



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

*Επεξεργασία διδιάστατων και τρισδιάστατων
απεικονίσεων οστράκων μυκηναϊκών ταφικών αγγείων
και εφαρμογή νέας μεθόδου ανασύνθεσής των*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Περπερίδης

Επιβλέπων : **Κωνσταντίνος Παπαοδυσσεύς**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

*Επεξεργασία διδιάστατων και τρισδιάστατων
απεικονίσεων οστράκων μυκηναϊκών ταφικών αγγείων
και εφαρμογή νέας μεθόδου ανασύνθεσής των*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Περπερίδης

Επιβλέπων : **Κωνσταντίνος Παπαοδυσσεύς**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή του Οκτωβρίου 2015

.....
Κ. Παπαοδυσσεύς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ.Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Η.Κουκούτσης
Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

.....

Ιωάννης Περπερίδης

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

Copyright© Ιωάννης Περπερίδης, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε και εφαρμόστηκε μια νέα προσέγγιση για την αυτοματοποιημένη ανασύνθεση κατακερματισμένων αντικειμένων με βάση τη διδιάστατη (2D) και τρισδιάστατη (3D) αναπαράσταση των θραυσμάτων τους. Οι σχετικές μεθοδολογίες παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά στις δημοσιεύσεις [1] και [2]. Η όλη διαδικασία ξεκινά με τη τρισδιάστατη σάρωση του διαθέσιμου θραύσματος. Εν συνεχεία, οι αναπαραστάσεις αυτές υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία ώστε να μπορούν να ελεγχθούν για πιθανές συναρμώσεις. Ακολούθως, χρησιμοποιούνται τέσσερα κριτήρια, που οδηγούν στον προσδιορισμό ζευγών θραυσμάτων, τα οποία μπορούν να συναρμώσουν μεταξύ τους σε ικανοποιητικό βαθμό. Τα κριτήρια αυτά έχουν επιλεγεί από τους συγγραφείς των άρθρων [1] και [2] κατά τέτοιον τρόπο, ώστε η όλη διαδικασία να προσεγγίζει τον άμεσο τρόπο ανασύνθεσης που εφαρμόζουν ειδικοί μελετητές. Το πρώτο κριτήριο εκμεταλλεύεται τον όγκο του διακένου μεταξύ δύο βέλτιστα τοποθετημένων θραυσμάτων. Το δεύτερο εξετάζει την επικάλυψη των θραυσμάτων σε κάθε πιθανή θέση ταιριάσματος ενώ τα κριτήρια 3 και 4 χρησιμοποιούν Αρχές του Λογισμού των Μεταβολών για την απόρριψη πιθανών θέσεων προσαρμογής. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής ήταν δεδομένα σύνολα διδιάστατων και τρισδιάστατων αναπαραστάσεων θραυσμάτων (οστράκων) ταφικών αγγείων της Μυκηναϊκής περιόδου που φυλάσσονται στις αποθήκες του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου. Ειδικές τεχνικές επεξεργασίας των αναπαραστάσεων των οστράκων εφαρμόστηκαν, ώστε αυτές να έρθουν σε κατάλληλη μορφή για την εφαρμογή της προαναφερθείσας μεθοδολογίας, όπως περιγράφεται αρκετά διεξοδικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής. Η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας προσέφερε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ανασύνθεση θραυσμένων αντικειμένων, ανασύνθεση τοιχογραφιών, ταιρίασμα αντικειμένων, 3D ανάλυση προτύπων, γεωμετρία, διαφορικός λογισμός των μεταβολών.

ABSTRACT

In the present dissertation a new approach regarding the automated reconstruction of fragmented objects has been studied and applied. This approach employs the two – dimensional (2D) and the three – dimensional (3D) representations of their fragments. The specific methodologies were presented for the first time in publications [1] and [2]. The whole procedure starts with the available fragment's three – dimensional scan. Then, these representations undergo appropriate processing so as to be checked for possible matchings. Subsequently, four criteria which lead to the identification of fragment pair are used so as to determine if the two fragments can be matched to each other satisfactorily. The above criteria have been developed by the authors of articles [1] and [2] in such a way, that the whole procedure simulates the method of reconstruction used by the specialized scholars. The first criterion considers the gap volume between two optimally placed fragments. The second criterion explores the fragments' overlapping in any possible matching position, whereas the third and fourth criteria use Principles of Calculus of Variations for the rejection of possible adjacent positions. Within the context of this dissertation, sets of two and three – dimensional fragment representations of burial vessels belonging to the Mycenaean period were used as data. These fragments are kept in the storerooms of the National Archaeological Museum. Special processing techniques of fragments' representations were employed in order to obtain the appropriate form for the application of the aforementioned methodology, as described in the relevant chapter of this dissertation. The application of this methodology produced satisfactory results.

KEY - WORDS: Fragmented objects reconstruction, Wall paintings reconstruction, Pattern matching, 3D pattern analysis, Geometry, Calculus of variations.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλω να ευχαριστήσω, θερμά, τον καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Παπαοδυσσέα, για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για την πολύτιμη επίβλεψή του κατά την διάρκεια της εκπόνησής της. Ακόμη, τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Σόλωνα Ζάννο, ο οποίος μου παρείχε την απαραίτητη καθοδήγηση, όπου αυτή χρειάστηκε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, την κοπέλα μου Κατερίνα για τη βοήθεια και τη δύναμη που μου έδωσε τα τελευταία χρόνια για να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 Στόχος της διπλωματικής.....	13
1.2 Ιστορικά στοιχεία.....	13
2. ΣΥΝΑΦΗ ΕΡΓΑ.....	15
3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΑΝΑΣΥΝΘΕΣΗΣ ΘΡΑΥΣΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	17
3.1 Αρχική επεξεργασία του θραύσματος.....	17
3.1.1 Εξαγωγή περιστρεφόμενων περιγραμμάτων για να αντιμετωπιστούν θραύσματα με τυχαίο προσανατολισμό.....	18
3.1.2 Διαιρώντας το περίγραμμα σε μπλοκ.....	19
3.2 Πραγματική μέθοδος εντοπισμού θραυσμάτων που ταιριάζουν.....	19
3.2.1 Ο καθορισμός των βέλτιστων παραμέτρων αντιστοίχισης.....	19
3.2.2 Οι έννοιες των «Σταθερών» και «Περιστρεφόμενων» αλυσίδων.....	19
3.2.3 Πρώτο κριτήριο ταιριάσματος περιγραμμάτων των θραυσμάτων.....	21
3.2.4 Δεύτερο κριτήριο ταιριάσματος.....	22
3.2.5 Τρίτο κριτήριο ταιριάσματος.....	22
3.2.6 Κριτήριο ταιριάσματος περιγραμμάτων των θραυσμάτων, βασιζόμενο στη διαφορά «αθροίσματος γωνιών».....	23
3.3 Εφαρμογή της αναφερθείσας Μεθοδολογίας.....	24
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΣΥΝΘΕΣΗ ΘΡΑΥΣΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ.....	27
4.1 Προκαταρκτική επεξεργασία του θραύσματος.....	27
4.2 Χρησιμοποιώντας τις έννοιες του «σταθερού» και «περιστρεφόμενου» θραύσματος.....	27
4.3 Τέσσερα κριτήρια αντιστοιχίας.....	29
4.3.1 Το πρώτο κριτήριο αντιστοιχίας.....	29
4.3.2 Δεύτερο κριτήριο αντιστοιχίας: η απαγόρευση των τοπικών και συνολικών αλληλοεπικαλύψεων στο επίπεδο επαφής $V_{k,m}$	29
4.3.3 Το τρίτο κριτήριο αντιστοιχίας: συσχετίζοντας την γεωμετρία της επιφάνειας επαφής με το μέγιστο επιτρεπόμενο όγκο του τομέα $V_{k,m}$	30
4.3.4 Το τέταρτο κριτήριο αντιστοιχίας.....	32
4.4 Περιγραφή της διαδικασίας που εφαρμόζεται για την αυτοματοποιημένη ανασύνθεση των θραυσμένων αντικειμένων με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια.....	33
5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ ΤΩΝ ΘΡΑΥΣΜΑΤΩΝ.....	37
5.1 Οι απεικονίσεις.....	37
5.2 Οι τρεις επιφάνειες των θραυσμάτων.....	43
5.3 Τα περιγράμματα της «άνω» και «κάτω» επιφάνειας των θραυσμάτων.....	51
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	57

BIBΛIOΓPAΦIA.....63

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχος της διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική θα εφαρμοστούν μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την αυτόματη ανασύνθεση αρχαιολογικών θραυσμένων αντικειμένων που η επιφάνειά τους είναι επίπεδη ή σχεδόν επίπεδη. Τα περισσότερα αντικείμενα έχουν ανασκαφεί σε χιλιάδες θραυσμένα κομμάτια και, ως εκ τούτου, η ανακατασκευή τους είναι επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία. Τόσο το σύστημα όσο και η μεθοδολογία που θα παρουσιαστούν ακολούθως αντλούν τη μέγιστη δυνατή πληροφορία από το σχήμα του περιγράμματος των θραυσμάτων για να μας δώσει ένα πιθανό ταίριασμα. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός της εργασίας αυτής είναι η επεξεργασία τρισδιάστατων απεικονίσεων θραυσμάτων αγγείων αρχαιολογικής αξίας με επίπεδη επιφάνεια. Η τελευταία είναι απαραίτητη για τη χρήση τους στη μέθοδο της αυτόματης ανασύνθεσης θραυσμένων αντικειμένων η οποία παρουσιάζεται στη δημοσίευση [1].

1.2 Ιστορικά στοιχεία

Οι ανασκαφείς ανακάλυψαν και συνεχίζουν να ανακαλύπτουν πολλά σημαντικά αρχαιολογικά ευρήματα συχνά θραυσμένα σε πολλές εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες κομμάτια. Τα ευρήματα μπορεί να είναι είτε θραύσματα τοιχογραφιών είτε πήλινα αγγεία που ήταν είδη καθημερινής χρήσεως είτε διάφορα σπουδαία έργα τέχνης. Τέτοια αρχαιολογικά ευρήματα βρέθηκαν στις Μυκήνες, Τίρυνθα, Θήρα, Κρήτη, Πύλο.

Συγκεκριμένα, στο Ακρωτήρι της Θήρας βρέθηκε μεγάλο πλήθος από τοιχογραφίες και αγγεία κατά τη διάρκεια των ανασκαφών το οποίο είναι πολύτιμη πηγή πληροφοριών για την καθημερινή ζωή στο Ακρωτήρι, τη θρησκεία, την οικονομία, τη φύση, τα ήθη και τα έθιμα του νησιού. Το ευτύχημα είναι ότι το στρώμα τέφρας και ελαφρόπετρας που κάλυψε τον οικισμό μετά την ηφαιστειακή έκρηξη δημιούργησε στο Ακρωτήρι το ιδανικό περιβάλλον έλλειψης οξυγόνου που απαιτείται για τη διατήρηση φθαρτών υλικών.

Τα περισσότερα δείγματα μυκηναϊκών τοιχογραφιών προέρχονται από τον 14ο και τον 13ο αιώνα π.Χ. και είναι συνδεδεμένα με τα ανακτορικά διαμερίσματα των Μυκηνών, της Τίρυνθας και της Πύλου ή με τις έδρες τοπικών αρχόντων. Οι μυκηναϊκές τοιχογραφίες ήταν, όπως και οι μινωικές, ζωγραφιστές συνθέσεις σε υπόστρωμα ασβεστοκονιάματος και γίνονταν με την τεχνική της νωπογραφίας. Η διαδικασία αυτή έπρεπε να ολοκληρωθεί πριν να στεγνώσει το ασβεστοκονίαμα, γι' αυτό και η εκτέλεση προϋπέθετε μεγάλη δεξιότητα και ένα ολόκληρο επιτελείο από τεχνίτες, οι οποίοι δούλευαν ταυτόχρονα τις μεγάλες εικονιστικές συνθέσεις. Η ίδια τεχνική εφαρμόστηκε και σε φορητά αντικείμενα, όπως δείχνουν οι

ζωγραφισμένες επιτύμβιες στήλες, τα διάφορα πλακίδια από ασβεστοκονίαμα και οι πήλινες λάρνακες.

2. ΣΥΝΑΦΗ ΕΡΓΑ

Έχουν υπάρξει πολλές προσεγγίσεις για τη λύση του προβλήματος της αυτοματοποιημένης ανασύνθεσης των θραυσμένων αντικειμένων. Το άρθρο [1] αναφέρει μια αποτελεσματική λύση για το πρόβλημα της αυτόματης τρισδιάστατης ανασύνθεσης. Στο [2] το πρόβλημα της ανασύνθεσης των θραυσμένων τοιχογραφιών θεραπεύεται στην περίπτωση όπου η μόνη διαθέσιμη πληροφορία είναι ένα ζευγάρι διδιάστατων θραυσμένων εικόνων. Η προσέγγιση είναι αποτελεσματική αλλά υποφέρει από την ουσιαστική απαγόρευση ότι δεν υπάρχουν πληροφορίες τριών διαστάσεων για τα συνιστώμενα θραύσματα. Στο [3] αναλαμβάνεται η ανασύνθεση των διδιάστατων θραυσμάτων αντικειμένων. Η διαδικασία συγκρίνει τα κυρτά - περιγράμματα των θραυσμάτων σε προοδευτικά αυξανόμενες κλίμακες ανάλυσης, χρησιμοποιώντας έναν σταδιακά δυναμικά προγραμματισμένο και ακολούθως αντιστοιχισμένο αλγόριθμο. Επιπλέον, στο [4] οι συγγραφείς αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της ανασύνθεσης του θραυσμένου αγγείου με μέσα αξονικών συμμετρικών πολυωνυμικών μοντέλων επιφάνειας. Το ίδιο πρόβλημα αντιμετωπίζεται στο [5], όπου η ανασύνθεση πλήινων σκευών βασίζεται στη συνέχιση του μέσου χρώματος σε περιφερειακά εικονοκύτταρα αντίστοιχων θραυσμάτων. Η προσέγγιση ανασύνθεσης αγγειακού τύπου στο [6] χρησιμοποιεί λειτουργίες της καμπυλότητας για να εντοπίσει αντιστοιχίες συνεχόμενων περιγραμματικών εικονοκυττάρων των δύο θραυσμάτων. Οι δημοσιεύσεις [7-12] λύνουν το πρόβλημα της ανασύνθεσης των σκισμένων ή τεμαχισμένων αντικειμένων με βάση το περίγραμμα χρησιμοποιώντας διδιάστατες/τρειςδιάστατες απεικονίσεις των εγγράφων.

Οι προσεγγίσεις στο πρόβλημα της τρισδιάστατης ανασύνθεσης των θραυσμένων αντικειμένων συχνά ενσωματώνουν στοιχεία από την επιφάνεια και σχήματα από πρότυπη αναπαράσταση με σκοπό να καθορίσουν τη σωστή ακολουθία βέλτιστων επιφανειακών ευθυγραμμίσεων που πιθανώς λύνουν το πρόβλημα της ανασύνθεσης. Δηλαδή, στο [15], οι συγγραφείς αρχικά ελαττώνουν την διάσταση του προβλήματος της επιφανειακής ευθυγράμμισης περιορίζοντας τη φυσιολογική ευθυγράμμιση της επιφάνειας και αναζητώντας ιδανική αντιστοιχία ζευγαριών μέσω ενός ειδικού είδους σχήματος τυχαίου δείγματος. Στα [16,17] παρουσιάζεται η αυτόματη τρισδιάστατη ανασύνθεση μέσω αποστάσεων σημείο προς σημείο μεταξύ κοινών ιδωμένων όψεων των θραυσμένων αντικειμένων. Η ιδανική ευθυγράμμιση μεταξύ συνεχόμενων σπασμένων όψεων εντοπίζεται μέσω προσομοιωμένης ανόπτησης. Στο [18], οι συγγραφείς εισάγουν μια μέθοδο τρισδιάστατης ανασύνθεσης η οποία βασίζεται στα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των θραυσμάτων που υπολογίζονται μέσω κεντρικών τοπικών ολοκληρωμάτων μεγάλης κλίμακας. Οι ενδεχόμενες επιφάνειες θραύσης εντοπίζονται μέσω ενός γραφικού τμηματοποιημένου αλγορίθμου. Έπειτα, μία λύση στην ανασύνθεση των

θραυσμάτων καθορίζεται μέσω μελλοντικών -κατά βάση- παγκόσμιων καταχωρήσεων για την αντιστοίχιση ζευγαριών θραυσμάτων, και ταυτοχρόνως βεβιασμένων τοπικών καταχωρήσεων πολλαπλών θραυσμάτων. Η προσέγγιση που εισάγεται στο [19], διαφέρει από τις προηγούμενες με την έννοια ότι η προτεινόμενη μέθοδος για την τρισδιάστατη ανασύνθεση θραυσμένων αντικειμένων δεν είναι βασισμένη στο μέλλον, αλλά βασίζεται στη δράση μιας επαναληπτικής διαδικασίας πάνω σε μια κατασκευή ενός πυκνού δυαδικού δέντρου συνημμένου στα σημεία των σπασμένων όψεων. Δηλαδή, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν μια εναλλαγή μεταξύ ζευγαριών σημείων συνεχόμενων σπασμένων επιφανειών με σκοπό να καθοριστούν δυαδικές σχέσεις μεταξύ αυτών των επιφανειών. Για να καθοριστεί το μέγιστο σετ των γειτονικών σημείων που ικανοποιούν την ίδια δυαδική σχέση, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν έναν ιεραρχικά ομαδοποιημένο αλγόριθμο ο οποίος επαναληπτικά δρα επάνω στην ομαδοποίηση του δυαδικού δέντρου με έναν τρόπο περιφερειακής ανάπτυξης, ούτως ώστε να ελαττώνει την πυκνότητά του. Το πρόβλημα της τρισδιάστατης ανασύνθεσης των θραυσμένων τοιχογραφιών συζητείται στο [20]. Οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα οικονομικό σύστημα για τη συλλογή και επεξεργασία πληροφοριών τρισδιάστατων θραυσμάτων. Το σύστημα της απόκτησης απαιτεί ελάχιστη επίβλεψη, όπου ένας μη επαγγελματίας χρήστης μπορεί να σαρώσει το λιγότερο 10 θραύσματα την ώρα. Το σύστημα εφαρμόζεται στις τοιχογραφίες του Ακρωτηρίου της Θήρας.

