



Συγκριτική πειραματική αποτίμηση της διαστατικής ακρίβειας σε εξαρτήματα που έχουν παραχθεί με προσθετική κατασκευή που επιτυγχάνεται με εφαρμογή σαρωτή laser σε σχέση με μηχανές CMM.

Τομέας: Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου

Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2025

Θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά ευγνωμοσύνη που νιώθω προς τον καθηγητή μου, κύριο Βασίλειο Σπιτά, για την καθοδήγησή του και τη μοναδική ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετάσχω σε ένα έργο με σημαντική ερευνητική αξία και άμεσο επαγγελματικό αντίκτυπο στην καριέρα μου. Θέλω επίσης να εκφράσω την εκτίμησή μου για το διδακτορικό ερευνητή Δημήτρη Κρυφό, με τον οποίο είχα την τιμή να συνεργαστώ. Ο πολύτιμος χρόνος του, οι διορατικές παρατηρήσεις του και η ενθάρρυνσή του ήταν καθοριστικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής και την επέκταση των γνώσεών μου.

Ιδιαίτερη ευχαριστία και ευγνωμοσύνη νιώθω για την οικογένειά μου. Συγκεκριμένα, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην γιαγιά μου, Ολυμπία, η οποία ήταν δίπλα μου σε όλα τα παιδικά και εφηβικά μου χρόνια και μου έδειξε μέσω του βίου της πως χωρίς μόχθο και προσπάθεια, κανένας στόχος δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. Στον μεγάλο αδερφό μου, Κωνσταντίνο, ο οποίος ήταν πάντοτε ένα βήμα μπροστά από εμένα και με κατεύθυνε ως πρότυπο σε σωστές αποφάσεις στη ζωή μου. Και φυσικά, στη μητέρα μου, Ελένη, η οποία πάντοτε με αγάπη φρόντιζε να ενισχύει κάθε προσπάθειά μου και να μου παρέχει ότι χρειαστώ ως υποδειγματικός γονέας.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αντώνιος Τζιαβάρας

Περιεχόμενα

1.	Κεφάλαιο 1	5
1.1	Περίληψη	5
1.2	Πλαίσιο	6
2.	Κεφάλαιο 2	10
2.1	Εισαγωγή	10
2.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	11
2.2.1	Ιστορία της μετρολογίας και εφαρμογές.	11
2.2.2	Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός.....	14
2.2.3	Γεωμετρική Ανάλυση Διαστάσεων και Ανοχών (GD&T)	28
2.2.4	Ιστορική Αναδρομή των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων	30
2.2.5	Σαρωτές Laser Ιστορική Αναδρομή.	31
2.2.6	Αρχές λειτουργίας Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων.....	32
2.2.7	Αρχές Λειτουργίας Σαρωτών Laser.....	34
2.2.8	Υπολογισμός κατασκευαστικών σφαλμάτων εξαρτημάτων.....	35
2.3	Μεθοδολογία.....	39
2.3.1	Εξοικείωση με τις Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων.	39
2.3.2	Εξοικείωση με τους Σαρωτές Laser	43
2.3.3	Κατασκευή Γεωμετρίας Αναφοράς	47
2.3.4	Κατασκευή και μέτρηση του πρωτοτύπου.....	52
3.	Συμπεράσματα	58
4.	Παράρτημα Α.....	62
5.	Παράρτημα Β.....	67
6.	Παράρτημα Γ	70
7.	Παράρτημα Δ.....	75
8.	Κατάλογος Πινάκων.....	77
9.	Κατάλογος Εικόνων	78
10.	Κατάλογος Αναφορών	80

1. Κεφάλαιο 1

1.1 Περίληψη

Η μετρολογία, η οποία είναι η επιστήμη της μέτρησης και της ακρίβειας, διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στη σύγχρονη βιομηχανία, υποστηρίζοντας την ακριβή αξιολόγηση προϊόντων, την εξασφάλιση ποιότητας και τη διασφάλιση αυστηρών προδιαγραφών στις διαδικασίες παραγωγής. Στο πλαίσιο αυτό, τα μετρητικά εργαλεία σαρωτών laser και οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machines) αποτελούν σημαντικές τεχνολογίες που ενισχύουν την εφαρμογή της μετρολογίας σε περιβάλλοντα υψηλών απαιτήσεων.

Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM), χρησιμοποιώντας αισθητήρες επαφής, επιτρέπουν την ακριβή μέτρηση συγκεκριμένων σημείων ενός αντικειμένου για την απόκτηση των χωρικών συντεταγμένων του. Είναι γνωστές για την υψηλή αξιοπιστία μετρήσεών τους, γεγονός που τις καθιστά εξαιρετικά χρήσιμες σε διαδικασίες όπου η ακρίβεια είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ποιότητας και τη συμμόρφωση σε συγκεκριμένα πρότυπα. Από την άλλη, οι σαρωτές laser χρησιμοποιούν ακτίνες laser για την τρισδιάστατη σάρωση και απεικόνιση αντικειμένων, καταγράφοντας λεπτομερώς τη γεωμετρική τους μορφή, χάρη στα υπεράριθμα σημεία που λαμβάνουν κατά τη χρήση τους. Η μέθοδος αυτή, ταχύτατη και σχετικά υψηλής ακρίβειας, είναι ιδανική για την καταγραφή και ανάλυση περίπλοκων και σύνθετων επιφανειών, καθώς και την κατασκευή τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων, καθιστώντας την απαραίτητη για εφαρμογές που απαιτούν άμεση επαλήθευση και έλεγχο της ποιότητας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση της αξιοπιστίας των μετρητικών αποτελεσμάτων ενός σαρωτή laser συγκριτικά με τα αντίστοιχα που παρέχει μία μηχανή μέτρησης συντεταγμένων. Συγκεκριμένα, για την διερεύνηση της ακρίβειας μέτρησης ενός σαρωτή laser, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε διάταξη αποτελούμενη από βασικές γεωμετρικές (κύβους, εσωτερικούς και εξωτερικούς κυλίνδρους, εσωτερικές και εξωτερικές πυραμίδες, εσωτερικούς και εξωτερικούς κώνους κ.α.). Αρχικά, πραγματοποιήθηκε γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών χρησιμοποιώντας μηχανή μέτρησης συντεταγμένων και τα αποτελέσματα της ορίστηκαν ως μετρήσεις αναφοράς, δεδομένης της γνωστής υψηλής ακρίβειας τους. Στην πορεία, η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε με χρήση σαρωτή laser και η επεξεργασία και αξιολόγηση του νέφους σημείων έγινε στα λογισμικά της 3D Systems και συγκεκριμένα με τα Geomagic Softwares.

Τέλος, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των δύο τεχνολογιών και με στατιστικές μεθόδους βρέθηκε η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του σαρωτή laser, καθώς έγινε σύγκριση της ακρίβειας που παρέχει συγκριτικά με μία μηχανή μέτρησης συντεταγμένων. Παράλληλα, κρίθηκε και η ικανότητα της να βρει εφαρμογή σε κλάδους της βιομηχανίας όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια.

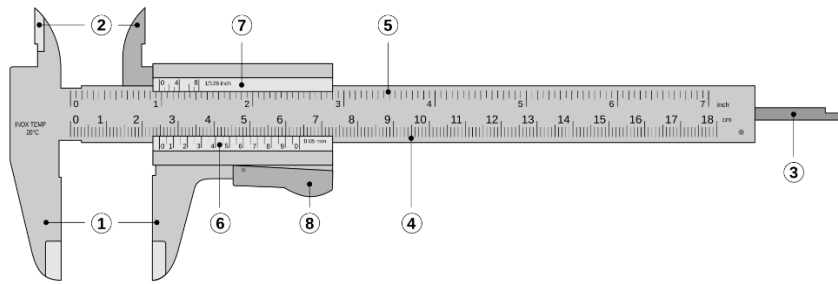
1.2 Πλαίσιο

Η μετρολογία αποτελεί έναν κρίσιμο επιστημονικό τομέα για τον μηχανολόγο μηχανικό, καθώς επικεντρώνεται στη διαδικασία της μέτρησης. Η υιοθέτηση ενός ενιαίου συστήματος μονάδων για την καταγραφή μετρήσεων, σε συνδυασμό με την ακρίβεια, την επαναληψιμότητα και την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων, αναδεικνύει τη μετρολογία ως θεμελιώδη παράγοντα στην πρόοδο της τεχνολογίας, της επιστήμης και της βιομηχανίας. Με τη συνεχή εξέλιξη των επιστημονικών μεθόδων, έχουν αναπτυχθεί εργαλεία που παρέχουν εξαιρετικά ακριβείς μετρήσεις, διευρύνοντας τις δυνατότητες της βιομηχανικής παραγωγής, ειδικά σε τομείς που απαιτούν υψηλό επίπεδο ακρίβειας, διασφάλισης ποιότητας και πιστοποίησης προϊόντων για την επιτυχή διεξόδυσή τους στην παγκόσμια αγορά. [1]

Σύμφωνα με την τεχνολογική εξέλιξη και την πληθώρα διαθέσιμων μετρητικών εργαλείων στη μετρολογία, προκύπτει η ανάγκη κατηγοριοποίησής τους σε δύο κύριες ομάδες. Βασισμένες στην καινοτομία και τις μετρητικές τους δυνατότητες διακρίνονται σε συμβατικά και μη συμβατικά μετρητικά εργαλεία. Ορισμένα συμβατικά μετρητικά εργαλεία που είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα για τη διενέργεια απλών αλλά ακριβών μετρήσεων, αποτελούν τα μικρόμετρα (micrometers) (Εικόνα 1), που χρησιμοποιούν σπειρώμα ακριβείας για τον υπολογισμό μικρών διαστάσεων με υψηλή ακρίβεια, τα παχύμετρα (calipers) (Εικόνα 2) που χρησιμοποιούν μηχανική ή ψηφιακή κλίμακα για την καταγραφή μήκους, διαμέτρων και βάθους, τα μικρομετρικά ρολόγια (dial indicators) (Εικόνα 3) που αξιοποιούν έναν περιστροφικό δείκτη για τον έλεγχο αποκλίσεων και τα γωνιόμετρα (anglemeters) (Εικόνα 4) που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση γωνιών μέσω κλίμακας ή αισθητήρα. Ωστόσο, παρότι αποτελούν οικονομική και πρακτική επιλογή για καθημερινές εφαρμογές, η χρήση τους περιορίζεται στη μέτρηση περίπλοκων ή μικροσκοπικών γεωμετριών. [2]



Εικόνα 1: Μικρόμετρο



Εικόνα 2: Παχύμετρο μηχανικής κλίμακας



Εικόνα 3: Μικρομετρικό ρολόι



Εικόνα 4: Ψηφιακό γωνιόμετρο

Αντίθετα, τα μη συμβατικά μετρητικά εργαλεία, όπως οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machines) (Εικόνα 5), οι οποίες χρησιμοποιούν αισθητήρες αφής για τη μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών, και οι σαρωτές laser (Laser Scanners) (Εικόνα 6), οι οποίοι λειτουργούν με την αποτύπωση της επιφάνειας ενός αντικειμένου μέσω μιας δέσμης laser χωρίς άμεση επαφή, αποτελούν τεχνολογικά προηγμένες λύσεις που προσφέρουν πρωτοφανή ακρίβεια και δυνατότητες για την ανάλυση σύνθετων και πολύπλοκων γεωμετριών. Η ικανότητα αυτών των εργαλείων να δημιουργούν τρισδιάστατα μοντέλα και η δυνατότητα επεξεργασίας και ανάλυσής τους με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών, επιτρέπει στους μηχανικούς να επιτύχουν ακριβείς μετρήσεις με εξαιρετικά χαμηλό περιθώριο σφάλματος. Αυτές οι τεχνολογίες βρίσκουν εφαρμογές σε τομείς με αυστηρές προδιαγραφές και απαιτήσεις ποιότητας, όπως η αεροδιαστημική, η ιατρική τεχνολογία, και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου η ακρίβεια και η αξιοπιστία των μετρήσεων είναι ύψιστης σημασίας για την παραγωγή και πιστοποίηση προϊόντων υψηλών προδιαγραφών. Με τη συνεχή ανάπτυξη των μηχανών μέτρησης συντεταγμένων και των σαρωτών laser, οι βιομηχανίες αποκτούν μεγαλύτερη ευχέρεια και ευελιξία στην επίτευξη των πιο αυστηρών απαιτήσεων, ενώ παράλληλα μειώνεται ο χρόνος παραγωγής και αυξάνεται η παραγωγικότητα.



Εικόνα 5: Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων



Εικόνα 6: Σαρωτής Laser

Η αυξανόμενη χρήση μη συμβατικών μετρητικών εργαλείων στον βιομηχανικό τομέα καταδεικνύει την αναγκαιότητα ύπαρξης εξαιρετικής ποιότητας μετρολογικών συστημάτων που δεν περιορίζονται μόνο στην ταχύτητα και την ευχρηστία, αλλά κυρίως στην ακρίβεια που απαιτείται για την επιτυχή ολοκλήρωση απαιτητικών τεχνικών έργων. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην ακρίβεια μέτρησης ενός σαρωτή laser συγκριτικά με μία μηχανή μέτρησης συντεταγμένων, και εν συνεχεία στη δυνατότητα εφαρμογής του στη βιομηχανία ως αξιόπιστη συσκευή για πραγματοποίηση γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T).[1], [3]

2. Κεφάλαιο 2

2.1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την τυποποίηση της ακρίβειας μέτρησης ενός σαρωτή laser. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη δημιουργία ενός απλού γεωμετρικού μοντέλου, που χρησιμοποιείται για τη λήψη μετρήσεων χρησιμοποιώντας αρχικά μια μηχανή μέτρησης συντεταγμένων για την απόκτηση μετρήσεων αναφοράς και μετέπειτα ενός σαρωτή laser. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την άμεση συσχέτιση των μετρήσεων του σαρωτή laser με τις μετρήσεις αναφοράς για την διαπίστωση της ακρίβειάς τους. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να αξιολογούν την ακρίβεια του εξοπλισμού τους με αντικειμενικό τρόπο. Επιπλέον, επιδιώκεται η καθιέρωση της τυποποίησης αυτής ως εργαλείου που θα προσφέρει στο αγοραστικό κοινό αξιόπιστες πληροφορίες για την ακρίβεια μέτρησης ενός σαρωτή laser, διευκολύνοντας έτσι την επιλογή του κατά την αγορά του μετρητικού εξοπλισμού. Η συμβολή της τυποποίησης έγκειται τόσο στη βελτίωση της εμπιστοσύνης προς την τεχνολογία, όσο και στη δυνατότητα σύγκρισης διαφορετικών συσκευών με σαφή και αντικειμενικά κριτήρια.

Είναι σημαντικό να σημειωθούν τα όρια και οι εξαιρέσεις της παρούσας μελέτης. Αρχικά, όσον αφορά τις παραμέτρους που ενδέχεται να εισάγουν σφάλμα κατά τη μέτρηση με έναν σαρωτή laser, στην παρούσα εργασία δεν πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές μετρήσεις σε διαφορετικούς τύπους επιφανειών. Επιφάνειες με διαφορετική υφή (τραχιές ή λείες) ή χρωματική απόδοση (σκούρες ή ανοιχτόχρωμες) δεν εξετάστηκαν ξεχωριστά για να ληφθούν υπόψη πιθανές αποκλίσεις στις μετρήσεις λόγω των χαρακτηριστικών αυτών. Αντίθετα, το αντικείμενο που χρησιμοποιήθηκε για τις σαρώσεις ήταν κατασκευασμένο με τρισδιάστατη προσθετική μέθοδο (3D printing), χρησιμοποιώντας μαύρο μη ανακλαστικό υλικό PLA. [4], [7]

Επιπλέον, η γωνία πρόπτωσης της ακτίνας του σαρωτή laser διατηρήθηκε σταθερή στις 90 μοίρες, καθώς αυτή θεωρήθηκε βέλτιστη για τη γρήγορη και ακριβή δημιουργία του νέφους σημείων. Δεν εξετάστηκε η ακρίβεια σε άλλες γωνίες πρόπτωσης, γεγονός που θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω μελέτης. [8]

Όσον αφορά τις συνθήκες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, αυτές περιορίστηκαν στο ελεγχόμενο περιβάλλον του εργαστηρίου, στο οποίο είναι εγκατεστημένος ο εξοπλισμός. Παράγοντες όπως ο φωτισμός, η θερμοκρασία και η υγρασία του χώρου ήταν συγκεκριμένοι, παρόλο που η αλλαγή των συνθηκών αυτών μπορεί να επηρεάσει σε έναν βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων. [8]

Η μέθοδος κατασκευής του αντικειμένου που σαρώνεται δεν αποτελεί θέμα διερεύνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Το αντικείμενο δημιουργήθηκε σε τρισδιάστατο εκτυπωτή Bambu Lab με χρήση PLA μη ανακλαστικού μαύρου χρώματος. Οι παράμετροι εκτύπωσης, καθώς και η ποιότητα κατασκευής του αντικειμένου, δεν αναλύονται και μπορούν να αποτελέσουν μελλοντική διερεύνηση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή των παραπάνω προσεγγίσεων εξυπηρετεί την απλοποίηση και τη σταθεροποίηση των συνθηκών μέτρησης, με σκοπό την εστίαση στην ανάπτυξη της μεθοδολογίας τυποποίησης. Παράλληλα, οι περιορισμοί αυτοί ανοίγουν τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα σε ευρύτερες και πιο σύνθετες συνθήκες.

2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.2.1 Ιστορία της μετρολογίας και εφαρμογές.

Από την αρχαιότητα μέχρι και τη σύγχρονη εποχή, οι πολιτισμοί βασίστηκαν στο εμπόριο και την κατασκευή για την ανάπτυξή τους. Η μετρολογία, ως η επιστήμη των μετρήσεων, είναι στενά συνδεδεμένη με την πρόοδο του ανθρώπινου είδους και των κοινωνιών, καθώς αποτέλεσε το έρεισμα για την υποστήριξη εμπορικών συναλλαγών και την κατασκευαστική δραστηριότητα. Η ιστορία της χαρακτηρίζεται από την αδιάκοπη προσπάθεια τυποποίησης των μετρήσεων και την ανάπτυξη εξειδικευμένων εργαλείων που εξυπηρετούν τόσο πρακτικούς όσο και επιστημονικούς σκοπούς.[5], [6]

Η αρχική προσπάθεια μέτρησης ξεκινάει από την Αρχαία Αίγυπτο και τη Μεσοποταμία και βασίστηκε στη χρήση φυσικών μεγεθών, όπως το μήκος του ανθρώπινου σώματος. Μονάδες όπως ο πήχης (cubit), το βήμα και η παλάμη αποτέλεσαν τα πρώτα πρότυπα μέτρησης. Η φιλοδοξία του ανθρώπου και οι απαιτήσεις του εμπορίου ωστόσο, άμεσα φανέρωσαν την ανάγκη ύπαρξης τυποποιημένων και πιο αξιόπιστων μετρητικών εργαλείων. Πρώτοι οι Αιγύπτιοι ανέπτυξαν τη «ράβδο του βασιλικού πήχης» (royal cubit rod), μία ράβδο κατασκευασμένη από γρανίτη ή μέταλλο, που εξασφάλιζε σταθερές μετρήσεις και χρησιμοποιήθηκε στις κατασκευές της εποχής. Στην αρχαία Μεσοποταμία χρησιμοποιήθηκαν πήλινα πρότυπα βαρών και ζυγαριές για το εμπόριο. Εκεί αναπτύχθηκαν μονάδες όπως το «mina» και το «shekel», που συνδέονταν με το εμπόριο και τη γεωργία. [5], [6]

Στην αρχαία Ελλάδα, η ραγδαία πρόοδος στις επιστήμες της γεωμετρίας, των μαθηματικών και της αρχιτεκτονικής οδήγησε στην ανάπτυξη προηγμένων εργαλείων, όπως οι διαβήτες και τα γωνιόμετρα, που χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για ακριβείς μετρήσεις και κατασκευές. Επιπλέον, η ανάγκη καταγραφής και παρακολούθησης του χρόνου αποτέλεσε το έναυσμα για την επινόηση της κλεψύδρας και του ρολογιού νερού που προσέφερε μια πρώιμη αλλά αποτελεσματική μέθοδο χρονομέτρησης. Την ίδια περίοδο, οι μονάδες μέτρησης

βασίζονταν στις αναλογίες του ανθρώπινου σώματος, όπως το πόδι και ο πήχυς, αποδεικνύοντας την πρακτική προσέγγιση της εποχής στις μετρήσεις. [5], [6]

Στη ρωμαϊκή εποχή, σημειώθηκε περαιτέρω εξέλιξη στη μετρολογία με την εισαγωγή νέων μονάδων μέτρησης. Η «libra» χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του βάρους, ενώ η «uncia» για τη μέτρηση του βάρους όσο και του μήκους. [5], [6]

Κατά τη μεσαιωνική περίοδο, η ύπαρξη πλήθους τοπικών μονάδων μέτρησης δημιούργησε σημαντικά εμπόδια στην ανάπτυξη του εμπορίου και της τεχνολογίας, λόγω της έλλειψης ενιαίου και τυποποιημένου συστήματος. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, ορισμένα κράτη, όπως η Αγγλία, προχώρησαν σε προσπάθειες τυποποίησης των μονάδων μέτρησης, επιβάλλοντας κανονισμούς που στόχευαν στη διασφάλιση δικαιοσύνης στις εμπορικές συναλλαγές και στην αποφυγή απάτης. [5], [6]

Στο πλαίσιο αυτών των μεταρρυθμίσεων, εισήχθησαν και καθιερώθηκαν μετρητικά εργαλεία μεγαλύτερης ακρίβειας, τα οποία βασίζονταν σε μονάδες όπως η «yard» για τη μέτρηση του μήκους και η «stone» για τον προσδιορισμό του βάρους. Αυτή η προσπάθεια τυποποίησης αποτέλεσε σημαντικό θεμέλιο για τη δημιουργία ενός πιο αξιόπιστου εμπορικού συστήματος, ενώ παράλληλα συνέβαλε στην ενίσχυση της εμπιστοσύνης στις συναλλαγές. Οι εξελίξεις αυτές όχι μόνο διευκόλυναν το εμπόριο, αλλά έθεσαν και τις βάσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη της επιστήμης και της τεχνολογίας, ενισχύοντας τη συνεργασία και την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών περιοχών και πολιτισμών. [5], [6]

Η Αναγέννηση αποτελεί μια καθοριστική περίοδο στην ιστορία, κατά την οποία σημειώθηκε εντυπωσιακή πρόοδος στις επιστήμες, την τεχνολογία, τις τέχνες και το εμπόριο. Αυτή η εποχή, που χαρακτηρίζεται από πνεύμα καινοτομίας και αναζήτησης γνώσης, οδήγησε στην εφεύρεση και εξέλιξη μετρητικών εργαλείων που διαμόρφωσαν τις βάσεις της σύγχρονης μετρολογίας. Ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα ήταν η δημιουργία του πρώιμου θερμομέτρου από τον Γαλιλαίο το 1593, ενώ το βαρόμετρο του Τορικέλλι, το οποίο επινοήθηκε το 1643, αποτέλεσε μια καινοτομία για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης. Εξίσου κομβικό ρόλο στην ακρίβεια μέτρησης έπαιξαν τα ρολόγια εκκρεμούς, που κατασκευάστηκαν από τον Huygens το 1656, προσφέροντας έναν πρωτοφανή βαθμό ακρίβειας στον προσδιορισμό του χρόνου. Επιπλέον, η ανάγκη για αξιόπιστες και τυποποιημένες μεθόδους μετρήσεων οδήγησε στη δημιουργία των πρώτων επιστημονικά τεκμηριωμένων κλιμάκων θερμοκρασίας, όπως οι κλίμακες Κελσίου (Celsius) και Φαρενάιτ (Fahrenheit), οι οποίες έθεσαν τα θεμέλια για τη συστηματική και συγκρίσιμη καταγραφή μετρήσεων. [5], [6]

Οι τεχνολογικές εξελίξεις που έλαβαν μέρος κατά την εποχή της Αναγέννησης δεν περιορίστηκαν απλώς στη βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών των εργαλείων μέτρησης, αλλά εισήγαγαν και νέες μεθοδολογίες που έθεσαν τις βάσεις για τη συστηματική οργάνωση της επιστήμης. Αυτή η πρόοδος συνέβαλε καθοριστικά στη

σύνδεση της επιστημονικής γνώσης με τις πρακτικές εφαρμογές, προετοιμάζοντας το έδαφος για την εποχή της Βιομηχανικής Επανάστασης. Κατά τη συγκεκριμένη περίοδο, εμφανίστηκαν εργαλεία όπως τα μικρόμετρα, οι βαθμονομητές και οι πρώτες μηχανές μέτρησης συντεταγμένων, τα οποία έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια των μετρήσεων και την ανάπτυξη της μαζικής παραγωγής. Παράλληλα, την εποχή αυτή τέθηκαν οι βάσεις για την ύπαρξη του Θεμελιώδους Συστήματος Μονάδων (S.I.), καθώς το 1799, η Γαλλία εισήγαγε το μετρικό σύστημα, που βασιζόταν στο μέτρο και το κιλό, θέτοντας έτσι τις βάσεις για την πρώτη διεθνώς αποδεκτή τυποποίηση. Αυτή η κίνηση αποτέλεσε σημείο καμπής για την ενοποίηση των μετρήσεων, διευκολύνοντας τη διεθνή συνεργασία στο εμπόριο, τη βιομηχανία και την επιστήμη. Η εξέλιξη των μετρητικών συστημάτων συνέβαλε στη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων και στην ενίσχυση της εμπιστοσύνης στις εμπορικές συναλλαγές. Η καθιέρωση των πρώτων διεθνών προτύπων έθεσε τα θεμέλια για την περαιτέρω πρόοδο στον τομέα της μετρολογίας, ο οποίος συνεχίζει να διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στις τεχνολογικές καινοτομίες και στη βελτίωση της καθημερινότητας σήμερα. [5], [6]

Η μετρολογία σήμερα αποτελεί θεμελιώδη κλάδο της σύγχρονης τεχνολογίας, επιστήμης και βιομηχανίας. Επηρεάζει σχεδόν κάθε τομέα της καθημερινής ζωής, από την κατασκευή προϊόντων και τη διασφάλιση ποιότητας, έως την εμπορική συναλλαγή και την ιατρική περίθαλψη. Στη σύγχρονη εποχή, η μετρολογία δεν είναι απλά η διαδικασία μέτρησης, αλλά ένα σύνολο διαδικασιών και τεχνολογιών που εξασφαλίζουν την ακρίβεια, την αξιοπιστία και την τυποποίηση των μετρήσεων, οι οποίες είναι καθοριστικές για την πρόοδο της βιομηχανίας και της κοινωνίας γενικότερα. [9], [10], [11]

Η σύγχρονη μετρολογία καλύπτει τρεις βασικούς κλάδους, τη βασική μετρολογία, την εφαρμοσμένη ή βιομηχανική μετρολογία και τη νομική μετρολογία. Η βασική μετρολογία ασχολείται με τις βασικές μονάδες μέτρησης και τη διατήρηση των προτύπων, όπως το μέτρο και το χιλιόγραμμα, και αποτελεί τη βάση για όλες τις άλλες μετρήσεις. Η εφαρμοσμένη μετρολογία αφορά τη χρήση των μετρήσεων στην βιομηχανία για την εξασφάλιση της ποιότητας και της ακρίβειας των προϊόντων. Τέλος, η νομική μετρολογία αναφέρεται στις μετρήσεις που σχετίζονται με τη δημόσια ασφάλεια και το εμπόριο, όπως οι ζυγαριές, οι μετρητές καυσίμων και τα όργανα μέτρησης ενέργειας. [9], [10], [11]

Η μετρολογία έχει κρίσιμη σημασία για πολλές πτυχές της σύγχρονης κοινωνίας και οικονομίας. Στη βιομηχανία, η ακριβής μέτρηση είναι καθοριστική για τη διασφάλιση της ποιότητας των προϊόντων και της παραγωγικότητας, μειώνοντας τα ελαττωματικά προϊόντα και τα λάθη παραγωγής. Στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, οι ιατρικές συσκευές, όπως θερμομέτρα, πιεσόμετρα και μηχανήματα ακτίνων Χ, συσχετίζονται άμεσα με τη μετρολογία, καθώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων των παραπάνω εργαλείων επηρεάζουν την υγεία του ανθρώπου. Τέλος, η μετρολογία βρίσκει αρκετές εφαρμογές και σε τομείς όπως η παρακολούθηση του περιβάλλοντος, η ενέργεια και η έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. [9], [10], [11]

