



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

**Τρισδιάστατη CAD μοντελοποίηση αντικειμένων
πολιτιστικής κληρονομιάς με χρήση Μηχανών Μέτρησης
Συντεταγμένων τύπου Αρθρωτού Βραχίονα**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΤΣΙΓΚΟΥ

Επιβλέπων : Στέφανος Διπλάρης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

(Υπογραφή)

.....

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΤΣΙΓΚΟΣ

Σπουδαστής Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

© 2010 – All rights reserved

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους ακολούθως αναφερομένους, καθώς χωρίς την ουσιαστική συνεισφορά του καθενός τους προς την παρούσα εργασία, δεν θα ήταν δυνατή η υλοποίησή της.

- Κο. Στέφανο Διπλάρη, επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της εργασίας και την καθοδήγησή του κατά την εκπόνησή της.
- Κο. Γιώργο Καϊσαρλή διδάκτορα Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη συμμετοχή του στην υλοποίηση της εργασίας και για τις συμβουλές του σε θέματα CAD μοντελοποίησης και Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού.

Περίληψη

Η εξέλιξη των βιομηχανικών κατασκευών σε συνδυασμό με την πρόοδο των μέσων παραγωγής και των συστημάτων μηχανολογικού σχεδιασμού με χρήση Η/Υ (*Computer Aided Design – CAD*), έχει προοδευτικά οδηγήσει στη χρήση σύνθετων γεωμετρικών μορφών, οι οποίες παρουσιάζουν έντονη γεωμετρική πολυπλοκότητα και χαρακτηρίζονται ως ελεύθερης μορφής επιφάνειες (*free – form surfaces*). Ο σχεδιασμός, η παραγωγή, ο ποιοτικός έλεγχος αλλά και ο αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός εξαρτημάτων με ελεύθερες επιφάνειες βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην τρισδιάστατη (3-D) CAD Μοντελοποίηση και αποτελούν νέα, σημαντικά και δυναμικά εξελισσόμενα πεδία επαγγελματικής/ επιστημονικής δραστηριότητας του Μηχανολόγου Μηχανικού. Στο πλαίσιο αυτό εντάσσεται η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας καθώς και η εξέλιξη των σχετικών μεθόδων, μέσων και τεχνολογικών εργαλείων που μπορούν να εξασφαλίσουν την επιτυχή παραγωγή τέτοιου είδους εξαρτημάτων. Η εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) έχει ως γενικό στόχο τη συμβολή στη διερεύνηση του παραπάνω αντικειμένου.

Επιπλέον, η τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση αποτελεί στις μέρες μας αναπόσπαστο κομμάτι της προσπάθειας τεκμηρίωσης της πολιτιστικής κληρονομιάς αφού προσφέρει σημαντικές δυνατότητες καταγραφής, διατήρησης και προβολής αρχαιολογικών ευρημάτων και αντικειμένων τέχνης (αγαλμάτων, αγγείων, ανάγλυφων, κοσμημάτων, χρηστικών ειδών, εργαλείων, μουσικών οργάνων, έργων λαϊκής τέχνης κ.α.). Τα αντικείμενα αυτά αν και εντάσσονται κατά πλειοψηφία στην κατηγορία αντικειμένων που περιγράφονται από επιφάνειες ελεύθερης μορφής, διατηρούν μια σειρά από ιδιαιτερότητες που τα διαφοροποιούν από τα μηχανολογικά εξαρτήματα ελεύθερης μορφής. Στη ΔΕ πραγματοποιείται σύντομη επισκόπηση της διεθνούς επιστημονικής δραστηριότητας και της υφιστάμενης στάθμης της τεχνολογίας στα ζητήματα που αφορούν στην τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος.

Κύριο αντικείμενο της ΔΕ είναι η διερεύνηση του επιπέδου πιστότητας που μπορεί να επιτευχθεί κατά την ψηφιακή αποτύπωση και την 3D-CAD μοντελοποίηση αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος, με τη χρήση λέιζερ κάμερας προσαρτημένης σε μηχανή μέτρησης συντεταγμένων τύπου αρθρωτού βραχίονα. Ειδικότερα, διερευνάται πειραματικά η επίδραση τόσο του υλισμικού όσο και συγκεκριμένων παραμέτρων του λογισμικού στην πιστότητα/ αβεβαιότητα του παραγόμενου CAD μοντέλου. Επίσης, στη ΔΕ εξετάζονται οι δυνατότητες ψηφιακής αποκατάστασης/ ανασύνθεσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς από τα επιμέρους διατιθέμενα μέλη τους με τη χρήση εργαλείων 3D-CAD.

Η πειραματική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσα από τρεις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιήθηκε ο σχετικός εξοπλισμός (σαρωτής laser, μηχανές μέτρησης συντεταγμένων, λογισμικό επεξεργασίας νέφους σημείων, μετρητικό λογισμικό) του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Αντιστρόφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Στην πρώτη εφαρμογή παρουσιάζεται η μοντελοποίηση πρότυπης σφαίρας, στη δεύτερη η ψηφιακή αποτύπωση μουσειακού αντιγράφου κυκλαδικού ειδωλίου, ενώ η τρίτη αναφέρεται στην προσπάθεια ψηφιακής αποκατάστασης θραυσμένου κεραμικού κυαθίου. Για τις δύο πρώτες εφαρμογές, τα αποτελέσματα της 3D-CAD μοντελοποίησης ελέγχονται ως προς την διαστασιολογική και γεωμετρική πιστοτήτά τους αντίστοιχα με τη χρήση υψηλής ακρίβειας μηχανής μέτρησης συντεταγμένων τύπου γέφυρας με αισθητήρα επαφής. Τα συνολικά αποτελέσματα των τριών εφαρμογών σχολιάζονται και προτείνονται κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της ΔΕ. Από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε προκύπτει ότι διαμορφώνεται ένα ευρύ επιστημονικό/ ερευνητικό πεδίο στο εν λόγω αντικείμενο, στο οποίο ο ρόλος του Μηχανολόγου Μηχανικού είναι καθοριστικός.

Abstract

The evolution of industrial manufacturing in conjunction with the progress of the means of production and engineering design using PC (*Computer Aided Design – CAD*), has gradually led to the use of complex geometric shapes, which show strong geometric complexity and are described as free-form surfaces. The design, production, quality control and the reverse mechanical engineering of parts with free form surfaces are largely based on three-dimensional (3-D) CAD Modeling and constitute a new, important and dynamically evolving professional / academic field in Mechanical Engineering. In this context, it is of great importance to investigate the effectiveness and the development of methods, means and tools that can ensure the successful production of such components. The overall objective of this diploma thesis is to contribute to the investigation of the above mentioned topic.

Moreover, three-dimensional digitization is nowadays an integral part of heritage documentation as it offers significant potential in recording, preserving and displaying of archaeological finds and artefacts (statues, vases, reliefs, jewelry, utilitarian items, tools, musical instruments, etc.). Although the majority of these items fall in the category of objects described by free-form surfaces, they retain a number of characteristics that differentiate them from the free-form mechanical parts. In this thesis, a brief overview of the international scientific activity is presented and the current state of technology issues relating to the three-dimensional digitization of cultural artifacts is reviewed.

The main objective of the thesis is to investigate the level of precision that can be achieved in the digitization and 3D-CAD modeling of cultural interest artefacts, using a laser camera in conjunction with an articulated-arm type coordinate measuring machine (AA-CMM). In particular, the influence of both hardware and software specific parameters in the precision / uncertainty of the generated CAD model is experimentally investigated. Also, the thesis discusses the possibilities of digital restoration / reconstruction of objects of cultural heritage from limited number of available fragments, by the use of 3D-CAD tools.

The experimental investigation is carried out through three applications that used the equipment (scanner, laser, CMM, cloud of points fitting software, measuring software) of Rapid Prototyping and Reverse Engineering Laboratory of the School of Mechanical Engineering of NTUA. The first one shows the CAD modeling of a sphere gauge, the second one, the digital reconstruction of a Cycladic figurine museum replica, while the third refers to the digital restoration effort of a fragmented pottery cup. For the first two applications, the dimensional and geometric precision of the 3D-CAD models are evaluated respectively through the use of high-precision bridge-type coordinate measuring machine (BT-CMM) with contact probe. The overall results of all three applications are discussed and relative future work is proposed. As a general conclusion, it is pointed out that a broad scientific / research field in this area is currently being established, in which the role of Mechanical Engineer is of great importance.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Η σημασία της τρισδιάστατης CAD μοντελοποίησης αντικειμένων με ελεύθερες επιφάνειες	1
1.2	Ψηφιακή αποτύπωση/τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς.....	3
1.3	Ο ρόλος του Μηχανολόγου Μηχανικού	4
1.4	Οριοθέτηση Διπλωματικής Εργασίας.....	6
1.5	Δομή και οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	7
2	Επισκόπηση Έρευνας & Τεχνολογικής Εξέλιξης	9
2.1	Σχετικές Διπλωματικές Εργασίες στο Εργαστήριο ΤΠΚ&ΑΣ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ	9
2.2	Σχετικές Ερευνητικές Εργασίες	11
3	Μέθοδοι και Τεχνολογίες 3D Αποτύπωσης/Μοντελοποίησης αντικειμένων με ελεύθερες επιφάνειες	13
3.1	Συμβατικές μέθοδοι	13
3.2	Σύγχρονες τεχνολογίες τεκμηρίωσης / τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς	18
3.2.1	<i>Τρισδιάστατη ψηφιοποίηση</i>	18
3.2.2	<i>Οι ιδιαιτερότητες των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς</i>	23
3.2.3	<i>Παρουσίαση της τρέχουσας στάθμης της τεχνολογίας – Βασικές μέθοδοι αποτύπωσης και ανακατασκευής</i>	27
3.2.4	<i>Σαρωτές τριγωνοποίησης με ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων</i>	36
3.2.5	<i>Η ακρίβεια των γεωμετρικών αποτελεσμάτων</i>	43
4	Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων	49
4.1	Βασικές αρχές των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων	49
4.2	Οι ΜΜΣ τύπου Αρθρωτού Βραχίονα	52
4.3	Εφαρμογές των ΜΜΣ-ΑΒ στον ποιοτικό έλεγχο και στον ΑΜΣ.....	53
5	Αβεβαιότητα ΜΜΣ	55
5.1	Εισαγωγή στην Ορολογία της Μετρολογίας.....	55
5.2	Διασαφήνιση των όρων ακρίβεια, ανοχή, πιστότητα, σφάλμα και αβεβαιότητα μέτρησης.....	59
5.3	Πηγές αβεβαιότητας στη μέτρηση	64
5.4	ISO – GUM: Οδηγός Εκτίμησης της Αβεβαιότητας στις Μετρήσεις.....	65
5.5	ASME B89.4.22-2004: Μέθοδοι για την Εκτίμηση της Απόδοσης ΜΜΣ-ΑΒ	66

6	Κατηγοριοποίηση αντικειμένων με βάση τη γεωμετρική τους μορφή.	68
7	Περιγραφή χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού.....	71
7.1	ΜΜΣ-ΑΒ / Τρισδιάστατος σαρωτής FARO ARM.....	71
7.2	Λογισμικό ψηφιακής αποτύπωσης Geomagic Studio.....	72
7.3	Λογισμικό CAD μοντελοποίησης Rhinoceros 3D.....	76
7.4	ΜΜΣ-ΤΓ / Αυτόματη CMM MISTRAL 070705	76
8	Εφαρμογή 1: Διερεύνηση Διαστασιολογικής Πιστότητας - Πρότυπη Σφαίρα.....	77
9	Εφαρμογή 2: Διερεύνηση Γεωμετρικής Πιστότητας - Κυκλαδικό Ειδώλιο	84
10	Εφαρμογή 3: Ψηφιακή Αποκατάσταση Θραυσμένου Κυάθιου	109
11	Συμπεράσματα & Προοπτικές Διπλωματικής Εργασίας	129
11.1	Συμπεράσματα Δ. Ε.....	129
11.2	Κατευθύνσεις/ Προτάσεις για την συνέχεια της Δ.Ε.....	131

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων χωρίς εσάρπα	14
Εικόνα 2: Προεργασία ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα	15
Εικόνα 3: Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα	15
Εικόνα 4: Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα	16
Εικόνα 5: Μέθοδοι οπτικής αναπαράστασης τρισδιάστατων δεδομένων	22
Εικόνα 6: Διάχυση του φωτός σε μαρμαρινη επιφάνεια	24
Εικόνα 7: Δημιουργία απόκλισης της δέσμης φωτός	24
Εικόνα 8: Σάρωση κατά την παρουσία αποφράξεων	25
Εικόνα 9: Ανακλάσεις και ασυνέχειες της δέσμης φωτός	26
Εικόνα 10: Αδυναμία αποφυγής πρόσκρουσης	26
Εικόνα 11: Βασικός διαχωρισμός τεχνικών οπτικής τρισδιάστατης σάρωσης	29
Εικόνα 12: Διάφοροι τύποι μοτίβων προβολής αντίνων λέιζερ	37
Εικόνα 13: Η αρχή της τριγωνοποίησης	38
Εικόνα 14: Συμβατική προσέγγιση σάρωσης	40
Εικόνα 15: Απλοποιημένο διάγραμμα σαρωτή με ένα άξονα σάρωσης	41
Εικόνα 16: Σάρωση διπλών αξόνων	41
Εικόνα 17: Χειροκίνητος έλεγχος βέλτιστης εστίασης της ακτίνας πάνω σε αντικείμενο	44
Εικόνα 18: Φυσικά όρια τρισδιάστατων οπτικών μετρήσεων που βασίζονται σε προβολή δέσμης φωτός – λέιζερ	44
Εικόνα 19: Θορυβώδες Gaussian προφίλ δέσμης φωτός (speckle noise)	45
Εικόνα 20: Συμπεριφορά ανάκλασης φωτός πάνω σε επιφάνειες	46
Εικόνα 21: Θόρυβος σε νέφος σημείων και η μεταφορά του στο πολυγωνικό πλέγμα	48
Εικόνα 22: Τυπική ΜΜΣ και διαγραμματική απεικόνιση εναλλακτικής κατασκευαστικής διαμόρφωσης ΜΜΣ	50
Εικόνα 23 ΜΜΣ τύπου αρθρωτού βραχίονα (AB) σε τρίποδα	52
Εικόνα 24 Βαθμοί ελευθερίας αρθρώσεων ΜΜΣ - AB	53
Εικόνα 25: Σχέση Αξιοπιστίας – Ακρίβειας	62
Εικόνα 26: Σχέση Αβεβαιότητας – Σφάλματος	63
Εικόνα 27: Παράγοντες που επιδρούν στην αβεβαιότητα μετρητικών αποτελεσμάτων ΜΜΣ [4]	65
Εικόνα 28: Αντικείμενα συμβατικής γεωμετρίας	68
Εικόνα 29: Αντικείμενα περίπλοκης γεωμετρίας	69
Εικόνα 30: Αντικείμενα ελεύθερης μορφής	69

Εικόνα 31: Βραχίονας FARO PLATINUM ARM Model P083D.....	72
Εικόνα 32: Επιφάνεια εργασίας του λογισμικού Geomagic Studio 9	73
Εικόνα 33: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας νέφους σημείων μοναδικής σάρωσης [22].....	74
Εικόνα 34: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας νέφους σημείων πολλαπλών σαρώσεων [22]	75
Εικόνα 35: Μέτρηση της πρότυπης σφαίρας στην ΜΜΣ-ΤΓ – Εφαρμογή 1	78
Εικόνα 36: Σάρωση πρότυπης σφαίρας με την λέιζερ κάμερα ΜΜΣ-ΑΒ	79
Εικόνα 37: Δεδομένα Σάρωσης -1 (πράσινο: raw data, γκρι: ordered data)	81
Εικόνα 38: Υπολογισμός σφαίρας σε πολυγωνικό μοντέλο από το λογισμικό Geomagic Studio.....	81
Εικόνα 39: Όψεις και λεπτομέρειες του Κυκλαδικού ειδωλίου – Εφαρμογή 2	85
Εικόνα 40: Πρώτη σάρωση Κυκλαδικού ειδωλίου – Εφαρμογή 2	86
Εικόνα 41: Συμπληρωματικές/ επιμέρους σαρώσεις.....	87
Εικόνα 42: Όψεις του αντικειμένου μετά το Manual Registration.....	87
Εικόνα 43: Οπτικοποίηση του αποτελέσματος της σύνθεσης των επιμέρους σαρώσεων.....	88
Εικόνα 44: Διαμόρφωση επιφάνειας για διαφορετικές τιμές ομαλότητας	89
Εικόνα 45: Αρχικό πολυγωνικό μοντέλο Κυκλαδικού ειδωλίου	90
Εικόνα 46: Επιδιόρθωση οπής στο μοντέλο πολυγώνων	91
Εικόνα 47: Συμπλήρωση ανοικτού τμήματος	92
Εικόνα 48: Ατέλειες στην επιφάνεια του μοντέλου πολυγώνων.....	92
Εικόνα 49: Δοκιμαστική περιοχή χωρίς εφαρμογή χαλάρωσης πολυγώνων	93
Εικόνα 50: Αποτελέσματα για διάφορες τιμές ομαλότητας και έντασης χαλάρωσης.....	94
Εικόνα 51: Εφαρμογή χαλάρωσης στο σύνολο των πολυγώνων	95
Εικόνα 52: Κατασκευή επιπέδου αναφοράς 1.....	96
Εικόνα 53: Καθαρισμός του χείλους της βάσης του μοντέλου	97
Εικόνα 54: Κάλυψη οπής βάσης	97
Εικόνα 55: Διάφορες όψεις του αποτελέσματος σύγκρισης των δύο μοντέλων	100
Εικόνα 56 Αντιπαραβολή του CAD μοντέλου Eidolio 1-1.igs με το αρχικό νέφος σημείων	101
Εικόνα 57 Αντιπαραβολή του CAD μοντέλου Eidolio 1-2.igs με το αρχικό νέφος σημείων	102
Εικόνα 58: Λήψη σημείων στο Κυκλαδικό ειδώλιο με τον αισθητήρα επαφής της ΜΜΣ-ΤΓ	103
Εικόνα 59: Εισαγωγή του μοντέλου CAD του Κυκλαδικού ειδωλίου στο μετρητικό λογισμικό PC-DMIS της ΜΜΣ-ΤΓ και πρόγραμμα λήψης σημείων επαφής.....	104
Εικόνα 60 Οδήγηση του αισθητήρα επαφής της ΜΜΣ-ΤΓ μέσω του μοντέλου CAD.....	104
Εικόνα 61 Υπολογιστική λήψη σημείων επαφής ΜΜΣ-ΤΓ στο μοντέλο CAD του αντικειμένου	104

Εικόνα 62 Έλεγχος γεωμετρικής ανοχής πιστότητας επιφανείας του CAD μοντέλου Eidolio 1-1.igs	105
Εικόνα 63 Έλεγχος γεωμετρικής ανοχής πιστότητας επιφανείας του CAD μοντέλου Eidolio 2-1.igs	105
Εικόνα 64 Η μηχανή ΤΚΠ U-print της εταιρίας Dimension	106
Εικόνα 65 Φάσεις κατασκευής αντιγράφου του ειδωλίου με τη μέθοδο RP/ U-Print	107
Εικόνα 66 Πρωτότυπο και RP/ U-Print αντίγραφο Κυκλαδικού ειδωλίου	107
Εικόνα 67: Φωτογραφική αποτύπωση των τεμαχίων (Α), (Β), (Γ) του κυαθίου – Εφαρμογή 3	110
Εικόνα 68: Παράδειγμα επιφάνειας που παρουσιάζει αυξημένη δυσκολία στην σάρωση	111
Εικόνα 69: Αρχικό νέφος σημείων πρώτης σάρωσης τεμαχίου (Α).....	111
Εικόνα 70: Νέφος σημείων μετά την διαγραφή σημείων του δαπέδου στήριξης	112
Εικόνα 71: Οπτικοποίηση της διαδικασίας απομάκρυνσης θορύβου	113
Εικόνα 72: Μετά την ομογενοποίηση του νέφους σημείων	114
Εικόνα 73: Νέφος σημείων δεύτερης σάρωσης τεμαχίου (Α) μετά την επεξεργασία.....	114
Εικόνα 74: Μετά την εφαρμογή του <i>Registration</i>	115
Εικόνα 75: Μετά των εφαρμογή του <i>Merge</i>	115
Εικόνα 76: Λεπτομέρεια της επιφάνειας με και χωρίς εφαρμογή απομάκρυνσης θορύβου ..	116
Εικόνα 77: Λεπτομέρεια πριν και μετά την εφαρμογή <i>Remove Spikes</i>	116
Εικόνα 78: Υπολογισμός του άξονα περιστροφής	117
Εικόνα 79: Δημιουργία επιπέδου αναφοράς.....	117
Εικόνα 80: Δημιουργία επιπέδου 4	118
Εικόνα 81: Άποψη του τεμαχίου και των επιπέδων	118
Εικόνα 82: Ευθυγράμμιση με άξονες αναφοράς	119
Εικόνα 83: Δημιουργία συνόρου μέσω τομής με το επίπεδο 4	119
Εικόνα 84: Αντιπροσωπευτική διατομή	120
Εικόνα 85: Διαστασιολόγηση μέσω του λογισμικού	120
Εικόνα 86: Αναπαράσταση του αρχικού κυαθίου	121
Εικόνα 87: Νέφος σημείων σάρωσης τεμαχίου (Β)	121
Εικόνα 88: Πολυγωνικό πλέγμα τεμαχίου (Β)	122
Εικόνα 89: Άξονας συμμετρίας και βοηθητικά επίπεδα.....	122
Εικόνα 90: Σύνθεση τεμαχίων (Α) και (Β).....	123
Εικόνα 91: Τοποθέτηση τεμαχίου στη μέγγενη και εφαρμογή πούδρας (τεμάχιο Γ).....	123
Εικόνα 92: Πολυγωνικό πλέγμα και άνοψη τεμαχίου (Γ).....	124
Εικόνα 93: Εισαγωγή του τεμαχίου (Γ) και σύνθεση με τα (Α) και (Β)	124

Εικόνα 94: Όψεις της σύνθεσης των τριών θραυσμάτων.....	125
Εικόνα 95: Προοπτική άποψη της σύνθεσης.....	126
Εικόνα 96: Προφίλ διατομής.....	127
Εικόνα 97: Βασικές διαστάσεις του μοντέλου	127
Εικόνα 98: Φωτορεαλιστική απεικόνιση του μοντέλου του κυαθίου	128

Συμβολισμοί & Συντομογραφίες

ΔΕ	Διπλωματική Εργασία
3D	Τρισδιάστατος
CAD	Computer Aided Design
ΜΜΣ	Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM)
ΜΜΣ-ΑΒ	Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων Αρθρωτού Βραχίονα
ΜΜΣ-ΤΓ	Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων Τύπου Γεφύρας
ΑΜΣ	Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός
ΤΚΠ&ΑΣ	(Εργαστήριο) Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Αντιστρόφου Σχεδιασμού

1

Εισαγωγή

1.1 Η σημασία της τρισδιάστατης CAD μοντελοποίησης αντικειμένων με ελεύθερες επιφάνειες

Τα εξαρτήματα/ προϊόντα/ μηχανολογικές κατασκευές στη συνήθη βιομηχανική παραγωγή περιγράφονται κατά κανόνα από απλές γεωμετρικές μορφές οι οποίες προκύπτουν από τη σύνθεση βασικών στερεών, όπως ο κύλινδρος, η σφαίρα, το παραλληλεπίπεδο. Παλαιότερες μελέτες, όπως αυτή που εκπονήθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970 στο πανεπιστήμιο του Rochester [1], αναφέρουν ότι το 80-85% των μηχανολογικών εξαρτημάτων περιγράφονται επαρκώς με τη συνδυαστική χρήση επιπέδων και κυλίνδρων, ενώ το ποσοστό αυτό φτάνει στο 90-95% εάν συμπεριληφθούν και άλλα βασικά στερεά (π.χ. κώνος, σφαίρα), [2]. Η διαπίστωση αυτή συνδέεται άμεσα με τις γεωμετρικές μορφές που αποδίδονται ευκολότερα από τα συνηθέστερα μέσα και μεθόδους παραγωγής στα οποία βασίζεται παραδοσιακά η κατασκευαστική δραστηριότητα (π.χ. τόννευση, φρεζάρισμα, διάτρηση). Ωστόσο, στη σύγχρονη βιομηχανική παραγωγή εμφανίζεται ολοένα και περισσότερο η ανάγκη κατασκευής αντικειμένων που οι επιφάνειές τους δεν περιορίζονται από τη σύνθεση βασικών γεωμετρικών στερεών και χαρακτηρίζονται από ελεύθερες μορφές π.χ. εργαλεία παραγωγής (εργαλεία διαμόρφωσης, χύτευσης) για την κατασκευή ελασματοουργικών εξαρτημάτων στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Αποτελεί γεγονός ότι η πρόσφατη εξέλιξη των βιομηχανικών κατασκευών σε συνδυασμό με την πρόοδο των μέσων παραγωγής και των συστημάτων μηχανολογικού σχεδιασμού με χρήση Η/Υ (Computer Aided Design – CAD), έχει προοδευτικά οδηγήσει στη χρήση σύνθετων γεωμετρικών μορφών οι οποίες χαρακτηρίζονται ως ελεύθερης μορφής επιφάνειες (free – form surfaces). Οι επιφάνειες αυτές παρουσιάζουν έντονη γεωμετρική πολυπλοκότητα

και προσεγγίζονται με πολυωνυμικές συναρτήσεις υψηλού βαθμού και αντίστοιχες παραμετρικές καμπύλες τύπου Bézier, B-splines και NURBS. Σε σημαντικό αριθμό σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών (αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, κατασκευή οπτικών συστημάτων, βιοϊατρικών εμφυτευμάτων κ.α.) η επιτυχής απόδοση της γεωμετρίας με τη χρήση επιφανειών ελεύθερης μορφής αποτελεί προϋπόθεση για την εξασφάλιση των κρίσιμων λειτουργικών χαρακτηριστικών και των υψηλών επιδόσεων των προϊόντων και των κατασκευών. Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι περιπτώσεις όπου η λειτουργικότητα ενός εξαρτήματος εξαρτάται άμεσα από την αλληλεπίδρασή του με ένα ρευστό ή μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (γεωμετρική διαμόρφωση πτερύγων αεροσκαφών, φακών οπτικών συστημάτων κ.α.). Επίσης, σε ορισμένες εφαρμογές (κινητά τηλέφωνα, αυτοκίνητα, καταναλωτικά προϊόντα, κ.α.), η αναγκαιότητα της ενσωμάτωσης επιφανειών ελεύθερης μορφής στα προϊόντα και στις κατασκευές επιβάλλεται από τις σύγχρονες αισθητικές απαιτήσεις.

Η μοντελοποίηση σε περιβάλλον 3-D CAD (Computer Aided Design) ενός εξαρτήματος / προϊόντος/ κατασκευής αποτελεί στο σύγχρονο κατασκευαστικό περιβάλλον απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη κρίσιμων εφαρμογών σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του. Έτσι, η φάση σχεδιασμού (εργαλεία ανάλυσης Computer Aided Engineering - CAE, όπως η ανάλυση FEM - Finite Elements Method), η φάση κατασκευής πρωτοτύπων με μεθόδους Rapid Prototyping, η φάση προγραμματισμού παραγωγής και κατασκευής με σύγχρονα μέσα ελεγχόμενα από H/Y (Computer Aided Process Planning – CAPP και Computer Aided Manufacturing – CAM), η φάση ποιοτικού ελέγχου (Computer Aided Inspection Planning – CAIP) και τέλος η φάση συναρμολόγησης, βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην ύπαρξη του τρισδιάστατου μοντέλου CAD. Ειδικότερα για τα εξαρτήματα/ προϊόντα με ελεύθερες επιφάνειες, η αναγκαιότητα της τρισδιάστατης μοντελοποίησης σε περιβάλλον CAD είναι ακόμα μεγαλύτερη. Αυτό αποδίδεται στο ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, το τρισδιάστατο CAD μοντέλο αποτελεί τη βάση π.χ. για αξιόπιστο και παραγωγικό ποιοτικό έλεγχο και τη συνακόλουθη εξασφάλιση της εναλλαξιμότητας. Σε αντίθεση με τα εξαρτήματα συμβατικής γεωμετρίας όπου ο ποιοτικός έλεγχος ενδεχομένως να περιορίζεται σε μετρήσεις αποστάσεων ή διαμέτρων, στα εξαρτήματα με ελεύθερες επιφάνειες ο ποιοτικός έλεγχος (π.χ. ο έλεγχος γεωμετρικής ανοχής πιστότητας επιφάνειας – profile tolerance κατά ASME Y14.5M) μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την υπολογιστική αντιπαραβολή των γεωμετρικών αποκλίσεων του κατασκευασμένου εξαρτήματος με την ονομαστική μορφή, αποκλειστικά σε περιβάλλον 3D CAD.

Από όσα ήδη αναφέρθηκαν γίνεται σαφές ότι ο σχεδιασμός, η παραγωγή, ο ποιοτικός έλεγχος αλλά και ο αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός εξαρτημάτων με ελεύθερες επιφάνειες βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην τρισδιάστατη CAD Μοντελοποίηση και αποτελούν νέα, σημαντικά και δυναμικά εξελισσόμενα πεδία επαγγελματικής/ επιστημονικής δραστηριότητας του Μηχανολόγου Μηχανικού. Στο πλαίσιο αυτό περιλαμβάνεται η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας καθώς και η εξέλιξη των σχετικών μεθόδων, μέσων και τεχνολογικών εργαλείων που μπορούν να εξασφαλίσουν την επιτυχή παραγωγή τέτοιου είδους εξαρτημάτων. Η εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας εντάσσεται στο προαναφερθέν πλαίσιο και έχει ως γενικό στόχο τη συμβολή στη διερεύνηση του παραπάνω αντικειμένου.

1.2 Ψηφιακή αποτύπωση/τεκμηρίωση αντικειμένων

πολιτιστικής κληρονομιάς

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται διεθνώς ερευνητικές δραστηριότητες και συναφείς εφαρμογές με στόχο την *υψηλής πιστότητας* τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση, μοντελοποίηση και τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς (αγαλμάτων, αγγείων, ανάγλυφων, κοσμημάτων, χρηστικών ειδών, εργαλείων, μουσικών οργάνων, έργων λαϊκής τέχνης κ.α.). Τα αντικείμενα αυτά αν και εντάσσονται κατά πλειοψηφία στην κατηγορία αντικειμένων που περιγράφονται από επιφάνειες ελεύθερης μορφής, όπως παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 1.1, διατηρούν μια σειρά από ιδιαιτερότητες που τα διαφοροποιούν από τα μηχανολογικά εξαρτήματα ελεύθερης μορφής (π.χ. απουσία ανάγκης εναλλαξιμότητας). Η εφαρμογή των σύγχρονων τεχνολογιών και μέσων ψηφιακής αποτύπωσης (σαρωτές laser, μηχανές μέτρησης συντεταγμένων CMM κ.α.) δίνει πλέον τη δυνατότητα τεκμηρίωσης, *με τη μορφή ψηφιακών στερεών μοντέλων*, αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος. Με τον τρόπο αυτό μπορεί, καταρχήν, να αντικατασταθεί η παραδοσιακή τεκμηρίωσή τους με φωτογραφίες και σχέδια που προφανώς δεν εξασφαλίζουν άμεση, πλήρη και ακριβή από κάθε άποψη πληροφόρηση, αξιοποίηση αλλά και δυνατότητα πιστής αναπαραγωγής.

Σε σύγκριση με τις καθιερωμένες μεθόδους τεκμηρίωσης των παραπάνω αντικειμένων, που βασίζονται στη χειρόγραφη σχεδίαση και τη συμβατική/ ψηφιακή φωτογράφιση, η ψηφιακή τρισδιάστατη υψηλής πιστότητας τεκμηρίωσή τους μεταξύ άλλων εξασφαλίζει:

- Χρονικά αναλλοίωτα και ασφαλέστερα διαφυλασσόμενα και ενημερωμένα ψηφιακά αρχεία.
- Συστηματική παρακολούθηση μεταβολών από ηλικία, βλαβών από τυχαίες ή συστηματικές αιτίες.
- Υψηλής ποιότητας και πολλαπλών δυνατοτήτων υποστήριξη της αρχαιολογικής έρευνας και μελέτης.
- Ακριβέστερη συντήρηση – αποκατάσταση.
- Άμεση διάδοση και προβολή των έργων της πολιτιστικής κληρονομιάς (μουσειακές ψηφιακές/ διαδικτυακές ανταλλαγές, διεθνείς σχέσεις, εκπαιδευτικές και τουριστικές εφαρμογές).
- Κινηματική/ στατική/ δυναμική ανάλυση σε περιβάλλον CAD – CAE, με βάση το ψηφιακό μοντέλο των αντικειμένων για την επιστημονική κατάρτιση τεχνικών προδιαγραφών μουσειακής στήριξης, συσκευασίας, διακίνησης, μεταφοράς, ασφάλειας έναντι πτώσης-βανδαλισμού κλπ.
- Κατασκευή πιστών αντιγράφων με χρήση σύγχρονων τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ψηφιακή μοντελοποίηση και μεθόδους ταχείας προτυποποίησης [CAD/CAE/ CAM - RP (*Rapid Prototyping*) – RT (*Rapid Tooling*)].
- Συστηματική και αντικειμενική αξιολόγηση της πιστότητας των αρχείων και των αντιγράφων καθώς και της αντοχής των τελευταίων.

Αποτελεί γεγονός ότι η εισαγωγή και χρήση των σύγχρονων τεχνολογιών ψηφιακής αποτύπωσης σαν εργαλείο για τη διαφύλαξη και προβολή της παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς είναι ένα νέο, συναρπαστικό και ταχύτατα εξελισσόμενο επιστημονικό πεδίο. Τα μέχρι σήμερα αποτελέσματα, σημαντικά αλλά οπωσδήποτε αποσπασματικού χαρακτήρα, καταδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω έρευνας και ανάπτυξης ώστε να προκύψουν εύχρηστοι, ταχείς, χαμηλού κόστους και, κυρίως, αξιόπιστες συναφείς μέθοδοι, μέσα και διαδικασίες. Για τη χώρα μας με την πλούσια πολιτιστική κληρονομιά είναι προφανής η σημασία καθώς επίσης και τα άμεσα και έμμεσα οφέλη που θα προκύψουν από την επιστημονική και τεχνολογική δραστηριοποίηση στον τομέα αυτόν. Άλλες χώρες με σαφώς μικρότερο πολιτιστικό δυναμικό από εμάς ήδη το κάνουν. Από την έως τώρα διερεύνηση της υπάρχουσας κατάστασης στην Ελλάδα δεν φαίνεται, τουλάχιστον εξ όσων διαπιστώθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, να έχει αρχίσει να αναπτύσσεται συστηματικά μέχρι σήμερα συναφής εκτεταμένη επιστημονική δραστηριότητα.

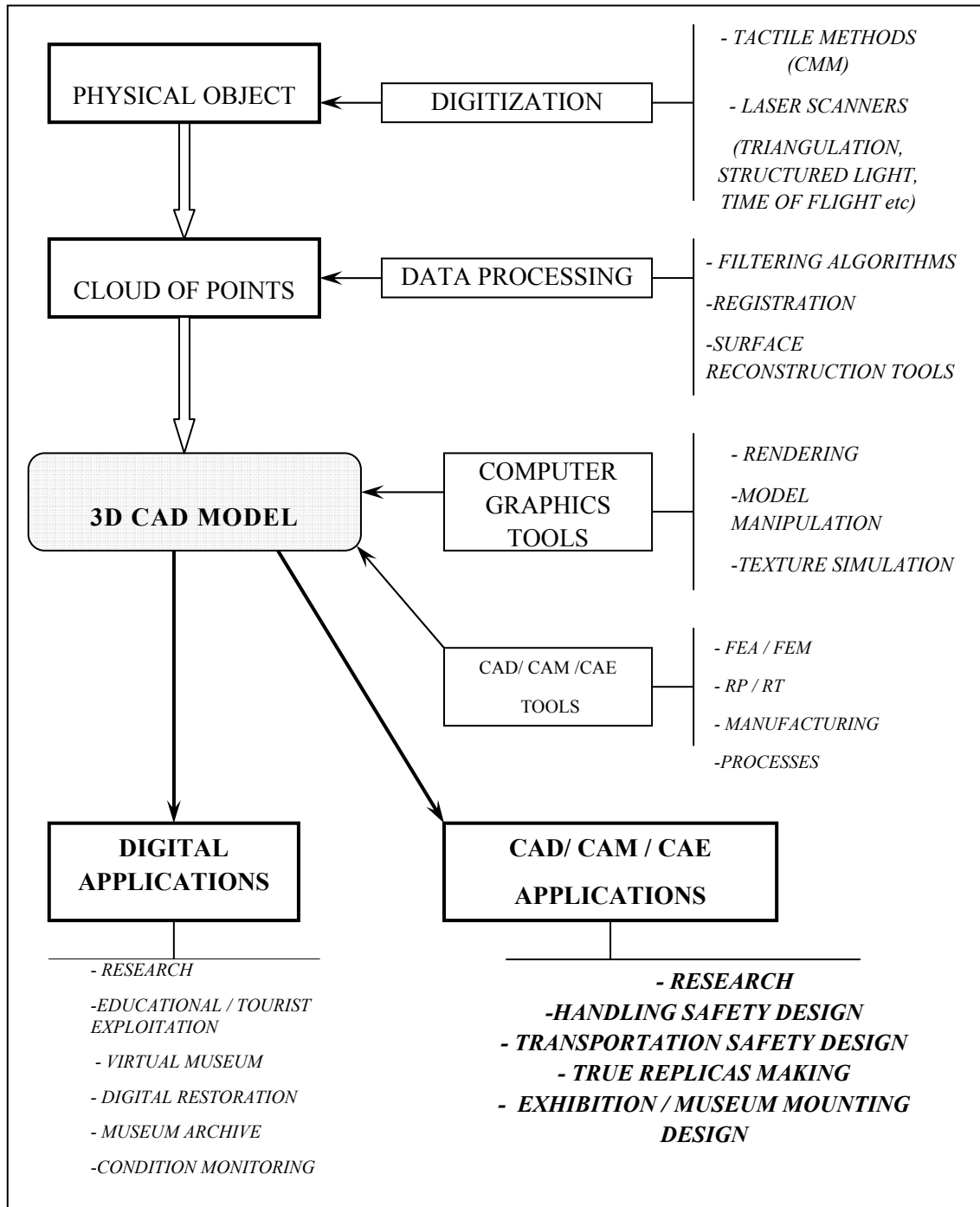
1.3 Ο ρόλος του Μηχανολόγου Μηχανικού

Η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνολογιών ψηφιακής αποτύπωσης τόσο με επαφή (π.χ. μηχανών μέτρησης συντεταγμένων CMM) όσο και χωρίς επαφή (π.χ. σαρωτές 3D laser), οι τεχνολογίες ανάλυσης και πιστοποίησης γεωμετρικής ακρίβειας / ποιοτικού ελέγχου, οι μέθοδοι και οι τεχνικές αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού, η δημιουργία, απεικόνιση και τροποποίηση ενός τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου που αποδίδει με υψηλή ακρίβεια τη μορφή ενός φυσικού αντικειμένου σε περιβάλλον CAD αποτελούν σύγχρονες, σημαντικές περιοχές δραστηριότητας του Μηχανολόγου Μηχανικού. Με στόχο την επίλυση προβλημάτων που εμφανίζονται στο βιομηχανικό και κατασκευαστικό περιβάλλον οι παραπάνω περιοχές εδώ και αρκετές δεκαετίες αποτελούν αντικείμενο μελέτης που εντάσσεται και στο επιστημονικό πεδίο του μηχανολόγου μηχανικού. Πρόσφατα, όπως ήδη αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.2, διερευνάται η εφαρμογή των επιστημονικών αυτών περιοχών στον τομέα της τεκμηρίωσης, προβολής, παρακολούθησης, αποκατάστασης και αναπαραγωγής αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος.

Η τρέχουσα έρευνα σε διεθνές επίπεδο επιδιώκει οι σχετικές εργασίες υλοποιούμενες σε περιβάλλον CAD να επιτυγχάνουν *υψηλή ακρίβεια αποτύπωσης γεωμετρίας και διαστάσεων* και να εξασφαλίζουν προϋποθέσεις περαιτέρω αξιοποίησης των αποτελεσμάτων τους εις όφελος της προστασίας, αποκατάστασης και προβολής των αντικειμένων της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η ύπαρξη ακριβούς/ υψηλής πιστότητας ψηφιακού μοντέλου αποτελεί την απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη εφαρμογών CAD/ CAE (*Computer Aided Engineering*)/ CAM (*Computed Aided Manufacturing*), με σκοπό *την κατασκευή εργαλείων για τη δημιουργία πιστών αντιγράφων, την κινηματική/ στατική/ δυναμική μελέτη συσκευασιών διακίνησης/ μεταφοράς, τη μελέτη μουσειακής στήριξης και ασφάλειας έναντι πτώσης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, κ.α.* Σε κάθε περίπτωση η δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου αποτελεί τον πλέον αξιόπιστο και σύγχρονο τρόπο αρχειοθέτησης και τεκμηρίωσης του αντικειμένου και παίζει έναν καίριο ρόλο σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Η σημαντική πρόοδος σε θέματα ταχύτητας επεξεργασίας, διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος και δυνατότητας αποθήκευσης πληροφορίας που γίνεται στο πεδίο των ηλεκτρονικών υπολογιστών τα τελευταία χρόνια, έχει καταστήσει προσιτή τη δημιουργία και διαχείριση τρισδιάστατων στερεών μοντέλων *πολύπλοκων αντικειμένων με ελεύθερες επιφάνειες* όπως

κατ' εξοχήν είναι τα αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς. Εντούτοις, η ευρύτατη διαφοροποίηση που χαρακτηρίζει τις μορφές, τα υλικά και τις επιμέρους λεπτομέρειες τέτοιου είδους αντικειμένων κάνει τη δημιουργία ενός υψηλής ακρίβειας/ πιστότητας ψηφιακού μοντέλου τους μια εργασία χρονοβόρα, υψηλών απαιτήσεων και κόστους.



Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η διαδικασία της ψηφιακής τεκμηρίωσης και οι εφαρμογές της σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς [3], [4]. Η δημιουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου σε περιβάλλον CAD αποτελεί το κεντρικό και ίσως το κρισιμότερο στάδιο της διαδικασίας ψηφιακής τεκμηρίωσης. Τα διαθέσιμα τεχνολογικά μέσα και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την ψηφιακή αποτύπωση του πρωτότυπου/ αυθεντικού αντικειμένου εισάγουν, αναπόφευκτα, διαστασιολογικές και γεωμετρικές

αποκλίσεις στο παραγόμενο ψηφιακό μοντέλο. Το μέγεθος των αποκλίσεων αυτών εξαρτάται άμεσα από ένα πλήθος τεχνολογικών παραγόντων όπως οι επιδόσεις ακρίβειας των χρησιμοποιούμενων μέσων ψηφιοποίησης και οι μέθοδοι/ δοκιμές με τις οποίες αυτές επαληθεύονται από τον κατασκευαστή τους, οι συνθήκες του περιβάλλοντος κατά τη χρήση τους (π.χ. θερμοκρασία, φωτισμός), το λογισμικό επεξεργασίας των δεδομένων που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση και προσαρμογής κατάλληλων επιφανειών κ.α.

Για την ποσοτική έκφραση της πιστότητας του λαμβανόμενου ψηφιακού μοντέλου, της ακρίβειάς του, ή – με τους όρους της σύγχρονης μετρολογίας – της συνολικής αβεβαιότητάς του είναι απαραίτητος ο συνυπολογισμός όλων αυτών των παραγόντων και η χρήση μεθοδολογιών που βασίζονται στις γενικές κατευθύνσεις του «Οδηγού για τον υπολογισμό της Αβεβαιότητας Μετρήσεων» (*Guide to the expression of Uncertainty in Measurement – GUM*) του διεθνούς οργανισμού προτύπων *ISO* [5]. Η σημασία του επιστημονικά τεκμηριωμένου υπολογισμού του παραπάνω μεγέθους είναι προφανής για την ποιότητα και την επιτυχία της ψηφιακής τεκμηρίωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς.

Επιπλέον η επιστημονική κατάρτιση των απαιτήσεων /προδιαγραφών ακρίβειας διαστάσεων και γεωμετρίας του παραγόμενου σε περιβάλλον CAD 3D ψηφιακού μοντέλου συνδέεται άμεσα τόσο με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ίδιου του αντικειμένου (π.χ. μέγεθος, γεωμετρική πολυπλοκότητα) όσο και με τις απαιτήσεις ακρίβειας της εκάστοτε εφαρμογής (π.χ. μελέτη μουσειακής στήριξης, παραγωγή πιστών αντιγράφων, ψηφιακή αποκατάσταση, εκπαιδευτική αξιοποίηση). Η συστηματική μελέτη και ο καθορισμός της αναγκαίας ακρίβειας ψηφιοποίησης με όρους διαστασιολογικών και γεωμετρικών ανοχών σε σχέση με τον ποσοτικό υπολογισμό της συνολικής αβεβαιότητας των εμπλεκόμενων, κατά περίπτωση, φάσεων αποτελούν απαραίτητα στοιχεία για τη στήριξη αποφάσεων σχετικά με την τεχνολογικά ορθή και κοστολογικά βέλτιστη επιλογή αντίστοιχών μέσων και τεχνολογικών εργαλείων. Ο ρόλος και η συμβολή του Μηχανολόγου Μηχανικού στη διερεύνηση των τεχνολογικών αυτών προβλημάτων είναι καθοριστικός.

1.4 Οριοθέτηση Διπλωματικής Εργασίας

Η τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση αποτελεί πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της προσπάθειας αρχειοθέτησης και τεκμηρίωσης της πολιτιστικής και πολιτισμικής μας κληρονομιάς αφού προσφέρει σημαντικές δυνατότητες καταγραφής, διατήρησης και προβολής αρχαιολογικών ευρημάτων, αντικειμένων τέχνης, ιστορικών μνημείων και αρχιτεκτονικών δημιουργιών.

Στο πλαίσιο της Δ.Ε. καταρχήν πραγματοποιείται επισκόπηση της διεθνούς δραστηριοποίησης και της υφιστάμενης τεχνογνωσίας και τεχνολογίας στα ζητήματα που αφορούν στην τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση αντικειμένων με ελεύθερες επιφάνειες με σκοπό τη διαμόρφωση σαφέστερης εικόνας για τις υπάρχουσες και τις μελλοντικές ανάγκες, τα προβλήματα, τις σημερινές πρακτικές τις πιθανές προοπτικές τόσο στη χώρα μας όσο και διεθνώς στο εν λόγω επιστημονικό πεδίο.

Κύριο αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση του επιπέδου πιστότητας που μπορεί να επιτευχθεί κατά την ψηφιακή αποτύπωση και την 3D-CAD μοντελοποίηση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς μέσω της τεχνολογίας σάρωσης με λέιζερ κάμερα προσαρτημένης σε μηχανή μέτρησης συντεταγμένων τύπου αρθρωτού βραχίονα. Ειδικότερα, διερευνάται πειραματικά η επίδραση τόσο του υλισμικού όσο και συγκεκριμένων

παραμέτρων του λογισμικού διαχείρισης νέφους σημείων και CAD μοντελοποίησης στην πιστότητα/ αβεβαιότητα του παραγόμενου 3D-CAD μοντέλου. Επιπλέον, στην παρούσα ΔΕ εξετάζονται οι δυνατότητες ψηφιακής αποκατάστασης/ ανασύνθεσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς από τα επιμέρους διατιθέμενα μέλη τους με τη χρήση εργαλείων 3D-CAD.

Η πειραματική διερεύνηση πραγματοποιείται μέσα από τρεις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιήθηκε ο σχετικός εξοπλισμός (μέσα ψηφιακής αποτύπωσης, σαρωτές laser, μηχανές μέτρησης συντεταγμένων CMM, λογισμικό επεξεργασίας) του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Αντιστρόφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Στην πρώτη εφαρμογή παρουσιάζεται η μοντελοποίηση πρότυπης σφαίρας, στη δεύτερη η ψηφιακή αποτύπωση μουσειακού αντιγράφου κυκλαδικού ειδωλίου, ενώ η τρίτη αναφέρεται στην προσπάθεια ψηφιακής αποκατάστασης θραυσμένου κεραμικού κυαθίου. Για τις δύο πρώτες εφαρμογές, τα αποτελέσματα της 3D-CAD μοντελοποίησης ελέγχονται ως προς την διαστασιολογική και γεωμετρική πιστοτήτά τους αντίστοιχα με τη χρήση υψηλής ακρίβειας μηχανής μέτρησης συντεταγμένων τύπου γέφυρας με αισθητήρα επαφής. Τα συνολικά αποτελέσματα των τριών εφαρμογών σχολιάζονται και προτείνονται κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας στο αντικείμενο της Δ.Ε.

Από τη συνολική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε προκύπτει ότι διαμορφώνεται ένα ευρύ επιστημονικό/ ερευνητικό πεδίο με αντικείμενο τη συστηματική μελέτη και αξιολόγηση όλων των φάσεων της διαδικασίας της ψηφιακής τεκμηρίωσης πολιτιστικών αντικειμένων, από την αποτύπωση και τη δημιουργία του στερεού ηλεκτρονικού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD έως την παραγωγή και τον έλεγχο των παραγόμενων αρχείων τεκμηρίωσης, πιστών αντιγράφων, σχεδιασμού εναλλακτικών λύσεων στήριξης, συσκευασίας, κλπ. στο οποίο ο ρόλος του μηχανολόγου μηχανικού είναι καθοριστικός.

1.5 Δομή και οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται εισαγωγή στη σύγχρονη προσέγγιση του αντικειμένου της τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης στην τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος, επισημαίνεται ο ρόλος του μηχανολόγου μηχανικού και οροθετείται το πεδίο συμβολής της παρούσας Δ.Ε.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά σε σχετικές Δ.Ε. που έχουν εκπονηθεί στο Εργαστήριο ΤΠΚ&ΑΣ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ καθώς και σε άλλες σχετικές ερευνητικές εργασίες.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται σύντομα οι συμβατικοί τρόποι τεκμηρίωσης / αποτύπωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με τη χρήση εκμαγείων γύψου και ελαστικών, με στόχο να διαπιστωθούν οι συναφείς αδυναμίες και οι ελλείψεις τους. Επίσης παρουσιάζονται οι σύγχρονες τεχνολογίες τεκμηρίωσης / τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς και τα πλεονεκτήματα που αυτές προσφέρουν, με ιδιαίτερη έμφαση στους σαρωτές τριγωνοποίησης με ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων.

Το Κεφάλαιο 4 αναφέρεται στις ΜΜΣ και ειδικότερα στις ΜΜΣ-ΑΒ.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά σε βασικές έννοιες της μετρολογίας και ειδικότερα στον τομέα των ΜΜΣ.

Στο Κεφάλαιο 6 επιχειρείται κατηγοριοποίηση των διαφόρων επιφανειών με βάση την γεωμετρική τους μορφή.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται σύντομα ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου ΤΚΠ-Ε&ΑΣ του Τομέα ΜΚ&ΑΕ του Ε.Μ.Π. που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η CAD μοντελοποίηση πρότυπης μεταλλικής σφαίρας με τη χρήση φορητής ΜΜΣ τύπου αρθρωτού βραχίονα με αισθητήρα λέιζερ και η μέτρηση της διαμέτρου της με σταθερή ΜΜΣ τύπου γέφυρας με αισθητήρα επαφής. Στη συνέχεια αντιπαραβάλλονται τα αποτελέσματα τους με στόχο τη διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τις διαστασιολογικές αποκλίσεις.

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζεται η ψηφιακή αποτύπωση μουσειακού αντιγράφου κυκλαδικού ειδωλίου και η διερευνάται η επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων του λογισμικού διαχείρισης νέφους σημείων και προσαρμογής επιφανειών που εκτιμάται ότι επηρεάζουν την πιστότητα του παραγόμενου 3D-CAD μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 10 παρουσιάζεται η μελέτη θραυσμάτων πήλινου κυαθίου, με σκοπό την ψηφιακή αποτύπωση τους, την ψηφιακή αποκατάσταση και τη δημιουργία του ηλεκτρονικού στερεού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD του αρχικού, πλήρους αντικειμένου.

Στο Κεφάλαιο 11 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της Διπλωματικής Εργασίας και προτείνονται κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας στο αντικείμενό της.

Η Δ.Ε. κλείνει με τις Βιβλιογραφικές Αναφορές.

2

Επισκόπηση Έρευνας & Τεχνολογικής Εξέλιξης

2.1 Σχετικές Διπλωματικές Εργασίες στο Εργαστήριο

ΤΠΚ&ΑΣ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Στο πλαίσιο των εκπαιδευτικών και ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου ΤΚΠ-Ε&ΑΣ του Τομέα ΜΚ&ΑΕ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ έχουν εκπονηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων τέσσερις διπλωματικές εργασίες με αντικείμενο που είναι σχετικό με αυτό της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

- «Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός με Χρήση του Μετρητικού Συστήματος FARO», Γεώργιος Ε. Τσίγκας, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, **Φεβρουάριος 1998**

Η εργασία αυτή επιχειρεί μια πρώτη προσέγγιση στην εφαρμογή τεχνικών Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού με τη χρήση Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων τύπου Αρθρωτού Βραχίονα με αισθητήρα επαφής. Η εργασία εστιάζεται σε συμβατικά μηχανολογικά εξαρτήματα που περιγράφονται με Μορφολογικά Στοιχεία Σχεδιασμού (Form Features). Παρουσιάζονται τέσσερις μελέτες περίπτωσης τέτοιων αντικειμένων και γίνεται χρήση του τότε διαθέσιμου σχετικού εξοπλισμού του Εργαστηρίου (βραχίονας FARO – IND01, μετρητικό λογισμικό CALIPER-3D, λογισμικό CAD Mechanical Desktop). Η αξιολόγηση των εφαρμογών είναι θετική με βάση τον χρόνο και την ευκολία μοντελοποίησης σε περιβάλλον CAD μηχανολογικών αντικειμένων που περιγράφονται από απλά form features κατά τον Αντίστροφο Μηχανολογικό Σχεδιασμό.

- «Αντίστροφος Σχεδιασμός Αντικειμένων Πολύπλοκης Γεωμετρίας σε περιβάλλον CMM – CAD», Θ. Βασιλόπουλος, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, **Σεπτέμβριος 2003**

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται οι ευρύτερα διαδεδομένες τεχνολογίες και διατάξεις για τη μέτρηση – αποτύπωση μηχανολογικών αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας με τη χρήση Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων (ΜΜΣ). Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της αναπαράστασης γεωμετρικών αντικειμένων σε Η/Υ και της λειτουργίας λογισμικών μηχανολογικής σχεδίασης/ γεωμετρικής μοντελοποίησης σε Η/Υ (CAD). Γίνεται χρήση του εξοπλισμού του Εργαστηρίου για την αποτύπωση μηχανολογικών αντικειμένων (πτερωτή και διαχυτής βαθμίδας υποβρύχιας αντλίας) και τον ανασχεδιασμό γεωμετρικών μοντέλων τους σε περιβάλλον CAD.

Αποτιμάται η χρησιμότητα των παραπάνω μέσων και εντοπίζονται-αντιμετωπίζονται τυχόν δυσχέρειες στη συνεργασία και διασύνδεσή τους. Τέλος εκτιμάται η δυνατότητα επέκτασης της ακολουθούμενης μεθοδολογίας σε αξιοποιήσιμα αποτελέσματα σε επίπεδο παραγωγικής διαδικασίας.

- «Εκτίμηση της Αβεβαιότητας μετρήσεων σε μηχανές CMM», Μ. Κάνιας Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, **Δεκέμβριος 2005**.

Παρουσιάζεται η σειρά των προτύπων ISO-GPS 15530, Geometrical Product Specification, Techniques for determining the uncertainty of measurement, η οποία εστιάζει στην εκτίμηση της αβεβαιότητας στις μετρήσεις με χρήση ΜΜΣ. Ειδικότερη μνεία και αναλυτική παρουσίαση γίνεται στο πρότυπο ISO 15530-3 στο οποίο περιγράφεται μια εναλλακτική διαδικασία που είναι σύμφωνη με το GUM και χρησιμοποιεί απλά εργαλεία για την εκτίμηση της αβεβαιότητας. Παράλληλα, εντοπίζονται οι πηγές που συμβάλουν στην αβεβαιότητα μέτρησης με χρήση ΜΜΣ, και υποδεικνύονται οι υπάρχουσες μέθοδοι συνυπολογισμού τους στην εκτίμηση της συνολικής αβεβαιότητας. Αυτό γίνεται ώστε να καθοριστεί η αιτιακή σχέση μεταξύ των συστατικών της αβεβαιότητας και των σφαλμάτων με τα οποία συνδέονται, καθώς και για να καταδειχθεί η βαρύτητα των σημαντικότερων απ' αυτά.

Ακολουθεί η πειραματική διερεύνηση κι εφαρμογή του παραπάνω προτύπου στον συναφή εξοπλισμό του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την εκτίμηση της αβεβαιότητας, σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια υπολογιστικού εργαλείου, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής και έχει ως σκοπό την επεξεργασία των μετρήσεων.

Τέλος, μετά από τη συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων εξάγονται ειδικότερα συμπεράσματα που αφορούν στο μετρητικό περιβάλλον και τον σχετικό εξοπλισμό του Εργαστηρίου ΤΚΠ&Ε του Ε.Μ.Π. αλλά και γενικότερα συμπεράσματα που αφορούν στην εφαρμογή της όλης διαδικασίας.

- «Συμβολή στη χρήση τεχνολογιών για την τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς», Ε. Φωτόπουλος, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, **Ιούλιος 2008**.

Κύριο αντικείμενο της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας είναι η συστηματική καταγραφή και τεκμηρίωση η οποία αφορά στα απαραίτητα στάδια και στα επιμέρους βήματα της διαδικασίας ψηφιακής αποτύπωσης και της δημιουργίας ηλεκτρονικού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με σκοπό τη δημιουργία ενός αντίστοιχου διαγράμματος ροής (workflow) των σχετικών εργασιών.

Για τις πιλοτικές εφαρμογές του διαγράμματος ροής χρησιμοποιήθηκε ο υφιστάμενος εξοπλισμός (μέσα ψηφιακής αποτύπωσης, σαρωτές laser, μηχανές μέτρησης συντεταγμένων CMM, λογισμικό επεξεργασίας, μηχανές ταχείας πρωτοτυποποίησης κ.α.) του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Αντιστρόφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Παρουσιάζονται αναλυτικά τρεις χαρακτηριστικές μελέτες περίπτωσης - εφαρμογές ψηφιακής αποτύπωσης (Κυκλαδικό Ειδώλιο, Κεφαλή Ηρακλή, Πολίτικη λύρα) για τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν μουσειακά αντίγραφα και αυθεντικά αντικείμενα. Τα αποτελέσματα των τριών εφαρμογών σχολιάζονται και προτείνονται κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας στο αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι η παρούσα ΔΕ, αν και αποτελεί συνέχεια της τελευταίας, διαφοροποιείται σημαντικά ως προς αυτή. Όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, κύριος στόχος της παρούσας ΔΕ είναι η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης τόσο του υλισμικού (ΜΜΣ-ΑΒ με λέιζερ κάμερα) όσο και συγκεκριμένων παραμέτρων του λογισμικού διαχείρισης νέφους σημείων και CAD μοντελοποίησης **στην πιστότητα/ αβεβαιότητα του παραγόμενου CAD μοντέλου**. Για τον σκοπό αυτό τα διαφορετικά μοντέλα CAD που δημιουργήθηκαν για τα αντικείμενων τω εφαρμογών συγκρίνονται και αξιολογούνται ως προς τη γεωμετρική τους πιστότητα: (α) μεταξύ τους, (β) αντιπαραβαλλόμενα με το αρχικό νέφος σημείων από το οποίο προήλθαν μέσω προσαρμογής επιφανειών και (γ) με τη χρήση υψηλής ακρίβειας ΜΜΣ-ΤΓ με αισθητήρα επαφής. Επιπλέον κατά την παρούσα ΔΕ εξετάζονται οι δυνατότητες **ψηφιακής αποκατάστασης / ανασύνθεσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς από τα επιμέρους διατιθέμενα μέλη** τους με τη χρήση εργαλείων 3D-CAD.

2.2 Σχετικές Ερευνητικές Εργασίες

- «Μορφοποίηση Πιστών Αντιγράφων Αρχαίων Αντικειμένων Με Εφαρμογή Μεθόδων Αντίστροφης Μηχανολογίας και Ταχείας Πρωτοτυποποίησης», Ε.Βαρύτης, Διδακτορική Διατριβή, *Εργαστήριο Εργαλειομηχανών και Διαμορφωτικής Μηχανολογίας*, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, **Ιούνιος 2009**.

Η Διδακτορική αυτή Διατριβή εξετάζει τον συνδυασμό μεθόδων αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού και ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων και την συναφή εφαρμογή τους σε αντικείμενα πολιτιστικού ενδιαφέροντος. Ειδικότερα σε ότι αφορά στην μοντελοποίηση CAD αντικειμένων τέτοιου είδους, εστιάζεται στα εξής δύο προβλήματα: (α) της αυτόματης συνένωσης δύο ή περισσότερων νεφών σημείων και (β) της απόκτησης και βελτίωσης της ηλεκτρονικής αναπαράστασης της γεωμετρίας αντικειμένων από ένα πολύ μικρό πλήθος σημείων. Για την επίλυση των προβλημάτων αυτών αναπτύσσονται κι εφαρμόζονται νέοι

υβριδικοί αλγόριθμοι που συνδυάζουν κατά περίπτωση δύο ή τρεις μεθοδολογίες (γενετικοί , quasi Newton αλγόριθμοι κ.α.)

Τα τελευταία χρόνια, κυρίως από το 1996 και μετά, αναπτύσσεται έντονη ερευνητική δραστηριότητα και συναφείς εφαρμογές με στόχο τη ψηφιακή τρισδιάστατη *υψηλής πιστότητας* τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Η βιβλιογραφική αναζήτηση σε έγκριτα διεθνή περιοδικά, στα οποία δημοσιεύεται αξιόλογο πλήθος υψηλής ποιότητας ερευνητικών εργασιών, καθώς και η διοργάνωση μεγάλου αριθμού σχετικών επιστημονικών συνεδρίων και ημερίδων αποδεικνύουν το σημαντικό ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας για τα θέματα αυτά. Οι αναφορές [6] – [14] που παρατίθενται ενδεικτικά στο τέλος της ΔΕ δίνουν μια σαφή εικόνα για την πρόσφατη διεθνή κινητικότητα που υπάρχει στο εν λόγω αντικείμενο.

3

Μέθοδοι και Τεχνολογίες 3D

Αποτύπωσης/Μοντελοποίησης αντικειμένων με ελεύθερες επιφάνειες

3.1 Συμβατικές μέθοδοι

➤ Εκμαγεία

Κυριότερη συμβατική μέθοδος για την αποτύπωση αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος αποτελεί η κατασκευή εκμαγείων, η οποία βρίσκει εφαρμογή εδώ και χιλιάδες χρόνια με τα πρώτα εκμαγεία να εντοπίζονται στην αρχαία Αίγυπτο και στην Κίνα. Για την κατασκευή εκμαγείων έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί πολλά διαφορετικά υλικά στα οποία περιλαμβάνονται η άμμος, το κερί, οι κόλλες, το δέρμα ζώων, η γύψος τα μέταλλα κ.ά.

Το κύριο πρόβλημα ως προς την κατασκευαστική διαμόρφωση των εκμαγείων προκύπτει από το μέγεθος και τη μορφή του προς εκμάγευση αντικειμένου, του «έργου». Εάν το έργο είναι μεγάλο το εκμαγείο πρέπει να γίνει σε τμήματα και αυτά να συνδεθούν χωρίς να χαθεί η μορφή του προπλάσματος του έργου. Εάν το έργο έχει πολλές κοίλες επιφάνειες είναι απαραίτητη η χρήση ελαστικών μέσων.

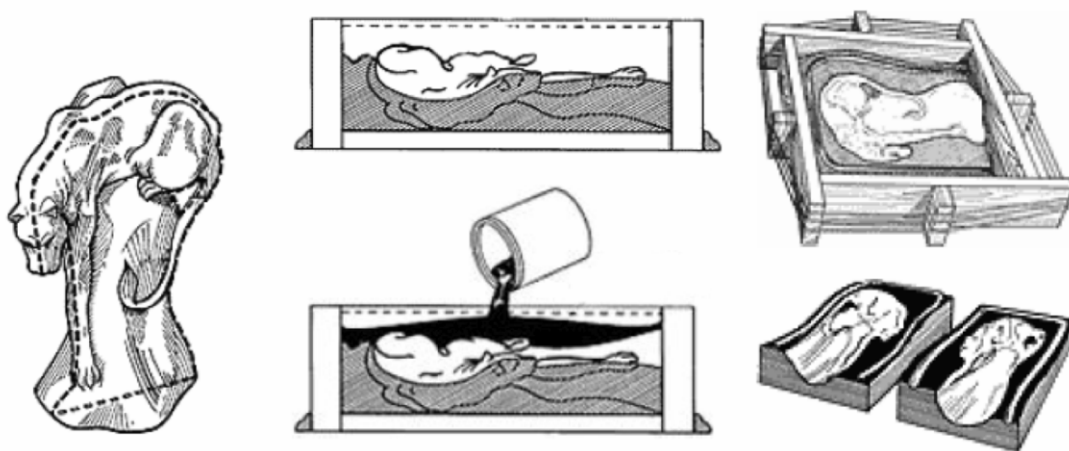
Το βέλτιστο εκμαγείο προπλάσματος προκύπτει με την εξ' ολοκλήρου κατασκευή εκμαγείου από γύψο (όταν το πρόπλασμα είναι νωπό σε πηλό) και ακολούθως η χύτευση στο εκμαγείο σταθερότερου υλικού. Για την κατασκευή αντιγράφων η γύψος είναι το περισσότερο συνηθισμένο υλικό χύτευσης. Η γύψος είναι ιδανικό υλικό για εκμαγεία γιατί λόγω της διαστολής της κατά την σκλήρυνση αποκολλάται εύκολα από το πρόπλασμα δημιουργώντας,

μικρά σφάλματα. Κατά την εκμάγευση του έργου μπορεί αφενός να καταστραφεί το εκμαγείο αλλά, αφετέρου, να προκληθούν ανεπανόρθωτες ζημιές στο ίδιο το πρωτότυπο έργο. Έτσι, βασικό μειονέκτημα του γύψινου εκμαγείου πήλινου προπλάσματος είναι ότι ένα σφάλμα στο εκμαγείο μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την καταστροφή ολόκληρου του έργου. Παράλληλα είναι δυνατή η κατασκευή μόνο ενός αντιγράφου. Τα γύψινα εκμαγεία αποτελούνται κατά περίπτωση από δύο και έως πεντακόσια κομμάτια (σπαστό καλούπι) ανάλογα με το μέγεθος και τις δυσκολίες του πρωτότυπου έργου. Για να γίνει η κατασκευή ενός εκμαγείου, το πρόπλασμα του γλυπτού καθαρίζεται επιμελώς και ακολούθως επαλείφεται με υγρό που βοηθάει στην αποκόλληση του εκμαγείου. Το υγρό αυτό είναι συνήθως πυκνό διάλυμα σαπουνιού σε νερό (μονωτικό για την γύψο) ή πυκνό διάλυμα πηλού (μονωτικό για ελαστικά). Επάνω από το διάλυμα αυτό, το έργο καλύπτεται με λάδι. Το πρόπλασμα χωρίζεται με λεπτές λωρίδες πηλού σε τμήματα κατά ζώνες. Σε αυτές ο εκμαγέας διαστρώνει λεπτό στρώμα παχύρρευστης γύψου και μόλις η γύψος σκληρυνθεί, τα τμήματα διαμορφώνονται εντέχνως έτσι ώστε να ταυτίζονται μεταξύ τους και να δημιουργούν μία ενιαία επιφάνεια. Όταν έχει ολοκληρωθεί η εκμάγευση και η επεξεργασία όλων των τμημάτων, τα τμήματα συναρμολογούνται και πάνω από αυτά τοποθετείται δεύτερο στρώμα γύψου ο «μανδύας» ή «εσάρπα».