3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΑΝΑΣΥΝΘΕΣΗΣ ΘΡΑΥΣΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

3.1 Αρχική επεξεργασία του θραύσματος

Η μέθοδος ανασύνθεσης σε δύο διαστάσεις ήταν η πρώτη μέθοδος που εφαρμόστηκε σε αρχαιολογικά ευρήματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι τοιχογραφίες της Θήρας όπου η μέθοδος εφαρμόστηκε με μεγάλη επιτυχία όπως αναφέρεται στη δημοσίευση [2]. Αυτές οι τοιχογραφίες έχουν σωθεί σε θραύσματα και η διαδικασία ανασύνθεσής τους είναι πολύ χρονοβόρα και επίπονη.



«Τοιχογραφία από το Ακρωτήρι της Θήρας»

Κατά τη μεθοδολογία αυτή κάθε θραύσμα αφού ενσωματωθεί κατά μήκος της ψιλής άμμου φωτογραφίζεται. Επομένως, το κάθε θραύσμα ενσωματώνεται σε ένα άσπρο φόντο σε μια τυχαία θέση. Η τοποθέτηση του θραύσματος στους άξονες

αποτελεί το «απόλυτο σύστημα ή πλαίσιο αναφοράς». Η κάθε φωτογραφία εισάγεται στον υπολογιστή για να εξαχθεί το περίγραμμά της. Όλα τα περιγράμματα των θραυσμάτων συγκρίνονται με τον τρόπο που θα αναφέρουμε στη συνέχεια. Η μεθοδολογία αυτή εξάγει τη μέγιστη δυνατή πληροφορία από το σχήμα του περιγράμματος του θραύσματος και μπορεί να εφαρμοστεί σε αντικείμενα που οι επιφάνειές τους είναι επίπεδες ή σχεδόν επίπεδες. Η μεθοδολογία της διδιάστατης ανασύνθεσης από τους συγγραφείς της δημοσίευσης [2] ήταν το σκαλοπάτι για να αναπτυχθεί η μεθοδολογία της τρισδιάστατης (3D) ανασύνθεσης που εισάγεται από τους συγγραφείς της δημοσίευσης [1], στην οποία θα αναφερθούμε στο κεφάλαιο 4.

3.1.1 Εξαγωγή περιστρεφόμενων περιγραμμάτων για να αντιμετωπιστούν θραύσματα με τυχαίο προσανατολισμό

Έστω δύο θραύσματα που ταιριάζουν με τυχαίο προσανατολισμό στο απόλυτο πλαίσιο αναφοράς. Για να ταιριάξουν πρέπει ένα τουλάχιστον από αυτά να εκτελέσει μια τυχαία περιστροφή. Για να εκτελεστεί αυτή η τυχαία περιστροφή θα πρέπει να δημιουργηθούν όλα τα δυνατά περιγράμματα του κάθε θραύσματος τα οποία προκύπτουν μετά από επαναλαμβανόμενες περιστροφές με συγκεκριμένο ΒΗΜΑ μοιρών. Εφόσον, επιλεγθεί $STEP=1^{\circ}$, τότε πρέπει να εκτελεστούν 360 περιστροφές στο αρχικό περίγραμμα γύρω από την αρχή των αξόνων του απόλυτου πλαισίου αναφοράς, λαμβάνοντας έτσι 360 περιγράμματα για κάθε θραύσμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον κάθε θραύσμα θεωρείται ένα άκαμπτο σώμα, η περιστροφή γύρω από ένα άλλο κέντρο είναι σύνθεση μιας παράλληλης μεταφοράς και περιστροφής γύρω από το κέντρο των αξόνων. Φυσικά, περιστροφή γύρω από το κέντρο κατά μία γωνία φ μετακινεί το σημείο (x, y) στο (X, Y) σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} Y \\ X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ x \end{bmatrix} \quad A.1$$

Άμεση εφαρμογή του τύπου αυτού, οδηγεί σε μη αποδεκτά περιγράμματα. Διόρθωση των λαμβανομένων περιγραμμάτων δεν είναι δυνατή, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι στα περιστραμμένα περιγράμματα που δημιουργούνται υπάρχουν κενά. Τα κενά αυτά δημιουργούνται γιατί η σχέση A.1 αναφέρεται σε συνεχή σώματα και όχι σε κβαντισμένα ψηφιακά, όπως είναι οι καμπύλες των περιγραμμάτων. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, στο αρχικά εξαγόμενο περίγραμμα του κάθε θραύσματος αυξάνεται η πυκνότητα του σε pixel. Με άλλα λόγια, το λεπτό περίγραμμα του ενός pixel δίνει τη θέση του σε ένα παχύ περίγραμμα, πάχους αρκετών pixels. Οι περιστροφές κατόπιν εφαρμόζονται στο πυκνό αυτό περίγραμμα του κάθε θραύσματος και έτσι λαμβάνονται συνεκτικά περιγράμματα χωρίς κενά, τα οποία μπορούν εύκολα να διορθωθούν.

3.1.2 Διαιρώντας το περίγραμμα σε μπλοκ

Το ληφθέν περίγραμμα διαιρείται σε μπλοκ. Ένα πλαίσιο 3x3 pixels (μάσκα) μετατοπίζεται καθ' όλο το περίγραμμα έτσι ώστε κάθε φορά, ένα pixel του περιγράμματος να είναι το κέντρο αυτής της μάσκας. Αυτή η μάσκα χρησιμοποιείται για την απαρίθμηση των pixels του περιγράμματος. Κάθε περίγραμμα του θραύσματος σαρώνεται οριζοντίως μέχρι να συναντήσει το πρώτο pixel του περιγράμματος. Αυτό είναι το πρώτο pixel που θα γίνει το κέντρο του 3x3 πλαισίου. Ακολούθως, το 2 pixel γίνεται το κέντρο της επόμενης 3x3 μάσκας κατά τη δεξιόστροφη φορά. Το pixel της μάσκας που καταλαμβάνεται από το pixel του περιγράμματος, γίνεται το pixel 3. Η διαδικασία κατασκευής μπλοκ τελειώνει όταν όλα τα pixels των περιγραμμάτων ανήκουν σε ένα μπλοκ.

3.2 Πραγματική μέθοδος εντοπισμού θραυσμάτων που ταιριάζουν

3.2.1 Ο καθορισμός των βέλτιστων παραμέτρων αντιστοίχισης

Ένα από τα δύο περιγράμματα των θραυσμάτων καθορίζεται αυθαίρετα, και κατά συνθήκη ορίζεται η βέλτιστη εικόνα αντιστοίχισης σε αυτό το περίγραμμα. Θα πρέπει να τονιστεί ότι το πρώτο pixel του κάθε μπλοκ έχει δύο ταιριασμένα pixels αφού για αυτή, και μόνο αυτή, την εφαρμογή, το πρώτο pixel του μπλοκ, με αριθμό m θεωρείται επίσης να ανήκει στο μπλοκ με τον αριθμό $(m - 1)$.

3.2.2 Οι έννοιες των «Σταθερών» και «Περιστρεφόμενων» αλυσίδων

Έστω δύο δοσμένα θραύσματα που οι επιφάνειες τους είναι επίπεδες και πρέπει να αποφασιστεί εάν τα σχήματα των περιγραμμάτων τους ταιριάζουν και, εάν ναι, πού ταιριάζουν. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, πρέπει:

Να επιλέγεται ως σταθερό ένα θραύσμα, το οποίο είναι τοποθετημένο στο απόλυτο σύστημα αναφοράς, και ονομάζεται "σταθερό θραύσμα".

Στη συνέχεια, να ορίζεται ένα μήκος σύγκρισης το οποίο μετριέται σε pixels, έστω, ΜΗΚΟΣ_ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ. Αρχικά, θεωρείται μια ομάδα από διαδοχικά pixels ξεκινώντας από το pixel 1. Αυτή η ομάδα των pixels περιγράμματος ονομάζεται "σταθερή αλυσίδα". Κατόπιν, ξεκινώντας από το τελευταίο pixel του περιγράμματος του προς σύγκριση θραύσματος (το οποίο θα αναφέρεται ως το «περιστρεφόμενο») και για ένα συγκεκριμένο προσανατολισμό του, ξεκινά η δημιουργία μιας περιστρεφόμενης αλυσίδας pixel γύρω από την σταθερή με τον εξής τρόπο:

- Το τελευταίο pixel M του περιστρεφόμενου θραύσματος τοποθετείται στην τέλεια θέση ταιριάσματος με το pixel 1 της σταθερής αλυσίδας.
- Ακολούθως, ένα πλήθος από $(k - 1)$ συνεχόμενα pixels του περιγράμματος του περιστρεφόμενου θραύσματος τοποθετούνται στο απόλυτο σύστημα

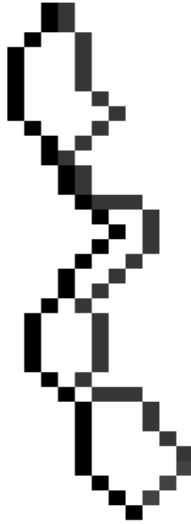
αναφοράς του σταθερού θραύσματος, με παράλληλη μετάθεση από το σύστημα αναφοράς του περιστρεφόμενου θραύσματος.

- Η παράλληλη μετάθεση των *rixels* του περιγράμματος του περιστρεφόμενου θραύσματος, έστω *A*, στο σύστημα αναφοράς του σταθερού θραύσματος, έστω *B*, τελειώνει όταν το τελευταίο *rixel* *k* ικανοποιεί ένα από τα ακόλουθα:
 - 1) Έστω η ευθεία με κλίση κάθετη στη μέση κλίση των *L* τελευταίων *rixel* της σταθερής αλυσίδας η οποία διέρχεται από το τελευταίο *rixel* της αλυσίδας αυτής και θα την ονομάσουμε «ευθεία φράγμα». Εάν η κλίση είναι άπειρη, τότε η «ευθεία φράγμα» είναι παράλληλη με τον άξονα *y* στο απόλυτο σύστημα αναφοράς του σταθερού θραύσματος. Η παράλληλη μετάθεση της περιστρεφόμενης αλυσίδας σταματά όταν το *rixel* *k* συναντήσει την «ευθεία φράγμα» για πρώτη φορά.
 - 2) Έστω ότι το *rixel* *k* είναι μεγαλύτερο από έναν αριθμό, που θα αποκαλείται ΥΠΕΡΒΟΛΙΚΟ_ΜΗΚΟΣ και η συνθήκη 1 δεν έχει ικανοποιηθεί ακόμα. Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι τα δύο περιγράμματα δεν ταιριάζουν σε αυτή τη θέση και για τον συγκεκριμένο προσανατολισμό των θραυσμάτων *A* και *B*.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τους άλλους προσανατολισμούς των περιστρεφόμενων αλυσίδων.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, και εάν *M* είναι ο συνολικός αριθμός *rixel* περιγράμματος του περιστρεφόμενου θραύσματος και *N* είναι ο συνολικός αριθμός *rixel* περιγράμματος του σταθερού θραύσματος, χτίζονται περιστρεφόμενες αλυσίδες αρχίζοντας, για κάθε διαφορετικό προσανατολισμό του περιστρεφόμενου θραύσματος, από το *rixel* (*M* - *j*) όπου *j* = 1, 2, ..., *M* - 1, γύρω από τις σταθερές αλυσίδες

$\#l, \#mod_N(l + 1), \dots,$ και $\#mod_N(l + COMP_LEN - 1)$ με $l = 2, 3 \dots, N$ του σταθερού θραύσματος. Δημιουργούνται λοιπόν με αυτό τον τρόπο $\frac{360}{STEP} * M * N$ ζεύγη αλυσίδων, για κάθε ζεύγος συγκρινόμενων θραυσμάτων, στα οποία εφαρμόζονται τα προτεινόμενα κριτήρια ταιριάσματος που παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Σχήμα 1: Δύο αλυσίδες rixel, η σταθερή (μαύρη γραμμή) και η περιστρεφόμενη (σκούρα γκρι γραμμή), κτισμένες στο απόλυτο σύστημα αναφοράς, μαζί με την «ευθεία φράγμα» (γκρι γραμμή)

3.2.3 Πρώτο κριτήριο ταιριάσματος περιγραμμάτων των θραυσμάτων

Ένα μέτρο του ταιριάσματος του σχήματος της σταθερής αλυσίδας με μήκος ΜΗΚΟΣ_ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ και της περιστρεφόμενης αλυσίδας με κυμαινόμενο μήκος, είναι ο αριθμός των rixels που περικλείονται από αυτές τις δύο αλυσίδες και η «ευθεία φράγμα» που τις ενώνει.

Σε αυτό το στάδιο μετρώνται τόσο τα rixels που ανήκουν στο εσωτερικό και των δύο θραυσμάτων, όσο και εκείνα που ανήκουν στο κενό μεταξύ τους. Δεν μετρώνται τα rixels που ανήκουν στην σταθερή αλυσίδα, ούτε όμως τα rixels της περιστρεφόμενης αλυσίδας που βρίσκονται σε τέλεια θέση ταιριάσματος. Επομένως, θεωρείται ότι τα περιγράμματα δύο θραυσμάτων, έστω A και B , ταιριάζουν στα rixels P_A και P_B αντίστοιχα, εάν ο αριθμός των rixels που περικλείονται από τις δύο αλυσίδες που ορίζονται παραπάνω, είναι μικρότερος από ένα επιλεγμένο αριθμό, τον οποίο θα αποκαλούμε ΜΕΓΙΣΤΟ_ΕΜΒΑΔΟΝ.

Η κατάλληλη επιλογή του ΜΕΓΙΣΤΟ_ΕΜΒΑΔΟΝ εξαρτάται από τον στατιστικά αναμενόμενο βαθμό της φθοράς ή κακής σάρωσης του θραύσματος, από το επιλεγμένο ΜΗΚΟΣ_ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ και τέλος από την ψηφιακή ανάλυση των ψηφιακών εικόνων των θραυσμάτων. Στην ακραία περίπτωση, όπου δεν υπάρχει φθορά, μπορεί κανείς να επιλέξει μια πολύ μικρή τιμή του ΜΕΓΙΣΤΟ_ΕΜΒΑΔΟΝ.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα και για τον τέλει προσανατολισμό του περιστρεφόμενου θραύσματος, καθώς η τιμή του ΜΕΓΙΣΤΟ_ΕΜΒΑΔΟΝ αυξάνεται, η πιθανότητα να εμφανίζονται τυχαία λανθασμένα ταιριάσματα μεταξύ δύο αλυσίδων είναι μη μηδενική. Αυτό συμβαίνει γιατί, δοθέντων των m προηγούμενων rixels του περιγράμματος, το $(m + 1)$ rixel έχει ένα περιορισμένο αριθμό πιθανών θέσεων. Συμπερασματικά, μπορεί να διατυπωθεί ότι για ένα δοσμένο σύνολο θραυσμάτων και ένα επιλεγμένο ΜΗΚΟΣ_ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ είναι

δυνατό να επιλεγθεί τιμή του ΜΕΓΙΣΤΟ_ΕΜΒΑΔΟΝ έτσι ώστε να μειώνονται δραστικά τα τυχαία λανθασμένα ταιριάσματα. Προκειμένου να μειωθεί περαιτέρω ο αριθμός αυτών των λανθασμένων ταιριασμάτων γίνεται χρήση και άλλων δύο κριτηρίων που βασίζονται στην πληροφορία περιγράμματος και αναλύονται στη συνέχεια.

3.2.4 Δεύτερο κριτήριο ταιριάσματος

Έστω ότι το πρώτο κριτήριο ικανοποιείται για τα θραύσματα A και B στα pixels P_A και P_B αντίστοιχα, για μία συγκεκριμένη περιστρεφόμενη αλυσίδα. Αν αυτό το ζεύγος pixel είναι μία πραγματική θέση ταιριάσματος, τα δύο θραύσματα δεν πρέπει να επικαλύπτονται καθόλου. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα pixels που περιλαμβάνονται από την σταθερή και την περιστρεφόμενη αλυσίδα πρέπει να βρίσκονται στο κενό μεταξύ των δύο θραυσμάτων.

Προφανώς, το δεύτερο κριτήριο ταιριάσματος μπορεί να είναι η απαίτηση αυτή η συνθήκη να ισχύει. Στην πράξη όμως, υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις από την τέλεια απεικόνιση των θραυσμάτων που οφείλονται σε ατέλειες κατά τη διάρκεια της σάρωσης και της ψηφιακής επεξεργασίας.

Άρα, το δεύτερο κριτήριο ταιριάσματος είναι η απαίτηση ο αριθμός των pixels που περιλαμβάνονται από την σταθερή και την περιστρεφόμενη αλυσίδα και ανήκουν στο κενό μεταξύ των δύο θραυσμάτων να είναι ένα αρκετά σημαντικό ποσοστό, έστω GP , του συνολικού αριθμού των εσώκλειστων pixels ή του μέγιστου επιτρεπτού εμβαδού ΜΕΓΙΣΤΟ_ΕΜΒΑΔΟΝ. Η ακριβής τιμή του GP , όπως και του ΜΕΓΙΣΤΟ_ΕΜΒΑΔΟΝ καθορίζονται κάθε φορά από τις συνθήκες της εφαρμογής.

3.2.5 Τρίτο κριτήριο ταιριάσματος

Έστω ότι τα δύο προηγούμενα κριτήρια ταιριάσματος των περιγραμμάτων ικανοποιούνται για δύο θραύσματα, έστω A και B , στα pixels P_A και P_B αντίστοιχα, και για ένα συγκεκριμένο προσανατολισμό της περιστρεφόμενης αλυσίδας.

Στις θέσεις αυτές και για τον ίδιο προσανατολισμό, συνεχίζεται το χτίσιμο της σταθερής και της περιστρεφόμενης αλυσίδας, μέχρι να σχηματισθούν ολόκληρα τα περιγράμματα των θραυσμάτων A και B .