Η σύγχρονη τεχνολογία έχει προσφέρει μια πληθώρα εργαλείων για την ακριβή μέτρηση. Παραδοσιακά εργαλεία, όπως μικρόμετρα, παχύμετρα και ζυγαριές ακριβείας, εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται για την ακριβή μέτρηση μηχανικών διαστάσεων και μάζας. Ωστόσο, η πρόοδος στην τεχνολογία έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πιο προηγμένων εργαλείων. Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMMs) χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση τρισδιάστατων γεωμετρικών σχημάτων με ακρίβεια. Οι σαρωτές laser επιτρέπουν τη λήψη ακριβών τρισδιάστατων απεικονίσεων αντικειμένων, χωρίς να απαιτείται επαφή με τα αντικείμενα. Τα οπτικά συστήματα μέτρησης, τα οποία χρησιμοποιούν κάμερες και φωτισμό για τη μέτρηση, προσφέρουν ανέπαφες μεθόδους για την αξιολόγηση προϊόντων σε διάφορους τομείς. [1], [6]

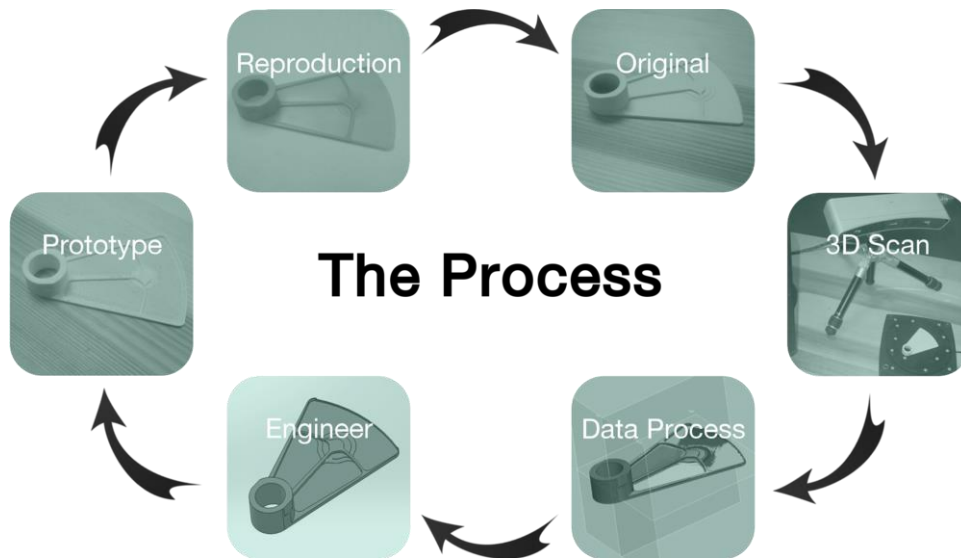
Η μετρολογία συνεχώς εξελίσσεται, με την εισαγωγή νέων τεχνολογιών που επεκτείνουν τα όρια της επιστήμης της μέτρησης. Στον τομέα της νανοτεχνολογίας, η νανομετρολογία χρησιμοποιεί εξειδικευμένα εργαλεία όπως το Ατομικό Μικροσκόπιο Δύναμης (AFM) για τη μέτρηση σε νανοκλίμακα, παρέχοντας μια πιο ακριβή κατανόηση των φαινομένων σε ατομικό επίπεδο. Επίσης, η κβαντική μετρολογία, η οποία χρησιμοποιεί φαινόμενα κβαντικής φυσικής, όπως τα ατομικά ρολόγια, επιτρέπει τη μέτρηση με ακρίβεια υψηλότερη από οποιαδήποτε προηγούμενη μέθοδο. Οι τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης (AI) ενσωματώνονται επίσης στη μετρολογία για να βελτιώσουν την ανάλυση και την ερμηνεία των μετρήσεων, βοηθώντας στην ανίχνευση και τη διόρθωση τυχόν αποκλίσεων.[12], [13]

Η μετρολογία είναι ένα κλειδί για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, όπως η βιομηχανία 4.0, η οποία συνδυάζει το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), την τεχνητή νοημοσύνη και τη ρομποτική για να δημιουργήσει έξυπνα εργοστάσια και αποδοτικά συστήματα παραγωγής. Η πρόοδος αυτή αναμένεται να βελτιώσει την ακριβή παρακολούθηση των διαδικασιών παραγωγής, να μειώσει τα λάθη και να ενισχύσει την αποδοτικότητα. [14]

Συνεπώς, είναι αντιληπτό ότι η μετρολογία έχει επιρροή σε κάθε τομέα της ανθρώπινης δραστηριότητας και συνεχίζει να αποτελεί θεμέλιο λίθο για την εξασφάλιση της ποιότητας και της ακρίβειας. Η κατανόηση και η εφαρμογή της μετρολογίας διασφαλίζουν την ανάπτυξη προϊόντων και τεχνολογιών που βελτιώνουν τη ζωή των ανθρώπων, προστατεύουν το περιβάλλον και ενισχύουν τη διεθνή συνεργασία. [6]

2.2.2 Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός

Ο αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός συνιστά ένα σύγχρονο και ραγδαία αναπτυσσόμενο πεδίο για τους μηχανολόγους μηχανικούς, το οποίο επικεντρώνεται στη λεπτομερή αποδόμηση και μέτρηση υφιστάμενων προϊόντων ή συστημάτων. Ο κύριος σκοπός της είναι η εις βάθος κατανόηση του σχεδιασμού, της λειτουργίας, των χαρακτηριστικών και της δομής αυτών, ώστε να καταστεί εφικτή η περαιτέρω αξιοποίηση και αναδιαμόρφωσή τους μέσω σχεδίασης με υπολογιστική υποβοήθηση (Computer-Aided Design - CAD) (Εικόνα 7). [15], [16]



Εικόνα 7: Διαδικασία αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού

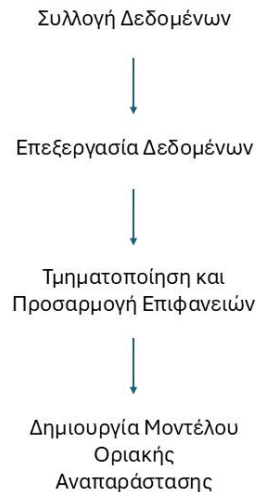
Ο αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου απουσιάζει η αρχική μηχανολογική σχεδίαση ή οι διαθέσιμες πληροφορίες είναι περιορισμένες. Με τη χρήση προηγμένων μεθόδων ανάλυσης και τεχνολογιών, παρέχει τη δυνατότητα αναδημιουργίας πιστών αντιγράφων, βελτιστοποίησης γεωμετρικών χαρακτηριστικών, αλλά και αισθητικής αναβάθμισης. Οι δυνατότητές του εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών τομέων, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η ιατρική αλλά και η επεξεργασία ξύλου και η αγγειοπλαστική. [15], [16]

Επιπροσθέτως, ο αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός στηρίζει τη δημιουργία εξατομικευμένων προϊόντων. Ενδεικτικά τέτοια προϊόντα είναι τα εργονομικά κράνη που εξασφαλίζουν σωστή εφαρμογή στο κεφάλι κάθε χρήστη (Εικόνα 8) και τα προσθετικά μέλη που προσαρμόζονται με ακρίβεια στις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε ατόμου. Αξιοποιώντας την καινοτόμο αυτή τεχνολογία, καθίσταται δυνατή η επίτευξη υψηλών προδιαγραφών σχεδιασμού, ενώ παράλληλα ενισχύεται η παραγωγή εξειδικευμένων λύσεων που ανταποκρίνονται σε ποικίλες απαιτήσεις της σύγχρονης αγοράς. [15], [16]



Εικόνα 8: Λήψη μετρήσεων της κεφαλής επαγγελματία οδηγού αγώνων με χρήση σαρωτή laser για τη δημιουργία εξατομικευμένου κράνους

Η διαδικασία του αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού περιλαμβάνει τέσσερα κύρια στάδια, τη συλλογή δεδομένων (Data Acquisition), την επεξεργασία και βελτιστοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται (Preprocessing), τη διαίρεση του αντικειμένου σε επιμέρους τμήματα και την προσαρμογή επιφανειών (Segmentation and Surface Fitting), καθώς και τη δημιουργία του τελικού μοντέλου σε λογισμικό σχεδιασμού με τη χρήση υπολογιστή (CAD Model Creation). Η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας είναι απαραίτητη για την ακριβή αναπαραγωγή και ψηφιοποίηση φυσικών αντικειμένων. [15], [16]



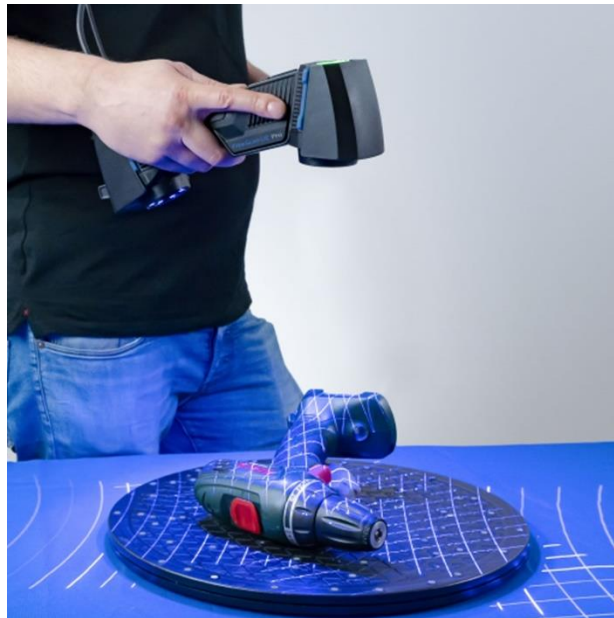
Εικόνα 9: Κύρια στάδια αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού

2.2.2.1 Συλλογή Δεδομένων

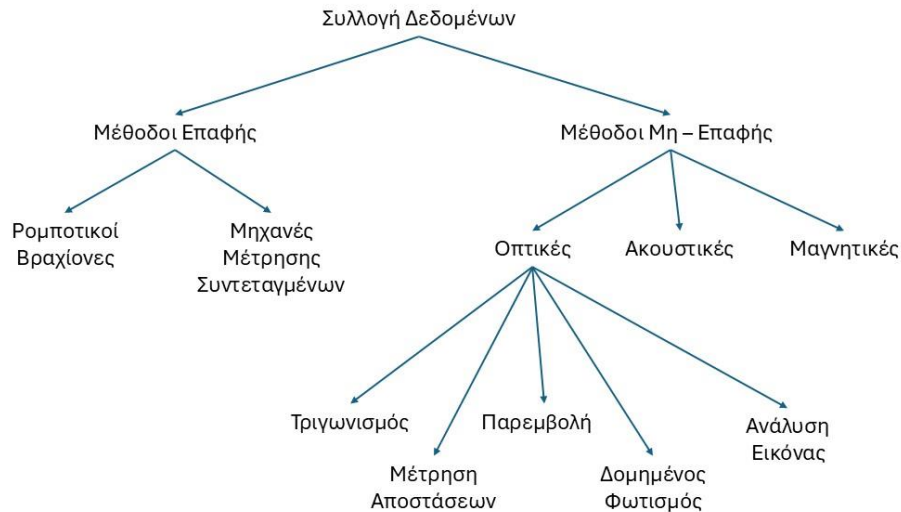
Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για τη συλλογή δεδομένων από μια επιφάνεια, με κοινό χαρακτηριστικό σε κάθε μέθοδο την ανάγκη αλληλεπίδρασης της γεωμετρίας του αντικειμένου με το μετρητικό εργαλείο, είτε μέσω κάποιου φυσικού φαινομένου είτε μέσω κάποιου μηχανισμού. Τα μετρητικά εργαλεία διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες με βάση τον τρόπο συλλογής δεδομένων, εκείνα που απαιτούν άμεση επαφή με την επιφάνεια (Contact Methods) (Εικόνα 10) και εκείνα που λειτουργούν χωρίς επαφή (Non-Contact Methods) (Εικόνα 11). [15], [16]



Εικόνα 10: Μέθοδος επαφής για τη λήψη μετρήσεων



Εικόνα 11: Μέθοδος μη επαφής για τη λήψη μετρήσεων



Εικόνα 12: Κατηγορίες μεθόδων συλλογής δεδομένων

Η περαιτέρω ταξινόμηση των μεθόδων μη επαφής γίνεται σε τρεις κύριες κατηγορίες, τις οπτικές, όπου μετρήσεις γίνονται με βάση τη διάδοση του φωτός, τις ακουστικές, όπου ηχητικά κύματα ανακλώνται στην επιφάνεια προς μελέτη και τις μαγνητικές όπου η επιφάνεια εισέρχεται σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και μέσω αυτού λαμβάνονται πληροφορίες συγκριτικά με την ένταση του πεδίου σε διάφορα σημεία της επιφάνειας. Οι μέθοδοι αυτοί χαρακτηρίζονται από την ικανότητα ταχείας συλλογής δεδομένων, αλλά και από την περιορισμένη ακρίβεια. Αυτό συμβαίνει διότι βασίζονται στη χρήση φωτεινών δεσμών, ηχητικών κυμάτων ή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων για την λήψη των δεδομένων, αλλά η ανάλυση και το αποτέλεσμα αυτών εξαρτάται άμεσα από την ευαισθησία των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται. [15], [16]

Η τελευταία κατηγοριοποίηση σχετίζεται με τις οπτικές μεθόδους και την τεχνολογία που εφαρμόζεται για τη συλλογή και καταγραφή δεδομένων. Οι βασικές τεχνικές περιλαμβάνουν τη μέθοδο του τριγωνισμού (triangulation), της μέτρησης αποστάσεων (ranging), της παρεμβολής (interferometry), του δομημένου φωτισμού (structured lighting) και της ανάλυσης εικόνας (image analysis). [15], [16]

Η μέθοδος του τριγωνισμού βασίζεται στη χρήση της γεωμετρικής σχέσης μεταξύ πηγών φωτός και φωτοευαίσθητων αισθητήρων για τον προσδιορισμό θέσεων στο χώρο. Συγκεκριμένα, μια ισχυρή φωτεινή δέσμη εστιάζεται και προβάλλεται υπό συγκεκριμένη γωνία πάνω στην εξεταζόμενη επιφάνεια, ενώ η ανακλώμενη δέσμη καταγράφεται από τον αισθητήρα. Με τη βοήθεια τριγωνομετρικών υπολογισμών, γνωρίζοντας τη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας και την απόσταση της φωτεινής πηγής από την επιφάνεια, προσδιορίζεται με ακρίβεια η θέση κάθε σημείου της επιφάνειας σε σχέση με ένα προκαθορισμένο επίπεδο αναφοράς. [15], [16]

Η μέθοδος μέτρησης αποστάσεων (ranging) συγκαταλέγεται στις πιο απλές τεχνικές, βασιζόμενη στη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής και στον υπολογισμό αποστάσεων με τη χρήση της σταθερής ταχύτητας διάδοσης του φωτός. Συγκεκριμένα, με βάση το γνωστό μήκος κύματος και τη συχνότητα της φωτεινής ακτίνας, υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσής της. Έπειτα, με χρήση φωτοευαίσθητων αισθητήρων, μετριέται ο χρόνος που απαιτείται για την ακτίνα να διανύσει την απόσταση προς την επιφάνεια και πίσω και με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η απόσταση της επιφάνειας από την πηγή φωτός. [15], [16]

Η μέθοδος της παρεμβολής (interferometry) αποτελεί μια εξαιρετικά ακριβή τεχνική μέτρησης αποστάσεων, βασιζόμενη στο μήκος κύματος της φωτεινής ακτίνας. Η αρχή της λειτουργίας της στηρίζεται στον υπολογισμό του αριθμού των μηκών κύματος που παρεμβάλλονται ανάμεσα στην πηγή φωτός και την επιφάνεια ενδιαφέροντος. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι εξαιρετική, καθώς το μήκος κύματος του ορατού φωτός είναι της τάξεως των εκατοντάδων νανομέτρων, ενώ οι τυπικές εφαρμογές στον αντίστροφο μηχανολογικό σχεδιασμό συχνά αφορούν αντικείμενα με διαστάσεις από μερικά χιλιοστά, εκατοστά ή μέτρα. [15], [16]

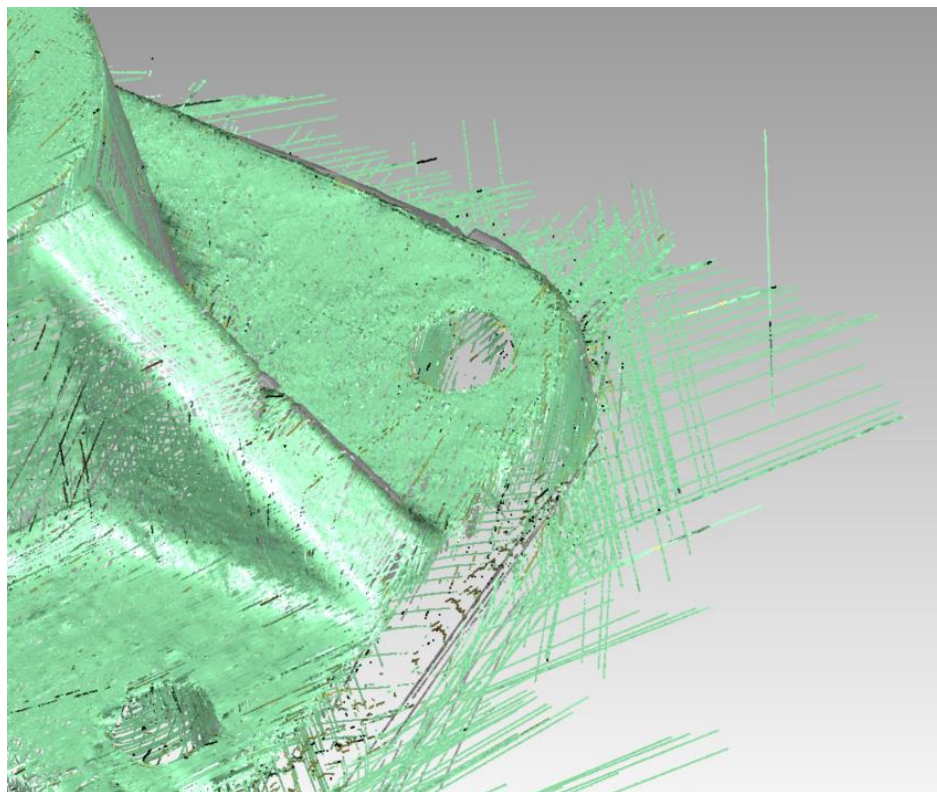
Η μέθοδος του δομημένου φωτισμού (structured lighting) χρησιμοποιεί την προβολή συγκεκριμένων φωτεινών μοτίβων πάνω σε μια επιφάνεια ενδιαφέροντος, ακολουθούμενη από την καταγραφή της εικόνας του ανακλώμενου φωτός. Η προκύπτουσα εικόνα αναλύεται για να εντοπιστούν οι αποκλίσεις μεταξύ του προβεβλημένου και του ανακλώμενου μοτίβου. Μέσω κατάλληλων υπολογισμών, αυτές οι αποκλίσεις μεταφράζονται σε συντεταγμένες των σημείων της επιφάνειας ως προς ένα επίπεδο αναφοράς. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη γρήγορη συλλογή μεγάλου αριθμού δεδομένων από ένα μόνο καρέ εικόνας, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές όπου απαιτείται ταχύτητα και πλήθος δεδομένων. Ωστόσο, η επεξεργασία των δεδομένων για τον ακριβή υπολογισμό των συντεταγμένων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη γεγονός που αυξάνει το κόστος εφαρμογής. [15], [16]

Η τελευταία οπτική μέθοδος καταγραφής μορφής που εξετάζεται είναι η ανάλυση εικόνας. Παρόμοια με τη μέθοδο του δομημένου φωτισμού, βασίζεται στην επεξεργασία καρέ εικόνας για την εξαγωγή δεδομένων συντεταγμένων. Ωστόσο, η διαδικασία εδώ δεν περιλαμβάνει την προβολή συγκεκριμένων μοτίβων φωτός. Αντίθετα, αξιοποιεί στερεοσκοπικά ζεύγη εικόνων, τα οποία παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό του ύψους και της θέσης κάθε σημείου της επιφάνειας. [15], [16]

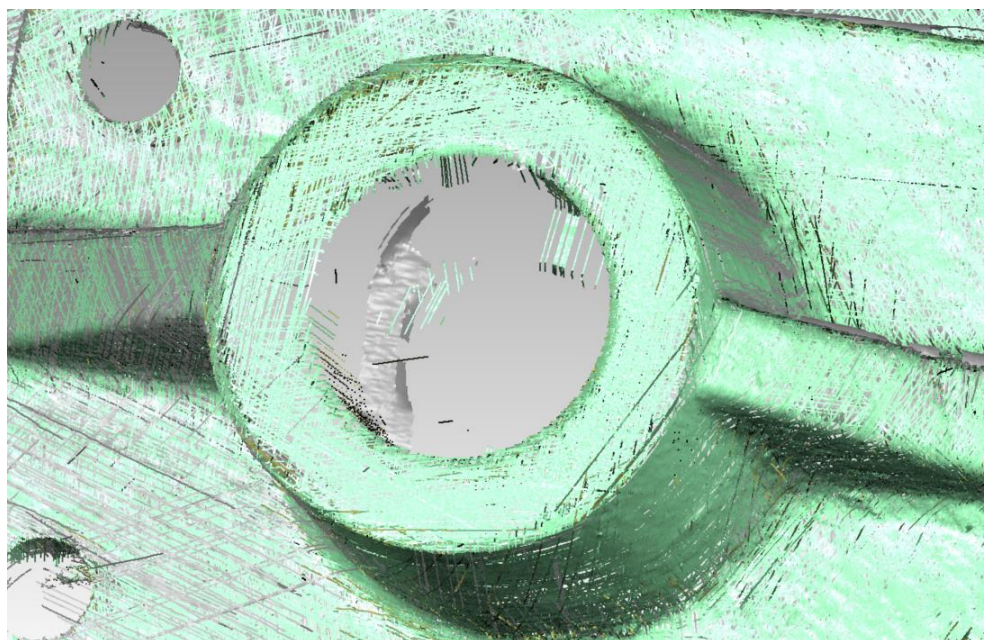
Τέλος, οι μέθοδοι επαφής διακρίνονται στους ρομποτικούς βραχίονες και στις μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM). Οι τεχνικές αυτές διακρίνονται για την εξαιρετική ακρίβειά τους, αλλά απαιτούν περισσότερο χρόνο για τη συλλογή δεδομένων λόγω της λεπτομερούς διαδικασίας που ακολουθούν. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου βασίζεται στις απαιτήσεις της εφαρμογής, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας που εξετάζεται, συνυπολογίζοντας την ταχύτητα και την ακρίβεια που ζητούνται. [15], [16]

2.2.2.2 Επεξεργασία Δεδομένων

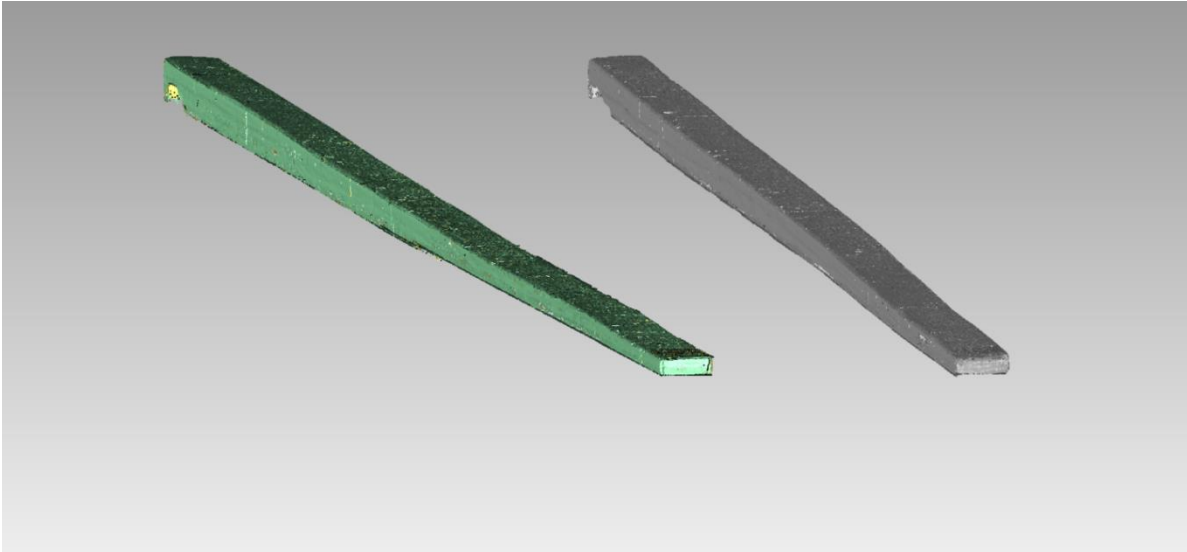
Οι τεχνολογίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού, καθώς χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων από επιφάνειες. Παρόλα αυτά, όπως συμβαίνει με κάθε μετρητική συσκευή, έτσι και αυτές ενέχουν σφάλματα κατά τη διαδικασία αναγνώρισης της γεωμετρίας (Εικόνα 13). Τα σφάλματα αυτά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τη σωστή διαμόρφωση του τελικού μοντέλου. Πιθανοί λόγοι πρόκλησης σφαλμάτων περιλαμβάνουν την ελλιπή ή εσφαλμένη βαθμονόμηση του οργάνου (calibration), την ακρίβεια και την ανάλυση των αισθητήρων (accuracy), καθώς και τους περιορισμούς στην προσβασιμότητα (accessibility) της γεωμετρίας που εξετάζεται, όπως για παράδειγμα κατά τη μέτρηση εσωτερικών οπών (Εικόνα 14). Επιπλέον, παράγοντες όπως η απόκρυψη του μέσου σάρωσης λόγω σκίασης (occlusion) ή στερεώσεων (fixturing) μπορούν να απαιτούν τη λήψη δεδομένων από πολλαπλές γωνίες (multiple views) (Εικόνα 15), εισάγοντας επιπλέον σφάλματα λόγω της διαδικασίας ευθυγράμμισης των διαφορετικών προβολών (Εικόνα 16). Ακόμη, η φύση της επιφάνειας του αντικειμένου, είτε τραχιά είτε λεία, μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των μετρήσεων, ενώ τα ημιτελή ή ασυνεχή δεδομένα που ενδέχεται να προκύψουν δυσχεραίνουν τη δημιουργία ενός συνεκτικού μοντέλου. Συνεπώς, η κατανόηση και η διόρθωση αυτών των σφαλμάτων είναι κρίσιμες για την εξασφάλιση της ποιότητας του τελικού αποτελέσματος. [15], [16]



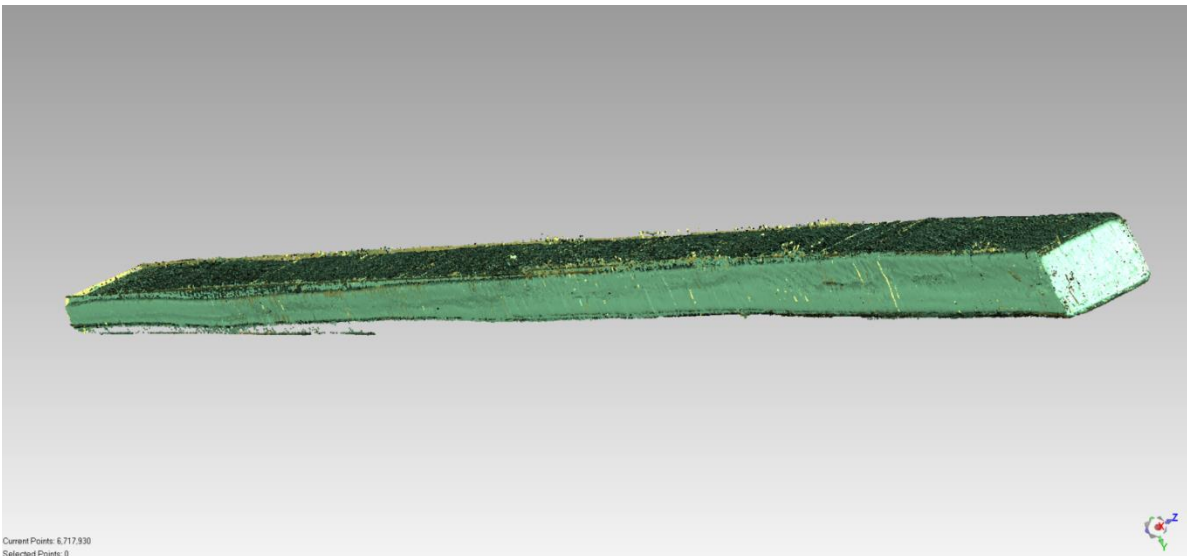
Εικόνα 13: Σφάλματα μέτρησης κατά τη διαδικασία λήψης μετρήσεων