Κάθε εσάρπα περικλείει ένα μέρος του εκμαγείου και όχι ολόκληρο το εκμαγείο. Πάνω από την εσάρπα απλώνεται τρίτο στρώμα γύψου ενισχυμένου με ίνες. Στο γύψινο εκμαγείο μπορεί να χυτευτεί γύψος και να κατασκευαστεί γύψινο θετικό. Το γύψινο εκμαγείο είναι ακριβές αλλά είναι δύσκολο στην κατασκευή του. Για τον λόγο αυτό, συνηθίζεται να κατασκευάζονται εκμαγεία από ελαστικά με ή χωρίς γύψινη «εσάρπα» (κέλυφος). Χωρίς να είναι πάντα απαραίτητη, η εσάρπα βοηθάει στην σταθεροποίηση του ελαστικού και την τοποθέτησή του σε ακριβή θέση.

- *Εκμαγεία χωρίς «εσάρπα» (κέλυφος)*

Τα εκμαγεία χωρίς εσάρπα γίνονται για μικρά κυρίως γλυπτά που παρουσιάζουν ισορροπία κατ' άξονα. Γενικά για να κατασκευαστεί το εκμαγείο ενός έργου χωρίς εσάρπα το πρόπλασμα πρέπει να είναι κωνικής μορφής. Το έργο τοποθετείται σε μία σταθερή κιβωτιόσχημη μορφή και χυτεύεται ελαστικό. Ακολούθως το ελαστικό κόβεται με κοπίδι σε δύο μέρη έτσι ώστε το έργο να μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα μέσα από αυτό (Εικόνα 1).



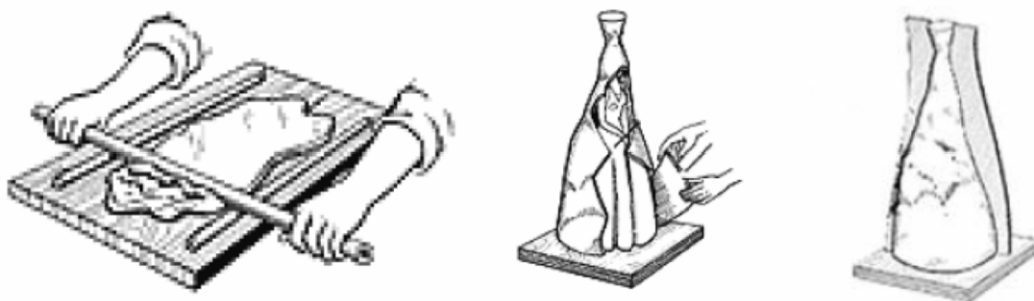
Εικόνα 1: Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων χωρίς εσάρπα

- *Εκμαγεία με εσάρπα*

Το πρόπλασμα καλύπτεται με φύλλο πηλού πάχους 3-5 cm, το οποίο με την σειρά του καλύπτεται με γύψινη εσάρπα.

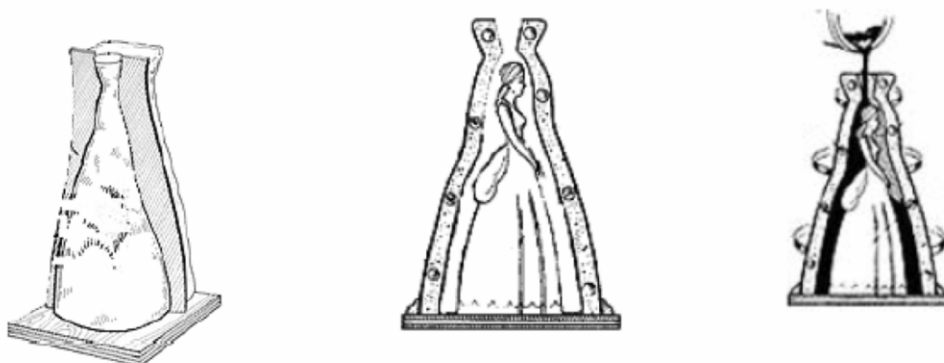
Σε κάθε μέρος κατασκευάζεται διαδοχικά μία εσάρπα από γύψο. Στο πρώτο μέρος σκαλίζονται εσοχές έτσι ώστε μόλις κατασκευαστεί το δεύτερο μέρος, οι εσοχές αυτές να γίνουν οδηγοί και να ταυτίζεται η ένωση στα τμήματα της εσάρπας.

Όταν η γύψος σκληρυνθεί, αφαιρείται η εσάρπα και καθαρίζονται σχολαστικά ο πηλός και το πρόπλασμα. Καθαρό πλέον, το πρόπλασμα περιβάλλεται από την εσάρπα από την οποία έχουν αφαιρεθεί τα υπολείμματα της πλαστελίνης ή του πηλού. Στην εσάρπα ανοίγεται μία κεντρική οπή και μικρότερες οπές εξαερισμού. Από την κεντρική οπή διοχετεύεται ελαστικό υλικό σε υγρή μορφή το οποίο περιβάλλει το πρόπλασμα. Με την στερεοποίηση του ελαστικού δημιουργείται το ελαστικό εκμαγείο.



Εικόνα 2: Προεργασία ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα

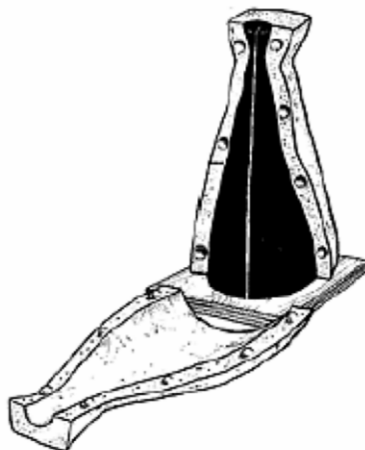
Μετά την αφαίρεση της εσάρπας, το ελαστικό κόβεται έτσι ώστε η ένωση των μερών του ελαστικού να μην συμπίπτει με την ένωση των μερών της εσάρπας (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα

Εναλλακτικά μπορεί το ελαστικό να χυτευτεί σε δύο μέρη, για να αποφευχθεί η εκ των υστέρων κοπή του. Για να γίνει αυτό χωρίζονται τα μέρη του προπλάσματος που θα χυτευτεί το ελαστικό με οδηγούς από πηλό. Ακολούθως χυτεύεται το ελαστικό στο πρώτο μέρος του έργου ενώ μετά την πήξη του πρώτου μέρους χυτεύεται και το δεύτερο μέρος αφού έχει επαλειφθεί η επιφάνεια της ένωσης με μονωτικό υλικό (αν είναι απαραίτητο) έτσι ώστε να μην συγκολληθούν τα δύο ελαστικά μεταξύ τους. Εκτός από τα ελαστικά σε υγρή μορφή,

έχουν αναπτυχθεί και ελαστικά τα οποία είναι σε στερεά μορφή και ζυμώνονται με καταλύτη για να αποκτήσουν την τελική τους μορφή. Τα ελαστικά αυτά εφαρμόζονται με πίεση επάνω στο έργο και αποφεύγεται η διαδικασία της χύτευσης του ελαστικού. Εξάλλου ο ψεκασμός, η επάλειψη αλλά και η εφαρμογή του ελαστικού με πίεση στο έργο προφυλάσσει από τις εκπλήξεις που μπορεί να επιφυλάσσει η χύτευση του ελαστικού.



Εικόνα 4: Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα

Σημαντικό μειονέκτημα κατά την διαδικασία της χύτευσης, είναι ότι στις κοιλότητες του προπλάσματος εγκλωβίζεται αέρας ο οποίος δεν επιτρέπει στο ελαστικό να πάρει την θέση του επάνω στο πρόπλασμα. Αυτή είναι μία συνήθης αστοχία που παρατηρείται σε εκμαγεία από χυτά ελαστικά.

Για να αποφευχθεί αυτό δημιουργούνται κατασκευαστικές λύσεις έτσι ώστε να διευκολύνεται η διαφυγή του αέρα κατά την χύτευση του ελαστικού του εκμαγείου (σχεδιασμός που είναι απαραίτητος σε κάθε μορφή χύτευσης). Η χύτευση του ελαστικού γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε με την είσοδο του ρευστού ελαστικού να αποβάλλεται ο αέρας (που ενδεχομένως εγκλωβίζεται) προς το εξωτερικό του μητρικού εκμαγείου.

Για την κατασκευή κάθε εκμαγείου απαιτείται διαφορετικός σχεδιασμός των μεθόδων που περιγράφηκαν και εξαρτάται σημαντικά από την ιδιομορφία του κάθε προπλάσματος.

➤ *Γύψος*

Η γύψος δεν είναι πρόσφατο υλικό για την κατασκευή εκμαγείων. Τα παλαιότερα γύψινα νεκρικά προσωπεία ανάγονται στην 6η χιλιετία π.Χ. όπως αποκάλυψαν το 1953 ανασκαφές στην Ιεριχώ της Μεσοποταμίας. Εκτός από την Μεσοποταμία και στην Αίγυπτο υπήρχαν κατασκευές με γύψο ιδιαίτερα ως επίχρισμα για την εξομάλυνση της τοιχοποιίας. Οι Αιγύπτιοι είχαν ειδικά εκπαιδευμένους τεχνίτες για την κατασκευή προπλάσμάτων γύψου καθώς επίσης και εκμαγείων γύψου. Η ανακάλυψη του εργαστηρίου του γλύπτη Θουτμόζου που ανακαλύφθηκε το 1912 ήταν το μεγαλύτερο επίτευγμα στην ιστορία της Αιγυπτιολογίας. Στο εργαστήριό του, στο οποίο εργαζόνταν το 1350 π.Χ. είχαν παραμείνει 20 γύψινα εκμαγεία που είχαν δημιουργηθεί από πήλινα προπλάσματα ενώ εκτός αυτού βρέθηκαν και αρκετά γύψινα και πέτρινα γλυπτά.

Σύμφωνα με τον Πλίνιο ο Λυσίστρατος ο Σικυώνιος, αδελφός του περίφημου γλύπτη Λύσιππου, αναφέρει ότι ο Λύσιππος για το πρώτο του γύψινο εκμαγείο χρησιμοποίησε απευθείας το όμορφο πρόσωπο ενός νέου άνδρα και αφού κατασκεύασε το θετικό αντίγραφο, το τελειοποίησε με τη σμίλη. Στην ρωμαϊκή εποχή η γυψοπλαστική γνωρίζει ευρύτατη διάδοση με την κατασκευή των νεκρικών προσωπείων των προγόνων, τα οποία ευλαβικά φυλάσσονται μαζί με τους οικογενειακούς θεούς, τους λάτρητες, στα λαράρια (εικονοστάσια) των σπιτιών. Στην Δύση η γύψος χρησιμοποιήθηκε ευρέως όταν εξαιρετικά κοιτάσματα γύψου στην Γαλλία έκαναν την Γύψο του Παρισιού ένα από τα διασημότερα είδη γύψου στον κόσμο. Η Γύψος του Παρισιού ήταν επί της ουσίας το υλικό που έφερε σε μαζική επαφή την γύψο με τον Δυτικό πολιτισμό.

➤ *Ελαστικά*

Σήμερα χρησιμοποιείται μεγάλη ποικιλία από διαφορετικά ευέλικτα ελαστικά προϊόντα για την κατασκευή των εκμαγείων για τους εξής λόγους:

Τα ελαστικά μπορούν και δίνουν ακριβές αντίγραφο του προπλάσματος.

Λόγω της ελαστικότητας τους μπορούν να ξεκαλουπωθούν εύκολα.

Γενικά αντέχουν αρκετά στην χρήση και την επανάληψη των αντιγράφων.

Συνήθη ελαστικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εκμαγείων είναι το latex (καουτσούκ), τα πολυσουλφίδια, οι πολυουρεθάνες και οι σιλικόνες. Πολλά από τα ελαστικά αυτά είναι δύο συστατικών. Το πρώτο συστατικό αναμειγνύεται με το έτερο συστατικό σε ορισμένη αναλογία και ακολούθως το υλικό είτε χυτεύεται επάνω στην επιφάνεια του προπλάσματος, είτε επαλείφεται με πινέλο, είτε ψεκάζεται στο υλικό. Η επιτυχία του ελαστικού να παρακολουθήσει το πρόπλασμα εξαρτάται από την αναλογία πρόσμιξης, την ικανότητα παραμόρφωσης του ελαστικού και το ιξώδες του ελαστικού.

➤ *Χύτευση σε εκμαγείο άμμου*

Κατά τη χύτευσης με άμμο το πρόπλασμα αφήνει το αποτύπωμά του πάνω στην άμμο, το έργο αφαιρείται από το αποτύπωμα και παραμένει το αρνητικό στο εκμαγείο. Σε δεύτερο εκμαγείο αποτυπώνεται το υπόλοιπο μέρος του έργου που δεν έχει αποτυπωθεί στο αρχικό εκμαγείο. Στο αποτύπωμα αυτό σχεδιάζονται οι αγωγοί της εισόδου και της εξόδου του μετάλλου. Τα εκμαγεία ενώνονται και χυτεύεται το μέταλλο. Η διαδικασία είναι σαφώς απλούστερη από την χύτευση των έργων με χαμένο κερί, όμως δεν δίνει έργα μεγάλης ακρίβειας και πολλές λεπτομέρειες χάνονται με τη διαδικασία αυτή.

Τα έργα που μπορούν να χυτευτούν είναι μικρού όγκου ενώ δύσκολα χυτεύονται έργα με κοίλο εσωτερικό. Τα εκμαγεία χωρίς κοίλο εσωτερικό δέχονται μεγάλες πιέσεις κατά την χύτευση κι έτσι σε εκμαγεία από άμμο δεν είναι εύκολο να χυτευτούν μεγάλα έργα αλλά κυρίως επιφάνειες και έργα χαμηλού ανάγλυφου. Σημαντικό μειονέκτημα που παρουσιάζεται στη χύτευση χαλκού σε εκμαγεία άμμου είναι οι ατέλειες που εμφανίζονται στο χάλκινο γλυπτό στην ένωση των εκμαγείων χύτευσης. Στην ένωση των εκμαγείων χύτευσης εμφανίζονται ραφές (γρέζια) τα οποία είναι ιδιαίτερα δύσκολο να καθαριστούν έτσι ώστε το έργο να διατηρήσει αναλλοίωτη την αρχική του μορφή.

3.2 Σύγχρονες τεχνολογίες τεκμηρίωσης / τρισδιάστατης

ψηφιακής αποτύπωσης αντικειμένων πολιτιστικής

κληρονομιάς

3.2.1 Τρισδιάστατη ψηφιοποίηση

Η αποτύπωση αντικειμένων και σχημάτων με οπτικά μέσα χρονολογείται στις αρχές του 19ου αιώνα, την ίδια χρονική περίοδο που έχει τις ρίζες της και η φωτογραφική τέχνη. Από τότε μέχρι σήμερα η τεχνολογία αποτύπωσης με οπτικά μέσα έχει προχωρήσει με ραγδαίους ρυθμούς. Αυτή η τεχνολογική εξέλιξη είναι πια μέρος της καθημερινής μας ζωής, π.χ. ένας τυπικός σαρωτής εγγραφών αποτελεί πλέον αναπόσπαστο κομμάτι κάθε σύγχρονου γραφείου, καθώς επιτρέπει τη γρήγορη και αποτελεσματική ψηφιοποίηση οποιουδήποτε εγγράφου. Εξετάζοντας την ιδέα της ψηφιοποίησης για αντικείμενα τριών διαστάσεων, η διαδικασία απόκτησης τρισδιάστατων δεδομένων από πραγματικά αντικείμενα αποτελεί μείζον πρόβλημα ιδιαίτερα όταν η γεωμετρική τους πολυπλοκότητα ξεπερνά τα βασικά γεωμετρικά στερεά (σφαίρες, πυραμίδες, κύβους κ.α.). Παλαιότερα, η επίλυση του προβλήματος αυτού ήταν δύσκολη και οι τρόποι προσέγγισης χρονοβόροι. Η ανάπτυξη ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων και ψηφιακών μετρητικών διατάξεων κατάφεραν να καθιερώσουν μια συνεχώς εξελίξιμη αγορά τρισδιάστατων σαρωτών.

Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν πλέον την καταγραφή τόσο της γεωμετρικής όσο και της χρωματικής πληροφορίας που φέρουν τα αντικείμενα μέσα σε ελάχιστο χρόνο. Οι αρχές λειτουργίας τους βασίζονται στην εφαρμογή γεωμετρικών αξιωμάτων και συναρτήσεων. Πρότυπα ακαδημαϊκά αλλά και εμπορικά συστήματα επιδιώκουν να δώσουν απάντηση στην τρισδιάστατη αποτύπωση, το καθένα από τη δική του σκοπιά, κάνοντας συγκεκριμένες παραδοχές. Το μεγάλο ενδιαφέρον της παγκόσμιας ερευνητικής κοινότητας εστιάζεται στην ανάλυση των μεθόδων αποτύπωσης αλλά και στην ανάπτυξη αλγορίθμων που θα επιτρέψουν την επεξεργασία των δεδομένων με αποδοτικότερους τρόπους. Η ανάπτυξη των τρισδιάστατων σαρωτών είναι αποτέλεσμα συλλογικής δουλειάς επιστημόνων από διαφορετικά ερευνητικά πεδία, όπως είναι αυτά της όρασης υπολογιστών, των τρισδιάστατων γραφικών, της μηχανολογίας, των μετρήσεων με ηλεκτρονικά αισθητήρια, της φωτογραμμετρίας και, φυσικά, των μαθηματικών.

Βασικό ρόλο στην εξάπλωση της χρήσης των τρισδιάστατων σαρωτών παίζει η δραματική βελτίωση των ηλεκτρονικών υπολογιστών στον τομέα των τρισδιάστατων γραφικών πραγματικού χρόνου. Η δυνατότητα διαχείρισης πολύπλοκης τρισδιάστατης γεωμετρίας σε πλατφόρμες χαμηλού κόστους βρίσκει άμεση εφαρμογή στην απεικόνιση λεπτομερών και υψηλής ακρίβειας τρισδιάστατων μοντέλων που δημιουργούν οι σαρωτές. Απώτερος σκοπός όλων των ερευνητικών προσπαθειών είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου αποτύπωσης σε συνδυασμό με υψηλής πιστότητας αποτελέσματα. Μέχρι τη στιγμή της συγγραφής της παρούσας εργασίας, μόνο η μέθοδος Σχήμα-Από-Σιλουέτες προσεγγίζει την ιδέα σάρωσης-με-το-πάτημα ενός-πλήκτρου. Ωστόσο τα αποτελέσματά της έχουν εφαρμογή κυρίως στο ηλεκτρονικό εμπόριο όπου μια απλά ρεαλιστική και όχι υψηλής ακρίβειας τρισδιάστατη

απόδοση του αντικείμενου είναι επαρκής. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται γεωμετρική ακρίβεια, εφαρμόζονται τεχνικές σάρωσης με ακτίνες λέιζερ.

Στην πραγματικότητα η διαδικασία τρισδιάστατης σάρωσης χαρακτηρίζεται μάλλον σύνθετη, και εμπλέκει μια ακολουθία διαφορετικών διαδικασιών που αναλύονται σε βάθος στις επόμενες παραγράφους. Αρχικά δίνεται ο ορισμός της *τρειςδιάστατης σάρωσης* και γίνεται ο βασικός διαχωρισμός των διαθέσιμων μεθοδολογιών και στη συνέχεια τονίζεται η ανάγκη ψηφιοποίησης και προβολής της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Στο σημείο αυτό, θα ήταν χρήσιμο να ορίσουμε ως **κινητά πολιτιστικά αντικείμενα** όλα τα αντικείμενα της πολιτιστικής κληρονομιάς των οποίων οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από κάποια εκατοστά έως και μερικά μετρά. Ο όρος «*κινητά*» δεν αφορά πάντα στην ιδιότητα του αντικείμενου να δύναται να μετακινηθεί αλλά έχει να κάνει και με την κατηγοριοποίησή του βάση της εφαρμοσιμότητας που έχουν συγκεκριμένες μεθοδολογίες αποτύπωσης.

Οριοθέτηση και Ορισμοί τρισδιάστατης ψηφιακής σάρωσης

Η ποικιλία των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των τρισδιάστατων συντεταγμένων της επιφάνειας ενός αντικείμενου έχει οδηγήσει στον προβληματισμό για το αν τελικά η *Τρισδιάστατη Σάρωση*, ως έννοια, ανήκει στις γεωδαιτικές μελέτες, στη φωτογραμμετρία ή/και την όραση υπολογιστών. Βλέποντας όμως το θέμα από την πλευρά του χρήστη το αποτέλεσμα είναι αυτό που μετράει ανεξάρτητα της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε. Γενικότερα, ως *τρειςδιάστατο σαρωτή (3D scanner)* θα μπορούσαμε να ορίσουμε οποιαδήποτε συσκευή δύναται να συλλέξει τρισδιάστατες συντεταγμένες από μία δεδομένη περιοχή πάνω στην επιφάνεια ενός αντικείμενου, η οποία πληρεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Ακολουθεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που βασίζεται σε κάποιο πρότυπο

Πραγματοποιεί δειγματοληψία υψηλού ρυθμού (εκατοντάδες ή χιλιάδες σημεία ανά δευτερόλεπτο)

Επιταχύνει τη διαδικασία, ώστε να πραγματοποιείται σε πραγματικό (σχεδόν) χρόνο

Δύναται ή και όχι να διακρίνει χρωματική πληροφορία της εκάστοτε επιφάνειας σε συνδυασμό με την τρισδιάστατη γεωμετρία της.

Ο τρόπος χρήσης μια τέτοιας συσκευής είναι :

είτε σταθερός σε κάποια συγκεκριμένη θέση

είτε πάνω σε κάποιον κλασικό, φωτογραφικού τύπου, τρίποδα

είτε σε παρόμοιες μεταφερόμενες βάσεις

είτε εν πτήση όταν πρόκειται για τοπογραφικές εφαρμογές.

Η σάρωση ενός αντικείμενου είναι πολλές φορές το εύκολο τμήμα μιας εργασίας ψηφιοποίησης. Η δημιουργία **πιστών τρισδιάστατων αναπαραστάσεων που αποτελούνται από ελεύθερες επιφάνειες απαιτούν συνήθως πολύ χρόνο και εργασία**. Η τρισδιάστατη σάρωση είναι ένα σημαντικό νέο εργαλείο για την τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Ως λύση, δεν αποτελεί πανάκεια, όπως πολλοί υποστηρίζουν (κυρίως οι εταιρίες ανάπτυξης τέτοιων συστημάτων). Χωρίς αμφιβολία οι τρισδιάστατοι σαρωτές ταιριάζουν απόλυτα σε εφαρμογές μετρήσεων ελεύθερων /«ακανόνιστων» επιφανειών και είναι προς το παρόν και η καλύτερη διαθέσιμη μέθοδος. Ωστόσο η αμιγής και μόνο συλλογή δεδομένων δεν είναι επαρκής. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί και στην μετέπειτα

επεξεργασία των δεδομένων. Ο χρόνος που απαιτείται για την δημιουργία ενός υψηλής πιστότητας τρισδιάστατου μοντέλου είναι πολλές φορές πολύ μεγαλύτερος από τον χρόνο σάρωσης.

Θεωρητικό υπόβαθρο

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται κάποια συνοπτικά και εισαγωγικά στοιχεία από την τεχνική ορολογία που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε ολόκληρη την Εργασία.

Τρισδιάστατη όραση υπολογιστών

Η δισδιάστατη όραση (π.χ. κλασική φωτογράφιση) προσπαθεί να ερμηνεύσει ένα τρισδιάστατο περιβάλλον χρησιμοποιώντας προβολές που δημιουργούνται από τα οπτικά αισθητήρια στις κάμερες (στατικές ή βίντεο). Η δισδιάστατη όραση προσφέρει περιορισμένη πληροφορία σχετικά με τις λεπτομέρειες του σχήματος ενός αντικειμένου.

Αντίθετα, η τρισδιάστατη όραση υπολογιστών ασχολείται πρωτίστως με την κατανόηση οπτικής πληροφορίας, όπως αυτή συλλέγεται από εξειδικευμένα ηλεκτρονικά οπτικά αισθητήρια. Συνεπώς, ασχολείται με την εξαγωγή, προς κτήση και κατανόηση δεδομένων από τη γεωμετρία και την υφή των επιφανειών των αντικειμένων που βρίσκονται μέσα σε μία σκηνή. Ο όγκος της πληροφορίας αυτής είναι τεράστιος καθώς ο πραγματικός κόσμος περιέχει τεράστια γεωμετρική πληροφορία. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη όραση παρέχουν άμεσα γεωμετρική πληροφορία ενός αντικειμένου ή ολόκληρου του χώρου εντός του οπτικού πεδίου τους. Η πληροφορία που προσφέρουν οι τρισδιάστατοι αισθητήρες για τα αντικείμενα έχουν να κάνουν με τη θέση τους στον τρισδιάστατο χώρο. Η πληροφορία αυτή έρχεται να εξαλείψει όλες τις ασάφειες που παρουσιάζουν τα δισδιάστατα συστήματα απεικόνισης .

Αναπαράσταση τρισδιάστατων επιφανειών

Χάρτης βάθους

Ο απλούστερος τρόπος αναπαράστασης και αποθήκευσης τρισδιάστατων συντεταγμένων της επιφάνειας ενός αντικειμένου είναι με τη χρήση *χαρτών βάθους* (depth maps). Ο χάρτης βάθους είναι μια δισδιάστατη εικόνα βεληνεκούς, όπου κάθε εικονοστοιχείο της παίρνει μια χρωματική τιμή από τις διαβαθμίσεις του γκρι. Η χρωματική τιμή υποδηλώνει την απόσταση του σημείου από τον οπτικό αισθητήρα στον τρισδιάστατο χώρο. Δύο είναι οι πιο γνωστές μεθοδολογίες δημιουργίας χαρτών βάθους: με την εκπομπή σήματος (Radar) και με τριγωνοποίηση.

Νέφος σημείων

Ως νέφος σημείων ορίζεται ένα σύνολο σημείων που μοιράζονται το ίδιο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Κάθε σημείο φέρει πληροφορία που το τοποθετεί σε μία συγκεκριμένη θέση μέσα στον τρισδιάστατο χώρο και αντιστοιχεί σε μια θέση πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου που ψηφιοποιήθηκε. Η πληροφορία αυτή είναι τρεις διαφορετικές τιμές, μία για κάθε άξονα (x,y,z).

Πολυγωνικό – τριγωνικό πλέγμα

Η απόδοση μίας επιφάνειας από ένα πλήθος τριγώνων είναι μια πολύ διαδεδομένη τεχνική για τρισδιάστατες αναπαραστάσεις. Κάθε τρίγωνο ορίζεται από τρεις κορυφές στον χώρο που

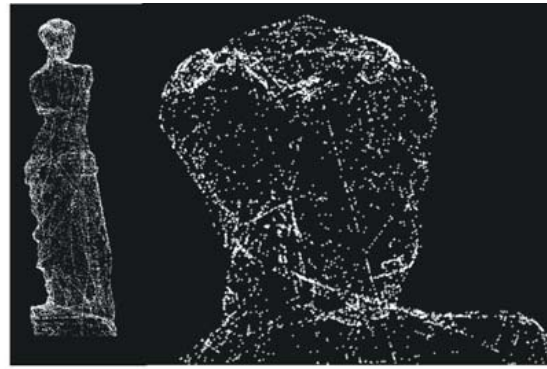
και αυτές φέρουν πληροφορία θέσης σε κάθε άξονα (x,y,z). Από ένα νέφος σημείων ή ένα χάρτη βάθους δύναται να γίνει η εξαγωγή ενός πολυγωνικού πλέγματος. Με το πολυγωνικό πλέγμα δημιουργούμε μια εικόνα με τεχνητή φωτισκίαση που απώτερο σκοπό έχει να τονίσει τις λεπτομέρειες της επιφάνειας. Το πολυγωνικό πλέγμα μπορεί να συνδεθεί με πληροφορία υψής χαρτογραφημένη πάνω σε κάθε τρίγωνο τις επιφάνειας. Το πεδίο που γίνεται η χαρτογράφηση ονομάζεται U.V. Η πιο ρεαλιστική αναπαράσταση είναι αυτή που περιλαμβάνει και την πληροφορία υψής.

Ογκομετρικά εικονοστοιχεία

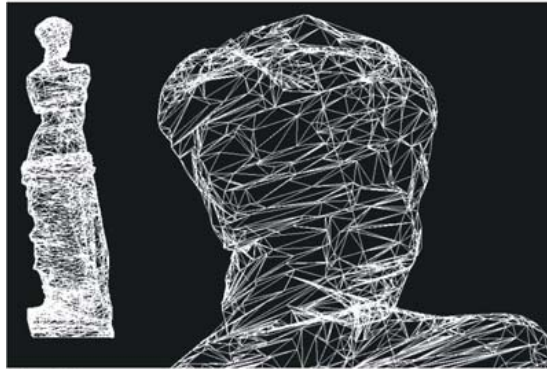
Πολλές φορές, στη εργασία αυτή, θα γίνονται αναφορές σε εικονοστοιχεία στον τρισδιάστατο χώρο. Ένα εικονοστοιχείο (*pixel* από *Picture element*), σύμφωνα με τον αρχικό ορισμό, αναπαριστά τις χρωματικές ιδιότητες ενός σημείου σε ένα δισδιάστατο χώρο. Στις τρεις διαστάσεις μπορούμε να πούμε πως ένα σημείο αναπαριστά πλέον, άλλοτε σημειακή ή στοιχειώδη επιφάνεια και άλλοτε σημειακό ή στοιχειώδη όγκο (εξ' ου και ο διαχωρισμός τους ως στοιχεία επιφάνειας ή *surfel* από *Surface Element* και στοιχεία όγκου ή *voxel* από *Volumetric pixel*). Οι δύο αυτές οντότητες εμπεριέχουν και την πληροφορία της τρίτης διάστασης. Το *voxel* αναπαρίσταται ως ένας «στοιχειώδης» κύβος στον τρισδιάστατο χώρο, ενώ το *surfel* αναπαριστά ένα «στοιχειώδες» τμήμα από το φλοιό μιας επιφάνειας. Το *surfel* απαντάται πολύ σπάνια στο χώρο της τρισδιάστατης αποτύπωσης.



α) Χάρτης Βάθους



β) Νέφος Σημείων



γ) Πολυγωνικό Πλέγμα



δ) Τεχνητή Φωτοσκίαση Πολυγωνικού Πλέγματος



ε) Σύνολο ογκομετρικών στοιχείων (Voxels)



στ) Πολυγωνικό Πλέγμα με πληροφορία υφής

Εικόνα 5: Μέθοδοι οπτικής αναπαράστασης τρισδιάστατων δεδομένων

Συστήματα τρισδιάστατης οπτικής αναπαράστασης

Τρισδιάστατα αντικείμενα μπορούν να προβληθούν σε κλασικές-συμβατικές οθόνες υπολογιστών δύο διαστάσεων με τη χρήση στερεοσκοπικών γυαλιών που λειτουργούν με την βοήθεια υγρών κρυστάλλων. Η μέθοδος βασίζεται στην ελεγχόμενη διακοπόμενη πόλωση των κρυστάλλων που βρίσκονται μπροστά από κάθε μάτι. Γνωρίζοντας την αρχική γεωμετρία δημιουργούνται δύο απόψεις με κάποιες γεωμετρικές διαφορές, οι οποίες προβάλλονται στην οθόνη διαδοχικά. Ανάλογα με τον ρυθμό ανανέωσης της εικόνας, το ανθρώπινο μάτι αναμειγνύει τις δύο εικόνες σε μια στερεοσκοπική εικόνα και δημιουργείται η αίσθηση της τρισδιάστατης όρασης. Ως εκ τούτου το αντικείμενο προβάλλεται ακριβώς σαν να βγαίνει από το επίπεδο της οθόνης. Με βάση αυτήν την τεχνική μεγαλύτερα τρισδιάστατα μοντέλα (ολόκληροι εικονικοί χώροι) μπορούν και προβάλλονται. Υπάρχουν, βέβαια, και άλλες τεχνικές προβολής τρισδιάστατων χώρων, όπως αυτή με τα *στερεογράμματα* (anaglyphs).

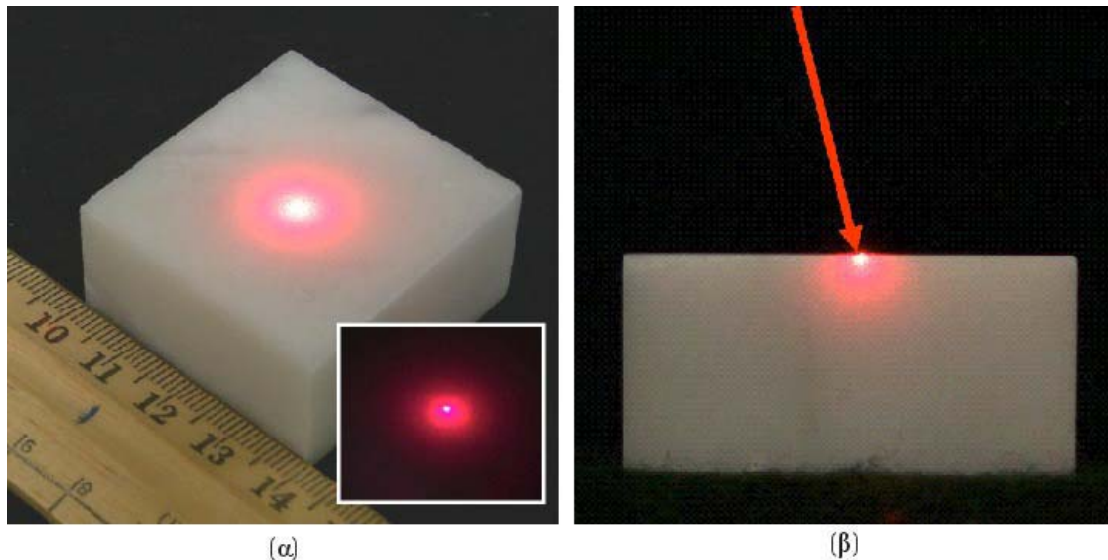
Σημαντικό στοιχείο στην οπτική αναπαράσταση τρισδιάστατων μοντέλων είναι η δυνατότητα αλληλεπίδρασης που προσφέρεται στον χρήστη. Με τον όρο *πραγματικό χρόνο* ορίζουμε την δυνατότητα του υπολογιστικού συστήματος να πραγματοποιεί τόσο άμεσα τις εντολές του χρήστη, ώστε το αποτέλεσμα τους να είναι σχεδόν άμεσα εμφανές. Υπάρχουν πολλά προγράμματα στο διαδίκτυο τα οποία προσφέρονται δωρεάν και επιτρέπουν τη μέτρηση των δυνατοτήτων του υπολογιστή και της κάρτα γραφικών που χρησιμοποιεί. Οι μονάδες μετρήσεις που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως το πλήθος των εικόνων ανά δευτερόλεπτο που μπορεί να παρουσιάσει η κάρτα γραφικών σε σχέση με το πλήθος των τριγώνων που εμφανίζονται σε αυτές τις εικόνες. Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει το πρόβλημα προβολής πολύπλοκων τρισδιάστατων μοντέλων σε διαδραστικό περιβάλλον πραγματικού χρόνου. Αυτός είναι, άλλωστε, και ο στόχος της εικονικής πραγματικότητας. Κάποιες από τις προτεινόμενες και ευρέως χρησιμοποιημένες τεχνικές είναι η ιεραρχική οργάνωση δεδομένων (octrees), τα επίπεδα λεπτομέρειας (level-of-details), η ιεραρχική προβολή, οι επικαλυπτόμενες επιφάνειες και άλλες.

3.2.2 Οι ιδιαιτερότητες των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

Η ποικιλία των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος καθώς και η μορφολογική τους πολυπλοκότητα, αποτελούν τμήμα ενός ευρύτερου συνόλου χαρακτηριστικών που δημιουργούν προβλήματα στις διάφορες μεθόδους αποτύπωσης. Όπως αναφέρθηκε ήδη στο Κεφάλαιο 1, η διαδικασία της ψηφιακής σάρωσης πολιτιστικών αντικειμένων πρέπει, στις περισσότερες περιπτώσεις, να γίνεται με τον μέγιστο δυνατό βαθμό ακρίβειας. Στην πραγματικότητα όμως η επιτυγχανόμενη ακρίβεια της αποτύπωσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το αντικείμενο αυτό καθαυτό. Μερικά από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που συμβάλουν στον περιορισμό της επιτυγχανόμενης ακρίβειας είναι η πολυμορφία του αντικειμένου, οι αντανακλάσεις των επιφανειών του, ο ιριδισμός και η διάχυση του φωτός. Το φαινόμενο της διάχυσης απαντάται κυρίως σε μαρμάρινες επιφάνειες.

Προϋπόθεση στην τρισδιάστατη ψηφιοποίηση με ακτίνες λέιζερ είναι το ότι η επιφάνεια του αντικειμένου είναι αδιαφανής και δε διαχέει το ανακλώμενο φως. Υλικά όμως όπως το μάρμαρο όμως απέχουν πολύ από αυτή την υπόθεση, εμφανίζοντας δύο σημαντικές οπτικές ιδιότητες. Αυτές είναι η ημιδιαφάνεια και η ανομοιογενής επιφανειακή τραχύτητα. Οι ιδιότητες αυτές αποτελούν πηγές θορύβου και επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων. Η επιφάνεια π.χ. του μαρμάρου είναι δομημένη από πυκνά συσσωρευμένους κρυστάλλους και η μεταβλητή τους πυκνότητα προκαλεί ανομοιογένεια στα υποστρώματα αλλοιώνοντας τα οπτικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Καθώς η ακτίνα φωτός διαπερνά το μάρμαρο η ανομοιομορφία των υποστρωμάτων έχει σαν αποτέλεσμα το διασκορπισμό της δέσμης. Ο διασκορπισμός αυτός εντοπίζεται και στο ορατό μήκος κύματος. Πρόσφατα δημοσιευμένες σχετικές ερευνητικές εργασίες προσέγγισαν το μέγεθος του σφάλματος που προκαλεί ο διασκορπισμός της δέσμης. Σε ένα πείραμα τους προβάλλουν μια ακτίνα λέιζερ μήκους κύματος 633nm πάνω σε ένα κομμάτι λευκού μαρμάρου τύπου Carrara Statuario. Στα υποστρώματα του μαρμάρου αλλά και στην επιφάνειά του εμφανίζονται κάποιοι φωτεινοί ομόκεντροι δίσκοι γύρω από το σημείο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση φωτός (Εικόνα 6α).

Στην Εικόνα 6β η δέσμη φωτός συγκεντρώνεται σε απόσταση ενός χιλιοστού από την άκρη του μαρμάρου. Η φωτογράφιση έγινε από τέτοια οπτική γωνία, ώστε να είναι εμφανές το βάθος διεύθυνσης του φωτός στα υποστρώματα.

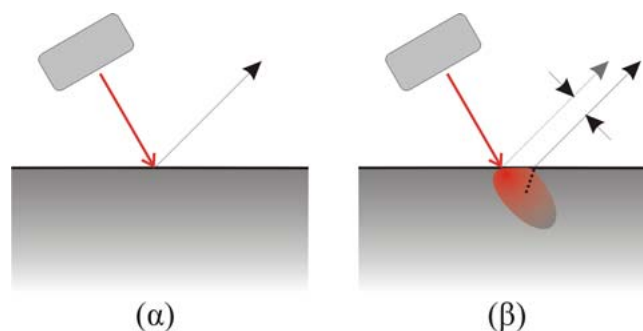


Εικόνα 6: Διάχυση του φωτός σε μαρμάρινη επιφάνεια

Άλλα είδη μαρμάρων επιτρέπουν τη διάχυση του περιβάλλοντος φωτισμού στο εσωτερικό τους και εμφανίζουν ιδιαίτερα χρωματικά χαρακτηριστικά. Με την σημερινή τεχνολογία αυτά τα χαρακτηριστικά είναι αδύνατο να ψηφιοποιηθούν. Ακόμα και η απλή εξομοίωση τους απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ.

Κλασικό παράδειγμα ενός τέτοιου υλικού είναι ο ακτινόλιθος γνωστός και ως νεφρίτης. Ένα γλυπτό από ακτινόλιθο παρουσιάζει σημαντικό διασκορπισμό της ακτίνας στα υποστρώματα της επιφάνειάς του. Το ανακλώμενο φως προσπίπτει στην επιφάνεια του αντικειμένου και τη διαπερνάει προς τα έξω με μια υπολογίσιμη απόκλιση, την οποία μπορεί να συλλάβει ο σαρωτής (Εικόνα 7).

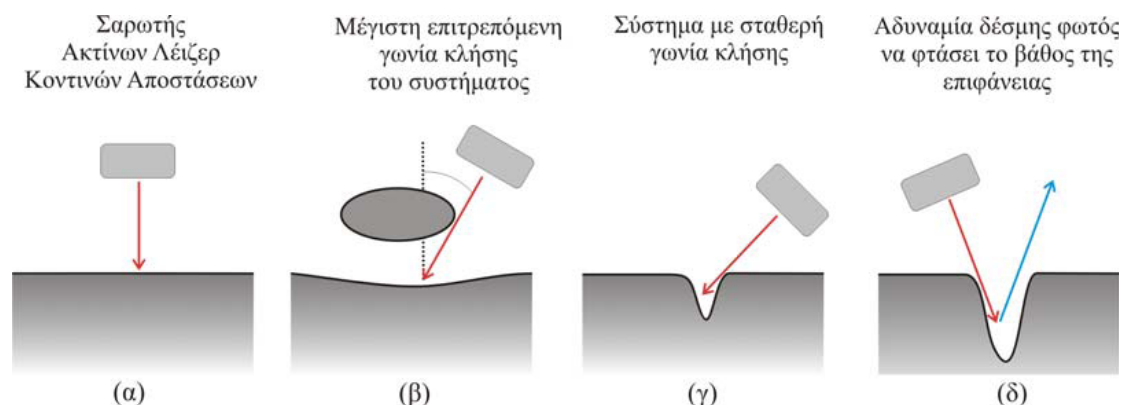
Όπως ήδη αναφέρθηκε κάτι τέτοιο επηρεάζει τη διαδικασία σάρωσης. Επίσης, η τελική ψηφιακή τρισδιάστατη απόδοση του γλυπτού θα έχει τη μορφή μιας πράσινης πετράς και όχι την πραγματική φωτοβόλα όψη που έχει ο νεφρίτης.



Εικόνα 7: Δημιουργία απόκλισης της δέσμης φωτός

Οι δυσκολίες που παρουσιάζουν τα πολιτισμικά αντικείμενα δεν περιορίζονται μόνο σε αντικείμενα που είναι φτιαγμένα από μάρμαρο. Ένα πολύπλοκα λαξευμένο γλυπτό ελεφαντοστού με σύνθετη εσωτερική γεωμετρία θα αποτελούσε άλλη μια πρόκληση για την ψηφιοποίηση, εξαιτίας της εμφάνισης έντονων σκιάσεων που προέρχονται από το ίδιο το αντικείμενο. Η σάρωση της γεωμετρίας θα ήταν δύσκολη λόγω των περίπλοκων εσωτερικών επιφανειών. Οι στενές σχισμές είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν με μεθόδους τριγωνοποίησης. Η δυσκολία εντοπίζεται στα σημεία της επιφάνειας που οφείλουν να είναι ταυτόχρονα εμφανή προς την πηγή της δέσμης φωτός αλλά και προς τον φωτογραφικό

αισθητήρα. Στην Εικόνα 8 απεικονίζονται κάποιες δύσκολες καταστάσεις που επιβεβαιώνουν αυτούς που υποστηρίζουν ότι η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση είναι μια πραγματικά δύσκολη διαδικασία. Η επιφάνεια στην Εικόνα 8α είναι επίπεδη και επιτρέπει την ομαλή διεξαγωγή της τριγωνοποίησης σε αντίθεση με την Εικόνα 8β, όπου ο σαρωτής εκμεταλλεύεται την μέγιστη γωνία κλίσης για να φτάσει στην κάτω επιφάνεια. Όταν η γωνία κλίσης δεν το επιτρέπει (Εικόνα 8γ) τότε καθίσταται αδύνατη η σάρωση του συγκεκριμένου σημείου. Η σμίλη που χρησιμοποιεί ο γλύπτης μπορεί και φτάσει σε σημεία που η δέσμη φωτός αδυνατεί (Εικόνα 8δ).

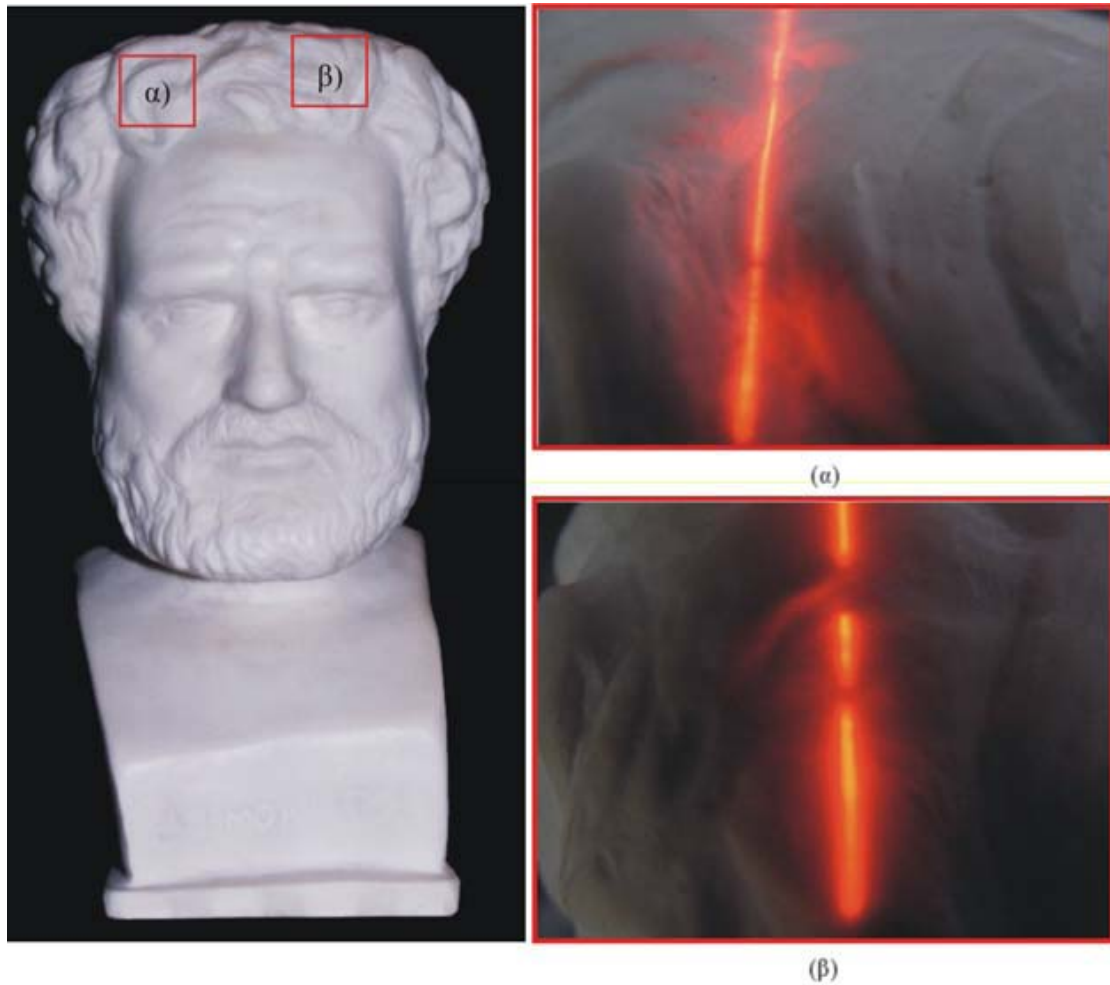


Εικόνα 8: Σάρωση κατά την παρουσία αποφράξεων

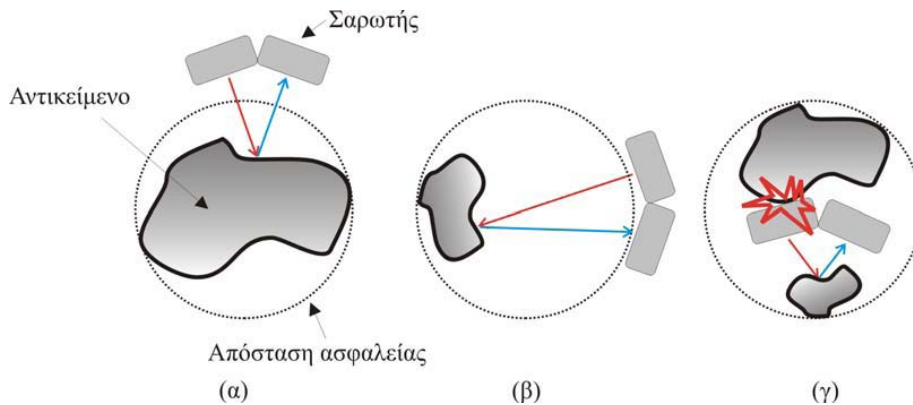
Η διάχυση της δέσμης ανάμεσα στις επιφάνειες και στις ανακλαστικές κοιλότητες του αντικείμενου είναι αναπόφευκτο φαινόμενο (Εικόνα 9). Οι ασυνέχειες που εμφανίζει η δέσμη φωτός απαιτούν την επανάληψη της σάρωσης στην ίδια περιοχή με τοποθέτηση του σαρωτή σε διαφορετική οπτική γωνία.

Η ανυπολόγιστη αξία των πολιτιστικών αντικείμενων δεν αφήνει περιθώρια φθοράς κι έτσι η επαφή του συστήματος σάρωσης με τα αντικείμενα είναι απαγορευμένη. Η ίδια γεωμετρική πολυπλοκότητα που επηρεάζει την συλλογή δεδομένων ανεβάζει και τον πήχη δυσκολίας στον χειρισμό του σαρωτή. Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή της θέσης του συστήματος ως προς το αντικείμενο. Στην Εικόνα 10 απεικονίζονται κάποιες περιπτώσεις όπου ο σαρωτής δεν μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια. Η εξασφάλιση της ακεραιότητας του αντικείμενου πραγματοποιείται με τον ορισμό μιας περιοχής την οποία δε θα πρέπει να παραβιάζει το σύστημα ψηφιοποίησης.

Τα περισσότερα εμπορικά συστήματα έχουν μια συγκεκριμένη απόσταση λειτουργίας που περιορίζουν την απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο. Αρκετές φορές όμως, αυτή η μέθοδος αποδεικνύεται αναποτελεσματική, καθώς πολύπλοκα αντικείμενα δεν μπορούν να ψηφιοποιηθούν πλήρως με το σαρωτή μονίμως έξω από την περιοχή ασφαλείας (Εικόνα 10γ).



Εικόνα 9: Ανακλάσεις και ασυνέχειες της δέσμης φωτός



Εικόνα 10: Αδυναμία αποφυγής πρόσκρουσης

Τα κοσμήματα αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της πολιτιστικής κληρονομιάς και ταυτόχρονα άλλο ένα παράδειγμα όπου οι σαρωτές με ακτίνες λέιζερ αδυνατούν να παρέχουν ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, η προσπάθεια ψηφιοποίησης με σύστημα ακτίνων λέιζερ ενός ασημένιου περιδέριου που καλύπτεται με πολύτιμους λίθους θα αποβεί μάταιη. Η μικρή σε διάχυση ανάκλαση του ασημιού σε συνδυασμό με τις εσωτερικές αντανακλάσεις των πολύτιμων λίθων θα έκαναν αδύνατη την σύλληψη της γεωμετρίας με μεθόδους τριγωνοποίησης. Ακόμα και με παθητικές μεθόδους, όπως η μέθοδος Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως, η ψηφιοποίηση πάλι θα ήταν ανεπιτυχής. Η ρεαλιστική απόδοση των

αντανεκλάσεων σε πολύτιμους λίθους, όπως τα διαμάντια, απαιτούν ειδικούς αλγόριθμους φωτορεαλισμού.

Η ψηφιοποίηση ενός γούνινου κεφαλόδεσμου είναι επίσης αδύνατη. Για άλλη μια φορά, η πολυπλοκότητα της επιφάνειας του αντικειμένου προκαλεί μεγάλη διασπορά στην δέσμη φωτός καθώς αυτή εισχωρεί μέσα στις πτυχώσεις. Η ψηφιοποίηση της επιφάνειας θα οδηγούσε σε ένα νέφος σημείων με πολύ θόρυβο. Από την άλλη, ακόμα και αν μπορούσε να πραγματοποιηθεί η αποτύπωση της επιφάνειας του συγκεκριμένου αντικειμένου, η γεωμετρική αναπαράσταση εκατομμυρίων τριγών σε πραγματικό χρόνο θα ήταν αδύνατη. Όσον αφορά στη φωτορεαλιστική απεικόνιση τέτοιων αντικειμένων απαιτούνται αλγόριθμοι καθολικού φωτισμού (*global illumination*) με υψηλό υπολογιστικό φορτίο.

Συνοψίζοντας, ένα μεγάλο πλήθος πολιτισμικών αντικειμένων εμφανίζει περίπλοκη γεωμετρία και επιφανειακές ιδιότητες που είτε δημιουργούν προβλήματα είτε καθιστούν αδύνατη την ψηφιοποίηση με τις σημερινές διαθέσιμες τεχνικές .

3.2.3 Παρουσίαση της τρέχουσας στάθμης της τεχνολογίας – Βασικές μέθοδοι αποτύπωσης και ανακατασκευής

Εισαγωγή

Όλα τα εμπορικά, αλλά και ερευνητικά, συστήματα που συλλέγουν τρισδιάστατες συντεταγμένες από μια δεδομένη περιοχή της επιφάνειας ενός αντικειμένου με έναν συστηματικό ή αυτοματοποιημένο τρόπο θεωρούνται τρισδιάστατοι σαρωτές.

Η ψηφιοποίηση αντικειμένων με τρισδιάστατους σαρωτές είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται σήμερα με ένα πλήθος διαφορετικών μεθόδων.

Διαφορετικές τεχνολογικές λύσεις έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση αντικειμένων με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως επιφάνειες με υψηλή ανακλαστικότητα, χρωματική ποικιλία, γεωμετρική πολυπλοκότητα κ.α. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της κάθε τεχνικής είναι το βασικότερο κριτήριο για τις εταιρίες ανάπτυξης εμπορικών τρισδιάστατων ψηφιακών σαρωτών. Ένα μεγάλο τμήμα του συνόλου των εμπορικών σαρωτών βασίζονται στην τριγωνοποίηση με ακτίνες λέιζερ και αυτό γιατί επιτυγχάνει γεωμετρικά αποτελέσματα υψηλότερης ακρίβειας, που φτάνουν και σε επίπεδα πολύ μικρότερα του 1 mm. Εκτός από την ακρίβεια υπάρχουν και άλλα κριτήρια για την επιλογή της καταλληλότερης μεθοδολογίας. Ένα από αυτά είναι η ταχύτητα σάρωσης. Άλλες δημοφιλείς μέθοδοι είναι οι *Σχήμα-Από-Σιλουέτες*, *Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως* αλλά και χειροκίνητες μέθοδοι, όπως ρομποτικοί βραχίονες με *αισθητήρες αφής* που συνεχίζουν ακόμα και σήμερα να εξυπηρετούν τις ανάγκες κάποιων εφαρμογών. Οι εφαρμογές που σχετίζονται με την τεκμηρίωση πολιτισμικής κληρονομιάς βρίσκουν λύση κυρίως σε συστήματα με αυτές τις μεθοδολογίες και διαχωρίζονται σε αυτά των *κοντινών-* και *μεσαιών-αποστάσεων*. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται είναι αυτή που ορίζει κάθε φορά τον μέγιστο δυνατό όγκο σάρωσης αλλά και τις μέγιστες αποστάσεις ανάμεσα στους αισθητήρες και στις επιφάνειες των αντικειμένων.

Μεθοδολογίες τρισδιάστατης σάρωσης

Το πλήθος των διαφορετικών μεθοδολογιών προδίδει το μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον για τον συγκεκριμένο χώρο. Από την άλλη, η διαφορετική λύση που προσφέρει η κάθε

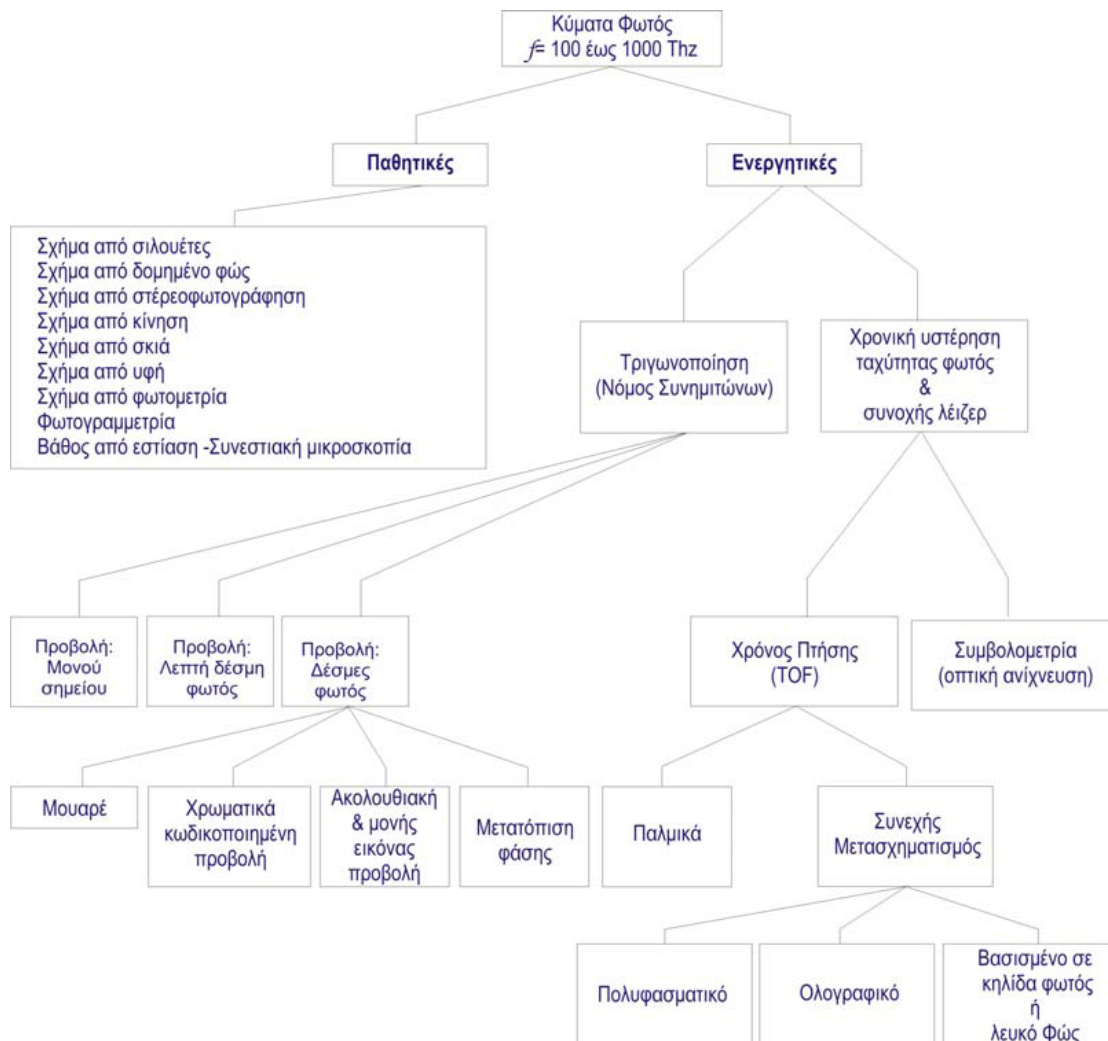
μεθοδολογία δείχνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Σημαντική είναι εδώ η συμβολή αλγορίθμων από τον χώρο της τρισδιάστατης όρασης των υπολογιστών.

Ο πρώτος και βασικότερος διαχωρισμός που μπορεί να γίνει στις μεθοδολογίες τρισδιάστατης ψηφιοποίησης είναι η διάκρισή τους σε:

παθητικές μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης: γίνεται συνήθως χρήση του περιβαλλοντικού φωτισμού και τα μοναδικά χαρακτηριστικά που αποτυπώνονται είναι αυτά που είναι εμφανή σε ψηφιακές εικόνες.

ενεργητικές μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης: τα ενεργητικά συστήματα που βασίζονται σε ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων αποτυπώνουν τις παραμορφώσεις που δέχεται η δέσμη φωτός καθώς ανακλάται πάνω σε επιφάνειες. Δημιουργούν ένα πυκνό *χάρτη βάθους* ή *ένα νέφος σημείων* από όλες τις εμφανείς επιφάνειες.

Στην Εικόνα 11 παρουσιάζονται οι επικρατέστερες τεχνικές σάρωσης που έχουν εφαρμογή στην αποτύπωση κινητών πολιτιστικών αντικειμένων (αλλά και μνημείων). Οι περισσότερες από αυτές έχουν ήδη εφαρμοστεί σε διάφορα ερευνητικά έργα και μελέτες. Σε αυτό το τμήμα της Εργασίας θα ασχοληθούμε με όλες τις παθητικές μεθόδους ενώ από τις ενεργητικές μας ενδιαφέρουν μόνο οι μέθοδοι τριγωνοποίησης κοντινών αποστάσεων και οι αισθητήρες αφής που δεν περιγράφονται στην εικόνα. Όλες οι μέθοδοι *Σχήμα-Από-Χ* επιτυγχάνουν την πρόσκτηση της τρίτης διάστασης μέσα από ένα σύνολο ψηφιακών φωτογραφιών. Το κοινό στοιχείο ανάμεσα στις δύο κατηγορίες είναι η ύπαρξη κάποιας διαδικασίας βαθμονόμησης. Η διαδικασία της βαθμονόμησης αποτελεί το κλειδί στην ορθή εξαγωγή της τρισδιάστατης γεωμετρίας και της πληροφορίας υψής, και, σε πολλές περιπτώσεις, αποτελείται από μια σειρά από μαθηματικές σχέσεις που αντιστοιχούν ένα σημείο από την δισδιάστατη φωτογραφία σε ένα σημείο στον πραγματικό χώρο, του οποίου η θέση είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια. Αυτή η αντιστοίχιση εφαρμόζεται στην συνέχεια για την ανάκτηση της τρίτης διάστασης όλων των σημείων που εμφανίζονται μέσα στις φωτογραφίες.



Εικόνα 11: Βασικός διαχωρισμός τεχνικών οπτικής τρισδιάστατης σάρωσης

Αναλυτική τεχνολογική ανασκόπηση

Η διαθέσιμη τεχνολογία, σήμερα, για την τρισδιάστατη ψηφιοποίηση αποτελεί ένα μεγάλο θέμα. Συγκεκριμένα, στην τελευταία δεκαετία, μια μεγάλη πληθώρα από εμπορικά συστήματα έκανε την εμφάνισή της, με στόχο τη διάχυση της τεχνολογίας που αναπτύχθηκε κατά την έρευνα των προηγούμενων είκοσι περίπου χρόνων. Η έρευνα όμως στο χώρο συνεχίζεται και τόσο βελτιώσεις όσο και νέα συστήματα κάνουν την εμφάνισή τους μέρα με τη μέρα.

Είναι πρακτικά αδύνατο να καταλογογραφηθούν πλήρως όλα τα διαθέσιμα συστήματα και μέθοδοι. Στην ανασκόπηση μεθόδων που ακολουθεί γίνεται μια γενική προσέγγιση με βάση το μέγεθος των αντικειμένων προς ψηφιοποίηση από το μικροσκοπικό επίπεδο έως το επίπεδο πολύ μεγάλων αντικειμένων, και γίνεται μια εισαγωγή στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Τεχνικές ψηφιοποίησης εξαιρετικά μικρών αντικειμένων

Είναι πλέον δυνατή η σύλληψη τρισδιάστατης πληροφορίας σε πάρα πολύ μικρή κλίμακα. Τεχνικές όπως η "Atomic Force Microscopy" και η "Stereo Scanning Electron Microscopy" μας επιτρέπουν να αναγνωρίσουμε και να καταγράψουμε χαρακτηριστικά σε κλίμακα μερικών δεκάδων νανομέτρων (nm). Άλλες τεχνικές, όπως η "Confocal Microscopy" και η

"White Light Scanning Interferometry" παρέχουν ανάλυση της κλίμακας μερικών εκατοντάδων νανομέτρων. Το μειονέκτημα που υπάρχει στη χρήση τέτοιων μεθόδων υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης είναι ότι αυτές οι συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ψηφιοποίηση πολύ μικρών επιφανειών (τυπικά μικρότερων του ενός τετραγωνικού χιλιοστού).

