίγειοι σαρωτές λέιζερ

2.1 Εισαγωγή

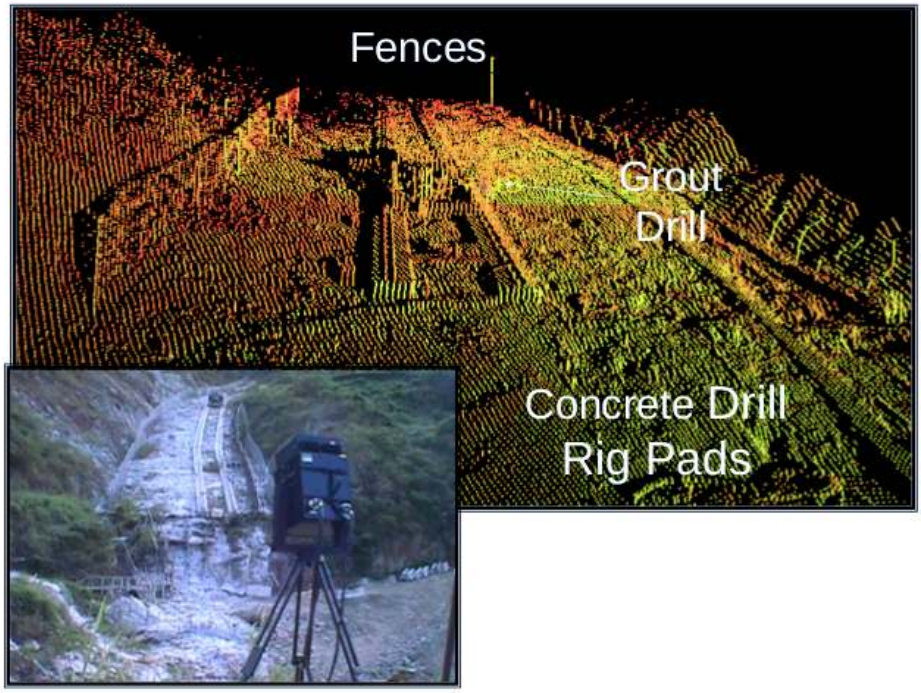
Οι επίγειοι σαρωτές λέιζερ (αγγλ. Terrestrial Laser Scanners - TLS) καταγράφουν την γεωμετρία και μερικές φορές πληροφορίες υφής για τις ορατές επιφάνειες των αντικειμένων και των χώρων. Οι σαρωτές παράγουν μια ψηφιακή τρισδιάστατη απεικόνιση (νέφος σημείων) μίας επιφάνειας σε ένα συγκεκριμένο οπτικό πεδίο με μία ορισμένη αβεβαιότητα μετρήσεων [26, σελ. 1].

Το παραγόμενο προϊόν από μία σάρωση, που χαρακτηρίζεται ως νέφος σημείων (βλ. εικόνα 2.1 και ενότητα 2.5), παρέχει ένα πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο του αντικειμένου το οποίο σαρώνεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λεπτομερή χαρτογράφηση αντικειμένων, όπως αρχαιολογικοί χώροι, φράγματα, κ.λ.π. .

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας των επίγειων σαρωτών καθώς και η διάθρωση των νεφών σημείων. Ακόμα παρουσιάζονται ενδεικτικές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται οι επίγειοι σαρωτές δίνοντας έμφαση στην ανίχνευση παραμορφώσεων.

2.2 Τρόπος λειτουργίας επίγειων σαρωτών

Οι επίγειοι σαρωτές είναι όργανα που δουλεύουν με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι παρόμοια με αυτή των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών (total stations) που μετρούν αποστάσεις χωρίς την χρήση ανακλαστήρα, δηλαδή χρησιμοποιώντας την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσδιορίζουν την απόσταση. Όμως υπάρχουν σημαντικές διαφορές σε ότι αφορά το μήκος κύματος που χρησιμοποιούν, στην ποσότητα και την ταχύτητα με την οποία προσλαμβάνουν δεδομένα, τις εργασίες πεδίου, την επεξεργασία των μετρήσεων, τα σφάλματα,



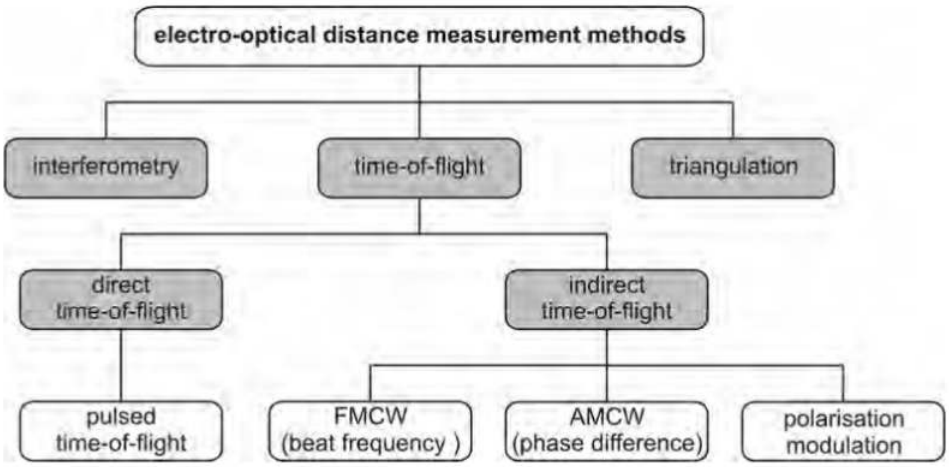
Εικόνα 2.1: Νέφος σημείων από επίγειο σαρωτή [41]

κ.λ.π. [42].

Οι μέθοδοι μέτρησης με χρήση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού της απόστασης σε άμεσες μεθόδους και μεθόδους που βασίζονται σε εικόνα. Οι άμεσες υπολογίζουν την απόσταση του στόχου από τον σαρωτή απ'ευθείας και η μέτρηση της απόστασης δεν επηρεάζεται από άλλους παράγοντες ενώ οι μέθοδοι εικόνας υπολογίζουν την απόσταση με κάποιον αλγόριθμό ερμηνεύοντας π.χ. τις σκιές ή την υφή των διαφορών τμημάτων του στόχου [95, σελ. 9].

Οι άμεσες μέθοδοι διακρίνονται με τη σειρά τους σε μεθόδους τριγωνισμού (triangulation), μέτρησης διαφοράς χρόνου (time of flight - TOF) και συμβολομετρίας (interferometry) (σχήμα 2.1) .Ο τριγωνισμός υπολογίζει την απόσταση με γεωμετρικές μεθόδους μέσω μετρήσεων γωνιών και αποστάσεων, η μέθοδος TOF υπολογίζει την απόσταση μέσω του χρόνου μετάβασης - επιστροφής ενός διαμορφωμένου κύματος και η συμβολομετρία εκμεταλλεύεται την συμφωνία ενός κύματος για τον υπολογισμός της απόστασης [95, σελ. 10].

Οι επίγειοι σαρωτές προσδιορίζουν την απόσταση με τον χρόνο πτήσης της ακτινοβολίας (time of flight - TOF). Οι μετρήσεις με βάση τον χρόνο χωρίζονται με την σειρά τους σε άμεσες μετρήσεις (direct TOF) και σε έμμεσες (inderict TOF) που συνήθως περιλαμβάνουν μετρήσεις φάσης (phase difference). Οι συσκευές που μετρούν την απόσταση με διαφορά φάσης έχουν εμβέλεια μερικά μέτρα και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε εσωτερικούς χώρους. Η ακρίβεια τους φτάνει το χιλιοστό και μπορούν να καταγράφουν εκατοντάδες χιλιάδες σημεία μέσα σε λίγα λεπτά. Αντιθέτως οι συσκευές TOF έχουν μεγαλύτερη εμβέλεια (που φθάνει μέχρι τα 2 χιλιόμετρα) αλλά έχουν χειρότερη ακρίβεια



Σχήμα 2.1: Μετρήσεις με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία [84]

και είναι και πιο αργές στην λειτουργία τους.

2.2.1 Σάρωση με την μέθοδο της μέτρησης διαφοράς χρόνου (Time of flight - TOF)

Η αρχή λειτουργίας των σαρωτών, που βασίζονται στην μέθοδο μέτρησης διαφοράς χρόνου, είναι ίδια με αυτή των ηλεκτρονικών οργάνων μέτρησης των μηκών (Electronic Distance Measurement - EDM).

Η βασική αρχή της μεθόδου είναι η μέτρηση της διαφοράς χρόνου μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου σήματος που εκπέμπεται από τον σαρωτή και θεωρώντας γνωστή την ταχύτητα του φωτός (βλ. σχ. 2.2), ο υπολογισμός της απόστασης δίνεται από την εξίσωση (2.1).

$$S = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta t \tag{2.1}$$

όπου S η απόσταση (m), c η ταχύτητα του φωτός (m/s) και Δt ο χρόνος μετάβασης - επιστροφής (s) του παλμού.

Ο υπολογισμός της διαφοράς χρόνου μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου σήματος γίνεται με διάφορες τεχνικές, με τις σημαντικότερες να είναι η μετάδοση του παλμού και η διαμόρφωση του φέροντος σήματος [95, σελ. 10].

Κατά την διαδικασία μέτρησης με την μέθοδο του παλμού, ο σαρωτής εκπέμπει μια συγκεντρωμένη φωτεινή ενέργεια σε τακτά χρονικά διαστήματα που μετά την ανάκλαση της σε κάποια επιφάνεια προσλαμβάνεται από τον φωτοανιχνευτή του οργάνου[95, σελ. 11].

Οι σαρωτές που χρησιμοποιούν την μέθοδο της μέτρησης της διαφοράς χρόνου είναι οι

πιο συνηθισμένοι σαρωτές που χρησιμοποιούνται σε κατασκευαστικές εργασίες λόγω της μεγαλύτερης εμβέλειας που έχουν (συνήθως μεταξύ 125 με 1000 μέτρα) και ο ρυθμός λήψης σημείων κυμαίνεται σε 50000 σημεία ανά δευτερόλεπτο. Συνήθως συνδυάζουν ένα σύστημα εκπομπής ακτινοβολίας με καθρέφτες που εκτρέπουν την ακτινοβολίας στο προς σάρωση αντικείμενο και ένα σύστημα που εντοπίζει την επιστροφή της ακτινοβολίας καθιστώντας δυνατή την μέτρηση της απόστασης (σχ. 2.3) [42, 18].

Εικόνα 2.2: Επίγειοι σαρωτές που χρησιμοποιούν την μέθοδο TOF [18, σελ. 24]

2.2.2 Σάρωση με την μέθοδο της διαφοράς φάσης (Phase shift)

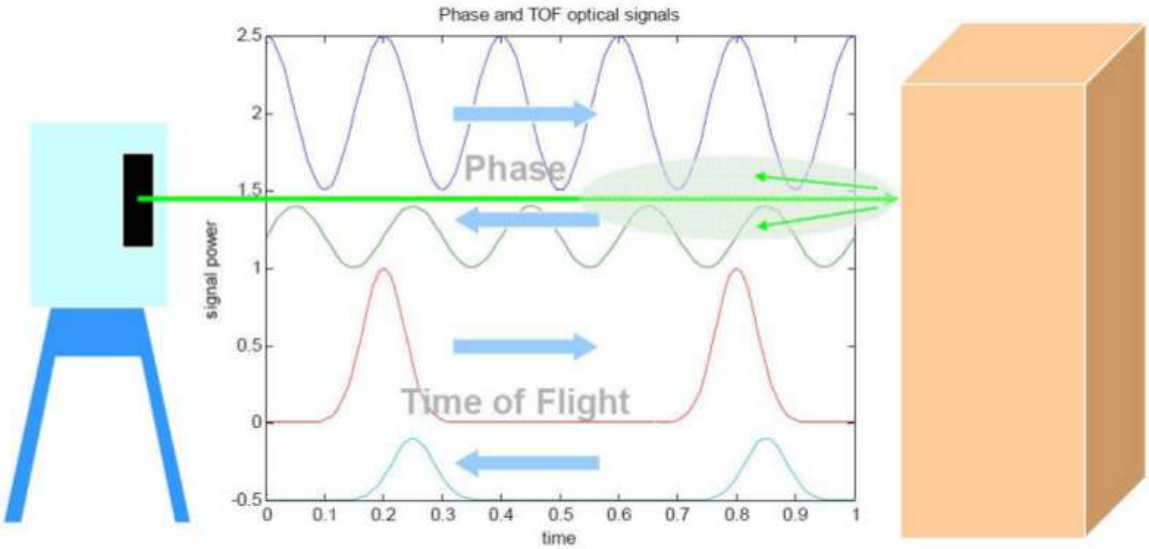
Στην μέθοδο αυτή, το εκπεμπόμενο σήμα διαμορφώνεται ως ένα αρμονικό κύμα και η απόσταση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη διαφορά φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και του επιστρέφοντος από το αντικείμενο κύματος (βλ. σχ. 2.2) [95, σελ. 12].

Η μέθοδος μέτρησης της διαφοράς φάσης δεν απαιτεί την ύπαρξη χρονομέτρου μεγάλης ακρίβειας, αλλά προβλέπει μια απλή ηλεκτρονική διάταξη για τη μέτρηση της διαφοράς φάσης και τον υπολογισμό του χρόνου μετάβασης - επιστροφής του σήματος από τον τύπο (2.2) [95, σελ. 13].

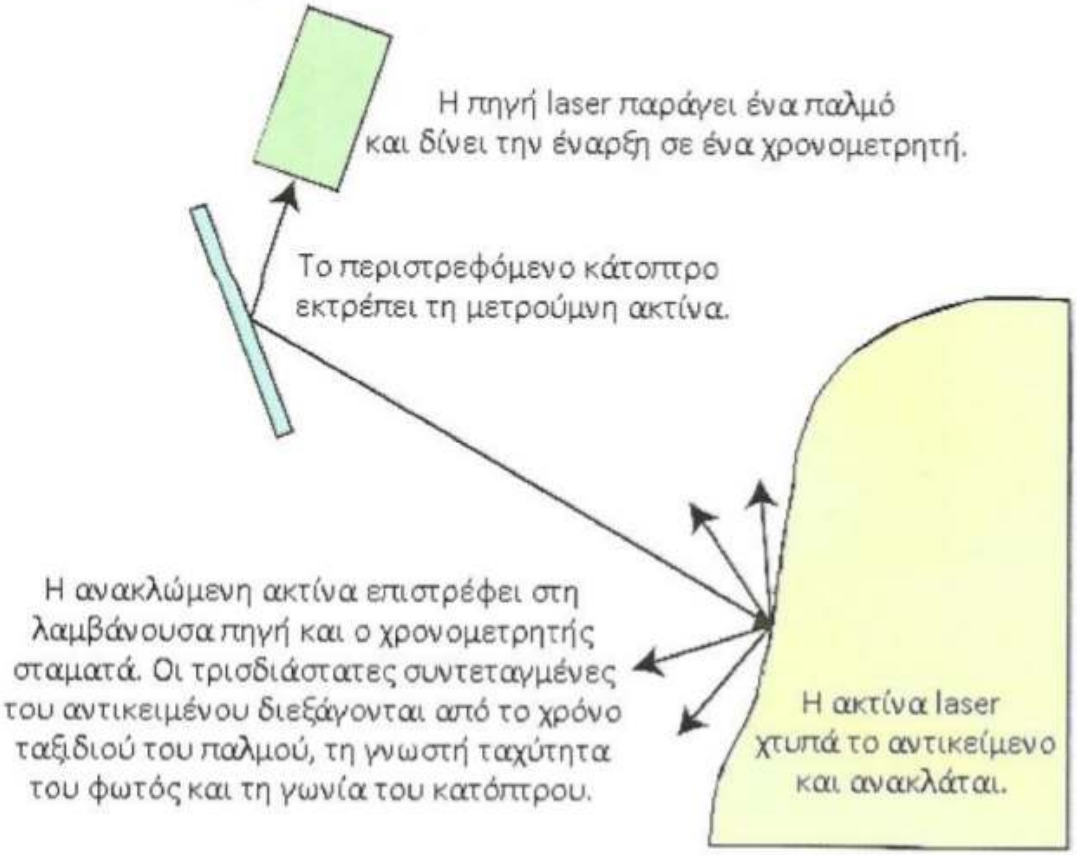
$$t = \frac{T \cdot \Phi}{2 \cdot \pi} \tag{2.2}$$

όπου t ο χρόνος μετάβασης - επιστροφής, T η χρονική διάρκεια ενός μήκος κύματος και Φ η διαφορά φάσης.

Από άποψη λειτουργικότητας, η μέθοδος δεν είναι πολύ διαφορετική από τη μέθοδο της μέτρησης διαφοράς χρόνου. Λόγω όμως της πολυπλοκότερης ανάλυσης των σημάτων, τα αποτελέσματα είναι ακριβέστερα σε βάρος όμως της μέγιστης μετρούμενης απόστασης (συνήθως μεταξύ 25 και 75 μέτρων). Έχουν όμως υψηλότερο ρυθμό λήψης σημείων σε σύγκριση με τους σαρωτές που χρησιμοποιούν την μέθοδο της διαφοράς χρόνου [42].



Σχήμα 2.2: Αρχή λειτουργίας επίγειων σαρωτών [42]



Σχήμα 2.3: Αρχή λειτουργίας επίγειων σαρωτών (2) [94, 7]

Εικόνα 2.3: Επίγειοι σαρωτές που χρησιμοποιούν την μέθοδο της διαφοράς φάσης [18, σελ. 26]

2.2.3 Ακρίβεια

Η ακρίβεια του κάθε σημείου σε ένα νέφος σημείων είναι ίση με το συσσωρευτικό σφάλμα που προκύπτει από την διαδικασία μέτρησης του κάθε σημείου ξεχωριστά καθώς και της επεξεργασίας που γίνεται έπειτα σε κάθε νέφος σημείων, π.χ. συνένωση νεφών σημείων (βλ. κεφ. 2.5.4) [42].

Στους επίγειους σαρωτές όπως και σε όλες τις τεχνολογίες laser χωρίς χρήση ανακλαστήρα (reflectorless), η λειτουργία τους επηρεάζεται και περιορίζεται εκτός από άλλους παράγοντες (απόσταση, ατμοσφαιρικές συνθήκες), από φυσικούς νόμους της ανακλαστικότητας, τις οπτικές ιδιότητες του υλικού, την περιλαμβανόμενη διάθλαση και το αποτέλεσμα της εσωτερικής διάθλασης [92, 91]. Παρακάτω αναλύονται οι κύριοι λόγοι που επηρεάζουν την ακρίβεια των οργάνων [91]:

Απόσταση: Η απόσταση από μια επιφάνεια μετράται, εάν ένα επαρκές ποσό της ενέργειας του παλμού ανακλάται, έτσι ώστε το σήμα να καταγραφεί από τον ανιχνευτή του συστήματος του οργάνου. Το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από τον ανιχνευτή πρέπει να ξεπερνά ένα προκαθορισμένο όριο έντασης για να καταγραφεί ο χρόνος επιστροφής του παλμού.

Μήκος κύματος παλμού laser: Η αναλογία του ανακλώμενου παλμού δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του υλικού της επιφάνειας αλλά και από το μήκος κύματος του παλμού laser. Έχει διαπιστωθεί [91] ότι επιφάνειες διαφορετικής ανακλαστικότητας προκαλούν συστηματικά σφάλματα στις μετρημένες αποστάσεις λόγω της αραίωσης του παλμού στην ανακλαστική επιφάνεια.

Χαρακτηριστικά επιφάνειας: Για αντικείμενα που αποτελούνται από διαφορετικά υλικά ή από διαφορετικού χρώματος ή επικάλυψης επιφάνειες, τα σφάλματα που αναμένονται είναι σημαντικά. Επίσης μια δοσμένη επιφάνεια μπορεί να παρουσιάζεται ανώμαλη σε ορατά μήκη κύματος και εξομαλυμένη σε μεγαλύτερα μήκη κύματος.

Μέγεθος και τύπος στόχων: Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τις μεταβολές (διακυμάνσεις) της ανακλαστικότητας είναι το μέγεθος και ο τύπος των στόχων. Αυτό

αποδεικνύεται μέσω πειραματικών διαδικασιών αφού τα αποτελέσματα ήταν τελείως διαφορετικά για μικρούς στόχους (π.χ. φύλλο), για γραμμικούς στόχους (π.χ. ένα σύρμα), εκτεταμένους στόχους (π.χ. η επιφάνεια ενός δρόμου) αλλά και ογκώδεις στόχους (π.χ. ένα δέντρο)

Γωνία πρόσπτωσης πάνω στην επιφάνεια: Επίσης την ανακλαστικότητα μπορεί να επηρεάσει και η γωνία πρόσπτωσης του εκπεμπόμενου παλμού στην επιφάνεια ανάκλασης.

Το χρώμα: Έχει αποδειχθεί ότι οι άσπρες και γενικότερα οι ανοιχτόχρωμες επιφάνειες αποφέρουν μεγάλης έντασης (ισχυρές) ανακλάσεις ενώ αντίθετα η ανάκλαση είναι μικρή σε μαύρες ή σκουρόχρωμες επιφάνειες.

Το υλικό: Η ένταση του ανακλώμενου παλμού εξαρτάται από φυσικούς, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, αλλά και από γεωμετρικούς παράγοντες των υλικών, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας.

Ατμοσφαιρικές συνθηκες: Η επιστροφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων διαμέσου της ατμόσφαιρας και περιγράφεται συνήθως από το πηλίκο της ανακλώμενης ακτινοβολίας με την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

2.3 Πλεονεκτήματα των σαρωτών

Τα τελευταία χρόνια οι επίγειοι σαρωτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε μία ευρεία γκάμα εργασιών, όπως για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων [60], για την γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων στον τομέα της αρχιτεκτονικής και της αρχαιολογίας [83, 39, 65], καθώς και την παρακολούθηση μικρομετακινήσεων, σαν μία εναλλακτική πρόταση στις κλασσικές μεθόδους γεωδαισίας.

Κάποιοι από τους λόγους που έχουν οδηγήσει στην ταχεία ανάπτυξη των σαρωτών είναι οι ακόλουθοι [60, σελ. 4-5]:

Τρισδιάστατη πληροφορία: Οι σαρωτές μπορούν και παράγουν απ' ευθείας τρισδιάστατη πληροφορία, χωρίς να εξαρτώνται από τις συνθήκες φωτισμού. Σε αντίθεση με τις φωτογραμμετρικές μεθόδους, οι οποίες και αυτές παράγουν τρισδιάστατη πληροφορία, οι σαρωτές δεν χρειάζονται πολύπλοκη επεξεργασία των μετρήσεων τους και ειδικές συνθήκες φωτισμού.

Υψηλή πυκνότητα πληροφορίας: Οι παραγόμενη τρισδιάστατη πληροφορία σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές της γεωδαισίας και της φωτογραμμετρίας είναι πυκνή. Οι σύγχρονοι σαρωτές έχουν την δυνατότητα λήψης ενός σημείο ανά 5mm, πράγμα που τους καθιστά ιδανικούς για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων.

Μετρήσεις που δεν απαιτούν επαφή με το αντικείμενο: Παρόμοια με την φωτογραμ-

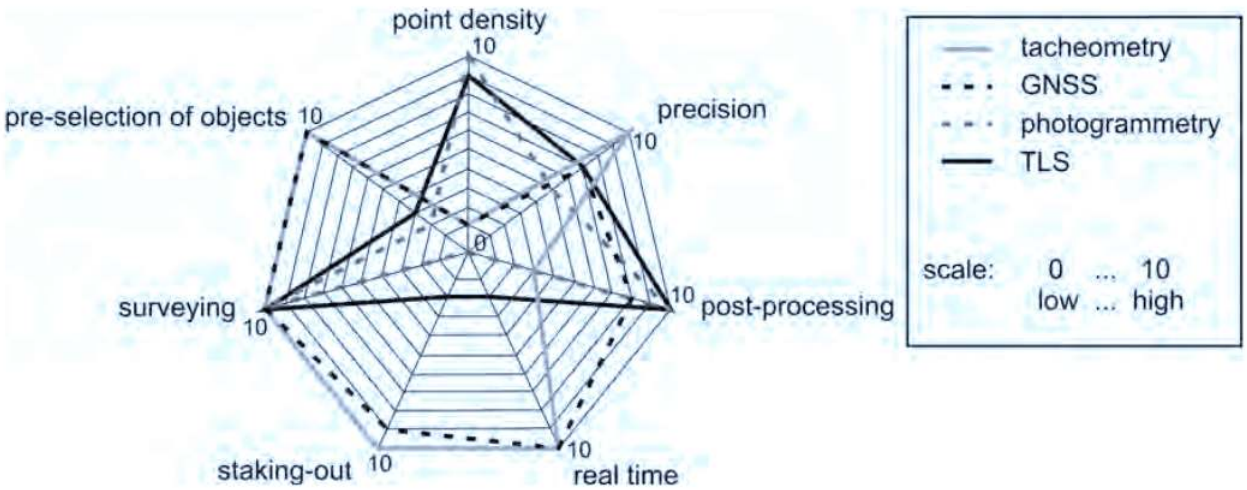
μετρία, οι επίγειοι σαρωτές είναι όργανα που δεν απαιτούν επαφή με το αντικείμενο το οποίο καταγράφουν. Η τυπική απόσταση από την οποία μπορούν να προσλάβουν μετρήσεις κυμαίνεται μεταξύ 50 και 200 μέτρων, πράγμα που τους καθιστά κατάλληλους για περιβάλλοντα τα οποία είναι δύσκολα στην πρόσβαση ή επικίνδυνα. Ακόμα, οι σαρωτές χρησιμοποιούν ακτινοβολία η οποία δεν είναι επικίνδυνη για τα μάτια, οπότε η σάρωση μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς να ληφθούν επιπρόσθετα μέτρα ασφαλείας και χωρίς να παρεμβάλλονται στην λειτουργία του προς σάρωση αντικειμένου (π.χ. μίας βιομηχανικής εγκατάστασης).

Υψηλή ταχύτητα μετρήσεων: Τα τελευταία χρόνια η ταχύτητα των σαρωτών αυξάνεται. Μία τυπική σάρωση διαρκεί περίπου 15 λεπτά και παρέχει μερικά εκατομμύρια τρισδιάστατα σημεία.

Μεγάλο οπτικό πεδίο(Field of view - F.O.V.): Το μεγάλο οπτικό πεδίο που παρέχουν οι σύγχρονοι σαρωτές μειώνει τον χρόνο παραμονής στο πεδίο μιας και είναι δυνατόν πολύπλοκα αντικείμενα (όπως π.χ. μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις) να σαρωθούν από λιγότερες θέσεις και έτσι οι μετακινήσεις του εξοπλισμού μειώνονται στο ελάχιστο.

Ενσωματωμένες φωτογραφίες: Οι σύγχρονοι σαρωτές έχουν ενσωματωμένες υψηλής ανάλυσης κάμερες, οι οποίες παρέχουν φωτογραφίες των αντικειμένων. Έτσι είναι δυνατή η τεκμηρίωση των αντικειμένων καθώς και η παραγωγή ορθοφωτογραφιών.

Το σχήμα 2.4 παρουσιάζει με συνοπτικό τρόπο τα συγκριτικά πλεονέκτημα - μειονεκτήματα των επίγειων σαρωτών με καθιερωμένες μεθόδους της γεωδαισίας (ταχυμετρία, GNSS και φωτογραμμετρία).



Σχήμα 2.4: Σύγκριση των επίγειων σαρωτών με την ταχυμετρία, GNSS και την φωτογραμμετρία [84]

2.4 Ο σαρωτής ScanStation 2

Ο σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις της διπλωματικής εργασίας είναι ο ScanStation 2 της εταιρείας Leica (βλ. σχήμα 2.5 και πίνακα 2.1).

Ο συγκεκριμένος σαρωτής κατασκευάστηκε το 2007 και αποτελεί ένα άρτιο όργανο επίγειας σάρωσης, καθώς έχει την δυνατότητα να συλλέγει μέχρι και 50.000 σημεία το δευτερόλεπτο, με μέγιστη πυκνότητα σάρωσης ενός χιλιοστού (1mm). Η μέγιστη εμβέλεια σάρωσης είναι τα 300 m και παρέχει στους χρήστες την επιλογή πολλαπλών τύπων σάρωσης και πυκνότητας σάρωσης σημείων. Επίσης η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης και της απόστασης είναι 6mm, και 4mm αντίστοιχα. Επιπλέον, διαθέτει ενσωματωμένη ψηφιακή φωτογραφική μηχανή (video camera) CCD σχετικά χαμηλής ανάλυσης. [87, 88].

Σχήμα 2.5: Leica ScanStation 2 [19]

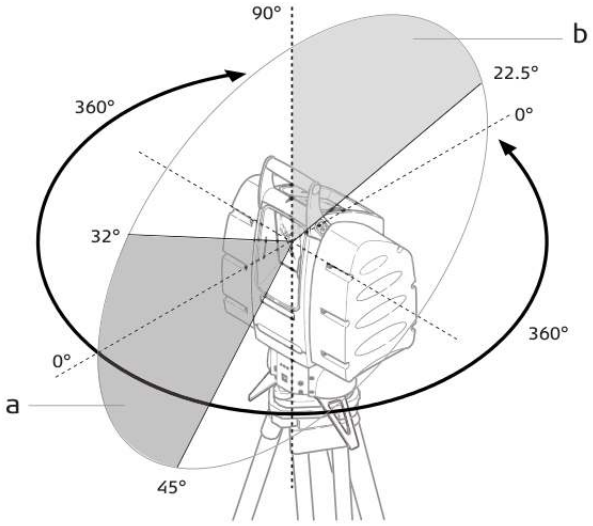
.

Το όργανο χρησιμοποιεί ένα ρομποτικό σύστημα καθρεφτών και ένα σύστημα για τον έλεγχο της περιστροφής που συνδέεται με laser και με την ψηφιακή κάμερα. Με αυτό τον τρόπο καταγράφει την υπό αποτύπωση περιοχή. Η μέθοδος σάρωσης που χρησιμοποιείται, είναι η time of flight, που έχει περιγραφεί στην ενότητα 2.2.1. Το όργανο διαθέτει κινούμενη κεφαλή με δυνατότητα περιστροφής $360°$ γύρω από τον οριζόντιο άξονα και $270°$ γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Το κύριο παράθυρο (a) (βλ. σχήμα 2.6) έχει ορατότητα $45°$ κάτω από τον ορίζοντα και $32°$ πάνω. Το πάνω παράθυρο (b) έχει ορατότητα από $22,5°$ μέχρι και το ζενίθ ($90°$) [19, 87, 88].

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του οργάνου φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Γενικά	
Επικοινωνία με τον χρήστη	Μέσω υπολογιστή
Κίνηση σαρωτή(scanner motor)	Κίνηση με σερβομηχανισμό
Κάμερα	Ενσωματωμένη κάμερα CCD
Ρυθμός σάρωσης	Μέχρι 50000 σημεία/δευτερόλεπτο
Θερμοκρασίες λειτουργίας	$0°C$ έως $40°C$
Βάρος	18,8 Kg
Ακρίβεια της μέτρησης	
Θέση	6 mm
Απόσταση	4 mm
Γωνία (οριζόντια/κατακόρυφη)	40 μrad / 60 μrad
Μέτρηση στόχων	2 mm απόκλιση
Διπλός – άξονας αντιστάθμισης	Ανάλυση: 1“, dynamic range $\pm$ 5‘
Σύστημα laser	
Τύπος	Παλλόμενο
Χρώμα	Πράσινο
Τάξη laser	3R
Εμβέλεια	300 m για 90% αντανάκλαση επιφάνειας και 134 κατά 18%
Μέγεθος σημείων	0 έως 50m: 4mm
Μέγιστη πυκνότητα δειγμάτων	<1 mm
Οπτικό πεδίο	
Οριζόντια γωνία	$360°$
Κατακόρυφη γωνία	$270°$
Δείκτης για οριζοντίωση	Εξωτερική φυσαλίδα
Ανταλλαγή δεδομένων	
Εισαγωγή	Cyclone native IMP Cyclone Object Exchange (COE) format, ASCII point data Leica’s X-Function DBX format, Land XML, ZFS, ZFC, 3DD
Εξαγωγή	Leica’s X-Function DBX format, Land XML, PTZ, DXF, ASCII point data

Πίνακας 2.1: Τεχνικά χαρακτηριστά του σαρωτή ScanStation 2 [19]



Σχήμα 2.6: Πεδίο ορατότητας του Leica ScanStation 2 [19]

.

Τέλος, ένα ακόμα πλεονέκτημα του σαρωτή είναι ότι παρέχει την δυνατότητα κέντρωσης σε συγκεκριμένο σημείο γνωστών συντεταγμένων που θα επιλέξει ο χρήστης. Επομένως ο ScanStation 2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν γεωδαιτικός σταθμός σε ποικίλες τοπογραφικές εργασίες όπως η όδευση και η χάραξη.

2.5 Νέφη σημείων

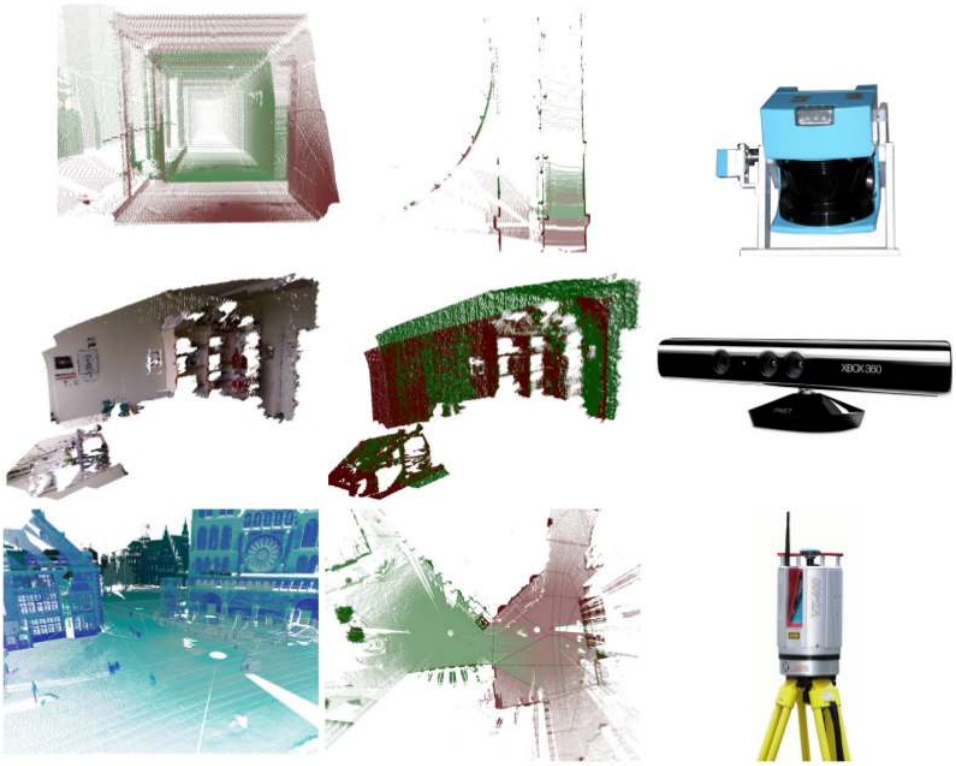
Τα νέφη σημείων δημιουργούνται συνήθως από τους σαρωτές. Αυτές οι συσκευές, με αυτοματοποιημένο τρόπο, μετρούν ένα μεγάλο αριθμό σημείων πάνω στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, και με αυτό το τρόπο παράγεται ένα αρχείο που περιέχει το νέφος σημείων. Το νέφος σημείων αντιπροσωπεύει το σετ των σημείων που σαρώθηκαν από την συσκευή.

Ένα νέφος σημείων είναι ένα σύνολο κορυφών σε ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων. Οι κορυφές αυτές συνήθως ορίζονται από τις καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) και αντιπροσωπεύουν κάποιου είδους επιφάνεια.

Τα νέφη σημείων χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς όπως η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων καθώς και για σκοπούς απεικόνισης [78].

Τα γραφικά υπολογιστών [46], η όραση υπολογιστών και η αντίστροφη μηχανική είναι μερικές από τις επιστήμες που χρησιμοποιούν τα νέφη σημείων σε ένα πλήθος εφαρμογών. Οι παραδοσιακές επιστήμες, όπως η φωτογραμμετρία, έχουν επικεντρωθεί περισσότερο στην χρήση δισδιάστατων εικόνων, αλλά πρόσφατα έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούν τα νέφη σημείων. Οπότε μια πληθώρα από επιστήμονες προσπαθούν να εκμεταλλευτούν το νέο τύπο δεδομένων. Η επιστήμη των γραφικών πασχίζει για να πετύχει τον οπτικό ρεαλισμό, ενώ από την άλλη μεριά η όραση των υπολογιστών χρησιμοποιεί

τα μοντέλα, που προκύπτουν από τα νέφη σημείων, ως εισαγωγή για ποικίλες διαδικασίες αυτοματισμού, όπως είναι η καθοδήγηση οχημάτων και η ρομποτική πλοήγηση. Σε αυτές τις διαδικασίες, η υψηλή ταχύτητα είναι η κύρια απαίτηση, ακόμη και αν είναι εις βάρος της ποιότητας των δεδομένων. Η αντίστροφη μηχανική, από την άλλη, απαιτεί από το τελικό μοντέλο να είναι μια αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρίας του αντικειμένου, με υψηλή πιστότητα και ακρίβεια. Αντίθετα, τα γραφικά των ηλεκτρονικών υπολογιστών δίνουν περισσότερη έμφαση στον οπτικό ρεαλισμό με χαμηλό υπολογιστικό κόστος [60, σελ. 8]. Επομένως, τα νέφη σημείων χρησιμοποιούνται από την κάθε επιστήμη με διαφορετικό τρόπο.



Σχήμα 2.7: Νέφη σημείων από διάφορους σαρωτές [16]

Μόλις ένα νέφος σημείων παραχθεί από τον σαρωτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση του αντικειμένου, έτσι ώστε να ελεγχθεί αν ολόκληρο το αντικείμενο έχει σαρωθεί καθώς και η ποιότητα των μετρήσεων. Παρόλο που η απεικόνιση των νεφών σημείων είναι χρήσιμη στις περισσότερες εφαρμογές, τα περισσότερα έργα θα χρειαστούν περαιτέρω επεξεργασία για να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες όπως επιφάνειες, πυκνότητα σημείων, κ.λ.π. . Για να εξαχθούν αυτού του είδους οι πληροφορίες, πρέπει να δημιουργηθούν επιπλέον δομές (octree, k-d tree, κ.λ.π.) [70, σελ. 45].

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται μερικές από τις ενέργειες που μπορούν να πραγματοποιηθούν στα νέφη σημείων.

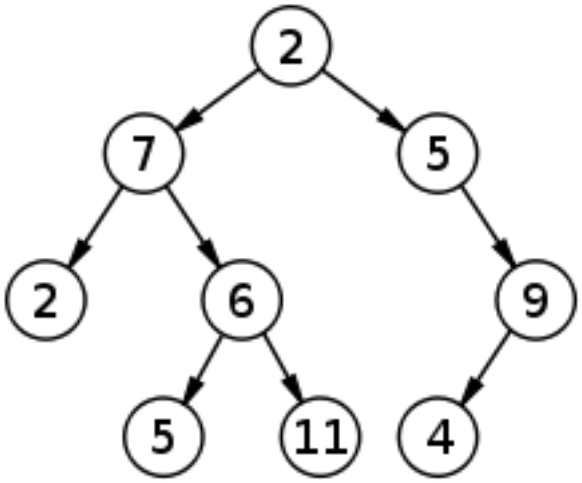
2.5.1 Δενδροειδές δομές δεδομένων

Οι δομές δεδομένων παρέχουν ένα μέσο για την διαχείριση τεράστιων όγκων δεδομένων (όπως είναι τα νέφη σημείων) έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά οι υπολογιστικοί πόροι.

Δομή δεδομένων είναι ο τρόπος αποθήκευσης και οργάνωσης της πληροφορίας σε ένα υπολογιστικό περιβάλλον έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά [71].

Ένα δένδρο είναι μία μη γραμμική, δισδιάστατη δομή δεδομένων, με ειδικές ιδιότητες [45, σελ. 969]. Μία δενδροειδής δομή είναι ένας τρόπος αναπαράστασης της ιεραρχικής φύσης μίας δομής σε γραφική μορφή [81]. Ονομάζεται δενδροειδής δομή λόγω της ομοιότητας των σχημάτων με ανεστραμμένα δέντρα (βλ. σχ. 2.8). Κάθε δενδροειδή δομή περιέχει κόμβους στους οποίους περιέχονται δύο ή περισσότερες συνδέσεις. Ο κόμβος είναι μία δομή που περιέχει κάποια τιμή, κάποια συνθήκη, ή αναπαριστά μια ξεχωριστή δομή δεδομένων (που μπορεί πάλι να είναι μία δενδροειδής δομή). Κάθε κόμβος μπορεί να περιέχει απογόνους (αγγλ. child nodes) και ο συγκεκριμένος κόμβος ονομάζεται γονέας κόμβος (αγγλ. parent node).

Επομένως μία δενδροειδή δομή δεδομένων είναι μία δομή δεδομένων που προσομοιώνει μία ιεραρχική δομή δέντρου με ένα σύνολο συνδεδεμένων κόμβων [80].



Σχήμα 2.8: Μια απλή δενδροειδής δομή δεδομένων. Σε αυτό το σχήμα ο κόμβος 7 έχει δύο απογόνους (το 2 και το 6) και ένα γονέα (το 2). Ο κεντρικός κόμβος (το 2) δεν έχει κανένα γονέα [80]

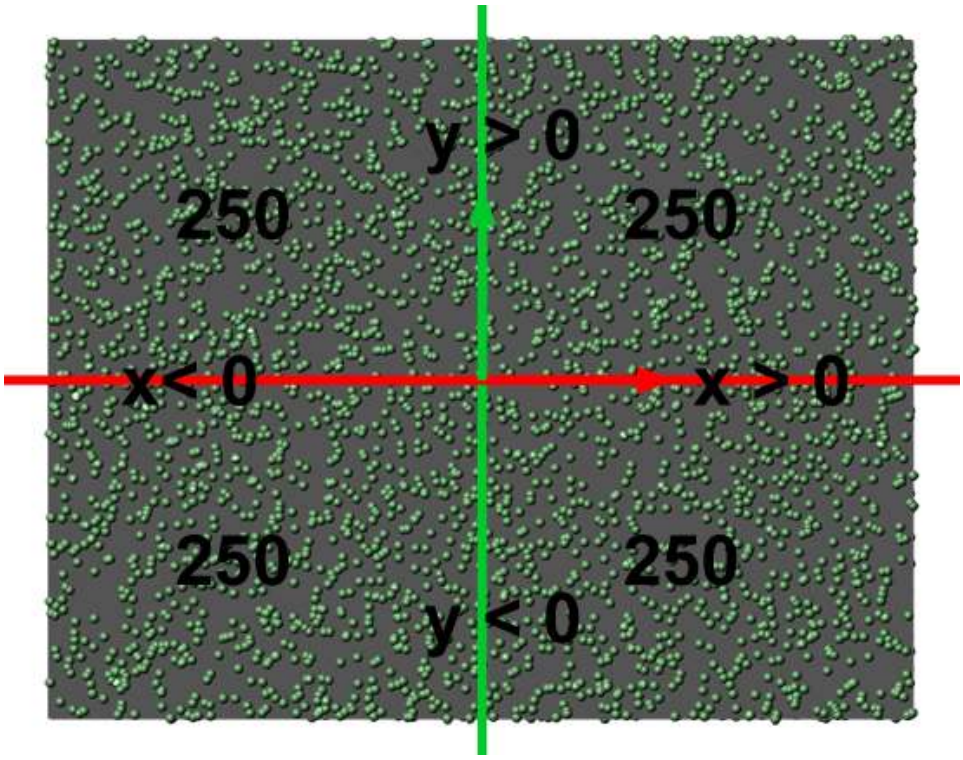
Η πιο απλή δενδροειδής μορφή που υπάρχει είναι το δυαδικό δέντρο. Στα δυαδικά δέντρα κάθε κόμβος έχει το πολύ δύο απογόνους, που συνήθως διακρίνονται ως "δεξιός κόμβος" και "αριστερός κόμβος".

2.5.2 Οκταδική δενδροειδείς δομή

Οι οκταδικές δομές (octree) είναι δενδροειδείς δομές δεδομένων και χρησιμοποιούνται για την οργάνωση του τρισδιάστατου χώρου. Έχουν πάρει το όνομα τους από το "Oct"

+ ”tree”, που σημαίνει ένα δέντρο με οκτώ κλάδους [76].

Χρησιμοποιούνται για να επιταχύνουν τις αναζητήσεις σε μεγάλο όγκο δεδομένων και η αρχή λειτουργίας τους είναι απλή. Οι αναζητήσεις βασίζονται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι ψάχνουμε για ένα σημείο σε ένα μεγάλο όγκο δεδομένων (π.χ. νέφος σημείων) που έχει μία συγκεκριμένη τρισδιάστατη θέση. Εάν τα δεδομένα περιέχουν πολλά στοιχεία, ο έλεγχος της θέσης κάθε στοιχείου μπορεί να είναι χρονοβόρα διαδικασία. Έστω ότι έχουμε 1000 σημεία που απλώνονται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια ενός ορθογωνίου πίνακα (βλ. σχήμα 2.9). Ακόμα, έστω ότι μπορεί να σχεδιαστεί μια κάθετη και μία οριζόντια γραμμή στη μέση του εν λόγω πίνακα. Σε κάθε υπο-χώρο που οριοθετείται από τις γραμμές υπάρχουν περίπου 250 σημεία. Αν αυτές οι γραμμές αντιπροσωπεύουν ένα καρτεσιανό σύστημα δισδιάστατων συντεταγμένων και οι συντεταγμένες των σημείων εκφράζονται σε αυτό το καρτεσιανό σύστημα, τότε είναι εμφανές ότι τα σημεία αριστερά του άξονα y έχουν αρνητικές τεταγμένες ενώ όλα τα σημεία πάνω στο άξονα x έχουν θετικές τετμημένες. Έτσι άμα θέλουμε να εντοπίσουμε τα σημεία για τα οποία ισχύει x>500 τότε γίνεται προφανές χρησιμοποιώντας τον διαχωρισμό του χώρου που έχουμε κάνει με βάση τις γραμμές ότι όλα τα στοιχεία που βρίσκονται στα αριστερά του άξονα y δεν μπορούν να περιέχονται στα στοιχεία μας αφού όλα αυτά τα αντικείμενα έχουν αρνητικές τετμημένες. Η απόρριψη των 500 σημείων στα αριστερά του άξονα y θα μειώσει το χρόνο αναζήτησης των σημείων στο μισό [59].



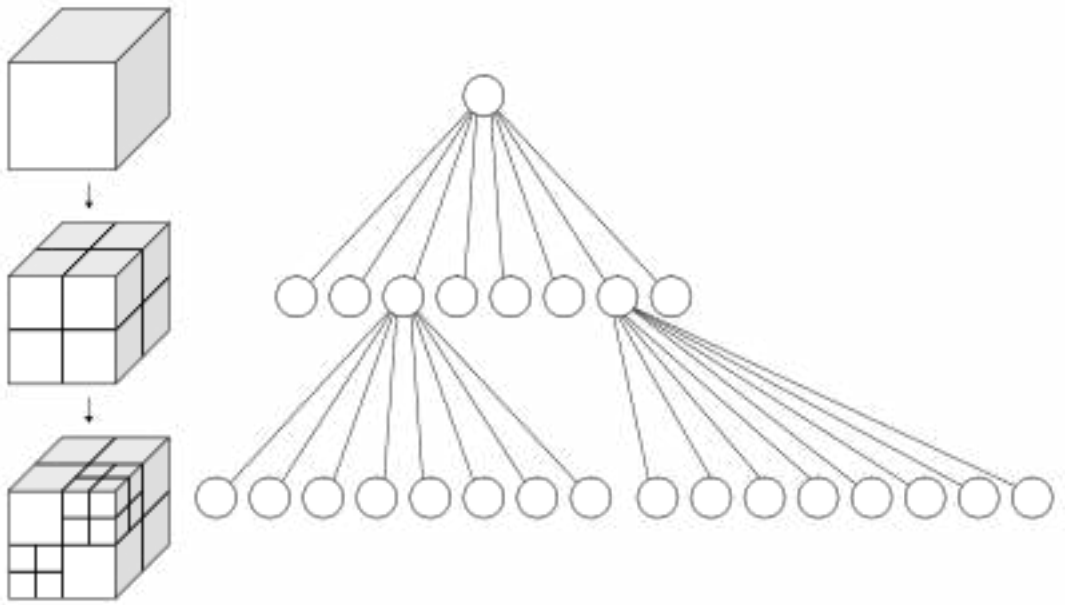
Σχήμα 2.9: Ορθογώνιος πίνακας με 1000 σημεία [59]

Έτσι ομοίως τα octree χρησιμοποιούνται για την διαδοχική διαίρεση ενός κυβικού τρισδιάστατου χώρου. Από ένα αρχικό κύβο, δημιουργούνται κελιά διαιρώντας τους αρχικούς κύβους σε 8 αντίστοιχους υπό-κύβους [76].

Τα octrees είναι το τρισδιάστατο ανάλογο των quadtrees. Το quadtree είναι μία δενδροειδή δομή δεδομένων στην οποία κάθε εσωτερικός κόμβος έχει ακριβώς τέσσερεις απογόνους. Το quadtree χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για να χωρίσει ένα δισδιάστατο χώρο σε τέσσερα τεταρτημόρια ή περιοχές. Οι περιοχές αυτές μπορεί είναι τετράγωνες, ορθογώνιες ή να έχουν αυθαίρετα σχήματα [79]. Το δισδιάστατο παράδειγμα που δόθηκε προσομοιάζει ακριβώς την λειτουργία των Quadtrees. Κάθε κόμβος του δέντρου αντιπροσωπεύει ένα κυβοειδή όγκο που ονομάζεται κελί. Ο αρχικός κύβος που περικλείει το σύνολο των δεδομένων, υποδιαιρείται διαδοχικά σε οκτώ μικρότερους κύβους και οι οκτώ μικρότεροι κύβοι διαιρούνται και αυτοί με την σειρά τους σε οκτώ μικρότερους.

Οι κανόνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σταματήσει η επαναληπτική διαδικασία είναι πολλοί. Το πιο απλό είναι να συνεχίσουν να διαιρούνται μέχρι να μην υπάρχουν άλλα δεδομένα (οι κόμβοι οι οποίοι δεν έχουν δεδομένα δεν θα διαιρεθούν περαιτέρω και ονομάζονται leaf κόμβοι) ή να φτάσουν σε ένα συγκεκριμένο μέγεθος κύβου (voxel size) που έχει οριστεί από τον χρήστη [70, σελ. 61],[76].

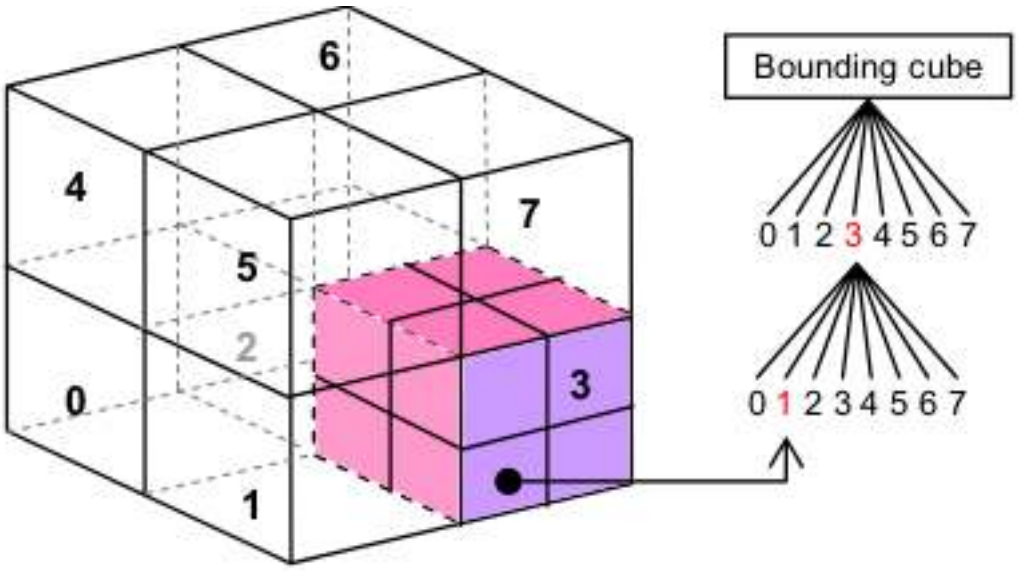
Κάθε επίπεδο διαίρεσης μετράται και ονομάζεται βάθος του octree. Όσο περισσότερες διαιρέσεις υπάρχουν τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος του. Ο αρχικός κύβος του octree έχει βάθος ίσο με μηδέν (0)[59].



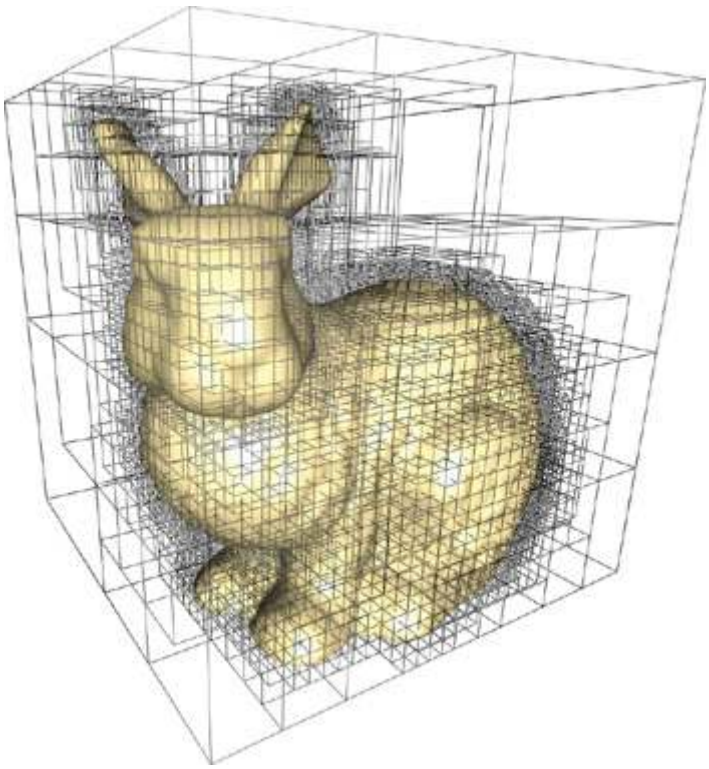
Σχήμα 2.10: Αριστερά: Υποδιαίρεση ενός κύβου σε octants. Δεξιά: Το αντίστοιχο octree [76]

2.5.3 Δενδροειδή δομή δεδομένων k-d

Η δενδροειδή δομή δεδομένων k-d (k-d tree [8]) (συντομογραφία για το k-διάστατη δενδροειδή δομή) είναι μία δενδροειδή χωρική κατάτμηση δεδομένων για την οργάνωση σημείων στον k-διαστατο χώρο. Τα k-d trees είναι μία χρήσιμη δομή δεδομένων για διά-



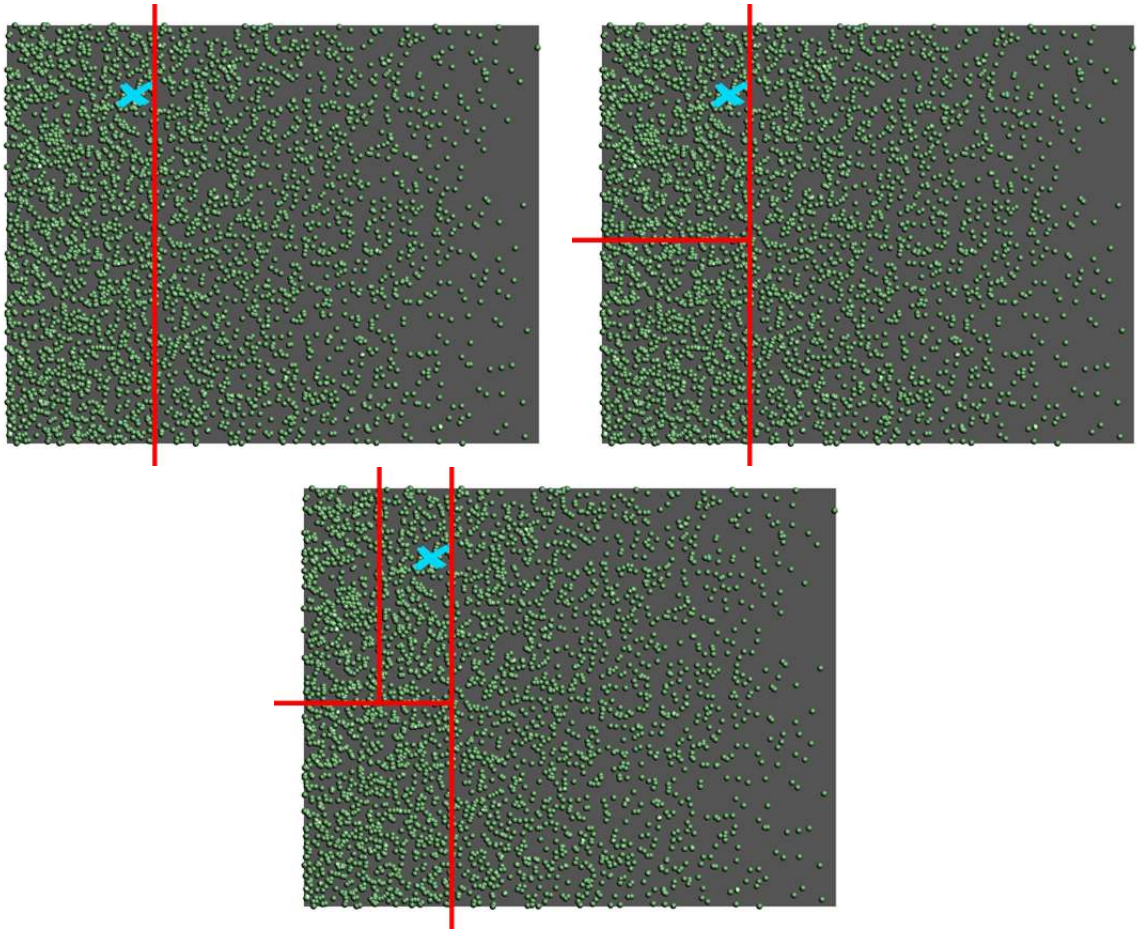
Σχήμα 2.11: Υποδιαίρεση ενός κύβου σε octants με το αντίστοιχο octree [14]



Σχήμα 2.12: Τρισδιάστατο μοντέλο με το αντίστοιχο octree [46]

φορες εφαρμογές, όπως αναζητήσεις που αφορούν την εύρεση του εγγύτερου γείτονα. Τα kd-trees είναι μια ειδική υποκατηγορία των δυαδικών δέντρων [75].

Η αρχή λειτουργίας των k-d trees είναι απλή. Έστω ότι υπάρχει ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με 1000 αντικείμενα που απλώνονται στην επιφάνεια του παραλληλόγραμμου (βλ. σχ. 2.13). Σε κάθε ένα από αυτά τα αντικείμενα είναι γραμμένη μια μοναδική ιδιότητα που δεν είναι ορατή (η πλευρά του αντικείμενου επί της οποίας είναι γραμμένη η ιδιότητα του αντικρίζει το έδαφος). Ο σκοπός είναι να βρεθεί ένα αντικείμενο πάνω στο οποίο είναι γραμμένη μία συγκεκριμένη ιδιότητα στο συντομότερο χρονικό διάστημα. Τεχνικά, θα αρκούσε απλώς να γυρίσουν όλα τα αντικείμενα μέχρι να βρεθεί το αντικείμενο. Αυτή όμως η διαδικασία απαιτεί πολύ χρόνο (βλ. σχ. 2.13).



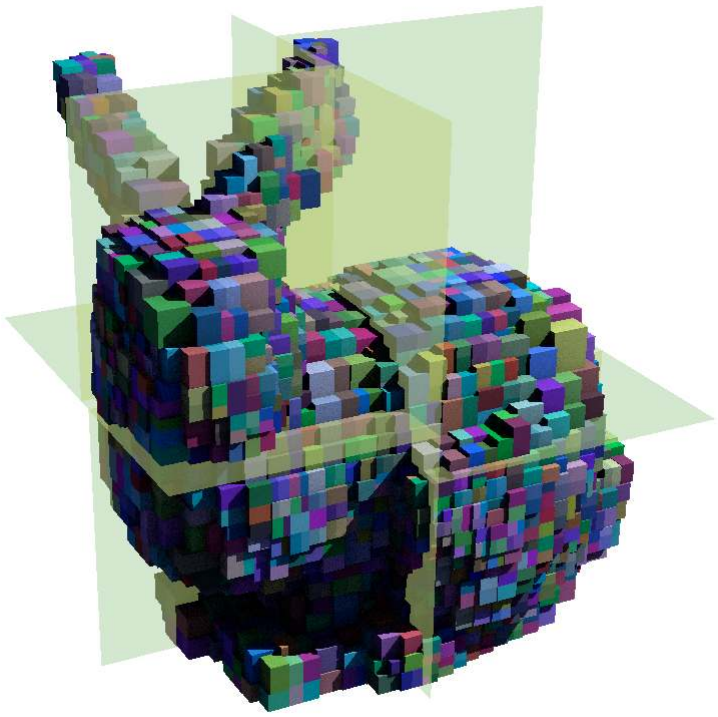
Σχήμα 2.13: Ορθογώνια παραλληλόγραμμο με 1000 αντικείμενα [58]

Έστω πως ο χώρος έχει χωριστεί με την βοήθεια μίας γραμμής. Στα δεξιά της γραμμής κείτονται 500 αντικείμενα και ομοίως άλλα 500 από τα αριστερά της γραμμής. Ακόμα έστω το αντικείμενο με την ιδιότητα που ψάχνουμε βρίσκεται στην αριστερή πλευρά, επομένως απομένει να ελεγχθούν 500 σημεία αντί για 1000.

Μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο ο χρόνος αναζήτησης επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία στα αντικείμενα που βρίσκονται στην αριστερή πλευρά και έτσι θα πρέπει να ελεγχθούν μόνο 250 σημεία. Έτσι ο χρόνος αναζήτησης μειώνεται στο ένα τέταρτο.

Διαιρώντας τα αντικείμενα σε υπο-ομάδες, οι οποίες θα περιέχουν ίσο αριθμό αντικειμένων μέχρι να περιέχεται μικρός αριθμός αντικειμένων στην κάθε υπο-ομάδα (για παράδειγμα μπορεί η επαναληπτική διαδικασία να σταματήσει όταν θα υπάρχουν σε κάθε ομάδα περίπου 10 αντικείμενα) με αποτέλεσμα να επιταχυνθεί κατά πολύ η διαδικασία της αναζήτησης [58].

Με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και τα k-d trees. Στην περίπτωση των νεφών σημείων, που είναι δομές τριών διαστάσεων, τα k-d trees ονομάζονται και 3-d trees και έτσι το παραπάνω παράδειγμα επεκτείνεται στον τρισδιάστατο χώρο μόνο που αντί να υπάρχουν γραμμές που χωρίζουν τον άξονα x και y υπάρχουν επίπεδα που χωρίζουν τους άξονες $x - y$, κ.λ.π. . Κάθε κόμβος του k-d tree περιέχει έναν δείκτη για το δεξί και το αριστερό υπο-δέντρο. Στην πληροφορική, ο δείκτης (αγγλ. Pointer) είναι τύπος δεδομένων του οποίου η τιμή είναι η διεύθυνση μνήμης που περιέχει κάποιο άλλο δεδομένο. Ονομάζεται δείκτης γιατί είναι μια μεταβλητή η οποία "δείχνει" την διεύθυνση μνήμης μιας άλλης μεταβλητής [85]. Κάθε κόμβος εκτός από τους κόμβους οι οποίοι δεν έχουν απογόνους έχουν ένα ορθογώνιο επίπεδο κάθετο σε έναν από τους τρεις άξονες (x, y, z) με αποτέλεσμα να τον χωρίζουν στην μέση. Όλα τα σημεία που βρίσκονται στο αριστερό υποδέντρο βρίσκονται κάτω από το επίπεδο,ενώ όλα τα σημεία στο δεξί υπο-δέντρο βρίσκονται πάνω από το επίπεδο [70, σελ. 62],[48]. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω ιδιότητες τα kd-tree μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση των εγγύτερων σημείων.



Σχήμα 2.14: Τρισδιάστατο μοντέλο με το αντίστοιχο k-d tree [32]

2.5.4 Συνένωση των νεφών σημείων

Η συνένωση των νεφών σημείων (αγγλ. registration of point clouds) ασχολείται με το σύστημα συντεταγμένων στο οποίο απεικονίζονται τα νέφη σημείων. Γίνεται με σκοπό την μετατροπή του νέφους από ένα σύστημα συντεταγμένων, το οποίο μπορεί να είναι το σύστημα συντεταγμένων του οργάνου, σε ένα άλλο, το οποίο μπορεί να είναι ένα αυθαίρετο τοπικό σύστημα [28, σελ. 83].

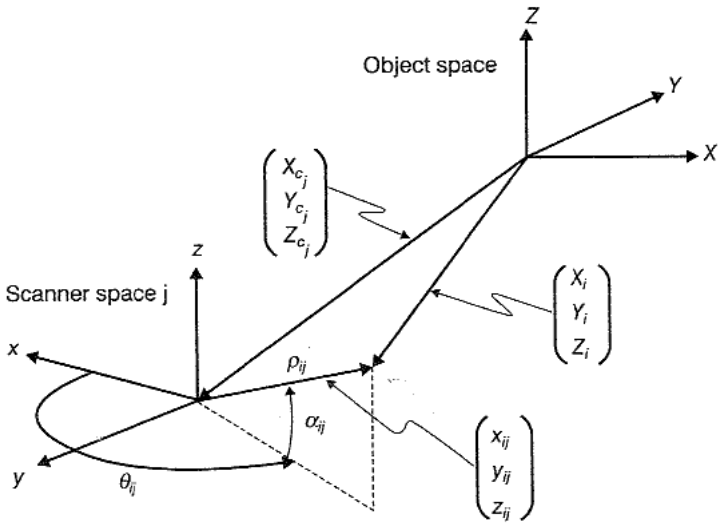
Οι επίγειοι σαρωτές μετρούν τη θέση των σημείων με βάση το το σύστημα συντεταγμένων που ορίζεται από τους αισθητήρες του οργάνου. Συνήθως τα σημεία που σαρώνονται από τους σαρωτές απεικονίζονται σε ένα σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων. Οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν την θέση ενός σημείου στο σφαιρικό σύστημα δίνονται παρακάτω (βλ. εξίσωσεις (2.3), (2.4), (2.5) και σχήμα 2.15).

$$\rho_{ij} = \sqrt{{x_{ij}}^2 + {y_{ij}}^2 + {z_{ij}}^2} \tag{2.3}$$

$$\theta_{ij} = arctan(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}) \tag{2.4}$$

$$\alpha_{ij} = arctan(\frac{z_{ij}}{\sqrt{{x_{ij}}^2 + {y_{ij}}^2}}) \tag{2.5}$$

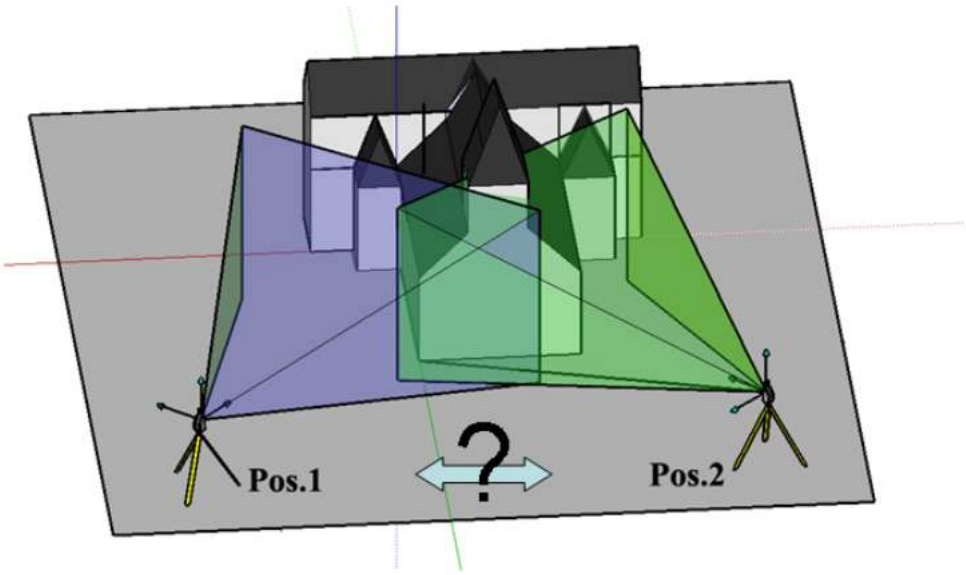
όπου $\rho_{ij}, \theta_{ij}, \alpha_{ij}$ η απόσταση, η οριζόντια γωνία και η κατακόρυφη γωνία αντίστοιχα ενός σημείου ενώ x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} οι αντίστοιχες καρτεσιανές συντεταγμένες.



Σχήμα 2.15: Η γεωμετρία των συντεταγμένων των επίγειων σαρωτών [28, σελ.86]

Πολύπλοκα αντικείμενα, όπως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δεν μπορούν να σαρωθούν επαρκώς από μία θέση, με αποτέλεσμα να χρειάζεται να συνενωθούν τα νέφη σημείων που προκύπτουν από διαφορετικές θέσεις οργάνου σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς, π.χ. το σύστημα αναφοράς του αντικειμένου [28, σελ. 110-111].

Συνένωση είναι η διαδικασία κατά την οποία ενώνονται δύο ή περισσότερα νέφη σημείων που λήφθηκαν από διαφορετικές θέσεις παρατήρησης, τα οποία έχουν μεταξύ τους ένα ελάχιστο ποσοστό επικάλυψης, σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς (βλ. σχ. 2.16). Κατά την διαδικασία της συνένωσης επιλέγεται ένα νέφος σημείων έτσι ώστε το ενιαίο νέφος που θα προκύψει να έχει το δικό του σύστημα αναφοράς και τα υπόλοιπα προσαρμόζονται σε αυτό με τις κατάλληλες μεταθέσεις και στροφές στις τρεις διευθύνσεις [95, σελ.46].



Σχήμα 2.16: Συνένωση των νεφών σημείων [18, σελ. 49]

Συνήθως ο μετασχηματισμός που χρησιμοποιείται για την μετατροπή των συντεταγμένων από το ένα σύστημα στο άλλο είναι 6-παραμετρικός αφινικός (6-parameter 3D rigid body transformation). Όμως αν υπάρχει η υποψία ότι μπορεί να υπάρχει διαφορά κλίμακας μεταξύ του συστήματος αναφοράς του σαρωτή και του συστήματος αναφοράς του αντικειμένου, τότε ο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετασχηματισμός ομοιότητας (3D similarity transformation).

Οι συνένωση των νεφών σημείων μπορεί να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηρορίες [28, σελ. 111]:

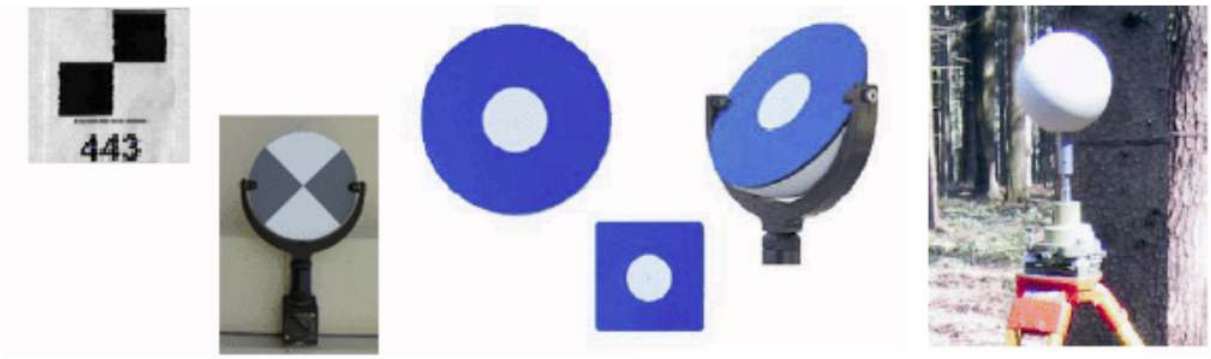
- Συνένωση με αντιστοιχία σημείων
- Συνένωση όπου ακριβής αντιστοιχία σημείων δεν υπάρχει.

2.5.5 Συνένωση νεφών σημείων με αντιστοιχία σημείων

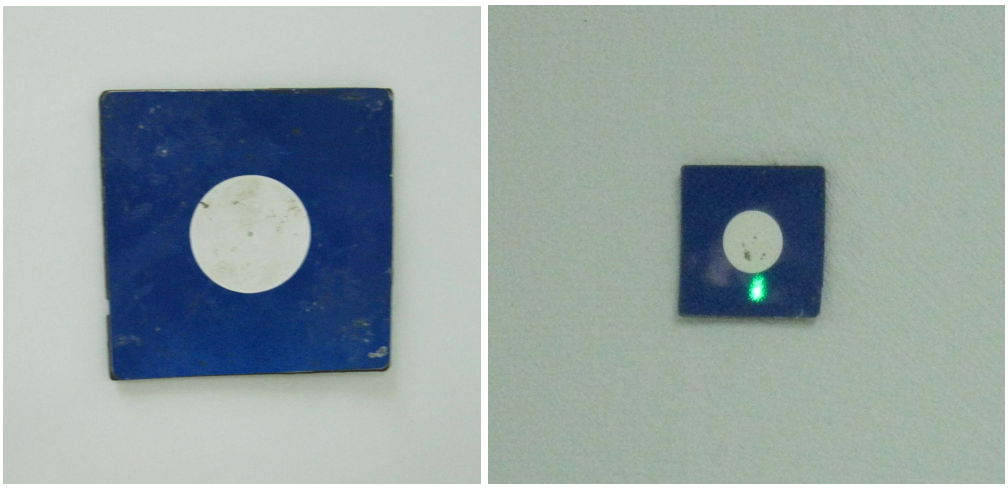
Σε αυτή την υπο-ενότητα εξετάζεται η συνένωση νεφών σημείων για τα οποία υπάρχει ακριβής αντιστοιχία σημείων μεταξύ των συστημάτων συντεταγμένων τους. Αυτό επιτυγχάνεται με σημασμένους στόχους που τοποθετούνται στην περιοχή σάρωσης και είναι ορατοί από τις θέσεις στις οποίες τοποθετείται ο σαρωτής. Οι στόχοι συνήθως σα-

ρώνονται και ο πλεονάζον αριθμός των παρατηρήσεων από την σάρωση χρησιμοποιείται για να εκτιμηθούν οι τρισδιάστατες συντεταγμένες του στόχου στο σύστημα αναφοράς του οργάνου. Αυτές οι συντεταγμένες μετά χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθούν οι παράμετροι μετασχηματισμού. Οι στόχοι συνήθως είναι επίπεδοι ή έχουν κάποιο γεωμετρικό σχήμα, όπως το σχήμα μίας σφαίρας [28, σελ. 111].

Το ακριβές σχήμα των στόχων διαφέρει ανάλογα με τον κατασκευαστή των οργάνων. Το κοινό χαρακτηριστικό που έχουν όλοι οι στόχοι είναι έντονη αντίθεση μεταξύ των στοιχείων του στόχου έτσι ώστε να είναι δυνατός ο ακριβής εντοπισμός του κέντρου του στόχου χρησιμοποιώντας κάποια μορφή επεξεργασία σήματος. Το γεωμετρικό σχήμα που χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι οι σφαίρες ή τα ημισφαίρια. Η εκτίμηση των παραμέτρων της σφαίρας (οι συντεταγμένες (x, y, z) του κέντρου και η ακτίνα R) βρίσκονται με την εφαρμογή κάποιας ελαχιστοτετραγωνικής μεθόδου [28, σελ. 111].



Εικόνα 2.4: Στόχοι σήμανσης [18]



Εικόνα 2.5: Στόχοι σήμανσης από το όργανο Scanstation 2 της Leica

2.5.6 Επαναληπτικός αλγόριθμος του πλησιέστερου σημείου

Οι αλγόριθμοι συνένωσης για τους οποίους δεν υπάρχει ακριβής αντιστοιχία μεταξύ των σημείων στις σαρώσεις μπορούν να χαρακτηριστούν με τον όρο επαναληπτικοί αλγό-

ριθμοι του πλησιέστερου σημείου (iterative closest point methods) ή απλώς ICP.

Ο ICP είναι μέθοδος προσαρμογής σημείου προς σημείου, και είναι ίδια μεθοδολογία όπως η συνόρθωση των τοπογραφικών δικτύων στην γεωδαισία [6, σελ. 2].

Ο ICP [25, 9] έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί τις διαφορές μεταξύ δύο νεφών σημείων. Χρησιμοποιείται για την ανακατασκευή δισδιάστατων ή τρισδιάστατων επιφανειών που προέρχονται από διαφορετικές σαρώσεις [74].

Η λειτουργία του αλγορίθμου είναι απλή. Έστω ότι έχουμε δύο σετ από σημεία, x και y, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ένα αφινικό μετασχηματισμό (rigid transformation):

$$y_i = R \cdot x_i + y_0 \tag{2.6}$$

όπου R ο πίνακας στροφής και y_0 το διάνυσμα μετάθεσης. Η βασική αρχή του ICP είναι ότι μετασχηματίζει το ένα νέφος σημείων έτσι ώστε να εφαρμόζει όσο καλύτερα στο άλλο ελαχιστοποιώντας τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων x_i του ενός νέφους και των y_i του άλλους νέφους, δηλαδή:

$$e^2 = \sum_i \|R \cdot x_i + y_0 - y_i\|^2 \rightarrow min \tag{2.7}$$

όπου το άθροισμα λαμβάνεται στο κοινό κομμάτι των δύο νεφών σημείων [28, σελ. 114].

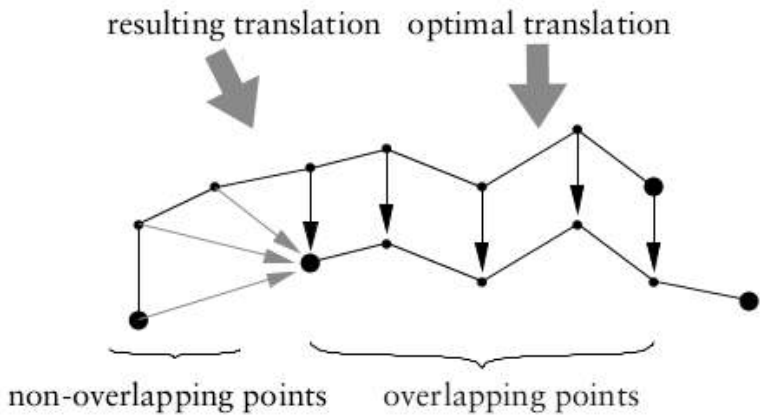
Τα βασικά βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμός είναι:

Εύρεση αντιστοιχίας: Το πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι η εύρεση αντιστοιχίας μεταξύ των σημείων των δύο νεφών. Για κάθε σημείο στο νέφος αναφοράς βρίσκεται ο κοντινότερος του γείτονας (με βάση την ευκλείδεια απόσταση) στο άλλο νέφος. Ένας βασικός περιορισμός του ICP είναι ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ο εγγύτερος γείτονας δεν αντιστοιχεί πάντα στο ίδιο σημείο επί της επιφάνειας σάρωσης, ιδιαίτερα αν οι δύο σαρώσεις είναι πολύ μακρυά. Παρόλα αυτά τις περισσότερες φορές συγκλίνει σε σωστή λύση λόγω της επαναληπτικής φύσης του αλγορίθμου [33].

Πολλές φορές για την βελτιστοποίηση του αλγορίθμου αποδίδονται βάρη στις αντιστοιχίες μεταξύ των σημείων ανάλογα με την πιθανότητα τους να αντιστοιχούν στα ίδια σημεία της επιφάνειας. Ένα εύλογο κριτήριο απόδοσης βαρών είναι απόσταση σημείου προς σημείου. Έτσι σημεία με μεγαλύτερη απόσταση συμμετέχουν λιγότερο στον μετασχηματισμό [33].