Εικόνα 14: Αδυναμία μέτρησης οπών και εισαγωγή σφάλματος εξαιτίας της προσβασιμότητας της γεωμετρίας



Εικόνα 15: Λήψη ξεχωριστών νεφών σημείων για την πλήρη απεικόνιση του εξαρτήματος λόγω στερέωσης



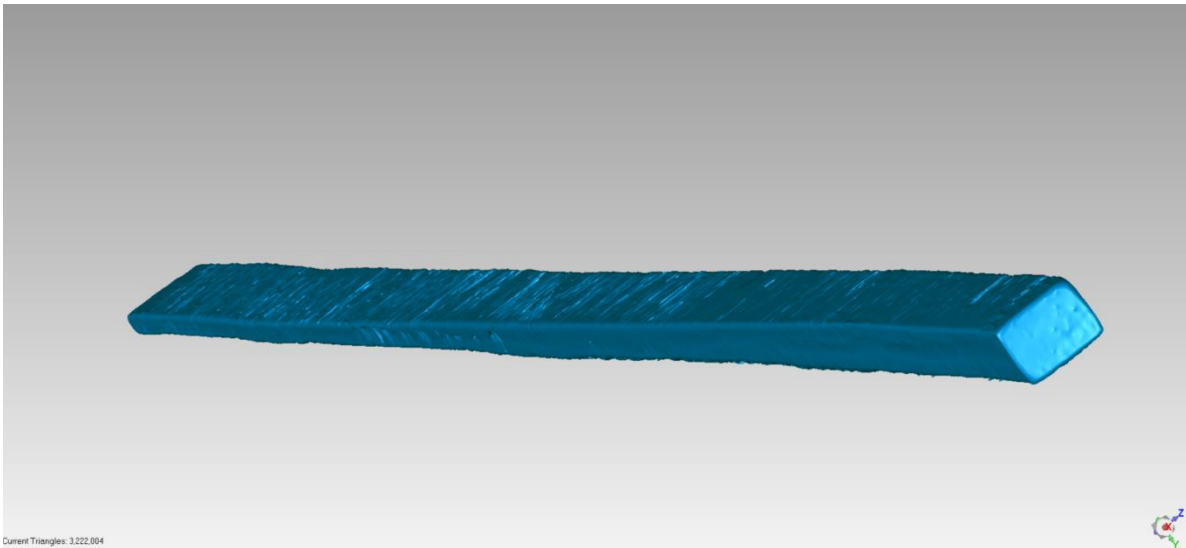
Εικόνα 16: Σφάλμα κατά την ευθυγράμμιση των δύο νεφών σημείων για την ολοκληρωμένη απεικόνιση του εξαρτήματος

Η μελέτη, η ανάλυση και η επεξεργασία των συλλεγμένων δεδομένων, με την υπάρχουσα τεχνολογία, οφείλει να πραγματοποιείται από έμπειρο μηχανολόγο μηχανικό ο οποίος με ευχέρεια μπορεί να διακρίνει ποιες περιοχές του νέφους σημείων αναφέρονται σε απλές γεωμετρίες όπως επιφάνειες, κυλίνδρους και κώνους και ποια σημεία αναφέρονται σε γεωμετρίες ελεύθερης μορφής. Για την επεξεργασία του νέφους σημείων και την μείωση του σφάλματος πάντοτε απαιτείται η εφαρμογή κάποιου φίλτρου αποθορυβοποίησης (Εικόνα 17), που και αυτό με την σειρά του διασφαλίζει κάποιο σφάλμα και κυρίως μειώνει

την οξύτητα του νέφους σημείων, ομαλοποιώντας την τελική γεωμετρία (Εικόνα 18). [15], [16]



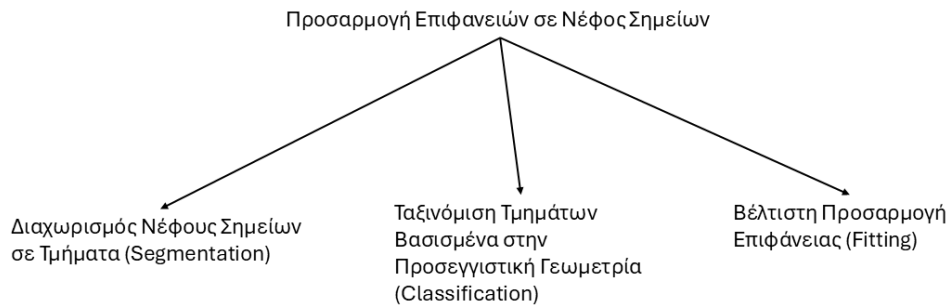
Εικόνα 17: Αποθορυβοποιημένο νέφος σημείων



Εικόνα 18: Ομαλοποιημένη τελική γεωμετρία

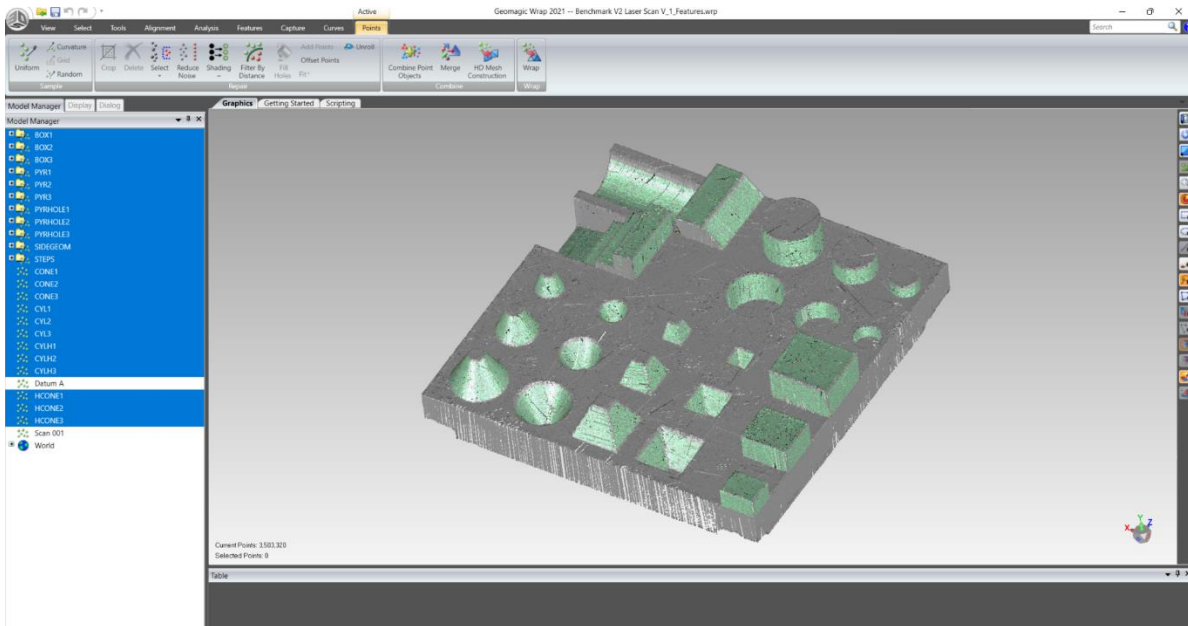
2.2.2.3 Τμηματοποίηση και Προσαρμογή Επιφανειών σε Απλές Γεωμετρίες.

Το στάδιο αυτό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κομμάτια για την τελική απεικόνιση ενός μοντέλου προς μελέτη. Τα βασικά ζητήματα για την προσαρμογή μίας επιφάνειας είναι τρία και συνήθως η ανάλυσή τους πραγματοποιείται με την παρακάτω σειρά, διαχωρισμός του νέφους σημείων σε τμήματα (segmentation), ταξινόμηση των τμημάτων με βάση τη γεωμετρία που προσεγγίζουν (classification), βέλτιστη προσαρμογή επιφάνειας σε κάθε τμήμα (fitting). [15], [16]



Εικόνα 19: Διαδικασία προσαρμογής επιφανειών σε νέφος σημείων

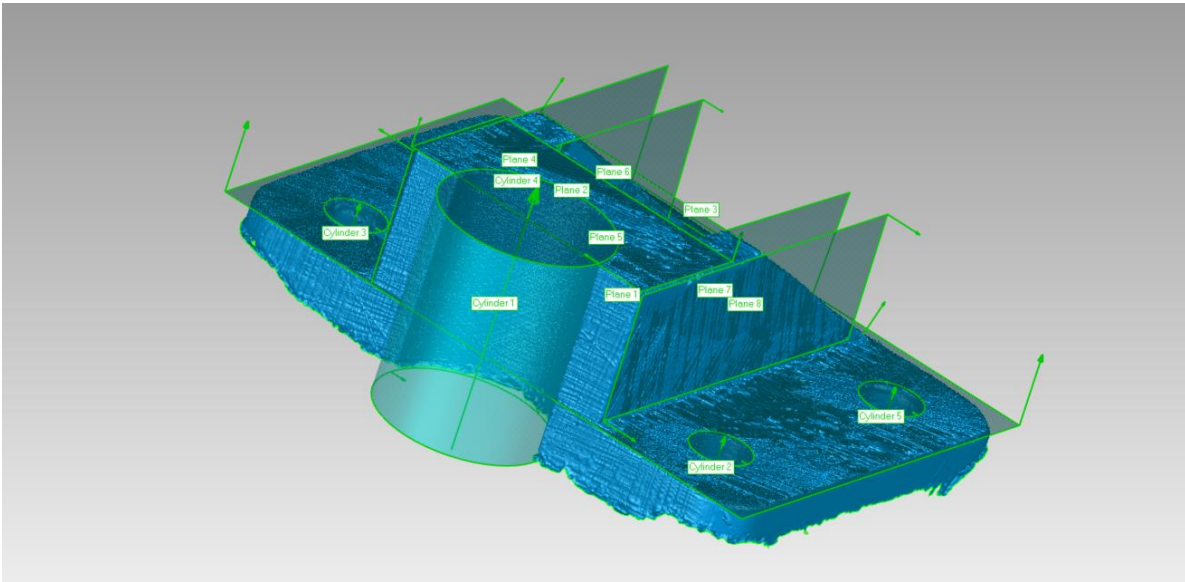
Όσον αφορά την τμηματοποίηση, αποτελεί τη διαδικασία διαίρεσης του συνόλου του νέφους σημείων σε υποσύνολα, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μία ξεχωριστή επιφάνεια της γεωμετρίας (Εικόνα 20). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται αναγνωρίζοντας περιοχές του νέφους που παρουσιάζουν ομοιογένεια ως προς την καμπυλότητα, τα μοναδιαία διανύσματα και τη συνέχεια. Για την υλοποίηση της τμηματοποίησης υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις, αυτή που βασίζεται στις ακμές/γωνίες της γεωμετρίας και αυτή που βασίζεται στις επιφάνειες. Η εστίαση στις ακμές βασίζεται στον εντοπισμό ορίων μεταξύ επιφανειών παρατηρώντας τα μοναδιαία διανύσματα ή την καμπυλότητα και λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα σημεία σε εκείνες τις περιοχές, ωστόσο είναι υπερευαίσθητη στον θόρυβο και ιδιαίτερα στην περίπτωση αιχμηρών ακμών. Αντίθετα, η προσέγγιση που βασίζεται στις επιφάνειες, ομαδοποιεί δεδομένα με κοινά χαρακτηριστικά επιφανειών, μοναδιαίων διανυσμάτων και συνέχειας αξιοποιώντας όλο το μετρημένο νέφος σημείων, με αποτέλεσμα να αποτελεί πολύ πιο αξιόπιστη μέθοδο τμηματοποίησης. [15], [16]



Εικόνα 20: Διαίρεση του νέφους σημείων σε υποσύνολα

Η διαδικασία της κατηγοριοποίησης είναι το βήμα στο οποίο κάθε υποσύνολο του νέφους σημείων αναγνωρίζεται και αποδίδεται σε ένα συγκεκριμένο τύπο επιφάνειας, όπως επίπεδο, κύλινδρος, κώνος, ελεύθερη γεωμετρία κ.α. (Εικόνα 21) [15], [16]

Τέλος, η προσαρμογή επιφανειών αποτελεί τη διαδικασία αναζήτησης της κατάλληλης μαθηματικής εξίσωσης που αναπαριστά ιδανικά κάθε κατηγορία επιφάνειας, εξασφαλίζοντας την ακρίβεια της προσαρμογής. Για την εκτέλεση των ανωτέρω, χρησιμοποιούνται εργαλεία προσαρμογής όπως η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων, ενώ ανάλογα με την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας και την ύπαρξη θορύβου λαμβάνεται η προσαρμοσμένη επιφάνεια στο νέφος σημείων. [15], [16]



Εικόνα 21: Αναγνώριση και απόδοση τύπου επιφάνειας

Για την πραγματοποίηση της διαδικασίας της τμηματοποίησης, της κατηγοριοποίησης και της προσαρμογής, ακολουθούνται δύο βασικές μεθοδολογίες. Η πρώτη είναι η από κάτω προς τα πάνω προσαρμογή (bottom – up) είναι η διαδικασία που ξεκινά από συγκεκριμένα σημεία εκκίνησης (seed points) και ολοένα επεκτείνει τις περιοχές και προσαρμόζει επιφάνειες, συμπεριλαμβάνοντας και μη, σημεία που ταιριάζουν στις ιδιότητες των σημείων εκκίνησης. Η δεύτερη είναι η από πάνω προς τα κάτω προσαρμογή (top – down) στην οποία η διαδικασία ξεκινά θεωρώντας πως όλα τα δεδομένα ανήκουν στην ίδια επιφάνεια και πραγματοποιούνται διαδοχικές υποδιαιρέσεις των επιφανειών, μέχρι να γίνει η πλήρης αναγνώριση κάθε επιφάνειας της γεωμετρίας προς μελέτη. Είναι, ωστόσο, σημαντικό να αναφερθούν οι δυσκολίες που παρουσιάζουν και οι δύο μέθοδοι λόγω της ύπαρξης θορύβου, τόσο όσον αφορά την πρώτη που είναι πολύ ουσιαστική η επιλογή των σημείων εκκίνησης, όσο και τη δεύτερη στην οποία ο διαχωρισμός των επιφανειών μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα. [15], [16]

2.2.2.4 Τμηματοποίηση και Προσαρμογή Επιφανειών Ελεύθερης Μορφής

Η τμηματοποίηση και η προσαρμογή γεωμετρικών επιφανειών ελεύθερης μορφής αποτελούν ένα ιδιαίτερα απαιτητικό στάδιο στον αντίστροφο μηχανολογικό σχεδιασμό, εξαιτίας της πολυπλοκότητας και της ποικιλομορφίας που τις χαρακτηρίζουν. Αυτοί οι τύποι επιφανειών συχνά απαιτούν εξειδικευμένη διαχείριση, καθώς μπορεί να περιλαμβάνουν σύνθετες δομές με έντονες καμπυλώσεις ή περιοχές που διαχωρίζονται από ομαλές ακμές και περιγράμματα. Για την κατανόηση και την ανακατασκευή της γεωμετρικής δομής τέτοιων δεδομένων εφαρμόζονται οι μέθοδοι που παρουσιάζονται παρακάτω. [15], [16]

Μια από τις μεθόδους είναι αυτή της συνολικής προσέγγισης επιφανειών (global approximating surface). Η προσέγγιση αυτή ξεκινά με τη δημιουργία μιας μεγάλης αρχικής

επιφάνειας που προσεγγίζει τα δεδομένα. Στη συνέχεια, η επιφάνεια αυτή βελτιστοποιείται με τη χρήση επαναληπτικών τεχνικών βασισμένων στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, ώστε να μειωθεί η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας και των σημείων, εξασφαλίζοντας καλύτερη προσαρμογή. Σε περίπτωση που το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό, μπορεί να γίνει διαίρεση της αρχικής επιφάνειας σε μικρότερες επιμέρους επιφάνειες ή να προστεθούν περισσότερες παράμετροι για την βελτιστοποίηση της προσέγγισης. [15], [16]

Μια άλλη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση δικτύων καμπυλών (curve network based surfaces). Σε αυτήν την προσέγγιση, η επιφάνεια διαιρείται με τη βοήθεια ενός δικτύου καμπυλών, οι οποίες μπορεί να είναι γραμμές καμπυλότητας, συμμετρίας ή ακμές. Το δίκτυο αυτό λειτουργεί ως οδηγός για τη δημιουργία επιμέρους επιφανειών, αλλά απαιτείται η συμβολή του χρήστη για την ακριβή οριοθέτηση του δικτύου και την επιτυχή κατασκευή της επιφάνειας. [15], [16]

Μια συνδυαστική προσέγγιση των δύο προηγούμενων μεθόδων είναι η τεχνική επιφανειών με αυθαίρετη τοπολογία (arbitrary topology surfaces), η οποία δημιουργεί ένα αυτοματοποιημένο δίκτυο ελεύθερης μορφής, βασισμένο στη διαδικασία τριγωνοποίησης των δεδομένων. Ακολούθως, η τριγωνοποίηση υφίσταται απλοποίηση, και πραγματοποιείται παρεμβολή επιμέρους επιφανειών, επιτυγχάνοντας πιο ομαλή σύνδεση μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα είναι η διαμόρφωση μιας συνεχούς και ενοποιημένης επιφάνειας. [15], [16]

Η λειτουργική ανάλυση της γεωμετρίας (functionally decomposed surfaces) αποτελεί την τελευταία προσέγγιση, η οποία επικεντρώνεται στην αναγνώριση της σχεδιαστικής λογικής που διέπει το αντικείμενο. Σε αυτή τη μέθοδο, τα δεδομένα αντιμετωπίζονται ως τμήματα μιας πολύπλοκης γεωμετρίας, η οποία ενδέχεται να έχει δημιουργηθεί από συνδυασμούς ενώσεων, καμπυλών και επιφανειών που προκύπτουν από βασικές μαθηματικές εξισώσεις. Παρόλο που αυτή η προσέγγιση παρέχει υψηλή ακρίβεια στον εντοπισμό της λειτουργικής δομής, απαιτεί σημαντική ανθρώπινη παρέμβαση καθώς και εξειδικευμένες γνώσεις στον σχεδιασμό και τα μαθηματικά. [15], [16]

Κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η συνολική προσέγγιση επιφανειών είναι πιο απλή, αλλά μπορεί να μην αποδίδει με ακρίβεια τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας, καθώς ενδέχεται να εισάγει σφάλματα σε όλο το μήκος της επιφάνειας. Από την άλλη, τα δίκτυα καμπυλών επιτρέπουν καλύτερο έλεγχο της δομής, ωστόσο απαιτούν περισσότερη εργασία και μπορεί να προσθέσουν τεχνητά όρια, περιορίζοντας την πλήρη αναπαράσταση της γεωμετρίας. Οι επιφάνειες αυθαίρετης τοπολογίας παρέχουν μια αυτοματοποιημένη λύση, αλλά ενδέχεται να παραμελούν τη λειτουργική σύνθεση. Τέλος, η λειτουργική ανάλυση εξασφαλίζει την πληρέστερη κατανόηση της γεωμετρικής δομής, αν και βασίζεται σε εξειδικευμένη γνώση της αρχικής μορφής του αντικειμένου. Συνολικά, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από το

επίπεδο πολυπλοκότητας της γεωμετρίας, την απαιτούμενη ακρίβεια και τη διαθέσιμη πληροφορία για την κατανόηση της μορφής και της κατασκευής του αντικειμένου. [15], [16]

2.2.2.5 Δημιουργία μοντέλου οριακής αναπαράστασης

Τελευταίο στάδιο της αντίστροφης μηχανικής, αποτελεί η δημιουργία μοντέλων οριακής αναπαράστασης (boundary representation) και στοχεύει στη δημιουργία ενός συνεκτικού και ολοκληρωμένου μοντέλου που αποτελείται από όλες τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας, όπως τις κορυφές, τις ακμές και τις επιφάνειες (Εικόνα 22). Η διαδικασία για τη δημιουργία του μοντέλου οριακής αναπαράστασης ξεκινά από ανοργάνωτα στοιχεία επιφανειών που έχουν βρεθεί από προηγούμενες διαδικασίες προσαρμογής, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν κενά ή αλληλεπικαλύψεις επιφανειών, ενώ στο τέλος της διαδικασίας προκύπτει ένα μοντέλο χωρίς ασυνέχειες και ελαττώματα. [15], [16]



Εικόνα 22: Μοντέλο οριακής αναπαράστασης

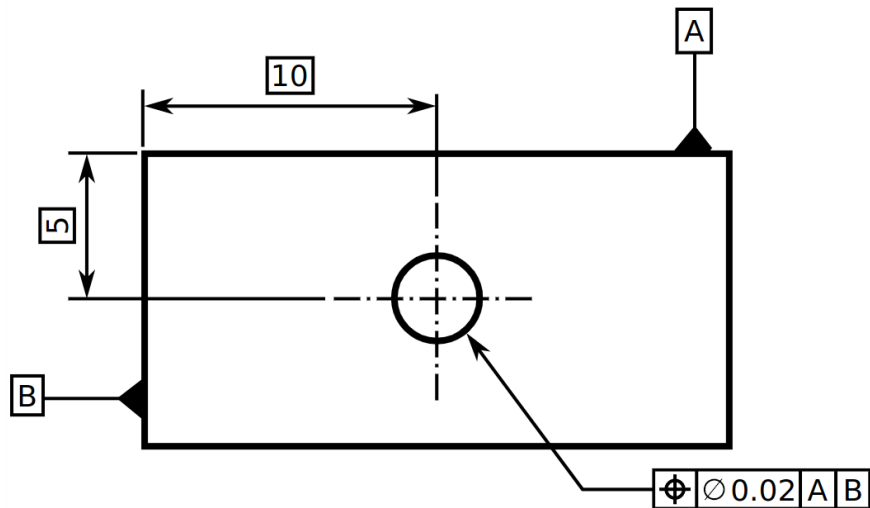
Σημαντικά βήματα για την διαδικασία αποτελούν ο υπολογισμός ακμών μέσω των επεκτάσεων των επιφανειών, ο υπολογισμός κορυφών σε σημεία ένωσης τριών ή και περισσότερων επιφανειών, οι αναμίξεις (blends) επιφανειών σε κενά, σε ακμές και κορυφές και τέλος σε ορισμένες περιπτώσεις όπου τα μοντέλα προορίζονται για βιομηχανική κατασκευή, απαιτείται η επιβολή περιορισμών του μοντέλου σε συνθήκες όπως η παραλληλία, η καθετότητα, η συμμετρία κ.α. [15], [16]

2.2.3 **Γεωμετρική Ανάλυση Διαστάσεων και Ανοχών (GD&T)**

Η γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών (GD&T) αποτελεί ένα σύστημα που χρησιμοποιείται στη μηχανολογία για τον καθορισμό και την επικοινωνία των ανοχών μέσω μίας συμβολικής γλώσσας που συναντάται σε μηχανολογικά σχέδια και τρισδιάστατα μοντέλα. Οι συμβολισμοί της γλώσσας αυτής περιγράφουν τη θεωρητική γεωμετρία ενός φυσικού αντικειμένου και τις επιτρεπόμενες αποκλίσεις από αυτήν. Η σημασία της

γεωμετρικής ανάλυσης και ανοχών αποτυπώνεται από την ανάγκη διασφάλισης σωστής συναρμογής εξαρτημάτων, καθώς και της ομαλής λειτουργίας τους, καθορίζοντας τις επιτρεπόμενες αποκλίσεις στο μέγεθος, τη μορφή, τον προσανατολισμό και τη θέση των χαρακτηριστικών. [17]

Τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν την γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών, αποτελούν οι τυποποιημένοι συμβολισμοί, τα πλαίσια ελέγχου χαρακτηριστικών (Feature Control Frames), καθώς και τα γεωμετρικά στοιχεία αναφοράς (Datums) (Εικόνα 23). Όσον αφορά τους τυποποιημένους συμβολισμούς, αυτοί χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως η ευθύτητα, η επιπεδότητα, η κυλινδρικήτητα, η καθετότητα, η παραλληλία, η ομοκεντρικότητα, η συμμετρία κ.α. Κάθε σύμβολο δηλαδή, παρέχει συγκεκριμένες πληροφορίες και προδιαγραφές σχετικά με την εφαρμοζόμενη ανοχή σε ένα χαρακτηριστικό. Τα πλαίσια ελέγχου χαρακτηριστικών είναι ορθογώνια πλαίσια που συναντώνται στα μηχανολογικά σχέδια και περιέχουν το σύμβολο του γεωμετρικού χαρακτηριστικού, την τιμή της ανοχής, καθορίζοντας την προδιαγραφή κατά την κατασκευή του μηχανολογικού εξαρτήματος. Τέλος, τα γεωμετρικά στοιχεία αναφοράς (Datums) είναι θεωρητικά ακριβή επίπεδα, γραμμές, σημεία ή άξονες από τα οποία καθορίζεται η θέση ή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και είναι απαραίτητα για τις διαδικασίες μέτρησης και κατασκευής του εξαρτήματος. [17]



Εικόνα 23: Βασικά στοιχεία γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών

Η σημασία ύπαρξης της γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών, αποτυπώνεται άμεσα στην ύπαρξη παγκόσμιας γλώσσας επικοινωνίας, η οποία μειώνει την αμφισημία στις προδιαγραφές σχεδιασμού, διευκολύνοντας την επικοινωνία μεταξύ των ομάδων σχεδιασμού, κατασκευής και διασφάλισης της ποιότητας. Παράλληλα, διασφαλίζει ότι τα εξαρτήματα πληρούν τις απαιτήσεις σχεδιασμού, οδηγώντας σε καλύτερη απόδοση των προϊόντων, ενώ μειώνει το κόστος κατασκευών διαχωρίζοντας τα χαρακτηριστικά κάθε γεωμετρίας σε κρίσιμα και μη κρίσιμα, προσαρμόζοντας τις τιμές των ανοχών κατά την

κατασκευή τους. Συνεπώς, η ενσωμάτωση της γεωμετρικής ανάλυσης ανοχών και σχεδιασμού στις μηχανολογικές πρακτικές οδηγεί σε πιο ακριβείς, αποδοτικές και οικονομικά συμφέρουσες διαδικασίες κατασκευής, διασφαλίζοντας την ποιότητα και την ομαλή λειτουργία εξαρτημάτων και συναρμογών. [17]

2.2.4 Ιστορική Αναδρομή των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων

Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων αποτελούν θεμελιώδες εργαλείο για την ανάπτυξη της βιομηχανικής παραγωγής και της ποιοτικής διασφάλισης, καθώς σήμερα αποτελούν τα κατά κόρον αυτοματοποιημένα εργαλεία μετρολογίας στη βιομηχανία παρέχοντας μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. [18], [19], [20]

Η τεχνολογική ανάπτυξή τους είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ανάγκη αυτοματοποίησης της παραγωγής η οποία στα πρώιμα χρόνια (1930-1950) βασιζόταν σε απλά χειροκίνητα μετρητικά εργαλεία, όπως οι διαβήτες και οι κανόνες εργαλεία που ενείχαν σφάλματα λόγω της εξάρτησής τους από τον ανθρώπινο χειριστή. Η ραγδαία ανάπτυξη τομέων, όπως της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής και της μηχανολογίας αύξησε την πίεση για πρόοδο της τεχνολογίας, ενισχύοντας τις προσπάθειες για αυτοματοποίηση των συσκευών αυτών. [18], [19], [20]

Η πρώτη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων εμφανίστηκε το 1959 από την αγγλική εταιρία Ferranti. Ήταν χειροκίνητη και επέτρεπε την κίνηση σε δύο άξονες, ενώ βρήκε εφαρμογή κυρίως στην αμυντική βιομηχανία. Έπειτα, το 1960 η ευρέως γνωστή και σήμερα εταιρία DEA (Digital Electronic Automation) κατασκεύασε την πρώτη μηχανή που επέτρεπε την κίνηση στους τρεις άξονες με ικανότητα λήψης μετρήσεων μεγαλύτερης ακρίβειας, επεκτείνοντας τους ορίζοντες ανάπτυξης και εφαρμογής των μηχανών. [21], [22]

Η εξέλιξη και η ψηφιοποίηση των μηχανών πραγματοποιήθηκε την δεκαετία του '70, όπου εγκαταστάθηκαν ηλεκτρονικοί αισθητήρες και υπολογιστικά συστήματα για την καταγραφή και την ανάλυση των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακοί κωδικοποιητές (encoders), που βελτίωσαν σημαντικά την ακρίβεια μέτρησης των μηχανών, ενώ δημιουργήθηκαν και λογισμικά επεξεργασίας των δεδομένων μέτρησης. Το 1973, οι εταιρίες Mitutoyo και Zeiss ξεκίνησαν το εμπόριο των μηχανών στο αγοραστικό κοινό, κάνοντας την τεχνολογία προσβάσιμη και επιταχύνοντας την υιοθέτησή της στη βιομηχανία. Επακόλουθο αυτού ήταν η ραγδαία εξέλιξη τους κατά τη δεκαετία του '80, όπου ενισχύθηκε με τη χρήση άλλων μηχανολογικών τεχνολογιών. [23], [24]

Στην δεκαετία του 1980, η ενσωμάτωση υπολογιστικών συστημάτων υψηλής ισχύος και λογισμικών CAD (Computer – Aided Design), προσέφερε τη δυνατότητα σύγκρισης των πραγματικών μετρήσεων με τα ονομαστικά δεδομένα. Σημεία αναφοράς για την κατασκευαστική εξέλιξη των μηχανών μέτρησης συντεταγμένων αποτελεί η προσθήκη ρουλεμάν αέρα στα κινητά μέρη των μηχανών, η οποία μείωσε σημαντικά την τριβή και την

αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής, καθώς και η προσθήκη ανιχνευτών σκανδαλισμού (touch trigger probes) που αύξησαν σημαντικά τη μετρητική ακρίβεια. [25]

Στη νεότερη εποχή (1990-2000), εντάχθηκε στις μηχανές μέτρησης συντεταγμένων η τεχνολογία αισθητήρων laser και οπτικών αισθητήρων οι οποίες επιταχύνουν τη μετρητική διαδικασία. Αναπτύχθηκαν φορητές μηχανές, όπως οι βραχίονες μέτρησης, καθώς και συστήματα θερμοκρασιακής αντιστάθμισης, εξασφαλίζοντας σταθερή ακρίβεια ακόμη και σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. [25]

Οι τελευταίες σημαντικές εξελίξεις που σημειώνονται στην τεχνολογική πρόοδο των μηχανών μέτρησης συντεταγμένων είναι η σύνδεσή τους με συστήματα Industry 4.0, ενισχύοντάς τες με έξυπνες εργοστασιακές εφαρμογές και η χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης που επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της ανάλυσης δεδομένων. Τέλος, η δημιουργία πλήρως αυτόματων μηχανών μέτρησης συντεταγμένων αποτελεί το μεγαλύτερο τεχνολογικό επίτευγμα μιας και αυξάνει ραγδαία τη διαδικασία μέτρησης, οπότε και την αύξηση της παραγωγικότητας, μειώνοντας στο ελάχιστο την εξάρτηση από τον ανθρώπινο παράγοντα. [26]

2.2.5 Σαρωτές Laser Ιστορική Αναδρομή.