Το εύλογο ερώτημα στο σημείο αυτό θα ήταν εάν υπάρχει, πραγματικά, κάποια πρακτική αξία στη χρήση τέτοιων τεχνικών και εξοπλισμού για την ψηφιοποίηση πολιτιστικής κληρονομιάς. Η απάντηση μπορεί να είναι μόνον υποθετική: ίσως. Όταν το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι αυτό της «απόλυτης» αποτύπωσης τότε σαφέστατα υπάρχει μια εφαρμογή. Για συγκεκριμένα πολιτιστικά αντικείμενα τα μικροσκοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιφανείας είναι δυνατό να είναι πολύ σημαντικά. Η πληροφορία γι' αυτά μπορεί να βοηθήσει διαδικασίες όπως έλεγχος κατάσταση και αυθεντικότητας, μέθοδος δημιουργίας, κοκ. Από τις τεχνικές που αναφέρθηκαν, η τεχνική της Stereo Scanning Electron Microscopy είναι μάλλον περιορισμένης εφαρμογής στο χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς. Στην τεχνική αυτή, τα δείγματα πρέπει να εισαχθούν σε ειδικούς χώρους υπό συνθήκες κενού και απαιτείται ειδική προετοιμασία, συνήθως επικάλυψη με μέταλλο. Έτσι, η τεχνική μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις καταστρεπτικές τεχνικές και είναι, συνεπώς, ακατάλληλη για εφαρμογή στη γενική περίπτωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Υπάρχουν, βέβαια, περιπτώσεις όπως θραυσμάτων κεραμικών, απολιθωμάτων ή γυάλινων αντικειμένων, όπου θα μπορούσε να εφαρμοστεί η εν λόγω τεχνική.

Η τεχνική Confocal microscopy είναι κυρίως «βιολογική τεχνική» και δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τεχνικές όπως φθορισμός. Δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ημιδιαφανή αντικείμενα και επιτρέπει την καταγραφή εσωτερικής πληροφορίας. Θα μπορούσε να είναι περιορισμένης χρήσης στην παρατήρηση διάφανων αντικειμένων. Επίσης, είναι δυνατή η σκιαγράφιση επιφάνειας π.χ. για την ψηφιοποίηση επιφανειακής υφής, έχοντας το πλεονέκτημα ότι είναι μια τεχνική που δε στηρίζεται σε επαφή με τα αντικείμενα.

Τη σκιαγράφιση επιφάνειας μπορεί επίσης να παρέχει και η τεχνική White Light Scanning Interferometry και μάλιστα με σημαντικά μικρότερο κόστος. Συστήματα όπως το Veeco RST επιτρέπουν τη μέτρηση τρισδιάστατων επιφανειών σε κλίματα κάτω του μικρομέτρου και θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ιδιαίτερα χρήσιμα για την επισταμένη μελέτη επιφανειών. Η τεχνική είναι χωρίς επαφή και δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη επιφανειακή προετοιμασία.

Η τεχνική Atomic Force Microscopy είναι η νεότερη στην κατηγορία των τεχνικών μικροσκοπικής κλίμακας και, ενώ υπάρχουν διαθέσιμα εμπορικά συστήματα, είναι ακόμη στη φάση σημαντικής ανάπτυξης. Η βασική αρχή είναι στη χρήση ενός πάρα πολύ μικρού μετρητικού συστήματος με μέγεθος που δεν ξεπερνά τα δέκα άτομα το οποίο φέρεται πάρα πολύ κοντά στην επιφάνεια προς μέτρηση χωρίς όμως να υπάρχει επαφή. Ενδο-ατομικές δυνάμεις έλκουν το σύστημα προς την επιφάνεια. Το μικροσκόπιο μπορεί να ανιχνεύσει το σύστημα μέτρησης στην κίνησή του κατά μήκος και πλάτος πάνω στην επιφάνεια που μετράται και να ρυθμίσει την απόστασή του από αυτήν μέσω της μέτρησης της δύναμης έλξης που ασκείται. Με τον τρόπο αυτό μετράται μια επιφάνεια μέσω της μέτρησης της ελκτικής δύναμης. Η μέθοδος μπορεί να παρέχει πολύ μεγάλη ακρίβεια (απαιτώντας, βέβαια, ιδιαίτερη επιδεξιότητα χειρισμού) που μπορεί να φτάσει κάτω του ενός νανόμετρου σε ειδικές περιπτώσεις.

Με τη χρήση τεχνικών όπως αυτών που περιγράφηκαν στις παραπάνω παραγράφους, γίνεται δυνατή η μετάβαση στην κλίμακα των 100 νανομέτρων και ακόμη πιο κάτω. Το εύλογο,

βέβαια, ερώτημα θα ήταν αν υπάρχει κάτι στην κλίμακα αυτή που να είναι ενδιαφέρον. Στις κλίμακες αυτές ανακτάται η μικρο-υφή μιας επιφάνειας, ή η τραχύτητά της η οποία είναι δυνατό να έχει σημαντική συμμετοχή στη συνολική παρουσία της μορφής του αντικειμένου. Μεταβολές στην τραχύτητα της επιφάνειας θα μπορούσαν να είναι χαρακτηριστικές για την κατάσταση της επιφάνειας (π.χ. διάβρωση). Η συνολική απάντηση είναι ότι, πράγματι, στην μικρο-κλίμακα υπάρχει σημαντική πληροφορία.

Έτσι, από τις τέσσερις τεχνικές που αναφέρθηκαν, οι τεχνικές Atomic Force Microscopy και White Light Scanning Microscopy έχουν πραγματικά κάτι να συνεισφέρουν στο χώρο της τρισδιάστατης ψηφιοποίησης της πολιτιστικής κληρονομιάς. Τα μειονεκτήματα των τεχνικών αυτών είναι:

μπορούν να μετρήσουν πολύ μικρές επιφάνειες ή μικρά δείγματα από τα πραγματικά αντικείμενα

είναι σημαντικά σύνθετες και απαιτούν γνώσεις, εξειδίκευση και επιδεξιότητα

ενώ ο εξοπλισμός είναι μεταφερόμενος απαιτούνται ιδιαίτερα ελεγχόμενες συνθήκες μέτρησης (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία) αν και πολλά μουσεία μπορούν να παρέχουν αυτές τις συνθήκες.

Όλα αυτά καταδεικνύουν το γεγονός ότι τέτοια συστήματα μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο σε μια διαδικασία ψηφιοποίησης ιδιαίτερα σε συνθήκες όπου η μικρο-δομή της επιφάνειας αντικειμένων έχει σημαντική πληροφορία να δώσει τόσο για τη σωστή απεικόνιση όσο και τον έλεγχο της κατάστασής του.

Τεχνικές ψηφιοποίησης μικρών αντικειμένων

Με τον όρο «μικρά αντικείμενα» εννοούνται εδώ αντικείμενα διάστασης έως 100x100 χιλιοστών (10x10 εκατοστά). Στην κατηγορία αυτή οι αδιαμφισβήτητα προτιμητέες τεχνικές είναι αυτές που βασίζονται σε συστήματα τριγωνοποίησης ακτίνων laser. Υπάρχει σήμερα πληθώρα τέτοιων εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων, και είναι μια απολύτως βαθιά διαδικασία για ένα εξειδικευμένο εργαστήριο που σχετίζεται με το χώρο της τρισδιάστατης όρασης να κατασκευάσει μια τέτοια συσκευή. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι σχετικά απλή: μια σημειακή πηγή laser σημαδεύει την επιφάνεια προς μέτρηση και ανιχνεύεται από έναν οπτικό αισθητήρα. Καθώς το laser μετακινείται πάνω στην επιφάνεια, συναντά διαφορετικά ύψη. Αυτά τα μεταβαλλόμενα ύψη αλλάζουν την ανάκλαση του laser στον οπτικό αισθητήρα. Αν και το σύστημα αυτό μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά, τα περισσότερα συστήματα βασίζονται σε εμπειρική βαθμονόμηση με χρήση προτυποποιημένων διαβαθμίσεων ύψους για την αναγνώριση της σχέσης μεταξύ της μεταβολής στο επιφανειακό ύψος και της θέσης της ακτίνας. Με δεδομένο ότι η προς μέτρηση περιοχή περιορίζεται σε 100x100mm τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν μια ακρίβεια μέτρησης της τάξης μερικών μικρομέτρων. Παρόλα αυτά, εάν η επιφάνεια του αντικειμένου είναι μεγαλύτερη, τότε η ακρίβεια μέτρησης μειώνεται, και μάλιστα πολλές φορές σημαντικά.

Τέτοια συστήματα είναι χρήσιμα για τη μέτρηση αντικειμένων όπως νομίσματα και μέταλλα, εγχάρακτες ή ανάγλυφες ταμπέλες και μικρά αντικείμενα χρυσοχοΐας. Είναι συνήθως φορητά, σχετικά φθηνά και εμπορικά διαθέσιμα.

Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεσαίου μεγέθους

Στην κατηγορία αυτή απαντώνται τα πιο ενδιαφέροντα πολιτιστικά αντικείμενα, και όπου διατίθενται οι περισσότερες τεχνικές ψηφιοποίησης. Τα αντικείμενα είναι διαστάσεων άνω

των 10 εκατοστών και μπορεί να φτάνουν έως και 1 με 2 μέτρα. Εδώ μπορεί να περιληφθούν ακόμη και αγάλματα φυσικού μεγέθους.

Τα πλέον χρησιμοποιούμενα συστήματα στην κατηγορία αυτή χρησιμοποιούν τεχνικές «δομημένου φωτισμού». Η λειτουργία τους βασίζεται σε μια επέκταση της αρχής της τριγωνοποίησης. Η διαφορά είναι ότι η σημειακή πηγή έχει πλέον αντικατασταθεί από ένα δισδιάστατο μοτίβο φωτός το οποίο προβάλλεται στην προς μέτρηση επιφάνεια. Διάφορες είναι οι μέθοδοι παραγωγής αυτού του μοτίβου φωτός, άλλοτε με τη συμβολή φωτός από πηγή laser και άλλοτε με απλή προβολή του μοτίβου με φωτογραφική μέθοδο. Συνήθως γίνεται χρήση ενός μοτίβου, το οποίο μετακινείται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου για να επιτευχθεί η συνολική μέτρησή του.

Υπάρχουν όμως και τεχνικές που χρησιμοποιούν πολλαπλά μοτίβα καθώς και τεχνικές Moiré. Το σημαντικό, όμως, σημείο εδώ είναι ότι με οποιονδήποτε τρόπο και εάν παράγονται τα μοτίβα φωτός η διαδικασία ανίχνευσης και ανάλυσής τους είναι η ίδια.

Ένα σύνθετο μοτίβο δεν αποτελείται από δύο απλές καταστάσεις τύπου on/off αλλά, τις περισσότερες φορές, από ημιτονοειδείς μεταβάσεις. Το σημαντικό εδώ είναι ότι καθίσταται δυνατός ο καθορισμός της θέσης όπου παρατηρούνται τα μέγιστα των μοτίβων οδηγώντας σε βελτίωση της ακρίβειας της μέτρησης, παρέχοντας τη δυνατότητα εντοπισμού σε τμήμα μικρότερο ενός κροσσού συμβολής του μοτίβου. Εμπορικά, τα συστήματα αυτά είναι ικανά να επιτύχουν ακρίβεια μέτρησης περί το 1/100 των διαστημάτων μεταξύ των κροσσών του μοτίβου. Έτσι εάν το διάκενο αυτό είναι για παράδειγμα 1 cm τότε η αναμενόμενη ακρίβεια μέτρησης είναι της τάξης του 0,1 mm. Τα συστήματα αυτά βασίζονται συνήθως σε μία από δύο βασικές αρχές λειτουργίας: είτε με χρήση μετασχηματισμού Fourier, είτε με χρονική μετατόπιση φάσης. Κάθε προσέγγιση έχει τα πλεονεκτήματα και τους υποστηρικτές της. Τα περισσότερα εμπορικά συστήματα αυτής της κατηγορίας βασίζονται στη χρονική μετατόπιση φάσης, καθώς η τεχνική αυτή έχει αναλυθεί σημαντικά σε ερευνητικό επίπεδο και είναι σε μερικές περιπτώσεις ευκολότερη στην εφαρμογή της έναντι της άλλης μεθόδου.

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των τεχνικών στην κατηγορία αυτή είναι ότι σε γενικές γραμμές η ακρίβειά τους είναι κλιμακούμενη. Αυτό σημαίνει ότι τείνουν να μετρούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα μικρά από ότι τα μεγάλα αντικείμενα. Για τα περισσότερα συστήματα το χαρακτηριστικό αυτό είναι συνυφασμένο με τον τρόπο που σχεδιάστηκαν. Περιορισμοί στην ακρίβειά τους πηγάζουν από το γεγονός ότι μια ψηφιακή εικόνα του μοτίβου φωτός έχει περιορισμένο εύρος ζώνης. Το εύρος αυτό ορίζεται από την ανάλυση που παρέχει το οπτικό αισθητήριο που χρησιμοποιεί το εκάστοτε σύστημα και το βάθος χρώματος με το οποίο ψηφιοποιείται η εικόνα. Βασικά, όσο μεγαλύτερο το πλήθος των εικονοστοιχείων στον οπτικό αισθητήρα τόσο καλύτερη η ανάλυση και τόσο μικρότερο μπορεί να είναι το διάκενο μεταξύ των κροσσών του μοτίβου για δεδομένο μέγεθος αντικειμένων. Καθώς η ακρίβεια των συστημάτων είναι στενά δεμένη με το μέγεθος των κροσσών του μοτίβου, μικρότεροι κροσσοί οδηγούν σε μεγαλύτερη ακρίβεια. Επίσης καθώς το βάθος χρώματος ψηφιοποίησης μεγαλώνει γίνεται όλο και μεγαλύτερη η ικανότητα διαχωρισμού σημείων εντός του κροσσού μοτίβου οδηγώντας σε περαιτέρω αύξηση της ακρίβειας.

Πολλά από τα συστήματα της κατηγορίας εφαρμόζουν την τεχνική τμηματικής ψηφιοποίησης για μεγάλες επιφάνειες (για μεγαλύτερη ακρίβεια) και στη συνέχεια χρησιμοποιούν λογισμικά για συνένωση των τμηματικών σαρώσεων. Φυσικά και εδώ υπάρχουν όρια και η διαδικασία απαιτεί περισσότερο χρόνο ψηφιοποίησης.

Άλλοι σημαντικοί περιορισμοί αυτών καθώς και κάθε οπτικού συστήματος που βασίζεται σε διασκορπισμό φωτός από μια επιφάνεια είναι:

Συνήθως αποτυγχάνουν στη μέτρηση σκούρων ή μαύρων αντικειμένων. Η απολύτως συμβατή προς αυτά επιφάνεια μέτρησης είναι μια ομαλή λευκή επιφάνεια χωρίς αντανάκλασεις. Έτσι καθίστανται καλή επιλογή για τα περισσότερα από τα έργα γλυπτικής.

Τις περισσότερες φορές, τα γυαλιστερά αντικείμενα με ανακλαστικές επιφάνειες αποτελούν σημαντικό πρόβλημα. Σήμερα, βέβαια, υπάρχουν ειδικές τεχνικές που αντιμετωπίζουν και το πρόβλημα αυτό. Στη γενικό όμως περίπτωση, δεν είναι δυνατή η μέτρηση αντικειμένων με υψηλή ανακλαστικότητα ή διάφανων αντικειμένων.

Η ύπαρξη μοτίβων ή σημαδιών στην επιφάνεια όπως για παράδειγμα ζωγραφική πάνω σε κεραμικά μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στο σύστημα οδηγώντας σε καταστάσεις ασάφειας εντοπισμού των προβαλλόμενων μοτίβων.

Επιφάνειες με μεγάλη γκάμα καμπυλοτήτων μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα. Πολύ απότομες ακμές μπορεί επίσης να εισάγουν δυσκολίες.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων είναι ότι παράγουν αυτό που καλείται «νέφος σημείων» και όχι ολοκληρωμένες επιφάνειες.

Στα παραγόμενα δεδομένα δεν υπάρχει κάποιου είδους πληροφορία αποκλειστικής σύνδεσης μεταξύ των σημείων, η οποία πρέπει να οριστεί στη συνέχεια.

Στην κατηγορία αυτή μπορούν να ενσωματωθούν και άλλες τεχνικές, μία εκ των οποίων γνωρίζει σημαντική άνθηση τα τελευταία χρόνια και δεν είναι άλλη από την ολογραφία με χρήση υπολογιστών. Η ολογραφία είναι ήδη ώριμη (φτάνει τα 50 περίπου χρόνια), αλλά δεν έχει ακόμη καταφέρει να αποδώσει τους καρπούς της τουλάχιστον σε εμπορικό επίπεδο. Έτσι η ολογραφία παραμένει ακόμη σε επίπεδο ερευνητικής ή πολύ ειδικής χρήσης. Παρουσιάζεται ως μια πολύ ακριβή, τεχνικά πολύπλοκη μέθοδος με μη σημαντικά αποτελέσματα για τον κόσμο του πολιτισμού, λίγο-πολύ ως ένα αξιοπερίεργο. Αυτό όμως αρχίζει να αλλάζει. Μερικά από τα προβλήματα που σχετίζονται με την ολογραφία είναι η απαίτηση για χρήση υγρών χημικών για την έκθεση των εικόνων και οι σημαντικοί περιορισμοί στη δυνατότητα απεικόνισης. Η ολογραφία με χρήση υπολογιστών δίνει μια παράπλευρη λύση σε όλα αυτά τα προβλήματα.

Αλλά ας πάρουμε τα πράγματα από την αρχή: ο λόγος για τον οποίο βλέπουμε αντικείμενα είναι γιατί το φως ανακλάται πάνω τους. Το φως έχει τρεις σημαντικές ιδιότητες: ένταση, συχνότητα και φάση. Μια ασπρόμαυρη εικόνα αναπαριστά μόνο την ένταση. Μια έγχρωμη εικόνα αναπαριστά τις δύο πρώτες ιδιότητες, ένταση και συχνότητα. Μόνο το ολόγραμμα μπορεί να συλλάβει και να αναπαραστήσει και τις τρεις ιδιότητες. Το φως που προέρχεται από διαφορετικά σημεία του αντικειμένου έχει διανύσει διαφορετικό μήκος αποστάσεων και έχει, συνεπώς, διαφορετική φάση. Έτσι, η πληροφορία της τρισδιάστατης δομής του αντικειμένου βρίσκεται στη φάση. Με έλεγχο της φάσης του φωτός που προσπίπτει στο αντικείμενο μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι όλη η πληροφορία φάσης στο ολόγραμμα προέρχεται από το αντικείμενο, που σημαίνει ότι θα έχουμε καταγράψει τη συνολική πληροφορία τρισδιάστατης μορφής του αντικειμένου. Κατά την απεικόνιση, το ολόγραμμα εμφανίζει παράλλαξη, δηλαδή βλέπουμε ένα τρισδιάστατο αντικείμενο και εάν μετακινήσουμε τη θέση όρασής του φέρνουμε άλλα τμήματα της επιφάνειάς του στο οπτικό μας πεδίο. Ακριβώς όπως θα γινόταν εάν το αντικείμενο είχε φυσική παρουσία. Δύο είναι οι προσεγγίσεις στην ολογραφία με υπολογιστές:

- η ψηφιακή ολογραφία και
- η τεχνητά δημιουργημένη ολογραφία (μέσω υπολογιστή)

Και οι δύο έχουν σημαντικές προοπτικές στη σύλληψη και απεικόνιση τρισδιάστατων πολιτιστικών αντικειμένων.

Ψηφιακή ολογραφία (digital holography) είναι η διαδικασία της καταγραφής ολογράμματος με οπτικά αισθητήρια και η αποθήκευσή του σε υπολογιστή.

Στη διαδικασία δεν εμπλέκεται πλέον κάποιο υγρό χημικό. Η προοπτική της μεθόδου είναι πολύ μεγάλη. Επειδή η εικόνα μπορεί να αποκατασταθεί μέσω λογισμικού είναι δυνατή η εξαγωγή του τρισδιάστατου σχήματος με μαθηματικές μεθόδους. Τα ψηφιακά ολογράμματα είναι δυνατό να απεικονιστούν με δύο τρόπους:

Ως πραγματικά ολογράμματα με όλες τις ιδιότητες παράλλαξης των τυπικών ολογραμμάτων, μέσω της «εγγραφής» των δεδομένων των ολογραμμάτων σε μια συσκευή που ονομάζεται χωρικός διαμορφωτής φωτός (spatial light modulator) και με τον φωτισμό τους είτε με φως από laser είτε με φως από σημειακή πηγή λευκού φωτός.

Μέσω του υπολογισμού της κυματομορφής από το ολόγραμμα εντός του υπολογιστή και στη συνέχεια υπολογισμού της εικονικής αναπαράστασής του σε οθόνη υπολογιστή με τυπικές μεθόδους απεικόνισης τρισδιάστατων γραφικών.

Πέραν του σημαντικού πλεονεκτήματος της μαθηματικής αναπαράστασης των δεδομένων ενός ψηφιακού ολογράμματος, άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής του και η δυνατότητα αντιγραφής και αναπαραγωγής του.

Από τη στιγμή που ένα ολόγραμμα κατασκευάζεται έχει πλέον τη μορφή ψηφιακών δεδομένων. Στη γενική περίπτωση είναι δυνατή η μετάδοσή του ή ακόμη και η επεξεργασία του (π.χ. κλιμάκωση). Μπορούμε να δανειστούμε ένα αντίστοιχο παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων από το χώρο της ψηφιακής μουσικής. Από τη στιγμή που έχουμε τη μουσική σε ψηφιακή μορφή είναι δυνατή η επεξεργασία της, η αλλαγή της μορφής δεδομένων, η αποστολή της μέσω π.χ. e-mail, η εγγραφή της σε CD, η μεταφόρτωση μέσω διαδικτύου, η μετάδοση μέσω ψηφιακού ραδιοφώνου, κ.ο.κ. Παρόμοια ευελιξία παρέχεται και από το ψηφιακό ολόγραμμα. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των ψηφιακών ολογραμμάτων είναι ότι βασίζεται στη χρήση φωτός laser, το οποίο αποτελεί πρότυπο. Αυτό σημαίνει ότι από τη στιγμή που αποθηκευτεί ένα ψηφιακό ολόγραμμα πολιτιστικού αντικειμένου σήμερα και η διαδικασία επαναληφθεί αργότερα, είναι δυνατή η απόλυτη σύγκριση μεταξύ των ολογραμμάτων. Το μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου laser HeNe δεν πρόκειται να μεταβληθεί με το πέρασμα του χρόνου (παρέχοντας με τον τρόπο αυτό μέθοδο συγκριτικής μελέτης αντικειμένων στο πέρασμα του χρόνου).

Τα *τεχνητά δημιουργημένα ολογράμματα* (με χρήση υπολογιστών) (Computer generated holograms) είναι στην ουσία η άλλη όψη του ίδιου νομίσματος. Για τη δημιουργία τους γίνεται σύλληψη τρισδιάστατων δεδομένων και στη συνέχεια ακολουθεί προσομοίωση της διαδικασίας δημιουργίας ολογράμματος εντός ενός υπολογιστή. Έχοντας υπολογίσει πώς θα είναι το ολόγραμμα, η διαδικασία προχωρά στην τελική κατασκευή του ολογράμματος. Πρόσφατες πρόοδοι στην τελευταία αυτή διαδικασία, ειδικότερα στη λιθογραφία ηλεκτρονίων, δίνουν πλέον αυτή τη δυνατότητα και σε αρκετά μεγάλη κλίμακα – έως και αρκετά μέτρα. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να δημιουργήσουμε το ολόγραμμα ενός αντικειμένου που δεν έχει, με την τυπική έννοια, ολογραφηθεί.

Η ποιότητα αποκατάστασης είναι εξαιρετική καθώς τα τεχνητά δημιουργημένα ολογράμματα μπορούν να έχουν πλήρη πληροφορία χρώματος. Υπάρχουν, βέβαια, μερικά αλλά στην πλειοψηφία τους είναι ειδικές εφαρμογές και ειδικευμένες τεχνικές υλοποιήσεις. Η συγκεκριμένη επιστήμη είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης. Οι οπτικοί αισθητήρες (CCD) δεν είναι ακόμη ικανοποιητικά μεγάλης ανάλυσης για την πραγματική σύλληψη του τεράστιου όγκου οπτικών δεδομένων που απαιτούνται. Αυτό, βέβαια, πρόκειται να αλλάξει. Όλη η εμπορική πίεση στην περαιτέρω ανάπτυξη με χρήση πυριτίου (silicon κατά τα γνωστά) οδηγεί σε όλο και μεγαλύτερης κλίμακας σμίκρυνση των ηλεκτρονικών υλικών. Και όχι μόνο για παρόμοιες εφαρμογές αλλά σε όλη την κλίμακα των βιομηχανικών κατασκευών. Προφανώς και η συγκεκριμένη εφαρμογή θα έχει σημαντικά οφέλη από την ανάπτυξη αυτή.

Εάν εξετάσουμε τη μέθοδο σε μεγάλο βάθος χρόνου μπορούμε να πούμε ότι η ολογραφία τεχνητά δημιουργημένων ολογραμμάτων είναι αδιαμφισβήτητη η απόλυτη λύση στην ψηφιοποίηση, αποθήκευση και απεικόνιση τρισδιάστατων πολιτιστικών αντικειμένων.

Τέλος, μία ακόμη τεχνική που μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για τα αντικείμενα της κλίμακας που μελετούμε στη συγκεκριμένη παράγραφο είναι η τομογραφία. Τομογραφία είναι η διαδικασία συλλογής τρισδιάστατων ογκομετρικών δεδομένων από σειρά δισδιάστατων εικόνων τομών. Η μέθοδος βρίσκεται σήμερα μεγαλύτερη εφαρμογή στην ιατρική και την αεροδιαστημική.

Είναι ικανή για υψηλή ακρίβεια, ειδικά για μικρά αντικείμενα. Το βασικό πλεονέκτημά της έγκειται στην ικανότητα σύλληψης και αναδημιουργίας εσωτερικής πληροφορίας. Η πλέον διαδεδομένη μορφή της εκφράζεται με τη χρήση ακτίνων X, όπου γίνεται χρήση ενός πομπού ακτίνων X χαμηλής ενέργειας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν επίσης και μέθοδοι οπτικής και ακουστικής τομογραφίας, αλλά είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης σε σχέση με την τομογραφία ακτίνων X.

Η τομογραφία όταν εφαρμόζεται σε ανθρώπους βασίζεται στο ότι το σώμα των ανθρώπων παρουσιάζει διαφοροποίηση ως προς το υλικά, π.χ. κοκάλια, μύες, υγρά, αέρια, κλπ. Καθένα από τα υλικά αυτά απορροφά μέρος των ακτίνων X σε διαφορετικό ποσοστό, και, συνεπώς, καθώς οι ακτίνες διατρέχουν το σώμα προκύπτει εικόνα χαρακτηριστική της διαδρομής που διανύθηκε και των υλικών που συναντήθηκαν. Για το λόγο αυτό η τομογραφία ακτίνων X ανθρώπινου σώματος θεωρείται πλούσια σε πληροφορία. Γενικά, όμως, δεν μπορεί να λεχθεί το ίδιο και για τα πολιτιστικά αντικείμενα. υπάρχουν εξαιρέσεις, αλλά παίρνοντας για παράδειγμα τα αγάλματα, υπάρχει πολύ μικρή διαφοροποίηση στα εσωτερικά υλικά και, έτσι, η τομογραφία μπορεί να συλλάβει μικρά ποσοστά πληροφορίας. Φυσικά υπάρχουν και εξαιρέσεις, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές ανοίγματος σαρκοφάγων.

Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεγάλου μεγέθους

Στην κατηγορία αυτή αναφερόμαστε σε αντικείμενα μεγαλύτερα από 2 μέτρα (μπορεί να φτάνουν τα 100 μέτρα). Ενώ υπάρχουν πολλές τεχνικές για τη μέτρηση μεσαίων αντικειμένων στην εν λόγω κλίμακα, υπάρχει γενικά μια έλλειψη μεθόδων στην κατηγορία αυτή. Στο τέλος της κλίμακας το πρόβλημα ανάγεται σε τεχνικές ψηφιοποίησης χώρων.

Εδώ υπάρχουν δύο βασικές οικογένειες μεθόδων:

Στην πρώτη οικογένεια, οι μέθοδοι βασίζονται στην ιδέα του «οπτικού radar». Στην απλούστερη περίπτωση μια πηγή εκπέμπει ακτίνες laser οι οποίες είναι διαμορφωμένες είτε κατά πλάτος είτε κατά συχνότητα. Η ακτίνα ανακλάται από το στόχο προς μέτρηση και ανιχνεύεται από το σύστημα μέτρησης. Με εξέταση της κατάστασης διαμόρφωσης της

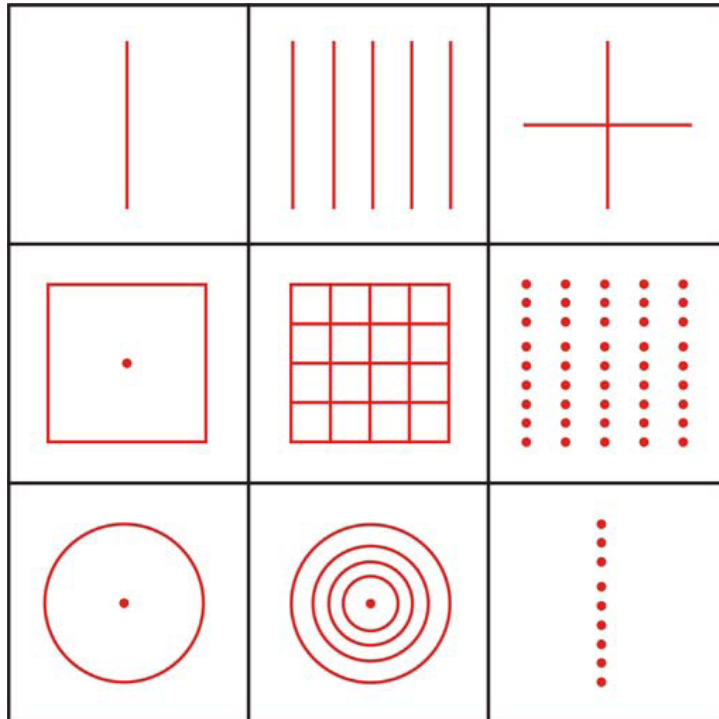
ακτίνας που ανιχνεύεται είναι δυνατός ο υπολογισμός του χρόνου που χρειάστηκε για να διανυθεί η αντίστοιχη απόσταση της ακτίνας από τον πομπό στο αντικείμενο και πίσω στο δέκτη. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του φωτός στον αέρα είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης που διανύθηκε. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως συστήματα «χρόνου πτήσης» (“time of flight”). Στην κατηγορία αυτή υπάρχουν διαθέσιμες εμπορικές συσκευές με δυνατότητα μέτρησης πολλαπλών σημείων και ακολουθιακής σύνθεσης μιας ολοκληρωμένης τρισδιάστατης σκηνής. Οι καλύτερες τεχνικές έχουν ακρίβεια περί τα 5 χιλιοστά για αποστάσεις λειτουργίας περί τα 30 μέτρα και άνω. Το προφανές μειονέκτημα είναι ότι πρόκειται για σύστημα που βασίζεται σε σημεία, δηλαδή αποτελούν μια μεγέθυνση των συστημάτων τριγωνοποίησης και συνεπώς απαιτείται σημαντικός χρόνος για τη συλλογή του συνόλου των απαιτούμενων δεδομένων.

Στη δεύτερη οικογένεια μέτρησης μεγάλων αντικειμένων ανήκουν τεχνικές *φωτογραμμετρίας*. Η βασικότερη των τεχνικών αυτών είναι η γνωστή «καθοδηγούμενη στερεοφωτογραμμετρία». Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται σημεία αναφοράς, τα οποία ορίζονται στην επιφάνεια των προς μέτρηση αντικειμένων και λαμβάνεται τουλάχιστον ένα ζεύγος φωτογραφιών από διαφορετικές γωνίες. Μέσω της ταύτισης των σημείων αναφοράς, είτε αυτόματα είτε όχι, καθίσταται δυνατή η ανάκτηση πληροφορίας τρισδιάστατης γεωμετρίας με τη μέτρηση απόστασης από το επίπεδο λήψης των φωτογραφιών. Η μέθοδος δίνει, προφανώς, καλύτερα αποτελέσματα όταν στα αντικείμενα ή, γενικά, στη σκηνή υπάρχουν επίπεδες επιφάνειες με λίγα σημεία αναφοράς. Είναι, γενικότερα, μέθοδος που ενδείκνυται περισσότερο για την ψηφιοποίηση μνημείων ή χώρων.

3.2.4 Σαρωτές τριγωνοποίησης με ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τριγώνων αποτελούν την βάση για πολλές τεχνικές μετρήσεων. Από τις βασικές μετρήσεις γεωδαισίας που πραγματοποιούνταν στην αρχαία Ελλάδα μέχρι και σήμερα με τους τρισδιάστατους σαρωτές λέιζερ, η χρήση των τριγώνων είναι θεμελιώδης. Ο Θαλής (6ος π.χ. αιώνας) διακρίθηκε για την ανακάλυψη πέντε γεωμετρικών θεωρημάτων. Δύο από αυτά εφαρμόζονται μέχρι και σήμερα αφού αποτελούν την λύση στο πρόβλημα της τριγωνοποίησης.

Οι πηγές ακτίνων λέιζερ έχουν μεγάλη εφαρμογή στη τρισδιάστατη σάρωση. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά μια δέσμης φωτός λέιζερ είναι η έντονη φωτεινότητα που την καθιστά αντιληπτή από οπτικούς αισθητήρες. Σε γενικές γραμμές, το φως που παράγουν οι πηγές λέιζερ είναι μονοχρωματικό, κατευθυντικό (σε αρκετά υψηλό βαθμό) και σε φάση. Η ιδιότητα της δέσμης να βρίσκεται σε φάση επιτρέπει στην ακτίνα λέιζερ να μένει εστιασμένη όταν προβάλλεται πάνω στην επιφάνεια αντικείμενου. Τα συστήματα που βασίζονται στην εκπομπή ακτίνων λέιζερ χρησιμοποιούν διαφορετικά μοτίβα φωτός. Στην Εικόνα 12 παρουσιάζονται κάποια από τα πλέον κλασικά μοτίβα προβολής που απαντώνται σε εμπορικά αλλά και ερευνητικά συστήματα.



Εικόνα 12: Διάφοροι τύποι μοτίβων προβολής ακτίνων λέιζερ

Οι σαρωτές αντικειμένων που βασίζονται σε ακτίνες λέιζερ χρησιμοποιούνται κυρίως σε αποστάσεις μικρότερες των δέκα μέτρων και θα μπορούσαμε να τους κατατάξουμε σε κατηγορίες ανάλογα με το πλήθος οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούν. Έτσι σε σαρωτές με έναν αισθητήρα εικόνας υπάρχει μια πηγή που προβάλλει την ακτίνα λέιζερ σε μια συγκεκριμένη και μεταβαλλόμενη προς την επιφάνεια του αντικείμενου γωνία. Ένας αισθητήρας εικόνας *CCD* ή *CMOS* βρίσκεται στην άλλη άκρη της βάσης του συστήματος και αναλαμβάνει τον εντοπισμό του σημείου ή της περιοχής που περιγράφει η ακτίνα λέιζερ καθώς ανακλάται στην επιφάνεια του αντικείμενου. Η προβολή της ακτίνας μπορεί να σχηματίζει απλά ένα φωτεινό σημείο, μια γραμμή, ένα μοτίβο από ρίγες ή ακόμα και ένα στατικό τυχαίο πλέγμα (Εικόνα 18). Η τριδιάστατη θέση της επιφάνειας του αντικείμενου που αντανακλά την ακτίνα μπορεί να βρεθεί από το ιδεατό τρίγωνο που δημιουργείται. Η ακρίβεια μέτρησης βάθους μειώνεται ανάλογα με την απόσταση ανάμεσα στο σαρωτή και το αντικείμενο.

Για πρακτικούς λόγους, η απόσταση ανάμεσα στους οπτικούς αισθητήρες και στην πηγή της ακτίνας λέιζερ δεν μπορεί να μεταβάλλεται ανεξέλεγκτα.

Η χρήση δύο οπτικών αισθητήρων αποτελεί μια παραλλαγή της αρχικής ιδέας τριγωνοποίησης. Οι αισθητήρες βρίσκονται στα δύο άκρα της βάσης του σαρωτή. Το σημείο αντανάκλασης της ακτίνας λέιζερ γίνεται αντιληπτό και από τους δύο αισθητήρες. Η γεωμετρική λύση είναι ίδια με αυτήν του ενός αισθητήρα άρα και τα αποτελέσματα έχουν την ίδια ακρίβεια. Ο δεύτερος αισθητήρας χρησιμοποιείται για την γρηγορότερη σάρωση αφού η πολυμορφία της επιφάνειας των αντικειμένων προκαλεί συχνά την αδυναμία του ενός αισθητήρα να φτάσει σε κάποια σημεία που την ίδια στιγμή μπορεί να είναι εμφανή στο δεύτερο αισθητήρα λόγω της διαφορετικής του θέσης και γωνίας.

Η οπτική τριγωνοποίηση είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται για περισσότερο από είκοσι χρόνια για την μέτρηση αποστάσεων. Τα τελευταία χρόνια όμως η ανάπτυξη γεωμετρικά σταθερών αισθητήρων και διόδων φωτός βελτίωσε κατά πολύ την ακρίβεια και την ταχύτητα

της εν λόγω τεχνικής. Η ποικιλία στους σαρωτές τριγωνοποίησης βασίζεται κυρίως στις παρακάτω παραμέτρους:

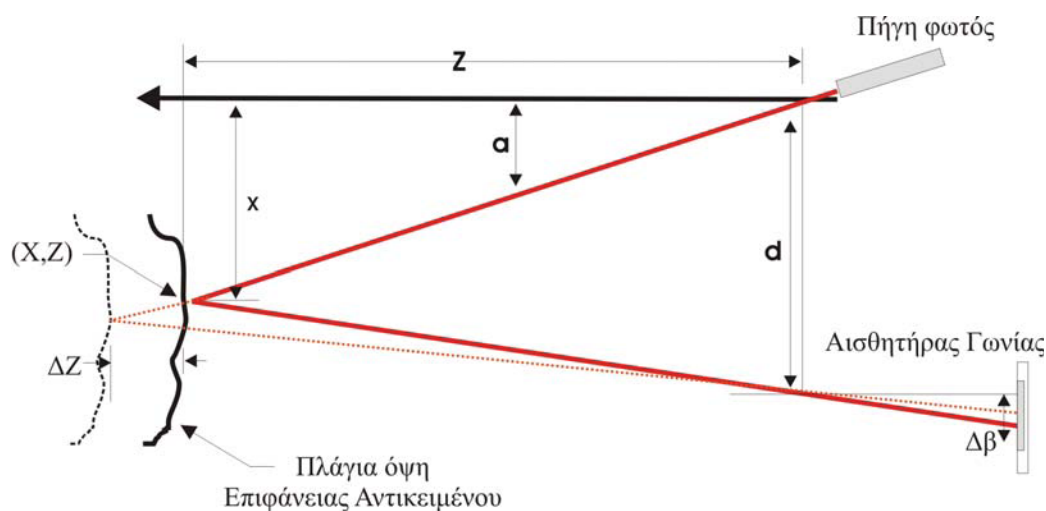
δομή του φωτισμού (απλό σημείο, ακτίνα λέιζερ, πολλαπλός πίνακας σημείων ή πολλαπλές δέσμες ακτίνων),

μορφή του αισθητήρα (γραμμικός πίνακας ή πλέγμα CCD ή CMOS)

μέθοδο σάρωσης (μετακίνηση του αντικειμένου μπροστά από την πηγή φωτός ή μετακίνηση του ίδιου του συστήματος γύρω από το αντικείμενο).

Στην Εικόνα 13 επεξηγείται το πρόβλημα της τριγωνοποίησης σε δύο διαστάσεις. Η θέση του κέντρου του παλμού της δέσμης φωτός που αντανακλάται στην επιφάνεια αποτυπώνεται πάνω στον αισθητήρα εικόνας. Ο σαρωτής με την σειρά του υπολογίζει τη νοητή γραμμή που τέμνει τη δέσμη σε ένα ακριβώς σημείο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάκτηση του βάθους. Το τρισδιάστατο σχήμα του αντικειμένου προκύπτει από την μετακίνηση και περιστροφή του αντικείμενου μπροστά από την σταθερή ακτίνα που προβάλλει ο σαρωτής.

Υπάρχει επίσης και η παραλλαγή της μεθόδου όπου η σάρωση του αντικειμένου πραγματοποιείται με την ακτίνα λέιζερ να μετακινείται γύρω από το αντικείμενο. Η ακρίβεια της οπτικής τριγωνοποίησης βασίζεται στην ικανότητα εντοπισμού του κέντρου του παλμού της δέσμης σε κάθε χρονική στιγμή. Σε συστήματα οπτικής τριγωνοποίησης κοντινών αποστάσεων, όπου το βάθος υπολογίζεται από έναν και μόνο παλμό φωτός, παράγεται ένα καθορισμένο εύρος σφαλμάτων. Τα σφάλματα αυτά εμφανίζονται λόγω της αντανάκλασης της δέσμης στην επιφάνεια του αντικειμένου αλλά και εξαιτίας των χαρακτηριστικών της ίδιας της επιφάνειας.



Εικόνα 13: Η αρχή της τριγωνοποίησης

Η βασική γεωμετρική αρχή των συστημάτων τριγωνοποίησης περιγράφεται στο Εικόνα 13. Γνωρίζοντας τις δύο γωνίες (a και $\Delta\beta$) ενός τριγώνου που είναι πάντα σχετικές με τη βάση του (d) τότε όλα τα χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις του τριγώνου μπορούν να οριστούν πλήρως. Σε κάθε αλλαγή της απόστασης ΔZ , μπορεί να υπολογιστεί η γωνία $\Delta\beta$ με το θεώρημα των αντίθετων γωνιών, θεωρώντας ότι το a είναι πάντα σταθερό. Ο αισθητήρας γωνίας είναι σταθερός. Για τον υπολογισμό της θέσης της επιφάνειας του αντικείμενου απαιτείται η σάρωση της κάθε δισδιάστατης εικόνας που αποτυπώνει ο οπτικός αισθητήρας, ώστε να βρεθεί το σημείο με την μέγιστη συγκέντρωση φωτός. Η διάταξη που παρουσιάζει το Εικόνα 13 είναι γνωστή ως *σύστημα μονού σημείου ακτίνας λέιζερ*.

Στην Εικόνα 14 η ακτίνα φωτός αντανακλάται από έναν καθρέφτη και προβάλλεται στη συνέχεια μέσω αυτού πάνω στην επιφάνεια του αντικείμενου.

Το οπτικό σύστημα αποτελείται από ένα φακό και ένα αισθητήριο το οποίο αποτυπώνει ψηφιακά την θέση της δέσμης φωτός πάνω στο αντικείμενο. Με απλή τριγωνομετρία, οι συντεταγμένες (x, z) του φωτιζόμενου σημείου μπορούν να υπολογιστούν. Οι υπολογισμοί γίνονται με τους εξής μαθηματικούς τύπους:

$$z = \frac{df_o}{p + f_o \tan(\theta)} \text{ και } x = z \tan(\theta)$$

όπου p είναι η θέση του σημείου του αντικείμενου, όπως παρουσιάζεται πάνω στον αισθητήρα, θ είναι η γωνία απόκλισης της ακτίνας λέιζερ, ενώ d είναι η απόσταση ανάμεσα στον φακό και την πηγή της ακτίνας. f_o είναι η απόσταση ανάμεσα στον αισθητήρα και το φακό.

Οι περιορισμοί της μεθόδου τριγωνοποίησης μπορούν να αποδειχθούν αν προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε την απόκλιση σφάλματος στον άξονα z , ορίζοντας το σ_z ως μια συνάρτηση του p . Ο νόμος διάδοσης των σφαλμάτων είναι:

$$\sigma_z \approx \frac{z^2}{f_o d} \sigma_p$$

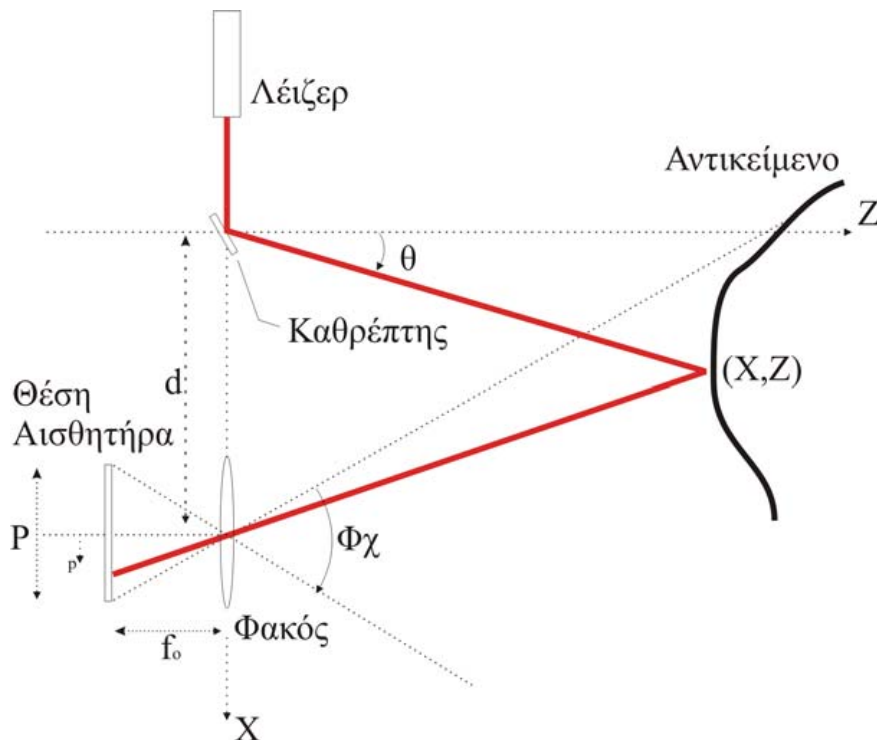
όπου σ_p είναι η τυπική απόκλιση σφαλμάτων για κάθε μέτρηση του σημείου p .

Ως εκ τούτου, η τυπική απόκλιση εκφράζει την απροσδιοριστία του z που είναι αντιστρόφως ανάλογη με την βάση της κάμερας και την εστιακή απόσταση του φακού. Το μέγεθος της παραμέτρου d περιορίζεται κυρίως από:

- τα κατασκευαστικά στοιχεία των οπτικών τμημάτων του συστήματος (η σταθερότητα του όλου συστήματος μειώνεται όσο το d αυξάνεται)
- τις σκιές που δημιουργούνται (προβλήματα *αυτό-απόφραξης* με την αύξηση του d)
- Το πεδίο όρασης Φ_χ δίνεται από τον τύπο:

$$\Phi_\chi = 2 \tan^{-1} \left(\frac{P}{2f_o} \right)$$

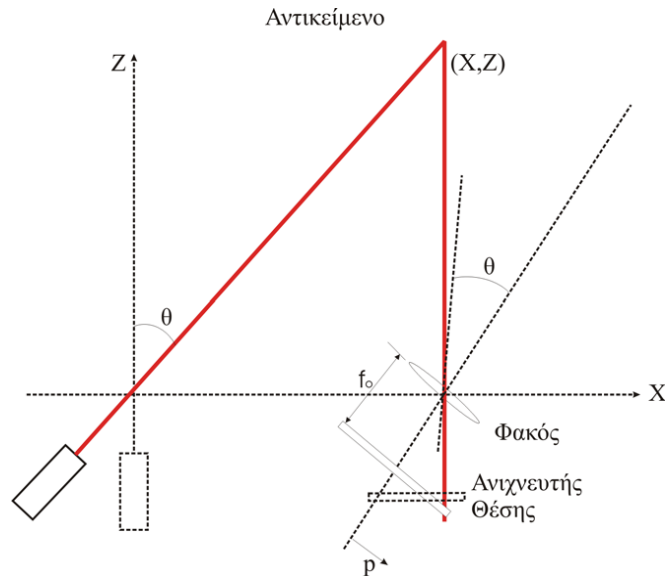
όπου P είναι το μήκος της απόστασης θέσης του αισθητήρα.



Εικόνα 14: Συμβατική προσέγγιση σάρωσης

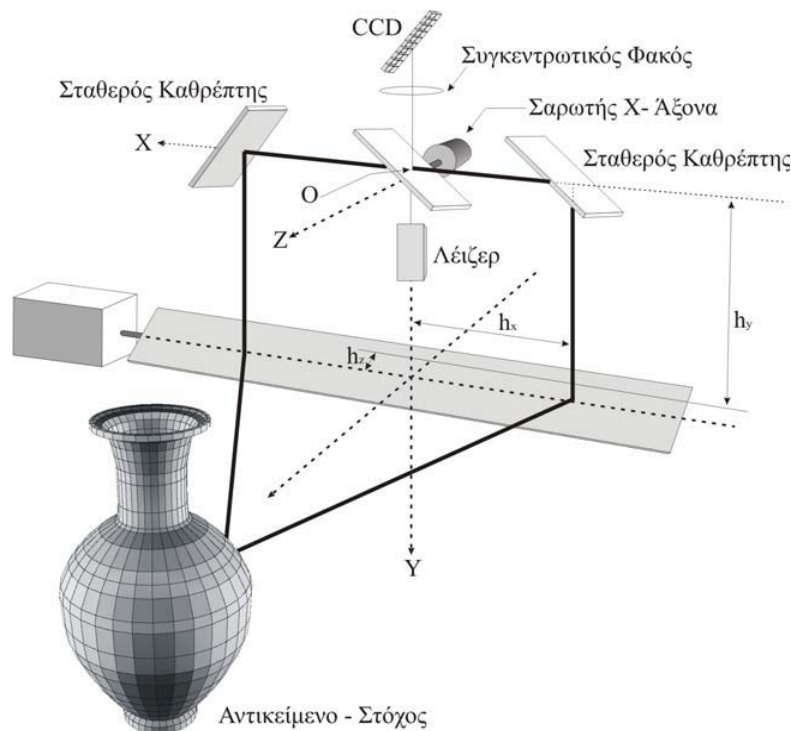
Συνεπώς, σε μια τυπική κατασκευή ενός συστήματος σάρωσης υπάρχει ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην εστιακή απόσταση, στην απροσδιοριστία μέτρησης της τρίτης διάστασης και των σκιών που μπορεί να δημιουργηθούν. Ένας τρισδιάστατος σαρωτής που βασίζεται στην τριγωνοποίηση εμφανίζει συνήθως μια τυπική απόκλιση (σ_z) της τάξης των 50 – 150 μm .

Ο Rioux παρουσίασε μια καινοτόμο προσέγγιση στην σάρωση με τριγωνοποίηση. Προτείνει ένα συγχρονισμένο σύστημα που μπορεί να σαρώσει σε πολύ μεγάλες εστιακές αποστάσεις με πολύ μικρές γωνίες τριγωνοποίησης χωρίς να τίθεται θέμα συμβιβασμού στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Με μικρές γωνίες τριγωνοποίησης επιτυγχάνεται, επίσης, μείωση στην εμφάνιση πιθανών σκιών. Ο απώτερος σκοπός δεν είναι άλλος από τον συγχρονισμό της προβολής της ακτίνας λέιζερ και του εντοπισμού της. Όπως περιγράφεται στην Εικόνα 15, το οπτικό πεδίο του ανιχνευτή θέσης ακολουθεί το σημείο καθώς σαρώνει τη σκηνή. Η εστιακή απόσταση του φακού σχετίζεται με το επιθυμητό βάθος πεδίου, ή την περιοχή μέτρησης και όχι με το οπτικό πεδίο. Η ανάπτυξη σαρωτών αυτόματου συγχρονισμού έχει αποφέρει σημαντικές μειώσεις στις διαστάσεις της οπτικής κεφαλής των συστημάτων.



Εικόνα 15: Απλοποιημένο διάγραμμα σαρωτή με ένα άξονα σάρωσης

Όπως προαναφέρθηκε, για μια πλήρη τρισδιάστατη αποτύπωση ενός αντικειμένου απαιτείται είτε η μετακίνηση του σαρωτή γύρω από το αντικείμενο είτε κάποια άλλη μέθοδος. Η μηχανική μετατόπιση βασισμένη σε γαλβανόμετρα είναι μια μέθοδος που επιτρέπει τη μετατόπιση της δέσμης φωτός πάνω σε επιφάνειες. Η βασική οργάνωση των οπτικών τμημάτων ενός τέτοιου συστήματος περιγράφεται στην Εικόνα 16. Οι καθρέφτες περιστρέφονται γύρω από το κέντρο ενός νοητού άξονα με τη χρήση γαλβανόμετρων. Ο άξονας X (μεγάλη ταχύτητα σάρωσης) χρησιμοποιείται για τη γραμμική σάρωση, ενώ ο άξονας Y (μικρή ταχύτητα σάρωσης) ανακλά κάθετα την ακτίνα, ώστε να δημιουργήσει την εικόνα που καταγράφεται από ένα CCD.



Εικόνα 16: Σάρωση διπλών αξόνων

Το τρισδιάστατο μοντέλο της επιφάνειας του αντικειμένου προκύπτει από μια ακολουθία διαδικασιών. Αυτές είναι οι εξής:

εκπομπή της δέσμης φωτός (ακτίνα λέιζερ)

συλλογή της δέσμης καθώς διασκορπίζεται στην σκηνή (μαζί με όλες τις μεταβολές που δέχεται εξαιτίας της ανάκλασης πάνω στις επιφάνειες του αντικειμένου) σε συγχρονισμό με τους καθρέφτες προβολής.

συγκέντρωση της δέσμης στο γραμμικό ανιχνευτή θέσης γνωστό και ως CCD.

Πιο συγκεκριμένα, από τη διαδικασία πρόσκτησης των εικόνων εξάγονται τρεις διαφορετικές πληροφορίες σε κάθε βήμα της διαδικασίας δειγματοληψίας:

δύο γωνιακές θέσεις των καθρεφτών και,

θέση του στίγματος της ακτίνας λέιζερ πάνω στον ανιχνευτή θέσης

Οι εξισώσεις που παράγονται από την βαθμονόμηση του συστήματος χρησιμοποιούνται για την χαρτογράφηση των γωνιακών θέσεων και του στίγματος της ακτίνας φωτός πάνω σε ένα κλασικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x,y,z) .

Σε πολλές εφαρμογές αποτύπωσης αντικειμένων πολιτισμικής κληρονομιάς, εκτός από τη γεωμετρία, η απόκτηση πληροφορίας υψής είναι απαραίτητη, καθώς προσφέρει μεγάλο ρεαλισμό, ιδιαίτερα όταν τα αντικείμενα φέρουν κάποια μορφή διακόσμηση. *Με την χαρτογράφηση της πληροφορίας υψής πάνω στην γεωμετρία επιτυγχάνεται μια φωτορεαλιστική απόδοση του αντικειμένου.* Μερικοί σαρωτές μπορούν και καταγράφουν την ένταση του επιστρεφόμενου σήματος προς τον οπτικό αισθητήρα. Αυτή η πληροφορία, όμως, δεν είναι αρκετή για την ρεαλιστική απόδοση της υψής. Οι περισσότεροι εμπορικοί σαρωτές τριγωνοποίησης έχουν βελτιστοποιηθεί για την αναγνώριση της ακτίνας λέιζερ και του σημείου που καταδεικνύει και όχι για την αποτύπωση της πληροφορία υψής στο συγκεκριμένο σημείο. Υπάρχουν χρήστες που απαιτούν την ύπαρξη υψηλής ποιότητας φωτογραφικών μηχανών μέσα στο ίδιο σύστημα σάρωσης. Η λύση αυτή είναι όμως δαπανηρή και κάποιοι εκ των χρηστών δεν είναι έτοιμοι να ανταποκριθούν στο κόστος μιας τέτοιας επιπρόσθετης λειτουργίας. Μια τυπική λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα, που ακολουθείται από αρκετές εταιρείες, είναι η τοποθέτηση εξωτερικής ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής πάνω στο σαρωτή με χρήση κάποιου συστήματος στήριξης και προσαρμογής. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η γνώση της σχετικής απόστασης σαρωτή και ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής που χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση τους. Η βαθμονόμηση και των δύο θα επιτρέψει την χαρτογράφηση (UV mapping) των διςδιάστατων εικόνων πάνω στην επιφάνεια του πολυγωνικού πλέγματος ή του νέφους σημείων.

Οι προδιαγραφές των εμπορικών σαρωτών, όπως δίνονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες, πρέπει πάντα να τίθενται υπό αμφισβήτηση. Οι πιθανές αποστάσεις κάλυψης σχετίζονται με την ανακλαστικότητα του ίδιου του αντικειμένου αλλά και την διαύγεια της ατμόσφαιρας, την οποιαδήποτε άλλη επιπρόσθετη ακτινοβολία που μπορεί να προκαλείται από τεχνητή ακτινοβολία και άλλες πηγές παρεμβολής. Οι σαρωτές ανίχνευσης σήματος που βασίζονται σε αισθητήρες CCD για τριγωνοποίηση δεν είναι τόσο ευαίσθητοι όσο αυτοί των τεχνικών χρόνου πτήσης σήματος (time of flight) και μέτρησης διαφοράς φάσης που χρησιμοποιούνται κυρίως για αποτυπώσεις ακίνητων αντικειμένων και σκηνών. Κάποιες φορές τα συστήματα αυτά απαιτούν συνθήκες νυχτερινού φωτισμού για καλύτερη λειτουργία.

3.2.5 Η ακρίβεια των γεωμετρικών αποτελεσμάτων

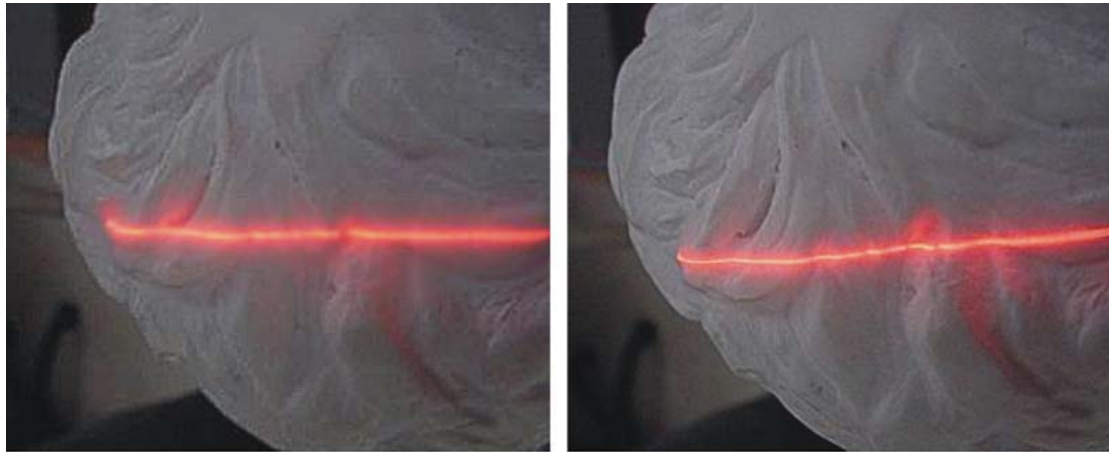
Η διαδικασία της βαθμονόμησης

Η διαδικασία βαθμονόμησης του ψηφιακού οπτικού συστήματος που χρησιμοποιεί ένας σαρωτής λέιζερ κοντινών αποστάσεων είναι βασικός παράγοντας της ορθής λειτουργίας του. Η διαδικασία βαθμονόμησης είναι συνήθως τυποποιημένη και περιλαμβάνει την αναγνώριση των *εσωτερικών* και *εξωτερικών* χαρακτηριστικών του οπτικού συστήματος με την βοήθεια ενός πραγματικού αντικείμενου που τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά είναι γνωστά με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Τα χαρακτηριστικά αυτά βοηθούν στην εύρεση εκείνου του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει την εστιακή απόσταση, τις παραμορφώσεις που εισάγει ο φακός στην εικόνα, καθώς και άλλες παραμέτρους που έχουν εφαρμογή στη σάρωση. Μετά τη σάρωση του γνωστού αντικείμενου η ακρίβεια και οι ανοχές μέτρησης του συστήματος μπορούν να υπολογιστούν. Αυτή η διαδικασία αποτελεί και τη φάση επαλήθευσης και επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων. Η ακρίβεια του συστήματος μπορεί να υπολογισθεί μέσω του γνωστού αντικείμενου βαθμονόμησης το οποίο αποτυπώνεται από διαφορετικές θέσεις και προσανατολισμούς.

Ένας γενικός κανόνας που ακολουθείται στη συγκεκριμένη διαδικασία είναι πως τα χαρακτηριστικά του αντικείμενου βαθμονόμησης πρέπει να είναι γνωστά με ακρίβεια δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή που αποτυπώνει το ψηφιακό οπτικό σύστημα του σαρωτή.

Ανάλυση του σαρωτή

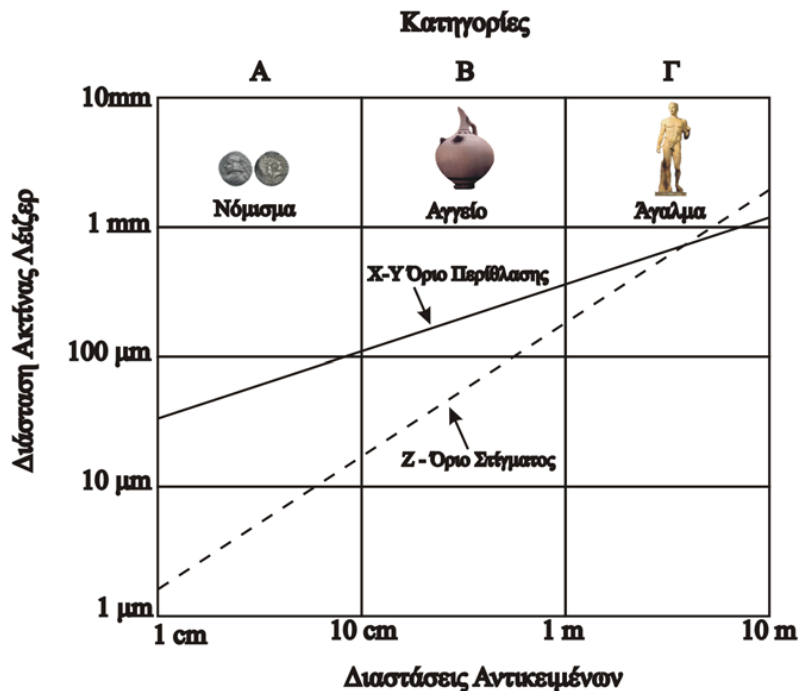
Η τελική ανάλυση ενός αντικείμενου είναι θεωρητικά μια συνάρτηση του μεγέθους των γωνιακών μεταβολών που μπορεί να αντιληφθεί το σύστημα καθώς η ακτίνα λέιζερ μετακινείται πάνω στις επιφάνειες. Μια πιο πρακτικής αξίας επεξήγηση της ανάλυσης σχετίζεται με το μέγεθος του στίγματος της ακτίνας λέιζερ που αντανακλάται. Αν η υψηλή ανάλυση είναι βασική προϋπόθεση σε μια εφαρμογή ψηφιοποίησης, τότε θα πρέπει με μεγάλη προσοχή να ελεγχθεί η βέλτιστη ικανότητα εστίασης της ακτίνας πάνω στο αντικείμενο είτε χειροκίνητα είτε μέσω κάποιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας που φέρει ο σαρωτής, έτσι, ώστε η αποτύπωση της γεωμετρίας του αντικείμενου να γίνει με την υψηλότερη δυνατή ανάλυση. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται στιγμιότυπο από διαδικασία ψηφιοποίησης στο επάνω τμήμα μιας προτομής. Η ρύθμιση της εστίασης γίνεται χειροκίνητα. Εμφανέστατη είναι η διαφορά έντασης της δέσμης καθώς ο σαρωτής πλησιάζει προς το σημείο βέλτιστης εστίασης.



α) Η ακτίνα βρίσκεται εκτός εστίασης λόγω της απόστασης του σαρωτή από το αντικείμενο. β) Η ακτίνα σε σωστή εστιακή απόσταση από το αντικείμενο.

Εικόνα 17: Χειροκίνητος έλεγχος βέλτιστης εστίασης της ακτίνας πάνω σε αντικείμενο

Η ανάλυση της οπτικής τριγωνοποίησης περιορίζεται από την περίθλαση της ακτίνας. Ακόμα και σε βέλτιστες περιπτώσεις εκπομπής, η δέσμη φωτός δεν διατηρεί τον απόλυτη ευθυγράμμιση με τον στόχο της. Στην πραγματικότητα, όσο μικρότερη είναι η ακτίνα λέιζερ τόσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση που δημιουργείται εξαιτίας της περίθλασης. Η περίθλαση της δέσμης επιβάλλει έναν περιορισμό στην ισχύ της ακτίνας λέιζερ. Το γράφημα στην Εικόνα 18 περιγράφει το βαθμό διάθλασης της ακτίνας καθώς μεταβάλλεται το μέγεθος των αντικειμένων. Ο διαχωρισμός των αντικειμένων έγινε με βάση τις διαστάσεις τους σε τρεις βασικές κατηγορίες. Ο περιορισμός αυτός έχει να κάνει με τα όρια ανάκτησης της δέσμης από τους αισθητήρες καθώς η δέσμη κινείται κατά μήκος των αξόνων x και y . Στην περίπτωση του άξονα z θα περίμενε κανείς μια συνεχόμενη βελτίωση καθώς η ισχύς της ακτίνας αυξάνεται και πλησιάζει την επιφάνεια του αντικειμένου. Δυστυχώς όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει.

