



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

υπό
ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΜΠΙΣΜΠΙΚΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2023

© 2023 Γεώργιος Παναγιώτης Μπισμπικόπουλος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Μπουζάκης Εμμανουήλ
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα
Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Κερμανίδης Αλέξης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα
Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Λυχναρόπουλος Ιωάννης
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

ACCURACY CONTROL OF COORDINATE MEASURING MACHINES

by

GEORGIOS PANAGIOTIS BISMPIKOPOULOS

Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Diploma

in Mechanical Engineering at the University of Thessaly

Volos, 2023

© 2022 Georgios Panagiotis Bimpikopoulos

All rights reserved. The approval of the present DThesis by the Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, University of Thessaly, does not imply acceptance of the views of the author (Law 5343/32 art. 202).

ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΜΠΙΣΜΠΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2023

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης,

Αναπληρωτής Καθηγητής Κατεργασιών Μορφοποίησης Υλικών

Περίληψη

Οι ψηφιακά καθοδηγούμενες μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machines ή CMMs) χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την παροχή ακριβών μετρήσεων των διαστάσεων και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των τμημάτων φυσικών αντικειμένων σε διάφορα στάδια της παραγωγής. Για την επίτευξη της θεωρητικής ακρίβειας της μηχανής CMM και για τη διασφάλιση της επαναληψιμότητας των μετρήσεων απαιτείται η βαθμονόμηση της, η λειτουργία της συσκευής σε σταθερές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία) καθώς και η τακτική συντήρησή της. Η παρούσα εργασία θα μελετήσει τη δομή και τη μετροτεχνική λειτουργία της μηχανής CMM καθώς και μεθόδους βελτίωσης της ακρίβειας αυτής.

Λέξεις-κλειδιά: μηχανές μέτρησης συντεταγμένων, CMM, ακρίβεια μετρήσεων

ACCURACY CONTROL OF COORDINATE MEASURING MACHINES

GEORGIOS PANAGIOTIS BISMPIKOPOULOS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly

Supervisor: Dr Emmanouil Bouzakis

Associate Professor of Materials Forming Processes

Abstract

Digitally guided Coordinate Measuring Machines (CMMs) are used in industry to provide precise measurements of the dimensions and internal features of physical object parts at various stages of production. In order to achieve the theoretical accuracy of the Coordinate Measuring Machine and to ensure the repeatability of the measurements, its calibration, the operation of the device in stable conditions (temperature, humidity) as well as its regular maintenance are required. The present paper will study the structure and metrological operation of the Coordinate Measuring Machine as also the actions that we need to take to improve CMM's precision during those measurements.

Key words: coordinate measuring machine, CMM, accuracy, measurements, improvements

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο	11
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	12
1.3 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	13
Κεφάλαιο 2. ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ	14
2.1 Ιστορικά στοιχεία των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων	14
2.2 Τεχνική ανάλυση των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων	17
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις	21
Κεφάλαιο 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ	25
3.1 Σχεδιασμός μιας Υψηλής Ακριβείας Μηχανής Μέτρησης Συντεταγμένων	26
3.2 Μέθοδος αλγοριθμικής διόρθωσης μέσω αυτοβαθμονόμησης	34
3.3 Μέθοδος αλγοριθμικής διόρθωσης μέσω αυτόματου συστήματος αντιστάθμισης σφαλμάτων	40
3.4 Συνοχή των μετρήσεων στις Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων	59
Κεφάλαιο 4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	65
4.1 Περιγραφή της μετρητικής διαδικασίας στο Εργαστήριο	65
4.2 Αποτελέσματα	73
Κεφάλαιο 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	81
Βιβλιογραφία	82

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.2-1: Πίνακας κινηματικών εξισώσεων.	37
Πίνακας 3.2-2: Μετρήσεις των σημείων αναφοράς των σφαιρών.	39
Πίνακας 3.4-1: Σφάλματα μορφής των αντικειμένων Α και Β.	62
Πίνακας 3.4-2: Συστήματα CMM.	62
Πίνακας 4.1-1: Χαρακτηριστικά φρεζοκεφαλής.	66
Πίνακας 4.1-2: Συντεταγμένες σημείων μέτρησης.	67

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.2-1: Μία σύγχρονη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων.	18
Σχήμα 2.3-1: Ένα τυπικό σχέδιο μιας μηχανής μέτρησης συντεταγμένων (CMM).	22
Σχήμα 3.1-1: Κάτοψη του προτεινόμενου 3D-CMM.	27
Σχήμα 3.1-2: Σχηματικό σχέδιο του προτεινόμενου 3D-CMM.	28
Σχήμα 3.1-3: c_{min} και c_{const} με a/l όπου προφόρτωση $F_p = 250 N$	31
Σχήμα 3.3-1: Μηχανή μέτρησης συντεταγμένων με οριζόντιο βραχίονα.	42
Σχήμα 3.3-2: Υλοποίηση των συστημάτων MDFM στην CMM.	44
Σχήμα 3.3-3: Αποτελέσματα μέτρησης οριζόντιας ευθυγράμμισης του άξονα X.	45
Σχήμα 3.3-4: Αποτελέσματα μέτρησης της κατακόρυφης ευθυγράμμισης του άξονα X.	45
Σχήμα 3.3-5: Αποτελέσματα της μέτρησης του βήματος του άξονα X.	46
Σχήμα 3.3-6: Αποτελέσματα της μέτρησης εκτροπής άξονα X.	47
Σχήμα 3.3-7: Αποτελέσματα μέτρησης κλίσης άξονα X.	47
Σχήμα 3.3-8: Αποτελέσματα της μέτρησης οριζόντιας ευθυγράμμισης του άξονα Z.	48
Σχήμα 3.3-9: Αποτελέσματα της μέτρησης κατακόρυφης ευθυγράμμισης του άξονα Z.	48
Σχήμα 3.3-10: Πλαίσια συντεταγμένων της CMM.	50
Σχήμα 3.3-11: Διάγραμμα του συστήματος αντιστάθμισης σφαλμάτων.	55
Σχήμα 3.3-12: Πειραματική διάταξη για τις διαγώνιες δοκιμές.	56
Σχήμα 3.3-13: Αποτελέσματα της διαγώνιας δοκιμής κατά μήκος της διαγωνίου του σώματος (1, 1, -1).	57
Σχήμα 3.3-14: Αποτελέσματα της διαγώνιας δοκιμής κατά μήκος της διαγωνίου του σώματος (-1, 1, -1).	58
Σχήμα 4.1-1: TESA MH3D CMM.	65
Σχήμα 4.1-2: Η κεφαλής φρέζας Mitsubishi Materials SE300-100A05R.	66
Σχήμα 4.1-3: Πλάγια όψη φρεζοκεφαλής.	67
Σχήμα 4.2-1: Τα σημεία της μέτρησης στο CAD.	73
Σχήμα 4.2-2: Η κάτοψη της μέτρησης στο CAD.	74
Σχήμα 4.2-3: Η κάτοψη της φρεζοκεφαλής της μέτρησης.	74
Σχήμα 4.2-4: Η εσωτερική διάμετρος της φρεζοκεφαλής όπως μετρήθηκε.	75
Σχήμα 4.2-5: Απεικόνιση του εξωτερικού νοητού κύκλου της φρεζοκεφαλής.	76
Σχήμα 4.2-6: Απεικόνιση της διαμέτρου του εξωτερικού νοητού κύκλου της φρεζοκεφαλής.	76

Σχήμα 4.2-7: Άνω τόξο.	77
Σχήμα 4.2-8: Άνω δεξιό τόξο.	78
Σχήμα 4.2-9: Κάτω δεξιό τόξο.	78
Σχήμα 4.2-10: Κάτω αριστερό τόξο.	79
Σχήμα 4.2-11: Άνω αριστερό τόξο.	79

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι κρίσιμης σημασίας σε πολλαπλές εργασίες σχεδιασμού και κατασκευής. Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM) χρησιμοποιούνται ευρέως για εργασίες μέτρησης ακριβείας, συμπεριλαμβανομένου του ποιοτικού ελέγχου και της επιθεώρησης. Ωστόσο, η ακρίβεια των CMM μπορεί να επηρεαστεί από διάφορες πηγές σφαλμάτων, όπως η φθορά του μηχανήματος και του αισθητήρα, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και η τεχνική του χειριστή. Η συγγραφή αυτής της διπλωματικής σχετικά με την λειτουργία των CMM παρέχει μια ευκαιρία για εμβάθυνση στους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια των CMM και την διερεύνηση μεθόδων για τη βελτίωση της ακριβείας των μετρήσεων. Αυτή η εργασία μπορεί να προσφέρει πολύτιμες γνώσεις και να συμβάλει στην ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών μεθόδων για τη βελτίωση της ακριβείας και της αξιοπιστίας των μετρήσεων των CMM, οι οποίες μπορούν να έχουν πρακτικές εφαρμογές σε διάφορους κλάδους. Επιπλέον, η έρευνα και η συγγραφή της διπλωματικής αυτής για αυτό το θέμα μπορεί να βοηθήσει στην ανάλυση των δεδομένων και των σφαλμάτων, καθώς και στην επίλυση των προβλημάτων που διέπουν τις μετρήσεις των μηχανών μέτρησης συντεταγμένων, οι οποίες είναι πολύτιμες στον τομέα της μηχανολογίας.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Υπάρχουν αρκετές αναφορές και μελέτες πάνω στις μηχανές μέτρησης συντεταγμένων - CMM. Η ομάδα της Creaform και ο Syam Wahyudin περιγράφουν αναλυτικά την ιστορία, χρήση και την εξέλιξη των CMM μέσα στις δεκαετίες. Η ομάδα της CMMXYZ συνεχίζει ανατρέχοντας σε συγκεκριμένα ιστορικά γεγονότα μεταξύ ανθρώπων και εταιρειών που ο ανταγωνισμός τους οδήγησε στην περαιτέρω εξέλιξη των μηχανών μέτρησης συντεταγμένων.

Οι ομάδες της GlobalSpec και της Keyence περιγράφουν την πλήρη λειτουργία, τα εξαρτήματα και τον τρόπο χρήσης ενός σύγχρονου CMM, καθώς και τις επιπτώσεις που έχει επιφέρει στις βιομηχανίες η μέτρηση ακριβείας.

Οι M. P.A. Vermeulen, P.C. J.N. Rosielle και P. H. J. Schellekens σχεδίασαν έναν εναλλακτικό τρισδιάστατο CMM υψηλής ακρίβειας με μέτρηση αβεβαιότητας κάτω από 0,1 μm σε όγκο μέτρησης 1 dm.

Όσον αφορά μεθόδους για την βελτίωση της ακρίβειας που λαμβάνουμε από τις μετρήσεις των μηχανών CMM, η βιβλιογραφία περιλαμβάνει την έρευνα των S.Sartori, P. C. Cresto, M. Di Ciommo και T. K. Kancheva για την διόρθωση των συστηματικών σφαλμάτων της CMM μέσω αλγορίθμου που εκτελεί ογκομετρική διόρθωση των σφαλμάτων. Οι P. S. Huang and J. Ni ανέπτυξαν επίσης μια ακόμη μέθοδο αλγοριθμικής προσαρμογής, μία μέθοδο αυτόματης αντιστάθμισης σφαλμάτων βασισμένη σε τρία συστήματα μέτρησης πολλαπλών βαθμών ελευθερίας.

Τέλος οι Per Saunders, Alan Wilson, Nick Orchard, Neil Tatman και Paul Maropoulos ανέπτυξαν ένα πλαίσιο από το οποίο η συνέπεια των μετρήσεων ελέγχεται μέσω της στρατηγικής που ακολουθείται σε αυτές, όπως είναι ο αριθμός ή η τοποθεσία των σημείων μέτρησης.

1.3 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε τέσσερις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 - 5, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 κάνουμε μια ιστορική ανασκόπηση από τις πρώτες μηχανές μέτρησης συντεταγμένων μέχρι σήμερα. Πραγματοποιούμε επίσης μια ενδελεχή ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών των σημερινών σύγχρονων μηχανών CMM, καθώς και των παραγόντων που επηρεάζουν τις μετρήσεις τους.

Στο Κεφάλαιο 3 αναπτύσσουμε μεθόδους για την βελτιστοποίηση της ακρίβειας των μηχανών CMM. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται σε πλήθος ερευνών, πειραμάτων και δημοσιεύσεων.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζουμε αριθμητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με την μηχανή CMM σε αντικείμενο, στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 2. ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

2.1 Ιστορικά στοιχεία των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων

Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM) είναι συσκευές μέτρησης ακριβείας που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των διαστάσεων και της γεωμετρίας των φυσικών αντικειμένων. Η μηχανή μέτρησης συντεταγμένων εμφανίζεται για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του '60 και αποτελείται από συσκευές 3D ανίχνευσης με απλή ψηφιακή ανάγνωση που εμφανίζει τη θέση XYZ στον τρισδιάστατο χώρο (The History of Metrology from Galileo to Optical Systems,2016). Η πρώτη CMM αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '50 στη Σκωτία από την εταιρεία Ferranti. Αυτή η μονάδα, ωστόσο, είχε μόνο δύο άξονες. Ο βασικός λόγος που οδήγησε στην εφεύρεση του CMM ήταν η αυτοματοποίηση και η επιτάχυνση τη μέτρησης και της επαλήθευσης των γεωμετρικών ανοχών GD&T σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα παραγωγής.

Η πρώτη CMM που κατασκευάστηκε από τη Ferranti λειτουργούσε μόνο σε 2 άξονες, και όχι ακόμη σε 3, έτσι δεν ήταν μια πραγματική CMM σύμφωνα με τον ορισμό της. Το 1963, ένας Ιταλός μηχανικός, ο Franco Sartorio, ο οποίος εργαζόταν στη FIAT εκείνη την εποχή, είχε την ιδέα να κάνει το CMM ένα καθολικό όργανο μέτρησης που να μπορεί να μετρήσει και να επαληθεύσει διάφορους τύπους διαστάσεων και γεωμετρικών GD&T ανοχών. Ο Sartorio λέγεται ότι πήρε την ιδέα του παρατηρώντας το εξαιρετικά αυτοματοποιημένο εργοστάσιο της Ford όταν επισκέφθηκε την εταιρεία αυτοκινήτων Ford στις ΗΠΑ και έμεινε έκπληκτος με το πώς το σύστημα αυτοματισμού μαζικής παραγωγής που εγκαθιδρύθηκε από τον Henry Ford μπορεί να αυξήσει σημαντικά την παραγωγικότητα της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Όταν επέστρεψε στην Ιταλία, διαπίστωσε ότι με το τρέχον σύστημα μέτρησης και επαλήθευσης των ανοχών GD&T για τα εξαρτήματα των αυτοκινήτων της Fiat, δεν μπορεί να εφαρμοστεί η πλήρης αυτοματοποίηση που χρειαζόταν. Επειδή, με το συμβατικό σύστημα που υπήρχε, απαιτούνταν μεγάλος αριθμός εργατικού δυναμικού και ρυθμίσεων στις μετρήσεις για την επαλήθευση πολλών εξαρτημάτων με ανοχές GD&T. Έτσι, ο Franco

Sartorio δημιούργησε την εταιρεία Digital Electronic Automation (DEA) στο Τορίνο της Ιταλίας και παρήγαγε το πρώτο πλήρως λειτουργικό CMM με 3 άξονες κατεύθυνσης (Syam Wahyudin,2022). Αμέσως μετά, αυτοματοποιημένα CMM κατασκευασμένα από εταιρείες της Αμερικής, της Γαλλίας, της Ιαπωνίας και της Γερμανίας εμφανίζονται στη δεκαετία του '60 να εκτελούν σύνθετες επιθεωρήσεις υπερηχητικών κινητήρων τζετ Concorde. Αυτή η εφεύρεση οδηγεί στη δημιουργία της εταιρείας Renishaw το 1973, που είναι ο κύριος προμηθευτής κεφαλών μέτρησης CMM.

Το 1972 συνέβη η πρώτη μεγάλη ανακάλυψη στην τεχνολογία CMM όταν η εταιρεία Zeiss παρουσίασε τον πρώτο της αισθητήρα (probe). Ο Sir David McMurtry του Ομίλου Rolls Royce εφηύρε έναν αισθητήρα κινηματικής αντίστασης, γνωστό ως αισθητήρας αφής (touch-trigger probe). Αυτή η εφεύρεση έφερε την επανάσταση στην τεχνολογία CMM και άνοιξε την πόρτα στις μηχανές μέτρησης συντεταγμένων DCC/CNC, δημιουργώντας πολλαπλές ευκαιρίες για την ανάπτυξη μηχανών με σκοπό την αυτόματη και ακριβή μέτρηση εξαρτημάτων για χρησιμοποίηση σε συνεκτικές βιομηχανικές γραμμές συναρμολόγησης. Εκείνη την περίοδο, σε ευρεία χρήση ήταν μηχανικοί αισθητήρες οι οποίοι βρισκόταν τοποθετημένοι σε ειδικές βάσεις ώστε να παραμένουν ακίνητοι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων συγκεκριμένων σημείων πάνω στα διάφορα αντικείμενα. Οι αισθητήρες αυτοί ήταν ιδανικοί για τη μέτρηση επίπεδων, κυλινδρικών ή στρογγυλών επιφανειών, αλλά ήταν αδύνατη η μετατόπιση τους ώστε να καταστεί δυνατή η μέτρηση διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών.

Τη σήμερα ημέρα, τα κλασικά CMM λειτουργούν με ένα τρισδιάστατο σύστημα αξόνων X, Y και Z, όπου το καθένα έχει ένα σύστημα κλίμακας για τον προσδιορισμό της σχετικής θέσης των σημείων. Αυτοί οι αισθητήρες αφής που αναπτύχθηκαν από τον McMurtry επιτρέπουν στους χειριστές των CMM και το λογισμικό να αυτοματοποιούν τις μετρήσεις και να τις εκτελούν με ακρίβεια για κάθε είδους αντικείμενο. (The History of Coordinate Measuring Machines, 2020)

Το 1973 η Zeiss παρουσίασε τον τρισδιάστατο αισθητήρα μέτρησης τους. Στη συνέχεια, η εταιρεία Renishaw ανέπτυξε περαιτέρω την τεχνολογία των CMM αναπτύσσοντας έναν μηχανοκίνητο αισθητήρα. Με αυτή την ανακάλυψη οι χειριστές των μηχανών CMM δε θα χρειαζόταν πλέον να προσαρμόζουν χειροκίνητα τους αισθητήρες ώστε να μετρήσουν τα διαφορετικά αντικείμενα που τους ενδιέφεραν. Αυτή η εφεύρεση

συνέβαλε σημαντικά στην περαιτέρω ανάπτυξη οικονομικών αισθητήρων σάρωσης και της αυτόματης γραφίδας του αισθητήρα.

Τη δεκαετία του '80 αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το λογισμικό μετρολογίας για χρήση σε προσωπικό υπολογιστή, το οποίο έγινε γρήγορα αρκετά δημοφιλές λόγω της ευκολίας στη χρήση του. Το 1985 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε τρισδιάστατη σάρωση τεχνολογία λέιζερ, μέσου ενός ανέπαφου αισθητήρα για τη μέτρηση της γεωμετρίας ιδιαίτερα εύθραυστων αντικειμένων. Το 1987 η εταιρεία Automated Precision Inc., θα αναπτύξει πρωτότυπο αισθητήρα λέιζερ και θα βελτιστοποιήσει την τεχνολογία αυτή αναπτύσσοντας μοντέλα υψηλότερης ακρίβειας και ευκολότερης φορητότητας. Οι αισθητήρες λέιζερ εξακολουθούν μέχρι και σήμερα να χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση εξαρτημάτων μεγάλων διαστάσεων όπως πτερύγια αεροσκάφους ή μεγάλα εργαλεία.

Στις αρχές του 2000 αναπτύχθηκαν τα φορητά οπτικά CMM. Συνδυάζουν την ευελιξία και την αποτελεσματικότητα των κλασικών CMM, με τη φορητότητα και την απλότητα που προσφέρουν τα φορητά συστήματα, με το επιπλέον προτέρημα ότι το φορητό οπτικό CMM είναι ανθεκτικό στους κραδασμούς, καθιστώντας τα ιδανικά για χρήση σε σχεδόν οποιοδήποτε περιβάλλον. Η τεχνολογία αυτή έχει εξελιχθεί και βελτιωθεί αρκετά σημαντικά τα τελευταία χρόνια, ώστε να ανταγωνίζεται πλέον τα κλασικά CMM. Είναι ακόμη ενσωματωμένα στη διαδικασία της επιθεώρησης και έχουν καταφέρει να προκαλέσουν τον ανταγωνισμό στην αγορά της μετρολογίας. (The History of Metrology from Galileo to Optical Systems, 2016)

Σήμερα, τα CMM χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, συμπεριλαμβανομένης της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας, της άμυνας, της ιατρικής και άλλων. Αποτελούν σημαντικό εργαλείο για τη διασφάλιση της ποιότητας και της ακρίβειας των κατασκευασμένων εξαρτημάτων και προϊόντων και συνεχίζουν να εξελίσσονται και να βελτιώνονται με την ανάπτυξη ολοένα και περισσότερων τεχνολογιών.