Το τρίτο κριτήριο είναι η απαίτηση ο αριθμός των επικαλυπτόμενων pixels του εσωτερικού των δύο θραυσμάτων να είναι μικρότερος από ένα όριο, έστω LB . Ένα δυναμικά οριζόμενο LB , ποσοστό του μέγιστου περιγράμματος των δύο θραυσμάτων, έστω LBP , θα είναι μια καλή επιλογή διότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του περιγράμματος των δύο θραυσμάτων τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα τα εσωτερικά τους να επικαλύπτονται στην περίπτωση που τα A και B δεν ταιριάζουν. Τα παραπάνω μπορούν να εκφραστούν με την παρακάτω σχέση:

$$LB = LBP * \max\{\text{length}(\text{countour}(A)), \text{length}(\text{countour}(B))\}$$

3.2.6 Κριτήριο ταιριάσματος περιγραμμάτων των θραυσμάτων, βασιζόμενο στη διαφορά «αθροίσματος γωνιών»

Προκειμένου να εφαρμοστούν τα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας στην κβαντισμένη περίπτωση που μας ενδιαφέρει, δηλαδή στην περίπτωση που οι καμπύλες είναι αλυσίδες pixels, ορίζουμε το άθροισμα γωνιών για κάθε αλυσίδα ως

$$SA = \sum_{\text{pixel αλυσίδας}} \text{απόλυτη γωνία block}$$

Εάν το μέγιστο εμβαδόν που εσωκλείεται από την σταθερή και την περιστρεφόμενη αλυσίδα είναι E και υπάρχει καθορισμένο μέγιστο φράγμα, έστω μ_{max} , της διαφοράς των αθροισμάτων γωνιών των δύο αυτών αλυσίδων.

Εάν d είναι η απόσταση μεταξύ της αρχής και του τέλους της σταθερής αλυσίδας και εάν $L = \text{ΥΠΕΡΒΟΛΙΚΟ_ΜΗΚΟΣ}$ τότε,

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

Προκειμένου λοιπόν να ληφθεί η απόφαση, εάν τα προαναφερθέντα κριτήρια εμβαδού θα εφαρμοσθούν σε ένα ζεύγος αλυσίδων που αρχίζουν στα pixels P_A και P_B αντίστοιχα, εφαρμόζεται το κριτήριο διαφοράς αθροισμάτων γωνιών. Σύμφωνα με αυτό αν τα αθροίσματα των γωνιών της σταθερής και της περιστρεφόμενης αλυσίδας διαφέρουν περισσότερο από μ_{max} , τότε τα δύο περιγράμματα δεν ταιριάζουν σε αυτή την θέση και για τον συγκεκριμένο προσανατολισμό των αθροισμάτων A και B . Η διαδικασία εφαρμογής των προαναφερθέντων κριτηρίων ταιριάσματος περιορίζεται στα ζεύγη αλυσίδων των οποίων η διαφορά των αθροισμάτων γωνιών τους είναι μικρότερη ή ίση από μ_{max} . Η απαίτηση η διαφορά αθροισμάτων γωνιών της σταθερής και της περιστρεφόμενης αλυσίδας να είναι αρκετά μικρή, είναι αναγκαία αλλά όχι και ικανή συνθήκη ταιριάσματος.

Εφόσον ο προσανατολισμός της περιστρεφόμενης αλυσίδας στο απόλυτο σύστημα αναφοράς του είναι εντελώς τυχαίος, για να βρεθεί πιθανό ταίριασμα μεταξύ των θραυσμάτων A και B , θα έπρεπε να εφαρμοσθούν τα προηγούμενα κριτήρια εμβαδού για όλες τις αλυσίδες που αρχίζουν σε κάθε ζευγάρι pixel P_A και P_B για όλους τους πιθανούς σχετικούς προσανατολισμούς του σταθερού και του περιστρεφόμενου θραύσματος που δημιουργούνται με διακριτό βήμα περιστροφής $BHMA$.

Αν τα θραύσματα A και B έχουν περιγράμματα μήκους N και M pixel αντίστοιχα, το θραύσμα B πρέπει να στραφεί με βήμα $BHMA$ και κάθε φορά πρέπει να εκτελούνται $M * N$ υπολογισμοί εμβαδού και συγκρίσεις κατά μέγιστο.

Για να εξαντληθούν όλοι οι πιθανοί προσανατολισμοί του περιστρεφόμενου θραύσματος πρέπει να εκτελεστούν $\frac{360}{BHMA} * M * N$ υπολογισμοί εμβαδού και συγκρίσεις κατά μέγιστο. Για να βρίσκονται ακριβή ταιριάσματα πρέπει το $BHMA$ να είναι αρκετά μικρό.

Πρέπει να ισχύει $BHMA \leq 1^\circ$, οδηγώντας σε ένα τεράστιο αριθμό υπολογισμών και συγκρίσεων και σε ανάλογα μεγάλο χρόνο.

Εφαρμόζοντας το κριτήριο διαφοράς αθροισμάτων γωνιών επιτυγχάνεται δραστική και σημαντική μείωση του συνολικού αριθμού υπολογισμών και συγκρίσεων.

3.3 Εφαρμογή της αναφερθείσας μεθοδολογίας

Υπολογίζεται το άθροισμα των pixels περιγράμματος για τα περιγράμματα όλων των θραυσμάτων στα οποία θα εφαρμοστεί η μεθοδολογία. Να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε θραυσμένα αντικείμενα που έχουν επίπεδη επιφάνεια όπως είναι οι τοιχογραφίες ή τα αγγεία. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας ξεκινά από το θραύσμα με τον μεγαλύτερο αριθμό pixel περιγράμματος, το οποίο καλείται και θραύσμα αναφοράς.

Το θραύσμα αναφοράς εξετάζεται για πιθανό ταίριασμα με όλα τα άλλα περιγράμματα των θραυσμάτων του συνόλου, διαδοχικά. Με άλλα λόγια, το θραύσμα αναφοράς θεωρείται το σταθερό θραύσμα, ενώ κάθε ένα από τα υπόλοιπα λαμβάνεται διαδοχικά ως το περιστρεφόμενο θραύσμα. Εφαρμόζεται για κάθε ζεύγος σταθερού και περιστρεφόμενου θραύσματος η ακόλουθη διαδικασία, που αποτελείται από τα εξής βήματα:

Βήμα 1:

Για συγκεκριμένο περιστρεφόμενο θραύσμα, η διαδικασία που αναφέρθηκε εφαρμόζεται πρώτα για τον αρχικό προσανατολισμό στο απόλυτο σύστημα αναφοράς του θραύσματος.

Αρχίζοντας κάθε φορά από το pixel $(M_k - j), j = 0, 1, 2, \dots, M_k - 1$ του περιστρεφόμενου θραύσματος, διαδοχικά δημιουργούνται περιστρεφόμενες αλυσίδες pixel γύρω από την σταθερή αλυσίδα που αποτελείται από τα pixels:

$$\#l, \dots, \#mod_N(l + MΗΚΟΣ_ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ - 1)l = 2, 3, \dots, N$$

όπου M_k ο συνολικός αριθμός pixels περιγράμματος του περιστρεφόμενου θραύσματος k και N ο συνολικός αριθμός pixels περιγράμματος του θραύσματος αναφοράς.

Βήμα 2:

Για τον προσανατολισμό του περιγράμματος του περιστρεφόμενου θραύσματος στο απόλυτο σύστημα αναφοράς του και για κάθε ζεύγος αλυσίδων που αρχίζουν στα pixels l, j αντίστοιχα, εφαρμόζεται το προαναφερθέν κριτήριο διαφοράς αθροίσματος γωνιών. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται το άθροισμα γωνιών τόσο της σταθερής όσο και της περιστρεφόμενης αλυσίδας, έστω SA_f και SA_γ , και εάν $|(SA_f - SA_\gamma)| > \mu_{max}$, τότε τα δύο περιγράμματα δεν ταιριάζουν για αυτή την θέση και τον σχετικό προσανατολισμό των θραυσμάτων. Αντίθετα, αν ισχύει

$$|(SA_f - SA_\gamma)| \leq \mu_{max} \text{ προχωράμε στο Βήμα 3.}$$

Βήμα 3:

Σε κάθε ζεύγος (l, j) που ικανοποιεί τον προηγούμενο περιορισμό, υπολογίζεται ο αριθμός των pixels $E_{l,j}$ που περικλείονται από τη σταθερή και την περιστρεφόμενη αλυσίδα καθώς και ο αριθμός των pixels $G_{l,j}$ που βρίσκονται στο κενό μεταξύ των δύο θραυσμάτων. Εάν το $E_{l,j}$ είναι μικρότερο από το καθορισμένο κατώφλι T και το $G_{l,j}$ ικανοποιεί το δεύτερο κριτήριο ταιριάσματος, τότε θεωρείται ότι υπάρχει πιθανότητα τα δύο εξεταζόμενα θραύσματα να ταιριάζουν στα pixels (l, j) αντίστοιχα. Η τιμή του κατωφλίου T μπορεί να υπολογιστεί ως εξής: Έστω ότι (l, j) είναι μια πραγματική θέση αντιστοιχίας των δύο θραυσμάτων. Κατόπιν, $T = \text{ΜΕΓΙΣΤΟ_ΕΜΒΑΔΟΝ} + Q_R$, όπου Q_R είναι ένα σφάλμα που οφείλεται στην κβάντωση της περιστροφής. Μια καλή εκτίμηση για τη μέγιστη τιμή του Q_R είναι:

$$\max(Q_R) = \frac{1}{2} \text{COMP_LEN}^2 \tan\left(\frac{BHMA}{2}\right).$$

Άρα εάν για ένα ζεύγος (l, j) ισχύει $E_{l,j} \leq T_1$ και εάν $G_{l,j}$ ικανοποιεί το δεύτερο κριτήριο ταιριάσματος, ελέγχεται αν ισχύει το τρίτο κριτήριο ταιριάσματος. Αν το κριτήριο αυτό ικανοποιείται, το σύστημα αποφασίζει με βεβαιότητα ότι τα δύο θραύσματα μπορεί να ταιριάζουν σε αυτά τα δύο pixels. Διαφορετικά, εάν ένα από τα προαναφερθέντα κριτήρια δεν ικανοποιείται, το σύστημα αποφασίζει ότι δεν είναι δυνατή η αντιστοίχιση μεταξύ του θραύσματος αναφοράς και του συγκεκριμένου προσανατολισμού του περιστρεφόμενου θραύσματος στο (l, j) . Με άλλα λόγια, εάν υπάρχει ένα πραγματικό ταίριασμα μεταξύ των δύο θραυσμάτων σε ένα ζευγάρι από pixels (l, j) , λόγω του χαρακτηριστικού σχήματος του περιγράμματός τους, και μόνο τότε, αυτό το ζεύγος πρέπει να ανήκει στο σύνολο που προτείνεται από το σύστημα.

Βήμα 4:

Τα παραπάνω βήματα εφαρμόζονται για όλους τους πιθανούς προσανατολισμούς του περιστρεφόμενου θραύσματος με βήμα περιστροφής $BHMA = 1^\circ$ και προτείνονται όλα τα πιθανά ζεύγη ταιριάσματος $(l, j)_i$.

Τελικά, σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, εάν υπάρχει πραγματικό ταίριασμα λόγω σχήματος περιγράμματος και μόνο μεταξύ των δύο θραυσμάτων στο ζεύγος pixels $(l, j)_i$, για ένα συγκεκριμένο προσανατολισμό του περιστρεφόμενου θραύσματος i , τότε αυτό το ζεύγος βρίσκεται ανάμεσα στα προτεινόμενα από το λογισμικό.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΣΥΝΘΕΣΗ ΘΡΑΥΣΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

4.1 Προκαταρκτική επεξεργασία του θραύσματος

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στην τρισδιάστατη ανασύνθεση θραυσμάτων η οποία είναι η επόμενη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μετά την διδιάστατη όπως αναφέρεται στη δημοσίευση [1]. Στη μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιούνται αρκετές πληροφορίες, τις οποίες πήραμε μέσω της διδιάστατης ανασύνθεσης, με βασική διαφορά ότι τώρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις επιφάνειες θραύσης των αντικειμένων. Αρχικά, εκτελείται μία τρισδιάστατη (3D) σάρωση των διαθέσιμων θραυσμάτων. Στη συνέχεια, για κάθε θραύσμα αυτόματα σημειώνεται η άνω επιφάνεια του, η κάτω επιφάνεια του και η πλευρική του επιφάνεια όπως θα αναφερθούμε στην ενότητα 5.1. Επίσης, καθορίζεται ο άξονας ο οποίος περνάει από το «κέντρο βάρους» του θραύσματος, έχει τη μικρότερη ροπή αδράνειας και είναι κάθετος στην άνω και κάτω επίπεδη επιφάνεια. Επιπλέον, περιστρέφονται όλα τα κομμάτια έτσι, ώστε οι κεντρικοί τους άξονες να είναι παράλληλοι προς τον άξονα z . Τέλος, για να αντιμετωπιστεί ο τυχαίος προσανατολισμός των θραυσμάτων, δημιουργείται ένα σύνολο περιστρεφόμενων εκδοχών για κάθε θραύσμα, με περιστροφή γύρω από τον κεντρικό του άξονα (z -άξονας) με μια μικρή γωνία $\delta\theta$. Η ενέργεια αυτή γίνεται μόνο μία φορά για κάθε θραύσμα.

4.2 Χρησιμοποιώντας τις έννοιες του «σταθερού» και «περιστρεφόμενου» θραύσματος.

Έστω ότι δίνονται δύο θραύσματα και πρέπει να αποφασιστεί εάν ταιριάζουν και αν ναι, πού ταιριάζουν, χρησιμοποιώντας όλη την τρισδιάστατη πληροφορία. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να ακολουθηθεί η παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά, επιλέγεται ένα θραύσμα, που ονομάζεται «σταθερό» και τοποθετείται σε ένα σύστημα αναφοράς έτσι ώστε ο κεντρικός του άξονας να συμπίπτει με τον z - άξονα. Στη συνέχεια, μελετάται το μήκος σύγκρισης το οποίο μετρίεται σε pixels και συμβολίζεται με L_c . Χρησιμοποιώντας τον όρο pixels υποδηλώνονται τα σημεία του ψηφιακού περιγράμματος της άνω επίπεδης επιφάνειας του θραύσματος. Εν συνεχεία, εξετάζεται μια ομάδα από διαδοχικά L_c pixels ξεκινώντας από το πρώτο pixel της καμπύλης περιγράμματος C^F της επίπεδης επιφάνειας του θραύσματος. Αυτά τα pixels του περιγράμματος ονομάζονται «σταθερή αλυσίδα» και συμβολίζονται με Γ_1^F , όπου F (fixed) σημαίνει «σταθερός» και «1» το pixel έναρξης της καμπύλης περιγράμματος C^F .

Ακολουθως, τοποθετείται το δεύτερο θραύσμα στο ίδιο καρτεσιανό σύστημα και πάλι έτσι, ώστε ο κεντρικός του άξονας να είναι παράλληλος στον z – άξονα και οι άνω επίπεδες επιφάνειες των δύο θραυσμάτων να βρίσκονται στο ίδιο, κάθετο στον z – άξονα, επίπεδο. Το δεύτερο θραύσμα έχει αυθαίρετο προσανατολισμό γύρω από τον κεντρικό του άξονα καθώς και μία αυθαίρετη θέση. Προηγουμένως, έχουν παραχθεί όλες οι περιστρεφόμενες εκδοχές του θραύσματος.

Για κάθε γωνία θ_i , η κίνηση του περιστρεφόμενου θραύσματος γύρω από το σταθερό θραύσμα μεταφράζεται ως εξής:

Η καμπύλη περιγράμματος C^R της επίπεδης επιφάνειας του περιστρεφόμενου θραύσματος αποτελείται από M pixels έτσι ώστε το πρώτο pixel της C^F και το τελευταίο pixel της C^R να συμπίπτουν. Στη συνέχεια, ορίζεται η «τερματική επιφάνεια φραγμού» B_1^T ως το επίπεδο που διέρχεται από το τελευταίο pixel της σταθερής αλυσίδας, η οποία είναι παράλληλη προς τον κεντρικό άξονα του σταθερού θραύσματος και κάθετη προς την ευθεία που ενώνει το πρώτο και το τελευταίο pixel της σταθερής αλυσίδας.

Επιπροσθέτως, δημιουργείται μια περιστρεφόμενη αλυσίδα $\Gamma_{1,M}^R$ που κινείται αριστερόστροφα στη C^R που ξεκινάει από το pixel M και τελειώνει στη διατομή της τερματικής επιφάνειας φραγμού με τη C^R , αν υπάρχει. Καθώς κινείται αριστερόστροφα στη C^R αυξάνεται το μήκος της $\Gamma_{1,M}^R$, αν ο αριθμός των pixels υπερβαίνει ένα κατώφλι L^{EX} , τότε απορρίπτεται η πιθανή θέση αντιστοιχίας.

Στη συνέχεια, ορίζονται οι έννοιες του «σταθερού πετάσματος» και «περιστρεφόμενου πετάσματος» («fixed escarpment» και «rotated escarpment» αντίστοιχα). Για τον ορισμό τους, προσδιορίζεται πρώτα η «αρχική επιφάνεια φραγμού» B_1^S , ως το επίπεδο που διέρχεται από το πρώτο σημείο της σταθερής αλυσίδας, η οποία είναι παράλληλη προς την τελική επιφάνεια φραγμού B_1^T . Κατόπιν, ορίζεται ένα κοινό επίπεδο πυθμένα για το ζεύγος A, B το οποίο είναι το κάτω επίπεδο είτε του A , είτε του B . Στη συνέχεια, το «σταθερό πέτασμα», E_1^F , είναι το επίπεδο που βρίσκεται στη πλευρική συνοριακή επιφάνεια του σταθερού θραύσματος που περικλείεται από την άνω επιφάνεια του θραύσματος, το κοινό κάτω επίπεδο που έχουμε ορίσει, καθώς και τα αρχικά και τελικά επίπεδα φραγμού. Ομοίως, ορίζουμε την έννοια του «περιστρεφόμενου πετάσματος», $E_{1,M}^R$, ως την πλευρική οριακή επιφάνεια του περιστρεφόμενου θραύσματος, που περικλείεται από την άνω επιφάνεια, τη κάτω επιφάνεια, τα αρχικά και τελικά επίπεδα φραγμού.

Η προηγούμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται αλλάζοντας το σημείο εκκίνησης της περιστρεφόμενης αλυσίδας η οποία κινείται από το pixel M στο pixel 1 της C^R , σχηματίζοντας έτσι ένα σύνολο από περιστρεφόμενες αλυσίδες και περιστρεφόμενα πετάσματα $\Gamma_{1,m}^R, E_{1,m}^R, m = M, M - 1, \dots$. Τέλος, παράγονται δύο σύνολα των σταθερών αλυσίδων και των σταθερών πετασμάτων μετακινώντας το σημείο εκκίνησης « k » της σταθερής αλυσίδας κατά μήκος της C^F δηλαδή $\Gamma_k^F, E_k^F, k = 1, 2, \dots$

Επομένως, για δύο δοσμένα θραύσματα, η ακριβής μορφή των σταθερών και περιστρεφόμενων πετασμάτων E_k^F, E_k^R, m εξαρτάται από: το πρώτο και τελευταίο σημείο των $\Gamma_k^F, \Gamma_{k,m}^R$, τη θέση των κάτω επιπέδων τους σε σχέση με την κοινή άνω επιφάνειά τους και τη γωνία περιστροφής θ_i . Ακόμη, εάν για μια συγκεκριμένη θέση του σταθερού πετάσματος δεν υπάρχει τομή μεταξύ της τελικής επιφάνειας φραγμού B_k^T και του περιστρεφόμενου θραύσματος, τότε δεν ορίζεται περιστρεφόμενο

πέτασμα. Για το σύστημα αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει ταίριασμα στην ειδική σχετική θέση των θραυσμάτων A, B .