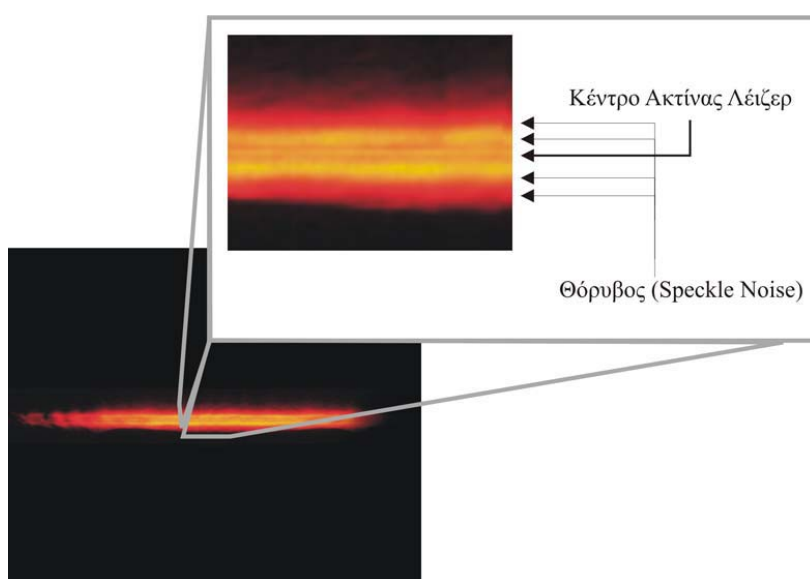


Εικόνα 18: Φυσικά όρια τρισδιάστατων οπτικών μετρήσεων που βασίζονται σε προβολή δέσμης φωτός – λέιζερ

Κοινό χαρακτηριστικό των σαρωτών κοντινών αποστάσεων αποτελεί το γεγονός ότι μεμονωμένα χαρακτηριστικά των αντικειμένων δεν μπορούν να αναγνωριστούν άμεσα. Οι μετρήσεις των αποστάσεων βάθους πολλές φορές αποκτούνται με βάση ένα τυπικό νοητό πλέγμα (π.χ. πλέγμα αισθητήρα CCD), το οποίο δεν μπορεί να εξασφαλίσει ότι κάθε δοθέν σημείο πάνω στο αντικείμενο συμπίπτει με ένα και μόνο ένα συγκεκριμένο σημείο πάνω στο πλέγμα. Οι μετρήσεις *σημείο-προς-σημείο* βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε παρεμβολή (interpolation). Αυτός ο περιορισμός είναι αποτέλεσμα της προκαθορισμένης χωρικής ανάλυσης του αισθητήρα εικόνας. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως θα δούμε και παρακάτω (*Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως*), η ίδια η τεχνική εισάγει μια κατά προσέγγιση εκτίμηση (averaging).

Ο θόρυβος της δέσμης φωτός

Σε συστήματα τριγωνοποίησης κοντινών αποστάσεων, η ακρίβεια των δεδομένων εξαρτάται σε μέγιστο βαθμό από την ορθή ερμηνεία της θέσης της ακτίνας λέιζερ. Η δέσμη φωτός δημιουργεί ένα *Gaussian* προφίλ πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Πιο συγκεκριμένα, η χωρική κατανομή της δέσμης φωτός σε ένα σημείο έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση καταστροφικών παρεμβολών που περιορίζουν τη δυνατότητα ανάκτησης της δέσμης από τους οπτικούς αισθητήρες. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό και ως *speckle effect* και εμφανίζεται με την μορφή τυχαίας διάχυσης της δέσμης. Υπεύθυνη για το θόρυβο είναι μεταξύ άλλων η επιφάνεια του αντικειμένου και, κυρίως, η τραχύτητα της. Ο θόρυβος αυτός (*speckle noise*) ο οποίος εμφανίζεται στη δέσμη του φωτός μεταφέρεται και στα τελικά δεδομένα.



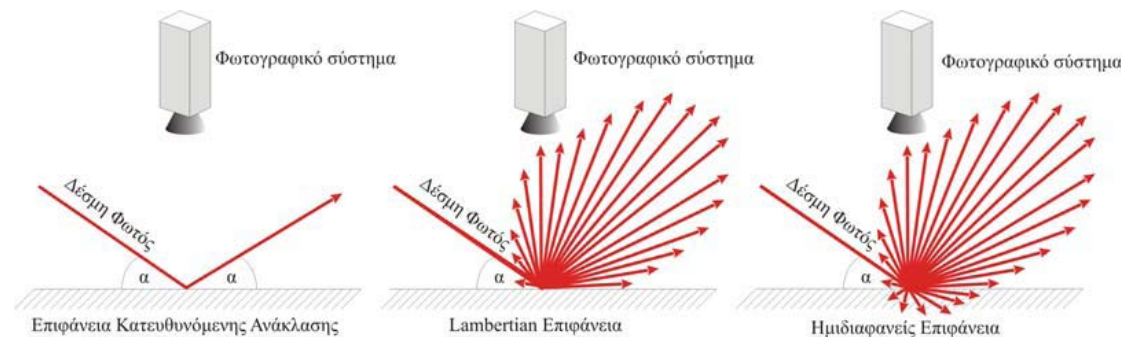
Εικόνα 19: Θορυβώδες Gaussian προφίλ δέσμης φωτός (speckle noise)

Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τις συνέπειες του θορύβου στον καθορισμό αποστάσεων με τριγωνοποίηση και έχουν καταλήξει στο αξίωμα ύπαρξης ενός θεμελιώδους ορίου που αποτελεί και το φράγμα στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ο θόρυβος δύναται να μειωθεί με την εφαρμογή συγκεκριμένων τεχνικών. Οι γραμμικές τεχνικές φιλτραρίσματος που βασίζονται σε χρονικούς τελεστές και βρίσκουν εφαρμογή στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας δεν αποδίδουν στην συγκεκριμένη περίπτωση και δεν μπορούν να μειώσουν τέτοιου είδους θόρυβο. Η διόρθωση γίνεται με τεχνικές φιλτραρίσματος στο πεδίο της εικόνας. Τα φίλτρα αυτά είναι γνωστά από τους χώρους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας και ως

χωρικά φίλτρα. Μια κλασική μέθοδος για την ελαχιστοποίηση του προβλήματος ορθής ερμηνείας της θέσης, αποτελεί η εύρεση του κέντρου του μονοδιάστατου παλμού της δέσμης. Τα αποτελέσματα της τεχνικής αυτής είναι σωστά μόνο όταν η επιφάνεια σάρωσης είναι επίπεδη .

Καταλήγουμε λοιπόν στον κανόνα ότι «τα οπτικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας ενός αντικειμένου επηρεάζουν τις επιδόσεις του σαρωτή λέιζερ» .

Ο βέλτιστος τύπος επιφάνειας για ψηφιοποίηση με ακτίνες λέιζερ είναι αυτός που φέρει χαρακτηριστικά Lambert (το φως ανακλάται ομοιόμορφα στον χώρο χωρίς να εισχωρεί στην επιφάνεια) και ταυτόχρονα έχει υψηλό δείκτη ανάκλασης. Στην Εικόνα 20 περιγράφεται ο τρόπος που συμπεριφέρονται οι δέσμες φωτός καθώς ανακλώνται σε μια επιφάνεια κατευθυνόμενης ανάκλασης (specular), σε μια Lambertian επιφάνεια και μια ημιδιαφανή επιφάνεια (π.χ. μάρμαρο).



Εικόνα 20: Συμπεριφορά ανάκλασης φωτός πάνω σε επιφάνειες

Σε μια ημιδιαφανή επιφάνεια το φως διεισδύει μέσα στα υποστρώματα του αντικειμένου σε βάθος ανάλογο της ισχύος του. Επιπρόσθετα, τα φως διαχέεται μέσα στα υποστρώματα του αντικειμένου και δημιουργεί διασκορπισμό. Στην ημιδιαφανή επιφάνεια το οπτικό σύστημα του σαρωτή συλλέγει πλήθος από ανακλάσεις φωτός που περιέχουν κορυφές. Αν η ένταση της δέσμης μειωθεί, ο θόρυβος γίνεται ακόμα πιο εμφανής και αυτό μειώνει περισσότερο την ποιότητα ανακατασκευής του τρισδιάστατου μοντέλου .

Γενικά, θόρυβος στα δεδομένα εμφανίζεται όταν:

- η ανακλαστικότητα της επιφάνειας ποικίλει και μεταβάλλεται
- η γεωμετρία της επιφάνειας παρεκκλίνει έντονα από επίπεδο σε επίπεδο
- η πορεία της δέσμης φωτός μέχρι τον αισθητήρα παρεμποδίζεται
- η τραχύτητα της επιφάνειας προκαλεί θόρυβο στην δέσμη φωτός

Ανακεφαλαιώνοντας, ο θόρυβος στην δέσμη φωτός είναι η κύρια πηγή σφαλμάτων και εμφανίζεται εξαιτίας των αντανάκλασεων της δέσμης από επιφάνειες που αποδεικνύονται τραχιές για το μήκος κύματος της δέσμης. Η τραχύτητα της επιφάνειας του αντικειμένου εισάγει τυχαίες αποκλίσεις στις διαδρομές της οπτικής πορείας (τροχιάς). Οι αποκλίσεις αυτές προκαλούν τυχαία σχήματα παραμόρφωσης στην τελική γεωμετρία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο παλμός της δέσμης φωτός που αποτυπώνεται στην εικόνα και χρησιμοποιείται αργότερα από τον σαρωτή για την ανάκτηση της τρίτης διάστασης (βάθος) εμπεριέχει το θόρυβο, ο οποίος επηρεάζει την αναγνώριση του κέντρου της δέσμης. Κάτι τέτοιο αποφέρει σφάλματα ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η επιφάνεια είναι επίπεδη.

Συνολικά μπορούμε να αναγνωρίσουμε τρεις διαφορετικές πηγές θορύβου που επηρεάζουν την αποτύπωση με ακτίνες λέιζερ. Αυτές οι πηγές είναι:

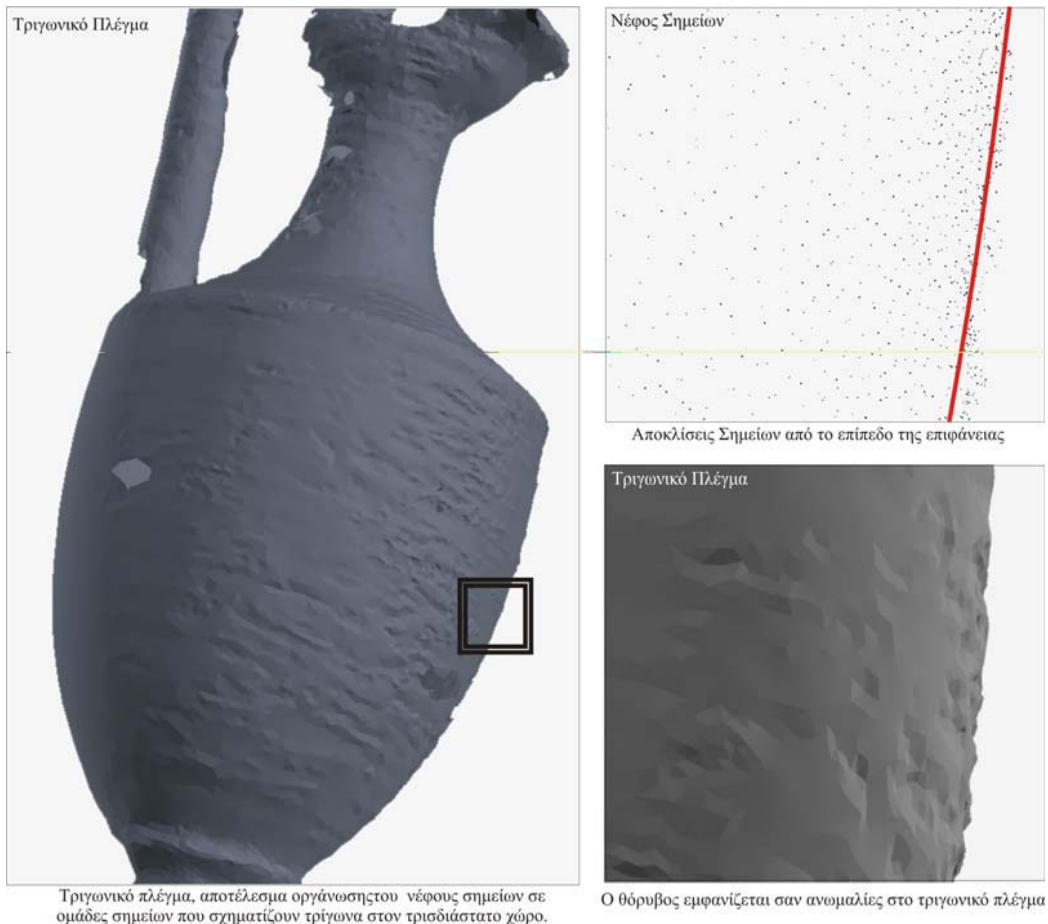
- ο ηλεκτρικός θόρυβος
- ο θόρυβος κβαντισμού
- ο θόρυβος από τη διάχυση της δέσμης φωτός

Οι δύο πρώτες πηγές θορύβου σχετίζονται με τον αισθητήρα αποτύπωσης της εικόνας που χρησιμοποιείται. Σε περιπτώσεις όπου είναι χαμηλή η ισχύς της δέσμης φωτός, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio) είναι μικρός, και έτσι, οι δύο αυτές πηγές θορύβου επηρεάζουν στο μέγιστο τα αποτελέσματα αποτύπωσης. Τέλος, ο θόρυβος από διάχυση της δέσμης σχετίζεται απόλυτα με την ίδια την φύση της ακτίνας λέιζερ.

Γεωμετρική ακρίβεια και μετάδοση του θορύβου

Η γεωμετρική ακρίβεια δεν είναι πάντα η κυρίαρχη απαίτηση στην τεκμηρίωση των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Μια μικρή απόκλιση μερικών χιλιοστών σε ένα σημείο της επιφάνειας που αποτελεί τμήμα ενός συνηθισμένου γεωμετρικού σχήματος δεν είναι κατ' ανάγκην μεγάλο πρόβλημα. Σε περιπτώσεις όπου η αποτύπωση πολύπλοκων επιφανειών είναι αναγκαία, τότε τα νέφη σημείων περιέχουν, συνήθως, θόρυβο. Ο θόρυβος παρουσιάζεται στο νέφος υπό την μορφή σημείων που ενώ θα έπρεπε να βρίσκονται πάνω στο ίδιο νοητό επίπεδο, αυτά αποκλίνουν προς τυχαίες διευθύνσεις γύρω από αυτό. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί δυσκολίες κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων αφού επιβάλουν την χρήση φίλτρων ομαλοποίησης (smoothing) και απλοποίησης (simplification). Στόχος των φίλτρων είναι να αφαιρέσουν το θόρυβο, να μειώσουν τον όγκο των δεδομένων, αλλά, ταυτόχρονα, να διατηρήσουν άθικτα τα περιθώρια των επιφανειών και τον όγκο του αντικειμένου.

Στην Εικόνα 21 παρουσιάζεται το τριγωνικό πλέγμα που δημιουργήθηκε από το μετασχηματισμό ενός νέφους σημείων. Το πολυγωνικό πλέγμα αναπαριστά τμήμα μιας *οινοχόης* που ψηφιοποιήθηκε με σαρωτή λέιζερ. Το βάθος πολλών σημείων υπολογίστηκε εσφαλμένα λόγω της ανακλαστικής επιφάνειας του αντικειμένου, της χρωματικής ποικιλίας που περιέχει η διακόσμηση του και του θορύβου από τη διάχυση της δέσμης.



Εικόνα 21: Θόρυβος σε νέφος σημείων και η μεταφορά του στο πολυγωνικό πλέγμα

Οι επιδόσεις του συγκεκριμένου συστήματος με βαθμονόμηση μεγαλύτερης ακρίβειας και μεταβλητή ρύθμιση της έντασης της δέσμης φωτός μπορούν να είναι καλύτερα αλλά στο συγκεκριμένο παράδειγμα εσκεμμένα οι ρυθμίσεις προκάλεσαν υψηλό θόρυβο, ώστε να γίνεται αισθητό το φαινόμενο της απόκλισης σημείων. Στην ίδια εικόνα προβάλλεται επίσης και τμήμα από το νέφος σημείων. Η κόκκινη γραμμή αναπαριστά το νοητό επίπεδο της επιφάνειας της οιοσχόης από την συγκεκριμένη οπτική γωνία. Τα σημεία που βρίσκονται έξω από αυτό το νοητό επίπεδο εμπεριέχουν θόρυβο. Κύρια πηγή θορύβου είναι η χρωματική πληροφορία της επιφάνειας του αντικειμένου η οποία επηρεάζει τις μετρήσεις του συστήματος που στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν βαθμονομημένο για την γεωμετρική αποτύπωση αντικειμένων που η επιφάνεια τους δεν φέρει χρωματικές μεταβολές. Χωρίς την χρήση αλγορίθμων ομαλοποίησης ο θόρυβος αυτός εμφανίζεται εντονότατα και στο τριγωνικό πλέγμα (αφού αυτό προήλθε από μετασχηματισμό του νέφος σημείων). Ανάλογα με το μετασχηματισμό που εφαρμόζεται ο θόρυβος γίνεται λιγότερο ή περισσότερο αισθητός. Πολλές φορές εμφανίζεται και με την μορφή γεωμετρικών ασυνεχειών στο πλέγμα.

4

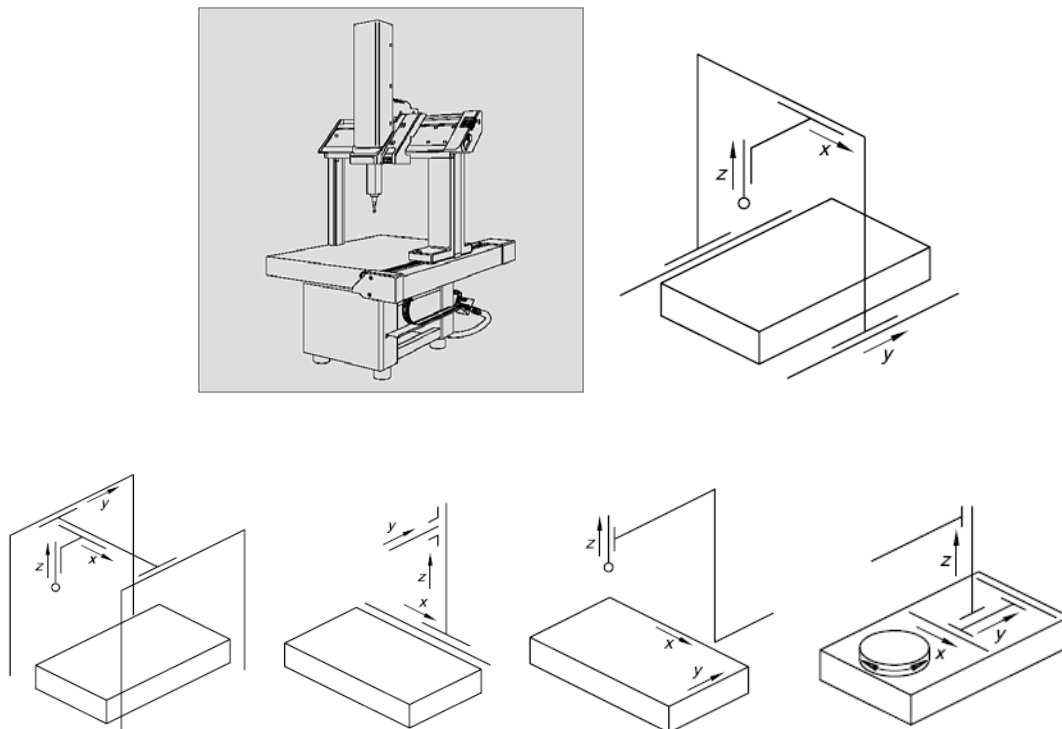
Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων

4.1 Βασικές αρχές των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων

Οι Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machines, CMM) μέσα από μια πορεία βελτίωσης και συνεχούς εξέλιξης, από την πρώτη τους εμφάνιση εδώ και πάνω από 40 χρόνια, έχουν ήδη διεθνώς καθιερωθεί ως το κατ'εξοχήν οικονομοτεχνικά κατάλληλο εργαλείο τόσο για τον ποιοτικό έλεγχο μορφής και διαστάσεων όσο και για τον Αντίστροφο Μηχανολογικό Σχεδιασμό (ΑΜΣ). Αποτελούν για τον κλάδο των μηχανολογικών κατασκευών ακριβείας ένα εργαλείο εξίσου απαραίτητο με τις μηχανές παραγωγής και τις εργαλειομηχανές. Επιγραμματικά, οι ΜΜΣ παρέχουν τις δυνατότητες για:

- Αξιόπιστη μέτρηση σε ολόκληρο το εύρος των προδιαγραφών γεωμετρικής ακρίβειας των κατασκευών (γεωμετρικών και διαστασιολογικών ανοχών)
- Ψηφιακή σάρωση και αποτύπωση σε περιβάλλον CAD ή/ και έλεγχο και αντιπαραβολή επιφανειών και γεωμετρίας εξαρτημάτων.

Καλύπτοντας ένα ευρύτατο πεδίο εφαρμογών όσον αφορά τα μεγέθη των ελεγχόμενων εξαρτημάτων, τις απαιτήσεις σε ακρίβεια, ταχύτητα, στιβαρότητα κλπ, οι σύγχρονες ΜΜΣ έχουν κάποια βασικά κοινά χαρακτηριστικά αλλά διαφέρουν ουσιαστικά σε πάρα πολλά σημεία. π.χ. στο μέγεθος και την «ακρίβειά» τους, στην κατασκευαστική τους διαμόρφωση (σταθερή ή κινούμενη τράπεζα ή/και γέφυρα, μονός, διπλός ή φορητός αρθρωτός βραχίονας κ.α.). Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται μια τυπική ΜΜΣ τύπου γέφυρας και δίνονται με μορφή διαγράμματος ορισμένοι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους κατασκευαστικών διαμορφώσεων ΜΜΣ που καταγράφονται στο πρότυπο ISO 10360-1. Ως βασικά κοινά «δομικά στοιχεία» όλων των τύπων ΜΜΣ εντοπίζονται τα παρακάτω:



Εικόνα 22: Τυπική ΜΜΣ και διαγραμματική απεικόνιση εναλλακτικής κατασκευαστικής διαμόρφωσης ΜΜΣ

1. Αισθητήρας λήψης συντεταγμένων των μετρούμενων σημείων (probe). Είναι η διάταξη που είναι υπεύθυνη για την καταγραφή των συντεταγμένων των επιθυμητών σημείων του ελεγχόμενου εξαρτήματος στο χώρο.
2. Υψηλής ακρίβειας μηχανολογική κατασκευή. Συγκροτείται από σύνολο ανεξάρτητων υποσυστημάτων (σταθερά και κινούμενα μηχανικά μέρη, σερβοκινητήρες, στοιχεία μετάδοσης κίνησης, οπτικές κλίμακες κ.α.) που είναι υπεύθυνα για τη μετακίνηση και την τοποθέτηση του αισθητήρα λήψης σημείων με υψηλή ακρίβεια κι επαναληψιμότητα στον τρισδιάστατο χώρο μέτρησης.
3. Ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης δεδομένων και αυτομάτου ελέγχου, (controller), υπεύθυνο για τον έλεγχο της δυναμικής συμπεριφοράς (ταχύτητα κίνησής, ταχύτητα μέτρησης, επιτάχυνση κ.α.) των κινούμενων μερών της ΜΜΣ και του αισθητήρα λήψης σημείων, για την υπολογιστική αντιστάθμιση των θερμοκρασιακών διαφορών από την θερμοκρασία αναφοράς των 20 Co και την αρχική επεξεργασία των συντεταγμένων των λαμβανόμενων σημείων.
4. Μετρητικό λογισμικό. Υπολογιστική πλατφόρμα μέσα από την οποία γίνεται η επικοινωνία της ΜΜΣ με τον χρήστη, δημιουργούνται τα προγράμματα μέτρησης, πραγματοποιείται η τελική επεξεργασία των συντεταγμένων των λαμβανόμενων σημείων και διαμορφώνονται οριστικά τα μετρητικά αποτελέσματα.

Η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και η αξιολόγηση των τεσσάρων αυτών «δομικών στοιχείων» μιας ΜΜΣ αποτελεί βασική προϋπόθεση τόσο για την ορθή επιλογή της σε σχέση με το συγκεκριμένο φάσμα μετρολογικών εφαρμογών που προορίζεται να καλύψει όσο και

για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρητικών της αποτελεσμάτων. Η κατηγοριοποίηση των διαθέσιμων τύπων ΜΜΣ γίνεται, σύμφωνα με τα παραπάνω, με βάση:

i. Την αρχή λειτουργίας του αισθητήρα λήψης σημείων: Μηχανικοί αισθητήρες συνεχούς ή σημειακής επαφής (contact probes) που καταγράφουν τις συντεταγμένες των σημείων ερχόμενοι σε επαφή με το μετρούμενο εξάρτημα, οπτικοί ή λέιζερ αισθητήρες μη-επαφής (non-contact probes) κ.α.

ii. Την κατασκευαστική διαμόρφωση και το μέγεθος του «ωφέλιμου χώρου μέτρησης» της μηχανής: Μεταξύ των πιο διαδεδομένων είναι οι μηχανές τύπου γέφυρας (bridge type) η οποία κινείται προσαρμοσμένη σε σταθερή τράπεζα, οι τύπου ικριώματος – γερανογέφυρας (gantry type), όπου η κίνηση γίνεται σε σταθερές οριζόντιες δοκούς στηριγμένες σε κάθετες στήλες, οι μονού ή διπλού οριζόντιου βραχίονα (single, dual horizontal arm) και οι φορητές χειροκίνητες μηχανές αρθρωτού βραχίονα (articulating arm). Ο ωφέλιμος χώρος μέτρησης μπορεί να είναι ένα παραλληλεπίπεδο με διαστάσεις που ξεκινούν από 500 x 500 x 400 mm και φτάνουν, σε ειδικές περιπτώσεις μέτρησης εξαρτημάτων μεγάλου μεγέθους, σε δεκάδες μέτρα.

iii. Τα χαρακτηριστικά του controller: Χειροκίνητες, ημιαυτόματες και ελεγχόμενες πλήρως από ηλεκτρονικό υπολογιστή (Direct Computer Control – DCC) μηχανές, σύστημα αντιστάθμισης θερμοκρασιακών μεταβολών σε πραγματικό χρόνο, δυνατότητα διαχείρισης δεδομένων από ψηφιακή σάρωση (scanning – ready) κ.α.

iv. Τα χαρακτηριστικά του μετρητικού λογισμικού: δυνατότητα εισαγωγής τρισδιάστατου ηλεκτρονικού μοντέλου (3D CAD model) του ελεγχόμενου εξαρτήματος και αυτοματοποίηση της παραγωγής των μετρητικών προγραμμάτων, ενσωμάτωση αλγόριθμών ψηφιακής σάρωσης, αυτοτελείς λογισμικές μονάδες (modules) για εξειδικευμένες μετρολογικές εφαρμογές π.χ. για έλεγχο οδοντωτών τροχών κ.α.

Από τη σύνθεση των παραπάνω συντελεστών προκύπτουν τελικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας ΜΜΣ όπως η μέγιστη ταχύτητα μέτρησης, το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος μετρούμενου εξαρτήματος κ.α.. Η ακρίβεια μέτρησης (*measuring accuracy*) εκφράζεται από τους κατασκευαστές ΜΜΣ με τις παραμέτρους ΜΡΕΕ (Maximum Permissible Size Error) και ΜΡΕΡ (Maximum Permissible Probing Error) όπως αυτές καθορίζονται στο διεθνές πρότυπο ISO 10360 – 2, [19]. Ωστόσο, το εν λόγω πρότυπο, [19], αφορά στην επαλήθευση επίδοσης των ΜΜΣ και δεν επιτρέπει να παράγονται άμεσα δηλώσεις σχετικά με την αβεβαιότητα των μετρήσεων.

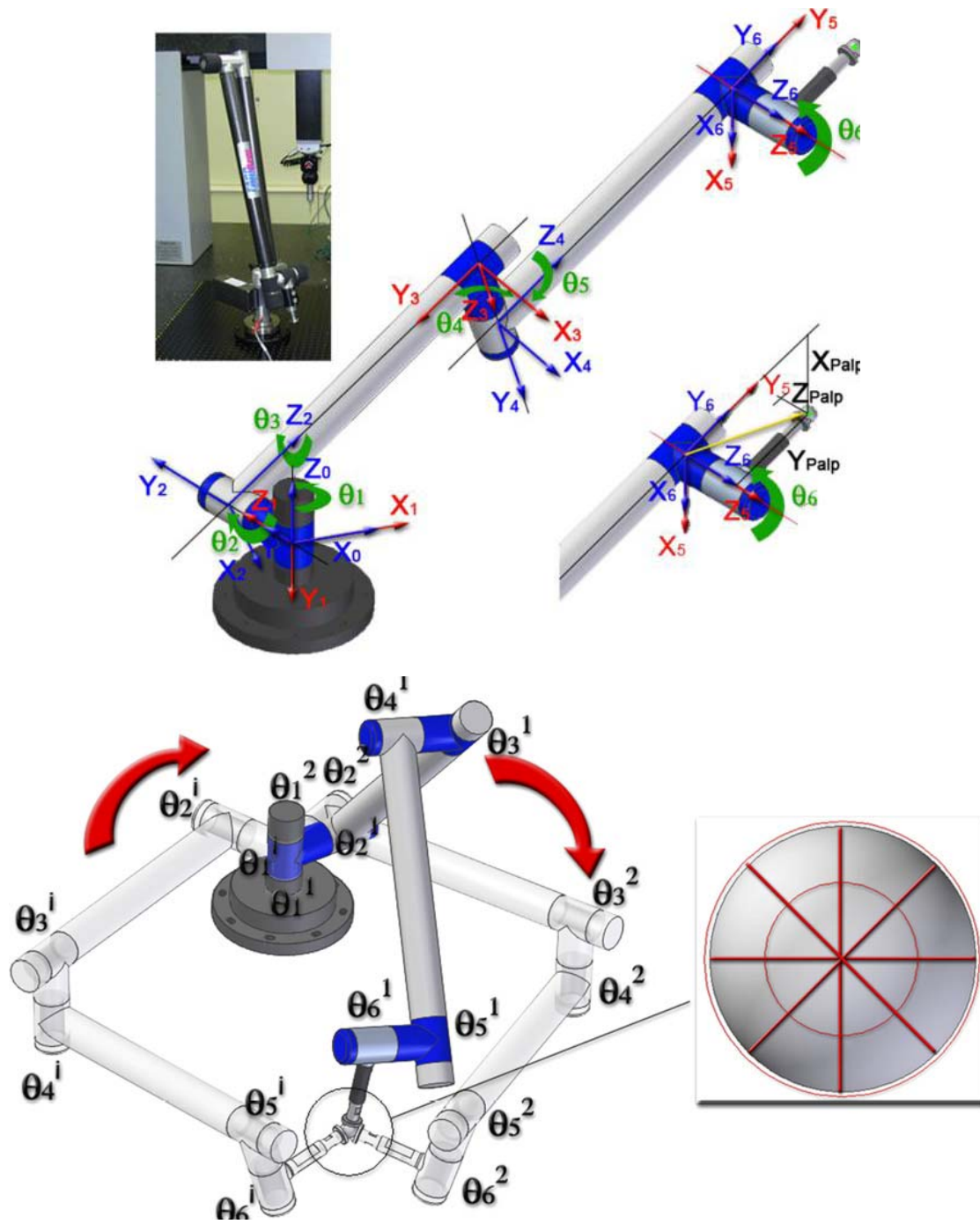
Οι εφαρμογές, τα οφέλη από τη χρήση, οι μετρητικές τεχνικές και το γενικότερο πλαίσιο των θεμάτων που αφορούν στις ΜΜΣ έχουν παρουσιαστεί σε γενικά και εξειδικευμένα τεχνικά εγχειρίδια και αποτελούν το αντικείμενο μεγάλου πλήθους ερευνητικών εργασιών. Παρά την ευρύτατη αποδοχή και διάδοση των ΜΜΣ, κάποια κρίσιμα ζητήματα εξακολουθούν να παραμένουν αδιευκρίνιστα. Ειδικότερα, τα ζητήματα αυτά αφορούν στον συνολικό προσδιορισμό της αβεβαιότητας, στις διαδικασίες βαθμονόμησης και στην αξιολόγηση των μετρητικών αποτελεσμάτων τους με βάση τα ισχύοντα εθνικά και διεθνή πρότυπα.

4.2 Οι ΜΜΣ τύπου Αρθρωτού Βραχίονα

Οι ΜΜΣ-ΑΒ έχουν ως βασικό τεχνικό χαρακτηριστικό την ύπαρξη ενός αρθρωτού βραχίονα, ο οποίος στερεώνεται σε σταθερή βάση και αποτελείται συνήθως από τρία στελέχη. Στην άκρη του τελευταίου στελέχους βρίσκεται ο αισθητήρας λήψης σημείων (π.χ. ακίδα επαφής), όμοια με αυτή που υπάρχει και στις ΜΜΣ τύπου γέφυρας. Ο αισθητήρας έρχεται σε επαφή με το μετρούμενο αντικείμενο και καταγράφει τις συντεταγμένες (X-Y-Z) των επιθυμητών σημείων στο χώρο. Ένας Η/Υ αναλαμβάνει να διαχειριστεί τα δεδομένα θέσης που συλλέγει από τους αισθητήρες που υπάρχουν στις αρθρώσεις της μηχανής, αποδίδοντας τελικά τη θέση του μετρούμενου σημείου στο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Οι έξι βαθμοί ελευθερίας προκύπτουν από τις γωνίες που σχηματίζουν οι αρθρώσεις, καθώς και από την περιστροφή των στελεχών του βραχίονα. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα προσαρμογής λέιζερ κάμερας στην άκρη του βραχίονα, με την βοήθεια της οποίας τα σημεία λαμβάνονται με την αρχή της τριγωνοποίησης, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3 της ΔΕ.



Εικόνα 23 ΜΜΣ τύπου αρθρωτού βραχίονα (ΑΒ) σε τρίποδα



Εικόνα 24 Βαθμοί ελευθερίας αρθρώσεων ΜΜΣ - ΑΒ

4.3 Εφαρμογές των ΜΜΣ-ΑΒ στον ποιοτικό έλεγχο και στον

ΑΜΣ

Οι ΜΜΣ-ΑΒ τα τελευταία χρόνια κερδίζουν διαρκώς έδαφος σε διάφορες περιοχές της βιομηχανικής μετρολογίας διαστάσεων και γεωμετρίας. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι συμβατικές ΜΜΣ πρακτικά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως κατά τη μέτρηση αντικειμένων πολύ μεγάλου μεγέθους που είτε δεν μπορούν να τοποθετηθούν στην σταθερή τράπεζα μιας ΜΜΣ, ή είναι πρακτικά αδύνατο τα μετακινηθούν από τον χώρο στον οποίο

είναι εγκατεστημένα (π.χ. μηχανοστάσιο πλοίου). Οι ΜΜΣ-ΑΒ δεν προσφέρουν, προς το παρόν, τα υψηλά επίπεδα ακρίβειας των συμβατικών ΜΜΣ, όμως μπορούν εύκολα να μεταφερθούν σε οποιονδήποτε χώρο απαιτείται, και μέσω της τεχνικής/ μεθόδου “leap frog”, όπου η μηχανή τοποθετείται σε διαδοχικές θέσεις στον χώρο οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω κοινών αναφορών (datums), να πραγματοποιήσουν μετρήσεις σε αντικείμενα πολύ μεγαλύτερα από την εργόσφαιρά τους.

Ένα βασικό μειονέκτημα των ΜΜΣ-ΑΒ είναι ότι όλες οι μετρήσεις γίνονται με την απαραίτητη συμβολή του χειριστή, σε αντίθεση με τις συμβατικές ΜΜΣ όπου παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός προγράμματος μετρήσεων τις οποίες η μηχανή αναλαμβάνει να εκτελέσει αυτοματοποιημένα. Παρόλαυτα, όταν πρόκειται για τον ποιοτικό έλεγχο ενός μοναδικού ή/και περιορισμένου πλήθους αντικειμένων, οι ΜΜΣ-ΑΒ πλεονεκτούν σε ευκολία χρήσης, καθώς ο χειροκίνητος χειρισμός υπερτερεί τελικά σε ευκολία από τη δημιουργία προγράμματος αυτοματοποιημένης μέτρησης.

5

Αβεβαιότητα ΜΜΣ

5.1 Εισαγωγή στην Ορολογία της Μετρολογίας

Η μέτρηση είναι μια από τις πλέον συνηθισμένες δραστηριότητες σε όλα τα επίπεδα της κοινωνικής και οικονομικής ζωής (εμπορικές συναλλαγές, βιομηχανικές μετρήσεις, έλεγχος προϊόντων και διεργασιών, εργαστηριακές μετρήσεις στις δοκιμές και στην έρευνα, ιατρικές και λοιπές εξετάσεις, περιβαλλοντικές μετρήσεις, κλπ.). Στις ανεπτυγμένες χώρες εκτιμάται ότι ένα ποσοστό 6-7% του ΑΕΠ τους αντιστοιχεί σε όλες τις παραπάνω δραστηριότητες μέτρησης [25].

Κάθε μέτρηση πραγματοποιείται με τη χρήση ενός μετρητικού οργάνου, μετρητικής διάταξης ή συσκευής προκειμένου να μετρηθεί ένα η περισσότερα χαρακτηριστικά ή ιδιότητες και να αποτυπωθούν οι αντίστοιχες ενδείξεις των μετρήσεων. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο είναι γεγονός ότι το αποτέλεσμα μιας μέτρησης μπορεί να παρουσιάζει μικρές ή μεγάλες αποκλίσεις από την πραγματική τιμή της ιδιότητας ή του μεγέθους που μετράται. Η **αβεβαιότητα** κατά συνέπεια μιας μέτρησης κρίνει την αξιοπιστία της και την εγγύτητα της στην πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους.

Οι συνέπειες μη αξιόπιστων μετρήσεων μπορεί να είναι μεγάλες ή μικρές, εμφανείς ή μη εμφανείς στις εμπορικές συναλλαγές, στην προστασία του καταναλωτή, στην ποιότητα των προϊόντων, στο κόστος παραγωγής, στην ασφάλεια και στην υγεία. Είναι ενδεικτικό ότι μια μικρή αβεβαιότητα ή απόκλιση της τάξης του 1 g σε ζυγίσεις μάζας 1 kg είναι αμελητέα σε επίπεδο μιας μεμονωμένης μέτρησης όσον αφορά στις οικονομικές επιπτώσεις για τους συναλλασσόμενους, αλλά σε ένα μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων τέτοιων μετρήσεων (π.χ. 100.000 μετρήσεων) οι οικονομικές συνέπειες μπορεί να είναι σημαντικές ως απόλυτη τιμή ανάλογα βέβαια και με το κόστος μονάδας του μεγέθους που μετράται (υλικό ή

ενέργεια). Κατά συνέπεια, το αποτέλεσμα κάθε μέτρησης έχει ένα βαθμό αβεβαιότητας και απόκλισης από την πραγματική τιμή.

Τα ερωτήματα που τίθενται πάντα είναι:

Ποιος είναι ο βαθμός αβεβαιότητας της μέτρησης;

Τι μπορεί να γίνει προκειμένου να μειωθεί η αβεβαιότητα ώστε η μέτρηση να είναι περισσότερο ακριβής, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι όποιες συνέπειες;

Η Μετρολογία είναι η επιστήμη που έχει ως αντικείμενο τη μέτρηση, τη μελέτη της αξιοπιστίας των μετρήσεων και την εφαρμογή των αρχών της στους τομείς της καθημερινής ζωής στις συναλλαγές, στη βιομηχανική παραγωγή, στο εργαστήριο, στον έλεγχο ποιότητας, στην ασφάλεια και στην υγεία. Η Μετρολογία διακρίνεται:

A) Στη Βιομηχανική ή Επιστημονική Μετρολογία, αντικείμενο της οποίας είναι:

Ο ορισμός και η υλοποίηση των βασικών μονάδων μέτρησης μέσω της ανάπτυξης και τήρησης των κατάλληλων προτύπων και διατάξεων.

Η μελέτη των παραγόντων εκείνων που επιδρούν και επηρεάζουν την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Η ανάπτυξη μεθόδων, τεχνικών, διατάξεων και συστημάτων μέτρησης, οι οποίες μπορούν να εξασφαλίζουν αξιόπιστα αποτελέσματα μετρήσεων.

Η ανάπτυξη των κατάλληλων μεθόδων διακρίβωσης μετρητικού εξοπλισμού, δηλαδή ο έλεγχος του με ένα άλλο κατάλληλο πρότυπο υψηλότερης ακρίβειας και ο υπολογισμός της αβεβαιότητας.

Η εφαρμογή της Βιομηχανικής ή Επιστημονικής Μετρολογίας επιβάλλεται από την ανάγκη ικανοποίησης προτύπων και προδιαγραφών, μείωσης του κόστους και βελτίωσης της ποιότητας. Η εφαρμογή της Βιομηχανικής ή Επιστημονικής Μετρολογίας συνίσταται ουσιαστικά στην εφαρμογή των απαραίτητων εκείνων διαδικασιών, μέσων και αρχών ώστε σε κάθε μέτρηση να γίνεται:

Χρήση κατάλληλου μετρητικού οργάνου και κατάλληλα ελεγχόμενου ως προς την μετρητική του αξιοπιστία, δηλ. κατάλληλα διακριβωμένου με ακριβή έκφραση της αβεβαιότητας.

Χρήση της κατάλληλης μεθόδου ή αρχής μέτρησης από τον κατάλληλο χρήστη ή χειριστή.

Κατάλληλη ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μέτρησης.

B) Στη Νομική Μετρολογία, αντικείμενο της οποίας είναι η θέσπιση και εφαρμογή υποχρεωτικών κανόνων, νόμων και κανονισμών με βάση κατάλληλη επιστημονική επεξεργασία και μελέτη ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία των συναλλαγών σε εγχώριο και διεθνές επίπεδο και η προστασία του καταναλωτή.

Όπως εξηγήθηκε και παραπάνω οι μετρήσεις δεν αποτελούν μόνον το μέσο προαγωγής της επιστημονικής έρευνας και των τεχνολογικών κατακτήσεων, αλλά επηρεάζουν επίσης βαθύτατα την ζωή κάθε πολίτη οποιασδήποτε αναπτυγμένης χώρας. Δεν είναι υπερβολή να ισχυριστεί κανείς ότι δεν υπάρχει έκφραση ή δραστηριότητα της σύγχρονης ζωής που να μην βασίζεται ή επηρεάζεται από τις μετρήσεις. “Ultimately everything is Metrology” [26], δηλαδή τελικά το κάθε τι γύρω μας εξαρτάται από την ικανότητά μας να πραγματοποιούμε ακριβείς μετρήσεις σε τομείς όπως οι εμπορικές συναλλαγές, η ποιότητα προϊόντων, οι μεταφορές και συγκοινωνία, η εκμετάλλευση φυσικών πόρων, οικονομία, δημόσια υγεία,

υγιεινή και ασφάλεια κλπ. Για να πραγματοποιηθούν όμως ακριβείς μετρήσεις θα πρέπει να έχουμε και **μετρητικά όργανα** τα οποία θα μας δίνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Τα όργανα μέτρησης και ελέγχου αποτελούν το σφυγμό κάθε επιχείρησης καθώς ελέγχουν και μετρούν την λειτουργία και απόδοση της παραγωγικής διαδικασίας. Ελέγχουν και εξασφαλίζουν την ποιότητα των προϊόντων και ως εκ τούτου επηρεάζουν άμεσα την ανταγωνιστικότητα της επιχείρησης.

Κάθε μετρητικό όργανο υπόκειται σε σφάλματα μέτρησης (τυχαία ή συστηματικά). Τα σφάλματα αυτά προκαλούνται από :

ατελές υλικό κατασκευής

ατελή κατασκευή του οργάνου από τον κατασκευαστή

αναπόφευκτες ιδιότητες των υλικών κατασκευής του οργάνου στις οποίες βασίζεται η λειτουργία του

συνθήκες χρήσης

συνθήκες αποθήκευσης κλπ

Ο περιοδικός και προγραμματισμένος έλεγχος του μετρολογικού εξοπλισμού μιας επιχείρησης ή εργαστηρίου έρευνας επιτυγχάνεται μέσω της **διακρίβωσης**, της διαδικασίας δηλ. κατά την οποία ελέγχεται και συγκρίνεται η ακρίβεια μιας συσκευής ή προτύπου, χρησιμοποιώντας ως μέσο σύγκρισης πρότυπες συσκευές ή και πρότυπα μεγαλύτερης ακρίβειας. Η διαδικασία της διακρίβωσης είναι αναγκαία, γιατί με αυτόν τον τρόπο:

διασφαλίζεται η σταθερή ποιότητα της παραγωγής, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε χρονική στιγμή η ποιότητα των προϊόντων να ικανοποιεί τις απαιτήσεις και προσδοκίες των πελατών

μειώνονται τα λειτουργικά έξοδα (εξαιτίας λιγότερων breakdowns κλπ)

μειώνεται ο αριθμός των εκτός προδιαγραφών παραγομένων προϊόντων

παράγονται αξιόπιστα αποτελέσματα μετρήσεων (στην περίπτωση πανεπιστημίων, εργαστηρίων ή κέντρων έρευνας)

τηρούνται οι αρχές των Συστημάτων Διασφάλισης Ποιότητας.

Τονίζεται ότι αποτελεί απαράβατο όρο εφαρμογής από μία επιχείρηση της δημοφιλούς σειράς των προτύπων διασφάλισης ποιότητας **ISO 9000**, η διακρίβωση των μετρητικών της οργάνων (άρθρο 4.11 σχετικού προτύπου). Εξάλλου όλες οι δοκιμές τύπου ή συμμόρφωσης προϊόντων (σήμανση πιστότητας CE κ.λ.π.), προϋποθέτουν την δυνατότητα πραγματοποίησης ακριβών μετρήσεων δηλ. την ύπαρξη διακριβωμένων μετρητικών προτύπων.

Αποτελεί ευρύτατα διαδεδομένη πλάνη, ακόμη και μεταξύ των έμπειρων χρηστών μετρητικών οργάνων, ότι η ανάγκη διακρίβωσης προκύπτει μόνο σαν αποτέλεσμα θέσπισης αυστηρών προδιαγραφών ακρίβειας ενός μετρητικού οργάνου. Ανεξάρτητα όμως αν η επιθυμητή ακρίβεια μέτρησής του είναι της τάξης 10^{-5} ppm ή μόνον 10%, η ακρίβεια και στις δύο περιπτώσεις πρέπει να κατοχυρωθεί και επιβεβαιωθεί μέσω της διακρίβωσης. Ενδεχομένως στην δεύτερη περίπτωση η διακρίβωση να είναι ευκολότερη ή φθηνότερη, λόγω χρησιμοποίησης μετρητικών προτύπων χαμηλότερης ακρίβειας, είναι όμως επιβεβλημένη.

Η πραγματοποίηση έγκυρων και αξιόπιστων διακριβώσεων λαμβάνει χώρα σε διαπιστευμένα (μόνον σύμφωνα με το πρότυπο **EN 45001**) εργαστήρια διακριβώσεων.

Για την κατάδειξη της σημασίας των μετρήσεων υψηλής ακρίβειας στις διακριβώσεις, περιγράφονται στη συνέχεια τα βασικά χαρακτηριστικά, αλλά και οι πρακτικές λειτουργίες ενός προτύπου εργαστηρίου Μετρολογίας/ Διακριβώσεων:

A. Εργαστηριακές συνθήκες: Αναφέρονται στην βασική υποδομή του εργαστηρίου που αποσκοπεί στην επίτευξη αυστηρότατου ελέγχου συνθηκών μετρήσεων (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, καθαρότητα αέρα, απόσβεση κραδασμών, ύπαρξη αντιστατικών δαπέδων κλπ

B. Χρήση κατάλληλων προτύπων αναφοράς: Πρόκειται όπως ήδη αναφέρθηκε για τα πρότυπα υψηλής ακρίβειας που χρησιμοποιεί το εργαστήριο για την πραγματοποίηση των διακριβώσεων. Η επιλογή των εκάστοτε χρησιμοποιούμενων προτύπων είναι κυρίως συνάρτηση της ακρίβειας μέτρησης του υπό διακρίβωση οργάνου. Αποτελεί βασικό κανόνα της Μετρολογίας ότι η ακρίβεια μέτρησης του χρησιμοποιούμενου προτύπου αναφοράς, πρέπει να είναι τουλάχιστον 3 φορές καλύτερη της (επιθυμητής) ακρίβειας του οργάνου που διακριβώνετε, ειδάλως, η τελευταία υποβαθμίζεται. Συνάγεται από τα προηγούμενα ότι δεν είναι δυνατή π.χ. η διακρίβωση μιας μετροταινίας με άλλη της ίδιας ακρίβειας μέτρησης (διότι εκτός των άλλων στο συγκεκριμένο παράδειγμα λείπει το κατάλληλο μέσο μεταφοράς της ακρίβειας).

Γ. Επιλογή κατάλληλης μεθόδου διακρίβωσης: Πρέπει πάντοτε να επιλέγεται μέθοδος η οποία θα είναι προτεινόμενη από τους διεθνείς οργανισμούς διακρίβωσης ή σε διαφορετική περίπτωση να ακολουθούνται βήμα προς βήμα διαδικασίες, κανονισμοί και μετρήσεις με πρότυπα υλικά τα οποία θα πρέπει να είναι **ιχνηλάσιμα** σε σχέση με εθνικά ή διεθνή πρότυπα.

Δ. Συσχετισμός ακρίβειας μετρήσεων ή ιχνηλασιμότητα (traceability): Έχει ειπωθεί ότι η διακρίβωση χρησιμοποιείται για να καθοριστεί, μέσα σε προκαθορισμένα όρια ακρίβειας, κατά πόσο το αποτέλεσμα μέτρησης ενός οργάνου αποκλίνει από γνωστή τιμή ενός υψηλότερου μετρολογικά προτύπου. Το τελευταίο πρέπει να είναι συσχετισμένο, μέσω άλλων προτύπων υψηλότερης ακρίβειας, με τα εθνικά ή διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα μέσω μιας αδιάσπαστης αλυσίδας συγκρίσεων (δηλ. διακριβώσεων). Αποτελεί βασική προϋπόθεση για την πραγματοποίηση αξιόπιστων διακριβώσεων, η διατήρηση εκ μέρους του εργαστηρίου που τις πραγματοποιεί, του συσχετισμού ακρίβειας εντός του χώρου ευθύνης του. Για την επίτευξη του στόχου αυτού δεν αρκεί, όπως εσφαλμένα ίσως πιστεύεται, μόνον η χρησιμοποίηση διακριβωμένων προτύπων, αλλά και η αξιόπιστη πραγματοποίηση της διακρίβωσης, δηλ. αποδεδειγμένη - μόνον μέσω της διαπίστευσης κατά EN 45001 - τεχνική επάρκεια, που αναφέρεται στο σύνολο των απαιτήσεων που αναφέρονται. Σημειώνεται ότι ύπαρξη “συσχετισμένων” προτύπων (traceable standards) δεν εξασφαλίζει οπωσδήποτε την πραγματοποίηση “συσχετισμένων” διακριβώσεων (traceable calibrations).

Ε. Υπολογισμός αβεβαιοτήτων (uncertainties): Όλες οι μετρήσεις, ανεξάρτητα από το πόσα καλά έχουν σχεδιαστεί και εκτελεστεί, υπόκεινται σε σφάλμα. Με τον επιστημονικά και μετρολογικά ορθό όρο αβεβαιότητα αναφερόμαστε, στην εκτίμηση μιας περιοχής τιμών, συνήθως γύρω από την μετρούμενη τιμή, η οποία - με μία πιθανότητα, π.χ. 95%, ή 99% - περιέχει την “αληθινή” τιμή του μετρούμενου μεγέθους.

Ο υπολογισμός της συνολικής αβεβαιότητας διακρίβωσης αποτελεί το πλέον ίσως επίπονο και εξειδικευμένο στάδιο της διακρίβωσης, που προϋποθέτει:

την λεπτομερή καταγραφή όλων των δυνατών ανεξάρτητων πηγών αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στην διαδικασία της διακρίβωσης

τον υπολογισμό της τιμής τους

τον χαρακτηρισμό της κατανομής τους

τον συνδυασμό τους - σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες - σε μία τελική τιμή αβεβαιότητας εκφρασμένης στο επιθυμητό διάστημα εμπιστοσύνης

Κάθε αξιόπιστο εργαστήριο διακρίβωσης οφείλει να περιλαμβάνει στα πιστοποιητικά που εκδίδει το μέγεθος αυτό. Το αποτέλεσμα μιας διακρίβωσης που δεν περιλαμβάνει εκτίμηση της αβεβαιότητας δεν έχει κανένα νόημα και είναι αναξιόπιστο. Η έκδοση “ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements” επαναπροσδιορίζει την αβεβαιότητα σαν το ισοδύναμο της τυπικής απόκλισης και υποδεικνύει τον χωρισμό των αβεβαιοτήτων σε δύο κατηγορίες ενώ αποτελεί το βασικό κείμενο υπολογισμού των αβεβαιοτήτων [4].

ΣΤ. Τεχνική επάρκεια εμπλεκόμενου προσωπικού: Είναι σαφές ότι η άγνοια ή η έλλειψη εμπειρίας του εμπλεκόμενου σε θέματα διακρίβωσης προσωπικού επηρεάζει αρνητικά την αξιοπιστία των διακρίβωσης. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι τα πρότυπα (SPRTs) υλοποίησης της Πρότυπης Θερμοδυναμικής Κλίμακας Θερμοκρασίας (ITS-90) είναι δυνατόν να αποδιακριβωθούν και μόνον από την απλή επαφή τους με τον πάγκο του εργαστηρίου. Κατά συνέπεια, άγνοια της ιδιαιτερότητας αυτής δημιουργεί προϋποθέσεις *ασυνέχειας* της αλυσίδας του συσχετισμού ακρίβειας που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Ζ. Διαπίστευση (Accreditation) κατά EN 45001: Η απόλυτη και μοναδική απόδειξη της τεχνικής επάρκειας (δηλαδή αξιοπιστίας) ενός εργαστηρίου διακρίβωσης και δοκιμών είναι η διαπίστευσή του σύμφωνα με το εξειδικευμένο πρότυπο EN 45001 - και όχι η πιστοποίησή του κατά τα πρότυπα της σειράς ISO 9000. Η διαφορά μεταξύ των δύο προτύπων είναι ότι ενώ το EN 45001 εμπεριέχει όλες τις σχετικές παραγράφους της σειράς των προτύπων ISO 9000, που αφορούν την διασφάλιση του συστήματος ποιότητας του εργαστηρίου, όταν λειτουργεί σαν προμηθευτής παροχής υπηρεσιών διακρίβωσης και δοκιμών, στο πεδίο για το οποίο έχει διαπιστευτεί, το αντίστροφο δεν ισχύει. Στα πρότυπα της σειράς ISO 9000 δεν προβλέπεται η κατοχύρωση των τεχνικών απαιτήσεων των εδαφίων Α-ΣΤ που προαναφέρθηκαν.

5.2 Διασαφήνιση των όρων ακρίβεια, ανοχή, πιστότητα,

σφάλμα και αβεβαιότητα μέτρησης

Όπως αναφέραμε και πριν το ουσιαστικότερο αντικείμενο της Μετρολογίας είναι οι μέθοδοι και η τέχνη στη μέτρηση φυσικών ποσοτήτων. Υποτίθεται ότι υπάρχει μια αληθινή τιμή για κάθε φυσική ποσότητα και η μετρητική διαδικασία είναι μια προσπάθεια προσεγγιστικού χαρακτήρα για την αποκάλυψη της. Αναμένεται, λοιπόν, να υπάρχει οπωσδήποτε κάποια διαφορά μεταξύ αληθινής τιμής και της αντίστοιχης μετρούμενης. Οι όροι ακρίβεια, πιστότητα, ανοχή, αβεβαιότητα και σφάλμα, χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν, από διαφορετική πλευρά ο καθένας, την σχέση μεταξύ της μετρούμενης τιμής και της αντίστοιχης αληθινής. Στην περίπτωση της ανοχής αναφερόμαστε στην απαίτηση, το αποτέλεσμα μιας μέτρησης να βρίσκεται ανάμεσα σε προκαθορισμένα όρια.

Με την ακρίβεια μιας μέτρησης καθορίζεται το πόσο κοντά βρίσκεται το αποτέλεσμα της μέτρησης σε σχέση με την αληθινή τιμή. Για παράδειγμα σε τόπο όπου η επιτάχυνση βαρύτητας θεωρείται ότι έχει τιμή $g = 9.80 \text{ m/sec}^2$, η ακρίβεια της μέτρησης προσδιορίζεται από το πόσο κοντά είναι προς την τιμή αυτή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε πειράματα ερευνητικού χαρακτήρα ο προσδιορισμός της ακρίβειας ενός αποτελέσματος είναι ιδιαίτερα δύσκολος στο μέτρο που η αληθινή τιμή της μετρούμενης ποσότητας δεν είναι ακόμα γνωστή. Στην Ελληνική βιβλιογραφία σαν δόκιμος όρος χρησιμοποιείται αντί της ακρίβειας (accuracy) η λέξη **ορθότητα** [27] και ορίζεται ως ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ της τιμής που μετριέται κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής και της πραγματικής τιμής της μετρούμενης ποσότητας.

Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι η ορθότητα, αν και δίνει την δυνατότητα να εκτιμηθεί το διάστημα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή του μετρούμενου μεγέθους, δεν παρέχει καμία πληροφορία σχετικά με το ποια είναι η πιθανότητα να βρεθεί η αληθής τιμή σε μια συγκεκριμένη περιοχή του διαστήματος αυτού. Στην πραγματικότητα ο όρος ορθότητα χαρακτηρίζει καταρχήν και κατά κύριο λόγο τη μετρολογική ποιότητα του οργάνου και όχι την ποιότητα μιας συγκεκριμένης μέτρησης, η οποία δίδεται από την αβεβαιότητα της μέτρησης αυτής.

Η **ανοχή** (tolerance) ως έννοια, αν και συνήθως δεν αποτελεί χαρακτηριστικό μιας μετρητικής διάταξης, συνδέεται άμεσα με την ορθότητα και αναφέρεται εδώ επειδή οι απαιτήσεις ορθότητας προδιαγράφονται μερικές φορές με όρους ανοχής. Όταν χρησιμοποιείται σωστά, η ανοχή ορίζει το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα στην τιμή μιας μέτρησης ή ακόμα τη μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση ενός μεγέθους από μια προδιαγεγραμμένη τιμή. Για παράδειγμα, η τιμή μιας ηλεκτρικής αντίστασης 100Ω τυχαία επιλεγμένης από μια παρτίδα χαρακτηριζόμενη από ανοχή 1%, αναμένεται να είναι μεταξύ 99Ω και 101Ω .

Η διαφορά ανάμεσα στην ορθότητα και την ανοχή, όταν υπάρχει, εντοπίζεται κυρίως στην αυστηρότητα με την οποία εφαρμόζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση. Η αυστηρότητα αυτή είναι θεωρητικά απόλυτη στην περίπτωση της ορθότητας, όπως αυτή εκλαμβάνεται από τη μετρολογική κοινότητα. Η ανοχή αντίθετα δεν είναι πάντα βέβαιο ότι εκφράζει μια σιγουριά 100% για το διάστημα που περιέχει την αληθή τιμή, δεδομένου ότι αποτελεί έννοια που μας έρχεται από τη βιομηχανία, η οποία την όρισε κατά καιρούς και κατά κλάδους με διαφορετικό τρόπο.

Η **πιστότητα** ή αξιοπιστία (precision) όμως μιας μέτρησης, αναφέρεται στον αριθμό των σημαντικών ψηφίων που υπάρχουν στο αποτέλεσμα, όπως επίσης και στο βαθμό επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων. Όταν η ίδια πειραματική μέτρηση γίνεται επαναληπτικά αρκετές φορές, η μέση τιμή αυτών των μετρήσεων θεωρείται ως η προσεγγιστικότερη τιμή προς την άγνωστη αληθινή τιμή του μεγέθους. Όσο μικρότερη είναι η διακύμανση των επί μέρους μετρήσεων σε σχέση με τη μέση τιμή τόσο μεγαλύτερη πιστότητα διαθέτει η μέτρηση.

Παράλληλα η πιστότητα είναι μια συχνά παρεξηγημένη έννοια, κυρίως εξαιτίας της σύγχυσης που προκαλείται από τη λαθεμένη της συσχέτιση με την ορθότητα μιας μέτρησης. Δεν είναι τυχαίο ότι στο VIM(Διεθνές Λεξικό Βασικών και Γενικών Όρων Μετρολογίας) [28] δεν αναφέρει τη λέξη "precision", πιθανά λόγω των διαφορετικών νοημάτων που έχουν κατά καιρούς αποδοθεί σε αυτήν. Στην πράξη, η πιστότητα αποτελεί κυρίως χαρακτηριστικό ενός οργάνου ή μιας μεθόδου μέτρησης και όχι του αποτελέσματος αυτού καθαυτού.

Η πιστότητα είναι ένας όρος ο οποίος στη γενική του χρήση περιγράφει ποιοτικά και όχι ποσοτικά τη διασπορά των ενδείξεων ενός οργάνου ή των αποτελεσμάτων μιας διαδικασίας μέτρησης για το ίδιο μετρούμενο μέγεθος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Με άλλα λόγια η πιστότητα περιγράφει τους βαθμούς ελευθερίας μιας διάταξης ή διαδικασίας μέτρησης από τα τυχαία σφάλματα, δηλαδή το πόσο επηρεάζεται το τελικό αποτέλεσμα από τα σφάλματα αυτά. Ένα όργανο υψηλής (ή μεγάλης) πιστότητας θα δώσει για το ίδιο μετρούμενο μέγεθος μικρή διασπορά αποτελεσμάτων σε αντίθεση με ένα όργανο χαμηλής πιστότητας, η χρήση του οποίου θα οδηγήσει σε μεγάλη διασπορά τιμών. Συνοπτικά μπορούμε να ορίσουμε την πιστότητα ως την εγγύτητα μεταξύ των ανεξάρτητων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μιας δοκιμής, που έγιναν υπό ίδιες ή διαφορετικές συνθήκες.

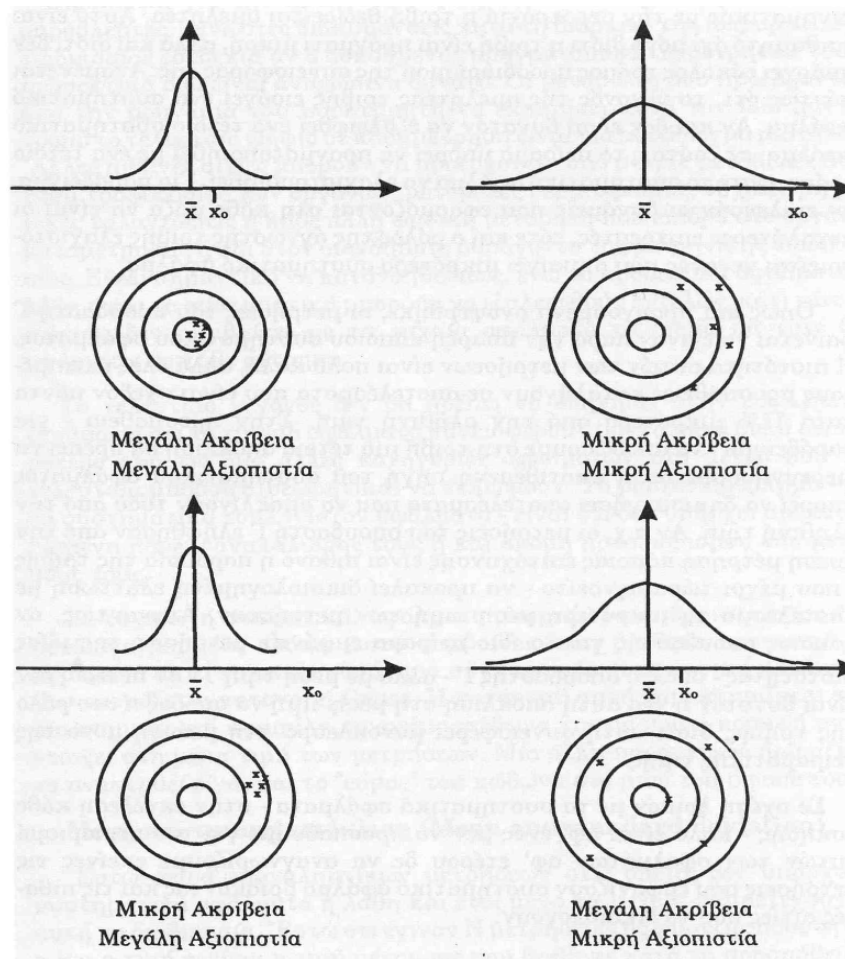
Οι όροι **επαναληψιμότητα** και **αναπαραγωγιμότητα** (repeatability και reproducibility) έχουν περίπου το ίδιο περιεχόμενο με τον όρο πιστότητα αλλά βρίσκουν εφαρμογή σε συγκεκριμένες συνθήκες όπου, σε αντίθεση με την πιστότητα, περιγράφουν ποσοτικά τη διασπορά των ενδείξεων ενός οργάνου ή των αποτελεσμάτων μιας διαδικασίας μέτρησης.

Η επαναληψιμότητα ή πιστότητα επαναληψιμότητας, εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση, περιγράφει την εγγύτητα των αποτελεσμάτων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, όταν εφαρμόζεται για μια σύντομη χρονική περίοδο η ίδια τιμή στην είσοδο του οργάνου (ίδιο μετρούμενο μέγεθος), διατηρώντας ταυτόχρονα σταθερές τις συνθήκες μέτρησης.

Η αναπαραγωγιμότητα ή πιστότητα αναπαραγωγιμότητας, εκφραζόμενη επίσης ως τυπική απόκλιση, περιγράφει την εγγύτητα των ενδείξεων για το ίδιο μετρούμενο μέγεθος, αλλά με διαφορετικά όργανα ή με μεταβολές στις συνθήκες μέτρησης.

Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ο ISO έχει απαγορεύσει διακριτικά την χρήση του όρου precision για την περιγραφή μιας μέτρησης λόγω των πολλών συγχύσεων στην έννοια του.