Εκτός από οποιαδήποτε διαδικασία απόδοσης βαρών, κάποια ακραία ζεύγη θα έπρεπε ομοίως να απορρίπτονται. Ένα κοινό κριτήριο για την απόρριψη κάποιων ζευγών είναι η απόρριψη όποιου ζεύγος έχει απόσταση πάνω από κάποιο όριο. Η μη απόρριψη των λανθασμένων ζευγών μπορεί να οδηγήσει σε συστηματικά λάθη

[33] (βλ. σχήμα 2.17).

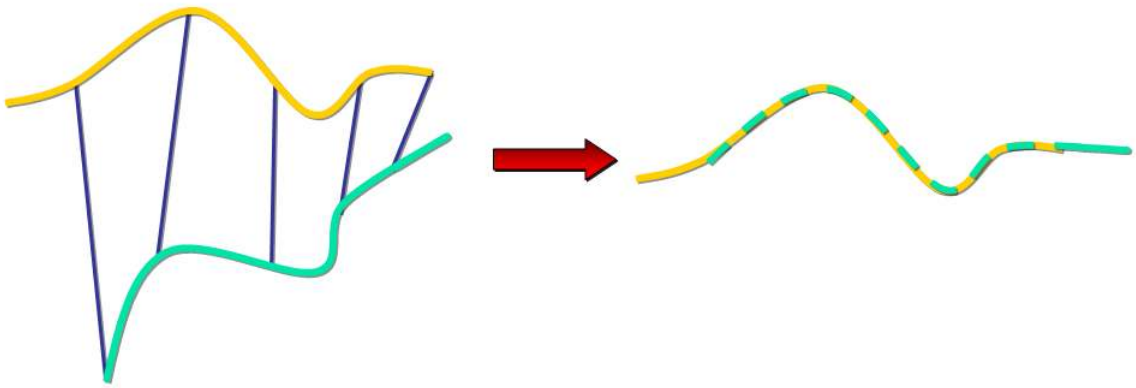


Σχήμα 2.17: Σφάλμα στην αντιστοιχίση των σημείων μεταξύ των δύο σαρώσεων [33]

Υπολογισμός μετασχηματισμού: Μετά την εύρεση των αντιστοιχιών γίνεται υπολογισμός του μετασχηματισμού χρησιμοποιώντας κάποια ελαχιστοτετραγωνική συνάρτηση. Στην αρχική δημοσίευση του ICP [9] υπάρχει μία λύση για την εύρεση του μετασχηματισμού, αλλά έχουν προταθεί και άλλοι τρόποι επίλυσης του προβλήματος [15, 64]

Μετασχηματισμός του νέφους: Μετασχηματισμός του ενός νέφους σημείων χρησιμοποιώντας τον υπολογισμένο μετασχηματισμό.

Επανάληψη: Εύρεση πάλι της αντιστοιχίας μεταξύ των σημείων και επανάληψη των παραπάνω βημάτων μέχρι να φτάσουμε σε μία αποδεκτή λύση.



Σχήμα 2.18: Τα βήματα του ICP. Οι μπλε γραμμές αντιπροσωπεύουν την αντιστοιχία ανάμεσα στα δύο νέφη, ενώ μετά το κόκκινο βελάκι φαίνεται το μετασχηματισμένο νέφος

Το κύριο μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι πρόκειται για έναν αλγόριθμό που βασίζεται στα σημεία και δεν λαμβάνει υπόψιν το τοπικό σχήμα της επιφάνειας με αποτέλεσμα να είναι επιρρεπής σε συσσωρευτικά σφάλματα λόγω των πολλών επαναλήψεων, με αποτέλεσμα να συγκλίνει πολλές φορές σε τοπικά ελάχιστα και να μην συγκλίνει σε

σωστή λύση. Επίσης για να μπορέσει ο αλγόριθμός να συγκλίνει σε σωστή λύση τα νέφη σημείων θα πρέπει να αλληλοκαλύπτονται κατά ένα μεγάλο ποσοστό (συνιστάται συνήθως 25–30% για την σωστή λειτουργία του αλγορίθμου). Τέλος η ύπαρξη χονδροειδών σφαλμάτων μπορεί πάλι να οδηγήσει σε εσφαλμένη λύση [74, 33, 50],[28, σελ. 116].

Τέλος είναι ένας αλγόριθμός που κοστίζει πολύ σε υπολογιστική ισχύ. Κατά κύριο λόγο αυτό που κοστίζει πολύ υπολογιστικό χρόνο είναι η αναζήτηση του πλησιέστερου γείτονα σε κάθε επανάληψη. Γι αυτό το λόγο για να επιταχυνθεί ο αλγόριθμός συνήθως χρησιμοποιούνται οι δενδροειδές δομές, όπως το kd-tree, που περιγράφτηκαν πιο πάνω (βλ. κεφάλαιο 2.5.3).

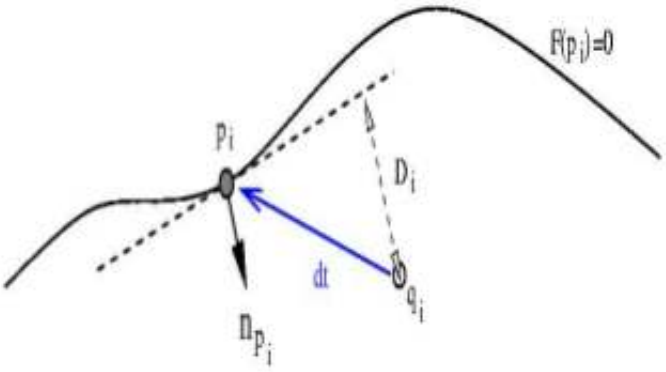
2.5.7 Παραλλαγές του ICP

Ο ICP έχει καταστεί η κύρια μέθοδος για την συνένωση νεφών σημείων και τρισδιάστατων μοντέλων. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί πολλές παραλλαγές του αλγορίθμου, που επηρεάζουν όλες τις πτυχές του αλγορίθμου, από την επιλογή των σημείων μέχρι την μέθοδο ελαχιστοποίησης [51].

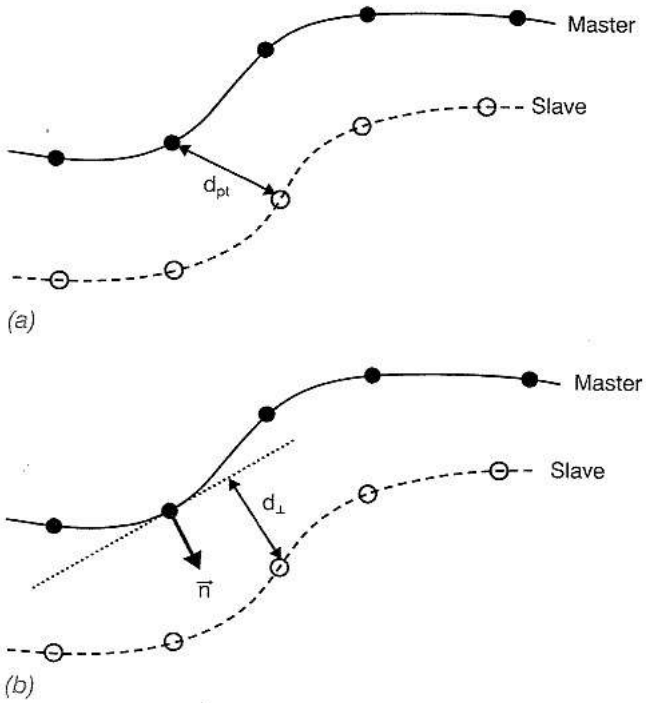
Αυτές οι παραλλαγές μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το στάδιο του αλγορίθμου το οποίο επηρεάζουν. Αναλυτικά τα στάδια του αλγορίθμου είναι:

- Ταξινόμηση τους ανάλογα με την επιλογή των σημείων.
- Ταξινόμηση τους ανάλογα με την μέθοδο αντιστοιχίας των σημείων.
- Η απόδοση βαρών στην αντιστοιχία των σημείων.
- Η απόρριψη μερικών αντιστοιχιών που θεωρούνται εσφαλμένες.
- Η εύρεση του σφάλματος της μετατροπής.
- Ελαχιστοποίηση του σφάλματος μετατροπής.

Για παράδειγμα, ο Chen και ο Medioni [11] ακολούθησαν μία διαφορετική προσέγγιση. Η κύρια διαφορά του αλγορίθμου τους με αυτή του αρχικού ICP είναι πως αντί να ελαχιστοποιούν την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των σημείων των δύο νεφών, ελαχιστοποιούν την απόσταση μεταξύ των σημείων του νέφους που θέλουμε να συνενώσουμε και της επιφάνειας που σχηματίζει το νέφος αναφοράς (σχ. 2.19, 2.4). Η επιφάνεια του νέφους αναφοράς προσεγγίζεται από ένα εφαπτομενικό επίπεδο και οι αποστάσεις υπολογίζονται κατά μήκος του κάθετου διανύσματος στην επιφάνεια του άλλου νέφους (normal shooting). Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι συγκλίνει πιο γρήγορα [28, σελ. 116].



Σχήμα 2.19: Ο αλγόριθμος του Chen και του Medioni για τον υπολογισμό των παραμέτρων στροφής και μετάθεσης μεταξύ δύο νεφών σημείων. p_i είναι ένα σημείο στην επιφάνεια $F(p_i) = 0$ και το n_{p_i} είναι το κάθετο διάνυσμα της επιφάνειας στο p_i. Η πραγματική μετάθεση και στροφή μεταξύ των δύο νεφών είναι d_t [6, σελ. 41]



Σχήμα 2.20: Ο υπολογισμός των αποστάσεων του ICP με a) σημείο προς σημείο b) σημείο προς επίπεδο [28, σελ. 117]

2.5.8 Συνένωση με χρήση γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Μια άλλη μέθοδος συνένωσης των νεφών γίνεται με τη χρήση χαρακτηριστικών (feature - based registration). Αναφερόμενοι στα χαρακτηριστικά του νέφους σημείων, νοούνται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (αγγλ. feature) του νέφους. Αυτό περιλαμβάνει σημεία, γραμμές και επιφάνειες που μπορεί να περιλαμβάνονται στο νέφος. Εκτός από τις γεωμετρικές πληροφορίες, κάποιες από αυτές τις μεθόδους χρησιμοποιούν και τις πληροφορίες έντασης ή χρώματος που υπάρχουν στο νέφος. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να εντοπίσουν και να υπολογίσουν τη σχέση μεταξύ δύο νεφών σημείων. Αυτή η σχέση, χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ο πίνακας στροφής και το διάνυσμα μετάθεσης μεταξύ των δύο νεφών, ελαχιστοποιώντας το άθροισμα των τετραγώνων ανάμεσα στα αντίστοιχα χαρακτηριστικά [1].

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές δημοσιεύσεις για την χρήσης τους. Για παράδειγμα ο [50] παρουσιάζει μία απλή μέθοδο με την οποία χρησιμοποιεί απλά γεωμετρικά σχήματα (όπως επίπεδα, σφαίρες, κ.λ.π.) για την συνένωση των νεφών. Ομοίως στα [55, 54] γίνεται προσπάθεια χρησιμοποίησης των κάθετων διανυσμάτων καθώς της καμπυλότητας των νεφών σημείων για την συνένωση των νεφών σε ένα ενιαίο σύστημα αναφοράς.

2.6 Χρήση επίγειων σαρωτών στην παρακολούθηση παραμορφώσεων

Στην επόμενη ενότητα γίνεται μία αναφορά στις εφαρμογές ανίχνευσης παραμορφώσεων στις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί οι σαρωτές.

2.6.1 Γενικά

Παραμόρφωση είναι η αλλαγή στο σχήμα ή στο μέγεθος ενός αντικειμένου από την εφαρμογή δυνάμεων ή αλλαγών στην θερμοκρασία. Η πρώτη περίπτωση μπορεί να είναι αποτέλεσμα εφελκυστικών δυνάμεων, θλιπτικών δυνάμεων, διάτμησης, κάμψης ή και συστροφής. Στην δεύτερη περίπτωση, ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι η κινητικότητα των δομικών στοιχείων του αντικειμένου [72].

Αντικείμενο της μελέτης των παραμορφώσεων είναι η συστηματική μέτρηση και παρακολούθηση της μεταβολής του σχήματος ή των διαστάσεων ενός αντικειμένου ως αποτέλεσμα της καταπόνησης που υφίσταται από φορτία[73].

Τα όργανα μέτρησης για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων εξαρτώνται από την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται, την επιλεγείσα μέθοδο και την απαιτού-

μενη επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Τα όργανα μέτρησης μπορούν να ταξινομηθούν σε 2 μεγάλες κατηγορίες: τα γεωδαιτικά και τα γεωτεχνικά όργανα. Και οι δύο κατηγορίες μπορούν να συνδυαστούν αρμονικά στις σύγχρονες μεθόδους παρακολούθησης των παραμορφώσεων.

Γεωδαιτικά όργανα: Τα σύγχρονα γεωδαιτικά όργανα υψηλών προδιαγραφών, μπορούν να υπολογιστούν γεωαναφερμένες μετατοπίσεις ή κινήσεις σε μία, δύο ή τρεις διαστάσεις. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί (total station), οι σύγχρονοι ψηφιακοί χωροβάτες, και τα παγκόσμια σύστημα εντοπισμού (GLONASS, GPS, κ.λ.π.).

Γεωτεχνικά όργανα: Τα γεωτεχνικά όργανα εκτελούν μη γεωαναφερμένες μετρήσεις μεγεθών. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται τα επιμηκυνσιομέτρα, τα πιεζόμετρα , τα βροχόμετρα , τα θερμόμετρα, τα βαρόμετρα, τα κλισιόμετρα, τα επιταχυνσιόμετρα και τα σεισμόμετρα.

Άλλες τεχνικές: όπως η χρήση των επίγειων σαρωτών laser, τα SSR, τα LiDAR, κ.λ.π. .

Οι εφαρμογές στις οποίες μπορεί να απαιτείται η μελέτη των παραμορφώσεων είναι στα φράγματα [29, 90], στους δρόμους, στις σήραγγες, στις μεταλλικές κατασκευές, στις γέφυρες [24], στα αρχαιολογικά μνημεία, στα εργοτάξια, στα ορυχεία, στην κατολίσθηση πρανών, στα ηφαίστεια, σε σεισμογενές περιοχές καθώς και σε περιοχές οι οποίες υφίστανται καθιζήσεις [89].

Η παρακολούθηση των παραμορφώσεων απαιτεί μια τεχνική μέτρησης δεδομένων η οποία θα περιλαμβάνει πολλές επιθυμητές ιδιότητες, όπως η αξιοπιστία, η ακρίβεια, το χαμηλό κόστος και η ευκολία στην χρήση. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι οι οποίες ενσωματώνουν μερικές από αυτές τις ιδιότητες, όχι όμως όλες. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες επαφής, όπως τα παραμορφωσίμετρα (dial gauges) και οι ευθύγραμμοί μεταβλητοί διαφορικοί μετασχηματιστές (linear- variable-differential transducers-LVDTs) χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων λόγω της υψηλής τους ακριβείας στις μετρήσεις. Ωστόσο, η αδυναμία λήψης μετρήσεων από απόσταση, καθώς χρειάζονται να είναι σε επαφή με το αντικείμενο προς μέτρηση, αλλά και το γεγονός ότι οι μετρήσεις που λαμβάνουν είναι μονοδιάστατες τα καθιστούν πολλές φορές ακατάλληλα. Επιπρόσθετα, ο αριθμός των προς παρακολούθηση σημείων περιορίζεται από τον από τον αριθμό των διαθέσιμων οργάνων [21].

Αντιθέτως οι επίγειοι σαρωτές είναι σύγχρονα γεωδαιτικά όργανα τα οποία έχουν πολλά συγκριτικά πλεονεκτήματα όπως οι τρισδιάστατες μετρήσεις, η απομακρυσμένη και χωρίς επαφή συλλογή δεδομένων καθώς και δυνατότητα συλλογής πυκνής πληροφορίας (νέφη σημείων). Γι' αυτό το λόγο έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται στην παρακολούθηση των παραμορφώσεων.

Οι παραδοσιακές γεωδαιτικές τεχνικές μετρούν τις τρισδιάστατες συντεταγμένες ενός προφανούς σημείου αναφοράς ή σύγκρισης, κάτι που τις καθιστά αντιοικονομικές μιας

και για μεγάλα ή σύνθετα αντικείμενα θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα πυκνό δίκτυο από σημεία, γεγονός που αυξάνει το κόστος μέτρησης και παραμονής στο πεδίο. Αφού οι μετρήσεις γεωαναφερθούν σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς, πιθανές παραμορφώσεις των σημείων μπορούν να ανιχνευθούν μέσα στο χρόνο. Σε γενικές γραμμές, η παραπάνω διαδικασία δεν μπορεί να εφαρμοστεί πιστά στα δεδομένα σάρωσης από τους επίγειους σαρωτές μιας και τα μεμονωμένα σημεία των επαναλαμβανόμενων σαρώσεων δεν αναφέρονται ακριβώς στην ίδια θέση. Επιπλέον, οι σαρώσεις που λαμβάνονται από τις διαφορετικές θέσεις που χρειάζονται για να καλυφθεί το υπό μελέτη αντικείμενο, μετά την συνένωση τους σε κοινό σύστημα αναφοράς, εισάγουν επιπρόσθετα σφάλματα που μπορεί να οδηγήσουν σε ψευδείς παραμορφώσεις[31, σελ. 238],[13].

Παρόλα αυτά, το κύριο πλεονέκτημα όμως της παρακολούθησης των παραμορφώσεων με μετρήσεις από επίγειους σαρωτές είναι ότι οι σαρωτές μπορούν να δημιουργήσουν ένα πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο της επιφάνειας του αντικειμένου. Η δημιουργία σημείων αναφοράς δεν απαιτείται, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ανίχνευση παραμορφώσεων σε όλη την επιφανεία του υπο μελέτη αντικειμένου [24].

Η ακρίβεια των μετρήσεων από τους επίγειους σαρωτές είναι χειρότερη από τις συμβατικές μεθόδους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, τα σφάλματα που εισάγουν οι σαρωτές μπορούν να αποκρύψουν τυχόν παραμορφώσεις. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ότι οι συνήθης μέθοδοι ανίχνευσης παραμορφώσεων δεν αξιοποιούν πλήρως το κύριο πλεονέκτημα των σαρωτών, δηλαδή την υψηλή πυκνότητα πληροφορίας που είναι ικανοί να προσλαμβάνουν [2]. Επομένως η υψηλή πυκνότητα των σημείων που μπορούν να λάβουν οι σαρωτές και ο πλεονασμός των δεδομένων που προκύπτει, μπορεί να βοηθήσει στην εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τις παραμορφώσεις που υφίστανται τα αντικείμενα [31, σελ. 238].

Οι συγκρίσεις των σαρώσεων μπορούν να ταξινομηθούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες [31, σελ. 247]:

- **Σύγκριση απ' ευθείας των σαρώσεων:** Σε αυτή την περίπτωση οι σαρώσεις επαναλαμβάνονται κάτω από τις ίδιες συνθήκες και τα νέφη σημείων συγκρίνονται απ' ευθείας μεταξύ τους.
- **Σύγκριση νέφους σημείων με επιφάνεια:** Σε αυτή την περίπτωση η σάρωση από την πρώτη περίοδο μετρήσεων μοντελοποιείται και δημιουργείται μία επιφάνεια. Έτσι οι επόμενες σαρώσεις συγκρίνονται με αυτή την επιφάνεια και προκύπτουν επομένως οι τυχόν παραμορφώσεις.
- **Σύγκριση δύο επιφανειών:** Σε αυτή την περίπτωση οι σαρώσεις μοντελοποιούνται και συγκρίνονται οι επιφάνειες που προκύπτουν από τις σαρώσεις.

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται οι διάφορες μελέτες που έχουν γίνει πάνω στο θέμα.

2.6.2 Ανίχνευση παραμορφώσεων σε τεχνικά έργα

Οι επίγειοι σαρωτές επιτρέπουν την γρήγορη απόκτηση δεδομένων χωρίς να απαιτείται εγκατάσταση ειδικών στόχων στο προς μελέτη αντικείμενο. Το κύριο μειονέκτημα των επίγειων σαρωτών που τους καθιστά ακατάλληλους για μετρήσεις παραμορφώσεων είναι η χαμηλή ακρίβεια των σημείων που λαμβάνουν. Η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί με τους σύγχρονους επίγειους σαρωτές κυμαίνεται από 5 μέχρι 25 χιλιοστά. Η ακρίβεια των σημείων των επίγειων σαρωτών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ο τρόπος λειτουργίας του σαρωτή (βλ. κεφ. 2.2) και τις συνθήκες των μετρήσεων (θερμοκρασία, η επιφάνεια πάνω στην οποία προσπίπτει το λέιζερ, κ.λ.π.) . Γενικότερα, η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με τους σαρωτές είναι περίπου μία τάξη μεγέθους χειρότερη από τις παραδοσιακές γεωδαιτικές τεχνικές (ταχυμετρία, G.P.S., κ.λ.π.) [65, 24].

Παρόλα αυτά, το κύριο πλεονέκτημα των σαρωτών είναι ότι δεν χρειάζεται να υπάρχει πρότερη γνώση για το που μπορεί να υπάρχουν παραμορφώσεις, διότι οι σαρωτές δημιουργούν ένα πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο του υπό μελέτη αντικειμένου. Ακόμα ο μεγάλος αριθμός δεδομένων που λαμβάνεται αντισταθμίζει την μικρή ακρίβεια του κάθε ξεχωριστού σημείου.

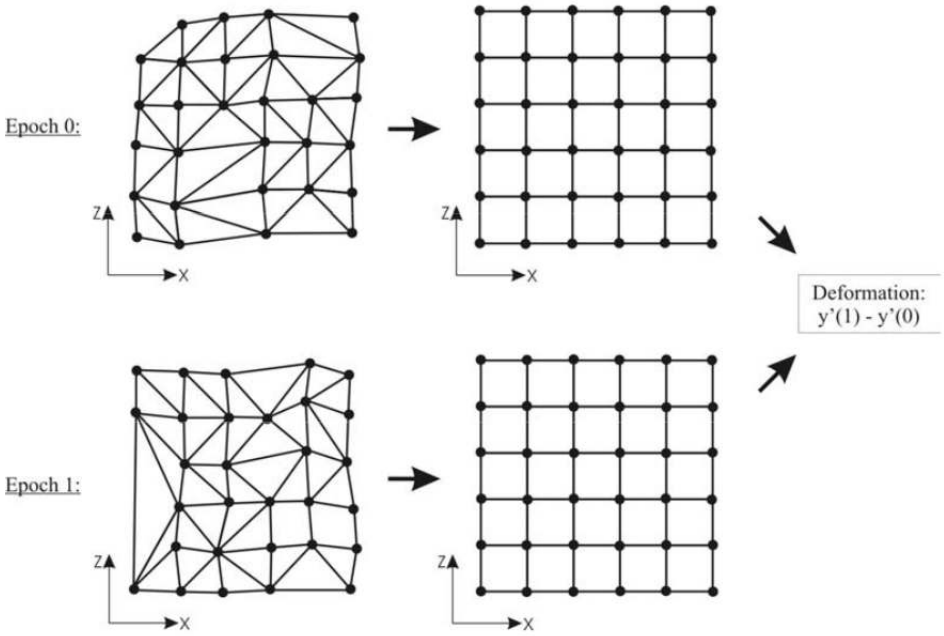
Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές προσπάθειες για την χρησιμοποίηση των επίγειων σαρωτών στην ανίχνευση παραμορφώσεων. Έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες που επιτρέπουν την ανίχνευση παραμορφώσεων σε:

- γέφυρες [24]
- φράγματα [29, 3, 56]
- σήραγγες [30, 49, 66, 40]
- καθώς και μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς [65]

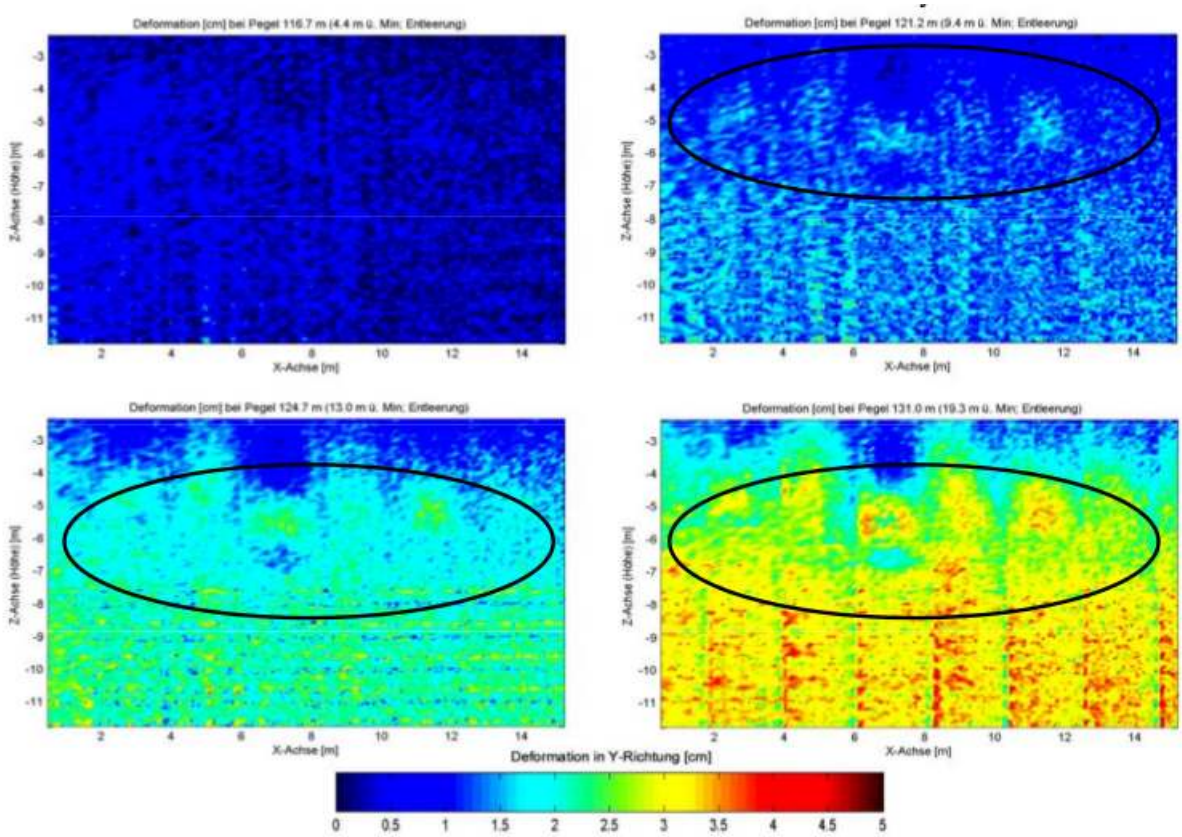
Μερικοί συγγραφείς, όπως οι [10, 37], καταφέρνουν να ανιχνεύσουν παραμορφώσεις συγκρίνοντας απ' ευθείας ψηφιακά μοντέλα εδάφους που παράγονται από διαφορετικές σαρώσεις.

Μία παρόμοια περίπτωση περιγράφεται στο [56] όπου νέφη σημείων με ακανόνιστη και μη-ομοιόμορφη δειγματοληψία παρεμβάλλονται κατάλληλα ώστε να σχηματίσουν ένα κάναβο ομοιόμορφο σε όλες τις εποχές μετρήσεων.Οι διαφορές μεταξύ των δύο κανάβων αποτελούν την παραμόρφωση (βλ. σχήμα 2.21,2.22).

Η μέθοδος αυτή όμως έχει περιορισμένη ευαισθησία στις μικρές παραμορφώσεις, πράγμα που την καθιστά ακατάλληλη για την μέτρηση περιορισμένων μετατοπίσεων. Ακόμα, καθώς τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους (ΨΜΕ) ορίζονται ως δισδιάστατα, π.χ. $z = f(x, y)$, οι διαφορές μεταξύ των ΨΜΕ παρέχουν μονοδιάστατη πληροφορία για τις παραμορφώσεις. Λόγω όμως της τρισδιάστατης φύσης των νεφών σημείων, αυτό αποτελεί ένα σημαντικό περιορισμό σε αυτή την προσέγγιση.



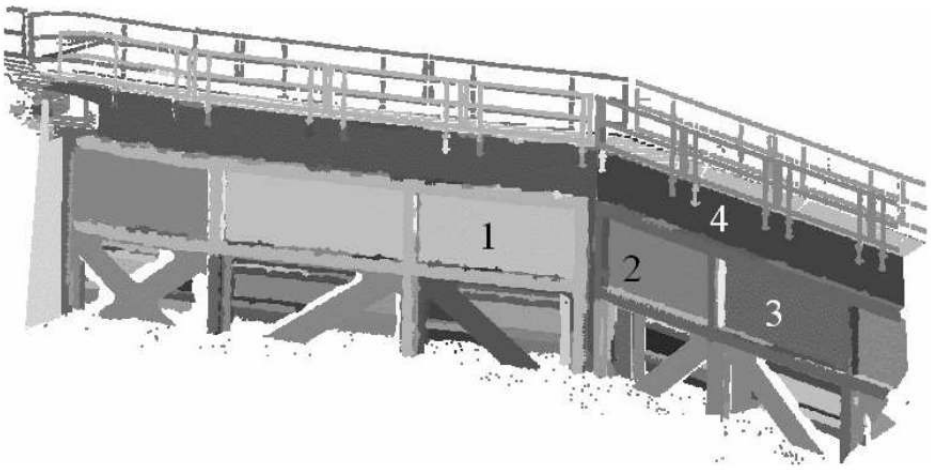
Σχήμα 2.21: Ανεπεξέργαστα νέφη σημείων με ακανόνιστη και μη - ομοιόμορφη δειγματοληψία (αριστερά) και ομοιόμορφος κάνναβος (δεξιά) για διαφορετικές περιόδους μετρήσεων [56]



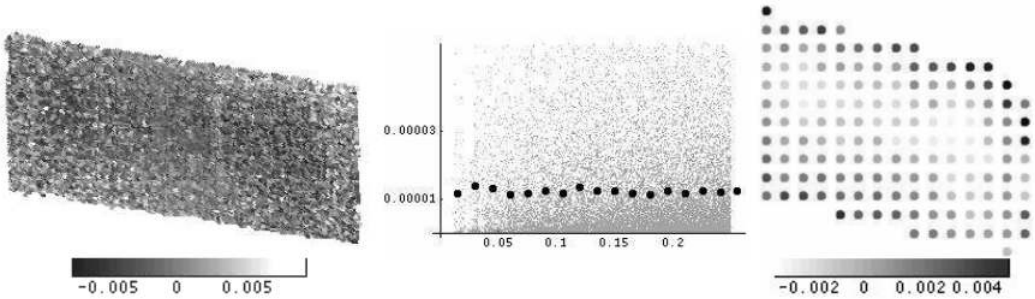
Σχήμα 2.22: Παραμορφώσεις που προκύπτουν από τον κάνναβο. Για περισσότερες πληροφορίες βλ. [56]

Το πλεονέκτημα των επίγειων σαρωτών, όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, όπως η ταχυμετρία, είναι ο μεγάλος αριθμός μετρήσεων που παράγεται. Το μειονέκτημα όμως του μεγάλου όγκου πληροφοριών είναι ότι είναι δύσκολο να προσδιοριστούν κάποια σταθερά σημεία, όπως κορυφές κτηρίων, κ.λ.π. . Επομένως για να χρησιμοποιηθεί ο μεγάλος όγκος πληροφορίας που παράγεται, είναι προτιμητέο αντί να γίνει προσπάθεια να εξαχθούν παραμορφώσεις από κάθε ένα σημείο ξεχωριστά, να προσαρμοστεί ένα μαθηματικό μοντέλο στο νέφος σημείων, όπως μία επιφάνεια. Η βασική ιδέα είναι για να ξεπεραστεί η περιορισμένη ακρίβεια του κάθε σημείου ξεχωριστά είναι να χρησιμοποιηθεί ο πλεονάζων αριθμός των παρατηρήσεων [30].

Για παράδειγμα ο [29] χωρίζει κατά τμήματα ένα φράγμα στην Ολλανδία και προσαρμόζει επίπεδα. Οι αποστάσεις μεταξύ των επιπέδων στις περιόδους των μετρήσεων είναι η μέτρηση των παραμορφώσεων (βλ. σχήμα 2.23,2.24).



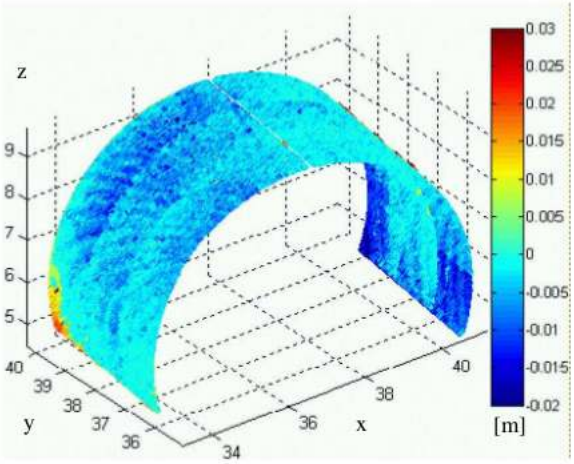
Σχήμα 2.23: Χωρισμός σε τμήματα ενός φράγματος [29]



Σχήμα 2.24: Ανάλυση παραμορφώσεων στο φράγμα. Για περισσότερες πληροφορίες βλ. [29]

Ακόμα ο [66] χρησιμοποιεί ως μοντέλο ένα κύλινδρο για να ανιχνεύσει παραμορφώσεις σε ένα τούνελ, ενώ ο [3] ακολουθεί παρόμοια μεθοδολογία προσαρμόζοντας τρισδιάστατες πολυωνυμικές επιφάνειες στην επιφάνεια ενός φράγματος (βλ. σχήμα 2.25).

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τύπου της μεθόδου είναι η υψηλή ποιότητα των παραμέτρων παραμόρφωσης που προκύπτουν. Ένας περιορισμός των μεθόδων αυτών έχει σχέση με την ανάγκη να στηρίζονται σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο επιφάνειας, το οποίο εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής [65]. Με αυτή τη μέθοδο



Σχήμα 2.25: Παραμορφώσεις που προκύπτουν από προσαρμογή κυλίνδρου. Για περισσότερες πληροφορίες βλ. [66]

είναι δυνατόν να ανιχνευθούν παραμορφώσεις της τάξης των χιλιοστών.

Μια ιδιαίτερη κατηγορία μοντέλων για την ανίχνευση παραμορφώσεων περιγράφεται στο [21], όπου κάνουν χρήση ενός φυσικού μοντέλου που αντιπροσωπεύει την παραμόρφωση ενός φορτισμένου δοκαριού. Σε αυτή την δημοσίευση είναι δυνατή η ανίχνευση πολύ μικρών παραμορφώσεων. Ένας περιορισμός όμως της μεθόδου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ιδιαίτερες περιπτώσεις ανάλυσης παραμορφώσεων.

Σε γενικές γραμμές, οι επίγειοι σαρωτές είναι κατάλληλοι για την ανίχνευση παραμορφώσεων της τάξης χιλιοστών. Ο [24] περιγράφει την παρακολούθηση παραμορφώσεων στην γέφυρα Felsenau στην οποία οι επίγειοι σαρωτές μπόρεσαν να αντικαταστήσουν τις μετρήσεις σχετικών υψομέτρων. Επομένως, οι επίγειοι σαρωτές μπορούν να συμπληρώσουν με μεγάλη επιτυχία τις παραδοσιακές μετρήσεις αλλά ακόμα δεν μπορούν να τις αντικαταστήσουν πλήρως [24].

2.6.3 Ανίχνευση αλλαγών με την χρήση octree

Μια πρωτότυπη μεθοδολογία περιγράφεται στα [20, 14], η οποία όμως επικεντρώνεται στην ανίχνευση αλλαγών σε εργοτάξια ή σε εγκαταστάσεις στο εσωτερικό κτηρίων. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιούνται τα octree (βλ. κεφ. 2.5.2) για την αποθήκευση των νεφών σημείων, καθώς και διαφορετικές μεθοδολογίες για την σύγκριση των νεφών.

Τα νέφη σημείων που παράγονται από την κάθε σάρωση αποθηκεύονται σε octrees που έχουν κοινό σύστημα αναφοράς, με αποτέλεσμα τα σημεία που βρίσκονται στους κύβους των octree να είναι συγκρίσιμα. Οπότε μια γρήγορη επισκόπηση των τυχών αλλαγών που μπορεί να έχουν συμβεί στα νέφη σημείων μπορεί να προκύψει συγκρίνοντας τις αποστάσεις των σημείων τα οποία βρίσκονται μέσα στους ίδιους κόμβους του octree. Διαφορές μεταξύ των νεφών οι οποίες είναι πάνω από το επίπεδο θορύβου του σαρωτή υποδηλώνουν αλλαγές [31, σελ. 245].

Η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι χρήσιμη για όλες τις εφαρμογές που περιέχουν σύνθετα περιβάλλοντα, και όπου η ταχύτητα της ανάλυσης των δεδομένων διαδραματίζει έναν κρίσιμο ρόλο. Ο κύριος περιορισμός αυτής της προσέγγισης είναι η περιορισμένη ακρίβεια των παραμορφώσεων [35].

2.6.4 Ανάλυση κατολισθήσεων

Η κατολίσθηση είναι μία καταστροφή που προσομοιάζει με την χιονοστιβάδα, όμως αντί να συμβαίνει με ολίσθηση χιονιού, συμβαίνει περιλαμβάνοντας τα πραγματικά στοιχεία του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων βράχων, δέντρων, χώματος και γενικότερα οποιουδήποτε συστατικού μπορεί να παρασυρθεί. Η εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων αποτελεί απόρροια ελλιπούς ευστάθειας των πρανών έναντι στατικών και σεισμικών φορτίων. Ένα πρανές μπορεί να αστοχήσει υπό την επίδραση γεωλογικών, μορφολογικών, φυσικών ή ανθρωπογενών παραγόντων, όπως είναι οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις ή η γενική αστάθεια του εδάφους [86].

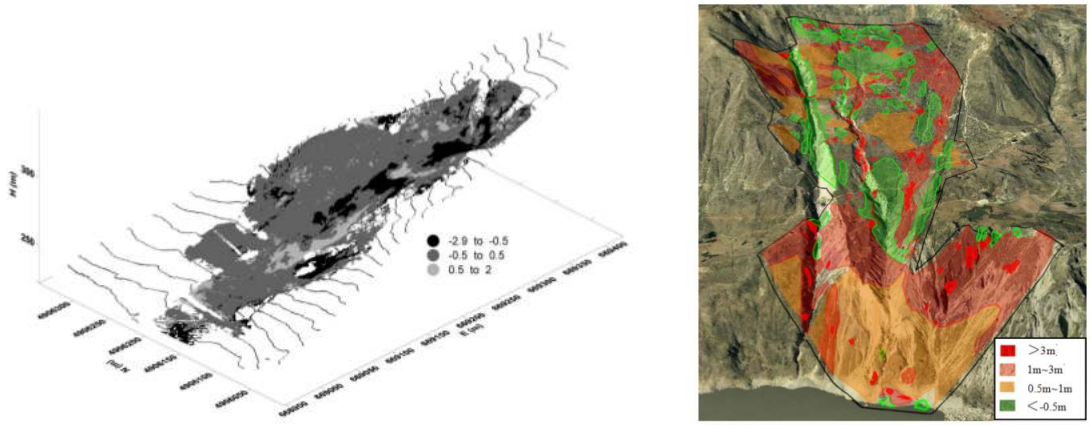
Οι κατολισθήσεις αποτελούν ένα σημαντικό φυσικό κίνδυνο που απειλεί τους κατοίκους των ορεινών περιοχών. Η αύξηση του πληθυσμού έχει οδηγήσει την επέκταση των κατοικημένων περιοχών σε δυνητικά επικίνδυνες περιοχές και οδηγεί σε σημαντική αύξηση των πιθανών ζημιών σε περίπτωση καταστροφής.

Επομένως η μέτρηση των παραμορφώσεων σε πλαγιές είναι πολύ σημαντική για την δημιουργία μηχανισμών προειδοποίησης των κατοίκων. Συγκεκριμένα, θα πρέπει οι μηχανισμοί αυτοί να είναι σε θέση να εκτιμούν τις τάσεις των παραμορφώσεων καθώς και να προβλέπουν με επιτυχία της κατολισθήσεις. Αυτές οι πληροφορίες είναι χρήσιμες για τον σχεδιασμό μηχανισμών που θα μειώνουν τον κίνδυνο [61].

Όπως παρουσιάστηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια οι επίγειοι σαρωτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε μία πλειάδα γεωδαιτικών εφαρμογών. Το κύριο πλεονέκτημα τους είναι ότι σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές της γεωδαισίας μπορούν να αποτυπώσουν μεγάλες σε έκταση περιοχές σε μικρό χρονικό διάστημα με μεγάλη λεπτομέρεια. Επομένως μπορεί να υπάρξει μια πλήρης αναπαράσταση της προς αποτύπωση επιφάνειας. Αυτό καθιστά κατάλληλους τους επίγειους σαρωτές για την ανάλυση των παραμορφώσεων μιας και επιτρέπει την παρακολούθηση κατολισθήσεων που η συμπεριφορά τους είναι άγνωστη. Αυτά τα πλεονεκτήματα έχουν οδηγήσει σε μία σειρά από ερευνητικές προσπάθειες [10, 2, 37, 61, 4, 44, 13, 27] για την πλήρη αξιοποίηση των σαρωτών στο τομέα της ανίχνευσης των κατολισθήσεων.

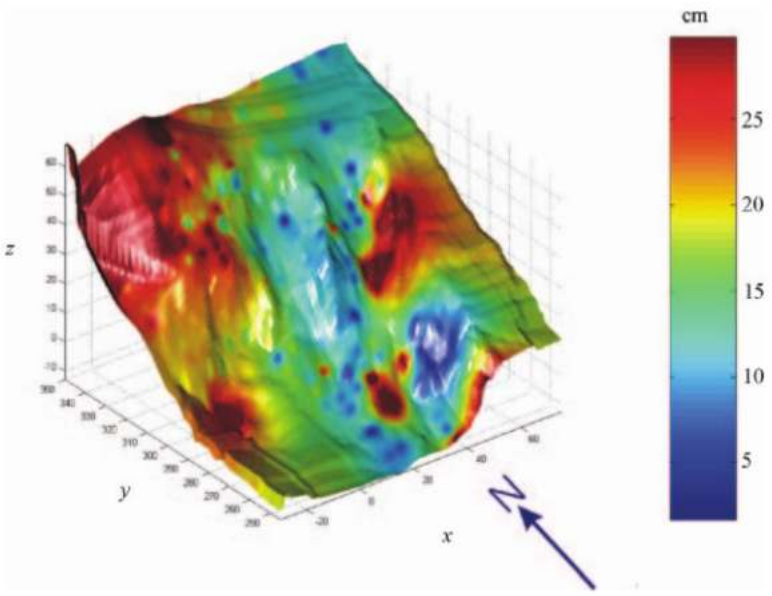
Για παράδειγμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι [10, 37] χρησιμοποιούν ψηφιακά μοντέλα εδάφους για την ανάλυση κατολισθήσεων (βλ. σχήμα 2.26).

Ακόμα, ο [61] περιγράφει μία μεθοδολογία για την ανίχνευση παραμορφώσεων σε πλαγιές με την χρήση του ICP (βλ. κεφ. 2.5.6). Η περιοχή προς μελέτη χωρίζεται σε υποπε-



Σχήμα 2.26: Ανάλυση κατολισθήσεων από ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Για περισσότερες πληροφορίες βλ. [10, 37]

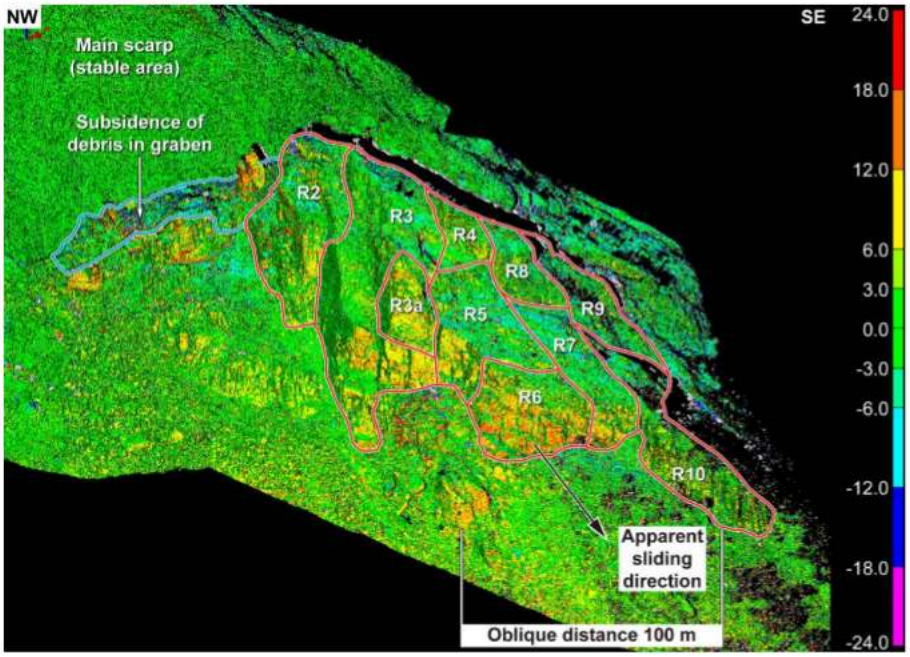
ριοχές και σε κάθε υποπεριοχή εφαρμόζεται ο ICP, ο οποίος παρέχει την στροφή και την μετάθεση του νέφους, με αποτέλεσμα να είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραμορφώσεων της πλαγιάς. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτή είναι ότι ο ICP δεν επηρεάζεται εύκολα από τον θόρυβο στις μετρήσεις, όπως η μικρές μορφολογικές αλλαγές στο έδαφος με αποτέλεσμα να δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα. Στο [61] ήταν δυνατή η ανίχνευση μικρομετακινήσεων της τάξης των λίγων εκατοστών.



Σχήμα 2.27: Παραμορφώσεις σε πλαγιά βουνού όπως προέκυψαν από τοπική χρήση του αλγόριθμου ICP. Για περισσότερες πληροφορίες βλ. [61]

Στα [44, 22] περιγράφονται παρόμοιες μεθοδολογίες με την προηγούμενη οι οποίες πάλι χρησιμοποιούν τον ICP για να υπολογίσουν τις παραμορφώσεις. Ακόμα στο [44] περιγράφεται ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα (βλ. κεφ. 3.3 και σχήμα 2.28).

Σε γενικές γραμμές, οι επίγειοι σαρωτές είναι κατάλληλοι για την ανάλυση κατολισθή-



Σχήμα 2.28: Σύγκριση νεφών σημείων με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα. Για περισσότερες πληροφορίες βλ. [44]

σεων. Στο [10] δείχθηκε ότι είναι δυνατόν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές τεχνικές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ανίχνευση παραμορφώσεων από νέφη σημείων

3.1 Εισαγωγή

Τα νέφη σημείων είναι μία από τις πιο θεμελιώδεις και ανεπεξέργαστες μορφές αναπαράστασης τρισδιάστατων δεδομένων. Οι σαρωτές προσφέρουν πρωτογενή δεδομένα υπό τη μορφή (θορυβωδών) ανοργάνωτων νεφών σημείων που αναπαριστούν επιφάνειες. Με την αυξανόμενη δημοφιλία και τις εκτεταμένες εφαρμογές αυτής της πηγής δεδομένων, είναι φυσικό και σημαντικό η απευθείας επεξεργασία, χωρίς να χρειάζεται η προσφυγή σε ενδιάμεσα στάδια, όπως η προσαρμογή μιας επιφάνειας (ένα βήμα που μπορεί να προσθέσει υπολογιστική πολυπλοκότητα και να εισάγει λάθη) [34].

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία για τον εντοπισμό των παραμορφώσεων σε αντικείμενα τα οποία είναι σαρωμένα σε τουλάχιστον δύο περιόδους μετρήσεων από επίγειους σαρωτές. Ακόμα παρουσιάζεται η υλοποίηση των μεθοδολογιών αυτών.

3.2 Συνένωση νεφών σε κοινό σύστημα αναφοράς

Έστω ότι υπάρχουν δύο νέφη σημείων που αποκτήθηκαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Σε διαφορετικές περιόδους μέτρησης, η θέση και προσανατολισμός των σαρώσεων δεν είναι ίδια. Κάθε νέφος σημείων έχει το δικό του τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Για να είναι δυνατή η μέτρηση των παραμορφώσεων από τις δύο περιόδους μέτρησης θα πρέπει τα δύο νέφη να γεωαναφερθούν στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται με την συνένωση τους σε κοινό σύστημα αναφοράς (αγγλ. co-registration ή global matching).

Έστω ότι το πρώτο νέφος είναι το ”νέφος αναφοράς” και το δεύτερο νέφος είναι το ”συγκρινόμενο νέφος”, τότε το μόνο που χρειάζεται για να γεωανφερθούν τα δύο νέφη

στο ίδιο σύστημα αναφοράς είναι ο υπολογισμός των 6 παραμέτρων μετασχηματισμού - 3 γωνιών, και 3 μεταθέσεων (βλ. αναλυτικά κεφάλαιο 2.5.4). Άμα υπάρχουν περισσότερες από δύο περίοδοι μετρήσεων τότε ακολουθείται η ίδια διαδικασία θεωρώντας κάθε φορά δύο εξ' αυτών ως νέφος αναφοράς και ως συγκρινόμενο νέφος.

Η συνένωση των νεφών είναι ένα από τα πιο κρίσιμα στάδια της διαδικασίας ανίχνευσης παραμορφώσεων. Όπως είναι φυσικό, η συνένωση των νεφών και τα όποια σφάλματα προκύπτουν από αυτή την διαδικασία μπορούν να επηρεάσουν την διαδικασία ανίχνευσης παραμορφώσεων και μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες ενδείξεις. Μία λάθος συνένωση μπορεί να οδηγήσει σε συστηματικά λάθη, που μπορεί να κάνει αδύνατον την εύρεση τυχόν παραμορφώσεων. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να πραγματοποιούνται έλεγχοι για την εύρεση της ποιότητας των εκτιμώμενων παραμέτρων [36, 62].

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι αυτόματες μέθοδοι συνένωσης των νεφών, και κυρίως αυτές που βασίζονται στον αλγόριθμο ICP δεν μπορούν να συγκλίνουν σε σωστή λύση με πολύ διαφορετικά νέφη σημείων. Οι τυχόν παραμορφώσεις που υπάρχουν στα νέφη σημείων δεν θα πρέπει να ξεπερνούν το 10% του συνολικού νέφους, διότι σε διαφορετική περίπτωση οι αλγόριθμοι συνένωσης αποτυγχάνουν. Αν ισχύει κάτι τέτοιο τότε θα πρέπει να συνενωθούν τα νέφη χωρίς να ληφθούν υπόψιν οι περιοχές των παραμορφώσεων. Σαν μία πρώτη προσέγγιση, μπορεί να θεωρηθεί ένα όριο απόστασης και κατά την διάρκεια εκτέλεσης του ICP να εξετάζονται μόνο τα σημεία τα οποία η απόσταση τους από το αντίστοιχο σημείο στο νέφος αναφοράς δεν ξεπερνά την απόσταση αυτή. Άμα υπάρχουν αρκετά σημεία τα οποία τηρούν το κριτήριο αυτό και είναι διασκορπισμένα στο σύνολο του νέφους τότε η επαναληπτική διαδικασία του ICP θα συγκλίνει και θα δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα[14].

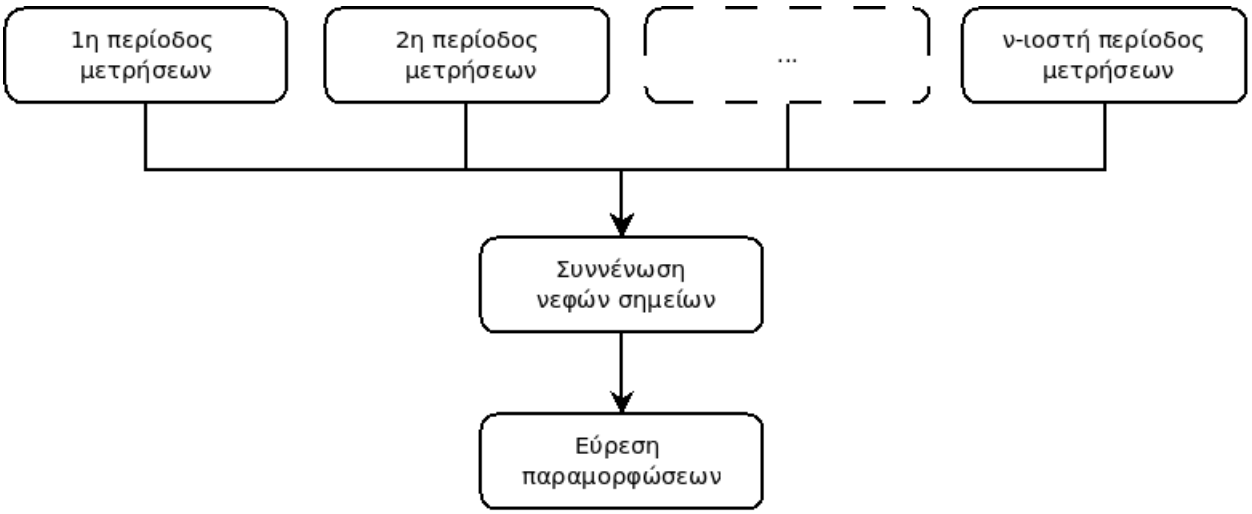
Το παρόν κεφάλαιο δεν θα ασχοληθεί με το θέμα της συνένωσης, μιας και έχουν γραφτεί πολλές εργασίες που αφορούν το θέμα και πως επιτυγχάνεται, και θα θεωρεί από δω και πλέον ότι όλα τα νέφη που συγκρίνονται βρίσκονται στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων.

Άρα η διαδικασία που ακολουθείται για την ανίχνευση των παραμορφώσεων από νέφη σημείων φαίνεται στο διάγραμμα ροής στο σχήμα 3.1.

Πιο συγκεκριμένα η εύρεση παραμορφώσεων μπορεί να χωριστεί σε δύο μεγάλες διεργασίες. Στην εύρεση αντιστοιχίας μεταξύ των σημείων των δύο νεφών και έπειτα τον υπολογισμό των παραμορφώσεων (σχ. 3.2).

3.3 Αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα

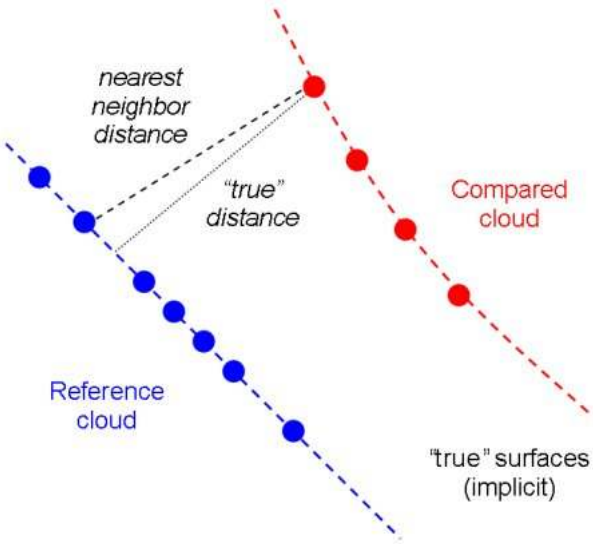
Ο πιο απλός τρόπος για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων ανάμεσα σε δύο νέφη είναι ο αλγόριθμος του "εγγύτερου" γείτονα. Για κάθε σημείο στο νέφος το οποίο συγκρίνουμε $(X_{i,comp}, Y_{i,comp}, Z_{i,comp})$ βρίσκουμε τον κοντινότερο σημείο στο νέφος αναφοράς $(X_{i,ref}, Y_{i,ref}, Z_{i,ref})$ και έπειτα υπολογίζουμε την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των δύο



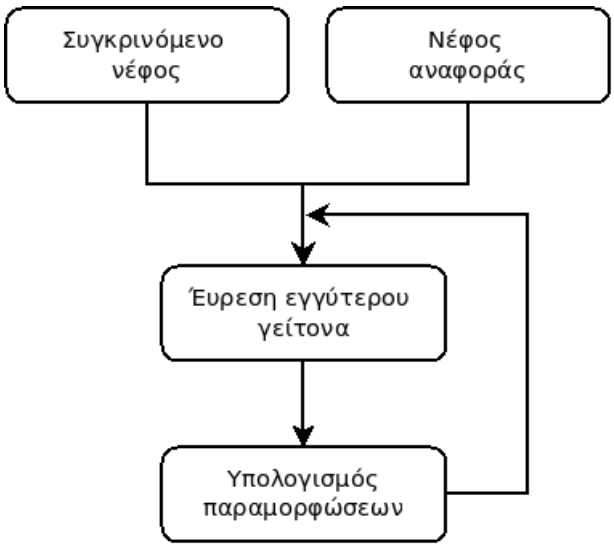
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής για την ανίχνευση παραμορφώσεων.

Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής για την ανίχνευση παραμορφώσεων.

σημείων (σχ. 3.3, 3.4).



Σχήμα 3.3: Η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του εγγύτερου γείτονα σε δύο νέφη σημείων [67]



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα

Άρα έχουμε:

$$v_i = \begin{pmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{i,ref} \\ Y_{i,ref} \\ Z_{i,ref} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_{i,comp} \\ Y_{i,comp} \\ Z_{i,comp} \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

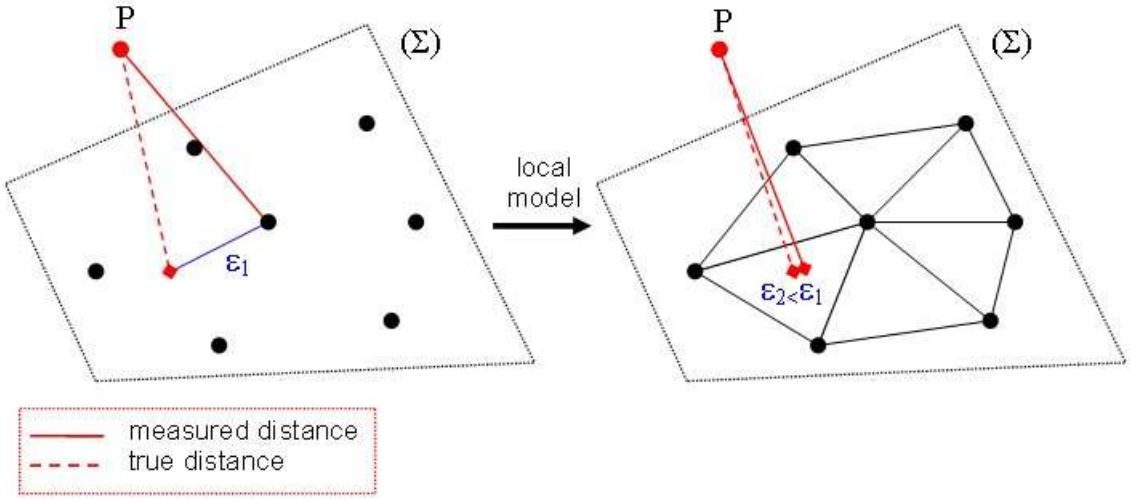
Αν το νέφος αναφοράς έχει μεγάλη πυκνότητα σημείων τότε η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των σημείων μπορεί να θεωρηθεί ίση με την "πραγματική" απόσταση. Όμως όταν δεν είναι αρκετά πυκνό το νέφος αναφοράς τότε ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα δεν είναι αρκετά ακριβής.

3.4 Αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας

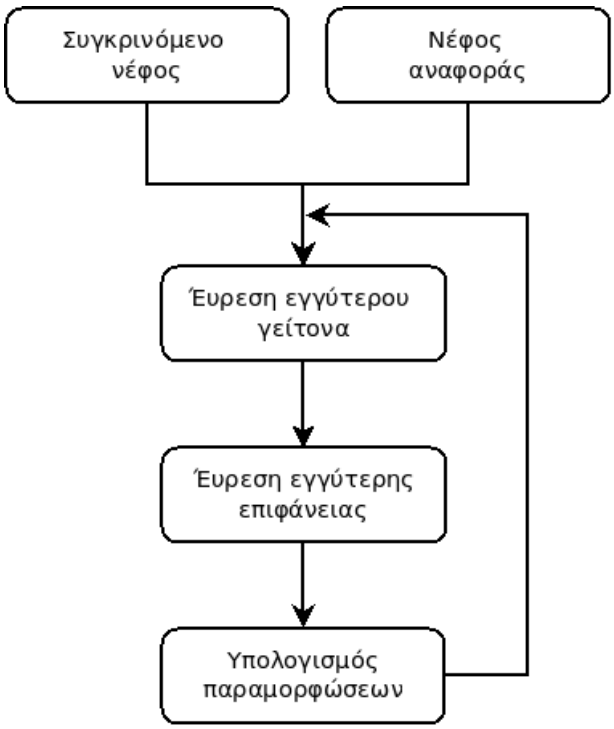
Όπως ήδη αναφέρθηκε αν το νέφος αναφοράς είναι αρκετά πυκνό, η επιφάνεια του συγκρινόμενου νέφους προσεγγίζεται από τα σημεία του νέφους ικανοποιητικά. Όταν όμως το νέφος αναφοράς δεν είναι αρκετά πυκνό, τότε η προσέγγιση του εγγύτερου σημείου δεν είναι αρκετά ικανοποιητική. Γι' αυτό το λόγο, είναι απαραίτητο να παραχθεί ένα καλύτερο μοντέλο της επιφάνειας. Γι' αυτό το λόγο αντί να συγκρίνουμε απ' ευθείας τα σημεία μπορούμε να συγκρίνουμε τα σημεία με μία τοπική επιφάνεια που δημιουργείται από ένα αριθμό εγγύτερων σημείων (σχ. 3.5).

Έπειτα υπολογίζεται η απόσταση από κάθε σημείο του νέφους το οποίο συγκρίνεται όχι με το εγγύτερο του σημείο, αλλά με την προβολή του από την επιφάνεια που έχει προκύψει.

Στατιστικώς αυτή η μεθοδολογία είναι πιο ακριβής και δεν εξαρτάται τόσο από την πυκνότητα του νέφους, όμως μερικές φορές μπορεί να παράγει περίεργα αποτελέσματα,



Σχήμα 3.5: Η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ της εγγύτερης επιφάνειας σε δύο νέφη σημείων [67]



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας

καθώς η μοντελοποίηση του νέφους είναι περιορισμένη (μιας και προκύπτει τοπικά από μικρο αριθμό σημείων και έτσι θα παραμείνουν μικρά λάθη, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για καμπύλες ή γωνιακές επιφάνειες [14]), αλλά εν γένει δίνει καλύτερα αποτελέσματα στο σύνολο [67].

Η μαθηματική επιφάνεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι οποιαδήποτε. Ο μόνος ανασταλτικός παράγοντας στην επιλογή είναι ο υπολογιστικός χρόνος που καταναλώνεται για τον υπολογισμό της μαθηματικής επιφάνειας. Έτσι οι μαθηματικές επιφάνειες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν καλό θα ήταν να είναι απλές όπως η προσαρμογή ενός επίπεδου ή κάποιου χαμηλού βαθμού (π.χ. 2ου βαθμού) πολυωνυμική συνάρτηση.

3.5 Αλγόριθμός του εγγύτερου κάθετου διανύσματος

Στην αρχική τους μορφή, τα σημεία αναπαριστώνται χρησιμοποιώντας τις τρισδιάστατες καρτεσιανές τους συντεταγμένες (x, y, z) σε σχέση με ένα σύστημα αναφοράς. Αν υποθέσουμε ότι το σύστημα αναφοράς παραμένει αναλλοίωτο με το πέρας του χρόνου, μπορεί να υπάρχουν δύο σημεία p_1 και p_2 που αποκτήθηκαν σε δύο διαφορετικές περιόδους μετρήσεων t_1 και t_2 τα οποία να έχουν τις ίδιες συντεταγμένες. Όμως η σύγκριση τους δεν είναι απόλυτα σωστή, μιας και παρόλο που μπορεί να έχουν ίδιες συντεταγμένες μπορεί να βρίσκονται εξ' ολοκλήρου σε διαφορετικές επιφάνειες, και όταν λαμβάνονται και τα σημεία γύρω τους να αντιπροσωπεύουν κάτι εντελώς διαφορετικό [52, σελ. 37].

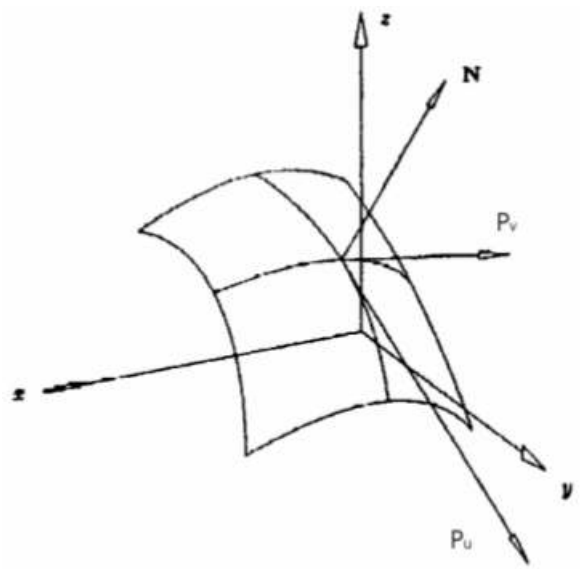
Οι εφαρμογές που χρειάζονται να συγκρίνουν τα σημεία, όπως π.χ. για την ανίχνευση παραμορφώσεων, χρειάζονται καλύτερα στοιχεία εκτός των καρτεσιανών συντεταγμένων. Η έννοια του τρισδιάστατου σημείου ως μοναδική οντότητα που μπορεί να οριστεί από τις καρτεσιανές του συντεταγμένες εξαφανίζεται και την θέση του παίρνει το σημείο με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του [52, σελ. 37].

Ένα από αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι και το κάθετο διάνυσμα. Το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια σε ένα σημείο, είναι το διάνυσμα που είναι κάθετο προς τα δύο εφαπτόμενα διανύσματα της επιφάνειας στο σημείο αυτό. Συνεπώς, ορίζεται από το εξωτερικό γινόμενο των δύο εφαπτόμενων διανυσμάτων (βλ. σχήμα 3.7) [93]:

$$N(u, v) = \frac{\partial P}{\partial u} \times \frac{\partial P}{\partial v} = P_u \times P_v \tag{3.2}$$

Ωστόσο, δεδομένου ότι τα νέφη σημείων αντιπροσωπεύουν ένα σύνολο δειγμάτων της πραγματικής επιφάνειας υπάρχουν δύο δυνατότητες για τον υπολογισμό των κάθετων διανυσμάτων [47]:

- Εύρεση της πραγματικής επιφάνειας, χρησιμοποιώντας τεχνικές meshing, και μετά



Σχήμα 3.7: Το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια [93]

υπολογίζονται οι κάθετοι.

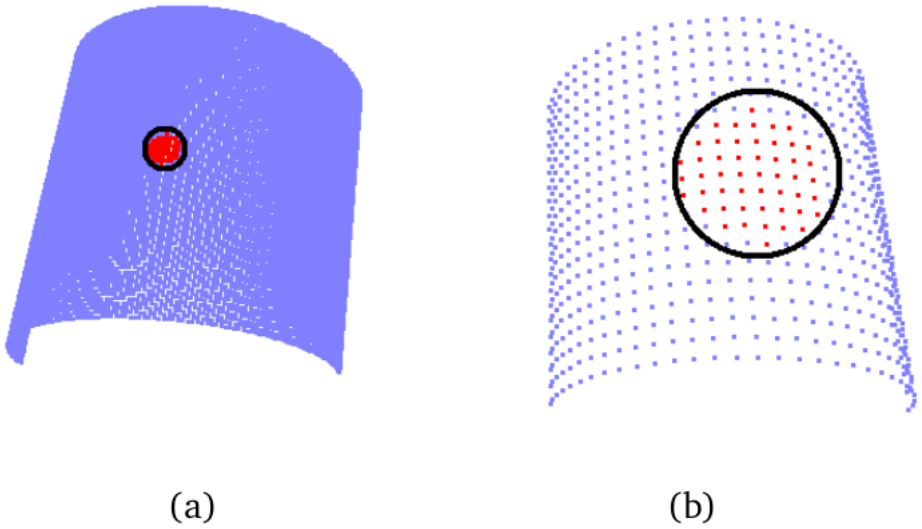
- Χρησιμοποιούνται προσεγγίσεις για να εξαχθούν απ' ευθείας οι κάθετοι.

Συνήθως χρησιμοποιούνται προσεγγίσεις διότι είναι υπολογιστικά πιο γρήγορο και η πιο συνηθισμένη προσέγγιση που χρησιμοποιείται είναι ο υπολογισμός της καθέτου από το εφαπτόμενο επίπεδο στο σημείο, το οποίο με την σειρά του ανάγεται στον ελαχιστοτετραγωνικό υπολογισμό του επιπέδου [47].

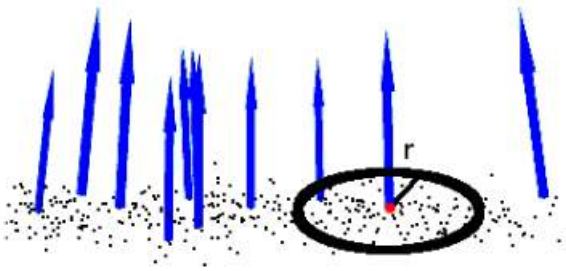
Το κάθετο διάνυσμα υπολογίζεται με την προσαρμογή ενός επιπέδου σε έναν συγκεκριμένο αριθμό εγγύτερων σημείων (βλ. σχήμα 3.8,3.9). Ο αριθμός των εγγύτερων σημείων μπορεί να προσδιοριστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

Κ πλησιέστεροι γείτονες (ΚΠΓ): Σε αυτή την μέθοδο για ένα δεδομένο σημείο επιλέγονται τα k σημεία από το νέφος σημείων που έχουν την μικρότερη απόσταση από το δεδομένο σημείο [60, σελ. 31-32].
Καθώς ο αριθμός των σημείων k είναι σταθερός, η μέθοδος προσαρμόζει την περιοχή ενδιαφέροντος σύμφωνα με την πυκνότητα των σημείων (βλ. σχήμα 3.8). Επιπλέον, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί πάντα ένα δεδομένο αριθμό σημείων και αποφεύγει με αυτό τον τρόπο εκφυλισμένες περιπτώσεις (π.χ. ένα σημείο που δεν έχει γείτονες) [60, σελ. 31-32].

Γείτονες που απέχουν σταθερή απόσταση (ΓΣΑ): Αυτή η μέθοδος, για κάθε δεδομένο σημείο χρησιμοποιεί μία συγκεκριμένη και σταθερή περιοχή ενδιαφέροντος και επιλέγει όλα τα σημεία εντός της περιοχής αυτής (βλ. σχήμα 3.9). Με αυτή τη μέθοδο ο αριθμός των σημείων αλλάζει ανάλογα με την πυκνότητα του νέφους σημείων και δεν προσαρμόζεται όπως στην προηγούμενη μέθοδο. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για νέφη σημείων των οποίων η πυκνότητα δεν αλλάζει πολύ από περιοχή σε περιοχή [60, σελ. 31-32].

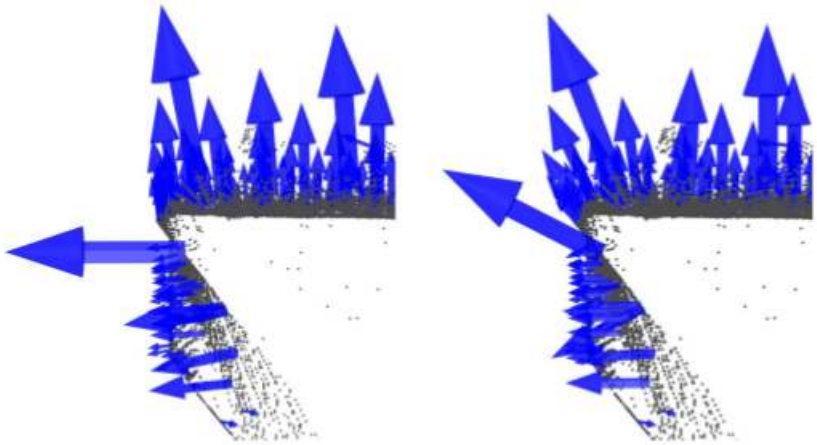


Σχήμα 3.8: Επιλογή k πλησιέστερων γειτόνων σε a) υψηλής πυκνότητας νέφος σημείου b) χαμηλής πυκνότητας νέφος σημείου [60, σελ. 33]



Σχήμα 3.9: Παράδειγμα αναζήτησης εγγύτερων σημείων με βάση την απόσταση r για τον προσδιορισμό του κάθετου διανύσματος [52, σελ. 41]

Επομένως έχοντας διαλέξει τον αριθμό των εγγύτερων γειτόνων είναι δυνατόν να προσαρμοστεί ένα επίπεδο σε αυτά τα σημεία και να υπολογιστεί έπειτα το κάθετο διάνυσμα (για αναλυτική μαθηματική λύση του προβλήματος βλ. [60, σελ. 32-34] και [52, σελ. 45-49]).
Σε γενικές γραμμές, δεν είναι σαφές πως θα πρέπει κάποιος να επιλέξει τον βέλτιστο αριθμό εγγύτερων σημείων όταν υπολογίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Εάν το νέφος σημείων είναι αρκετά θορυβώδες, επιλέγοντας μικρό αριθμό γειτόνων οδηγεί σε μεγάλα σφάλματα κατά την εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Αντιθέτως, αν ο αριθμός των εγγύτερων γειτόνων είναι πολύ μεγάλος, μικρές λεπτομέρειες δεν θα είναι εμφανείς (βλ. σχήμα 3.10).



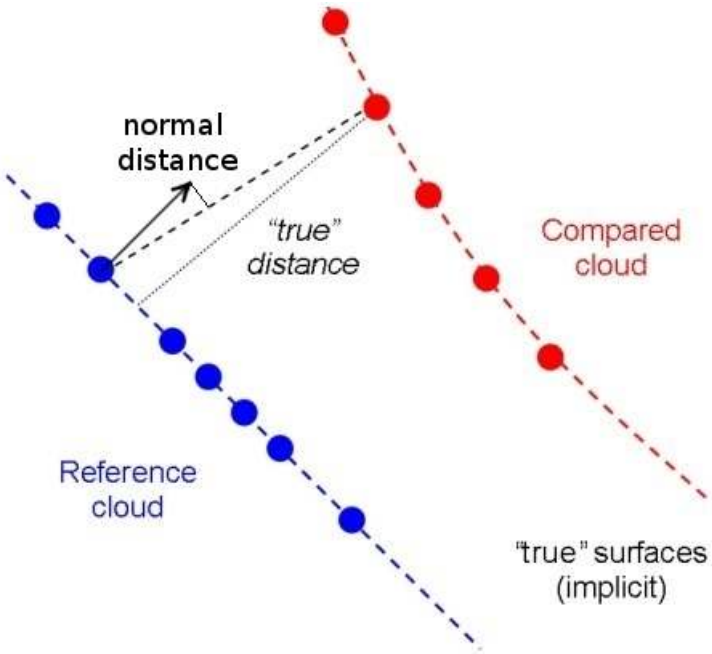
Σχήμα 3.10: Παράδειγμα υπολογισμού των καθέτων διανυσμάτων χρησιμοποιώντας α) σωστό αριθμό εγγύτερων σημείων(αριστερά), β) λάθος αριθμό εγγυτέρων σημείων (δεξία) [52, σελ. 41]

Άρα για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων, υπολογίζεται για κάθε σημείο στο νέφος αναφοράς το κάθετο διάνυσμα στο σημείο, καθώς και τους k εγγύτερους γείτονες στο συγκρινόμενο νέφος. Ανάμεσα σε αυτούς τους k εγγύτερους γείτονες, το σημείο το οποίο έχει την μικρότερη απόσταση στην κάθετο θεωρείται ως το σημείο που αντιστοιχεί στο νέφος αναφοράς (βλ. σχήμα 3.11).

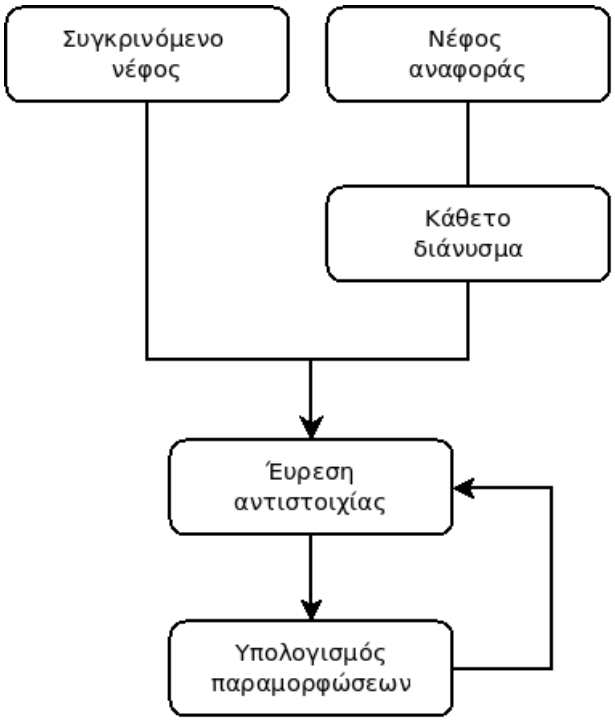
3.6 Σύγκριση επιφανειών

Μια εναλλακτική λύση για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων, που επωφελείται πλήρως από την πυκνότητα των μετρήσεων που παράγουν οι επίγειοι σαρωτές είναι η μοντελοποίηση της επιφανείας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.6.2 τα νέφη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενός μοντέλου της επιφάνειας και επομένως η ανίχνευση των παραμορφώσεων μπορεί να γίνει συγκρίνοντας μοντέλα. Η διαφορά με τις μεθοδολογίες που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.6.2 είναι ότι δεν χρειάζεται η ύπαρξη κάποιου συγκεκριμένου μαθηματικού μοντέλου.

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στην παρακάτω ενότητα αναφέρεται καθαρά βιβλιο-



Σχήμα 3.11: Η απόσταση από το κάθετο διάνυσμα



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο του καθέτου διανύσματος

γραφικά και δεν θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω, αφού κατ' ουσίαν ξεφεύγει από το θέμα της διπλωματικής που είναι η ανίχνευση παραμορφώσεων από νέφη σημείων. Σε αυτή την ενότητα τα νέφη χρησιμοποιούνται για να παραχθεί το μαθηματικό μοντέλο μιας επιφάνειας το οποίο έπειτα χρησιμοποιείται για την εύρεση των παραμορφώσεων.

Για να είναι δυνατή η ανίχνευση παραμορφώσεων με σύγκριση επιφανειών απαιτείται πρώτα η ανοικοδόμηση των επιφανειών πριν από την σύγκριση τους. Δεδομένου ότι τα νέφη σημείων αντιπροσωπεύουν ένα σύνολο δειγμάτων της πραγματικής επιφάνειας για να είναι δυνατή η ανοικοδόμηση της επιφάνειας δημιουργείται ένα μοντέλο S' από το νέφος σημείων που προσεγγίζει την πραγματική επιφάνεια S. Η ανοικοδόμηση της επιφάνειας δεν μπορεί να εγγυηθεί την ακριβή ανάκτηση της επιφάνειας S, επειδή οι πληροφορίες σχετικά με την επιφάνεια είναι μέσα από ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων. Είναι φανερό λοιπόν ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα της πληροφορίας τόσο η επιφάνεια του μοντέλου S' συγκλίνει στην πραγματική επιφάνεια S [63].

Γενικά, η ανοικοδόμηση της επιφάνειας είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα επειδή τα μετρημένα σημεία στα νέφη είναι ανοργάνωτα και περιέχουν αρκετό θόρυβο. Ακόμα οι επιφάνειες οι οποίες μετρούνται μπορεί να μην περιέχουν κάποιες χαρακτηριστικές γεωμετρικές ιδιότητες, οι οποίες να βοηθούν στην εξαγωγή πληροφοριών. Σε γενικές γραμμές όμως, όλες οι μέθοδοι ανοικοδόμησης των επιφανειών περιέχουν 4 βασικά στάδια [63]:

Προ-επεξεργασία των μετρήσεων: Σε αυτό το στάδιο απαλείφονται τυχόν λάθη και θορυβώδεις μετρήσεις.