4.3 Τέσσερα κριτήρια αντιστοιχίας

Αρχικά, για να εξεταστεί εάν δύο θραύσματα A, B ταιριάζουν, εφαρμόζεται κατάλληλα κάθε περιστρεφόμενη εκδοχή του B δίπλα στο A και ορίζονται οι πιθανές επιφάνειες επαφής μεταξύ τους. Σε κάθε πιθανή θέση ταιριάσματος εφαρμόζονται τέσσερα κριτήρια:

4.3.1 Το πρώτο κριτήριο αντιστοιχίας

Έστω, δύο οποιαδήποτε θραύσματα A, B και όλα τα συναφή υπάρχοντα ζεύγη:

- 1) των σταθερών και περιστρεφόμενων αλυσίδων $(\Gamma_k^F, \Gamma_{k,m}^R)$,
- 2) των σταθερών και περιστρεφόμενων πετασμάτων $(E_k^F, E_{k,m}^R)$,
- 3) της αρχικής και τελικής επιφάνειας φραγμού (B_k^S, B_k^T) .

Επιπλέον, τα δύο θραύσματα τοποθετούνται στο ίδιο πλαίσιο αναφοράς έτσι, ώστε η άνω επίπεδη επιφάνειά τους να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο, κάθετα προς τον z -άξονα. Στη συνέχεια, συμβολίζεται με $V_{k,m}$ η κλειστή περιοχή που οριοθετείται από:

- 1) τα σταθερά και περιστρεφόμενα πετάσματα του ίδιου ζεύγους $(E_k^F, E_{k,m}^R)$,
- 2) της αρχικής και τελικής επιφάνειας φραγμού του ίδιου ζεύγους (B_k^S, B_k^T) ,
- 3) το κοινό άνω επίπεδο των δύο θραυσμάτων και
- 4) το κάτω επίπεδο του A ή B το οποίο είναι πλησιέστερο προς τη κοινή άνω επιφάνεια.

Έχει υπολογιστεί ο όγκος $\tau_{k,m}$ όλων αυτών των κλειστών περιοχών $V_{k,m}$. Αν $\tau_{k,m}$ είναι μικρότερο από ένα προκαθορισμένο κατώφλι τ_T , τότε θεωρούμε την συγκεκριμένη θέση ως δυνατή θέση αντιστοιχίας των δύο θραυσμάτων A, B .

Σημειώνεται ότι η σωστή επιλογή του τ_T εξαρτάται από το μήκος σύγκρισης L_C , την απόσταση της κοινής κάτω επιφάνειας με το άνω επίπεδο και το άνοιγμα μεταξύ των δύο θραυσμάτων που ταιριάζουν.

4.3.2 Δεύτερο κριτήριο αντιστοιχίας: η απαγόρευση των τοπικών και συνολικών αλληλοεπικαλύψεων στο επίπεδο επαφής $V_{k,m}$

Στην ιδανική περίπτωση, όπου δύο θραύσματα A, B ταιριάζουν κατάλληλα, δε πρέπει να υπάρχει επικάλυψη στα μεταξύ τους σταθερά και περιστρεφόμενα πετάσματα. Ωστόσο, λόγω των αναπόφευκτων ανακριβειών της ψηφιακής αναπαράστασης των θραυσμάτων, μπορεί κανείς να αναμένει επικαλύψεις μεταξύ αυτών των πετασμάτων ακόμη και στην περίπτωση ενός τέλει φυσικού ταιριάσματος. Ως εκ τούτου, εάν σε μια συγκεκριμένη θέση των θραυσμάτων A, B το Κριτήριο 1 ικανοποιείται, τότε απαιτείται η τοπική επικάλυψη μεταξύ του σταθερού

πετάσματος E_k^F και του περιστρεφόμενου $E_{k,m}^R$ να είναι μικρότερη από ένα αποδεκτό όριο τ^O . Αν η επικάλυψη είναι μεγαλύτερη από το τ^O πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αυθαιρεσία στην παράλληλη μετάφραση του θραύσματος B . Κατά συνέπεια, για να καταργηθεί αυτή η αυθαιρεσία πρέπει: Για κάθε σημείο « p » του περιστρεφόμενου πετάσματος, να λαμβάνεται ένα σημείο τομής του επιπέδου με τον κάθετο άξονα z περνώντας από το « p » με το σταθερό πέτασμα. Επομένως, η ελάχιστη απόσταση του σημείου « p » από όλα τα σημεία αυτής της τομής συμβολίζεται με μ^p και $\vec{\mu}^p$ θα είναι το αντίστοιχο διάνυσμα. Ανάμεσα σε όλα αυτά τα $\vec{\mu}^p$ εντοπίζουμε αυτό με το μέγιστο μήκος, το οποίο συμβολίζεται με $\vec{\mu}$.

Παράλληλα μεταφράζεται το περιστρεφόμενο θραύσμα B με $-\vec{\mu}$ και υπολογίζεται εκ νέου η επικάλυψη του όγκου. Αν η επικάλυψη του όγκου είναι μικρότερη από το τ^O και το κριτήριο 1 εξακολουθεί να ικανοποιείται, τότε λαμβάνεται υπόψη η συνολική επικάλυψη των δυο θεωρούμενων θραυσμάτων. Δηλαδή, θα επιτρέπεται μια συνολική επικάλυψη μεταξύ των ψηφιακών αναπαραστάσεων των συγκεκριμένων θραυσμάτων και απαιτείται η επικάλυψη του όγκου να είναι μικρότερη από ένα κατάλληλο κατώφλι τ^{FO} . Προφανώς, η ακριβής τιμή του ορίου αυτού εξαρτάται από τον όγκο των θραυσμάτων και την ποιότητα της χρησιμοποιούμενης μεθόδου για την ψηφιακή αναπαράσταση.

4.3.3 Το τρίτο κριτήριο αντιστοιχίας: συσχετίζοντας την γεωμετρία της επιφάνειας επαφής με το μέγιστο επιτρεπόμενο όγκο του τομέα $V_{k,m}$

Το τρίτο κριτήριο, λειτουργώντας ως «φίλτρο απόρριψης αντιστοιχιών», έχει επιταχύνει δραστικά την απόδοση της αυτόματης τρισδιάστατης (3D) ανασύνθεσης. Η βασική ιδέα μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Έστω ότι σε μια ορισμένη θέση των θραυσμάτων A, B συμβαίνει τέλει ταίριασμα, με την έννοια ότι $t_{k,m}$ είναι μηδέν ή ισοδύναμα τα πετάσματα $E_k^F, E_{k,m}^F$ συμπίπτουν. Σε αυτή την ιδανική περίπτωση, σε κάθε σημείο των πετασμάτων τα μοναδιαία διανύσματα \vec{n}_F και \vec{n}_R είναι αντίθετα. Δεδομένου ότι πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η παρουσία αναπόφευκτων κενών μεταξύ των θραυσμάτων που ταιριάζουν, λόγω της κατεργασίας του κατακερματισμένου αρχικού αντικειμένου και / ή λόγω φθοράς, θα υπάρχουν σίγουρα αποκλίσεις από αυτή την ιδανική κατάσταση. Στην πραγματικότητα, μπορεί κανείς να αναμένει διαισθητικά ότι αν υπάρχει μια σημαντική διαφοροποίηση των μοναδιαίων διανυσμάτων \hat{n} σε όλη την οριακή επιφάνεια του τομέα $V_{k,m}$, τότε ο όγκος του $t_{k,m}$, δεν μπορεί να είναι ικανοποιητικά μικρός. Με άλλα λόγια, στην περίπτωση αυτή, το κριτήριο 1 δεν ικανοποιείται. Μια αυστηρή διατύπωση αυτής της διαισθητικής δήλωσης περιγράφεται παρακάτω.

Τα θραύσματα A, B τοποθετούνται όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.2 και ο όγκος $t_{k,m}$ είναι μικρότερος από τη μέγιστη αποδεκτή τιμή τ^T . Στη συνέχεια, το ολοκλήρωμα των γωνιών που ορίζεται μέσω του τύπου $\mu = \oint_{\partial V_{k,m}} \arctan \left(\frac{\vec{n}^* \cdot \vec{t}}{\vec{n}^* \cdot \vec{n}} \right) dS$ ικανοποιεί την ανισότητα (3.2), με την r_T, r_0 να είναι οι αποστάσεις των B_k^S, B_k^T από τον κεντρικό άξονα του E_k^F , $\Delta\theta = \theta_T - \theta_0$, να είναι η διέδρη γωνία που περικλείει το

$E_{k,m}^R$, $\Delta z = T - S$ η απόσταση μεταξύ των κοινών άνω και κάτω επιπέδων των θραυσμάτων και $r(\theta, T), r(\theta, S)$ το ανώτερο και το κατώτερο όριο των καμπυλών του $E_{k,m}^R$. Ισοδύναμα, εάν, για την τρέχουσα θέση των θραυσμάτων A, B , η μέση γωνία του κανονικού διανύσματος $\partial V_{k,m}$, υπερβαίνει το άνω όριο (3.2), τότε η θέση αυτή δεν είναι μια πραγματική θέση αντιστοιχίας. Το κριτήριο αυτό απόρριψης έχει ληφθεί από την επίλυση του προβλήματος μεταβολής που αναφέρεται παρακάτω.

Το πρόβλημα μεταβολής χρησιμοποιώντας το λογισμό των μεταβολών.

Έστω μια περιοχή U με οριακή επιφάνεια ∂U που αντιπροσωπεύει το διάκενο μεταξύ δύο γειτονικών θραυσμάτων και τα τμήματα της πλευρικής τους επιφάνειας σε αυτή τη θέση, αντίστοιχα. Το ολοκλήρωμα των γωνιών των μοναδιαίων διανυσμάτων στο ∂U εκφράζεται μέσω του ολοκληρώματος:

$$\mu = \oint_{\partial U} \arctan \left(\frac{\vec{n}^* \cdot \vec{j}}{\vec{n}^* \cdot \vec{i}} \right) dS.$$

Στη συνέχεια, το πρόβλημα είναι να βρεθούν τα άκρα της ποσότητας μ , δεδομένου ότι ο όγκος V της περιοχής U οριοθετείται από την ανισότητα

$0 \leq V \leq V_M$. Ως εκ τούτου, μπορούμε να διατυπώσουμε το πρόβλημα με τη χρήση του ολοκληρώματος Lagrangian

$$\iint_{ER} f(\vec{x}, \frac{\partial \vec{x}}{\partial u}, \frac{\partial \vec{x}}{\partial v}, u, v) dudv = \mu - \lambda V,$$

όπου (u, v) είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές της επιφάνειας ∂U , $\vec{x}(u, v)$ είναι το διάνυσμα θέσης ενός αυθαίρετου σημείου ∂U και $\frac{\partial \vec{x}}{\partial u}, \frac{\partial \vec{x}}{\partial v}$ οι μερικές παράγωγοι ως προς \vec{x} . Ως εκ τούτου, το πρόβλημα μετατρέπεται σε εξεύρεση επιφάνειας E^R (το περιστρεφόμενο πέτασμα) που τερματίζει στο όριο επιφάνειας φραγμού B^S, B^T και τα κοινά άνω και κάτω επίπεδα C, D έτσι, ώστε

$$\delta \iint_{ER} f(\vec{x}, \frac{\partial \vec{x}}{\partial u}, \frac{\partial \vec{x}}{\partial v}, u, v) dudv = 0.$$

Η διαμόρφωση προτείνει τη χρήση κυλινδρικών συντεταγμένων και η έκφραση του ∂U με θ και z να είναι ανεξάρτητες μεταβλητές. Στην πραγματικότητα, η $\vec{x}(r, \theta, z)$ είναι η θέση του διανύσματος ενός αυθαίρετου σημείου που βρίσκεται στο ∂U σε κυλινδρικές συντεταγμένες. Η αρχή του διανύσματος \vec{x} , θεωρείται ότι είναι στο εσωτερικό της περιοχής U για να εξασφαλιστεί η μοναδικότητα της αξίας του \vec{x} . Σαφώς $\vec{x}(\theta, z) = (r(\theta, z) \cos(\theta), r(\theta, z) \sin(\theta), z)$.

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες, ο όγκος V της περιοχής U είναι

$V = \iint_U dx dy dz$. Με την εφαρμογή του Θεωρήματος «Stokes» παίρνουμε

$$V = \frac{1}{3} \int_S^T \int_{\theta_0}^{\theta_T} r(\theta, z)^2 - zr(\theta, z) * \frac{\partial}{\partial z} r(\theta, z) d\theta dz.$$

Το πρόβλημα τώρα μπορεί να αναφέρεται σε ένα αυστηρό τρόπο ως εξής:

“Εύρεση των ακροτάτων της μ υπό τους περιορισμούς ότι $V \leq V_M$, όπου V_M είναι σταθερό, και οι επιφάνειες φραγμού $B^S \subset \partial U, B^T \subset \partial U$ είναι γνωστές και σταθερές επιφάνειες. Το σταθερό πέτασμα E^F , καθώς και η αρχική καμπύλη του περιστρεφόμενου πετάσματος E^R είναι επίσης γνωστά”. Με άλλα λόγια, το πρόβλημα είναι να καθοριστεί το περιστρεφόμενο πέτασμα που μεγιστοποιεί το $|\mu|$ όταν $V \leq V_M$. Μια γενική λύση στο πρόβλημα αυτό δίνεται στο ακόλουθο θεώρημα:

Θεώρημα. Έστω ένας σταθερός ορθογώνιος σωλήνας T , δηλαδή ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο απείρου μήκους, που οριοθετεί ένα διδιάστατο (2D) τομέα E^F σε μια ορισμένη επιφάνεια S^F . Ας θεωρηθεί ότι η Γ^F είναι το σημείο τομής του E^F με τον T . Άλλωστε Γ^R είναι ένα συγκεκριμένο κομμάτι στην ομαλή καμπύλη T το οποίο δεν διασχίζει τη Γ^F . Ως εκ τούτου, ο τομέας Ω που Γ^R και Γ^E καθορίζουν στο T . Προφανώς $(\Omega) \geq 0$. Δίνεται επίσης ένας σταθερός άξονας z ο οποίος είναι κάθετος προς 2 παράλληλα επίπεδα του T , όπου Ω και E^F είναι μη-τεμνόμενα και τοποθετείται επί της άλλης πλευράς του Γ^R σε σχέση με το Γ^F . Επίσης, το κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (r, θ, z) έχει τον z ως άξονα. Αυτό το σύστημα Γ^F περικλείεται από μία δίεδρη γωνία που ξεκινά από το θ_0 και τελειώνει στο θ_T . Εξετάζεται σε κάθε κομμάτι η λεία επιφάνεια E^R που οριοθετείται από τη Γ^R , με το μόνο περιορισμό ότι ο όγκος V της τρισδιάστατης (3D) περιοχής που περικλείεται από T , E^F και E^R έχει ένα άνω φράγμα $V \leq V_M$. Στη συνέχεια, η ποσότητα που ορίζεται μέσω του τύπου

$$\mu = \oint_{E^R} \arctan\left(\frac{\vec{n}^* \cdot \hat{j}}{\vec{n}^* \cdot \hat{t}}\right) dS - \oint_{E^F} \arctan\left(\frac{\vec{n}^* \cdot \hat{j}}{\vec{n}^* \cdot \hat{t}}\right) dS \text{ ικανοποιεί την ανισότητα,}$$

$$\left| \frac{\mu}{|\Delta\theta\Delta z|} \right| \leq \left| \ln\left(\frac{r_T}{r_0}\right) \right| + \left| \frac{\Delta\theta}{2} + \frac{\Delta z}{6\tau^T} \left[-r_0^2 + \frac{1}{\Delta\theta\Delta z} \int_{\theta_0}^{\theta_T} (T \cdot r(\theta, T)^2 - S r(\theta, S)^2) d\theta \right] \right|,$$

όπου r_T, r_0 είναι τα μήκη των ακτίνων των σημείων Γ^R , οι οποίες αντιστοιχούν σε θ_0 και θ_T αντίστοιχα, $\Delta\theta = \theta_T - \theta_0$, $\Delta z = T - S$ είναι η απόσταση των δύο επιπέδων του T που είναι κάθετα στο z και $r(\theta, T), r(\theta, S)$ είναι οι ακτίνες των τμημάτων των Γ^R για $z = T$ και $z = S$ αντίστοιχα.

4.3.4 Το τέταρτο κριτήριο αντιστοιχίας

Παρουσιάζεται ένα τέταρτο κριτήριο που είναι μια απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματική αντιστοιχία των δύο θραυσμάτων A, B . Το περιεχόμενο αυτού του κριτηρίου μπορεί να περιγραφεί διαισθητικά ως εξής: Τα δύο θραύσματα είναι σε επαφή με το k -th pixel της C^F και το M -th pixel της C^R . Σε αυτή τη θέση, οι αρχικές B_k^S και τελικές B_k^T επιφάνειες φραγμού είναι επακριβώς καθορισμένες. Κατά τη διαδικασία της δοκιμής, αν η θέση αυτή είναι μια πραγματική θέση αντιστοιχίας, ένα θραύσμα B περιστρέφεται γύρω από ένα κάθετο άξονα στο xy - επίπεδο που διέρχεται από το σημείο επαφής των δύο θραυσμάτων που προς στιγμήν το θεωρούν σταθερό. Καθώς το θραύσμα B περιστρέφεται, σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να μην τέμνει το τελικό επίπεδο φραγμού, ή δύναται να το τέμνει έτσι ώστε να σχηματίζουν ένα περιστρεφόμενο πέτασμα $E_{k,m}^R$ πάρα πολύ μεγάλο και πολύ «μακρινό» από το σταθερό πέτασμα. Ως εκ τούτου, τίθεται το ερώτημα πώς να συνδεθεί το μέγιστο επιτρεπόμενο πλάτος των $E_{k,m}^R$ με τον μέγιστο αποδεκτό όγκο τ^T του $V_{k,m}$. Υπό ορισμένες πολύ εύλογες συνθήκες, μπορεί κανείς να εκφράσει το πλάτος του $E_{k,m}^R$ μέσω του μήκους της περιστρεφόμενης αλυσίδας $\Gamma_{k,m}^R$, δεδομένου ότι το κοινό επίπεδο πυθμένα παραμένει το ίδιο. Με άλλα λόγια, το παραπάνω ερώτημα επαναδιατυπώνεται:

Πόσο μακριά μπορεί να είναι η περιστρεφόμενη αλυσίδα $\Gamma_{k,m}^R$, δεδομένου ότι τα κριτήρια 1 και 3 ικανοποιούνται; Η απάντηση στο ερώτημα αυτό θα δοθεί στην ανάλυση που ακολουθεί.