Η σχέση αξιοπιστίας (πιστότητας) και ακρίβειας (ορθότητας), απεικονίζεται ενδεικτικά στο παρακάτω σχήμα, θεωρώντας ότι οι μετρήσεις ακολουθούν μια κανονική κατανομή:



Εικόνα 25: Σχέση Αξιοπιστίας – Ακρίβειας

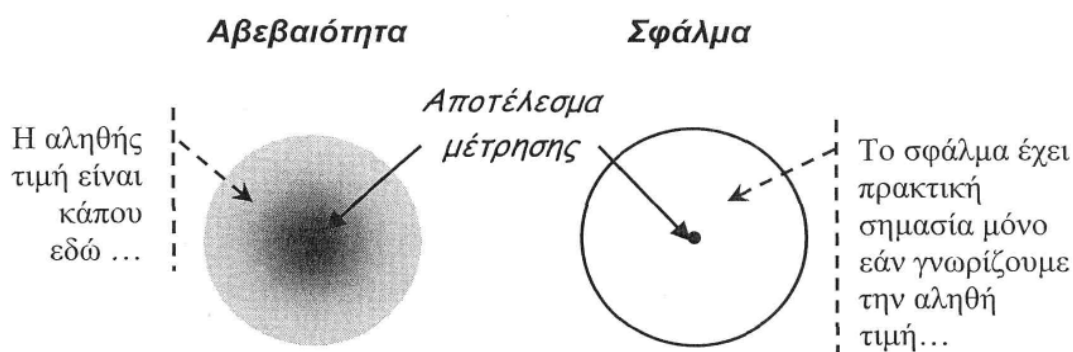
Η έννοια της **αβεβαιότητας** (uncertainty) είναι σχετικά πρόσφατη στην ιστορία της μετρολογίας, αντίθετα με την έννοια του σφάλματος η οποία χρησιμοποιήθηκε επί μακρόν για να χαρακτηρίσει την απόκλιση μιας μέτρησης από την αληθή τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Όπως και στην περίπτωση της σύγχυσης γύρω από τις έννοιες της πιστότητας-αξιοπιστίας και της ορθότητας-ακρίβειας, που εξετάστηκαν προηγουμένως, έτσι και η αβεβαιότητα συγχέεται συχνά με το σφάλμα.

Σύμφωνα με τον VIM [28], το σφάλμα ορίζεται ως "...η διαφορά ανάμεσα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης και μια αληθή τιμή του μετρούμενου μεγέθους...". Η αληθής τιμή ορίζεται με τη σειρά της ως μια τιμή σύμφωνη με τον ορισμό του μετρούμενου μεγέθους. Αξίζει να σημειωθεί, ότι με τη λέξη "αληθής" χρησιμοποιείται το αόριστο άρθρο "μία" και όχι "η" (στα αγγλικά "a" αντί για "the") για να τονιστεί ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότερες από μία τιμές συμβατές με τον ορισμό του μετρούμενου μεγέθους και ότι δεν μπορούμε να ξέρουμε ποια είναι η αληθής τιμή. Για παράδειγμα, υφίστανται πολλές αληθείς τιμές για το μέγεθος "διάμετρος του νομίσματος του 1 €", τιμές που δεν μπορούμε να γνωρίζουμε εντελώς.

Δεν μπορούμε λοιπόν ποτέ να αναφερόμαστε στην πραγματική ή αληθή τιμή φυσικού μεγέθους; θεωρητικά, η αληθής τιμή θα μπορούσε να είναι το αποτέλεσμα μόνο μιας τέλει ιδεατής μέτρησης, για πρακτικούς όμως λόγους το αποτέλεσμα μιας μέτρησης χαρακτηριζόμενης από αμελητέα αβεβαιότητα λαμβάνεται συχνά ως η πραγματική τιμή και αναφέρεται ως "συμβατική αληθής τιμή". Εξυπακούεται ότι το πόσο μικρή πρέπει να είναι

μια αβεβαιότητα για να θεωρείται αμελητέα εξαρτάται από τις συνθήκες χρήσης. Μια αβεβαιότητα 5 g για ένα βάρος 1 kg είναι αμελητέα για τον κρεοπώλη που προαναφέρθηκε, αλλά πολύ σημαντική για μια ζύγιση πολύτιμων μετάλλων από ένα χρυσοχόο!

Γενικά, το σφάλμα είναι μια εξ ορισμού μη προσδιορίσιμη αφηρημένη έννοια που αντιπροσωπεύει τη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη και την αληθή αλλά άγνωστη τιμή ενός μεγέθους. Πρέπει επομένως να διαφοροποιείται προσεκτικά από την αβεβαιότητα, η οποία αποτελεί, όπως προαναφέρθηκε, ένα ποσοτικό μέτρο της ποιότητας των γνώσεων που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Ίσως η σύγχυση οφείλεται στο γεγονός ότι είναι δυνατόν, με τη χρησιμοποίηση των κατάλληλων τεχνικών (για παράδειγμα τη διακρίβωση), να διορθωθεί ένα μέρος του σφάλματος.



Εικόνα 26: Σχέση Αβεβαιότητας – Σφάλματος

Το σφάλμα αποτελεί μια αφηρημένη έννοια σχετική με ένα σημείο, ενώ η αβεβαιότητα περιγράφει ένα εύρος τιμών. Στην πραγματικότητα το μόνο σφάλμα που μπορούμε να γνωρίζουμε ποσοτικά είναι αυτό που μπορούμε να διορθώσουμε και το οποίο κατά συνέπεια, μετά τη διόρθωση αυτή, παύει να υπάρχει!

Σε αντιδιαστολή με τον αφηρημένο χαρακτήρα του σφάλματος, η αβεβαιότητα (uncertainty) ορίζεται πρακτικά και συγκεκριμένα ως:

«παράμετρος συνδεδεμένη με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσε εύλογα να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος» στο ISO GUM. Και παρόμοια στο VIM [28] ως : «παράμετρος που συνδέεται με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσαν εύλογα να αποδοθούν στο μετρούμενο μέγεθος. Η αβεβαιότητα περιλαμβάνει γενικά πολλά συστατικά που μπορούν να αξιολογηθούν από τις πειραματικές σταθερές αποκλίσεις που βασίζονται στις επαναλαμβανόμενες παρατηρήσεις (αξιολόγηση αβεβαιότητας τύπων A) ή από τις σταθερές αποκλίσεις που αξιολογούνται από τις υποτιθέμενες διανομές πιθανότητας βασισμένες στην εμπειρία ή άλλες πληροφορίες (αξιολόγηση αβεβαιότητας τύπων B). Η αβεβαιότητα προτιμάται ως όρος από το σφάλμα μέτρησης επειδή αυτό δεν μπορεί να γίνει ποτέ γνωστό.»

Αποδίδονται, με άλλα λόγια, στο αποτέλεσμα της παρατήρησης, στην περίπτωση μας της μέτρησης, στοιχεία εγγενούς μεταβλητότητας, τα οποία ξεφεύγουν από τον έλεγχο του παρατηρητή. Η μετατόπιση από την έννοια του σφάλματος σε αυτήν της αβεβαιότητας, ως βασική θεώρηση για το χαρακτηρισμό της ποιότητας της μέτρησης, συνδέεται έτσι με μια σημαντική αλλαγή στη μεθοδολογική προσέγγιση του ζητήματος αυτού.

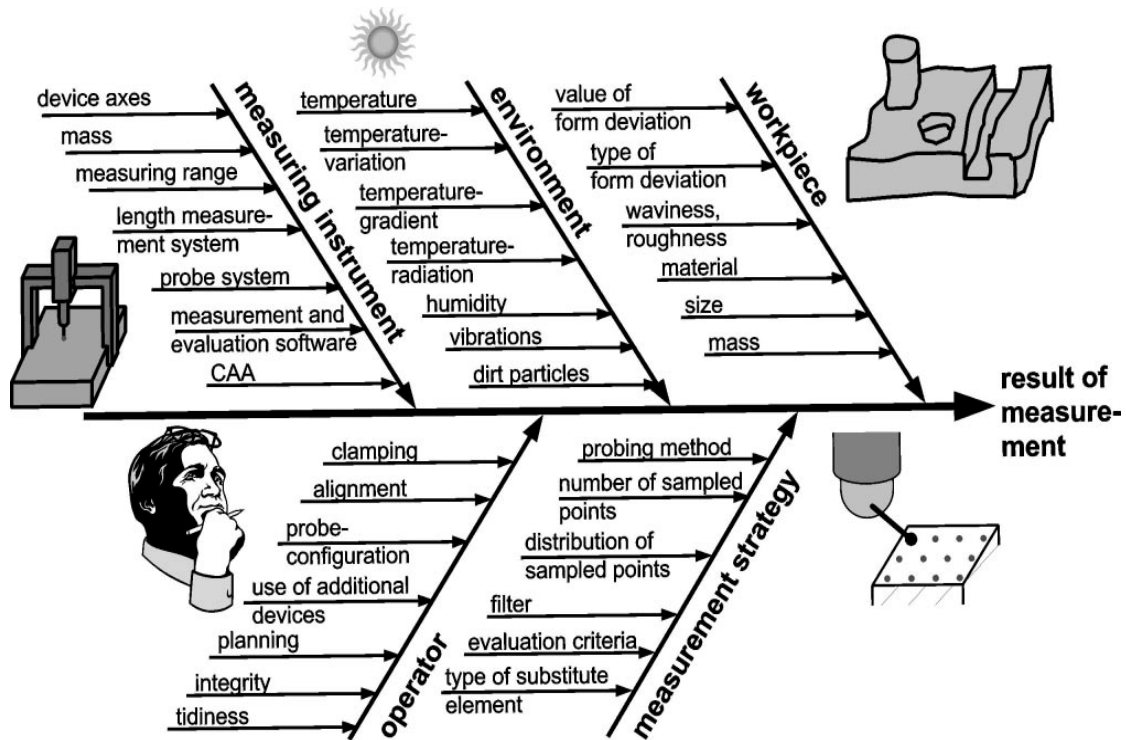
Η πληροφορία επομένως που διαθέτουμε για το αποτέλεσμα μιας μέτρησης αφορά όχι μόνο στην εκτιμώμενη καλύτερη προσέγγιση της τιμής του μετρούμενου μεγέθους, αλλά και στη διασπορά των πιθανών λογικών τιμών που το μέγεθος αυτό θα μπορούσε έχει, με επίγνωση της αδυναμίας να εντοπιστεί η μία και μοναδική αληθής τιμή.

Συμπερασματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι, με τον τρόπο αυτό, δίνουμε μια κάπως θολή αλλά ρεαλιστική εικόνα για την τιμή του μετρούμενου μεγέθους, αξιοποιώντας το σύνολο της διαθέσιμης πληροφόρησης. Αναφερόμαστε, στην εκτίμηση μιας περιοχής τιμών, συνήθως γύρω από την μετρούμενη τιμή, η οποία - με μία πιθανότητα, π.χ. 95%, ή 99% - περιέχει την “αληθινή” τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η αβεβαιότητα κατά συνέπεια μιας μέτρησης κρίνει και την αξιοπιστία αλλά και την εγγύτητα της στην πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους, δηλαδή μας δίνει ποσοτική αλλά και ποιοτική περιγραφή, που σημαίνει πως η έννοια της συμπεριλαμβάνει το νόημα των όρων, αξιοπιστία-πιστότητα και ακρίβεια-ορθότητα.

5.3 Πηγές αβεβαιότητας στη μέτρηση

Η αβεβαιότητα ενός αποτελέσματος μέτρησης αντανακλά την έλλειψη πλήρους γνώσης της τιμής του μετρητού μεγέθους και αυτό συμβαίνει είτε λόγω έλλειψης πληροφοριών, είτε γιατί το αποτέλεσμα της μέτρησης μιας ποσότητας υπόκειται σε πολλών ειδών σφάλματα. Η πλήρης γνώση απαιτεί μία άπειρη ποσότητα πληροφοριών. Τα φαινόμενα τα οποία συμβάλλουν στην αβεβαιότητα και κατ'αυτόν τον τρόπο στο γεγονός ότι το αποτέλεσμα μίας μέτρησης δεν μπορεί να χαρακτηριστεί από μία μοναδική τιμή, ονομάζονται πηγές αβεβαιότητας. Στην πράξη, υπάρχουν πολλές δυνατές πηγές αβεβαιότητας σε μία μέτρηση, οι οποίες περιλαμβάνουν :

- (α) ελλιπή ορισμό του μετρητού μεγέθους
- (β) ατελή πραγματοποίηση του ορισμού του μετρητού μεγέθους
- (γ) μη αντιπροσωπευτική δειγματοληψία - το δείγμα το οποίο μετρήθηκε είναι δυνατόν να μην αντιπροσωπεύει το ορισθέν μετρητό μέγεθος.
- (δ) ατελώς γνωστές επιδράσεις περιβαλλοντικών συνθηκών ή ατελείς μετρήσεις αυτών των επιδράσεων.
- (ε) σφάλμα ανάγνωσης αναλογικών οργάνων οφειλόμενο στον χρήστη
- (στ) πεπερασμένη διακριτότητα του οργάνου ή πεπερασμένο κατώφλι διάκρισης.
- (ζ) ανακριβείς τιμές των μετρητικών προτύπων και των υλικών αναφοράς
- (η) ανακριβείς τιμές των σταθερών καθώς και άλλων παραμέτρων λαμβανομένων από εξωτερικές πηγές και χρησιμοποιούμενων στον αλγόριθμο αναγωγής των δεδομένων
- (θ) προσεγγίσεις και παραδοχές οι οποίες ενσωματώνονται στην μετρητική μέθοδο και στην μετρητική διαδικασία
- (ι) μεταβολές σε επαναλαμβανόμενες παρατηρήσεις του μετρητού μεγέθους υπό, φαινομενικώς, ταυτόσημες συνθήκες
- (κ) Οι πηγές αυτές δεν είναι κατ' ανάγκη ανεξάρτητες. Ορισμένες από τις πηγές (α) έως(θ) είναι δυνατόν να συμβάλλουν στην (ι).



Εικόνα 27: Παράγοντες που επιδρούν στην αβεβαιότητα μετρητικών αποτελεσμάτων ΜΜΣ [4]

5.4 ISO – GUM: Οδηγός Εκτίμησης της Αβεβαιότητας στις Μετρήσεις

Η μεθοδολογία εκτίμησης των αβεβαιοτήτων στις μετρήσεις, ειδικότερα από τη στοχαστική σκοπιά, ήταν για ένα μεγάλο διάστημα αντικείμενο διαμάχης. Μόνο τα τελευταία χρόνια έγινε μια συστηματική προσπάθεια σύγκλισης των απόψεων σε διεθνές επίπεδο γύρω από το ζήτημα αυτό, προσπάθεια που κατέληξε το 1995 στη δημοσίευση από τον ISO και άλλους 7 διεθνείς οργανισμούς του *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (εν συντομία GUM).

Η προσέγγιση του GUM βασίστηκε σε μια σειρά συστάσεις του CIPM (Comite International des Poids et Mesures). Οι βασικές ιδέες των συστάσεων αυτών μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα :

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: οι αβεβαιότητες Τύπου Α, που υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους και οι αβεβαιότητες Τύπου Β, που υπολογίζονται με άλλα μέσα. Η κατηγοριοποίηση αυτή δεν αντιστοιχεί στη διάκριση μεταξύ "τυχαίων" και "συστηματικών" αβεβαιοτήτων, εννοιών που προκαλούν παρανοήσεις και πρέπει να αποφεύγονται.

Οι συνιστώσες Τύπου Α προκύπτουν από την (υπολογιζόμενη ή εκτιμούμενη) μεταβλητότητα (variance) ή την τυπική απόκλιση (standard deviation) και τους βαθμούς ελευθερίας του

αποτελέσματος. Η γνώση της συμμεταβλητότητας (covariance) είναι επίσης συχνά απαραίτητη, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

Οι συνιστώσες Τύπου Β, παρά το ότι δεν προκύπτουν απευθείας από κάποια στατιστική επεξεργασία, οφείλουν να παρουσιάζονται με όρους τυπικής αβεβαιότητας. Η τυπική αυτή αβεβαιότητα (το τετράγωνο της) μπορεί να θεωρηθεί ως προσέγγιση της αντίστοιχης μεταβλητότητας, η ύπαρξη της οποίας υφίσταται ως υπόθεση.

Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα (combined uncertainty) προκύπτει από το συνδυασμό όλων των επιμέρους συνιστωσών, εκφραζόμενων με τη μορφή τυπικών αποκλίσεων.

Όταν απαιτείται, για τις ανάγκες συγκεκριμένων εφαρμογών, ο υπολογισμός μιας συνολικής διευρυμένης αβεβαιότητας (expanded uncertainty) σε καθορισμένο βαθμό εμπιστοσύνης, η τυπική αβεβαιότητα πολλαπλασιάζεται με ένα σαφώς οριζόμενο συντελεστή.

Είναι απαραίτητο να τονιστεί με έμφαση ότι ο οδηγός GUM δεν είναι επιστημονικό σύγγραμμα και δεν αναφέρεται σε ειδικότερα προβλήματα, όπως, για παράδειγμα, η διάδοση αβεβαιοτήτων σε μη γραμμικά μοντέλα. Επιπλέον, δέχεται ορισμένες κριτικές κυρίως λόγω της εμφορικής αναφοράς στη συχνοτική στατιστική, η οποία όμως προϋποθέτει μεγάλους όγκους δεδομένων σπάνια διαθέσιμων στην πράξη.

Χωρίς να απαντάει σε όλα τα — συχνά πολύπλοκα — προβλήματα μετρολογικής αβεβαιότητας, ο οδηγός GUM θέτει το πλαίσιο και δίνει τα βασικά μεθοδολογικά εργαλεία για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων. Η αξία του έγκειται κυρίως στο ότι αποτελεί προϊόν σύγκλισης απόψεων σε διεθνές επίπεδο. Έγινε γρήγορα αποδεκτός και σήμερα τυγχάνει καθολικής σχεδόν αποδοχής ως κείμενο αναφοράς από μετρολόγους, φορείς διαπίστευσης και εργαστήρια. Έχει υιοθετηθεί από την CEN ως ευρωπαϊκό πρότυπο (ENV 13005, Αύγουστος 1999).

5.5 ASME B89.4.22-2004: Μέθοδοι για την Εκτίμηση της

Απόδοσης ΜΜΣ-ΑΒ

Το πρότυπο αυτό φέρει τον τίτλο «Μέθοδοι για την Εκτίμηση της Απόδοσης ΜΜΣ Αρθρωτού Βραχίονα» (Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines - AACMM). Ενώ οποιοδήποτε πλήθος περιστροφικών αρθρώσεων μπορεί να εκτιμηθεί, το πρότυπο εστιάζεται στις πιο συνηθεις διατάξεις που είναι διαθέσιμες στο εμπόριο και περιορίζεται στις επτά. Επίσης ασχολείται μόνο με χειροκίνητες υλοποιήσεις ανιχνευτών επαφής. Δεν αναφέρεται καθόλου σε μηχανοκίνητες διατάξεις και οπτικές μη-επαφής, όπως οι λέιζερ κάμερες.

Καθορίζονται οι απαιτήσεις και οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό και την δοκιμή των επιδόσεων των AACMM και επιχειρεί ενοποίηση της ορολογίας, κατηγοριοποίηση των μηχανών, αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθώς και ανάλυση των δεδομένων. Επιχειρείται ο καθορισμός των απλούστερων αξιόπιστων μεθόδων δοκιμών χωρίς να αντικαθιστούν άλλες περισσότερο πλήρεις δοκιμές που μπορεί να είναι κατάλληλες για κάποιες ειδικές εφαρμογές.

Παρέχεται ορολογία για τις AACMM που χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελείται από ένα λεξιλόγιο που καλύπτει τεχνικούς όρους που εμφανίζονται στο συγκεκριμένο και σε άλλα πρότυπα της ASME. Στο δεύτερο μέρος καθορίζει ένα πλήθος κατηγοριών των μηχανών.

Το κυρίως μέρος της προδιαγραφής υποδιαιρείται σε τρία τμήματα: γενική κατάταξη μηχανών, περιβαλλοντικές απαιτήσεις, και επιδόσεις μηχανών. Η γενική κατάταξη περιλαμβάνει τύπους μηχανών, εύρος μέτρησης και ανάλυση κωδικοποιητή του άξονα περιστροφής. Οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις αναφέρονται σε θερμική απόκριση, ηλεκτρικές απαιτήσεις και ασφάλεια έναντι κραδασμών. Στις προδιαγραφές απόδοσης περιλαμβάνονται δοκιμές ωφέλιμης διαμέτρου, απόδοσης άρθρωσης μονού σημείου, και ογκομετρικής απόδοσης.

Οι τιμές απόδοσης αναφέρονται ως μέγιστη απόκλιση, εύρος και τυπική απόκλιση. Αυτό γίνεται ώστε να υπάρχει συμφωνία με υπάρχοντα εθνικά και διεθνή πρότυπα.

Προκειμένου να αποσαφηνιστεί η χρήση του προτύπου, ένας σύντομος οδηγός χρήσης περιλαμβάνεται στο παράρτημα Α αυτού.

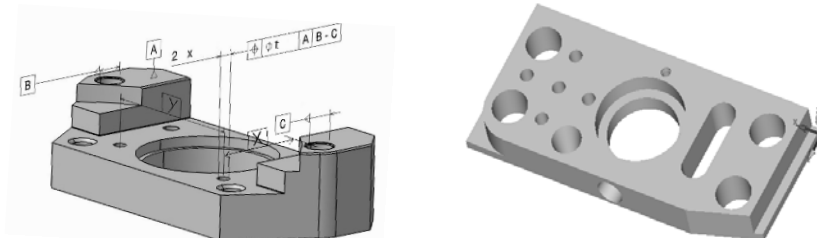
Η παραγωγικότητα είναι ένα σημαντικό θέμα στην επιλογή ενός AACMM. Ένα πλήθος παραγόντων επηρεάζουν την σχετική παραγωγικότητα των μετρητικών συστημάτων και περιλαμβάνουν μεταβλητές που αναφέρονται τόσο στο σύστημα μέτρησης όσο και στο μετρούμενο τεμάχιο. Αυτό το πρότυπο δεν ασχολείται με μεθόδους καθορισμού και αξιολόγησης της παραγωγικότητας. Αυτή θα πρέπει να αξιολογείται σε σχέση με την αναμενόμενη χρήση του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων πτυχών όπως το λογισμικό, η εργονομία και η συχνότητα βαθμονόμησης.[20]

6

Κατηγοριοποίηση αντικειμένων με βάση τη γεωμετρική τους μορφή.

Τα εξαρτήματα/ αντικείμενα/ κατασκευές μπορούν να διαχωριστούν με κριτήριο τη γεωμετρική μορφή τους στις παρακάτω τρεις βασικές κατηγορίες:

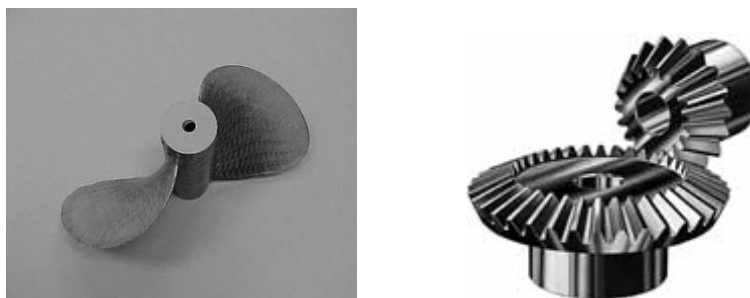
α. *Αντικείμενα συμβατικής γεωμετρίας* που η μορφή τους καθορίζεται από συνδυασμό βασικών γεωμετρικών στοιχείων τα οποία περιγράφονται από απλές μαθηματικές εξισώσεις (γραμμή, κύκλος, επίπεδο, κύβος, κύλινδρος, σφαίρα, κώνος κ.λ.π.) και για τα οποία οι διαστάσεις, οι θέσεις, ο προσανατολισμός και γενικότερα οι σχέσεις τους στο χώρο καθορίζονται από σύνθετες γεωμετρικές συνθήκες και από απαιτήσεις υψηλής ακριβείας.



Εικόνα 28: Αντικείμενα συμβατικής γεωμετρίας

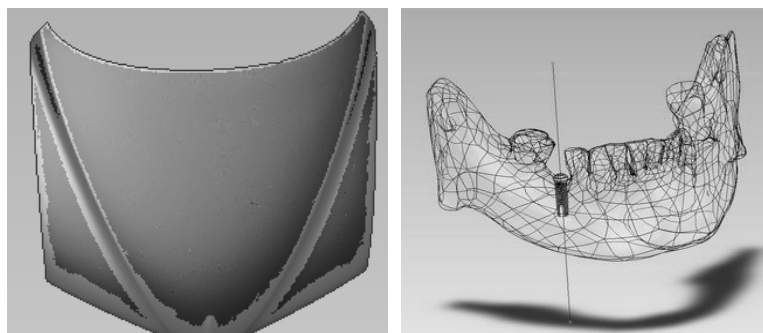
β. *Αντικείμενα περίπλοκης γεωμετρίας* που η μορφή τους καθορίζεται επακριβώς με τη χρήση σύνθετων μαθηματικών σχέσεων. Τέτοιου είδους μαθηματικές σχέσεις περιγράφουν π.χ. τη μορφή της εξειλιγμένης η οποία δίνει το προφίλ μιας παρειάς οδόντος σε έναν οδοντωτό τροχό, τη μορφή ενός πτερυγίου έλικας ή αεριοστροβίλου

κ.λ.π. και χρησιμοποιούνται για τον γεωμετρικό καθορισμό αντικειμένων, τυποποιημένων και μη, που είναι ευρύτατα διαδεδομένα στις μηχανολογικές κατασκευές.



Εικόνα 29: Αντικείμενα περίπλοκης γεωμετρίας

γ. Αντικείμενα που η επιφάνειές τους χαρακτηρίζονται από ελεύθερες μορφές και αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία και ως «γλυπτές» (sculptured) επιφάνειες. Οι επιφάνειες αυτές παρουσιάζουν υψηλή γεωμετρική πολυπλοκότητα και προσεγγίζονται με πολυωνυμικές συναρτήσεις υψηλού βαθμού (καμπύλες NURBS, Bézier κ.λ.π.) και αντίστοιχες παραμετρικές επιφάνειες. Στην παρακάτω εικόνα δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιου είδους αντικειμένων που περιλαμβάνουν τόσο τεχνολογικές (εξάρτημα από διαμόρφωση ελάσματος) όσο και φυσικές επιφάνειες ελεύθερης μορφής (τμήμα της κάτω γνάθου ασθενούς).



Εικόνα 30: Αντικείμενα ελεύθερης μορφής

Ο διαχωρισμός των αντικειμένων στις τρεις παραπάνω βασικές κατηγορίες δεν αποκλείει βεβαίως τη συνύπαρξη στο ίδιο αντικείμενο στοιχείων ή τμημάτων του που ανήκουν το κάθε ένα σε ξεχωριστές κατηγορίες (α) – (γ), συνθέτοντας τελικά ένα αντικείμενο που εν μέρει ανήκει και στις τρεις. Δύναται να οριστεί ως *Μη-συμβατικό Μηχανολογικό Αντικείμενο (ΜΜΑ)* αυτό που δεν αποτελείται αποκλειστικά από απλά γεωμετρικά στερεά και στερεά που δημιουργούνται από τις μεταξύ τους πράξεις της άλγεβρας Boole. Το ΜΜΑ περιλαμβάνει αντικείμενα που ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες (β) και – κυρίως - (γ).

Στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς, τα αντικείμενα εντάσσονται στην κατηγορία (γ). Σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι ένα αντικείμενο ανήκει σε μία από τις κατηγορίες (α) και (β), προκειμένου να διευκολυνθεί η μελέτη του. Καθοριστικό ρόλο παίζει ο σκοπός και η μέθοδος με την οποία κατασκευάστηκε το υπό μελέτη αντικείμενο. Είναι σαφές ότι ένας κίονας ως δομικό στοιχείο ανήκει στις κατηγορίες (α) και (β). Όμως, ως καλλιτεχνική δημιουργία μπορεί να μην υπακούει σε αυστηρά γεωμετρικά πρότυπα και κανόνες συμμετρίας, εντάσσοντάς τον στην κατηγορία (γ). Γίνεται αντιληπτό ότι η ένταξη

ενός τέτοιου αντικειμένου σε κάποια κατηγορία καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον σκοπό για τον οποίο μελετάται.

Στην πρώτη εφαρμογή της παρούσας Δ.Ε. (Κεφάλαιο 8) η σφαίρα που μελετάται κατατάσσεται στην κατηγορία (α). Είναι ένα βιομηχανικά κατασκευασμένο αντικείμενο με σαφή γεωμετρία τέλειας σφαίρας. Συνεπώς, καθίσταται εύλογη η διαδικασία μέτρησης της διαμέτρου αυτής.

Το ειδώλιο της δεύτερης εφαρμογής (Κεφάλαιο 9) εντάσσεται στην κατηγορία (γ) καθώς πρόκειται περί μιας αμιγώς καλλιτεχνικής δημιουργίας χωρίς ιδιαίτερες γεωμετρικές απαιτήσεις. Η υφή/ τραχύτητα της επιφάνειας του εν λόγω αντικειμένου αποτελεί έναν ακόμη λόγο προς αυτήν την κατεύθυνση.

Στην τελευταία εφαρμογή, το κυάθιο που μελετάται (Κεφάλαιο 10) έχει προκύψει από μέθοδο κατασκευής η οποία επιβάλει κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, χωρίς όμως να ενδιαφέρεται για την πιστή υλοποίησή τους. Οι ατέλειες που εμφανίζονται επιβάλλουν την κατάταξη αυτού στην κατηγορία (γ). Ωστόσο, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μελέτη όπως αναλύεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο, γίνεται η απαραίτητη παραδοχή ότι το κυάθιο εμφανίζει στοιχεία των κατηγοριών (α) και (β), όπως άξονα συμμετρίας.

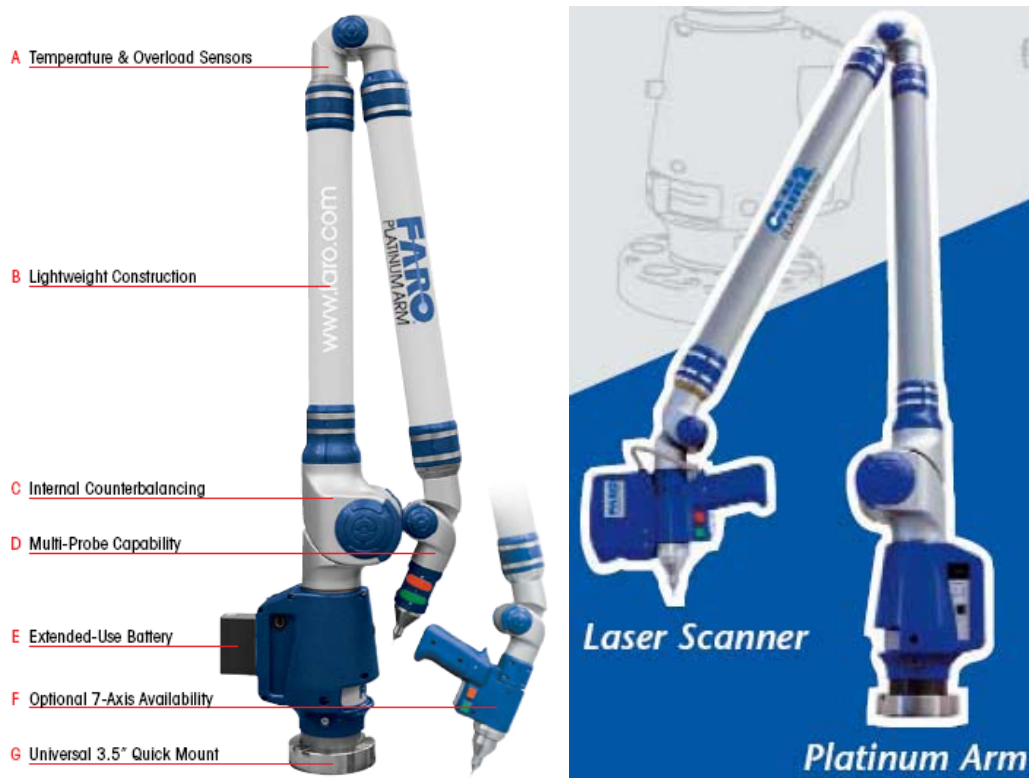
7

Περιγραφή χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού

7.1 ΜΜΣ-ΑΒ / Τρισδιάστατος σαρωτής FARO ARM

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας και ειδικότερα κατά την πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε μέσω των εφαρμογών που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 8, χρησιμοποιήθηκε η Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων τύπου Αρθρωτού Βραχίονα (ΜΜΣ-ΑΒ) **FARO PLATINUM ARM Model P083D**. Πρόκειται για έναν χειροκίνητο φορητό μετρητικό βραχίονα τελευταίας τεχνολογίας κατασκευασμένο από την εταιρία FARO Technologies Inc (έτος κατασκευής 2007) που διαθέτει 7 βαθμούς ελευθερίας και διάμετρο εργόσφαιρας 2,4 μέτρα. Με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές επίδοσης του κατασκευαστή, η ακρίβεια του συστήματος είναι πιστοποιημένη σύμφωνα με το πρότυπο ANSI B89 (2 Sigma Single Point Accuracy) $\pm 0.030\text{mm}$. Εκτός από τον μηχανικό αισθητήρα επαφής (ακίδα επαφής), η εν λόγω ΜΜΣ-ΑΒ διαθέτει επιπροσθέτως λέιζερ κάμερα προσαρτημένη στην απόληξη του βραχίονα για εφαρμογές αποτύπωσης αντικειμένων χωρίς επαφή όπως ο ποιοτικός/ μετροτεχνικός έλεγχος, ο αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός (reverse engineering), η τρισδιάστατη μοντελοποίηση (3-D modelling) και η αντιπαραβολή νέφους σημείων με ονομαστική γεωμετρία μοντέλου CAD. Για την λέιζερ κάμερα, ο κατασκευαστής δίνει ακρίβεια $\pm 0.050\text{mm}$, βάθος πεδίου 85mm, ωφέλιμο πλάτος δέσμης σάρωσης 34mm έως 60mm ανάλογα με την απόσταση από την μετρούμενη επιφάνεια, 640 σημεία ανά δέσμη σάρωσης, 30 σαρώσεις ανά δευτερόλεπτο (frames per second), άρα 19200 σημεία ανά δευτερόλεπτο, και μήκος κύματος λέιζερ 660nm (CDRH Class II/IEC Class 2M). Για το σύστημα βραχίονα-κάμερας η ακρίβεια προδιαγράφεται στα $\pm 0.080\text{mm}$. [24]

Η ΜΜΣ-ΑΒ Faro Arm επικοινωνεί μέσω θύρας USB με Η/Υ στον οποίο είναι εγκατεστημένο κατάλληλο εξειδικευμένο λογισμικό για τη διεκπεραίωση των παραπάνω εργασιών. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα της μέτρησης/ ψηφιακής αποτύπωσης αποθηκεύονται σε πραγματικό χρόνο στον Η/Υ.

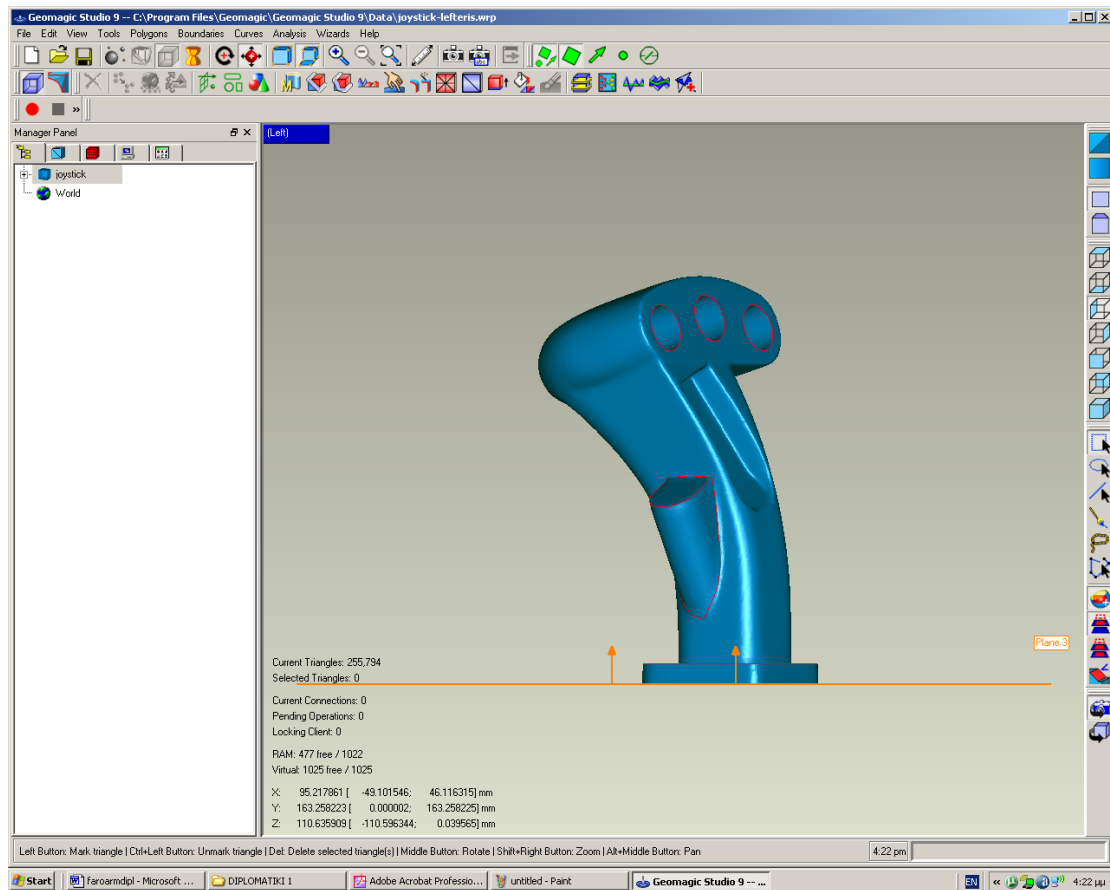


Εικόνα 31: Βραχίονας FARO PLATINUM ARM Model P083D

7.2 Λογισμικό ψηφιακής αποτύπωσης *Geomagic Studio*

Η ΜΜΣ-ΑΒ Faro Arm υποστηρίζεται από το λογισμικό Geomagic Studio v.9 της εταιρίας Raindrop, [22]. Το λογισμικό αυτό παρέχει υψηλής ποιότητας υπολογιστικά εργαλεία ψηφιακής αποτύπωσης, συλλογής νέφους σημείων καθώς και μετατροπής πολύπλοκων πολυγωνικών αντικειμένων σε ακριβή NURBS μοντέλα συμβατά με συστήματα CAD/ CAM / CAE/ RP (δυνατότητα εξαγωγής αρχείων τύπου igs, step, stl κ.α). Η κυρίαρχη θέση που κατέχει στη διεθνή αγορά το έχει ήδη καταξιώσει ως το κατεξοχήν χρησιμοποιούμενο υπολογιστικό εργαλείο για τέτοιου είδους εργασίες.

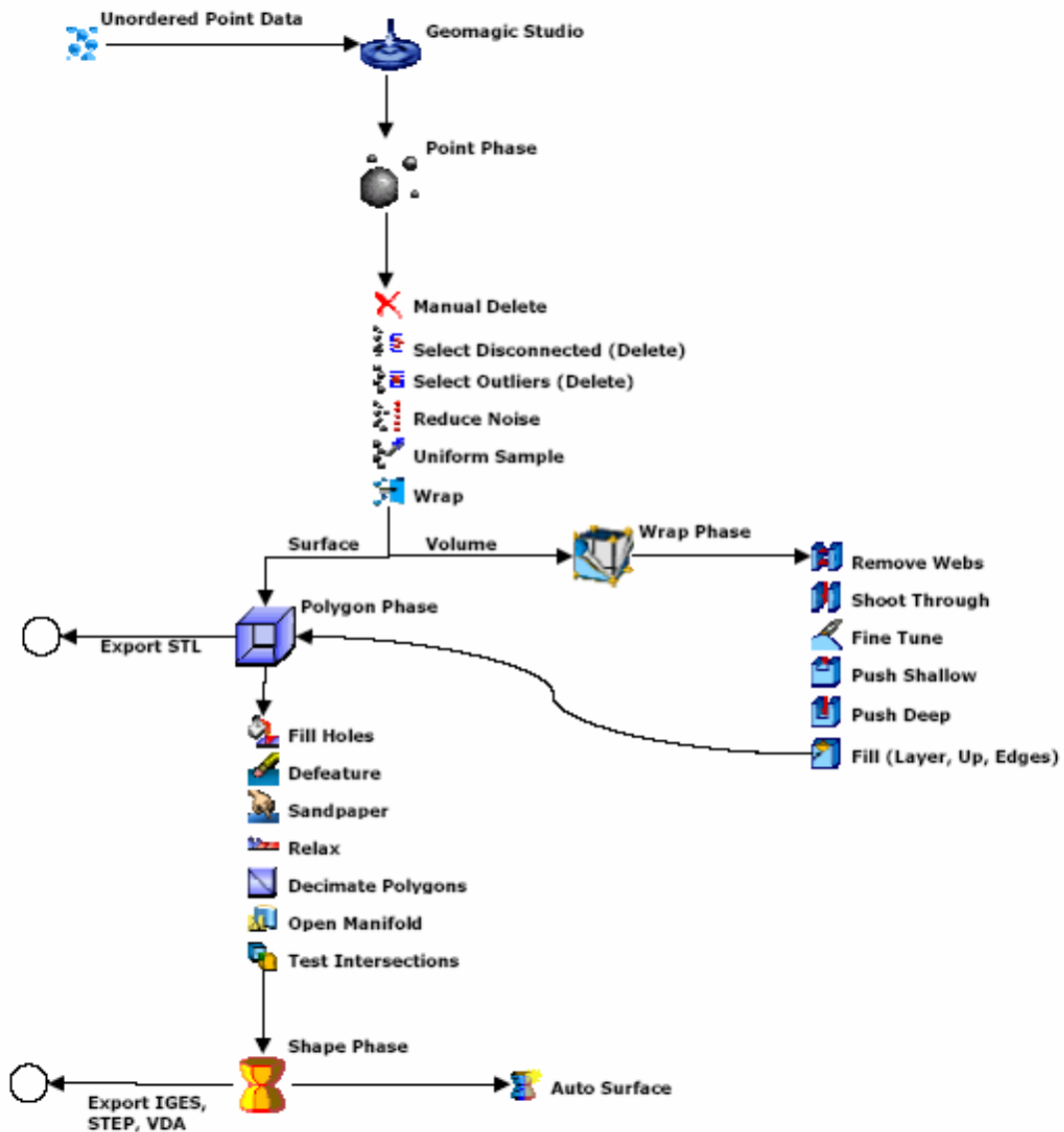
Στην παρακάτω Εικόνα 32 παρουσιάζεται η τυπική μορφή της επιφάνειας εργασίας του εν λόγω λογισμικού όπου διακρίνονται οι γραμμές με τα βασικά εργαλεία επεξεργασίας και το βασικό παράθυρο του μοντέλου. Στην Εικόνα 33 και στην Εικόνα 34 παρουσιάζονται τα τυπικά διαγράμματα ροής εργασιών κατά την επεξεργασία νέφους σημείων που έχει προκύψει από μοναδική και από πολλαπλές σαρώσεις αντίστοιχα.



Εικόνα 32: Επιφάνεια εργασίας του λογισμικού Geomagic Studio 9

Single Scan Workflow

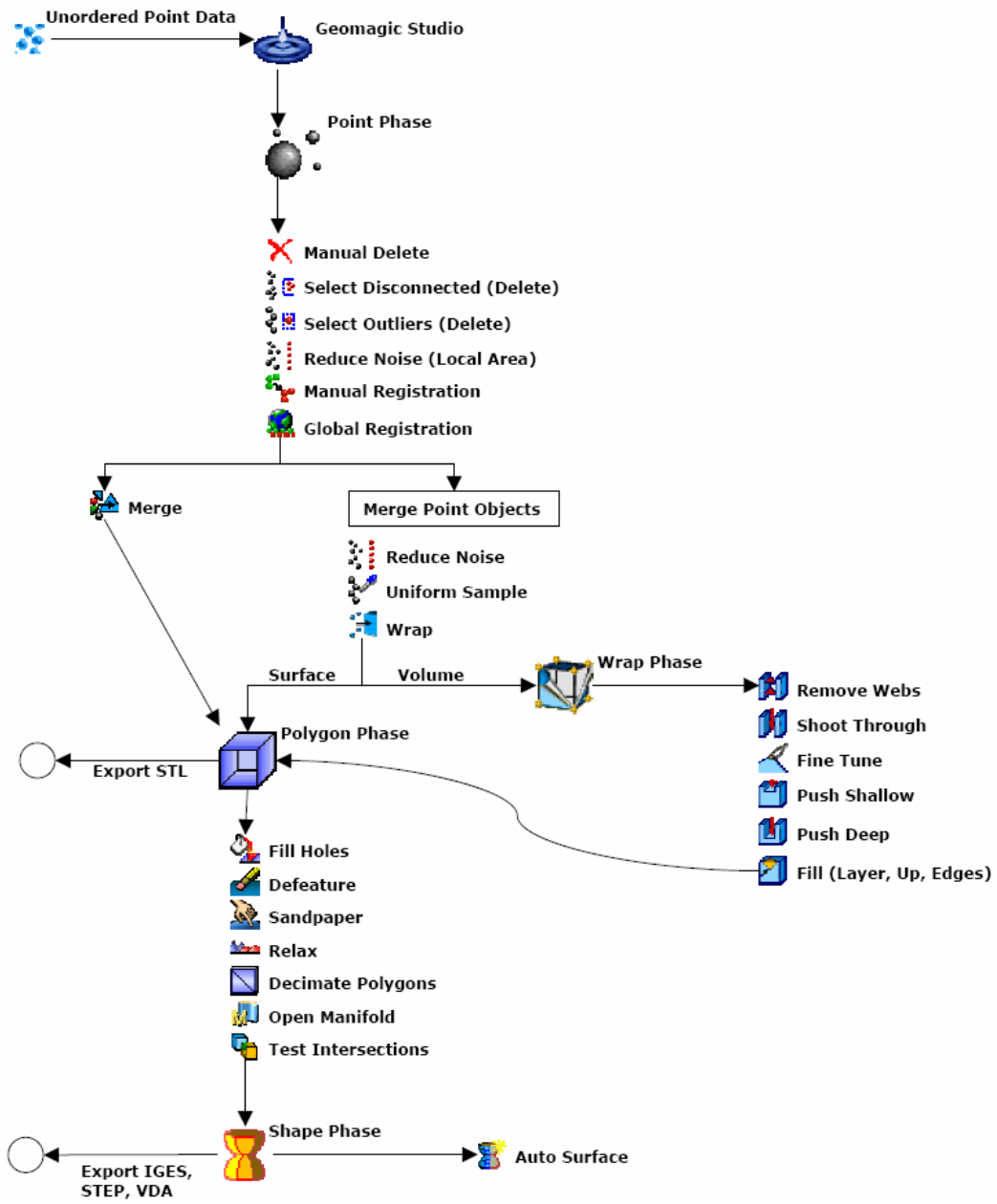
Unordered Point Data



Εικόνα 33: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας νέφους σημείων μοναδικής σάρωσης [22]

Multiple Scans Workflow

Unordered Point Data



Εικόνα 34: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας νέφους σημείων πολλαπλών σαρώσεων [22]

7.3 Λογισμικό CAD μοντελοποίησης Rhinoceros 3D

Το λογισμικό Rhinoceros 3D v.4.0 είναι ένα ευέλικτο κι εύχρηστο εργαλείο επεξεργασίας τρισδιάστατων μοντέλων CAD. Χρησιμοποιείται σε ευρύτατο πλήθος εφαρμογών: βιομηχανικός σχεδιασμός, εφαρμογές αρχιτεκτονικής με απαιτήσεις σε ελεύθερες μορφές, ναυπηγική, κοσμηματοποιία, αυτοκινητοβιομηχανία, CAD/CAM, ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων (*rapid prototyping*), αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός, ψηφιακή διασκέδαση, γραφιστική.

Το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε στην τρίτη εφαρμογή (*κεφάλαιο 10 της ΔΕ*) κατά τη φάση κατασκευής του τελικού 3D-CAD μοντέλου του κυαθίου καθώς και για τη φωτορεαλιστική του απεικόνιση. Διευκρινίζεται ότι το Εργαστήριο ΤΚΠ-ΑΣ του Ε.Μ.Π., μετά τη θετική αξιολόγηση του εν λόγω λογισμικού που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας ΔΕ, είναι στη φάση απόκτησης επίσημης άδειας χρήσης του Rhinoceros 3D, ενώ η έως τώρα χρήση του γίνονταν στα πλαίσια της περιορισμένου χρόνου/ δοκιμαστικής άδειας λειτουργίας (*trial licence*), που παρέχει ελεύθερα η εταιρία που το αναπτύσσει.

7.4 ΜΜΣ-ΤΓ / Αυτόματη CMM MISTRAL 070705

Η ΜΜΣ-ΤΓ του Εργαστηρίου ΤΚΠ-ΑΣ του Ε.Μ.Π. είναι τύπου *Mistral 070705* (s/n 00808) του οίκου DEA – Brown & Sharpe Inc. με αβεβαιότητα μέτρησης σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10360 – 2:

$U_3 (\mu\text{m}) = \text{MPE}_E = 3 + L(\text{mm})/250$ (*Volumetric length measuring uncertainty*)

$R (\mu\text{m}) = \text{MPE}_P = 3$ (*Volumetric probing uncertainty*)

όπου L (σε mm) η μετρούμενη διάσταση και U_3 , R (σε μm) η αβεβαιότητα στο χώρο μέτρησης, ανεξαρτήτως διευθύνσεως, κατά τη μέτρηση διαστάσεων και σφάλματος μορφής αντίστοιχα. (Πιστοποιητικό διακρίβωσης MI808070705297 – DEA).

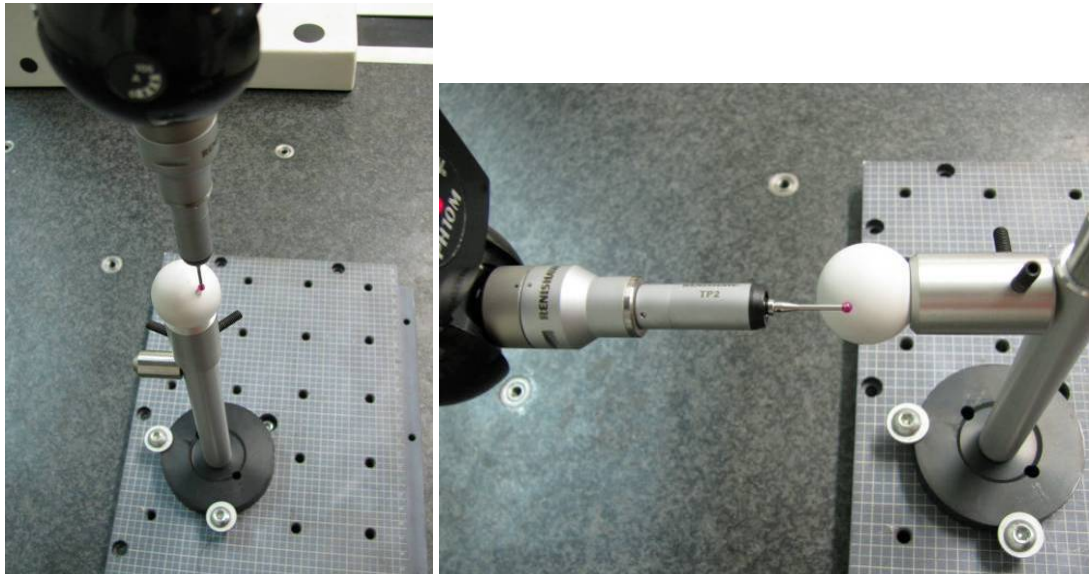
Στις εφαρμογές 1 και 2 (κεφάλαια 8 και 9 της ΔΕ αντίστοιχα) για την καταγραφή των σημείων επαφής χρησιμοποιήθηκε η αυτόματη (motorized) κεφαλή τύπου PH10M (s/n L96618) του οίκου Renishaw Ltd. σε συνδυασμό με εργαλείο αποτελούμενο από στέλεχος τύπου TP200 (s/n Z85454) του οίκου Renishaw Ltd. με απόληξη τύπου “ruby-ball tips” μήκους 20 mm και διαμέτρου 4mm. Κατά τη συνολική διεξαγωγή και επεξεργασία των μετρήσεων με την παραπάνω μηχανή CMM χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PC - DMIS v. 3.6 της Wilcox Assoc. Inc. στο οποίο οι αλγόριθμοι μαθηματικής προσαρμογής των μετρούμενων σημείων σε γεωμετρικά στοιχεία (features) είναι πιστοποιημένοι σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10360-5, από το ινστιτούτο PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) [23]. Επισημαίνεται τέλος ότι οι μετρητικές εργασίες των εφαρμογών 1 και 2 έλαβαν χώρα αποκλειστικά στον σχετικό χώρο μετρήσεων του Εργαστηρίου ΤΚΠ&ΑΣ. Ο χώρος είναι θερμοκρασιακά σταθερός (θερμοκρασία χώρου: $20 \pm 1.5^\circ \text{C}/12\text{h}$, καταγραφικά ελέγχου: TESTO 175H2, ακρίβεια ένδειξης $\pm 0.2^\circ \text{C}$ και LT Lutron TM 916, $\pm [1\% + 1^\circ \text{C}]$). Ο εν λόγω χώρος είναι επίσης ελεγχόμενος από πλευράς δονήσεων, υγρασίας, σκόνης κ.α. παραγόντων που επηρεάζουν την διευρυμένη αβεβαιότητα των μετρητικών αποτελεσμάτων.

8

Εφαρμογή 1: Διερεύνηση Διαστασιολογικής

Πιστότητας - Πρότυπη Σφαίρα

Με στόχο την πειραματική διερεύνηση του επιπέδου πιστότητας που μπορεί να επιτευχθεί κατά την ψηφιακή αποτύπωση και την 3D-CAD μοντελοποίηση με τη χρήση λέιζερ κάμερας προσαρτημένης σε μηχανή μέτρησης συντεταγμένων τύπου αρθρωτού βραχίονα (ΜΜΣ-ΑΒ) πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο εκπόνησης της ΔΕ δύο διαφορετικές εφαρμογές. Στην Εφαρμογή 1, που παρουσιάζεται παρακάτω, η διερεύνηση εστιάζεται στην **διαστασιολογική πιστότητα των παραγόμενων μοντέλων CAD** και στους παράγοντες που την επηρεάζουν, όπως αυτή εκφράζεται ποσοτικά μέσω της απόκλισης των τιμών χαρακτηριστικών γεωμετριών. Το αντικείμενο που επιλέχθηκε για τον σκοπό αυτό είναι μια πρότυπη σφαίρα ονομαστικής διαμέτρου 30mm κατασκευασμένης από χάλυβα και καλυμμένης με λεπτή στρώση λευκής βαφής, η οποία εκτιμάται ότι έχει πάχος μερικών μικρών (μm). Σημειώνεται ότι η ύπαρξη της βαφής καθιστά την επιφάνεια ιδανική για λήψη νέφους σημείων με την λέιζερ κάμερα, καθώς αυξάνει τον συντελεστή διάθλασης συγκριτικά με μια γυαλισμένη/στιλπνή μεταλλική επιφάνεια. Για τον λόγο αυτό η σειρά των προτύπων μηκών και σφαιρών (*gage blocks, sphere gages*) που διαθέτει το Εργαστήριο ΤΚΠ-ΑΣ κρίθηκε μετά από σχετικές δοκιμές ακατάλληλη για τη διεξαγωγή της εν λόγω διερεύνησης, αφού η ποιότητα της επιφάνειάς τους (επιφάνεια «καθρέπτης») οδηγούσε στην εισαγωγή πολύ υψηλών επιπέδων θορύβου κατά την ψηφιοποίηση. Η πρότυπη σφαίρα που τελικά χρησιμοποιήθηκε παραχωρήθηκε στο Εργαστήριο ΤΚΠ-ΑΣ για περιορισμένο χρονικό διάστημα από το Τεχνικό Γραφείο Δ. Βρέκοσσις, το οποίο αυτό σημείο αυτό ευχαριστούμε. Το αντικείμενο της παρούσας εφαρμογής, που προφανώς ανήκει στην κατηγορία «α» του Κεφαλαίου 6 της ΔΕ (συμβατική γεωμετρία / βασικά στερεά) μετράται αρχικά με την υψηλής ακρίβειας ΜΜΣ-ΤΒ και στη συνέχεια ψηφιοποιείται και μοντελοποιείται σε 3D-CAD με την ΜΜΣ-ΑΒ, με σκοπό την αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων που αφορούν στη διάμετρό του.



Εικόνα 35: Μέτρηση της πρότυπης σφαίρας στην ΜΜΣ-ΤΓ – Εφαρμογή 1

α - Μέτρηση διαμέτρου πρότυπης σφαίρας με τη χρήση ΜΜΣ - ΤΓ

Τα διαστασιολογικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πρότυπης σφαίρας (διάμετρος και σφάλμα μορφής) μετρήθηκαν αρχικά με τη χρήση Μετρητικής Μηχανής Συντεταγμένων Τύπου Γέφυρας.

Για την εξέταση της επαναληψιμότητας των μετρητικών αποτελεσμάτων της ΜΜΣ-ΤΓ η πρότυπη σφαίρα τοποθετήθηκε σε δύο διαφορετικά σημεία του χώρου μέτρησης με δύο διαφορετικούς προσανατολισμούς. Χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα δύο διαφορετικοί προσανατολισμοί της κεφαλής Renishaw (γωνίες περιστροφής $A=0, B=0$ και $A=90, B=0$) για τις δυο προσδέσεις της σφαίρας, Εικόνα 35(α), (β). Και στις δύο περιπτώσεις ελήφθησαν 20 σημεία σε διασπορά που κάλυπτε λίγο περισσότερο από ένα ημισφαίριο, εφόσον η σφαίρα δεν ήταν πλήρως προσβάσιμη από την ακίδα επαφής (κάτι τέτοιο θα ήταν δυνατόν μόνον εάν γίνονταν χρήση περισσότερων του ενός προσανατολισμών της κεφαλής για την λήψη σημείων στην ίδια μέτρηση, εισάγοντας όμως έναν επιπλέον παράγοντα αβεβαιότητας). Σε κάθε μέτρηση τα 20 σημεία επαφής προσαρμόστηκαν από το μετρητικό λογισμικό PC-DMIS στο ιδανικό γεωμετρικό στοιχείο της σφαίρας με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Οι μετρήσεις για κάθε πρόσδεση επαναλήφθηκαν πέντε φορές. Ο μέσος όρος των μετρητικών αποτελεσμάτων ήταν για την τιμή της διαμέτρου $\varnothing 30.083 \text{ mm}$ με τυπική απόκλιση 0.003mm και για το σφάλμα μορφής της 0.018mm , με αβεβαιότητα $\pm 0.004\text{mm}$ (σύμφωνα με την προδιαγραφή MPE_E του ISO 10360-2). **Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται ως τιμή αναφοράς** προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδοση της ΜΜΣ τύπου αρθρωτού βραχίονα με την λείζερ κάμερα. Έτσι, η σύγκλιση ή η απόκλιση των μετρητικών αποτελεσμάτων της τελευταίας σε σχέση με την παραπάνω τιμή αναφοράς χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την αξιολόγηση των παραμέτρων που επιδρούν στην πιστότητα της 3D-CAD μοντελοποίησης.

Σημειώνεται ότι οι παραπάνω μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο του Εργαστηρίου ΤΚΠ-ΑΣ, ο οποίος είναι θερμοκρασιακά σταθερός (θερμοκρασία χώρου: $20 \pm 1.5^\circ \text{C}/12\text{h}$, καταγραφικά ελέγχου: TESTO 175H2, s/n 20038973/408, ακρίβεια ένδειξης $\pm 0.2^\circ \text{C}$ και LT Lutron TM 916, (s/n P842776) $\pm [1\% + 1^\circ \text{C}]$). Ο χώρος είναι επίσης ελεγχόμενος από πλευράς δονήσεων, υγρασίας, σκόνης κ.α. παραγόντων που επηρεάζουν την διευρυμένη αβεβαιότητα των μετρητικών αποτελεσμάτων.

β - Μοντελοποίηση CAD πρότυπης σφαίρας με τη χρήση ΜΜΣ – ΑΒ /λέιζερ κάμερας

Για την ψηφιακή αποτύπωση με τη χρήση ΜΜΣ – ΑΒ /λέιζερ κάμερας η πρότυπη σφαίρα στερεώθηκε αρχικά στον πάγκο εργασίας βαρέως τύπου του Εργαστηρίου ΤΚΠ-ΑΣ με τη βοήθεια κατάλληλου σφιγκτήρα ο οποίος συγκρατούσε τη βάση στήριξής της, όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα. Κατόπιν, η διαδικασία αποτύπωσης πραγματοποιήθηκε τέσσερις φορές διαφοροποιώντας σε κάθε μία συγκεκριμένες παραμέτρους (βλ. παρακάτω *συγκεντρωτικό πίνακα αποτελεσμάτων*). Κατά τη διαδικασία της ψηφιακής αποτύπωσης δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε η δέσμη σάρωσης να προσπίπτει στην επιφάνεια της σφαίρας όσο το δυνατόν κάθετα. Όπως ήδη επισημάνθηκε, το μέγεθος που εξετάζεται εδώ είναι η υπολογιζόμενη διάμετρος της σφαίρας που προκύπτει από την CAD μοντελοποίηση του εκάστοτε νέφους σημείων μέσω των εντολών δημιουργίας τρισδιάστατων σχημάτων του λογισμικού Geomagic Studio. Επίσης, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση (*standard deviation*) που πρακτικά εκφράζει το πόσο απέχουν τα σημεία του νέφους της εκάστοτε σάρωσης από την επιφάνεια της μαθηματικά προσαρμοσμένης σφαίρας.



Εικόνα 36: Σάρωση πρότυπης σφαίρας με την λέιζερ κάμερα ΜΜΣ-ΑΒ

Το εν λόγω λογισμικό προσφέρει καταρχήν τη δυνατότητα καταγραφής των δεδομένων σε μορφή σημείων (*raw data*), κελίων (*ordered data*) ή – ταυτόχρονα - και των δύο. Επίσης, τα *ordered data* μπορούν να προκύψουν από τα *raw data* σε επόμενο βήμα, μετά από σχετική επιλογή του χρήστη, μέσω εσωτερικών υπολογισμών και φιλτραρίσματος που γίνεται από το λογισμικό. Προκειμένου να διερευνηθεί το κατά πόσο επηρεάζει η επιλογή αυτής της παραμέτρου τη διαστασιολογική πιστότητα του παραγόμενου CAD μοντέλου του αντικειμένου, πραγματοποιήθηκαν ξεχωριστοί υπολογισμοί για τα δύο αυτά είδη δεδομένων.

Ένας ακόμη παράγοντας που εξετάστηκε ήταν η διαδικασία απομάκρυνσης θορύβου. Η διαδικασία αυτή έχει τη μορφή παραμετροποιήσιμης εντολής στο Geomagic Studio και στόχος της είναι η «ομαλοποίηση» της επιφάνειας του παραγόμενου CAD μοντέλου. Πραγματοποιείται μέσω μικρομετατοπίσεων ορισμένων σημείων που το λογισμικό θεωρεί ότι η μετρημένη θέση τους στον χώρο έχει αλλοιωθεί λόγω θορύβου, σε μία νέα θέση που εκτιμάται ότι προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική τους θέση στο ψηφιοποιούμενο αντικείμενο. Αυτό που επιχειρήθηκε μέσω του πειράματος είναι η ποσοτική αποτίμηση της επίδρασης της διαδικασίας αυτής στη διάσταση της διαμέτρου του αντικειμένου.

Πριν από την έναρξη της σάρωσης παρέχεται στον χρήστη η δυνατότητα μεταβολής του εύρους της γωνίας υποδοχής της ακτίνας από τον αισθητήρα (*παράμετρος Filter Angle*), με τιμές που κυμαίνονται από 0° έως 90°. Όταν επιλεγεί η τιμή 0°, τότε το λογισμικό κάνει δεκτές όλες τις ακτίνες που εισέρχονται στον αισθητήρα, καταγράφοντας μεγάλο πλήθος σημείων που δεν αντιστοιχούν σε πραγματικά. Συνεπώς, το νέφος σημείων που προκύπτει εμπεριέχει πολύ θόρυβο δυσχεραίνοντας την περαιτέρω επεξεργασία. Στην αντίθετη περίπτωση, οι ακτίνες που εισέρχονται εντελώς κάθετα στον αισθητήρα είναι ιδανικές όσον αφορά την ποιότητα της ψηφιοποίησης πλην όμως ελάχιστες σε πλήθος. Οι τρεις πρώτες σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν με την ρύθμιση της παραμέτρου αυτής στις 45° και η τέταρτη στις 75°. Για λόγους οικονομίας και συγκρότησης της παρουσίασης τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από σαρώσεις που πραγματοποιήθηκαν με ενδιάμεση κλιμάκωση της παραμέτρου αυτής (ανά 10°) δεν κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν.

Για τις περισσότερες εφαρμογές (*αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός, ποιοτικός έλεγχος κ.α.*) ο απαιτούμενος χρόνος για τη σάρωση ενός εξαρτήματος αποτελεί κρίσιμη συνιστώσα. Με το σκεπτικό αυτό διερευνάται η επίδραση του δαπανώμενου χρόνου στην διαστασιολογική πιστότητα των λαμβανόμενων σημείων («γρήγορη» σε αντιδιαστολή με «αργή και προσεκτική» σάρωση). Επιπλέον, μία «γρήγορη» σάρωση εκτός από μικρό χρόνο για την εκτέλεσή της, αποδίδει και σχετικά μικρό πλήθος σημείων, συντομεύοντας έτσι τους χρόνους επεξεργασίας, μαθηματικής προσαρμογής επιφανειών και υπολογισμών που απαιτούνται από το λογισμικό. Κατά την πρώτη Σάρωση - 1, που αντιπροσωπεύει την περίπτωση της «γρήγορης προσέγγισης», καταγράφηκαν σημεία κυρίως του άνω ημισφαιρίου της σφαίρας που ελήφθησαν με μία μόνο, γρήγορη κίνηση της λέιζερ κάμερας πάνω από το αντικείμενο, χωρίς επαναληπτικές επιμέρους σαρώσεις. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στη συγκεκριμένη εφαρμογή, από την έναρξη της σάρωσης μέχρι την απόδοση της πρώτης τιμής διαμέτρου μεσολάβησαν μόλις μερικά λεπτά (<5 min).