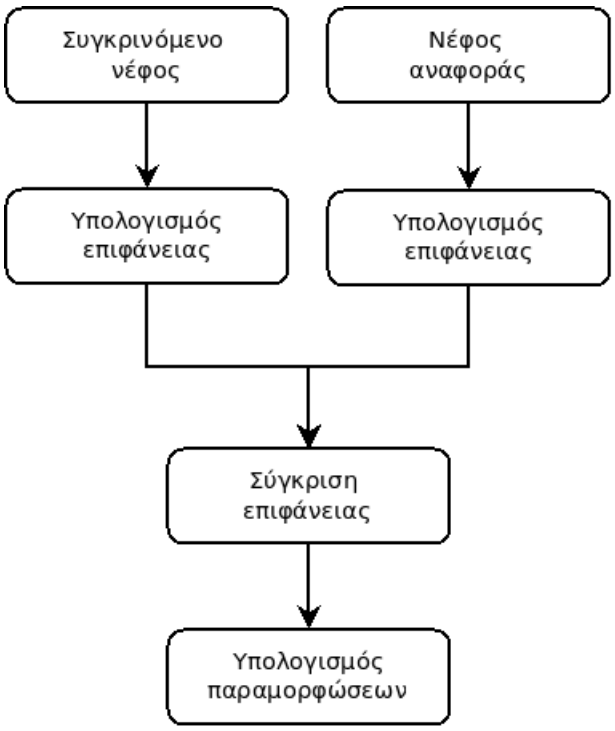
Εύρεση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας: Σε αυτό το στάδιο καθορίζονται οι ιδιότητες της επιφάνειας και χρησιμοποιούνται για την βελτίωση του τελικού αποτελέσματος.

Δημιουργία της πολυγωνικής επιφάνειας: Δημιουργία πολυγωνικής επιφάνειας όπως τα mesh.

Μετεπεξεργασία: Σε αυτό το στάδιο βελτιστοποιείται το παραχθέν μοντέλο της επιφάνειας.

Στο [17] αναλύονται λεπτομερώς όλα τα στάδια της ανοικοδόμησης των επιφανειών. Αφού παραχθούν οι επιφάνειες από τα δύο νέφη τότε είναι δυνατή η σύγκριση τους. Για αναλυτική λύση του προβλήματος της σύγκρισης βλέπε [5, 12] (βλ. σχήμα 3.13).

Εναλλακτικά μπορεί να συγκριθεί μια επιφάνεια με ένα νέφος σημείων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση αντί να μοντελοποιηθούν και τα δύο νέφη σημείων, μοντελοποιείται μόνο το ένα και έπειτα τα άλλο χρησιμοποιείται απ' ευθείας και συγκρίνεται με το υπάρχον μοντέλο.



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα ροής για την σύγκριση επιφανειών από νέφη σημείων

3.7 Αλγόριθμός σύγκρισης με βάση τον ICP

Από την βιβλιογραφία, είναι προφανές ότι οι υπάρχουσες μέθοδοι για την ανίχνευση παραμορφώσεων βασίζονται είτε σε τεχνικές επεξεργασίας των σημείων είτε σε τεχνικές που αναδομούν την επιφάνεια από τα νέφη σημείων.

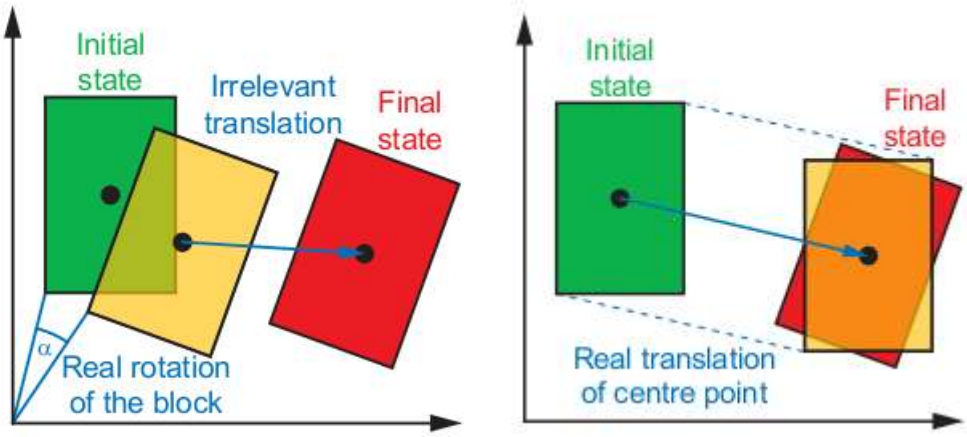
Μια ενδιάμεση τεχνική είναι η χρησιμοποίηση των τεχνικών συνένωσης των νεφών, όπως ο αλγόριθμος ICP, για την ανίχνευση των παραμορφώσεων. Η ιδέα πίσω από την προτεινόμενη προσέγγιση είναι η χρησιμοποίηση του πίνακα στροφής και του διανύσματος μετάθεσης που προκύπτουν από τους αλγόριθμους συνένωσης.

Για τον εντοπισμό των παραμορφώσεων, η περιοχή ενδιαφέροντος τμηματοποιείται σε μικρότερες περιοχές με βάση κάποια μεθοδολογία (π.χ. χρήση των octree) και ύστερα στα σημεία της κάθε υπο-περιοχής εφαρμόζεται ο αλγόριθμος συνένωσης. Παρόμοιες μεθοδολογίες έχουν ήδη αναπτυχθεί από τους [22, 61, 44].

Στην προτεινόμενη μεθοδολογία (βλ. σχήμα 3.15) χρησιμοποιείται ένα octree το οποίο τμηματοποιεί το συγκρινόμενο νέφος σε κυβικές περιοχές που έχουν συγκεκριμένο μέγεθος. Στα σημεία τα οποία βρίσκονται μέσα στον κύβο εφαρμόζεται ο ICP. Ο μετασχηματισμός που εφαρμόζει ο ICP μπορεί να εκφραστεί με έναν 4x4 πίνακα, ο οποίος περιέ-

χει τα στοιχεία στροφής (R) και μετάθεσης (t) (βλ. εξίσωση (3.3) και σχ. 3.14).

$$M_{tot} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0_{1x3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$



(α') Η στροφή που προκύπτει από τον ICP

(β') Η μετάθεση που προκύπτει από τον ICP

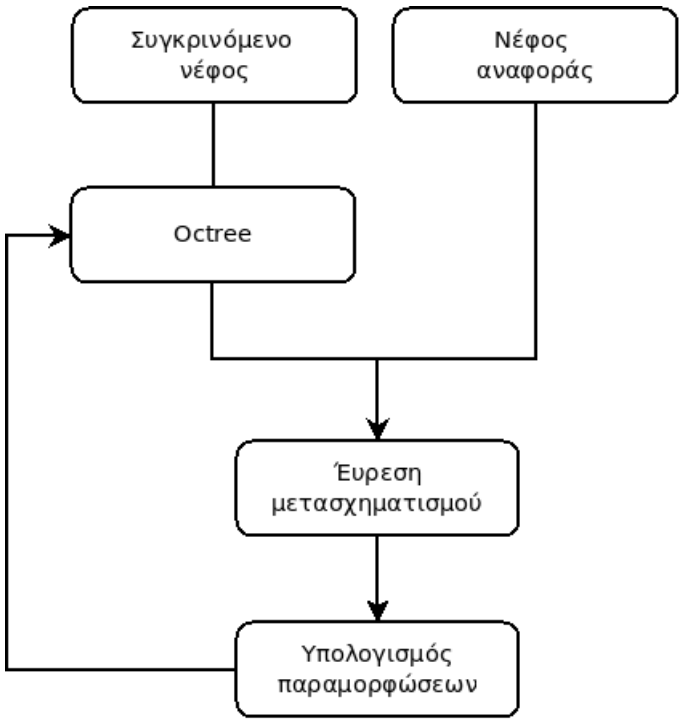
Σχήμα 3.14: Η μετάθεση και η στροφή του αλγορίθμου ICP [44]

Όμως αυτός ο πίνακας δεν δίνει απ' ευθείας τις παραμορφώσεις. Αντιθέτως η πραγματική παραμόρφωση εκφράζεται από ένα διάνυσμα μεταξύ της αρχικής και τελικής θέσης, και το οποίο λαμβάνεται με πολλαπλασιασμό του κάθε σημείου του κύβου με τον πίνακα μετάθεσης-στροφής του ICP. Επομένως οι παραμορφώσεις δίνονται από την εξίσωση (3.4).

$$v_i = \begin{pmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \\ 0 \end{pmatrix} = M_{tot} \cdot \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.4}$$

Εναλλακτικά αντί να πολλαπλασιαστεί το κάθε σημείο με τον πίνακα στροφής-μετάθεσης μπορεί να πολλαπλασιαστεί μόνο το κέντρο βάρους του κύβου. Αυτό συμβαίνει διότι τα σημεία του κάθε υπο-κύβου πολλαπλασιάζονται με τον ίδιο πίνακα στροφής. Επομένως όλα δίνουν την ίδια παραμόρφωση. Οπότε μπορούν να προσομοιωθούν όλα από το κέντρο βάρος του κύβου.

Το πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής έναντι των άλλων είναι ότι είναι λιγότερο επιρρεπής σε σφάλματα που οφείλονται στον θόρυβο των μετρήσεων διότι δεν λαμβάνει υπόψιν του μόνο ένα σημείο στο νέφος αλλά αντίθετα λαμβάνονται όλα τα σημεία τα οποία βρίσκονται μέσα στον υπο-κύβο υπολογίζοντας έτσι ένα μέσο όρο παραμορφώ-



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο σύγκρισης με βάση τον ICP

σεων για τα σημεία αυτά. Επομένως είναι κατάλληλος για πιο θορυβώδη νέφη.

Τα κύρια μειονεκτήματα του αλγορίθμου είναι τα προβλήματα που παρουσιάζουν πολλές φορές οι αλγόριθμοι συνένωσης, συμπεριλαμβανομένου και του ICP. Για την ακρίβεια δεν είναι εξασφαλισμένη η σύγκλιση του αλγορίθμου στην σωστή λύση, αλλά λόγω των μικρών αποστάσεων που συνήθως παρουσιάζουν οι παραμορφώσεις είναι πολύ πιθανόν ο αλγόριθμος να συγκλίνει σωστά και χωρίς προβλήματα. Ακόμα οι αλγόριθμοι συνένωσης απαιτούν ισχυρούς υπολογιστές και αρκετό χρόνο για τον υπολογισμό. Επομένως ο αλγόριθμός με βάση τον ICP είναι ένας "αργός" αλγόριθμος, ο οποίος δεν θα ήταν κατάλληλος για τον γρήγορο υπολογισμό των παραμορφώσεων.

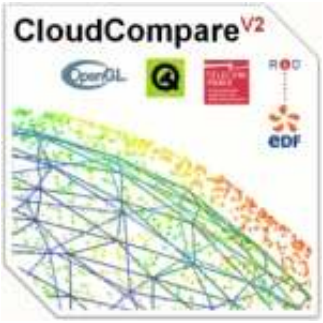
3.8 Λογισμικό

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει οδηγήσει στην ύπαρξη μιας πλειάδας από λογισμικό κατάλληλο για την επεξεργασία των νεφών σημείων. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα λογισμικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση των αλγορίθμων καθώς και για την πραγματοποίηση των μετέπειτα πειραμάτων.

3.8.1 CloudCompare

Το CloudCompare είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας τρισδιάστατων νεφών σημείων. Δημιουργήθηκε αρχικά το 2003 κατά την διάρκεια συνεργασίας μεταξύ της Telecom

Paris Tech και της R&D που είναι τμήμα της EDF, από τον διδακτορικό φοιτητή Daniel Girardeau-Montaut ο οποίος εργαζόταν πάνω στην ανίχνευση αλλαγών σε τρισδιάστατα δεδομένα [20]. Εκείνη την εποχή, ο κύριος σκοπός του ήταν η ανίχνευση αλλαγών σε υψηλής πυκνότητας τρισδιάστατα νέφη σημείων τα οποία είχαν παραχθεί από σαρωτές σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις (όπως σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) ή σε εργοτάξια [14]. Βασίζεται σε μία συγκεκριμένη δομή octree που του επιτρέπει μεγάλες επιδόσεις σε σχέση με την συγκεκριμένη λειτουργία.



Σχήμα 3.16: Το λογότυπο του CloudCompare[68]

.

Στη συνέχεια, προστέθηκαν πολλοί αλγόριθμοι για την επεξεργασία την νεφών σημείων. Το CloudCompare παρέχει μία σειρά από βασικά εργαλεία για την επεξεργασία και την απόδοση των νεφών σημείων. Ακόμα προσφέρει και αρκετά προηγμένους αλγόριθμους, μεταξύ των οποίων είναι και οι μέθοδοι για την εκτέλεση[82] :

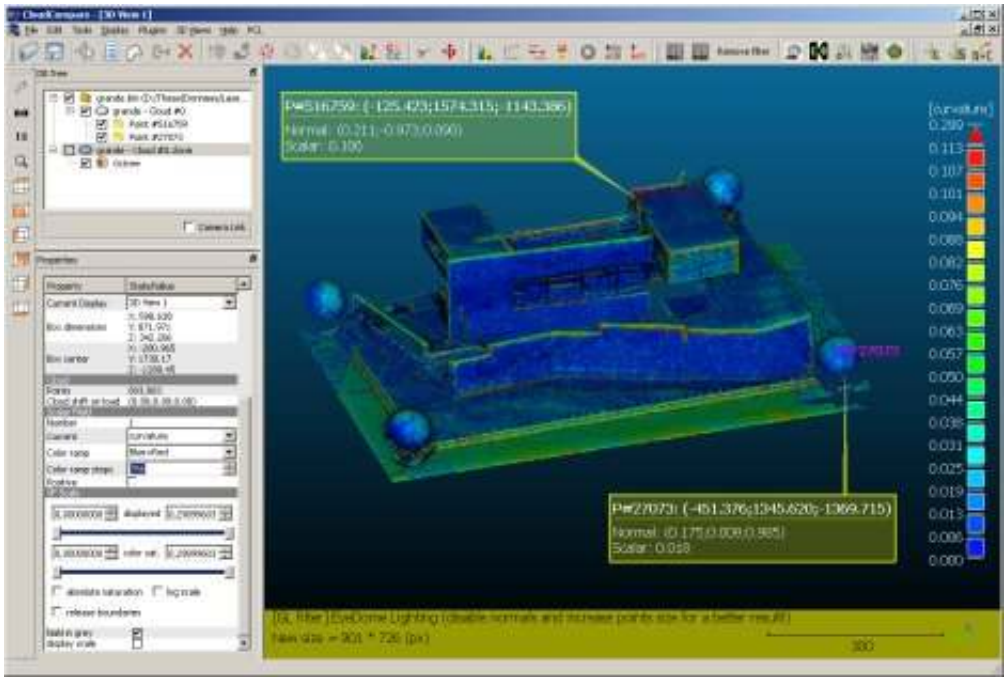
- προβολών (με βάση κάποιον άξονα, κυλινδρική ή κωνική, ...)
- συνένωση νεφών (ICP, ...)
- υπολογισμό απόστασης (νέφος προς νέφος ή νέφος προς, ...)
- στατιστικά στοιχεία υπολογισμού (κατανομή χ^2, ...)
- κατάτμηση σε τμήματα
- υπολογισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών (πυκνότητα, καμπυλότητα, τραχύτητα, γεωλογικός προσανατολισμός του επιπέδου, ...)

Το CloudCompare μπορεί να τρέξει σε Windows, Linux και Mac OS X πλατφόρμες, τόσο για 32bit και 64bit αρχιτεκτονικές. Αναπτύσσεται σε C++ με Qt. Είναι ανοικτού κώδικα και ελεύθερο λογισμικό και εκδίδεται υπό την άδεια GPL.

3.8.2 Point Cloud Library

Η Point Cloud Libradry (PCL) [53] είναι μια ένα ανοικτού κώδικα βιβλιοθήκη-πλαίσιο (αγγλ. software framework) που περιλαμβάνει πολυάριθμους αλγορίθμους για την επεξεργασία νέφη σημείων, με κύριο σκοπό την επιτάχυνση των ρομποτικών εφαρμογών.

Η PCL είναι μία πλήρως πολυμορφική βιβλιοθήκη, γραμμένη σε C++. Η πλειοψηφία των



.

Εικόνα 3.1: Στιγμιότυπο από το CloudCompare [68]

Σχήμα 3.17: Το λογότυπο της PCL [53]

.

μαθηματικών πράξεων υλοποιούνται με την βοήθεια μίας άλλης ανοικτού κώδικα βιβλιοθήκης, της Eigen [23]. Ακόμα η PCL παρέχει υποστήριξη για τους μοντέρνους επεξεργαστές πολλαπλών πυρήνων μέσω του OpenMP [43] ενώ μέσω της βιβλιοθήκης Boost γίνεται αποδοτική χρήση της μνήμης του υπολογιστή. Τέλος η εύρεση των εγγύτερων γειτόνων γίνεται μέσω της FLANN (Fast Library for Aproximate Nearest Neighbors) [38].

Η PCL, μπορεί να τρέξει σε μία πληθώρα λειτουργικών συστημάτων όπως Windows, MacOS, Linux και Android.[53] Η ανάπτυξη της βιβλιοθήκης ξεκίνησε από την εταιρεία Willow Garage, αλλά πλέον αναπτύσσεται από πλειάδα ερευνητών και μηχανικών από όλο τον κόσμο. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην άδεια χρήσης BSD με την οποία διατίθεται η βιβλιοθήκη, η οποία επιτρέπει την ελεύθερη εμπορική και ερευνητική χρήση της βιβλιοθήκης.

Από αλγοριθμική πλευρά, η PCL χωρίζεται σε υπο-βιβλιοθήκες, οι πιο σημαντικές από τις οποίες φαίνονται παρακάτω [53, 77]:

Filters: Βοηθά στην υλοποίηση φίλτρων τα οποία είναι ικανά να αφαιρέσουν τον θόρυβο τον μετρήσεων

Features: Η συγκεκριμένη υπο-βιβλιοθήκη περιέχει του αλγόριθμους για τον υπολογισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των νεφών όπως η καμπυλότητα.

Io: Βοηθά στην ανάγνωση και εγγραφή των δεδομένων σε αρχεία .pcd, τα οποία είναι η μορφή αρχείων που υποστηρίζει η βιβλιοθήκη.

Registration: Η συγκεκριμένη υπο-βιβλιοθήκη βοηθά στην υλοποίηση των αλγορίθμων συνένωσης όπως ο αλγόριθμος ICP.

KdTree: Η βιβλιοθήκη αυτή εφαρμόζει την δομή δεδομένων kdtree με χρήση της FLANN.

Octree: Ομοίως αυτή η βιβλιοθήκη βοηθά στην υλοποίηση της δομής δεδομένων octree.

Visualization: Η PCL έρχεται με την δική της βιβλιοθήκη απεικόνισης που βασίζεται στην ανοικτού κώδικα βιβλιοθήκη VTK [57].

Τέλος αυτό που καθιστά την βιβλιοθήκη μία από τις καλύτερες στο είδος τους είναι η ύπαρξη μια ευρείας γκάμας παραδειγμάτων ελεύθερα προς χρήση αλλά και μία δραστήρια κοινότητα που βοηθά στην περαιτέρω ανάπτυξη της βιβλιοθήκης.

3.8.3 Cyclone

Το Cyclone είναι ένα λογισμικό επεξεργασίας τρισδιάστατων νεφών από την εταιρεία Leica Geosystems, το οποίο χρησιμοποιείται για τοπογραφικές, κατασκευαστικές και άλλες συναφείς εργασίες, κυρίως όμως χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των δεδομένων που αποκτήθηκαν με την χρήση των σαρωτών της Leica (βλ. ενότητα 2.4).

Σε αυτή την διπλωματική χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με τον σαρωτή για την παραγωγή νεφών, αλλά και την συνένωση των νεφών και την εξαγωγή τους σε κατάλληλη μορφή που να είναι δυνατή η επεξεργασία τους από το CloudCompare και την PCL. Η έκδοση η οποία χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την διπλωματική είναι η 7. Το λογισμικό αποτελείται από επιμέρους ενότητες. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι ενότητες που έχει το Cyclone.

Cyclone-Scan: Είναι το πρόγραμμα μέσω του οποίου λειτουργεί ένας σαρωτής της εταιρείας Leica. Με τη βοήθεια αυτού του υποπρογράμματος πραγματοποιείται η σάρωση του αντικειμένου αφού πρώτα έχουν προσδιοριστεί οι παράμετροι της σάρωσης όπως η οριοθέτηση της περιοχής σάρωσης, η ανάλυση της σάρωσης και η φωτεινότητα. [88]

Cyclone-Register: Είναι το πρόγραμμα που παρέχει τη δυνατότητα συνένωσης νεφών σημείων, τα οποία έχουν ληφθεί από διαφορετικές θέσεις σάρωσης. Το υποπρόγραμμα αυτό παρέχει επίσης αναλυτικά στατιστικά στοιχεία της συνένωσης, που περιλαμβάνουν την ακρίβεια της συνένωσης, το σφάλμα του κάθε στόχου (target constraint) και τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS) και το ιστόγραμμα σφάλματος για κάθε νέφος (cloud constraint).[88]

Cyclone-Model: Είναι το πρόγραμμα που παρέχει τη δυνατότητα της άμεσης διαχείρισης του νέφους σημείων, της μοντελοποίησης των αντικειμένων που έχουν σαρωθεί και μπορούν εύκολα να εξαχθούν ή να εισαχθούν σε περιβάλλον CAD. Το υποπρόγραμμα αυτό περιλαμβάνει εργαλεία που βοηθούν στη μοντελοποίηση των τρισδιάστατων νεφών σημείων ως γεωμετρία CAD ή ως νέφη για μηχανικές, τοπογραφικές, κατασκευαστικές, αρχιτεκτονικές και άλλες σχετικές εφαρμογές.[88]

Cyclone-Survey: Είναι υποπρόγραμμα του Cyclone-Model και επιτρέπει στους χρήστες να εξάγουν γρήγορα σχετικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά και πληροφορία συντεταγμένων από το νέφος σημείων. Με το υποπρόγραμμα αυτό είναι δυνατή η δημιουργία TIN – η δημιουργία τριγώνων μεταξύ των γειτονικών σημείων, ισοϋψών καμπυλών, διατομών και υπάρχουν ακόμα πολλές χρήσιμες δυνατότητες.[88]

Cyclone-Viewer: Είναι μία έκδοση του Cyclone στην οποία ο χρήστης βλέπει τα δεδομένα χωρίς τη δυνατότητα επεξεργασίας. Η έκδοση αυτή παρέχει τη δυνατότητα εμφάνισης της βάσης δεδομένων και οι χρήστες του μπορούν να πλοηγηθούν στο νέφος σημείων και στα τρισδιάστατα μοντέλα, χωρίς όμως να λειτουργεί το Cyclone-Model.[88]

Cyclone-Server: Παρέχει την δυνατότητα για ταυτόχρονη σύνδεση πολλών χρηστών στην ίδια βάση δεδομένων μέσα σε ένα δίκτυο. Έτσι εξοικονομείται χρόνος στην διεκπεραίωση κάποιας σύνθετης εργασίας όπου συνεργάζονται πολλά άτομα.[88]

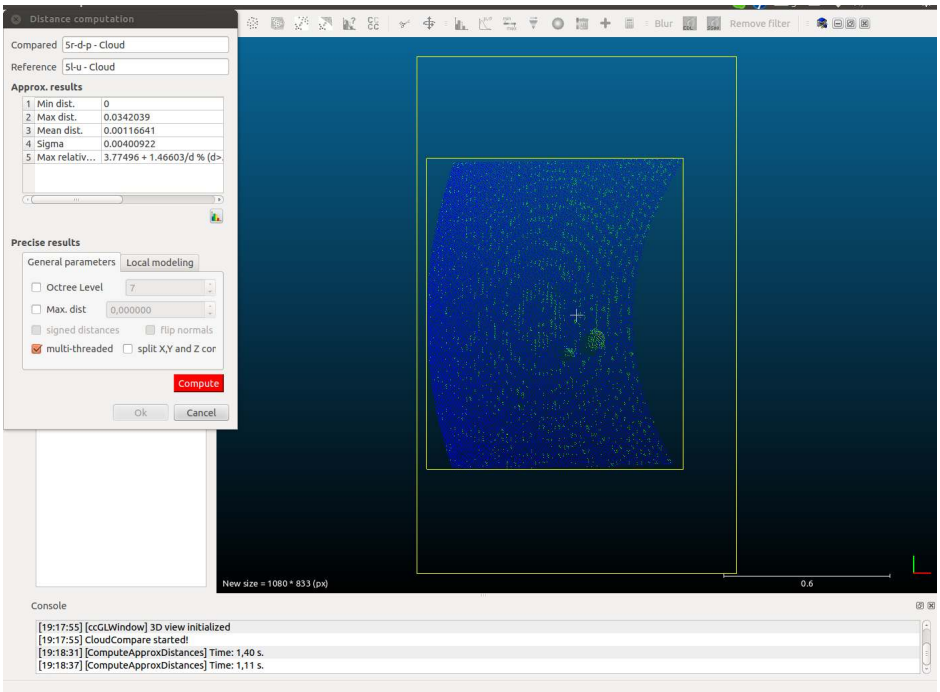
Το Cyclone τρέχει μόνο σε λειτουργικό Windows, ενώ αποτελεί λογισμικό κλειστού κώδικα.

3.9 Ανάπτυξη κώδικα

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκε έτοιμο λογισμικό αλλά και αναπτύχθηκε νέος κώδικας σε C++ που υλοποιεί την λειτουργία των αλγορίθμων. Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η υλοποίηση του κάθε αλγορίθμου. Ο πλήρης κώδικας που αναπτύχθηκε βρίσκεται στο παράρτημα.

3.9.1 Αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα

Για τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CloudCompare καθώς και υλοποιήθηκε μια νέα εκδοχή του αλγορίθμου με την βοήθεια της διεπαφής της βιβλιοθήκης PCL. Συγκεκριμένα το πιο δύσκολο κομμάτι του αλγορίθμου είναι η εύρεση του κοντινότερου σημείου στο νέφος αναφοράς όταν έχουμε ένα δεδομένο σημείο στο νέφος σύγκρισης. Αυτό πραγματοποιείται στο CloudCompare με την βοήθεια των octree, ενώ στην βιβλιοθήκη PCL πραγματοποιείται με τα kdtrees.
Συγκεκριμένα στο CloudCompare υπάρχει ήδη έτοιμη υπο-ρουτίνα η οποία εκτελεί την σύγκριση των νεφών (βλ. σχήμα 3.18).



Σχήμα 3.18: Η υπο-ρουτίνα σύγκρισης των νεφών στο CloudCompare

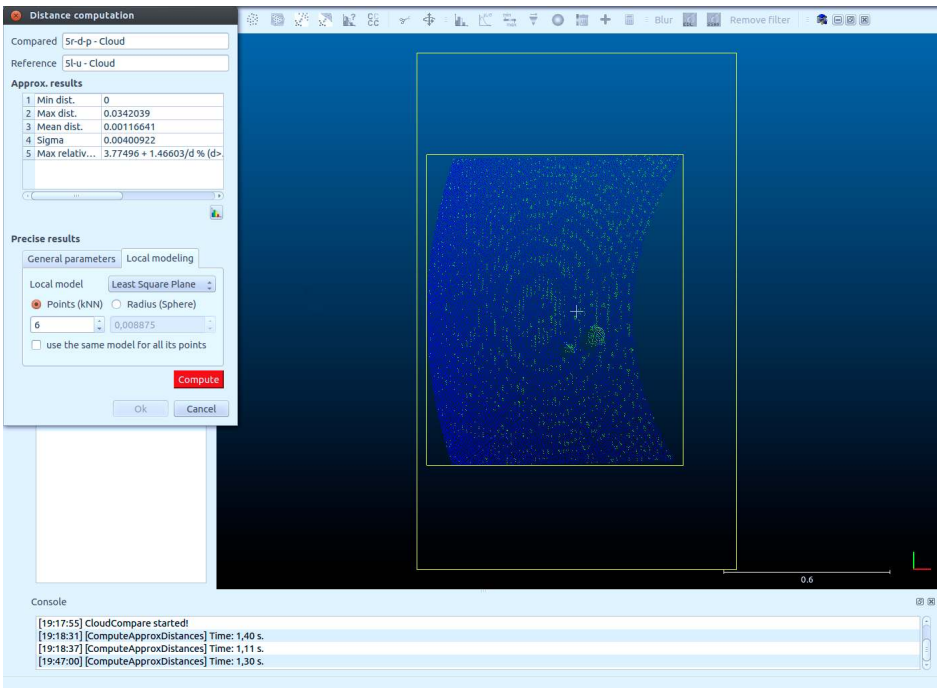
Αντιθέτως στην PCL χρησιμοποιήθηκε η υποβιβλιοθήκη registration μέσω της οποίας ήταν δυνατή η εύρεση της αντιστοιχίας των σημείων ανάμεσα στα δύο νέφη και έπειτα η εύρεση των παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η κλάση pcl :: registration :: CorrespondenceEstimation και έπειτα δημιουργήθηκε η συνάρτηση findDerfomation για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων (βλέπε αλγόριθμο 3.1).

```
void findDerfomation (const PointCloudSourceConstPtr &input_,
   const PointCloudTargetConstPtr &target_,pcl::Correspondences &
   correspondences,pcl::PointCloud<Deformation> &cloud)
{
  for(size_t i=0; i<correspondences.size();i++)
    {
      Deformation point;

      point.x=  (*input_)[(correspondences[i].index_query)].x;
      point.y=  (*input_)[(correspondences[i].index_query)].y;
      point.z=  (*input_)[(correspondences[i].index_query)].z;
      point.deformation_x=(*input_)[(correspondences[i].
         index_query)].x - (*target_)[(correspondences[i].
         index_match)].x;
      point.deformation_y=(*input_)[(correspondences[i].
         index_query)].y - (*target_)[(correspondences[i].
         index_match)].y;
      point.deformation_z=(*input_)[(correspondences[i].
         index_query)].z - (*target_)[(correspondences[i].
         index_match)].z;
      point.distance=std::sqrt(correspondences[i].distance);

      cloud.push_back(point);
    }
}
```

Αλγόριθμος 3.1: "Η συνάρτηση για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων"

3.9.2 Αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας

Σε αυτό τον αλγόριθμο χρησιμοποιήθηκε μόνο το πρόγραμμα CloudCompare το οποίο είχε 3 εκδοχές του αλγορίθμου αυτού υλοποιημένες (βλ. σχήμα 3.19). Στην πρώτη εκδοχή η επιφάνεια προσεγγίζεται από ένα επίπεδο (least square best fitting plane), στην δεύτερη από τρίγωνα (2D1/2 Delaunay triangulation) και στην τρίτη από ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού (quadratic height function).



Σχήμα 3.19: Η υπο-ρουτίνα σύγκρισης της εγγύτερης επιφάνειας στο CloudCompare

3.9.3 Αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε η διεπαφή της βιβλιοθήκης PCL. Μέσω της υπο-βιβλιοθήκης features και συγκεκριμένα μέσω της κλάσης pcl::NormalEstimation υπολογίστηκε το εφαπτόμενο επίπεδο από έναν συγκεκριμένο αριθμό πλησιέστερων σημείων που παρέχεται από τον χρήστη και ύστερα υπολογίζεται το κάθετο διάνυσμα.

Μετά ο χρήστης παρέχει τον αριθμό των εγγύτερων σημείων στο νέφος αναφοράς με τα οποία θέλει να συγκριθεί για να βρεθεί αυτό το οποίο έχει την μικρότερη απόσταση. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια της υπο-βιβλιοθήκης registration και συγκεκριμένα της κλάσης pcl::registration::CorrespondenceEstimationNormalShooting. Αφού βρεθεί η αντιστοιχία των σημείων μεταξύ των δύο νεφών υπολογίζονται οι παραμορφώσεις. Επομένως για την λειτουργία του αλγόριθμου ο χρήστης θα πρέπει να παρέχει στο πρόγραμμα δύο αριθμούς. Ο πρώτος δείχνει τον αριθμό των σημείων από το οποίο θα υπολογιστεί το κάθετο διάνυσμα και ο δεύτερος είναι ο αριθμός των εγγύτερων σημείων στο συγκρινόμενο νέφος με τα οποία θα συγκριθεί για να βρεθεί αυτό το οποίο έχει την μικρότερη απόσταση.

3.9.4 Αλγόριθμος σύγκρισης με βάση τον ICP

Ομοίως και γι' αυτό τον αλγόριθμό χρησιμοποιήθηκε η διεπαφή της βιβλιοθήκης PCL. Συγκεκριμένα για το συγκρινόμενο νέφος δημιουργείται το αντίστοιχο octree με την βοήθεια της αντίστοιχης υπο-βιβλιοθήκης και ύστερα όλοι οι leaf κόμβοι (δηλαδή ο κύβος

με την μικρότερη πλευρά που περιέχει σημεία) του προσπερνιούνται και τα σημεία που υπάρχουν μέσα στον κόμβο χρησιμοποιούνται στον ICP και με αυτό τον τρόπο εντοπίζονται οι παραμορφώσεις στο νέφος. Ο ICP που χρησιμοποιείται από την βιβλιοθήκη PCL περιέρχεται στην βιβλιοθήκη registration και για την εύρεση των αντιστοιχιών χρησιμοποιεί την δενδροειδή δομή kd-tree. Επομένως η υλοποίηση του αλγορίθμου δεν είναι και η βέλτιστη μιας και υλοποιούνται δύο παρόμοιες δενδροειδές δομές με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων. Ο χρήστης το μόνο που χρειάζεται να παρέχει στο πρόγραμμα είναι το μέγεθος του κύβου (voxel size).

Μέρος ΙΙ

Μετρήσεις και αποτελέσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μετρήσεις και αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγή

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από πειράματα για να εξακριβωθεί αν οι αλγόριθμοι είναι δυνατόν να εντοπίσουν παραμορφώσεις.

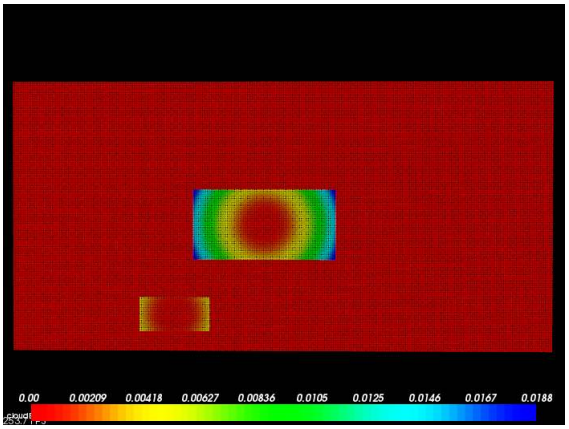
Στην αρχή πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πάνω σε προσομοιώμενα δεδομένα για μια αρχική αξιολόγηση. Αργότερα πραγματοποιήθηκαν επιπλέον πειράματα σε νέφη σημείων τα οποία σαρώθηκαν με τον σαρωτή ScanStation 2 της Leica. Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αλγορίθμων.

4.2 Προσομοιωμένα δεδομένα

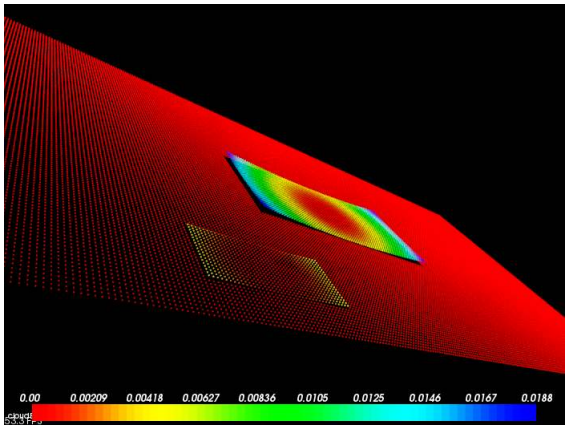
Δημιουργήθηκαν προσομοιωμένα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογηθούν αρχικά οι αλγόριθμοι. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε ένα επίπεδο 3m x 1,5m στο οποίο σε δύο σημεία του κατά τον άξονα z δημιουργήθηκαν παραβολοειδής παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις είχαν μέγιστο ύψος τα 1,88cm και ήταν τοποθετημένες στην μέση και στο κάτω μέρος του επιπέδου (βλ. σχήμα 4.1).

Για απλότητα δεν εισήχθη περαιτέρω θόρυβος στα νέφη (όπως θα συνέβαινε στα πραγματικά δεδομένα). Επομένως τρέχοντας τους αλγόριθμους πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα που φαίνονται στο σχήμα 4.2. Αναλυτικά οι παραμορφώσεις στα σχήματα Α'.1, Α'.1, Α'.4, Α'.5, Α'.6 και Α'.7 του παραρτήματος

Παρατηρείται ότι όλοι οι αλγόριθμοι, εκτός του ICP, έχουν ανιχνεύσει με ακρίβεια της παραμορφώσεις και χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα. Τα προβλήματα που παρουσιάζει ο ICP είναι κατά κύριο λόγο αναμενόμενα, μιας και ο ICP είναι κατάλληλος για πιο θορυβώδη νεφη. Τα σημεία στο οποία δεν έχουν υπολογιστεί σωστά οι παραμορφώσεις (κυ-

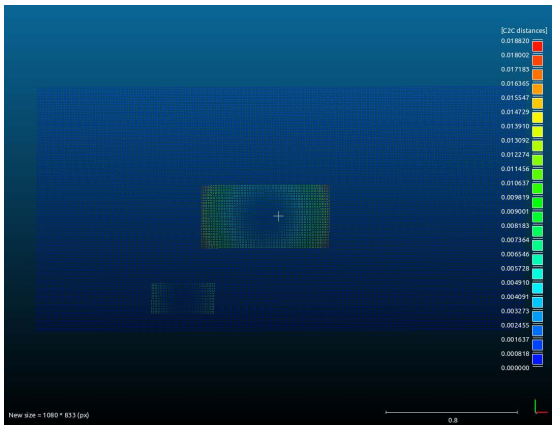


(α')

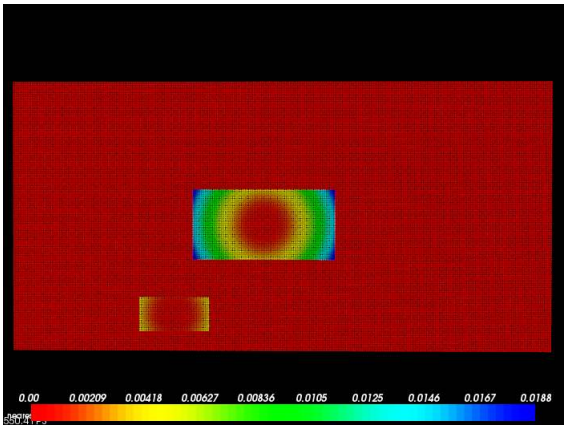


(β')

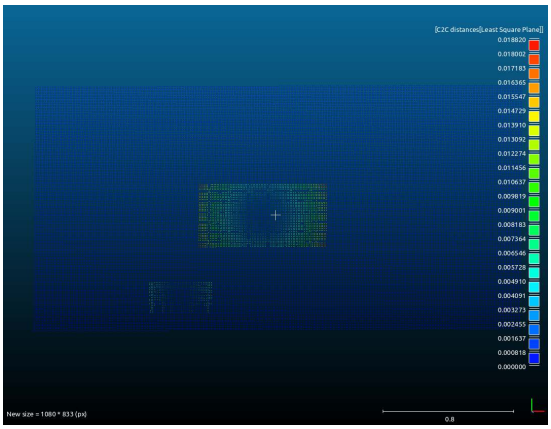
Σχήμα 4.1: Τα προσομοιωμένα δεδομένα



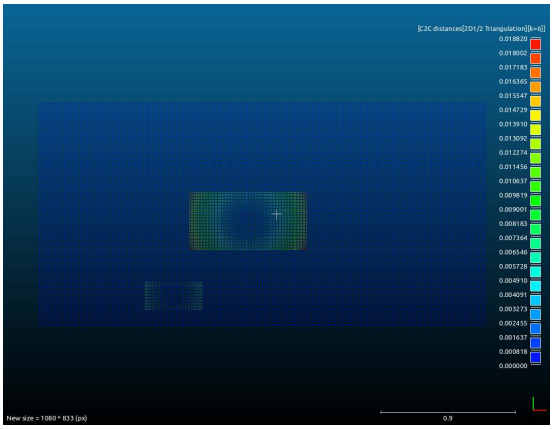
(α') Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας από το CloudCompare



(β') Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL

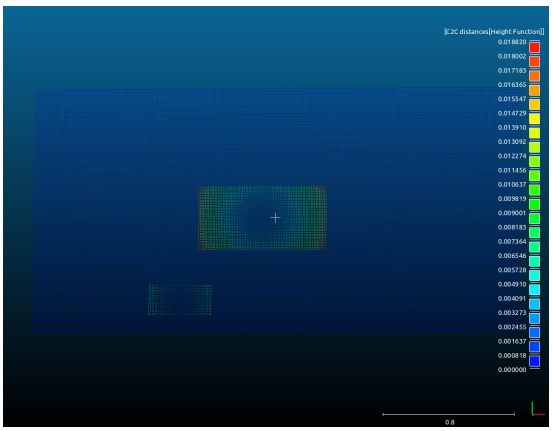


(γ') Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου)

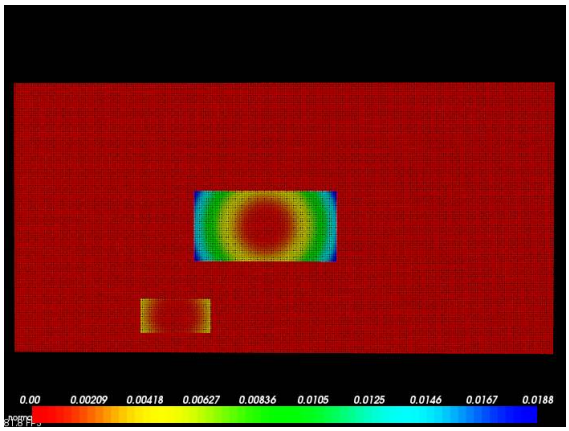


(δ') Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation)

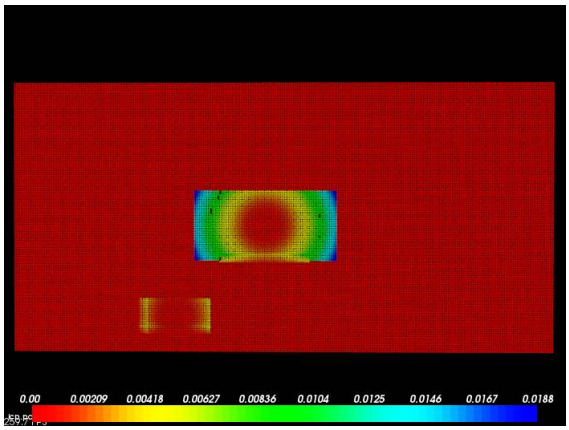
Σχήμα 4.2: Οι συνολικές παραμορφώσεις από τους 4 πρώτους αλγορίθμους



(ε') Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function)



(στ') Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος



(ζ') Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0,05

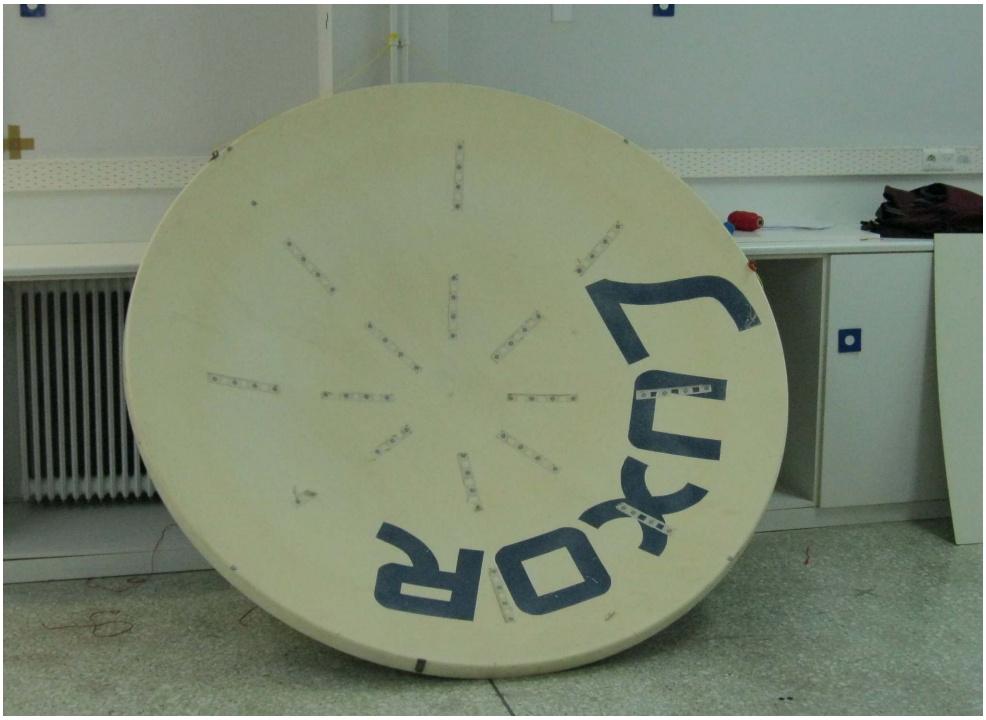
Σχήμα 4.2: Οι συνολικές παραμορφώσεις από τους αλγόριθμους

ρίως στο κάτω μέρος του μεγάλου παραβολοειδούς και στις άκρες του μικρού) οφείλονται κατά κύριο στο γεγονός ότι ο ICP υπολογίζει ένα μέσο όρο των παραμορφώσεων για κάθε υπο-κύβο του octree με αποτέλεσμα να μην είναι εμφανή τα όρια των παραμορφώσεων.Ακόμα υπάρχουν μερικά σημεία στα οποία οι επιμέρους υπο-κύβοι δεν περιείχαν αρκετά σημεία (<3) για να λειτουργήσει ο ICP με αποτέλεσμα να μην υπολογιστούν παραμορφώσεις γι' αυτά τα σημεία. Όμως παρόλα τα προβλήματα, ο ICP εντόπισε με αρκετή ακρίβεια της παραμορφώσεις.

4.3 Δορυφορική κεραία (Luxor)

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε στο Κτίριο Λαμπαδάριο της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών (Σ.Α.Τ.Μ.) του ΕΜΠ στην περιοχή του Ζωγράφου.

Το προς αποτύπωση αντικείμενο είναι μία δορυφορική κεραία, διαμέτρου 1,4 m (βλ. εικόνα 4.1). Η δορυφορική κεραία έχει τοποθετηθεί όσο γίνεται πιο κάθετα ως προς το έδαφος ώστε να είναι ορατά όλα τα σημεία της επιφάνειας της και έχει προσδεθεί κατάλληλα ώστε να διατηρείται σταθερή η θέση της κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

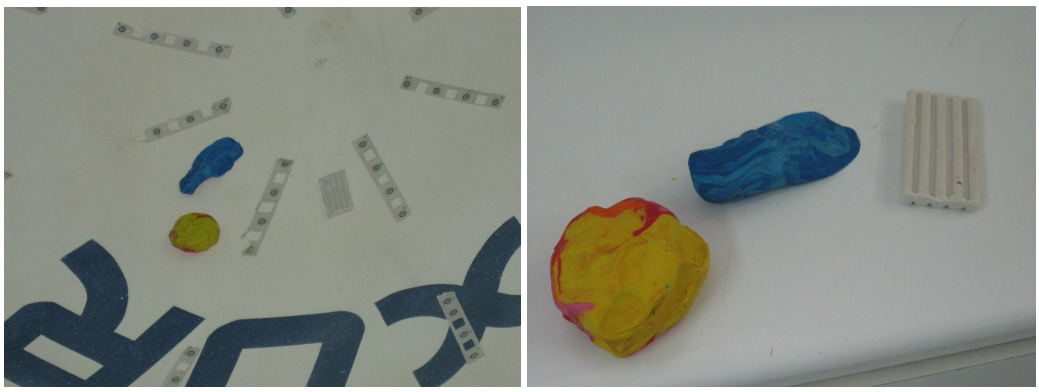


.

Εικόνα 4.1: Η δορυφορική κεραία

Η προσομοίωση των παραμορφώσεων στην κεραία πραγματοποιήθηκε με την χρησιμοποίηση πλαστελίνης (βλ. εικόνα 4.2)

Πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα αλλά θα παρουσιαστούν τα κύρια πειράματα, τα οποία είναι ενδεικτικά και αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μετρήσεων με την χρησιμοποίηση νεφών σημείων. Στα πειράματα έγινε προσπάθεια να



.

Εικόνα 4.2: Η δορυφορική κεραία με την πλαστελίνη προσκολλημένη

γίνουν λήψεις από διαφορετικές θέσεις και με διαφορετική πυκνότητα. Στον πίνακα 4.1 φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε πειράματος.

Πείραμα	Περιγραφή
1ο	3 θέσεις οργάνου με πυκνότητα 5mm
2ο	3 θέσεις οργάνου με πυκνότητα 5mm
3ο	2 θέσεις οργάνου με πυκνότητα 5 mm με μικρό σφάλμα στην συνένωση
4ο	2 θέσεις οργάνου με διαφορετικές πυκνότητες

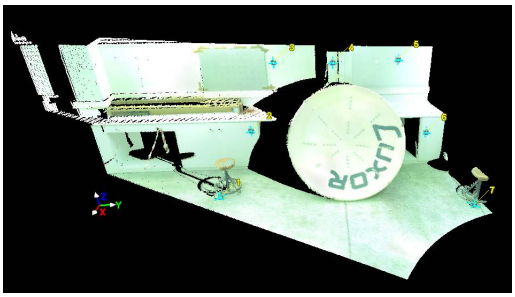
Πίνακας 4.1: Περιγραφή των πειραμάτων

4.3.1 Σάρωση κεραίας

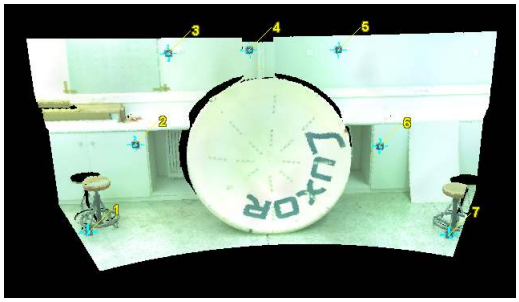
Η κεραία σαρώθηκε από 3 θέσεις (μία δεξιά, μία από το κέντρο και μία από τα αριστερά της κεραίας) σε διάφορες πυκνότητες σημείων (βλ. σχήμα 4.3). Ακόμα σαρώθηκε σε δύο περιόδους (μία πριν την τοποθέτηση της πλαστελίνης και μία μετά).

Η διαδικασία της σάρωσης στο πεδίο είναι κατά το πλείστον αυτοματοποιημένη. Ο σαρωτής, με εξαίρεση το μεγάλο βάρος του (περίπου 19 kg) και την δυσκολία που παρουσιάζει στην μεταφορά, μπορεί να στηθεί και να λειτουργήσει ακόμη και από ένα άτομο.

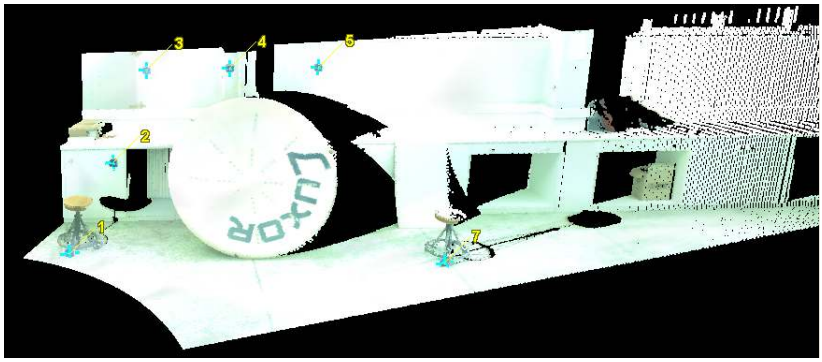
Ακόμα, πριν την έναρξη των σάρωσεων τοποθετήθηκαν κατάλληλοι στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση των σαρώσεων (βλ. ενότητα 2.5.5). Προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθούν στόχοι έναντι κάποιας επαναληπτικής μεθόδου, όπως ο ICP (βλ. ενότητα 2.5.6), για να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα (μιας και η αναγνώριση των στόχων από τον σαρωτή γίνεται με ακρίβεια 2mm) και για να είναι πιο ελεγχόμενες οι συνθήκες (βλ. σχήμα 4.3). Συγκεκριμένα ο ελάχιστος απαραίτητος αριθμός των στόχων είναι 3 για την συνένωση των διαδοχικών νεφών (3 παράμετροι στροφής και 3 παράμετροι μετάθεσης) και 2 για τον ορισμό του συστήματος αναφοράς (ένα για την αρχή του συστήματος αναφοράς και ένα δεύτερο για τον ορισμό του αζιμούθιου). Όμως για μεγαλύτερο έλεγχο τοποθετήθηκαν περισσότεροι στόχοι.



(α') Σάρωση από τα δεξία

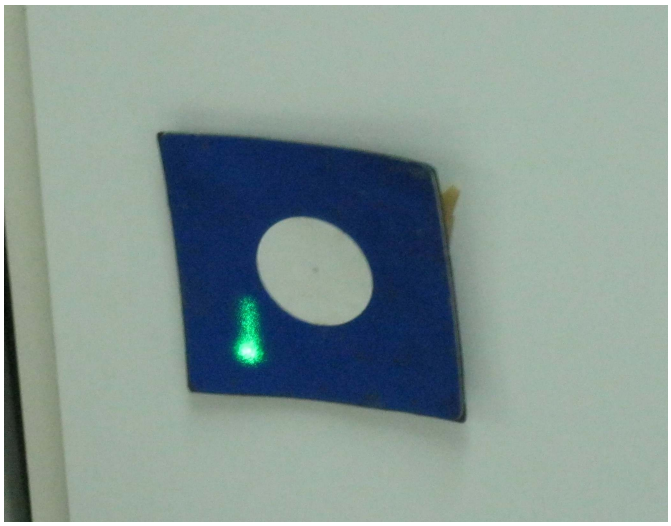


(β') Σάρωση από το κέντρο



(γ') Σάρωση από τα αριστερά

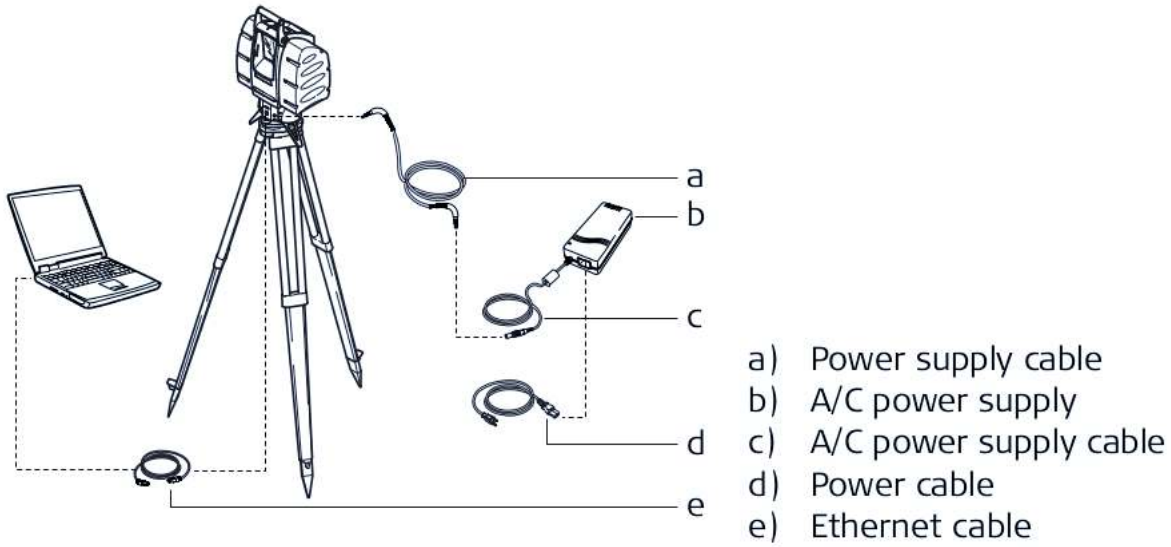
Σχήμα 4.3: Σαρώσεις της κεραίας



Εικόνα 4.3: Στόχος για την σύνδεση των σαρώσεων κατά την διαδικασία της σάρωσης.

Για να ξεκινήσει η διαδικασία των μετρήσεων, αρχικά ο επίγειος σαρωτής τοποθετείται πάνω σε τρίποδα και οριζοντιώνεται. Αν δεν χρησιμοποιούνταν οι στόχοι που παρέχονται από το όργανο για την υλοποίηση του συστήματος αναφοράς τότε θα έπρεπε να κεντρωθεί πάνω από ένα σημείο γνωστών συντεταγμένων καθώς και να γίνει μέτρηση και του ύψους οργάνου. Από την στιγμή όμως που οι στόχοι παραμένουν σταθεροί και φαίνονται σε όλες τις σαρώσεις τότε το σύστημα αναφοράς μπορεί να υλοποιηθεί με βάση τους στόχους. Οι στόχοι κατά την διάρκεια των σαρώσεων είχαν τοποθετηθεί στον τοίχο πίσω από την κεραία, έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος μετακίνησης τους αλλά και να είναι ορατοί σε όλες τις σαρώσεις.

Η διενέργεια μιας σάρωσης με τον επίγειο σαρωτή Scanstation 2 απαιτεί την ταυτόχρονη σύνδεσή του με μία πηγή παροχής ρεύματος, που στην περίπτωση μας είναι το ρεύμα (εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μπαταρία), και με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή (βλ. σχήμα 4.4).

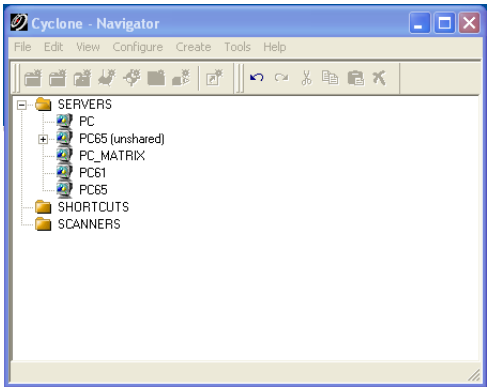


Σχήμα 4.4: Συνδεσμολογία σαρωτή

Ο υπολογιστής είναι απαραίτητος, καθώς μέσω αυτού γίνονται όλες οι διαδικασίες και δίνονται οι εντολές στο σαρωτή. Αφού συνδεθεί ο σαρωτής με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και με την παροχή του ρεύματος γίνεται εκκίνηση της εφαρμογής Cyclone, μέσω της οποίας γίνονται οι σαρώσεις. Το όργανο αρχικά διενεργεί ορισμένες περιστροφές, για να γίνει η διαδικασία του καλιμπραρίσματος και παράλληλα ορίζεται το αρχείο, στο οποίο θα γίνουν οι εργασίες (βλ. σχήμα 4.5).

Όταν ολοκληρωθεί το καλιμπράρισμα του οργάνου,ο χρήστης είναι σε θέση να καθορίσει την περιοχή, στην οποία θα γίνει η σάρωση. Επιπλέον, πρέπει να οριστεί η πυκνότητα, με την οποία θα γίνει η σάρωση. Η πυκνότητα αυτή έχει να κάνει με την απόσταση που θα έχουν μεταξύ τους τα σημεία που σαρώνονται. Αφού οριστούν τα παραπάνω στη συνέχεια ξεκινάει η διαδικασία της σάρωσης (βλ. εικόνα 4.4).

Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της σάρωσης της περιοχής μελέτης, είναι απαραίτητη



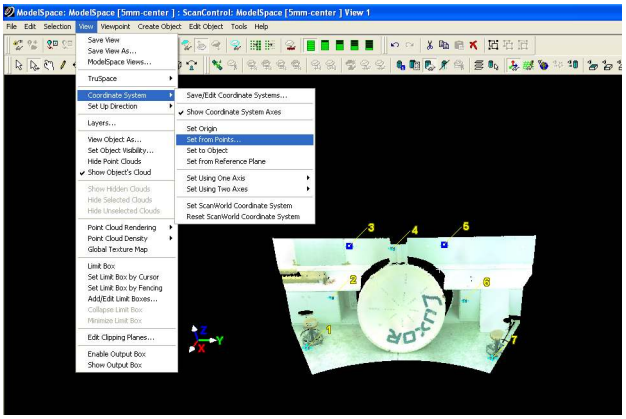
Σχήμα 4.5: Ορισμός αρχείου μέσα από το πρόγραμμα Cyclone

Εικόνα 4.4: Ο σαρωτής εν λειτουργία

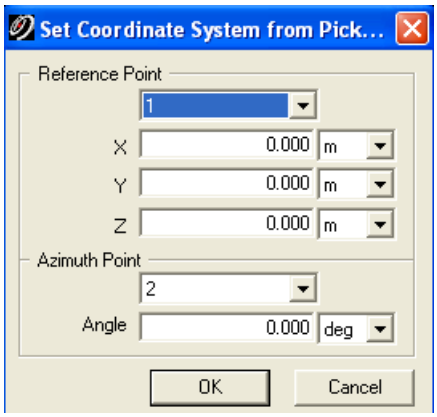
η ακριβέστερη σάρωση των ειδικών ανακλαστικών στόχων, που χρησιμεύουν για τη συνένωση σαρώσεων, καθώς και για τον ορισμό του συστήματος συντεταγμένων. Οι ειδικοί αυτοί στόχοι είναι τετράγωνα στοχάκια που αναγνωρίζει αυτόματα το λογισμικό του σαρωτή και το κέντρο τους υπολογίζεται με ακρίβεια 2mm.

4.3.2 Επεξεργασία των νεφών σημείων

Αφού λήφθηκαν τα δεδομένα από τον σαρωτή έγινε επεξεργασία με το πρόγραμμα Cyclone. Ως πρώτο βήμα ήταν όλα τα νέφη να γεωαναφερθούν στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Αυτό επιτεύχθηκε με την χρήση δύο σημείων μέσα από το ίδιο το Cyclone (βλ. σχήμα 4.6).



(α') Το μενού της γεωαναφοράς των νεφών



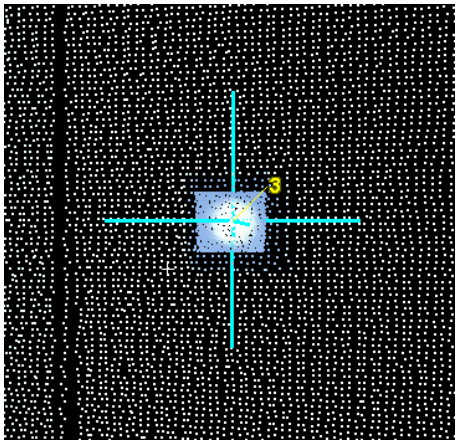
(β') Το παράθυρο της γεωαναφοράς των νεφών

Σχήμα 4.6: Η γεωαναφορά των νεφών από το Cyclone

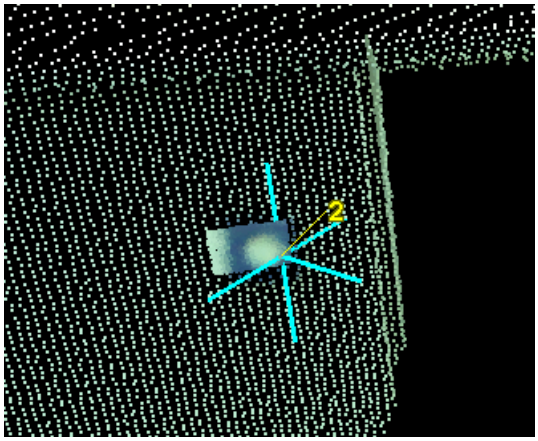
Το μόνο που έπρεπε να προσεχθεί ήταν οι στόχοι να είχαν σαρωθεί σωστά από το όργανο (βλ. σχήμα 4.7). Σε κάποιες περιπτώσεις, αν και παρόλο που ο σαρωτής έλεγε ότι ο στόχος έχει σαρωθεί επιτυχώς ήταν εμφανές ότι υπήρχε κάποιο λάθος στην σάρωση. Παρόλα αυτά δεν υπήρχε κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα μιας και υπήρχε πλεονάζων αριθμός στόχων.

Ομοίως μετά την γεωαναφορά συνενώθηκαν και τα νέφη τα οποία είχαν την ίδια πυκνότητα (βλ. σχήμα 4.8 που απεικονίζεται το συνενωμένο νέφος το οποίο παράχθηκε από τις σαρώσεις του σχήματος 4.3). Θεωρητικά θα μπορούσε να είχε γίνει πρώτα η συνένωση και μετά η γεωαναφορά αλλά στην περίπτωση μας δεν είχε διαφορά.

Ομοίως και εδώ το μόνο που έπρεπε να προσεχθεί ήταν οι στόχοι η οποίοι δεν είχαν σαρωθεί σωστά από το όργανο. Το μόνο που χρειαζόταν ήταν να μην τους λάβουμε υπόψιν κατά την διάρκεια της συνένωσης (βλ. σχήμα 4.9).

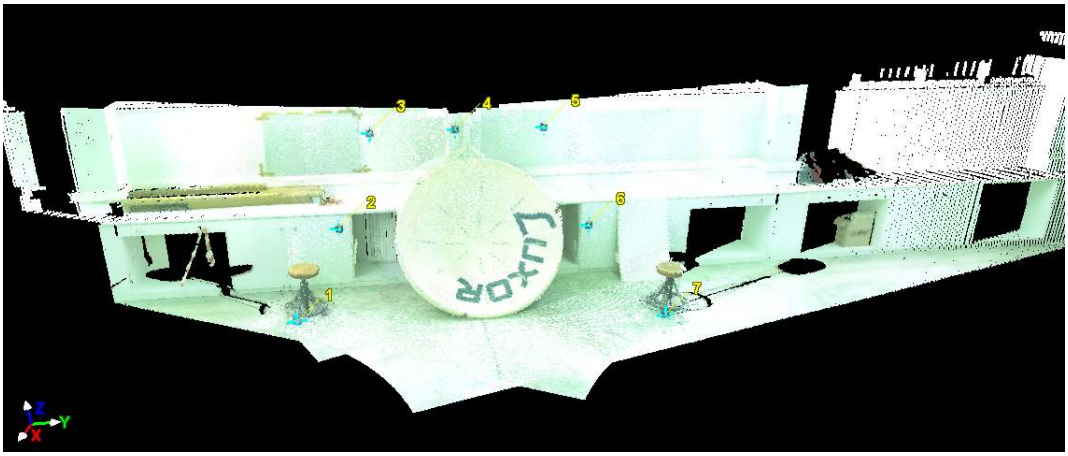


(α') Στόχος σωστά σαρωμένος

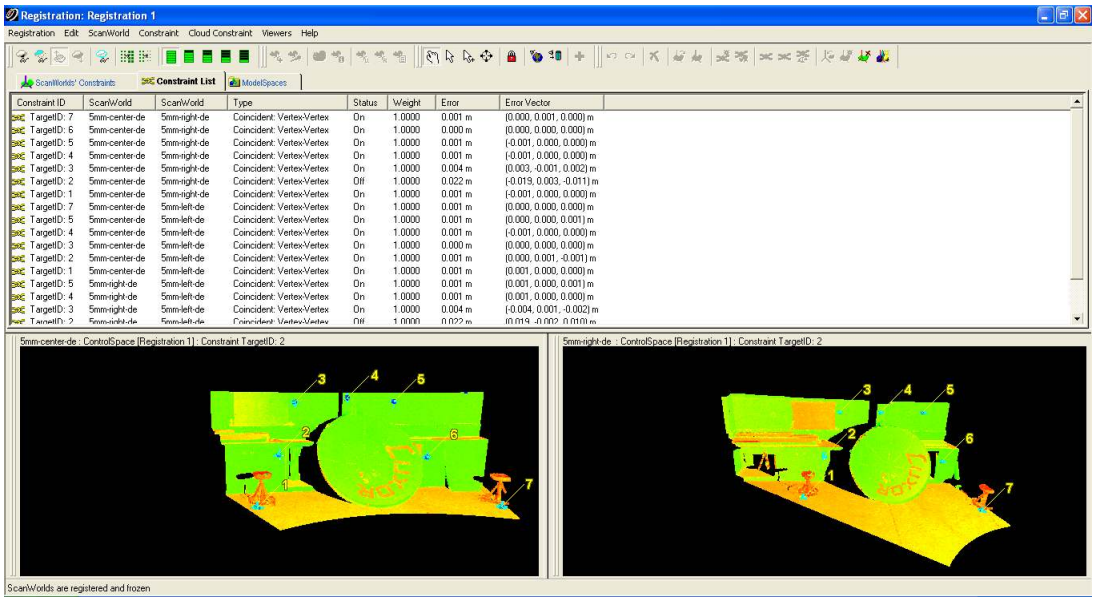


(β') Στόχος λάθος σαρωμένος

Σχήμα 4.7: Σαρωμένοι στόχοι

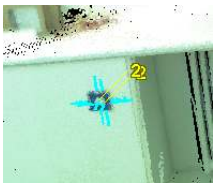


Σχήμα 4.8: Συνενωμένο νέφος



(α') Τα παράθυρο συνένωσης των νεφών

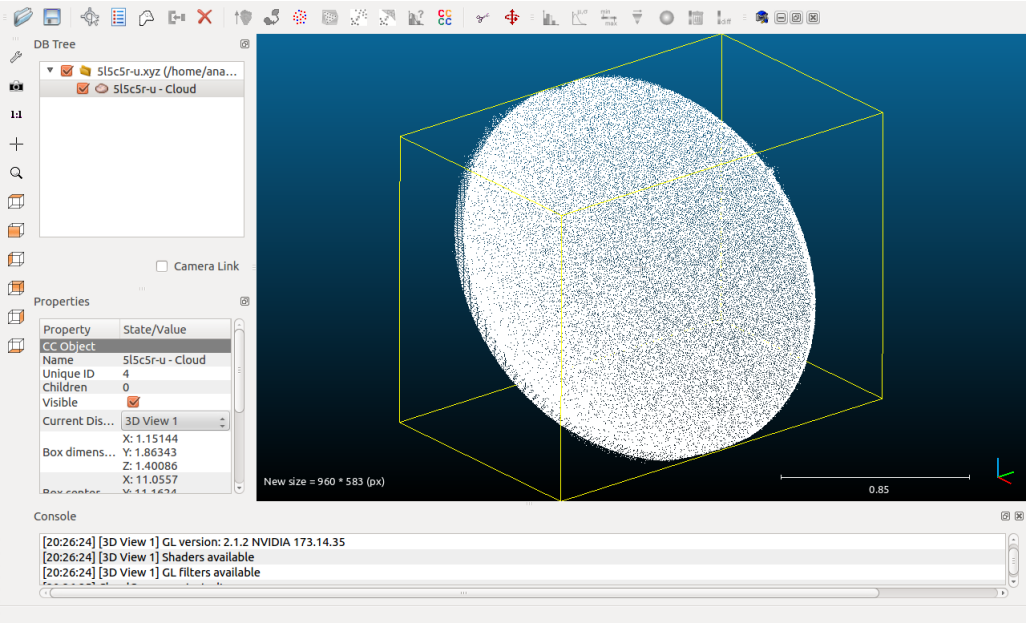
(β') Στόχος ο οποίος έχει μεγάλο λάθος



(γ') Ο λάθος σαρωμένος στόχος στο νέφος

Σχήμα 4.9: Συνένωση νεφών

Αφού έγινε η συνένωση και η γεωαναφορά των νεφών σημείων, απομονώθηκε η κεραία και ύστερα έγινε εξαγωγή του νέφους της κεραίας σε μορφή ASCII. Το βήμα αυτό πραγματοποιήθηκε για να είναι δυνατή η επεξεργασία των νεφών από το πρόγραμμα CloudCompare (βλ. σχήμα 4.10) καθώς και να μπορέσει να γίνει η μετατροπή τους σε αρχεία .pcd τα οποία είναι τα αρχεία που διαβάζει η βιβλιοθήκη PCL. Τέλος αποφασίστηκε να εξαχθεί μόνο η κεραία και όχι ολόκληρη η σάρωση για να είναι πιο γρήγορη (χρονικά) η επεξεργασία των νεφών από τους αλγορίθμους (διότι ο χρόνος αυξάνεται όσο περισσότερα σημεία περιέχει ένα νέφος).



Σχήμα 4.10: Η σαρωμένη κεραία μέσα από το πρόγραμμα CloudCompare

4.3.3 Μέγεθος παραμορφώσεων

Για να υπάρχει η δυνατότητα αξιολόγησης των αλγορίθμων, οι παραμορφώσεις οι οποίες τοποθετήθηκαν στην κεραία, μετρήθηκαν με ένα παχύμετρο (βλ. εικόνα 4.5).

Η άσπρη πλαστελίνη είχε τετράγωνο σχήμα με αυλακώσεις και είχε μήκος περί τα 4.3 cm και πλάτος περί τα 8.3 cm ενώ το μέσο πάχος της ήταν περίπου 0.9 cm (βλ. εικόνα 4.6).

Η μπλε πλαστελίνη είχε πιο πολύπλοκο σχήμα (βλ. εικόνα 4.7). Το πλάτος ήταν περίπου 3.6 cm ενώ είχε δύο τμήματα διαφορετικού πάχους. Το μήκος του άνω κομματιού ήταν περίπου 6.2 cm ενώ είχε μέσο πάχος περίπου στα 2.2 cm ενώ το μήκος του κάτω κομματιού ήταν περίπου 7.3 cm με μέσο πάχος τα 0.3 cm.

Τέλος η κίτρινη πλαστελίνη (βλ. εικόνα 4.8) ήταν η μεγαλύτερη από όλες. Είχε ομοιόμορφο σχήμα και είχε μήκος περί τα 7.8 cm και πλάτος 7.2 cm ενώ το μέσο πάχος της ήταν στα 3.5 cm.

Εικόνα 4.5: Το παχύμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την διαστατολόγηση των πλαστελινών

(α') Το μήκος της άσπρης πλαστελίνης

(β') Το πλάτος της άσπρης πλαστελίνης

Εικόνα 4.6: Η λευκή πλαστελίνη

(α') Το πλάτος της μπλε πλαστελίνης

(β') Το μήκος της μπλε πλαστελίνης στο άνω κομμάτι της

(γ') Το πλάτος της μπλε πλαστελίνης στο κάτω κομμάτι της

Εικόνα 4.7: Η μπλέ πλαστελίνη

(α') Το μήκος της κίτρινης πλαστελίνης

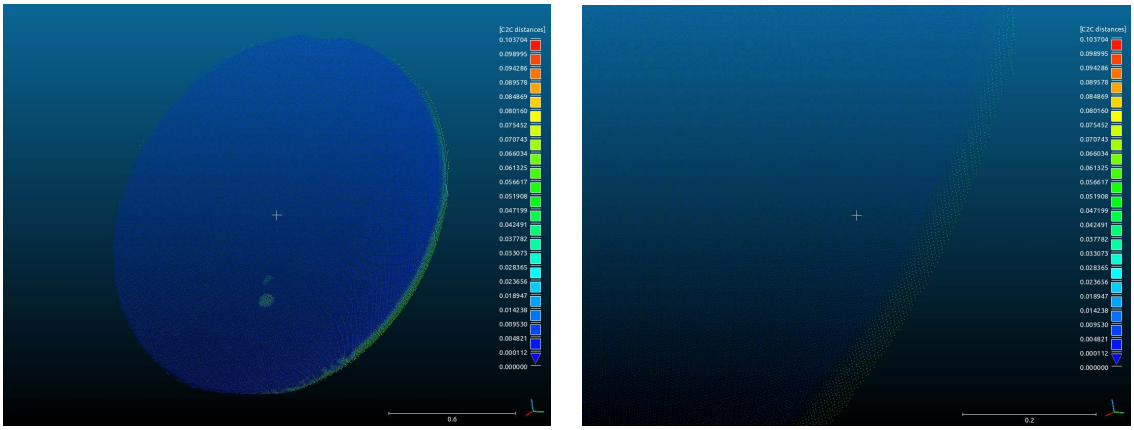
(β') Το πλάτος της κίτρινης πλαστελίνης

Εικόνα 4.8: Η κίτρινη πλαστελίνη

4.3.4 1ο πείραμα

Σε αυτό το πείραμα επιλέχθηκε οι αλγόριθμοι να δοκιμαστούν κάτω από ιδανικές συνθήκες και να περιοριστούν στο ελάχιστο οι εξωτερικές επιδράσεις.

Όταν συγκρίνονται δύο νέφη σημείων θα πρέπει η έκταση του νέφους αναφοράς είναι μεγαλύτερη από την έκταση του συγκρινόμενου νέφους και αυτό συμβαίνει διότι οι αλγόριθμοι δεν μπορούν να ξεχωρίσουν πότε δεν υπάρχει πραγματική αντιστοιχία και πότε παραμόρφωση με αποτέλεσμα στα όρια των νεφών όταν το συγκρινόμενο νέφος είναι μεγαλύτερο να υπάρχει ψευδής εύρεση παραμορφώσεων. Στο σχήμα 4.11 φαίνεται η ψευδής παραμόρφωση που προκύπτει όταν δεν υπάρχει πραγματική αντιστοιχία στα δυο νέφη.



(α') (β')

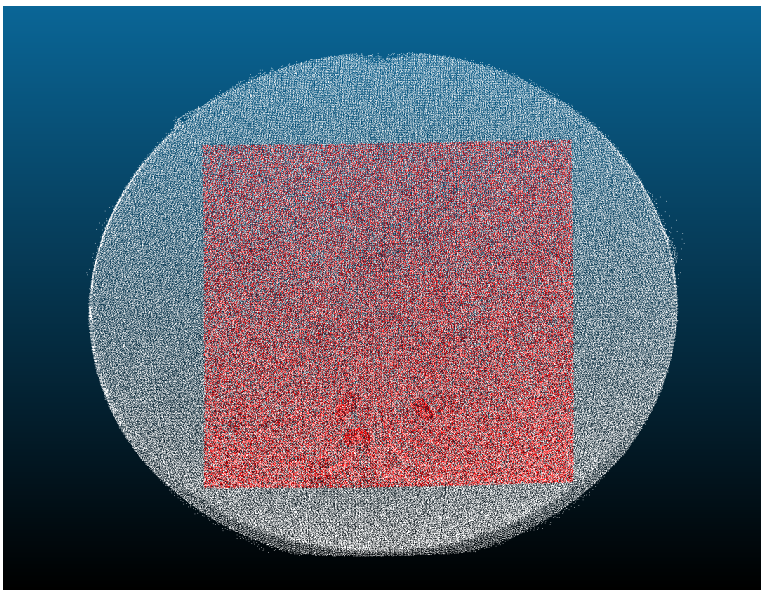
Σχήμα 4.11: Ψευδείς παραμορφώσεις

Ακόμα καλό θα ήταν το νέφος αναφοράς να έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το συγκρινόμενο νέφος μιας και η πυκνότητα μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία μερικών αλγόριθμων.

Τέλος η συνένωση των νεφών και η γεωαναφορά τους στο ίδιο σύστημα πραγματοποιήθηκε έχοντας στο νου την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων, μιας και η συνένωση είναι ένα από τα πιο κρίσιμα στάδια μιας και μπορεί να εισάγει σημαντικά σφάλματα στην διαδικασία.

Με το παραπάνω σκεπτικό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν οι σαρώσεις που παράχθηκαν και από τις 3 θέσεις του σαρωτή με πυκνότητα σημείων 5mm. Επομένως η ύπαρξη πλεονάζουσας πληροφορίας κατά την διάρκειας της συνένωσης (μιας και υπήρχαν 3 θέσεις) και της γεωαναφοράς βοήθησε στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων της συνένωσης, ενώ έπειτα κόπηκε ένα κομμάτι της κεραίας για να παραχθεί το συγκρινόμενο νέφος. Έτσι το νέφος αναφοράς είχε 257866 σημεία ενώ το συγκρινόμενο νέφος 132167 σημεία (βλ. σχήμα 4.12).