Πόρισμα 1. Έστω ότι σε ένα επίπεδο, υπάρχουν μια καμπύλη Γ^F που αποκαλείται σταθερά, μια άλλη καμπύλη Γ^R που αποκαλείται περιστρεφόμενη και δύο παράλληλα φραγμένα ευθύγραμμα τμήματα, ένα αρχικό ε^I και ένα τελικό ε^T . Ας υποθέσουμε, άλλωστε, ότι η περιοχή του τομέα που ορίζεται από αυτές τις τέσσερις καμπύλες $\Gamma^F, \Gamma^R, \varepsilon^I, \varepsilon^T$ διατηρείται σταθερή, ίση με ένα και ότι το ολοκλήρωμα των γωνιών $\int_{T_A}^{T_B} \arctan\left(\frac{\dot{y}(t)}{\dot{x}(t)}\right) dt$ είναι επίσης γνωστό και ίσο με γ . Στη συνέχεια, αν η καμπύλη Γ^F είναι δεδομένη και είναι σταθερή, το μήκος της μεταβλητής καμπύλης

$$\Gamma^R \text{ δεν μπορεί να υπερβαίνει την τιμή } \frac{a}{L_C/2} \sqrt{\frac{1}{\tan\left(\frac{\gamma}{T_B - T_A}\right)^2} + 1}.$$

4.4 Περιγραφή της διαδικασίας που εφαρμόζεται για την αυτοματοποιημένη ανασύνθεση των θραυσμένων αντικειμένων με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια

Έστω N διαθέσιμα θραύσματα με επίπεδες επιφάνειες και οι τρισδιάστατες (3D) αναπαραστάσεις τους. Για να επιτευχθεί μια βέλτιστη ανασύνθεση αυτών των θραυσμάτων, εφαρμόζεται η διαδικασία που αποτελείται από τα βήματα που περιγράφονται παρακάτω:

Βήμα 1 - Επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων

Αρχικά ορίζεται ένα γωνιακό βήμα $\delta\theta = 1^\circ$ για να δημιουργηθούν όλες οι περιστρεφόμενες εκδοχές του κάθε θραύσματος. Στη συνέχεια, επιλέγεται το μήκος της καμπύλης επαφής στην άνω επίπεδη επιφάνεια των σταθερών θραυσμάτων, L_C , να είναι ένα ποσοστό του μέσου μήκους / περιμέτρου των άνω επιφανειών των ορίων καμπυλών των θραυσμάτων. Επίσης υπολογίζεται η μέση περιοχή όλων των «πλευρικών επιφανειών» των θραυσμάτων και χρησιμοποιείται μαζί με την L_C , προκειμένου να καθοριστούν μέσω της ανισότητας της ενότητας 4.3.3 το όριο του όγκου, τ^T , έτσι ώστε η μέγιστη μέση διαφορά του h mm για το πραγματικό ταίριασμα των θραυσμάτων να είναι αποδεκτή. Ορίζεται μία πολύ μικρή τιμή του $h=0,4$ mm, που αντιπροσωπεύει σχεδόν το τέλειο ταίριασμα μεταξύ των γειτονικών κομματιών. Στη συνέχεια, διαδοχικά αυξάνεται το h έως και 1,2 χιλιοστά για να επιτρέπονται μεγαλύτερα κενά μεταξύ των κομματιών που ταιριάζουν εξ αιτίας σοβαρών φθορών. Επιπλέον, για κάθε τιμή του h χωριστά, ορίζεται το κατώφλι που περικλείει τις καμπύλες επαφής, $E_R = hL_C$, μαζί με το όριο γωνιακής απόκλισης $\gamma = \arctan\left(\frac{h}{L_C}\right)$ για τον υπολογισμό L^{EX} .

Βήμα 2 – Η εφαρμογή των κριτηρίων θεωρώντας το μεγαλύτερο θραύσμα ως το σταθερό

Επιλέγεται το θραύσμα με τη μεγαλύτερη άνω επίπεδη επιφάνεια, το οποίο το συμβολίζουμε με F_1 , και το θέτουμε ως το σταθερό θραύσμα της εργασίας αντιστοίχισης. Κατόπιν, αναζητούνται πιθανές θέσεις που ταιριάζουν μεταξύ του F_1 και όλων των άλλων θραυσμάτων, τα οποία περιστρέφονται και εφαρμόζονται τα αναπτυχθέντα κριτήρια με την ακόλουθη σειρά:

1. Πρώτα εφαρμόζεται το κριτήριο 4 ελέγχοντας τα γειτονικά μήκη των επαπτόμενων καμπυλών στις άνω επιφάνειες των θραυσμάτων.
2. Δεύτερον, αν το κριτήριο 4 ικανοποιείται, εξετάζεται αν οι επαπτόμενες επιφάνειες των θεωρούμενων δύο θραυσμάτων στην γειτονική θέση ικανοποιούν το κριτήριο 3 αναφορικά με τη γεωμετρική τους ομοιότητα.
3. Τρίτον, στην περίπτωση που το κριτήριο 3 έχει επίσης ικανοποιηθεί, το κριτήριο 2 ελέγχει κάποια πιθανή επικάλυψη μεταξύ των δύο θραυσμάτων, τόσο σε τοπικό επίπεδο όσο και συνολικά.
4. Αν τα δύο αυτά θραύσματα στη συγκεκριμένη σχετική θέση περάσουν τα 3 φίλτρα απόρριψης, τότε και μόνο τότε το σύστημα προβαίνει στην εξέταση του τελικού κριτηρίου 1 ελέγχοντας αν ο όγκος του κενού μεταξύ των 2 θραυσμάτων είναι μικρότερος από το προκαθορισμένο όριο τ^T . Αν το κριτήριο 1 επίσης ικανοποιηθεί στις σχετικές θέσεις των θραυσμάτων, τότε το σύστημα χαρακτηρίζει την ειδική σχετική θέση των θραυσμάτων ως ταιριαστή.

Βήμα 3 - Συγχώνευση των θραυσμάτων που ταιριάζουν για να παραχθεί μία «νησίδα»

Αν η ανωτέρω εφαρμογή του βήματος 2 προσφέρει ταίριασμα του F_1 με έναν αριθμό από άλλα θραύσματα, τότε συγχωνεύονται εικονικά αυτά τα ταιριαστά θραύσματα για να παραχθεί η «νησίδα» I_1 .

Ακολούθως, η I_1 μπαίνει στη θέση του F_1 και επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 και 3 έως ότου δεν αναφερθεί κανένα περαιτέρω ταίριασμα.

Βήμα - 4 Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία ανασύνθεσης για τα μη ταιριαστά θραύσματα

Μετά το τέλος του τρίτου βήματος είναι πιθανό να υπάρξουν θραύσματα τα οποία δεν ανήκουν στη «νησίδα» I_1 . Ανάμεσά τους εντοπίζεται το θραύσμα με τη μεγαλύτερη άνω επιφάνεια, το οποίο θα παίξει το ρόλο του F_1 και επαναλαμβάνονται τα βήματα 2,3 και 4 ούτως ώστε να ληφθεί ένα σύνολο «νησίδων» I_n . Η διαδικασία τελειώνει όταν τα μη ταιριαστά θραύσματα έχουν εξαντληθεί και δεν έχουν αναφερθεί περαιτέρω συζεύξεις.

Βήμα 5 - Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για μια νέα τιμή της σταθεράς “ h ”

Με το πέρας του βήματος 4 εξάγεται ένας αριθμός «νησίδων» I_n , μερικά από τα οποία μπορεί να είναι απλά θραύσματα. Σε αυτό το σημείο αυξάνεται ελάχιστα η τιμή του h , με σκοπό να επιτραπεί ένα μεγαλύτερο κενό μεταξύ των δύο γειτονικών θραυσμάτων και επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 5.

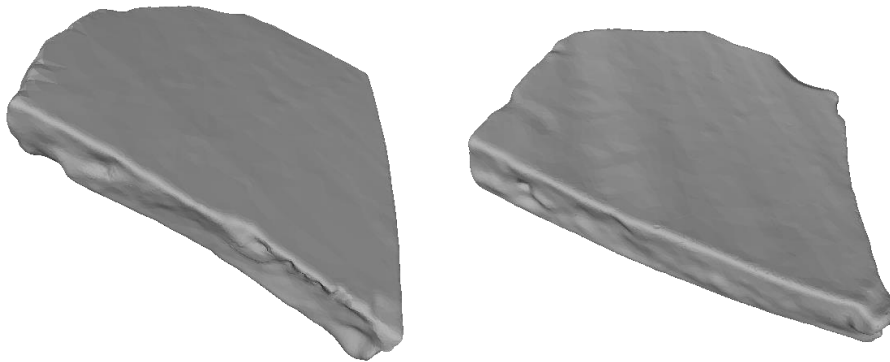
5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ ΤΩΝ ΘΡΑΥΣΜΑΤΩΝ

5.1 Οι απεικονίσεις

Με τον όρο τρισδιάστατη απεικόνιση ενός θραύσματος εννοούμε την ψηφιακή απεικόνισή του, η οποία προκύπτει από την σάρωσή του με κατάλληλο, τρισδιάστατο σαρωτή. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα, που αποτελείται από δύο κάμερες και έναν προβολέα με ονομαστική ακρίβεια σάρωσης 3-7 μm . Τα προς σάρωση θραύσματα τοποθετούνται σε μία πλάκα αναφοράς που φέρει φωτογραμμετρικούς στόχους. Η πλάκα αναφοράς έχει επίσης σαρωθεί και μετρηθεί κενή. Η μέση ακρίβεια αυτής της μέτρησης είναι 5 $\mu\text{m} / 1\text{m}$. Η πλάκα αναφοράς τοποθετείται σε μία συσκευή περιστροφής και για κάθε γωνία περιστροφής της, μετρώνται οι συντεταγμένες των στόχων αναφοράς. Στη συνέχεια, τα θραύσματα τοποθετούνται πάνω στη πλάκα αναφοράς και οι συντεταγμένες των σημείων δειγματοληψίας στην επιφάνειά τους μετρώνται με βάση τις μετρήσεις της πλάκας αναφοράς. Οι συντεταγμένες των σημείων της επιφάνειας του θραύσματος βρίσκονται με φωτογραμμετρική ανασύνθεση της πληροφορίας που αντλείται από δύο διαφορετικές διδιάστατες (2D) προβολές, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία του "δομημένου φωτός", όπως εκτενώς περιγράφεται στο [22]. Η διαδικασία σάρωσης πραγματοποιείται με ανάλυση δειγματοληψίας 0,14 mm. Επομένως, μέσω της τρισδιάστατης σάρωσης αποκτούμε μία ολοκληρωμένη εικόνα των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας του θραύσματος στο σύνολό της. Θα παρουσιάσουμε ακολούθως κάποια θραύσματα αγγείων μετά την τρισδιάστατη σάρωση τους.



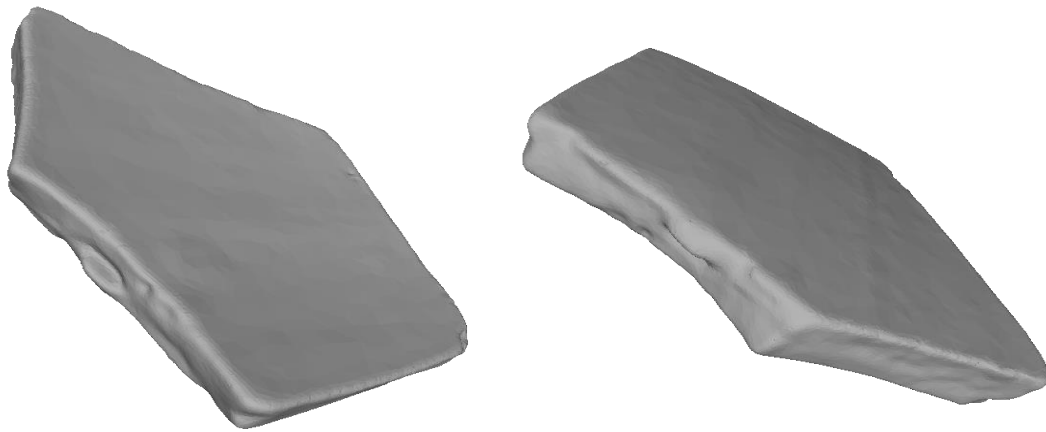
«Η διδιάστατη εικόνα του θραύσματος v0497»



«Το θραύσμα v0497 από δύο διαφορετικές γωνίες μετά τη σάρωσή του»



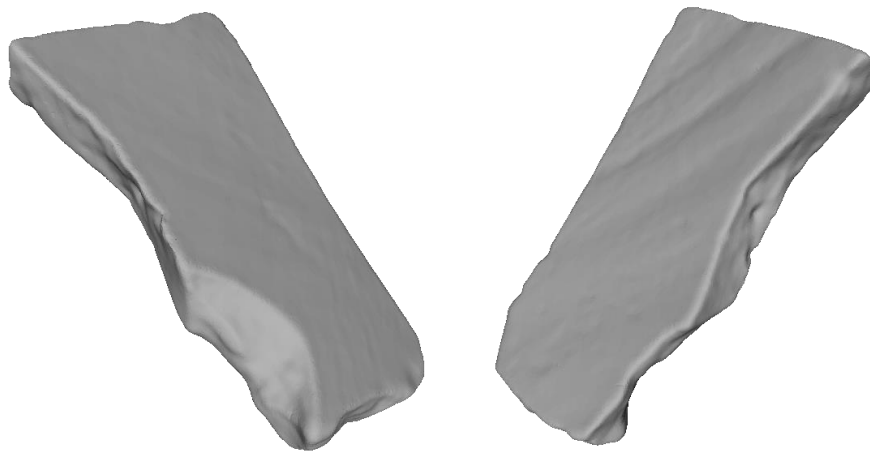
«Η διδιάστατη εικόνα του θραύσματος v0500»



«Το θραύσμα v0500»



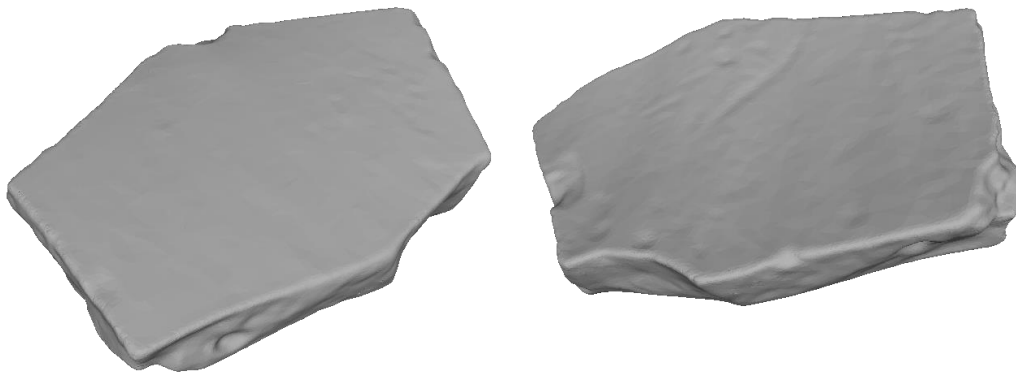
«Η διδιάστατη εικόνα του θραύσματος v0503»



«Το θραύσμα v0503»



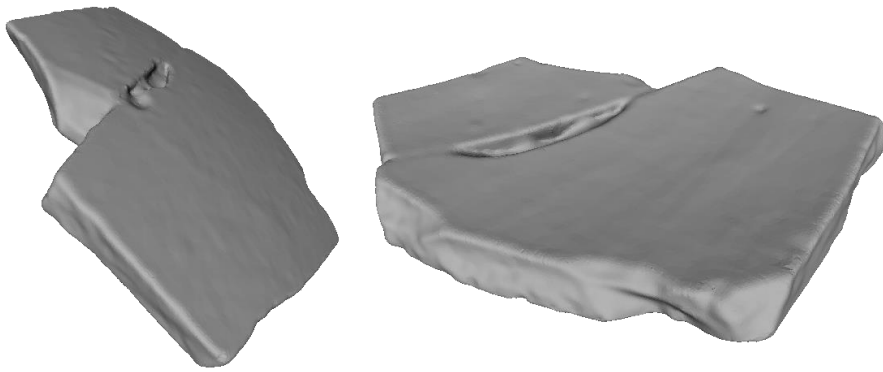
«Η διδιάστατη εικόνα του θραύσματος v0504»



«Το θραύσμα v0504»



«Η διδιάστατη εικόνα του θραύσματος v0506»



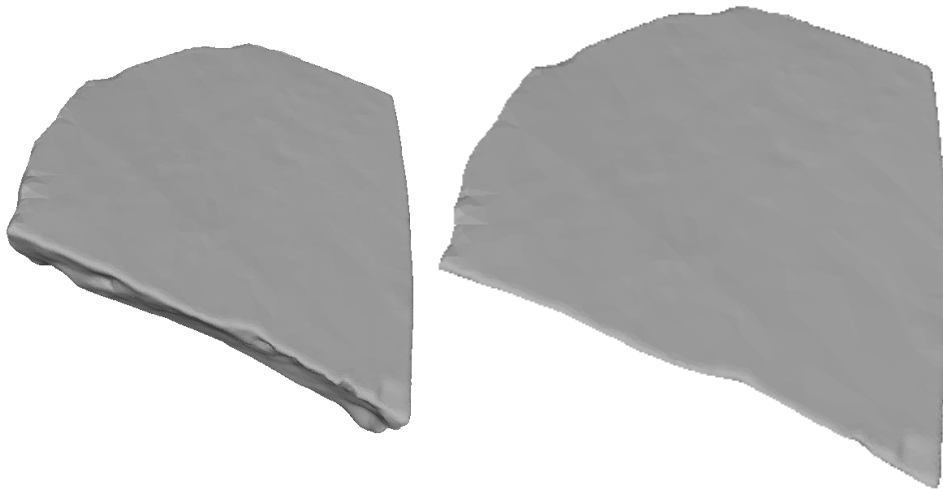
«Το θραύσμα v0506»