2.2 Τεχνική ανάλυση των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων

Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM) είναι μηχανικά συστήματα που έχουν σχεδιαστεί ώστε να μετακινούν έναν αισθητήρα μέτρησης για τον προσδιορισμό συντεταγμένων διαφορετικών σημείων πάνω σε μια επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας. Παρέχουν ακριβείς μετρήσεις των αντικειμένων ώστε να καταστεί δυνατόν ο σχεδιασμός, η αξιολόγηση, η διαμόρφωση προφίλ και η αντίστροφη μηχανική εξαρτημάτων. Οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούν πολλαπλές διεπαφές και λογισμικά μοντελοποίησης και διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία μεγεθών και σχεδίων.. (Coordinate Measuring Machines Information, n.d.)

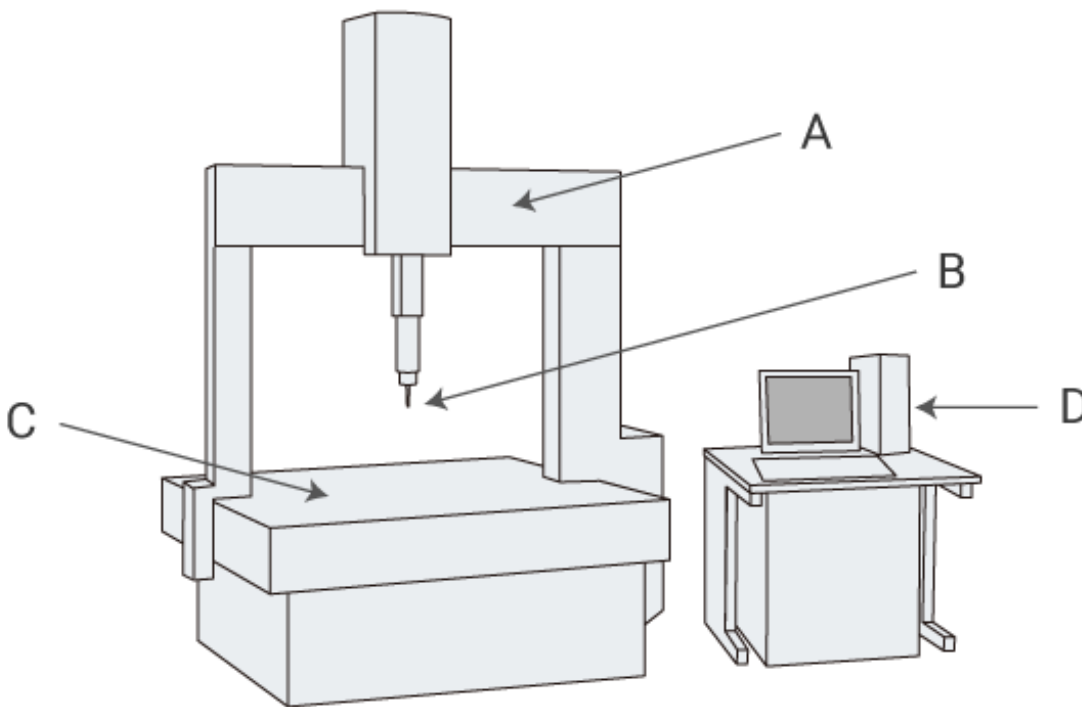
Συμβατικά, οι μετρήσεις γίνονταν οπτικά με χρήση εργαλείων χειρός. Ωστόσο, αυτά τα εργαλεία απαιτούν σημαντικό χρόνο και έχουν περιορισμένη ακρίβεια. Από την άλλη πλευρά, μια μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM) έχει τρισδιάστατες δυνατότητες μέτρησης (κατευθύνσεις X, Y και Z), μετράει δηλαδή το ύψος, το πλάτος και το μήκος του εξαρτήματος χρησιμοποιώντας τεχνολογία επεξεργασίας συντεταγμένων. Επιπλέον, τέτοια μηχανήματα μπορούν να μετρήσουν αυτόματα τον στόχο, να καταγράψουν τα δεδομένα μέτρησης και να λάβουν μετρήσεις GD&T.

Μια μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM) μπορεί να είναι χρησιμοποιεί είτε αισθητήρες αφής είτε ένα σφαιρικό αντικείμενο που για την εκτέλεση μετρήσεων ή μπορεί να είναι ένα μοντέλο χωρίς επαφή, το οποίο χρησιμοποιεί άλλες μεθόδους, όπως κάμερες και λέιζερ. Ορισμένα μοντέλα που έχουν σχεδιαστεί για την αυτοκινητοβιομηχανία μπορούν ακόμη και να μετρήσουν αντικείμενα μεγαλύτερα από 10 μέτρα σε μέγεθος.

Η CMM κινεί τον αισθητήρα και χρησιμοποιεί με ακρίβεια την άκρη του ώστε να εκτελέσει τις μετρήσεις, μέσω της επαφής του με το τεμάχιο μέτρησης στον τρισδιάστατο χώρο, και έπειτα το λογισμικό αναδημιουργεί το σχήμα από τα σημεία που λαμβάνονται. Όταν ο αριθμός των σημείων αυτών είναι αρκετός τότε το σχήμα που δημιουργήσε το λογισμικό από την μέτρηση, μπορεί να συγκριθεί με τα κατασκευαστικά δεδομένα μέσω λογισμικού CAD για επιθεώρηση του σχήματος, της μορφής του και της στρέβλωσης. (Keyence,2020)

Τα CMM αποτελούνται από τέσσερα κύρια στοιχεία: την κινούμενη γέφυρα, την τράπεζα, τον αισθητήρα μέτρησης και το σύστημα ελέγχου ή υπολογισμού με το κατάλληλο λογισμικό μέτρησης. Μετά την τοποθέτηση ενός τεμαχίου στο τραπέζι της μηχανής,

χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας για τη μέτρηση διαφορετικών σημείων σε αυτό χαρτογραφώντας τις συντεταγμένες x, y, z . Ο αισθητήρας λειτουργεί είτε χειροκίνητα μέσω χειριστή είτε αυτόματα μέσω συστήματος ελέγχου. Αυτά τα σημεία στη συνέχεια μεταφέρονται σε μια διεπαφή υπολογιστή όπου μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας λογισμικό μοντελοποίησης (π.χ. CAD) και αλγόριθμους για περαιτέρω ανάπτυξη. (Coordinate Measuring Machines Information, n.d.)



Σχήμα 2.2-1: Μία σύγχρονη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων. (Πηγή: Keyence, 2020)

- A. Κινούμενη γέφυρα
- B. Αισθητήρας
- Γ. Τράπεζα
- Δ. Ελεγκτής

Συνήθως, τα περισσότερα CMM είναι τύπου γέφυρας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2-1. Στην άκρη του αισθητήρα είναι εφαρμοσμένο ένα σφαιρικό σημείο επαφής όπου εφαρμόζει πάνω στο τεμάχιο κάθετα και οι τιμές συντεταγμένων των τριών διαστάσεων καθορίζονται και μετρώνται.

Αυτές οι μηχανές μέτρησης χρησιμοποιούνται κυρίως για τρισδιάστατη μέτρηση μητρών όπως εξαρτήματα αυτοκινήτων και διαφόρων άλλων μηχανικών μερών, καθώς και για μέτρηση των διαφορών που προκύπτουν από σχέδια.(Keyence,2020)

Για τη σωστή λειτουργία μιας μηχανής CMM:

- 1) Είναι απαραίτητη η τοποθέτηση του αντικείμενου μέτρησης στο εργαστήριο μετρολογίας για τουλάχιστον 5 ώρες πριν από τη μέτρηση ώστε το αντικείμενο να προσαρμοστεί σε θερμοκρασία δωματίου (20–22 °C). Αυτό θα αποτρέψει σφάλματα μέτρησης και αποκλίσεις λόγω θερμικής διαστολής.
- 2) Χρειάζεται να κατευθύνουμε τον αισθητήρα στην επιθυμητή θέση μέτρησης χειροκίνητα ή με έναν υπολογιστή ελέγχου. Το CMM θα καταγράψει τις συντεταγμένες (x, y, z) της θέσης του αισθητήρα. Καθώς συνεχίζεται η λήψη σημείων, το λογισμικό του συστήματος θα υπολογίζει καθορισμένες διαστάσεις όπως διαμέτρους, μήκη, γωνίες και άλλες κρίσιμες διαστάσεις.
- 3) Πρέπει να έχει πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση στη γραφίδα, στο άκρο του αισθητήρα, που έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο για να ξεκινήσει με ακρίβεια η μέτρηση. Αυτό συμβαίνει για να αναγνωριστούν οι σφαιρικές συντεταγμένες του κέντρου της γραφίδας. Έπειτα ρυθμίζοντας τη διάμετρο σφαίρας της γραφίδας, είναι δυνατός ο υπολογισμός μετατοπίζοντας την ακτίνα από το σημείο που αγγίζει πραγματικά (εκτός της σφαίρας) στις συντεταγμένες του κέντρου της σφαίρας. Για τη βαθμονόμηση, χρησιμοποιείται γενικά μια σφαίρα με γνωστή σφαιρικότητα, γνωστή ως σφαίρα αναφοράς.
- 4) Η σωστή χρήση και διαχείριση είναι ζωτικής σημασίας για την ακρίβεια των μετρήσεων. Απαιτείται βεβαίωση ότι τα κινούμενα μέρη κινούνται σωστά οριζόντια και κάθετα κατά τη χρήση. Επίσης, σημαντική είναι η χρησιμοποίηση ενός προτύπου μέτρησης ή ενός παρόμοιου αντικείμενου για τον έλεγχο για σφάλματα ένδειξης. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν ακριβείς μετρήσεις, είναι κρίσιμο να επιτρέπεται η προσαρμογή της θερμοκρασίας του αντικείμενου στη θερμοκρασία δωματίου στο εργαστήριο μετρολογίας. Εναλλακτικά, οι παράμετροι μέτρησης πρέπει να ρυθμιστούν ώστε να διορθώνεται η οποιαδήποτε διαφορά θερμοκρασίας. Για τους

αισθητήρες αφής, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι ο αισθητήρας κινείται με σταθερή ταχύτητα κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

- 5) Τα CMM απαιτούν τακτική συντήρηση και επιθεώρηση προκειμένου να οι μετρήσεις να παραμένουν υψηλής ακριβείας. Είναι απαραίτητο να αντικαθίστανται τακτικά τα φθαρμένα εξαρτήματα, να λιπαίνεται η μηχανή και να καθαρίζεται το σύστημα ώστε να διατηρείται βέλτιστη απόδοση. (Keyence, 2020)

Τα CMM μπορούν να εκτελούν διαφορετικούς τύπους μετρήσεων. Σε αυτούς περιλαμβάνονται:

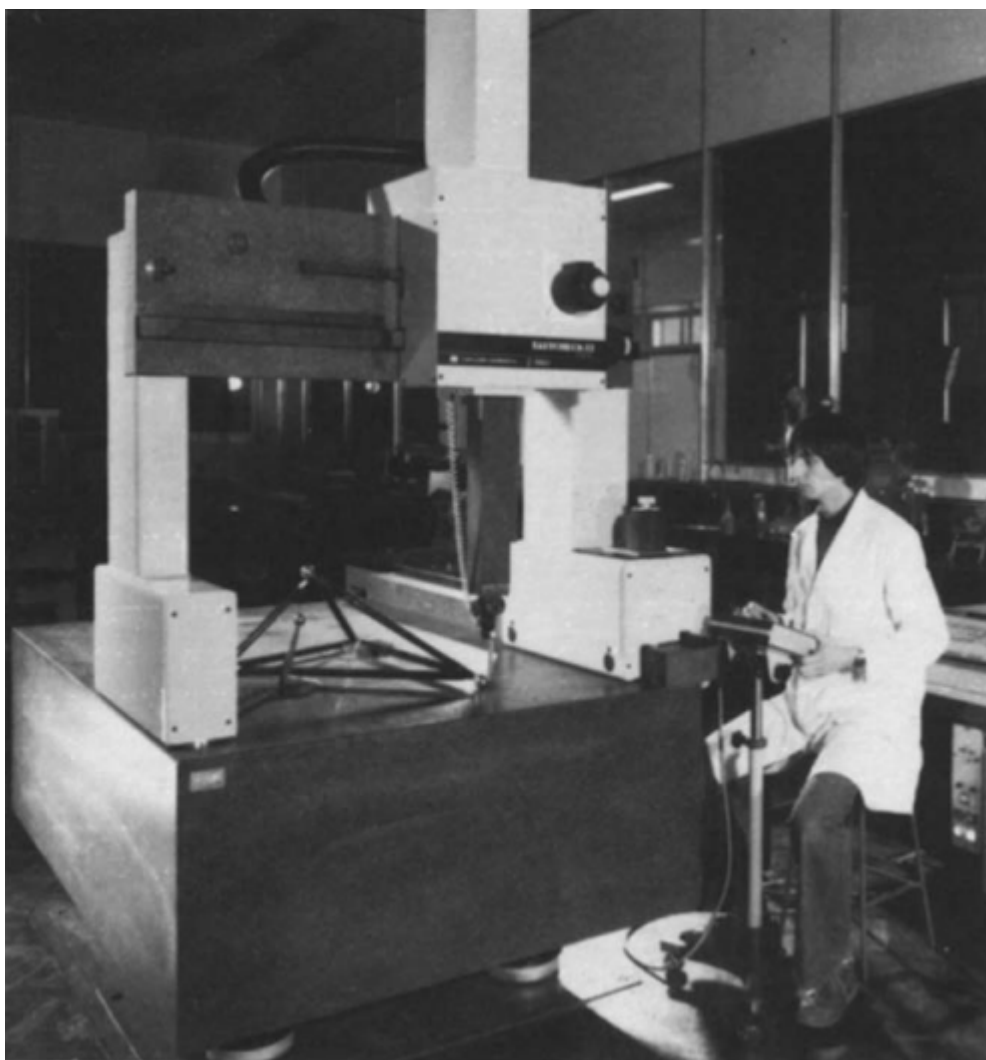
- Οι μετρήσεις διαστάσεων, οι οποίες είναι μετρήσεις μεγέθους που γίνονται στις κατευθύνσεις x , y και z .
- Οι μετρήσεις μορφής, οι οποίες πραγματοποιούνται για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με τη μορφή ενός αντικείμενου. Αυτές οι μετρήσεις μπορεί να είναι 2D ή 3D, ανάλογα με τις δυνατότητες του μηχανήματος.
- Οι μετρήσεις γωνίας ή προσανατολισμού, που πραγματοποιούνται για την καταγραφή πληροφοριών γωνίας μεταξύ σημείων σε ένα αντικείμενο.
- Η χαρτογράφηση βάθους, η οποία εκτελείται μετρώντας τη διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών εικόνων της ίδιας σκηνής που λαμβάνονται σε ελαφρώς διαφορετικές γωνίες. Τα αντικείμενα πιο μακριά θα μετακινηθούν σχετικά λίγο από τη μια εικόνα στην άλλη, ενώ τα πιο κοντινά αντικείμενα θα μετακινηθούν σε μεγαλύτερο βαθμό. Στη συνέχεια δημιουργείται ένας χάρτης βάθους, με αποτέλεσμα μια ενιαία εικόνα που χρησιμοποιεί διαφορετικές εντάσεις για να αναπαραστήσει τα διαφορετικά βάθη.
- Η ψηφιοποίηση ή η απεικόνιση, όπου το τελικό αποτέλεσμα είναι μια ψηφιακή μορφή ή εικόνα της γεωμετρίας του τεμαχίου από τις μετρήσεις που έγιναν από το CMM.
- Οι μετρήσεις αξόνων, οι οποίες είναι μετρήσεις για συγκεκριμένες εφαρμογές που πραγματοποιούνται από το CMM όπου έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την επιθεώρηση αξόνων. (Coordinate Measuring Machines Information, n.d.)

Μία παράμετρος υψηλού επιπέδου που είναι απαραίτητη, είναι η επαναληψιμότητα της τοποθέτησης. Χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της αυτοβαθμονόμησης, είναι δυνατό να βελτιωθεί γρήγορα και με μικρό κόστος η ποιότητα των μετρήσεων του CMM.

Για να αυξηθεί η ακρίβεια των CMM μπορούν να εφαρμοστούν δύο κυρίως προσεγγίσεις: (α) αύξηση της μηχανικής ακρίβειας μιας μηχανής. (β) διόρθωση των υφιστάμενων σφαλμάτων, χρησιμοποιώντας λογισμικό υπολογιστή στον έλεγχο του μηχανήματος.

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις

Οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM) είναι όργανα μέτρησης υψηλής ακρίβειας που χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση και την αξιολόγηση της ποιότητας των κατασκευασμένων εξαρτημάτων. Αυτά τα μηχανήματα χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα για τη μέτρηση των διαστάσεων και της γεωμετρίας των εξαρτημάτων και παρέχουν λεπτομερή δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της ακρίβειας της κατασκευαστικής διαδικασίας. Η απόδοση των CMM είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της ποιότητας και της συνέπειας των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται, καθώς και για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της γραμμής παραγωγής. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα των μετρήσεων που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας ένα CMM και είναι σημαντικό να γνωρίζουμε αυτούς τους παράγοντες προκειμένου να βελτιστοποιήσουμε την απόδοση του μηχανήματος.



Σχήμα 2.3-1: Ένα τυπικό σχέδιο μιας μηχανής μέτρησης συντεταγμένων (CMM).

(Πηγή: Harvie, 1986)

Ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων CMM είναι ο ίδιος ο αισθητήρας. Ο αισθητήρας είναι το μέρος του μηχανήματος που έρχεται σε επαφή με το εξάρτημα που μετράται και είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση των δεδομένων μέτρησης στον υπολογιστή του μηχανήματος. Ο αισθητήρας πρέπει να είναι εξαιρετικά ακριβής για να διασφαλίζεται ότι οι μετρήσεις που λαμβάνονται είναι αξιόπιστες. Ο τύπος του αισθητήρα που χρησιμοποιείται, το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται και η κατάστασή του μπορούν όλα να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας κατασκευασμένος από σκληρότερο υλικό θα είναι λιγότερο επιρρεπής στη φθορά και την παραμόρφωση από έναν

αισθητήρα κατασκευασμένο από ένα μαλακότερο υλικό, ο οποίος μπορεί να είναι πιο επιρρεπής στο ξύσιμο της επιφάνειας του εξαρτήματος που μετράται.

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των μετρήσεων CMM είναι το θερμικό περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί το μηχάνημα. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία μπορεί να προκαλέσουν διαστολή ή συστολή του μηχανήματος, κάτι που με τη σειρά του μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για μηχανήματα που είναι μεγάλα ή έχουν μεγάλο περίβλημα εργασίας, καθώς είναι πιο ευαίσθητα σε αλλαγές που σχετίζονται με τη θερμοκρασία. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να διατηρείται ένα σταθερό θερμικό περιβάλλον γύρω από το μηχάνημα και να παρακολουθείται και να διορθώνονται τυχόν αλλαγές στη θερμοκρασία που ενδέχεται να προκύψουν. (Krawczyk,Gąska,Sładek, 2015)

Η μηχανική σταθερότητα του CMM είναι επίσης ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται. Το μηχάνημα πρέπει να είναι στερεωμένο με ασφάλεια σε μια στιβαρή και επίπεδη επιφάνεια και τυχόν κραδασμοί ή κινήσεις του μηχανήματος μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται. Επομένως, είναι σημαντικό να διατηρείται το μηχάνημα σε καλή μηχανική κατάσταση και να διασφαλίζεται ότι είναι σταθερά τοποθετημένο σε επίπεδη επιφάνεια. Επιπλέον, το μηχάνημα θα πρέπει να βαθμονομείται τακτικά για να διασφαλίζεται ότι η ακρίβειά του παραμένει εντός των καθορισμένων ορίων.

Το λογισμικό και το υλικό που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του CMM διαδραματίζουν επίσης κρίσιμο ρόλο στον προσδιορισμό της ακρίβειας των μετρήσεων που λαμβάνονται. Ο υπολογιστής που ελέγχει το μηχάνημα πρέπει να είναι γρήγορος και αξιόπιστος και το λογισμικό πρέπει να μπορεί να ελέγχει με ακρίβεια την κίνηση του αισθητήρα και να καταγράφει τα δεδομένα μέτρησης. Η ακρίβεια των αλγορίθμων λογισμικού που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των δεδομένων μέτρησης μπορεί επίσης να επηρεάσει την ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να διασφαλίζεται ότι το λογισμικό και το υλικό που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του CMM είναι υψηλής ποιότητας και ενημερώνονται τακτικά για να είναι σίγουρο ότι λειτουργούν σωστά.