Έπειτα εκτελέστηκαν οι αλγόριθμοι. Η επιλογή των παραμέτρων των αλγορίθμων έγινε με βάση την πληρότητα των αποτελεσμάτων. Έτσι για τον αλγόριθμο της εγγύτερης επι-



Σχήμα 4.12: Τα συγκρινόμενα νέφη στο 1ο πείραμα. Με άσπρο το νέφος αναφοράς και κόκκινο το συγκρινόμενο νέφος

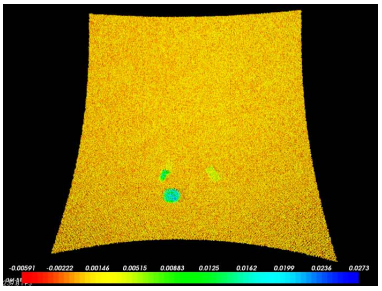
φάνειας χρησιμοποιήθηκαν και οι τρεις επιλογές που μας έδινε το πρόγραμμα CloudCompare. Για τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες επιλογές της βιβλιοθήκης PCL, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιήθηκαν και ακραίες τιμές για κάθε μία μεταβλητή για να δούμε πόσο επηρεάζει τα αποτελέσματα. Τέλος για τον αλγόριθμο του ICP χρησιμοποιήθηκαν 4 μεγέθη κύβου (voxel size). Το πρώτο ήταν αρκετά μεγάλο και το τελευταίο αρκετά μικρό. Τα άλλα δύο ήταν ενδιάμεσες τιμές για την αξιολόγηση της λειτουργίας του αλγορίθμου.

Ενδεικτικά παρατίθεται τα αποτελέσματα του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα στο σχήματα 4.13 και 4.14. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των αλγορίθμων βρίσκονται στα σχήματα Α'.8, Α'.10, Α'.12, Α'.14, Α'.16, Α'.18, Α'.20, Α'.22, Α'.24, Α'.26, Α'.28, Α'.30 και Α'.32 του παραρτήματος.

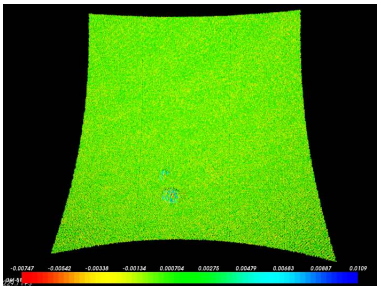
Όλοι οι αλγόριθμοι εντόπισαν τις παραμορφώσεις άνω των 5mm, που είναι περίπου και η ακρίβεια του κάθε σημείου που λαμβάνει ο σαρωτής. Επομένως, όταν το νέφος αναφοράς έχει μεγαλύτερη πυκνότητα σημείων από το συγκρινόμενο νέφος, η πυκνότητα των σημείων δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην ανίχνευση των παραμορφώσεων, παρά μόνο με την λεπτομέρεια με την οποία θα εμφανίζονται (βλ. σχήμα 4.15 και 4.16).

Όμως παρόλο που όλοι οι αλγόριθμοι εντόπισαν τις παραμορφώσεις, υπήρξαν δύο οι οποίοι δεν τις εντόπισαν σωστά ή υπήρχε στα αποτελέσματα τους αρκετός θόρυβος. Αυτοί οι δύο αλγόριθμοι ήταν ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με παραμέτρους 5 και 300 και ο αλγόριθμος του ICP με voxel size ίσο με 0.1m (βλ. σχήμα 4.17).

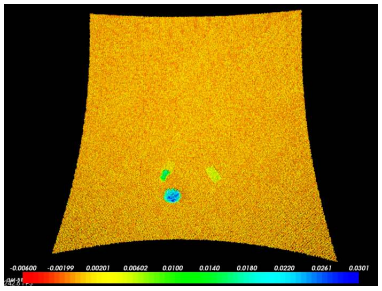
Διαπιστώθηκε ότι στον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος, όσο αυξανόταν ο αριθμός των εγγύτερων σημείων στο νέφος αναφοράς τα αποτελέσματα γινόντουσαν χειρότερα ενώ αντίθετα όσο αυξανόταν ο αριθμός των σημείων από τα οποία υπολογιζόταν



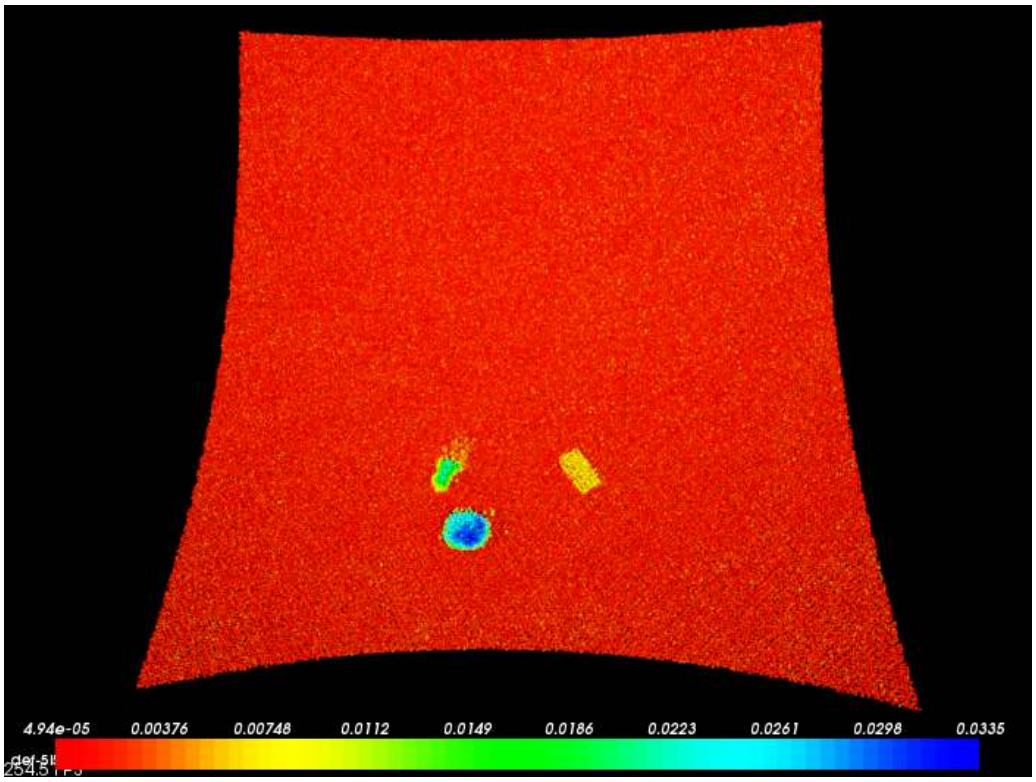
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

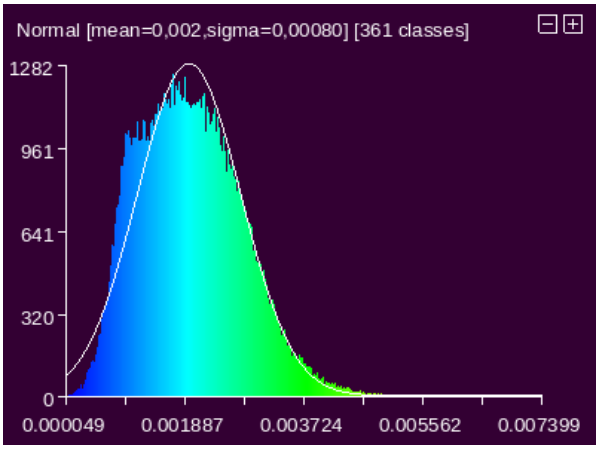


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

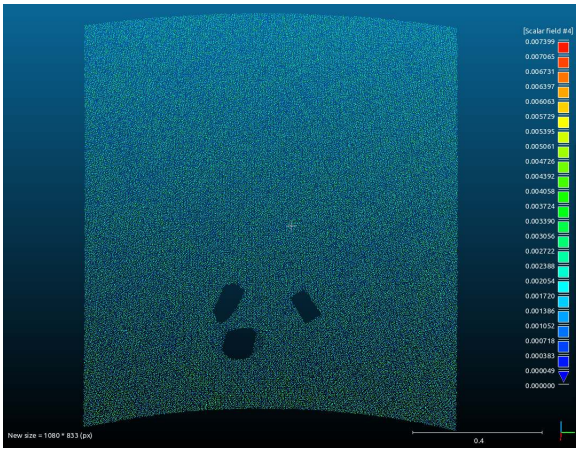


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα 4.13: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL

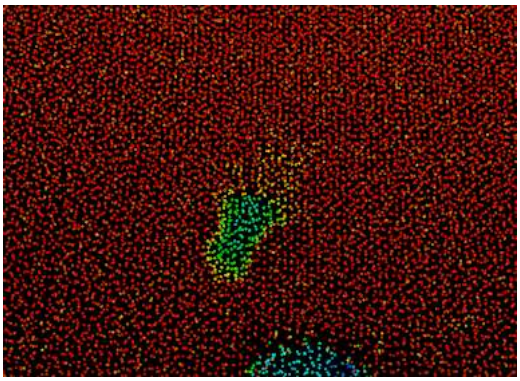


(α') Το ιστόγραμμα



(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

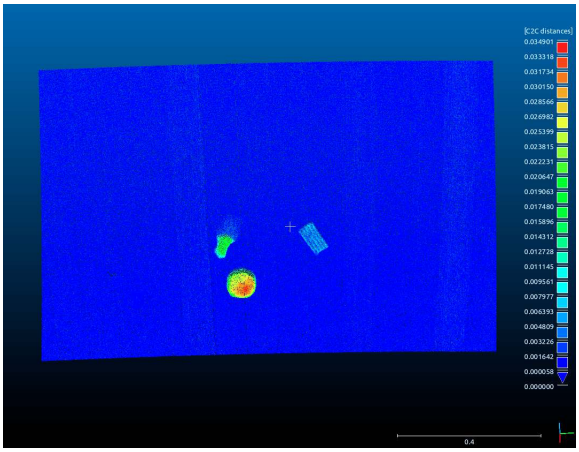
Σχήμα 4.14: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από την PCL



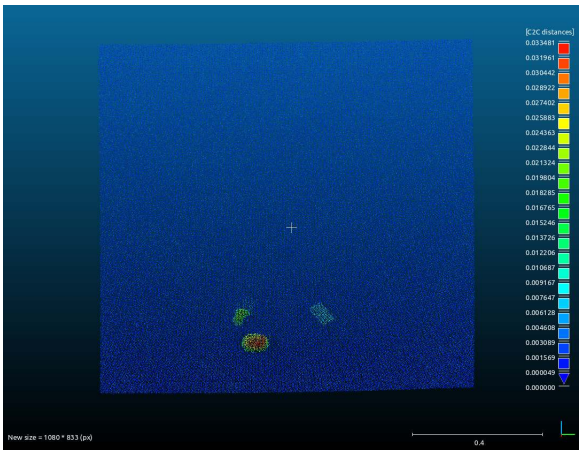
(α') Η παραμόρφωση από τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος με παραμέτρους 300,10

(β') Φωτογραφία της μπλε πλαστελίνης

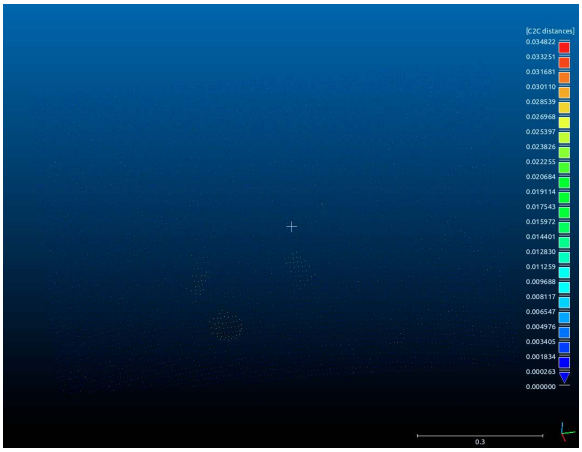
Σχήμα 4.15: Η λεπτή παραμόρφωση στην μπλέ πλαστελίνη



(α') Ανίχνευση παραμορφώσεων χρησιμοποιώντας νέφη πυκνότητας 1mm

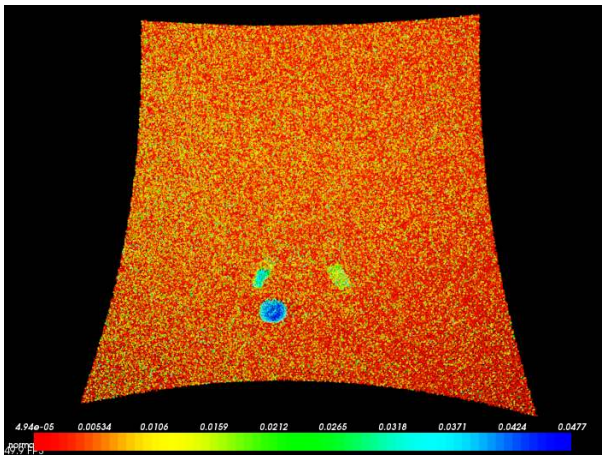


(β') Ανίχνευση παραμορφώσεων χρησιμοποιώντας νέφη πυκνότητας 5mm

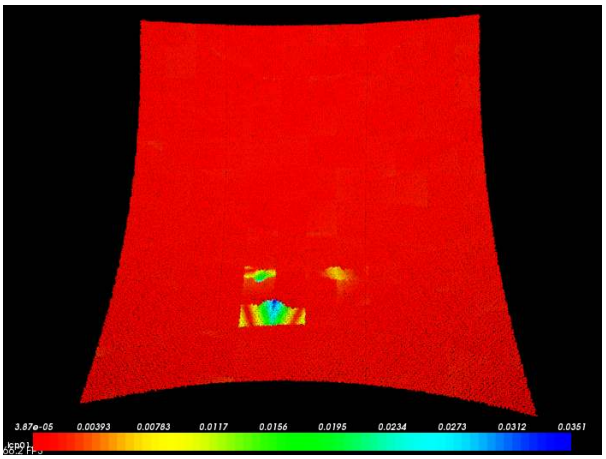


(γ') Ανίχνευση παραμορφώσεων χρησιμοποιώντας νέφη πυκνότητας 10mm

Σχήμα 4.16: Σύγκριση πυκνοτήτων χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα του προγράμματος CloudCompare



(α') Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με παραμέτρους 5 και 300



(β') Ο αλγόριθμος του ICP με voxel size ίσο με 0.1m

Σχήμα 4.17: Οι αλγόριθμοι που δεν εντόπισαν σωστά τις παραμορφώσεις στο 1ο πειράμα

το εφαπτόμενο επίπεδο τα αποτελέσματα γινόντουσαν καλύτερα. Επομένως όταν αυτά συνδυάστηκαν, δηλαδή μεγάλος αριθμός εγγύτερων σημείων στο νέφος αναφοράς, μικρός αριθμός από το οποίο υπολογιζόταν το εφαπτόμενο επίπεδο τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων δεν ήταν ικανοποιητικά.

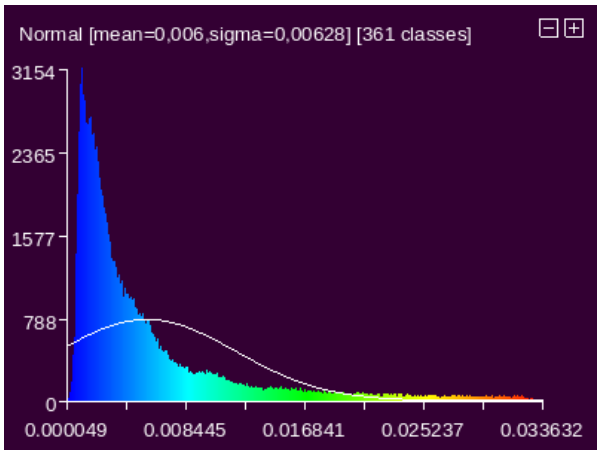
Αντιθέτως ο αλγόριθμος του ICP δεν κατάφερε να εντοπίσει με λεπτομέρεια τις παραμορφώσεις λόγω του μεγάλου μεγέθους του voxel. Όταν το το μέγεθος του voxel μειώθηκε τα αποτελέσματα ήταν καλύτερα.

Για να συγκριθεί η ποιότητα των αποτελεσμάτων του κάθε αλγορίθμου υπολογίστηκαν τα ιστογράμματα αφού αφαιρέθηκαν οι παραμορφώσεις (βλ. σχήμα 4.14). Όλα τα ιστογράμματα των αλγορίθμων βρίσκονται στα σχήματα Α'.9, Α'.11, Α'.13, Α'.15, Α'.17, Α'.19, Α'.21, Α'.23, Α'.25, Α'.27, Α'.29, Α'.31 και Α'.33 του παραρτήματος. Οι περιοχές των παραμορφώσεων αφαιρέθηκαν για να φανεί στο ιστόγραμμα ο θόρυβος των μετρήσεων. Θεωρητικά χωρίς τις παραμορφώσεις όλες οι υπόλοιπες διαφορές θα έπρεπε να είναι μηδέν. Αντιθέτως λόγω της ύπαρξης θορύβου υπάρχουν κάποια υπόλοιπα. Το ιστόγραμμα κατατάσσει σε κλάσεις αυτές τις διαφορές και τις τοποθετεί σε διάγραμμα στο οποίο είναι εμφανείς αυτές οι διαφορές. Ο μέσος όρος των ιστογραμμάτων (δηλαδή των υπολοίπων των μετρήσεων) μαζί με τον χρόνο εκτέλεσης των αλγορίθμων φαίνονται στον πίνακα 4.2.

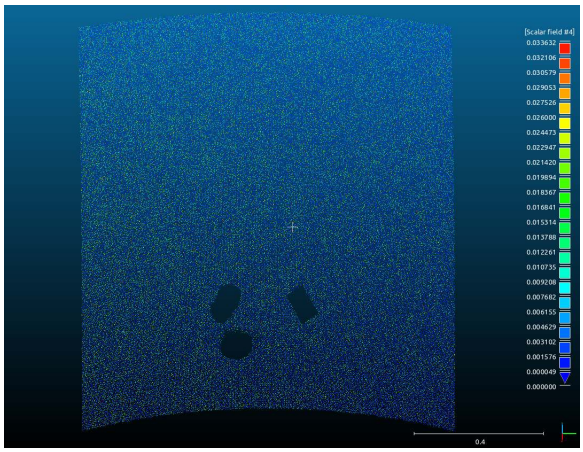
Παρατηρείται ότι όλοι οι αλγόριθμοι, εκτός του αλγόριθμου του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με παραμέτρους 5 και 300, έχουν μέσο όρο στα ιστογράμματα κάτω των 5 mm που είναι και το όριο θορύβου των μετρήσεων. Επομένως οι αλγόριθμοι δεν "δημιουργούν" επιπλέον θόρυβο. Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με παραμέτρους 5 και 300, όπως φαίνεται στο διάγραμμα έχει αποτύχει μιας και έχει σε περιοχές στις οποίες δεν υπάρχουν παραμορφώσεις, έχει δημιουργήσει παραμορφώσεις της τάξης του εκατοστού και σε ακραίες περιπτώσεις έχουμε μέχρι 3.5 cm θόρυβο (βλ. σχήμα 4.18).

Αλγόριθμος	Πρόγραμμα	Παράμετροι	Χρόνος εκτέλεσης (sec)	Μ.Ο. (mm) ιστογρ.
Εγγύτερος γείτονας	CloudCompare	—	1.63	2
	PCL	—	0.12	2
Εγγύτερη επιφάνεια	CloudCompare	επιπέδο	2.23	1
		triangulation	2.93	2
		quadratic	2.63	1
Κάθετο διάνυσμα	PCL	5,10	0.37	3
		300,10	5.05	2
		5,300	5.19	6
		300,50	7.40	2
ICP	PCL	0.1m	24.3	1
		0.05m	93.78	1
		0.02m	522.83	1
		0.01m	1566.36	1

Πίνακας 4.2: Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων στο 1ο πείραμα



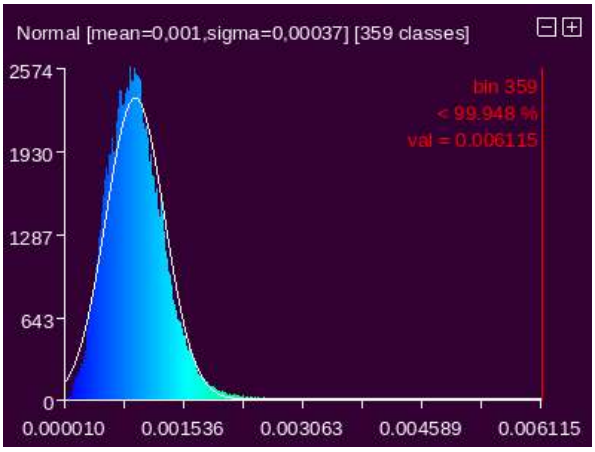
(α') Το ιστόγραμμα



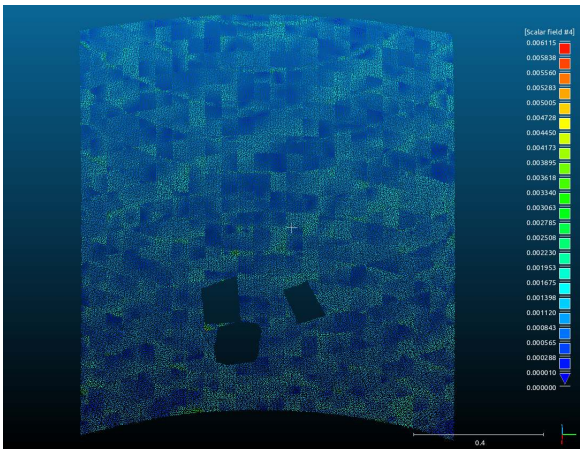
(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

Σχήμα 4.18: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 300)

Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι ο αλγόριθμος του ICP εξομάλυνε τον θόρυβο και η τυπική απόκλιση του ήταν μικρότερη σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγόριθμους και προσομοίαζε την κανονική κατανομή (βλ. σχήμα 4.19). Επομένως σε πολύ θορυβώδης μετρήσεις θα βοηθούσε στην εξαγωγή πιο σωστών συμπερασμάτων. Όμως το γεγονός ότι χωρίζει τον χώρο σε υπο-κύβους μειώνει την ευαισθησία του αλγορίθμου σε μικρές παραμορφώσεις ενώ πολλές φορές αδυνατεί να υπολογίσει παραμορφώσεις με μερικά σημεία διότι ο υπο-κύβος περιέχει πολύ λίγα σημεία μέσα (<3).



(α') Το ιστόγραμμα



(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

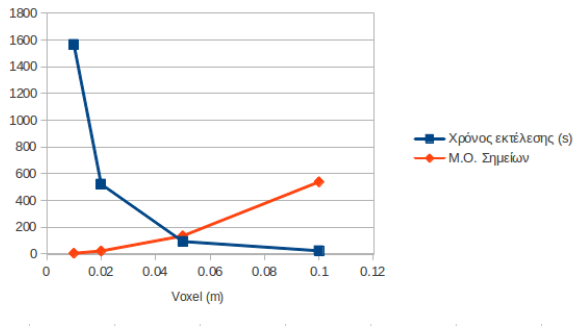
Σχήμα 4.19: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.05

Στον πίνακα 4.19 φαίνεται το μέγεθος του voxel, ο μέσος όρος των σημείων, ο αριθμός των voxel στα οποία χωρίστηκε το νέφος, τα voxel στα οποία δεν υπήρχε αρκετός αριθμός σημείων για τον υπολογισμό παραμορφώσεων ενώ ακόμα υπάρχει και το ποσοστό των σημείων για τα οποία υπολογίστηκαν παραμορφώσεις. Όπως φαίνεται όσο μικραίνει το voxel τόσο πιο δύσκολος γίνεται ο υπολογισμός παραμορφώσεων.

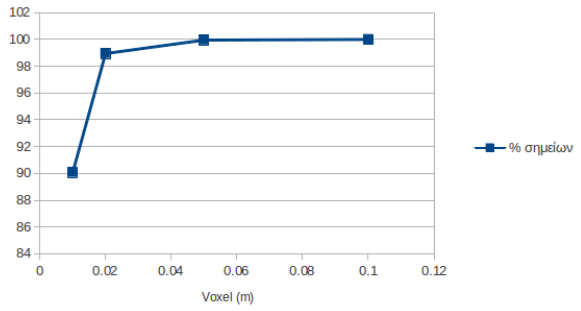
Μέγεθος Voxel (m)	Μ.Ο. σημείων	Αριθμός Voxel	Μη επαρκή	% σημείων
0.1	539.457	244	6	99.993
0.05	135.556	974	40	99.948
0.02	22.7599	5806	793	98.943
0.01	5.81567	22725	7411	90.067

Πίνακας 4.3: Στατιστικά για τον αλγόριθμο του ICP

Ακόμα από τον πίνακα 4.2 και το σχήμα 4.20 φαίνεται ότι ο ICP σε σύγκριση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους χρειάζεται πολύ περισσότερο χρόνο και το όφελος στο συγκεκριμένο πείραμα δεν είναι πολύ μεγάλο που να δικαιολογεί την τόση διαφορά στον χρόνο. Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου ο περισσότερος χρόνος καταναλώνεται στην δημιουργία του octree και στην εύρεση αντιστοιχιών. Επομένως μια πιο γρήγορη δενδροειδή δομή που θα χωρίζει και τον χώρο πιο αποτελεσματικά, έτσι ώστε να σιγουρεύει ότι θα υπολογίζονται παραμορφώσεις για όλα τα σημεία, ίσως να ήταν πιο κατάλληλη και να μείωνε τον απαιτούμενο χρόνο για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων.



(α')

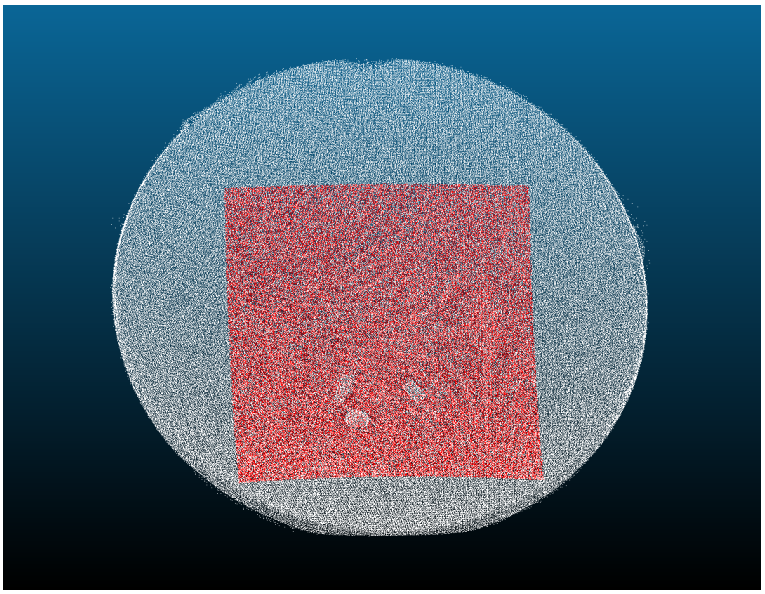


(β')

Σχήμα 4.20: Διαγράμματα για τον αλγόριθμο του ICP από το 1ο πείραμα

4.3.5 2ο πείραμα

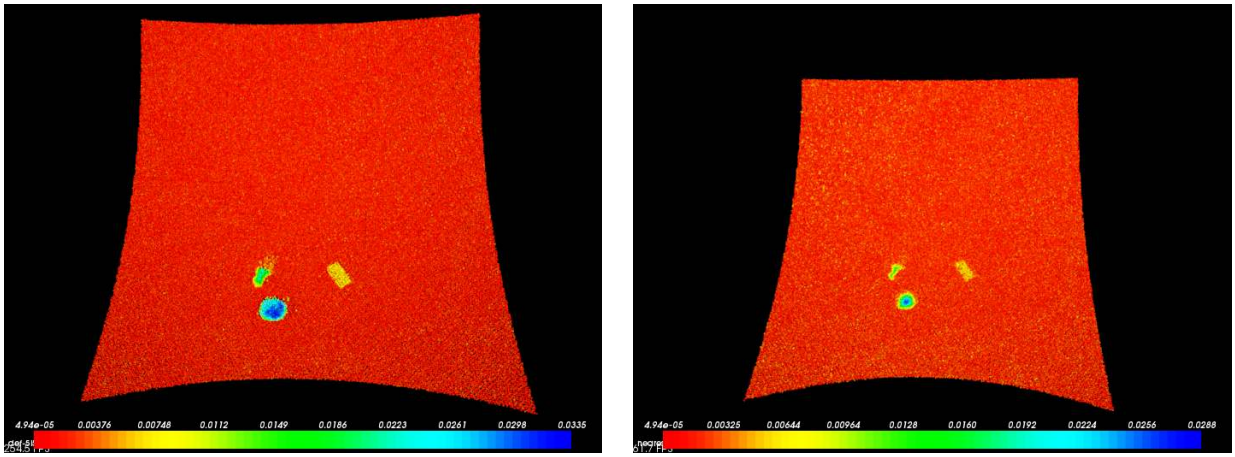
Σε αυτό το πείραμα, επαναλήφθηκαν οι συνθήκες του 1ου πειράματος. Δηλαδή χρησιμοποιήθηκαν όλες οι θέσεις σάρωσης με πυκνότητα σημείων 5mm και ελαχιστοποιήθηκαν τα σφάλματα συνένωσης. Η μόνη διαφορά με το προηγούμενο πείραμα είναι ότι αντί να αναζητηθούν οι παραμορφώσεις από την χρονική στιγμή $t2$ στην $t1$ αναζητήθηκαν από την $t1$ στην $t2$. Στις κλασσικές γεωδαιτικές τεχνικές, η αλλαγή αυτή έχει ως αποτέλεσμα, να προκύψουν οι ίδιες κατά μέγεθος παραμορφώσεις, με μόνη διαφορά ότι έχουν αντίθετη φορά. Σε αυτό το πείραμα γίνεται προσπάθεια να διαπιστωθεί αν ισχύει το ίδιο και στις παραμορφώσεις που ανιχνεύονται από νέφη σημείων. Επομένως αυτή τη φορά, το νέφος αναφοράς μας ήταν η παραμορφωμένη κατάσταση και το συγκρινόμενο νέφος η μη παραμορφωμένη. Το νέφος αναφοράς αυτή τη φορά είχε 255300 σημεία ενώ το συγκρινόμενο νέφος 111240 σημεία (βλ. σχήμα 4.21).



Σχήμα 4.21: Τα συγκρινόμενα νέφη στο 2ο πείραμα. Με άσπρο το νέφος αναφοράς και κόκκινο το συγκρινόμενο νέφος

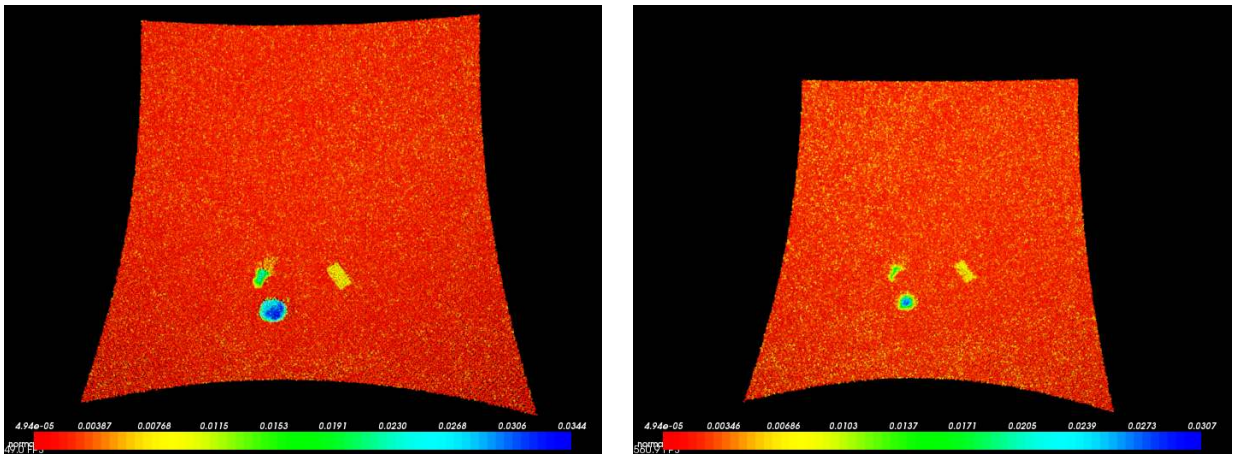
Έπειτα ομοίως εκτελέστηκαν οι αλγόριθμοι. Διατηρήθηκαν οι ίδιες παράμετροι με το

προηγούμενο πείραμα μιας και ήταν αρκετά ικανοποιητικές για τον εντοπισμό τυχόν προβλημάτων. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των αλγορίθμων βρίσκονται στα σχήματα Α'.34, Α'.36, Α'.38, Α'.40, Α'.42, Α'.44, Α'.46, Α'.48, Α'.50, Α'.52, Α'.54, Α'.56 και Α'.58 του παραρτήματος. Όλοι οι αλγόριθμοι εντόπισαν τις παραμορφώσεις, όμως υπήρχαν διαφορές σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του 1ου πειράματος (βλ. σχήμα 4.22, 4.23, 4.24). Τις μεγαλύτερες διαφορές τις είχαν οι αλγόριθμοι που σύγκριναν τα σημεία με βάση της απόσταση τους (όπως ο αλγόριθμος του εγγύτερου σημείου και ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας). Αντιθέτως ο αλγόριθμος που βασιζόταν στον ICP λόγω της επαναληπτικής φύσης του ICP κατάφερε να προσεγγίσει την πραγματικότητα ελαφρώς καλύτερα σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους.



(α') 1ο πείραμα (β') 2ο πείραμα

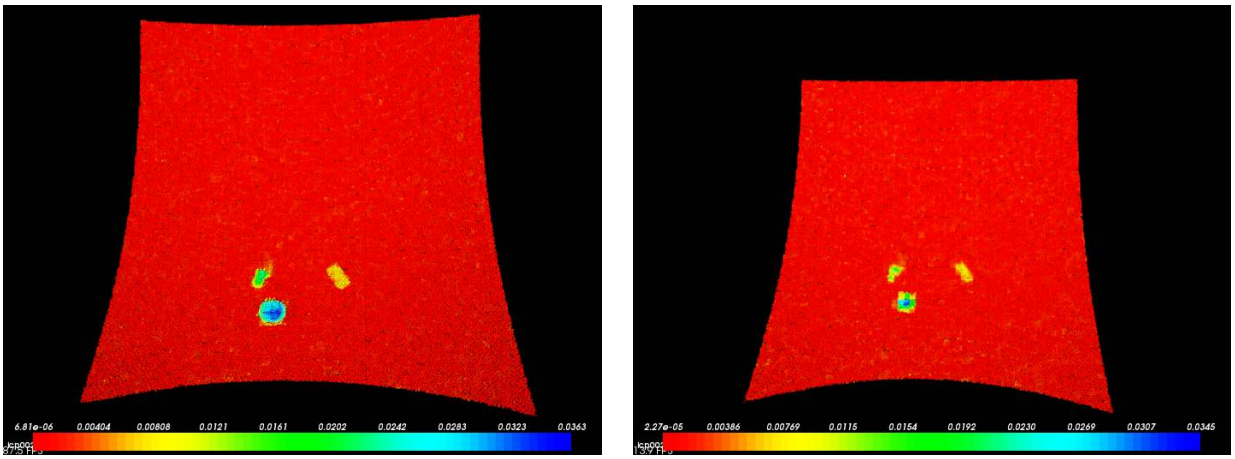
Σχήμα 4.22: Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα μεταξύ 1ου και 2ου πειράματος



(α') 1ο πείραμα (β') 2ο πείραμα

Σχήμα 4.23: Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10) μεταξύ 1ου και 2ου πειράματος

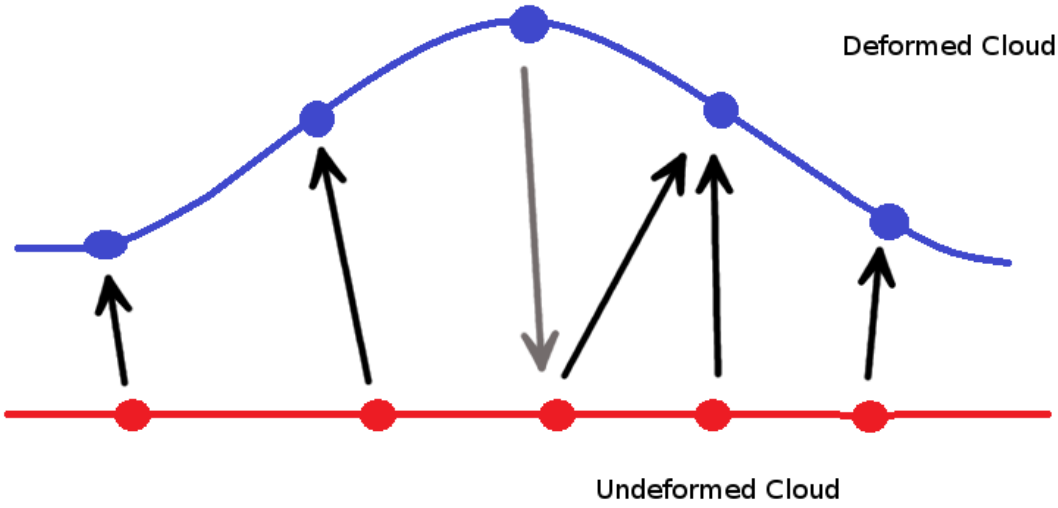
Ο λόγος για τον οποίο οι αλγόριθμοι δεν συγκλίνουν στα ίδια αποτελέσματα φαίνεται στο σχήμα 4.25. Όταν συγκρίνεται το παραμορφωμένο με το μη παραμορφωμένο νέφος ο εγγύτερος γείτονας φαίνεται με το γκρι βελάκι. Αντιθέτως όταν συγκρίνεται το



(α') 1ο πείραμα (β') 2ο πείραμα

Σχήμα 4.24: Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του ICP (με voxel ίσο με 0.02) μεταξύ 1ου και 2ου πειράματος

μη παραμορφωμένο με το παραμορφωμένο νέφος, τότε ο εγγύτερος γείτονας φαίνονται με τα μαύρα βελάκια. Λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων ο εγγύτερος γείτονας δεν είναι ο σωστός και γι' αυτό το πρόβλημα των λάθος παραμορφώσεων εμφανίζεται μόνο στις μεγάλες πλαστελίνες. Αντιθέτως στις μικρές πλαστελίνες τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με το 1ο πείραμα.



Σχήμα 4.25: Όταν συγκρίνεται το παραμορφωμένο με το μη παραμορφωμένο νέφος ο εγγύτερος γείτονας φαίνεται με το γκρι βελάκι. Αντιθέτως όταν συγκρίνεται το μη παραμορφωμένο με το παραμορφωμένο νέφος, τότε ο εγγύτερος γείτονας φαίνονται με τα μαύρα βελάκια

Τέλος υπολογίστηκαν πάλι όλα τα ιστογράμματα. Όλα τα ιστογράμματα των αλγορίθμων βρίσκονται στα σχήματα Α'.35, Α'.37, Α'.39, Α'.41, Α'.43, Α'.45, Α'.47, Α'.49, Α'.51, Α'.53, Α'.55, Α'.57 και Α'.59 του παραρτήματος. Οι τιμές τους είναι ίδιες με τις τιμές του 1ου πειράματος και δεν παρατηρείται κάποια διαφορά άξια σχολιασμού. Ακόμα ο μέσος όρος των ιστογραμμάτων μαζί με τον χρόνο εκτέλεσης των αλγορίθμων φαίνονται στον πίνακα 4.4 ενώ ομοίως στον πίνακα 4.5 έχουν υπολογιστεί τα στατιστικά στοιχεία του

αλγορίθμου ICP που είναι και αυτά παρόμοια με το 1ο πείραμα.

Αλγόριθμος	Πρόγραμμα	Παράμετροι	Χρόνος εκτέλεσης (sec)	Μ.Ο. (mm) ιστογρ.
Εγγύτερος γείτονας	CloudCompare	—	2.76	2
	PCL	—	0.12	2
Εγγύτερη επιφάνεια	CloudCompare	επίπεδο	2.38	1
		triangulation	2.92	2
		quadratic	2.75	1
Κάθετο διάνυσμα	PCL	5,10	0.33	3
		300,10	4.32	2
		5,300	4.47	6
		300,50	4.69	2
ICP	PCL	0.1m	24.04	1
		0.05m	79.99	1
		0.02m	418.89	1
		0.01m	1270.36	1

Πίνακας 4.4: Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων στο 2ο πείραμα

Voxel size (m)	Μ.Ο. σημείων	Αριθμός Voxel	Μη επαρκή	%
0.1	463.500	239	3	99.996
0.05	133.702	831	35	99.940
0.02	22.5868	4927	717	98.832
0.01	5.90164	18848	5928	90.354

Πίνακας 4.5: Στατιστικά για τον αλγόριθμο του ICP από το 2ο πείραμα

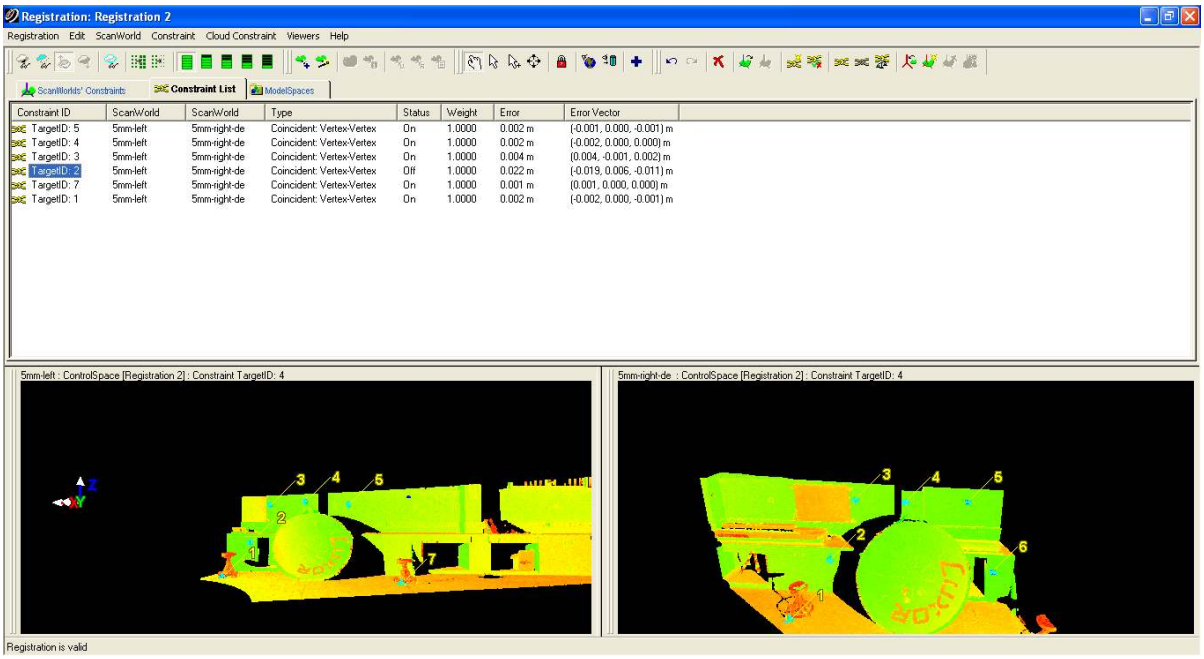
4.3.6 3ο πείραμα

Σε αυτό το πείραμα επιλέχθηκε να δοκιμαστεί πόσο επηρεάζει το σφάλμα της συνένωσης στην ανίχνευση των παραμορφώσεων. Γι' αυτό το σκοπό αφέθηκε ένα μικρό σφάλμα στην συνένωση (βλ. σχήμα 4.26).

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.26 χρησιμοποιήθηκαν τα νέφη από την αριστερή και την δεξιά πλευρά σάρωσης της κεραίας με πυκνότητα 5 mm. Το νέφος αναφοράς ήταν το αριστερό νέφος με 70920 σημεία ενώ το συγκρινόμενο νέφος ήταν το δεξί νέφος με 40195 σημεία (βλ. σχήμα 4.27).

Έπειτα εκτελέστηκαν οι αλγόριθμοι. Διατηρήθηκαν οι ίδιες παράμετροι με το προηγούμενο πείραμα μιας και ήταν αρκετά ικανοποιητικές για τον εντοπισμό τυχόν προβλημάτων. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των αλγορίθμων βρίσκονται στα σχήματα Α'.60, Α'.62, Α'.64, Α'.66, Α'.68, Α'.70, Α'.72, Α'.74, Α'.76, Α'.78, Α'.80, Α'.82 και Α'.84 του παραρτήματος.

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η διακριτική ικανότητα των αλγορίθμων μειώθηκε αισθητά. Όλοι οι αλγόριθμοι δεν εντόπισαν την άσπρη πλαστελίνη, παρόλο που στο 1ο

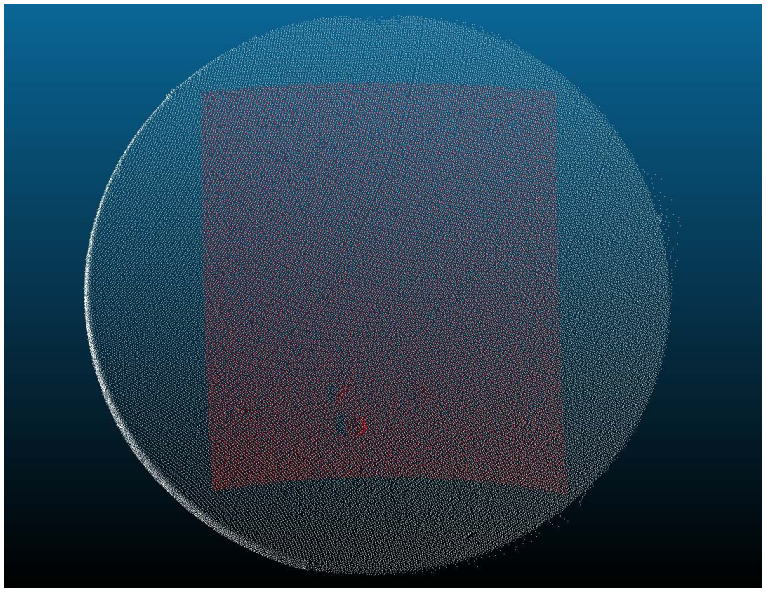


(α') Τα παράθυρο συνένωσης των νεφών

TargetID: 3	5mm-left	5mm-right-de	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004 m	(0.004, -0.001, 0.002) m
TargetID: 2	5mm-left	5mm-right-de	Coincident: Vertex-Vertex	Off	1.0000	0.022 m	(-0.019, 0.006, -0.011) m
TargetID: 7	5mm-left	5mm-right-de	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.001, 0.000, 0.000) m

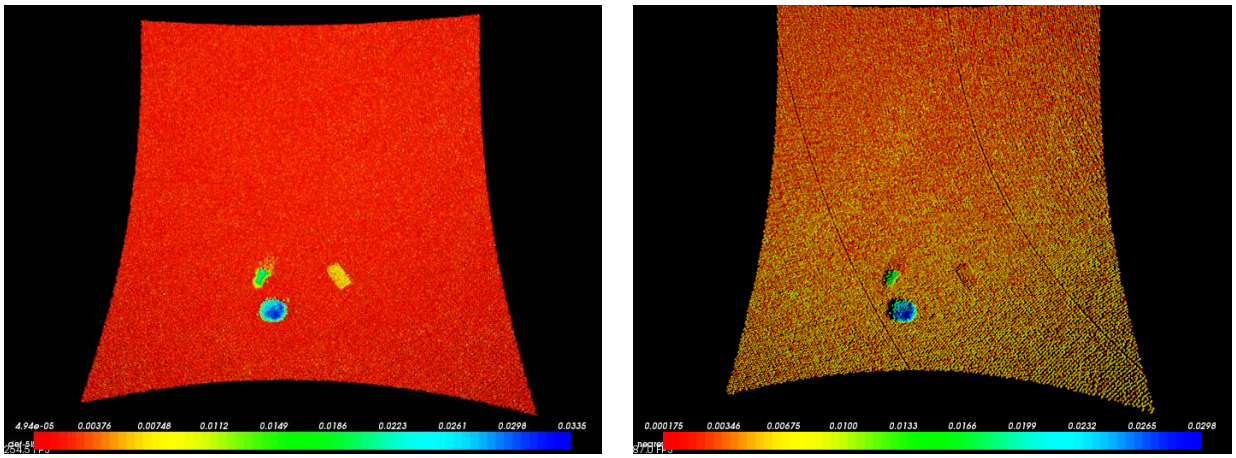
(β') Το σφάλμα της συνένωσης

Σχήμα 4.26: Λάθος στην συνένωση



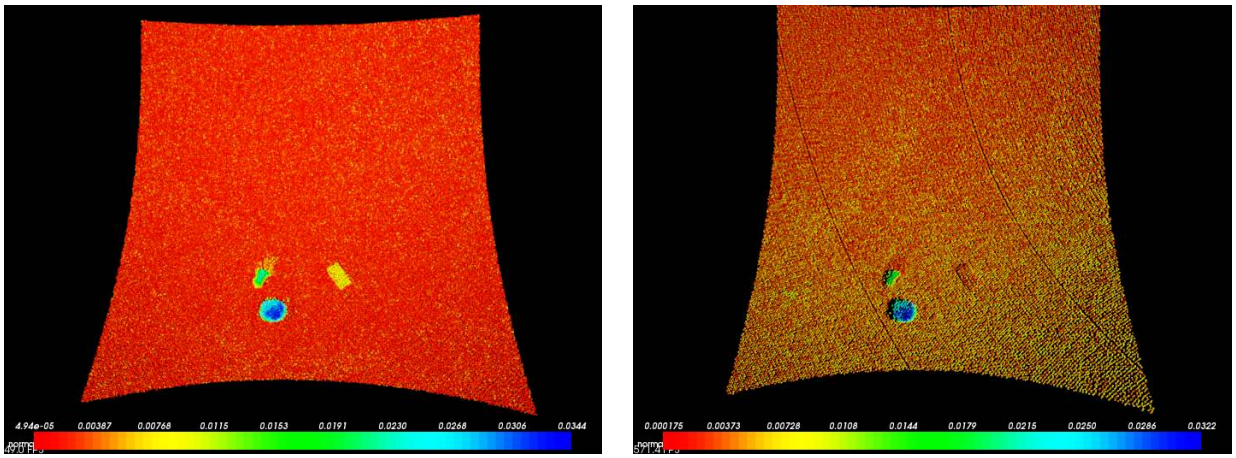
Σχήμα 4.27: Τα συγκρινόμενα νέφη στο 3ο πείραμα. Με άσπρο το νέφος αναφοράς και κόκκινο το συγκρινόμενο νέφος

πείραμα την είχαν εντοπίσει. Δηλαδή δεν ήταν δυνατόν να εντοπίσουν παραμορφώσεις μικρότερες του εκατοστού(βλ. σχήμα 4.28, 4.29, 4.30). Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η διακριτική ικανότητα των αλγορίθμων μειώθηκε αισθητά. Όλοι οι αλγόριθμοι δεν εντόπισαν την άσπρη πλαστελίνη, παρόλο που στο 1ο πείραμα την είχαν εντοπίσει. Δηλαδή δεν ήταν δυνατόν να εντοπίσουν παραμορφώσεις μικρότερες του εκατοστού



(α') 1ο πείραμα (β') 3ο πείραμα

Σχήμα 4.28: Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα μεταξύ 1ου και 3ου πειράματος

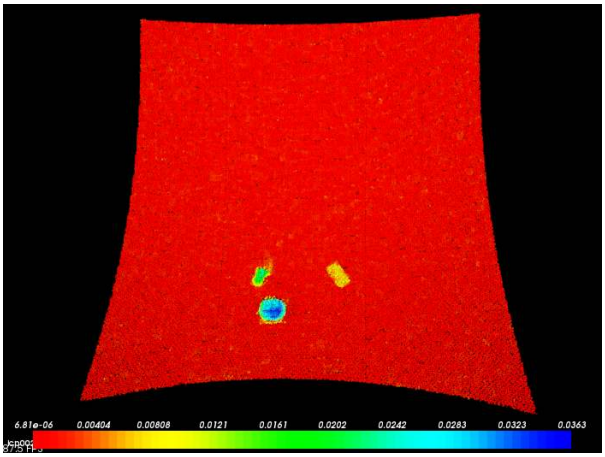


(α') 1ο πείραμα (β') 3ο πείραμα

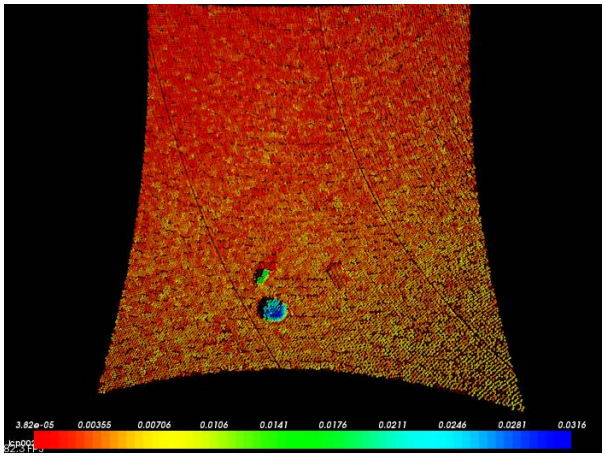
Σχήμα 4.29: Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10) μεταξύ 1ου και 3ου πειράματος

Διορθώνοντας τα σφάλματα της συνένωσης χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ICP (βλ. σχήμα 4.31), παρατηρούμε ότι οι αλγόριθμοι είναι πάλι σε θέση να ανιχνεύσουν και την άσπρη πλαστελίνη ακριβώς όπως και στο 1ο πείραμα.

Τέλος υπολογίστηκαν πάλι τα ιστογράμματα. Όλα τα ιστογράμματα των αλγορίθμων βρίσκονται στα σχήματα Α'.61, Α'.63, Α'.65, Α'.67, Α'.69, Α'.71, Α'.73, Α'.75, Α'.77, Α'.79, Α'.81, Α'.83 και Α'.85 του παραρτήματος. Όπως παρατηρούμε (βλ. σχήμα 4.32 και πίνακα 4.6) ο μέσος όρος των ιστογραμμάτων έχει μεγαλώσει φανερώνοντας τον θόρυβο που

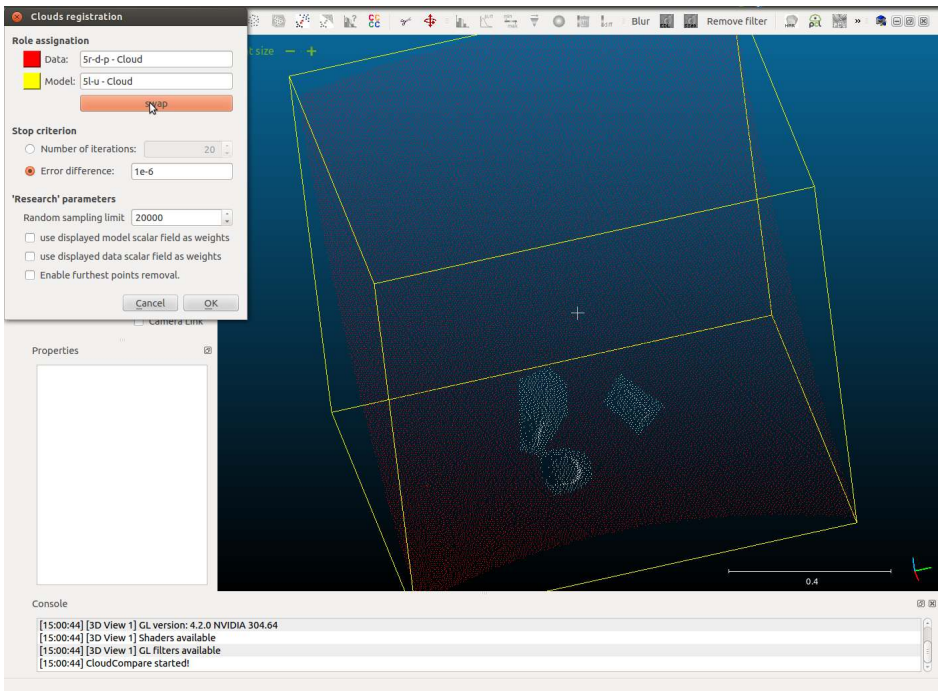


(α') 1ο πείραμα



(β') 3ο πείραμα

Σχήμα 4.30: Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του ICP (με voxel ίσο με 0.02) μεταξύ 1ου και 3ου πειράματος

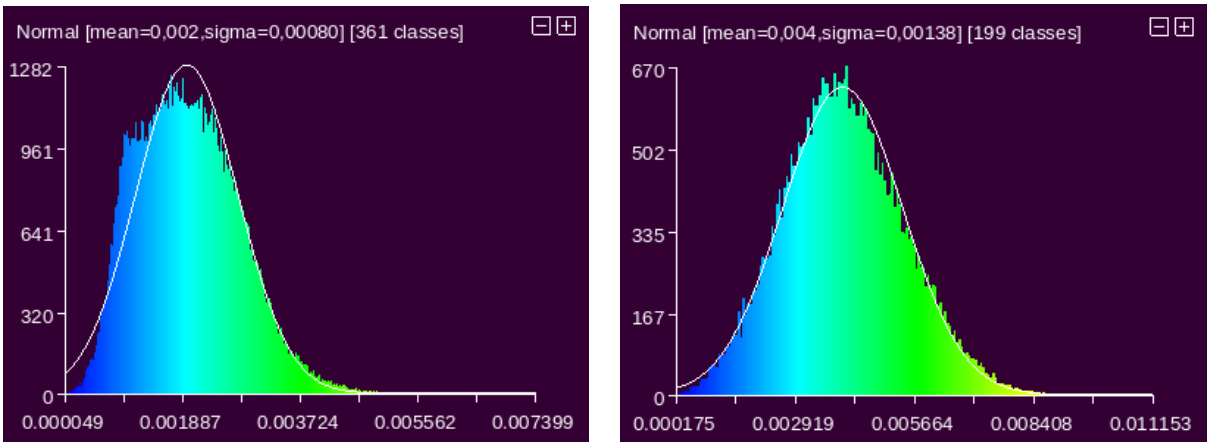


(α') Τα παράθυρο συνένωσης των νεφών του CloudCompare

(β') Τα αποτελέσματα της συνένωσης

Σχήμα 4.31: Διόρθωση της συνένωσης

εισήχθη λόγω της εσφαλμένης συνένωσης. Επομένως η διαδικασία της συνένωσης παίζει σημαντικό ρόλο και θα πρέπει να γίνεται με προσοχή ειδάλλως εισάγει θόρυβο στις μετρήσεις καθιστώντας την ανίχνευση παραμορφώσεων δύσκολη.



(α') 1ο πείραμα (β') 3ο πείραμα

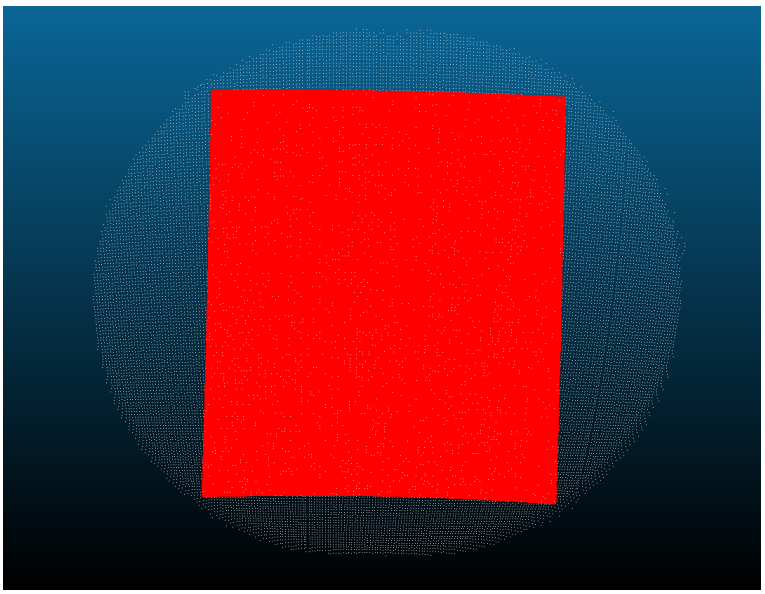
Σχήμα 4.32: Σύγκριση των ιστογραμμάτων του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα μεταξύ 1ου και 3ου πειράματος

Αλγόριθμος	Πρόγραμμα	Παράμετροι	Χρόνος εκτέλεσης (sec)	Μ.Ο. (mm) ιστογρ.
Εγγύτερος γείτονας	CloudCompare	—	1.77	4
	PCL	—	0.12	4
Εγγύτερη επιφάνεια	CloudCompare	επίπεδο	1.62	1
		triangulation	1.71	2
		quadratic	1.50	3
Κάθετο διάνυσμα	PCL	5,10	0.10	6
		300,10	1.57	2
		5,300	1.59	10
		300,50	1.68	4
ICP	PCL	0.1m	6.3	3
		0.05m	21.23	3
		0.02m	98.16	3
		0.01m	54.3	3

Πίνακας 4.6: Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων στο 3ο πείραμα

4.3.7 4ο πείραμα

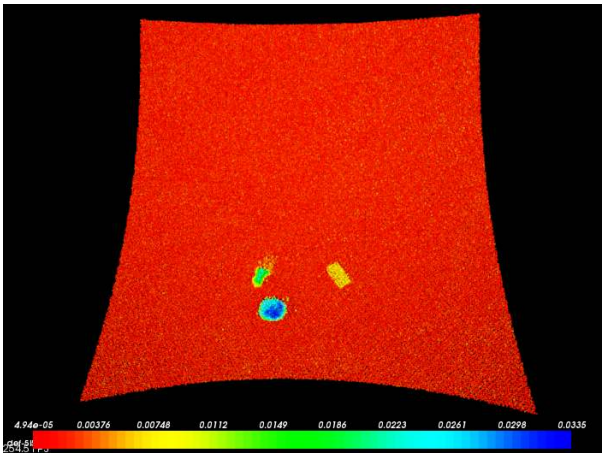
Στο τελευταίο πείραμα επιλέχθηκε να δοκιμαστεί πόσο επηρεάζει η διαφορετική πυκνότητα των νεφών. Για αυτό το σκοπό επιλέχθηκαν νέφη διαφορετικών πυκνοτήτων για να συγκριθούν. Χρησιμοποιήθηκαν νέφη που είχαν σαρωθεί από το κέντρο της κεραίας. Το νέφος αναφοράς είχε πυκνότητα 10mm και είχε 26330 σημεία ενώ το συγκρινόμενο νέφος είχε πυκνότητα 1mm και 1436385 σημεία (βλ. σχήμα 4.33).



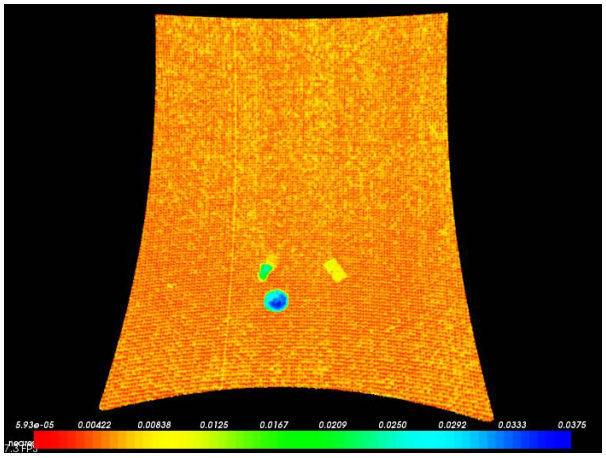
Σχήμα 4.33: Τα συγκρινόμενα νέφη στο 4ο πείραμα. Με άσπρο το νέφος αναφοράς και κόκκινο το συγκρινόμενο νέφος

Έπειτα εκτελέστηκαν οι αλγόριθμοι. Διατηρήθηκαν οι ίδιες παράμετροι για τους αλγόριθμους με τα προηγούμενα πείραμα μιας και ήταν αρκετά ικανοποιητικές για να παρουσιάσουν τυχόν προβλημάτων. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των αλγορίθμων βρίσκονται στα σχήματα Α'.86, Α'.88, Α'.90, Α'.92, Α'.94, Α'.96, Α'.98, Α'.100, Α'.102, Α'.104, Α'.106, Α'.108 και Α'.110 του παραρτήματος.

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι ο θόρυβος στα αποτελέσματα αυξήθηκε. Παρόλα αυτά οι αλγόριθμοι εντόπισαν και τις 3 πλαστελίνες με ακρίβεια (βλ. σχήμα 4.34,4.35, 4.36, 4.37). Ακόμα οι αλγόριθμοι της εγγύτερης επιφάνειας κατάφεραν να μειώσουν τον θόρυβο από την διαφορά στην πυκνότητα, όπως αναμενόταν.



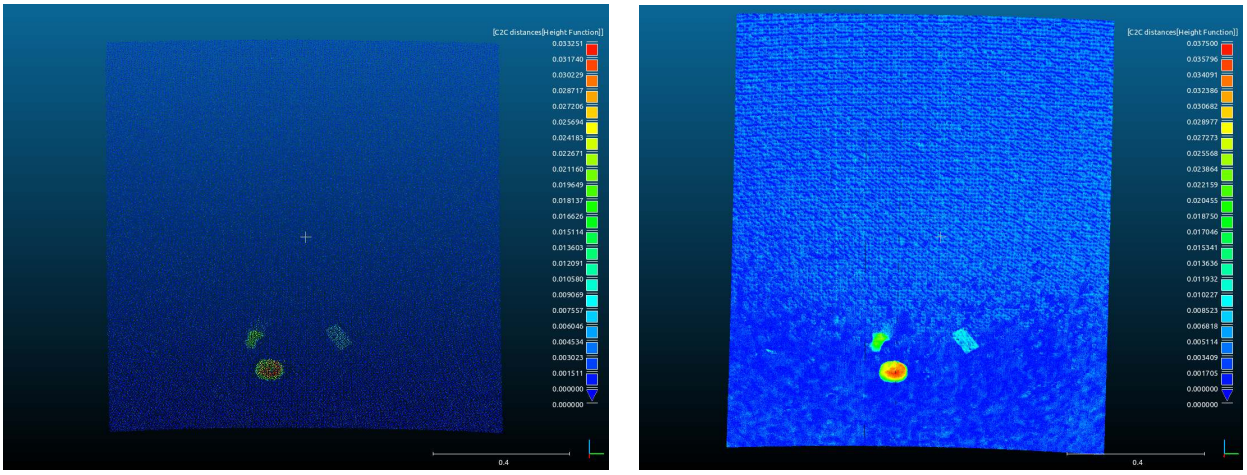
(α') 1ο πείραμα



(β') 4ο πείραμα

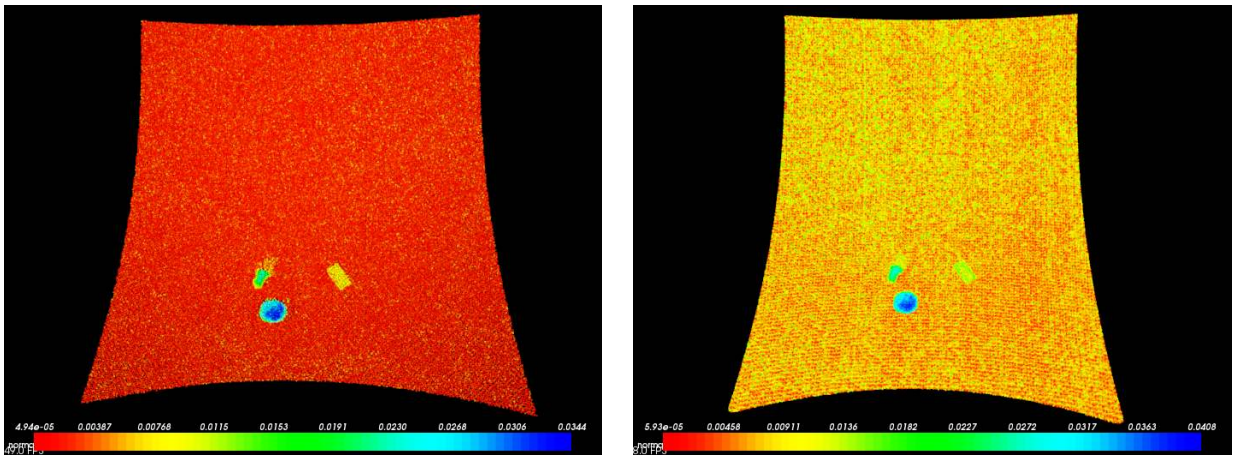
Σχήμα 4.34: Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα μεταξύ 1ου και 4ου πειράματος

Τέλος υπολογίστηκαν πάλι τα ιστογράμματα. Όλα τα ιστογράμματα των αλγορίθμων βρίσκονται στα σχήματα Α'.87, Α'.89, Α'.91, Α'.93, Α'.95, Α'.97, Α'.99, Α'.101, Α'.103, Α'.105,



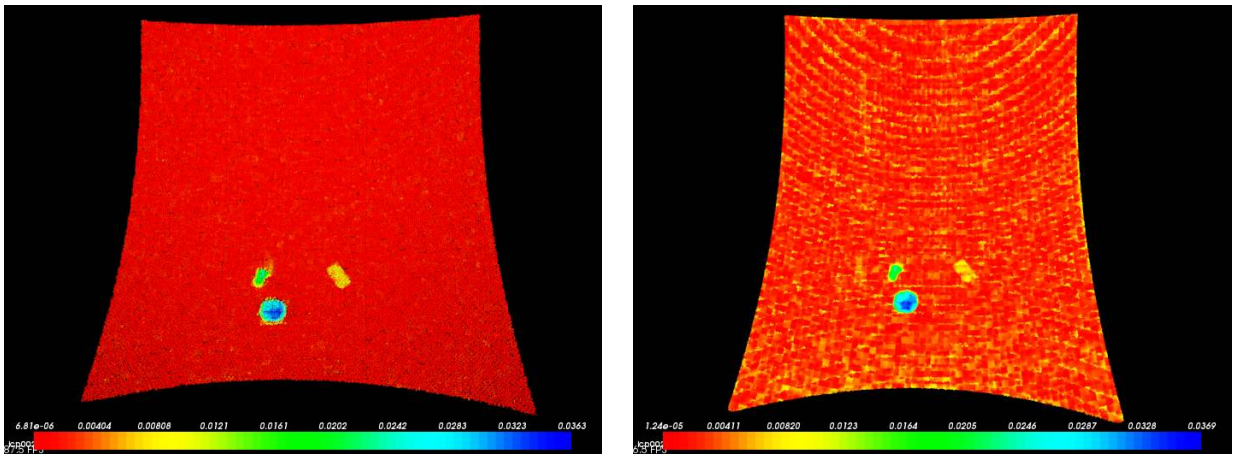
(α') 1ο πείραμα (β') 4ο πείραμα

Σχήμα 4.35: Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function) μεταξύ 1ου και 4ου πειράματος



(α') 1ο πείραμα (β') 4ο πείραμα

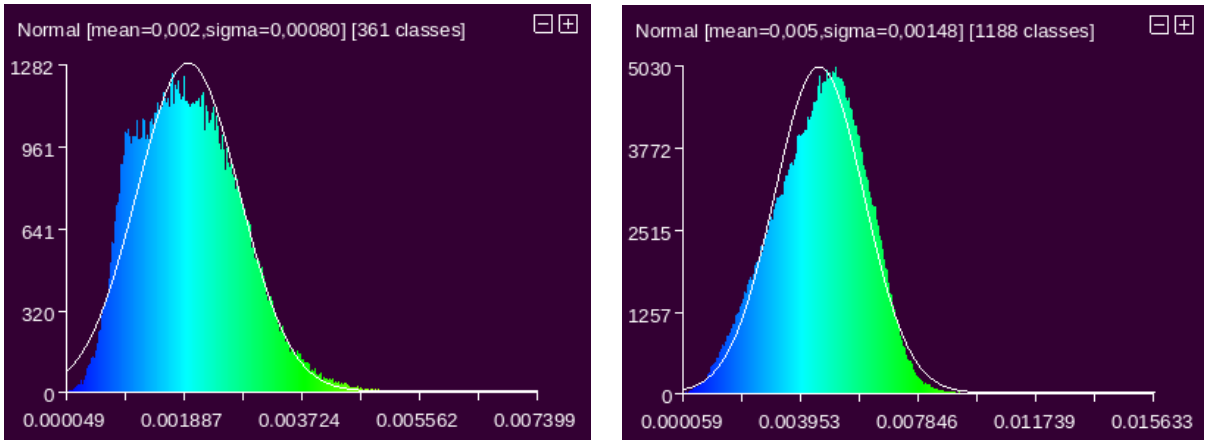
Σχήμα 4.36: Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10) μεταξύ 1ου και 4ου πειράματος



(α') 1ο πείραμα (β') 4ο πείραμα

Σχήμα 4.37: Σύγκριση αποτελεσμάτων του αλγόριθμου του ICP (με voxel ίσο με 0.02) μεταξύ 1ου και 4ου πειράματος

Α'.107, Α'.109 και Α'.111 του παραρτήματος. Όπως παρατηρήθηκε (βλ. σχήμα 4.38 και πίνακα 4.7) ο μέσος όρος των ιστογραμμάτων έχει μεγαλώσει λόγω του θορύβου που προκύπτει από τις διαφορετικές πυκνότητες ανάμεσα στα νέφη.



(α') 1ο πείραμα (β') 4ο πείραμα

Σχήμα 4.38: Σύγκριση των ιστογραμμάτων του αλγόριθμου του εγγύτερου γείτονα μεταξύ 1ου και 4ου πειράματος

Αλγόριθμος	Πρόγραμμα	Παράμετροι	Χρόνος εκτέλεσης (sec)	Μ.Ο. (mm) ιστογρ.
Εγγύτερος γείτονας	CloudCompare	—	2.83	5
	PCL	—	0.57	5
Εγγύτερη επιφάνεια	CloudCompare	επίπεδο	2.29	2
		triangulation	2.86	3
		quadratic	2.52	3
Κάθετο διάνυσμα	PCL	5,10	3.23	6
		300,10	55.02	10
		5,300	53.84	6
		300,50	59.22	8
ICP	PCL	0.1m	8.38	2
		0.05m	14.60	1
		0.02m	59.83	2
		0.01m	224.31	3

Πίνακας 4.7: Χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων στο 4ο πείραμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να διερευνηθεί αν από τα νέφη σημείων που παράγουν οι επίγειοι σαρωτές laser είναι δυνατόν να προκύψει άμεσα πληροφορία σχετικά με παραμορφώσεις. Για να υλοποιηθεί ο στόχος χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι αλγόριθμοι. Στον παρόν κεφάλαιο γίνεται αρχικά μια ανασκόπηση και παρουσίαση των βασικών συμπερασμάτων της έρευνας καθώς και προτάσεις για την συνέχιση και εξέλιξη της παρούσας έρευνας.

5.2 Συμπεράσματα

Κατά την διάρκεια της διπλωματικής εκτός από το θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο αναπτύχθηκε πραγματοποιήθηκαν και πειράματα για την αξιολόγηση των αλγορίθμων. Με βάση τις μετρήσεις που έγιναν, έγινε εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων.

5.3 Συλλογή δεδομένων

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκαν τόσο προσομοιωμένα δεδομένα, όσο και πραγματικά τα οποία παράχθηκαν με την βοήθεια του σαρωτή ScanStation 2 της Leica. Για την δημιουργία των προσομοιωμένων δεδομένων δεν υπήρξε κάποια ιδιαίτερη δυσκολία μιας και δημιουργήθηκαν με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Αντιθέτως για την συλλογή των δεδομένων της κεραίας παρουσιάστηκαν κάποια πρακτικά προβλήματα τα οποία αντιμετωπίστηκαν με επιτυχία. Έγινε προσπάθεια για την

ανίχνευση παραμορφώσεων που κυμαίνονταν από λίγα χιλιοστά μέχρι λίγα εκατοστά και τελικά ήταν δυνατή η ανίχνευση παραμορφώσεων της τάξης των 9 mm. Το κύριο πρόβλημα ήταν η σταθεροποίηση της κεραίας έτσι ώστε να μην μετακινηθεί κατά την διάρκεια των μετρήσεων αλλά και κατά την τοποθέτηση της πλαστελίνης. Η σταθεροποίηση της κεραίας επιτευχθεί με σχοινιά τα οποία δέθηκαν στο πίσω μέρος της κεραίας.

Η πραγματοποίηση των μετρήσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον απλούστευσε κατά πολύ την διαδικασία μιας και δεν ήταν υποχρεωτική η σύνδεση του σαρωτή με μπαταρίες, πράγμα που θα μείωνε την διάρκεια λειτουργίας του σαρωτή. Τέλος οι καιρικές συνθήκες δεν επηρέασαν τα πειράματα μιας και πραγματοποιήθηκαν μέσα σε αίθουσα της σχολής Α.Τ.Μ. .

Τέλος δεν πραγματοποιήθηκε κάποιο πείραμα με πραγματικά δεδομένα λόγω της δυσκολίας εύρεσης ενός αντικειμένου που παραμορφώνεται συστηματικά.

5.3.1 Διαδικασία επεξεργασίας

Κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων παρουσιάστηκαν κάποιες δυσκολίες. Τα κύρια προβλήματα αφορούσαν τα λογισμικά επεξεργασίας.

Το πρώτο πρόβλημα αντιμετωπίσθηκε κατά την διάρκεια εγκατάστασης των προγραμμάτων μιας και έπρεπε να μεταγλωττιστούν από τον πηγαίο κώδικά τους, αλλά αντιμετωπίσθηκε με επιτυχία καθώς υπήρχαν αναλυτικές οδηγίες στο διαδίκτυο.

Το επόμενο βήμα που έπρεπε να αντιμετωπισθεί ήταν η εκμάθηση των προγραμμάτων, το οποίο ξεπεράστηκε ομοίως με την αναζήτηση των εγχειριδίων των προγραμμάτων.

Τέλος το μεγαλύτερο πρόβλημα αντιμετωπίσθηκε κατά την συγγραφή του κώδικα για την υλοποίηση των αλγορίθμων μιας και χρειάστηκαν αρκετές προσπάθειες για την σωστή υλοποίηση των αλγορίθμων.

Παρόλα τα προβλήματα, η διαδικασία επεξεργασίας ήταν επιτυχής και ήταν δυνατή η παραγωγή προϊόντων που παρουσίαζαν τις παραμορφώσεις.

5.3.2 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Τέλος με βάση τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έγινε εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων:

- Όταν συγκρίνονται δύο νέφη σημείων θα πρέπει η έκταση του νέφους αναφοράς να είναι μεγαλύτερη από την έκταση του συγκρινόμενου νέφους και αυτό συμβαίνει διότι οι αλγόριθμοι δεν μπορούν να ξεχωρίσουν πότε δεν υπάρχει πραγματική αντιστοιχία και πότε παραμόρφωση με αποτέλεσμα στα όρια των νεφών όταν το συγκρινόμενο νέφος είναι μεγαλύτερο να υπάρχει ψευδή εύρεση παραμορφώ-

σεων.

- Ακόμα το νέφος αναφοράς πρέπει να έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το συγκρινόμενο νέφος μιας και η πυκνότητα μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία μερικών αλγόριθμων και να εισάγει θόρυβο.
- Όλοι οι αλγόριθμοι ήταν σε θέση να εντοπίσουν τις παραμορφώσεις αλλά αυτός που είχε το μικρότερο σφάλμα και ήταν ο πιο ακριβής ήταν ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας. Αντιθέτως ο αλγόριθμος του ICP ήταν ο πιο αποτελεσματικός στην εξάλειψη του θορύβου.

  Στον πίνακα 5.1 φαίνονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε αλγορίθμου.

Αλγόριθμος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εγγύτερος γείτωνας	– Απλός αλγόριθμος στην υλοποίηση του – Ο πιο γρήγορος αλγόριθμος στην εκτέλεση	– Η ακρίβεια του είναι περιορισμένη
Εγγύτερη επιφάνεια	– Βελτιωμένη ακρίβεια σε σύγκριση με τον εγγύτερο γείτωνα	– Ελαφρώς πιο αργός από τον εγγύτερο γείτωνα
Κάθετο διάνυσμα	– Λαμβάνει υπόψιν και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας	– Η ακρίβεια του είναι περιορισμένη – Προσθέτει μερικές φορές θόρυβο στις μετρήσεις
ICP	– Αντιμετωπίζει τον θόρυβο των μετρήσεων καλύτερα από τους υπόλοιπους	– Ο πιο αργός αλγόριθμος

Πίνακας 5.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αλγορίθμων

- Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των παραπάνω μεθοδολογιών ήταν η έλλειψη επιπέδου εμπιστοσύνης για τις παραμορφώσεις. Όμως παρόλα αυτά μπορούν να δοθούν μερικές κατευθύνσεις για την ακρίβεια των παραμορφώσεων:

  1. Η ακρίβεια του οργάνου επηρεάζει καθοριστικά την ακρίβεια των παραμορφώσεων. Παρατηρήθηκε από τις μετρήσεις ότι δεν είναι δυνατός ο εντοπισμός παραμορφώσεων κάτω της ακρίβειας του οργάνου. Επομένως διαφορές μεταξύ των νεφών οι οποίες είναι πάνω από το επίπεδο θορύβου του σα-

ρωτή μπορεί να υποδηλώνουν αλλαγές.