5.2 Οι τρεις επιφάνειες των θραυσμάτων

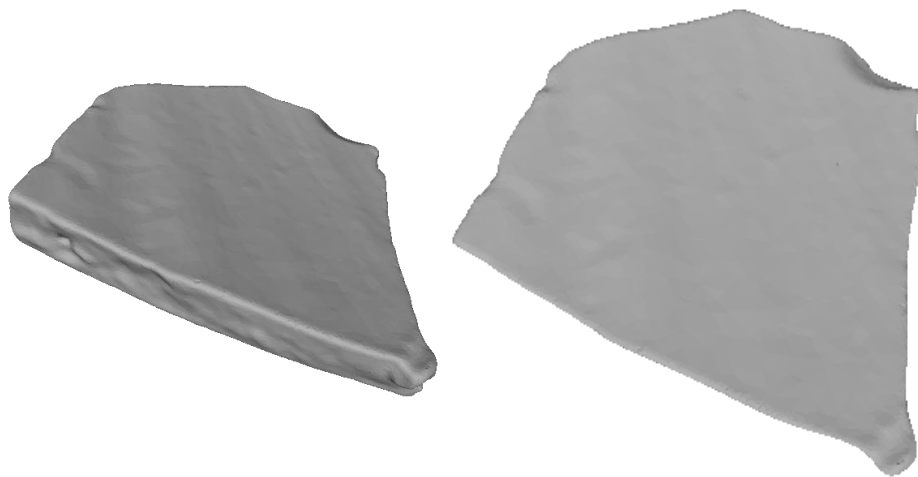
Η επεξεργασία της τρισδιάστατης (3D) αναπαράστασης των θραυσμάτων ξεκινάει με τον εντοπισμό των τριών επιφανειών του θραύσματος:

- 1) Της «άνω επιφάνειας» («upper surface») του θραύσματος
- 2) Της «κάτω επιφάνειας» («lower surface») του θραύσματος
- 3) Της «πλευρικής επιφάνειας» («lateral surface») του θραύσματος

Η διάκριση των τριών αυτών επιφανειών είναι απαραίτητη για την αυτόματη ανασύνθεση των θραυσμάτων. Το κριτήριο με το οποίο διακρίνουμε την «άνω» από την «κάτω» επιφάνεια είναι ότι η υφή της «άνω» επιφάνειας είναι συνήθως πιο λεία σε σχέση με την «κάτω» που είναι συνήθως πιο τραχιά. Τέλος, η επιφάνεια που ενώνει την «άνω» με την «κάτω» επιφάνεια είναι η «πλευρική», η οποία είναι λιγότερο ομαλή σε σχέση με τις άλλες λόγω της θραύσης αυτής καθεαυτής, αλλά και της φθοράς.



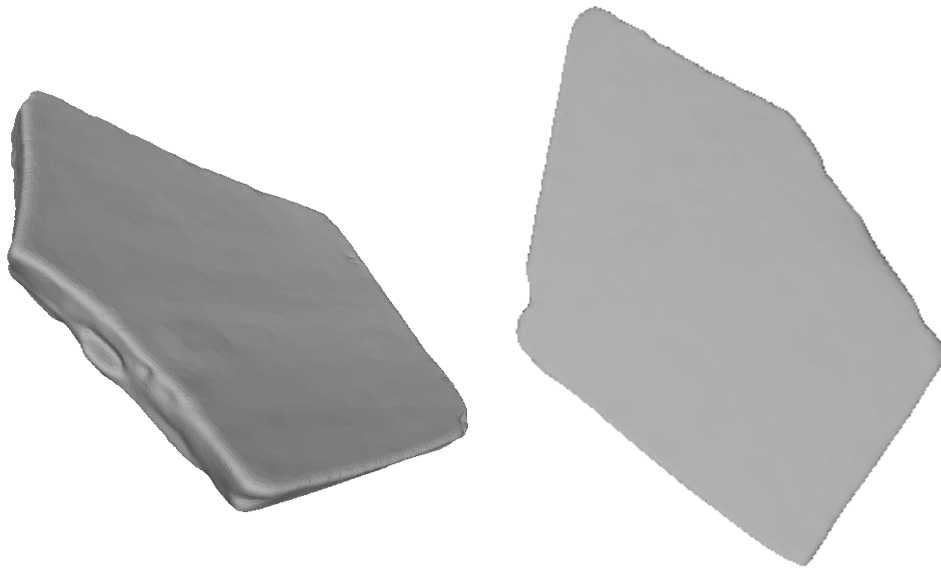
«Η άνω επιφάνεια του θραύσματος v0497 αποκομμένη από το υπόλοιπο θραύσμα»



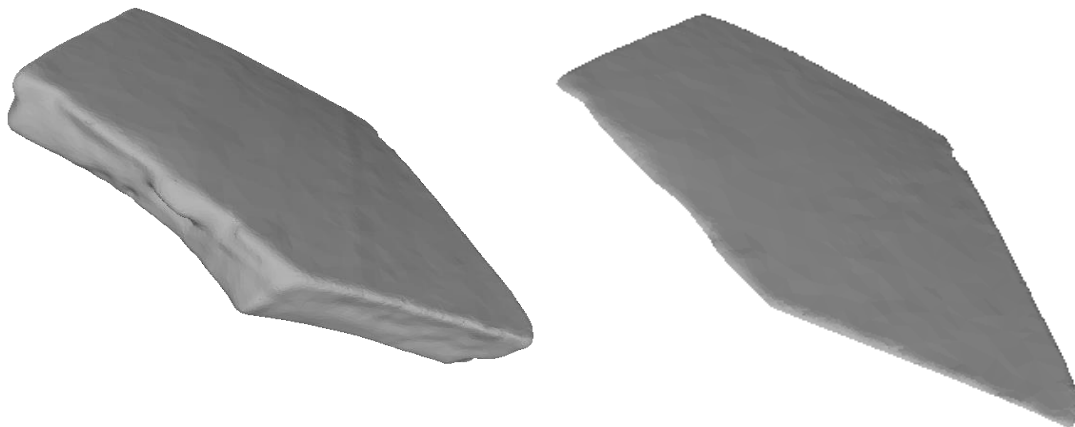
«Η κάτω επιφάνεια του θραύσματος v0497 αποκομμένη από το υπόλοιπο θραύσμα»



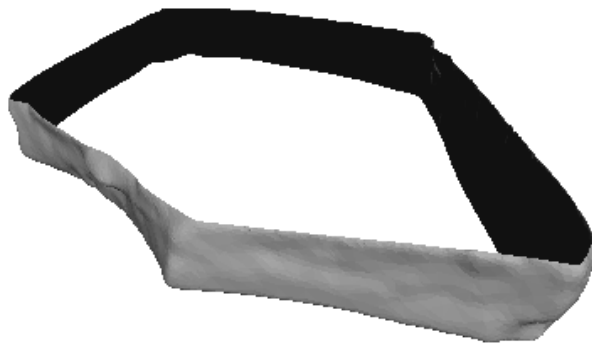
«Η πλευρική επιφάνεια του θραύσματος v0497 από δύο οπτικές γωνίες»



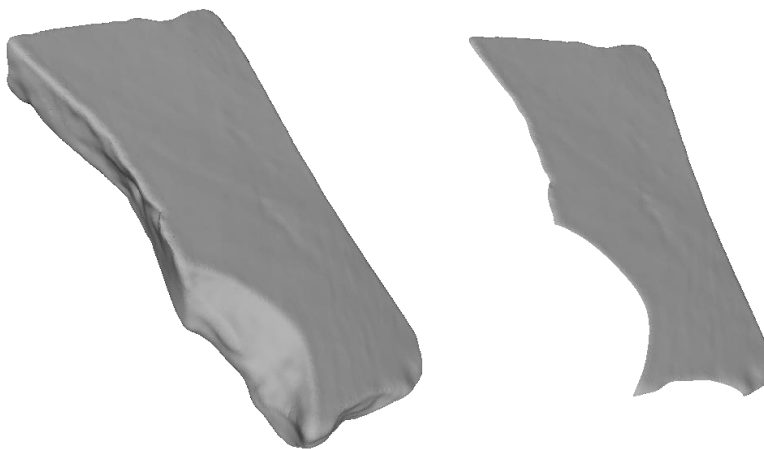
«Η κάτω επιφάνεια του θραύσματος v0500 αποκομμένη από το υπόλοιπο θραύσμα»



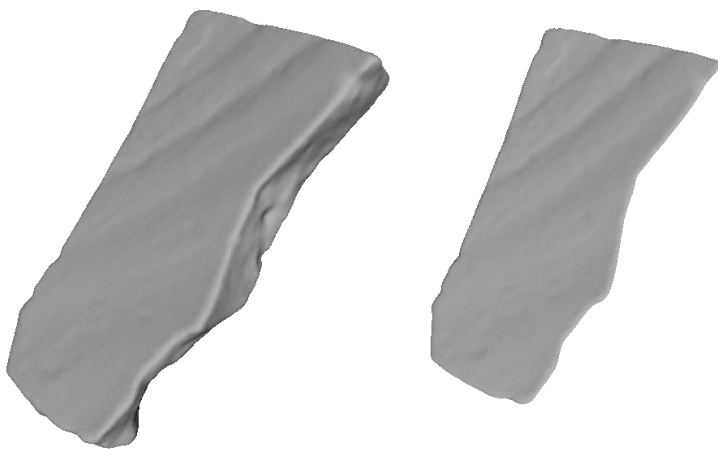
«Η άνω επιφάνεια του θραύσματος v0497»



«Η πλευρική επιφάνεια του θραύσματος v0500»



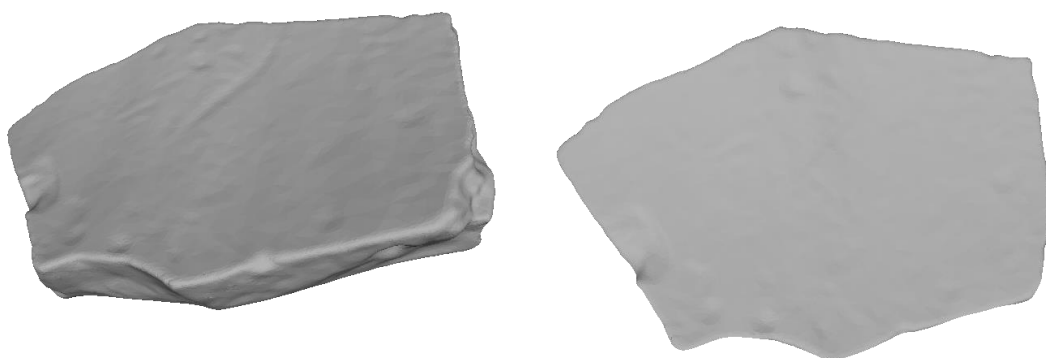
« Η άνω επιφάνεια του θραύσματος v0503»



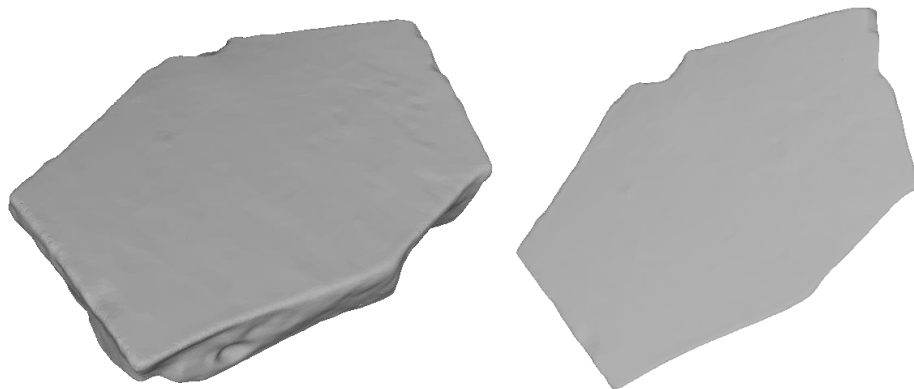
«Η κάτω επιφάνεια του θραύσματος v0503»



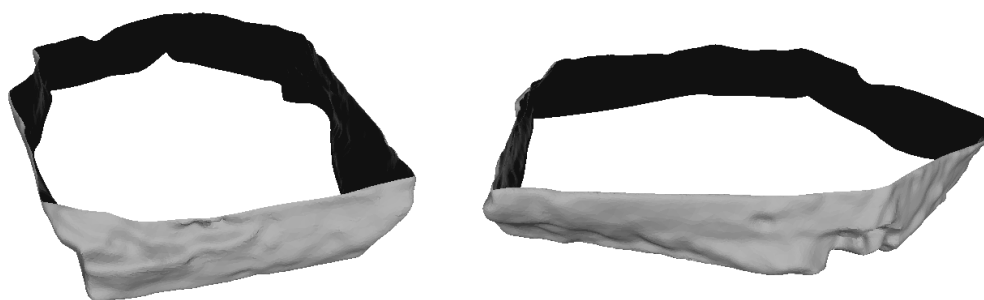
«Η πλευρική επιφάνεια του θραύσματος v0503»



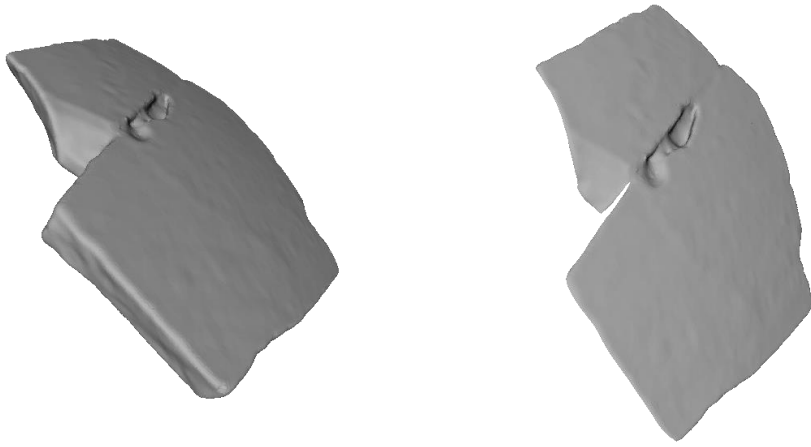
«Η κάτω επιφάνεια του θραύσματος v0504»



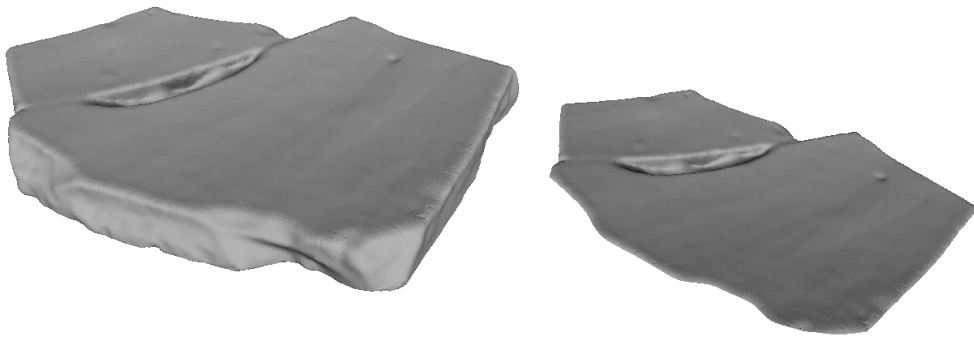
«Η άνω επιφάνεια του θραύσματος v0504»



«Η πλευρική επιφάνεια του θραύσματος v0504»



«Η άνω επιφάνεια του θραύσματος v0506»



«Η κάτω επιφάνεια του θραύσματος v0506»

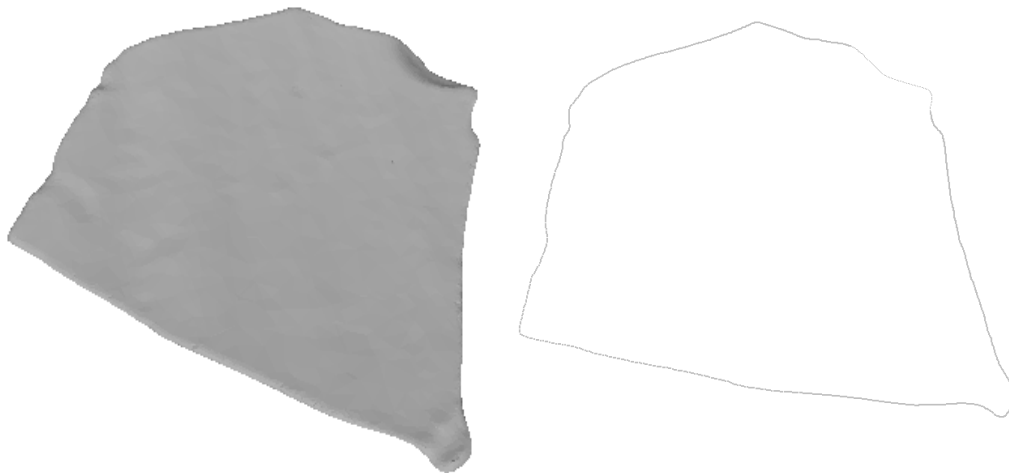


«Η πλευρική επιφάνεια του θραύσματος v0506»

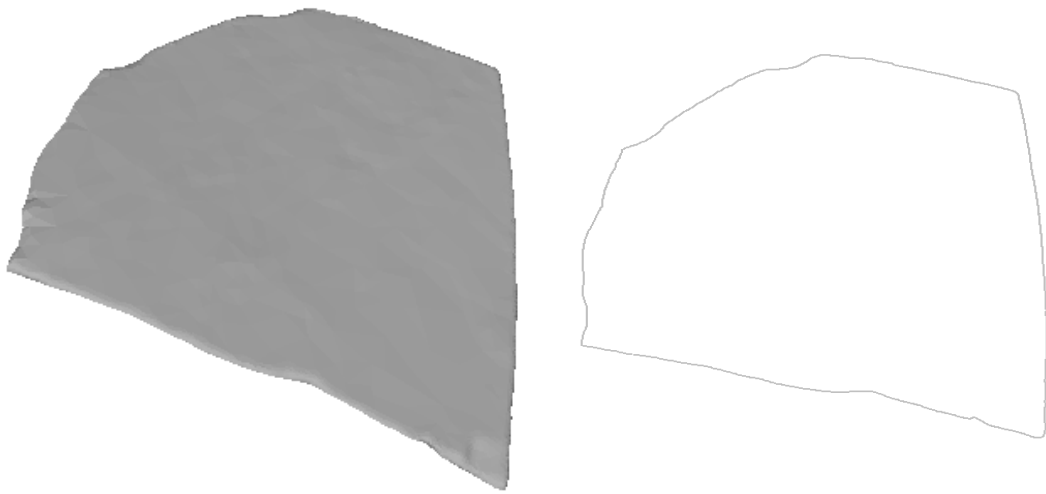
5.3 Τα περιγράμματα της «άνω» και «κάτω» επιφάνειας των θραυσμάτων

Το επόμενο βήμα στην επεξεργασία της 3D απεικόνισης των θραυσμάτων είναι η εξαγωγή των δύο καμπυλών που είναι τα περιγράμματα της «άνω» και «κάτω» επιφάνειας του θραύσματος. Οι καμπύλες αυτές, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4, θα χρησιμοποιηθούν στην αυτόματη ανασύνθεση.