Τέλος, ο χειριστής του CMM μπορεί επίσης να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται. Ο χειριστής πρέπει να είναι εκπαιδευμένος στη σωστή χρήση του μηχανήματος και να είναι εξοικειωμένος με το λογισμικό και το υλικό του

μηχανήματος. Ο χειριστής πρέπει επίσης να γνωρίζει τους διάφορους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται και πρέπει να λάβει μέτρα για να ελαχιστοποιήσει την επίδρασή τους. Για παράδειγμα, ο χειριστής θα πρέπει να είναι προσεκτικός ώστε να αποφεύγει την τοποθέτηση του αισθητήρα σε θέση που είναι πιθανό να προκαλέσει κάμψη ή παραμόρφωση στο αντικείμενο προς μέτρηση, καθώς αυτό μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των μετρήσεων που λαμβάνονται.

Συμπερασματικά, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια της μέτρησης εξαρτημάτων στη μηχανή μέτρησης συντεταγμένων, συμπεριλαμβανομένης της ποιότητας του μηχανήματος, του περιβάλλοντος στο οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση, του λογισμικού και του υλικού που χρησιμοποιείται καθώς και της εμπειρίας και της τεχνογνωσίας του χειριστή. Προκειμένου να επιτευχθούν ακριβείς και υψηλής ποιότητας μετρήσεις, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη όλοι αυτοί οι παράγοντες και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπός τους. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει επένδυση σε εξοπλισμό υψηλής ποιότητας, έλεγχο του περιβάλλοντος στο οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση, χρήση εξειδικευμένου λογισμικού και υλικού, καθώς και εκπαίδευση των χειριστών ώστε να διαθέτουν τις απαραίτητες δεξιότητες και τεχνογνωσία. (A. Harvie, 1986)

Κεφάλαιο 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναπτύξουμε μεθόδους και διαφορετικούς τρόπους αντιμετώπισης με σκοπό την βελτίωση της ακρίβειας που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με τις μηχανές μέτρησης συντεταγμένων.

Η βελτίωση της ακρίβειας μιας μηχανής μέτρησης συντεταγμένων (CMM) είναι σημαντική προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα και η συνέπεια των προϊόντων σε βιομηχανίες όπως η κατασκευαστική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική. Υπάρχουν πολλά βήματα που μπορούν να γίνουν για τη βελτίωση της ακρίβειας ενός CMM, συμπεριλαμβανομένης της τακτικής συντήρησης, της σωστής εκπαίδευσης και της χρήσης του σωστού λογισμικού και η χρήση διαφόρων εξαρτημάτων.

Μια βασική πτυχή της διατήρησης της ακρίβειας ενός CMM είναι η τακτική συντήρηση και βαθμονόμηση. Αυτό περιλαμβάνει τον έλεγχο και τη ρύθμιση των διαφόρων στοιχείων του CMM, όπως ο αισθητήρας, η πλατφόρμα και η μονάδα ελέγχου, για να διασφαλιστεί ότι λειτουργούν σωστά και με ακρίβεια. Είναι επίσης σημαντικό να ελέγχεται για τυχόν φθορά ή ζημιά, να αντικαθίστανται και να επισκευάζονται τυχόν εξαρτήματα που δεν λειτουργούν σωστά. Η τακτική συντήρηση και η βαθμονόμηση μπορούν να βοηθήσουν στην αποφυγή σφαλμάτων και να διασφαλίσουν την ακρίβεια του CMM με την πάροδο του χρόνου.

Η σωστή εκπαίδευση των χειριστών CMM είναι επίσης σημαντική για τη διασφάλιση της ακρίβειας της CMM. Αυτό περιλαμβάνει την παροχή λεπτομερών οδηγιών στους χειριστές σχετικά με τη σωστή ρύθμιση και χρήση του CMM, καθώς και τον τρόπο ερμηνείας και ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Είναι επίσης σημαντικό να παρέχεται στους χειριστές τακτική εκπαίδευση και ενημερώσεις σχετικά με νέες τεχνικές και τεχνολογίες που μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια του CMM.

Εκτός από την τακτική συντήρηση και εκπαίδευση, η χρήση του κατάλληλου λογισμικού και εξαρτημάτων μπορεί επίσης να βελτιώσει την ακρίβεια ενός CMM. Για παράδειγμα, η χρήση λογισμικού που έχει σχεδιαστεί ειδικά για CMM, όπως το λογισμικό μετρολογίας, μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων παρέχοντας προηγμένες δυνατότητες και εργαλεία. Επιπλέον, η χρήση εξειδικευμένων εξαρτημάτων, όπως αισθητήρες με αντιστάθμιση θερμοκρασίας και στερέωση ακριβείας, μπορεί να

βοηθήσει στη βελτίωση της ακρίβειας του CMM μειώνοντας τις επιπτώσεις εξωτερικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία και οι κραδασμοί.

Συνολικά, υπάρχουν πολλά βήματα που μπορούν να γίνουν για να βελτιωθεί η ακρίβεια ενός CMM. Η τακτική συντήρηση και η βαθμονόμηση, η σωστή εκπαίδευση των χειριστών και η χρήση του σωστού λογισμικού και εξαρτημάτων μπορούν όλα να βοηθήσουν στη διασφάλιση της ακρίβειας και της συνέπειας των μετρήσεων που λαμβάνονται από το CMM και, συνεπώς, στη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων σε βιομηχανίες που βασίζονται σε ακριβείς μετρήσεις.

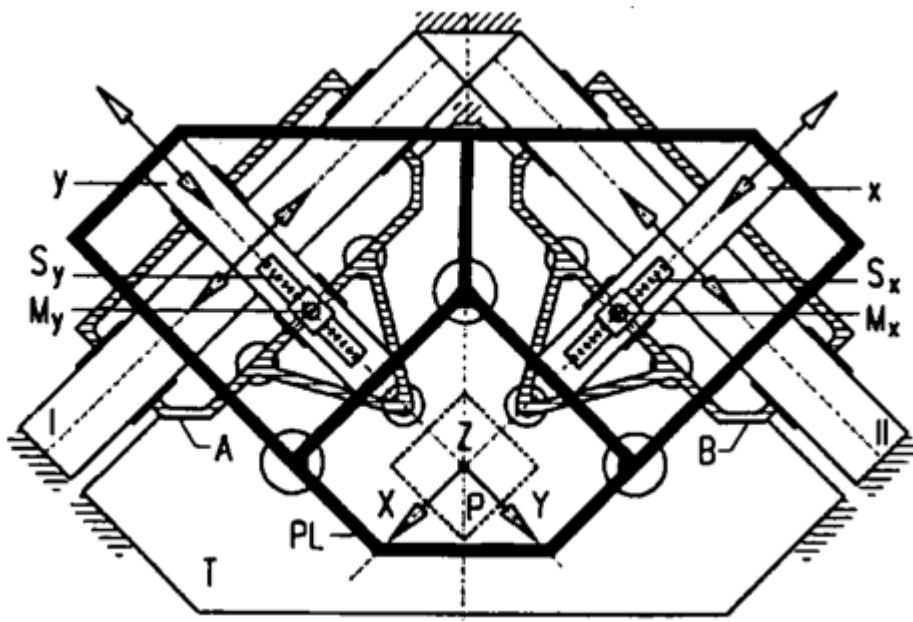
3.1 Σχεδιασμός μιας Υψηλής Ακρίβειας Μηχανής Μέτρησης Συντεταγμένων

Οι αυστηρότερες ανοχές και η μείωση των μεγεθών των προϊόντων απαιτεί μηχανές μέτρησης συντεταγμένων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι ανακρίβειες στις μετρήσεις των CMM προέρχονται συνήθως από γεωμετρικά σφάλματα των οδηγών και από παραμορφώσεις των εξαρτημάτων της μηχανής λόγω πεπερασμένης ακαμψίας, αδράνειας και μεταβολών της θερμοκρασίας. Για τη βελτίωση της ακρίβειας των μηχανών μέτρησης συντεταγμένων οι M. P.A. Vermeulen, P.C. J.N. Rosielle και P. H. J. Schellekens του Πανεπιστημίου Τεχνολογίας του Αϊντχόφεν σχεδίασαν έναν εναλλακτικό 3-D CMM υψηλής ακρίβειας με μέτρηση αβεβαιότητας κάτω από 0,1 μm σε όγκο μέτρησης 1 dm.

Για να επιτευχθεί μια τέτοια ελαφριά και άκαμπτη κατασκευή χρειάζονται έδρανα αντισταθμισμένου αέρα και καλά τοποθετημένοι γραμμικοί κινητήρες ώστε να έχουμε υψηλή ακαμψία και ευνοϊκή δυναμική συμπεριφορά. Για να αντιμετωπιστούν οι αλλαγές στη θερμοκρασία χρειάζεται στατικά προσδιορισμένος σχεδιασμός, εκτεταμένη χρήση αλουμινίου και μηχανική αντιστάθμιση θερμότητας. Ένα σύστημα απομόνωσης κραδασμών είναι απαραίτητο για την αποφυγή των μηχανικών διαταραχών. Πολύ σημαντική είναι η αποφυγή των περιστροφικών σφαλμάτων που προκαλούνται από τη μηχανική σχεδίαση και η εφαρμογή διόρθωσης μέσω λογισμικού για τα υπόλοιπα σφάλματα μετάδοσης. Με την ελαχιστοποίηση των προς διόρθωση μεγεθών γίνεται εφικτή μια υψηλότερη ακρίβεια μέτρησης. (Breyer, K.H., Pressel, H.G., 1991)

Για το σχεδιασμό μιας τέτοια μηχανής δίνεται πολύ προσοχή στην ικανοποίηση της της συνθήκης του Abbe, η οποία αναφέρει ότι “Η μέγιστη ακρίβεια επιτυγχάνεται όταν η

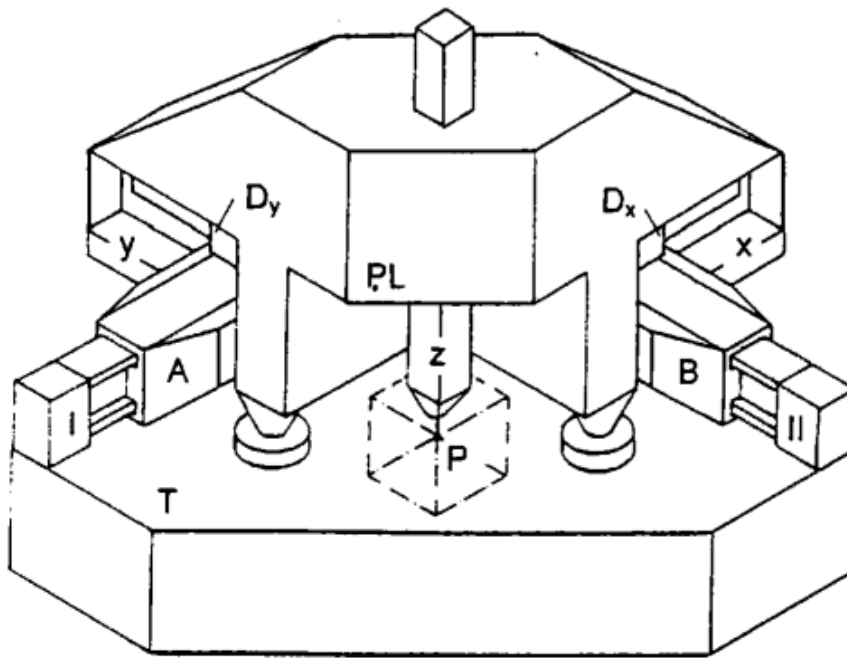
κλίμακα και οι άξονες μέτρησης είναι κοινοί”, καθώς και στη συνθήκη του Bryan “Το σύστημα μέτρησης της ευθύτητας πρέπει να ευθυγραμμίζεται με το λειτουργικό σημείο του οποίου η ευθύτητα πρόκειται να μετρηθεί.” Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ξεχωριστά ενδιάμεσα σώματα στις διευθύνσεις x και y καθώς και δοκοί διασταύρωσης (Bryan, J.B., 1979). Στο σχήμα 3.1-1 φαίνονται οι κλίμακες x και y (S_x και S_y) που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μέτρησης και στηρίζονται σε ορθογώνιες δοκούς (x και y), συνδεδεμένες με τον αισθητήρα (P) μέσω μιας κινούμενης πλατφόρμας (PL). Οι δοκοί κινούνται μέσα από τα αντίστοιχα ενδιάμεσα σώματα (A και B), όπου το καθένα φέρει μια κεφαλή μέτρησης (M_x και M_y). Αυτά τα σώματα μπορούν να κινούνται κατά μήκος των αντίστοιχων δοκών οδήγησης (I και II) που τοποθετούνται σε βάση.



Σχήμα 3.1-1: Κάτοψη του προτεινόμενου 3D-CMM.

(Πηγή: Vermeulen, Rosielle & Schellekens, 1998)

Οι κλίμακες είναι πάντα ευθυγραμμισμένες με την κίνηση του αισθητήρα, επομένως η μέτρηση χωρίς σφάλματα τύπου Abbe είναι δυνατή στο οριζόντιο μεσαίο επίπεδο της μηχανής.



Σχήμα 3.1-2: Σχηματικό σχέδιο του προτεινόμενου 3D-CMM.

(Πηγή: Vermeulen, Rosielle & Schellekens, 1998)

Αυτός ο απλούστερος σχεδιασμός έχει μια κάθετη ολίσθηση στην πλατφόρμα που ικανοποιεί την αρχή του Abbe. Για μετρήσεις εκτός του μεσαίου επιπέδου εμφανίζονται μόνο πολύ μικρά σφάλματα. Αυτή η δομή ικανοποιεί επίσης την αρχή του Bryan σε κατεύθυνση x και y , καθιστώντας το μηχάνημα μη ευαίσθητο σε σφάλματα ευθύτητας των δοκών στήριξης της κλίμακας. Οι οδηγοί x και y συνδέονται μεταξύ της πλατφόρμας και των ενδιάμεσων σωμάτων B και αντίστοιχα A (D_x και D_y), έτσι οι κινητήριες δυνάμεις τους κατευθύνονται μέσω του κέντρου μάζας της πλατφόρμας ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα αδρανειακά περιστροφικά φαινόμενα. Ο οδηγός z είναι τοποθετημένος δίπλα στο κέντρο μάζας του πείρου. Ως εκ τούτου το σχέδιο αυτής της μηχανής μπορεί να πραγματοποιηθεί και σε μηχανές μεγάλου μεγέθους, όπου το μηχάνημα θα μπορεί να λειτουργεί ως πλατφόρμα για μια μεγάλη ποικιλία από αισθητήρες επαφής και μη.

Ο σχεδιασμός μιας υψηλής ακριβείας μέτρησης συντεταγμένων χρειάζεται να λάβει σοβαρά υπόψη τις παραμορφώσεις στο πλαίσιο της μηχανής, και να τις ελαχιστοποιεί, για αυτό η δυναμική και θερμομηχανική συμπεριφορά είναι εξαιρετικά σημαντικές.

Δυναμική συμπεριφορά

Τα εξαρτήματα του πλαισίου της μηχανής κατασκευάζονται από αλουμίνιο λόγω της εξαιρετικής θερμικής συμπεριφοράς, της εύκολης δυνατότητας απόκτησης του αλλά και της σχετικά εύκολης μηχανικής του επεξεργασίας, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό. Αυτά τα εξαρτήματα προέρχονται από μεγάλα κομμάτια τα οποία αποκόπηκαν μέσω μηχανών CNC, αποτρέποντας έτσι την απώλεια ακαμψίας και αγωγιμότητας στις συνδέσεις των πλακών. Η μάζα και η ακαμψία των πλακών είναι ευθέως ανάλογες με το πάχος της πλάκας. Για να επιτευχθεί η ίδια ακαμψία μιας κατασκευής αλουμινίου σε σχέση με μία από χάλυβα, το πάχος της πλάκας τριπλασιάζεται λόγω της μικρότερης πυκνότητάς της. Ως αποτέλεσμα, η δυναμική συμπεριφορά της εγκάρσιας πλάκας είναι σημαντικά βελτιωμένη.

Θερμομηχανική συμπεριφορά

Ο κύριος λόγος που προτιμήθηκε το αλουμίνιο από τον χάλυβα για το πλαίσιο της μηχανής είναι η εξαιρετική του θερμική συμπεριφορά. Η θερμική ευαισθησία για τις κλίσεις α/λ του αλουμινίου είναι 2,1 φορές μικρότερη από τον χάλυβα (0.21 W/mK του αλουμινίου έναντι χάλυβα 0.10 W/mK). Το αλουμίνιο επίσης έχει θερμική αγωγιμότητα 4,6 φορές καλύτερη καθώς επίσης και θερμική διάχυση 5,9 φορές καλύτερη από ότι ο χάλυβας. Γι' αυτό δεν είναι πιθανό να εμφανιστούν κλίσεις σε αυτό. Το αλουμίνιο ωστόσο έχει υψηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, ο οποίος επηρεάζει την ευαισθησία της μηχανής στις αλλαγές της θερμοκρασίας. Για να ελαχιστοποιηθεί η ευαισθησία της μηχανής σε αυτές τις αλλαγές, μειώνεται η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και των συστημάτων μέτρησης, και εφαρμόζεται μηχανική θερμική αντιστάθμιση μήκους για όλους τους κύριους άξονες. Για τον άξονα z επιλέγονται διαφορετικά υλικά ώστε να αντισταθμίζουν τις θερμικές διαστολές.

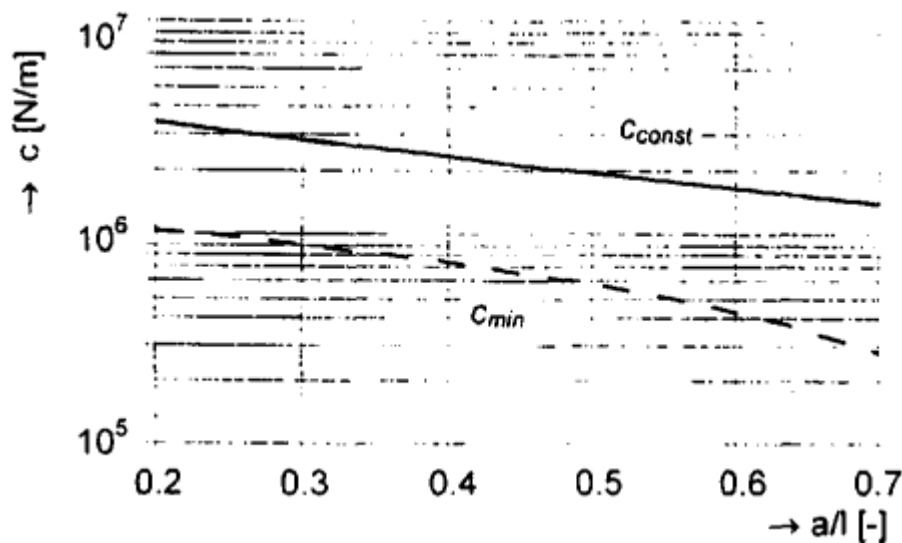
Επιλέγεται μια επιτραπέζια βάση από γρανίτη λόγω την υψηλής επιπεδότητας της επιφάνειας του και παρά την κακή του θερμική συμπεριφορά. Τα σφάλματα λόγω θερμότητας μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με αρκετούς τρόπους όπως:

- Η χρήση τηλεχειριστηρίου κίνησης, ώστε να θωρακίζεται το μηχάνημα από τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει ο χειριστής.
- Η μικρή παραγωγή θερμότητας στους οδηγούς λόγω της υψηλής σταθεράς του οδηγού και της μικρής ηλεκτρικής αντίστασης.

- Οι παραμορφώσεις πάνω στη βάση από γρανίτη θα είναι ελάχιστες λόγω απομόνωσης γύρω από το μηχάνημα.
- Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας δωματίου περιορίζονται σε αυτές που ισχύουν σε κανονικές εργαστηριακές συνθήκες.

Έδρανα κύλισης αέρα

Για όλες τις επιφάνειες επιλέχθηκαν έδρανα κύλισης αέρα προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια καθοδήγησης και η τριβή να είναι αμελητέα. Για τη βελτιστοποίηση της ακαμψίας, αναπτύχθηκαν παθητικής αντιστάθμισης έδρανα ώθησης. Για αυτή τη CMM επιλέχθηκαν δύο διαφορετικά έδρανα κύλισης, ένα με διάμετρο 40mm και ένα με 60mm. Για τη διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς των εδράνων αέρα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κραδασμών στο z-άξονα του CMM. Αυτές οι δοκιμές έδειξαν ότι η ελάχιστη ακαμψία c_{min} στο ρύγχος για τη μεσαία θέση προκύπτει στα 217 Hz, που είναι η πρώτη φυσική συχνότητα του συστήματος. Στην περιοχή συχνοτήτων από 5 έως 100 Hz η ακαμψία είναι περίπου σταθερή, όπως περιγράφεται από την c_{const} . Κάτω από τα 5 Hz η ακαμψία αυξάνεται τρομερά σε άπειρη για στατικές καταστάσεις. Η εξάρτηση του c_{const} από το επίπεδο προφόρτισης είναι μικρή. Φαίνεται έτσι ότι ο μηχανισμός αντιστάθμισης στα έδρανα κύλισης αέρα δεν μπορεί να ακολουθήσει καλά κραδασμούς πάνω από 5 Hz. Ωστόσο, για στατικές δυνάμεις επιτυγχάνεται ένα τεράστιο κέρδος ακαμψίας σε σχέση με τα συμβατικά έδρανα κύλισης, χρησιμοποιώντας έδρανα κύλισης διαμέτρου μόνο 40 mm. Για επίπεδο προφόρτισης 250 N ανά έδρανο (βέλτιστη στατική ακαμψία) οι τιμές δυναμικής ακαμψίας c_{min} και c_{const} φαίνονται στο Σχήμα 3.1-3 ως συνάρτηση του αδιάστατου προεξέχοντος μήκους: a/l



Σχήμα 3.1-3: c_{min} και c_{const} με a/l όπου προφόρτωση $F_p = 250 N$

(Πηγή: Vermeulen, Rosielle & Schellekens, 1998)

Για μεγάλο μήκος η ακαμψία στη μύτη του πυλώνα c_{nose} μειώνεται σημαντικά σε σχέση με την ακαμψία του εδράνου c .