2. Ακόμα η συνένωση των νεφών μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ανίχνευση παραμορφώσεων. Όπως είναι φυσικό, η συνένωση των νεφών και τα όποια σφάλματα προκύπτουν μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες ενδείξεις. Μια λάθος συνένωση μπορεί να οδηγήσει σε συστηματικά λάθη, που μπορεί να κάνει αδύνατον την εύρεση τυχόν παραμορφώσεων. Όπως φάνηκε και από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν η λανθασμένη συνένωση οδηγεί σε αύξηση του θορύβου.
3. Τέλος η γεωαναφορά των νεφών ομοίως επηρεάζει την δυνατότητα ανίχνευσης παραμορφώσεων.

Επομένως είναι εμφανές ότι η ανίχνευση παραμορφώσεων απευθείας από νέφη σημείων είναι δυνατή και υπό προϋποθέσεις μπορεί να ανιχνευθούν παραμορφώσεις που είναι μικρότερες του εκατοστού.

5.4 Προτάσεις

Μετά την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας αξίζει να σημειωθούν κάποιες προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση του προβλήματος που μελετήθηκε αλλά και κάποιες γενικότερες σκέψεις.

5.4.1 Προτάσεις που αφορούν την μελλοντική διερεύνηση του προβλήματος

- Η ανίχνευση παραμορφώσεων με βάση τον ICP είναι αρκετά υποσχόμενη μέθοδος και γι' αυτό τον λόγο προτείνεται περαιτέρω ανάπτυξη των μεθοδολογιών που βασίζονται στις μεθοδολογίες συνένωσης των νεφών. Ομοίως η ανίχνευση παραμορφώσεων με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου κάθετου διανύσματος βασίζεται στις μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί για την συνένωση των νεφών με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (βλ. ενότητα 2.5.8). Προτείνεται η περαιτέρω διευρένηση για την χρησιμοποίηση αυτών των μεθοδολογιών για την ανίχνευση παραμορφώσεων καθώς και η ανάπτυξη κατάλληλων προγραμματιστικών εργαλείων τα οποία θα επιταχύνουν την εύρεση των παραμορφώσεων.
- Όπως έχει ήδη αναφερθεί όταν συγκρίνονται δύο νέφη σημείων θα πρέπει η έκταση του νέφους αναφοράς να είναι μεγαλύτερη από την έκταση του συγκρινόμενου νέφους και αυτό συμβαίνει διότι οι αλγόριθμοι δεν μπορούν να ξεχωρίσουν πότε δεν υπάρχει πραγματική αντιστοιχία και πότε παραμόρφωση με αποτέλεσμα στα όρια των νεφών όταν το συγκρινόμενο νέφος είναι μεγαλύτερο να υπάρχει ψευδή

εύρεση παραμορφώσεων. Μία λύση για το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει προταθεί με τους χάρτες ορατότητας [14, 83]. Η ανίχνευση παραμορφώσεων μεταξύ σαρώσεων μπορεί να προσεγγιστεί με την ερώτηση αν ένα σημείο που είναι ορατό σε μία σάρωση είναι ορατό και στην άλλη. Από ένα τέτοιο πεδίο σύγκρισης μπορούν να προκύψουν τρεις περιπτώσεις:

1. το σημείο να είναι ορατό, αλλά να μην υπάρχει αντίστοιχο σημείο στο νέφος αναφοράς, δηλαδή έχουμε μία αλλαγή
2. το σημείο να είναι ορατό αλλά να υπάρχει αντίστοιχο σημείο στο νέφος αναφοράς, δηλαδή δεν έχουμε καμία αλλαγή,
3. το σημείο να μην είναι ορατό, καθώς υπάρχει ένα αντικείμενο που το κρύβει και εξαιτίας της έλλειψης παραπάνω πληροφοριών, το χαρακτηρίζουμε ως σημείο χωρίς καμία αλλαγή

Επομένως η λύση των χαρτών ορατότητας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να αυτοματοποιηθεί περαιτέρω η διαδικασία ανίχνευσης παραμορφώσεων.

Βιβλιογραφία

[1] Yezeed Abdelmajid. Investigation and comparison of 3d laser scanning software packages. Master's thesis, KTH, Geodesy and Geoinformatics, 2012.

[2] A. Abellán, M. Jaboyedoff, T. Oppikofer, and J. M. Vilaplana. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(2):365–372, 2009.

[3] M. Alba, L. Fregonese, F. Prandi, M. Scaioni, and P. Valgoi. Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning. In *Proceedings of of the ISPRS Commission V Symposium, Dresden*, 2006.

[4] M Alba, F Roncoroni, and M. Scaioni. Application of tls for change detection in rock faces. In *ISPRS WG III/2, I/2, V/3, VII/7 Laserscanning '09 , Paris, France, September 1-2*, pages 99–104, 2009.

[5] N. Aspert, D. Santa-Cruz, and T. Ebrahimi. Mesh: Measuring errors between surfaces using the hausdorff distance. In *Multimedia and Expo, 2002. ICME'02. Proceedings. 2002 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 705–708. IEEE, 2002.

[6] Kwang-Ho Bae. *Automated registration of unorganised point clouds from terrestrial laser scanners*. PhD thesis, Curtin University of Technology., 2006.

[7] David Barber. *3D Laser Scanning for Heritage: Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*. English Heritage, PO Box 569 Swindon SN2 2YP, July 2007.

[8] Jon Louis Bentley. Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Commun. ACM*, 18(9):509–517, September 1975.

[9] Paul J. Besl and Neil D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 14(2):239–256, February 1992.

[10] G. Bitelli, M. Dubbini, and A. Zanutta. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35:246–251, 2004.

[11] Yang Chen and Gérard Medioni. Object modelling by registration of multiple range images. *Image Vision Comput.*, 10(3):145–155, April 1992.

[12] P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno. Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces. *Computer Graphics Forum*, 17(2):167–174, 1998.

[13] Ćmielewski. Identification deformation areas of slops using terrestrial laser scanner - preliminary reasearch. 2011.

[14] R. Marc D. Girardeau-Montaut, M. Roux and G. Thibault. Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. In *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop Laser scanning 2005, Enschede, the Netherlands, September 12-14*, 2005.

[15] D.W. Eggert, A. Lorusso, and R.B. Fisher. Estimating 3-d rigid body transformations: a comparison of four major algorithms. *Machine Vision and Applications*, 9(5):272–290, 1997.

[16] J. Elseberg, S. Magnenat, R. Siegwart, and A. Nüchter. Comparison of nearest-neighbor-search strategies and implementations for efficient shape registration. *Journal of Software Engineering for Robotics*, 61(6):2–12, 2012.

[17] R. Fabio et al. From point cloud to surface: the modeling and visualization problem. In *International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models*, volume 34, page 5, 2003.

[18] J.L.L. García. *Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning: Training Material Based on Practical Applications ; [prepared by the Learning Tools for Advanced Three-dimensional Surveying in Risk Awareness Project (3DRiskMapping), Version 4 June 2008].* Universidad Politécnica de Valencia, 2008.

[19] Leica Geosystems. *Leica ScanStation 2 User Manual*, 2007.

[20] D. Girardeau-Montaut. *Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles.* ENST. E. École nationale supérieure des télécommunications, 2006.

[21] SJ Gordon, DD Lichti, MP Stewart, and J. Franke. Modelling point clouds for precise structural deformation measurement. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35:B5, 2004.

[22] Christos Gounaris and Maria Tsakiri. Movement detection of pit slopes using laser scanner point clouds. ???

[23] Gaël Guennebaud, Benoît Jacob, et al. Eigen v3. http://eigen.tuxfamily.org, 2010.

[24] H. Ingens H. m. Zogg. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring - load tests on the felsenau viaduct (ch). In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, volume XXXVII, pages 555–562, 2008.

[25] Berthold K. P. Horn. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A*, 4(4):629–642, 1987.

[26] Uwe Lohr J.-Angelo Beraldin, Francois Blais. *Laser Scanning Technology*. In Vosselman and Maas [69], 2010.

[27] J. Kasperski, C. Delacourt, P. Allemand, P. Potherat, M. Jaud, and E. Varrel. Application of a terrestrial laser scanner (tls) to the study of the séchilienne landslide (isère, france). *Remote Sensing*, 2(12):2785–2802, 2010.

[28] Derek Lichti and Jan Skaloud. *Registration and Calibration*. In Vosselman and Maas [69], 2010.

[29] R. Lindenbergh and N. Pfeifer. A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. *Proc. of Optical 3D Measurement Techniques*, 2:61–70, 2005.

[30] R. Lindenbergh, N. Pfeifer, and T. Rabbani. Accuracy analysis of the leica hds3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring. In *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop Laser scanning 2005, Enschede, the Netherlands, September 12-14*, 2005.

[31] Roderik Lindenbergh. *Engineering Application*. In Vosselman and Maas [69], 2010.

[32] Victor Lu. Computer graphics and spatial data structures on multi/many-core hardware. https://netfiles.uiuc.edu/victorlu/www/index.html, 2012. [Πρόσβαση στις 24-Οκτωβρίου-2012].

[33] M. Magnusson. *The three-dimensional normal-distributions transform: an efficient representation for registration, surface analysis, and loop detection*. PhD thesis, Örebro universitet, 2009.

[34] F. Mémoli and G. Sapiro. Comparing point clouds. In *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, pages 32–40. ACM, 2004.

[35] O. Monserrat and M. Crosetto. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3d surface matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(1):142 – 154, 2008.

[36] O. Monserrat, M. Crosetto, and B. Pucci. Use of a point cloud co-registration algorithm for deformation measuring. In *13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, Lisbon*, 2008.

[37] XIE Mowen, HU Man, WANG Zengfu, and HAO Nan. Three-dimensional laser scanner to detect large reservoir landslide displacement. In *7th International Symposium on Digital Earth, Perth, Australia*, 2011.

[38] Marius Muja and David G. Lowe. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration. In *International Conference on Computer Vision Theory and Application VISSAPP'09)*, pages 331–340. INSTICC Press, 2009.

[39] Fawwas Ishakat Naif Haddad. 3d laser scanner and reflectorless total station: A comparative study of the slots of el-khazneh at petra in jordan. In *XXI International CIPA Symposium*, 2007.

[40] Timothy Nuttens, Alain De Wulf, Greet Deruyter, Cornelis Stal, Hans De Backer, and Ken Schotte. Application of laser scanning for deformation measurements: a comparison between different types of scanning instruments. In *8th FIG Regional Conference 2012*, 2012.

[41] US Army Corps of Engineers. *Control and Topographic Surveying*, em 1110-1-1005 edition, 2007.

[42] California Department of Transportation-Division of Right of Way and Land Surveys. *Surveys Manual*. January 2011.

[43] OpenMP. Architecture review board, "openmp application program interface, version 3.1". http://www.openmp.org, 2011.

[44] T. Oppikofer, M. Jaboyedoff, L. Blikra, M.H. Derron, and R. Metzger. Characterization and monitoring of the aknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(3):1003–1019, 2009.

[45] Harvey Deitel Paul Deitel. *C++ Προγραμματισμός*. Μ. Γκιούρδας, 4η edition, 2003.

[46] Matt Pharr and Randima Fernando. Octree textures on the gpu. In *Gpu gems 2: programming techniques for high-performance graphics and general-purpose computation*. Addison-Wesley Professional, 2005.

[47] pointcloud.org. Estimating surface normals in a pointcloud. http://pointclouds.org/documentation/tutorials/normal_estimation.php#normal-estimation, 2012. [Πρόσβαση στις 11-Ιανουαρίου-2012].

[48] pointcloud.org. How to use a kdtree to search. http://www.pointclouds.org/documentation/tutorials/kdtree_search.php#kdtree-search, 2012. [Πρόσβαση στις 28-Οκτωβρίου-2012].

[49] J. POSPÍŠIL, B. KOSKA, and T. KŘEMEN. Using laser scanning technologies for deformation measuring, 2007.

[50] T. Rabbani, S. Dijkman, F. van den Heuvel, and G. Vosselman. An integrated approach for modelling and global registration of point clouds. *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(6):355–370, 2007.

[51] Szymon Rusinkiewicz and Marc Levoy. Efficient variants of the icp algorithm. In *Proceedings of the Third Intl. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, pages 145–152, 2001.

[52] Radu Bogdan Rusu. *Semantic 3D Object Maps for Everyday Manipulation in Human Living Environments*. PhD thesis, Computer Science department, Technische Universitaet Muenchen, Germany, 10/2009 2009.

[53] Radu Bogdan Rusu and Steve Cousins. 3D is here: Point Cloud Library (PCL). In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, May 9-13 2011.

[54] R.B. Rusu, N. Blodow, and M. Beetz. Fast point feature histograms (fpfh) for 3d registration. In *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*, pages 3212–3217. IEEE, 2009.

[55] R.B. Rusu, N. Blodow, Z.C. Marton, and M. Beetz. Aligning point cloud views using persistent feature histograms. In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 3384–3391. IEEE, 2008.

[56] T. Schäfer, T. Weber, P. Kyrinovič, and M. Zámečniková. Deformation measurement using terrestrial laser scanning at the hydropower station of gabčíkovo. In *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying Bratislava, Slovakia*, 2004.

[57] Will Schroeder, Ken Martin, and Bill Lorensen. *Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3D Graphics, 4th Edition*. Kitware, 4th edition, December 2006.

[58] Scratchapixel. Creating kd-trees. http://www.scratchapixel.com/lessons/3d-advanced-lessons/kd-tree/creating-kd-trees/, 2012. [Πρόσβαση στις 24-Οκτωβρίου-2012].

[59] Scratchapixel. Creating octrees. http://www.scratchapixel.com/lessons/3d-advanced-lessons/octree/creating-octrees/, 2012. [Πρόσβαση στις 30-Σεπτεμβρίου-2012].

[60] T.R. Shah. *Automatic reconstruction of industrial installations using point clouds and images*. Publications on Geodesy. Nederlander Commissie voor Geodesie, 2006.

[61] G. Teza, A. Galgaro, N. Zaltron, and R. Genevois. Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. *International Journal of Remote Sensing*, 28(16):3425–3446, 2007.

[62] E. Tournas and M. Tsakiri. Deformation monitoring based on terrestrial laser scanner point cloud registration. In *Proceedings of the 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis and 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. Lisboa*, 2008.

[63] M. Tsakiri, D. Lichti, and N. Pfeifer. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring. In *3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24*, 2006.

[64] S. Umeyama. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 13(4):376–380, 1991.

[65] B. Van Genechten, M. Santana Quintero, T. Demeyere, S. Herinckx, L. Schueremans, and D. Roose. Terrestrial laser scanning in architectural heritage–deformation analysis and the automatic generation of 2d cross-sections. In *Proceedings of the CIPA XXII International Symposium: Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage*, 2009.

[66] R. Van Gosliga, R. Lindenbergh, and N. Pfeifer. Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning. *Image Engineering and Vision Metrology. ISPRS Commission*, 36:167–172, 2006.

[67] CloudCompare (version 2.4) [GPL software]. Distances computation. http://www.danielgm.net/cc/doc/wiki/index.php5?title=Distances_Computation, 2012. [Πρόσβαση στις 14-Νοεμβρίου-2012].

[68] CloudCompare (version 2.4) [GPL software]. Introduction. http://www.danielgm.net/cc/doc/wiki/index.php5?title=Introduction, 2013. [Πρόσβαση στις 18-Ιανουαρίου-2013].

[69] G. Vosselman and H.G. Maas, editors. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Taylor & Francis, 2010.

[70] George Vosselman and Reinhard Klein. *Visualization and Structuring of Point Clouds*. In Vosselman and Maas [69], 2010.

[71] Wikipedia. Data structure — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Data_structure, 2012. [Πρόσβαση στις 26-Μαΐου-2012].

[72] Wikipedia. Deformation (engineering) — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_%28engineering%29, 2012. [Πρόσβαση στις 29-Ιουλίου-2012].

[73] Wikipedia. Deformation monitoring — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_monitoring, 2012. [Πρόσβαση στις 29-Ιουλίου-2012].

[74] Wikipedia. Iterative closest point — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Iterative_Closest_Point, 2012. [Πρόσβαση στις 25-Οκτωβρίου-2012].

[75] Wikipedia. k-d tree — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/K-d_tree, 2012. [Πρόσβαση στις 24-Οκτωβρίου-2012].

[76] Wikipedia. Octree — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Octree, 2012. [Πρόσβαση στις 26-Μαίου-2012].

[77] Wikipedia. Pcl (point cloud library) — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/PCL_%28Point_Cloud_Library%29, 2012. [Πρόσβαση στις 10-Δεκεμβρίου-2012].

[78] Wikipedia. Point cloud — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Point_cloud, 2012. [Πρόσβαση στις 24-Οκτωβρίου-2012].

[79] Wikipedia. Quadtree — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Quadtree, 2012. [Πρόσβαση στις 30-Σεπτεμβρίου-2012].

[80] Wikipedia. Tree (data structure) — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Tree_data_structure, 2012. [Πρόσβαση στις 26-Μαίου-2012].

[81] Wikipedia. Tree structure — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Tree_structure, 2012. [Πρόσβαση στις 26-Μαίου-2012].

[82] Wikipedia. Cloudcompare — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/CloudCompare, 2013. [Πρόσβαση στις 18-Ιανουαρίου-2013].

[83] R. Zeibak and S. Filin. Change detection via terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36(3/W52):430–435, 2007.

[84] H.M. Zogg. *Investigations of high precision terrestrial laser scanning with emphasis on the development of a robust close-range 3D-laser scanning system*. PhD thesis, Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 18013, 2008.

[85] Βικιπαίδεια. Δείκτης (πληροφορική) — Βικιπαίδεια, Η ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια. http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B5%CE%AF%CE%BA%CF%84%CE%B7%CF%82_%28%CF%80%CE%BB%CE%B7%CF%81%CE%BF%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE%29, 2012. [Πρόσβαση στις 24-Οκτωβρίου-2012].

[86] Βικιπαίδεια. Φυσικός κίνδυνος — Βικιπαίδεια, Η ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια. http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82_%CE%BA%CE%AF%CE%BD%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%BF%CF%82, 2013. [Πρόσβαση στις 16-Ιανουαρίου-2013].

[87] Σπύρος Σ. Γεωργαλάς. Επίγεια σάρωση laser σε εφαρμογές οδοποιίας-μελέτη ορατότητας και επισκόπηση επιφάνειας οδοστρώματος. Master's thesis, Ε.Μ.Π., 2011.

[88] Γεωργαντά Α. Ιωάννη. Γεωμετρική τεκμηρίωση μεταλλότυπου σκυροδέτησης σήραγγας οδοποιίας με γεωδαιτικές μεθόδους. Master's thesis, Ε.Μ.Π., 2010.

[89] Ευαγγελία Καραμολέγκου. Εξέλιξη κατακόρυφων μετακινήσεων στις περιοχές Νέο Φάληρο-Μοσχάτο-Καλλιθέα. Master's thesis, Ε.Μ.Π., 2012.

[90] Νταλούκα Κρυσταλία. Προσδιορισμός των οριζόντιων μετακινήσεων του φράγματος της λίμνης Πλαστήρα με επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους. Master's thesis, Ε.Μ.Π., 2012.

[91] Αναστασία Μαρκολέφα. Αξιολόγηση της μέτρησης του μήκους και του ποσοστού της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας με reflectorless γεωδαιτικούς σταθμούς. Master's thesis, Ε.Μ.Π., 2010.

[92] Στυλιανός Μαυράκης. Διερεύνηση της αξιοπιστίας μέτρησης μηκών χωρίς την χρήση ανακλαστήρα με τους σύγχρονους γεωδαιτικούς σταθμούς. Master's thesis, Ε.Μ.Π., 2008.

[93] Νικόλαος Μπιλάλης. Μοντέλα επιφανειών - Αναπαράσταση επιφανειών. Ιn *Σημειώσεις για το μάθημα "Μελέτη σχεδίαση με χρήση Η/Υ (CAD)*. Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006.

[94] Μιλτιάδης Παυλίδης. Αποτύπωση τμήματος των τειχών της Θεσσαλονίκης με laser scanner και σύγκριση με φωτογραμμετρική μέθοδο αποτύπωσης. Master's thesis, Α.Π.Θ., 2011.

[95] Ιωάννα Σκουρή. Χρήση επίγειου σαρωτή laser σε συνήθεις τοπογραφικές γεωδαιτικές εφαρμογές. Master's thesis, Ε.Μ.Π., 2010.

Μέρος ΙΙΙ

Παραρτήματα

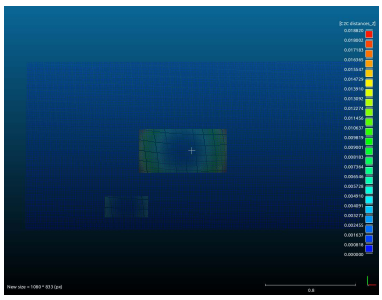
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α’

Αναλυτικά αποτελέσματα

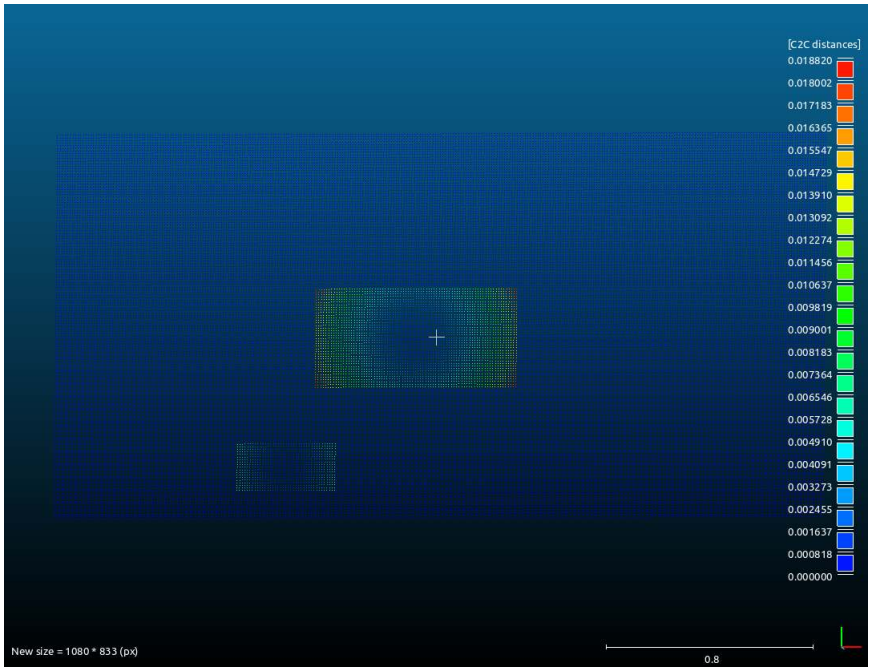
Α’.1 Προσομοιωμένα δεδομένα

(α’) Οι παραμορφώσεις κατά x

(β’) Οι παραμορφώσεις κατά y

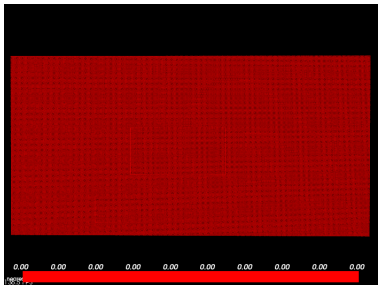


(γ’) Οι παραμορφώσεις κατά z

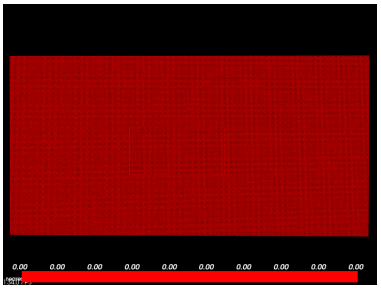


(δ’) Οι ολικές παραμορφώσεις

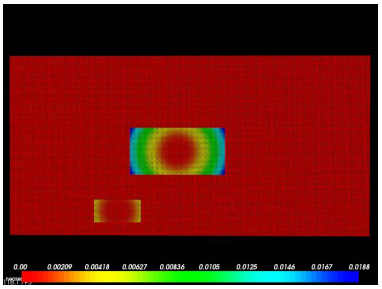
Σχήμα Α’.1: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας από το CloudCompare



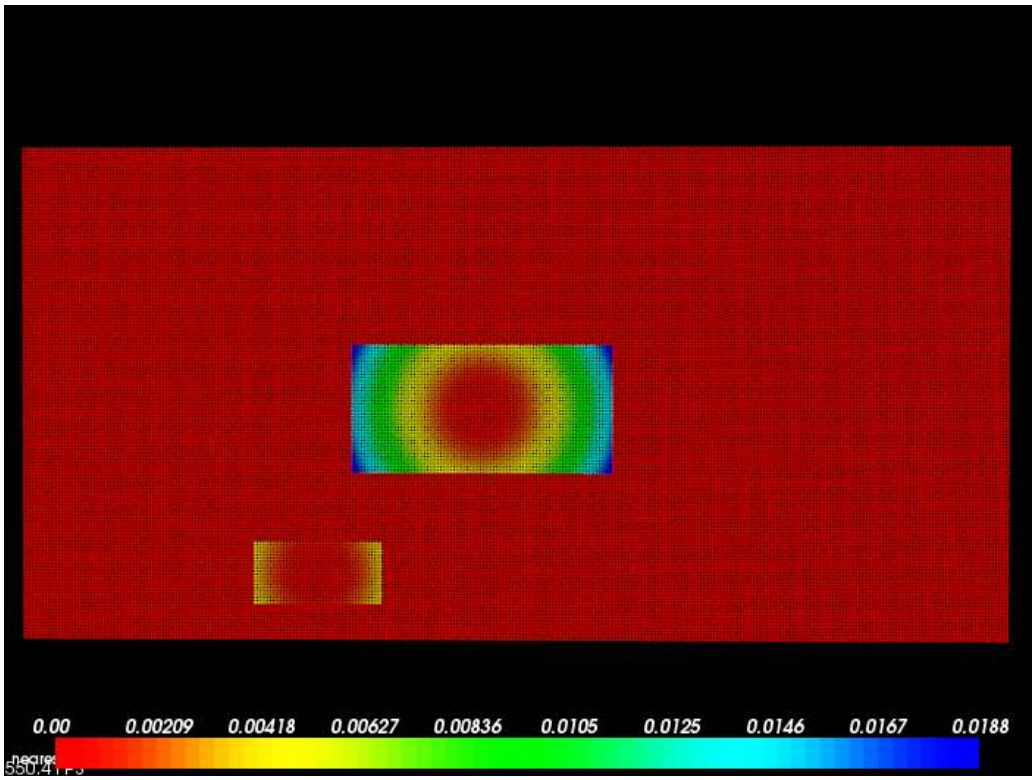
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

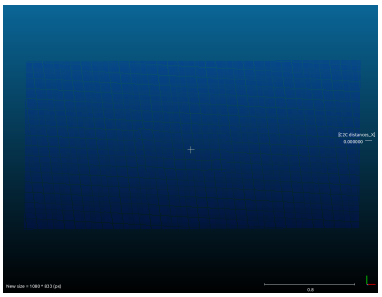


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

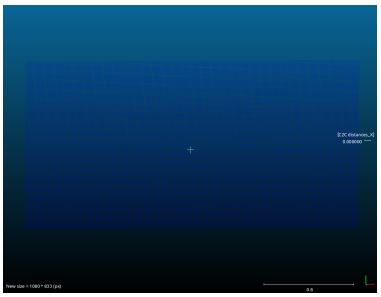


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

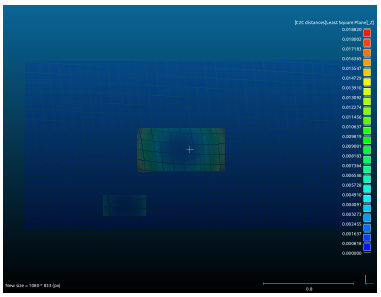
Σχήμα Α'.2: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL



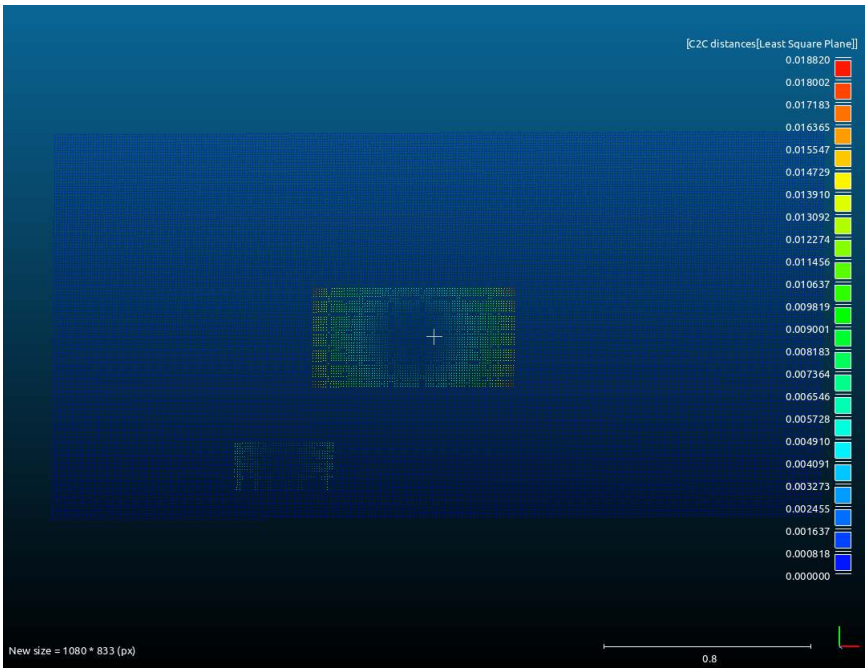
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

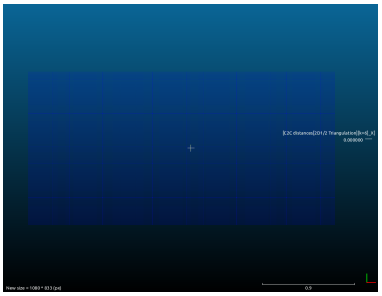


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

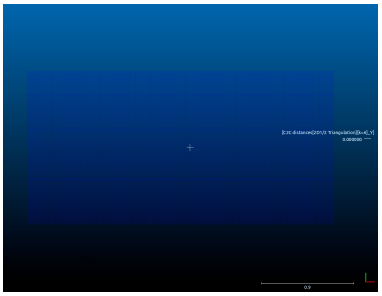


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

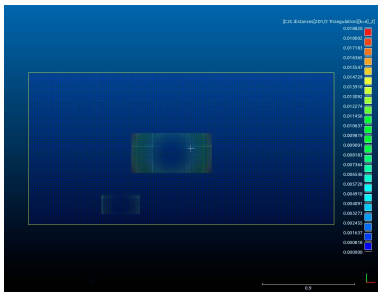
Σχήμα Α'.3: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου)



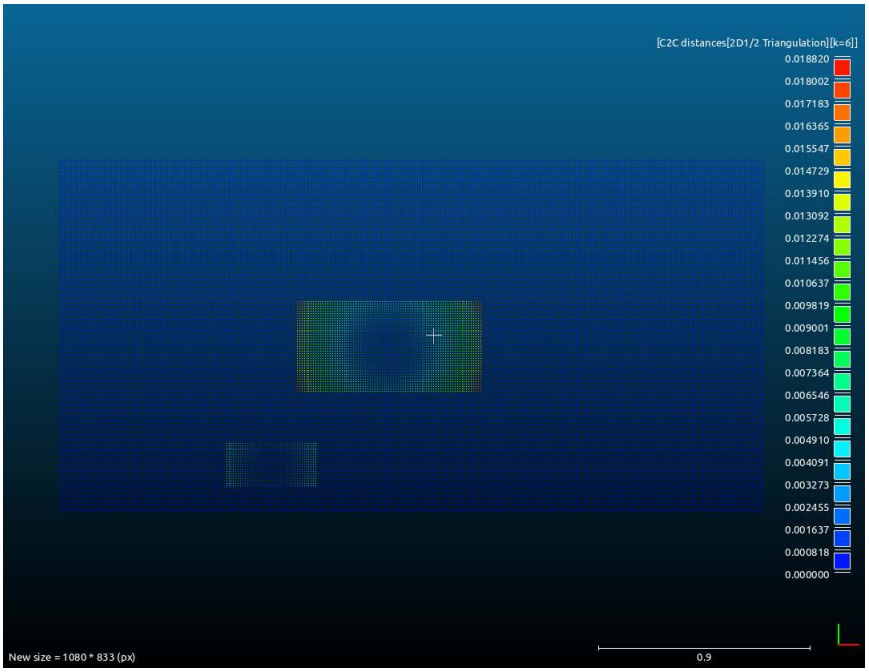
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y



(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

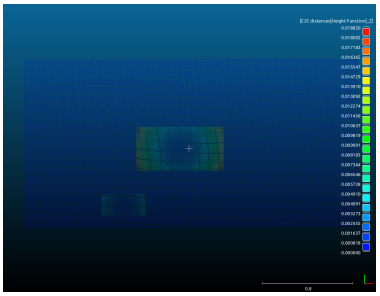


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

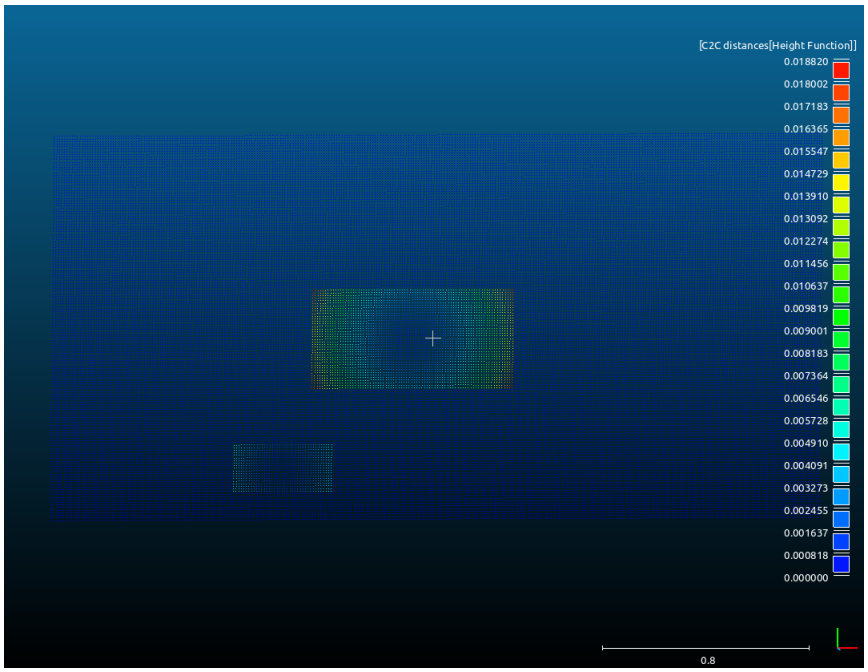
Σχήμα Α'.4: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation)

(α') Οι παραμορφώσεις κατά x

(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

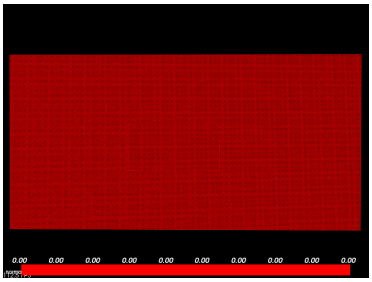


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

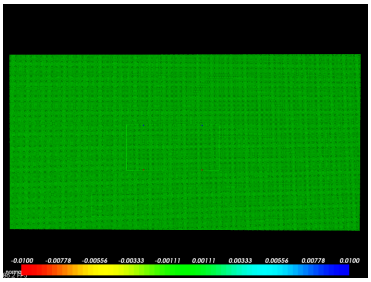


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

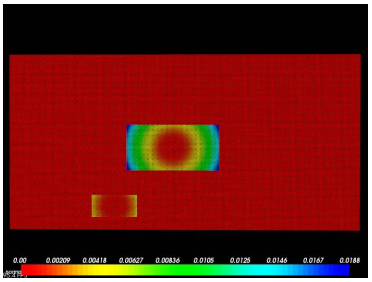
Σχήμα Α'.5: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function)



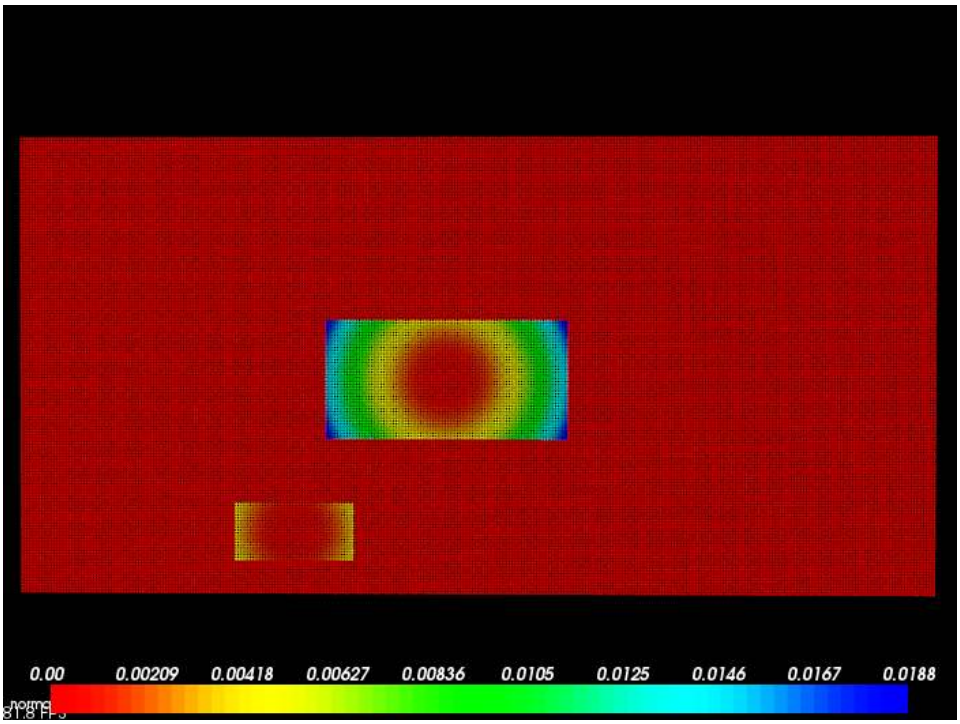
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

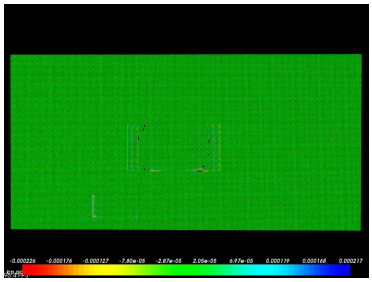


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

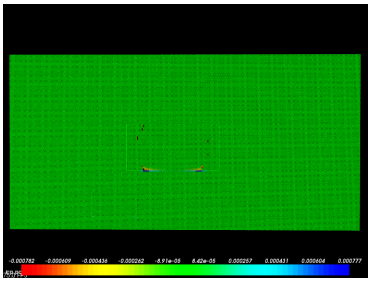


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

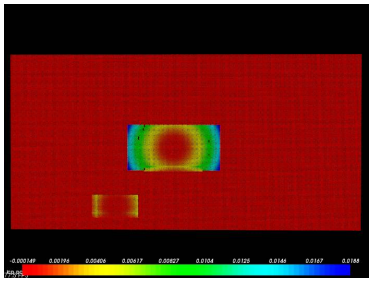
Σχήμα Α'.6: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος



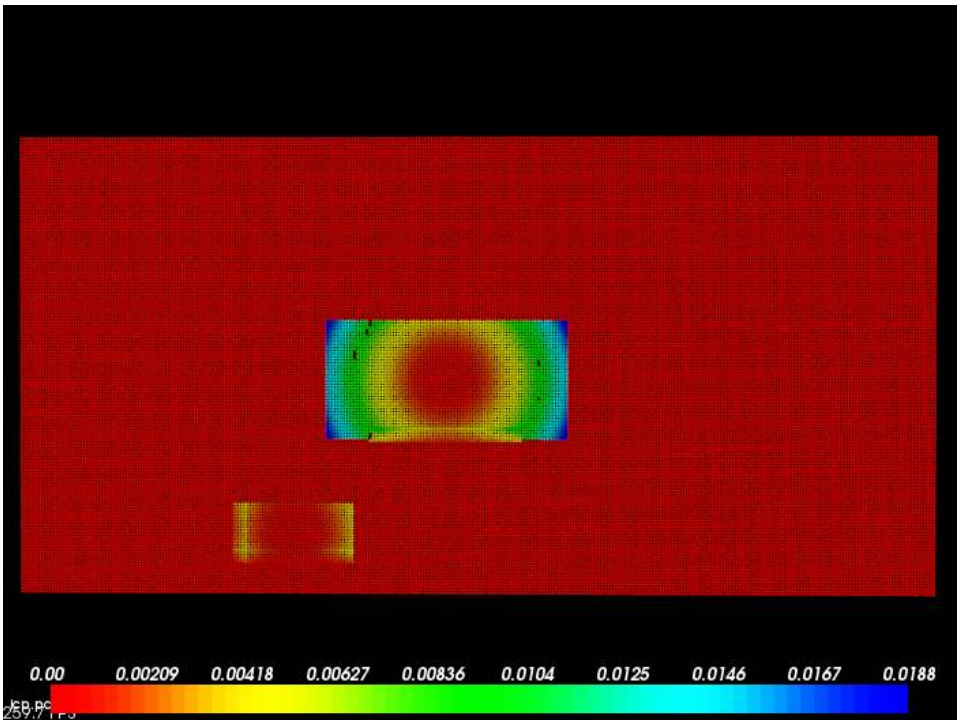
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y



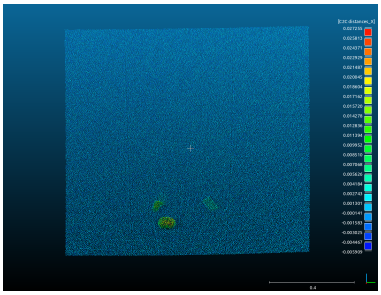
(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z



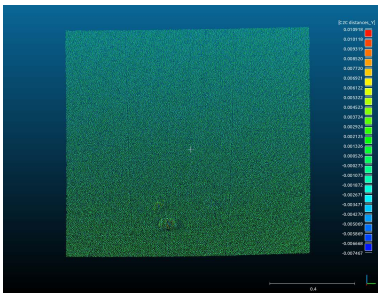
(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.7: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.05

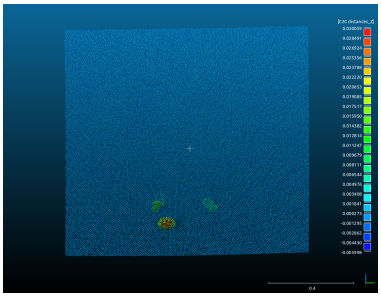
Α'.2 1ο πείραμα



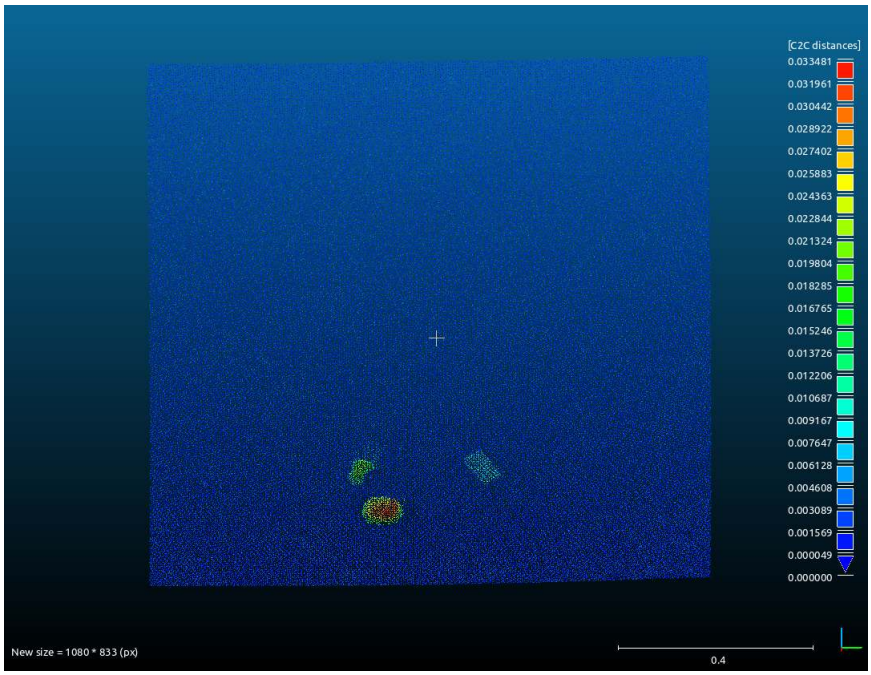
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

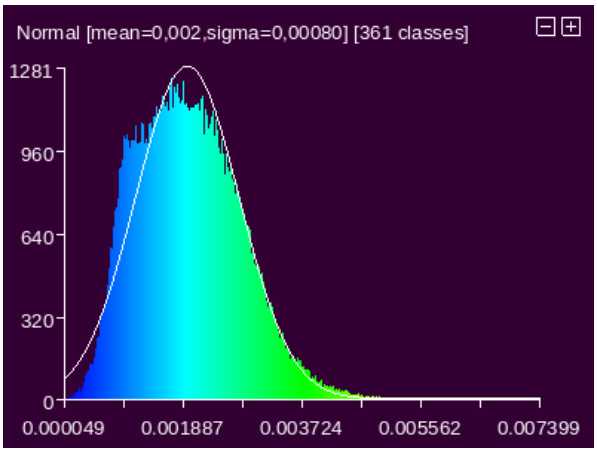


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

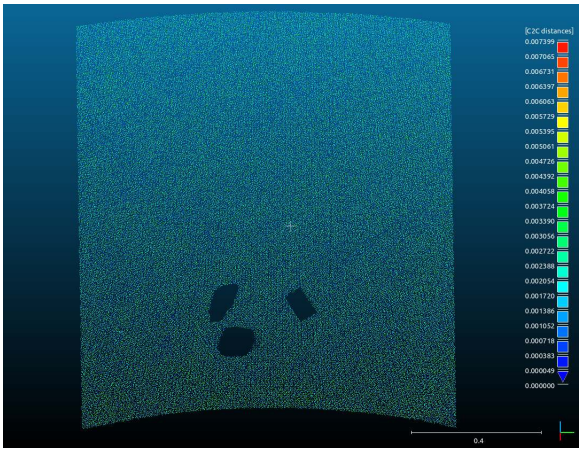


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.8: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompre

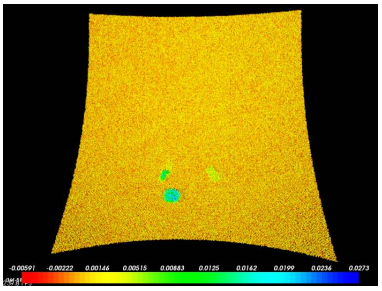


(α') Το ιστόγραμμα

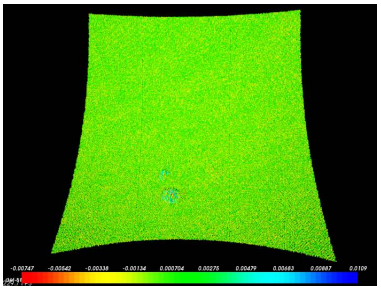


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

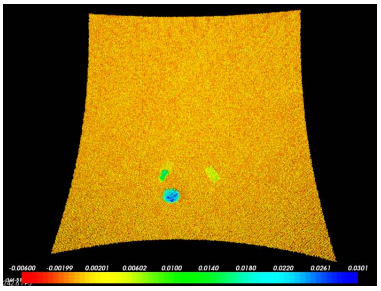
Σχήμα Α'.9: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompare



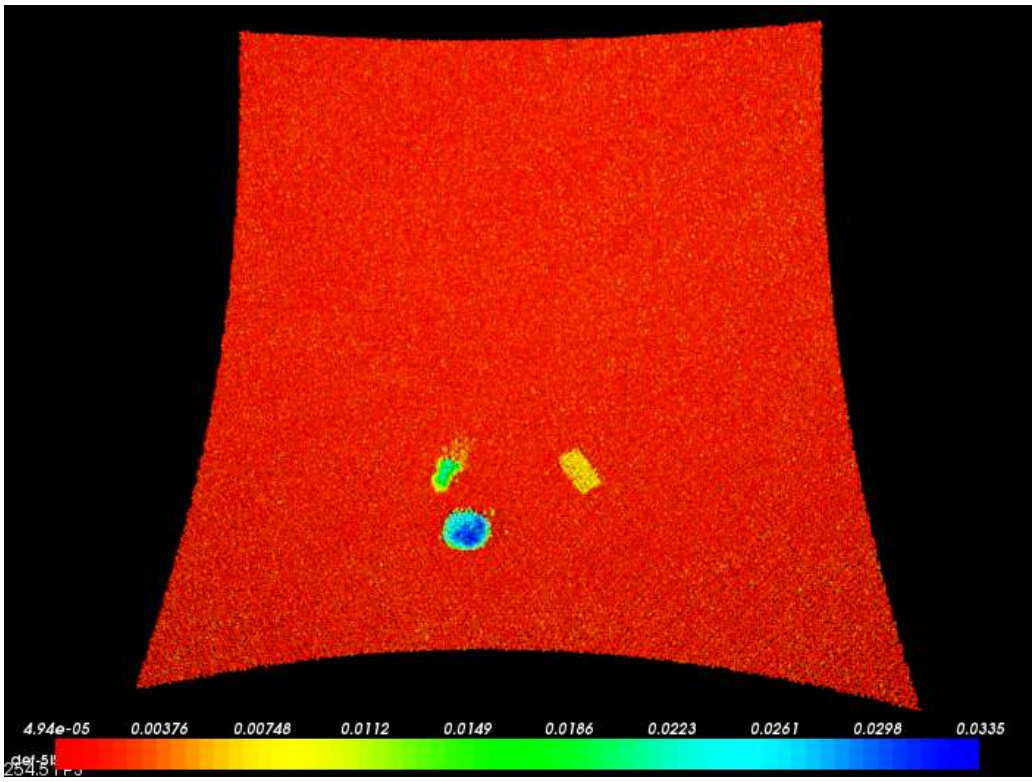
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

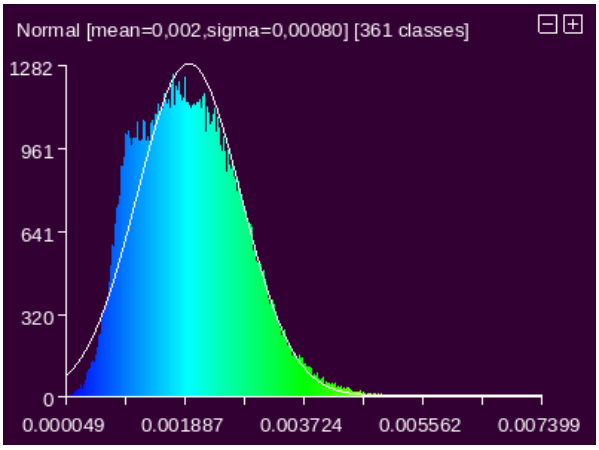


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

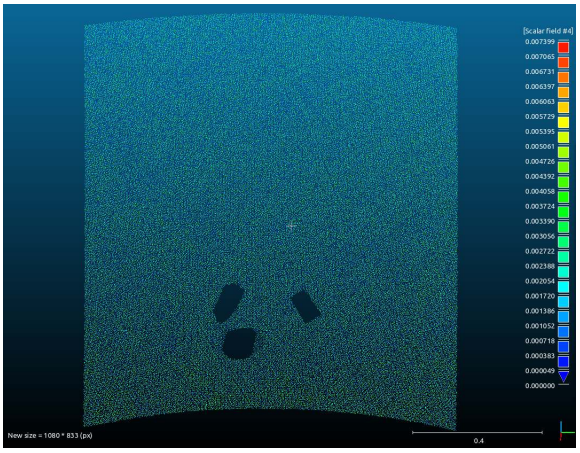


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.10: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL

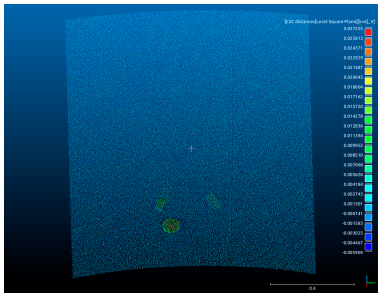


(α') Το ιστόγραμμα

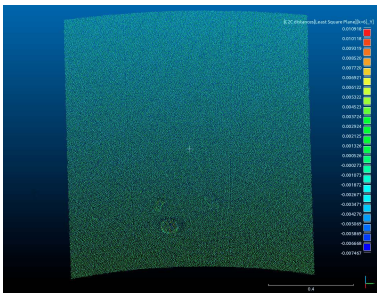


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

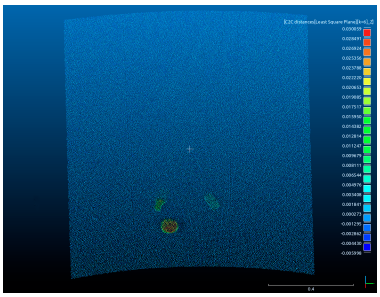
Σχήμα Α'.11: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από την PCL



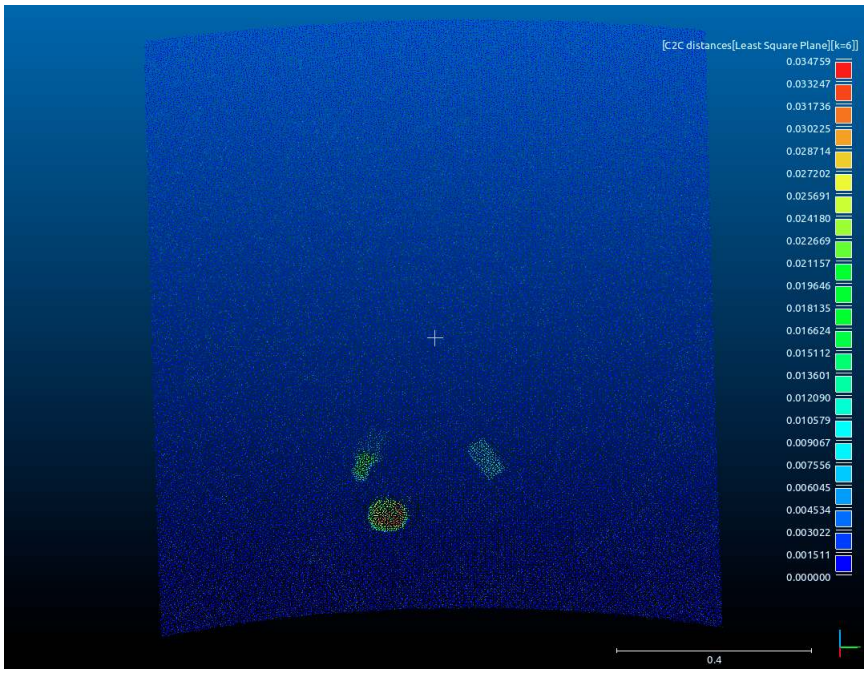
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

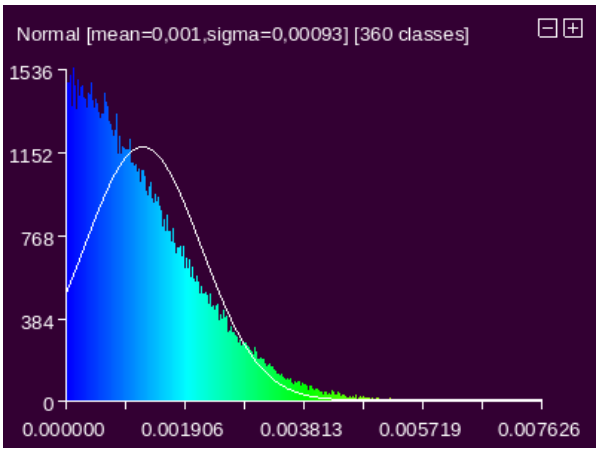


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

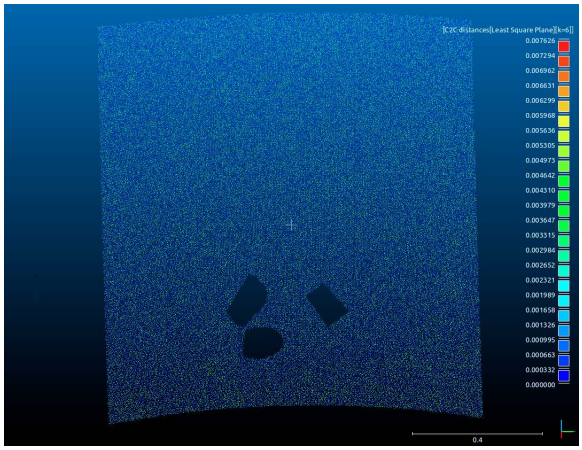


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.12: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου)

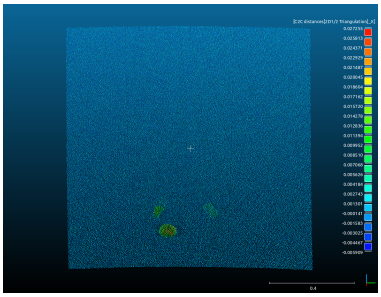


(α') Το ιστόγραμμα

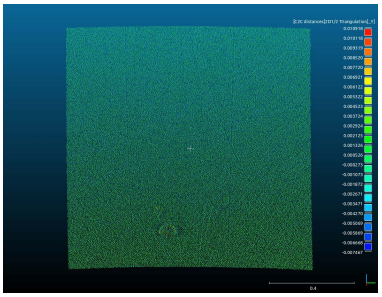


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

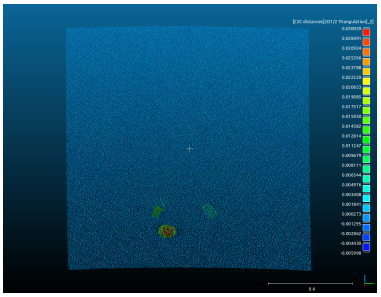
Σχήμα Α'.13: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου)



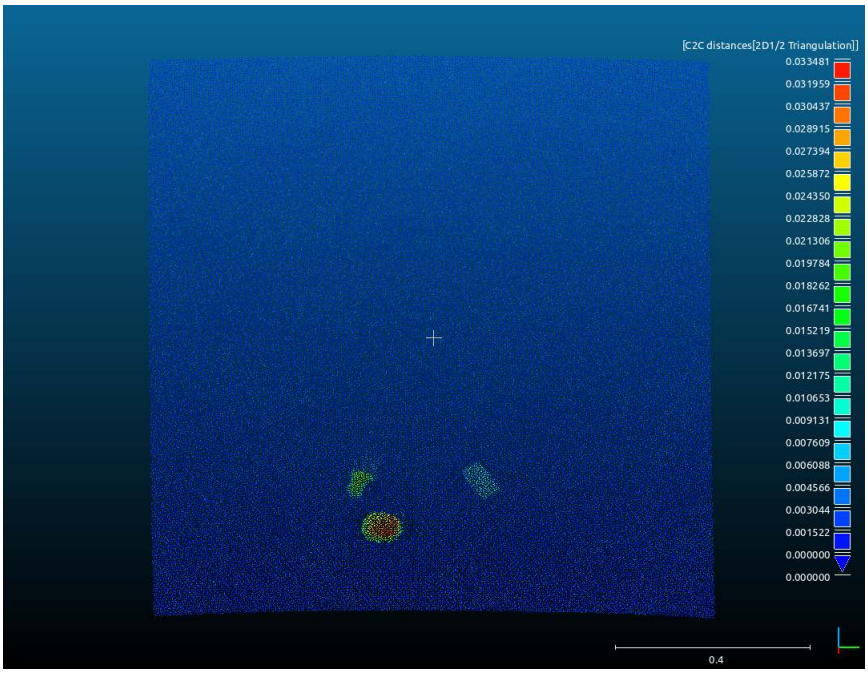
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

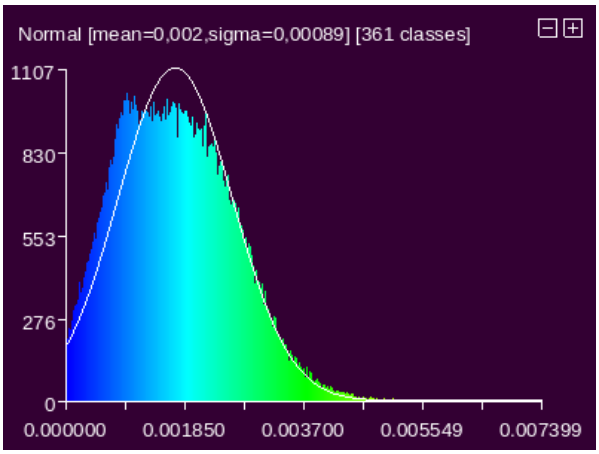


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

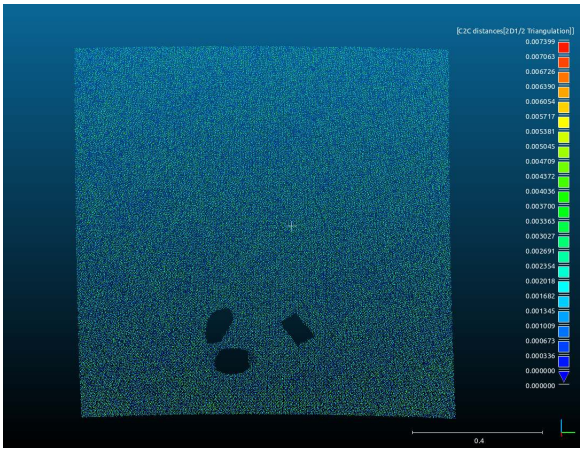


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.14: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation)

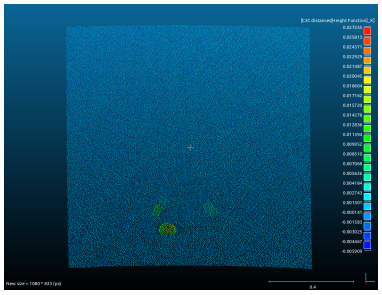


(α') Το ιστόγραμμα

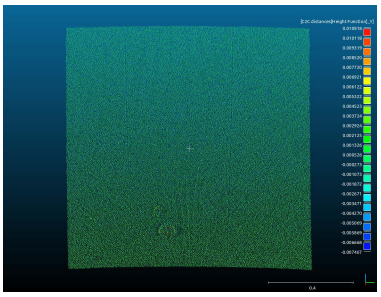


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

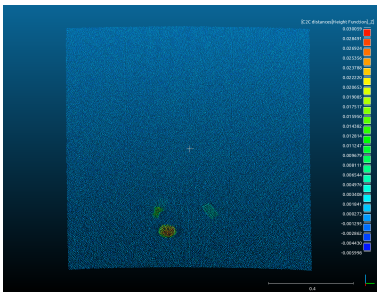
Σχήμα Α'.15: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation)



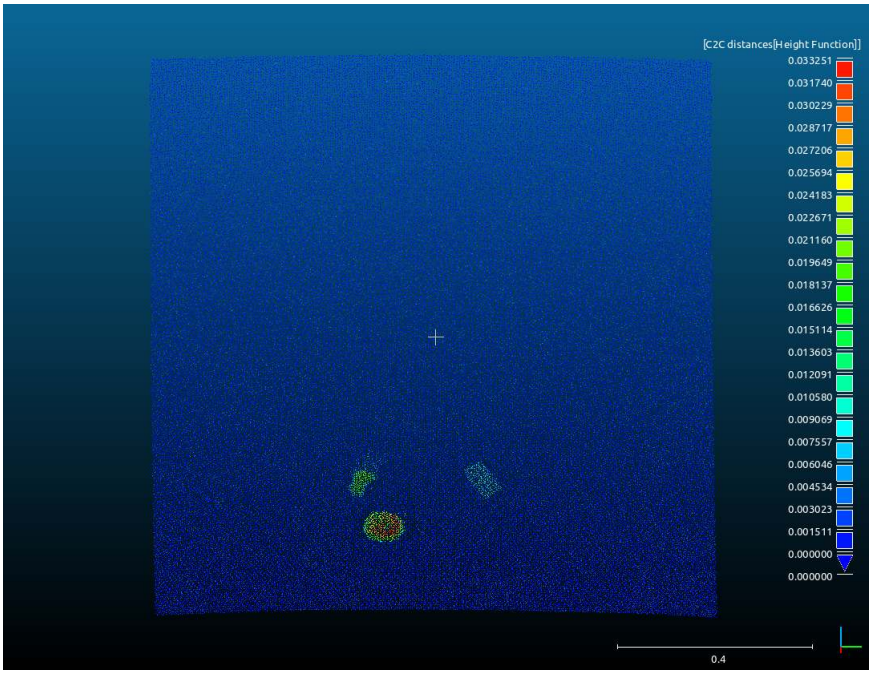
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

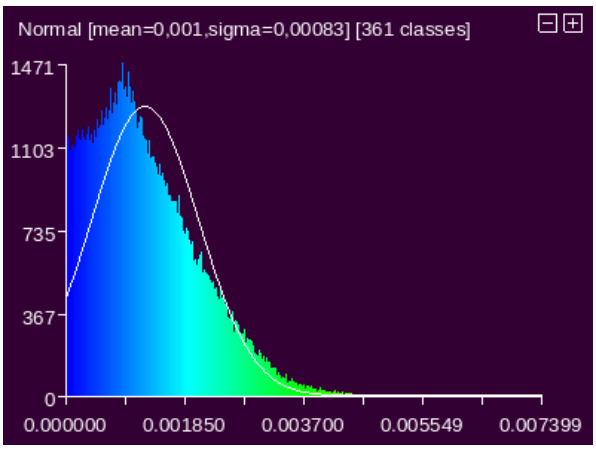


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

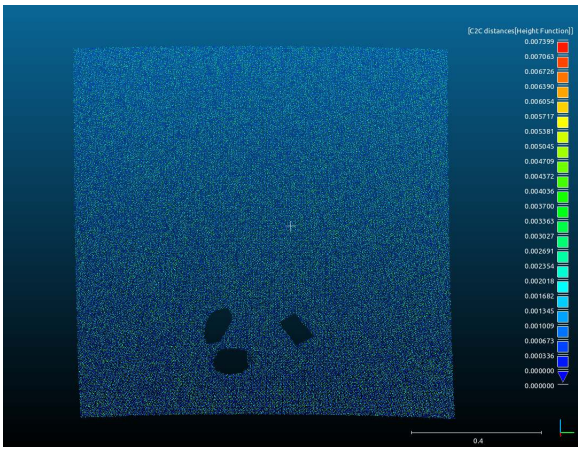


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.16: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function)

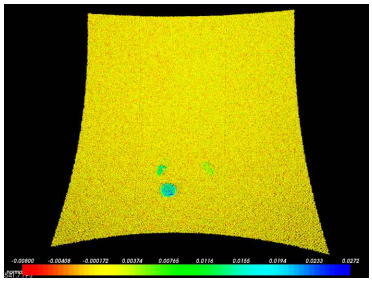


(α') Το ιστόγραμμα

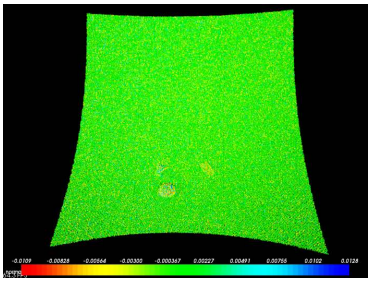


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

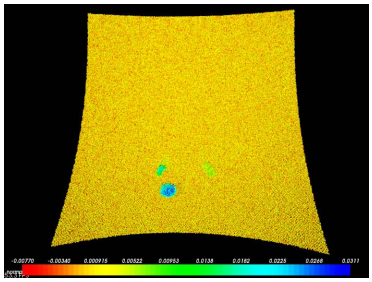
Σχήμα Α'.17: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function)



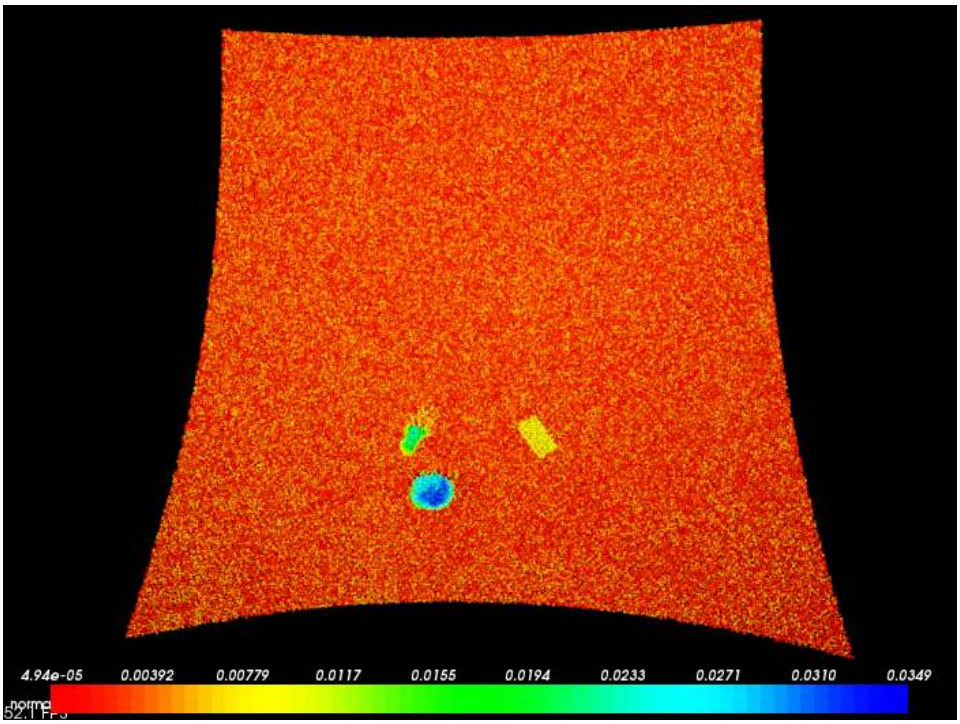
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

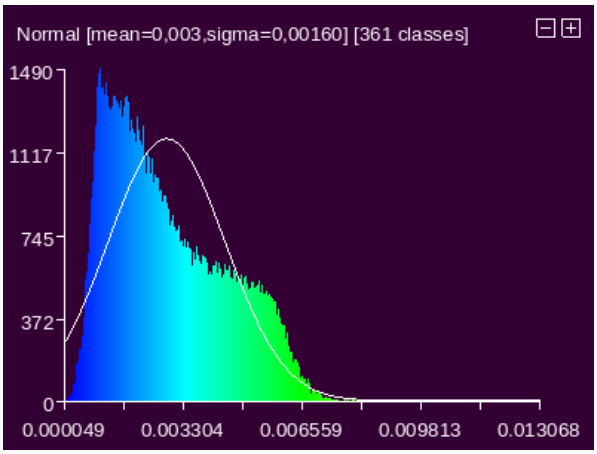


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

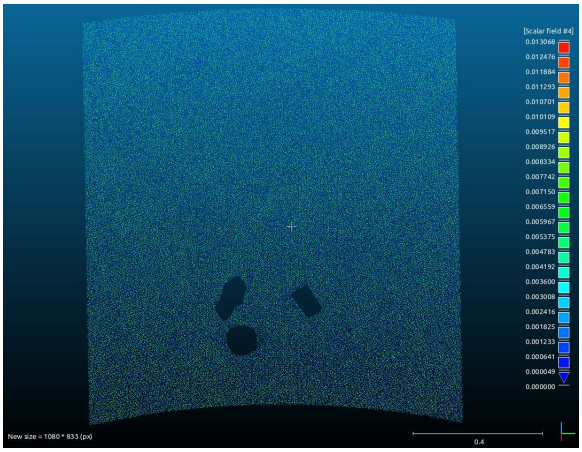


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.18: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

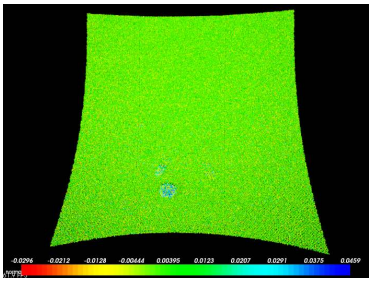


(α') Το ιστόγραμμα

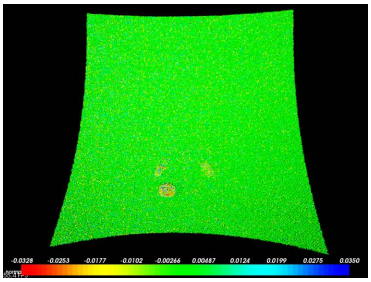


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

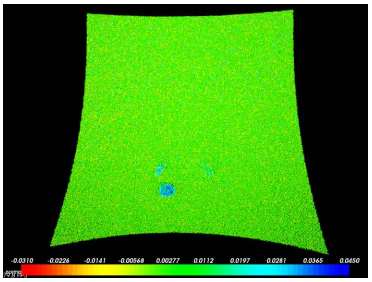
Σχήμα Α'.19: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 10)



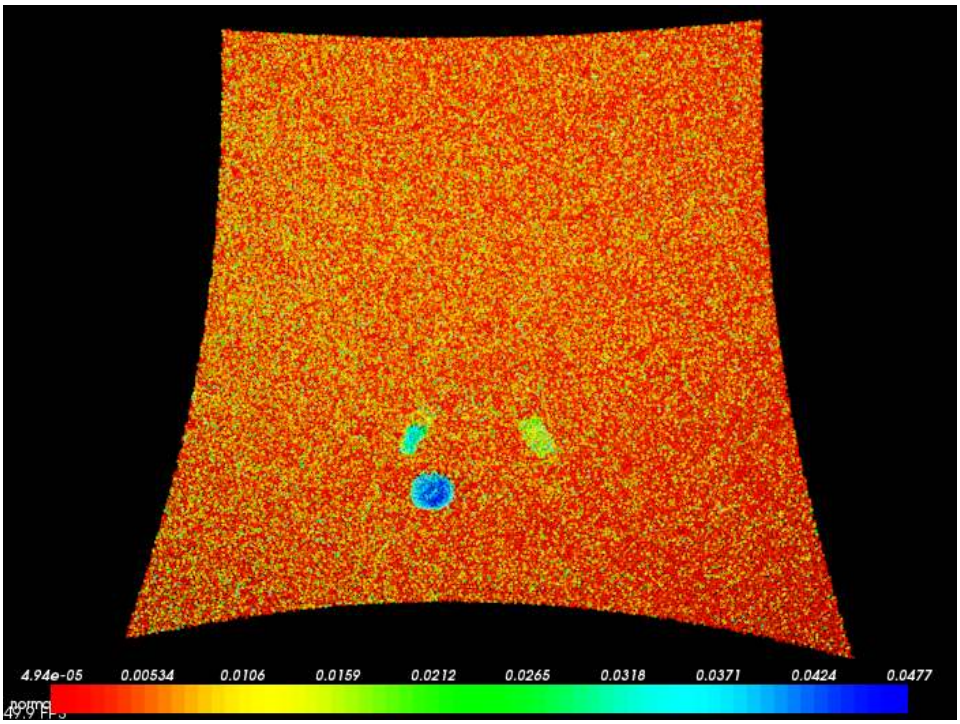
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

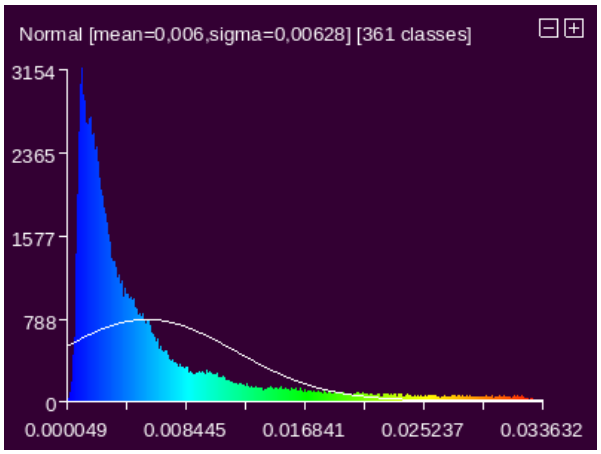


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

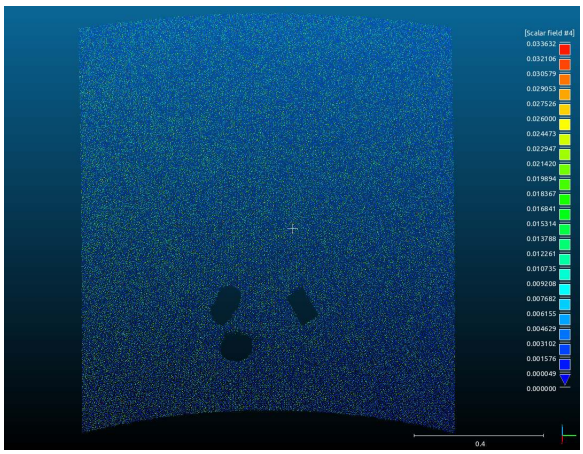


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.20: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 300 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

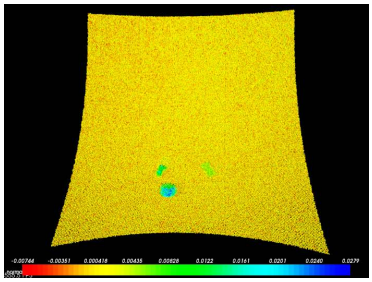


(α') Το ιστόγραμμα

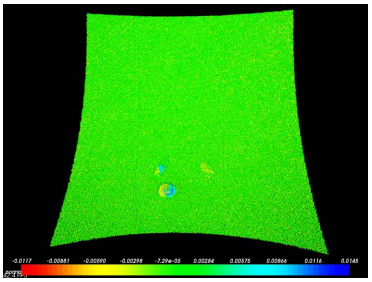


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

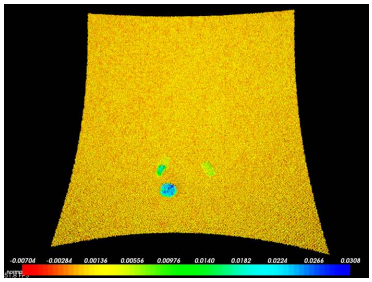
Σχήμα Α'.21: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 300)



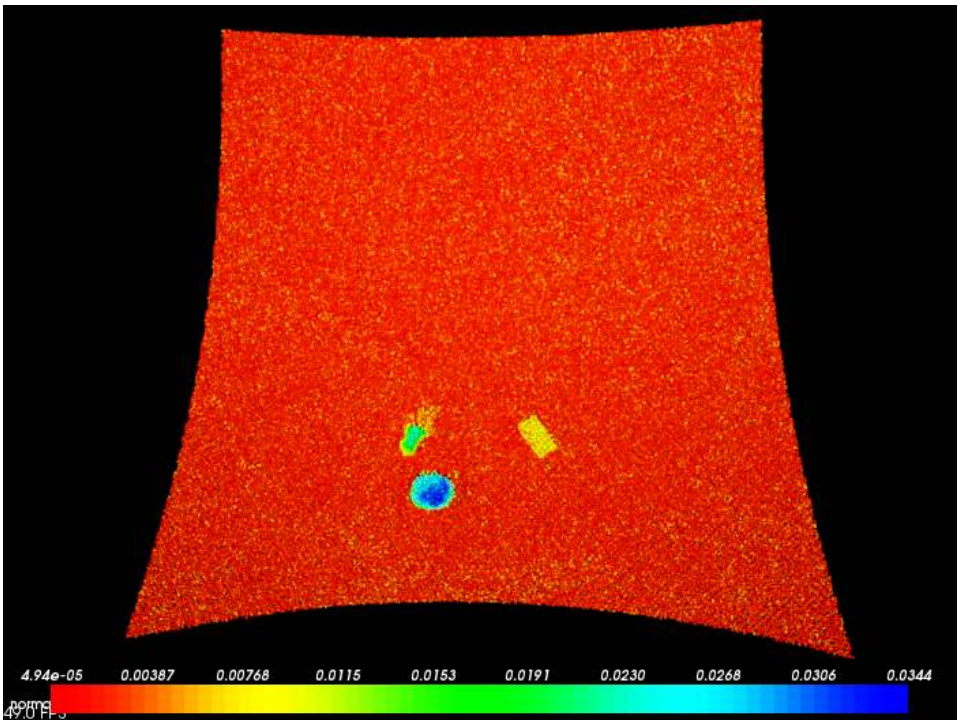
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