Οι σαρωτές laser αποτελούν ένα από τα πλέον πρωτοποριακά εργαλεία στη σύγχρονη μετρολογία, χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες φωτεινών πηγών και ευαίσθητων αισθητήρων για να καλύψουν την ανάγκη της βιομηχανίας για ταχύτερες, ευκολότερες και ακριβέστερες μετρήσεις. Οι συσκευές αυτές έχουν ευρεία εφαρμογή σε τομείς όπως η βιομηχανία, η ιατρική και η αρχαιολογία. Η εξέλιξή τους αντικατοπτρίζει την πρόοδο της τεχνολογίας, παράλληλα με τη σημαντική βελτίωση της ακρίβειας και της ταχύτητας στη μαζική παραγωγή μηχανολογικών και άλλων προϊόντων.

Η απαρχή των σαρωτών laser, ξεκινά με την ίδια την ανακάλυψη της τεχνολογίας των laser από τον Theodore Maiman το 1960. Το πρώτο λειτουργικό laser χαρακτηριζόταν από την ικανότητα να παράγει μία ισχυρή και συγκεντρωμένη δέσμη φωτός, και ήταν μονάχα το θεμέλιο για τεχνολογίες όπως αυτή του σαρωτή laser, η οποία ήρθε στην επιφάνεια χρόνια αργότερα. [27], [28]

Τη δεκαετία του 1970 η τεχνολογία των laser άρχισε να αναγνωρίζεται για τις μετρολογικές της δυνατότητες, βρίσκοντας εφαρμογή σε κλάδους όπως η τοπογραφία, με σκοπό την αποτύπωση του εδάφους και την μέτρηση αποστάσεων, μετρήσεις δηλαδή που δεν απαιτούσαν ύψιστη ακρίβεια, αλλά μία εύκολη και γρήγορη προσέγγιση των μελετώμενων φαινομένων. [27], [28]

Η δεκαετία του 1970, μπορεί να μην εισήγαγε την τεχνολογία των laser στη μετρολογία με την έννοια που είναι γνωστή σήμερα, ωστόσο αποτέλεσε ένα πολύ σημαντικό μεταβατικό στάδιο ώστε να εδραιωθεί η χρήση τους στη βιομηχανική μετρολογία. Τη δεκαετία του

1980, γίνεται η ενσωμάτωση των πρώτων συστημάτων σαρωτών laser σε μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM), παρέχοντας μεγαλύτερη ταχύτητα και ακρίβεια στις μετρήσεις. Οι αρχικές εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας περιλάμβαναν τη μέτρηση επιφανειών και την καταγραφή γεωμετρικών χαρακτηριστικών για τον ποιοτικό έλεγχο, ενώ η δυνατότητα μέτρησης δύσκολων ή περίπλοκων γεωμετριών, έδωσε το λάκτισμα για τη δημιουργία μεγάλου εύρους μηχανημάτων τα οποία όλο και βελτίωναν την ακρίβεια των μετρήσεων. [27], [28]

Κατά τη δεκαετία του 1990, αναπτύχθηκαν φορητοί σαρωτές laser, οι οποίοι προσέφεραν μεγαλύτερη ευελιξία και ακρίβεια στις μετρήσεις, ξεπερνώντας τον περιορισμό του εργαστηριακού περιβάλλοντος, όπου χρησιμοποιούνταν οι μεγάλες και βαριές μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM). Οι φορητές αυτές συσκευές βρήκαν ευρεία εφαρμογή στον τομέα του ποιοτικού ελέγχου προϊόντων και συνέβαλαν σημαντικά στην εξέλιξη του αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού (reverse engineering). Χάρη σε αυτές, έγινε δυνατή η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων με ταχύ ρυθμό, χωρίς να απαιτούνται αναλυτικές μέθοδοι σχεδίασης, γεγονός που βελτίωσε την αποδοτικότητα και εξασφάλισε την ακριβή αναπαράσταση αντικειμένων. [27], [28]

Τέλος, από το 2000 και έπειτα, οι σαρωτές laser απέκτησαν σημαντική παρουσία σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική και η μετρολογία παραγωγής. Η δυνατότητά τους να πραγματοποιούν τρισδιάστατη σάρωση (3D scanning), η ενσωμάτωσή τους σε συστήματα σχεδίασης με υπολογιστική υποβοήθηση (CAD), η φορητότητά τους, καθώς και οι ταχύτερες και ακριβείς μετρήσεις που προσφέρουν αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά που συνέβαλαν στην ευρεία χρήση τους στην βιομηχανία υψηλών απαιτήσεων ακρίβειας. Επιπλέον, με την αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης οι σαρωτές αυτοί έχουν τη δυνατότητα να αποτελέσουν πολύτιμα εργαλεία για αυτοματοποιημένη επιθεώρηση και συντήρηση μηχανολογικού εξοπλισμού. [29]

2.2.6 Αρχές λειτουργίας Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων.

Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM) αποτελούν εξαιρετικά ακριβή μετρητικά εργαλεία για τη μέτρηση των φυσικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου. Η βασική διαδικασία που ακολουθείται, είναι ο καθορισμός των χωρικών συντεταγμένων του αντικειμένου, χρησιμοποιώντας συνήθως έναν αισθητήρα (probe) που αλληλεπιδρά με τις επιφάνειες του αντικειμένου. [30]

Οι κύριες αρχές λειτουργίας μίας μηχανής μέτρησης συντεταγμένων (CMM) περιλαμβάνουν τη χρήση αισθητήρων, την κίνηση στους άξονες και την απόκτηση δεδομένων, ενώ απαρτίζεται από τα εξής βασικά μέρη, τη δομή του μηχανήματος, τον ελεγκτή και το λογισμικό επεξεργασίας. [30], [31]

Όσον αφορά τα δομικά στοιχεία, μια μηχανή μέτρησης συντεταγμένων αποτελείται από την τράπεζα (βάση) όπου εκεί στερεώνεται το αντικείμενο προς μελέτη. Είναι

κατασκευασμένη από υλικά υψηλής ακαμψίας, όπως ο γρανίτης, ώστε να παρέχει σταθερότητα και αντοχή στις δονήσεις. Τη γέφυρα ή γρανάζι (bridge), που τοποθετείται πάνω από την τράπεζα και κινεί τον αισθητήρα στην τροχιά των αξόνων του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων X και Y, ενώ συνήθως κατασκευάζεται από ελαφριά υλικά όπως το αλουμίνιο ή τα ανθρακονήματα. Τον κάθετο βραχίονα (Z-axis arm) που επιτρέπει την κίνηση στον κατακόρυφο άξονα Z και ενσωματώνει συστήματα αντιστάθμισης βάρους για ομαλή κίνηση. [30], [31]

Η κίνηση του αισθητήρα στο χώρο πραγματοποιείται από γραμμικούς οδηγούς, οι οποίοι διασφαλίζουν την ακρίβεια κίνησης στους τρεις άξονες του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Συνήθως χρησιμοποιούνται αεροστατικοί ή μηχανικοί οδηγοί για την ελαχιστοποίηση της τριβής και την αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής. Οι ακτινωτοί ενεργοποιητές (Actuators) παρέχουν την απαιτούμενη δύναμη για την κίνηση της γέφυρας καθώς και του κατακόρυφου βραχίονα, χρησιμοποιώντας μοτέρ υψηλής ακρίβειας για την επακριβώς ελεγχόμενη κίνησή τους. Ακόμη εγκατεστημένοι είναι και κωδικοποιητές θέσης (Encoders) εκ των οποίων οι γραμμικοί και οι περιστροφικοί είναι υπεύθυνοι για την ανίχνευση της ακριβούς θέσης του αισθητήρα στο χώρο, ενώ οι οπτικοί κωδικοποιητές παρέχουν εξαιρετική ανάλυση και αξιοπιστία. [30], [31]

Όσον αφορά τους αισθητήρες, κατηγοριοποιούνται στους αισθητήρες επαφής (touch trigger probes) οι οποίοι ενεργοποιούνται όταν ο αισθητήρας αγγίζει την επιφάνεια του αντικειμένου, τους σαρωτικούς αισθητήρες (scanning probes), οι οποίοι καταγράφουν συνεχώς τα δεδομένα μιας επιφάνειας ακολουθώντας μια καθορισμένη διαδρομή κατά μήκος της επιφάνειας, δηλαδή σαρώνοντάς τη, και τους οπτικούς αισθητήρες που χρησιμοποιούν laser ή κάμερες για ανέπαφες μετρήσεις σε αρκετά περίπλοκες γεωμετρίες. [30], [31]

Ο ελεγκτής είναι αυτός που διαχειρίζεται τις εντολές του χρήστη και την ανάδραση των αισθητήρων, ενώ το λογισμικό είναι υπεύθυνο για την ερμηνεία των δεδομένων, την ανάλυσή τους, την αναπαράσταση του τρισδιάστατου μοντέλου, και εάν είναι διαθέσιμα, τη σύγκρισή του με τα πρότυπα σχέδια CAD του πρωτότυπου μοντέλου. [30], [31]

Η κίνηση του αισθητήρα στον χώρο γύρω από το αντικείμενο προς μελέτη πραγματοποιείται με βάση το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (X, Y, Z) χρησιμοποιώντας γραμμικές οδηγίες, ενώ η θέση του καθορίζεται από κλίμακες υψηλής ακρίβειας, κατασκευασμένες από γυαλί ή χαλαζία ή μαγνητικές κλίμακες. [30], [31]

Τέλος, η συλλογή δεδομένων και η ψηφιακή αναπαράστασή τους επιτυγχάνονται μέσω της καταγραφής τρισδιάστατων συντεταγμένων. Αυτές οι πληροφορίες επεξεργάζονται με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού, όπως το PC-DMIS, το οποίο παράγει μετρήσεις, όπως μήκη, γωνίες και ανοχές, παρέχοντας ακριβή γεωμετρική ανάλυση. [30], [31]

2.2.7 Αρχές Λειτουργίας Σαρωτών Laser

Η αρχή λειτουργίας των σαρωτών laser βασίζεται σε τεχνολογικά προηγμένα συστήματα οπτικής, στην ανίχνευση φωτεινών δεσμών μέσω φωτοευαίσθητων αισθητήρων και στην επεξεργασία δεδομένων. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στους σαρωτές περιλαμβάνει εύρος εξειδικευμένων οργάνων και τεχνολογιών που συνεργάζονται για την ακριβή μέτρηση διαστάσεων και τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων βασισμένων στη μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανολογίας. [32], [33]

Τα βασικά συστήματα που διέπουν την λειτουργία των σαρωτών laser είναι τα laser εκπομπής, οι ανιχνευτές ακτινών laser, τα συστήματα περιστροφής και σάρωσης, τα οπτικά συστήματα, τα ηλεκτρονικά συστήματα επεξεργασίας σημάτων και το λογισμικό ανάλυσης και αναπαράστασης δεδομένων. [32], [33]

Όσον αφορά το laser εκπομπής, πρακτικά είναι η πηγή της εκπεμπόμενης ακτίνας και συνήθως έχει καθορισμένο μήκος κύματος και συχνότητα διευκολύνοντας την ακριβή μέτρηση αποστάσεων της πηγής από τα αντικείμενα προς μελέτη. Η φωτεινή πηγή συνήθως εκπέμπει φως που ανήκει στην κατηγορία του υπέρυθρου (800 nm – 900 nm), ενώ η εκπομπή μπορεί να είναι συνεχής (CW – Continuous Wave) ή παλμική διαφοροποιώντας την ακρίβεια στις μετρήσεις, αλλά και την κατανάλωση ενέργειας σε κάθε περίπτωση. [32], [33]

Οι ανιχνευτές των ακτινών laser είναι υπεύθυνοι για τη συλλογή του ανακλώμενου φωτός από τις επιφάνειες του αντικειμένου. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ανιχνευτών είναι οι φωτοευαίσθητοι (photo – detectors) που μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό σήμα. Οι βασικές τεχνολογίες ανίχνευσης είναι οι φωτοдиодοι (photodiodes) που χρησιμοποιούνται σε συστήματα που απαιτείται ταχύτητα και τα συστήματα CCD (Charge – Coupled Devices) ή CMOS (Complementary Metal – Oxide – Semiconductor) τα οποία καταγράφουν την εικόνα του ανακλώμενου σήματος και βρίσκουν εφαρμογή σε σαρωτές υψηλής ανάλυσης. [34]

Όσον αφορά τώρα τη διαδικασία της σάρωσης, στους σαρωτές υπάρχουν εγκατεστημένοι περιστροφικοί μηχανισμοί, συνήθως σερβομηχανισμοί. Οι μηχανισμοί αυτοί επιτρέπουν τη διάθλαση της φωτεινής ακτίνας σε διάφορες κατευθύνσεις και την καταγραφή δεδομένων σε πολλές θέσεις και υπό διάφορες γωνίες, με αποτέλεσμα να καλύπτεται πλήρως η επιφάνεια του αντικειμένου. [32]

Η ποιότητα και η μορφή της φωτεινής ακτίνας ωστόσο, καθορίζεται από οπτικά συστήματα που εγκαθίστανται στους σαρωτές. Χρησιμοποιούνται συστήματα φακών για να καθοδηγήσουν και να επικεντρώσουν την ακτίνα laser στην επιφάνεια του αντικειμένου, γεγονός που επηρεάζει σε ύψιστο βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων. Επιπλέον, σημαντική είναι και οι φακοί που στοχεύουν στην ακριβή εστίαση της ακτίνας laser πάνω

στη μελετώμενη επιφάνεια, καθώς και τη διαχείριση της διάθλασης και διάχυσης του φωτός. [32]

Η επεξεργασία τώρα του σήματος που λαμβάνεται από τους φωτοευαίσθητους αισθητήρες, γίνεται με τη χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων και συστημάτων επεξεργασίας σημάτων. Τα συστήματα αυτά είναι υπεύθυνα για την ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται από τους ανιχνευτές και τη δημιουργία του τρισδιάστατου νέφους σημείων. Για την πραγματοποίηση των παραπάνω εφαρμόζονται κυρίως συστήματα που αξιοποιούν την τεχνολογία time – of – flight (ToF), τα οποία βασίζονται στον υπολογισμό του χρόνου που απαιτείται, ώστε η φωτεινή δέσμη να ταξιδέψει από το σαρωτή στην επιφάνεια προς μελέτη και πίσω σε αυτόν. Με βάση το χρόνο αυτό και τη γνωστή ταχύτητα διάδοσης, υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ πηγής και επιφάνειας. [32], [33]

2.2.8 Υπολογισμός κατασκευαστικών σφαλμάτων εξαρτημάτων.

2.2.8.1 Λογισμικό PC – DMIS.

Το λογισμικό PC – DMIS αποτελεί ένα από τα πιο ευρέως διαδεδομένα λογισμικά για πραγματοποίηση διαστασιολογικού και ποιοτικού ελέγχου, χρησιμοποιώντας μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMMs) για ερευνητική ή και βιομηχανική χρήση.

Όπως συνοπτικά αναφέρθηκε και πριν, η διαδικασία μέτρησης ενός εξαρτήματος στο περιβάλλον του PC – DMIS ξεκινά με την ευθυγράμμιση του αντικειμένου. Ο χρήστης ορίζει ένα σύστημα αναφοράς συντεταγμένων μετρώντας βασικά γεωμετρικά στοιχεία αναφοράς (datum features), όπως ευθείες και επίπεδα, στις τρεις κατευθύνσεις του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Με βάση αυτά τα γεωμετρικά στοιχεία αναφοράς, ξεκινούν οι μετρήσεις του συνολικού εξαρτήματος, καθώς και η πραγματοποίηση της γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T).

Απαραίτητο στάδιο, πριν την έναρξη λήψης μετρήσεων, είναι το σωστό καλιμπράρισμα του αισθητήρα αφής (touch probe), ώστε να προσδιοριστούν πλήρως οι συντεταγμένες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (διάμετρος) του άκρου του αισθητήρα (stylus tip) και να διορθωθούν πιθανές αποκλίσεις, ώστε να διασφαλιστούν τα σωστά αποτελέσματα των μετρήσεων.

Η διαδικασία του καλιμπραρίσματος πραγματοποιείται ακολουθώντας μία ρουτίνα βημάτων στο περιβάλλον του λογισμικού. Αρχικά, επιλέγεται η εντολή probe calibration από την γραμμή εντολών, ενώ στη συνέχεια επιλέγεται το μοντέλο του αισθητήρα αφής (π.χ. Renishaw TP20) και η διάμετρος της μπίλιας του. Η πραγματοποίηση της βαθμονόμησης βασίζεται στην ρουμπινένια σφαίρα αναφοράς, της οποίας η ακριβής διάμετρος και θέση πάνω στην τράπεζα είναι πλήρως γνωστές και ορισμένες στο λογισμικό. Εκτελώντας την ρουτίνα στο λογισμικό, ο αισθητήρας αφής εκτελεί πολλαπλές μετρήσεις γύρω από τη ρουμπινένια σφαίρα, αγγίζοντας την από διαφορετικές γωνίες. Μέσω του

λογισμικού υπολογίζεται η απόκλιση της μπίλιας του αισθητήρα (tip) από το ιδανικό κέντρο και προσαρμόζονται οι μετρήσεις ανάλογα.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιείται με τον καθορισμό της θέσης της μπίλιας του αισθητήρα και την απόκλισή του από το μηδενικό σημείο. Αυτό πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας προσαρμογή των μετρούμενων σημείων με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων εντός του λογισμικού PC – DMIS, ενώ τα αποτελέσματα των αποκλίσεων μπορούν να αναγνωστούν από το χρήστη για να ελέγξει την επιτυχία της ρουτίνας βαθμονόμησης. Τέλος, εάν τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, το λογισμικό αποθηκεύει τις διορθώσεις, διαφορετικά απαιτείται εκ νέου βαθμονόμηση.

Στη συνέχεια, με ορισμένο το σύστημα συντεταγμένων για το μετρούμενο εξάρτημα και με σωστή βαθμονόμηση της μετρητικής μηχανής, ξεκινά η διαδικασία λήψης μετρήσεων κατά την οποία συλλέγονται σημεία χειροκίνητα για κάθε γεωμετρία που βρίσκεται πάνω στο μετρούμενο εξάρτημα. Συγκεκριμένα για ένα επίπεδο χρειάζονται τουλάχιστον τρία σημεία και για έναν κύλινδρο τρία σημεία σε δύο διαφορετικά ύψη. Προφανώς, όσο περισσότερες μετρήσεις λαμβάνονται, απαιτείται περισσότερος χρόνος, αλλά τόσο πιο αξιόπιστα είναι και τα αποτελέσματα της προσαρμογής στην μετέπειτα διαδικασία.

Η αναγνώριση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (feature recognition) στο λογισμικό PC – DMIS με βάση τα συλλεγμένα σημεία κατά την μετρητική διαδικασία γίνεται για να εξαχθούν επίπεδα, γραμμές, κύκλοι, κύλινδροι, οπές, σφαίρες, κώνοι κ.α. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, το λογισμικό χρησιμοποιεί αλγορίθμους προσαρμογής γεωμετρικών σχημάτων, οι οποίοι βρίσκουν τη βέλτιστη γεωμετρική αναπαράσταση ενός συνόλου σημείων μέτρησης.

Οι βασικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο λογισμικό για την προσαρμογή γεωμετρικών σχημάτων στα μετρούμενα σημεία, είναι η προσαρμογή με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, κατά την οποία υπολογίζεται και ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των κατακόρυφων αποκλίσεων των σημείων από την προσαρμοσμένη γεωμετρική γραμμή ή επιφάνεια. Οι αποκλίσεις αυτές μετριοούνται με βάση την απόσταση κάθε σημείου από το θεωρητικό μαθηματικό μοντέλο του γεωμετρικού χαρακτηριστικού που παρεμβάλλεται.

Έστω ότι διατίθεται ένα σύνολο μετρημένων σημείων που προέρχονται από τη μέτρηση μίας ευθείας με συντεταγμένες στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x_i, y_i) , με $i=0, 1, 2, \dots, N$. Στα σημεία αυτά, θα προσαρμοστεί μία ευθεία με μαθηματική εξίσωση:

$$y = a \cdot x + b \quad (1)$$

Στη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, για κάθε σημείο (x_i, y_i) , υπολογίζεται η απόκλιση d_i από τη θεωρητική ευθεία και ελαχιστοποιείται το άθροισμα S των τετραγώνων αυτών των αποκλίσεων:

$$S = \sum_{i=1}^N d_i^2 \quad (2)$$

Όπου στην παραπάνω σχέση:

$$d_i = y_i - (a \cdot x_i + b) \quad (3)$$

Επιλέγοντας τις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων a και b , δηλαδή μηδενίζοντας τις μερικές παραγώγους:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0 \quad (5)$$

Με την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων αυτών προκύπτουν οι τιμές των συντελεστών a και b και προσδιορίζεται το πολυώνυμο προσέγγισης. Κατά αντίστοιχο τρόπο γενικεύεται η μέθοδος σε κάθε είδους γεωμετρία που προσεγγίζεται από κάποια μαθηματική εξίσωση (κύκλος, κώνος, επίπεδο κ.ο.κ.).

Τα τελικά αποτελέσματα των μετρήσεων και της προσαρμογής που πραγματοποιείται με την γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών, καταγράφονται σε μία αναφορά αποτελεσμάτων που παρουσιάζει τα συνολικά αποτελέσματα της μετρητικής διαδικασίας, χρησιμοποιώντας γραφικές αναπαραστάσεις, αποτελέσματα επιτυχίας/αποτυχίας από τις επιθυμητές ανοχές και στατιστικές αναλύσεις, όπως χρωματικούς χάρτες κ.α.

2.2.8.2 Λογισμικό Geomagic Wrap και Geomagic Control X

Το λογισμικό Geomagic Control X αποτελεί ένα ισχυρό λογισμικό για την επαλήθευση γεωμετρικών διαστάσεων και την επιθεώρηση τρισδιάστατων δεδομένων. Είναι ευρέως διαδεδομένο σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπου απαιτείται ύψιστη ακρίβεια στις μετρήσεις και ακριβής έλεγχος της ποιότητας εξαρτημάτων, καθώς είναι κατασκευασμένο για να επεξεργάζεται δεδομένα που λαμβάνονται από συστήματα τρισδιάστατης σάρωσης και μηχανές μέτρησης συντεταγμένων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε την βέλτιστη λύση για την πραγματοποίηση της αναγνώρισης γεωμετριών (feature recognition) και την γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών (GD&T), μεταξύ άλλων όπως η κατασκευή αλγορίθμων στο περιβάλλον της Matlab, της Python ή την αντίστοιχη

διαδικασία σε λογισμικά όπως το Catia, Recreate κ.α. μιας και παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα με τον ταχύτερο τρόπο.

Συγκεκριμένα, η διαδικασία αναγνώρισης γεωμετριών ξεκινά αφού έχει ληφθεί το νέφος σημείων και έχει «καθαριστεί» πλήρως από πιθανό θόρυβο στο λογισμικό Geomagic Wrap, καταλήγοντας σε ένα καθαρό, συνεχές και πυκνό νέφος σημείων στο οποίο απεικονίζεται ολοκληρωτικά όλη τη γεωμετρία.

Η διαδικασία συνεχίζεται με την τμηματοποίηση του νέφους σημείων στο λογισμικό Geomagic Wrap, όπου αποθηκεύονται ξεχωριστά νέφη σημείων που αναφέρονται στην κάθε γεωμετρία σε αρχεία της μορφής GPD (αρχεία μορφής IGES), καταλήγοντας δηλαδή σε νέφη σημείων που εισάγονται στη συνέχεια τμηματικά στο λογισμικό Geomagic Control X.

Με την εισαγωγή των επιμέρους νεφών σημείων στο λογισμικό Geomagic Control X, αναπαρίσταται η συνολική γεωμετρία του εξαρτήματος και πλέον ξεκινά η διαδικασία αναγνώρισης γεωμετριών. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτόματα χρησιμοποιώντας την εντολή «αυτόματη αναγνώριση γεωμετρικών χαρακτηριστικών (auto feature recognition)» εντός του λογισμικού. Ωστόσο, μπορεί να πραγματοποιηθεί και χειροκίνητα σε κάθε γεωμετρία επιλέγοντας τα επιμέρους δεδομένα και παρεμβάλλοντας την γεωμετρία στην οποία αναφέρονται, για παράδειγμα επίπεδο σε νέφος σημείων που αναπαριστά επίπεδο, κύλινδρο σε νέφος σημείων που αναπαριστά κύλινδρο κ.ο.κ.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό Geomagic Wrap για την αποθορυβοποίηση και στο Geomagic Control X για την προσαρμογή επιφανειών και την πραγματοποίηση γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών, αποτελούν σύνθετα και απαραίτητα εργαλεία για την τελική εξαγωγή συμπερασμάτων για τα μετρητικά δεδομένα.