Έδρανα κύλισης προφόρτισης

Σχεδιάστηκε ένα πολύ συμπαγές έδρανο προφόρτισης με ενσωματωμένο πνευματικό ελατήριο. Το πνευματικό ελατήριο είναι ένας θάλαμος αέρα στην παροχή του αέρα πίσω από το δίσκο του εδράνου. Η πίεση και η διάμετρος του θαλάμου επιλέγονται για ένα δεδομένο επίπεδο προφόρτισης ενός εδράνου μεμβράνης. Το έδρανο μεμβράνης και το έδρανο προφόρτισης τοποθετούνται απέναντι το ένα από το άλλο για να αποφευχθεί η κάμψη του οδηγού. Σε περίπτωση πτώσης πίεσης, το έδρανο αποδυναμώνεται, προστατεύοντας τον οδηγό από ζημιά λόγω επαφής.

Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Οι γραμμικοί ηλεκτροκινητήρες έχουν πολύ πιο ευνοϊκές ιδιότητες σε σχέση με τους συμβατικούς, για αυτό και προτιμούνται για τις μηχανές υψηλής ακριβείας. Αυτές οι ιδιότητες έχουν να κάνουν με υψηλά δυναμικά χαρακτηριστικά, υψηλό εύρος ζώνης σερβομηχανισμού, απλό σχεδιασμό και αμελητέα τριβή και αντίδραση. Αυτοί οι κινητήρες χρησιμοποιούνται στο CMM σε ένα κλειστό σύστημα σερβομηχανισμού με κλίμακες παρεμβολής ανάλυσης της τάξεως των 5 nm για ανατροφοδότηση θέσης. Έτσι οι

πρακτικές ακρίβειες τοποθέτησης είναι περιορισμένες από τον ελεγκτή αλλά και την μηχανή και είναι εφικτά σφάλματα μέχρι μόνο 10 nm. Λόγω της υψηλής σταθεράς δύναμης, της μικρής ηλεκτρικής αντίστασης και μικρών αδρανειακών δυνάμεων τροφοδοσίας, η διασπορά της ισχύος δεν ξεπερνά το 1 W.

Απομόνωση κραδασμών και ισοστάθμιση της μηχανής

Για την αποφυγή μηχανικών διαταραχών εφαρμόζεται παθητική απομόνωση αυτών των κραδασμών. Τα μεταλλικά ελατήρια αντικαθίστανται από πνευματικούς απομονωτές λόγω της ευκολίας με την οποία είναι εφικτή η προφόρτιση και η πρόσθετη απόσβεση, καθώς και την απουσία ύπουλων λειτουργιών που συνήθως υπάρχουν στα μεταλλικά ελατήρια. Επιπλέον η αυτόματη πνευματική ισοστάθμιση της μηχανής είναι μια πολύ εύκολη και γρήγορη διαδικασία που μπορεί να γίνει σε 20 δευτερόλεπτα. Οι κινήσεις του μηχανήματος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας προκαλεί μεταβολή στο φορτίο που δέχονται οι απομονωτές, και για να αποφευχθεί η κλίση του μηχανήματος είναι αναγκαία η προσθήκη ενός γρήγορου συστήματος ισοστάθμισης, με εύρος ζώνης 10 Hz. Επιλέγεται ένα μηχανικό σχέδιο με διαφορικούς επαγωγικούς αισθητήρες, προβόλους και ενεργοποιητές φωνητικών πηνίων. Η μέγιστη γωνία κλίσης που ορίζεται κατά τη διάρκεια της ρύθμισης του συστήματος ισοστάθμισης περιορίζεται στα $2 * 10^{-2} \text{ mrad}$.

Ανάλυση σφάλματος και βαθμονόμηση

Μία εκτενής ανάλυση σφαλμάτων πραγματοποιήθηκε και τα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Σωστές αρχές σχεδιασμού οδηγούν σε υψηλή στατική ακαμψία 10^7 N/m , με αποτέλεσμα να έχουμε ένα σφάλμα πεπερασμένης ακαμψίας της τάξεως των 5 nm, καθώς και ευνοϊκή δυναμική συμπεριφορά. Έχουμε χαμηλότερη φυσική συχνότητα 90 Hz και το δυναμικό σφάλμα τοποθέτησης που προκύπτει είναι 4 nm.
- Η ανακρίβεια των συστημάτων μέτρησης είναι 100 nm για μήκος μέτρησης 100 mm. Αυτό το σφάλμα μπορεί να μειωθεί με διόρθωση μέσω λογισμικού στα 20 nm.

- Η χρήση αλουμινίου και η αντιστάθμιση μηχανικού θερμικού μήκους ελαχιστοποιεί την ευαισθησία του μηχανήματος στις θερμοκρασιακές αλλαγές. Έτσι έχουμε θερμομηχανικά σφάλματα της τάξεως των 10 *nm*.
- Αυτό το σχέδιο μηχανής ικανοποιεί τις αρχές του Abbe και του Bryan, και μειώνει τα περιστροφικά σφάλματα στα 12 *nm*. Για τα υπόλοιπα σφάλματα μεταφοράς εφαρμόζεται διόρθωση σφάλματος περίπου 3 *μm*.
- Η χρήση της μεθόδου PTB μέτρησης δισδιάστατων αντικειμένων αναφοράς σε διαφορετικές επιλεγμένες θέσεις, είναι ιδανική ώστε η βαθμονόμηση να είναι ακριβής και εύκολα πραγματοποιήσιμη. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο βαθμονόμησης αναμένεται συνολική αβεβαιότητα μέτρησης 0,1 *μm* (Kunzmann, H., Trapet, E., Waldele. F., 1990).

Συμπέρασμα

Ο σχεδιασμός αυτής της υψηλής ακριβείας τρισδιάστατης μηχανής μέτρησης συντεταγμένων με όγκο μέτρησης 1 *dm*³ είναι αρκετά αντισυμβατικός σε σχέση με τα συνηθισμένα CMM. Ικανοποιούνται οι αρχές του Abbe και του Bryan, ούτως ώστε να είναι δυνατή η υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις με το να δίνεται όσο το δυνατόν λιγότερη βαρύτητα στις διορθώσεις μέσω λογισμικού. Το πιο σημαντικό είναι ότι έγινε δυνατή η αποφυγή των περιστροφικών σφαλμάτων που προκαλούνται συνήθως από τον μηχανικό σχεδιασμό, και η διόρθωση των σφαλμάτων μέσω λογισμικού χρησιμοποιείται μόνο για τα υπόλοιπα σφάλματα μεταφοράς. Η εκτίμηση της αβεβαιότητας που προκύπτει της ογκομετρικής μέτρησης είναι 0,1 *μm*. Φαίνεται έτσι ότι το σχέδιο αυτής της μηχανής CMM που σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να αυξηθεί σε μεγαλύτερου μεγέθους μηχανή πετυχαίνει τους στόχους της υψηλότερης ακρίβειας και μειωμένων σφαλμάτων που είχαν αρχικά τεθεί. (M. M. P.A. Vermeulen, P.C. J.N. Rosielle, P. H. J. Schellekens, 1998)

3.2 Μέθοδος αλγοριθμικής διόρθωσης μέσω αυτοβαθμονόμησης

Η αλγοριθμική διόρθωση των συστηματικών σφαλμάτων είναι ίσως η πιο σημαντική μέθοδος που χρησιμοποιείται διαδομένα για την βελτίωση της ακρίβειας των CMM. Για τον προσδιορισμό των σφαλμάτων του CMM χρησιμοποιείται μια ογκομετρική τεχνική και ένα τρισδιάστατο πλέγμα για να αναπαραστήσει τον όγκο εργασίας της μηχανής. Τα στοιχεία σφάλματος, τα οποία αποτελούν τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της μετρούμενης θέσης καθορίζονται για κάθε σημείο του πλέγματος. Η ογκομετρική διόρθωση σφαλμάτων συνεπάγεται παρεμβολή μεταξύ γνωστών σφαλμάτων που είναι αποθηκευμένα στο πλέγμα για τη διόρθωση σφαλμάτων σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο του όγκου εργασίας του μηχανήματος. Η μέτρηση ογκομετρικού σφάλματος αναφέρεται στη μέτρηση των σφαλμάτων σε κάθε σημείο του πλέγματος. Τα δεδομένα μέτρησης μετατρέπονται σε παραμετρική μορφή όπου παραμετρική διόρθωση σφαλμάτων πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο και εκτελείται με τη χρήση γρήγορων αλγορίθμων και επεξεργασιών.

Για να ληφθεί η συνάρτηση παραμετρικού κινηματικού σφάλματος από μετρήσεις ογκομετρικού σφάλματος, απαιτούνται τα ακόλουθα:

- καθιέρωση κινηματικού μοντέλου
- λήψη μετρήσεων ογκομετρικού σφάλματος
- προσδιορισμός συναρτήσεων παραμετρικού σφάλματος.

Η χρησιμοποίηση μιας νέας διαδικασίας για την αντιστάθμιση σφαλμάτων λογισμικού, που ονομάζεται «αυτοβαθμονόμηση» είναι απαραίτητη. Σε αυτή τη διαδικασία ένα δείγμα δεν χρειάζεται προβαθμονόμηση αλλά να είναι μόνο σταθερό κατά τις μετρήσεις των σημείων αναφοράς του. Έτσι το δείγμα μπορεί να προσαρμοστεί σε κάθε είδους μηχανή ώστε να έχει τις βέλτιστες διαστάσεις για τη διαδικασία μέτρησης.

Οι συντεταγμένες του δείγματος καταγράφονται σε διαφορετικές θέσεις του όγκου εργασίας της μηχανής που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των συντελεστών του μοντέλου, με βάση τις 18 κινηματικές συναρτήσεις. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται και καθοδηγείται από το μοντέλο των κινηματικών συναρτήσεων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αυτόματη διόρθωση των τριών συντεταγμένων του μηχανήματος.

(Donati & Canuto, 1986)

Το σφάλμα μέτρησης του CMM ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της ένδειξης $M(x_m + x_t, Y_m + Y_t, Z_m + Z_t)$ που μας δίνει το CMM, και τις «αληθινές» συντεταγμένες $P(x', y', z')$ του μετρούμενου σημείου.

$$E(m) = P - M \quad (1)$$

Το συστηματικό σφάλμα $E(M)$ περιγράφει μια παραμετρική κίνηση του αισθητήρα, στερεωμένη στο έμβολο της μηχανής. Αυτά τα σφάλματα περιγράφονται από το μοντέλο των 18 κινηματικών συναρτήσεων ή «κινηματικό μοντέλο» που είναι περισσότερο γνωστό στη βιβλιογραφία. Σύμφωνα με αυτό, η θέση σφάλματος αντιπροσωπεύεται από τρεις συνιστώσες μετάδοσης και ένα διάνυσμα τριών γωνιών Euler, συγκεκριμένα των:

- κύλιση ή περιστροφή γύρω από τον άξονα x.
- βήμα ή περιστροφή γύρω από τον άξονα y.
- εκτροπή ή περιστροφή γύρω από τον άξονα z.

Τα 18 σφάλματα μετάδοσης και περιστροφής, έξι για καθένα από τα τρία κινούμενα μέλη της μηχανής ονομάζονται κινηματικές συναρτήσεις της μηχανής. Χρησιμοποιώντας το κινηματικό μοντέλο, οι σωστές τιμές για μια δεδομένη θέση στον όγκο της μηχανής είναι:

$$x' = x_m + x_t + \delta_{xx}(x_m) + \delta_{yx}(y_m) + \delta_{zx}(z_m) + [\varepsilon_{xy}(x_m) + \varepsilon_{yy}(y_m)] \cdot z_m - \varepsilon_{xz}(x_m) \cdot y_m - [\varepsilon_{xz}(x_m) + \varepsilon_{yz}(y_m) + \varepsilon_{zz}(z_m)] \cdot y_t + [\varepsilon_{xy}(x_m) + \varepsilon_{yy}(y_m) + \varepsilon_{zy}(z_m)] \cdot z_t \quad (2)$$

$$y' = y_m + y_t + \delta_{xy}(x_m) + \delta_{yy}(y_m) + \delta_{zy}(z_m) - [\varepsilon_{xx}(x_m) + \varepsilon_{yx}(y_m)] \cdot z_m + [\varepsilon_{xz}(x_m) + \varepsilon_{yz}(y_m) + \varepsilon_{zz}(z_m)] \cdot x_t - [\varepsilon_{xx}(x_m) + \varepsilon_{yx}(y_m) + \varepsilon_{zx}(z_m)] \cdot z_t \quad (3)$$

$$z' = z_m + z_t + \delta_{xz}(x_m) + \delta_{yz}(y_m) + \delta_{zz}(z_m) + \varepsilon_{xx}(x_m) \cdot y_m - [\varepsilon_{xy}(x_m) + \varepsilon_{yy}(y_m) + \varepsilon_{zy}(z_m)] \cdot x_t + [\varepsilon_{xx}(x_m) + \varepsilon_{yx}(y_m) + \varepsilon_{zx}(z_m)] \cdot y_t \quad (4)$$

όπου $x_m, y_m, z_m =$ η συντεταγμένη που μετράει η μηχανή

$x_t, y_t, z_t =$ η συντεταγμένη συνιστώσα του διανύσματος του αισθητήρα

$\delta, \varepsilon =$ οι 18 κινηματικές συναρτήσεις

Αν οι μετρήσεις γίνουν από μόνο έναν αισθητήρα, τότε έχουμε $x_t = 0$, $y_t = 0$, $z_t = 0$ και οι εξισώσεις (2), (3) και (4) γίνονται εκ νέου

$$x' = x_m + \delta_{xx}(x_m) + \delta_{yx}(y_m) + \delta_{zx}(z_m) + [\varepsilon_{xy}(x_m) + \varepsilon_{yy}(y_m)] \cdot z_m - \varepsilon_{xz}(x_m) \cdot y_m \quad (5)$$

$$y' = y_m + \delta_{xy}(x_m) + \delta_{yy}(y_m) + \delta_{zy}(z_m) - [\varepsilon_{xx}(x_m) + \varepsilon_{yx}(y_m)] \cdot z_m \quad (6)$$

$$z' = z_m + \delta_{xz}(x_m) + \delta_{yz}(y_m) + \delta_{zz}(z_m) + \varepsilon_{xx}(x_m) \cdot y_m \quad (7)$$

Σε αυτές οι εξισώσεις οι οποίες δίνουν το συστημικό σφάλμα, πρέπει να τους δοθεί μια παραμετρική μορφή ώστε να είναι δυνατή η αποθήκευση και η χρήση τους μέσω υπολογιστή. Κάθε συνάρτηση πρέπει έτσι να περιγράφεται από μια μαθηματική παράσταση ενός πεπερασμένου αριθμού συντελεστών.

Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται οι σχέσεις

$$u = -1 + 2 \cdot \frac{x_m - (x_m)_{min}}{(x_m)_{max} - (x_m)_{min}} \quad (8)$$

$$v = -1 + 2 \cdot \frac{y_m - (y_m)_{min}}{(y_m)_{max} - (y_m)_{min}} \quad (9)$$

$$w = -1 + 2 \cdot \frac{z_m - (z_m)_{min}}{(z_m)_{max} - (z_m)_{min}} \quad (10)$$

ώστε τα διαστήματα μέτρησης (x_{min}, x_{max}) , (y_{min}, y_{max}) , (z_{min}, z_{max}) να μετατρέπονται σε $(-1, +1)$, $(-1, +1)$, $(-1, +1)$ και πλέον οι 18 κινηματικές συναρτήσεις αναπτύσσονται σε σειρά πολυωνύμων Legendre. Οι όροι που χρησιμοποιούνται για τα πολυώνυμα Legendre εξαρτώνται από α) το είδος των σφαλμάτων που πραγματοποιεί η συγκεκριμένη μηχανή, συνήθως μεταξύ 2 και 4 και β) ο αριθμός των συγκεκριμένων μετρήσεων. Εάν n είναι ο μέσος αριθμός των όρων, το $18 \times n$ δεν πρέπει να είναι περισσότερο από το ένα δέκατο των μετρούμενων σημείων.

Ο προσδιορισμός των δ^i και ε^i του παραμετρικού μοντέλου χρειάζεται την μέτρηση σημείων αναφοράς πάνω σε δείγμα 17 σφαιρών, σε διαφορετικά σημεία στον όγκο

εργασίας της CMM, ούτως ώστε να αποκτηθεί ένα ολοκληρωμένο πλέγμα μετρούμενων σημείων για την μηχανή.

Στον Πίνακα 3.2-1 στην 2η στήλη δίνονται οι 18 κινηματικές συναρτήσεις. Στην 3η στήλη δίνεται ο αριθμός των συντελεστών (i) και στην 4η στήλη οι τιμές των συντελεστών, υπολογισμένες χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των μετρήσεων από το δείγμα των 17 σφαιρών.

No	Kinematic function	Coefficients of correction	
		Number	Value
1	2	3	4
1	$\delta_{xx}(x_m) = \sum_{i=1}^{k1} \delta_{xx}^i L_i(u)$	4	0; 0.397; 0.009; -0.126
2	$\delta_{yx}(y_m) = \sum_{i=2}^{k2} \delta_{yx}^i L_i(v)$	1	-0.175
3	$\delta_{zx}(z_m) = \sum_{i=2}^{k3} \delta_{zx}^i L_i(w)$	0	
4	$\delta_{xy}(x_m) = \sum_{i=1}^{k4} \delta_{xy}^i L_i(u)$	2	0.043; 0.393
5	$\delta_{yy}(y_m) = \sum_{i=1}^{k5} \delta_{yy}^i L_i(v)$	2	-0.443; -0.010
6	$\delta_{zy}(z_m) = \sum_{i=2}^{k6} \delta_{zy}^i L_i(w)$	1	-0.691
7	$\delta_{xz}(x_m) = \sum_{i=1}^{k7} \delta_{xz}^i L_i(u)$	3	-3.579; 0.345; 0.367
8	$\delta_{yx}(y_m) = \sum_{i=1}^{k8} \delta_{yx}^i L_i(v)$	2	-2.829; -0.069
9	$\delta_{zx}(z_m) = \sum_{i=1}^{k9} \delta_{zx}^i L_i(w)$	2	0; -0.147
10	$\epsilon_{zz}(z_m) = \sum_{i=1}^{k10} \epsilon_{zz}^i L_i(u)$	3	2.942; -0.014; -1.34
11	$\epsilon_{yx}(y_m) = \sum_{i=1}^{k11} \epsilon_{yx}^i L_i(v)$	0	
12	$\epsilon_{zx}(z_m) = \sum_{i=1}^{k12} \epsilon_{zx}^i L_i(w)$	*	
13	$\epsilon_{xy}(x_m) = \sum_{i=1}^{k13} \epsilon_{xy}^i L_i(u)$	2	-4.306; -2.886
14	$\epsilon_{yy}(y_m) = \sum_{i=1}^{k14} \epsilon_{yy}^i L_i(v)$	0	
15	$\epsilon_{zy}(z_m) = \sum_{i=1}^{k15} \epsilon_{zy}^i L_i(w)$	*	
16	$\epsilon_{xz}(x_m) = \sum_{i=1}^{k16} \epsilon_{xz}^i L_i(u)$	1	2.714
17	$\epsilon_{yz}(y_m) = \sum_{i=1}^{k17} \epsilon_{yz}^i L_i(v)$	*	
18	$\epsilon_{zz}(z_m) = \sum_{i=1}^{k18} \epsilon_{zz}^i L_i(w)$	*	

* = not identified by measurements with only one probe

Πίνακας 3.2-1: Πίνακας κινηματικών εξισώσεων.