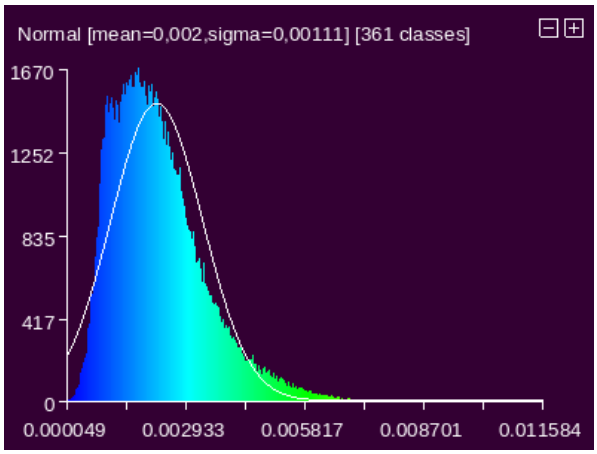


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

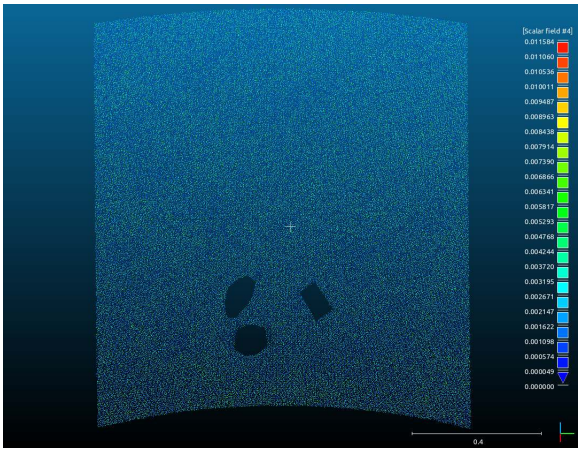


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.22: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

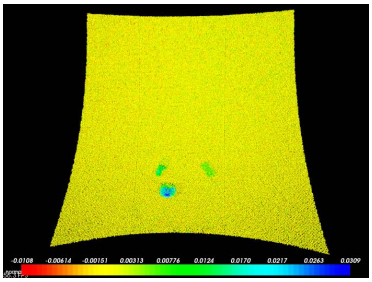


(α') Το ιστόγραμμα

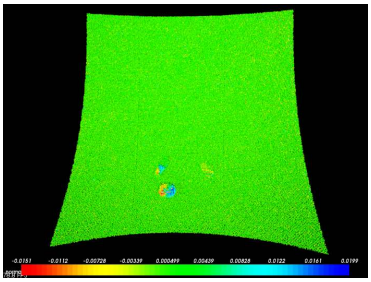


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

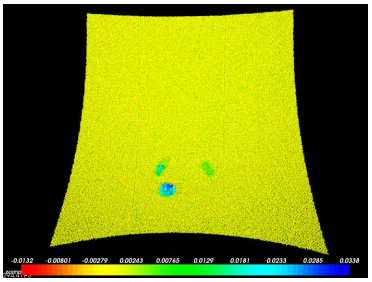
Σχήμα Α'.23: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10)



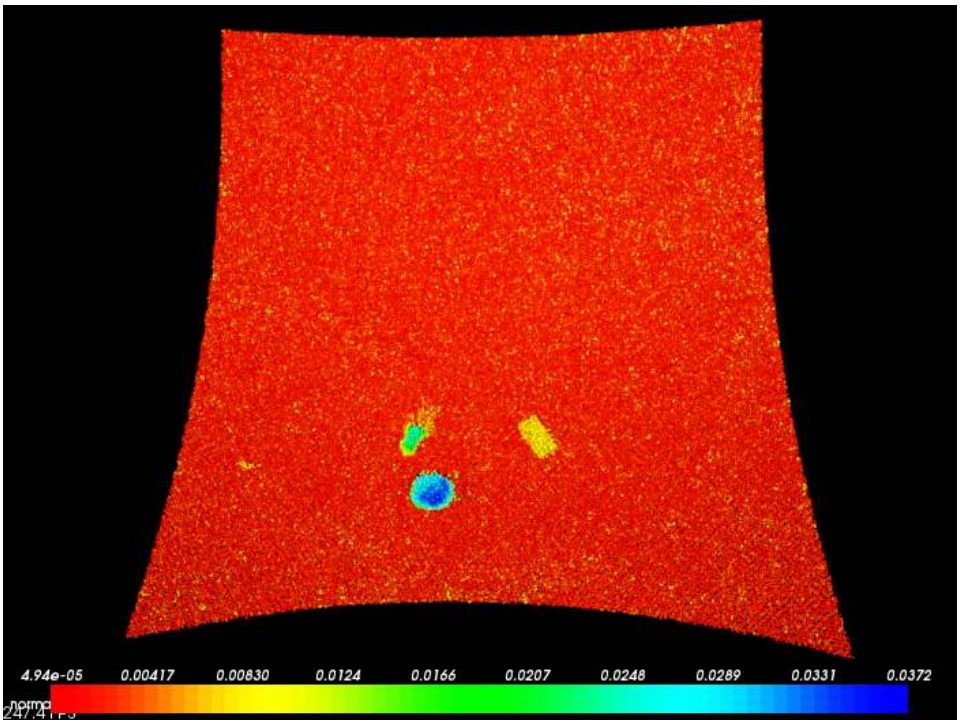
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

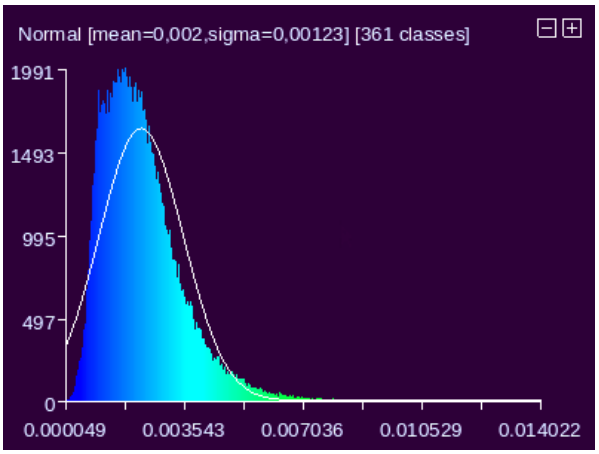


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

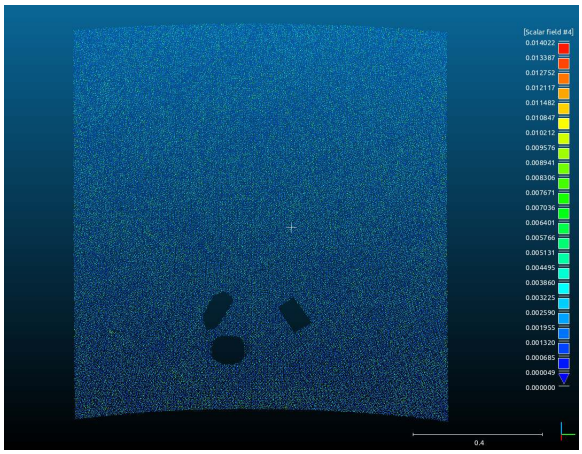


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.24: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 50 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

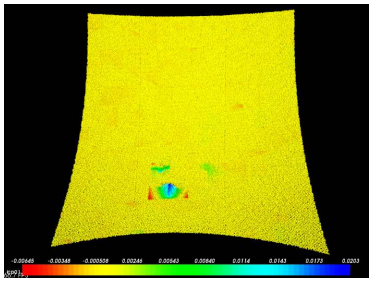


(α') Το ιστόγραμμα

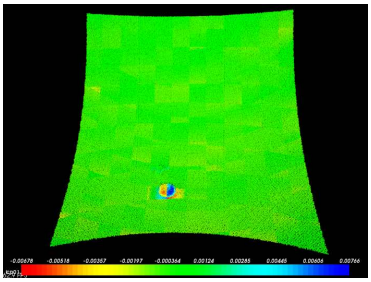


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

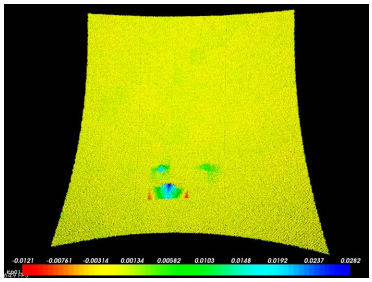
Σχήμα Α'.25: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 50)



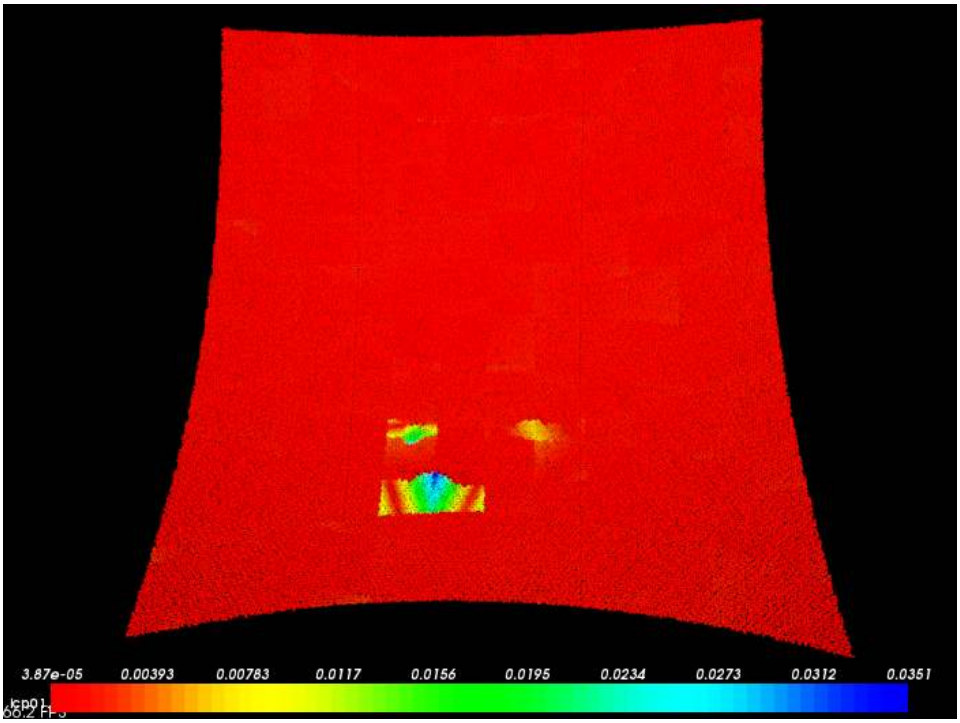
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

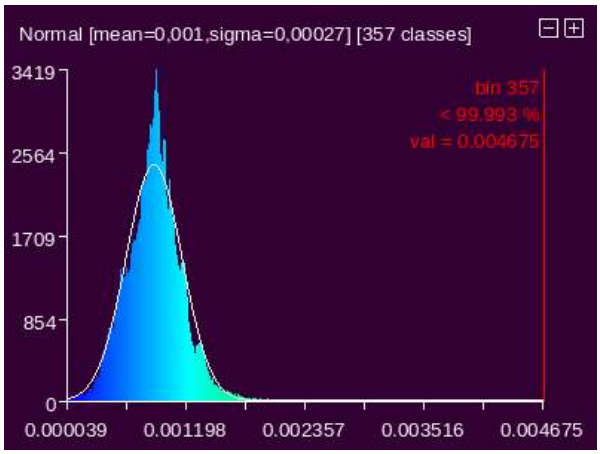


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

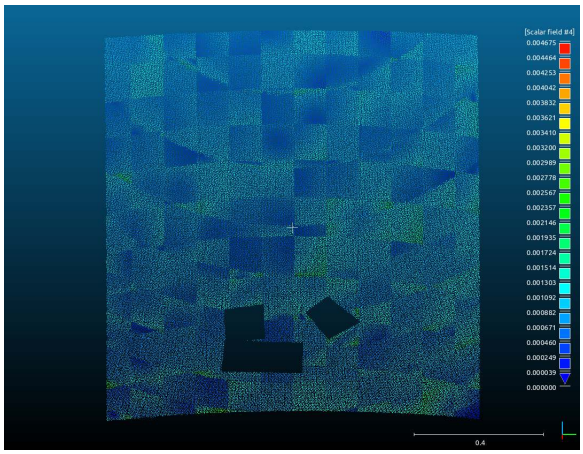


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.26: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.1

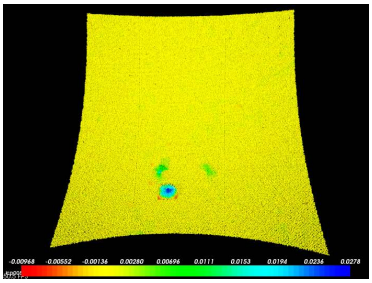


(α') Το ιστόγραμμα

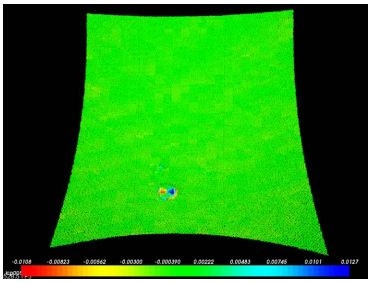


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

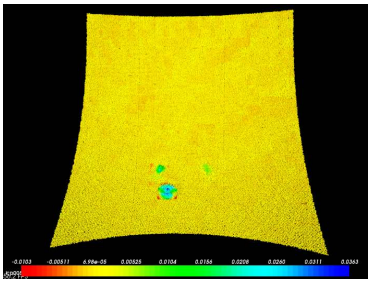
Σχήμα Α'.27: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.1



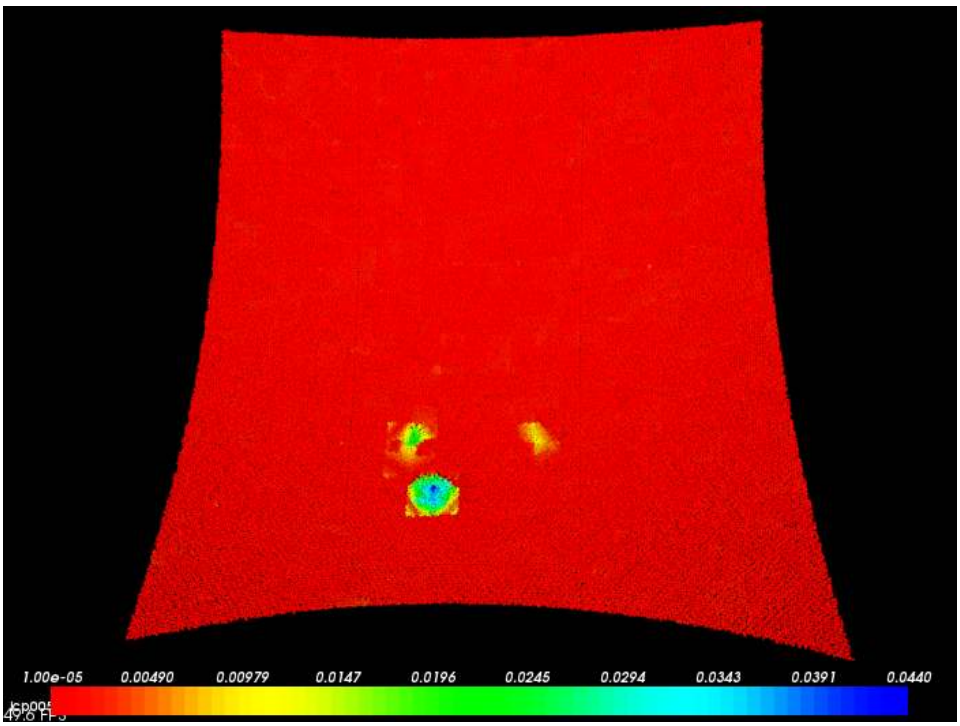
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

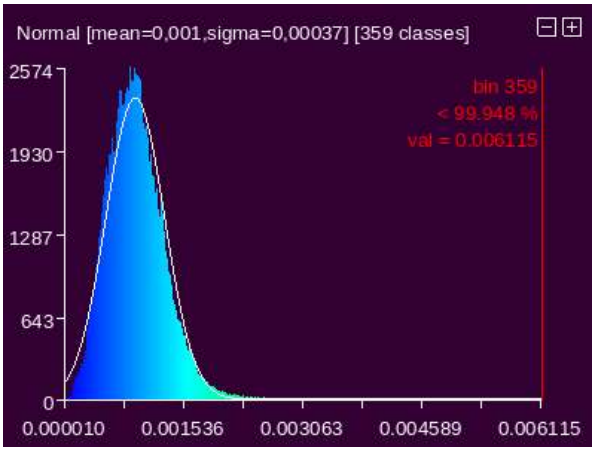


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

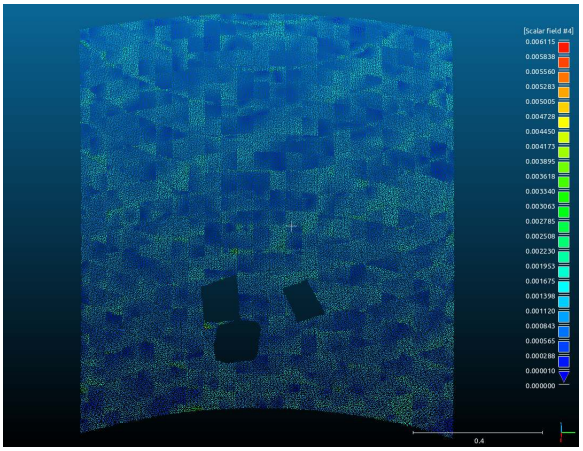


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.28: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.05

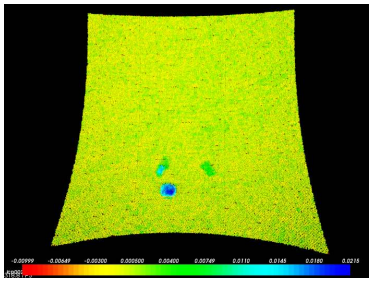


(α') Το ιστόγραμμα

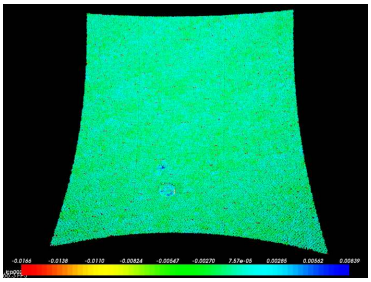


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

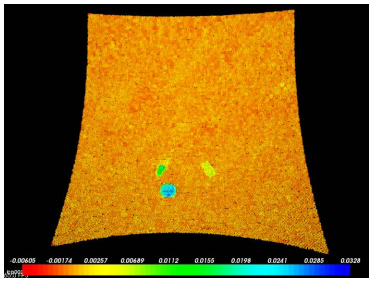
Σχήμα Α'.29: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.05



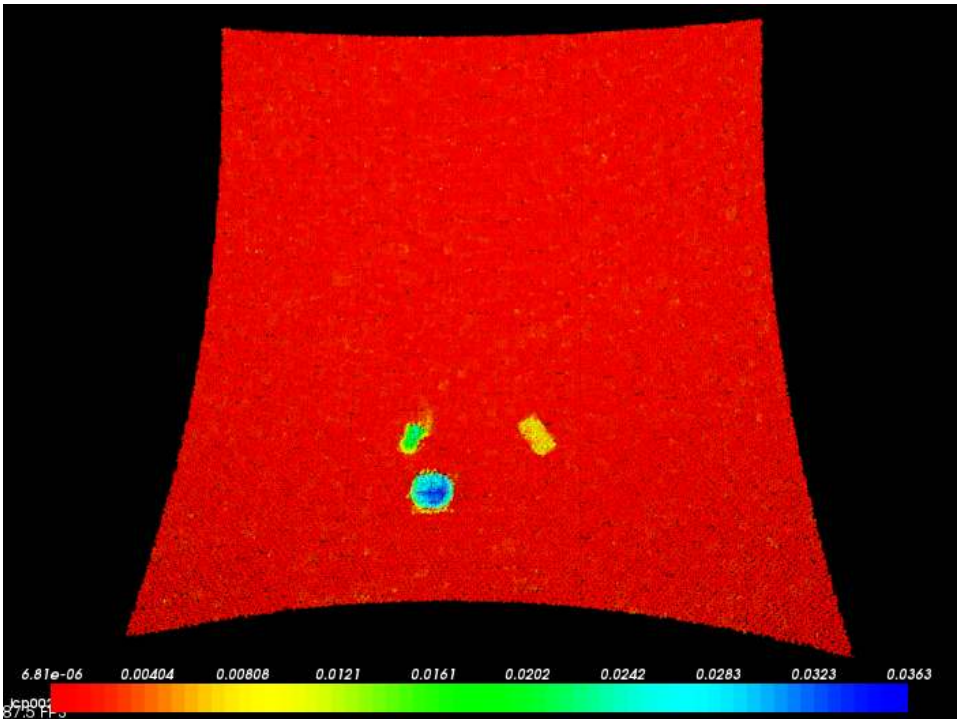
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

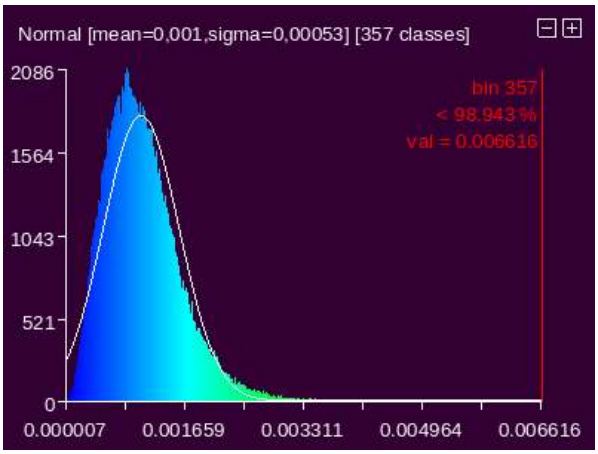


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

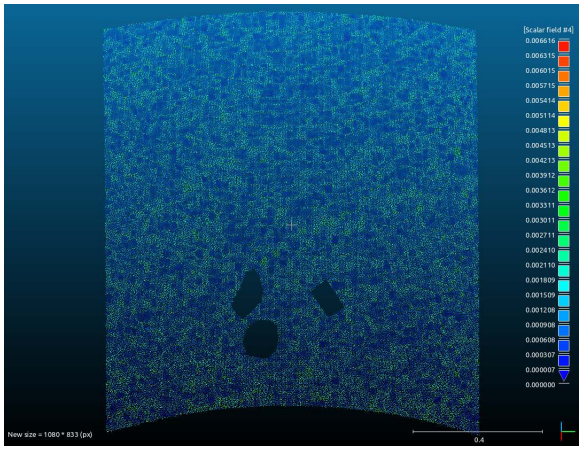


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.30: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.02

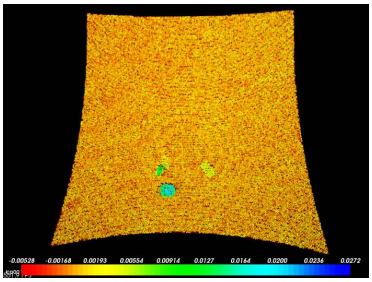


(α') Το ιστόγραμμα

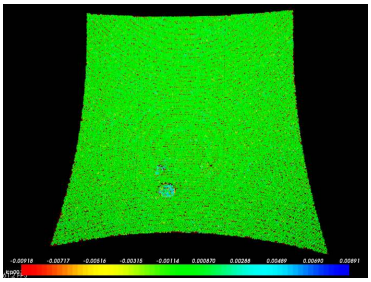


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

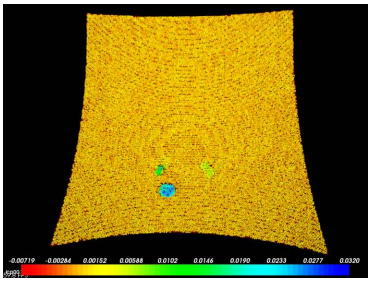
Σχήμα Α'.31: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.02



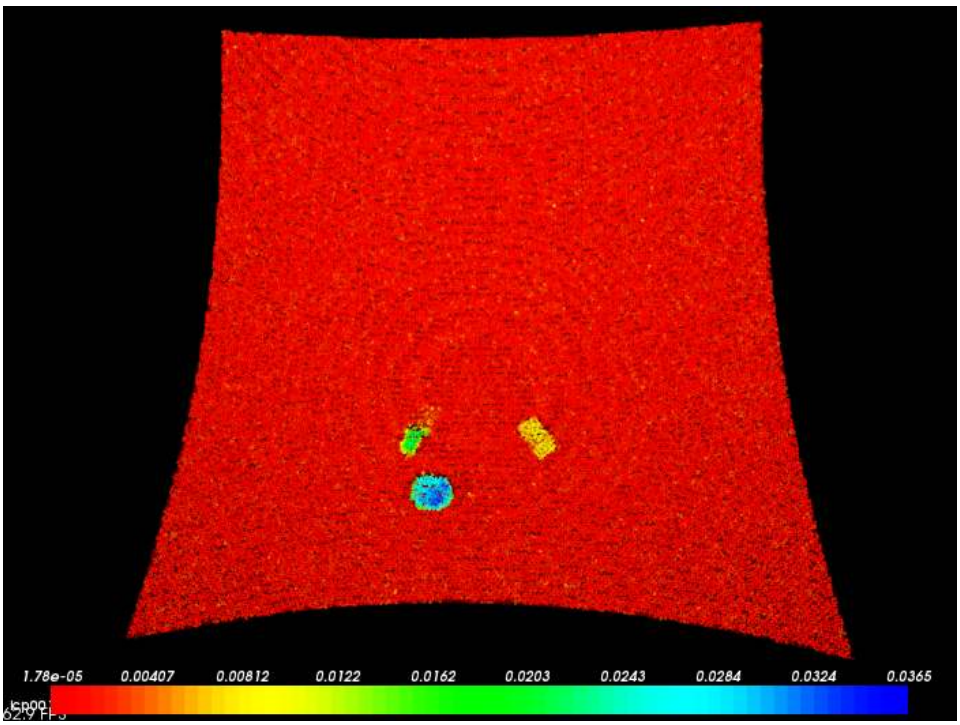
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

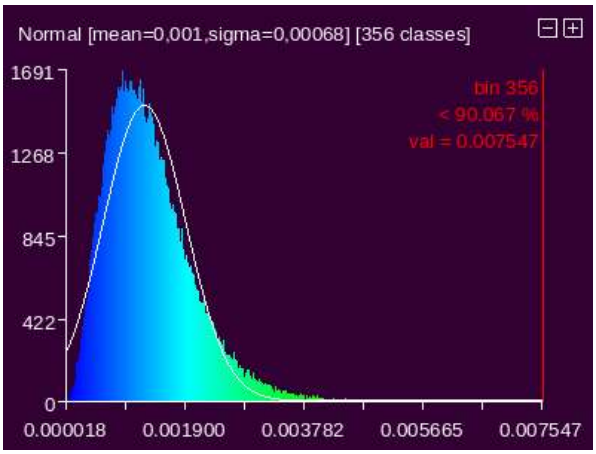


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

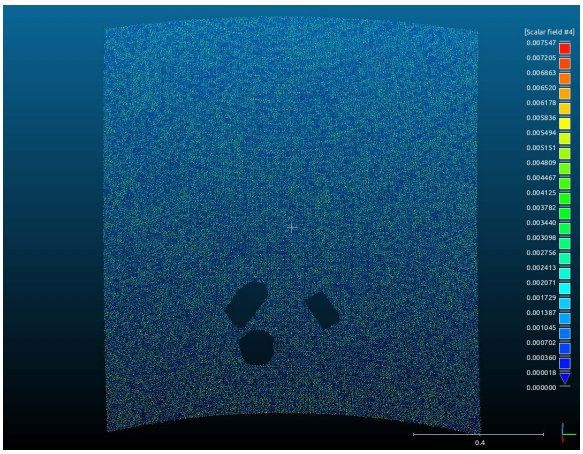


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.32: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.01



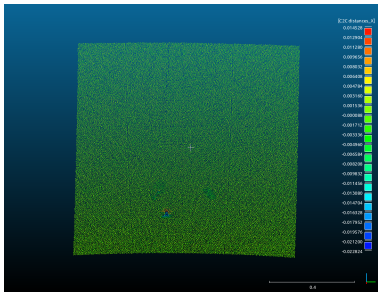
(α') Το ιστόγραμμα



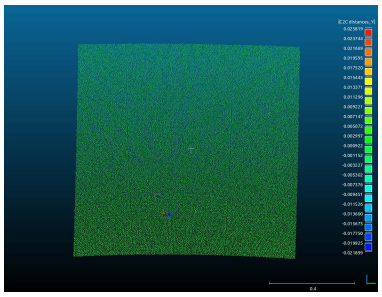
(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

Σχήμα Α'.33: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.01

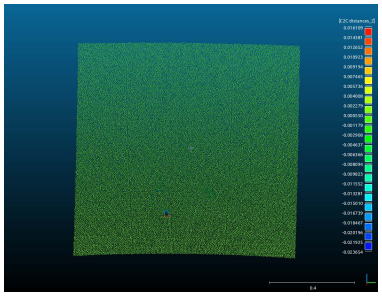
Α'.3 2ο πείραμα



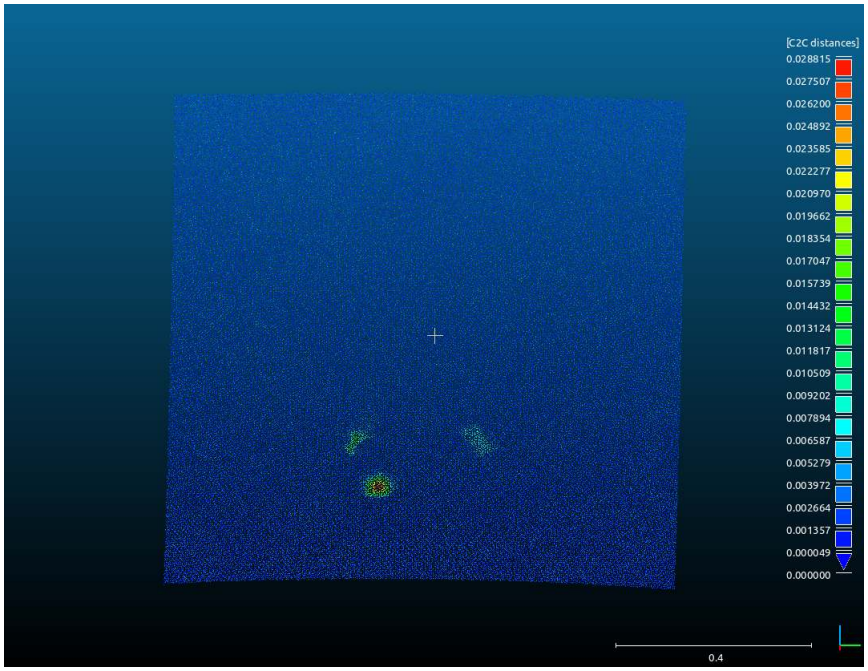
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

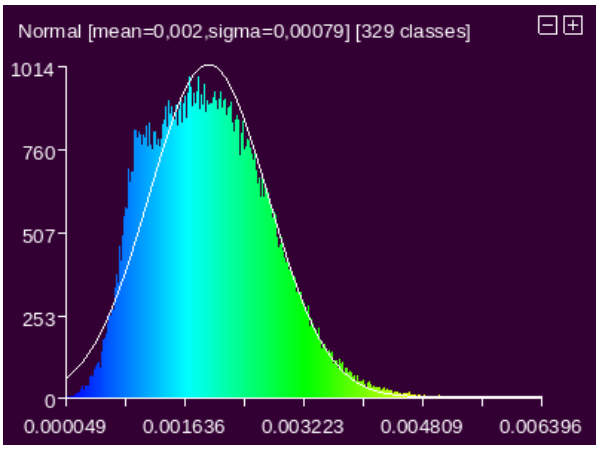


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

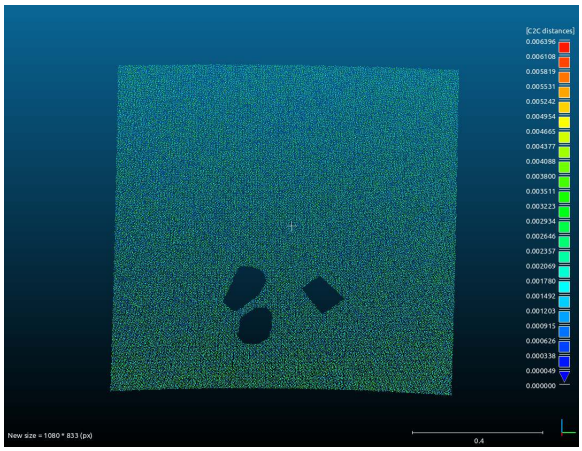


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.34: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompre

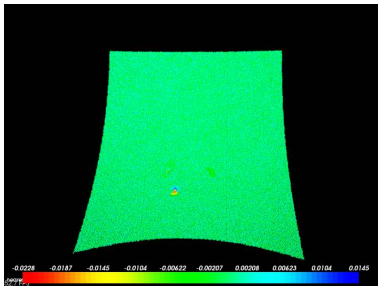


(α') Το ιστόγραμμα

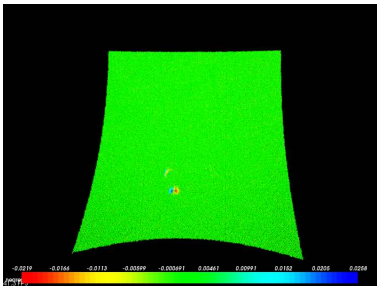


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

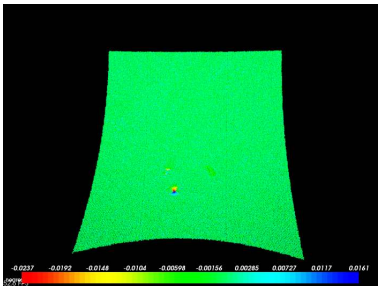
Σχήμα Α'.35: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompare



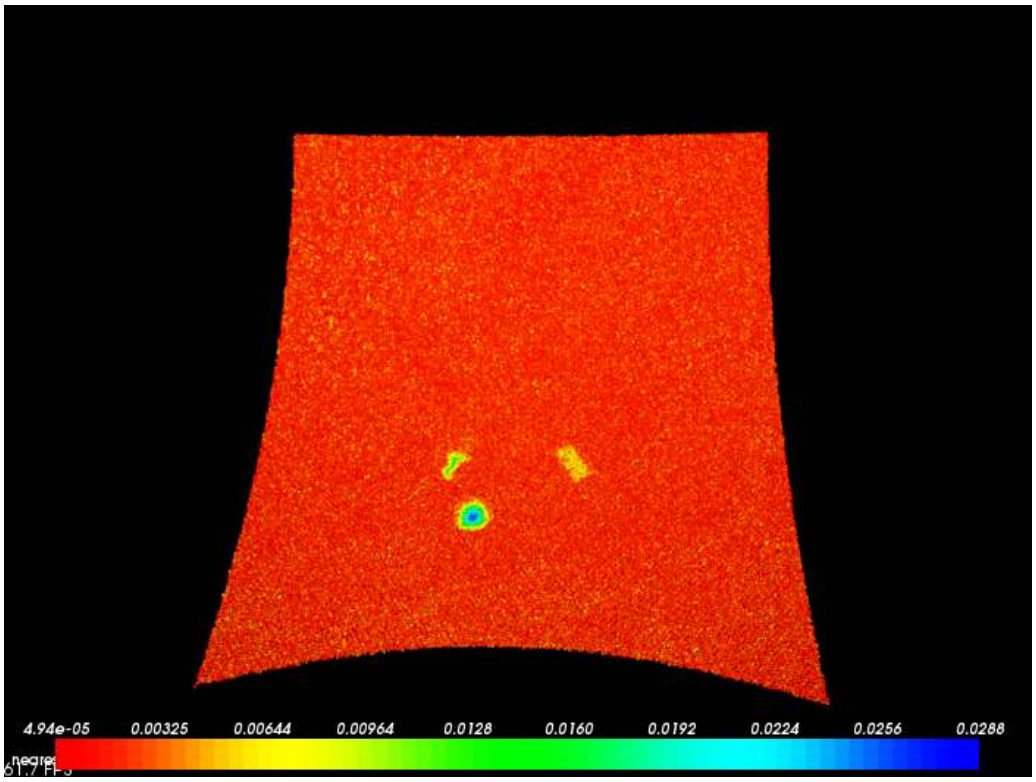
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

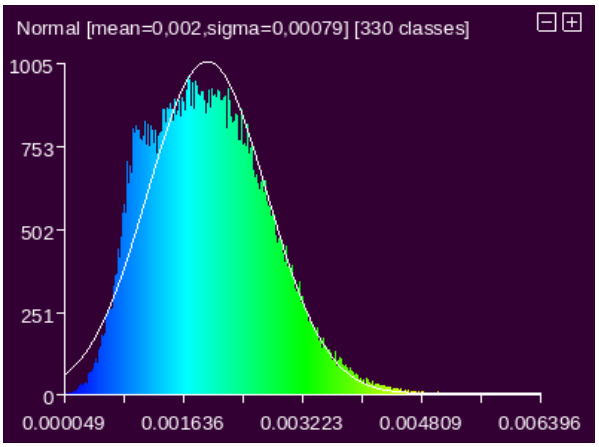


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

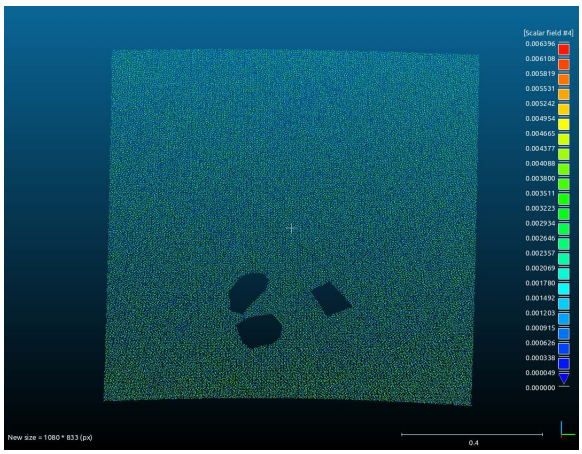


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.36: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL

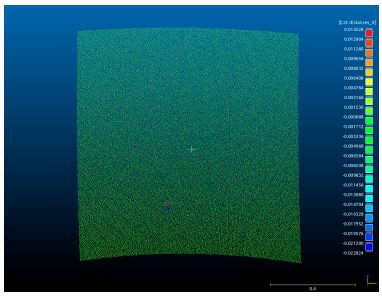


(α') Το ιστόγραμμα

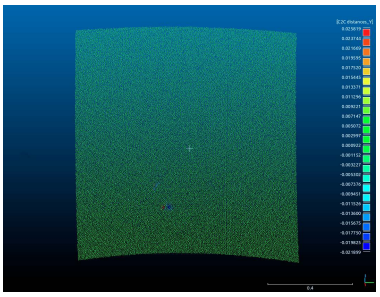


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

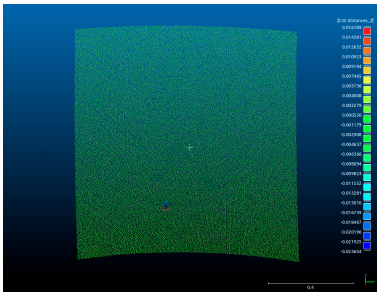
Σχήμα Α'.37: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από την PCL



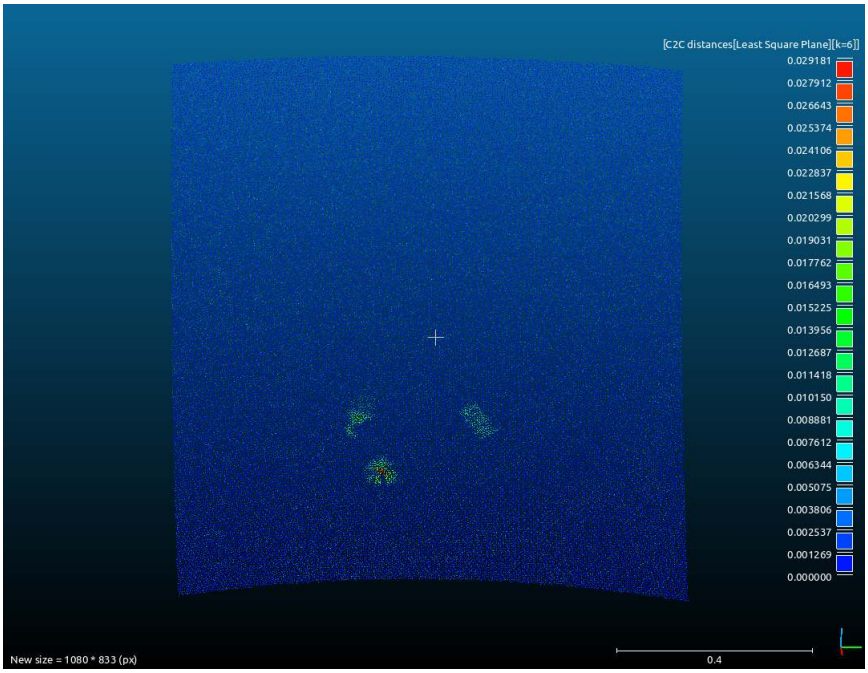
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

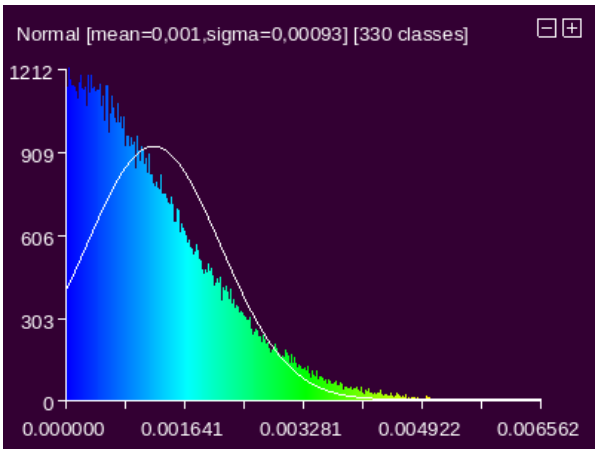


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

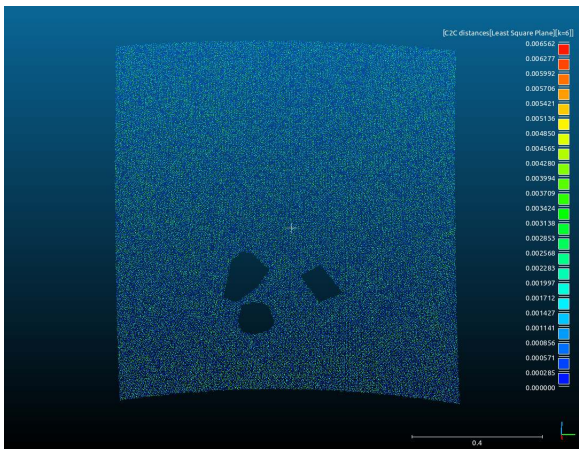


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.38: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου)

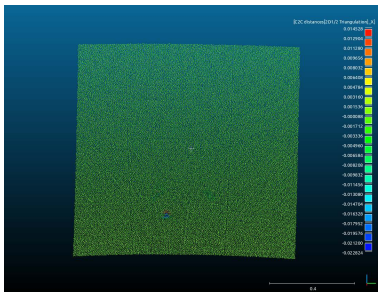


(α') Το ιστόγραμμα

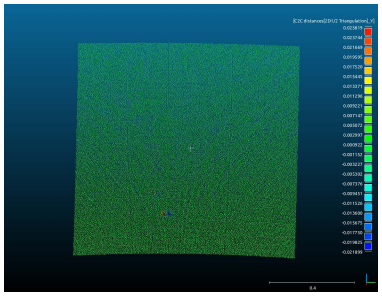


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

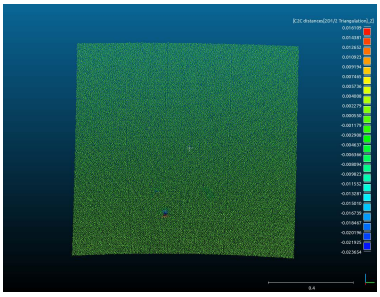
Σχήμα Α'.39: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου)



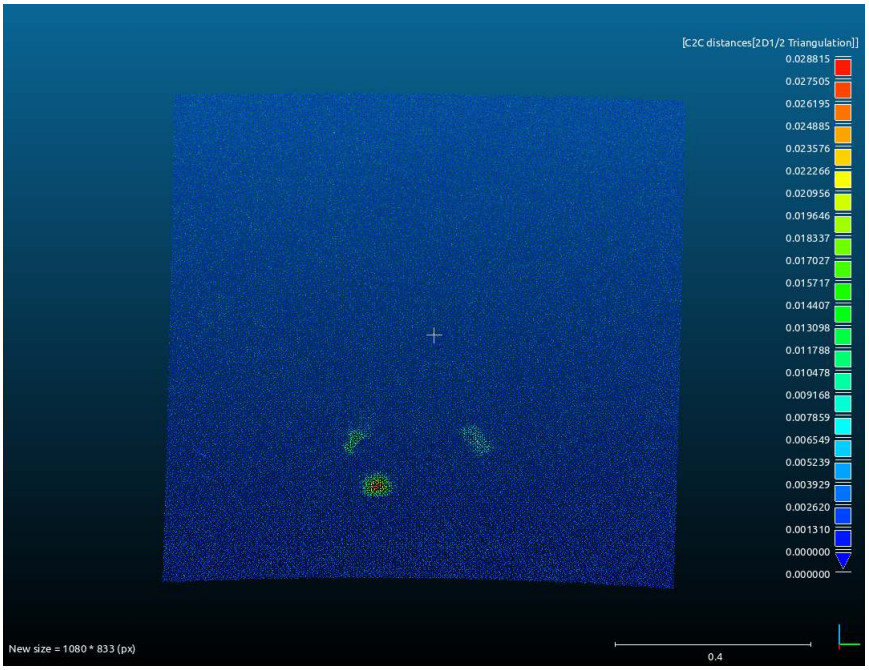
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

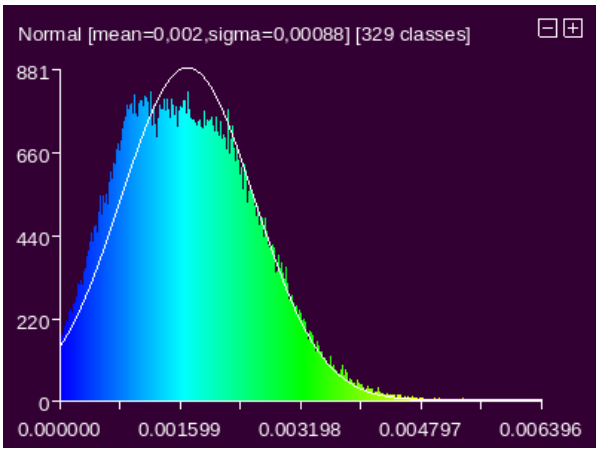


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

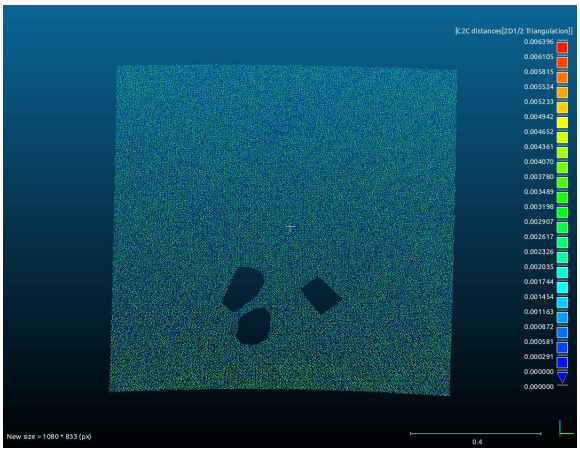


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.40: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation

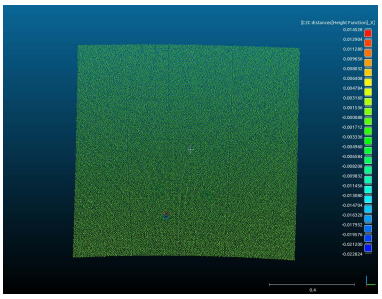


(α') Το ιστόγραμμα

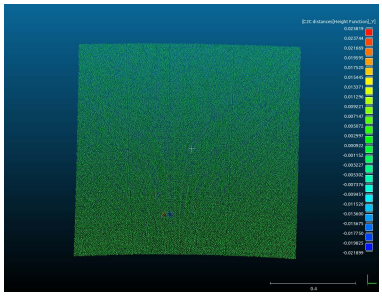


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

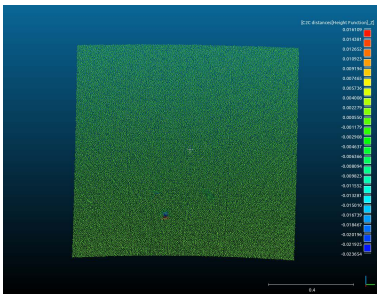
Σχήμα Α'.41: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation)



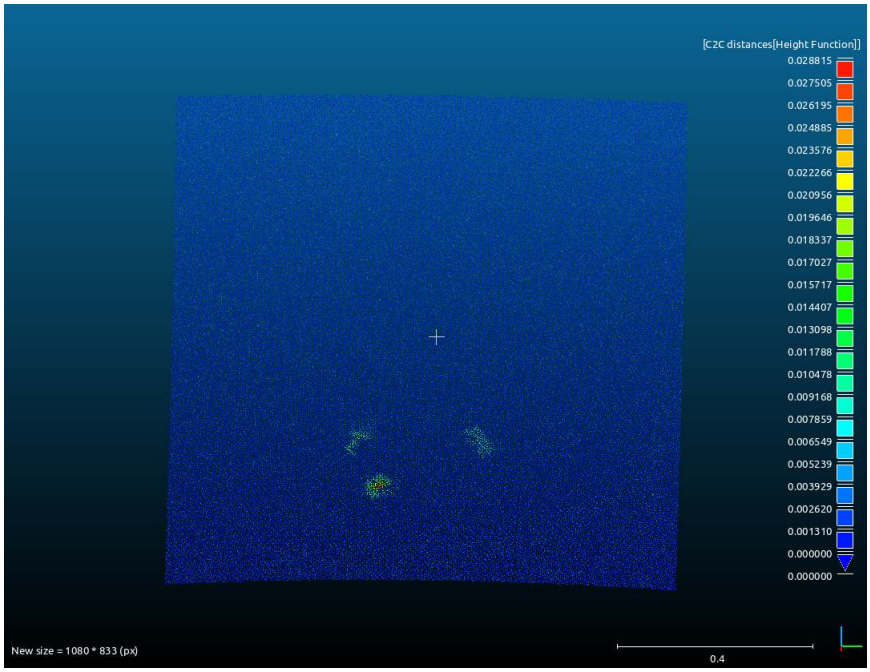
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

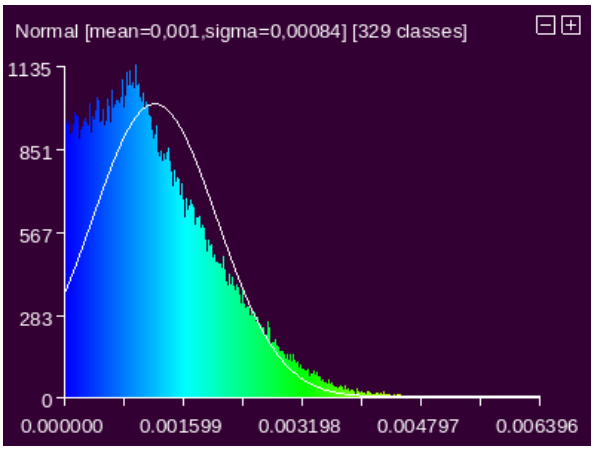


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

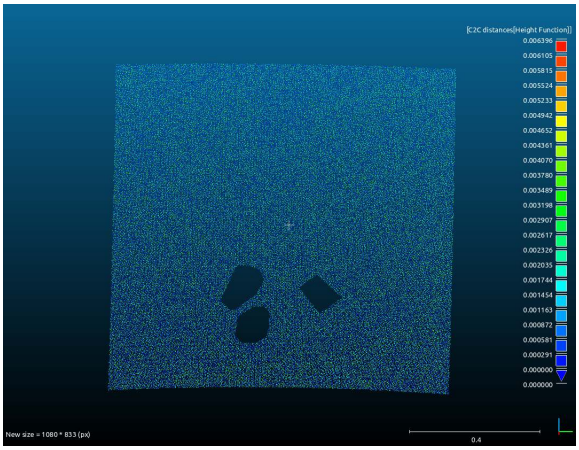


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.42: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function)

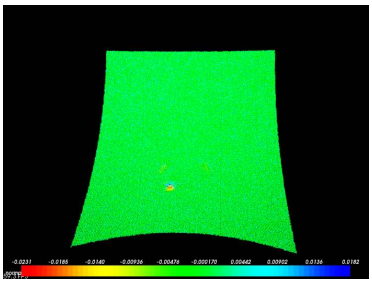


(α') Το ιστόγραμμα

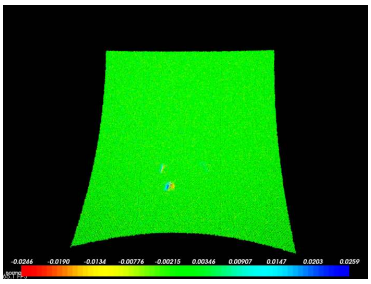


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

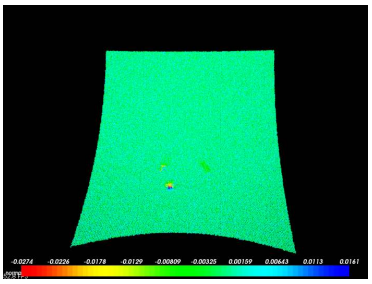
Σχήμα Α'.43: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function)



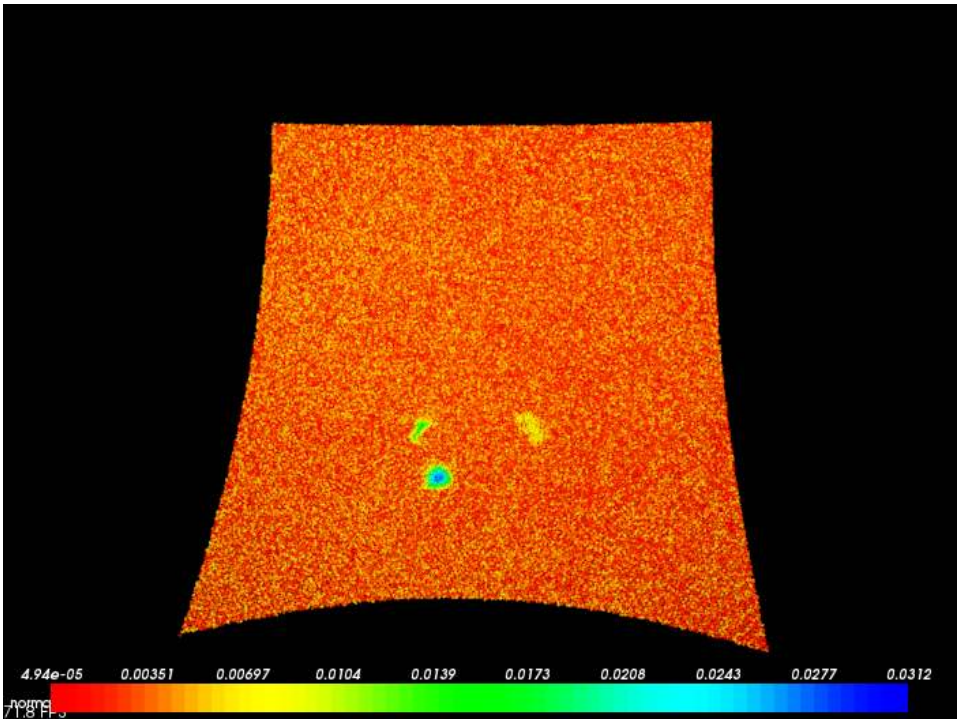
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

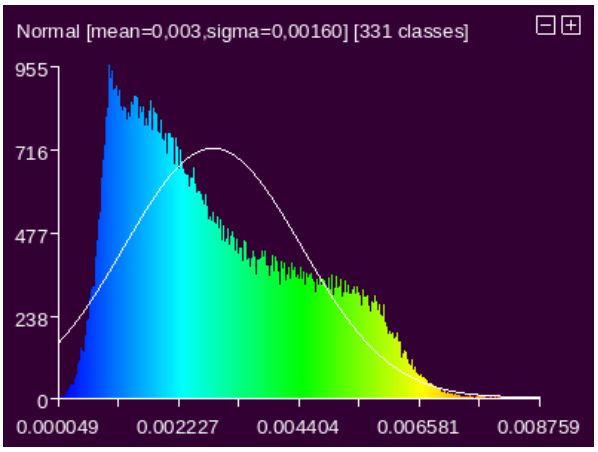


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

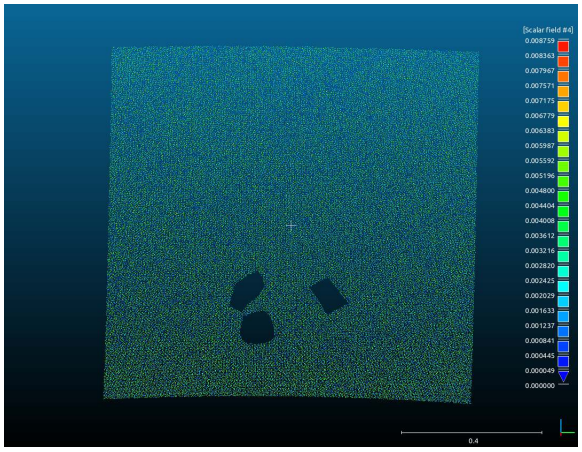


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.44: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

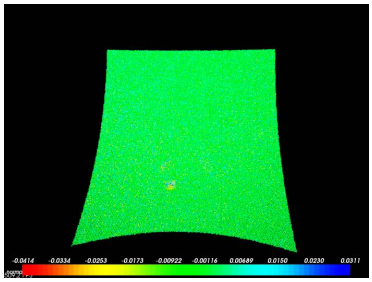


(α') Το ιστόγραμμα

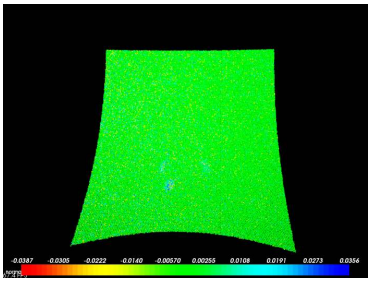


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

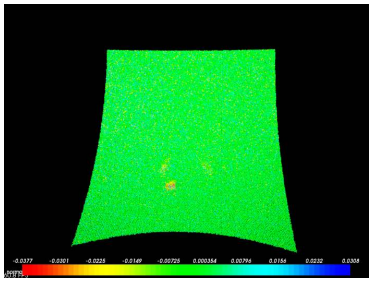
Σχήμα Α'.45: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 10)



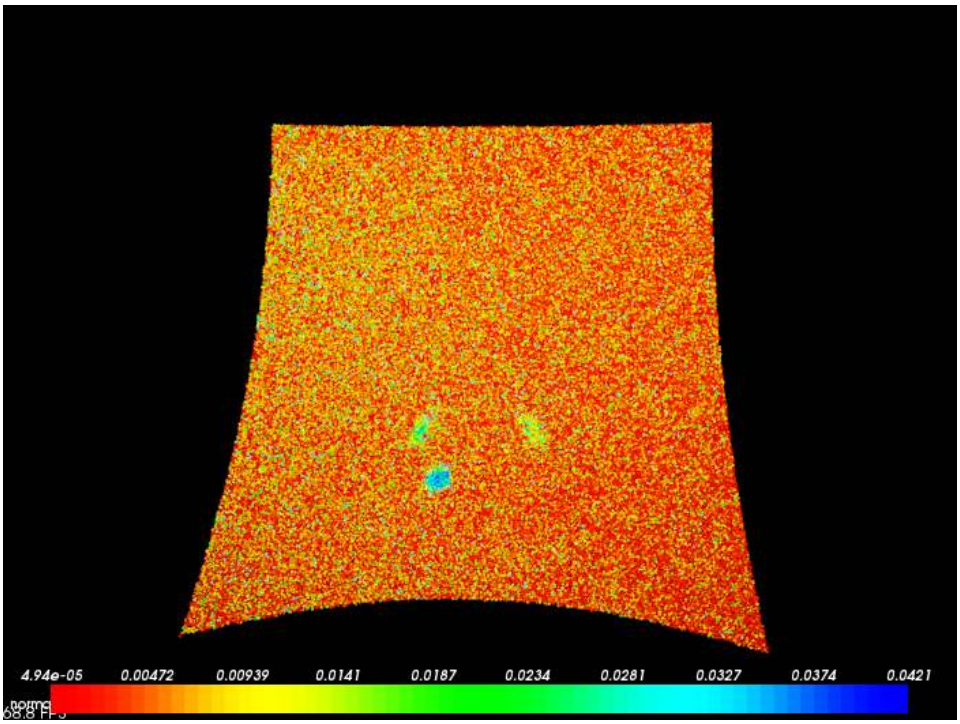
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

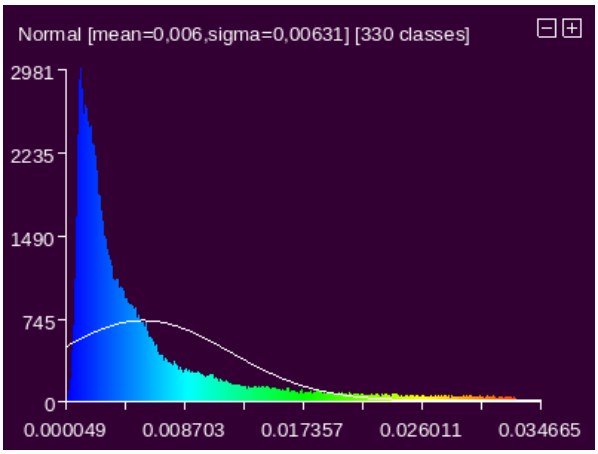


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

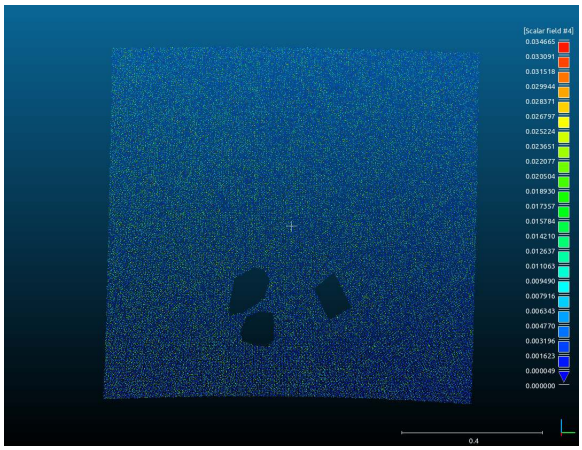


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.46: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 300 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

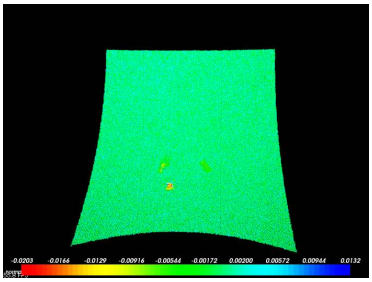


(α') Το ιστόγραμμα

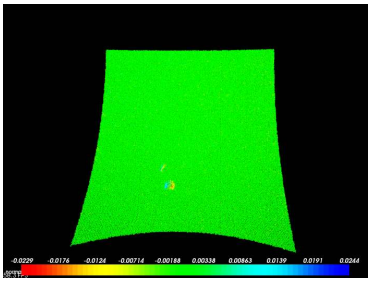


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

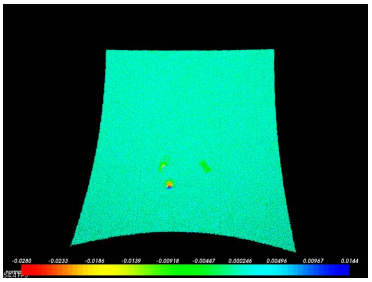
Σχήμα Α'.47: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 300)



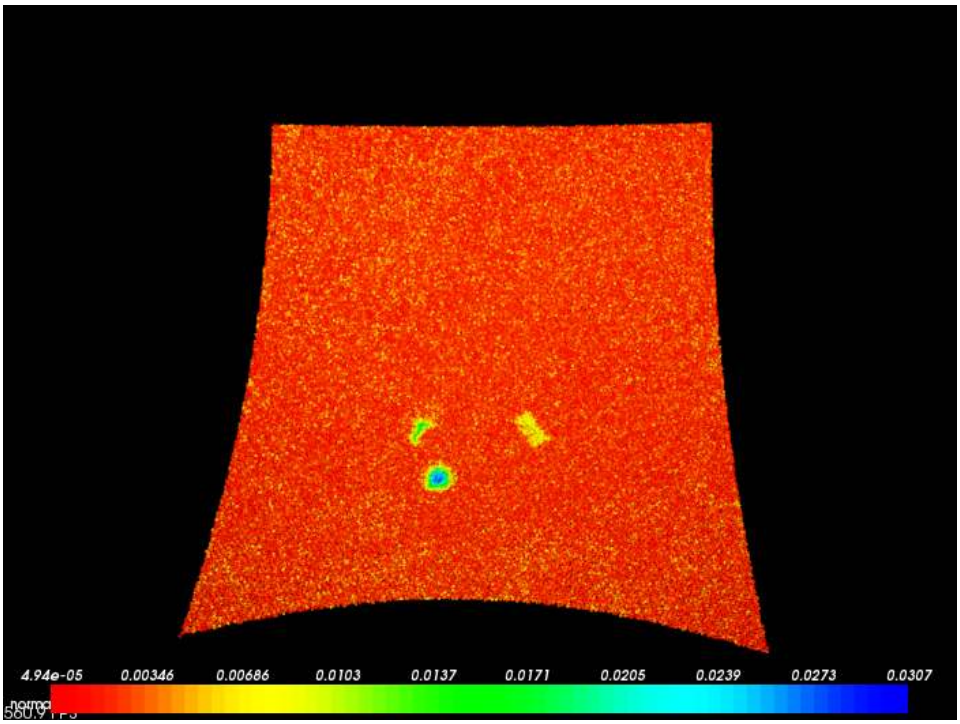
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

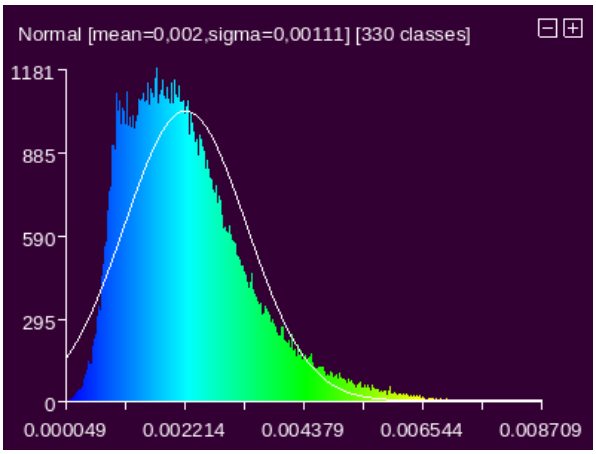


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

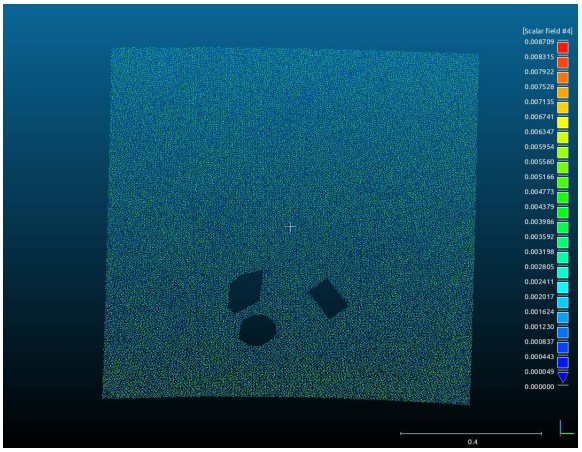


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.48: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

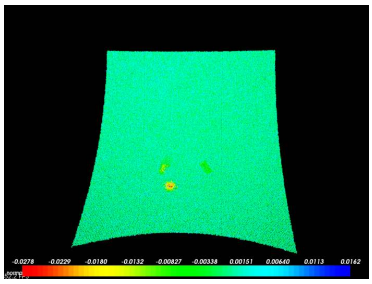


(α') Το ιστόγραμμα

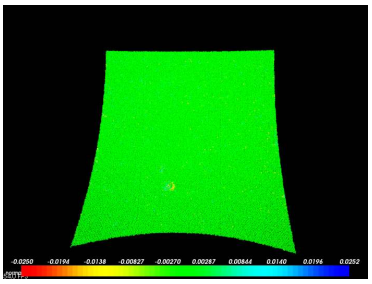


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

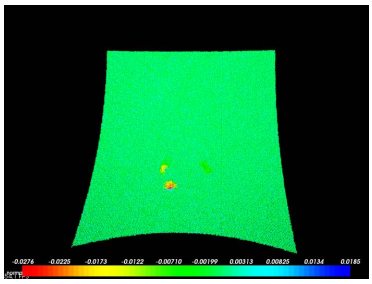
Σχήμα Α'.49: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10)



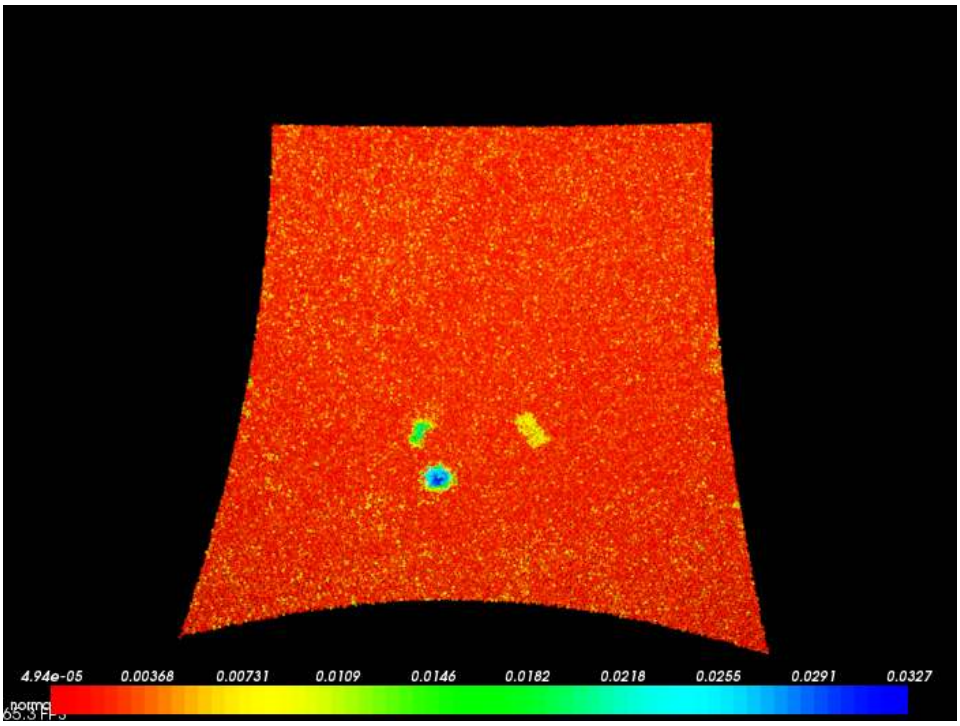
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

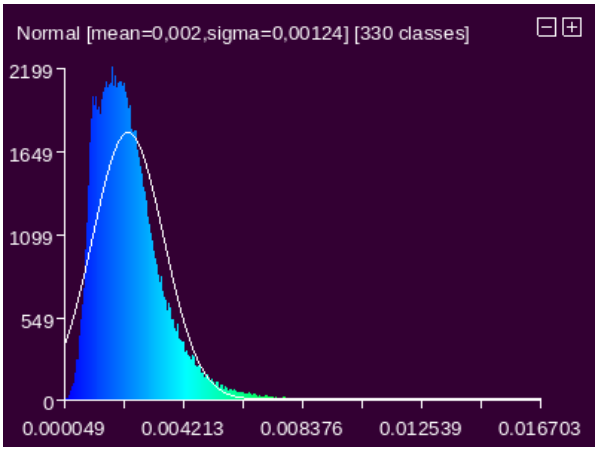


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

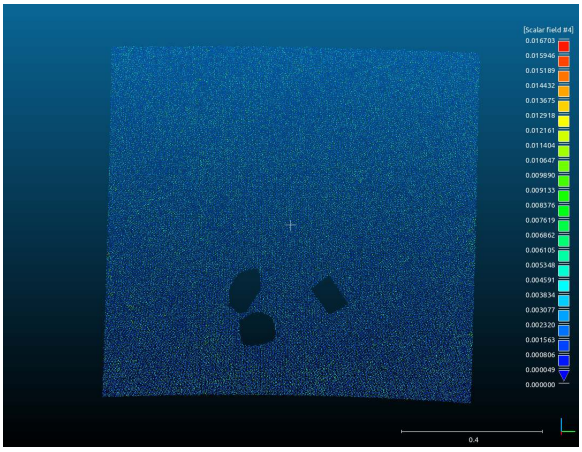


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.50: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 50 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

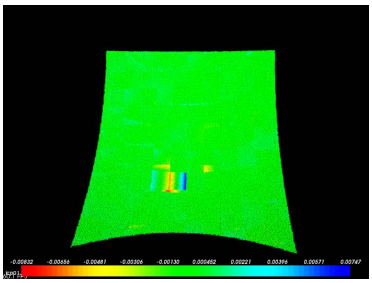


(α') Το ιστόγραμμα

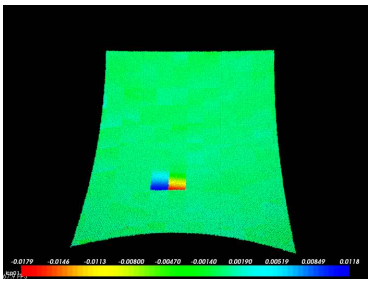


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

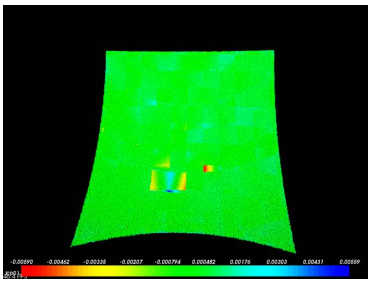
Σχήμα Α'.51: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 50)



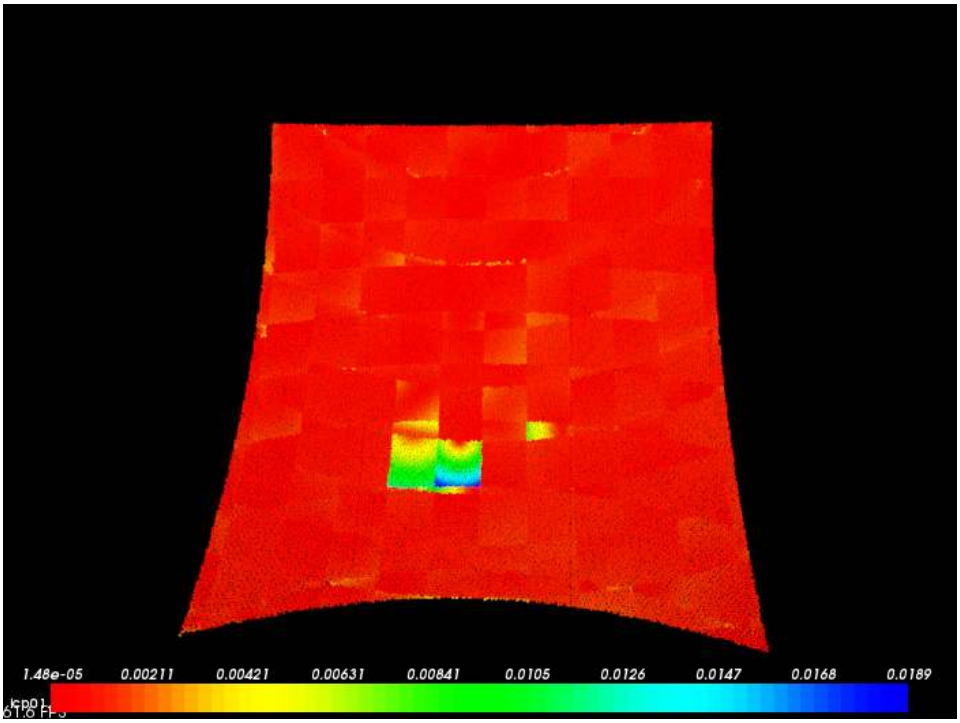
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

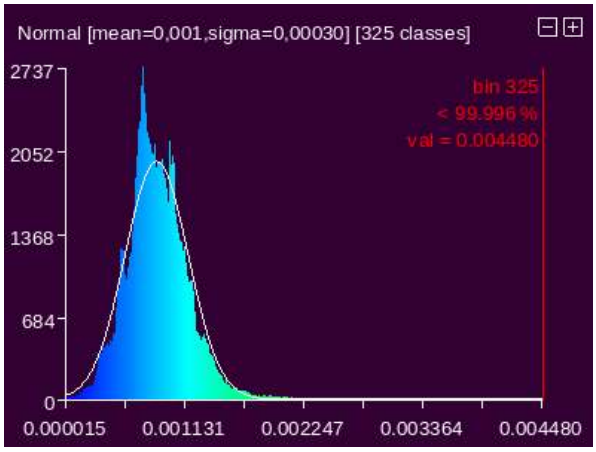


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

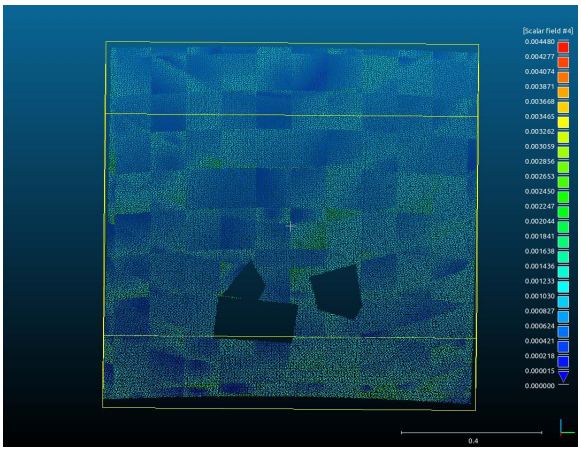


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.52: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.1

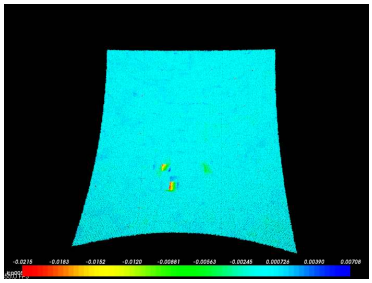


(α') Το ιστόγραμμα

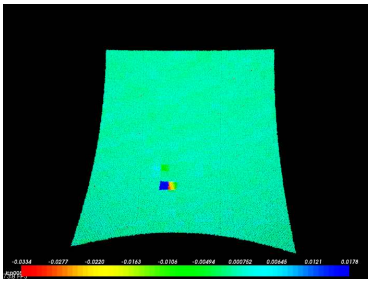


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

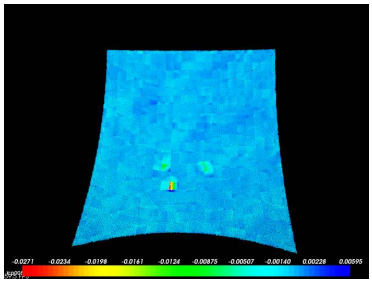
Σχήμα Α'.53: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.1



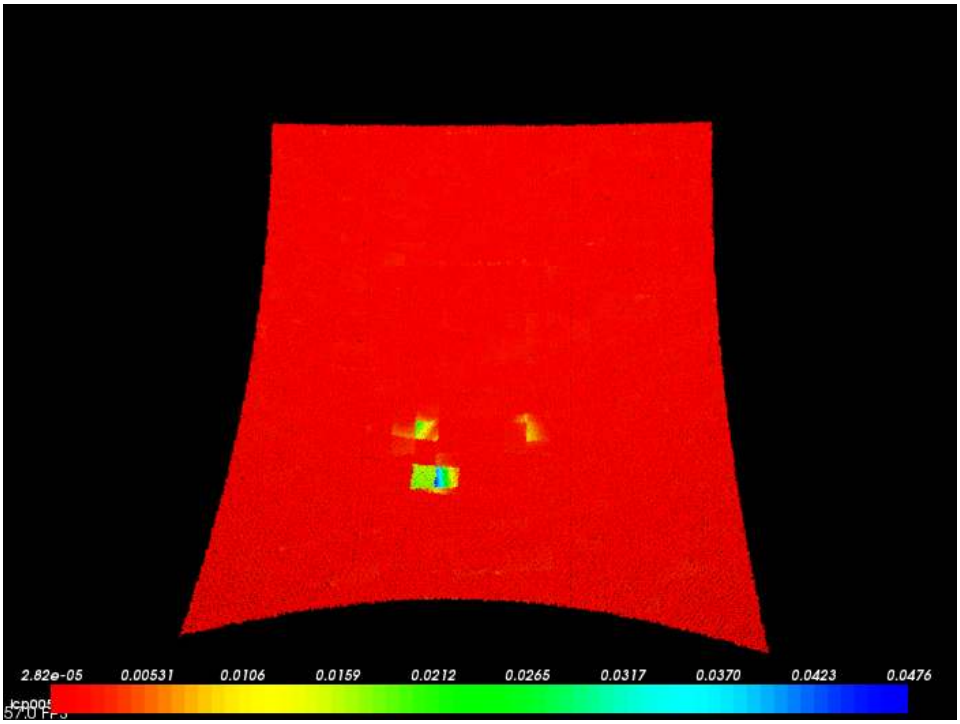
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