Συγκεκριμένα, το λογισμικό Geomagic Wrap χρησιμοποιεί πλήθος αλγορίθμων για την πραγματοποίηση αποθορυβοποίησης ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Ο αλγόριθμος smoothing, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Laplacian, διατηρεί τα κύρια χαρακτηριστικά της επιφάνειας αφαιρώντας τον υψηλής συχνότητας θόρυβο. Η μέθοδος Statistical Outlier Removal (SOR) βασίζεται σε βασικά στατιστικά θεωρήματα και χρησιμοποιείται για την αφαίρεση ακραίων σημείων (outliers), που βρίσκονται μακριά από τον μέσο όρο θέσης των γειτονικών σημείων. Μέθοδος υψίστης σημασίας, αποτελεί η μέθοδος Moving Least Squares (MLS), η οποία χρησιμοποιεί αλγορίθμους κατά τους οποίους ευθυγραμμίζει το νέφος σημείων με τοπική προσαρμογή επιπέδων ή καμπυλών χρησιμοποιώντας τα κοντινά σημεία. Με τον τρόπο αυτό, σημεία που θεωρούνται ακραία σημεία του νέφους (outliers) προσαρμόζονται στο κύριο νέφος σημείων (inliers), μειώνοντας το θόρυβο του νέφους, αλλά διατηρώντας τις λεπτομέρειες του. Τέλος, για σημεία που προέρχονται από μετρήσεις της γεωμετρίας με έντονη καμπυλότητα, εξαιρετική μέθοδος αποτελεί η Curvature – Based Smoothing, κατά την οποία μειώνεται ο θόρυβος του νέφους στην περιοχή αυτή, χωρίς να

επηρεάζονται οι αιχμηρές γωνίες και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, όπως για παράδειγμα σε σημεία που παρουσιάζεται έντονη αλλαγή καμπυλότητας. [35], [36]

Όσον αφορά το λογισμικό Geomagic Control X για την αναγνώριση γεωμετρικών χαρακτηριστικών (feature recognition), χρησιμοποιούνται συνδυαστικά πλήθος αλγορίθμων με σκοπό τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Ο αλγόριθμος RANSAC (Random Sample Consensus), προσαρμόζει επαναληπτικά γεωμετρικά στοιχεία στα νέφη σημείων και στατιστικά εκτιμά τις παραμέτρους που τα χαρακτηρίζει, όπως την ακτίνα και το ύψος του κυλίνδρου. Ο μετασχηματισμός Hough (Hough Transformation) αποτελεί έναν εξαιρετικό αλγόριθμο για την αρχική εκτίμηση του γεωμετρικού σχήματος που χαρακτηρίζει ένα νέφος σημείων, ενώ η προσαρμογή με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (Least Squares Fitting) υπολογίζει τη βέλτιστη μαθηματική εξίσωση που περιγράφει το γεωμετρικό σχήμα αυτό, ελαχιστοποιώντας την απόκλιση της θεωρητικής επιφάνειας από τα πραγματικά δεδομένα. Για την αυτόματη αναγνώριση γεωμετρικών χαρακτηριστικών που υποστηρίζει το λογισμικό, εξαιρετικός αλγόριθμος είναι αυτός της ανάπτυξης περιοχών και ομαδοποίησης (Region Growing and Clustering), κατά τον οποίο το συνολικό νέφος σημείων χωρίζεται σε επιμέρους νέφη σημείων τα οποία χαρακτηρίζονται από παρόμοια καμπυλότητα και ομοιομορφία μοναδιαίων διανυσμάτων. [37], [38]

Για την γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών (GD&T), το λογισμικό Geomagic Control X χρησιμοποιεί γεωμετρικούς λύτες περιορισμών (constraint solvers) και στατιστική ανάλυση για την αξιολόγηση γεωμετρικών ανοχών. Συγκεκριμένα, η μέθοδος ελάχιστης ζώνης (Minimum Zone / Chebyshev Method) καθορίζει τις ζώνες ανοχής ελαχιστοποιώντας τη μέγιστη απόκλιση που παρουσιάζει το νέφος σημείων από το ιδανικό γεωμετρικό χαρακτηριστικό. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση αβεβαιοτήτων και την ανάλυση της διακύμανσης των μετρήσεων. Η βελτιστοποίηση με περιορισμούς (constraint – based optimization) αξιολογεί χαρακτηριστικά, όπως η καθετότητα και η παραλληλία. Η ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA – Principal Component Analysis) χρησιμοποιείται για την ευθυγράμμιση των επιμέρους νεφών σημείων και τον υπολογισμό των βάσεων αναφοράς (datums). Τέλος, η βέλτιστη ευθυγράμμιση (Best – Fit Alignment) υπολογίζει τη βέλτιστη προσαρμογή χαρακτηριστικών ελαχιστοποιώντας τις αποκλίσεις μέσω επαναληπτικών αλγορίθμων. [37], [38]

2.3 Μεθοδολογία

2.3.1 Εξοικείωση με τις Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων.

Για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, σημαντική αποτέλεσε η εξοικείωση με τον εργαστηριακό εξοπλισμό. Συγκεκριμένα, διαδοχικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM) του εργαστηρίου ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων και εργαλείων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μελετήθηκαν εξαρτήματα αποτελούμενα από απλές γεωμετρίες όπως επίπεδα, κεκλιμένα

επίπεδα κυλίνδρους και οπές, καθώς πραγματοποιήθηκε και πλήρης γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών (GD&T).

Η μεθοδολογία για την πραγματοποίηση της ανάλυσης, σε κάθε περίπτωση, ξεκινά με την στερέωση του μελετώμενου εξαρτήματος στην τράπεζα της μηχανής μέτρησης συντεταγμένων, το οποίο πρέπει οπωσδήποτε να παραμείνει στην ίδια θέση από την έναρξη έως και την περάτωση του ελέγχου. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η σύνδεση της μηχανής μέτρησης συντεταγμένων με τον Η/Υ του εργαστηρίου με χρήση του λογισμικού PC – DMIS, που αποτελεί ένα λογισμικό μετρολογίας με μεγάλη προγραμματιστική ικανότητα για τη δημιουργία και την εκτέλεση μετρητικών διαδικασιών.

Για την έναρξη λήψης των μετρήσεων, απαραίτητη είναι η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα επαφής (touch probe) (Εικόνα 24) ο οποίος μπορεί να ποικίλει σε διαστάσεις και η επιλογή του γίνεται με το σκεπτικό της βέλτιστης ικανότητας λήψης μετρήσεων, λαμβάνοντας υπόψη τα δυσπρόσιτα σημεία της γεωμετρίας προς μελέτη. Ακόμη, σημαντικός είναι ο ορισμός της γωνίας του αισθητήρα μέτρησης (Εικόνα 25). Αυτή επιλέγεται με τρόπο τέτοιο, ώστε κατά τη διαδικασία λήψης μετρήσεων κατά μήκος του άξονα Z, ο κάθετος βραχίονας να μην έρχεται σε επαφή με το εξάρτημα, αλλά και ο αισθητήρας να μπορεί να λαμβάνει μετρήσεις σε όλο το μήκος του εξαρτήματος.



Εικόνα 24: Αισθητήρας αφής της εταιρίας RENISHAW



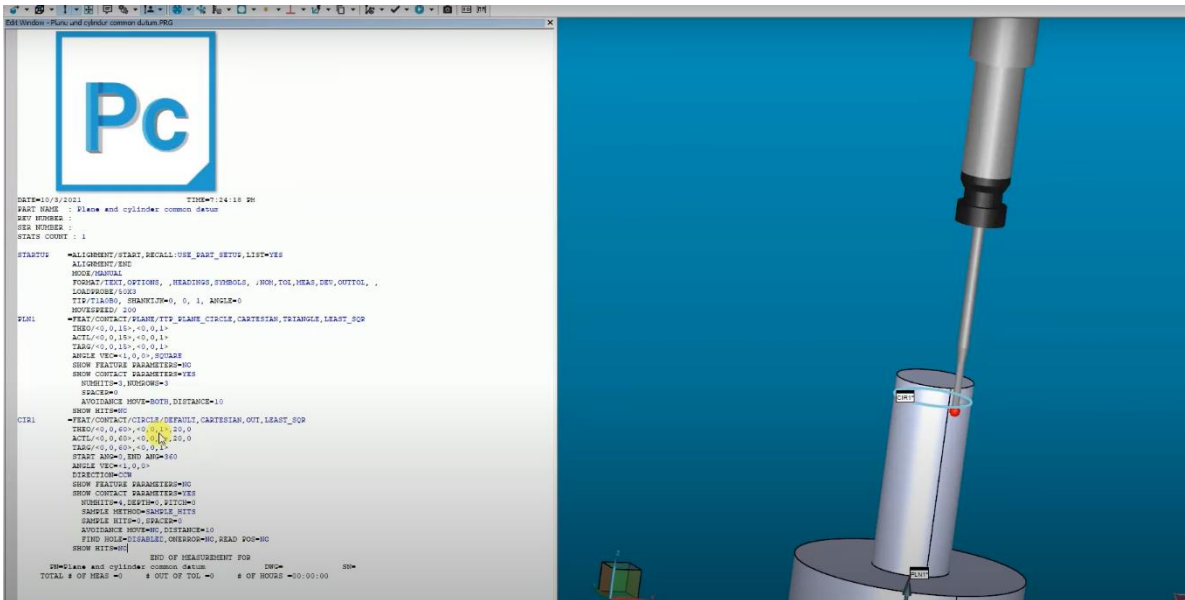
Εικόνα 25: Αισθητήρας αφής στραμμένος υπό γωνία 45 μοιρών κατά τον Z άξονα

Επόμενο βήμα αποτελεί η βαθμονόμηση του αισθητήρα αφής. Συγκεκριμένα, μετά την εγκατάσταση του αισθητήρα στην μηχανή, πραγματοποιούνται διαδοχικές μετρήσεις σε διάφορα σημεία της ρουμπινένιας σφαίρας υψηλής ακριβείας (certified sphere) (Εικόνα 26). Οι διαστάσεις και η θέση της στην τράπεζα της μηχανής μέτρησης συντεταγμένων είναι γνωστές και καταχωρημένες στο λογισμικό PC – DMIS. Μέσα από το λογισμικό εκτελείται η ρουτίνα αυτόματης βαθμονόμησης του αισθητήρα, κατά την οποία η CMM μετακινεί τον αισθητήρα για να αγγίξει διάφορα σημεία στην επιφάνεια της σφαίρας. Μετά από αυτή τη διαδικασία, το σύστημα μετράει τις αποκλίσεις του αισθητήρα και προσδιορίζει την πραγματική διάμετρο, τις αντισταθμίσεις (offsets) και τη γωνιακή ευθυγράμμιση, ενώ είναι απαραίτητο να επαναλαμβάνεται αυτή η διαδικασία σε κάθε αλλαγή του αισθητήρα αφής.



Εικόνα 26: Ρουμπινένια σφαίρα υψηλής ακριβείας

Με τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων να είναι πλήρως ρυθμισμένη και το εξάρτημα προς μελέτη σωστά στερεωμένο στην τράπεζα, η διαδικασία μέτρησης συνεχίζεται με τον ορισμό του συστήματος συντεταγμένων. Αρχικά το σύστημα συντεταγμένων ευθυγραμμίζεται με τις επιφάνειες του αντικειμένου, ορίζοντας ευθείες και επίπεδα κατά μήκος των επιφανειών του εξαρτήματος. Στη συνέχεια, για κάθε γεωμετρία του εξαρτήματος προς μελέτη, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες που αναζητούνται μέσω διαδοχικών επαφών του αισθητήρα με το εξάρτημα (Εικόνα 27), και στη συνέχεια με χρήση του λογισμικού PC – DMIS γίνεται η αναγνώριση των χαρακτηριστικών (feature recognition) της γεωμετρίας, δηλαδή αν πρόκειται για επιφάνεια, κύλινδρο, κώνο κ.λπ.



Εικόνα 27: Λήψη μετρήσεων στο λογισμικό PC – DMIS

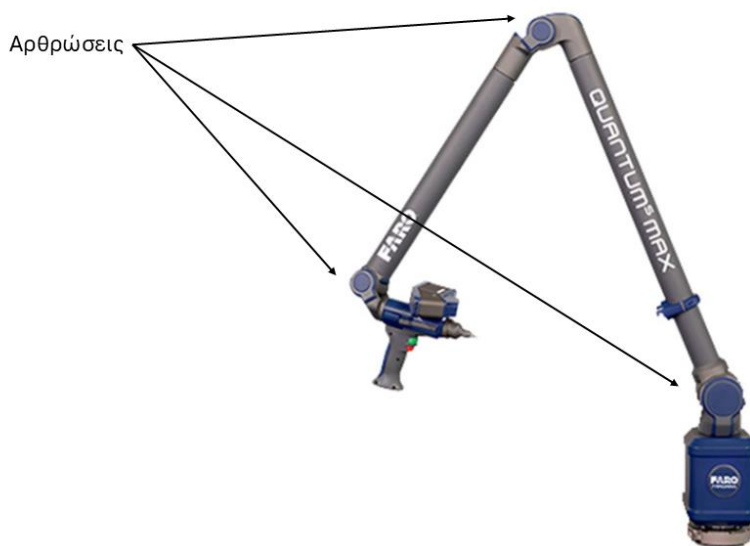
Κατά το τέλος της διαδικασίας, με γνωστά τα χαρακτηριστικά του εξαρτήματος, ακολουθεί η γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών. Συγκεκριμένα, επιλέγονται τα χαρακτηριστικά της γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών που θέλουν να εξαχθούν, όπως η παραλληλία, η καθετότητα, η κυλινδρικότητα κ.α. και μέσω του λογισμικού PC – DMIS πραγματοποιείται η ανάλυση και εξάγονται τα αποτελέσματα σε φύλλο αναφοράς.

2.3.2 Εξοικείωση με τους Σαρωτές Laser

Απαραίτητη κρίθηκε και η εξοικείωση με τους σαρωτές laser για την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές μετρήσεις σε διάφορα εξαρτήματα στον σαρωτή laser του εργαστηρίου ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων και εργαλείων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σκοπός των μετρήσεων ήταν η πλήρης κατανόηση της δειγματοληπτικής ικανότητας του σαρωτή laser και η πειραματική εύρεση του βέλτιστου τρόπου λήψης νεφών σημείων, καθώς και η αποτύπωση τους στο κατάλληλο λογισμικό. Δοκιμάστηκαν διάφορες γεωμετρίες, απλές και σύνθετες και τελικά και σε αυτές έγινε πλήρης γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών (GD&T).

Η εξοικείωση ξεκινά με τον τεχνολογικό εξοπλισμό. Αυτός αποτελείται από έναν σαρωτή laser FAROarm της εταιρίας FARO, ο οποίος εγκαθίσταται σε μία σταθερή τράπεζα. Ο βραχίονας του σαρωτή αποτελείται από τρεις βασικές αρθρώσεις (Εικόνα 28), οι οποίες επιτρέπουν την εύκολη κίνησή του στον χώρο, ενώ ο αισθητήρας σάρωσης βρίσκεται στο μπροστινό μέρος με μία εργονομική λαβή, σε σχήμα πιστολιού, για την εύκολη χρήση του. Ακολουθεί η στερέωση του εξαρτήματος στην τράπεζα, η οποία κατά τον ίδιο τρόπο με την

μηχανή μέτρησης συντεταγμένων, πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή, έτσι ώστε να παραμείνει ακίνητο καθ' όλη τη διάρκεια της σάρωσης. Όσον αφορά τον τεχνολογικό εξοπλισμό, ο σαρωτής συνδέεται με έναν Η/Υ και η σάρωση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το λογισμικό GEOMAGIC WRAP το οποίο επιτρέπει τη ζωντανή καταγραφή σημείων.

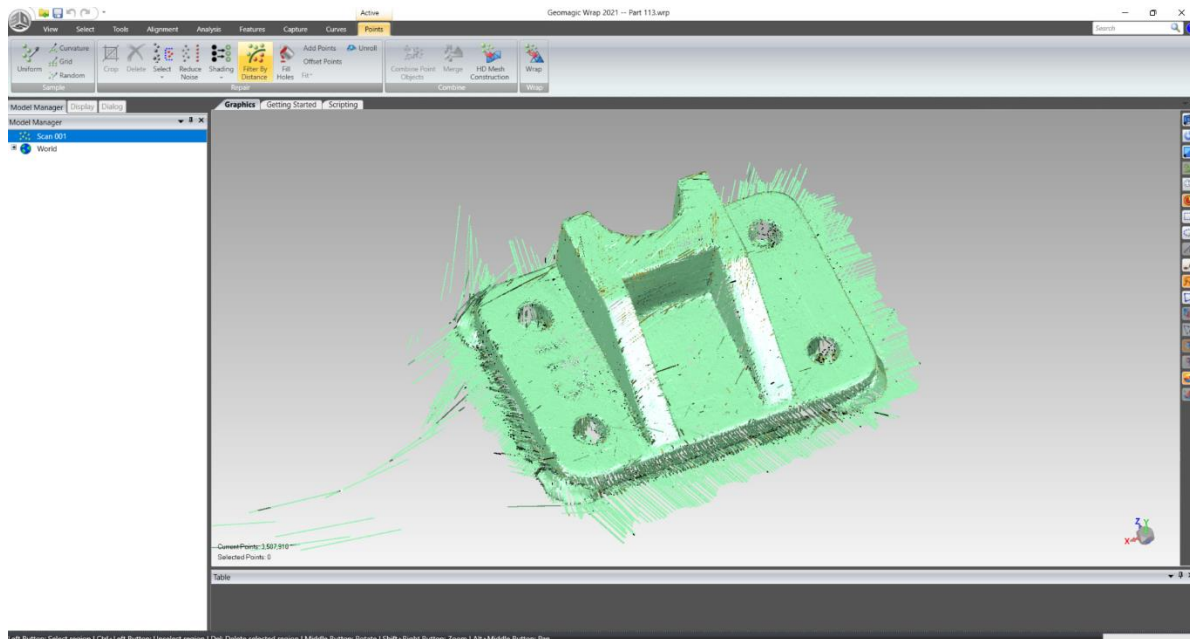


Εικόνα 28: Αρθρώσεις του σαρωτή laser

Η διαδικασία της σάρωσης ξεκινάει σε κάθε περίπτωση με την βαθμονόμηση του σαρωτή. Αυτή πραγματοποιείται με την περιστροφή κάθε άρθρωσης κατά 180° στην θετική και την αρνητική κατεύθυνση, ώστε να προσδιοριστεί η κάθε πιθανή θέση του σαρωτή σε σχέση με την αρχή των αξόνων στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Η αρχή των αξόνων βρίσκεται στη θέση στήριξης του σαρωτή με την τράπεζα. Για την λήψη των μετρήσεων στο εξάρτημα, ο αισθητήρας του σαρωτή πρέπει να βρίσκεται σε ένα αρκετά περιορισμένο εύρος κάθετης απόστασης από αυτό, συγκεκριμένα 50mm έως και 150 mm, το οποίο κατά τη διαδικασία σάρωσης αποτυπώνεται με μία πράσινη και μία κόκκινη λυχνία. Συγκεκριμένα, όταν ο αισθητήρας βρίσκεται εντός του αποδεκτού εύρους απόστασης, η πράσινη λυχνία ανάβει και λαμβάνονται εκατοντάδες σημεία κάθε δευτερόλεπτο, αντίθετα όταν βρίσκεται εκτός του αποδεκτού εύρους, ανάβει η κόκκινη λυχνία και σταματά η συλλογή δεδομένων.

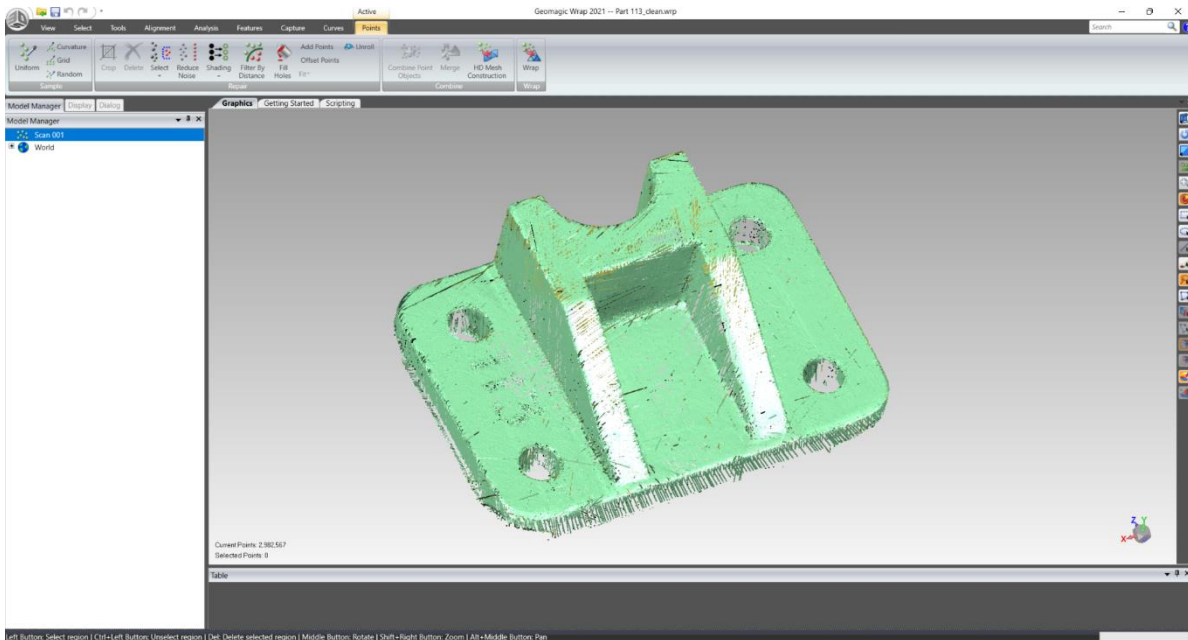
Τα εξαρτήματα που μετρήθηκαν αποτελούνταν από γεωμετρικές όπως, επίπεδα, κεκλιμένα επίπεδα, κυλίνδρους και οπές. Με τη συλλογή πληροφοριών από τη βιβλιογραφία και των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας, διαπιστώθηκε πως η βέλτιστη γωνία σάρωσης μεταξύ αισθητήρα και εξαρτήματος είναι οι 90° , κατά την οποία η εκπεμπόμενη δέσμη προσκρούει ομοιόμορφα στις επιφάνειες του εξαρτήματος. Πραγματοποιήθηκαν ακόμη διαδοχικές σαρώσεις εξαρτημάτων σε διαφορετικές όψεις με σκοπό την ολική

αναπαράσταση του τρισδιάστατου μοντέλου με την κατάλληλη επεξεργασία στο λογισμικό GEOMAGIC WRAP (Εικόνα 29).

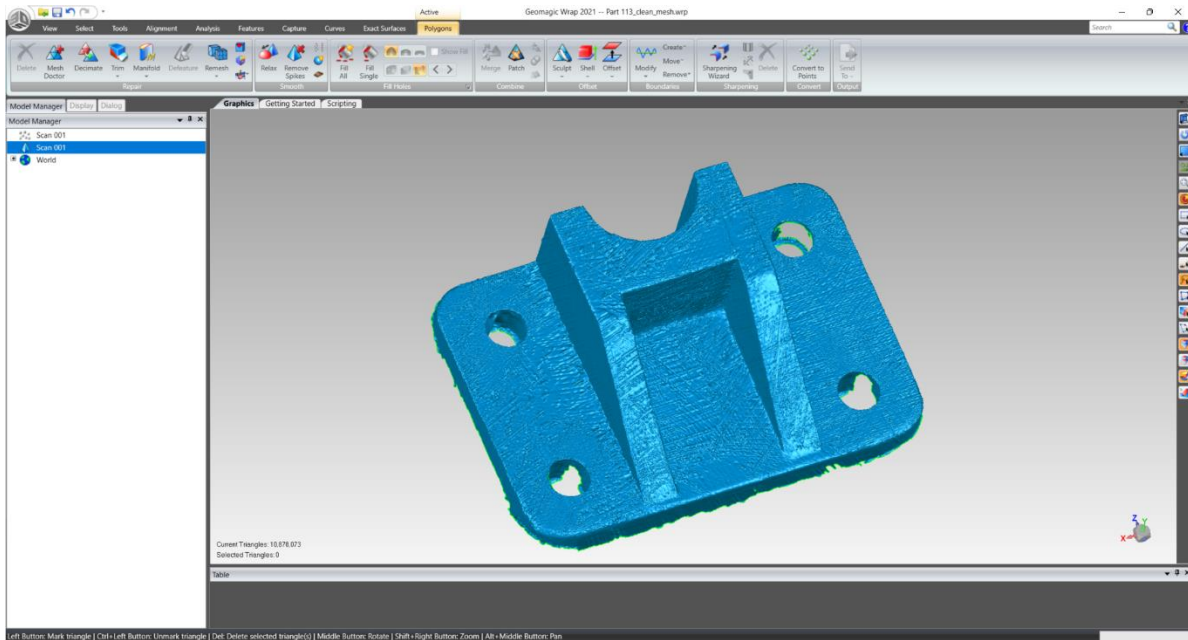


Εικόνα 29: Αρχικό νέφος σημείων εξαρτήματος κατά τη σάρωση του

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Αποκτήθηκε το νέφος σημείων για κάθε εξάρτημα και έγινε η επεξεργασία του νέφους σημείων στο λογισμικό GEOMAGIC WRAP. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα δεδομένα καθαρίστηκαν από τον εμφανή θόρυβο, δηλαδή αφαιρέθηκαν συλλεγμένα σημεία από την τράπεζα ή τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη στερέωση του εξαρτήματος. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε αυτόματη αποθρομβοποίηση του νέφους σημείων στην οποία απορρίφθηκαν σημεία των οποίων η θέση απέκλινε σε μεγάλο βαθμό από το κύριο νέφος σημείων (Εικόνα 30). Τέλος, η επεξεργασία του νέφους σημείων έγινε με την δημιουργία πλέγματος (mesh creation), όπου από πλήθος σημείων δημιουργήθηκαν οι επιφάνειες του εξαρτήματος. Η περαιτέρω επεξεργασία του πλέγματος οδηγεί σε πιο ομαλές ή τραχιές επιφάνειες, καθώς και στη διόρθωση σφαλμάτων της πλεγματοποίησης, όπως την επικάλυψη οπών ή την αφαίρεση κορυφών (spikes) (Εικόνα 31).



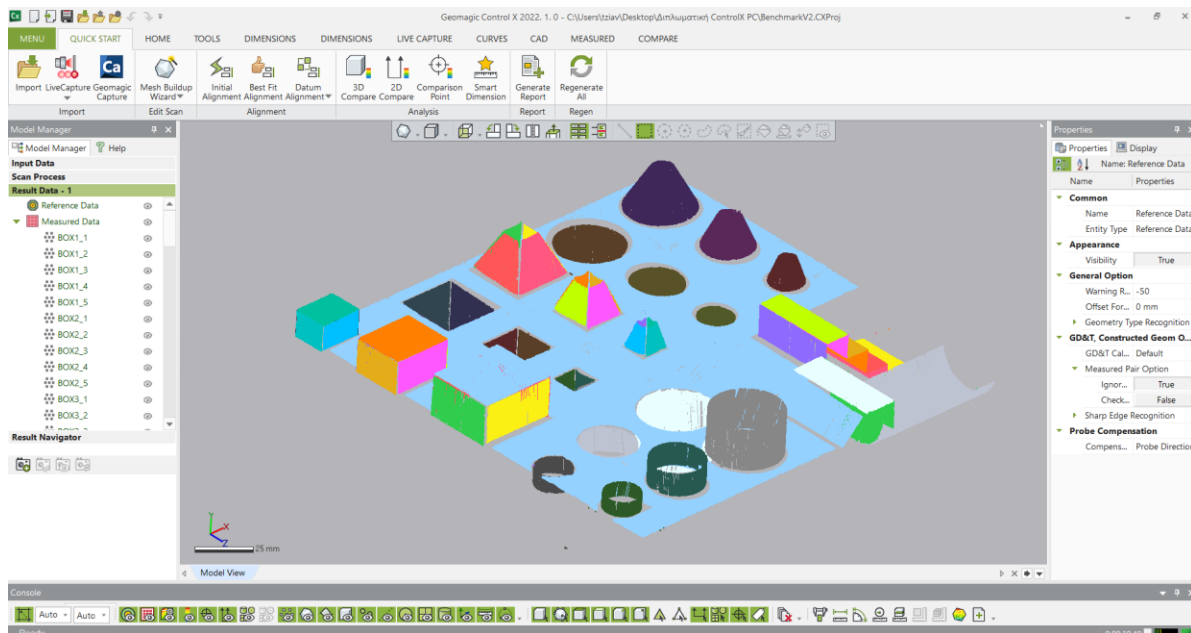
Εικόνα 30: Αποθρομβοποιημένο νέφος σημείων εξαρτήματος μετά την επεξεργασία του



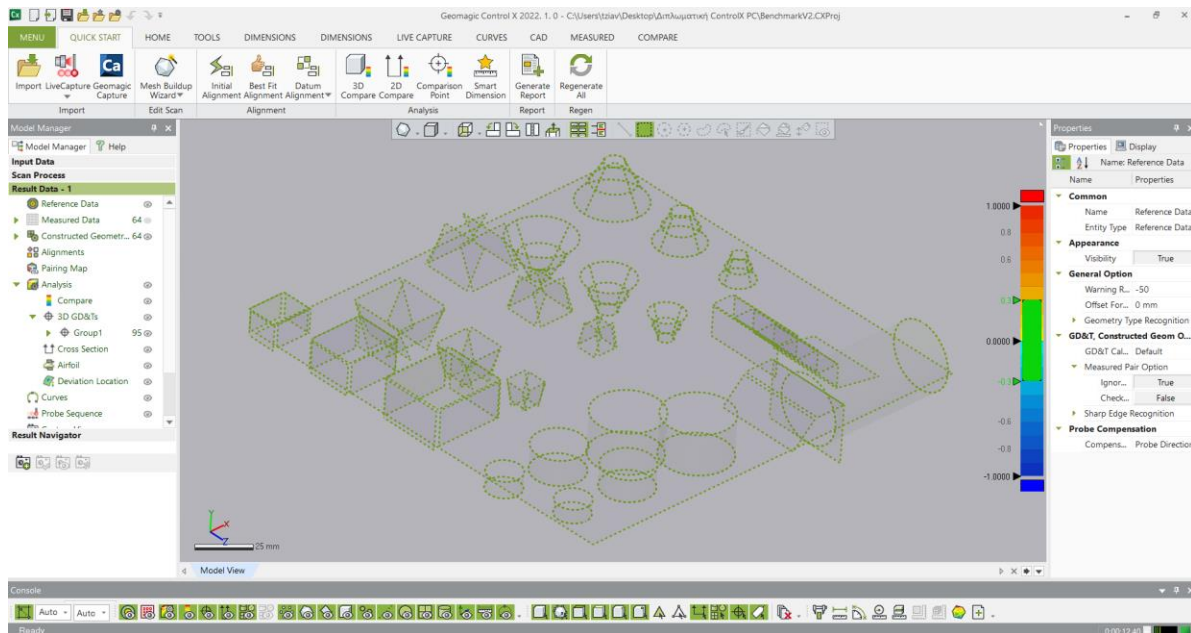
Εικόνα 31: Τελικό νέφος σημείων μετά την πλεγματοποίησή του (mesh creation)

Η γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών (GD&T) στην περίπτωση του σαρωτή laser ολοκληρώνεται χρησιμοποιώντας το λογισμικό GEOMAGIC CONTROL X, στο οποίο εισάγονται τα νέφη σημείων κάθε γεωμετρίας του εξαρτήματος (Εικόνα 32). Χρησιμοποιώντας τους αλγορίθμους βέλτιστης εφαρμογής (BestFit) του λογισμικού γίνεται η αναγνώριση γεωμετριών στο συνολικό νέφος σημείων, και τελικά εξάγονται τα

αποτελέσματα των μετρήσεων σχετικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εξαρτήματος, όπως η κυλινδρική, η καθετότητα κ.α. (Εικόνα 33).