Κατά τη Σάρωση - 2, πραγματοποιήθηκαν πέντε (5) επιμέρους σαρώσεις καλύπτοντας κατά κύριο λόγο το άνω ημισφαίριο. Προκειμένου να υπολογιστεί η διάμετρος, το λογισμικό επιβάλει να πραγματοποιηθεί σύνθεση των επιμέρους σαρώσεων και μέσω της εντολής Merge να δημιουργηθεί το πολυγωνικό μοντέλο.

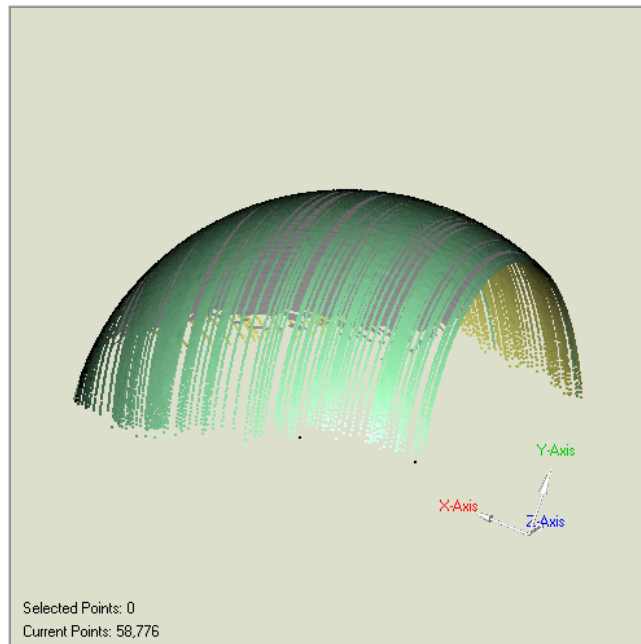
Για τη Σάρωση - 3 πραγματοποιήθηκαν δεκαεπτά (17) επιμέρους σαρώσεις σε μια προσπάθεια πλήρους κάλυψης της επιφάνειας της σφαίρας. Κατά την επεξεργασία του νέφους σημείων που προέκυψε διαγράφηκαν τα σημεία της βάσης στήριξης.

Στην τέταρτη και τελευταία Σάρωση - 4 εκτελέστηκαν οκτώ επιμέρους (8) σαρώσεις καλύπτοντας το μεγαλύτερο μέρος της σφαιρικής επιφάνειας.

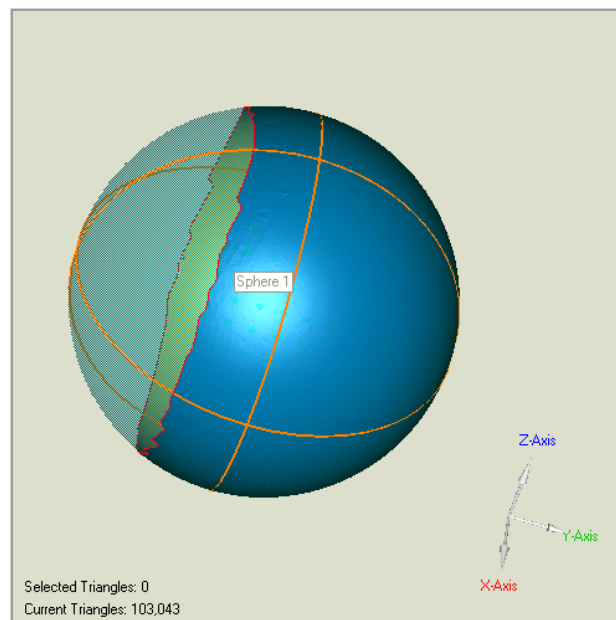
Επιγραμματικά, οι τιμές των διαμέτρων που υπολογίστηκαν στις δεκαέξι διαφορετικές περιπτώσεις που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα προέκυψαν από συνδυασμούς των εξής επιλογών/ παραμέτρων:

- Raw data / ordered data
- Πλήθος επιμέρους σαρώσεων
- Χωρίς / με μείωση θορύβου
- Filter angle 45° - 75°
- Προ / μετά δημιουργίας πολυγωνικού μοντέλου

Κατά την επεξεργασία του τελευταίου συνδυασμού παραμέτρων, το λογισμικό δεν παρείχε τη δυνατότητα εφαρμογής μείωσης θορύβου πριν την μετάβαση σε πολυγωνικό μοντέλο. Έτσι εφαρμόστηκε η εντολή Relax Polygons η οποία επιτελεί παρεμφερή λειτουργία.



Εικόνα 37: Δεδομένα Σάρωσης -1 (πράσινο: raw data, γκρι: ordered data)



Εικόνα 38: Υπολογισμός σφαίρας σε πολυγωνικό μοντέλο από το λογισμικό Geomagic Studio

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Με μπλε χρώμα σημειώνονται οι μέγιστες τιμές για κάθε περίπτωση και με κόκκινο οι ελάχιστες αντίστοιχα.

Τύπος δεδομένων	Πλήθος επιμέρους σαρώσεων	Πλήθος σημείων/κελιών	Πλήθος πολυγώνων	Μέγιστη γωνία δέσμης (°)	Noise Reduction	Διάμετρος (mm)	Standard deviation (mm)
<u>Σάρωση - 1</u>							
raw	1	58,776	-	45	όχι	30.0470	0.009263
raw	1	58,776	-	45	ναι	30.0363	0.006722
ordered	1	38,118	-	45	όχι	30.0366	0.007482
ordered	1	38,118	-	45	ναι	30.0340	0.006078
raw	1	58,776	35,824	45	όχι	30.0525	0.009854
raw	1	58,776	35,659	45	ναι	30.0457	0.007559
ordered	1	38,118	76,236	45	όχι	30.0366	0.007482
ordered	1	38,118	76,236	45	Relax pol.	29.9922	0.008568
<u>Σάρωση - 2</u>							
raw	5	96,437	105,690	45	όχι	29.8797	0.036371
raw	5	96,437	105,690	45	ναι	29.8675	0.035113
ordered	5	106,469	160,626	45	όχι	30.0700	0.027418
ordered	5	106,469	158,507	45	ναι	30.0391	0.025532
<u>Σάρωση - 3</u>							
raw	17	641,852	116,725	45	όχι	30.0585	0.014073
raw	17	641,852	115,930	45	ναι	30.0445	0.012880
ordered	17	376,904	405,266	45	όχι	30.0561	0.010978
ordered	17	376,904	404,024	45	ναι	30.0547	0.010540
<u>Σάρωση - 4</u>							
raw	8	303,414	114,737	75	όχι	30.0626	0.011152
raw	8	303,414	114,468	75	ναι	30.0565	0.010857
ordered	8	319,288	370,838	75	όχι	30.0641	0.011443
ordered	8	319,288	370,506	75	ναι	30.0638	0.011100

γ - Αντιπαραβολή ΜΜΣ-ΑΒ και ΜΜΣ-ΤΓ αποτελεσμάτων διαμέτρου πρότυπης σφαίρας

Από την εξέταση των παρατιθέμενων στον παραπάνω πίνακα αποτελεσμάτων και σε αντιπαραβολή με το αποτέλεσμα της διαμέτρου της πρότυπης σφαίρα που προέκυψε από την ΜΜΣ-ΤΓ επισημαίνονται τα εξής:

- Η μέγιστη τιμή διαμέτρου είναι 30.0700mm (Σάρωση - 2, Περίπτωση 3, σημειώνεται με υπογράμμιση στον πίνακα). Η ελάχιστη τιμή διαμέτρου είναι 29.8675mm (Σάρωση - 2, Περίπτωση 3, σημειώνεται με υπογράμμιση στον πίνακα). Συνεπώς το συνολικό εύρος τιμών των λαμβανόμενων διαμέτρων είναι 0.2025mm.
- Η μέγιστη τιμή τυπικής απόκλισης είναι 0.036371mm (Σάρωση - 2, Περίπτωση 1, σημειώνεται με υπογράμμιση στον πίνακα) ενώ η ελάχιστη τιμή τυπικής απόκλισης είναι 0.006722mm (Σάρωση - 1, Περίπτωση 2, σημειώνεται με υπογράμμιση στον πίνακα).
- Το πλήθος των επιμέρους, επαναλαμβανόμενων σαρώσεων δεν παίζει καθοριστικό ρόλο στην διαστασιολογική πιστότητα. Έτσι, μία και μοναδική ποιοτική (κάθετη δέσμη, χαμηλός θόρυβος) σάρωση εκτιμάται βάσει των αποτελεσμάτων ότι αρκεί. Επίσης, η εφαρμογή της εντολής «Noise Reduction» εμφανίζεται να μειώνει την τιμή της διαμέτρου και της τυπικής απόκλισης.
- Παρατηρείται ακόμη ότι όλες οι τιμές διαμέτρου που εμφανίζονται στον πίνακα είναι μικρότερες από την τιμή που μετρήθηκε με την ΜΜΣ-ΤΓ. Το αναμενόμενο ίσως θα ήταν η εμφάνιση διασποράς των τιμών σε ένα εύρος περίπου $\pm 0.080\text{mm}$, όσο η αβεβαιότητα που δίνει ο κατασκευαστής της ΜΜΣ-ΑΒ.
- Η πλήρης ή μερική ($> 180^\circ$) κάλυψη της σφαιρικής επιφάνειας (αντιπαραβολή Σάρωσης -1 με Σάρωση - 3 και Σάρωση - 4) δεν επηρεάζει σημαντικά την διαστασιολογική πιστότητα.
- Σε γενικές γραμμές η επίδραση των παραμέτρων του λογισμικού Geomagic Studio που διερευνήθηκαν πειραματικά κατά την παρούσα εφαρμογή δεν φαίνεται να είναι καθοριστική για τη διαστασιολογική πιστότητα των παραγόμενων CAD μοντέλων του εξαρτήματος.

9

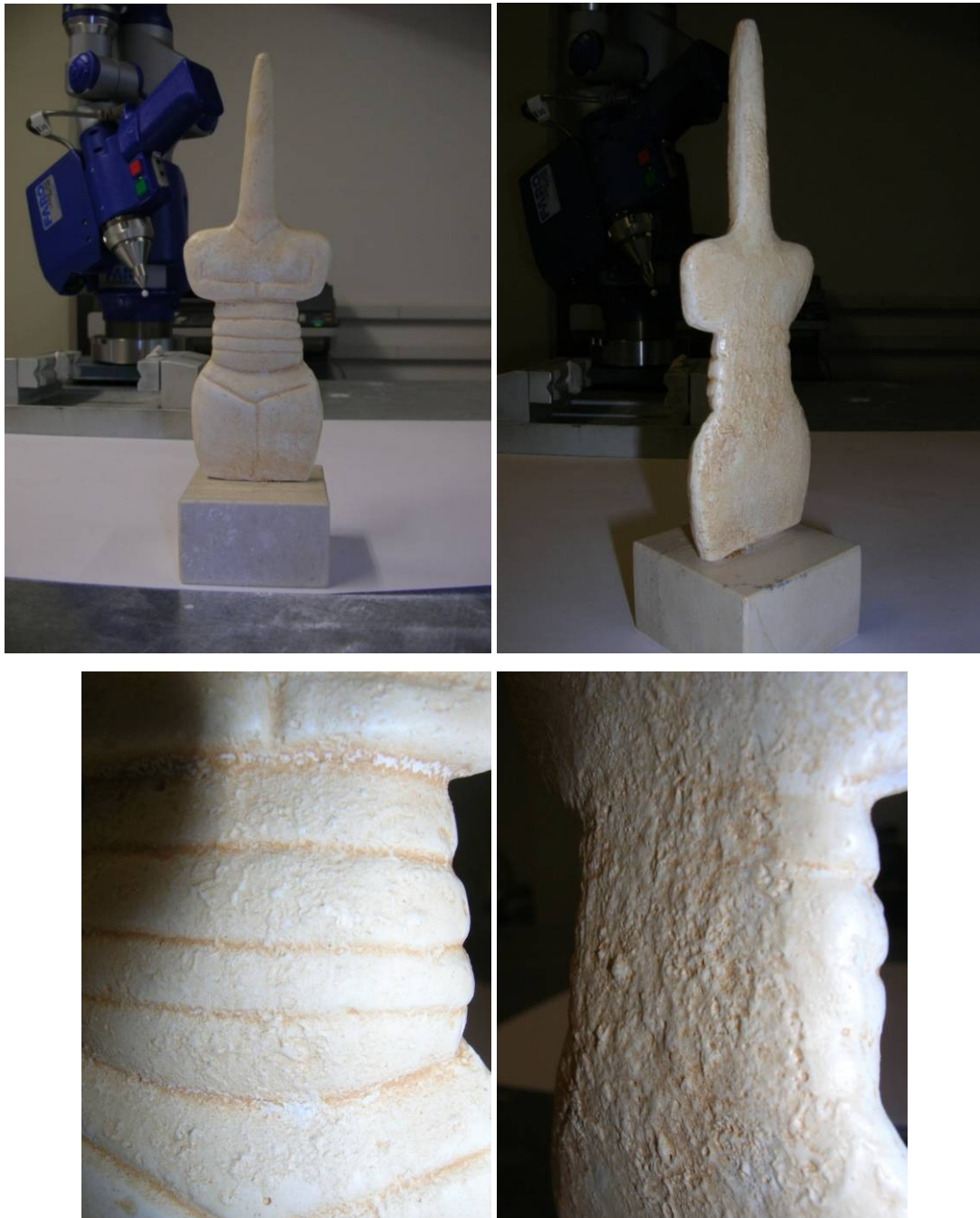
Εφαρμογή 2: Διερεύνηση Γεωμετρικής

Πιστότητας - Κυκλαδικό Ειδώλιο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, κύριο αντικείμενο της ΔΕ είναι η διερεύνηση του επιπέδου πιστότητας που μπορεί να επιτευχθεί κατά την ψηφιακή αποτύπωση και την 3D-CAD μοντελοποίηση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς, με τη χρήση λέιζερ κάμερας προσαρτημένης σε μηχανή μέτρησης συντεταγμένων τύπου αρθρωτού βραχίονα. Σκοπός της παρούσας εφαρμογής είναι η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης τόσο του υλισμικού (ΜΜΣ-ΑΒ + λέιζερ κάμερα) όσο και συγκεκριμένων παραμέτρων του λογισμικού Geomagic Studio στην πιστότητα/ αβεβαιότητα του παραγόμενου CAD μοντέλου αντικειμένου πολιτιστικού ενδιαφέροντος που παρουσιάζει έντονη γεωμετρική πολυπλοκότητα. Το αντικείμενο που επιλέχθηκε για την παρούσα εφαρμογή και μοντελοποιήθηκε σε περιβάλλον 3D-CAD είναι μουσειακό αντίγραφο ειδώλιου κυκλαδικής τέχνης με ενδεικτικές διαστάσεις 150 x 55 x 8 mm (ύψος/μήκος/πλάτος), το οποίο εμπίπτει στην κατηγορία των αντικειμένων που περιγράφονται από επιφάνειες ελεύθερης μορφής (κατηγορία «γ», Κεφ. 6 ΔΕ). Έτσι, σε συνέχεια της Εφαρμογής 1 του Κεφαλαίου 8, στην παρούσα εφαρμογή η διερεύνηση εστιάζεται **στη γεωμετρική πιστότητα** των παραγόμενων μοντέλων CAD και στους παράγοντες που την επηρεάζουν. Σε αντίθεση με την Εφαρμογή 1, όπου το μέγεθος αυτό μπορεί να εκφραστεί ποσοτικά μέσω της απόκλισης των τιμών χαρακτηριστικών γεωμετριών (διάμετρος σφαίρας, απόσταση εδρών κ.α.), στην εφαρμογή αυτή η ποσοτική έκφρασή του γίνεται με τη χρήση στατιστικών στοιχείων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση κ.α.) καθώς και με τη χρήση της γεωμετρικής ανοχής πιστότητας επιφάνειας (*profile tolerance*) κατά ASME Y14.5M:2009.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι φάσεις και τα επιμέρους βήματα που πραγματοποιήθηκαν κατά την ψηφιακή αποτύπωση, την επεξεργασία νέφους σημείων και την

CAD μοντελοποίηση του ειδωλίου κυκλαδικής τέχνης στο λογισμικό Geomagic Studio. Η παρουσίαση αυτή συνοδεύεται από την αναφορά των εκάστοτε τιμών των παραμέτρων του λογισμικού που επιλέχθηκαν (οι οποίες παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα στο τέλος του κεφαλαίου) και από την οπτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της επίδρασής τους με την παράθεση σειράς χαρακτηριστικών εικόνων. Τα διαφορετικά μοντέλα CAD του αντικειμένου που δημιουργήθηκαν συγκρίνονται και αξιολογούνται ως προς τη γεωμετρική τους πιστότητα: (α) μεταξύ τους, (β) αντιπαραβαλλόμενα με το αρχικό νέφος σημείων από το οποίο προήλθαν μέσω προσαρμογής επιφανειών και (γ) με τη χρήση υψηλής ακρίβειας ΜΜΣ-ΤΓ με αισθητήρα επαφής.



Εικόνα 39: Όψεις και λεπτομέρειες του Κυκλαδικού ειδωλίου – Εφαρμογή 2

I – ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ CAD ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΥΝΤΗΡΗΤΙΚΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ

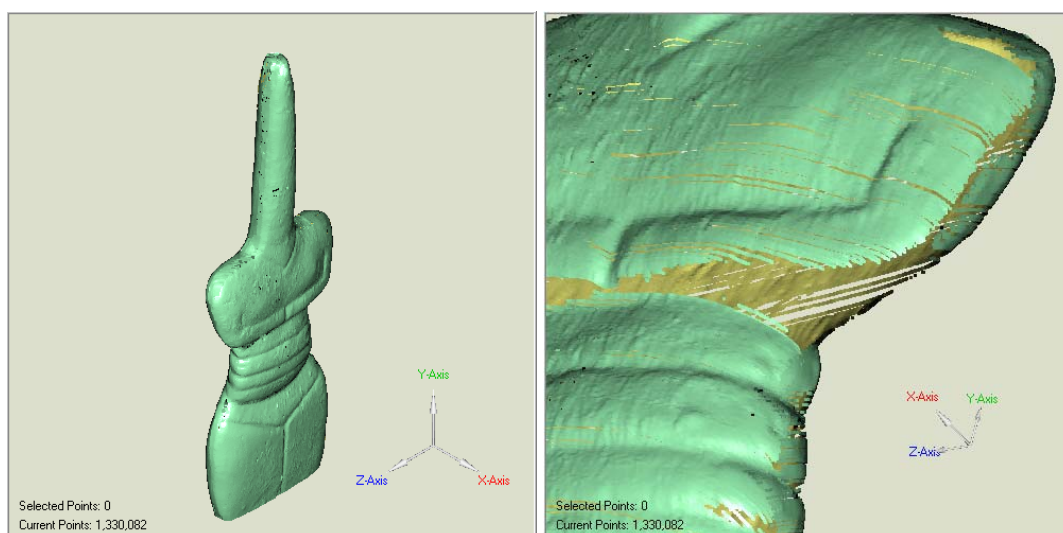
α. Προετοιμασία, τοποθέτηση και συγκράτηση

Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες η επιφάνεια του αντικειμένου είναι λευκή χωρίς να είναι γυαλιστερή. Τέτοιου είδους επιφάνειες διευκολύνουν σημαντικά τη σάρωση καθώς αποδίδουν σημεία χωρίς πολύ θόρυβο και δεν επηρεάζονται από αντανακλάσεις του φωτισμού περιβάλλοντος. Το αγαλματίδιο είναι πακτωμένο σε μαρμάρινη ορθογωνική βάση η διατήρηση της οποίας κρίθηκε απαραίτητη κατά την ψηφιακή σάρωση, καθώς προσέφερε ιδανική στήριξη χωρίς να παρεμβάλλεται μεταξύ του τεμαχίου και της δέσμης σάρωσης. Το αντικείμενο τοποθετήθηκε στον πάγκο εργασίας βαρέως τύπου του Εργαστηρίου ΤΚΠ-ΑΣ και συγκρατήθηκε από την ορθογωνική του βάση με κοινή μέγερνη εφαρμοστού.

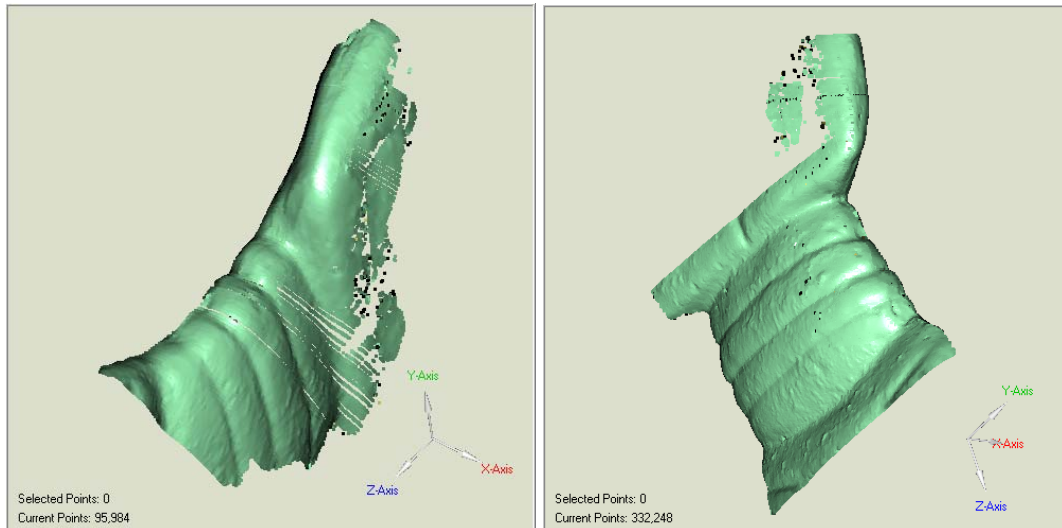
β. Ψηφιακή Σάρωση αντικειμένου με τη χρήση ΜΜΣ – ΑΒ /λέιζερ κάμερας

Για την εφαρμογή αυτή επιλέχθηκε η χρήση raw data (βλ. κεφάλαιο 8 ΔΕ) διότι ο συγκεκριμένος τύπος δεδομένων προσφέρει μέγιστο έλεγχο και διευρυμένη δυνατότητα επεξεργασίας στον χρήστη. Αντίθετα, τα δεδομένα τύπου ordered προτιμώνται σε περιπτώσεις μεγαλύτερων διαστάσεων και περιορισμένου χρόνου επεξεργασίας, παρέχοντας μία πιο γρήγορη προσέγγιση. Η αρχική σάρωση πραγματοποιήθηκε με κατεύθυνση από την κορυφή προς τη βάση, με σταθερές επαναλαμβανόμενες κινήσεις. Η διαδικασία μπορεί να παραλληλιστεί με την απόπειρα βαφής του αντικειμένου με την χρήση πινέλου.

Μετά το πέρας της αρχικής σάρωσης, παρατηρήθηκε ότι στις περιοχές κάτω από τους αγκώνες το νέφος σημείων δεν επαρκούσε. Αυτό ήταν αποτέλεσμα της αδυναμίας πρόσβασης της δέσμης σάρωσης στη συγκεκριμένη περιοχή λόγω τοποθέτησης του αντικειμένου. Συνεπώς το αντικείμενο τοποθετήθηκε εκ νέου στο πλάι για δύο συμπληρωματικές/ επιμέρους σαρώσεις. Κάτι τέτοιο κρίθηκε απαραίτητο για την συμπλήρωση του τελικού νέφους σημείων και αποτελεί συνήθη πρακτική κατά την ψηφιακή σάρωση αντικειμένων στα οποία δεν είναι δυνατόν η δέσμη λέιζερ να έχει πλήρη πρόσβαση στο σύνολο της επιφάνειάς τους με ένα μόνο «δέσιμο».



Εικόνα 40: Πρώτη σάρωση Κυκλαδικού ειδωλίου – Εφαρμογή 2

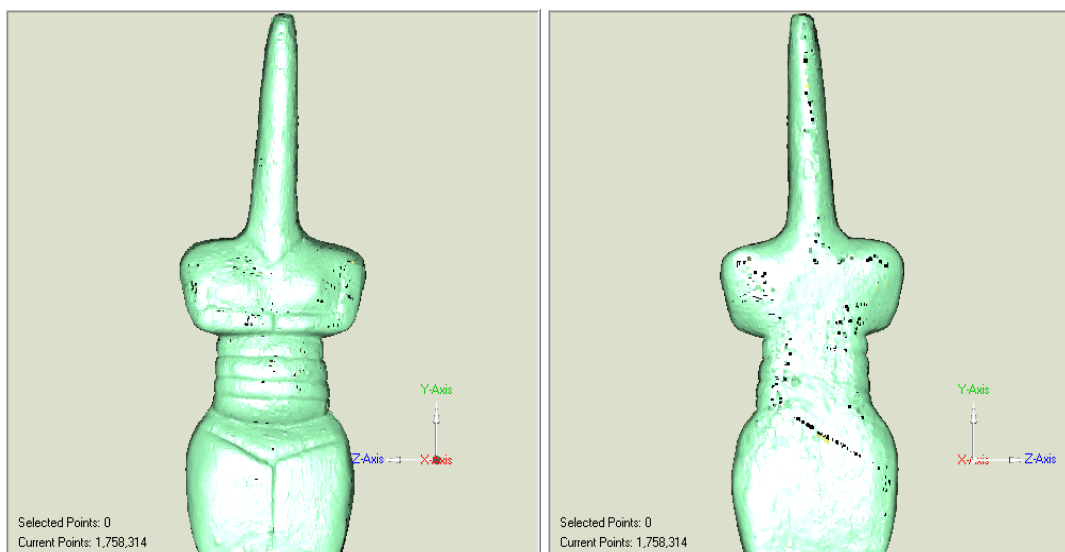


Εικόνα 41: Συμπληρωματικές/ επιμέρους σαρώσεις

ΦΑΣΗ 1 -- Επεξεργασία / Διαχείριση νέφους σημείων

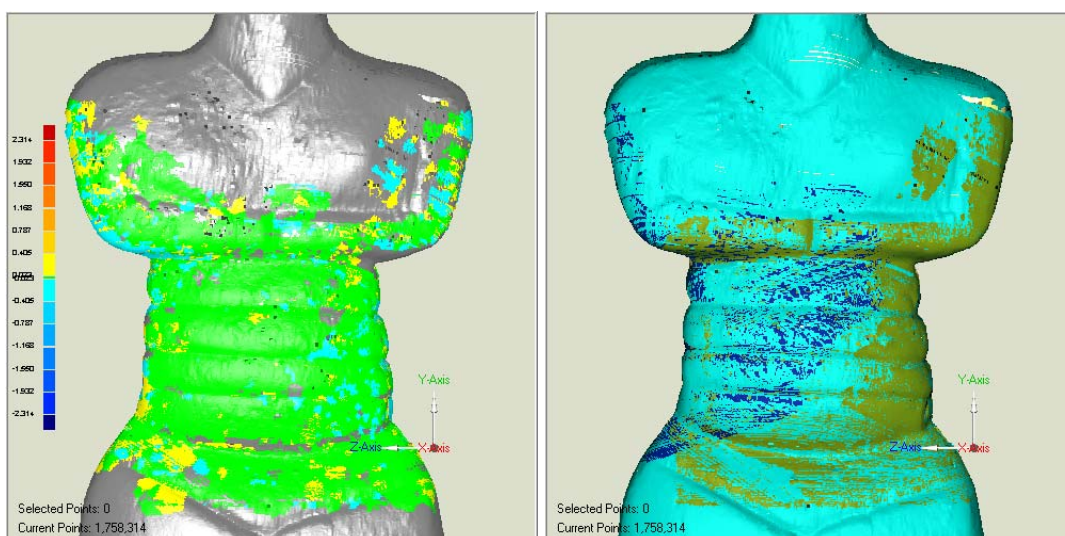
γ. Σύνθεση επιμέρους σαρώσεων

Τα τρία διακεκριμένα νέφη σημείων που προέκυψαν από τις παραπάνω επιμέρους σαρώσεις επανατοποθετήθηκαν/ επανασυνδέθηκαν υπολογιστικά με τη χρήση του λογισμικού Geomagic Studio στον χώρο ώστε να δημιουργήσουν το πλήρες αντικείμενο. Αυτό πραγματοποιήθηκε μέσω της εντολής **Manual Registration**, όπου ο χρήστης επέλεξε διαισθητικά κάποια σημεία που ήταν κοινά στα επιμέρους νέφη. Συγκεκριμένα θεωρήθηκε σταθερό το νέφος της πρώτης σάρωσης και επάνω του προσαρμόστηκαν τα δύο εναπομείναντα νέφη. Το συνολικό πλήθος σημείων που προέκυψε από την τελική σύνθεση των τριών νεφών ανέρχεται σε $1,8 \times 10^6$ περίπου. Ορισμένα μαύρα στίγματα που διακρίνονται στην Εικόνα 41 και 41 είναι αποτέλεσμα σκίασης αυτών λόγω της θέσης της εικονικής πηγής φωτός κατά την απεικόνιση στο λογισμικό.



Εικόνα 42: Όψεις του αντικειμένου μετά το Manual Registration

Η εκτέλεση της εντολής **Global Registration** θεωρήθηκε ως απαραίτητο επόμενο βήμα, καθώς αυτή επιτρέπει στο λογισμικό να βελτιώσει τη σύνθεση των τριών νεφών εκτελώντας ένα πλήθος επαναληπτικών αριθμητικών δοκιμών. Στην Εικόνα 43α με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές όπου τα σημεία από διαφορετικές σαρώσεις σχεδόν ταυτίζονται. Στην Εικόνα 43β τα διαφορετικά χρώματα αντιπροσωπεύουν τις τρεις διαφορετικές σαρώσεις. Τέτοιες οπτικοποιήσεις βοηθούν τον χρήστη να κρίνει ποιοτικά αν το αποτέλεσμα της σύνθεσης είναι ικανοποιητικό. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι ενδείξεις θεωρήθηκαν ότι πληρούν τα κριτήρια της εφαρμογής, καθώς γίνεται αντιληπτό ότι οι τρεις σαρώσεις συντίθενται ομαλά, όπως υποδεικνύεται και στο εγχειρίδιο του λογισμικού.



Εικόνα 43: Οπτικοποίηση του αποτελέσματος της σύνθεσης των επιμέρους σαρώσεων

δ. Απομάκρυνση θορύβου

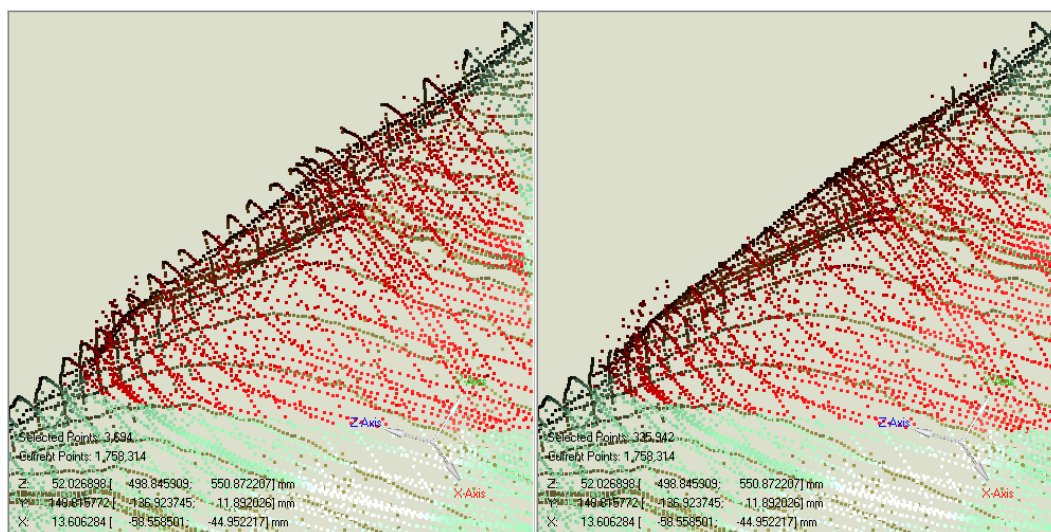
Το επόμενο βήμα που πραγματοποιήθηκε στη φάση επεξεργασίας του συνολικού πλέον νέφους σημείων είχε σαν στόχο την απομάκρυνση σημείων που ήταν ασύνδετα με το υπόλοιπο νέφος και συνεπώς χαρακτηρίζονται ως θόρυβος. Πρώτα εκτελέστηκε η εντολή **Select disconnected components**, θέτοντας το επίπεδο διαχωρισμού στην ένδειξη Medium και το μέγεθος στο 5.0. Το αποτέλεσμα ήταν να επιλεγούν και κατόπιν να απαλειφθούν 269 σημεία. Το πλήθος κρίνεται αρκετά μικρό σε σχέση με το σύνολο, γεγονός το οποίο συντελεί στην άποψη ότι πρόκειται για ένα αρκετά ποιοτικό νέφος σημείων (περιορισμένος θόρυβος).

Η εντολή **Select Outliers** που εκτελέστηκε αμέσως μετά είναι ακόμη πιο στοχευμένη στην απομάκρυνση θορύβου. Το λογισμικό διαθέτει μόλις μία παράμετρο προς ρύθμιση από τον χρήστη, την *εναισθησία*, επηρεάζοντας άμεσα το πλήθος των επιλεγόμενων σημείων, λαμβάνοντας τιμές από 0 έως 100%. Εκ των προτέρων η παράμετρος αυτή είναι ρυθμισμένη στο 66.667%, αποδίδοντας για τη συγκεκριμένη περίπτωση 26.620 σημεία. Για επιλογή τιμής 50% τα αποδιδόμενα σημεία ήταν 11,397, ενώ για την τιμή 80% το πλήθος ανήλθε σε 64,588 σημεία. Ακολουθήθηκε στην φάση αυτή η πρώτη επιλογή (50%) και τα επιλεγμένα σημεία απαλείφθηκαν.

Η εντολή περιορισμού θορύβου (**Reduce Noise**) αντισταθμίζει τα σφάλματα/ θόρυβο της σάρωσης μετακινώντας ορισμένα σημεία στις στατιστικά θεωρούμενες από το λογισμικό ως πραγματικές θέσεις. Λόγω των σφαλμάτων αυτών είναι δυνατόν οξείες ακμές να εμφανίζονται περισσότερο αμβλείες και αντίθετα ήπιες καμπύλες πιο έντονες. Το αποτέλεσμα της εντολής είναι η δημιουργία ενός πιο ομοιόμορφου νέφους σημείων που καθιστά ομαλότερη την διαδικασία μετάβασης στην φάση τριγώνων. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων της εντολής για το ειδώλιο, επιλέχθηκε μία μικρή περιοχή της επιφάνειάς του.

Η μέθοδος που επιλέχθηκε είναι αυτή για ελεύθερης μορφής επιφάνειες, δίνοντας προτεραιότητα στην διατήρηση των καμπυλοτήτων. Σε αντίθετη περίπτωση, η εναλλακτική επιλογή είναι αυτή για πρισματικές επιφάνειες, όπου πρωτεύουσα σημασία έχει η διατήρηση των ακμών. Το επίπεδο ομαλότητας (**smoothness level**) ρυθμίστηκε στην μεσαία θέση (medium), καθώς στην ρύθμιση για μέγιστη ομαλότητα το αποτέλεσμα απέκλινε αισθητά από το πρωτότυπο μεταβάλλοντας τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά. Στην Εικόνα 44 γίνεται αντιληπτή η διαφορά μεταξύ των τριών ρυθμίσεων της εν λόγω παραμέτρου (*α: minimum smoothness, β: medium smoothness, γ: maximum smoothness*).

Αξίζει εδώ να τονιστεί ότι η έλλειψη σχετικής εμπειρίας στη διαχείριση παραμέτρων του λογισμικού καθώς και η υπερβολή στην εφαρμογή εντολών διαμόρφωσης μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε καταστροφική αλλοίωση της μορφής του παραγόμενου τελικά 3-D CAD μοντέλου.



Εικόνα 44: Διαμόρφωση επιφάνειας για διαφορετικές τιμές ομαλότητας

Η εφαρμογή της εντολής ομογενοποίησης (**Uniform Sample**) στοχεύει στην μείωση του πλήθους των σημείων σε τέτοιο βαθμό που να μην επηρεάζεται η διαμόρφωση της επιφάνειας. Αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο αφού μειώνοντας τα σημεία, μειώνονται αντίστοιχα και οι απαραίτητοι χρόνοι υπολογισμού κατά τη μετέπειτα επεξεργασία. Κρίθηκε σκόπιμο, στην παρούσα εφαρμογή και λαμβάνοντας υπόψη την ιδιαιτερότητα του αντικείμενου πολιτιστικής κληρονομιάς, να επιλεχθεί ως μέγιστη προτεραιότητα η διατήρηση της καμπυλότητας και η μη διαγραφή των συνοριακών σημείων. Έτσι, ύστερα από δοκιμές, ως στόχος τέθηκαν τα 200,000 σημεία διότι εκτιμήθηκε ότι αυτό το πλήθος αρκεί ώστε να

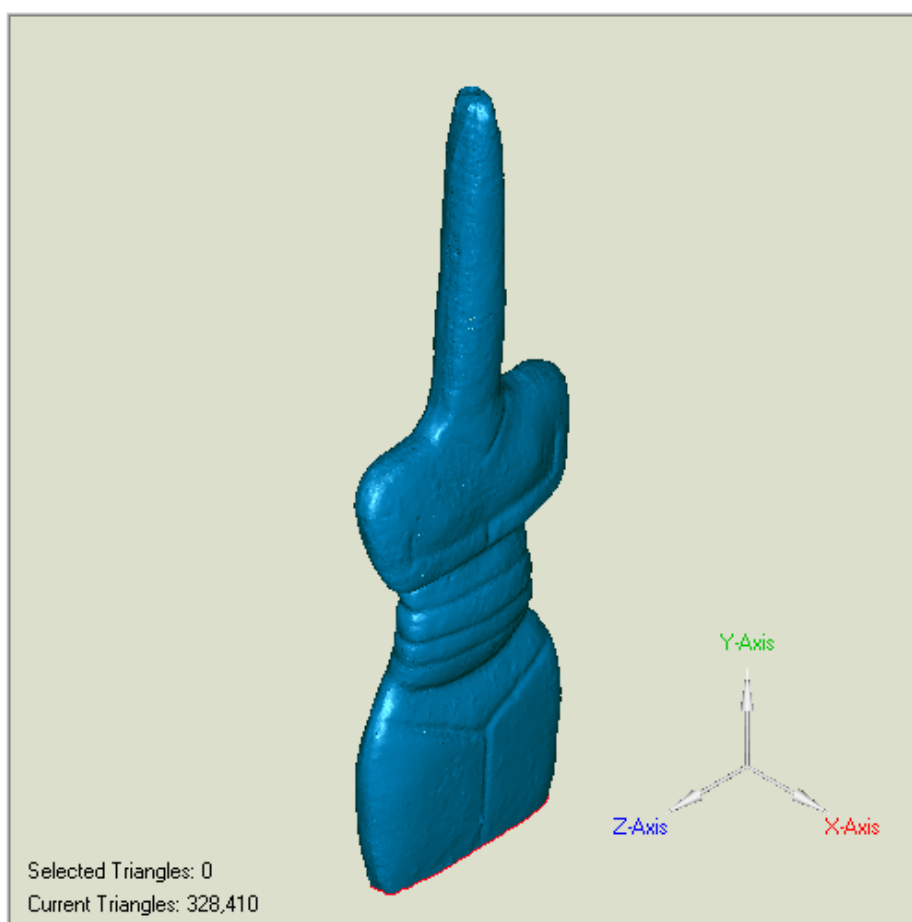
διατηρηθούν τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου χωρίς περιττή πληροφορία, γεγονός το οποίο θα οδηγούσε στην δημιουργία ενός ογκώδους και δύσχρηστου ψηφιακού αρχείου.

ε. Ομογενοποίηση και συγχώνευση σημείων

Η τελευταία εντολή που πραγματοποιήθηκε κατά την Φάση 1 (διαχείριση νέφους) ήταν η συγχώνευση (**Merge**), όπου οι τρεις διαφορετικές σαρώσεις συνενώθηκαν σε μία. Μία από τις λειτουργίες της εντολής αυτής είναι ότι φιλτράρει τα διαθέσιμα σημεία και χρησιμοποιεί τα πλέον κατάλληλα για τον σχηματισμό, σε επόμενη φάση, του πολυγωνικού μοντέλου. Στην περίπτωση παράκαμψης αυτής της διαδικασίας, το λογισμικό επιχειρώντας να δημιουργήσει επιφάνειες από κάθε σάρωση, θα οδηγήσει στην εμφάνιση πτυχώσεων και ανωμαλιών.

ΦΑΣΗ 2 -- Φάση πολυγώνων

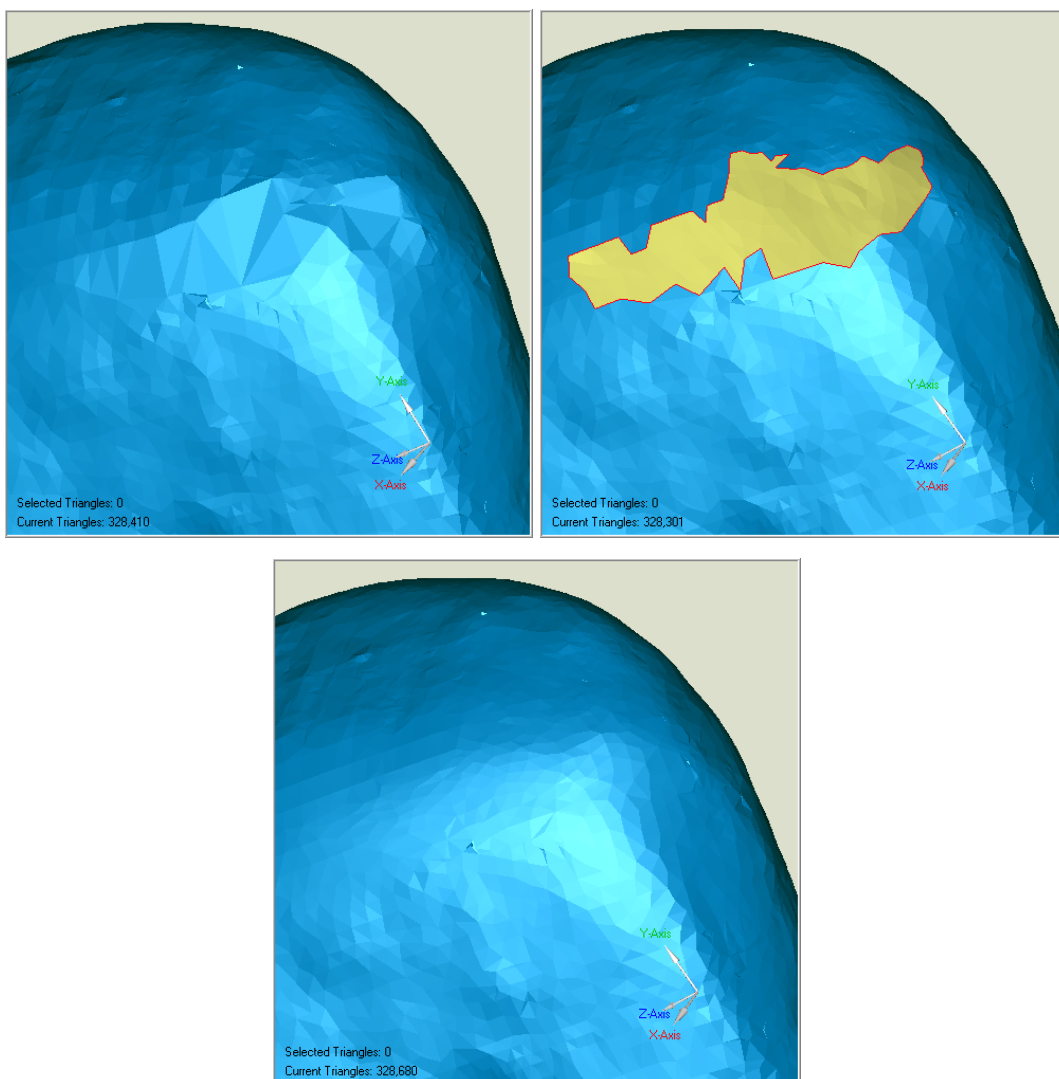
Από το νέφος σημείων, όπως αυτό διαμορφώθηκε μετά την παραπάνω επεξεργασία, περνάμε με τη χρήση της εντολής **wrap** στην επόμενη φάση κατά την οποία το αντικείμενο περιγράφεται πλέον με πολύγωνα (*polygon phase*). Ειδικότερα, η προσέγγιση που ακολουθείται από το λογισμικό είναι η «ένωση» των διαθέσιμων σημείων του νέφους και η προσαρμογή τριγώνων με αποτέλεσμα το ηλεκτρονικό μοντέλο CAD του αντικειμένου να έχει άμεσα τη δυνατότητα εξαγωγής σε μορφή αρχείου stl, και να είναι άμεσα αξιοποιήσιμο για εφαρμογές RP/CAM/CAE. Το μοντέλο του Κυκλαδικού ειδωλίου σε αυτή την φάση αποτελείται από 328,410 τρίγωνα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 45.



Εικόνα 45: Αρχικό πολυγωνικό μοντέλο Κυκλαδικού ειδωλίου

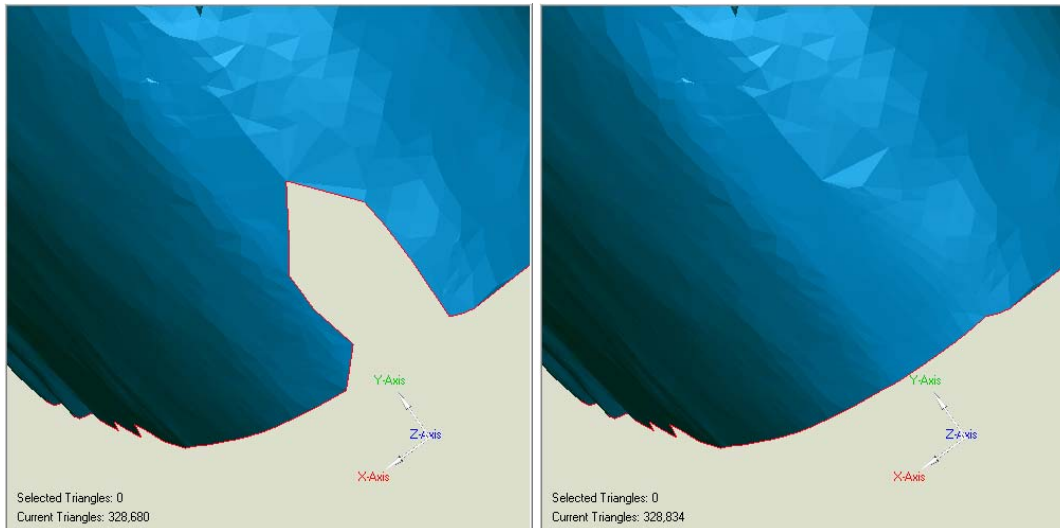
στ. Επεξεργασία ατελειών μοντέλου πολυγώνων

Μετά από οπτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων της εντολής wpar, παρατηρήθηκαν ορισμένες ανωμαλίες στην επιφάνεια του μοντέλου πολυγώνων. Συγκεκριμένα, ανωμαλία παρατηρήθηκε στο εμπρός μέρος του αριστερού ώμου, που εκτιμάται ότι προκλήθηκε λόγω μη επαρκούς πλήθους σημείων στην περιοχή (Εικόνα 46α). Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε διαγράφοντας χειροκίνητα τα ακατάλληλα πολύγωνα (Εικόνα 46β), και εκτελώντας την εντολή πλήρωσης οπών με την μέθοδο «πλήρωση βάσει καμπυλότητας», η οποία κάλυψε την οπή υπολογίζοντας την καμπυλότητα της περιοχής από τα γειτονικά πολύγωνα. Η αξιοπιστία της προσέγγισης της γειτονικής περιοχής, σε συνδυασμό με το εύρος της οπής οπωσδήποτε επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα της εν λόγω εντολής και την επίδρασή που αυτή τελικά έχει στη γεωμετρική πιστότητα του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το αποτέλεσμα (Εικόνα 46γ) κρίθηκε ικανοποιητικό, καθώς φαίνεται να διατηρεί τα χαρακτηριστικά του πρωτοτύπου.



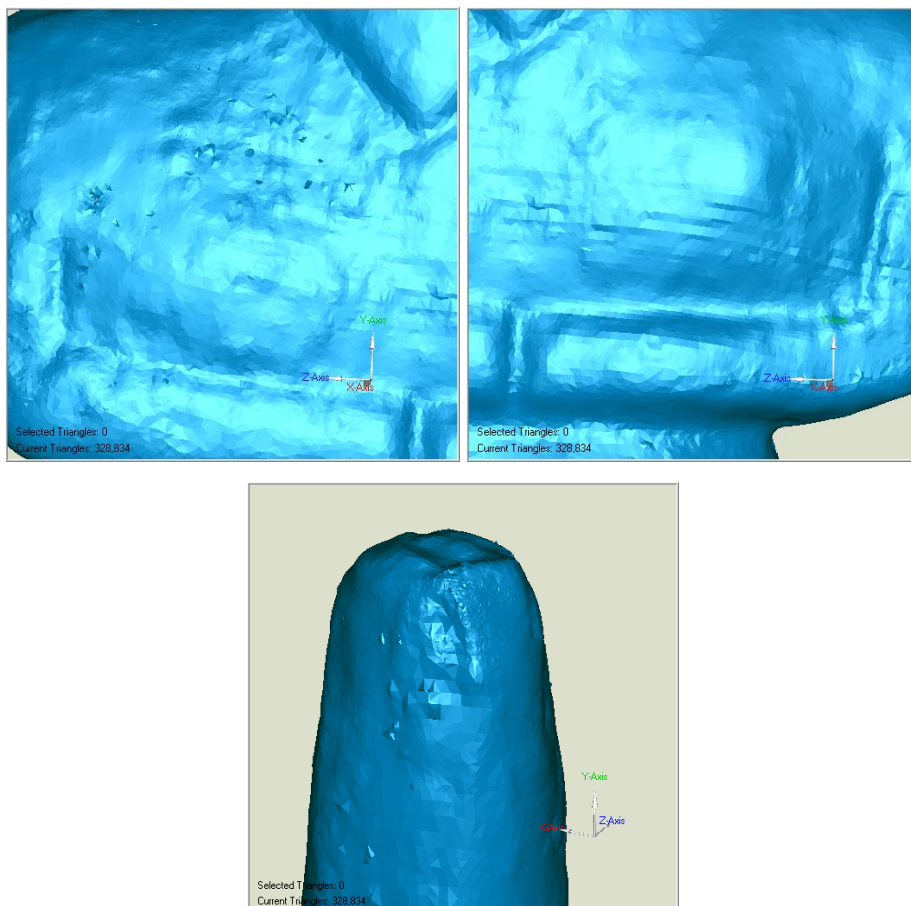
Εικόνα 46: Επιδιόρθωση οπής στο μοντέλο πολυγώνων

Με την χρήση της επιλογής *Fill Partial* διορθώθηκε αντίστοιχα και η ανωμαλία που επισημάνθηκε στην περιοχή του κάτω μέρους του αριστερού ποδιού όπως φαίνεται στην Εικόνα 47.



Εικόνα 47: Συμπλήρωση ανοικτού τμήματος

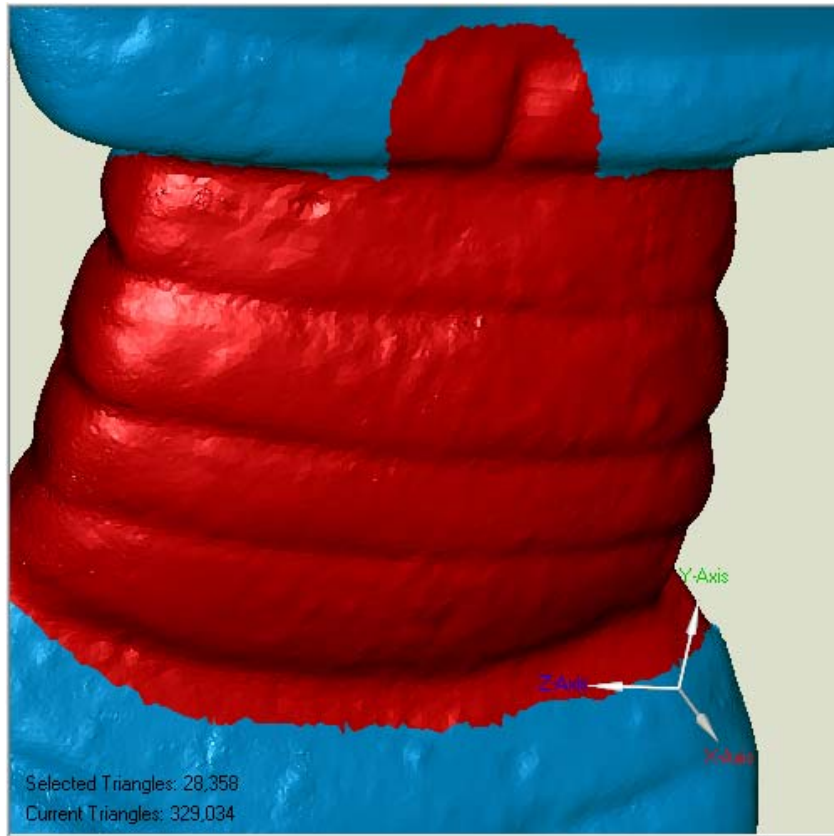
Εξετάζοντας συνολικά το μοντέλο πολυγώνων παρατηρήθηκαν κάποιες ατέλειες στην επιφάνεια. Μερικές αντιπροσωπευτικές εμφανίζονται στην Εικόνα 48.



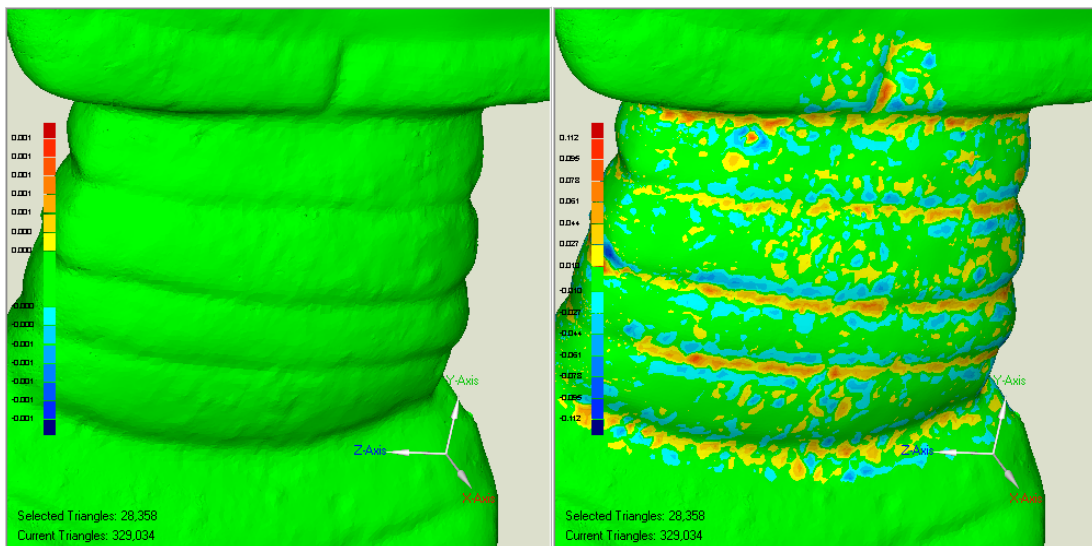
Εικόνα 48: Ατέλειες στην επιφάνεια του μοντέλου πολυγώνων

Προκειμένου να εξομαλυνθούν αυτές οι διαμορφώσεις, εκτελέστηκε η εντολή «χαλάρωσης» πολυγώνων (*Relax Polygons*). Η εντολή λειτουργεί ως «λείανση», τροποποιώντας κατάλληλα τις γωνίες που σχηματίζουν τα επίπεδα δύο γειτονικών τριγώνων, όταν αυτές θεωρούνται

ακραίες. Οι δύο παράμετροι που τίθενται στην κρίση του χρήστη είναι η ομαλότητα (*Smoothness Level*), που προσομοιώνει το πλήθος κινήσεων κατά την λείανση ενός υποθετικού πήλινου μοντέλου, και η ένταση (*Strength*), που μπορεί να συγκριθεί με την πίεση κάθε κίνησης. Ο στόχος είναι η επιλογή τέτοιων τιμών ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση των γεωμετρικών/ μορφολογικών χαρακτηριστικών του πρωτοτύπου αντικειμένου και η ταυτόχρονη εξομάλυνση των αφύσικων επιφανειών. Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης επιλέχθηκε αρχικά μία περιοχή της επιφάνειας του μοντέλου και τα αποτελέσματα των δοκιμών εμφανίζονται στις παρακάτω εικόνες.

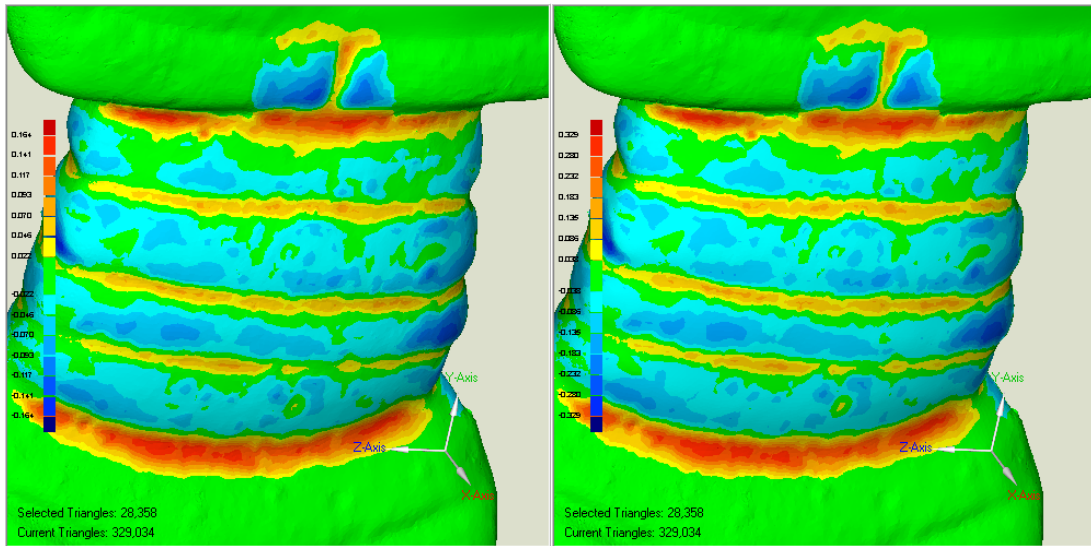


Εικόνα 49: Δοκιμαστική περιοχή χωρίς εφαρμογή χαλάρωσης πολυγώνων



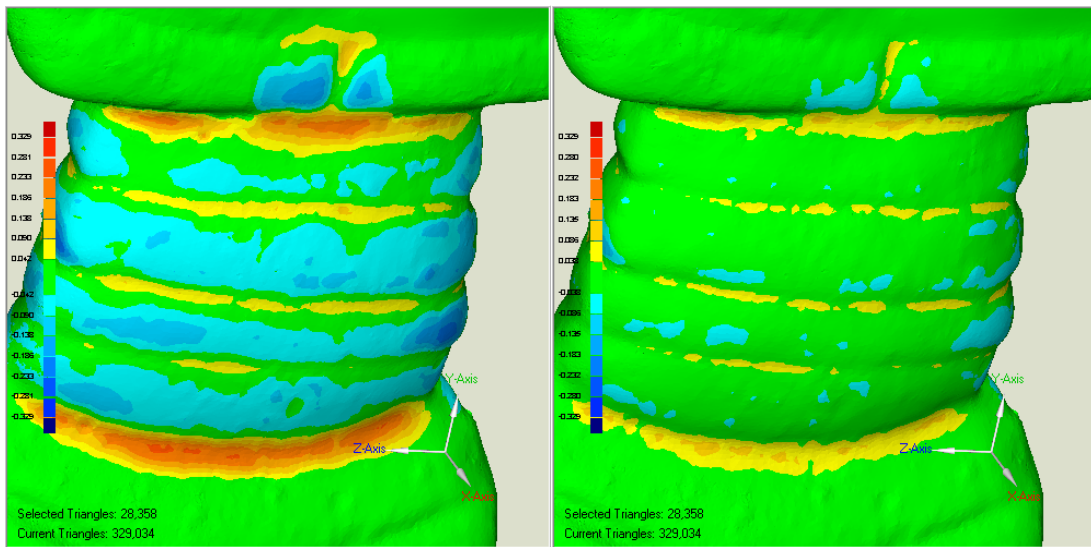
(α) Ελάχιστη ομαλότητα, ανεξάρτητα έντασης

(β) Μέγιστη ομαλότητα, ελάχιστη ένταση



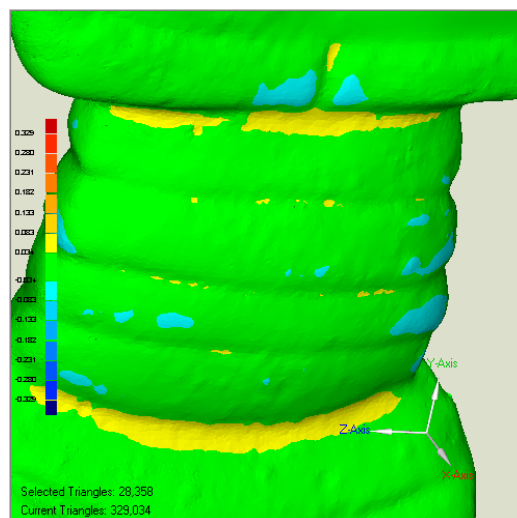
(γ) Ομαλότητα 5/9, ένταση 5/9

(δ) Μέγιστη ομαλότητα, ένταση 5/9



(ε) Ομαλότητα 5/9, μέγιστη ένταση

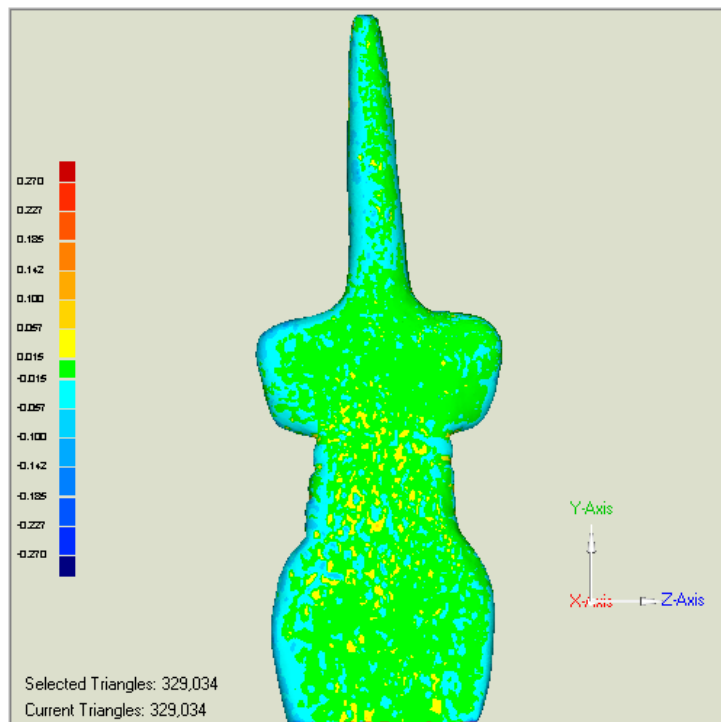
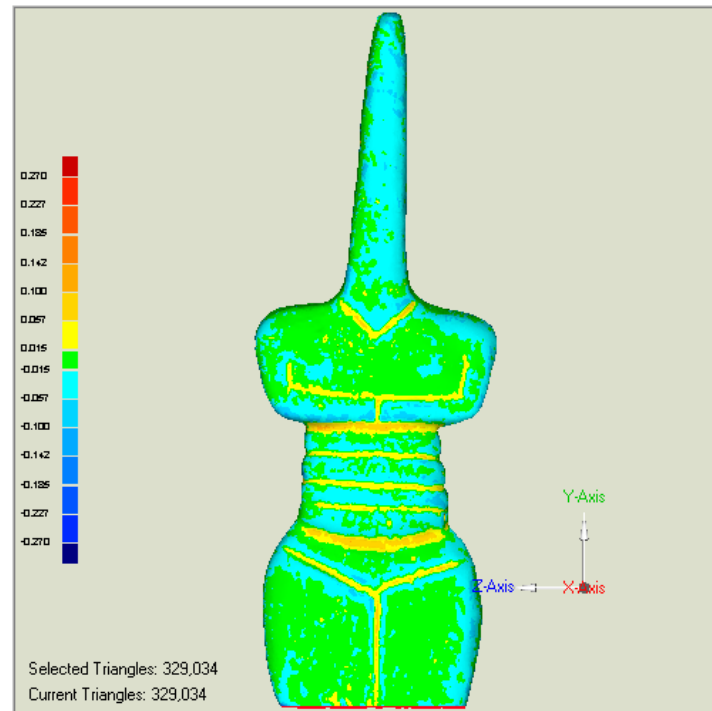
(στ) Ομαλότητα 5/9, ένταση 3/9



(ζ) Ομαλότητα 3/9, ένταση 5/9

Εικόνα 50: Αποτελέσματα για διάφορες τιμές ομαλότητας και έντασης χαλάρωσης

Τελικά επιλέχθηκε εδώ ο συνδυασμός *(ομαλότητα 5/9, ένταση 3/9)* διότι τα αποτελέσματα που απέφερε κρίθηκαν ικανοποιητικά με βάση το σκεπτικό της διατήρησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πρωτοτύπου (επιφανειακές ανωμαλίες στο Κυκλαδικό ειδώλιο). Κατόπιν, με αυτές τις ρυθμίσεις εφαρμόστηκε η εντολή χαλάρωσης και στην υπόλοιπη επιφάνεια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό την μορφή θερμικών διαγραμμάτων στην Εικόνα 5050. Από τα στατιστικά στοιχεία που παρέχει το λογισμικό, υπολογίστηκε ότι η μέγιστη μετακίνηση ήταν 0.2699mm και η μέση τιμή των μετακινήσεων 0.0147mm.