(Πηγή: Sartori, Cresto, Di Ciommo & Kancheva, 1988)

Όλα αυτά τίθενται στην πράξη με μέτρηση σε μια μηχανή μέτρησης συντεταγμένων. Ο αισθητήρας κινείται και έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο, δίνοντας ένα σήμα για την καταγραφή των τριών αξονικών θέσεων. Μετακινώντας τον αισθητήρα και καταγράφοντας τις ενδείξεις που μας δείχνει η μηχανή, αγγίζονται όλα τα προκαθορισμένα σημεία του αντικειμένου μέχρι να μετρηθούν όλες τα απαραίτητα σημεία. Για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις και να επιβεβαιωθούν οι υπολογισμένοι συντελεστές του παραμετρικού μοντέλου της κινηματικής συνάρτησης, ήταν απαραίτητες οι μετρήσεις με έναν από τους αισθητήρες και το λογισμικό για την επιθεώρηση των σημείων αναφοράς του τρισδιάστατου δείγματος. Οι προϋποθέσεις που ορίζονται για το δείγμα είναι:

- (1) Σταθερότητα κατά τις μετρήσεις.
- (2) Επιτυχής τοποθεσία σε διαφορετικές θέσεις μέσα στη μηχανή.
- (3) Να είναι δυνατή η τρισδιάστατη μέτρηση των σημείων πάνω σε αυτό.
- (4) Θερμοκρασίας παρόμοια με αυτή της CMM.
- (5) Δυνατότητα μεταφοράς.
- (6) Εύκολος καθαρισμός από τη σκόνη.

Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της μέτρησης ωστόσο χρειάζεται να:

- α) Προσδιοριστούν τα συστηματικά σφάλματα του μηχανήματος.
- β) Μείωση των τυχαίων σφαλμάτων όπως η επαναληψιμότητα και η έλλειψη σταθερότητας του CMM.
- γ) Αποφυγή της επίδρασης της θερμοκρασίας στη μέτρηση.

Η διαδικασία που ακολουθείται για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση είναι η εξής:

- (1) Κυκλικές μετρήσεις των σημείων αναφοράς (10 σημεία στον άξονα z) των σφαιρών για να αποφευχθεί η χρονική εξάρτηση των μετρήσεων.
- (2) Σταθερή δύναμη 0,075 N και σταθερή ταχύτητα.
- (3) Υπολογισμοί της μέσης τιμής των συντεταγμένων των κέντρων των σφαιρών και των αποστάσεων μεταξύ των κέντρων των σφαιρών.
- (4) Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις για μείωση των τυχαίων σφαλμάτων.
- (5) Μετρήσεις της θερμοκρασίας του δείγματος και της θερμοκρασίας της μηχανής ώστε να αποφύγουμε έναν από τους βασικότερους παράγοντες που υποβαθμίζουν την ποιότητα των μετρήσεων.

Q_z (mm)	Ident spheres	Measured value of the distance		Corrected value of the distance		D (μm)	d (μm)
		Mean value (mm)	$SD_{\max} - SD_{\min}$ (μm)	Mean value (mm)	$SD_{\max} - SD_{\min}$ (μm)		
1	2	3	4	5	6	7	8
110–111	1–2	77.5200	0.8	77.5199	0.5	0.1	0.3
	1–3	155.0467	1.0	155.0464	0.5	0.0	0.5
	1–4	232.5415	1.0	232.5413	0.4	0.1	0.5
	1–5	310.1148	1.3	310.1145	0.8	0.4	0.5
215–216	1–2	77.5181	0.9	77.5180	0.4	0.1	0.5
	1–3	155.0443	1.3	155.0443	0.8	0.0	0.5
	1–4	232.5390	1.7	232.5391	1.0	-0.1	0.7
	1–5	310.1124	2.0	310.1129	1.4	-0.5	0.6
249–250	1–2	77.5181	0.8	77.5181	0.4	0.0	0.4
	1–3	155.0445	0.9	155.0446	0.7	-0.1	0.2
	1–4	232.5393	1.4	232.5396	0.9	-0.3	0.5
	1–5	310.1126	1.9	310.1137	1.2	-1.1	0.6
293–294	1–2	77.5181	1.4	77.5179	0.6	0.2	0.9
	1–3	155.0443	1.5	155.0444	1.0	-0.1	0.5
	1–4	232.5389	1.9	232.5393	1.0	-0.5	1.0
	1–5	310.1123	2.6	310.1136	1.4	-1.3	1.2

D = Difference of the mean value of the distance without and with correction

d = Difference between ($SD_{\max} - SD_{\min}$) without and with correction

Q_z = Quota of the measured plane in z

Πίνακας 3.2-2: Μετρήσεις των σημείων αναφοράς των σφαιρών.

(Πηγή: Sartori, Cresto, Di Ciommo & Kancheva, 1988)

Οι μετρήσεις των σημείων αναφοράς των σφαιρών του δείγματος έγιναν σε τέσσερα επίπεδα πάνω στον όγκο της μηχανής. Σε κάθε επίπεδο, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για 10 θέσεις σε διαφορετικές γωνίες ως προς τους άξονες x και y .

Επειδή οι σφαίρες βρίσκονταν σε διαφορετικές αποστάσεις, έγιναν 160 έλεγχοι. Με βάση τρεις επαναλήψεις των κυκλικών μετρήσεων των συντεταγμένων των κέντρων των σφαιρών, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές της απόστασης μεταξύ των κέντρων. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 3.2-2.

Από τον Πίνακα 3.2-2 φαίνεται ότι τα μεγαλύτερα σφάλματα πραγματοποιούνται για τη μεγαλύτερη απόσταση στο υψηλότερο επίπεδο. Αυτά τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τα αναμενόμενα σφάλματα. Με την αύξηση της τιμής προς την κατεύθυνση z , το σφάλμα αυξάνεται. Αυτό οφείλεται κυρίως στα σφάλματα περιστροφής στη σχετική κίνηση της μηχανής. Μετά τη διόρθωση, τα συστηματικά σφάλματα μειώνονται δύο φορές από 2,6 μm σε 1,4 μm .

Βλέπουμε λοιπόν ότι η διόρθωση μέσω λογισμικού για τα σφάλματα των μετρήσεων της CMM επιτρέπει στον χειριστή να ανησυχεί μόνο για μία παράμετρο, την επαναληψιμότητα της τοποθέτησης. Με τη διαδικασία της αυτοβαθμονόμησης είναι δυνατή η σχετικά γρήγορη και φθηνή βελτίωση ενός CMM, ή κατά την παραγωγή, να αποφεύγεται η τελευταίας στιγμής παύσης της κατασκευής όταν επιτυγχάνεται η επαναληψιμότητα, χωρίς να χρειάζεται η περαιτέρω προσαρμογή της γραμμικότητας, της ορθογωνιότητας και της ευθύτητας. Η χρήση διορθώσεων λογισμικού αντί για χειροκίνητη διόρθωση μέσω προσαρμογών της μηχανής είναι πλέον δυνατή. (S.Sartori, P. C. Cresto, M. Di Ciommo και T. K. Kancheva,1988)

3.3 Μέθοδος αλγοριθμικής διόρθωσης μέσω αυτόματου συστήματος αντιστάθμισης σφαλμάτων

Ακόμη μία μέθοδος διόρθωσης σφαλμάτων μέσω αλγοριθμικής προσαρμογής έχει αναπτυχθεί από τους P. S. Huang and J. Ni το 1994. Αυτή η μέθοδος αυτόματης αντιστάθμισης σφαλμάτων (Multi-Degree-of-Freedom Measurement Systems ή αλλιώς MDFM) βασίζεται σε τρία συστήματα μέτρησης πολλαπλών βαθμών ελευθερίας, ένα για τον κάθε άξονα της CMM. Δύο μαθηματικά μοντέλα σφαλμάτων έχουν αναπτυχθεί για τη σύνθεση των στοιχείων σφάλματος και την πρόβλεψη των σφαλμάτων στο άκρο της γραφίδας του αισθητήρα. Εννέα από τα είκοσι-ένα στοιχεία σφάλματος μετρώνται με μη αυτοματοποιημένους μεθόδους που χρησιμοποιούν εμπορικά διαθέσιμα συστήματα μέτρησης, όπως συμβολόμετρο λέιζερ, ενώ τα υπόλοιπα δώδεκα στοιχεία σφάλματος της μηχανής μετρώνται συνδεδεμένα από τα συστήματα MDFM. Έτσι το ένα από τα δύο μοντέλα που αναπτύχθηκαν αντιστοιχεί στη συμβατική αντιστάθμιση σφαλμάτων και το άλλο στην αυτόματη αντιστάθμιση σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο. Τα σφάλματα που προβλέπονται από τα δύο αυτά μοντέλα στη συνέχεια αφαιρούνται από τις ονομαστικές συντεταγμένες του CMM, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια του.

Πραγματοποιήθηκαν ακόμη διαγώνιες δοκιμές χρησιμοποιώντας το σύστημα συμβολόμετρου λέιζερ ως αναφορά μέτρησης, προκειμένου να γίνει έλεγχος της απόδοσης των συστημάτων αντιστάθμισης σφαλμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με τη χρήση του

αυτόματου συστήματος αντιστάθμισης σφαλμάτων, η απόδοση των CMM μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, σε σύγκριση με τη χρήση του συμβατικού συστήματος αντιστάθμισης.

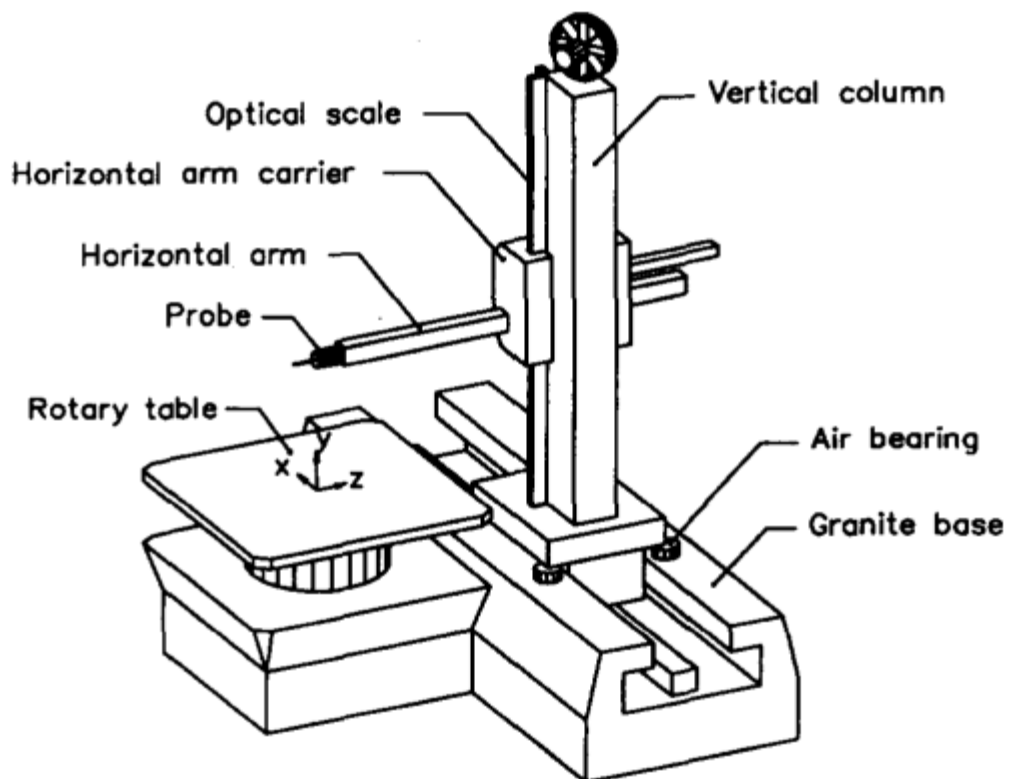
Τη δεκαετία του '70 αναπτύχθηκε η πρώτη τεχνική αντιστάθμισης σφαλμάτων που ήταν μια αποδοτική μέθοδος για τη βελτίωση της ακρίβειας των CMM. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο και έναν χάρτη σφαλμάτων για να προβλέψει τα σφάλματα στο άκρο της γραφίδας του αισθητήρα και στη συνέχεια να αντισταθμίσει τα σφάλματα αυτά. Σημαντική βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί στα ογκομετρικά σφάλματα των CMMs με προσεκτική βαθμονόμηση των γεωμετρικών σφαλμάτων του μηχανήματος και προσεκτικό έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως τη διακύμανση της θερμοκρασίας (Hocken,Simpson,Borchardt,Lazar,Reeve,Stein,1977). Ωστόσο αυτή η τεχνική ενέχει σημαντικούς περιορισμούς. Ο σημαντικότερος είναι ότι η δημιουργία ενός χάρτη σφαλμάτων απαιτεί σημαντική ανθρώπινη προσπάθεια και χρόνο. Επίσης απαιτείται το περιβάλλον να είναι καλά προστατευμένο και ελεγχόμενο προκειμένου να μειωθούν τα τυχαία και μη επαναλαμβανόμενα σφάλματα, επειδή η μη αυτόματη μέθοδος αντιστάθμισης μπορεί να αντισταθμίσει μόνο επαναλαμβανόμενα σφάλματα. Η προσέγγιση που πραγματοποίησαν για αυτό το πρόβλημα ο Huang και ο Ni είναι η ενσωμάτωση συστημάτων μέτρησης λέιζερ υψηλής ακρίβειας με ένα CMM για την παρακολούθηση των στοιχείων σφάλματος στο μηχάνημα σε πραγματικό χρόνο. Με την ταυτόχρονη μέτρηση της πλειοψηφίας των στοιχείων σφαλμάτων, μειώνεται σημαντικά ο χρόνος που απαιτείται για τη βαθμονόμηση της μηχανής CMM. Με την αυτόματη και σε πραγματικό χρόνο μέτρηση τους, τα σφάλματα εξαιτίας περιβαλλοντικών αλλαγών μπορούν να εντοπιστούν. Μετά τον εντοπισμό των σφαλμάτων, μπορούν να διορθωθούν με τη χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου σφάλματος.

Έτσι, αναπτύχθηκε ένα τέτοιο αυτόματο σύστημα αντιστάθμισης σφαλμάτων, το οποίο ενσωματώνει τρία συστήματα μέτρησης λέιζερ, το καθένα για έναν άξονα του CMM. Αυτά τα συστήματα μέτρησης μετρούν ταυτόχρονα 12 από τα 21 στοιχεία σφάλματος που σχετίζονται με το CMM, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία σφάλματος λαμβάνονται με μη αυτόματη βαθμονόμηση.

Ένα CMM αποτελείται από τρεις ορθογώνιους άξονες. Κάθε άξονας κίνησης συνοδεύεται από έξι βαθμούς ελευθερίας γεωμετρικών σφαλμάτων, τρεις από τους οποίους είναι μεταφορικούς και τρεις περιστροφικούς. Μαζί με τα σφάλματα τετραγωνισμού μεταξύ των αξόνων, υπάρχουν συνολικά 21 στοιχεία σφάλματος. Ο

συνηθισμένος τρόπος αντιστάθμισης σφαλμάτων ήταν η χρησιμοποίηση οργάνων όπως συμβολόμετρο λέιζερ για την βαθμονόμηση. Τέτοια όργανα όμως έχουν ένα μεγάλο αρνητικό, ότι μπορούν να μετρήσουν μόνο ένα ή δύο στοιχεία σφάλματος την φορά, καθιστώντας την βαθμονόμηση μία χρονοβόρα διαδικασία. Κρίνεται έτσι απαραίτητο ότι χρειάζονται νέα όργανα μέτρησης τα οποία να μπορούν να μετρήσουν πολλαπλά στοιχεία σφάλματος ταυτόχρονα. Γι' αυτό χρησιμοποιείται το πρωτότυπο σύστημα μέτρησης πολλαπλών βαθμών ελευθερίας (σύστημα MDFM).

Οι Huang και Ni χρησιμοποίησαν για τις μετρήσεις τους έναν CMM με οριζόντιο βραχίονα και ζώνη εργασίας 2000 x 1500 x 750 mm κατασκευασμένο από την εταιρεία Giddings & Lewis.



Σχήμα 3.3-1: Μηχανή μέτρησης συντεταγμένων με οριζόντιο βραχίονα.

(Πηγή: Huang & Ni, 1994)

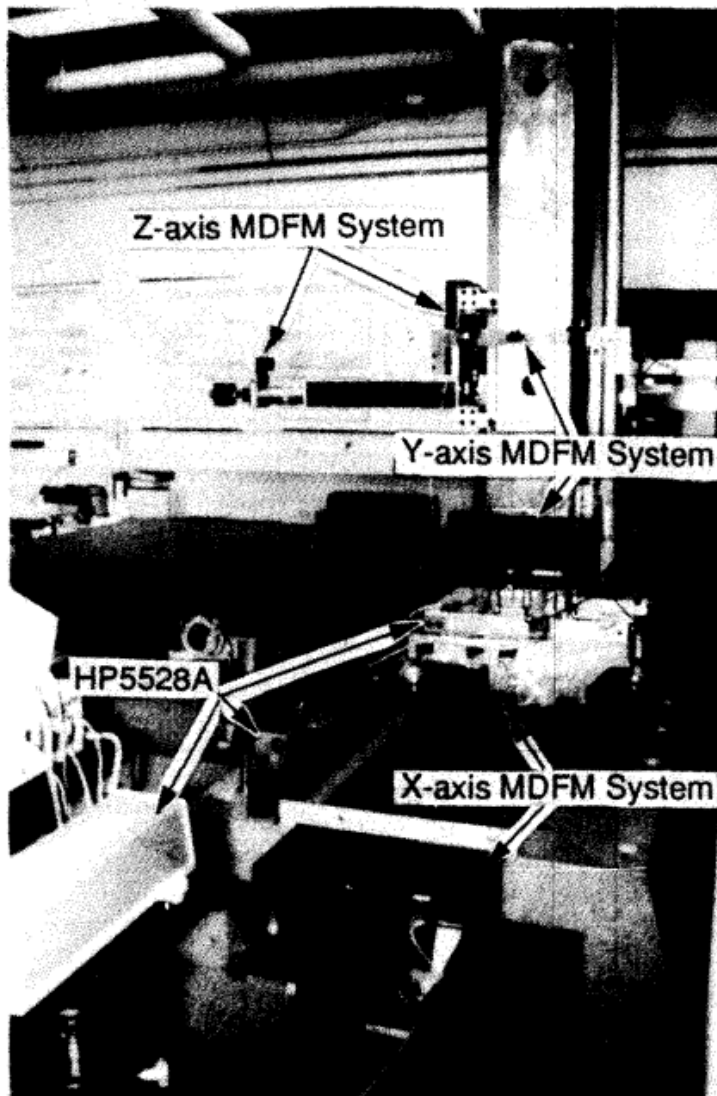
Η κάθετη στήλη κινείται κατά μήκος του άξονα x . Ο φορέας του οριζόντιου βραχίονα κινείται κατά μήκος του άξονα y στην κατακόρυφη στήλη και ο οριζόντιος βραχίονας κινείται κατά μήκος του άξονα z στον οριζόντιο φορέα βραχίονα.

Το MDFM σύστημα για τους άξονες x και y του CMM μετρά πέντε στοιχεία σφάλματος: οριζόντια ευθύτητα, κατακόρυφη ευθύτητα, βήμα, εκτροπή και κύλιση. Μία

δέσμη λέιζερ ορίζεται ως η αναφορά μέτρησης του συστήματος και έτσι η σταθερότητά της κατάδειξης είναι πολύ σημαντική για την ακρίβεια μέτρησης. Για να εξασφαλιστεί η υψηλή ακρίβεια της μέτρησης, επιλέγεται μια πηγή λέιζερ υψηλής απόδοσης με καλή σταθερότητα κατάδειξης δέσμης. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένας διαστολέας δέσμης για περαιτέρω βελτίωση της σταθερότητας και μείωση της απόκλισης δέσμης. Η πρώτη και η τρίτη δέσμη χρησιμοποιούνται για μετρήσεις ευθύτητας και κύλισης. Η δεύτερη δέσμη χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του βήματος και της εκτροπής, χρησιμοποιώντας την αρχή της αυτόματης ευθυγράμμισης με λέιζερ. Η τέταρτη δέσμη χρησιμοποιείται για αντιστάθμιση της πλευρικής μετατόπισης της δέσμης.

Στον z άξονα ωστόσο χρειάζεται απλοποίηση του συστήματος μέτρησης με μείωση του αριθμού των στοιχείων σφάλματος ώστε ο οριζόντιος βραχίονας να είναι μικρότερος σε μέγεθος και ελαφρύτερος σε βάρος. Ύστερα από ανάλυση επιλέχθηκε η οριζόντια ευθύτητα και την κατακόρυφη ευθύτητα ως στοιχεία που θα μετρηθούν αυτόματα και σε πραγματικό χρόνο. Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιείται μια δίοδος λέιζερ ως πηγή φωτός. Η απόδοση αυτού του συστήματος είναι παρόμοια με εκείνη των συστημάτων MDFM του άξονα x και y

Τα τρία MDFM συστήματα υλοποιούνται στον CMM όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.3-2.