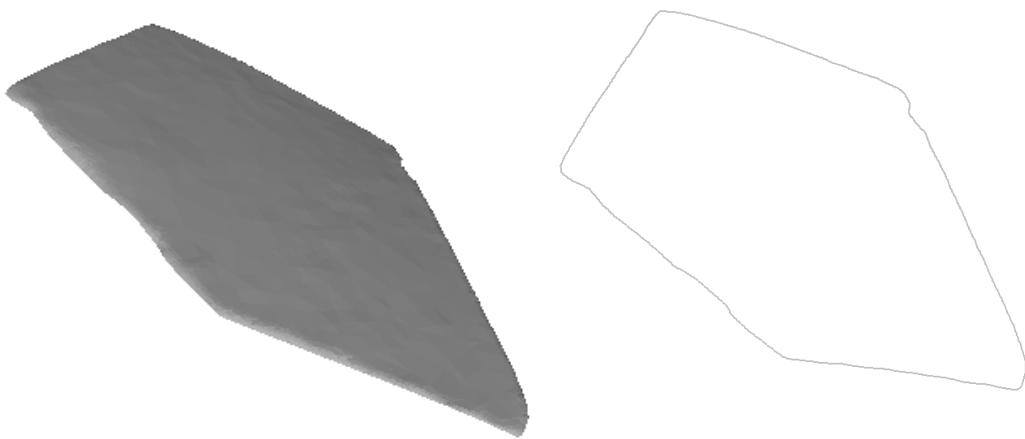
Αφού προσδιορίσουμε τις τρεις επιφάνειες, εξάγουμε τις καμπύλες ως περιγράμματα των επιφανειών αυτών. Για τον εντοπισμό των καμπυλών αυτών είναι απαραίτητος ο μαθηματικός προσδιορισμός τους μέσω της μεταβολής του κάθετου διανύσματος των επιφανειών. Στη συνέχεια, αποθηκεύουμε την καμπύλη σε μορφή αλυσίδας σημείων, ώστε να χρησιμοποιηθούν στη μέθοδο της αυτόματης ανασύνθεσης.



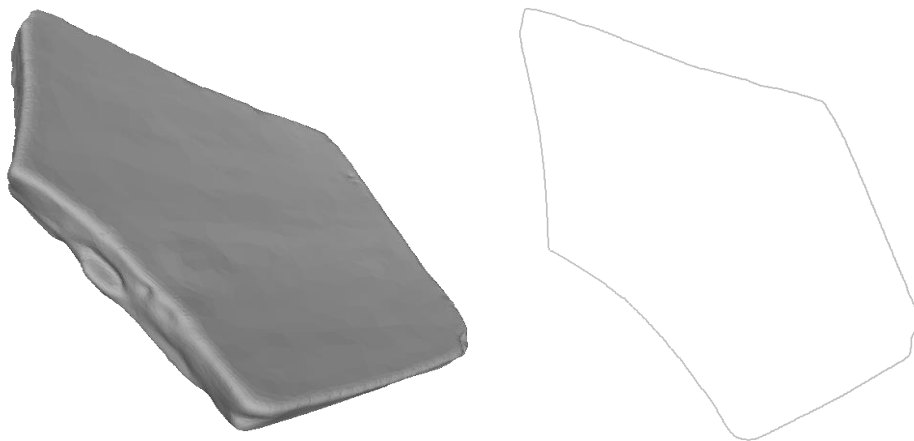
«Το περίγραμμα της κάτω επιφάνειας του θραύσματος v0497»



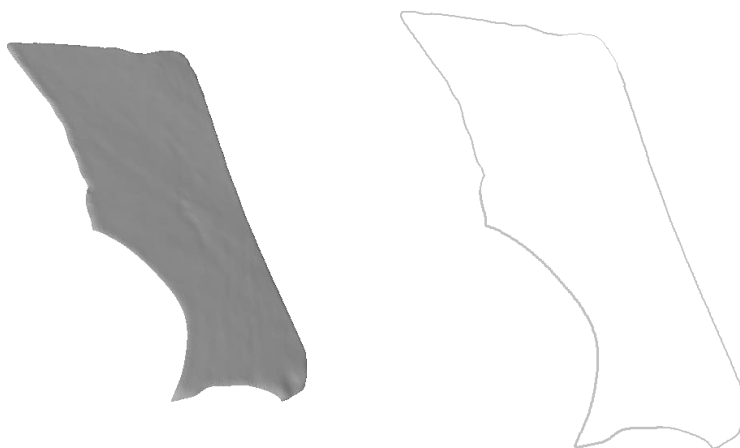
«Το περίγραμμα της άνω επιφάνειας του θραύσματος ν0497»



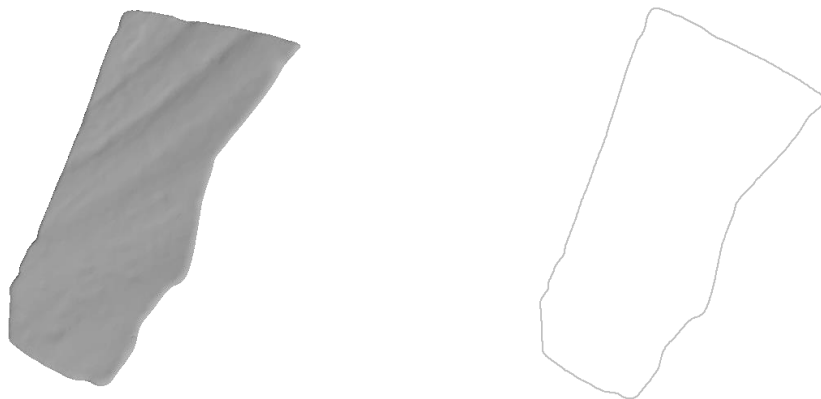
«Το περίγραμμα της άνω επιφάνειας του θραύσματος ν0500»



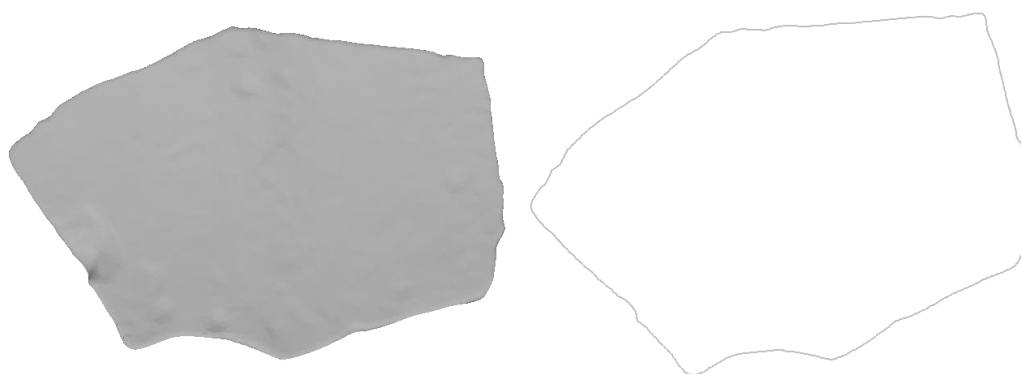
«Το περίγραμμα της κάτω επιφάνειας του θραύσματος v0500»



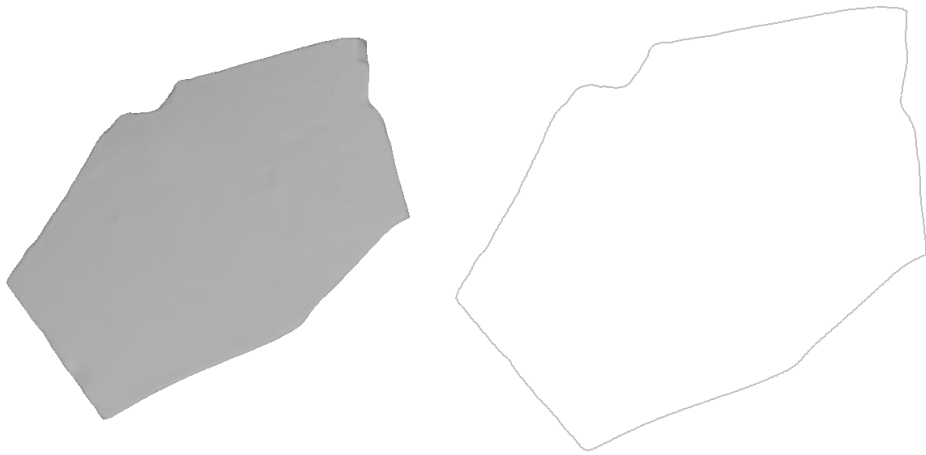
«Το περίγραμμα της άνω επιφάνειας του θραύσματος v0503»



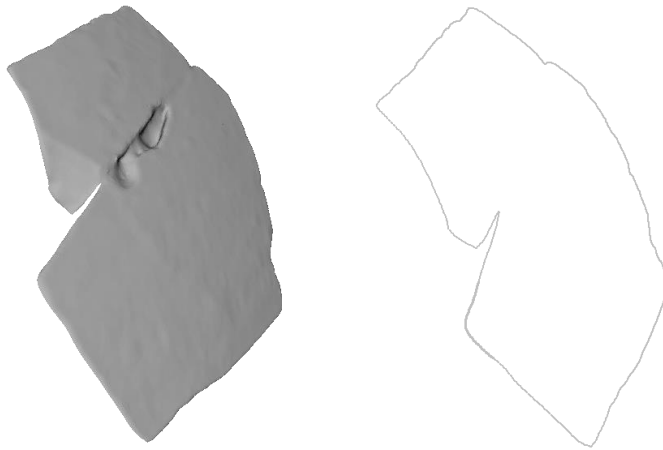
«Το περίγραμμα της κάτω επιφάνειας του θραύσματος v0503»



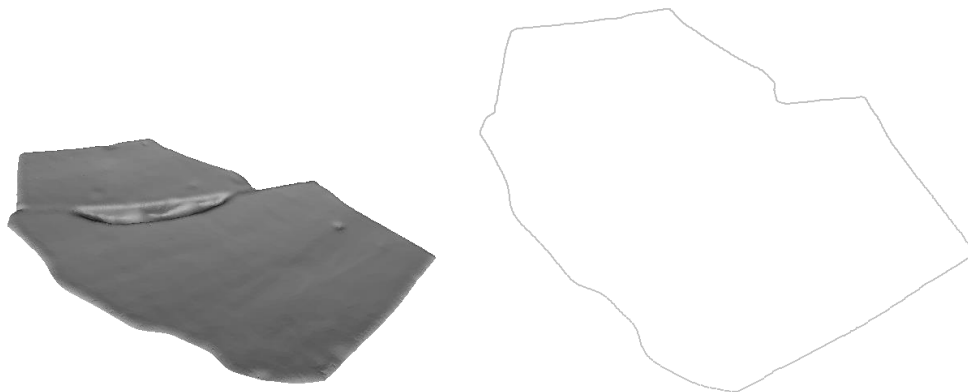
«Το περίγραμμα της κάτω επιφάνειας του θραύσματος v0504»



«Το περίγραμμα της άνω επιφάνειας του θραύσματος v0504»



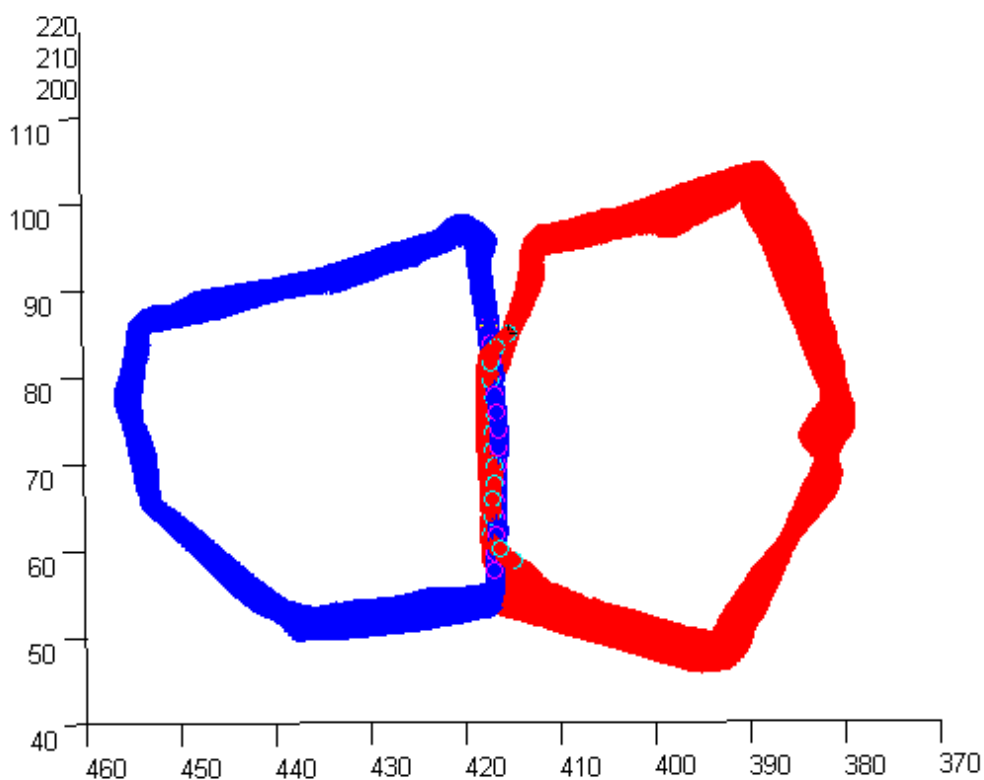
«Το περίγραμμα της άνω επιφάνειας του θραύσματος v0506»



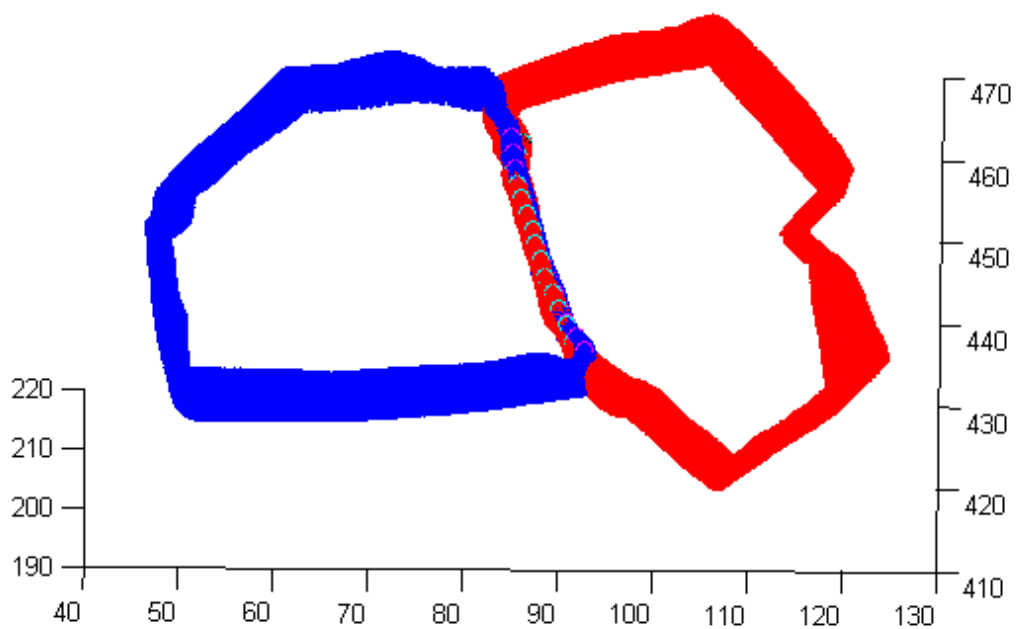
«Το περίγραμμα της κάτω επιφάνειας του θραύσματος v0506»

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

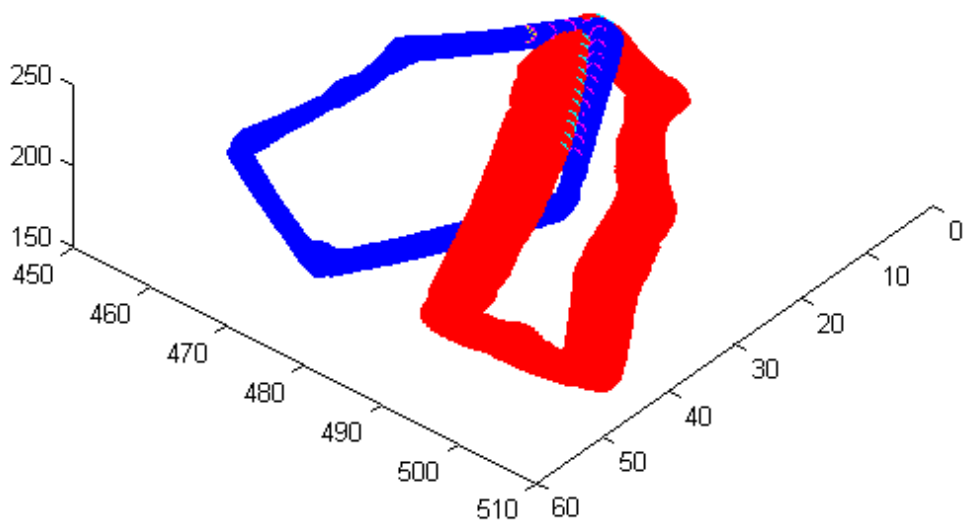
Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε η προκαταρκτική επεξεργασία τρισδιάστατων απεικονίσεων θραυσμάτων/οστράκων ταφικών αγγείων της Μυκηναϊκής περιόδου που σώζονται στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο. Η προκαταρκτική αυτή επεξεργασία έφερε τα θραύσματα σε μορφή απολύτως κατάλληλη, ώστε να εφαρμοστούν νέες μεθοδολογίες αυτοματοποιημένης ανασύνθεσης θραυσμένων αντικειμένων [1],[2]. Οι συγκεκριμένες μεθοδολογίες, αφού μελετήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, εφαρμόστηκαν στις προαναφερθείσες επεξεργασμένες τρισδιάστατες απεικονίσεις οστράκων. Η εφαρμογή αυτών των μεθοδολογιών έδωσε σαφώς ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται ευθύς αμέσως.