Εικόνα 32: Νέφη σημείων στο λογισμικό GEOMAGIC CONTROL X



Εικόνα 33: Αναγνωρισμένες γεωμετρίες στο λογισμικό GEOMAGIC CONTROL X

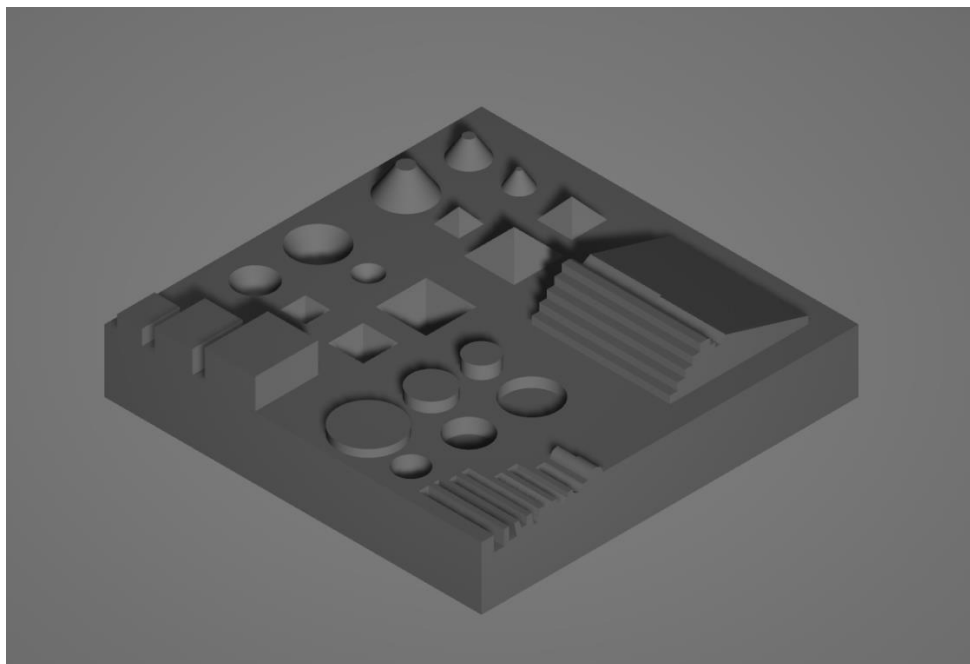
2.3.3 Κατασκευή Γεωμετρίας Αναφοράς

Δεδομένης της ανάγκης ύπαρξης μιας τυποποίησης που προσδιορίζει τη μετρητική ικανότητα ενός σαρωτή laser συγκριτικά με μία μηχανή μέτρησης συντεταγμένων, κρίθηκε

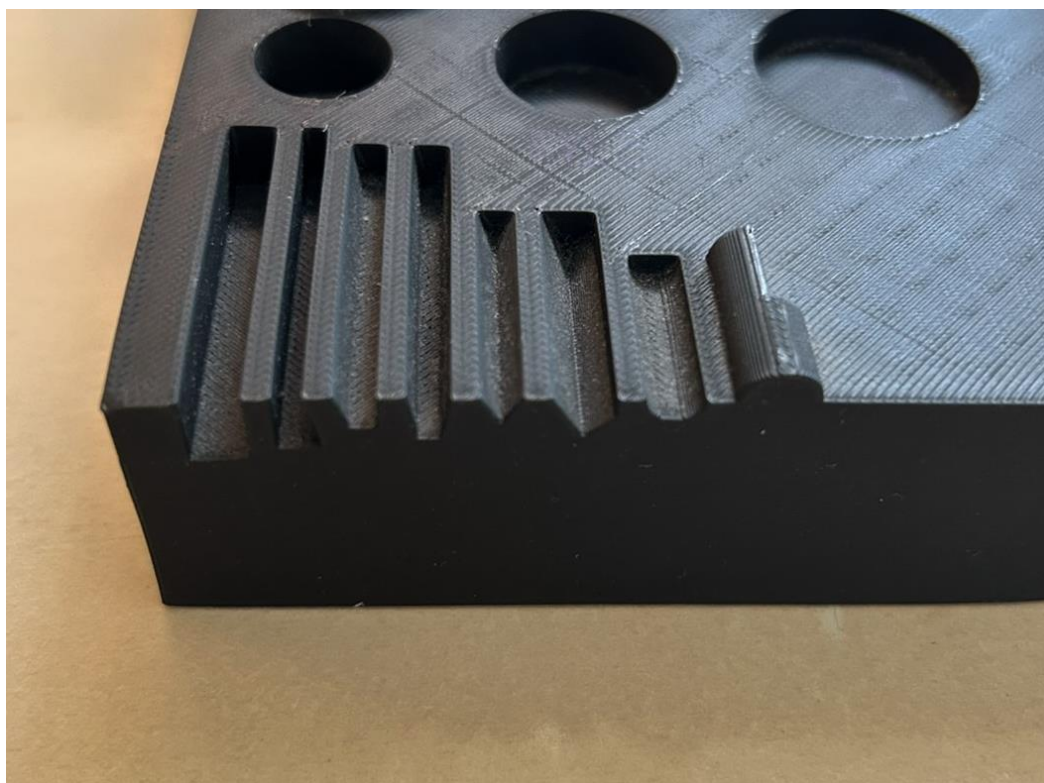
απαραίτητο να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί μία γεωμετρία αναφοράς η οποία αποτελείται από όλες τις βασικές γεωμετρίες, όπως κυλίνδρους, οπές, κύβους, κώνους, κεκλιμένα επίπεδα και σκαλοπάτια. Ζητούμενο επιπλέον, αποτελεί το μέγεθος και η φορητότητα της γεωμετρίας αυτής, καθώς και η ευκολία λήψης μετρήσεων με τις δύο μετρητικές συσκευές. Η τυποποιημένη μετρητική διάταξη οφείλει τελικά να παρέχει μια πειραματική διάταξη, που επιτρέπει στον χρήστη να πραγματοποιεί άμεσα και με υψηλή αξιοπιστία γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών (GD&T) σε οποιαδήποτε συσκευή σάρωσης, τέτοια ώστε να μπορεί να επαληθεύσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του. [39], [40]

Με γνώμονα τα παραπάνω κριτήρια, κατασκευάσθηκαν με την μέθοδο τρισδιάστατης προσθετικής κατασκευής σε 3D εκτυπωτή της εταιρίας Bambu Lab του εργαστηρίου, δύο γεωμετρίες, η αρχική προσέγγιση και η βελτιωμένη.

Όσον αφορά την πρώτη γεωμετρία αναφοράς, αποτελείται από τρεις κύβους διαφορετικών διαστάσεων, τρεις κυλίνδρους και τρεις κυλινδρικές οπές διαφορετικών διαστάσεων, τρεις εσωτερικές και εξωτερικές πυραμίδες διαφορετικών διαστάσεων, τρεις εσωτερικούς και εξωτερικούς κώνους διαφορετικών διαστάσεων, κεκλιμένα επίπεδα σε διαφορετικές γωνίες μεταξύ τους, μία γεωμετρία σκαλοπατιών και ποικίλες γεωμετρίες μικρών διαστάσεων (Εικόνα 34). Κατά την εκτύπωση της γεωμετρίας αναφοράς, παρατηρήθηκε από την πρώτη στιγμή, πως οι μικρές γεωμετρίες θα αποτελούσαν τροχοπέδη στη δειγματοληψία, τόσο με την μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM), όσο και με τον σαρωτή laser. Για τη μέτρηση με τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί εξαιρετικά μικρός αισθητήρας αφής, ώστε να μπορεί να απεικονιστεί η κάθε λεπτομέρεια των εσοχών, ενώ για τη μέτρηση με το σαρωτή laser στις περιοχές αυτές το αποτέλεσμα θα ήταν η δημιουργία αρκετού θορύβου λόγω της μικρής επιφάνειας κρούσης των φωτεινών δεσμών (Εικόνα 35).



Εικόνα 34: Αρχική εκδοχή της γεωμετρίας αναφοράς



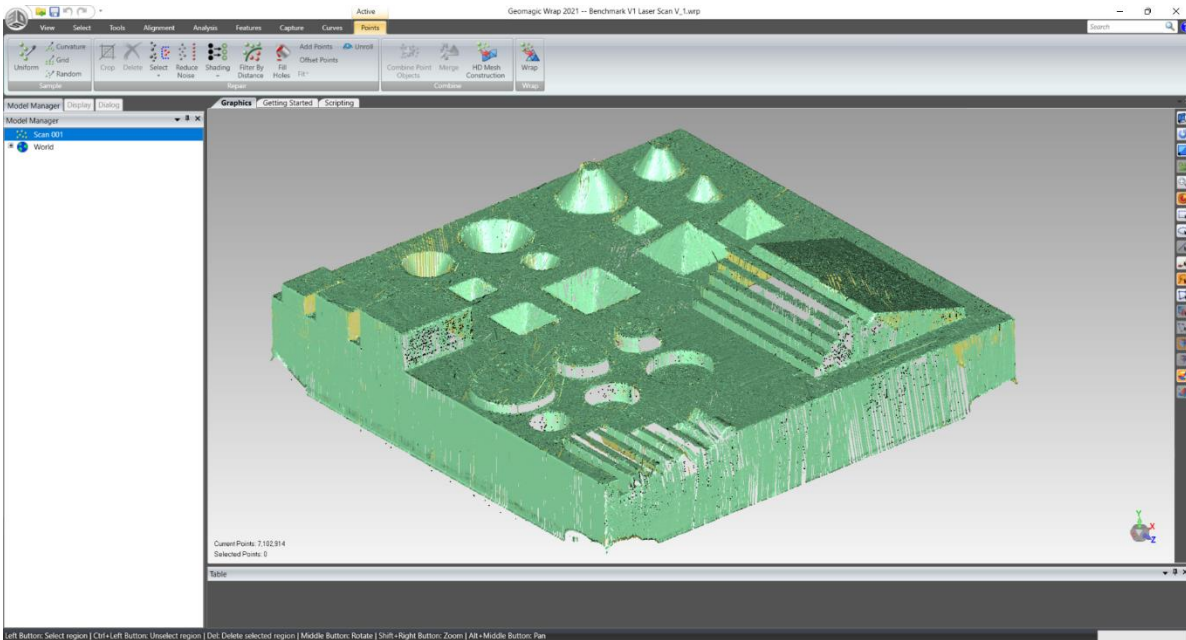
Εικόνα 35: Ποικίλες γεωμετρίες μικρών διαστάσεων

Στη συνέχεια, τυπώθηκε το εξάρτημα και ακολούθησε η μέτρησή του στη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων και στο σαρωτή laser του εργαστηρίου (Εικόνα 36). Τα αποτελέσματα της μηχανής μέτρησης συντεταγμένων ήταν ικανοποιητικά, ωστόσο φάνηκε τόσο στην περίπτωση αυτή, αλλά ακόμη περισσότερο στην περίπτωση του σαρωτή laser, η ανάγκη τροποποίησης της γεωμετρίας. Συγκεκριμένα, το νέφος σημείων που λήφθηκε από τον σαρωτή laser δεν ήταν ικανοποιητικό, καθώς το νέφος σημείων στους κυλίνδρους, στους κύβους και σε κάθε περίπτωση οπών ήταν ελλιπές. Συμπερασματικά, οι γεωμετρίες του εξαρτήματος ήταν αρκετά μικρές και αρκετά συνεπτυγμένες η μία με την άλλη (Εικόνα 37).

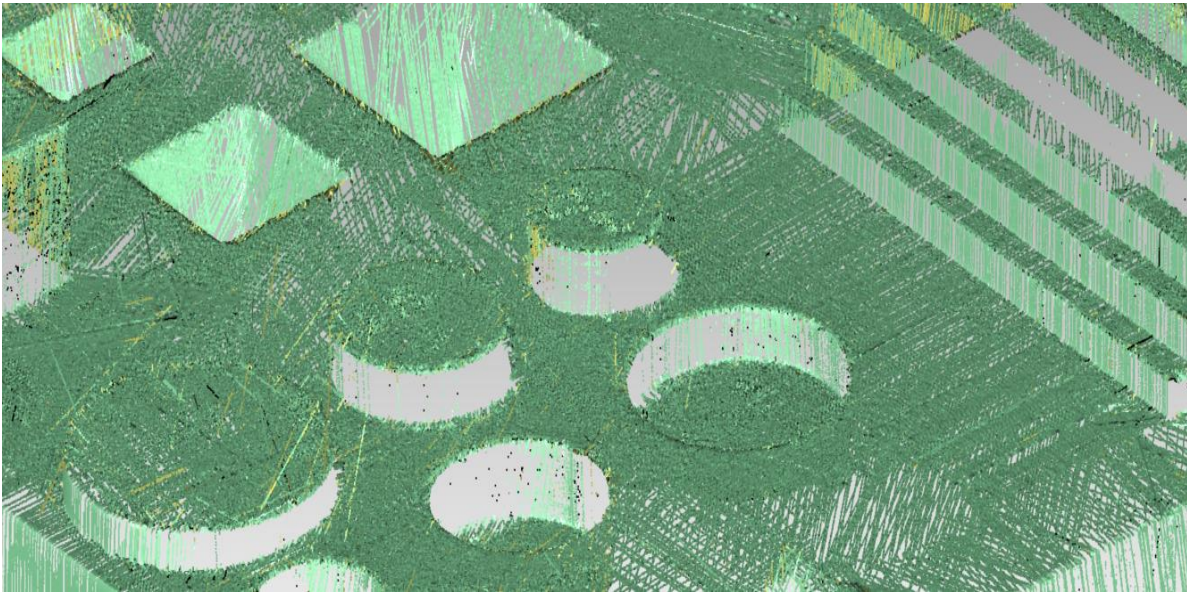
Όσον αφορά το σύνολο των μικρών γεωμετριών, δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM). Αυτό συνέβη, καθώς ο απαιτούμενος χρόνος για την αλλαγή των αισθητήρων αφής για τη μέτρηση της κάθε γεωμετρίας φάνηκε αναποτελεσματικός συγκριτικά με τα χρήσιμα αποτελέσματα που τελικά θα έδινε η γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών (GD&T) στην περιοχή αυτή. Τα αποτελέσματα κατά τη μέτρηση με τον σαρωτή laser ήταν ακόμη χειρότερα, καθώς το τελικό νέφος σημείων στην περιοχή αυτή ήταν πλήρως ελλιπές. Το νέφος αυτό χαρακτηριζόταν από αρκετό θόρυβο, παρά από δεδομένα που αποτελούσαν αυτοτελείς γεωμετρίες, συνεπώς θεωρήθηκε απαραίτητο οι γεωμετρίες αυτές να αφαιρεθούν (Εικόνα 38).

Λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνικές δυσλειτουργίες της αρχικής πρότυπης γεωμετρίας, δηλαδή του μικρού μεγέθους συνεπτυγμένων γεωμετριών στην επιφάνεια του εξαρτήματος, αλλά και τις δύσκολα προσεγγίσιμες ακριανές γεωμετρίες, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε η δεύτερη βελτιστοποιημένη γεωμετρία. Η φιλοσοφία σχεδιασμού της παρέμεινε να είναι ένα εξάρτημα με πλήθος απλών γεωμετριών για πλήρη γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών, στο οποίο όμως τώρα οι γεωμετρίες θα ήταν μεγαλύτερης κλίμακας και ιδανικά κατανεμημένες, ώστε να μην δημιουργούνται δυσκολίες κατά τη μέτρησή της.

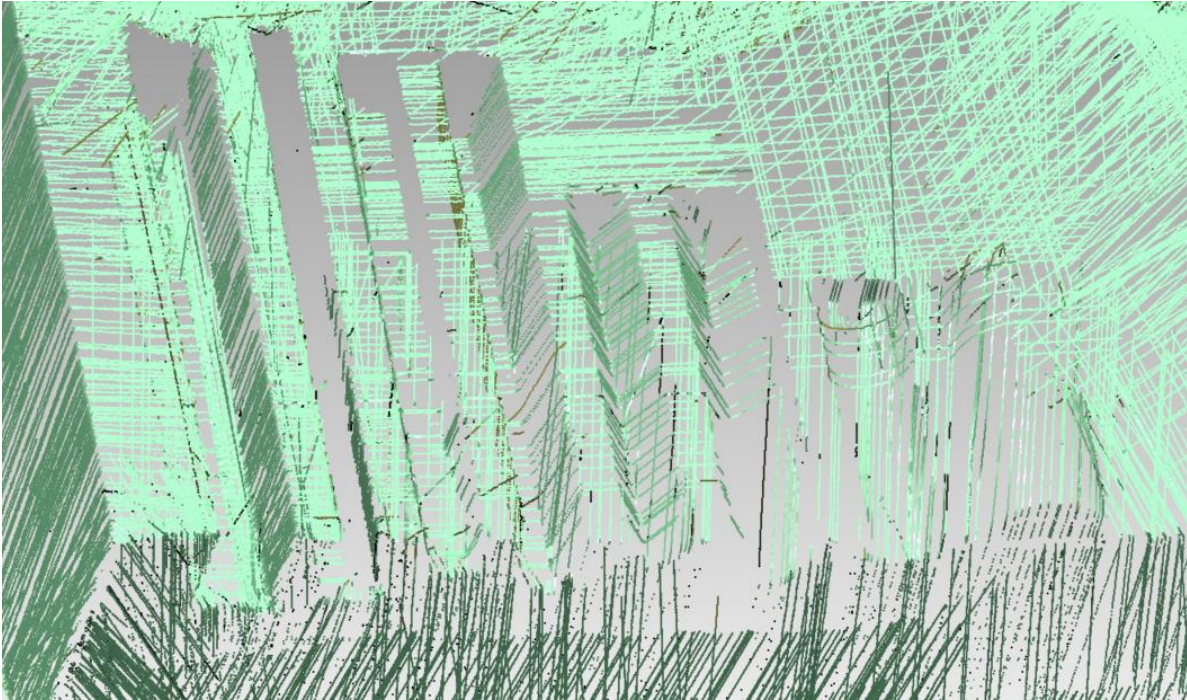
Με τη φιλοσοφία αυτή, σχεδιάστηκε από την αρχή μία νέα γεωμετρία. Η διάταξη περιείχε τρεις εσωτερικούς και εξωτερικούς κυλίνδρους, τρεις κύβους, τρεις εσωτερικές και εξωτερικές πυραμίδες, τρεις εσωτερικούς και εξωτερικούς κώνους, ένα κεκλιμένο επίπεδο, σκαλοπάτια και έναν ιδιόμορφο μισό κύλινδρο σε κάθετη διεύθυνση με τους υπόλοιπους έξι. Με τη λήψη μετρήσεων στη γεωμετρία αυτή και με τις δύο μεθόδους, παρατηρήθηκε πως η αποστασιοποίηση κάθε γεωμετρίας από την άλλη και η αύξηση των γεωμετρικών τους διαστάσεων οδήγησε σε πολύ πιο αποτελεσματική και εύκολη λήψη μετρήσεων τόσο στην μηχανή μέτρησης συντεταγμένων, όσο και στον σαρωτή laser, όπου καταγράφηκε ένα αρκετά πυκνό και λεπτομερές νέφος σημείων.



Εικόνα 36: Νέφος σημείων της αρχικής εκδοχής της γεωμετρίας αναφοράς



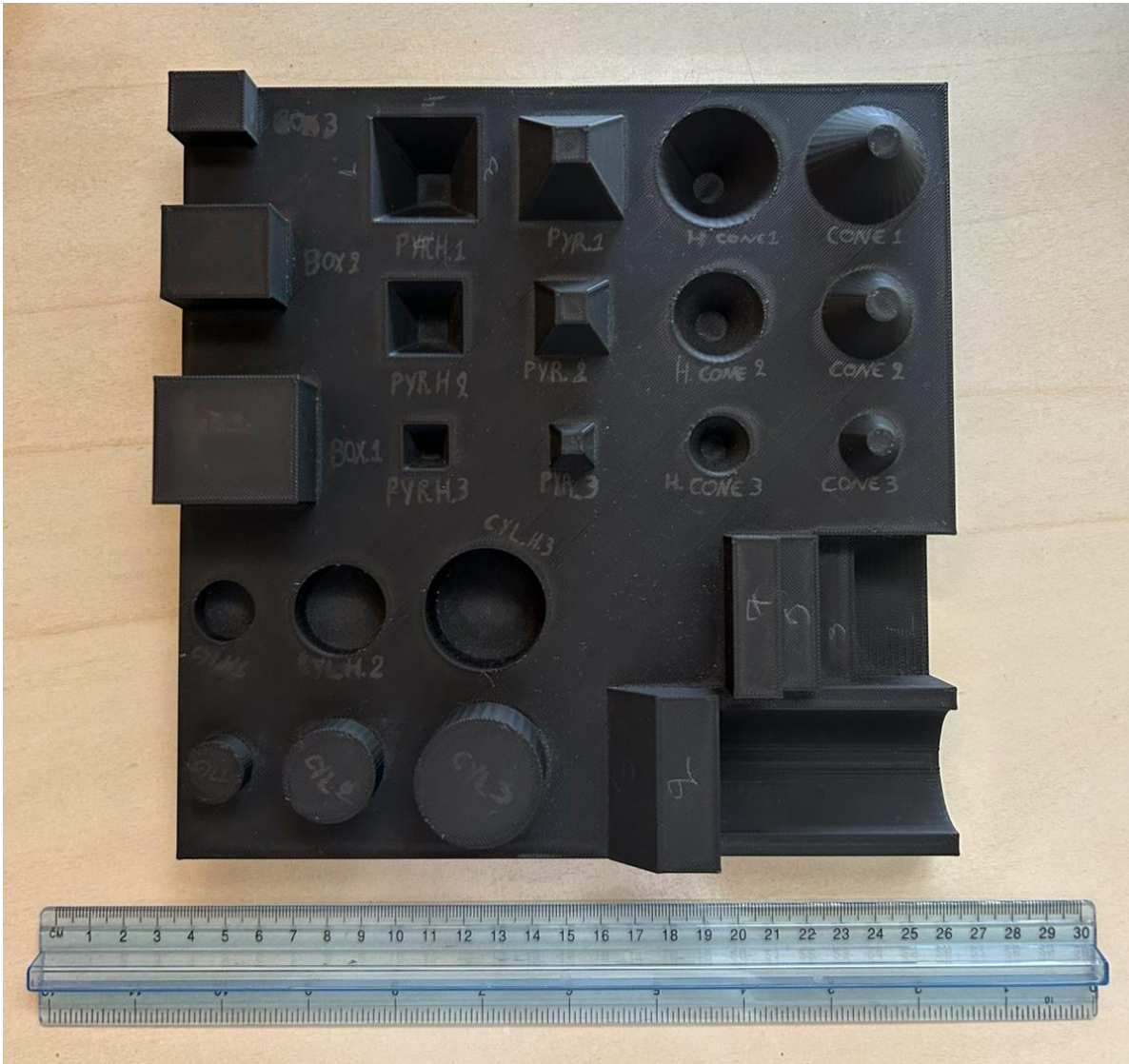
Εικόνα 37: Ελλiptές νέφος σημείων



Εικόνα 38: Νέφος σημείων στην περιοχή των ποικίλων γεωμετριών μικρών διαστάσεων

2.3.4 Κατασκευή και μέτρηση του πρωτοτύπου

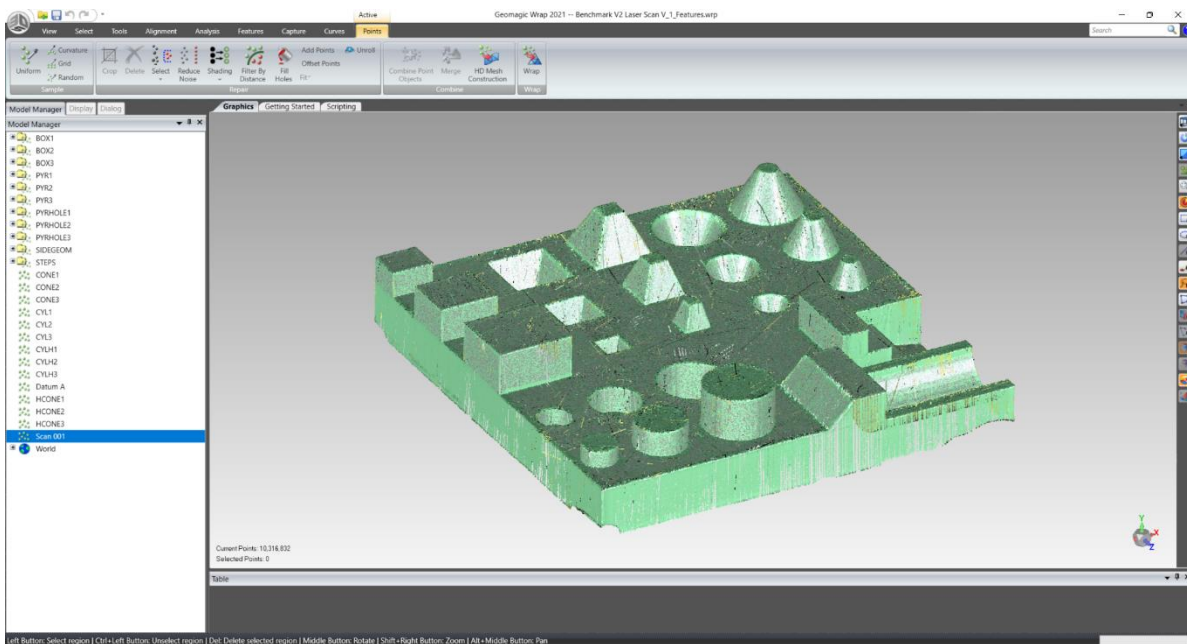
Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εύρεση μίας τυποποίησης η οποία άμεσα υπολογίζει την ακρίβεια μέτρησης ενός σαρωτή Laser συγκριτικά με μία μηχανή μέτρησης συντεταγμένων, ξεκίνησε με την κατασκευή της τελικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας. Το τελικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι μεγαλύτερων διαστάσεων με αποτέλεσμα στην επιφάνειά του να μπορεί να περιέχει περισσότερες γεωμετρίες μεγαλύτερων διαστάσεων, βέλτιστα κατανεμημένων ώστε να μπορούν να μετρηθούν και με τις δύο μετρητικές συσκευές σε ικανοποιητικό βαθμό (Εικόνα 39). Ακόμη, με την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού επιτεύχθηκε και εξοικονόμηση υλικού PLA, ενώ προφανώς η τελική γεωμετρία και πάλι εκτυπώθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο τρισδιάστατης προσθετικής κατασκευής στον 3D εκτυπωτή του εργαστηρίου της εταιρίας Bambu Lab.