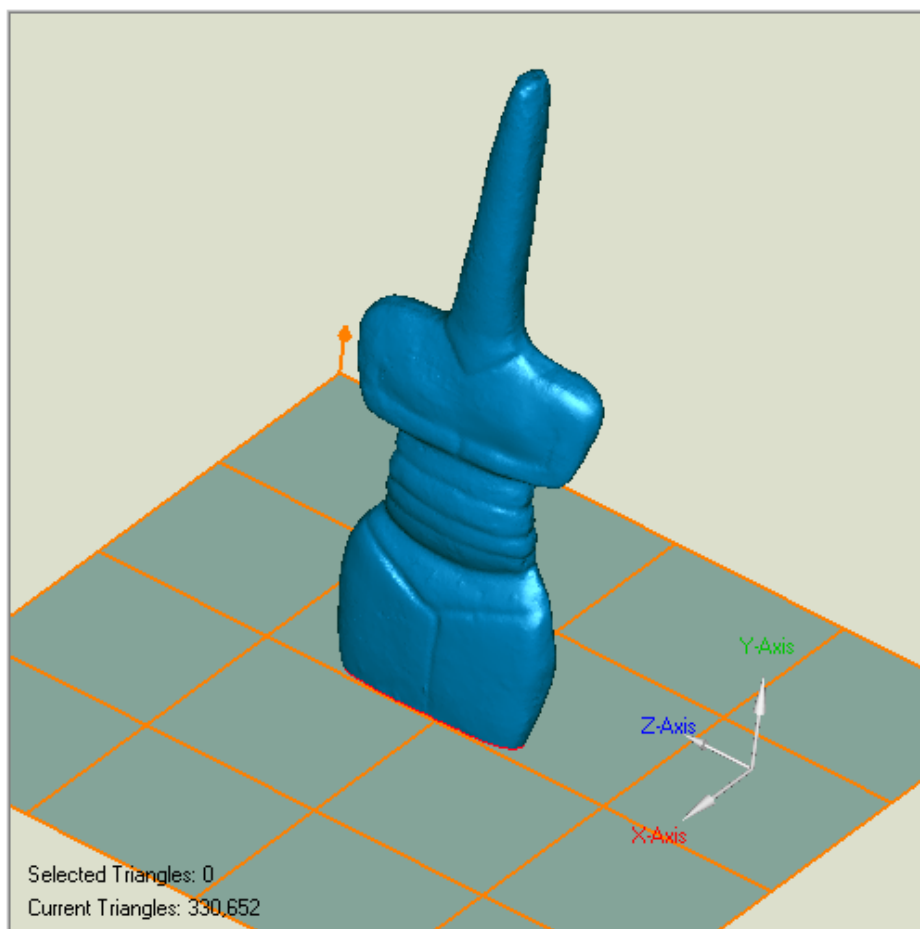


Εικόνα 51: Εφαρμογή χαλάρωσης στο σύνολο των πολυγώνων

ΦΑΣΗ 3 – Δημιουργία CAD μοντέλου επιφανειών

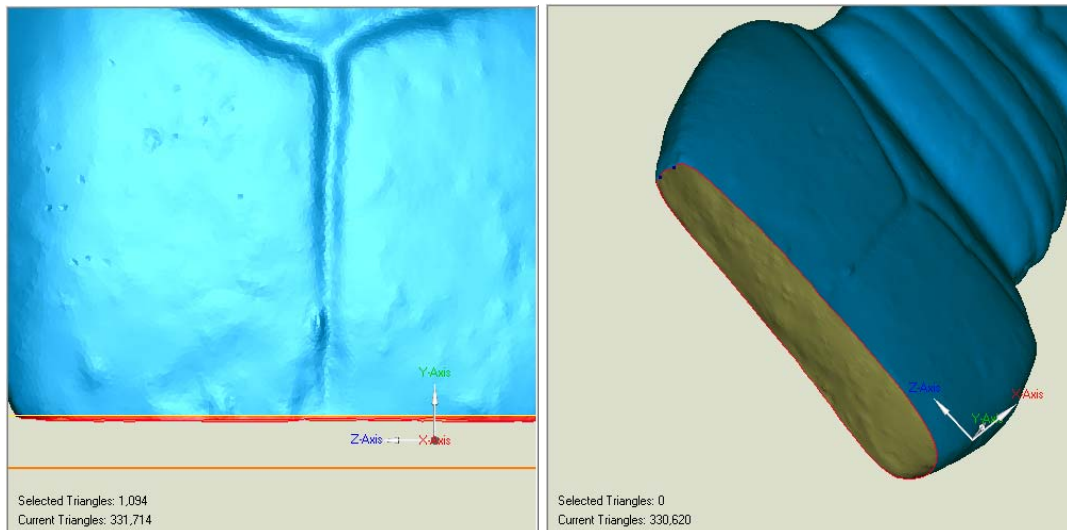
ζ. Επεξεργασία - Κλείσιμο “water tight” του μοντέλου

Το λογισμικό Geomagic Studio παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας Αναφορών (Datums), όπως άξονες, επίπεδα και σημεία. Εκτελώντας την εντολή δημιουργίας αναφορών (**Create Datums**) κατασκευάστηκε το επίπεδο 1 παράλληλο στο επίπεδο XZ και σε απόσταση 140mm από αυτό (Εικόνα 52).

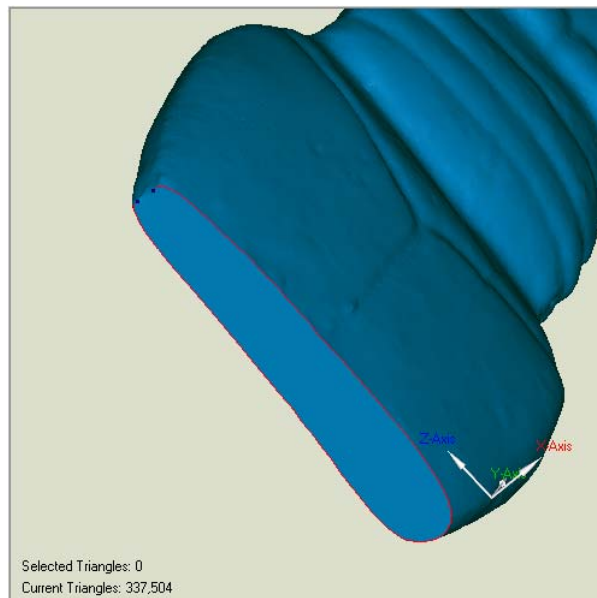


Εικόνα 52: Κατασκευή επιπέδου αναφοράς 1

Κάνοντας χρήση του επιπέδου αναφοράς 1 και της εντολής τομής με επίπεδο (**Section By Plane**), αποκόπηκαν ορισμένα τρίγωνα από την βάση του μοντέλου δημιουργώντας ένα επίπεδο χείλος, όπως διακρίνεται στην Εικόνα 53. Η οπή καλύφθηκε μέσω της εντολής συμπλήρωσης οπών (Fill Holes) απειλώνοντας την λειτουργία ανίχνευσης καμπυλότητας (Εικόνα 54).



Εικόνα 53: Καθαρισμός του χείλους της βάσης του μοντέλου



Εικόνα 54: Κάλυψη οπής βάσης

Αυτή η εργασία εκτελέστηκε ώστε να δημιουργηθεί μία ευπαρουσίαστη βάση εφόσον δεν υπήρχαν δεδομένα σάρωσης για την περιοχή αυτή.

Σε αυτή τη φάση, το μοντέλο είναι πλέον «κλειστό»/ συνεχές (**water-tight**) και ο όγκος του μπορούσε να υπολογιστεί σε $34,941 \text{ mm}^3$. Η εντολή υπολογισμού όγκου μπορεί να φανεί χρήσιμη στον υπολογισμό της μάζας εάν είναι γνωστή η πυκνότητα του υλικού. Οι βασικές διαστάσεις υπολογίστηκαν:

-Ύψος:	151.74mm	(άξονας Y)
-Πλάτος:	25.86mm	(άξονας Z)
-Βάθος:	6.73mm	(άξονας X)

Μία ακόμη χρήσιμη πληροφορία που προσφέρει το λογισμικό είναι ο υπολογισμός του κέντρου μάζας και την αποθήκευσή του ως σημείο Αναφοράς (Datum).

Ο τελικός αριθμός τριγώνων ανέρχεται σε 337,504. Παρέχεται η δυνατότητα περαιτέρω μείωσης των τριγώνων και συνακόλουθης μείωσης του μεγέθους του ηλεκτρονικού αρχείου του μοντέλου με την χρήση της εντολής **Decimate Polygons**, όπου το λογισμικό διατηρεί περισσότερα τρίγωνα σε περιοχές έντονης διακύμανσης της γεωμετρίας, απαλείφοντας αντίστοιχα από άλλες πιο απλές επιφάνειες.

Μέσω της εντολής **Shape Phase** πραγματοποιείται η μετάβαση από το μοντέλο πολυγώνων στο **CAD μοντέλο επιφανειών** το οποίο μπορεί να εισαχθεί σε αντίστοιχα σχεδιαστικά πακέτα λογισμικού CAD για περαιτέρω επεξεργασία με σχεδιαστικά πλέον εργαλεία (π.χ. τροποποίηση της μορφής της επιφάνειας, διάνοιξη οπών κ.α.). Εναλλακτικά, παρέχεται η δυνατότητα μέσω της εντολής **Auto-Surface**, να δημιουργηθεί το αντίστοιχο CAD μοντέλο με προσέγγιση καμπυλών τύπου NURBS, χάνοντας σε ακρίβεια, αλλά πλεονεκτώντας σε ευκολία επέμβασης σε 3D σχεδιαστικό περιβάλλον. Για την παρούσα εφαρμογή, δεν κρίθηκε απαραίτητη μια τέτοια ενέργεια.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση δημιουργήθηκε ηλεκτρονικό αρχείο τύπου IGES, που μαζί με το format STEP αποτελεί το κυρίαρχο «ουδέτερο» format ανταλλαγής δεδομένων στα σύγχρονα συστήματα 3D-CAD. Έτσι, ως τελικό αποτέλεσμα του συνόλου των φάσεων και των επιμέρους βημάτων της διαδικασίας που περιγράφηκε στις παραπάνω παραγράφους δημιουργήθηκε το αρχικό 3D-CAD μοντέλο του Κυκλαδικού ειδωλίου, με τίτλο **Eidolio 1-1.igs**

II – ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ CAD ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΕΠΙΘΕΤΙΚΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ

Με αφετηρία **το ίδιο αρχικό νέφος σημείων** όπως προέκυψε από τα παραπάνω βήματα *α. – γ.* και μετά από την επανάληψη των υπολοίπων βημάτων *δ. – ζ.* δημιουργήθηκε ένα νέο, δεύτερο 3D-CAD μοντέλο του Κυκλαδικού ειδωλίου, με τίτλο **Eidolio 1-2.igs**

Οι παράμετροι των εντολών/ επιλογών του λογισμικού Geomagic Studio που αναφέρθηκαν στα βήματα *δ. – ζ.* ρυθμίστηκαν στην περίπτωση αυτή έτσι ώστε η συνολική αντιμετώπιση της διαδικασίας να έχει έναν πιο «επιθετικό» χαρακτήρα. Αυτό συνεπάγεται εντονότερη απαλοιφή θορύβου και περίπου τα μισά σε πλήθος (165,241) πολύγωνα (βήμα *ε.*) σε σχέση με το μοντέλο που ήδη περιγράφηκε. Στον Πίνακα *Φάσεων – Βημάτων – Παραμέτρων* που παρατίθεται στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου δίδονται συγκεντρωτικά οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν καταρχήν για τη δημιουργία του CAD μοντέλου **Eidolio 1-1.igs**. Οι τιμές αυτές, προσαυξημένες κατά 30% οδήγησαν στη δημιουργία του νέου, «επιθετικού» CAD μοντέλου (π.χ. *select outliers*: για το **Eidolio 1-1.igs** = 50% ενώ για το **Eidolio 1-2.igs** = 80%).

Όπως έγινε φανερό από τη μέχρι τώρα περιγραφή της διαδικασίας, οι επιλογές και οι ρυθμίσεις των παραμέτρων του λογισμικού αφήνουν σημαντικό περιθώριο υποκειμενικών εκτιμήσεων και εξαρτώνται κατά πολύ από τη σχετική εμπειρία του χρήστη. Η επίδραση των εν λόγω παραμέτρων και η συνολικότερη συμβολή του λογισμικού στη γεωμετρική πιστότητα και τελικά στην αβεβαιότητα της διαδικασίας ψηφιακής αποτύπωσης / 3D-CAD μοντελοποίησης μόνον πειραματικά μπορεί να διερευνηθεί/ ποσοτικοποιηθεί. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν τα δύο παραπάνω CAD μοντέλα («*συντηρητικό*»: **Eidolio 1-1.igs** και «*επιθετικό*»: **Eidolio 1-2.igs**) του Κυκλαδικού ειδωλίου, εφόσον, όπως ήδη έχει αναφερθεί, η διερεύνηση αυτή αποτελεί τον κύριο στόχο της παρούσας ΔΕ.

III – ΑΝΤΙΠΑΡΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ CAD – ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΠΙΣΤΟΤΗΤΑ

i. Αντιπαραβολή των CAD μοντέλων *Eidolio 1-1.igs* και *Eidolio 1-2.igs*

Η αντιπαραβολή των CAD μοντέλων *Eidolio 1-1.igs* και *Eidolio 1-2.igs* πραγματοποιήθηκε με την χρήση της εντολής *3D Compare* του λογισμικού Geomagic Studio, η οποία δημιούργησε μία τρισδιάστατη χρωματικά κωδικοποιημένη χαρτογράφηση των γεωμετρικών αποκλίσεων μεταξύ των δύο μοντέλων. Για κάθε σημείο του ενός CAD μοντέλου, το λογισμικό μέτρησε την απόσταση από το εγγύτερο σημείο του άλλου CAD μοντέλου.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το αποτέλεσμα της εν λόγω σύγκρισης. Για την ευχερέστερη απεικόνιση επιλέχθηκαν 15 χρωματικές αποχρώσεις, που αντιστοιχούν σε αριθμητική κλιμάκωση των γεωμετρικών αποκλίσεων. Σχετικά με τα αποτελέσματα της αντιπαραβολής, επισημαίνονται συνοπτικά τα παρακάτω στατιστικά μεγέθη:

Μέγιστη απόσταση : θετική 0.265mm. αρνητική -0.337mm

Μέση τιμή θετικών αποκλίσεων: **0.022mm**

Μέση τιμή αρνητικών αποκλίσεων: **-0.030mm**

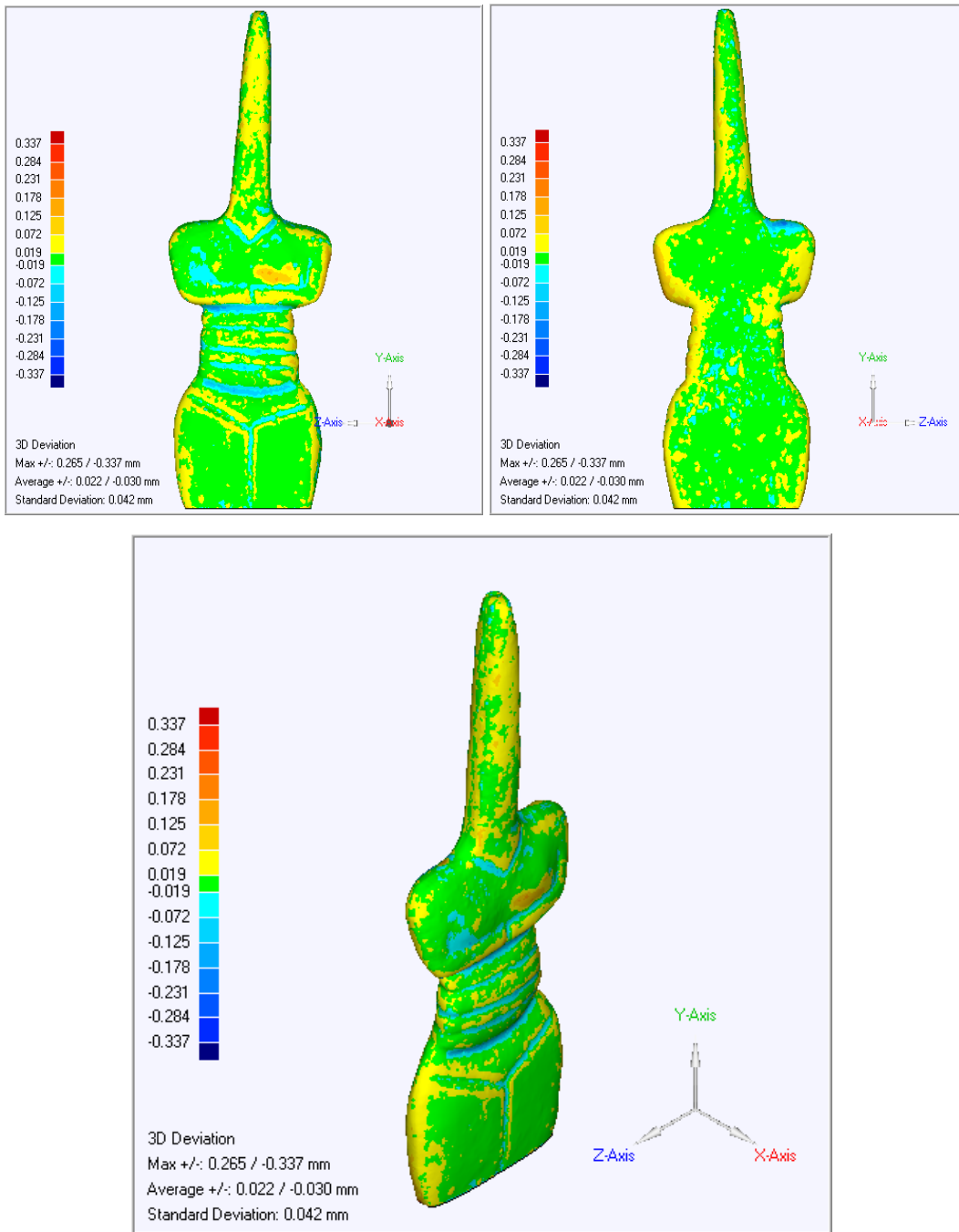
Μέση απόκλιση (ως άθροισμα των δύο παραπάνω αποκλίσεων): -0.008mm

Τυπική απόκλιση: **0.042mm**

Πράσινη περιοχή: (-0.019mm , 0.019mm)

Ως γενικές παρατηρήσεις μπορούν εδώ να σημειωθούν οι εξής:

- Οι τιμές της μέγιστης θετικής κι αρνητικής απόκλισης εμφανίζονται μεν αρκετά μεγάλες αποδίδονται δε στην ύπαρξη / διατήρηση μεμονωμένων σημείων που δεν χαρακτηρίζουν συνολικά τις επιφάνειες των δύο CAD μοντέλων και που οφείλονται κυρίως στην κάπως αυθαίρετη διαμόρφωση της βάσης/ χείλους, στο «τελείωμα» του αντικειμένου με τη χρήση του Επιπέδου Αναφοράς 1 (β. παραπάνω βήμα ζ.),
- Οι μέση τιμή της θετικής κι αρνητικής γεωμετρικής απόκλισης καθώς και η τυπική απόκλιση της κατανομής εμφανίζονται αρκετά περιορισμένες. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα δύο CAD μοντέλα ελάχιστη γεωμετρική απόκλιση έχουν μεταξύ τους. Έτσι τεκμηριώνεται πειραματικά ότι η επίδραση των παραμέτρων του λογισμικού, όπως αυτές διαφοροποιούνται κατά την «συντηρητική» και «επιθετική» αντιμετώπιση, δεν συνεισφέρουν ουσιαστικά στην διαφοροποίηση της πιστότητας του παραγόμενου CAD μοντέλου. Ενισχύεται με τον τρόπο αυτό η άποψη ότι το εύρος της αβεβαιότητας στο παραγόμενο/ τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται κυρίως από παράγοντες που σχετίζονται με το υλισμικό (Μηχανή ΜΜΣ-ΑΒ και λέιζερ κάμερα) και τις συνθήκες ψηφιακής αποτύπωσης (θερμοκρασία, δονήσεις, διάχυτος φωτισμός και αντανάκλασεις, υφή επιφάνειας αντικειμένου, καταλληλότητα μέσων στήριξης κ.α.) παρά από τις παραμέτρους του λογισμικού επεξεργασίας του λαμβανόμενου νέφους σημείων και της CAD μοντελοποίησης.
- Η αντιπαραβολή των δύο μοντέλων CAD και τα παραπάνω αποτελέσματα δεν παρέχουν ασφαλώς καμία ένδειξη ως προς την γεωμετρική τους πιστότητα σε σχέση με το πρωτότυπο αντικείμενο, τεκμηριώνουν όμως το μέγεθος των γεωμετρικών αποκλίσεων που εισάγονται εξ' αιτίας του λογισμικού επεξεργασίας.



Εικόνα 55: Διάφορες όψεις του αποτελέσματος σύγκρισης των δύο μοντέλων

ii. Αντιπαραβολή του CAD μοντέλου *Eidolio 1-1.igs* με το αρχικό νέφος σημείων

Για τον έλεγχο των γεωμετρικών αποκλίσεων που οφείλονται αποκλειστικά στη διαδικασία επεξεργασίας του νέφους σημείων και της CAD μοντελοποίησης κρίθηκε σκόπιμη η άμεση αντιπαραβολή του CAD μοντέλου *Eidolio 1-1.igs* με τα σημεία του αρχικού νέφους, όπως αυτό διαμορφώθηκε μετά την απομάκρυνση του θορύβου (βλ. παραπάνω βήμα δ.). Η αντιπαραβολή τους πραγματοποιήθηκε και πάλι με την χρήση της εντολής *3D Compare* του λογισμικού Geomagic Studio, η οποία δημιούργησε μία τρισδιάστατη χρωματικά κωδικοποιημένη χαρτογράφηση των γεωμετρικών αποκλίσεων μεταξύ των δύο μοντέλων.

Για κάθε σημείο του νέφους, το λογισμικό μέτρησε την απόσταση από το εγγύτερο σημείο του CAD μοντέλου.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το αποτέλεσμα της εν λόγω σύγκρισης. Σε αντιστοιχία με τα παραπάνω, για την ευχερέστερη απεικόνιση επιλέχθηκαν σε 15 χρωματικές αποχρώσεις, που αντιστοιχούν σε αριθμητική κλιμάκωση των γεωμετρικών αποκλίσεων. Σχετικά με τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης αντιπαραβολής, επισημαίνονται συνοπτικά τα εξής:

Μέγιστη απόσταση : θετική 0.348mm. αρνητική -0.341mm

Μέση τιμή θετικών αποκλίσεων: **0.039mm**

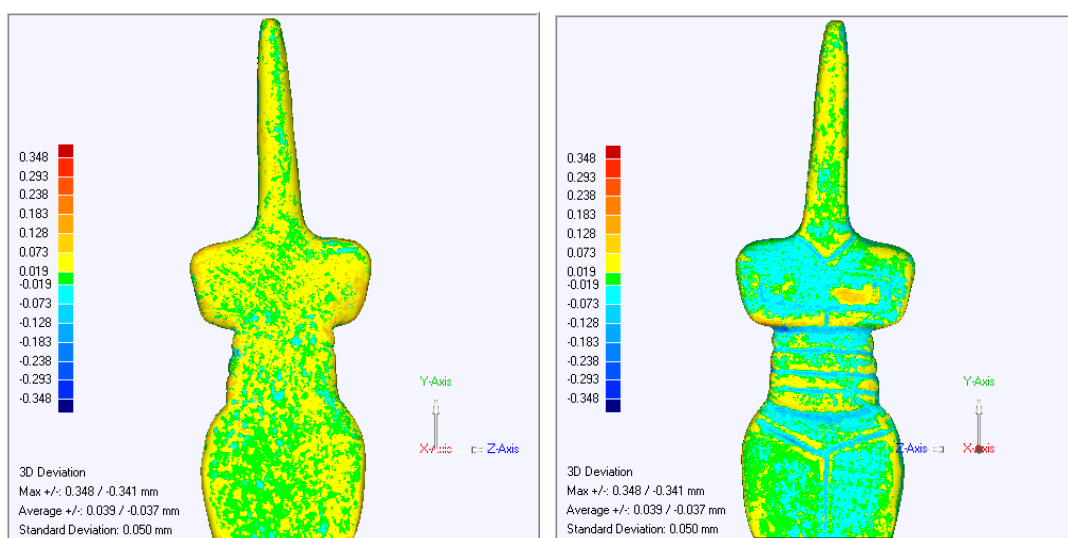
Μέση τιμή αρνητικών αποκλίσεων: **-0.037mm**

Μέση απόκλιση (ως άθροισμα των δύο παραπάνω αποκλίσεων): 0.002mm

Τυπική απόκλιση: **0.050mm**

Πράσινη περιοχή: (-0.019mm , 0.019mm)

Από τα αποτελέσματα αυτά ενισχύονται οι παρατηρήσεις που σημειώθηκαν στην παραπάνω παράγραφο (i).



Εικόνα 56 Αντιπαραβολή του CAD μοντέλου Eidolio 1-1.igs με το αρχικό νέφος σημείων

iii. Αντιπαραβολή του CAD μοντέλου Eidolio 1-2.igs με το αρχικό νέφος σημείων

Όπως στην παραπάνω παράγραφο (ii), σχετικά με τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης αντιπαραβολής, επισημαίνονται τα εξής:

Μέγιστη απόσταση : θετική 0.367mm. αρνητική -0.404mm

Μέση τιμή θετικών αποκλίσεων: **0.033mm**

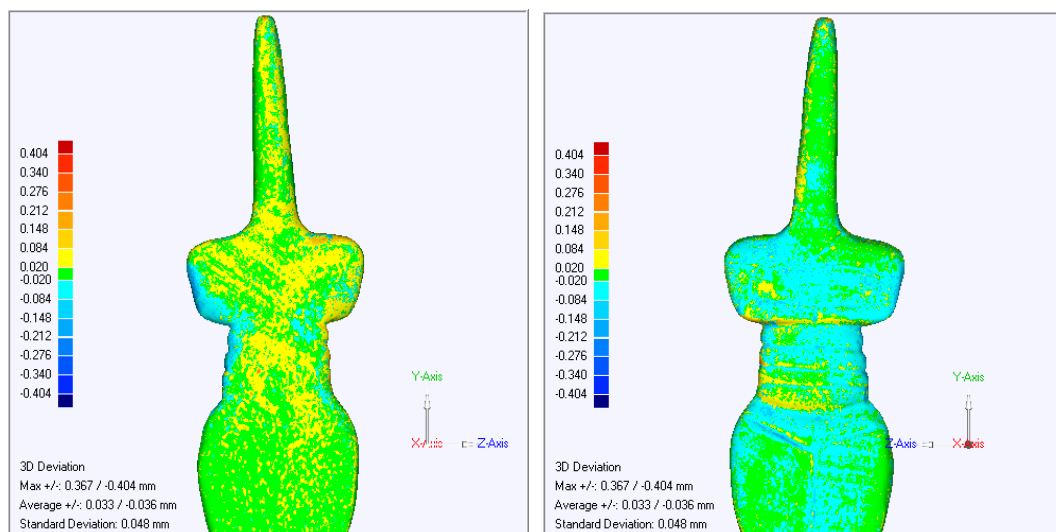
Μέση τιμή αρνητικών αποκλίσεων: **-0.036mm**

Μέση απόκλιση (ως άθροισμα των δύο παραπάνω αποκλίσεων): -0.003mm

Τυπική απόκλιση: **0.048mm**

Πράσινη περιοχή: (-0.019mm , 0.019mm)

Και εδώ τα αποτελέσματα ενισχύουν τις σχετικές παρατηρήσεις της παραγράφου (i).



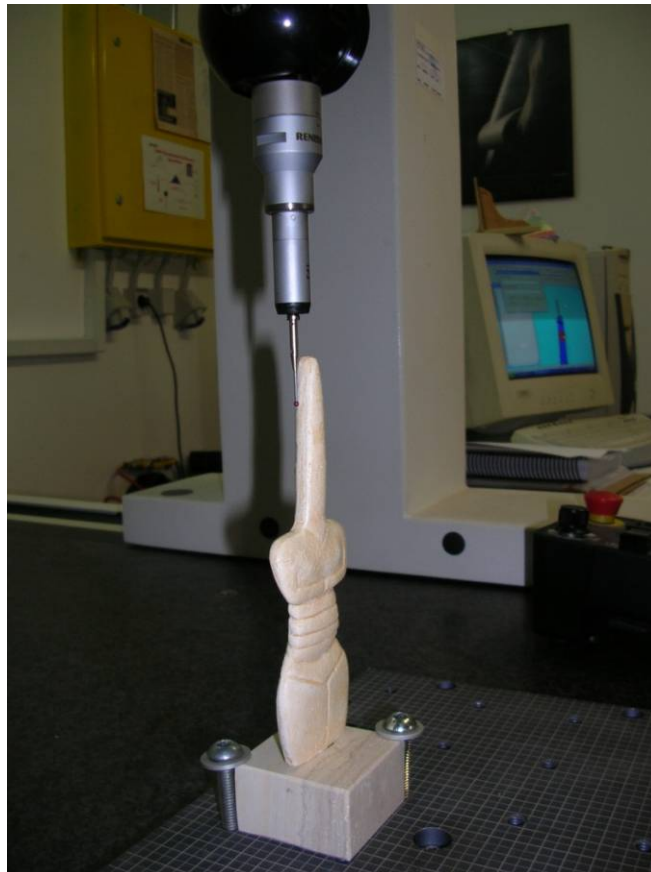
Εικόνα 57 Αντιπαραβολή του CAD μοντέλου Eidolio 1-2.igs με το αρχικό νέφος σημείων

iv. Έλεγχος της γεωμετρικής πιστότητας των CAD μοντέλων Eidolio 1-1.igs και Eidolio 2-1.igs με τη χρήση της ΜΜΣ - ΤΓ

Με στόχο την πειραματική διερεύνηση της επίδρασης των παραγόντων που σχετίζονται με το υλισμικό (Μηχανή ΜΜΣ-ΑΒ και λέιζερ κάμερα) και τις συνθήκες ψηφιακής αποτύπωσης (θερμοκρασία, δονήσεις, διάχυτος φωτισμός και αντανάκλασεις, υφή επιφάνειας αντικείμενου, καταλληλότητα μέσων στήριξης κ.α.) πραγματοποιήθηκε επανάληψη της διαδικασίας που περιγράφηκε στις παραγράφους α. – ζ. του παρόντος κεφαλαίου. Έτσι, από ένα **νέο, δεύτερο νέφος σημείων**, που προέκυψε από την επανάληψη των παραπάνω βημάτων α. – γ. καθώς και την επανάληψη των υπολοίπων βημάτων δ. – ζ. με τιμές των παραμέτρων του λογισμικού **ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν καταρχήν για τη δημιουργία του CAD μοντέλου Eidolio 1-1.igs** (βλ. Πίνακα Φάσεων – Βημάτων – Παραμέτρων που παρατίθεται στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου), δημιουργήθηκε ένα νέο, τρίτο 3D-CAD μοντέλο του Κυκλαδικού ειδωλίου, με τίτλο **Eidolio 2-1.igs**

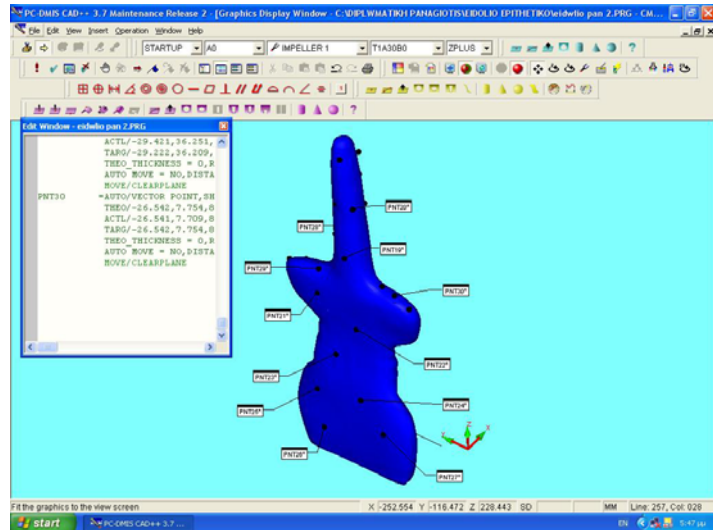
Στη συνέχεια, τα δύο CAD μοντέλα Eidolio 1-1.igs και Eidolio 1-2.igs εξετάστηκαν ξεχωριστά ως προς την γεωμετρική τους πιστότητα και αξιολογήθηκαν με τη χρήση της ΜΜΣ-ΤΓ. Η αντιπαραβολή στην περίπτωση αυτή έγινε απευθείας με το πρωτότυπο αντικείμενο, το οποίο προσδόθηκε στην γρανιτένια τράπεζα εργασίας της ΜΜΣ-ΤΓ, Εικόνα 58. Μέσω του μετρητικού λογισμικού PC-DMIS, στο οποίο εισάγεται το εκάστοτε CAD μοντέλο, επιλέχθηκαν 30 τυχαία σημεία σε ικανοποιητική διασπορά και από αντιπροσωπευτικές περιοχές πάνω στην CAD επιφάνεια με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός «μετρητικού προγράμματος ελέγχου» (part program). Διευκρινίζεται ότι το εν λόγω λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα απευθείας οδήγησης της ΜΜΣ-ΤΓ μέσω της επιλογής, από την οθόνη γραφικών του συνδεδεμένου H/Y, συγκεκριμένων επιθυμητών γεωμετρικών χαρακτηριστικών (*features*) ή/και μεμονωμένων σημείων (*vector points*) του 3D-CAD μοντέλου του ελεγχόμενου εξαρτήματος. Η πρακτική αυτή (*CAD – based part programming*) αποτελεί τον πλέον σύγχρονο τρόπο ποιοτικού ελέγχου εξαρτημάτων με ελεύθερες επιφάνειες, όπως χυτά ακριβείας ή εξαρτήματα από διαμόρφωση ελάσματος.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εφαρμογής, η εν λόγω δυνατότητα του λογισμικού PC-DMIS ασφαλώς δεν χρησιμοποιείται για τον ποιοτικό έλεγχο των κατασκευαστικών γεωμετρικών αποκλίσεων του φυσικού αντικειμένου (Κυκλαδικό ειδώλιο), αλλά για την εξέταση της γεωμετρικής πιστότητας των CAD μοντέλων Eidolio 1-1.igs και Eidolio 1-2.igs. Με το σκεπτικό αυτό, το σύνολο των 30 σημείων επαφής που ελήφθησαν μετά την αυτόματη εκτέλεση του παραπάνω προγράμματος μέτρησης αποτελεί ένα νέο, περιορισμένης έκτασης αλλά υψηλής ακρίβειας νέφος σημείων. Η αντιπαραβολή των σημείων αυτών με τα αντίστοιχα του CAD μοντέλου επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την γεωμετρική πιστότητα του τελευταίου.

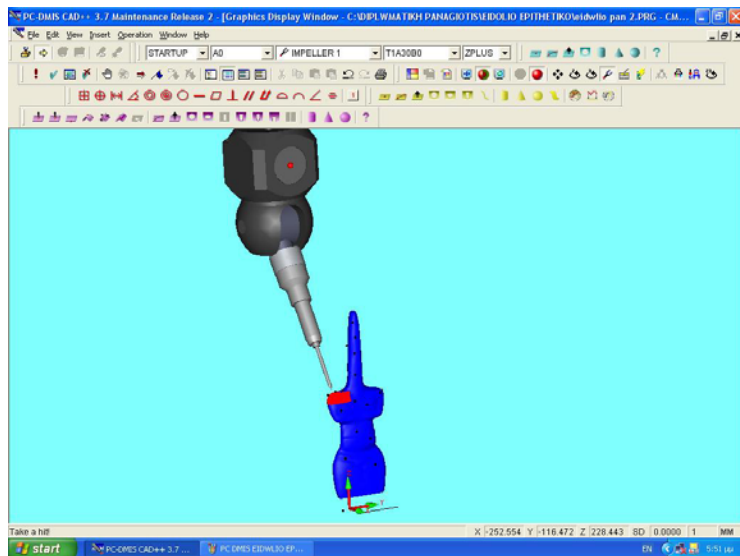


Εικόνα 58: Λήψη σημείων στο Κυκλαδικό ειδώλιο με τον αισθητήρα επαφής της ΜΜΣ-ΤΓ

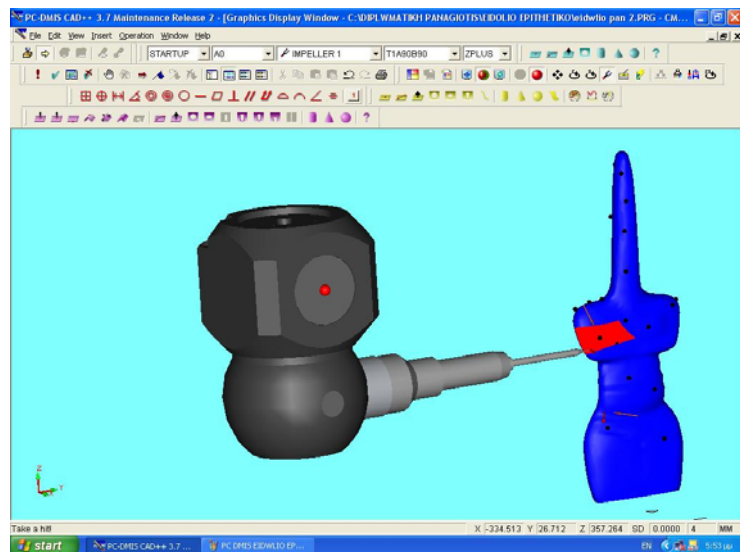
Προϋπόθεση για την επιτυχία και τον περιορισμό εισαγωγής ενός σημαντικού παράγοντα αβεβαιότητας στην εν λόγω αντιπαραβολή, αποτελεί η πλήρης ταύτιση του συστήματος συντεταγμένων του μοντέλου CAD με αυτό του φυσικού αντικειμένου που βρίσκεται στο τραπέζι της ΜΜΣ-ΤΓ. Η ταύτιση αυτή επιτυγχάνεται με τη λήψη στο φυσικό αντικείμενο συγκεκριμένων στοιχείων αναφοράς (*Datum*) τα οποία μπορούν επιτυχώς να υλοποιήσουν το σύστημα συντεταγμένων του μοντέλου CAD. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η ύπαρξη της σταθερής μαρμάρινης ορθογωνικής βάσης του ειδωλίου προσέφερε τα ζητούμενα στοιχεία αναφοράς (*επίπεδο, γραμμή, σημείο*), εξασφαλίζοντας την απαραίτητη ταύτιση των δύο συστημάτων συντεταγμένων. Στις εικόνες που ακολουθούν διακρίνεται η τοποθέτηση του συστήματος συντεταγμένων στην μπροστινή αριστερή επάνω κορυφή της μαρμάρινης βάσης του Κυκλαδικού ειδωλίου στο υπολογιστικό περιβάλλον του λογισμικού PC-DMIS.



Εικόνα 59: Εισαγωγή του μοντέλου CAD του Κυκλαδικού ειδωλίου στο μετρητικό λογισμικό PC-DMIS της ΜΜΣ-ΤΓ και πρόγραμμα λήψης σημείων επαφής

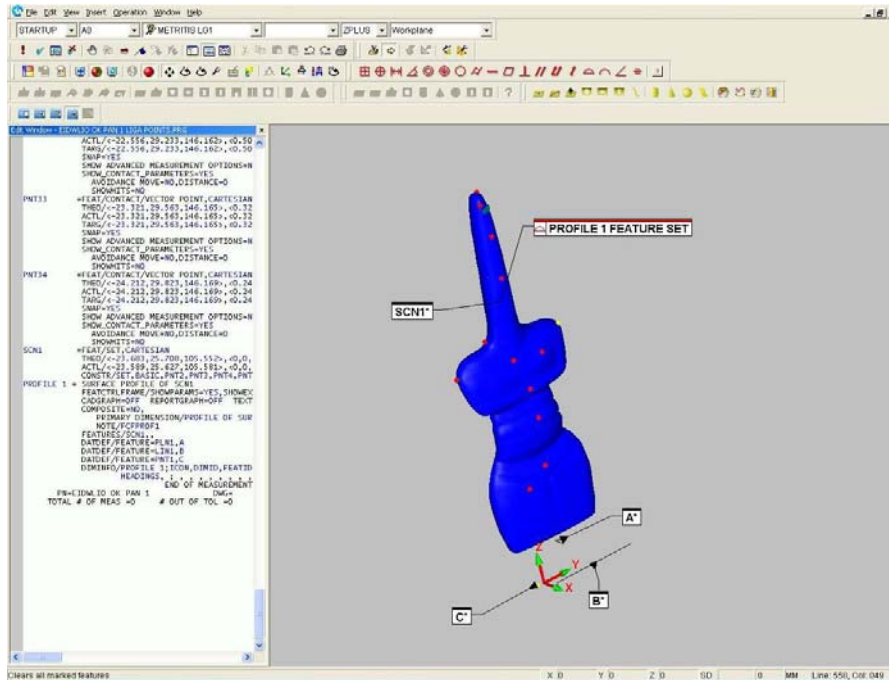


Εικόνα 60 Οδήγηση του αισθητήρα επαφής της ΜΜΣ-ΤΓ μέσω του μοντέλου CAD

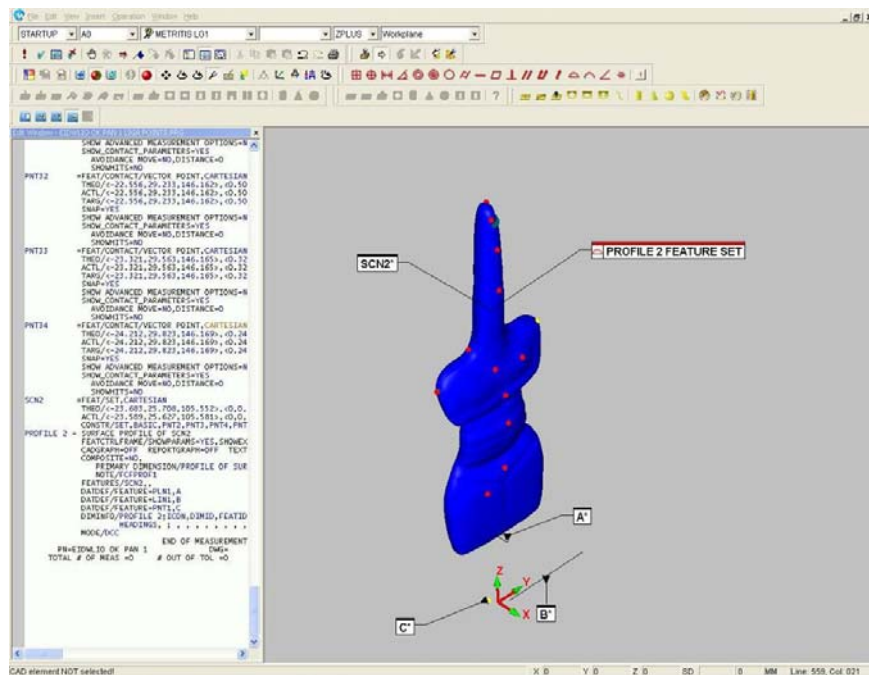


Εικόνα 61 Υπολογιστική λήψη σημείων επαφής ΜΜΣ-ΤΓ στο μοντέλο CAD του αντικειμένου

Λόγω του περιορισμένου πλήθους των σημείων επαφής για τον έλεγχο της γεωμετρικής πιστότητας των CAD μοντέλων σε σχέση με το πρωτότυπο αντικείμενο, δεν χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση αυτή στατιστικά μεγέθη. Για τον σκοπό αυτό έγινε χρήση της γεωμετρικής ανοχής πιστότητας επιφάνειας (*profile tolerance*) κατά ASME Y14.5M:2009. Τα αποτελέσματα, 0.176mm και 0.193 για το Eidolio 1-1.igs και Eidolio 1-2.igs αντίστοιχα, επιβεβαιώνουν πειραματικά τις επιδόσεις της ΜΜΣ-ΑΒ και λέιζερ κάμερας που προδιαγράφονται από τον κατασκευαστή.



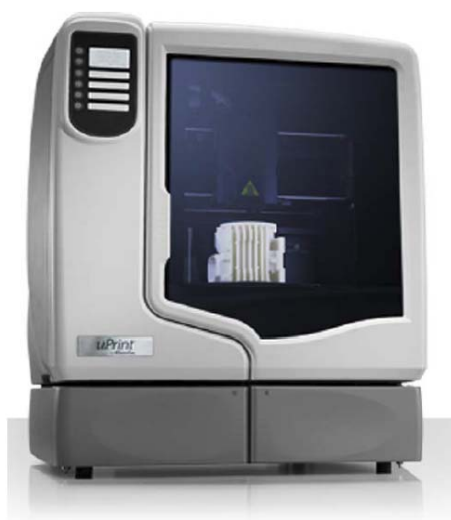
Εικόνα 62 Έλεγχος γεωμετρικής ανοχής πιστότητας επιφάνειας του CAD μοντέλου Eidolio 1-1.igs



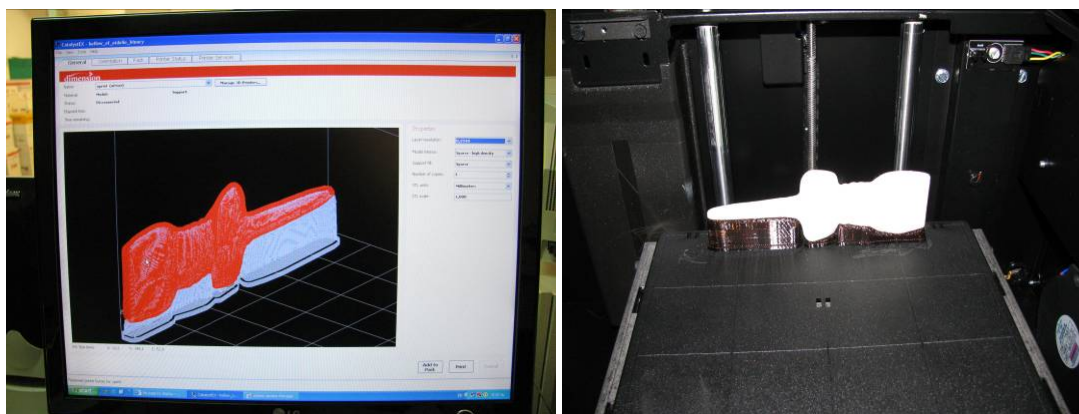
Εικόνα 63 Έλεγχος γεωμετρικής ανοχής πιστότητας επιφάνειας του CAD μοντέλου Eidolio 2-1.igs

IV – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΤΙΓΡΑΦΟΥ ΤΟΥ ΕΙΔΩΛΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟ CAD ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΑΧΕΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ

Τον Μάιο του 2010 το Εργαστήριο ΤΚΠ-ΑΣ εγκατέστησε και έθεσε σε λειτουργία τη νέα, σύγχρονη διάταξη Ταχείας κατασκευής Πρωτοτύπων (*Rapid Prototyping*) U-Print της κατασκευάστριας εταιρίας Dimension, Εικόνα 64. Πρόκειται για ένα εύχρηστο σύστημα desktop 3-D printer με σημαντικές επιδόσεις σε θέματα ταχύτητας κατασκευής και απόδοσης σύνθετων γεωμετρικών μορφών. Με στόχο την απόκτηση σχετικής τεχνογνωσίας από πλευράς του Εργαστηρίου αλλά και τον έλεγχο των επιδόσεων του συστήματος U-Print κρίθηκε σκόπιμη η επιλογή και κατασκευή του Κυκλαδικού ειδώλιου από το CAD μοντέλο Eidolio 1-1.igs. Στις εικόνες που ακολουθούν παρατίθενται στιγμιότυπα από τις φάσεις κατασκευής του «αντιγράφου RP/ U-Print» καθώς και το τελικό φυσικό αντικείμενο που κατασκευάστηκε σε «αντιπαραβολή» με το πρωτότυπο Κυκλαδικό ειδώλιο. Ο έλεγχος των κατασκευαστικών αποκλίσεων του αντιγράφου μπορεί να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παραπάνω παράγραφο iv, κάτι τέτοιο ξεφεύγει όμως από τον στόχο της παρούσας ΔΕ κι επισημαίνεται μόνο ως μελλοντική πιθανή κατεύθυνση για τη συνέχισή της.



Εικόνα 64 Η μηχανή ΤΚΠ U-print της εταιρίας Dimension





Εικόνα 65 Φάσεις κατασκευής αντιγράφου του ειδωλίου με τη μέθοδο RP/ U-Print



Εικόνα 66 Πρωτότυπο και RP/ U-Print αντίγραφο Κυκλαδικού ειδωλίου

Πίνακας Φάσεων – Βημάτων – Παραμέτρων Εφαρμογής 2

ΦΑΣΗ 1: ΝΕΦΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ			
Registration	Σύνθεση 3 σαρώσεων		Εικόνα 43
a. Απομάκρυνση Θορύβου			
a1.Select Disconnected Components	Medium 5.0		-
a2.Select Outliers	50% → 11,397 σημεία 66% → 16,620 σημεία 80% → 64,588 σημεία		-
a3.Reduce Noise	Smoothness Level: min/ med /max		Εικόνα 44
b. Ομογενοποίηση Νέφους Σημείων			
b1.Uniform Sample	200,000 σημεία		-
b2.Merge	328,410 πολύγωνα		-
ΦΑΣΗ 2: ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΛΥΓΩΝΩΝ			
c. Επεξεργασία Ατελειών			
c1.Fill Holes	Fill Partial		Εικόνα 47
c2.Relax Polygons	Smoothness Level	Strength	Εικόνα 50
	min	-	α
	max	min	β
	5/9	5/9	γ
	max	5/9	δ
	5/9	max	ε
	5/9	3/9	στ
	3/9	5/9	ζ
ΦΑΣΗ 3: CAD ΜΟΝΤΕΛΟ			
d. Κλείσιμο “water-tight” μοντέλου			
d1.Create Datums	Δημιουργία επιπέδου βάσης		Εικόνα 52
d2.Section By Plane	Τομή μοντέλου με επίπεδο βάσης		Εικόνα 53
d3.Fill Holes	Κλειστή Επιφάνεια		Εικόνα 54

10

Εφαρμογή 3: Ψηφιακή Αποκατάσταση

Θραυσμένου Κυαθίου

Στόχο της παρούσης εφαρμογής αποτέλεσε η μελέτη θραυσμάτων πήλινου κυαθίου, με σκοπό την ψηφιακή αποτύπωση τους, την ψηφιακή αποκατάσταση και τη δημιουργία του ηλεκτρονικού στερεού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD του αρχικού, πλήρους αντικειμένου.

Τα κομμάτια που μελετήθηκαν και αξιοποιήθηκαν για τον σκοπό αυτό ονομάστηκαν:

- (Α): Το μεγαλύτερο διαστασιολογικά. Περιλαμβάνει μεγάλο μέρος του επάνω χείλους.
- (Β): Στενόμακρο κομμάτι που εκτείνεται από το επάνω χείλος μέχρι τμήμα της βάσης.
- (Γ): Περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της βάσης του κυαθίου.



Εικόνα 67: Φωτογραφική αποτύπωση των τεμαχίων (Α), (Β), (Γ) του κυαθίου – Εφαρμογή 3

Ψηφιακή Σάρωση του τεμαχίου (Α)

Με τη χρήση της MMΣ-AB *FARO ARM* πραγματοποιήθηκε ψηφιακή σάρωση του πρώτου τεμαχίου (Α). Τα δεδομένα που προέκυψαν από την ψηφιακή σάρωση ήταν σε μορφή νέφους σημείων (*raw data* - ακατέργαστα δεδομένα). Μετά από ένα πλήθος δοκιμαστικών σαρώσεων, προέκυψε μια σειρά από χρήσιμα συμπεράσματα. Τα είδη των επιφανειών που εμφανίστηκαν μπορούν να διακριθούν στις κάτωθι κατηγορίες:

- φυσικό κεραμικό χρώμα με τραχεία υφή
- φυσικό κεραμικό χρώμα με γυαλιστερή υφή
- βαμμένο μαύρο χρώμα με γυαλιστερή υφή

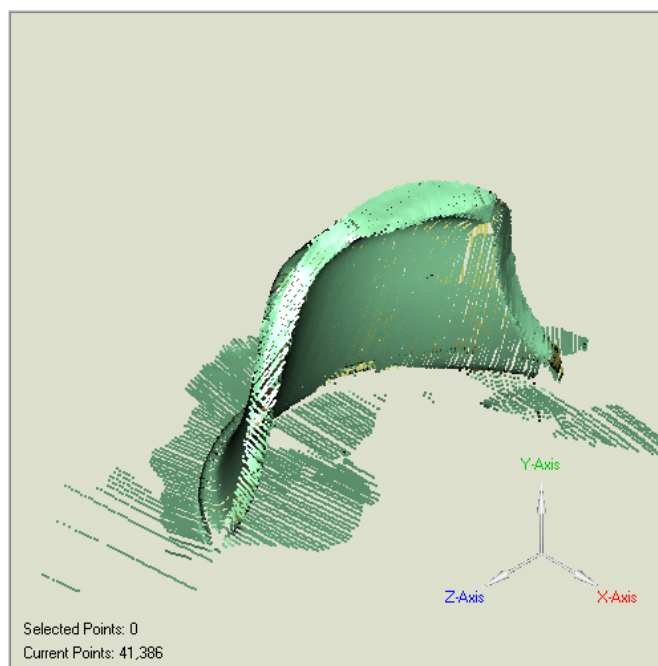
Οι επιφάνειες της πρώτης κατηγορίας δεν παρουσίασαν ιδιαίτερες δυσκολίες κατά τη σάρωση. Εκείνες τις δεύτερης, απαιτούσαν από τον χειριστή να διατηρεί την δέσμη σάρωσης (*laser stripe*) όσο το δυνατόν πιο κάθετη σε αυτές, ακολουθώντας σχεδόν πιστά την καμπυλότητά τους. Η τρίτη κατηγορία απέδιδε αισθητά λιγότερα σημεία σε σχέση με τις υπόλοιπες. Σε αυτό το πρόβλημα, τη λύση έδωσε η εφαρμογή λεπτού στρώματος λευκής πούδρας. Η επιφάνεια έγινε πιο φιλική στην σάρωση, αποδίδοντας δεδομένα με ταχύτερο ρυθμό. Έχει υπολογιστεί ότι το μέσο πάχος μιας λεπτής στρώσης πούδρας είναι περίπου 0.030 mm [21]. Παρατηρήθηκε επίσης ότι βελτιώθηκε και η συμπεριφορά του σαρωτή στις ακμές, όπου η λήψη σημείων είναι εν γένει μια απαιτητική διαδικασία, καθώς η δέσμη διαθλάται πολύ έντονα. Μετά την ολοκλήρωση της σάρωσης, η πούδρα αυτή ήταν εύκολο να απομακρυνθεί, αφήνοντας το τεμάχιο ξανά στην φυσική του κατάσταση.



Εικόνα 68: Παράδειγμα επιφάνειας που παρουσιάζει αυξημένη δυσκολία στην σάρωση

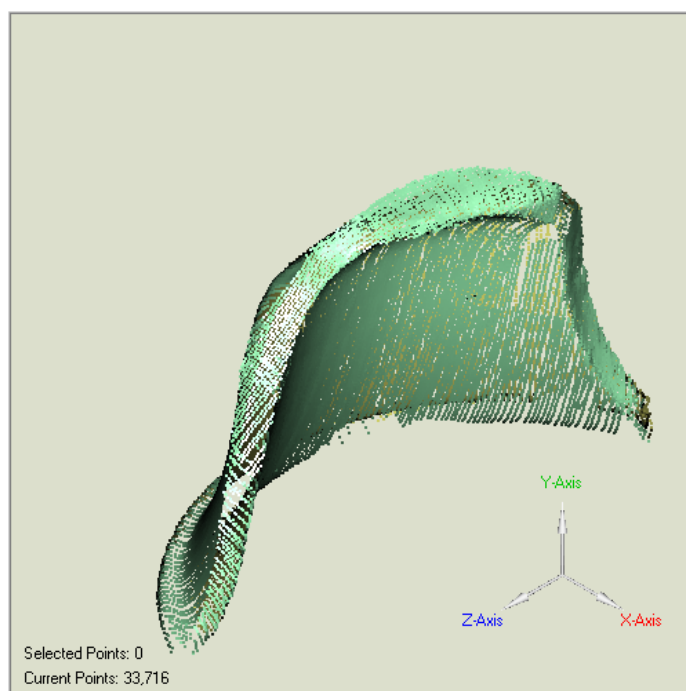
Από τη μορφή του θραύσματος (A) γίνεται αντιληπτό ότι δεν ήταν δυνατή η πλήρης αποτύπωσή του μέσω μίας και μοναδικής σάρωσης, εφόσον σημαντικό μέρος της επιφάνειας του δεν ήταν προσβάσιμο από η δέσμη λέιζερ. Συνεπώς, κρίθηκε απαραίτητο η σάρωση να πραγματοποιηθεί σε δύο ξεχωριστές φάσεις με αντίστοιχες προσδέσεις του αντικειμένου οι οποίες θα επέτρεπαν την πλήρη αποτύπωσή του. Σε μία από τις δύο σαρώσεις χρησιμοποιήθηκε μέγγενη μικρών διαστάσεων με στόχο την κατάλληλη στήριξη /τοποθέτηση, έτσι ώστε στα δύο τμήματα που προέκυψαν να υπάρχουν κοινά σημεία και από τις δύο μεγαλύτερες επιφάνειες. Με αυτό τον τρόπο επρόκειτο να διευκολυνθεί η διαδικασία της *registration*.

Το αποτέλεσμα της πρώτης σάρωσης, όπου δεν έγινε χρήση της μέγγενης και το τεμάχιο στηρίχθηκε εφάπτοντας το χείλος του με την επιφάνεια εργασίας (πάγκος βαρέως τύπου), φαίνεται στην εικόνα 3.



Εικόνα 69: Αρχικό νέφος σημείων πρώτης σάρωσης τεμαχίου (A)

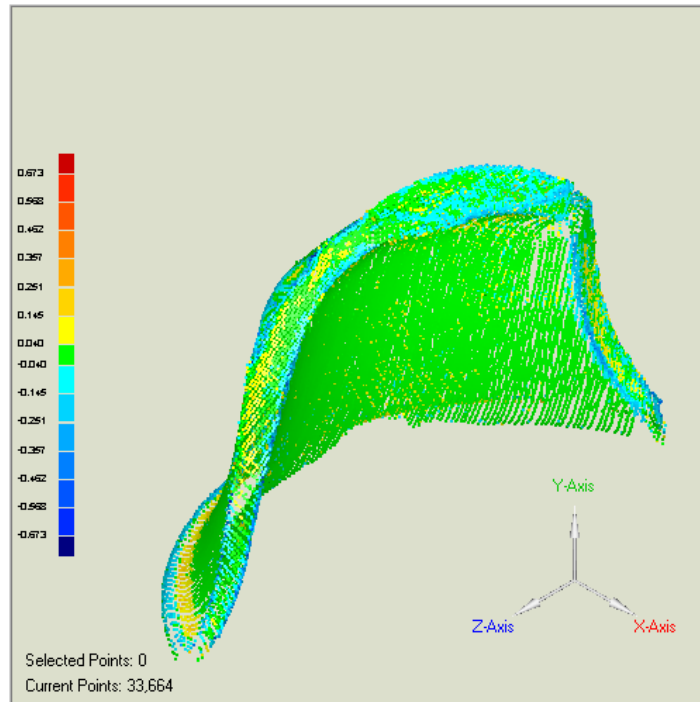
Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στο νέφος υπάρχουν και σημεία της επιφάνειας στήριξης. Τα σημεία αυτά απομακρύνθηκαν με την χρήση των εντολών επιλογής και διαγραφής του λογισμικού. Σε αυτή τη φάση, το νέφος αποτελείτο από 33,716 σημεία. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 5.



Εικόνα 70: Νέφος σημείων μετά την διαγραφή σημείων του δαπέδου στήριξης

Με την εκτέλεση της εντολής *Select disconnected* θέτοντας τον παράγοντα διαχωρισμού στην χαμηλή τιμή, επιλέχθηκαν 21 σημεία. Κατόπιν τα σημεία αυτά διαγράφηκαν. Κατά την εκτέλεση της εντολής *Select outliers*, το επίπεδο ευαισθησίας διατηρήθηκε χαμηλά (50), με στόχο την αποφυγή διαγραφής σημείων που καθορίζουν μορφολογικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Με αυτό τον τρόπο επιλέχθηκαν και διεγράφησαν ακόμη 31 σημεία.

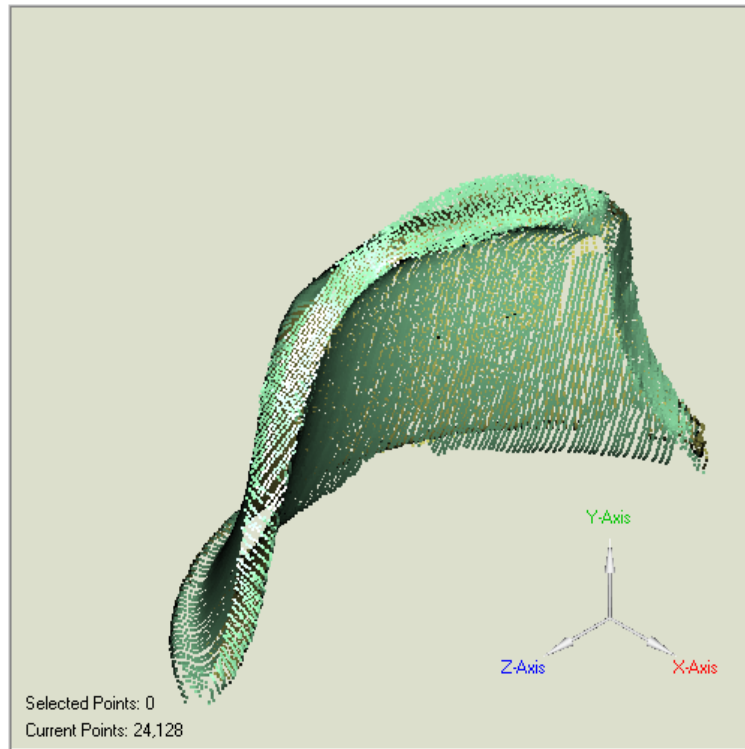
Η επόμενη εντολή που εκτελέστηκε είναι η απομάκρυνση θορύβου. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι κατά την διαδικασία αυτή το λογισμικό μετακινεί κάποια σημεία στον χώρο σύμφωνα με τις παραμέτρους που καθορίζονται από τον χρήστη, χωρίς να διαγράφει κανένα από αυτά. Οι προηγούμενες εντολές υπέδειξαν ελάχιστα σημεία σε σχέση με το συνολικό πλήθος αυτών, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι το νέφος της εφαρμογής είναι αρκετά ποιοτικό. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με την επιθυμία για την κατά το δυνατόν πιστότερη διατήρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, οδήγησε τον χρήστη σε μια συντηρητική αντιμετώπιση στο θέμα της απομάκρυνσης σημείων. Στην Εικόνα 71, με πράσινο χρώμα εμφανίζονται τα σημεία τα οποία θεωρούνται ότι δεν χρειάζεται να μετακινηθούν, ενώ με κόκκινο και μπλε εμφανίζονται εκείνα τα οποία το πρόγραμμα προτίθετο να μετακινήσει προς το εξωτερικό και προς το εσωτερικό του τεμαχίου αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι οι παράμετροι της εντολής ρυθμίστηκαν συντηρητικά (ελεύθερης μορφής επιφάνεια, χαμηλό επίπεδο ομοιομορφίας). Η πρόταση του προγράμματος έγινε δεκτή από τον χρήστη και η εντολή εκτελέστηκε. Η περίπτωση μη εφαρμογής απομάκρυνσης θορύβου θα οδηγούσε σε ένα μοντέλο με έντονη ανομοιογένεια στην επιφάνεια.



Εικόνα 71: Οπτικοποίηση της διαδικασίας απομάκρυνσης θορύβου

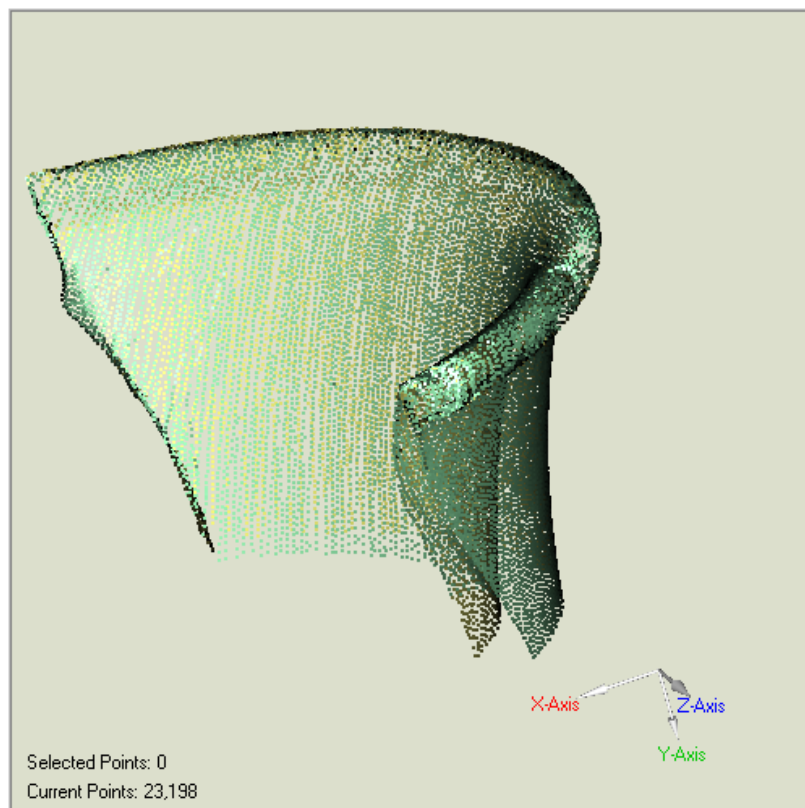
Σημειώνεται ότι σε μια ιδανική περίπτωση νέφους σημείων, όπου ο θόρυβος έχει ελαχιστοποιηθεί ήδη κατά το στάδιο της ψηφιακής σάρωσης, κανένα από τα παραπάνω στάδια επεξεργασίας δεν είναι απαραίτητο.

Η τελευταία εντολή που εκτελέστηκε στην φάση σημείων, είναι η ομογενοποίηση του νέφους (*Uniform sample*). Επιλέγεται σαν τελικός στόχος τα 25,000 σημεία, δηλαδή μία μείωση της τάξης του 25% περίπου. Επίσης επιλέγεται ως μέγιστη προτεραιότητα η διατήρηση της καμπυλότητας, καθώς και η διατήρηση των συνοριακών σημείων. Το τελικό πλήθος σημείων ανέρχεται σε 24,128.