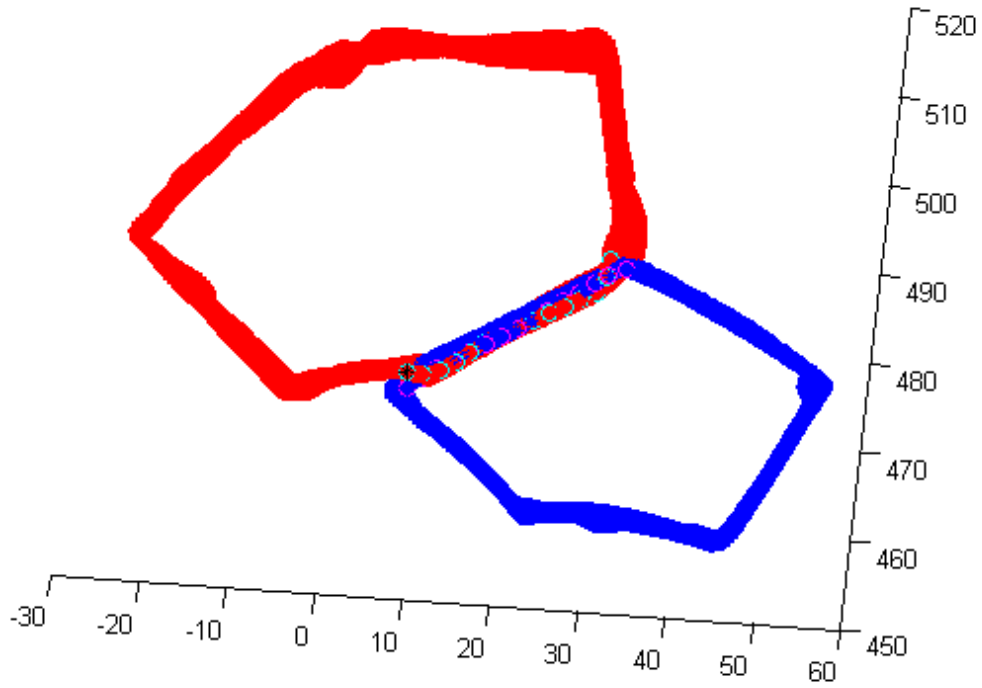
«Μία πιθανή θέση ταιριάσματος που έδωσε η εφαρμογή του συστήματος για τα θραύσματα v0497-v0504»



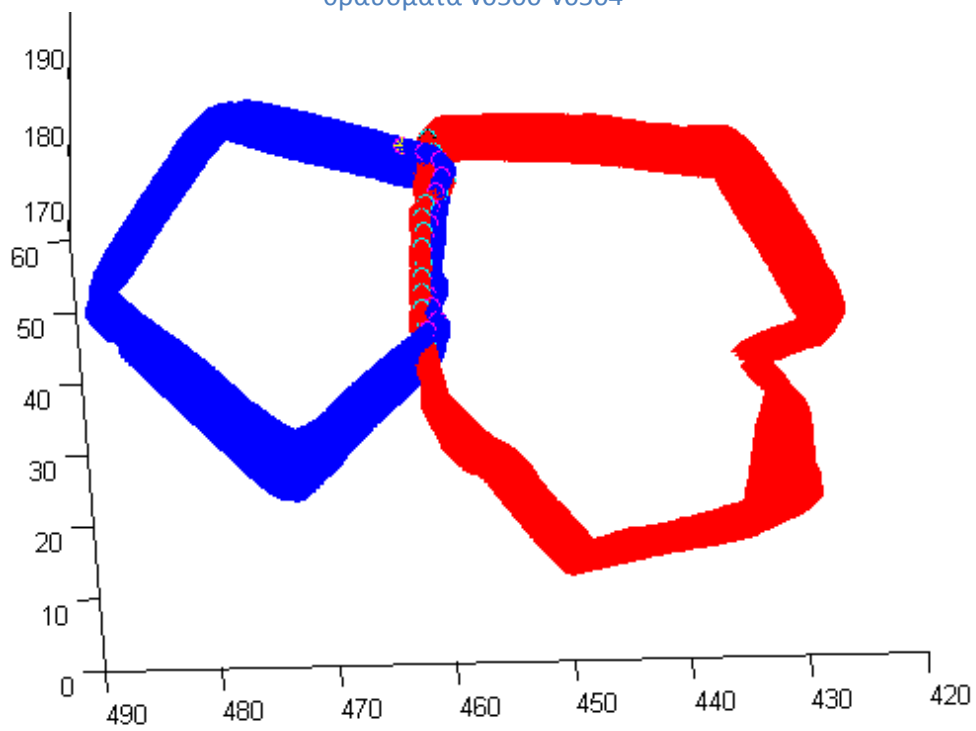
«Μία πιθανή θέση ταιριάσματος που έδωσε η εφαρμογή του συστήματος για τα θραύσματα v0497-v0506»



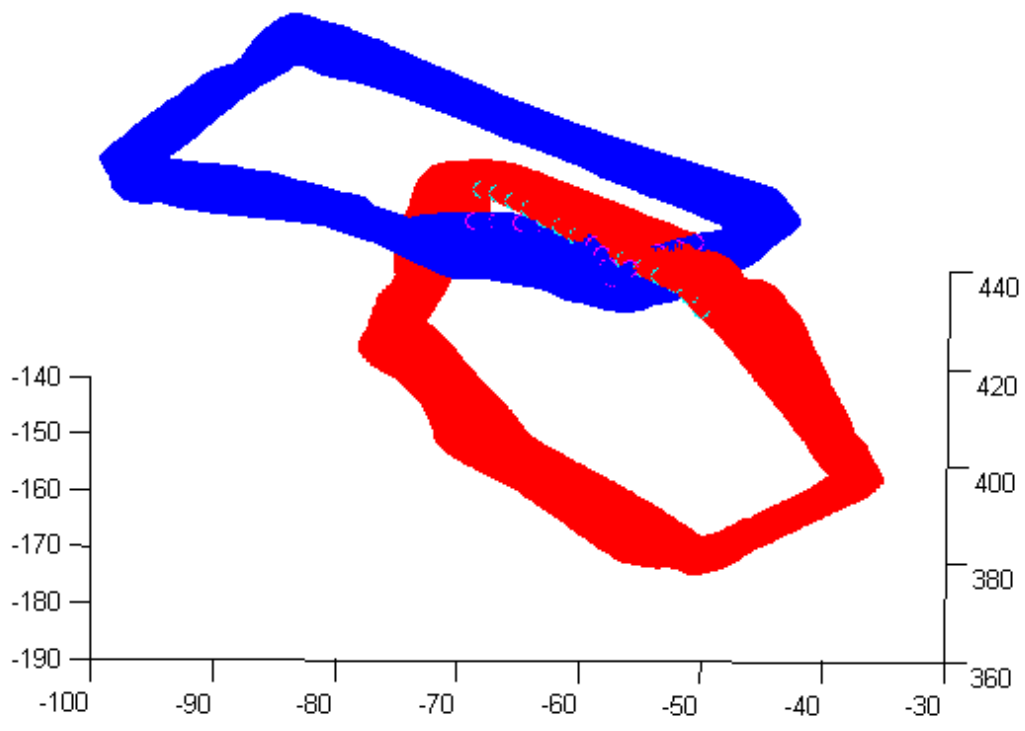
«Μία πιθανή θέση ταιριάσματος που έδωσε η εφαρμογή του συστήματος για τα θραύσματα v0500-v0503»



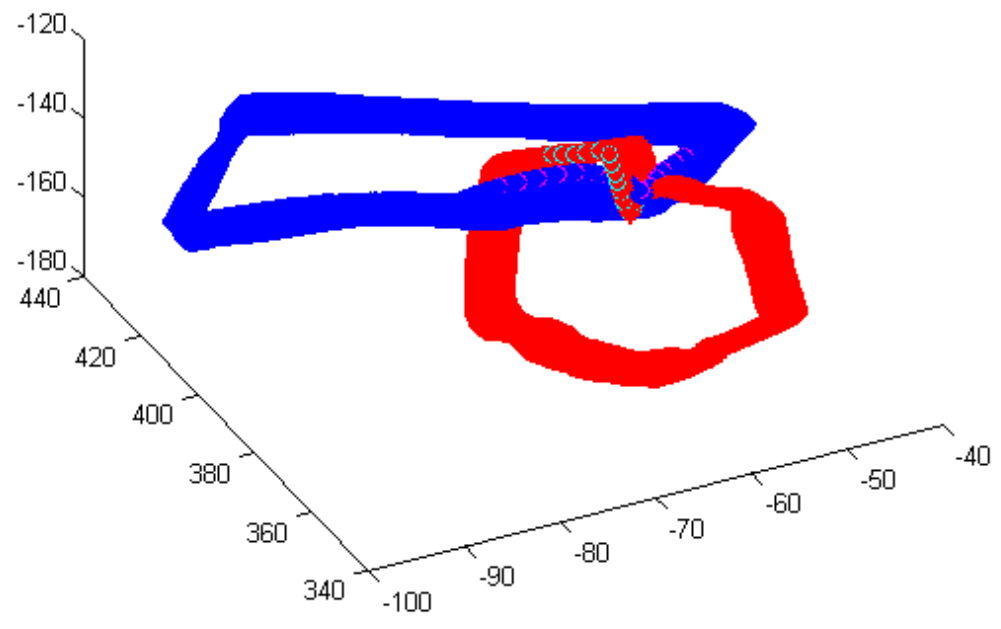
«Μία πιθανή θέση ταιριάσματος που έδωσε η εφαρμογή του συστήματος για τα θραύσματα v0500-v0504»



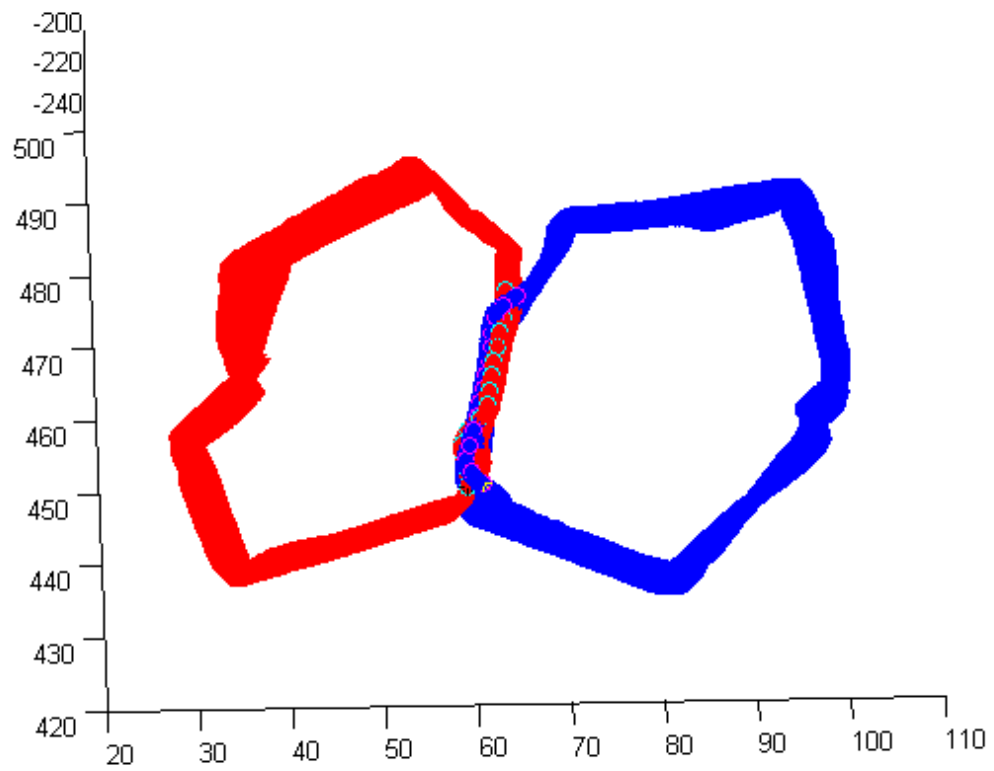
«Μία πιθανή θέση ταιριάσματος που έδωσε η εφαρμογή του συστήματος για τα θραύσματα v0500-v0506»



«Μία πιθανή θέση ταιριάσματος που έδωσε η εφαρμογή του συστήματος για τα θραύσματα v0503-v0504»



«Μία πιθανή θέση ταιριάσματος που έδωσε η εφαρμογή του συστήματος για τα θραύσματα v0503-v0506»



«Μία πιθανή θέση ταιριάσματος που έδωσε η εφαρμογή του συστήματος για τα θραύσματα v0504-v0506»

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C. Papaodysseus, D. Arabadjis, M. Exarhos, P. Rousopoulos, S.Zannos, M. Panagopoulos, L. Papazoglou- Manioudaki, Efficient solution to the 3D problem of automatic wall paintings reassembly
- [2] C. Papaodysseus, T. Panagopoulos, M. Exarhos, C. Triantafillou, D. Fragoulis, C. Doumas, Contour-shape based reconstruction of fragmented, 1600 BC wall paintings, *IEEE Transactions on Signal Processing* 50 (6) (2002) 1277–1288.
- [3] H.C. da Gama Leitao, J. Stolfi, A multiscale method for the reassembly of two-dimensional fragmented objects, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 24 (9) (2002) 1239–1251.
- [4] A. Willis, X. Orriols, D.B. Cooper, Accurately estimating shred 3D surface geometry with application to pot reconstruction, in: *ACVA '03 workshop of CVPR 2003*, pp. 1–7.
- [5] Y. Shogo, K. Shohei, K. Satoshi, I. Hidenori, An earthenware reconstruction method based on the matching of both contour curve and color pattern on the surface of potsherds, *Journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan* 34 (2) (2005) 126–133.
- [6] G. Ucoluk, I.H. Toroslu, Automatic reconstruction of 3D surface objects, *Elsevier Computers & Graphics* 23 (4) (1999) 573–582.
- [7] A. Biswas, P. Bhowmick, B.B. Bhattacharya, Reconstruction of torn documents using contour maps, in: *IEEE Int. Conf. on Image Processing*, vol. 3, 2005, pp. 517–520.
- [8] P. de Smet, Reconstruction of ripped-up documents using fragment stack analysis procedures, *Elsevier Forensic Science International* 176 (2–3) (2008) 124–136.
- [9] F. Stanco, L. Tenze, G. Ramponi, A. de Polo, Virtual restoration of fragmented glass plate photographs, in: *12th IEEE Medit. Electrotechnical Conf.*, vol. 1, 2004, pp. 243–246.
- [10] A. Ukovic, G. Ramponi, Feature extraction and clustering for the computer-aided reconstruction of strip-cut shredded documents, *Journal of Electronic Imaging* 17 (1) (2008).
- [11] A. Ukovic, G. Ramponi, H. Doulaverakis, Y. Kompatsiaris, M.G. Strintzis, Shredded document reconstruction using MPEG-7 standard descriptors, in: *4th IEEE Int. Symp. on Signal Processing*, 2004, pp. 334–337.
- [12] L. Zhu, Z. Zhou, D. Hu, Globally consistent reconstruction of ripped-up documents, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 30 (1) (2008) 1–13.
- [13] P.J. Besl, H.D. McKay, A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14 (2) (1992) 239–256.
- [14] S. Linnainmaa, D. Harwood, L.S. Davis, Pose determination of a three-dimensional object using triangle pairs, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 10 (5) (1988) 634–647.
- [15] S. Winkelbach, M. Rilk, C. Schöpfung, F.M. Wahl, Fast random sample matching of 3D fragments, in: *Pattern Recognition, 26th DAGM Symposium*, in: *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3175, Springer, Berlin, 2004, pp. 129–136.
- [16] G. Papaioannou, E.A. Karabassi, T. Theoharis, Reconstruction of three-dimensional objects through matching of their parts, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 24 (1) (2002) 114–124.

- [17] G. Papaioannou, E.A. Karabassi, On the automatic assemblage of arbitrary broken solid artefacts, *Elsevier Image and Vision Computing* 21 (2003) 401–412.
- [18] Q.X. Huang, S. Flöry, N. Gelfand, M. Hofer, H. Pottmann, Reassembling fractured objects by geometric matching, *ACM Transactions on Graphics* 25 (3) (2006) 569–578.
- [19] S. Winkelbach, F.M. Wahl, Pairwise matching of 3D fragments using cluster trees, *International Journal of Computer Vision* 78 (1) (2008) 1–13. Springer.
- [20] B.J. Brown, C. Toler-Fraklin, D. Nehab, M. Burns, D. Dobkin, A. Vlachopoulos, C. Doulas, C. Rusinkiewicz, T. Weyrich, A system for high-volume acquisition and matching of fresco fragments: reassembling Thera wall paintings, *ACM Transactions on Graphics* 27 (3) (2008).
- [21] C. Papaodysseus, D. Arabadjis, M. Panagopoulos, P. Rousopoulos, M. Exarhos, E. Papazoglou, Automated reconstruction of fragmented objects using their 3D representation—application to important archaeological finds, in: *IEEE Proc. of ICSP 08*, 2008, pp. 769–772.
- [22] R.J. Valkenburg, A.M. McIvor, Accurate 3D measurement using a structured light system, *Elsevier Image Vision and Computing* 16 (2) (1998) 99–110.
- [23] W. Puech, A.G. Bors, I. Pitas, J.-M. Chassery, Projection distortion analysis for flattened image mosaicing from straight uniform generalized cylinders, *Pattern Recognition* 34 (8) (2001) 1657–1670.
- [24] C. Papaodysseus, T. Panagopoulos, M. Exarhos, C. Triantafillou, D. Fragoulis, C. Doulas, Image and pattern analysis of 1650 BC wall paintings and reconstruction, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 38 (4) (2008) 958–965.