Εικόνα 41: Βελτιστοποιημένη γεωμετρική διάταξη κατασκευασμένη με τη μέθοδο τρισδιάστατης προσθετικής κατασκευής

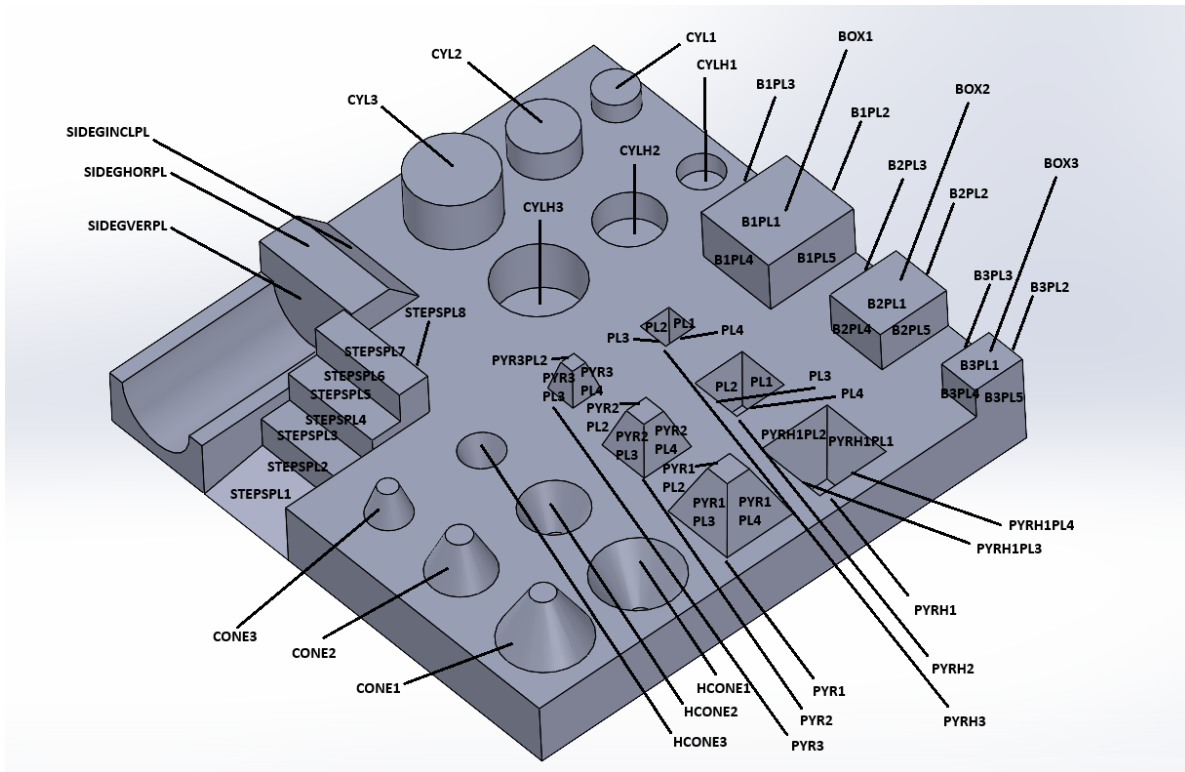
Με την περάτωση του σχεδιασμού στο περιβάλλον του SOLIDWORKS και της κατασκευής της τελικής γεωμετρικής διάταξης, ακολούθησε η μέτρηση και η αξιολόγηση του μοντέλου. Αρχικά, μετρήθηκε χρησιμοποιώντας τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM) του εργαστηρίου και μέσω του λογισμικού PC – DMIS πραγματοποιήθηκε πλήρης γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών, η οποία πρακτικά έδωσε τις μετρήσεις αναφοράς με τις οποίες στη συνέχεια γίνεται η σύγκριση με το σαρωτή laser. Οι μετρήσεις αναφοράς παρουσιάζονται αναλυτικά στις Εικόνες 42, 43, 44, 45, 46 του παραρτήματος Α.

Στη συνέχεια, το εξάρτημα μετρήθηκε χρησιμοποιώντας το σαρωτή laser και μέσω του GEOMAGIC WRAP σχηματίστηκε ένα ολοκληρωμένο νέφος σημείων που αναλυτικά παρουσίαζε κάθε σημείο της γεωμετρίας. Ακολούθησε η επεξεργασία του νέφους, ώστε να γίνει η αποθορυβοποίηση και να ληφθούν υπόψη μόνο τα έγκυρα δεδομένα (inliers) σχηματίζοντας το τελικό νέφος σημείων που αποτελείται από τις αντικειμενικές μετρήσεις (Εικόνα 47). Έπειτα, πραγματοποιήθηκε και στην περίπτωση αυτή γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών (GD&T) στο λογισμικό GEOMAGIC CONTROL X. Συγκεκριμένα, τμηματικά τα νέφη σημείων εισήχθησαν στο λογισμικό, πραγματοποιήθηκε η αναγνώριση γεωμετριών με χρήση βέλτιστης προσαρμογής (Best Fit) και συγκεκριμένα με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και τελικά ολοκληρώθηκε η γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών, όπου εξήχθησαν τα αποτελέσματα μέτρησης του σαρωτή laser. Τα αποτελέσματα στην περίπτωση του σαρωτή laser φαίνονται στις Εικόνες 48, 49, 50 του παραρτήματος Β.



Εικόνα 42: Τελικό νέφος σημείων πρότυπης γεωμετρίας

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών που έδωσαν οι δύο μετρητικές μηχανές, συντάσσονται οι παρακάτω πίνακες οι οποίοι παρουσιάζουν ενδεικτικά ορισμένες μετρήσεις της κάθε μηχανής σχετικά με την καθετότητα και την κυλινδρικότητα. Τα συνολικά αποτελέσματα της γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα Γ. Ακόμη, στην Εικόνα 51 παρουσιάζεται η ονοματολογία κάθε γεωμετρίας, βάση της οποίας κατασκευάστηκαν και οι παρακάτω πίνακες.



Εικόνα 43: Ονοματολογία των γεωμετριών του πρότυπου μοντέλου

Πίνακας 1: Καθετότητα των Plane 2, 3, 4, 5 συγκριτικά με το Plane 1 του Box 1

<u>Perpendicularity</u> <u>(B1PL1)</u>	CMM	LS
B1PL2	0.265	0.079
B1PL3	0.058	0.096
B1PL4	0.063	0.107
B1PL5	0.034	0.055

Πίνακας 2: Κυλινδρικότητα όλων των κυλίνδρων και οπών της γεωμετρίας αναφοράς

<u>Cylindricity</u>	CMM	LS
CYL1	0.121	0.087
CYL2	0.115	0.052

CYL3	0.112	0.100
CYLH1	0.078	0.073
CYLH2	0.056	0.079
CYLH3	0.076	0.086
HALFCYL	0.052	0.064

3. Συμπεράσματα

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αξιοπιστία των μετρήσεων του σαρωτή laser, πραγματοποιήθηκε έλεγχος συσχέτισης του Pearson (Pearson’s correlation test) στο περιβάλλον του Microsoft Excel.

Κατά την πραγματοποίηση ενός ελέγχου συσχέτισης πρακτικά συγκρίνεται ο βαθμός συσχέτισης δύο μεγεθών. Στην προκειμένη περίπτωση η μελετώμενη συσχέτιση έγινε μεταξύ των αποτελεσμάτων της γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών της μηχανής μέτρησης συντεταγμένων (CMM) και του σαρωτή laser. Αναλύεται δηλαδή, η συσχέτιση της επιτεδότητας, της κυλινδρικότητας, της παραλληλίας και όλων των απαραίτητων μεγεθών που προκύπτουν από την κάθε μετρητική μηχανή ξεχωριστά.

Δείκτης συσχέτισης αποτελεί η μεταβλητή r , που ονομάζεται Pearson’s correlation coefficient η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

Όπου x_i, y_i είναι οι τιμές των μετρήσεων από τις δύο μετρητικές μηχανές αντίστοιχα, και \bar{x}, \bar{y} οι μέσες τιμές τους.

Οι τιμές του συντελεστή r κυμαίνονται από -1 έως και 1. Για μηδενική τιμή του, υπάρχει μηδενική συσχέτιση δεδομένων, για τιμή που αγγίζει τη μονάδα έχουμε ισχυρή συσχέτιση και για τις ενδιάμεσες τιμές η συσχέτιση αυξάνει γραμμικά. Η ένταση της συσχέτισης παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Ένταση της συσχέτισης συναρτήσει της τιμής του συντελεστή r

Τιμή του r	Ένταση της Συσχέτισης
-1.0 – -0.8	Ισχυρή αρνητική συσχέτιση
-0.8 – 0.5	Μέτρια αρνητική συσχέτιση
-0.5 – 0.3	Ασθενής αρνητική συσχέτιση
-0.3 – +0.3	Μικρή ή μηδενική συσχέτιση
+0.3 – +0.5	Ασθενής θετική συσχέτιση
+0.5 – +0.8	Μέτρια θετική συσχέτιση

+0.8 – +1.0	Ισχυρή θετική συσχέτιση
-------------	-------------------------

Για αρνητικές τιμές του συντελεστή συσχέτισης r (negative correlation), οι δύο μεταβλητές κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις μεταξύ τους, δηλαδή η μία αυξάνεται ενώ η άλλη μειώνεται. Αντίθετα, όταν ο συντελεστής συσχέτισης είναι θετικός και οι δύο μεταβλητές αυξάνονται ή μειώνονται αντίστοιχα.

Στον παρακάτω Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου συσχέτισης (correlation test), καθώς ακολουθεί και ο σχολιασμός των συμπερασμάτων.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα ελέγχου συσχέτισης αποτελεσμάτων μετρήσεων σαρωτή laser – CMM

FLATBOXCORR	0.225	Μικρή συσχέτιση
FLATPYRCORR	-0.206	Μικρή συσχέτιση
FLATPYRHCORR	-0.398	Ασθενής αρνητική συσχέτιση
FLATSTEPSCORR	0.142	Μικρή συσχέτιση
CYLCORR	-0.089	Μηδενική συσχέτιση
CYLHCORR	-0.027	Μηδενική συσχέτιση
PARRCORR	-0.412	Ασθενής αρνητική συσχέτιση
PERPCORRDATB	-0.036	Μηδενική συσχέτιση
PERPCORRDATC	0.966	Ισχυρή θετική συσχέτιση
PERPCORRDATD	0.710	Μέτρια θετική συσχέτιση
PERPCORRDATA	0.389	Ασθενής θετική συσχέτιση

Παρατηρώντας τον Πίνακα 4, αλλά και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων διαπιστώνεται η απόκλιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων του σαρωτή laser συγκριτικά με τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων. Συγκεκριμένα, όσον αφορά την επιπεδότητα των επιπέδων των κύβων, των διαδοχικών κάθετων επιπέδων (σκαλοπατιών), των εξωτερικών πυραμίδων, της κυλινδρικότητας των εσωτερικών και εξωτερικών κυλίνδρων και της καθετότητας των επιπέδων B1PL2, B1PL3, B1PL4, B1PL5 σε σχέση με το B1PL1, υπάρχει μικρή έως και μηδενική συσχέτιση, δηλαδή δεν υπάρχει κάποια γραμμική

σχέση των μετρήσεων μεταξύ των δύο τεχνολογιών μέτρησης (σαρωτή Laser και CMM). Όσον αφορά την καθετότητα των επιπέδων B2PL2, B2PL3, B2PL4, B2PL5 σε σχέση με το B2PL1, την καθετότητα των επιπέδων B3PL2, B3PL3, B3PL4, B3PL5 σε σχέση με το B3PL1 και την καθετότητα όλων των επιπέδων σε σχέση με το datum A, που είναι το επίπεδο που στερεώνονται όλες οι γεωμετρικές η συσχέτιση είναι θετική. Συνεπώς, υπάρχει αύξουσα γραμμική σχέση που συνδέει τις μετρήσεις των δύο τεχνολογιών μέτρησης. Τέλος, σχετικά με την παραλληλία όλων των επιπέδων σε σχέση με το datum A και την επιπεδότητα των εσωτερικών πυραμίδων η συσχέτιση είναι αρνητική. Δηλαδή, οι μετρήσεις των δύο τεχνολογιών παρουσιάζουν μια αντίρροπη γραμμική συσχέτιση με τα αποτελέσματά τους να αποκλίνουν.

Για τον προσδιορισμό, τώρα της ακρίβειας του σαρωτή λέιζερ συγκριτικά με τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων, μία κατάλληλη και ευρέως αποδεκτή μέθοδος για τη σύγκριση των δύο τεχνικών μέτρησης είναι η ανάλυση Bland – Altman. Η μέθοδος αυτή παρέχει μία αριθμητική αξιολόγηση της συμφωνίας μεταξύ των δεδομένων της μηχανής μέτρησης συντεταγμένων και του σαρωτή laser.

Κατά τη μέθοδο αυτή, γνωρίζοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων της γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών από τις δύο τεχνολογίες μέτρησης, δηλαδή τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων και το σαρωτή laser, υπολογίζονται οι διαφορές των μετρήσεων και οι μέσοι όροι τους. Για κάθε ζεύγος τιμών, υπολογίζεται η διαφορά αφαιρώντας τη μέτρηση της μηχανής μέτρησης συντεταγμένων από εκείνη του σαρωτή.

$$\text{Διαφορά} = \text{Τιμή σαρωτή laser} - \text{Τιμή CMM} \quad (7)$$

Έπειτα, υπολογίζεται ο μέσος όρος των δύο τιμών ως εξής:

$$\text{Μέσος Όρος} = \frac{\text{Τιμή σαρωτή laser} + \text{Τιμή CMM}}{2} \quad (8)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο μέσος όρος όλων των διαφορών, δηλαδή η μέση απόκλιση (Bias). Η τιμή αυτή πρακτικά φανερώνει εάν υπάρχει σταθερή απόκλιση του σαρωτή laser από τις μετρήσεις της μηχανής μέτρησης συντεταγμένων. Μικρή ή και μηδενική τιμή υποδηλώνει καλή συμφωνία, ενώ μεγάλες τιμές φανερώνουν μεγάλη απόκλιση. Για τον υπολογισμό της μέσης διαφοράς χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση.

$$\text{Μέση Διαφορά} = \bar{d} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i \quad (9)$$

Όπου στην παραπάνω σχέση d_i είναι η μεμονωμένη διαφορά και n είναι ο αριθμός των μετρήσεων.

Τέλος, η μέθοδος ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των ορίων συμφωνίας (Limits of agreement). Πρακτικά, υπολογίζεται το άνω και το κάτω όριο συμφωνίας (Upper and Lower limit of agreement) τα οποία αντιπροσωπεύουν το εύρος στο οποίο αναμένεται να βρίσκονται το 95% των διαφορών μεταξύ των δύο μεθόδων μέτρησης. Για τον υπολογισμό των ορίων αυτών είναι απαραίτητος και ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης των διαφορών (Standard Deviation), οπότε με βάση αυτή τα όρια υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$\text{Άνω LoA} = \bar{d} + 1.96 \cdot SD \quad (10)$$

$$\text{Κάτω LoA} = \bar{d} - 1.96 \cdot SD \quad (11)$$

Παρατηρώντας, τη μέση διαφορά (Bias), αλλά και το άνω και κάτω όριο συμφωνίας για κάθε στοιχείο της γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών που παρουσιάζονται ενδεικτικά στους παρακάτω πίνακες και αναλυτικά στο παράρτημα Δ, προκύπτει η ακρίβεια μέτρησης του σαρωτή laser συγκριτικά με τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την επιπεδότητα

Flatness

Bias	0.0199
Upper LoA	0.0828
Lower LoA	-0.0430

Πίνακας 6: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την κυλινδρικότητα

Cylindricity

Bias	-0.0098
Upper LoA	0.0488
Lower LoA	-0.0684

Συνοψίζοντας, οι σαρωτές laser προσφέρουν μια ιδιαίτερα χρήσιμη λύση για τη γρήγορη και αποδοτική γεωμετρική ανάλυση διαστάσεων και ανοχών, παρέχοντας έναν αποδεκτό βαθμό ακρίβειας. Ωστόσο, οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων εξακολουθούν να θεωρούνται οι πιο αξιόπιστες συσκευές μέτρησης, καθώς η ακρίβεια και η συνέπεια των αποτελεσμάτων τους είναι γενικά αδιαμφισβήτητες.

4. Παράρτημα Α

Pc		PART NAME : AT V.2.1				September 11, 2024 13:34		
		REV NUMBER :		SER NUMBER :		STATS COUNT : 1		
FCFCYL1		MM	0.01		DEFAULT		ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
CYL3	0.000	0.010		0.074	0.074	0.064		
FCFCYL2		MM	0.01		DEFAULT		ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
CYL2	0.000	0.010		0.078	0.078	0.068		
FCFCYL3		MM	0.01		DEFAULT		ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
CYL1	0.000	0.010		0.054	0.054	0.044		
FCFCYL4		MM	0.01		DEFAULT		ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
CYLH1	0.000	0.010		0.078	0.078	0.068		
FCFCYL5		MM	0.01		DEFAULT		ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
CYLH2	0.000	0.010		0.072	0.072	0.062		
FCFCYL6		MM	0.01		DEFAULT		ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
CYLH3	0.000	0.010		0.078	0.078	0.068		
FCFCYL7		MM	0.01		DEFAULT		ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
HALFCYL	0.000	0.010		0.059	0.059	0.049		
FCFLAT1		MM	0.01		DEFAULT		ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
B1PLN1	0.000	0.010		0.007	0.007	0.000		
B1PLN2	0.000	0.010		0.022	0.022	0.012		
B1PLN3	0.000	0.010		0.009	0.009	0.000		
B1PLN4	0.000	0.010		0.010	0.010	0.000		
B1PLN5	0.000	0.010		0.024	0.024	0.014		
B2PLN1	0.000	0.010		0.008	0.008	0.000		
B2PLN2	0.000	0.010		0.017	0.017	0.007		
B2PLN3	0.000	0.010		0.010	0.010	0.000		
B2PLN4	0.000	0.010		0.010	0.010	0.000		
B2PLN5	0.000	0.010		0.007	0.007	0.000		
B3PLN1	0.000	0.010		0.017	0.017	0.007		
B3PLN2	0.000	0.010		0.027	0.027	0.017		
B3PLN3	0.000	0.010		0.003	0.003	0.000		
B3PLN4	0.000	0.010		0.010	0.010	0.000		
B3PLN5	0.000	0.010		0.020	0.020	0.010		
FCPPER1		MM	0.01 A		DEFAULT		ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS	
CYL3	0.000	0.010	0.000	0.035	0.035	0.025	0.000	

Εικόνα 44: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM)

FCFPERP2		MM	⊥ ⊙0.01 A		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
CYL2	0.000	0.010	0.000	0.040	0.040	0.030	0.000
FCFPERP3		MM	⊥ ⊙0.01 A		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
CYL1	0.000	0.010	0.000	0.017	0.017	0.007	0.000
FCFPERP4		MM	⊥ ⊙0.01 A		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
CYLH1	0.000	0.010	0.000	0.048	0.048	0.038	0.000
FCFPERP5		MM	⊥ ⊙0.01 A		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
CYLH2	0.000	0.010	0.000	0.068	0.068	0.058	0.000
FCFPERP6		MM	⊥ ⊙0.01 A		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
CYLH3	0.000	0.010	0.000	0.060	0.060	0.050	0.000
FCFPERP7		MM	⊥ 0.01 A		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
B1PLN2	0.000	0.010	0.000	0.038	0.038	0.028	0.000
B1PLN3	0.000	0.010	0.000	0.020	0.020	0.010	0.000
B1PLN4	0.000	0.010	0.000	0.042	0.042	0.032	0.000
B1PLN5	0.000	0.010	0.000	0.035	0.035	0.025	0.000
B2PLN2	0.000	0.010	0.000	0.035	0.035	0.025	0.000
B2PLN3	0.000	0.010	0.000	0.032	0.032	0.022	0.000
B2PLN4	0.000	0.010	0.000	0.044	0.044	0.034	0.000
B2PLN5	0.000	0.010	0.000	0.014	0.014	0.004	0.000
B3PLN2	0.000	0.010	0.000	0.028	0.028	0.018	0.000
B3PLN3	0.000	0.010	0.000	0.036	0.036	0.026	0.000
B3PLN4	0.000	0.010	0.000	0.035	0.035	0.025	0.000
B3PLN5	0.000	0.010	0.000	0.026	0.026	0.016	0.000
FCFPERP8		MM	⊥ 0.01 B		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
B1PLN2	0.000	0.010	0.000	0.028	0.028	0.018	0.000
B1PLN3	0.000	0.010	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000
B1PLN4	0.000	0.010	0.000	0.027	0.027	0.017	0.000
B1PLN5	0.000	0.010	0.000	0.050	0.050	0.040	0.000
FCFPERP9		MM	⊥ 0.01 D		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
B2PLN2	0.000	0.010	0.000	0.038	0.038	0.028	0.000
B2PLN3	0.000	0.010	0.000	0.025	0.025	0.015	0.000
B2PLN4	0.000	0.010	0.000	0.046	0.046	0.036	0.000
B2PLN5	0.000	0.010	0.000	0.008	0.008	0.000	0.000

Εικόνα 45: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM)

FCPPERP10		MM	0.01 F		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
B3PLN2	0.000	0.010	0.000	0.030	0.030	0.020	0.000
B3PLN3	0.000	0.010	0.000	0.021	0.021	0.011	0.000
B3PLN4	0.000	0.010	0.000	0.040	0.040	0.030	0.000
B3PLN5	0.000	0.010	0.000	0.029	0.029	0.019	0.000
FCFPARL1		MM	0.01 A		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
B1PLN1	0.000	0.010	0.000	0.042	0.042	0.032	0.000
B2PLN1	0.000	0.010	0.000	0.014	0.014	0.004	0.000
B3PLN1	0.000	0.010	0.000	0.039	0.039	0.029	0.000
FCFPARL2		MM	0.01 C		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
B1PLN4	0.000	0.010	0.000	0.067	0.067	0.057	0.000
FCFPARL3		MM	0.01 E		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
B2PLN4	0.000	0.010	0.000	0.030	0.030	0.020	0.000
FCFPARL4		MM	0.01 G		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
B3PLN4	0.000	0.010	0.000	0.035	0.035	0.025	0.000
FCFPARL5		MM	0.01 H		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
B1PLN5	0.000	0.010	0.000	0.057	0.057	0.047	0.000
FCFPARL6		MM	0.01 I		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
B2PLN5	0.000	0.010	0.000	0.042	0.042	0.032	0.000
FCFPARL7		MM	0.01 J		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
B3PLN5	0.000	0.010	0.000	0.053	0.053	0.043	0.000
FCFFLAT2		MM	0.01		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
PH1PLN1	0.000	0.010		0.020	0.020	0.010	
PH1PLN2	0.000	0.010		0.044	0.044	0.034	
PH1PLN3	0.000	0.010		0.006	0.006	0.000	
PH1PLN4	0.000	0.010		0.007	0.007	0.000	
PH2PLN1	0.000	0.010		0.016	0.016	0.006	
PH2PLN2	0.000	0.010		0.010	0.010	0.000	
PH2PLN3	0.000	0.010		0.012	0.012	0.002	
PH2PLN4	0.000	0.010		0.007	0.007	0.000	
PH3PLN1	0.000	0.010		0.012	0.012	0.002	
PH3PLN2	0.000	0.010		0.006	0.006	0.000	
PH3PLN3	0.000	0.010		0.016	0.016	0.006	
PH3PLN4	0.000	0.010		0.010	0.010	0.000	
P3PLN1	0.000	0.010		0.016	0.016	0.006	
P3PLN2	0.000	0.010		0.015	0.015	0.005	

Εικόνα 46: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM)

P3PLN3	0.000	0.010		0.008	0.008	0.000	
P3PLN4	0.000	0.010		0.049	0.049	0.039	
P2PLN1	0.000	0.010		0.165	0.165	0.155	
P2PLN2	0.000	0.010		0.016	0.016	0.006	
P2PLN3	0.000	0.010		0.006	0.006	0.000	
P2PLN4	0.000	0.010		0.029	0.029	0.019	
P1PLN1	0.000	0.010		0.017	0.017	0.007	
P1PLN2	0.000	0.010		0.020	0.020	0.010	
P1PLN3	0.000	0.010		0.010	0.010	0.000	
P1PLN4	0.000	0.010		0.019	0.019	0.009	
FCFLAT3		MM		0.01	DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
STEPSLN1	0.000	0.010		0.034	0.034	0.024	
STEPSLN2	0.000	0.010		0.026	0.026	0.016	
STEPSLN3	0.000	0.010		0.010	0.010	0.000	
STEPSLN4	0.000	0.010		0.027	0.027	0.017	
STEPSLN5	0.000	0.010		0.048	0.048	0.038	
STEPSLN6	0.000	0.010		0.011	0.011	0.001	
STEPSLN7	0.000	0.010		0.023	0.023	0.013	
STEPSLN8	0.000	0.010		0.014	0.014	0.004	
FCFLAT4		MM		0.01	DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
SIDEPLN1	0.000	0.010		0.048	0.048	0.038	
SIDEPLN2	0.000	0.010		0.016	0.016	0.006	
SIDEPLN3	0.000	0.010		0.031	0.031	0.021	
FCFANGLRTY1		MM		0.01 K	DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
PH1PLN2	0.000	0.010	0.000	2.998	2.998	2.988	0.000
PH1PLN3	0.000	0.010	0.000	6.404	6.404	6.394	0.000
PH1PLN4	0.000	0.010	0.000	2.969	2.969	2.959	0.000
FCFANGLRTY2		MM		0.01 L	DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
PH2PLN2	0.000	0.010	0.000	0.012	0.012	0.002	0.000
PH2PLN3	0.000	0.010	0.000	0.017	0.017	0.007	0.000
PH2PLN4	0.000	0.010	0.000	0.008	0.008	0.000	0.000
FCFANGLRTY3		MM		0.01 M	DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
PH3PLN2	0.000	0.010	0.000	0.006	0.006	0.000	0.000
PH3PLN3	0.000	0.010	0.000	0.016	0.016	0.006	0.000
PH3PLN4	0.000	0.010	0.000	0.011	0.011	0.001	0.000
FCFANGLRTY4		MM		0.01 N	DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
P3PLN2	0.000	0.010	0.000	0.018	0.018	0.008	0.000
P3PLN3	0.000	0.010	0.000	0.011	0.011	0.001	0.000
P3PLN4	0.000	0.010	0.000	0.050	0.050	0.040	0.000

Εικόνα 47: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM)

FCFANGLRTY5		MM	∠ 0.01 Q		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
P2PLN2	0.000	0.010	0.000	0.055	0.055	0.045	0.000
P2PLN3	0.000	0.010	0.000	0.030	0.030	0.020	0.000
P2PLN4	0.000	0.010	0.000	0.091	0.091	0.081	0.000
FCFANGLRTY6		MM	∠ 0.01 P		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
P1PLN2	0.000	0.010	0.000	0.021	0.021	0.011	0.000
P1PLN3	0.000	0.010	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000
P1PLN4	0.000	0.010	0.000	0.019	0.019	0.009	0.000
FCFPROF1		MM	⌒ 0.01		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	MEAS	MAX	MIN	OUTTOL	
HCON1	0.000	0.010	0.053	0.026	-0.026	0.043	
FCFPROF2		MM	⌒ 0.01		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	MEAS	MAX	MIN	OUTTOL	
HCON2	0.000	0.010	0.040	0.020	-0.020	0.030	
FCFPROF3		MM	⌒ 0.01		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	MEAS	MAX	MIN	OUTTOL	
HCON3	0.000	0.010	0.049	0.025	-0.025	0.039	
FCFPROF4		MM	⌒ 0.01		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	MEAS	MAX	MIN	OUTTOL	
CON1	0.000	0.010	0.051	0.025	-0.025	0.041	
FCFPROF5		MM	⌒ 0.01		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	MEAS	MAX	MIN	OUTTOL	
CON2	0.000	0.010	0.059	0.029	-0.029	0.049	
FCFPROF6		MM	⌒ 0.01		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	MEAS	MAX	MIN	OUTTOL	
CON3	0.000	0.010	0.102	0.051	-0.051	0.092	
FCFPERP11		MM	⊥ 0.01 Q		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
STEPSPLN2	0.000	0.010	0.000	0.034	0.034	0.024	0.000
FCFPERP12		MM	⊥ 0.01 R		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
STEPSPLN4	0.000	0.010	0.000	0.155	0.155	0.145	0.000
FCFPERP13		MM	⊥ 0.01 S		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
STEPSPLN6	0.000	0.010	0.000	0.021	0.021	0.011	0.000
FCFPARL8		MM	∥ 0.01 S		DEFAULT	ISO 1101	
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS
STEPSPLN3	0.000	0.010	0.000	0.043	0.043	0.033	0.000
STEPSPLN5	0.000	0.010	0.000	0.117	0.117	0.107	0.000