Εικόνα 72: Μετά την ομογενοποίηση του νέφους σημείων

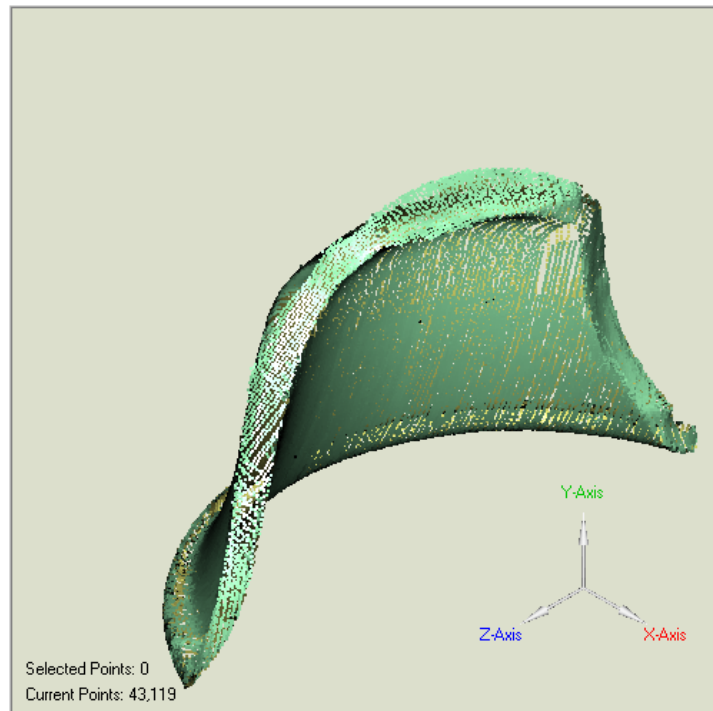
Με ίδιες διαδικασίες διαμορφώνεται και το αρχείο που λήφθηκε από τη δεύτερη σάρωση του υπόλοιπου τεμαχίου.



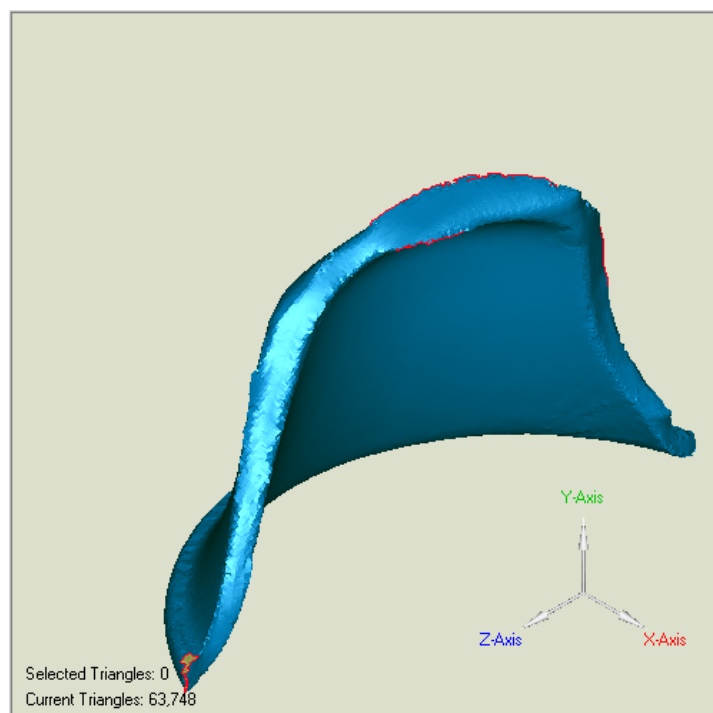
Εικόνα 73: Νέφος σημείων δεύτερης σάρωσης τεμαχίου (Α) μετά την επεξεργασία

Με την εντολή *Manual Registration*, τα δύο τμήματα τοποθετήθηκαν στη σωστή σχετική μεταξύ τους θέση, σχηματίζοντας ένα ενιαίο σύνολο σημείων, το οποίο αντιπροσώπευε πλήρως το πραγματικό αντικείμενο. Βασικό μέρος αυτής της διαδικασίας είναι η υπόδειξη από τον χρήστη κάποιων κοινών σημείων. Αυτός ήταν ο λόγος για τον οποίο αποτέλεσε βασική επιδίωξη η εμφάνιση κοινών σημείων στις δύο σαρώσεις.

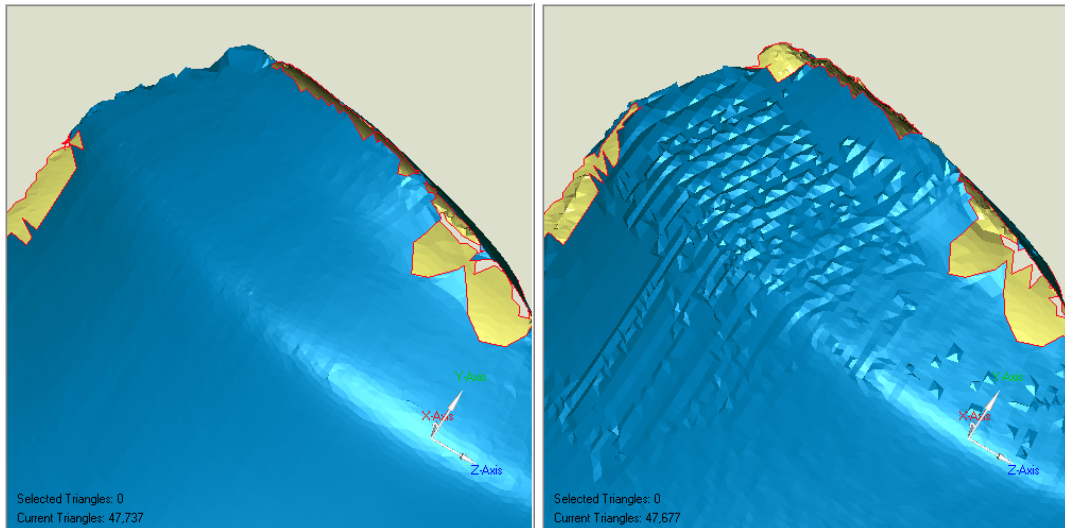
Η εντολή *Global Registration* πραγματοποίησε μια λεπτομερέστερη ευθυγράμμιση των δύο μερών. Τέλος, με την εντολή *Merge* το μοντέλο πέρασε στην φάση των πολυγώνων (43,000).



Εικόνα 74: Μετά την εφαρμογή του *Registration*

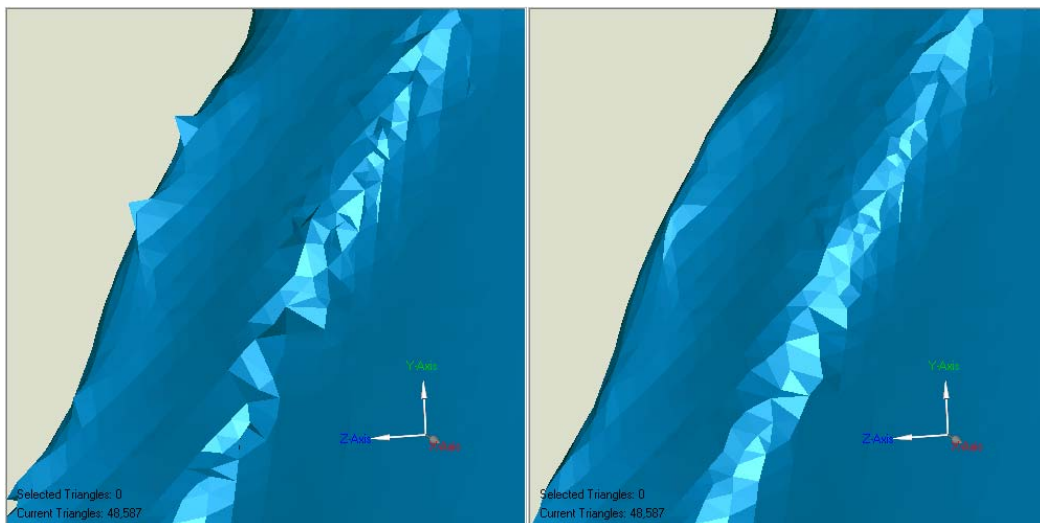


Εικόνα 75: Μετά των εφαρμογή του *Merge*



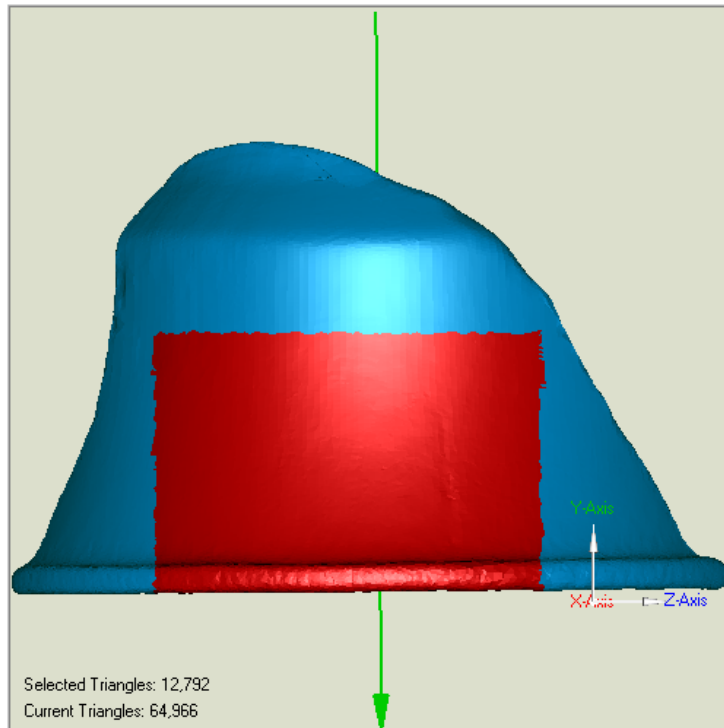
Εικόνα 76: Λεπτομέρεια της επιφάνειας με και χωρίς εφαρμογή απομάκρυνσης θορύβου

Με την εκτέλεση της εντολής *Fill Holes*, απαλλάχθηκε το μοντέλο από κάποια κενά που εμφανίστηκαν στην επιφάνειά του. Μετά την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας, το μοντέλο δεν παρουσίαζε καμία ασυνέχεια στην επιφάνειά του, και συνεπώς θεωρείτο στερεό σώμα. Από το μενού πολυγώνων, εκτελέστηκε η εντολή *Repair Intersections* με την παράμετρο *Relax/Clean*, ώστε να διορθωθούν κάποιες αφύσικες πτυχώσεις. Με την εντολή *Remove Spikes* απομακρύνθηκαν κάποιες έντονες διαμορφώσεις όπως φαίνεται στην Εικόνα 77.

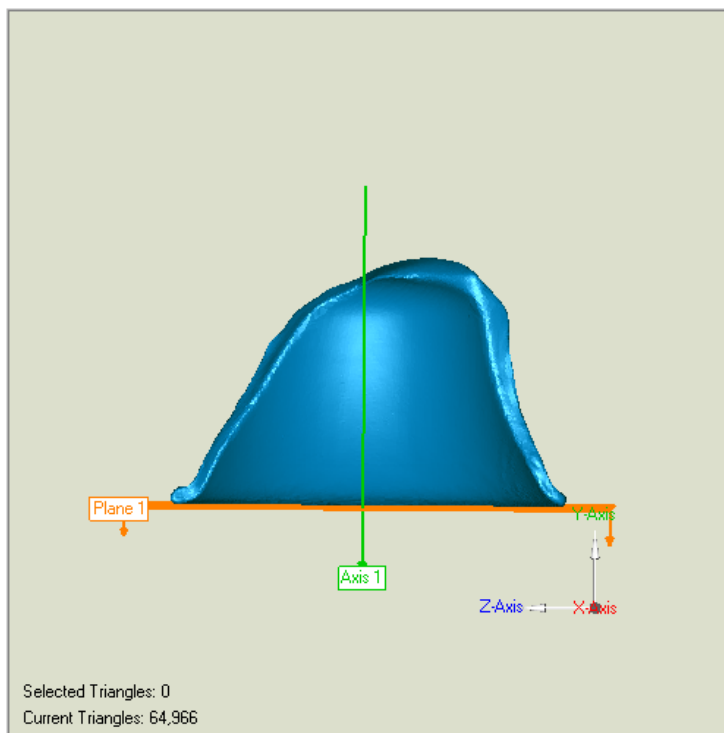


Εικόνα 77: Λεπτομέρεια πριν και μετά την εφαρμογή *Remove Spikes*

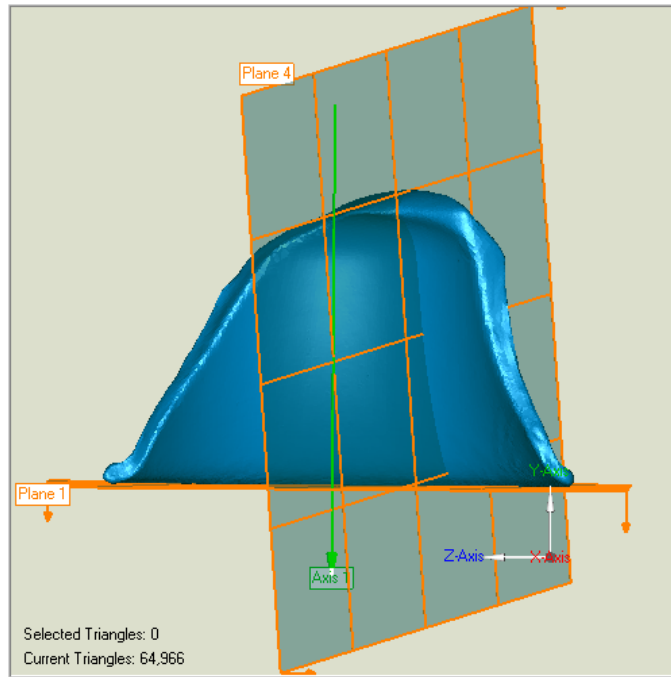
Στην συνέχεια εκτελέστηκε η εντολή *Create Datums*, επιλέγοντας την εφαρμογή άξονα περιστροφής (axis 1) μέσω υπολογισμού από περιοχή σημείων που υπέδειξε ο χρήστης. Επίσης, δημιουργήθηκε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα περιστροφής, το οποίο εφάπτεται στο χείλος του τεμαχίου (plane 1). Ακόμη ένα επίπεδο σχηματίστηκε με ακτινική κατεύθυνση, με στόχο να αναδείξει την γεωμετρία της διατομής (plane 4).



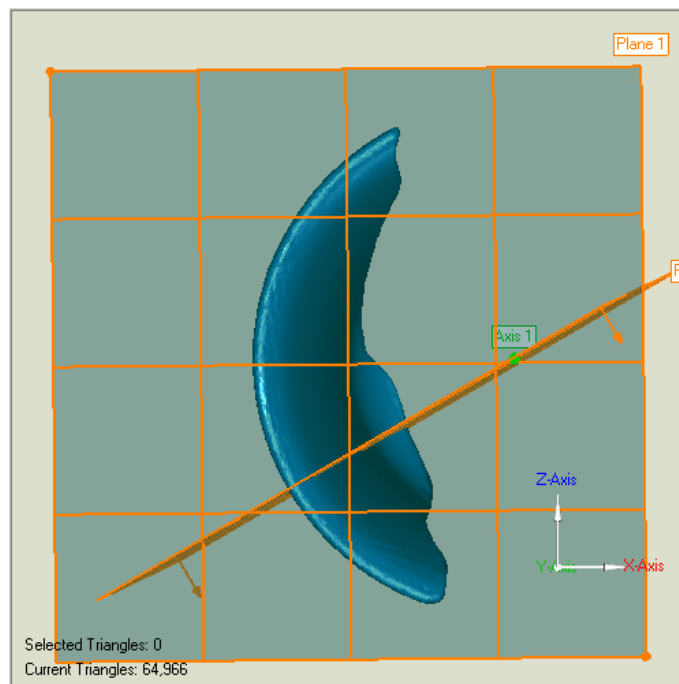
Εικόνα 78: Υπολογισμός του άξονα περιστροφής



Εικόνα 79: Δημιουργία επιπέδου αναφοράς

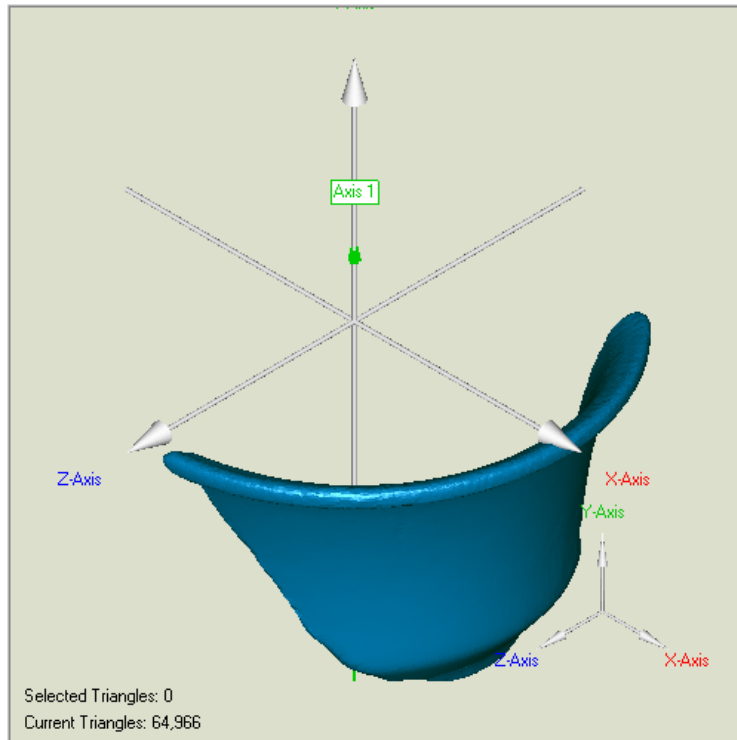


Εικόνα 80: Δημιουργία επιπέδου 4



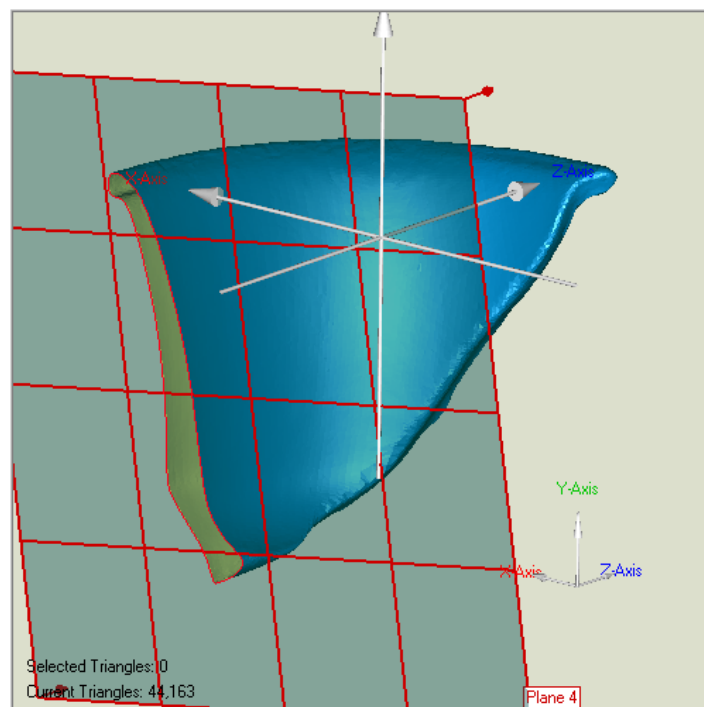
Εικόνα 81: Άποψη του τεμαχίου και των επιπέδων

Με τη βοήθεια της εντολής *Alignment To World* το μοντέλο μετακινήθηκε στο χώρο έτσι ώστε ο άξονας συμμετρίας να ταυτίζεται με τον Y άξονα, και το επίπεδο που ορίστηκε από το χείλος του αντικειμένου να ταυτίζεται με το επίπεδο XZ. Επίσης, το επίπεδο της τομής (διατομή) ταυτίστηκε με το επίπεδο XY. Αυτή η διαδικασία διευκόλυνε την παραπέρα επεξεργασία.



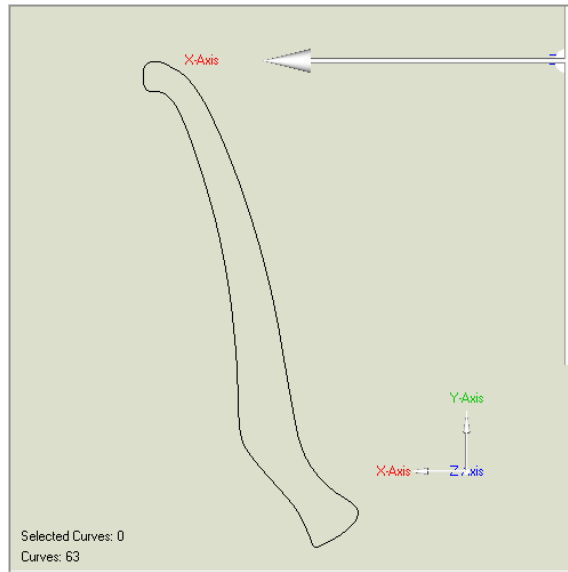
Εικόνα 82: Ευθυγράμμιση με άξονες αναφοράς

Κατόπιν εκτελέστηκε η εντολή *Section By Plane*, με αποτέλεσμα να εμφανιστεί η ζητούμενη διατομή ως σύνορο της επιφάνειας.



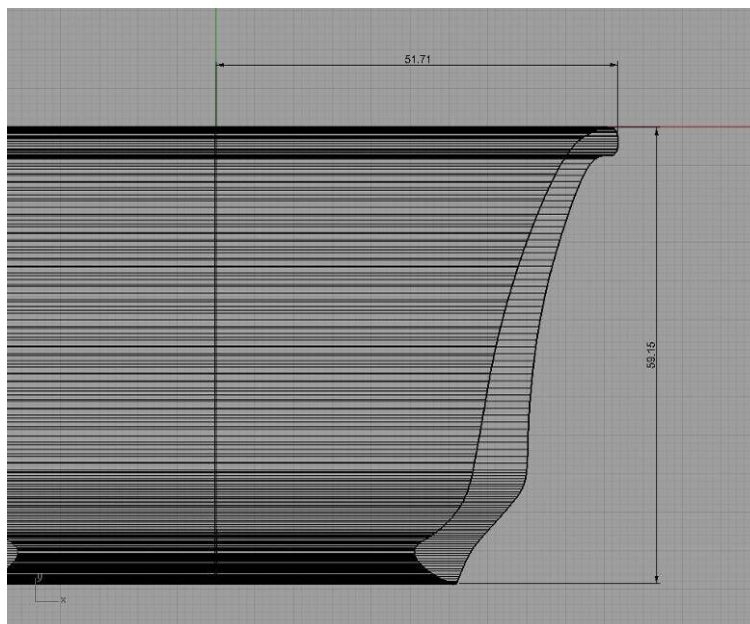
Εικόνα 83: Δημιουργία συνόρου μέσω τομής με το επίπεδο 4

Με την εκτέλεση της εντολής *Create Curve Object* δημιουργήθηκε η καμπύλη που αντιπροσωπεύει την ζητούμενη διατομή

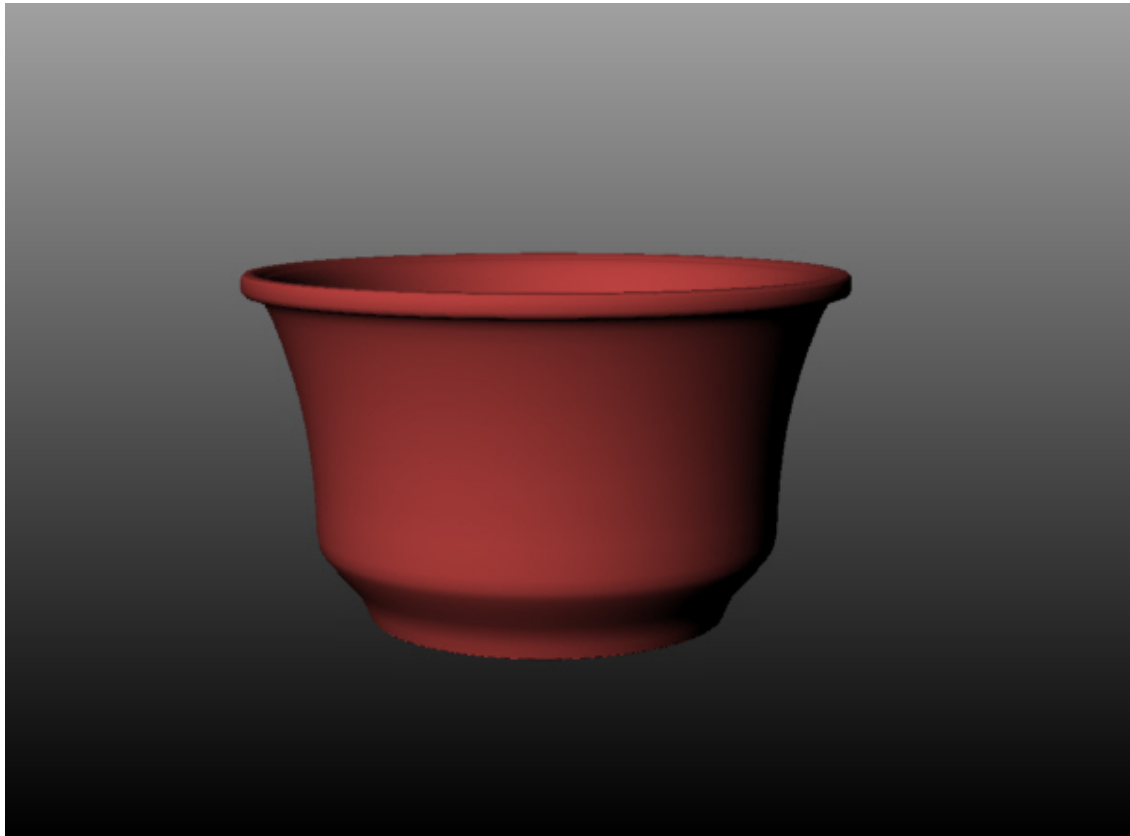


Εικόνα 84: Αντιπροσωπευτική διατομή

Από τον *Model Manager*, έγινε εξαγωγή της καμπύλης η οποία αποτελείτο από 63 ευθύγραμμα τμήματα. Το αρχείο τύπου *IGES* εισάχθηκε στο πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης *RHINO*. Με την εντολή *Revolve* η καμπύλη πραγματοποιώντας μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον Y άξονα, μετατράπηκε σε στερεό σώμα. Το λογισμικό υπολόγισε την μέγιστη διάμετρο σε 102mm και το ύψος του κυαθίου σε 58mm.



Εικόνα 85: Διαστασιολόγηση μέσω του λογισμικού

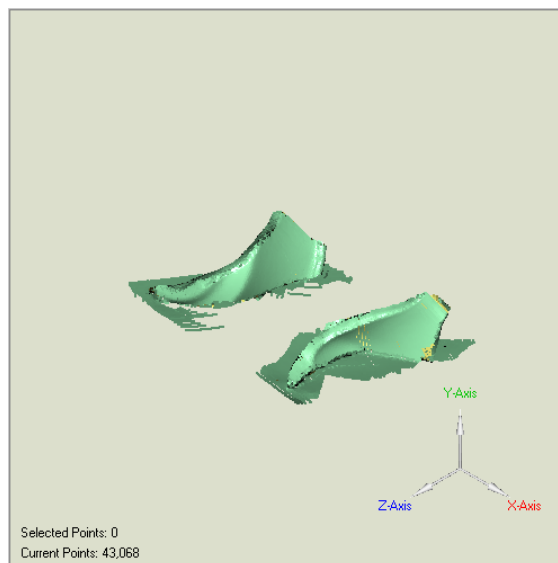


Εικόνα 86: Αναπαράσταση του αρχικού κυαθίου

Αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο προέκυψε με την υπόθεση ότι το τεμάχιο (A) είναι το μόνο διαθέσιμο στον ερευνητή, χωρίς να γίνουν εικασίες σχετικά με την υπόλοιπη γεωμετρία του πλήρους αντικειμένου.

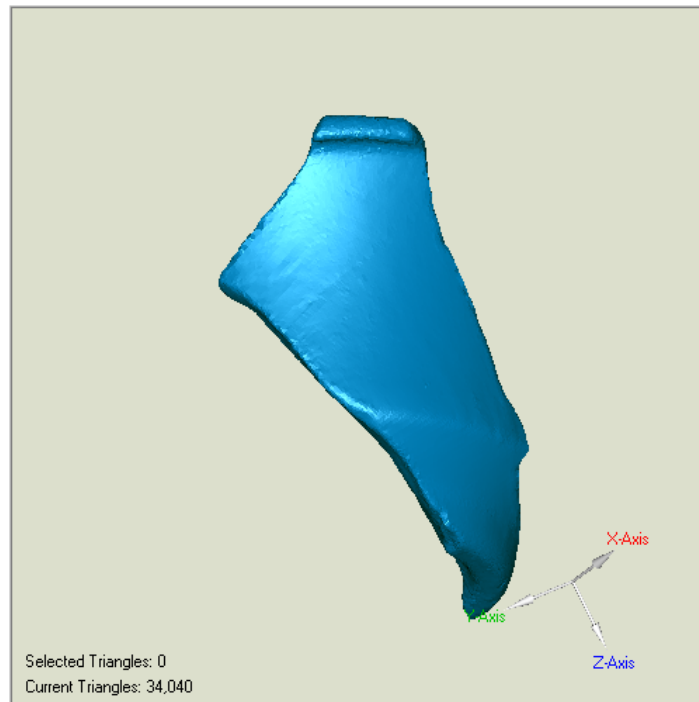
Σάρωση τεμαχίου (B)

Το τεμάχιο (B) υποβλήθηκε σε αντίστοιχη διαδικασία με αυτή που παρουσιάστηκε για το τεμάχιο (A). Για τις δύο σαρώσεις δεν χρησιμοποιήθηκε μέγγενη.



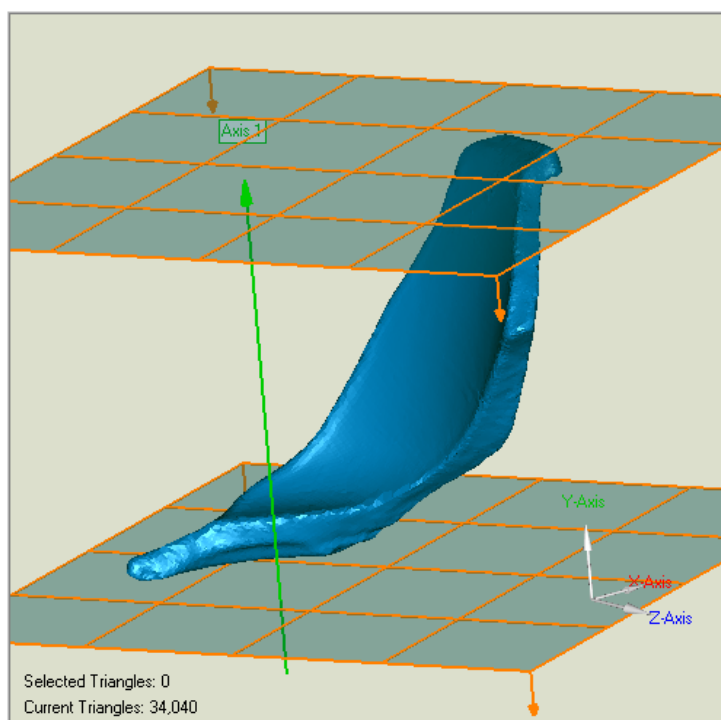
Εικόνα 87: Νέφος σημείων σάρωσης τεμαχίου (B)

Αφού εκτελέστηκαν οι εντολές Registration, Reduce Noise, Uniform Sample, Merge, Fill Holes και Remove Spikes, προέκυψε το μοντέλο της εικόνας 25 που αποτελείται από 34,040 πολύγωνα.



Εικόνα 88: Πολυγωνικό πλέγμα τεμαχίου (B)

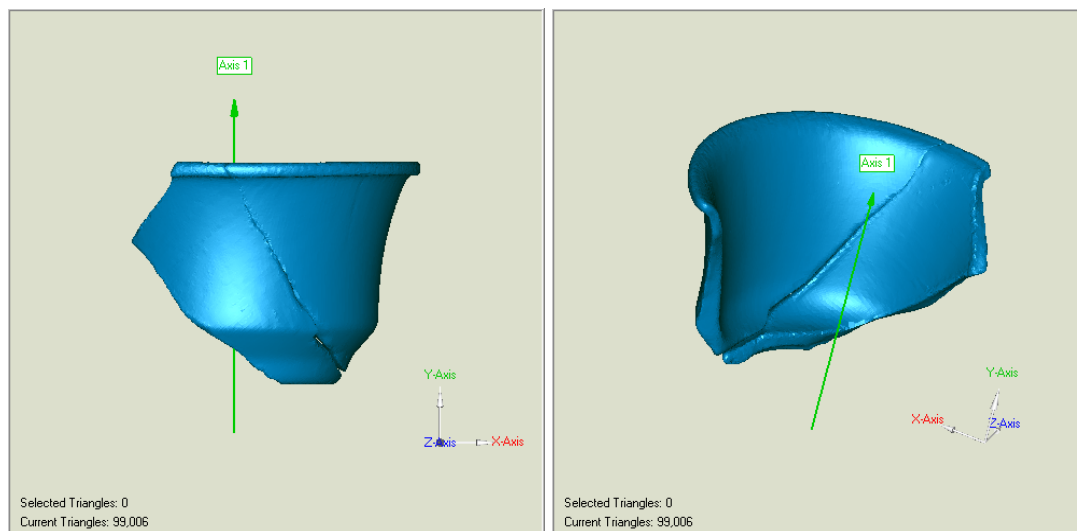
Πραγματοποιήθηκε υπολογισμός του άξονα συμμετρίας (εντολή *Create datums*) και βάσει αυτού σχηματίστηκαν τα δύο επίπεδα που είναι κάθετα σε αυτόν και εφάπτονται στο χείλος και τη βάση του τεμαχίου. Μέσω της εντολής *Alignment to world* ο άξονας συμμετρίας ταυτίστηκε με τον άξονα Y και το επίπεδο του χείλους με το επίπεδο XZ.



Εικόνα 89: Άξονας συμμετρίας και βοηθητικά επίπεδα

Σύνθεση των τεμαγίων (Α) και (Β)

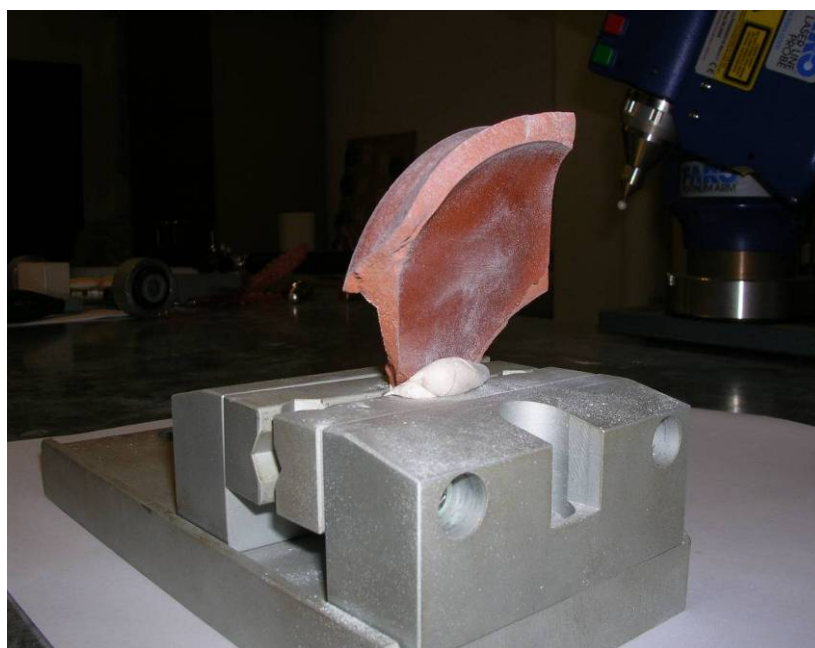
Η σύνθεση των πολυγωνικών μοντέλων των τεμαγίων Α και Β πραγματοποιήθηκε σε μερικά απλά βήματα. Καταρχήν έγινε εισαγωγή των δύο μοντέλων σε ένα κοινό αρχείο. Ταυτίστηκαν οι δύο άξονες περιστροφής. Τέλος, μετατοπίστηκε περιφερειακά το ένα από τα δύο περί τον άξονα συμμετρίας, μέχρι να λάβει την σωστή σχετική θέση ως προς το άλλο. Όπως διακρίνεται στην εικόνα 27, τα κομμάτια εφάρμοσαν μεταξύ τους αρκετά ικανοποιητικά. Σημειώνεται ότι η απόλυτη σύνθεση είναι αδύνατο να επιτευχθεί διότι έχουν προηγηθεί αναγκαίες διαδικασίες επεξεργασίας οι οποίες συντέλεσαν στην κατά το δυνατόν ελάχιστη παραμόρφωση των επιφανειών.



Εικόνα 90: Σύνθεση τεμαγίων (Α) και (Β)

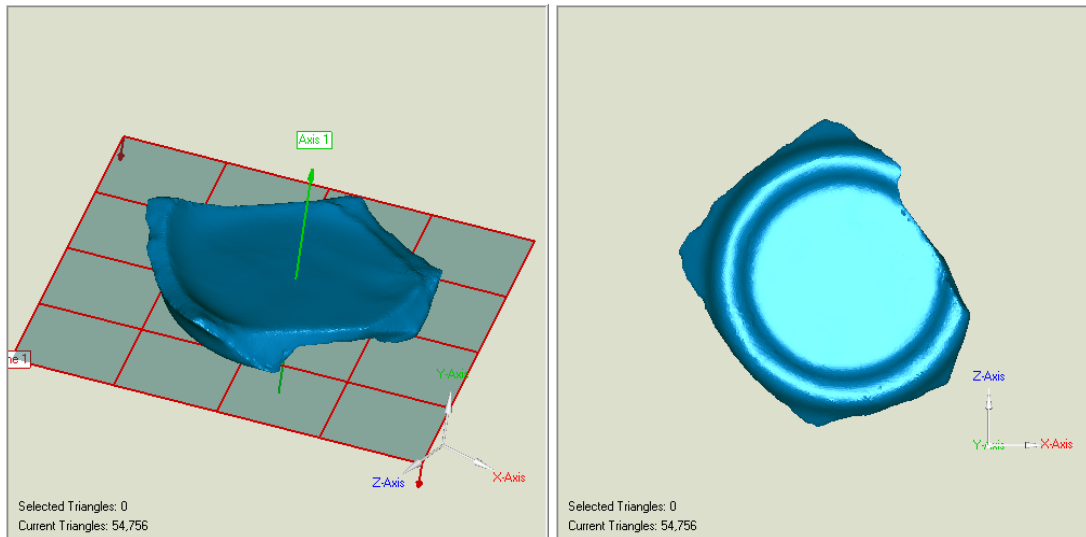
Σάρωση τεμαγίου (Γ)

Το τεμάχιο (Γ) στηρίχθηκε στην μέγγενη όπως φαίνεται στην Εικόνα 91, και καλύφθηκε με μία λεπτή στρώση πούδρας.



Εικόνα 91: Τοποθέτηση τεμαγίου στη μέγγενη και εφαρμογή πούδρας (τεμάχιο Γ)

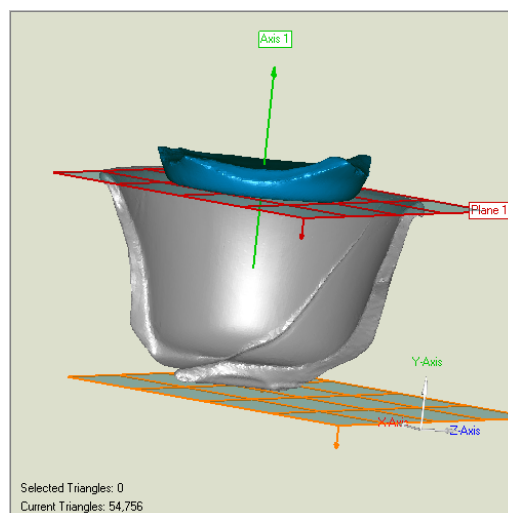
Από τη σάρωση και επεξεργασία του τεμαχίου (Γ) προέκυψε το μοντέλο που εμφανίζεται στην εικόνα 28. Με τη μέθοδο που ήδη αναφέρθηκε δημιουργήθηκαν ο άξονας περιστροφής και το επίπεδο που εφάπτεται στην βάση.



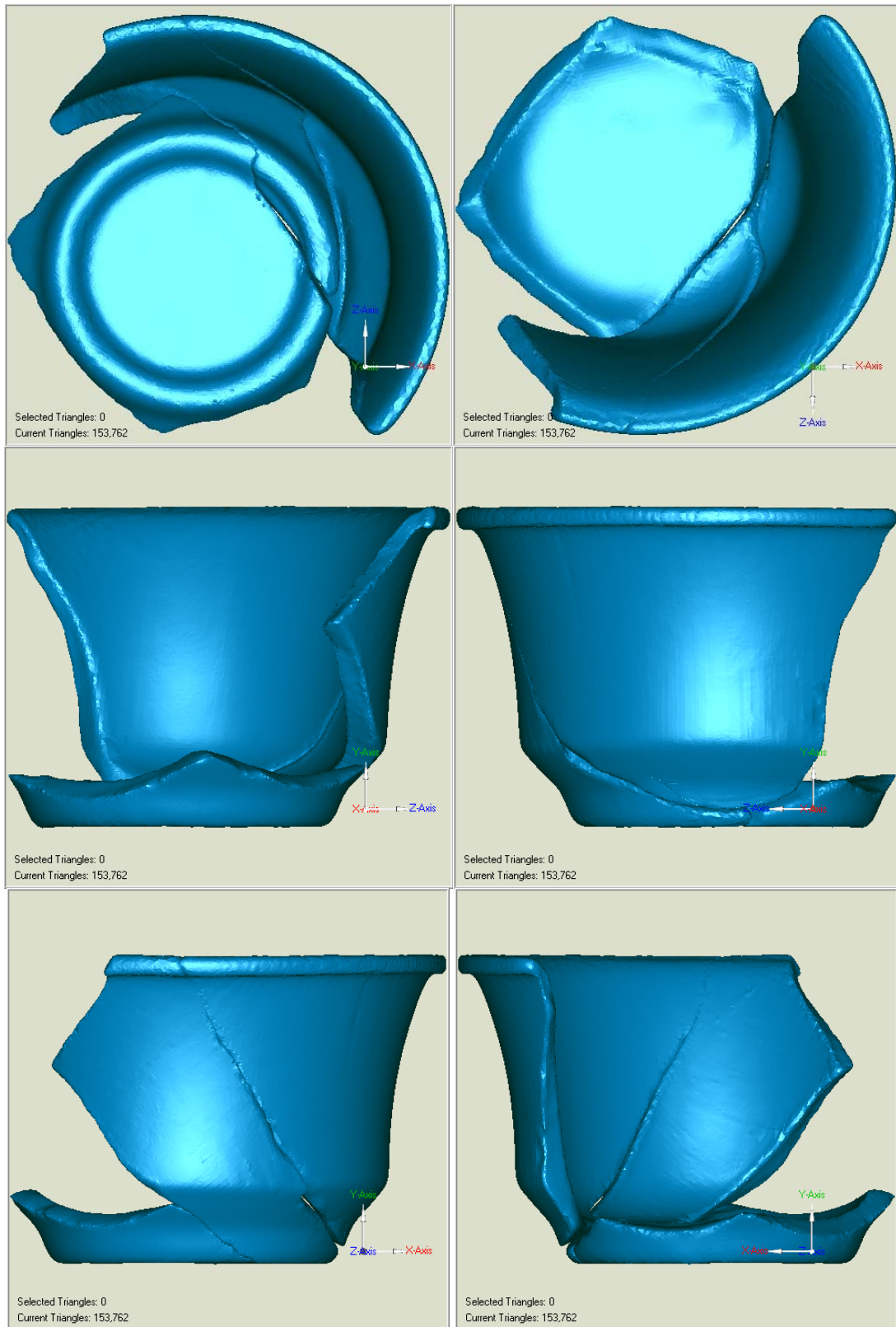
Εικόνα 92: Πολυγωνικό πλέγμα και άνοψη τεμαχίου (Γ)

Σύνθεση των τριών θραυσμάτων

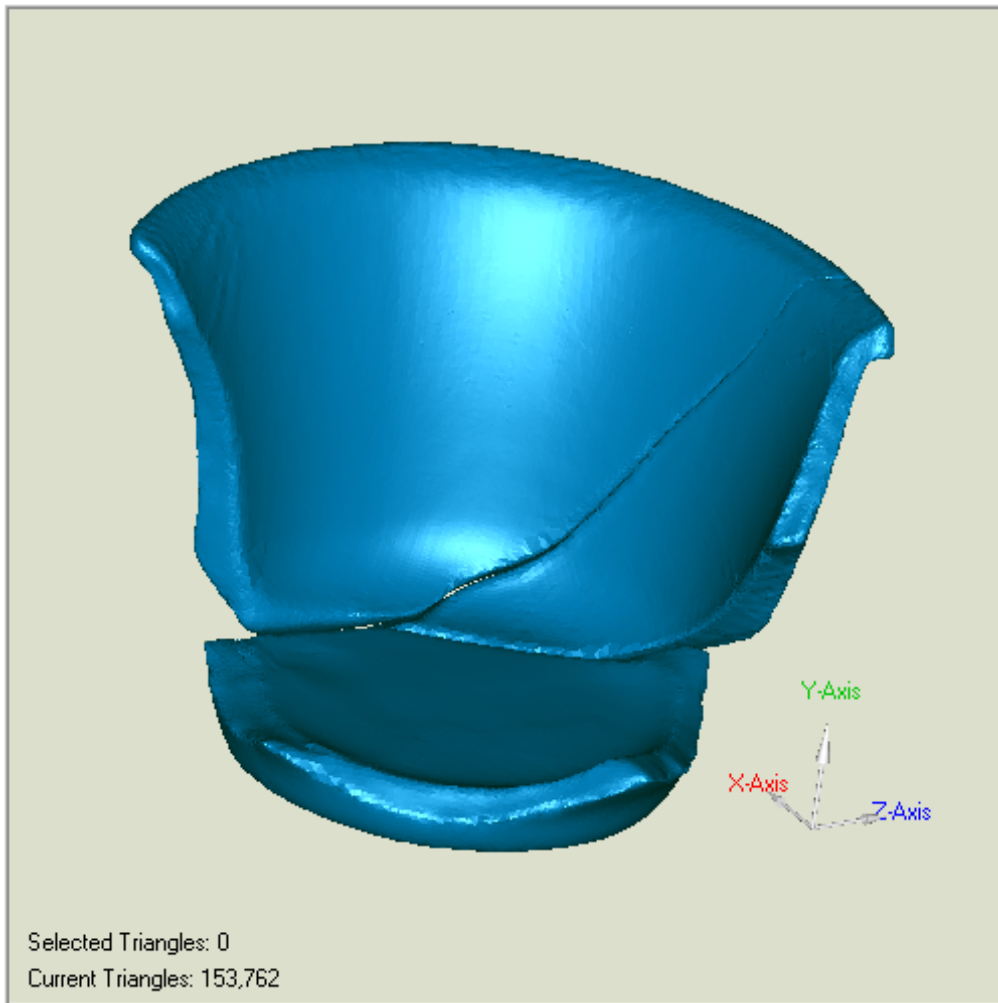
Το μοντέλο (Γ) εισήχθη στο ίδιο αρχείο με τα ήδη ευθυγραμμισμένα μοντέλα των (Α) και (Β). Οι άξονες περιστροφής των τριών μοντέλων ταυτίστηκαν με τον Y άξονα. Με την εκτέλεση της εντολής *Datum/Feature Alignment* μετακινήθηκε η βάση τόσο ώστε το επίπεδο (1) αυτής να συμπέσει με το επίπεδο (1) του τεμαχίου (Β). Το αποτέλεσμα της σύνθεσης των τριών κομματιών φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 93: Εισαγωγή του τεμαχίου (Γ) και σύνθεση με τα (Α) και (Β)



Εικόνα 94: Όψεις της σύνθεσης των τριών θραυσμάτων

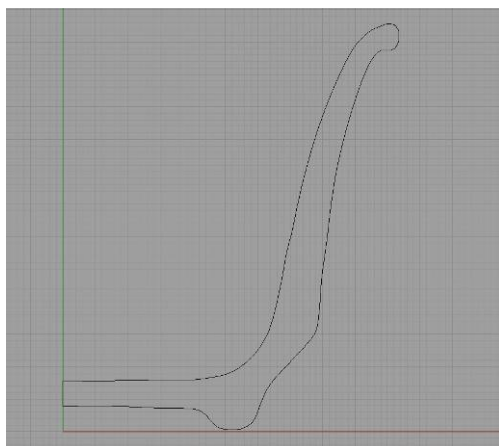


Εικόνα 95: Προοπτική άποψη της σύνθεσης

Πραγματοποιήθηκε τομή του μοντέλου με ένα επίπεδο, ώστε να προκύψει το αντιπροσωπευτικό προφίλ της διατομής με την μορφή καμπύλης. Η καμπύλη εισήχθη στο λογισμικό RHINOCEROS και με την πλήρη περιστροφή της περί τον άξονα συμμετρίας απέδωσε το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο. Η μέγιστη διάμετρος υπολογίστηκε σε 103.50mm και το ύψος σε 62.51mm. Η απόκλιση των τιμών αυτών σε σχέση με εκείνες που υπολογίστηκαν μόνο βάσει του τεμαχίου (Α) (διάμετρος 102mm, ύψος 58mm) οφείλεται στο ότι στην δεύτερη περίπτωση ο όγκος της πληροφορίας είναι μεγαλύτερος. Συνεπώς προσεγγίζονται καλύτερα οι πραγματικές διαστάσεις του κυαθίου.

Αυτή η ψηφιακή αναπαράσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια σειρά εφαρμογών, όπως:

- Κατασκευή πιστών αντιγράφων μέσω συστημάτων CAD/CAM
- Έκθεση σε εικονικό-ψηφιακό μουσείο (e-museum)
- Χρήση κατά την συντήρηση
- Ταύτιση ή σύγκριση με λοιπά ευρήματα μέσω δημιουργίας βάσης δεδομένων



Εικόνα 96: Προφίλ διατομής



Εικόνα 97: Βασικές διαστάσεις του μοντέλου

Το πρωτότυπο κύαθιο μετρήθηκε με την βοήθεια της ΜΜΣ-ΤΓ και η διάμετρος βρέθηκε 102.528mm ενώ το ύψος 62.283mm. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την τοποθέτηση του αντικειμένου στην τράπεζα μέτρησης, παρατηρήθηκε ότι το χείλος δεν εφαπτόταν απόλυτα με τη γρανιτένια επιφάνεια έδρασης της μηχανής, γεγονός το οποίο οφείλεται στον τρόπο κατασκευής του (*χειροποίητο κεραμικό*). Όπως προκύπτει από τις μετρούμενες τιμές, η διάμετρος που υπολογίστηκε μέσω του Geomagis είναι περίπου 1mm μικρότερη και το ύψος 0.2mm μικρότερο επίσης, σε σχέση με το μετρημένο από την ΜΜΣ-ΤΓ. Τα αποτελέσματα αυτά θεωρούνται αναμενόμενα αφ' ενός λόγω της αβεβαιότητας της ΜΜΣ-ΑΒ και της λέιζερ κάμερας και αφετέρου λόγω της επεξεργασίας του νέφους σημείων από το λογισμικό Geomagis που ευνοεί την συρρίκνωση των επιφανειών με έντονη καμπυλότητα όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση η περιοχές του χείλους και της βάσης. Επιπρόσθετα, το αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητικό καθώς το νέφος σημείων προέρχεται μόνο από ένα τμήμα του κυαθίου δυσχεραίνοντας έτσι τον προσδιορισμό του άξονα συμμετρίας του συνόλου. Δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι το αντικείμενο αρχικά κατασκευάστηκε χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις σε γεωμετρική ακρίβεια και η συμμετρικότητά του ήταν μία αναγκαία παραδοχή με στόχο την επιστημονική του μελέτη.



Εικόνα 98: Φωτορεαλιστική απεικόνιση του μοντέλου του κωθίου

11

Συμπεράσματα & Προοπτικές Διπλωματικής

Εργασίας

11.1 Συμπεράσματα Δ. Ε.

Η υψηλής πιστότητας ψηφιακή αποτύπωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς ανάγεται/ αποτελεί πρόβλημα Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού, με ιδιαίτερη έμφαση στη διατήρηση προδιαγραφών γεωμετρικής ακρίβειας ελευθέρων επιφανειών. Ως τέτοιο εντάσσεται στις δραστηριότητες του Μηχανολόγου Μηχανικού, εφόσον η εμπειρική γνώση και η καλλιτεχνική προσέγγιση παραχωρούν τη θέση τους στα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα ψηφιακής αποτύπωσης, στη Μετρολογία και τον Μηχανολογικό Σχεδιασμό σε Η/Υ. Στη μεγάλη πλειοψηφία των εφαρμογών ΑΜΣ, απαιτήσεις γεωμετρικής ακρίβειας καθορίζονται σε εξαρτήματα που αποτελούν μέρος συναρμολογημένου μηχανολογικού συνόλου με δύο ή περισσότερα συνεργαζόμενα στοιχεία. Η ιδιαιτερότητα και η συμβολή της παρούσας ΔΕ μπορεί να συνοψιστεί στο ότι απευθύνεται στην πειραματική διερεύνηση της γεωμετρικής και διαστασιολογικής πιστότητας σε εφαρμογές ΑΜΣ **μη λειτουργικού χαρακτήρα** (ψηφιακή αποτύπωση ανάγλυφων, γλυπτών κλπ) οι οποίες επιπροσθέτως έχουν την ιδιαιτερότητα των ελευθέρων επιφανειών.

Η αποτελεσματική εφαρμογή των ΜΜΣ-ΑΒ στο εν λόγω πεδίο απαιτεί τον συνδυασμό γνώσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας αλλά και συναφούς εμπειρίας. Αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση η μελέτη, κατανόηση και ποσοτική περιγραφή των «αδυναμιών» του συστήματος «υλισμικό – συνθήκες ψηφιακής αποτύπωσης – λογισμικό CAD μοντελοποίησης» για την επιτυχή αντιμετώπιση των παραγόντων/ παραμέτρων που επηρεάζουν το τελικό παραγόμενο αποτέλεσμα. Η λύση της εφαρμογής λεπτού στρώματος πούδρας σε στιλπνές επιφάνειες οι οποίες λόγω αντανάκλασης της δέσμης λείζερ

δημιουργούν θόρυβο είναι ένα τέτοιο παράδειγμα συνδυασμού εμπειρικής τεχνικής και επιστημονικής προσέγγισης.

Επίσης, ως συμπέρασμα της ΔΕ προκύπτει ότι σε γενικές γραμμές η επίδραση των παραμέτρων του λογισμικού Geomagic Studio που διερευνήθηκαν πειραματικά κατά την εκπόνησή της δεν φαίνεται να είναι καθοριστική για τη διαστασιολογική πιστότητα των παραγόμενων CAD μοντέλων του εξαρτήματος. Ενισχύεται με τον τρόπο αυτό η άποψη ότι το εύρος της αβεβαιότητας στο παραγόμενο/ τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται κυρίως από παράγοντες που σχετίζονται με το υλισμικό (Μηχανή ΜΜΣ-ΑΒ και λέιζερ κάμερα) και τις συνθήκες ψηφιακής αποτύπωσης (θερμοκρασία, δονήσεις, διάχυτος φωτισμός και αντανάκλασεις, υφή επιφάνειας αντικειμένου, καταλληλότητα μέσων στήριξης κ.α.) παρά από τις παραμέτρους του λογισμικού επεξεργασίας του λαμβανόμενου νέφους σημείων και της CAD μοντελοποίησης.

Ειδικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την πειραματική διερεύνηση

Πριν την έναρξη της σάρωσης κρίνεται απαραίτητη η εκπόνηση ενός σχεδίου της διαδικασίας όσον αφορά στις διάφορες τοποθετήσεις/ προσδέσεις του αντικειμένου ώστε να αποφευχθούν τυχόν παραλείψεις ή περιττές σαρώσεις που οδηγούν είτε σε αναξιοπίστα αποτελέσματα είτε σε απώλεια χρόνου. Επίσης, προτείνεται η πραγματοποίηση κάποιων δοκιμαστικών σαρώσεων σε τμήματα της επιφάνειας.

Από τις Εφαρμογές 1 και 2 εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι προδιαγραφές της κατασκευάστριας εταιρείας για την επίδοση ακρίβειας της ΜΜΣ-ΑΒ FAROARM επαληθεύονται από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Με τον τρόπο αυτό επικυρώνεται και τεκμηριώνεται πειραματικά η αξιοπιστία της εν λόγω ΜΜΣ-ΑΒ.

Επίσης, επικυρώνεται ότι η προσέγγιση των επαναλαμβανόμενων, επιμέρους επικαλυπτόμενων σαρώσεων μιας επιφάνειας δεν είναι προς όφελος της πιστότητας. Μία προσεκτική σάρωση αρκεί για να αποδώσει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Σε υπερβολικά λείες επιφάνειες καθίσταται θεμιτή η εναπόθεση λεπτού στρώματος πούδρας ώστε η επιφάνεια αυτή να αποκτήσει ιδιότητες πιο «φιλικές» προς την λέιζερ κάμερα του FARO.

Από την τρίτη εφαρμογή γίνεται κατανοητό πώς μπορεί η τεχνολογία σάρωσης να συντελέσει δραστικά στην αρχαιολογική μελέτη και συγκεκριμένα στην ψηφιακή αποτύπωση, αποκατάσταση και δημιουργία ηλεκτρονικού στερεού μοντέλου έχοντας μόνο στην διάθεσή της τμήμα του αντικειμένου αυτού.

Η καταλληλότητα του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού αποτύπωσης (επαφής ή οπτικού) κρίνεται σε σχέση με την απαιτούμενη ακρίβεια μέτρησης και αποτύπωσης, την σκοπούμενη χρήση των αποτελεσμάτων και κυρίως από την μορφή και γεωμετρική σύνθεση του πρωτογενούς αντικειμένου. Έτσι, η γεωμετρική σύνθεση και μορφή του αντικειμένου της αποτύπωσης θα πρέπει να είναι ο «οδηγός» για την επιλογή των μέσων, της στρατηγικής και της ιεράρχησης των βημάτων του αντίστροφου σχεδιασμού, καθώς και για τις φάσεις μετρήσεων, συλλογής δεδομένων και μετέπειτα σχεδιασμού του αντικειμένου σε περιβάλλον CAD.

Επίσης, η επεξεργασία ενός μοντέλου στο περιβάλλον του λογισμικού Geomagic απαιτεί εξοικείωση και ιδιαίτερη προσοχή κατά τον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων, διότι

είναι εύκολο ο χρήστης να οδηγηθεί σε ένα μοντέλο με πολύ ελκυστική εμφάνιση (λείο, συμμετρικό) το οποίο όμως δεν θα ανταποκρίνεται στο πραγματικό αντικείμενο. Οι επιλογές και οι ρυθμίσεις των παραμέτρων του λογισμικού αφήνουν σημαντικό περιθώριο υποκειμενικών εκτιμήσεων και εξαρτώνται κατά πολύ από τη σχετική εμπειρία του χρήστη.

11.2 Κατευθύνσεις/ Προτάσεις για την συνέχεια της Δ.Ε.

Η εκπόνηση της ΔΕ υπήρξε αφορμή για την ανάδειξη ορισμένων ερευνητικών κατευθύνσεων, τόσο στο πεδίο της 3D CAD μοντελοποίησης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς, όσο και στην ευρύτερη περιοχή της γεωμετρικής ακρίβειας μηχανολογικών κατασκευών. Παρακάτω προτείνονται κατευθύνσεις για τη συνέχιση της έρευνας και επισημαίνονται τα αντίστοιχα τεχνολογικά προβλήματα στα οποία η περαιτέρω εμβάθυνση και η πληρέστερη επιστημονική τους προσέγγιση αποτελούν ανοιχτό ερευνητικό πεδίο.

A) Η ανάπτυξη μεθοδολογίας συστηματικού υπολογισμού αβεβαιότητας του 3D-CAD μοντέλου, λαμβάνοντας συνολικά υπόψη τους παράγοντες που επηρεάζουν τις ενδιάμεσες φάσεις δημιουργίας του, σε συμφωνία με τις κατευθύνσεις του προτύπου ISO - GUM

B) η δημιουργία υπολογιστικού εργαλείου για την επιστημονικά τεκμηριωμένη κατάρτιση προδιαγραφών γεωμετρικής και διαστασιολογικής ακρίβειας του 3D-CAD μοντέλου σε συνάρτηση με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του αντικειμένου (π.χ. μέγεθος, γεωμετρική πολυπλοκότητα) και τις απαιτήσεις ακρίβειας της εκάστοτε εφαρμογής (π.χ. μελέτη μουσειακής στήριξης, κατασκευή πιστών αντιγράφων).

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] H. B. Voelcker et al., An introduction to PADL: Characteristics, status, and rationale. Technical Report Tech. Momo. No. 22, Production Automation Project, University of Rochester, Rochester, NY, December 1974.
- [2] <http://web.mit.edu/hyperbook/Patrikalakis-Maekawa-Cho/node7.html>
- [3] Kaisarlis, G.J., Diplaris, S.C. and Sfantsikopoulos, M.M., Identifying and Quantifying accuracy requirements for cultural heritage digital 3D object documentation, Proc. of ITECOM Conference, Athens, Greece, 16 – 17 Dec., 2003, ITECOM CD Proceedings.
- [4] Kaisarlis, G.J., Diplaris, S.C. and Sfantsikopoulos, M.M., Size scale in 3D Digital Documentation of cultural heritage objects, Proc. of 6th International Conference for MESOMECHANICS, Patras, Greece, May 31 – June 4, 2004, pp.169 – 173.
- [5] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization for Standardization, Geneva. ISBN 92-67- 10188-9, First Edition 1993, corrected and reprinted 1995. (BSI Equivalent: BSI PD 6461: 1995, Vocabulary of Metrology, Part 3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. British Standards Institution, London.).
- [6] **From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition**, Fabio Bruno, Stefano Bruno, Giovanna De Sensi, Maria-Laura Luchi, Stefania Mancuso, Maurizio Muzzupappa, Journal of Cultural Heritage, 11, (2010), 42–49.
- [7] **Evolution of the architectural and heritage representation**, Amparo Núñez Andrés, Felipe Buill Pozuelo, Landscape and Urban Planning, 91, (2009), 105–112.
- [8] **3D Modeling of Complex and Detailed Cultural Heritage Using Multi-Resolution Data**, Fabio Remondino, Stefano Girardi, Alessandro Rizzi, and Lorenzo Gonzo, ACM Journal on Computing and Cultural Heritage, Vol. 2, No. 1, July 2009.
- [9] **Qp: A tool for generating 3D models of ancient Greek pottery**, Anestis Koutsoudis, George Pavlidis, Fotis Arnaoutoglou, Despina Tsiafakis, Christodoulos Chamzas, Journal of Cultural Heritage, 10, (2009), 281–295
- [10] **Sampled 3D Models for CH Applications: A Viable and Enabling New Medium or Just a Technological Exercise?**, Paolo Cignoni and Roberto Scopigno, ACM Journal on Computing and Cultural

- [11] **Automatic matching of sculpture fragments as modern tool for archaeological verification of hypotheses on their origin**, A. Bujakiewicz, M. Kowalczyk, P. Podlasiak, D. Zawieska, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, (2008), 285-290
- [12] **Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning**, Naci Yastikli, Journal of Cultural Heritage, 8 (2007), 423- 427
- [13] **Building a digital model of Michelangelo's Florentine Pieta'** F. Bernardini, H. E. Rushmeier, I. M. Martin, J. Mittleman, G. Taubin, IEEE Computer Graphics and Applications, 22, (1), (2002), 59–67.
- [14] **Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo**, Raffaella Fontana ,Marinella Greco, Marzia Materazzi, Enrico Pampaloni, Luca Pezzati, Claudio Rocchini, Roberto Scopigno, Journal of Cultural Heritage, 3, (2002), 325–331
- [15] **Active Optical 3D Imaging for Heritage Applications**, G. Godin, J.-A. Beraldin, J. Taylor et al. IEEE Computer Graphics and Applications, 22, (5), (2002), 24–34.
- [16] **3D digitizing of cultural heritage**, Massimiliano Pieraccini, Gabriele Guidi, Carlo Atzeni, Journal of Cultural Heritage, (2), (2001), 63-70.
- [17] **Automatic monitoring and 3D reconstruction applied to cultural heritage**, Federico Pedersini, Augusto Sarti, Stefano Tubaro, Journal of Cultural Heritage, 1, (2000), 301–313.
- [18] **Computer graphics: assistance for archaeological hypotheses**, Stephane Potier , Jean Louis Maltret, Jacques Zoller, Automation in Construction, 9, (2000),117–128
- [19] ISO 10360, Acceptance and reverification tests for CMM, ISO, Geneva, 2000.
- [20] ASME B89.4.22-2004, Methods for performance evaluation of articulated arm coordinate measuring machines, 2005
- [21] N. Vukasinovic, D. Bracun, The influence of incident angle, object colour and distance on CNC laser scanning, University of Ljubljana, 2009.
- [22] Εγχειρίδιο Χρήσης “Geomagic Studio 9”, Raindrop Geomagic Inc .
- [23] Εγχειρίδιο Χρήσης “Mistral 07.07.05 Operation Manual”, DEA/Brown&Sharpe, 1999 .
- [24] <http://www.faro.com>
- [25] Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (EIM), Οι βασικοί σκοποί του EIM, N.2231/94.
- [26] Δρ. Α. Λευκόπουλος, Διακριβώσεις: ο ακρογωνιαίος λίθος των μετρήσεων

και της ποιότητας.

- [27] Μ. Ε. Μαθιουλάκης, “Μέτρηση, Ποιότητα Μέτρησης και Αβεβαιότητα”, Έκδοση Ελληνικής Ένωσης Εργαστηρίων, Αθήνα, 2004.
- [28] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM), Second Edition 1993. International Organization for Standardization, Geneva.