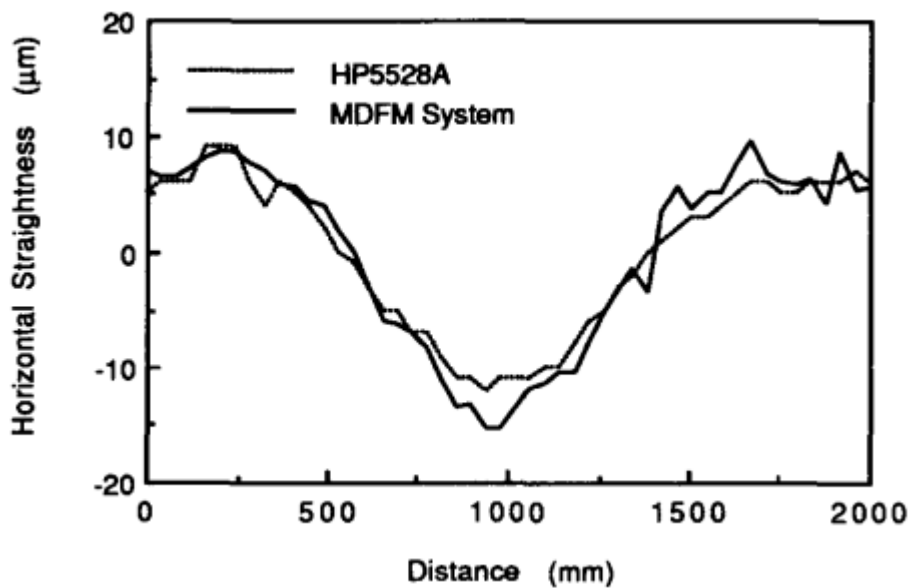


Σχήμα 3.3-2: Υλοποίηση των συστημάτων MDFM στην CMM. (Πηγή: Huang & Ni, 1994)

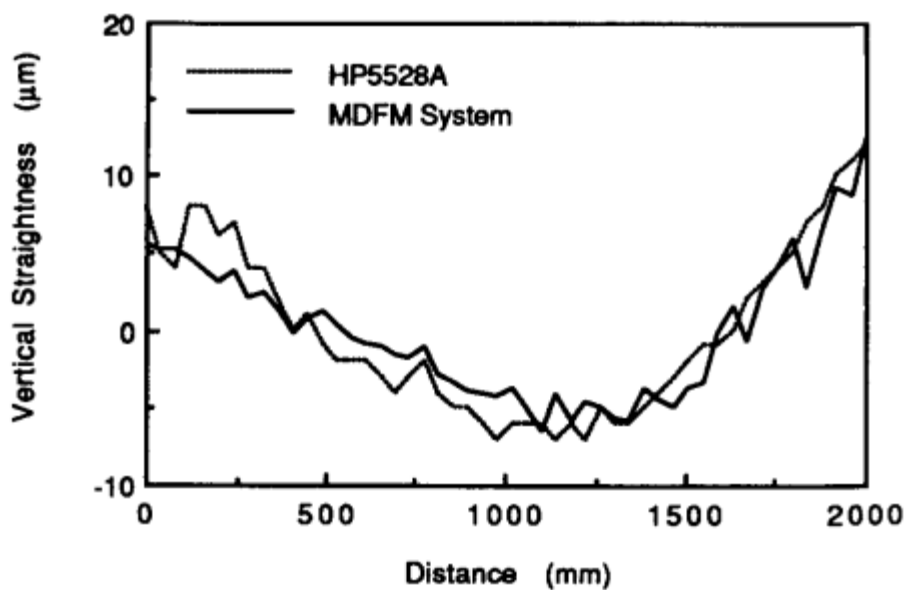
Το τμήμα αναφοράς του συστήματος MDFM του άξονα x είναι τοποθετημένο στη βάση του CMM ενώ το κινούμενο μέρος είναι τοποθετημένο στην κατακόρυφη στήλη, η οποία κινείται κατά μήκος του άξονα x . Το τμήμα αναφοράς του συστήματος MDFM του άξονα y είναι τοποθετημένο στην κατακόρυφη στήλη και το κινούμενο μέρος είναι τοποθετημένο στον φορέα του οριζόντιου βραχίονα, ο οποίος κινείται κατά μήκος του άξονα y . Το σημείο αναφοράς του συστήματος MDFM του άξονα z είναι τοποθετημένο στον φορέα του οριζόντιου βραχίονα και το κινούμενο μέρος είναι τοποθετημένο στον οριζόντιο βραχίονα, ο οποίος κινείται κατά μήκος του άξονα z . Το σύστημα MDFM του άξονα z είναι τοποθετημένο κατακόρυφα.

Για τον έλεγχο της ακρίβειας των μετρήσεων των MDFM συστημάτων, χρησιμοποιήθηκε ταυτόχρονα με τα συστήματα MDFM, ένα σύστημα συμβολόμετρου λέιζερ ώστε να πραγματοποιεί μέτρηση των στοιχείων σφάλματος του CMM και να μπορεί να γίνει η σύγκριση.

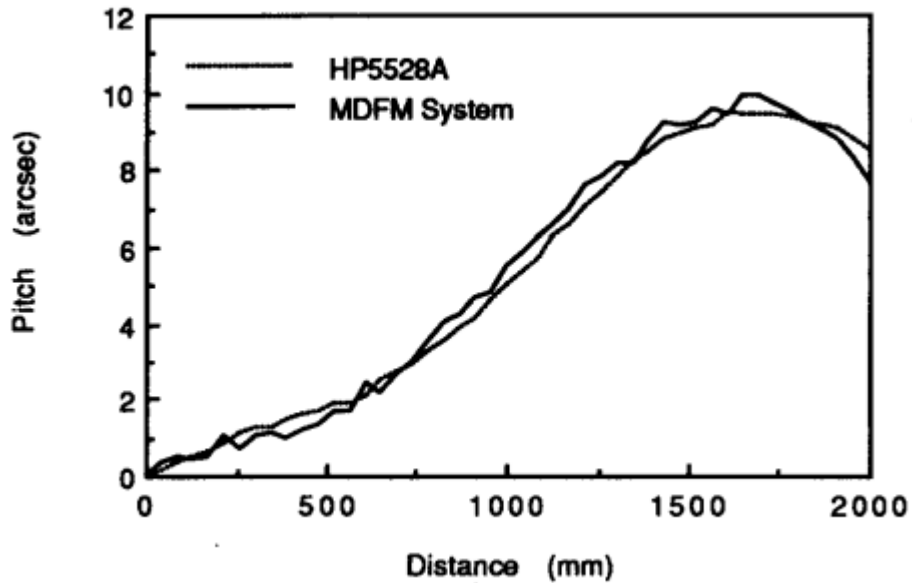
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στον άξονα x φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 3.3-3: Αποτελέσματα μέτρησης οριζόντιας ευθυγράμμισης του άξονα X .
(Πηγή: Huang & Ni, 1994)

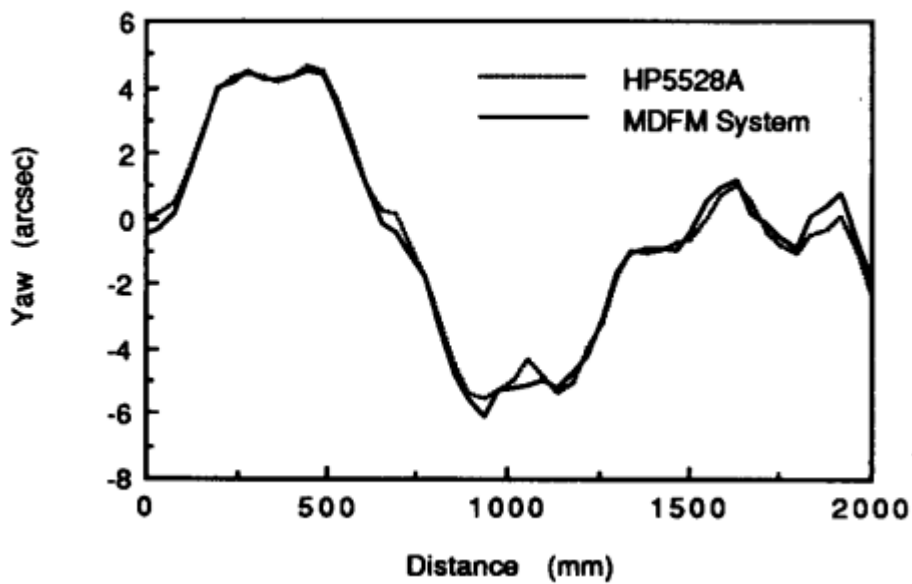


Σχήμα 3.3-4: Αποτελέσματα μέτρησης της κατακόρυφης ευθυγράμμισης του άξονα X .
(Πηγή: Huang & Ni, 1994)

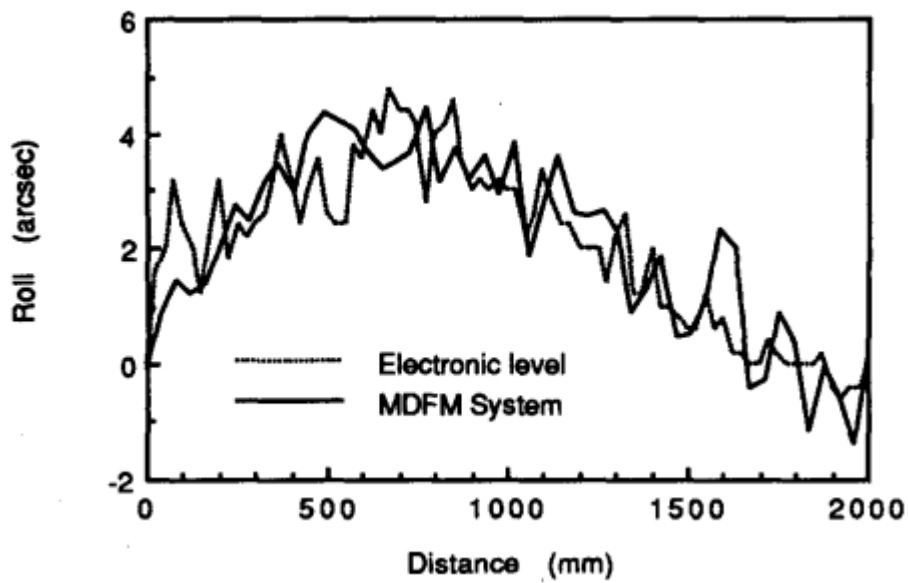


Σχήμα 3.3-5: Αποτελέσματα της μέτρησης του βήματος του άξονα X.
(Πηγή: Huang & Ni, 1994)

Τα δύο συστήματα δείχνουν καλή συμφωνία για τις μετρήσεις βήματος και εκτροπής, αλλά υπάρχουν διαφορές στη μέτρηση ευθύτητας (περίπου 5 μm). Υπάρχουν δύο λόγοι για αυτές τις αποκλίσεις στις μετρήσεις ευθύτητας. Πρώτον, οι θέσεις μέτρησης ευθύτητας για τα δύο συστήματα είναι διαφορετικές, πράγμα που συνεπάγεται τη διαφορά ανάλογη με τα γωνιακά σφάλματα του άξονα x και τη μετατόπιση μεταξύ των θέσεων μέτρησης. Δεύτερον, η σχετικά μεγάλη απόσταση διαδρομής του άξονα x (2 m) προκαλεί επιπλέον θόρυβο και μετατόπιση λόγω των αναταράξεων του αέρα στη δέσμη λέιζερ που είναι ανάλογη με την διαδρομή της δέσμης λέιζερ στον αέρα. Κατά αυτόν τον τρόπο επηρεάζεται και η ακρίβεια του συμβολόμετρου λέιζερ.



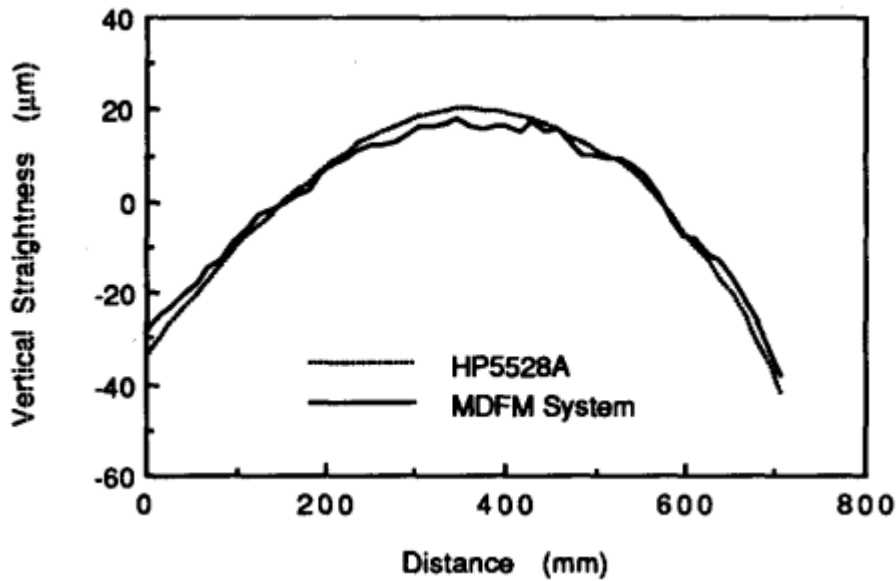
Σχήμα 3.3-6: Αποτελέσματα της μέτρησης εκτροπής άξονα X. (Πηγή: Huang & Ni, 1994)



Σχήμα 3.3-7: Αποτελέσματα μέτρησης κλίσης άξονα X. (Πηγή: Huang & Ni, 1994)

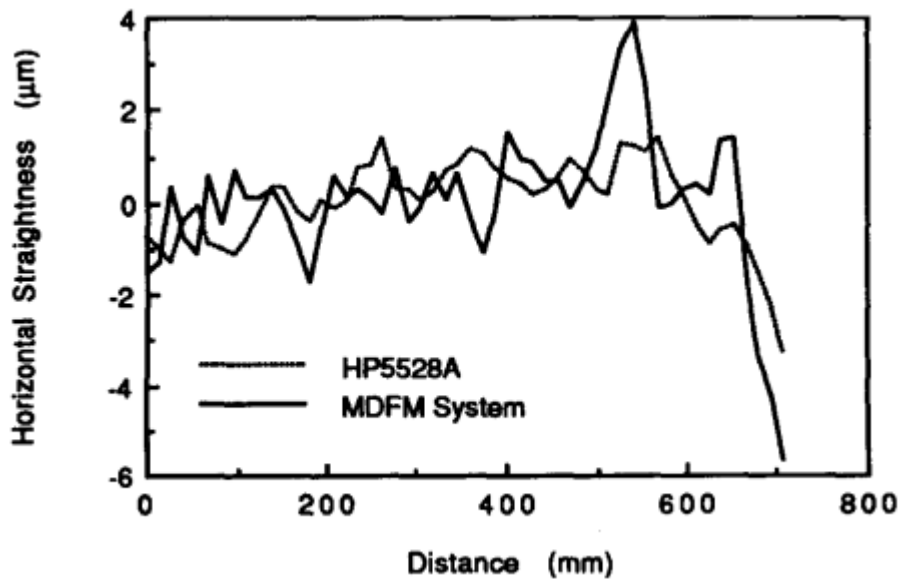
Τα αποτελέσματα για τις μετρήσεις του άξονα y είναι παρόμοια με εκείνα για τις μετρήσεις του άξονα x .

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τον άξονα z φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 3.3-8: Αποτελέσματα της μέτρησης οριζόντιας ευθυγράμμισης του άξονα Z.

(Πηγή: Huang & Ni, 1994)



Σχήμα 3.3-9: Αποτελέσματα της μέτρησης κατακόρυφης ευθυγράμμισης του άξονα Z.

(Πηγή: Huang & Ni, 1994)

Οι διαφορές στις μετρήσεις αυτές μεταξύ των συστημάτων εξηγούνται με παρόμοιο τρόπο.

Για τον προσδιορισμό του μοντέλου σφάλματος, λαμβάνεται η υπόθεση ότι η μηχανή είναι ένα άκαμπτο σώμα, προκειμένου τα 21 στοιχεία σφάλματος να μπορούν να

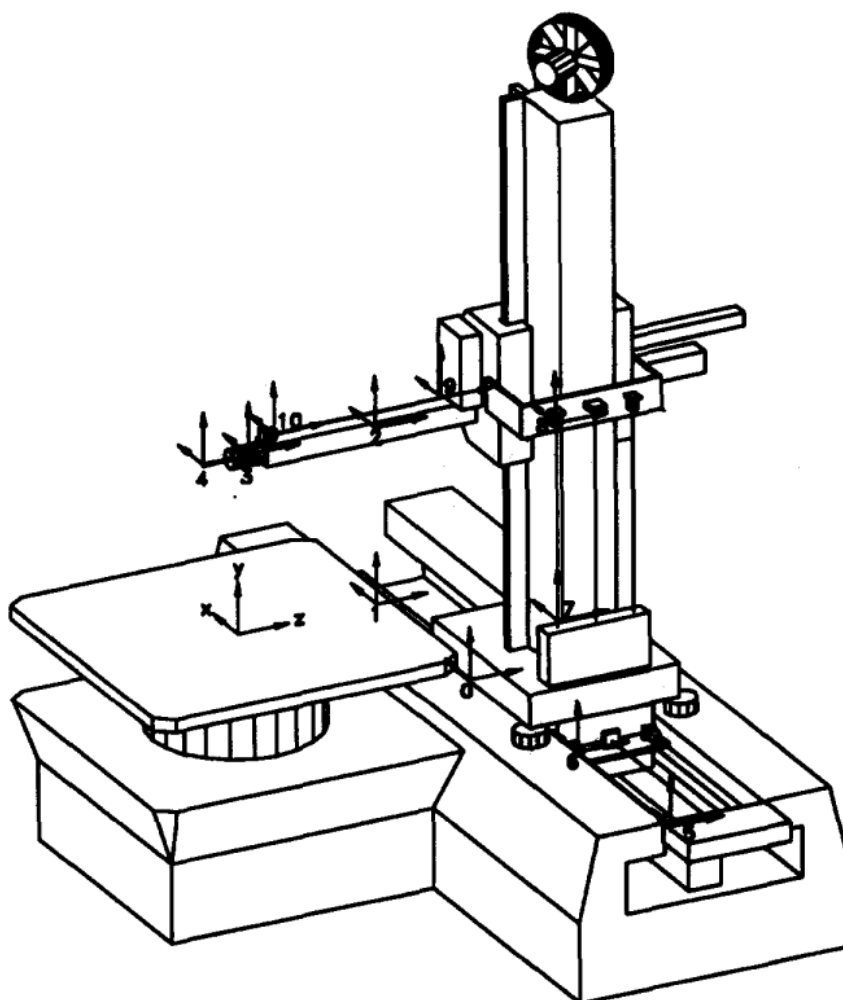
χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν τη χωρική γεωμετρία της μηχανής. Για την περιγραφή της θέσης ενός αντικείμενου σε σχέση είτε με το πλαίσιο συντεταγμένων αναφοράς είτε με ένα άλλο αντικείμενο, χρησιμοποιείται η μέθοδος μετασχηματισμού ομογενών συντεταγμένων.

Μια ομογενής μήτρα μετασχηματισμού προσδιορίζεται ως

$$T = \begin{bmatrix} o_{1x} & o_{2x} & o_{3x} & p_x \\ o_{1y} & o_{2y} & o_{3y} & p_y \\ o_{1z} & o_{2z} & o_{3z} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

όπου o_1 , o_2 και o_3 αντιπροσωπεύουν τον προσανατολισμό και το p αντιπροσωπεύει τη θέση του πλαισίου συντεταγμένων σε σχέση με ένα άλλο πλαίσιο συντεταγμένων, αντίστοιχα.

Για να βρεθεί το μοντέλο σφαλμάτων σε μη αυτόματο σύστημα αντιστάθμισης, εφαρμόζεται η μέθοδος μετασχηματισμού ομογενών συντεταγμένων στο CMM όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3-10 υπό τις υποθέσεις των μικρών γωνιακών κινήσεων και μηδενικών σφαλμάτων που σχετίζονται με το σύστημα του αισθητήρα.



Σχήμα 3.3-10: Πλαίσια συντεταγμένων της CMM. (Πηγή: Huang & Ni, 1994)

Έχουμε έτσι τους ακόλουθους πίνακες, ο καθένας από τους οποίους περιγράφει ένα πλαίσιο συντεταγμένων σε σχέση με ένα άλλο:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & x + \delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & \delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(y) & \varepsilon_y(y) & \delta_x(y) + \alpha_{xy}y \\ \varepsilon_z(y) & 1 & -\varepsilon_x(y) & y + \delta_y(y) \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(y) & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(z) & \varepsilon_y(z) & \delta_x(z) + \alpha_{xz}z \\ \varepsilon_z(z) & 1 & -\varepsilon_x(z) & \delta_y(z) + \alpha_{yz}z \\ -\varepsilon_y(z) & \varepsilon_x(z) & 1 & z + \delta_z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & 0 & y_p \\ 0 & 0 & 1 & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

όπου

$\varepsilon_x(x), \varepsilon_y(x)$ και $\varepsilon_z(x)$ είναι τα περιστροφικά σφάλματα του άξονα X,
 $\varepsilon_x(y), \varepsilon_y(y)$ και $\varepsilon_z(y)$ είναι τα περιστροφικά σφάλματα του άξονα Y,
 $\varepsilon_x(z), \varepsilon_y(z)$ και $\varepsilon_z(z)$ είναι τα περιστροφικά σφάλματα του άξονα Z,
 $\delta_x(x), \delta_y(x)$ και $\delta_z(x)$ είναι τα μεταφορικά σφάλματα του άξονα X,
 $\delta_x(y), \delta_y(y)$ και $\delta_z(y)$ είναι τα μεταφορικά σφάλματα του άξονα Y
 $\delta_x(z), \delta_y(z)$ και $\delta_z(z)$ είναι τα μεταφορικά σφάλματα του άξονα Z
 α_{xy}, α_{xz} και α_{yz} είναι τα σφάλματα τετραγωνισμού μεταξύ των τριών αξόνων,
 x, y, z είναι οι αποστάσεις διαδρομής κατά μήκος των αξόνων X, Y και Z, αντίστοιχα
 x_p, y_p, z_p είναι οι μετατοπίσεις του άκρου της γραφίδας του αισθητήρα σε σχέση με
το πλαίσιο συντεταγμένων $x_3 y_3 z_3$.