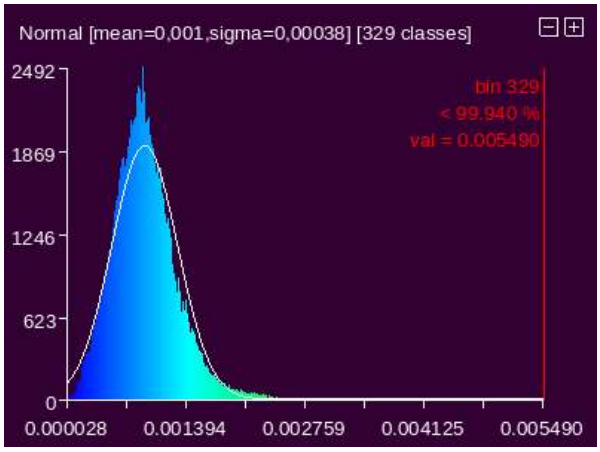


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

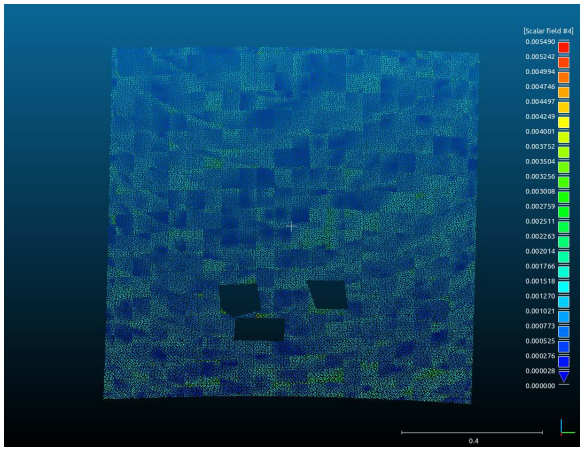


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.54: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.05

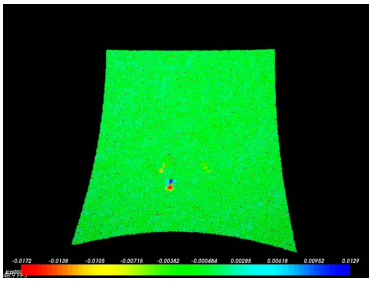


(α') Το ιστόγραμμα

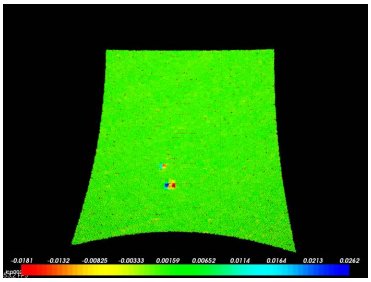


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

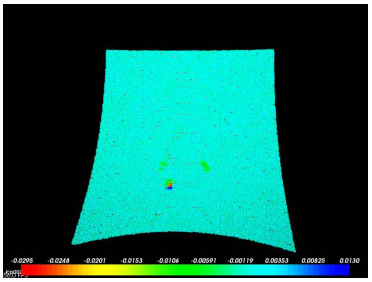
Σχήμα Α'.55: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.05



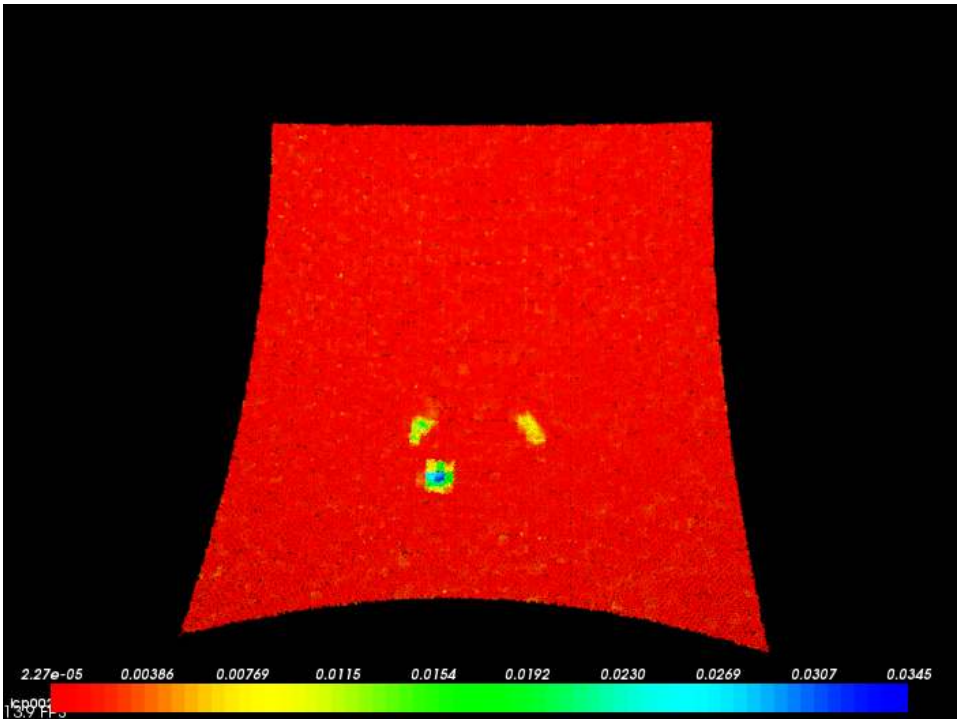
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

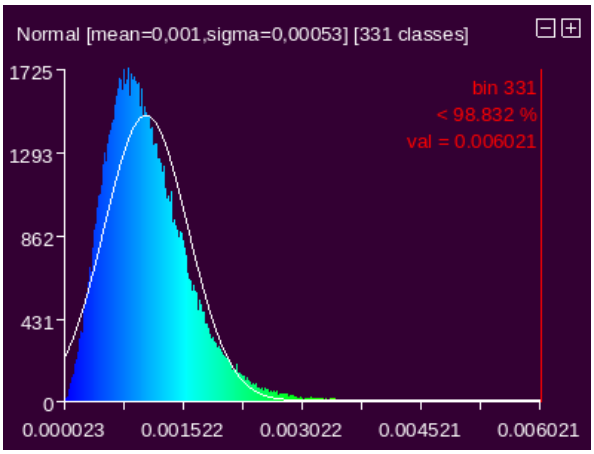


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

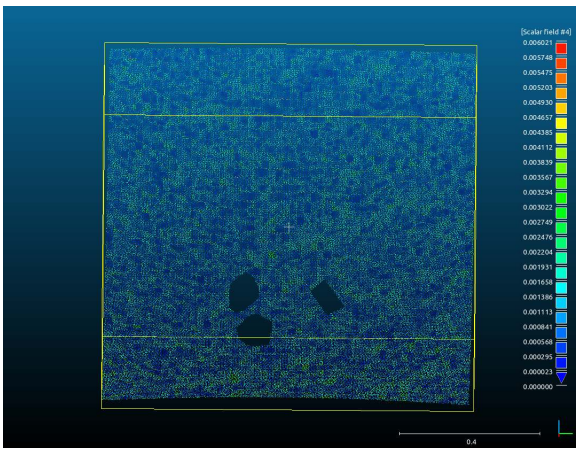


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.56: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.02

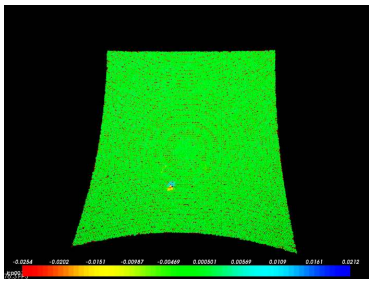


(α') Το ιστόγραμμα

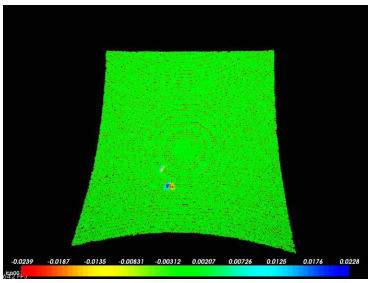


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

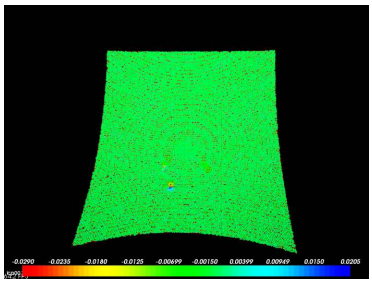
Σχήμα Α'.57: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.02



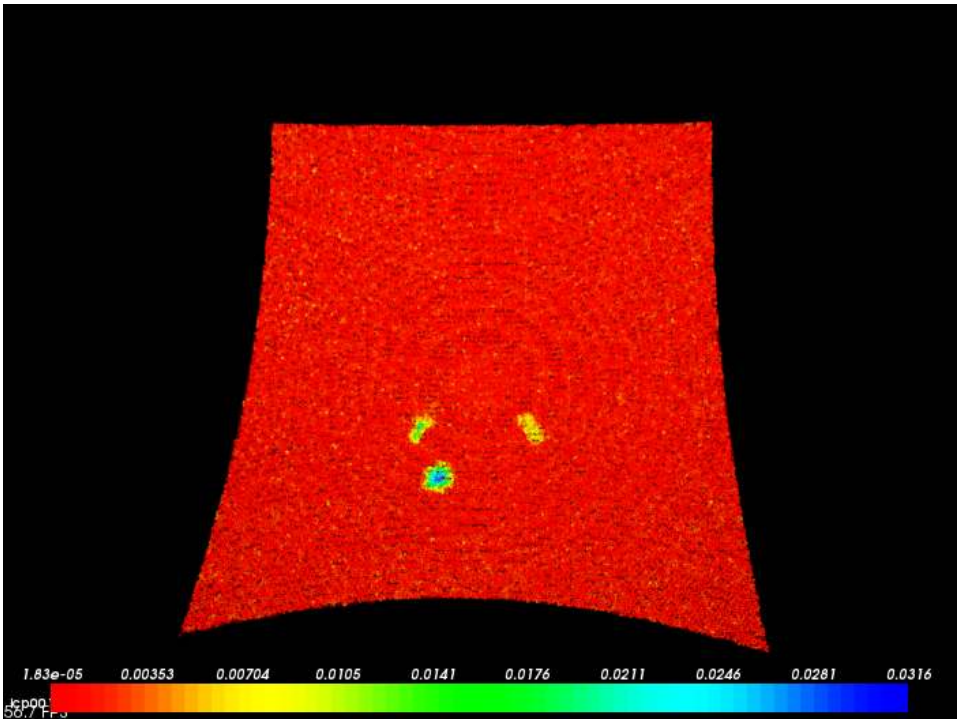
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

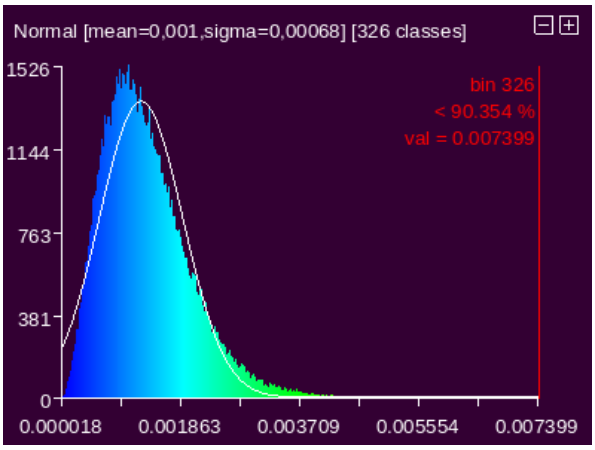


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

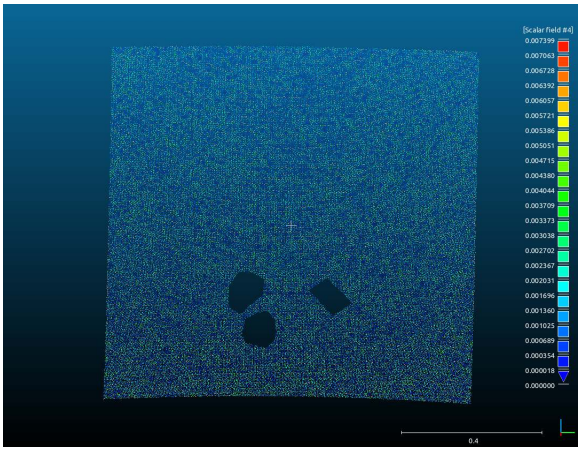


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.58: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.01



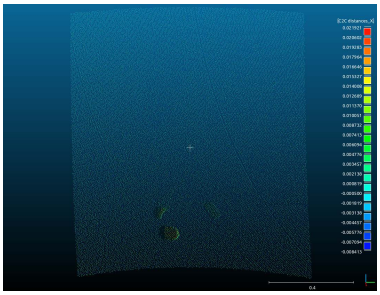
(α') Το ιστόγραμμα



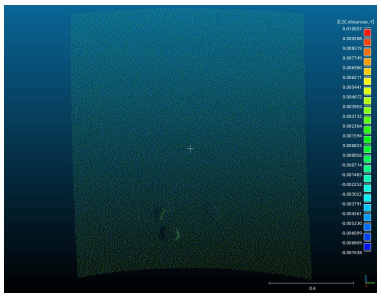
(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

Σχήμα Α'.59: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.01

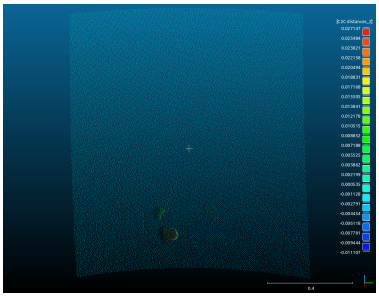
Α'.4 3ο πείραμα



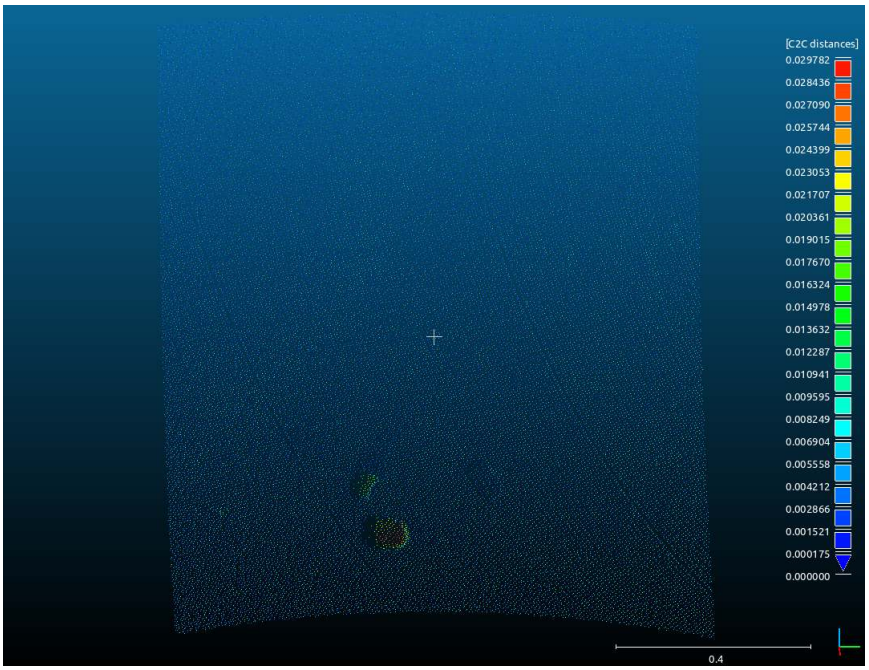
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

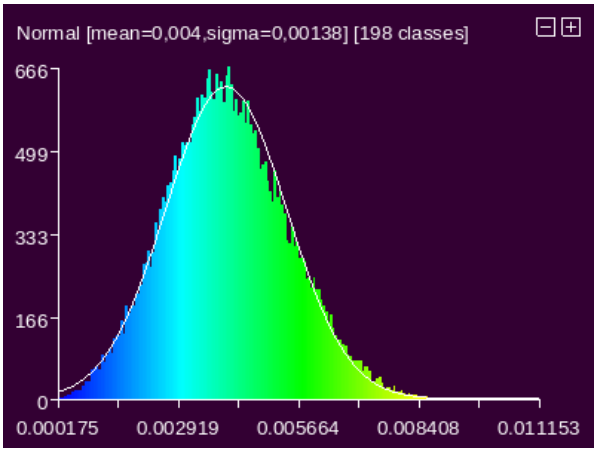


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

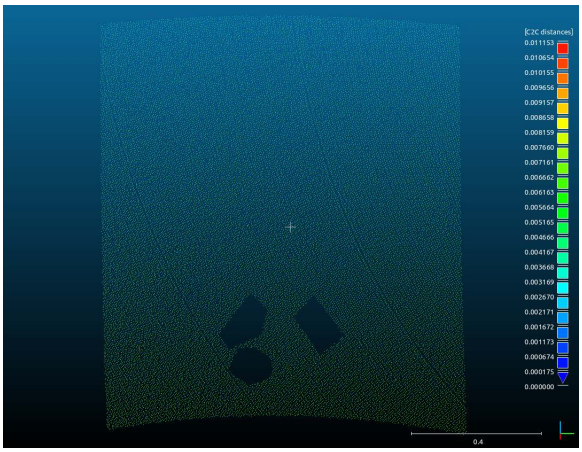


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.60: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompre

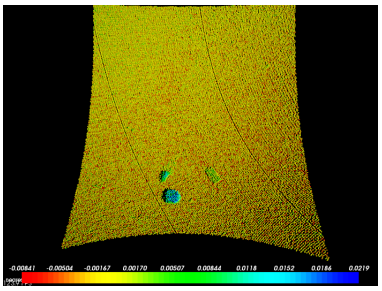


(α') Το ιστόγραμμα

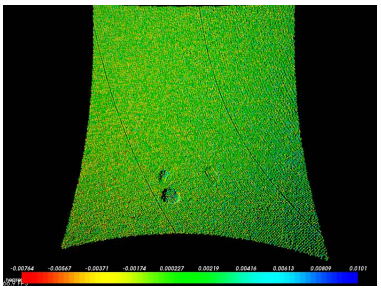


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

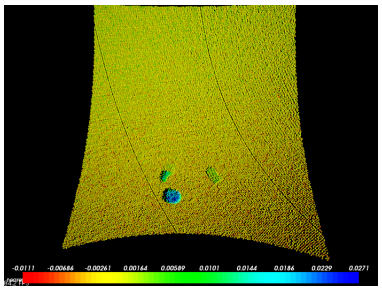
Σχήμα Α'.61: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompare



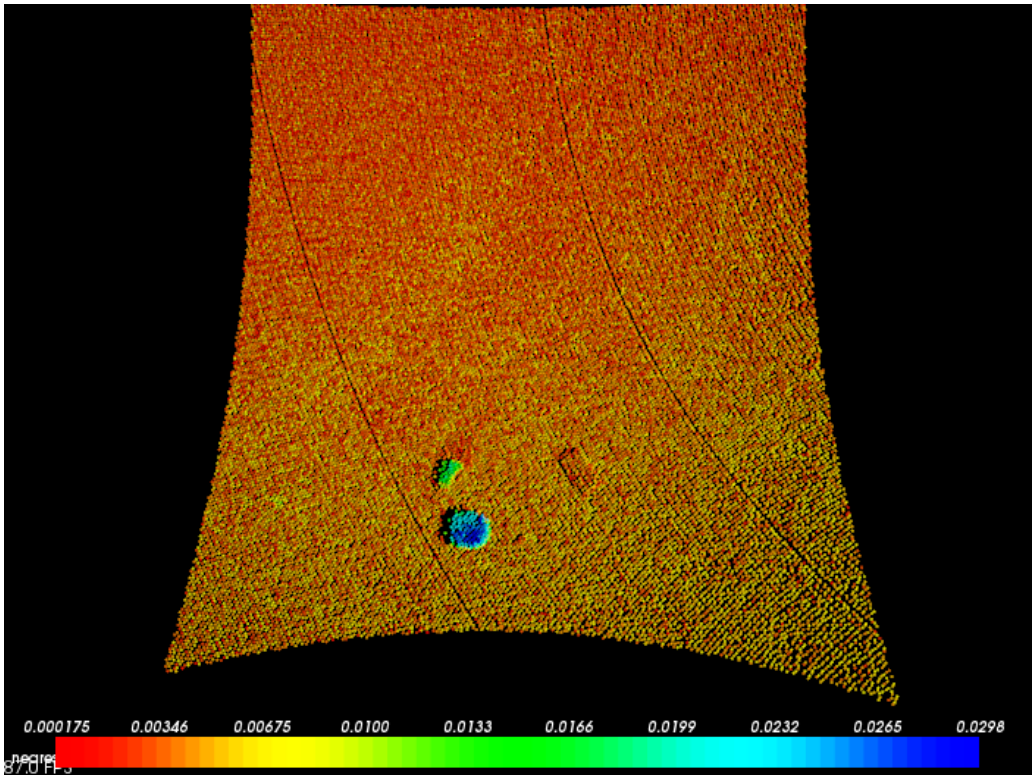
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

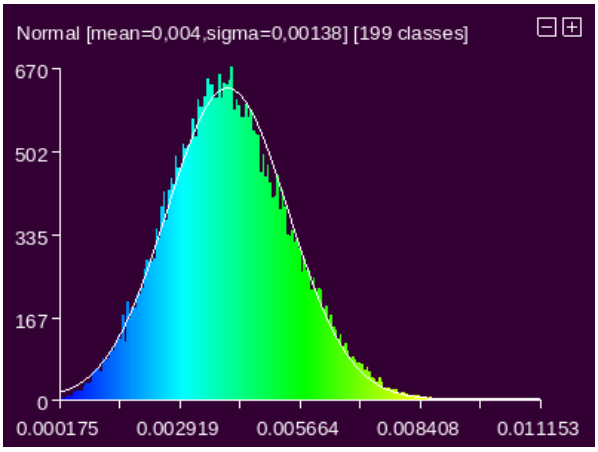


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

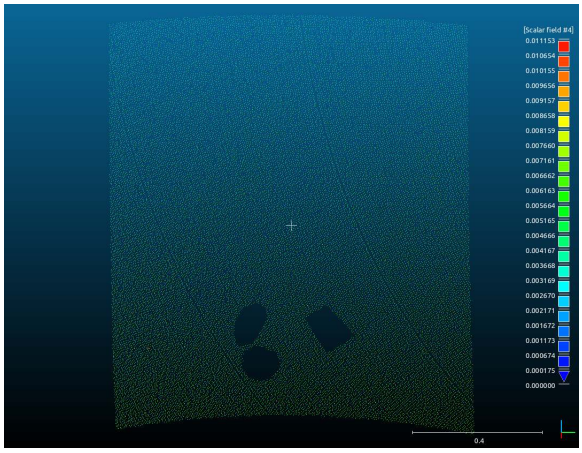


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.62: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL

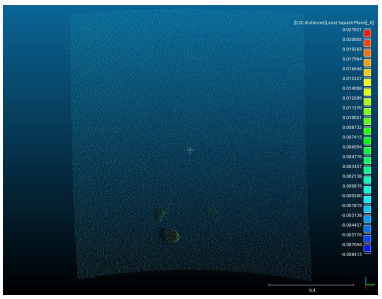


(α') Το ιστόγραμμα

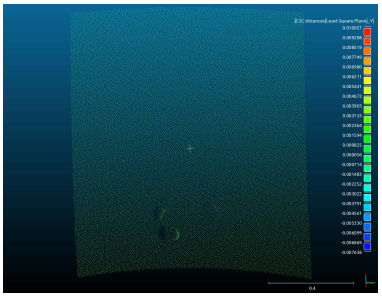


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

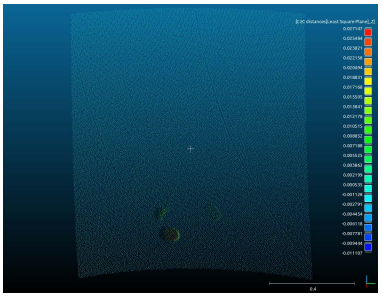
Σχήμα Α'.63: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από την PCL



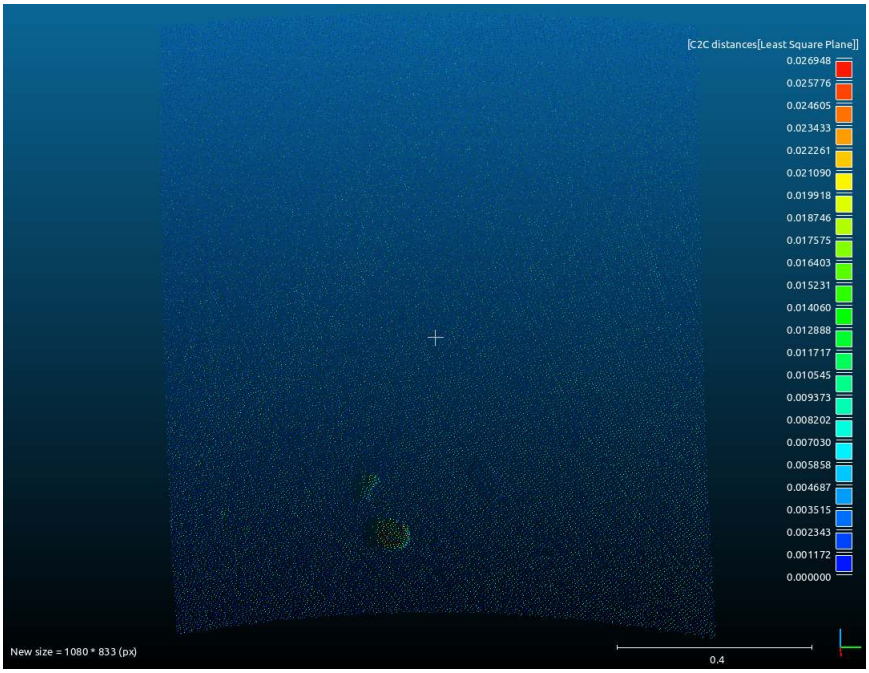
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

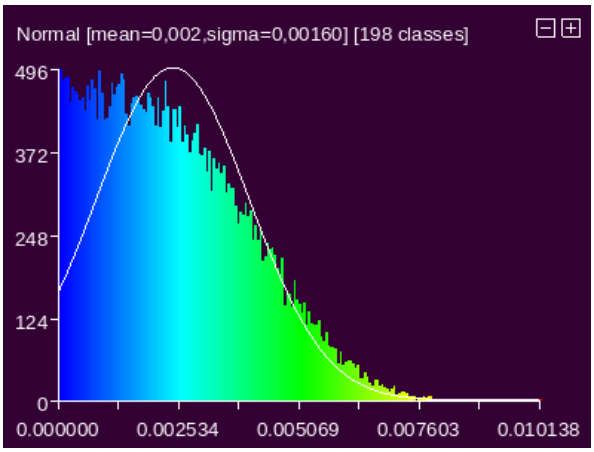


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

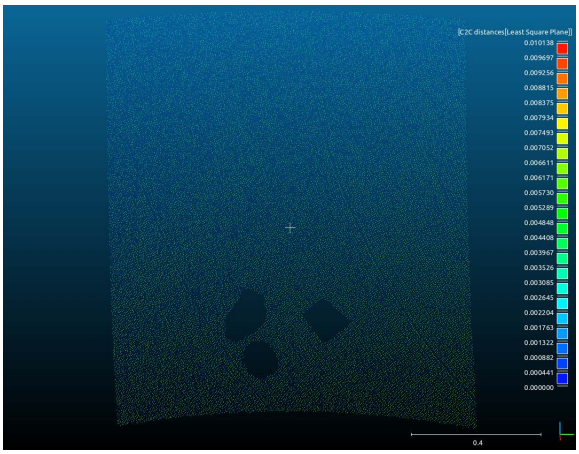


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.64: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου)

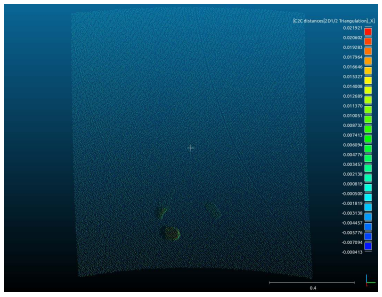


(α') Το ιστόγραμμα

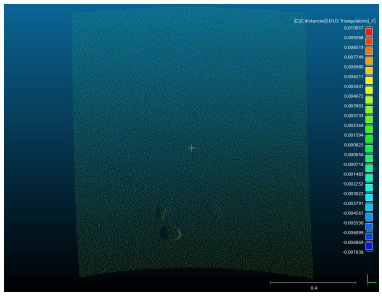


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

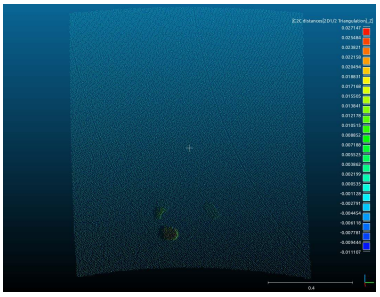
Σχήμα Α'.65: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου)



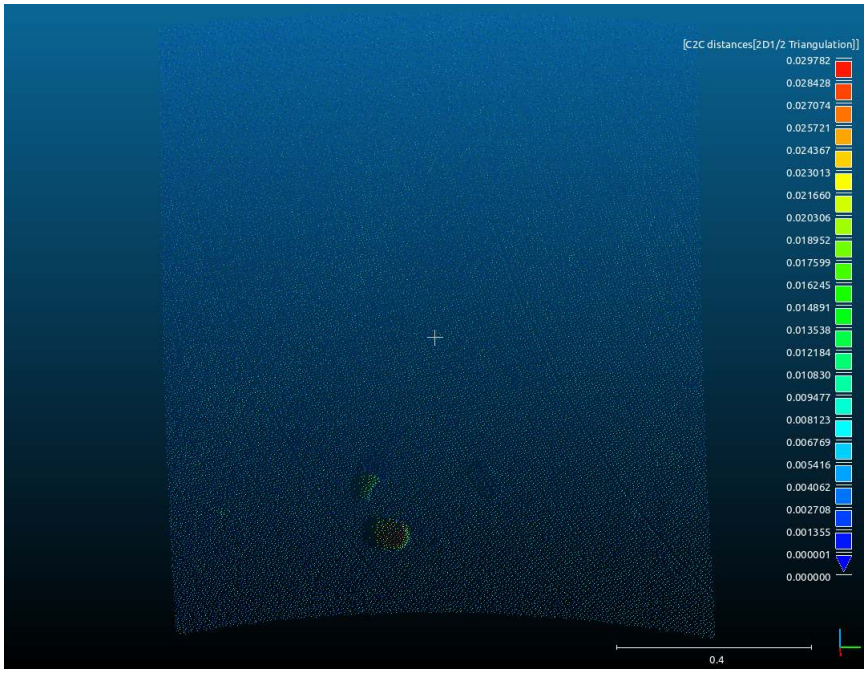
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

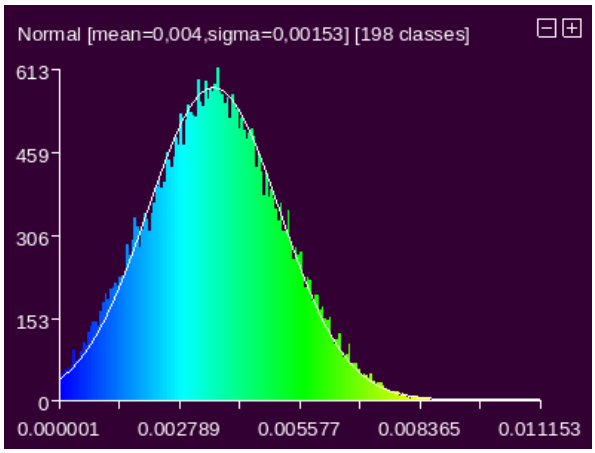


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

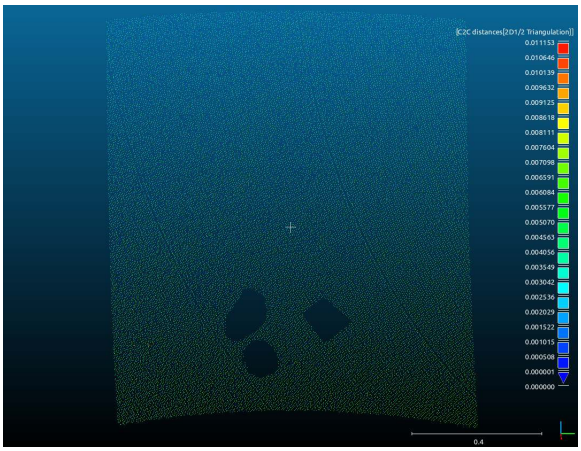


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.66: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation)

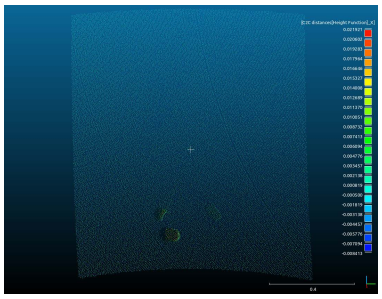


(α') Το ιστόγραμμα

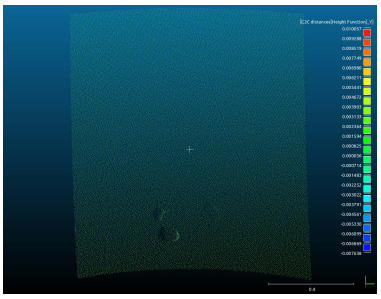


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

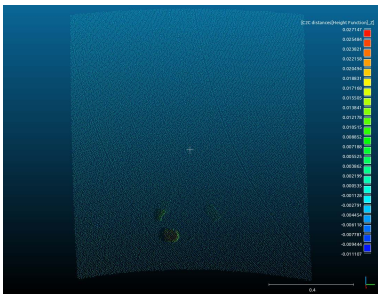
Σχήμα Α'.67: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation)



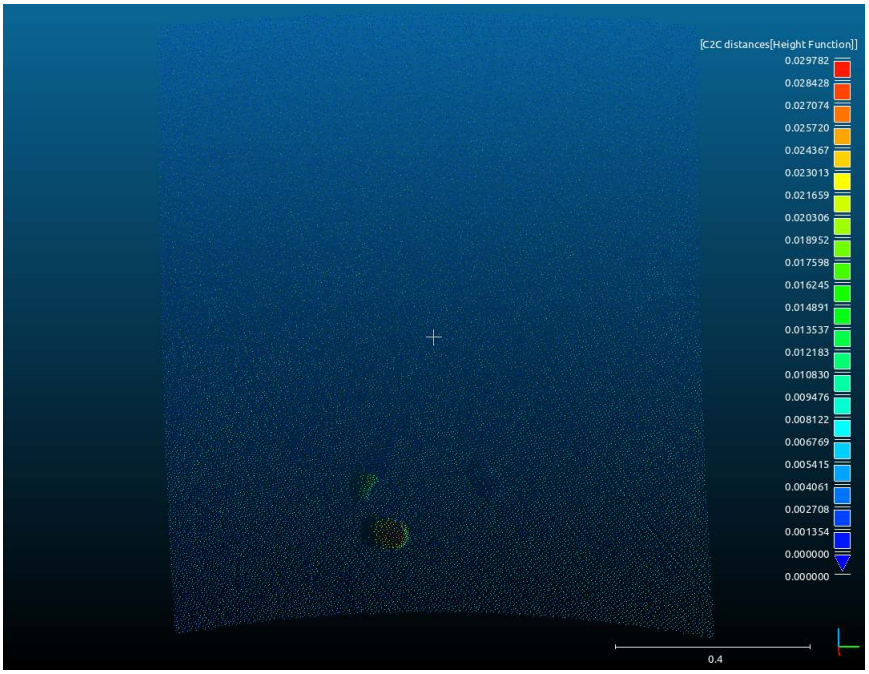
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

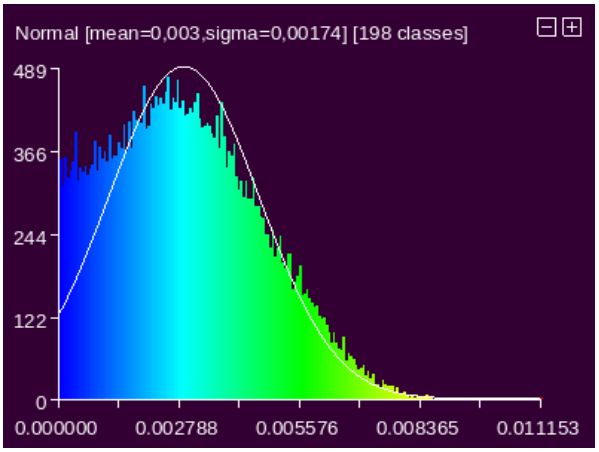


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

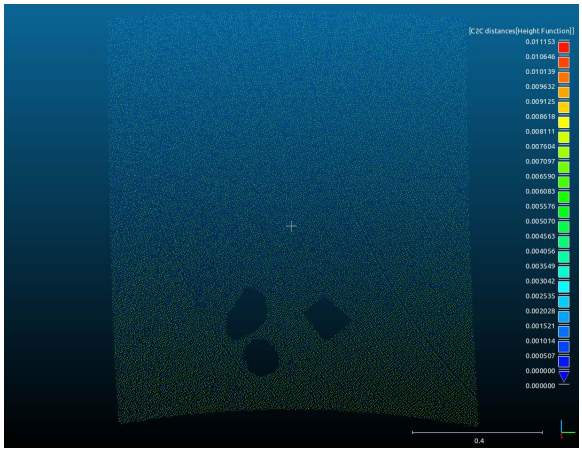


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.68: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function)

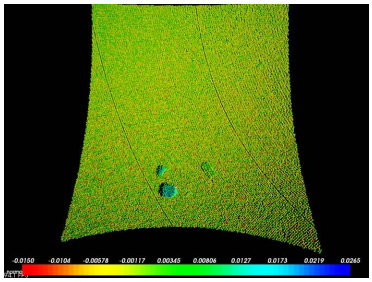


(α') Το ιστόγραμμα

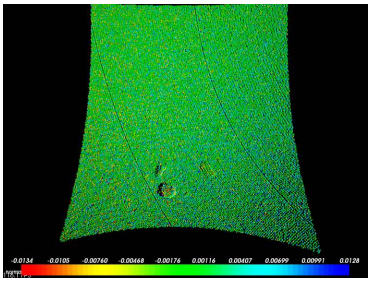


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

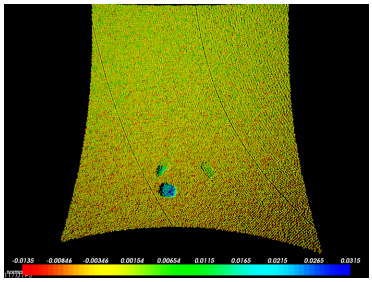
Σχήμα Α'.69: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function)



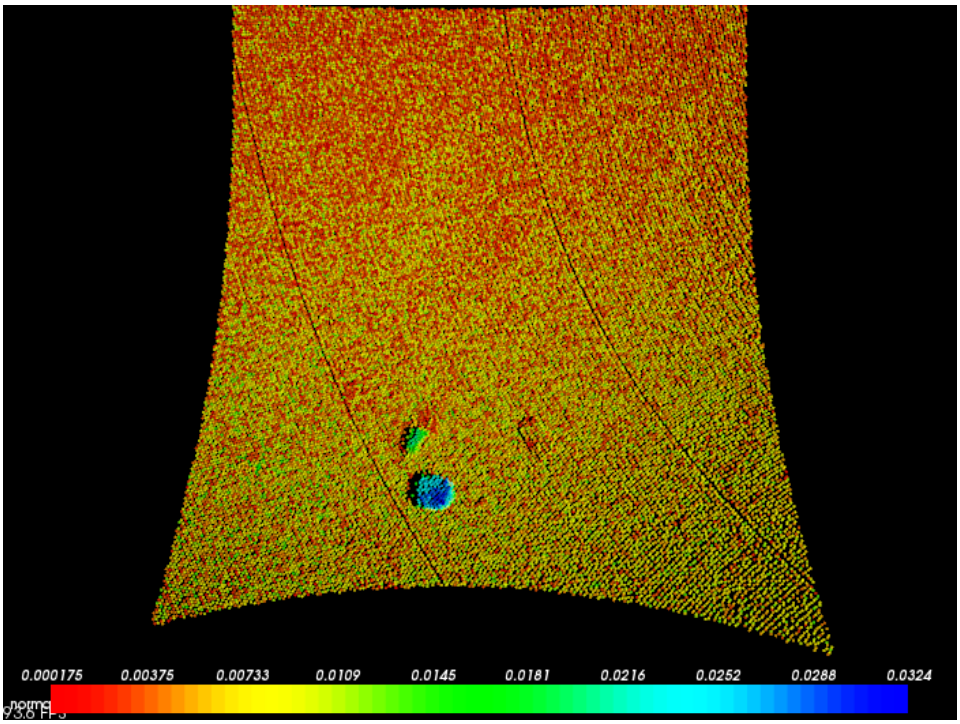
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

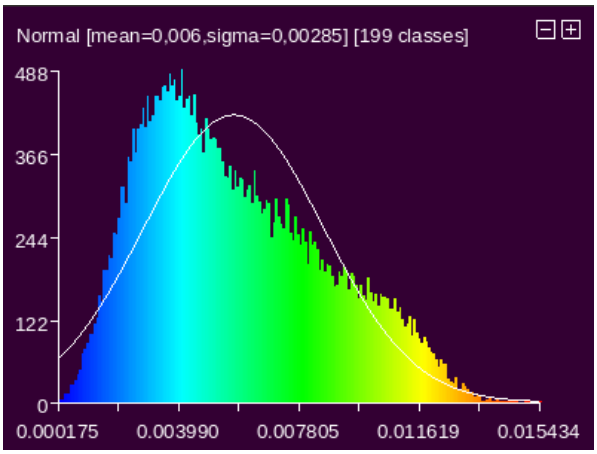


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

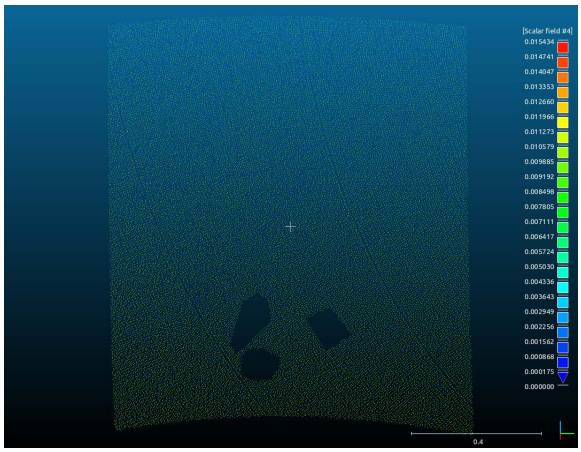


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.70: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

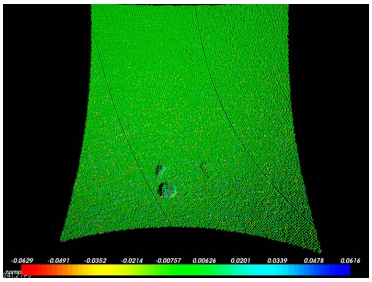


(α') Το ιστόγραμμα

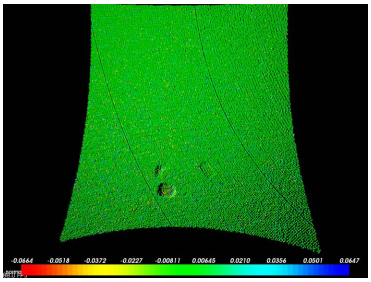


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

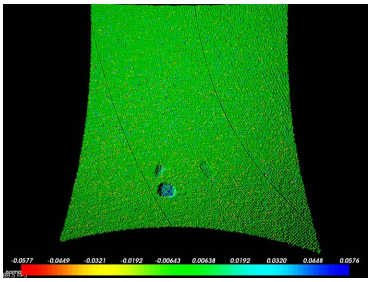
Σχήμα Α'.71: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 10)



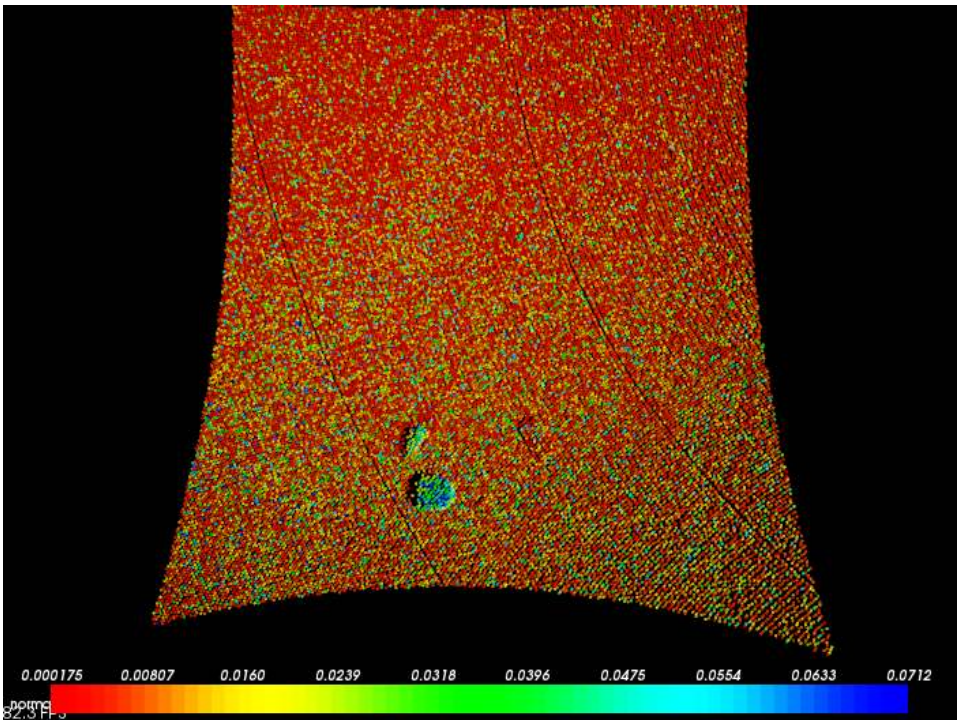
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

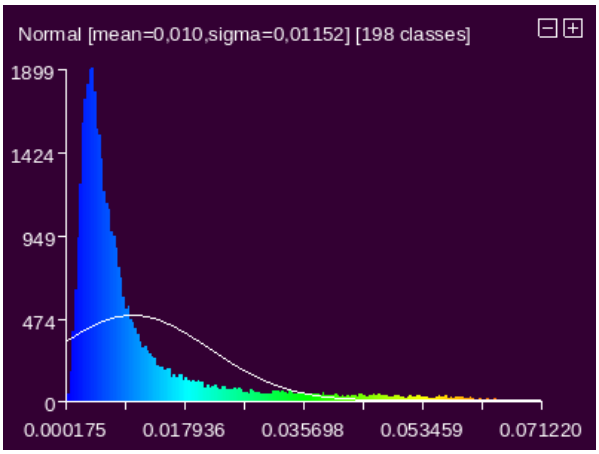


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

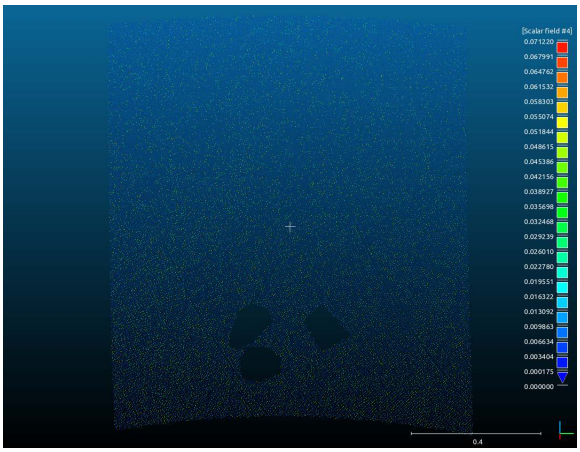


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.72: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 300 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

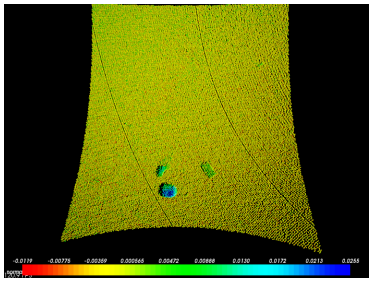


(α') Το ιστόγραμμα

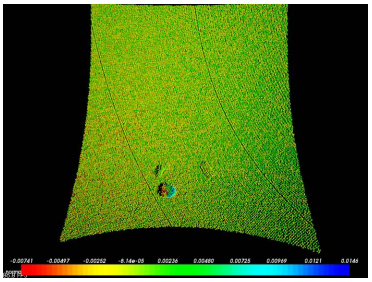


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

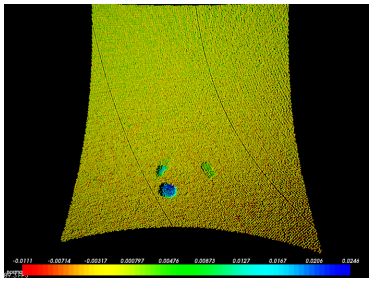
Σχήμα Α'.73: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 300)



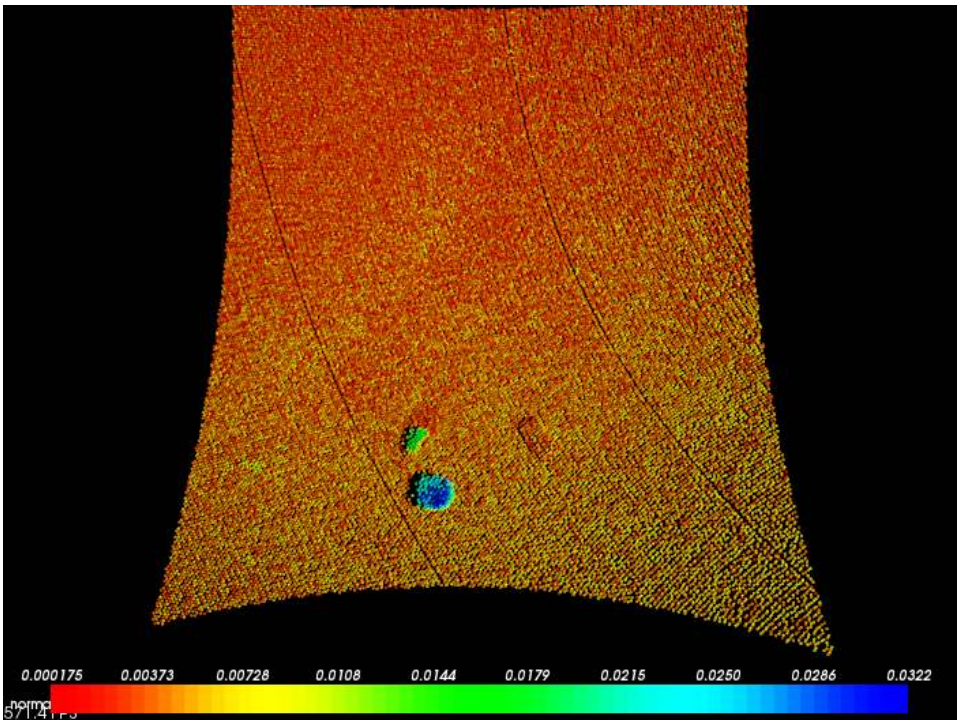
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

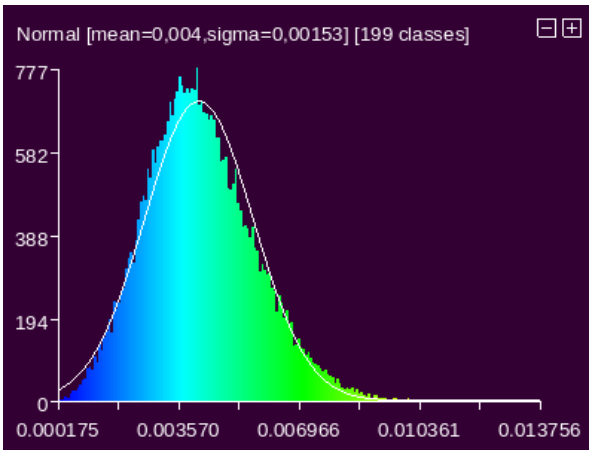


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

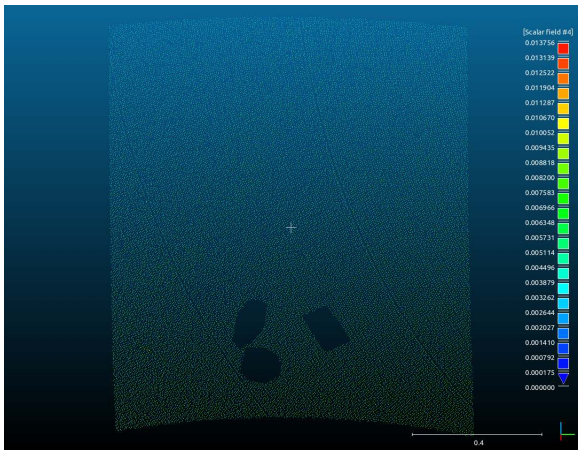


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.74: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

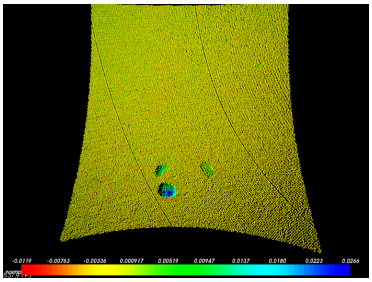


(α') Το ιστόγραμμα

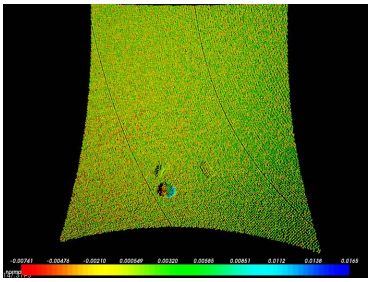


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

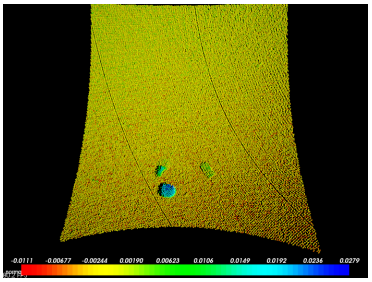
Σχήμα Α'.75: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10)



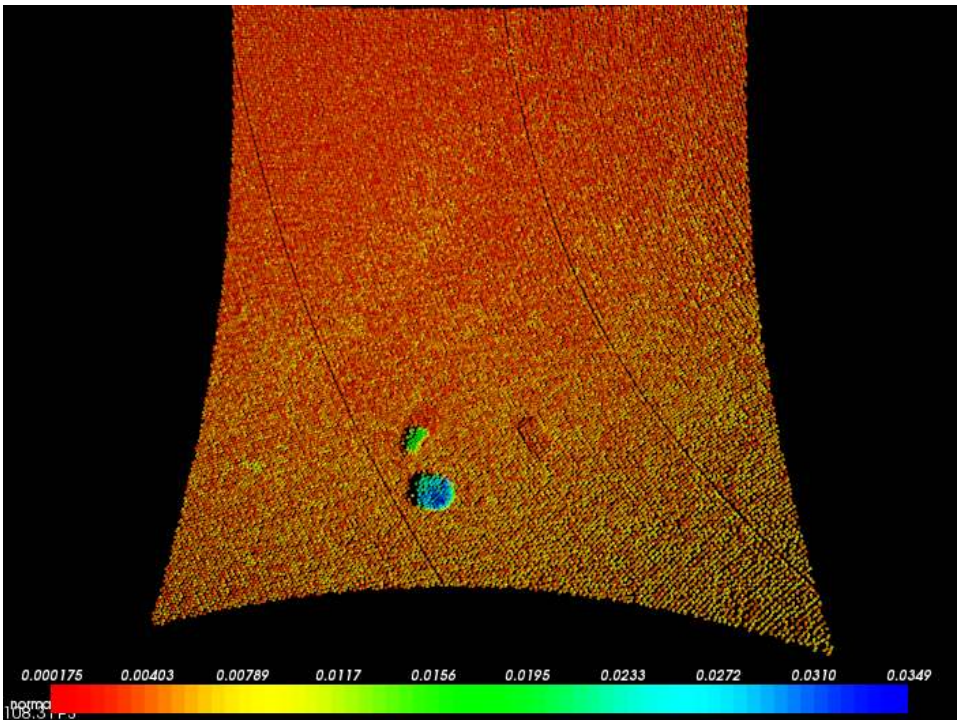
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

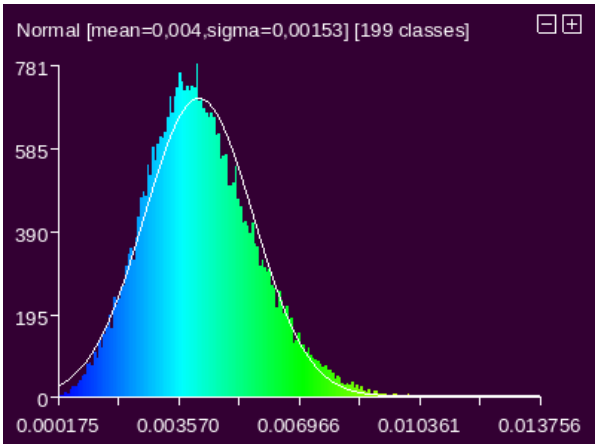


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

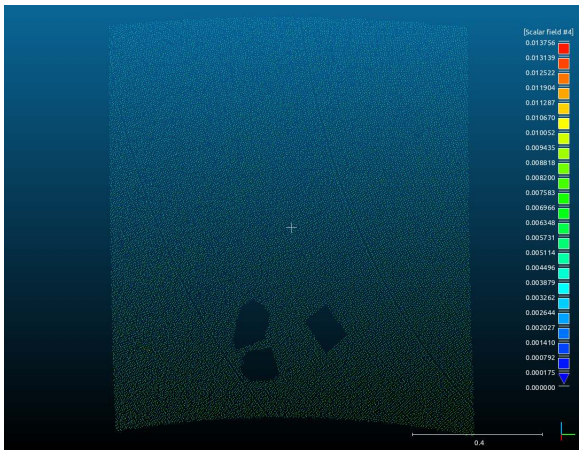


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.76: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 50 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

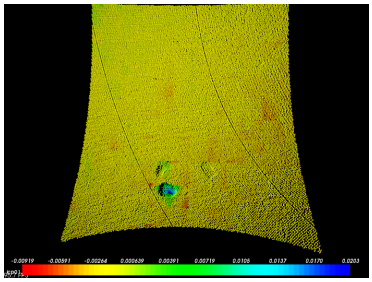


(α') Το ιστόγραμμα

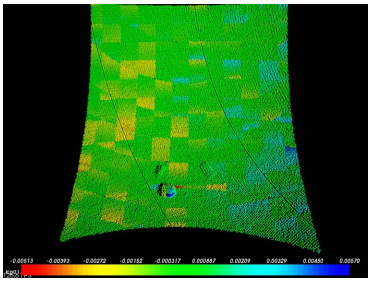


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

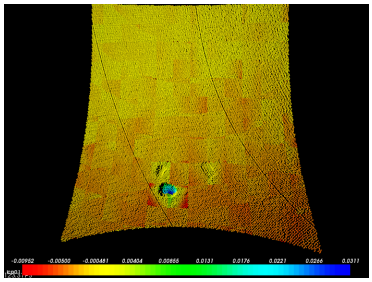
Σχήμα Α'.77: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 50)



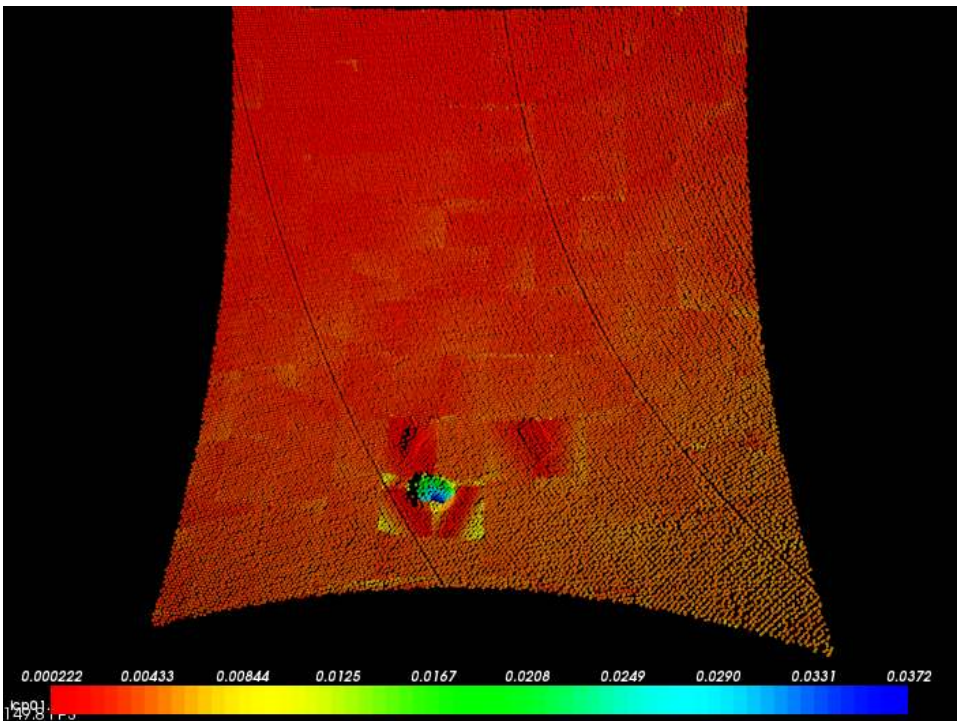
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

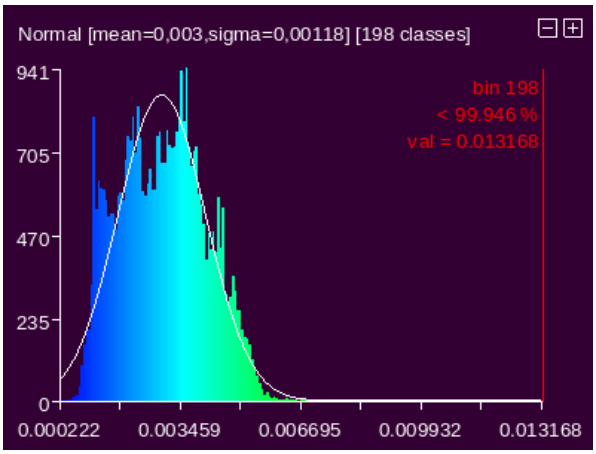


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

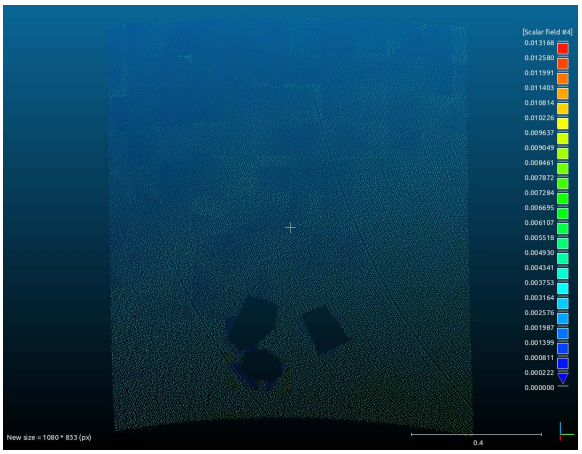


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.78: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.1

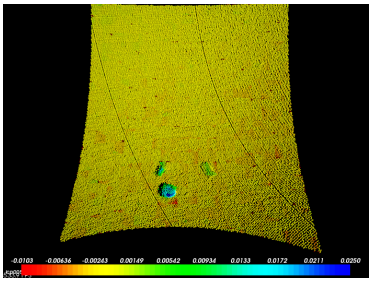


(α') Το ιστόγραμμα

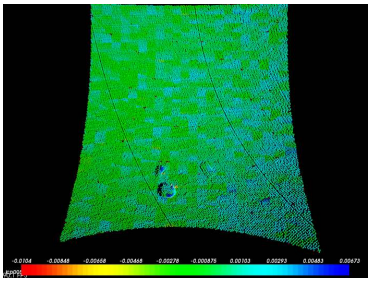


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

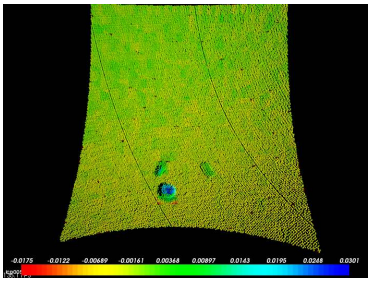
Σχήμα Α'.79: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.1



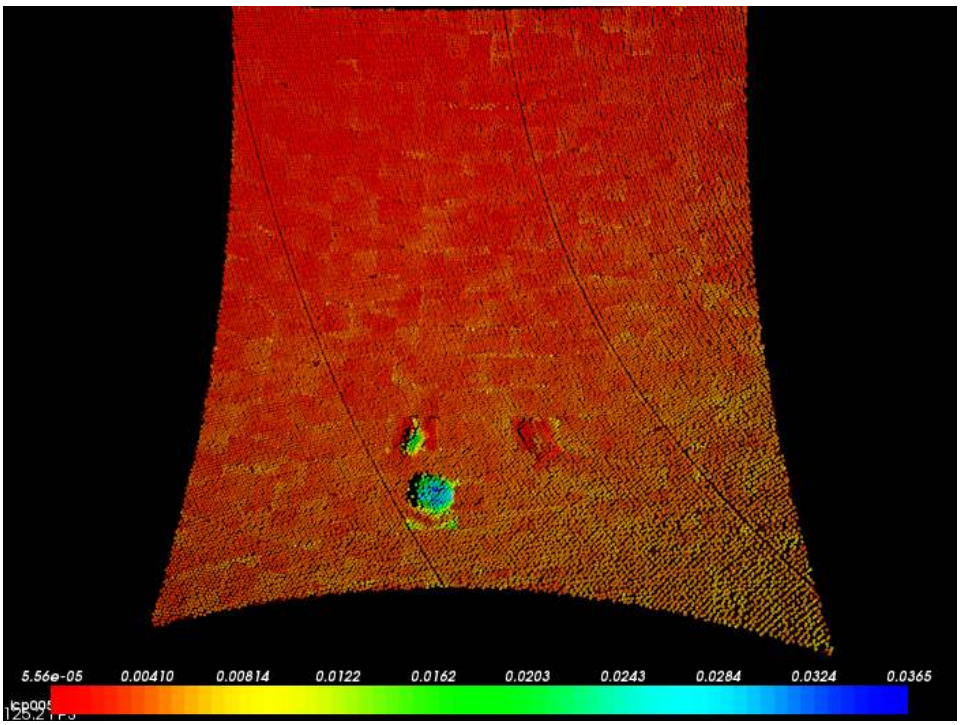
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

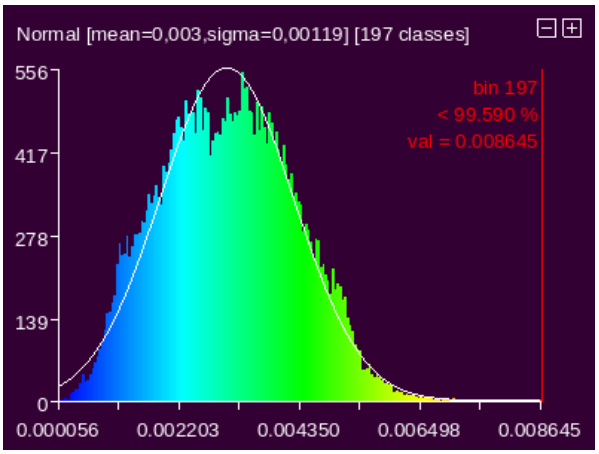


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

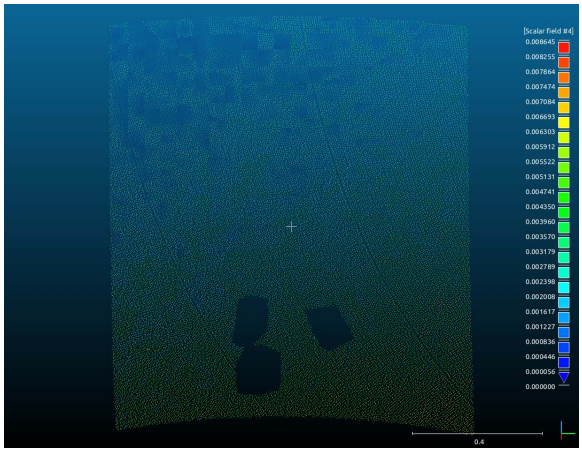


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.80: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.05

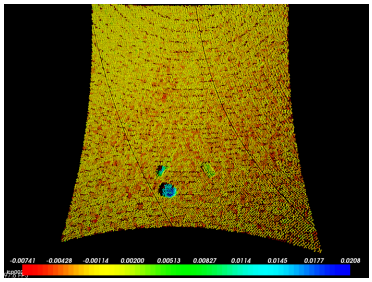


(α') Το ιστόγραμμα

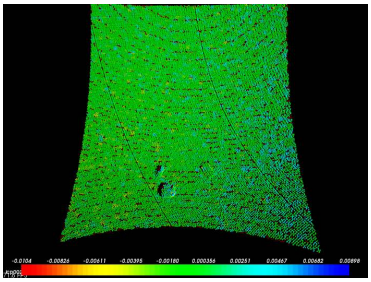


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

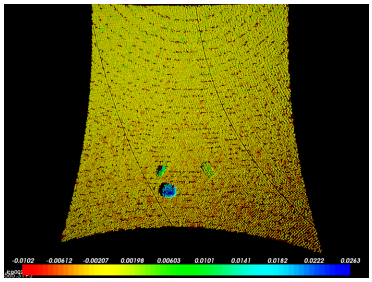
Σχήμα Α'.81: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.05



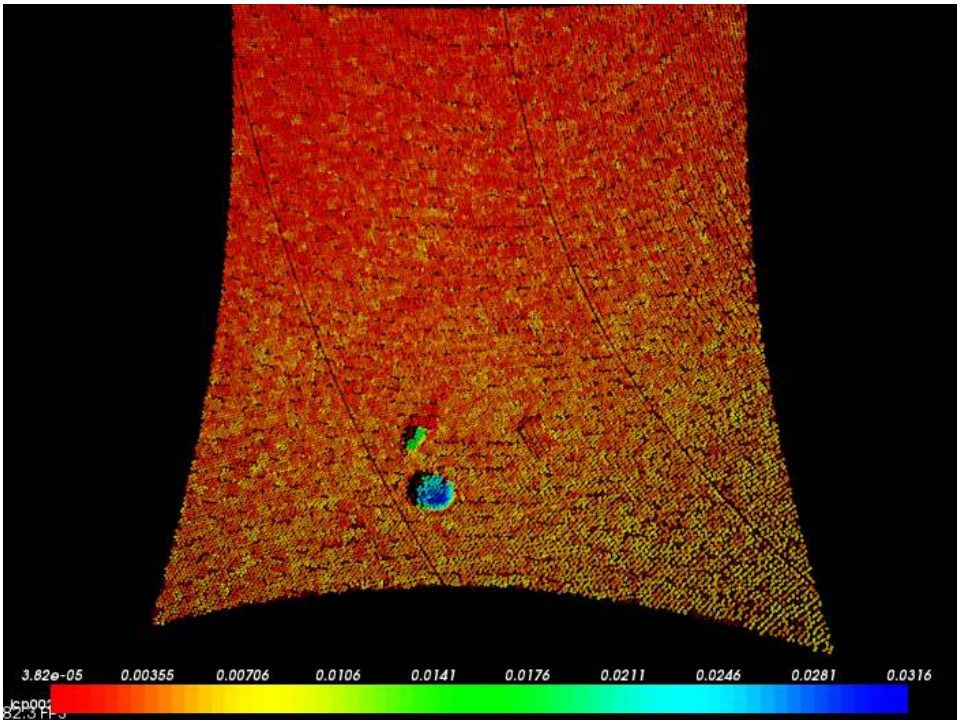
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

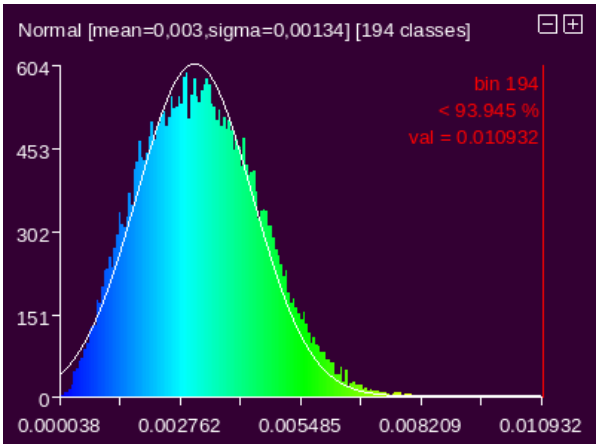


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

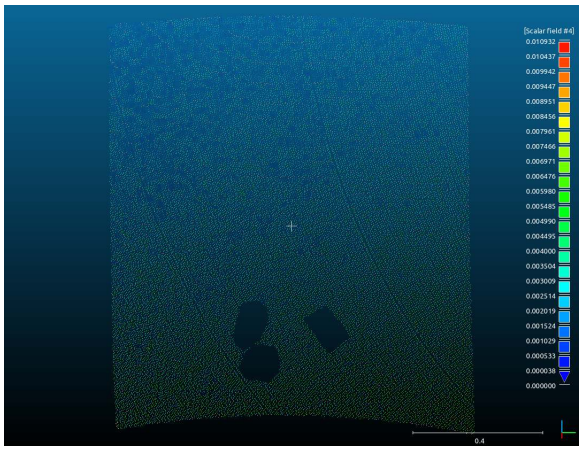


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.82: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.02

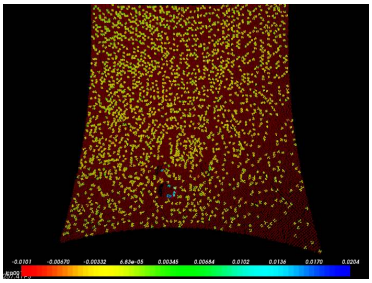


(α') Το ιστόγραμμα

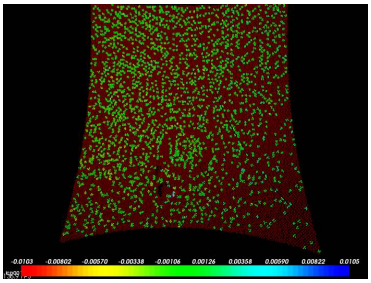


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

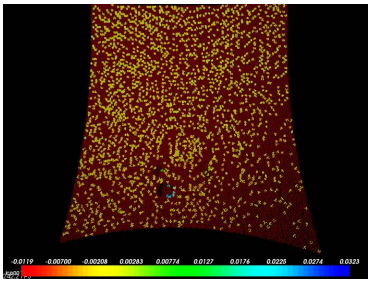
Σχήμα Α'.83: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.02



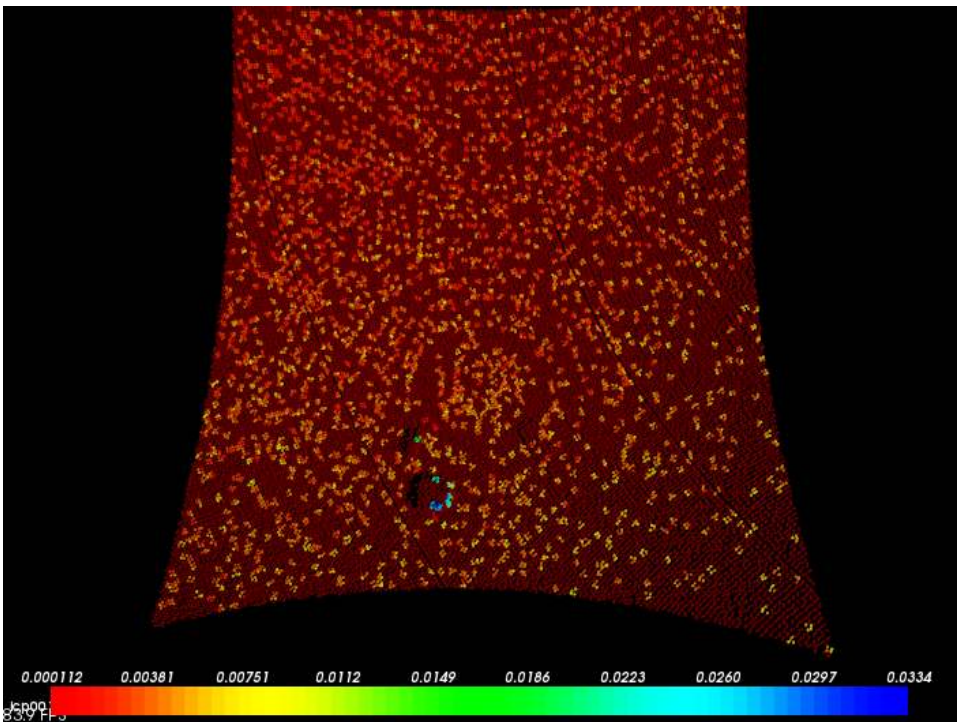
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

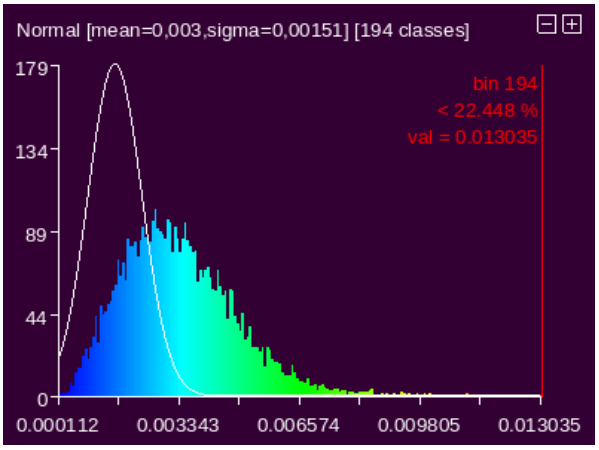


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

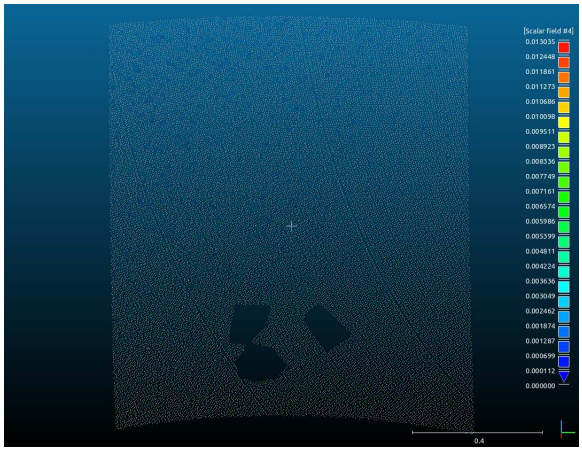


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.84: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.01



(α') Το ιστόγραμμα



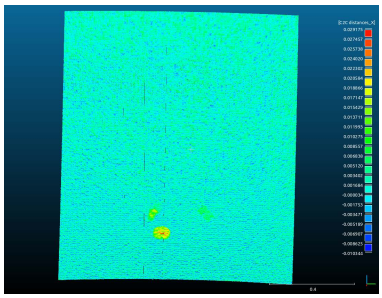
(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

Σχήμα Α'.85: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.01

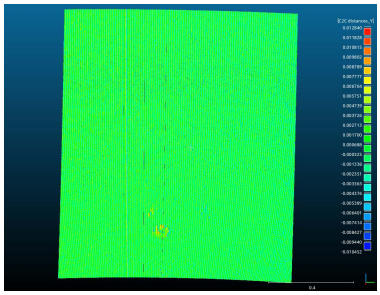
Voxel size (m)	Μ.Ο. σημείων	Αριθμός Voxel	Μη επαρκή	%
0.1	152.833	262	15	99.946
0.05	42.5818	937	88	99.590
0.02	7.55261	5321	1328	93.945
0.01	2.18404	18403	16201	22.448