Εικόνα 48: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM)

5. Παράρτημα Β

Name	Result Name	Tol.	Meas. Value	Bonus Tol.
CylindricityCYL1	Result Data - 1	0.2	0.0866	0
CylindricityCYL2	Result Data - 1	0.2	0.0524	0
CylindricityCYL3	Result Data - 1	0.2	0.1002	0
CylindricityCYLH1	Result Data - 1	0.2	0.0733	0
CylindricityCYLH2	Result Data - 1	0.2	0.079	0
CylindricityCYLH3	Result Data - 1	0.2	0.0859	0
CylindricityHALFCYL	Result Data - 1	0.2	0.064	0
FlatnessB1_PL1	Result Data - 1	0	0.0634	0
FlatnessB1_PL2	Result Data - 1	0	0.0476	0
FlatnessB1_PL3	Result Data - 1	0	0.0305	0
FlatnessB1_PL4	Result Data - 1	0	0.0341	0
FlatnessB1_PL5	Result Data - 1	0	0.036	0
FlatnessB2_PL1	Result Data - 1	0	0.0511	0
FlatnessB2_PL2	Result Data - 1	0	0.0584	0
FlatnessB2_PL3	Result Data - 1	0	0.0265	0
FlatnessB2_PL4	Result Data - 1	0	0.0328	0
FlatnessB2_PL5	Result Data - 1	0	0.0402	0
FlatnessB3_PL1	Result Data - 1	0	0.0791	0
FlatnessB3_PL2	Result Data - 1	0	0.0806	0
FlatnessB3_PL3	Result Data - 1	0	0.03	0
FlatnessB3_PL4	Result Data - 1	0	0.0468	0
FlatnessB3_PL5	Result Data - 1	0	0.0426	0
FlatnessHOR_PL	Result Data - 1	0	0.0602	0
FlatnessINCL_PL	Result Data - 1	0	0.0476	0
FlatnessP1_PL1	Result Data - 1	0	0.0492	0
FlatnessP1_PL2	Result Data - 1	0	0.0385	0
FlatnessP1_PL3	Result Data - 1	0	0.0326	0
FlatnessP1_PL4	Result Data - 1	0	0.0495	0
FlatnessP2_PL1	Result Data - 1	0	0.0404	0
FlatnessP2_PL2	Result Data - 1	0	0.0447	0
FlatnessP2_PL3	Result Data - 1	0	0.038	0
FlatnessP2_PL4	Result Data - 1	0	0.0788	0
FlatnessP3_PL1	Result Data - 1	0	0.0988	0

Εικόνα 49: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τον σαρωτή laser

Name	Result Name	Tol.	Meas. Value	Bonus Tol.
FlatnessP3_PL2	Result Data - 1	0	0.0536	0
FlatnessP3_PL3	Result Data - 1	0	0.1081	0
FlatnessP3_PL4	Result Data - 1	0	0.0666	0
FlatnessPH1_PL1	Result Data - 1	0	0.031	0
FlatnessPH1_PL2	Result Data - 1	0	0.0825	0
FlatnessPH1_PL3	Result Data - 1	0	0.0378	0
FlatnessPH1_PL4	Result Data - 1	0	0.0443	0
FlatnessPH2_PL1	Result Data - 1	0	0.0505	0
FlatnessPH2_PL2	Result Data - 1	0	0.082	0
FlatnessPH2_PL3	Result Data - 1	0	0.0434	0
FlatnessPH2_PL4	Result Data - 1	0	0.0432	0
FlatnessPH3_PL1	Result Data - 1	0	0.0427	0
FlatnessPH3_PL2	Result Data - 1	0	0.0838	0
FlatnessPH3_PL3	Result Data - 1	0	0.0407	0
FlatnessPH3_PL4	Result Data - 1	0	0.0459	0
FlatnessSTEPS_PL1	Result Data - 1	0	0.0903	0
FlatnessSTEPS_PL2	Result Data - 1	0	0.0579	0
FlatnessSTEPS_PL3	Result Data - 1	0	0.098	0
FlatnessSTEPS_PL4	Result Data - 1	0	0.0378	0
FlatnessSTEPS_PL5	Result Data - 1	0	0.0601	0
FlatnessSTEPS_PL6	Result Data - 1	0	0.0421	0
FlatnessSTEPS_PL7	Result Data - 1	0	0.0881	0
FlatnessSTEPS_PL8	Result Data - 1	0	0.0507	0
FlatnessVER_PL	Result Data - 1	0	0.0524	0
ParallelismB1_PL1	Result Data - 1	0.2	0.1714	0
ParallelismB2_PL1	Result Data - 1	0.2	0.0642	0
ParallelismB3_PL1	Result Data - 1	0.2	0.1457	0
ParallelismSTEPS_PL3	Result Data - 1	0.2	0.3054	0
ParallelismSTEPS_PL5	Result Data - 1	0.2	0.1527	0
ParallelismSTEPS_PL7	Result Data - 1	0.2	0.1182	0
PerpendicularityB1_PL2_DA	Result Data - 1	0	0.0517	0
PerpendicularityB1_PL2_DB	Result Data - 1	0	0.0791	0
PerpendicularityB1_PL3_DA	Result Data - 1	0	0.0642	0

Εικόνα 50: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τον σαρωτή laser

Name	Result Name	Tol.	Meas. Value	Bonus Tol.
PerpendicularityB1_PL3_DB	Result Data - 1	0	0.0958	0
PerpendicularityB1_PL4_DA	Result Data - 1	0	0.1364	0
PerpendicularityB1_PL4_DB	Result Data - 1	0	0.1073	0
PerpendicularityB1_PL5_DA	Result Data - 1	0	0.0484	0
PerpendicularityB1_PL5_DB	Result Data - 1	0	0.0551	0
PerpendicularityB2_PL2_DA	Result Data - 1	0	0.1846	0
PerpendicularityB2_PL2_DC	Result Data - 1	0	0.1885	0
PerpendicularityB2_PL3_DA	Result Data - 1	0	0.0613	0
PerpendicularityB2_PL3_DC	Result Data - 1	0	0.0666	0
PerpendicularityB2_PL4_DA	Result Data - 1	0	0.0929	0
PerpendicularityB2_PL4_DC	Result Data - 1	0	0.0968	0
PerpendicularityB2_PL5_DA	Result Data - 1	0	0.0698	0
PerpendicularityB2_PL5_DC	Result Data - 1	0	0.0645	0
PerpendicularityB3_PL2_DA	Result Data - 1	0	0.1149	0
PerpendicularityB3_PL2_DD	Result Data - 1	0	0.0963	0
PerpendicularityB3_PL3_DA	Result Data - 1	0	0.0886	0
PerpendicularityB3_PL3_DD	Result Data - 1	0	0.0589	0
PerpendicularityB3_PL4_DA	Result Data - 1	0	0.0535	0
PerpendicularityB3_PL4_DD	Result Data - 1	0	0.057	0
PerpendicularityB3_PL5_DA	Result Data - 1	0	0.0753	0
PerpendicularityB3_PL5_DD	Result Data - 1	0	0.106	0
PerpendicularitySTEPS_PL2	Result Data - 1	0	0.1016	0
PerpendicularitySTEPS_PL4	Result Data - 1	0	0.0807	0
PerpendicularitySTEPS_PL6	Result Data - 1	0	0.0506	0
PerpendicularitySTEPS_PL8	Result Data - 1	0	0.0829	0

Εικόνα 51: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τον σαρωτή laser

6. Παράρτημα Γ

Πίνακας 7: Καθετότητα των Plane 2, 3, 4, 5 συγκριτικά με το Plane 1 του Box 1

<u>Perpendicularity</u> <u>(B1PL1)</u>	CMM	LS
B1PL2	0.265	0.0791
B1PL3	0.058	0.0958
B1PL4	0.063	0.1073
B1PL5	0.034	0.0551

Πίνακας 8: Καθετότητα των Plane 2, 3, 4, 5 συγκριτικά με το Plane 1 του Box 2

<u>Perpendicularity</u> <u>(B2PL1)</u>	CMM	LS
B2PL2	0.271	0.1885
B2PL3	0.042	0.0666
B2PL4	0.064	0.0968
B2PL5	0.073	0.0645

Πίνακας 9: Καθετότητα των Plane 2, 3, 4, 5 συγκριτικά με το Plane 1 του Box 3

<u>Perpendicularity</u> <u>(B3PL1)</u>	CMM	LS
B3PL2	0.269	0.0963
B3PL3	0.045	0.0589
B3PL4	0.055	0.057
B3PL5	0.122	0.106

Πίνακας 10: Καθετότητα των Plane 2, 3, 4, 5 των Box 1, 2, 3 συγκριτικά με το Datum A

<u>Perpendicularity</u> <u>(Datum A)</u>	CMM	LS
B1PL2	0.259	0.0517
B1PL3	0.066	0.0642
B1PL4	0.057	0.1364
B1PL5	0.041	0.0484
B2PL2	0.223	0.1846
B2PL3	0.032	0.0613
B2PL4	0.021	0.0929
B2PL5	0.063	0.0698
B3PL2	0.207	0.1149
B3PL3	0.034	0.0886
B3PL4	0.025	0.0535
B3PL5	0.1	0.0753
STEPPL2	0.042	0.1016
STEPPL4	0.063	0.0807
STEPPL6	0.028	0.0506
STEPPL8	0.054	0.0829

Πίνακας 11: Επιπεδότητα όλων των επιπέδων της γεωμετρίας αναφοράς

<u>Flatness</u>	CMM	LS
Datum A	0.056	0.1202
B1PL1	0.018	0.0634

B1PL2	0.091	0.0476
B1PL3	0.056	0.0305
B1PL4	0.029	0.0341
B1PL5	0.033	0.036
B2PL1	0.043	0.0511
B2PL2	0.072	0.0584
B2PL3	0.032	0.0265
B2PL4	0.009	0.0328
B2PL5	0.06	0.0402
B3PL1	0.026	0.0791
B3PL2	0.082	0.0806
B3PL3	0.032	0.03
B3PL4	0.023	0.0468
B3PL5	0.083	0.0426
PYR1PL1	0.039	0.0492
PYR1PL2	0.03	0.0385
PYR1PL3	0.015	0.0326
PYR1PL4	0.083	0.0495
PYR2PL1	0.046	0.0404
PYR2PL2	0.017	0.0447
PYR2PL3	0.014	0.038
PYR2PL4	0.025	0.0788
PYR3PL1	0.015	0.0988
PYR3PL2	0.023	0.0536
PYR3PL3	0.02	0.1081

PYR3PL4	0.033	0.0666
PYRH1PL1	0.029	0.031
PYRH1PL2	0.028	0.0825
PYRH1PL3	0.052	0.0378
PYRH1PL4	0.011	0.0443
PYRH2PL1	0.026	0.0505
PYRH2PL2	0.011	0.082
PYRH2PL3	0.063	0.0434
PYRH2PL4	0.015	0.0432
PYRH3PL1	0.037	0.0427
PYRH3PL2	0.018	0.0838
PYRH3PL3	0.032	0.0407
PYRH3PL4	0.02	0.0459
STEPSPL1	0.068	0.0903
STEPSPL2	0.02	0.0579
STEPSPL3	0.025	0.098
STEPSPL4	0.034	0.0378
STEPSPL5	0.017	0.0601
STEPSPL6	0.018	0.0421
STEPSPL7	0.012	0.0881
STEPSPL8	0.047	0.0507
SIDEGVERPL	0.075	0.0524
SIDEGHORPL	0.022	0.0602
SIDEGINCLPL	0.032	0.0476

Πίνακας 12: Κυλινδρικήτητα όλων των κυλίνδρων και οπών της γεωμετρίας αναφοράς

<u>Cylindricity</u>	CMM	LS
CYL1	0.121	0.0866
CYL2	0.115	0.0524
CYL3	0.112	0.1002
CYLH1	0.078	0.0733
CYLH2	0.056	0.079
CYLH3	0.076	0.0859
HALFCYL	0.052	0.064

Πίνακας 13: Παραλληλία όλων των παράλληλων επιπέδων στο Datum A συγκριτικά με το Datum A

<u>Parallelism (Datum A)</u>	CMM	LS
B1PL1	0.03	0.1714
B2PL1	0.121	0.0642
B3PL1	0.11	0.1467
STEPSPL3	0.057	0.3054
STEPSPL5	0.043	0.1527
STEPSPL7	0.042	0.1182

7. Παράρτημα Δ

Πίνακας 14: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την επιπεδότητα

Flatness

Bias	0.0199
Upper LoA	0.0828
Lower LoA	-0.0430

Πίνακας 15: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την κυλινδρικήτητα

Cylindricity

Bias	-0.0098
Upper LoA	0.0488
Lower LoA	-0.0684

Πίνακας 16: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την παραλληλία συγκριτικά με το Datum A

Parallelism (Datum A)

Bias	0.0926
Upper LoA	0.2938
Lower LoA	-0.4832

Πίνακας 17: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την καθετότητα των επιπέδων του κύβου 1

Perpendicularity (B1Pl1)

Bias	-0.0207
Upper LoA	0.1961

Lower LoA	-0.4049
-----------	---------

Πίνακας 18: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την καθετότητα των επιπέδων του κύβου 2

Perpendicularity (B2PL1)

Bias	-0.0084
Upper LoA	0.0946
Lower LoA	-0.1937

Πίνακας 19: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την καθετότητα των επιπέδων του κύβου 3

Perpendicularity (B3PL1)

Bias	-0.0432
Upper LoA	0.1277
Lower LoA	-0.2935

Πίνακας 20: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την καθετότητα των επιπέδων συγκριτικά με το Datum A

Perpendicularity (Datum A)

Bias	-0.0324
Upper LoA	0.1549
Lower LoA	-0.3359

8. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Καθετότητα των Plane 2, 3, 4, 5 συγκριτικά με το Plane 1 του Box 1	56
Πίνακας 2: Κυλινδρικήτητα όλων των κυλίνδρων και οπών της γεωμετρίας αναφοράς	56
Πίνακας 3: Ένταση της συσχέτισης συναρτήσεως της τιμής του συντελεστή r	58
Πίνακας 4: Αποτελέσματα ελέγχου συσχέτισης αποτελεσμάτων μετρήσεων σαρωτή laser – CMM	59
Πίνακας 5: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την επιπεδότητα	61
Πίνακας 6: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την κυλινδρικήτητα.....	61
Πίνακας 7: Καθετότητα των Plane 2, 3, 4, 5 συγκριτικά με το Plane 1 του Box 1	70
Πίνακας 8: Καθετότητα των Plane 2, 3, 4, 5 συγκριτικά με το Plane 1 του Box 2	70
Πίνακας 9: Καθετότητα των Plane 2, 3, 4, 5 συγκριτικά με το Plane 1 του Box 3	70
Πίνακας 10: Καθετότητα των Plane 2, 3, 4, 5 των Box 1, 2, 3 συγκριτικά με το Datum A....	71
Πίνακας 11: Επιπεδότητα όλων των επιπέδων της γεωμετρίας αναφοράς	71
Πίνακας 12: Κυλινδρικήτητα όλων των κυλίνδρων και οπών της γεωμετρίας αναφοράς ..	74
Πίνακας 13: Παραλληλία όλων των παράλληλων επιπέδων στο Datum A συγκριτικά με το Datum A.....	74
Πίνακας 14: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την επιπεδότητα	75
Πίνακας 15: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την κυλινδρικήτητα.....	75
Πίνακας 16: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την παραλληλία συγκριτικά με το Datum A.....	75
Πίνακας 17: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την καθετότητα των επιπέδων του κύβου 1.....	75
Πίνακας 18: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την καθετότητα των επιπέδων του κύβου 2.....	76
Πίνακας 19: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την καθετότητα των επιπέδων του κύβου 3.....	76
Πίνακας 20: Αποτελέσματα μεθόδου Bland – Altman για την καθετότητα των επιπέδων συγκριτικά με το Datum A.....	76

9. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Μικρόμετρο	6
Εικόνα 2: Παχύμετρο μηχανικής κλίμακας	7
Εικόνα 3: Μικρομετρικό ρολόι.....	7
Εικόνα 4: Ψηφιακό γωνιόμετρο.....	7
Εικόνα 5: Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων.....	8
Εικόνα 6: Σαρωτής Laser	9
Εικόνα 7: Διαδικασία αντιστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού.....	15
Εικόνα 8: Λήψη μετρήσεων της κεφαλής επαγγελματία οδηγού αγώνων με χρήση σαρωτή laser για τη δημιουργία εξατομικευμένου κράνους.....	16
Εικόνα 9: Κύρια στάδια αντιστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού	16
Εικόνα 10: Μέθοδος επαφής για τη λήψη μετρήσεων	17
Εικόνα 11: Μέθοδος μη επαφής για τη λήψη μετρήσεων	17
Εικόνα 12: Κατηγορίες μεθόδων συλλογής δεδομένων.....	18
Εικόνα 13: Σφάλματα μέτρησης κατά τη διαδικασία λήψης μετρήσεων	21
Εικόνα 14: Αδυναμία μέτρησης οπών και εισαγωγή σφάλματος εξαιτίας της προσβασιμότητας της γεωμετρίας	21
Εικόνα 15: Λήψη ξεχωριστών νεφών σημείων για την πλήρη απεικόνιση του εξαρτήματος λόγω στερέωσης.....	22
Εικόνα 16: Σφάλμα κατά την ευθυγράμμιση των δύο νεφών σημείων για την ολοκληρωμένη απεικόνιση του εξαρτήματος.....	22
Εικόνα 17: Αποθρομβοποιημένο νέφος σημείων	23
Εικόνα 18: Ομαλοποιημένη τελική γεωμετρία	23
Εικόνα 19: Διαδικασία προσαρμογής επιφανειών σε νέφος σημείων	24
Εικόνα 20: Διάρθρωση του νέφους σημείων σε υποσύνολα	25
Εικόνα 21: Αναγνώριση και απόδοση τύπου επιφάνειας	26
Εικόνα 22: Μοντέλο οριακής αναπαράστασης	28
Εικόνα 23: Βασικά στοιχεία γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών	29
Εικόνα 24: Αισθητήρας αφής της εταιρίας RENISHAW	40
Εικόνα 25: Αισθητήρας αφής στραμμένος υπό γωνία 45 μοιρών κατά τον Z άξονα.....	41
Εικόνα 26: Ρουμπινένια σφαίρα υψηλής ακριβείας	42
Εικόνα 27: Λήψη μετρήσεων στο λογισμικό PC – DMIS.....	43
Εικόνα 28: Αρθρώσεις του σαρωτή laser.....	44
Εικόνα 29: Αρχικό νέφος σημείων εξαρτήματος κατά τη σάρωση του.....	45
Εικόνα 30: Αποθρομβοποιημένο νέφος σημείων εξαρτήματος μετά την επεξεργασία του.....	46
Εικόνα 31: Τελικό νέφος σημείων μετά την πλεγματοποίησή του (mesh creation).....	46
Εικόνα 32: Νέφη σημείων στο λογισμικό GEOMAGIC CONTROL X.....	47
Εικόνα 33: Αναγνωρισμένες γεωμετρικές στο λογισμικό GEOMAGIC CONTROL X	47
Εικόνα 34: Αρχική εκδοχή της γεωμετρίας αναφοράς	49
Εικόνα 35: Ποικίλες γεωμετρικές μικρών διαστάσεων	49

Εικόνα 36: Νέφος σημείων της αρχικής εκδοχής της γεωμετρίας αναφοράς	51
Εικόνα 37: Ελλιπές νέφος σημείων	51
Εικόνα 38: Νέφος σημείων στην περιοχή των ποικίλων γεωμετριών μικρών διαστάσεων	52
Εικόνα 39: Βελτιστοποιημένη γεωμετρική διάταξη	53
Εικόνα 40: Σκαρίφημα βελτιστοποιημένης γεωμετρικής διάταξης	53
Εικόνα 41: Βελτιστοποιημένη γεωμετρική διάταξη κατασκευασμένη με τη μέθοδο τρισδιάστατης προσθετικής κατασκευής	54
Εικόνα 42: Τελικό νέφος σημείων πρότυπης γεωμετρίας.....	55
Εικόνα 43: Ονοματολογία των γεωμετριών του πρότυπου μοντέλου	56
Εικόνα 44: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM)	62
Εικόνα 45: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM)	63
Εικόνα 46: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM)	64
Εικόνα 47: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM)	65
Εικόνα 48: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM)	66
Εικόνα 49: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τον σαρωτή laser	67
Εικόνα 50: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τον σαρωτή laser	68
Εικόνα 51: Αποτελέσματα γεωμετρικής ανάλυσης διαστάσεων και ανοχών (GD&T) χρησιμοποιώντας τον σαρωτή laser	69

10. Κατάλογος Αναφορών

- [1] H. Czichos, T. Saito, and L. Smith, Eds., *Springer Handbook of Metrology and Testing*. Berlin, Germany: Springer, 2011.
- [2] L. Pendrill, "History and evolution of metrology – Measurement science," in *Springer Handbook of Metrology and Testing*, 2nd ed., H. Czichos, T. Saito, and L. Smith, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2011, pp. 3–20.
- [3] Hexagon Manufacturing Intelligence, "Metrology and manufacturing solutions," Hexagon AB. [Online]. Available: <https://www.hexagonmi.com/>. [Accessed: Jun. 19, 2025].
- [4] B. R. Romsek, "Terrestrial laser scanning: Comparison of time-of-flight and phase-based measuring systems," M.S. thesis, Dept. of Engineering, Purdue Univ., West Lafayette, IN, USA, Jan. 2008.
- [5] I. Asimov, *Realm of Measure: From the Yardstick to the Theory of Relativity*. New York, NY, USA: Walker & Company, 1960.
- [6] Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), "Historical information." [Online]. Available: <https://www.bipm.org/en/historical-information>. [Accessed: Jun. 2025].
- [7] A. Sun *et al.*, "A review of error analysis and calibration techniques for spherical coordinate 3D laser scanners: Focus on non-instrumental and non-geometric factors," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 5, pp. 1–20, 2025. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/00202940241312667>.
- [8] S. Soudarissanane, R. C. Lindenbergh, M. Menenti, and P. J. G. Teunissen, "Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points," *J. Appl. Geod.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/JAG.2009.001>.
- [9] P. Squara, M. Imhoff, and M. Cecconi, "Metrology in medicine: From measurements to decision, with specific reference to anesthesia and intensive care," *Anesth. Analg.*, vol. 120, no. 1, pp. 66–75, Dec. 19, 2014.
- [10] Y. Wang, Q. Chen, T. Hong, and C. Kang, "Review of smart meter data analytics: Applications, methodologies, and challenges," *arXiv preprint*, arXiv:1802.04117, Feb. 2018.
- [11] L. Brown *et al.*, "Measuring measurement – What is metrology and why does it matter?," *Philos. Trans. R. Soc. A*, 2020.
- [12] V. A. Ukraintsev and G. W. Banke Jr., "Review of reference metrology for nanotechnology: significance, challenges, and solutions," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS*

MOEMS, vol. 11, no. 1, Art. 011010, Feb. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/1.JMM.11.1.011010>.

[13] National Physical Laboratory (NPL), "Advanced Quantum Metrology Laboratory (AQML)," Quantum Metrology Institute. [Online]. Available: <https://www.npl.co.uk/quantum/advanced-quantum-metrology-laboratory>. [Accessed: Jun. 2025].

[14] S. Koehler, P. J. Bevan, A. Stoupin, H. P. Weber, and K. Richter, "Metrology for the digital age," *Measurement: Sensors*, vol. 18, Art. 100232, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100232>.

[15] F. Buonamici *et al.*, "Reverse engineering modeling methods and tools: a survey," *Comput.-Aided Des. Appl.*, vol. 15, no. 3, pp. 443–464, 2018.

[16] T. Várady, R. R. Martin, and J. Cox, "Reverse engineering of geometric models—an introduction," *Comput.-Aided Des.*, vol. 29, no. 4, pp. 255–268, Apr. 1997.

[17] Y. Li *et al.*, "A review of geometric dimensioning and tolerancing (GD&T) of additive manufacturing and powder bed fusion lattices," *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 7, pp. 1297–1305, May 2022.

[18] M. C. Paulk, C. V. Weber, B. Curtis, and M. B. Chrissis, *The Capability Maturity Model: Guidelines for Improving the Software Process*. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1995.

[19] W. S. Humphrey, "The Capability Maturity Model: Guidelines for improving the software process," *IEEE Softw.*, vol. 7, no. 6, pp. 18–27, Nov. 1990, doi: 10.1109/52.58844.

[20] W. S. Humphrey, "Introduction to the Capability Maturity Model for Software," SEI Tech. Rep. CMU/SEI-89-TR-24, Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, PA, 1989.

[21] D. L. Lane, *Method for Evaluation and Certification of the Ferranti X-Y Coordinate Measuring Machine*, Lawrence Radiation Laboratory, Univ. of California, Livermore, CA, Tech. Rep., 1969. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/4174749>

[22] Wasy Research, "The history and introduction of CMM: The inseparable relation between CMM and GD&T." [Online]. Available: <https://www.wasyresearch.com/the-history-and-introduction-of-cmm-the-inseparable-relation-between-cmm-and-gd-t/>. [Accessed: Jun. 2025].

[23] Carl Zeiss, "History of metrology." [Online]. Available: <https://www.zeiss.com.sg/metrology/pages/history.html>. [Accessed: Jun. 2025].

- [24] Mitutoyo Corporation, "Corporate history." [Online]. Available: <https://en-40020.site-translation.com/corporate/history/>. [Accessed: Jun. 2025].
- [25] F. T. Farago and M. A. Curtis, *Handbook of Dimensional Measurement*. London, UK: Institute of Physics Publishing, 1994.
- [26] D. J. Whitehouse, *Handbook of Surface and Nanometrology*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.
- [27] M. A.-B. Ebrahim, *3D Laser Scanners: History, Applications, and Future*. ResearchGate, 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/266672453_3D_Laser_Scanners_History_Applications_and_Future.
- [28] M. Edl, M. Mizerák, and J. Trojan, *3D Laser Scanners: History and Applications*. ResearchGate, 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/325501296_3D_LASER_SCANNERS_HISTORY_AND_APPLICATIONS.
- [29] C. Hu, L. Kong, and F. Lv, "Application of 3D laser scanning technology in engineering field," *E3S Web Conf.*, vol. 233, Art. 04014, Jan. 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202123304014.
- [30] Hexagon, *Introduction to Coordinate Metrology*. [Online]. Available: <https://hexagon.com/resources/resource-library/intro-coordinate-metrology>. [Accessed: Jun. 20, 2025].
- [31] Γ. Καϊσαρλής, Σ. Διπλάρης, and Μ. Σφαντζικόπουλος, "Συμβολή των μετρητικών μηχανών συντεταγμένων στη μετρολογία διαστάσεων: σημερινή πραγματικότητα και προοπτικές," in *Proc. 1ου Τακτικού Εθνικού Συνεδρίου Μετρολογίας*, Αθήνα, Greece, Nov. 11–12, 2005.
- [32] J. Shan and C. K. Toth, Eds., *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
- [33] FARO Technologies, "Understanding laser scanners." [Online]. Available: <https://www.faro.com/en/Resource-Library/Article/understanding-laser-scanners>. [Accessed: Jun. 2025].
- [34] Z. Zhang, *Photodetectors: Materials, Devices and Applications*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2012.
- [35] 3D Systems, "Geomagic Wrap software overview." [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/software/geomagic-wrap>. [Accessed: Jun. 2025].

- [36] F. Chang Xue, "Point cloud data preprocessing based on the Geomagic," *Adv. Mater. Res.*, vols. 690–693, pp. 2817–2820, 2013.
- [37] 3D Systems, "Scan to scan," video. [Online]. Available: <https://s3.amazonaws.com/dl.3dsystems.com/binaries/support/downloads/KB+Files/ScantoScan.mp4>. [Accessed: Jun. 2025].
- [38] A. Georgopoulos and G. Stylios, "Using RANSAC for 3D point cloud segmentation," Academia.edu, 2021. [Online]. Available: https://www.academia.edu/77762784/Using_RANSAC_for_3D_point_cloud_segmentation. [Accessed: Jun. 2025].
- [39] S. Martínez-Pellitero, E. Cuesta, J. Barreiro, and B. J. Álvarez, "Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control," *Measurement*, vol. 43, no. 9, pp. 1213–1222, 2010.
- [40] S. Martínez-Pellitero *et al.*, "Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control," ResearchGate. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/289525458>. [Accessed: Jun. 20, 2025].