Η ομογενής μήτρα μετασχηματισμού του άκρου της γραφίδας αισθητήρα δίνεται σε σχέση με το πλαίσιο αναφοράς ως

$$T_{\text{αισθ.}} = {}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \quad (6)$$

Από τη θέση αναφοράς του $T_{\text{αισθ.}}$ παίρνουμε τις συντεταγμένες της θέσης αναφοράς του άκρου της γραφίδας του αισθητήρα

$$P_x = x + x_p + \delta_x(x) + \delta_x(y) + \delta_x(z) + \alpha_{xy}y + \alpha_{xz}z - \varepsilon_z(x)y + [\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)]z - [\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(z)]y_p + [\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(z)]z_p, \quad (7)$$

$$P_y = y + y_p + \delta_y(x) + \delta_y(y) + \delta_y(z) + \alpha_{yz}z - [\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)]z + [\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(z)]x_p - [\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(z)]z_p, \quad (8)$$

$$P_z = z + z_p + \delta_z(x) + \delta_z(y) + \delta_z(z) + \varepsilon_x(x)y - [\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(z)]x_p + [\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(z)]y_p. \quad (9)$$

Αφαιρώντας τις ονομαστικές συντεταγμένες του άκρου του αισθητήρα, $x + x_p$, $y + y_p$ και $z + z_p$, έχουμε τα σφάλματα συντεταγμένων ως:

$$E_x = \delta_x(x) + \delta_x(y) + \delta_z(z) + \alpha_{xy}y + \alpha_{xz}z - \varepsilon_z(x)y + [\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)]z + [\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(z)]z_p, \quad (10)$$

$$E_y = \delta_y(x) + \delta_y(y) + \delta_y(z) + \alpha_{yz}z - [\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)]z - [\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(z)]z_p, \quad (11)$$

$$E_z = \delta_z(x) + \delta_z(y) + \delta_z(z) + \varepsilon_x(x)y. \quad (12)$$

Για το αυτόματο σύστημα αντιστάθμισης σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο πρέπει να λάβουμε υπόψιν ότι τα συστήματα μέτρησης είναι σε διαφορετικές θέσεις από αυτές στις οποίες έγινε η βαθμονόμηση τους, καθώς αυτό θα προκαλέσει διαφορές στα σφάλματα μεταφοράς τα οποία είναι ανάλογα με τα σφάλματα περιστροφής και τη μετατόπιση.

Χρησιμοποιείται ξανά η μέθοδος μετασχηματισμού ομογενών συντεταγμένων για να βρεθούν οι σχέσεις μεταξύ των σφαλμάτων μεταφοράς σε δύο διαφορετικές θέσεις.

x_5, y_5, z_5 : ένα πλαίσιο αναφοράς με μετατοπίσεις x_1, y_1 και z_1 και από το πλαίσιο x_0, y_0, z_0

x_6, y_6, z_6 : ένα πλαίσιο κάθετης στήλης στον αριστερό ανακλαστήρα για το σύστημα MDFM του άξονα X

x_7, y_7, z_7 : ένα πλαίσιο κάθετης στήλης με μετατοπίσεις x_2, y_2 και z_2 από το πλαίσιο x_1, y_1, z_1

x_8, y_8, z_8 : ένα πλαίσιο φορέα οριζώντιου βραχίονα στον αριστερό ανακλαστήρα για το σύστημα MDFM του άξονα Y

x_9, y_9, z_9 : ένα πλαίσιο φορέα οριζώντιου βραχίονα με μετατόπιση x_3, y_3, z_3 από το

πλαίσιο x_2, y_2, z_2

x_{10}, y_{10}, z_{10} : ένα πλαίσιο οριζώντιου βραχίονα στον οπισθοανακλαστήρα για το σύστημα MDFM του άξονα Z.

Με βάση αυτά τα πλαίσια συντεταγμένων, γράφονται οι πίνακες για την κίνηση του άξονα X:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & x + \delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & \delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & y_1 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & x + \Delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & \Delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & \Delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$${}^6T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_1 \\ 0 & 1 & 0 & -y_1 \\ 0 & 0 & 1 & -z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

όπου $\Delta_y(x)$ και $\Delta_z(x)$ είναι τα σφάλματα ευθύτητας της κίνησης του άξονα X που μετρήθηκαν από το σύστημα MDFM. Αυτοί οι πίνακες έχουν τη σχέση:

$${}^0T_1 = {}^0T_5 {}^5T_6 {}^6T_1 \quad (17)$$

Πολλαπλασιάζοντας τους πίνακες στη δεξιά πλευρά της παραπάνω εξίσωσης και στη συνέχεια εξισώνοντας τις αντίστοιχες συνιστώσες των διανυσμάτων θέσης, παίρνουμε:

$$\delta_y(x) = \Delta_y(x) - \varepsilon_z(x) x_1 + \varepsilon_x(x) z_1 \quad (18)$$

$$\delta_z(x) = \Delta_z(x) - \varepsilon_y(x) x_1 + \varepsilon_x(x) y_1 \quad (19)$$

Παρόμοια οι σχέσεις για τους άξονες Y και Z είναι:

$$\delta_x(y) = \Delta_x(y) + \varepsilon_z(y) y_2 - \varepsilon_y(y) z_2 \quad (20)$$

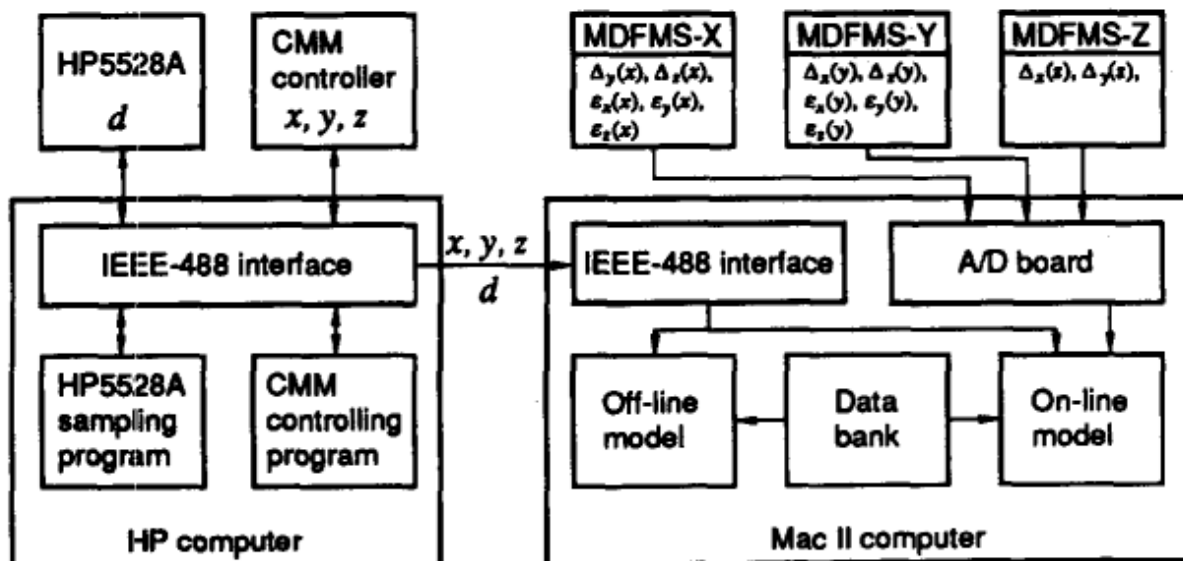
$$\delta_z(y) = \Delta_z(y) + \varepsilon_y(y) x_2 - \varepsilon_x(y) y_2 \quad (21)$$

$$\delta_x(z) = \Delta_x(z) + \varepsilon_z(z) y_3 - \varepsilon_y(z) z_3 \quad (22)$$

$$\delta_y(z) = \Delta_y(z) - \varepsilon_z(z) x_3 + \varepsilon_x(z) z_3 \quad (23)$$

όπου τα $\Delta_x(y)$ και $\Delta_z(y)$ είναι τα σφάλματα ευθύτητας της κίνησης του άξονα Y που μετρώνται από το σύστημα MDFM για τον άξονα Y, και τα $\Delta_x(z)$ και $\Delta_y(z)$ είναι τα σφάλματα ευθύτητας της κίνησης άξονα Z που μετρώνται από το σύστημα MDFM για τον άξονα Z. Αντικαθιστώντας αυτές τις εξισώσεις στα αντίστοιχα μέρη των εξισώσεων, λαμβάνονται οι εξισώσεις σφάλματος συντεταγμένων για το αυτόματο σύστημα αντιστάθμισης.

Το CMM ελέγχεται από έναν προσωπικό υπολογιστή HP μέσω μιας διεπαφής IEEE-488. Σε κάθε θέση, ο υπολογιστής HP συλλέγει τις τρέχουσες συντεταγμένες από τον CMM και στη συνέχεια τις στέλνει σε έναν υπολογιστή Mac II επίσης μέσω της διεπαφής IEEE-488. Με βάση αυτές τις συντεταγμένες, ο υπολογιστής Mac II ανακτά όλα τα γεωμετρικά σφάλματα στη θέση αφού εξετάσει πρώτα όλα τα προ-βαθμονομημένα στοιχεία σφαλμάτων τα οποία βρίσκονται στην τράπεζα δεδομένων.

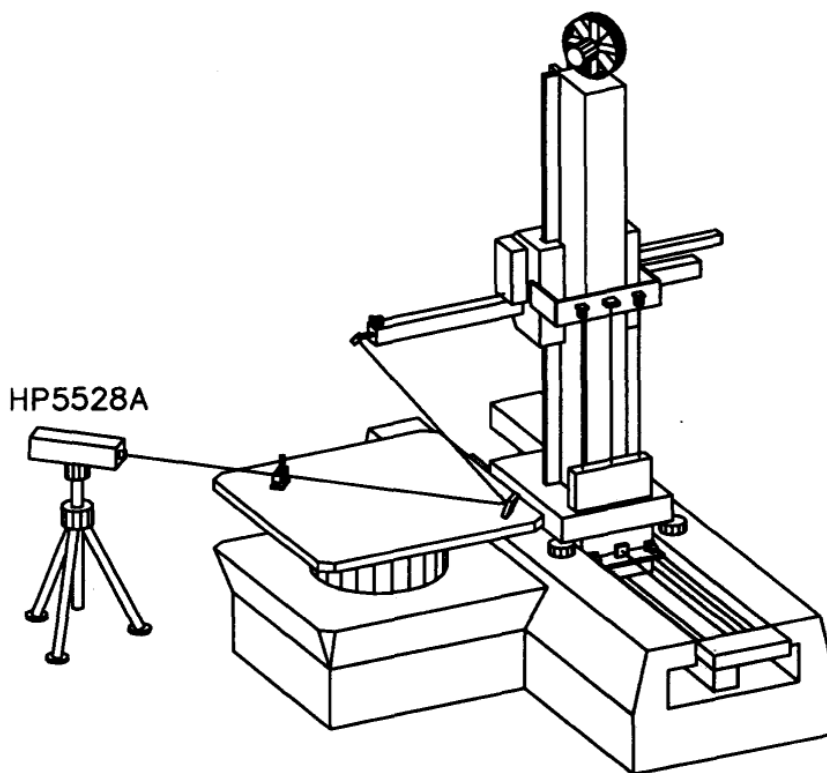


Σχήμα 3.3-11: Διάγραμμα του συστήματος αντιστάθμισης σφαλμάτων. (Πηγή: Huang & Ni, 1994)

Με τα στοιχεία σφάλματος και τις συντεταγμένες, το μη αυτόματο μοντέλο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των σφαλμάτων στο άκρο της γραφίδας του αισθητήρα. Ο υπολογιστής Mac II συλλέγει ακόμη δεδομένα από τα τρία συστήματα MDFM για δώδεκα στοιχεία σφάλματος μέσω ενός συστήματος απόκτησης δεδομένων. Με βάση αυτά τα μετρούμενα στοιχεία σφάλματος καθώς και τα υπόλοιπα στοιχεία σφάλματος που ανακτήθηκαν από την τράπεζα δεδομένων, το αυτόματο μοντέλο σφάλματος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των σφαλμάτων στο άκρο της γραφίδας του αισθητήρα ξανά. Τα σφάλματα που λαμβάνονται από αυτά τα δύο μοντέλα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη διόρθωση των συντεταγμένων.

Για την επαλήθευση του συστήματος αντιστάθμισης σφαλμάτων πραγματοποιείται ένας διαγώνιος έλεγχος. Στην προκειμένου περίπτωση οι Huang και Li χρησιμοποίησαν το σύστημα συμβολόμετρου λέιζερ HP5528A ως σύστημα αναφοράς. Σε αυτό τον έλεγχο το CMM κινείται κατά μήκος μιας διαγωνίου ενώ το σύστημα συμβολόμετρου λέιζερ HP5528A μετρά την απόσταση της διαδρομής του μηχανήματος κατά μήκος αυτής της διαγωνίου, χρησιμοποιώντας έναν κάτοπτρο για να κατευθύνει τη δέσμη στην καθορισμένη διαγώνιο. Η συνολική απόσταση της διαδρομής κατά μήκος της διαγωνίου είναι 1m. Προκειμένου οι πληροφορίες να είναι ακριβείς, το CMM κινείται κατά 25 βήματα. Σε κάθε βήμα, ο υπολογιστής HP συλλέγει τις συντεταγμένες της εκάστοτε θέσης και την ένδειξη απόστασης που δίνει το σύστημα συμβολόμετρου λέιζερ και στη συνέχεια τις στέλνει στον υπολογιστή

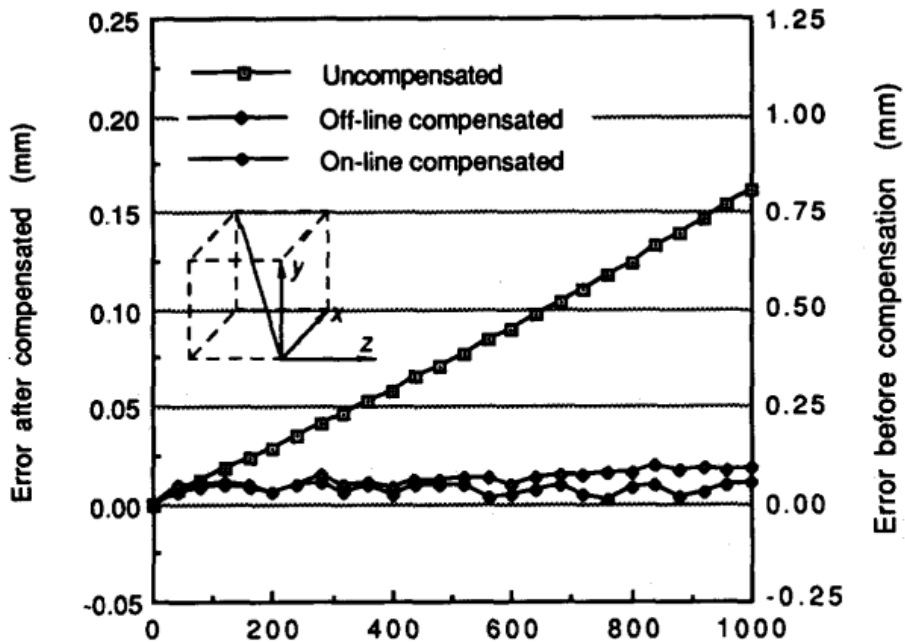
Mac II όπου υπολογίζονται τα σφάλματα χρησιμοποιώντας τα δύο μοντέλα. Αυτά τα σφάλματα χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση της απόστασης διαδρομής όπως φαίνεται από την αλλαγή των συντεταγμένων. Στη συνέχεια, η διορθωμένη απόσταση συγκρίνεται με την ένδειξη από το σύστημα συμβολόμετρου λέιζερ HP5528A με τη διαφορά να αντιπροσωπεύει το υπολειπόμενο σφάλμα του συστήματος αντιστάθμισης. Έπειτα, ο υπολογιστής HP μετακινεί το CMM στην επόμενη θέση κατά μήκος της διαγωνίου και η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να πραγματοποιηθεί και η τελευταία μέτρηση στην τελική θέση.



Σχήμα 3.3-12: Πειραματική διάταξη για τις διαγώνιες δοκιμές. (Πηγή: Huang & Ni, 1994)

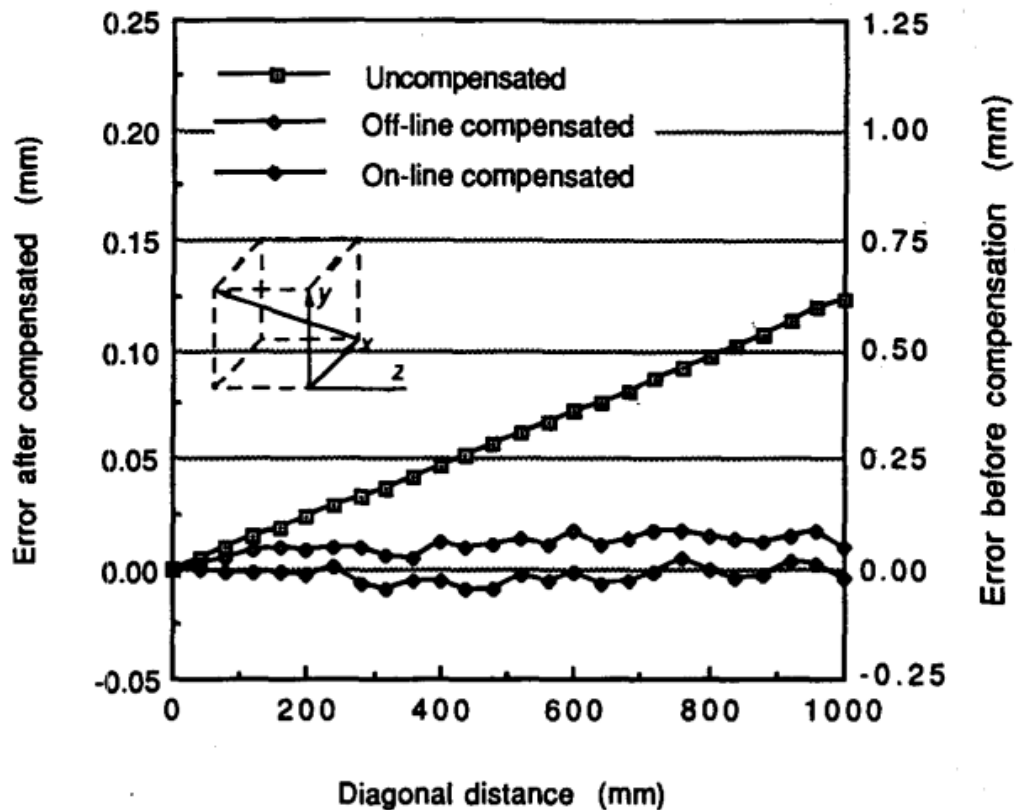
Τα σχήματα 3.3-13 και 3.3-14 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των διαγωνίων δοκιμών, το καθένα δείχνει το μη αντισταθμισμένο αποτέλεσμα, το αντισταθμισμένο αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας το μοντέλο μη αυτόματης διόρθωσης σφάλματος, και το αντισταθμισμένο αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας το μοντέλο αυτόματης διόρθωσης σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο.

Error Compensation of Coordinate Measuring Machines



Σχήμα 3.3-13: Αποτελέσματα της διαγώνιας δοκιμής κατά μήκος της διαγωνίου του σώματος (1, 1, -1) (Πηγή: Huang & Ni, 1994)

Από τα σχήματα φαίνεται, ότι το μέγιστο υπολειπόμενο σφάλμα για το μη αυτόματο μοντέλο είναι περίπου 17 μm για τον πρώτο έλεγχο και 20 μm για τον δεύτερο έλεγχο. Ωστόσο, το μέγιστο υπολειπόμενο σφάλμα για το αυτόματο μοντέλο είναι 14 μm για τον πρώτο έλεγχο και 11 μm για τον δεύτερο έλεγχο, τα οποία αποτελούν πολύ σημαντική βελτίωση σε σχέση με τα αποτελέσματα του μη αυτόματου μοντέλου σφάλματος.