Πίνακας Α'.1: Στατιστικά για τον αλγόριθμο του ICP από το 3ο πείραμα

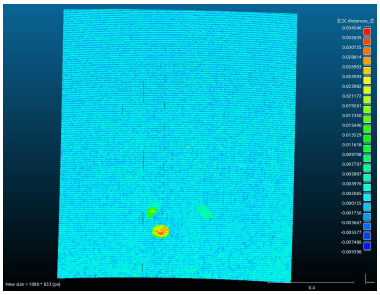
Α'.5 4ο πείραμα



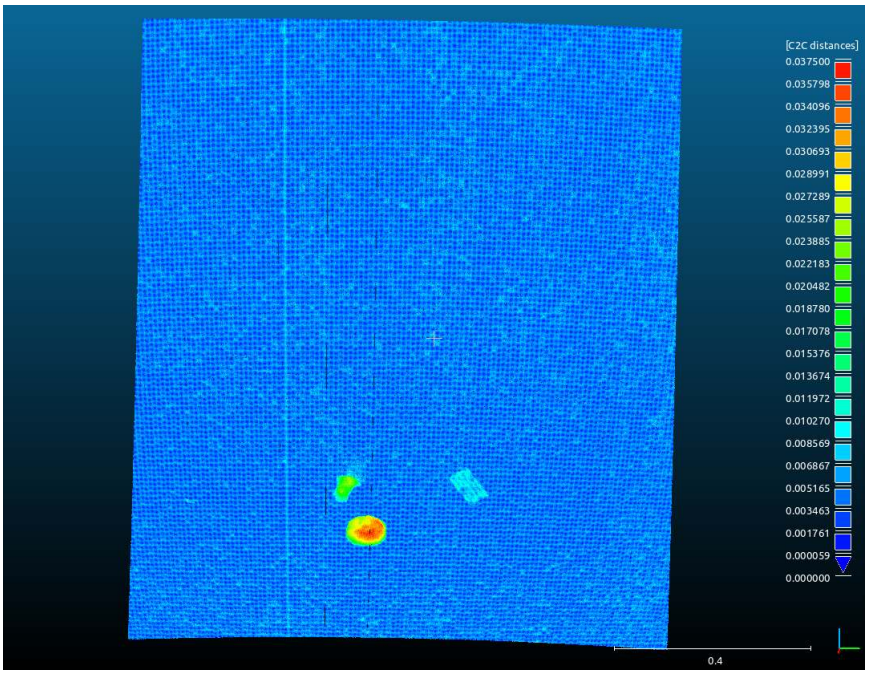
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

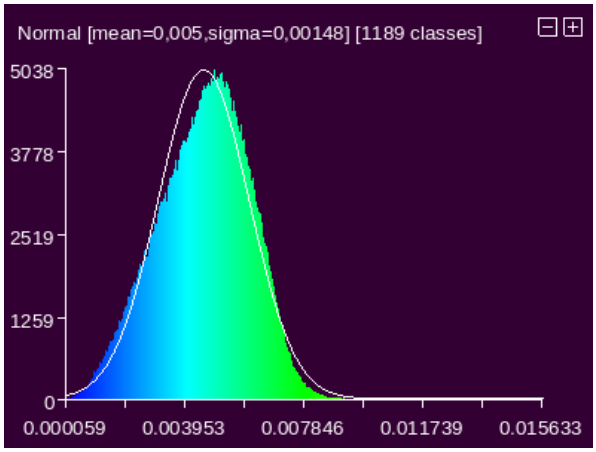


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

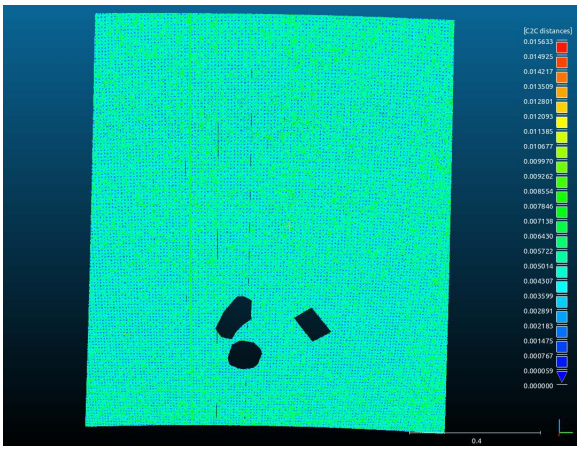


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.86: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompre

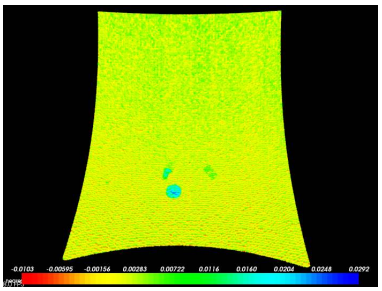


(α') Το ιστόγραμμα

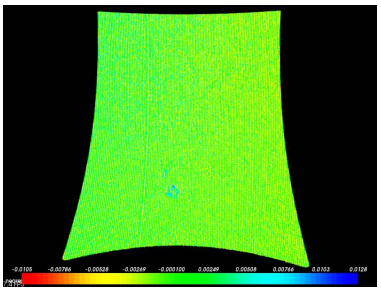


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

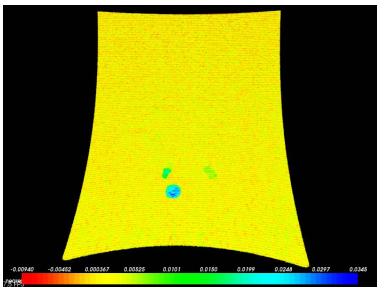
Σχήμα Α'.87: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από το CloudCompare



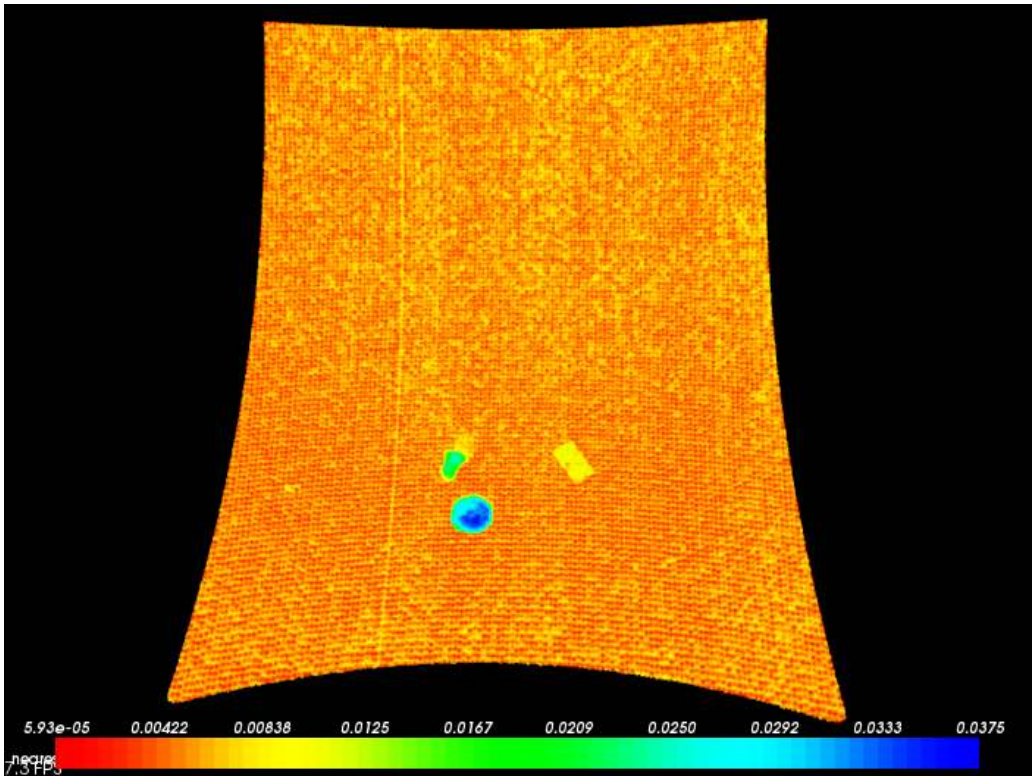
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

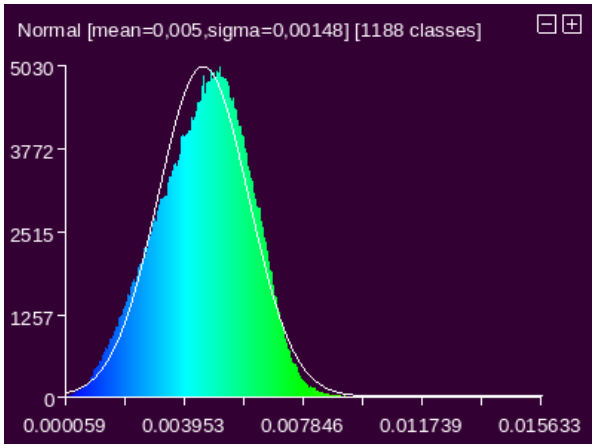


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

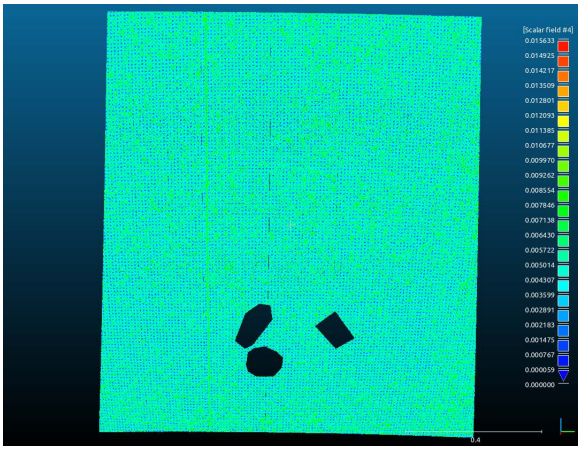


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.88: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου γείτονα από την PCL

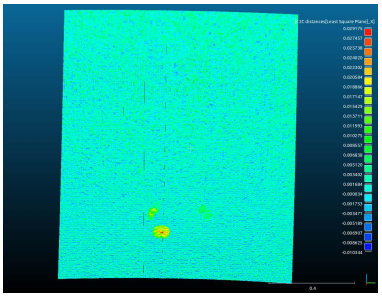


(α') Το ιστόγραμμα

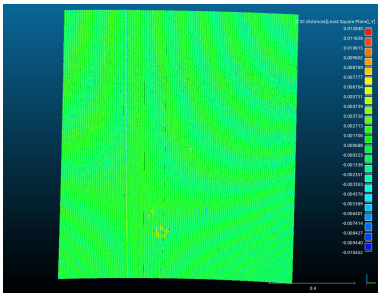


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

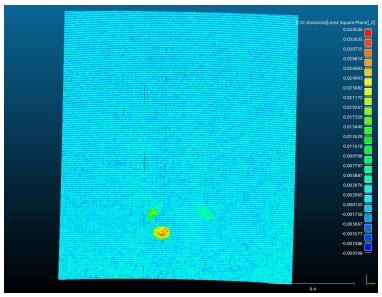
Σχήμα Α'.89: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του εγγύτερου γείτονα από την PCL



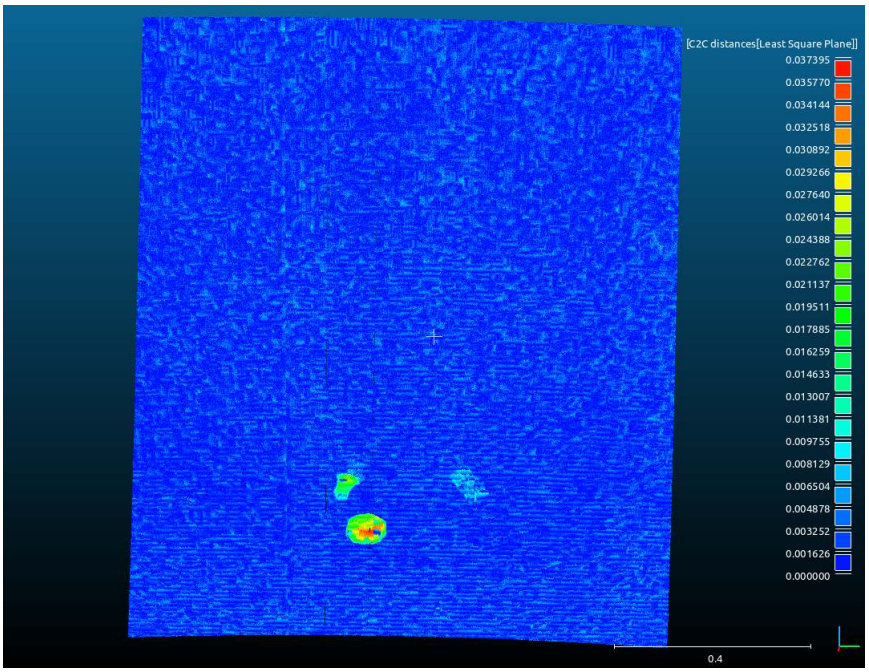
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

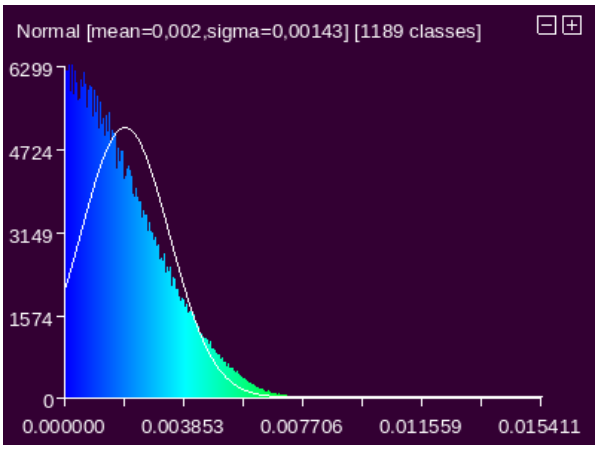


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

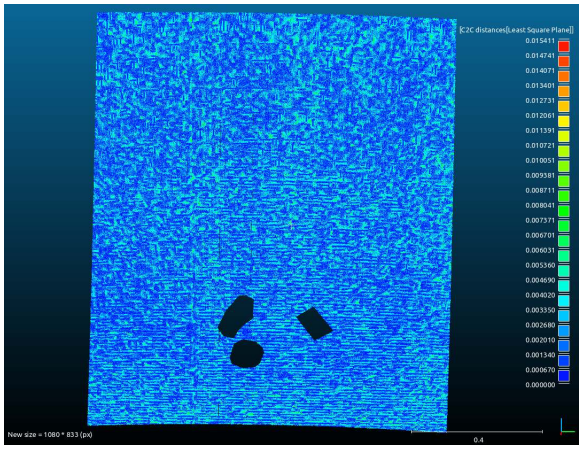


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.90: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου)

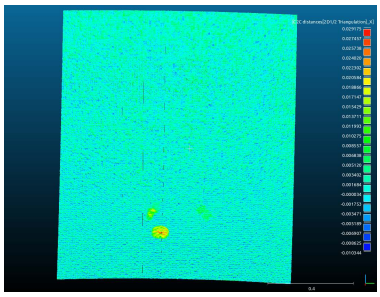


(α') Το ιστόγραμμα

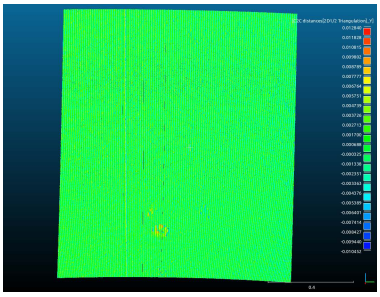


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

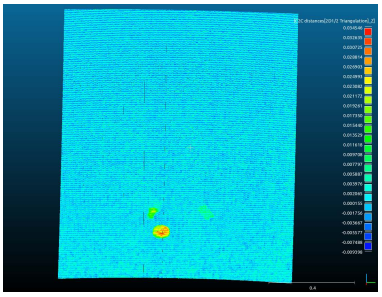
Σχήμα Α'.91: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (προσαρμογή επιπέδου)



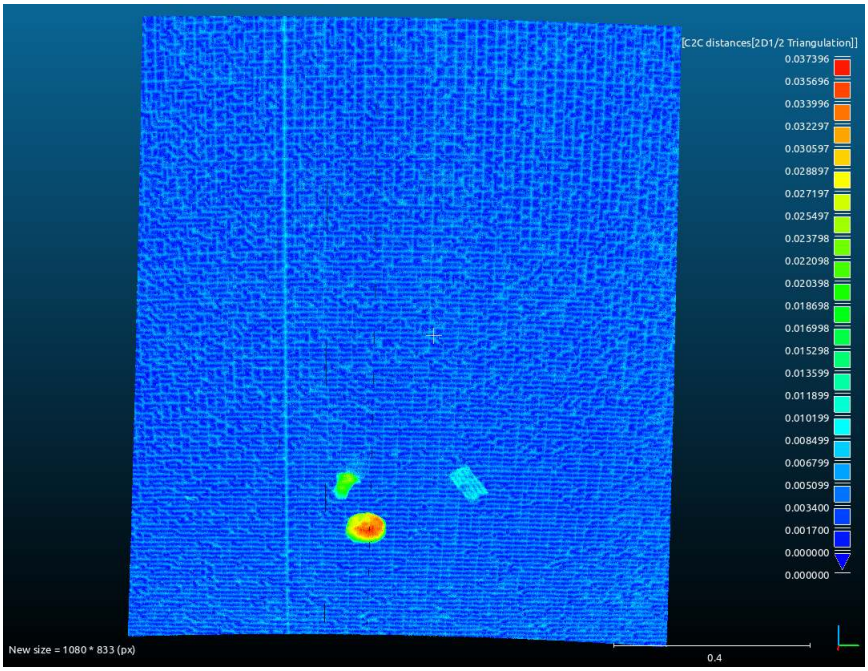
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

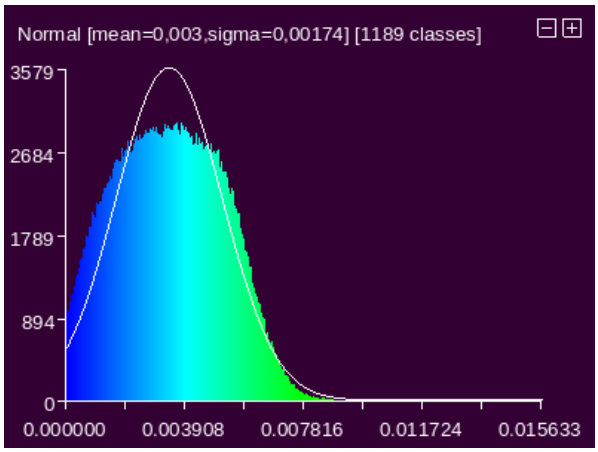


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

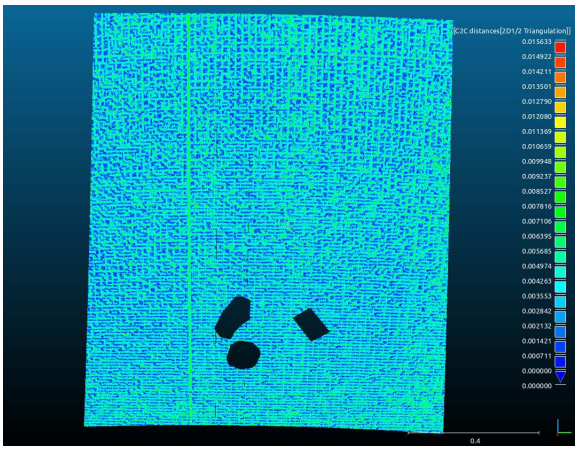


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.92: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation)

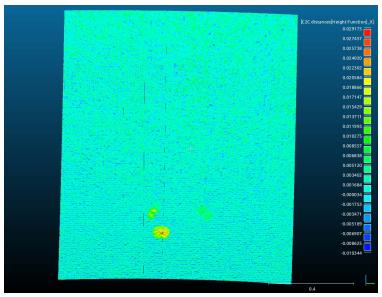


(α') Το ιστόγραμμα

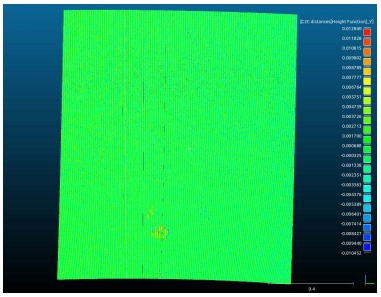


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

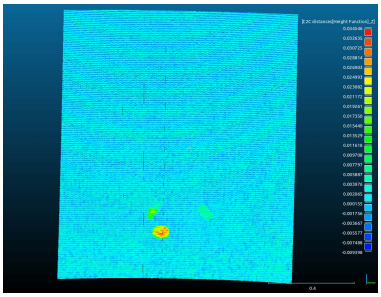
Σχήμα Α'.93: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (2D1/2 Delaunay triangulation)



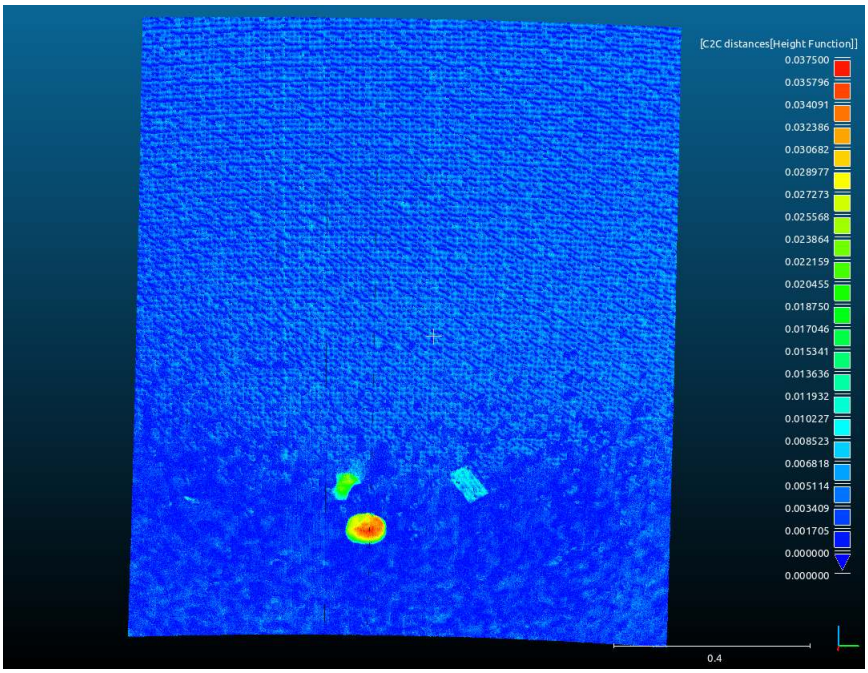
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

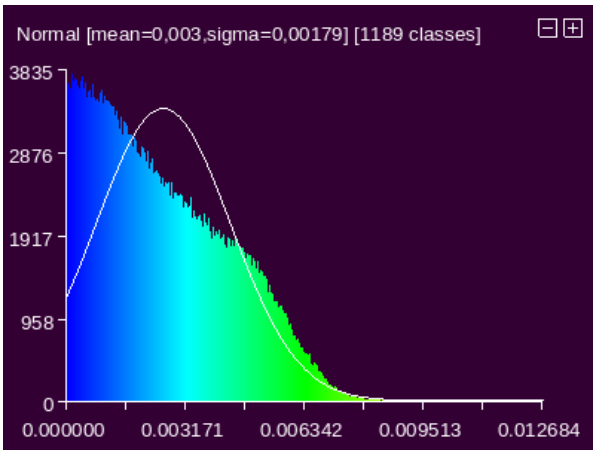


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

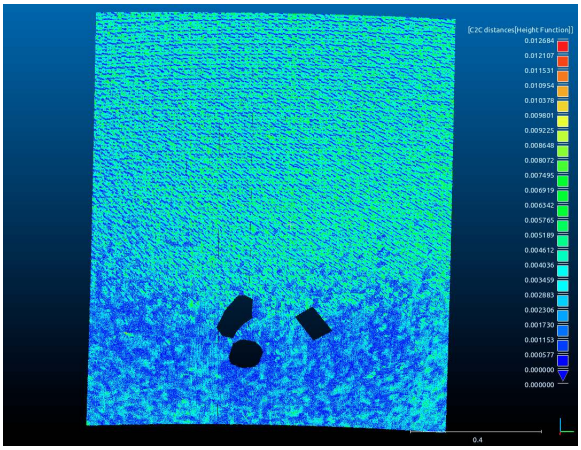


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.94: Ο αλγόριθμος της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function)

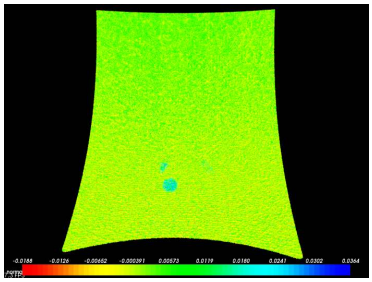


(α') Το ιστόγραμμα

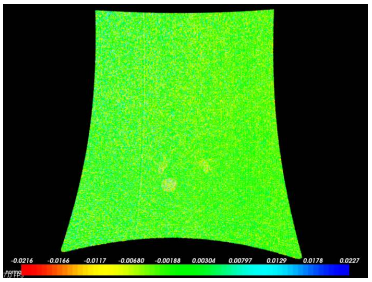


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

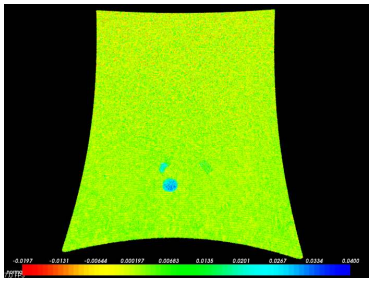
Σχήμα Α'.95: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο της εγγύτερης επιφάνειας (quadratic height function)



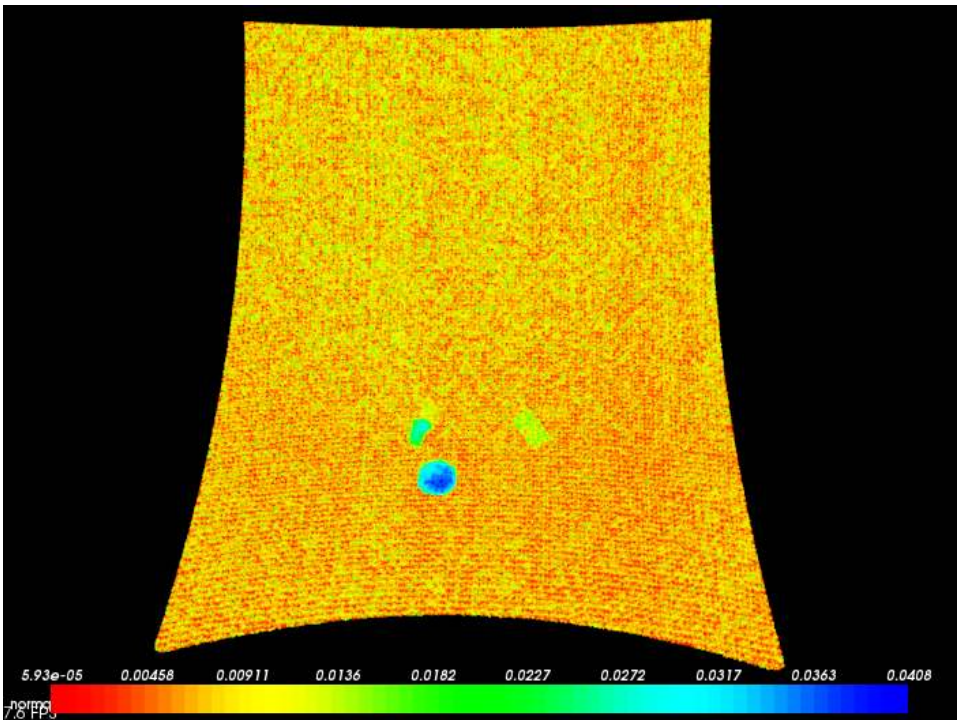
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

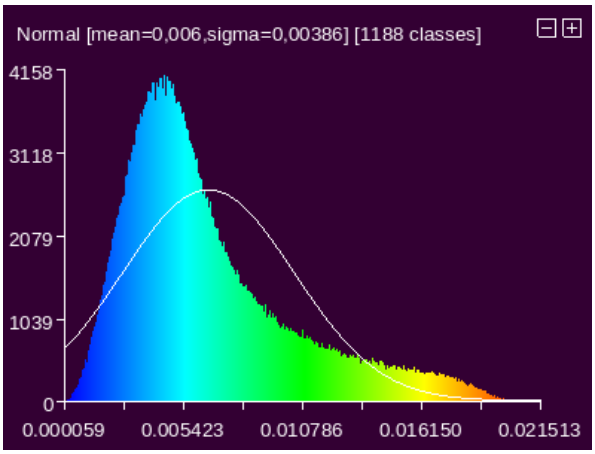


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

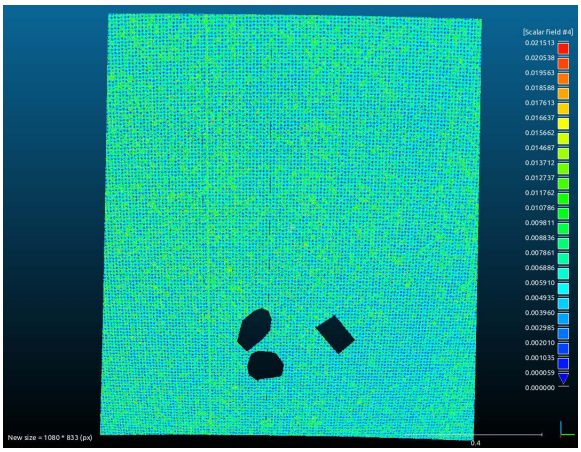


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.96: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

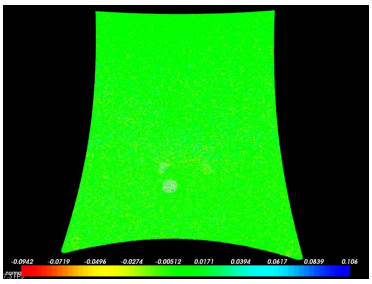


(α') Το ιστόγραμμα

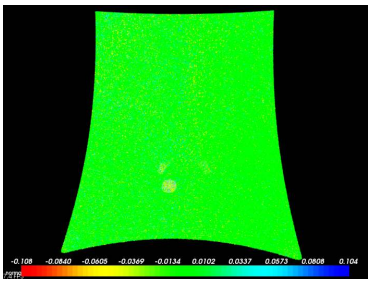


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

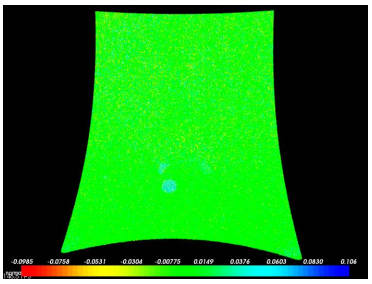
Σχήμα Α'.97: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 10)



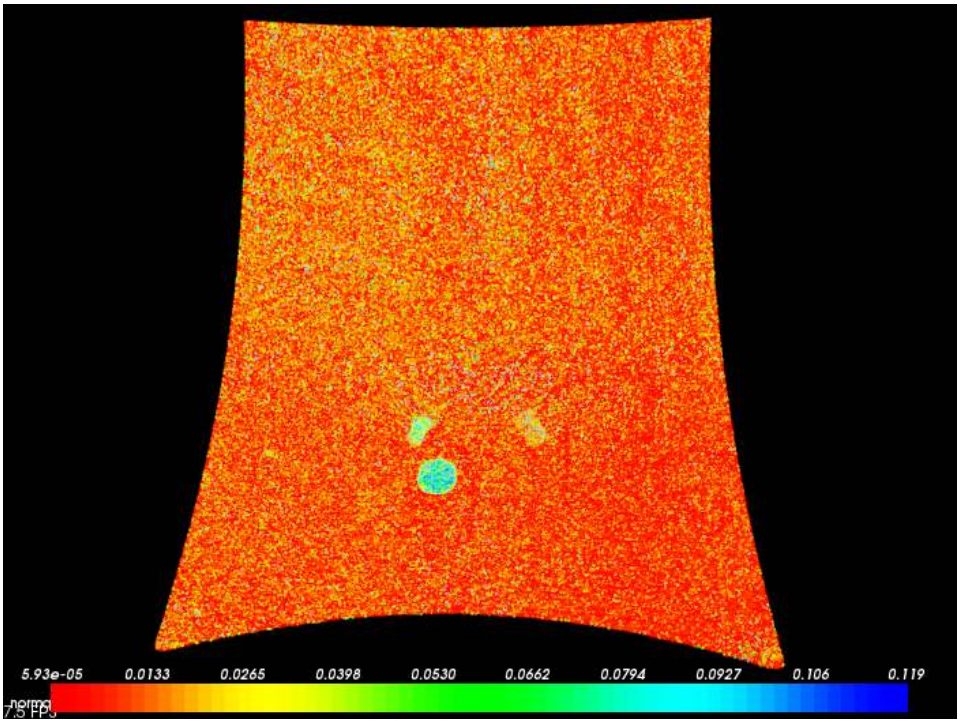
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

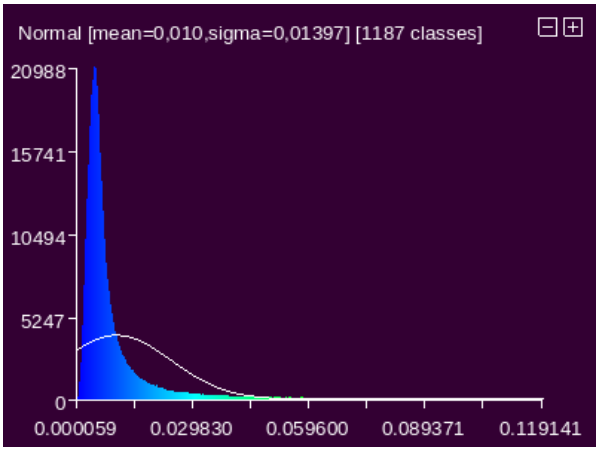


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

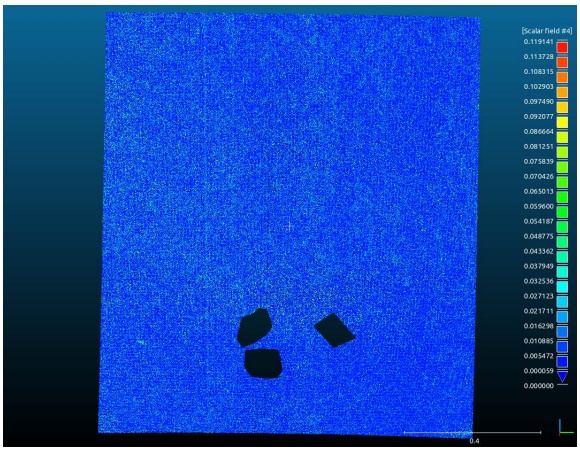


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.98: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 5 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 300 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

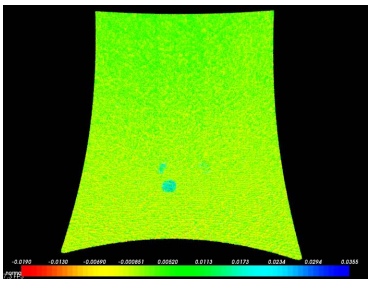


(α') Το ιστόγραμμα

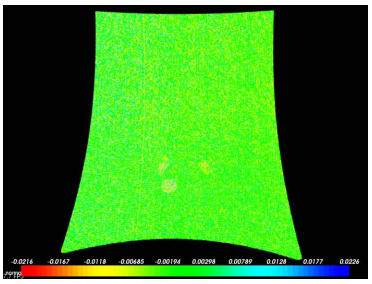


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

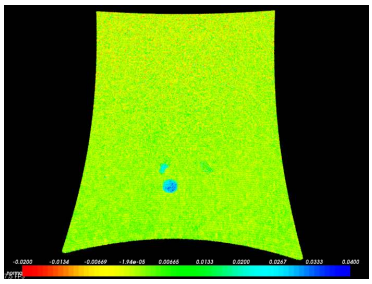
Σχήμα Α'.99: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 5 και 300)



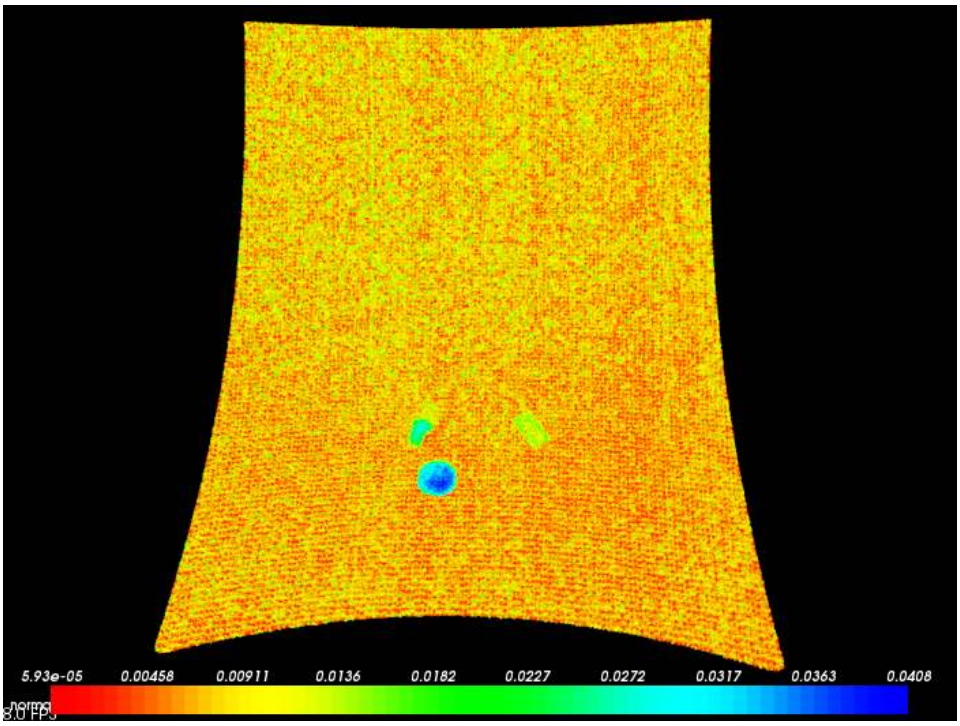
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

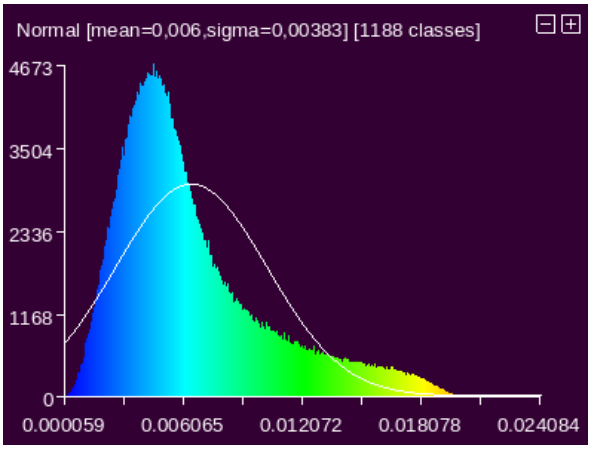


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

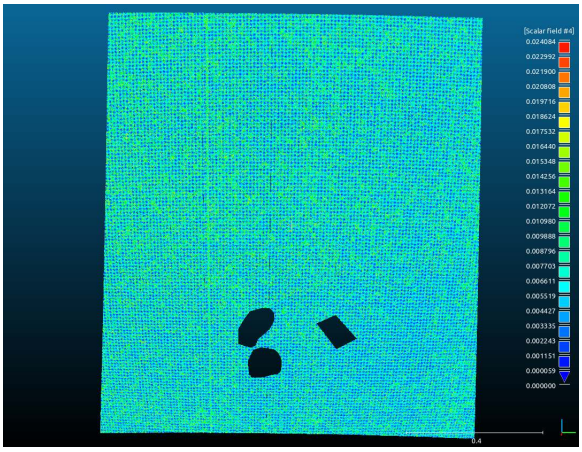


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.100: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 10 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

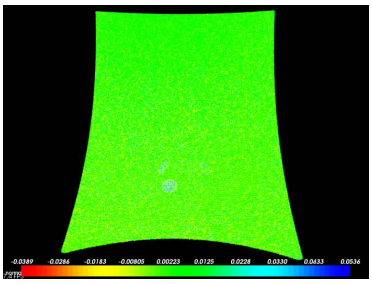


(α') Το ιστόγραμμα

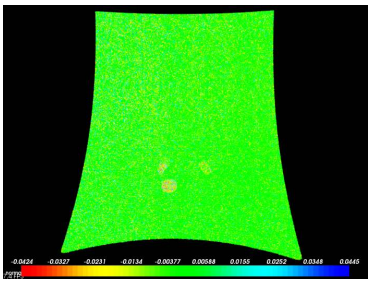


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

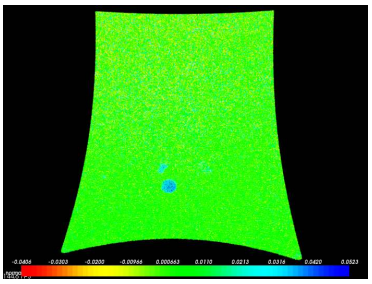
Σχήμα Α'.101: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 10)



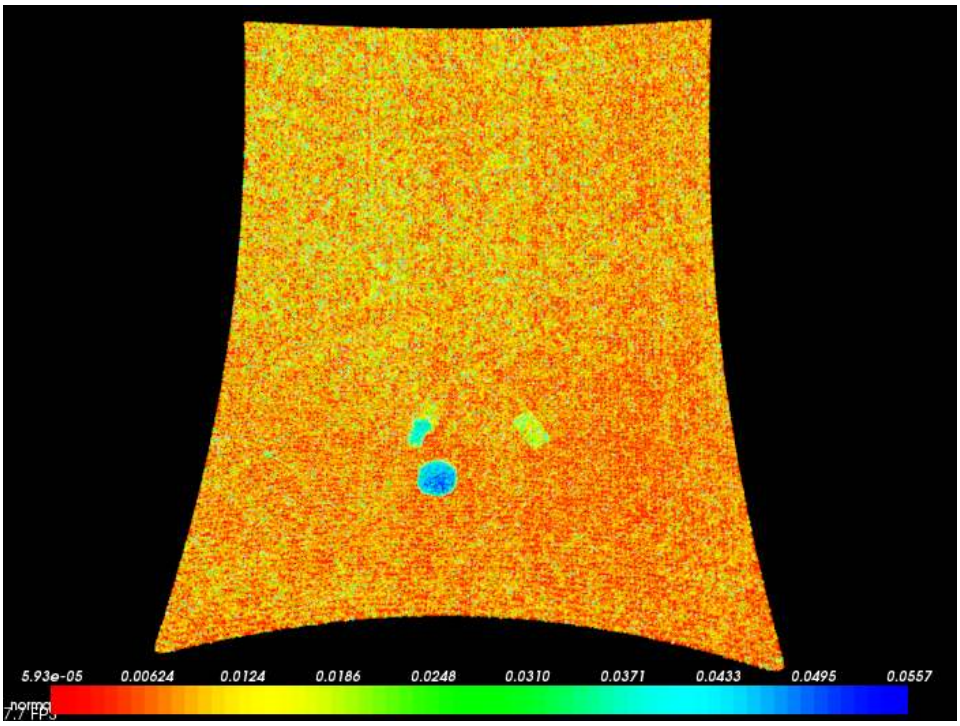
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

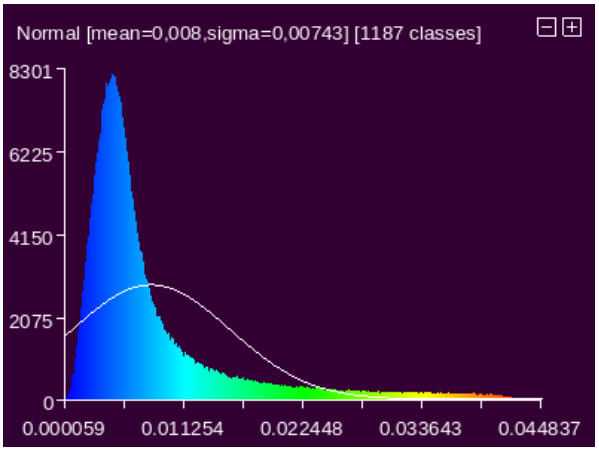


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

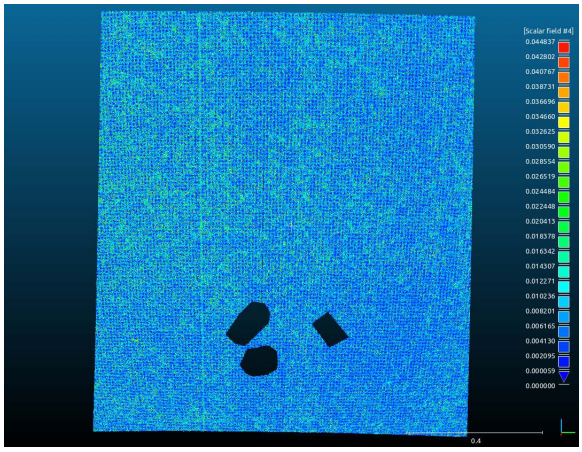


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.102: Ο αλγόριθμος του εγγύτερου κάθετου διανύσματος με χρήση 300 σημείων για τον υπολογισμό του διανύσματος και 50 σημείων για την σύγκριση με το συγκρινόμενο νέφος

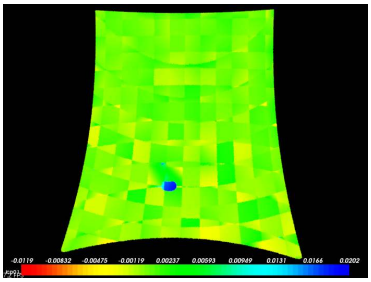


(α') Το ιστόγραμμα

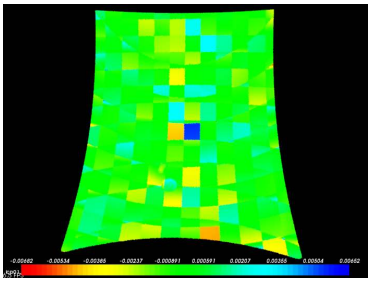


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

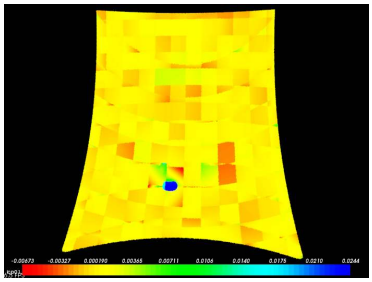
Σχήμα Α'.103: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του κάθετου διανύσματος (με παραμέτρους 300 και 50)



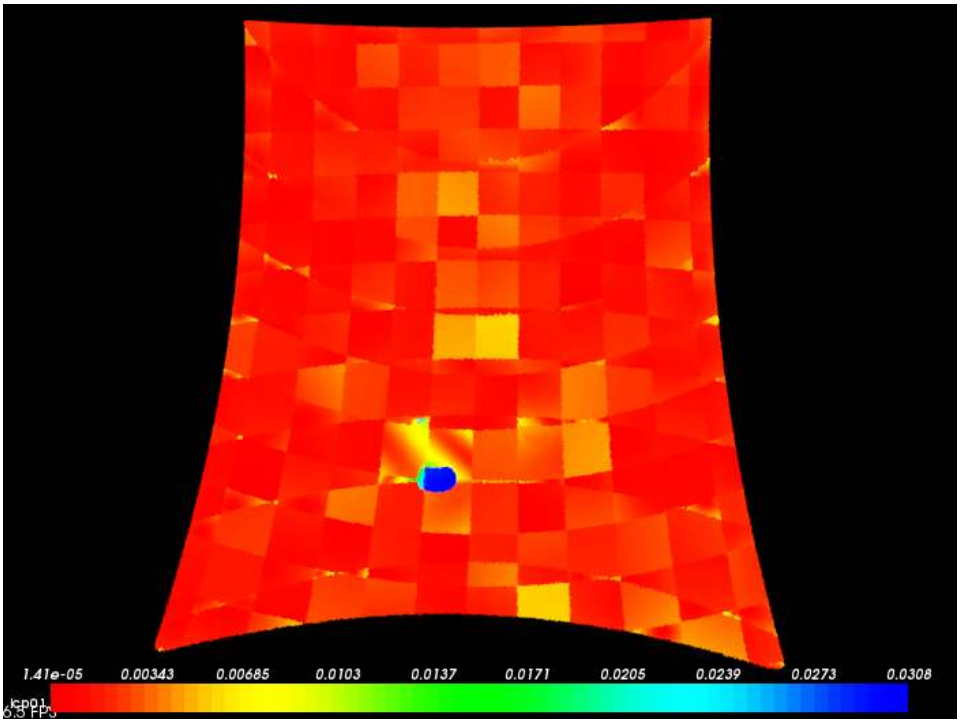
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

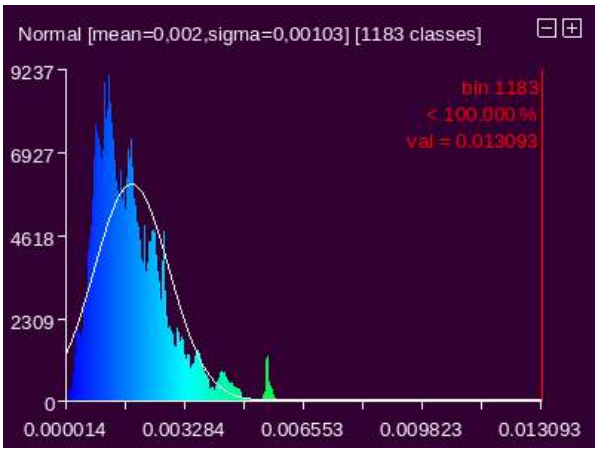


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

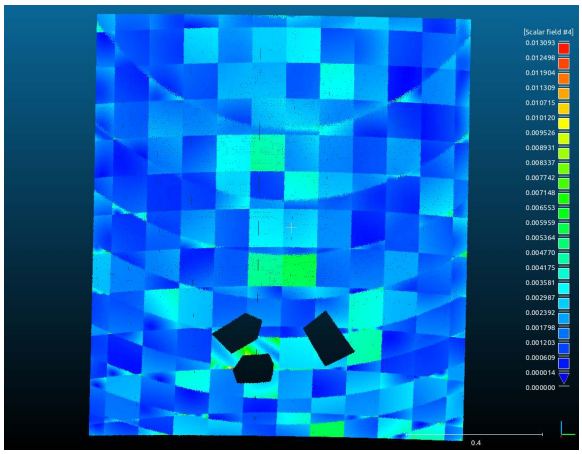


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.104: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.1

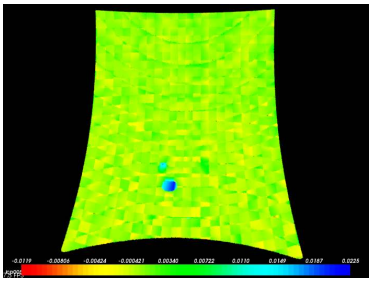


(α') Το ιστόγραμμα

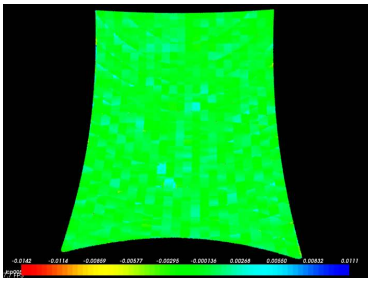


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

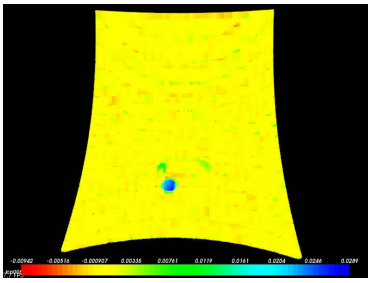
Σχήμα Α'.105: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.1



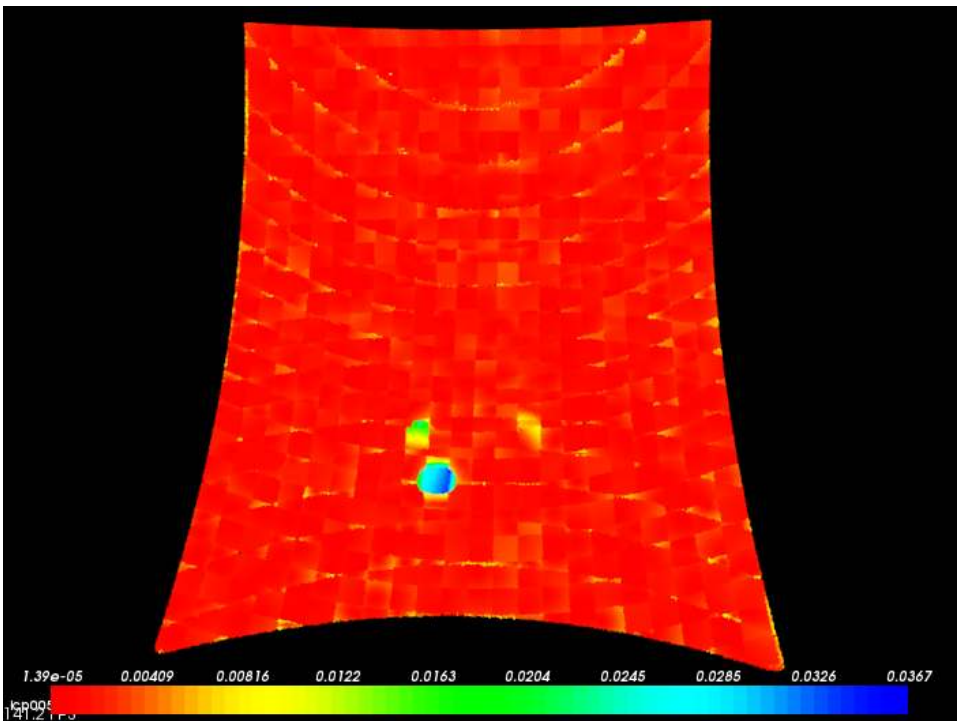
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

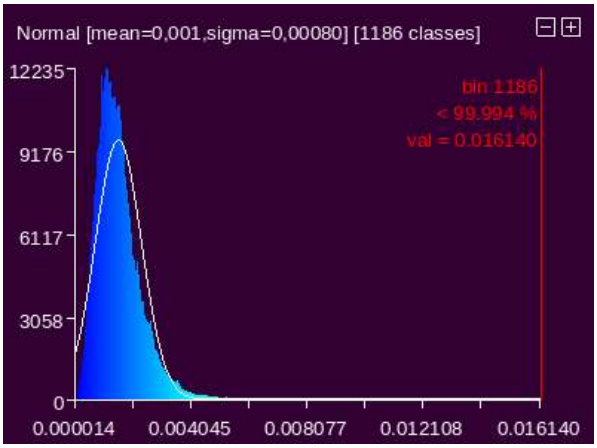


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

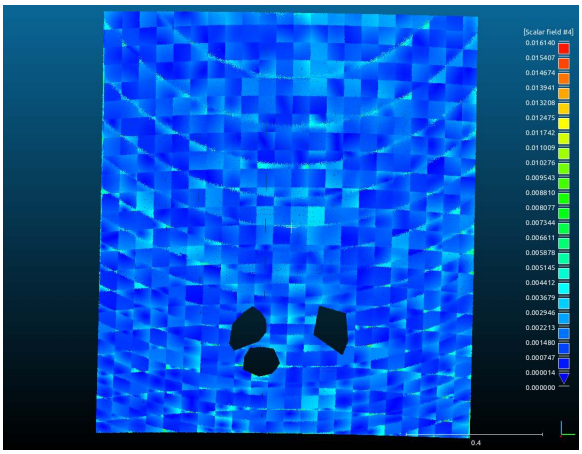


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.106: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.05

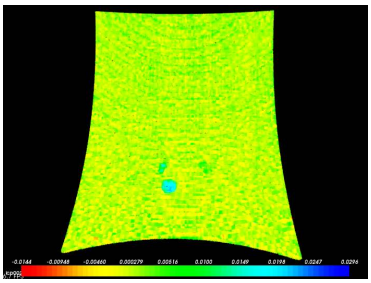


(α') Το ιστόγραμμα

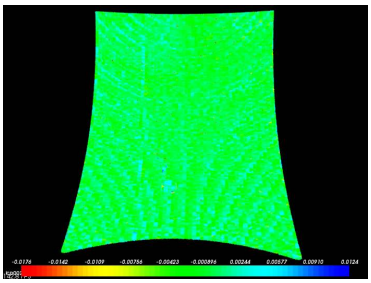


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

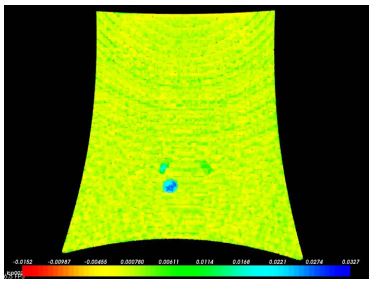
Σχήμα Α'.107: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.05



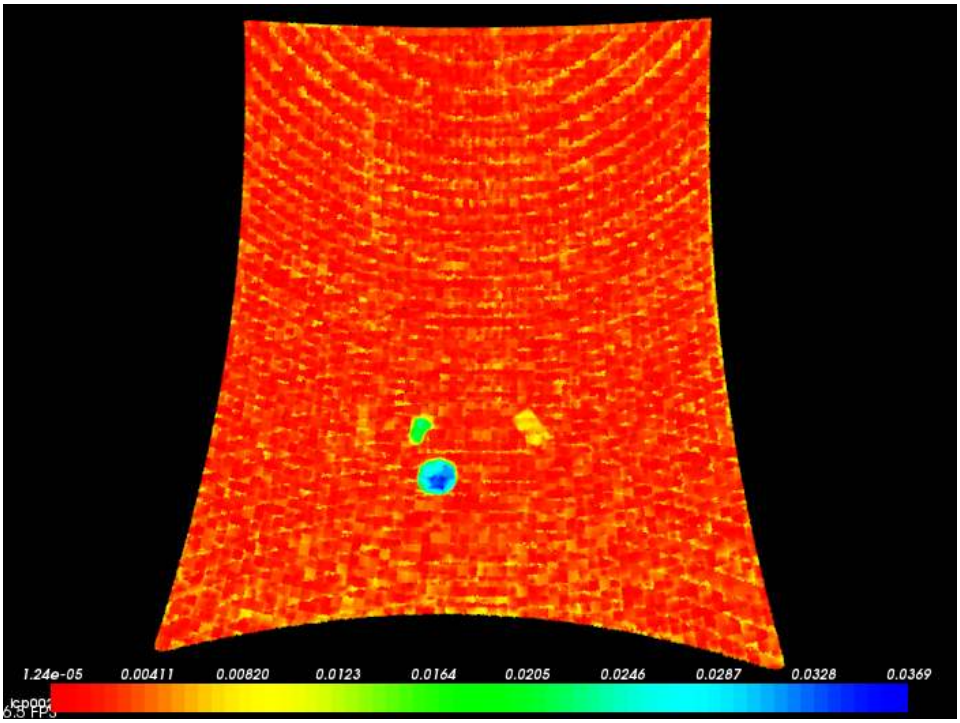
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

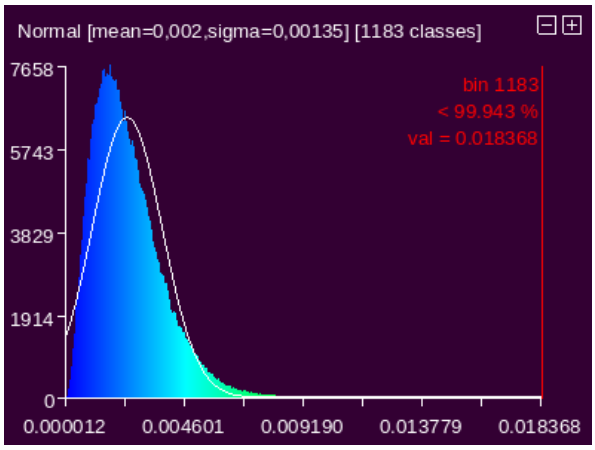


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

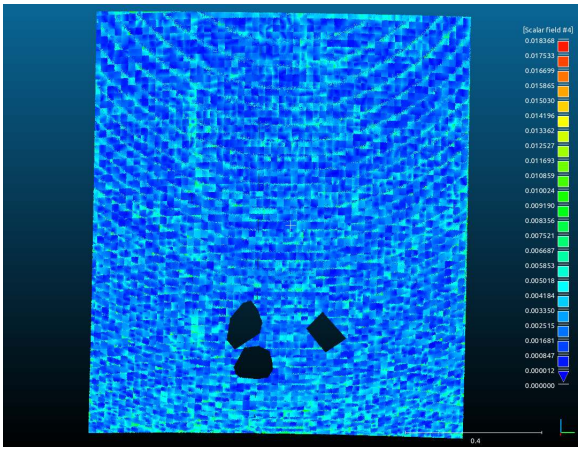


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.108: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.02

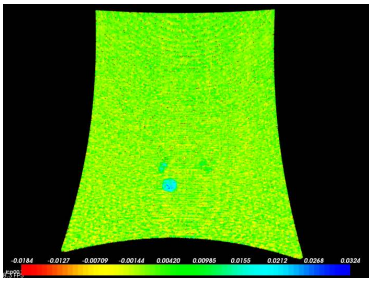


(α') Το ιστόγραμμα

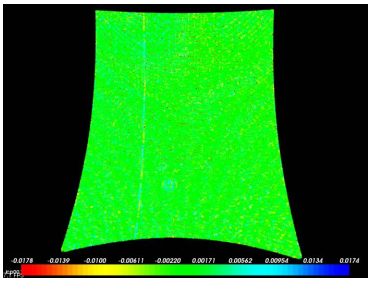


(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

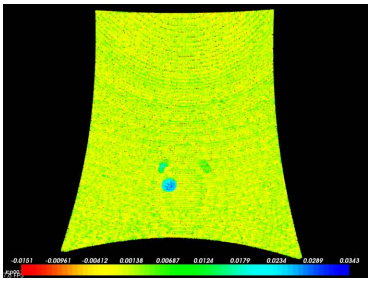
Σχήμα Α'.109: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.02



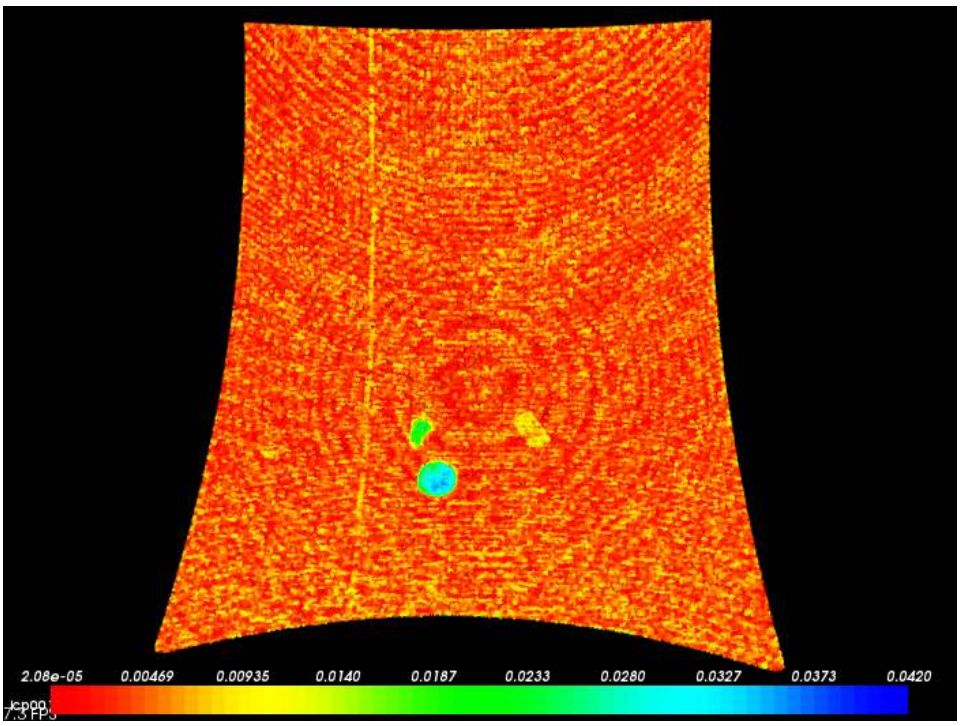
(α') Οι παραμορφώσεις κατά x



(β') Οι παραμορφώσεις κατά y

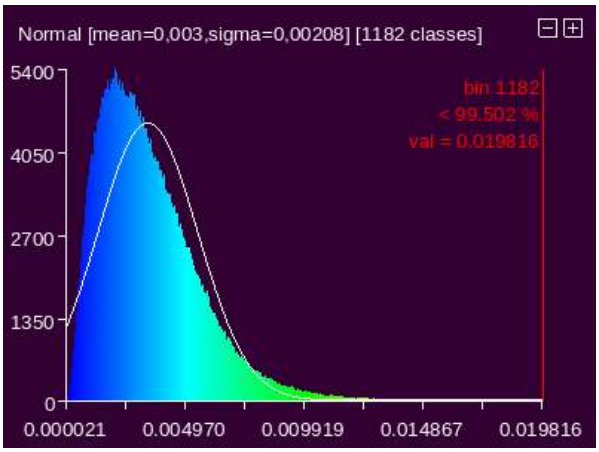


(γ') Οι παραμορφώσεις κατά z

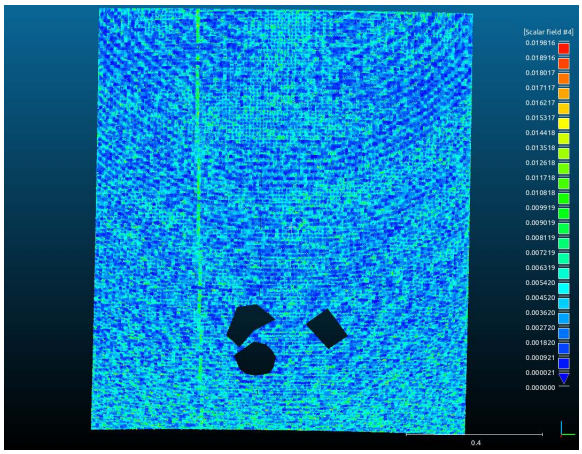


(δ') Οι ολικές παραμορφώσεις

Σχήμα Α'.110: Ο αλγόριθμος του ICP με μέγεθος voxel ίσο με 0.01



(α') Το ιστόγραμμα



(β') Οι περιοχές από τις οποίες υπολογίζεται

Σχήμα Α'.111: Το ιστόγραμμα των μη παραμορφωμένων περιοχών με βάση τον αλγόριθμο του ICP με voxel ίσο με 0.01

Voxel size (m)	Μ.Ο. σημείων	Αριθμός Voxel	Μη επαρκή	%
0.1	4919.13	291	4	100.000
0.05	1322.64	1085	44	99.994
0.02	204.701	7016	498	99.943
0.01	47.0977	30497	4193	99.502

Πίνακας Α'.2: Στατιστικά για τον αλγόριθμο του ICP από το 4ο πείραμα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β'

Κώδικας σε C++

```
#include <iostream>
#include <pcl/io/pcd_io.h>
#include <pcl/console/parse.h>

#include <time.h> //for counting time
#include <pcl/registration/correspondence_estimation.h> //for
    estimating correspondence

//For estimating normal shooting
#include <pcl/registration/
    correspondence_estimation_normal_shooting.h>
#include <pcl/features/normal_3d.h>


//for octree in icp search
#include <pcl/octree/octree_search.h>
#include <pcl/octree/octree_iterator.h>
#include <pcl/octree/octree_impl.h>
#include <pcl/registration/icp.h>


#include <pcl/point_types.h>
#include <pcl/point_cloud.h>


struct Deformation
{
  PCL_ADD_POINT4D;
```

```
  float deformation_x;
  float deformation_y;
  float deformation_z;
  float distance;
  EIGEN_MAKE_ALIGNED_OPERATOR_NEW
} EIGEN_ALIGN16;

POINT_CLOUD_REGISTER_POINT_STRUCT (Deformation,
                                   (float, x, x)
                                   (float, y, y)
                                   (float, z, z)
                                   (float, deformation_x,
                                      deformation_x)
                                   (float, deformation_y,
                                      deformation_y)
                                   (float, deformation_z,
                                      deformation_z)
                                   (float, distance, distance)
)

typedef Eigen::Matrix<float, 4, 4> Matrix4;


typedef pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ> PointCloudSource;
typedef PointCloudSource::Ptr PointCloudSourcePtr;
typedef PointCloudSource::ConstPtr PointCloudSourceConstPtr;

typedef pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ> PointCloudTarget;
typedef PointCloudTarget::Ptr PointCloudTargetPtr;
typedef PointCloudTarget::ConstPtr PointCloudTargetConstPtr;



void findDerfomation (const PointCloudSourceConstPtr &input_,
   const PointCloudTargetConstPtr &target_,pcl::Correspondences &
   correspondences,pcl::PointCloud<Deformation> &cloud)
{
  for(size_t i=0; i<correspondences.size();i++)
    {
      Deformation point;
```

```
        point.x=  (*input_)[(correspondences[i].index_query)].x;
        point.y=  (*input_)[(correspondences[i].index_query)].y;
        point.z=  (*input_)[(correspondences[i].index_query)].z;
        point.deformation_x=(*input_)[(correspondences[i].
           index_query)].x - (*target_)[(correspondences[i].
           index_match)].x;
        point.deformation_y=(*input_)[(correspondences[i].
           index_query)].y - (*target_)[(correspondences[i].
           index_match)].y;
        point.deformation_z=(*input_)[(correspondences[i].
           index_query)].z - (*target_)[(correspondences[i].
           index_match)].z;
        point.distance=std::sqrt(correspondences[i].distance);

        cloud.push_back(point);
      }
}

typedef pcl::octree::OctreePointCloudSearch<pcl::PointXYZ>
   OctreeT;
typedef OctreeT::LeafNodeIterator LeafNode;

void findDerfomationICP (const PointCloudSourceConstPtr &input_,
   const PointCloudTargetConstPtr &target_,pcl::Correspondences &
   correspondences,pcl::PointCloud<Deformation> &cloud, double
   octree_resolution_,double min_corr_=4)
{

  std::cout <<"Creation␣of␣octree␣..." <<std::endl;

  //Creation of octree
  OctreeT octree (octree_resolution_);

  //Add points from cloudA to octree
  octree.setInputCloud (input_);
  octree.defineBoundingBox();
  octree.addPointsFromInputCloud();

  //Creation of LeafNode iterator for octree
```

```
LeafNode iterator (&octree);

std::cout <<"Iterating␣over␣the␣octree␣..." <<std::endl;
std::cout <<"Number␣of␣Leafs:␣" <<octree.getLeafCount() <<std::
   endl;


int average=0; //For debugging reasons
int aver=1;  //For debugging reasons
int nocorr=0; //For debugging reasons


do
  {

    //Retrieve data from leafNodeIterator
    boost::shared_ptr< std::vector<int> > octreesearch (new
       std::vector<int>);
    iterator.getData(*octreesearch);

    std::cout << (float(aver)/float(octree.getLeafCount()))
       *100<<"␣%␣Completed␣(Iteration␣" <<aver <<"␣out␣of␣" <<
       octree.getLeafCount() << ")";
    std::cout<<",␣Size:␣"<<octreesearch->size() <<std::endl;
    average+=octreesearch->size();
    aver++;

    if (octreesearch->size()< min_corr_)
      {
        std::cout <<"Not␣enough␣correspondence␣found!\n";

        for(size_t i=0; i<octreesearch->size();i++)
          {
            Deformation point;

            point.x=  (*input_)[(*octreesearch)[i]].x;
            point.y=  (*input_)[(*octreesearch)[i]].y;
            point.z=  (*input_)[(*octreesearch)[i]].z;
            point.deformation_x=numeric_limits<float>::
               quiet_NaN( );
```

```
            point.deformation_y=numeric_limits<float>::
                quiet_NaN( );
            point.deformation_z=numeric_limits<float>::
                quiet_NaN( );
            point.distance=numeric_limits<float>::quiet_NaN( );

            cloud.push_back(point);

        }

      nocorr++;

      continue;
    }

  typename pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>::Ptr temp (new pcl
      ::PointCloud<pcl::PointXYZ>);

  pcl::copyPointCloud(*input_,*octreesearch,*temp);

  pcl::IterativeClosestPoint<pcl::PointXYZ, pcl::PointXYZ>
      icp;
  icp.setInputSource (temp);
  icp.setInputTarget (target_);
  icp.align (*temp);

  //Estimation of the transformation matrix between sub-
      cloudA and it's correspondence in cloudB
  Eigen::Matrix4f transf_matrix = icp.getFinalTransformation
      ();

  for(size_t i=0; i<octreesearch->size();i++)
    {
      Deformation point;

      point.x=  (*input_)[(*octreesearch)[i]].x;
      point.y=  (*input_)[(*octreesearch)[i]].y;
      point.z=  (*input_)[(*octreesearch)[i]].z;
      point.deformation_x=point.x-(transf_matrix(0,0)*point.x
          +transf_matrix(0,1)*point.y +transf_matrix(0,2)*
```

```
            point.z + transf_matrix(0,3));
          point.deformation_y=point.y-(transf_matrix(1,0)*point.x
             +transf_matrix(1,1)*point.y +transf_matrix(1,2)*
            point.z + transf_matrix(1,3));
          point.deformation_z=point.z-(transf_matrix(2,0)*point.x
             +transf_matrix(2,1)*point.y +transf_matrix(2,2)*
            point.z + transf_matrix(2,3));

          point.distance=std::sqrt(std::pow(point.deformation_x
            ,2)+std::pow(point.deformation_y,2)+std::pow(point.
            deformation_z,2));

          //Should never hapen
          if (transf_matrix(3,3)!=1)
            {
              std::cout << "Bad␣matrix!\n" ;
              EXIT_FAILURE;
            }

          cloud.push_back(point);

        }

    } while (*++iterator);


  std::cout << "Average␣number␣of␣points:␣" << (double)average/(
     double)aver <<std::endl;
  std::cout<< "No␣correspondeces␣found␣in␣" << nocorr << "␣voxels
     ␣from␣" << octree.getLeafCount() << std::endl;
  std::cout<< "Resolution:␣" << octree_resolution_ <<std::endl;

}

void printtime(clock_t t1, clock_t t2)
{
  float diff ((float)t2-(float)t1);
  float seconds = diff / CLOCKS_PER_SEC;
  float minutes=seconds/60;
  float hour=seconds/3600;
```

```
  if(std::floor(hour)>0)
  {
    std::cout << std::floor(hour) << "h␣";
  }

  if (std::floor(minutes)>0)
  {
    std::cout << std::floor(minutes)-std::floor(hour)*60<<"m␣";
  }


  std::cout << seconds - std::floor(minutes)*60 <<"s␣" << "and␣in
     ␣seconds:" <<seconds;

}

int main (int argc, char** argv)
{
  if (argc < 3)
    {
      std::cerr << "ERROR:␣Syntax␣is␣dede␣<Reference␣pcd␣file>␣<
         Compare␣pcd␣file><Deformation␣pcd␣file>" << std::endl;
      std::cerr << "EXAMPLE:␣./dede␣cloudA.pcd␣cloudB.pcd␣
         deformation.pcd" << std::endl;
      return -1;
    }

  double icp = 0.0; //resolution for the octree if used
  pcl::console::parse_argument (argc, argv, "-icp", icp);

  int normal_ksearch = 0;
  int normal_corr = 0;
  bool normal = pcl::console::parse_2x_arguments(argc, argv, "-
     normal", normal_ksearch, normal_corr) > 0;

  if (pcl::console::find_switch (argc, argv, "-debug"))
    {
      pcl::console::setVerbosityLevel (pcl::console::L_DEBUG);
    }
```

```
clock_t t1,t2,t3,t4,t5;
t1=clock();

//Load cloud A
std::string reference_path(argv[1]);
pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>::Ptr reference (new pcl::
   PointCloud<pcl::PointXYZ>);

if (pcl::io::loadPCDFile<pcl::PointXYZ> (reference_path, *
   reference) == -1) //* load the file
  {
    std::cerr << "ERROR: Cannot open file " << reference_path
       << "! Aborting..." << std::endl;
    return (-1);
  }
std::cout << "Loaded " << reference->width * reference->height
          << " data points from " << reference_path << std::
             endl;
t2=clock();

//Load cloud B
std::string compare_path(argv[2]);
pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>::Ptr compare (new pcl::
   PointCloud<pcl::PointXYZ>);

if (pcl::io::loadPCDFile<pcl::PointXYZ> (compare_path, *compare
   ) == -1) //* load the file
  {
    std::cerr << "ERROR: Cannot open file " << compare_path <<
       "! Aborting..." << std::endl;
    return (-1);
  }
std::cout << "Loaded " << compare->width * compare->height
          << " data points from " << compare_path << std::endl;

t3=clock();

pcl::PointCloud<Deformation>::Ptr deformation (new pcl::
   PointCloud<Deformation>);
```

```
if (normal)
  {
    std::cout << "normal:"<< normal_ksearch <<", "<<
       normal_corr << std::endl;
    std::cout << "Using DeformationDetection with normal
       shooting nearest point " << std::endl;
    boost::shared_ptr<pcl::Correspondences> correspondences (
       new pcl::Correspondences);

    pcl::NormalEstimation<pcl::PointXYZ, pcl::Normal> ne;
    ne.setInputCloud (compare);

    pcl::search::KdTree<pcl::PointXYZ>::Ptr tree (new pcl::
       search::KdTree<pcl::PointXYZ> ());
    ne.setSearchMethod (tree);

    pcl::PointCloud<pcl::Normal>::Ptr input_normals (new pcl::
       PointCloud<pcl::Normal>);
    ne.setKSearch (normal_ksearch);
    //ne.setRadiusSearch (5);
    ne.compute (*input_normals);

    pcl::registration::CorrespondenceEstimationNormalShooting <
       pcl::PointXYZ, pcl::PointXYZ, pcl::Normal> ce;
    ce.setInputSource (compare);

    ce.setSourceNormals (input_normals);
    ce.setInputTarget (reference);

    ce.setKSearch (normal_corr);
    ce.determineCorrespondences (*correspondences);

    findDerfomation(compare,reference,*correspondences,*
       deformation);
  }
else if (icp)
  {
    std::cout << "Using DeformationDetection with ICP" << std::
       endl;
```

```
      boost::shared_ptr<pcl::Correspondences> correspondences (
         new pcl::Correspondences);
      //findRecCorrespondences(compare,reference,*correspondences
         );
      findDerfomationICP(compare,reference,*correspondences,*
         deformation,icp);

    }
  else
    {
      std::cout << "Using␣DeformationDetection␣with␣nearest␣point
         ␣" << std::endl;

      boost::shared_ptr<pcl::Correspondences> correspondences (
         new pcl::Correspondences);

      pcl::registration::CorrespondenceEstimation<pcl::PointXYZ,
         pcl::PointXYZ> corr_est;
      corr_est.setInputSource (compare);
      corr_est.setInputTarget (reference);
      corr_est.determineCorrespondences(*correspondences);

      findDerfomation(compare,reference,*correspondences,*
         deformation);
    }

  t4=clock();

  if (deformation->size()>0)
    {
      pcl::io::savePCDFileASCII (std::string (argv[3]), *
         deformation);
      std::cout << "Saved␣" << deformation->size()
                << "␣data␣points␣to␣" << std::string (argv[3]) <<
                    std::endl;
    }
  else
    {
      std::cout << "No␣deformation␣was␣detected" << std::endl;
    }
```

```
  t5=clock();

  std::cout<<"Time␣for␣Loading␣" << reference->width * reference
     ->height << "␣data␣points␣from␣" << reference_path << ":␣";
  printtime(t1,t2);
  std::cout<<std::endl;

  std::cout<<"Time␣for␣Loading␣" << compare->width * compare->
     height << "␣data␣points␣from␣" << compare_path << ":␣";
  printtime(t2,t3);
  std::cout<<std::endl;

  std::cout<<"Algorith␣execution␣time:␣";
  printtime(t3,t4);
  std::cout<<std::endl;

  std::cout<<"Writing␣" << deformation->size() << "␣data␣points␣
     from␣" << std::string (argv[3]) << ":␣";
  printtime(t4,t5);
  std::cout<<std::endl;

  std::cout<<"Total:␣";
  printtime(t1,t5);
  std::cout<<std::endl;

  return(0);

}
```