Σχήμα 3.3-14: Αποτελέσματα της διαγώνιας δοκιμής κατά μήκος της διαγωνίου του σώματος (-1, 1, -1). (Πηγή: Huang & Ni, 1994)

Τα αποτελέσματα δείχνουν λοιπόν ότι με τη χρήση του αυτόματου συστήματος αντιστάθμισης σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο, η απόδοση των CMM μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά, σε σύγκριση με τη χρήση του συμβατικού συστήματος μη αυτόματης αντιστάθμισης των σφαλμάτων και για αυτό προτείνεται η χρησιμοποίησή του. (P.S. Huang και J.Ni, 1995)

3.4 Συνοχή των μετρήσεων στις Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων

Ο έλεγχος της συνοχής των μετρήσεων, πάντα ήταν πρόκληση για τις CMMs. Με τις δεκαετίες πολλοί τρόποι και πολλές μέθοδοι αναπτύχθηκαν προκειμένου να βελτιώσουν την ακρίβεια των μηχανών CMM και να προσφέρουν σταθερότητα και συνέπεια στις μετρήσεις. Οι Per Saunders, Alan Wilson, Nick Orchard, Neil Tatman και Paul Maropoulos ανέπτυξαν ένα πλαίσιο από το οποίο η συνέπεια ελέγχεται μέσω της στρατηγικής που ακολουθείται στις μετρήσεις, όπως είναι για παράδειγμα ο αριθμός και η τοποθεσία των σημείων μέτρησης. Πραγματοποιήθηκε γι' αυτό ενδελεχής μελέτη για τον τρόπο με τον οποίο η μέτρηση της γεωμετρίας των εξαρτημάτων οποιαδήποτε μηχανής μπορεί να γίνει αναπόσπαστο κομμάτι των συστημάτων της διαχείρισης του κύκλου ζωής του προϊόντος (product lifecycle management -PLM). Αυτή η αλλαγή μπορεί να επιφέρει σημαντική βελτίωση στη συνοχή των μετρήσεων που λαμβάνουμε σε οποιοδήποτε εξάρτημα κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας. Τα σημαντικότερα στοιχεία για την επίτευξη της σταθερότητας και της συνοχής στις μετρήσεις που χρειαζόμαστε είναι, τα συνεπή αποτελέσματα και η σταθερή ακαμψία. Είναι αναγκαία η ύπαρξη συστημάτων που κρατάνε υπό έλεγχο τη συνέπεια των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των CMM, μιας και είναι πολυχρηστικές μηχανές και αυτό ακριβώς προκαλεί την ασυνέπεια στις μετρήσεις τους.

Οι βασικές πηγές των ασυνεπειών στις μετρήσεις που λαμβάνονται συνήθως είναι:

- Οι διαφορές που υπάρχουν στο μέγεθος και υλικό της μπάλας/σημείου αναφοράς, στο μήκος και την ακαμψία της γραφίδας του αισθητήρα, καθώς και στον προσανατολισμό του αισθητήρα. Αυτοί οι παράμετροι έχουν σημαντική επίδραση στις τιμές που λαμβάνονται από τις μετρήσεις.
- Η μερικές φορές τυχαία επιλογή του αριθμού και των σημείων μέτρησης από τον χειριστή, χωρίς κάποια στρατηγική μέτρησης.
- Οι διαφορετικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από διαφορετικούς χειριστές για την αξιολόγηση και διόρθωση των μετρήσεων.
- Η τοποθεσία του CMM και η περιβαλλοντική του κατάσταση, ειδικά όταν πολλές μηχανές τοποθετούνται στα πατώματα του εργοστασίου ή σε μέρη που η θερμοκρασία αυξομειώνεται.
- Η θερμοκρασία και η κατάσταση του εξαρτήματος την στιγμή της μέτρησης.
- Η ελλιπής ακολούθηση των διαδικασιών από τον χειριστή του CMM.

Λόγω όλων αυτών των διαφορετικών παραμέτρων, είναι πρακτικά αδύνατο να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα κατά την εκτέλεση μετρήσεων σε διαφορετικά CMM σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Ωστόσο για να είναι χρήσιμα τα αποτελέσματα των μετρήσεων πρέπει να είναι συνεπή, και για να είναι συνεπή πρέπει οι μετρήσεις να τηρούν τις ίδιες αρχές, και για αυτό χρησιμοποιείται η έννοια της αβεβαιότητας μέτρησης.

Η αβεβαιότητα ορίζεται στο διεθνές λεξιλόγιο της μετρολογίας (International vocabulary of metrology - VIM) ως «μη αρνητική παράμετρος που χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών της ποσότητας που αποδίδονται σε ένα μέτρο, με βάση τις πληροφορίες που χρησιμοποιούνται» (JCGM 200, 2008). Ο ορισμός επίσης της μετρολογικής «συμβατότητας» σύμφωνα με τον VIM ορίζεται ως ένα μέσο που καθορίζει εάν δύο αποτελέσματα μετρήσεων αναφέρονται στην ίδια μέτρηση. Η αβεβαιότητα μέτρησης μπορεί να εφαρμοστεί ως δοκιμή της συμβατότητας, όπου εξετάζει εάν δύο μετρούμενες τιμές βρίσκονται εντός ενός συμφωνημένου πολλαπλάσιου της τυπικής αβεβαιότητας. Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό, είναι αναγκαία η απαίτηση για συνεπή αποτελέσματα μετρήσεων από διαφορετικά συστήματα CMM, παρόλο που με τα διαφορετικά συστήματα θα υπάρχουν και διαφορετικές αβεβαιότητες. Για την ύπαρξη συνεπών αποτελεσμάτων, θα ήταν απαραίτητο η αβεβαιότητα να είναι παρόμοια για όλες τις μετρήσεις από όλα τα διαφορετικά CMM.

Για να υπάρχει συνέπεια στις μετρήσεις, πρέπει να υπάρχει και συνέπεια στην ακαμψία. Ιδιαίτερα θα πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε να μην επιβάλλεται το ίδιο επίπεδο ακαμψίας που υπάρχει στην μέτρηση, και συνεπώς το κόστος σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα. Αντιθέτως θα πρέπει σε κάθε περίπτωση η διαδικασία της μέτρησης να γίνεται σωστά αναλόγως με τους διαθέσιμους πόρους. Είναι σημαντικό η αβεβαιότητα για κάθε μέτρηση να είναι συμβατή με τον σκοπό της μέτρησης. Εάν η αβεβαιότητα μιας μέτρησης είναι πολύ υψηλή, τότε η μέτρηση καθεαυτή δεν προσδίδει καμία αξία. Για την επίτευξη σταθερής ακαμψίας, η αβεβαιότητα της μέτρησης είναι ένας χρήσιμος οδηγός.

Για την αξιολόγηση της αβεβαιότητας μέτρησης στις CMMs ακολουθούνται τρεις τεχνικές που περιγράφονται από το ISO 15530-1. Η πρώτη είναι η ανάλυση ευαισθησίας και περιγράφεται στο ISO «Οδηγός για την Έκφραση της Αβεβαιότητας στη Μέτρηση» και απαιτεί κατανόηση των πηγών της αβεβαιότητας και ένα κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο. Η δεύτερη είναι μια προσέγγιση σύγκρισης, όπου χρησιμοποιείται ένα παρόμοιο αντικείμενο ώστε να καταγραφούν οι πηγές της αβεβαιότητας και οι αλληλεπιδράσεις. Η τρίτη τεχνική είναι η χρήση μιας προσομοίωσης, γνωστή ως λογισμικό αξιολόγησης αβεβαιότητας, και

είναι μάλλον η πιο πρακτική επιλογή από τις τρεις όταν υπάρχουν πολλές μετρήσεις για αξιολόγηση και απαιτούνται προβλέψεις, όπως χρειάζεται όταν θέλουμε να σχεδιάσουμε την συνοχή των μετρήσεων σε πολλαπλά CMM σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος.

Μεγάλη επιρροή στην αβεβαιότητα έχει η στρατηγική της μέτρησης που ακολουθείται. Η οποία είναι σχετικά εύκολο να ελεγχθεί. Τα κύρια στοιχεία της στρατηγικής μέτρησης που ακολουθείται σε ένα CMM είναι ο αριθμός των σημείων μέτρησης και η ακριβής τοποθεσία τους. Η θέση αυτή των σημείων είναι αρκετά σημαντική μιας και η βέλτιστη στρατηγική μέτρησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφή των θέσεων αυτών των σημείων. Οι στρατηγικές μέτρησης κατηγοριοποιούνται σε τρεις κατηγορίες αναλόγως με τη επιρροή που έχουν στην παραγόμενη γεωμετρία:

- **Τυφλή στρατηγική**

Ονομάζεται έτσι επειδή γνωρίζει μόνο τη γεωμετρία που καθορίζεται από το σχέδιο, και λειτουργεί χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις αποκλίσεις που προκύπτουν από την διαδικασία της κατασκευής του αντικειμένου (BS 7172,1989).

- **Στρατηγική των ειδικών**

Υπάρχει ένας μικρός αριθμός συστημάτων που επιχειρούν να συλλάβουν τη γνώση των ειδικών, ειδικά γνώση για την παραγωγική διαδικασία (Hwang L, Lee H, Ha S.,2002).

- **Προσαρμοστική στρατηγική**

Οι πιο υποσχόμενες είναι οι στρατηγικές που προσαρμόζονται στην πραγματική γεωμετρία, που αλλάζουν τη στρατηγική τους χρησιμοποιώντας προηγούμενες μετρήσεις για την επιλογή του επόμενου σημείου. Ωστόσο μια πιο απλή προσεγγιστική μέθοδος είναι η μελέτη της παραγωγικής διαδικασίας και η καταγραφή της «υπογραφής» της (Ascione, Moroni,Petrò,Romano, 2012). Έπειτα με βάση αυτή την υπογραφή, αναπτύσσεται ένα μοντέλο του πραγματικού χαρακτηριστικού που δημιουργήθηκε. Ύστερα σχεδιάζεται η στρατηγική της μέτρησης με βάση αυτό το μοντέλο (Moroni, Petrò, 2011).

Η στρατηγική που είναι καλύτερο να ακολουθηθεί είναι η προσαρμοστική, που είναι βασισμένη στην ανάλυση της υπογραφής της κατασκευαστικής διαδικασίας. Γι αυτό και αναπτύσσεται ένα θεωρητικό πλαίσιο που παρουσιάζει πώς αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί.

Αυτοματοποιημένα πακέτα προγραμματισμού που περιέχουν διαφορετικούς τρόπους στρατηγικών μέτρησης, παρέχουν τον μηχανισμό με τον οποίο μπορούν οι

στρατηγικές αυτές να αναπτυχθούν πάνω σε μια ποικιλία διαφορετικών μηχανημάτων CMM.

Για το αν η ικανότητα μιας επιχειρησιακής στρατηγικής να εντοπίζει αλλαγές στην βιομηχανική παραγωγή, σύμφωνα με την διαδικασία που παρουσιάστηκε, επιχειρείται μια περίπτωση μελέτης.

Αυτή η μελέτη επικεντρώθηκε σε δύο αντικείμενα με σκόπιμα σφάλματα στη μορφή τους, τα οποία θα αποκαλούνται αντικείμενο A και αντικείμενο B (Block A και Block B). Χρησιμοποιήθηκαν επίσης δύο CMM για να εκτελέσουν τις μετρήσεις, το ένα τη λεπτομερή και το δεύτερο τη μέτρηση των λειτουργιών.

Feature	Block A	Block B
Hole 1	3 lobes / 15 μm amplitude	3 lobes / 10 μm amplitude
Hole 2	4 lobes / 15 μm amplitude	4 lobes / 20 μm amplitude
Hole 3	5 lobes / 15 μm amplitude	5 lobes / 25 μm amplitude
Hole 4	5 harmonics \sim 22 μm	3 harmonics \sim 22 μm
Hole 5	No deliberate errors	No deliberate errors
Hole 6	No deliberate errors	No deliberate errors
Boss	3 lobes / 25 μm amplitude	No deliberate errors

Πίνακας 3.4-1: Σφάλματα μορφής των αντικειμένων A και B.

(Πηγή:Saunders, Wilsonc, Orchardd, Tatmand & Maropoulos, 2014)

	Detailed	Operations
CMM	Zeiss F25	Zeiss UPMC 550
MPE (1D for UPMC)	0.25 μm + L/666	0.9 μm + L/300
Probe error	\sim 0.25 μm	\sim 0.6 μm
Temperature range	20 $^{\circ}\text{C}$ +/- 0.05 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$ +/- 0.1 $^{\circ}\text{C}$
Strategy	256 points (64 @ 4 levels)	32 points (8 @ 4 levels)

Πίνακας 3.4-2: Συστήματα CMM.

(Πηγή:Saunders, Wilsonc, Orchardd, Tatmand & Maropoulos, 2014)

Η λεπτομερής μέτρηση πραγματοποιήθηκε στον Zeiss F25. Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν δώδεκα φορές σε δύο διαφορετικούς προσανατολισμούς για να δώσουν μια μέση τιμή και μια τυπική απόκλιση για την κυλινδρικήτητα. Η τυπική απόκλιση βρέθηκε να είναι μικρότερη από 0,1 μm και για τα επτά χαρακτηριστικά και στα δύο αντικείμενα. Έτσι περαιτέρω ανάλυση πραγματοποιήθηκε με βάση μόνο την μέση τιμή. Σημεία μέτρησης από μία από τις σειρές μετρήσεων σχεδιάστηκαν ώστε να επιβεβαιωθεί οπτικά η κατασκευαστική υπογραφή σύμφωνα με τον Πίνακα 3.4-1. Χρησιμοποιήθηκε προσομοίωση μέσω του λογισμικού αξιολόγησης αβεβαιότητας (USES), το οποίο έχει την ικανότητα να μοντελοποιεί σφάλματα μορφής. Η προσομοίωση έδειξε ότι θα υπήρχε σφάλμα για αυτή τη στρατηγική στο περιβάλλον λειτουργίας μεταξύ 1 μm και 1,6 μm για κάθε χαρακτηριστικό, γι' αυτό και θεωρείται μια ανοχή κυλινδρικήτητας 20 μm , και μια αναλογία 10:1 μεταξύ της ανοχής και μιας αύξησης της αβεβαιότητας που θα κρινόταν αποδεκτή. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η μέτρηση των λειτουργιών και επαναλήφθηκε δέκα φορές σε δύο προσανατολισμούς. Τα αποτελέσματα αυτής ήταν ότι σε δύο περιπτώσεις η τυπική απόκλιση έφτασε τα 0,5 μm και 0,3 μm , ενώ σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις ήταν μικρότερη των 0,2 μm , δείχνοντας ότι η επαναληψιμότητα του συστήματος είναι εμπιστεύσιμη.

Η χρησιμοποίηση του λογισμικού αξιολόγησης της αβεβαιότητας, κάνει δυνατή την εύρεση στρατηγικών που να προσφέρουν συνέπεια στη μέτρηση κατά μήκος όλης της εφοδιαστικής αλυσίδας. Τα αποτελέσματα της περίπτωσης μελέτης ήταν ενθαρρυντικά. Επιπλέον ωστόσο θα ήταν χρήσιμοι οι παρακάτω πιθανοί μετρισμοί:

- Η επανάληψη της αναλυτικής μέτρησης ανά τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να είναι δυνατός ο γρήγορος εντοπισμός μιας μεγάλης μεγέθους αλλαγής στη μορφή.
- Η προσομοίωση ολόκληρης της κατασκευαστικής διαφοροποίησης και η δοκιμή διαφορετικών στρατηγικών έναντι μιας σειράς κατασκευαστικών προϊόντων κατά τη διάρκεια προβλέψεων αβεβαιότητας των μετρήσεων.

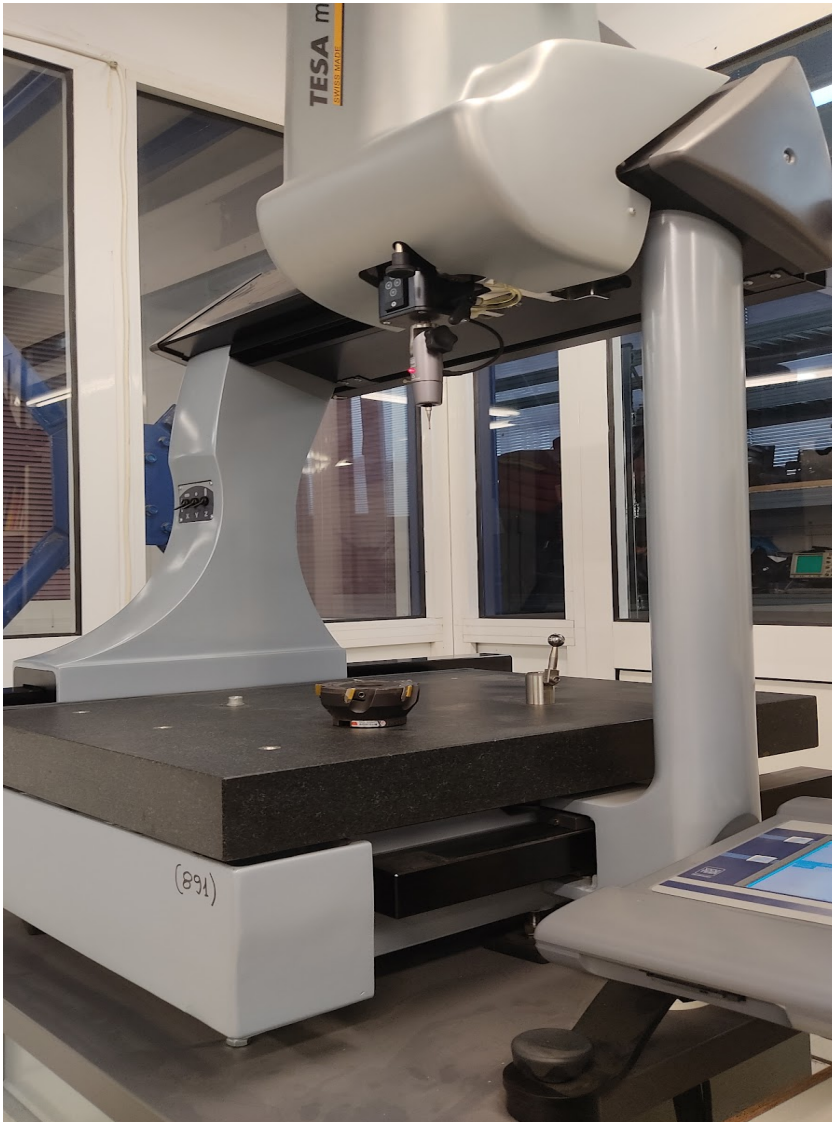
Συμπερασματικά, με το πλαίσιο που εισήχθη είναι δυνατός ο έλεγχος της συνέπειας των μετρήσεων των CMM σε περιβάλλον διαχείρισης του κύκλου ζωής προϊόντος-PLM. Αυτό το πλαίσιο βασίζεται στην προσαρμοστική στρατηγική ως την επιλεγμένη στρατηγική μέτρησης και προτείνεται η χρησιμοποίηση της προκειμένου να είναι ελεγχόμενη η

συνέπεια των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των μηχανών CMM, σε πολλαπλά κομμάτια της εφοδιαστικής αλυσίδας. (Per Saunders, Alan Wilson, Nick Orchard, Neil Tatman και Paul Magoroulos, 2014)

Κεφάλαιο 4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

4.1 Περιγραφή της μετρητικής διαδικασίας στο Εργαστήριο

Στο Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, εκτελέσαμε μια μελέτη περίπτωσης (case study), μια σειρά από μετρήσεις σε μία κεφαλής φρέζας στη Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων της σχολής. Ο στόχος της μελέτης είναι η μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της φρεζοκεφαλής και η σύγκριση με την κατασκευαστική του γεωμετρία, καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την ακρίβειας των μετρήσεων της μηχανής. Η CMM που χρησιμοποιήθηκε είναι κατασκευασμένη από την εταιρεία TESA, σειράς MH3D.



Σχήμα 4.1-1: TESA MH3D CMM.

Η κεφαλή φρέζας που χρησιμοποιήθηκε ως το αντικείμενο προς μέτρηση είναι κατασκευασμένη από την εταιρεία Mitsubishi Materials και έχει αριθμό μοντέλου SE300-100A05R.

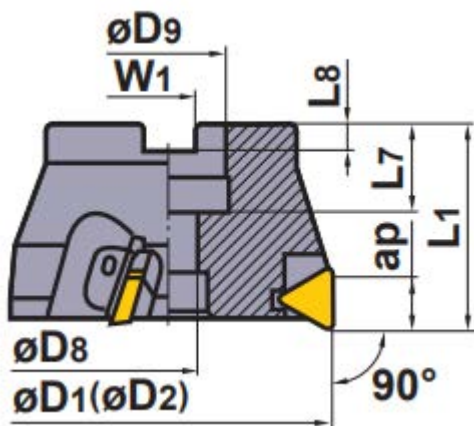


Σχήμα 4.1-2: Η κεφαλή φρέζας Mitsubishi Materials SE300-100A05R.

Τα χαρακτηριστικά αυτής της κεφαλής φρέζας δίνονται από τον κατασκευαστή ως εξής:

Αριθμός δοντιών	Διαστάσεις (mm)							
	D1	D2	L1	D9	L7	D8	W1	L8
5	100	102.2	50	61.75	32	41	42	8

Πίνακας 4.1-1: Χαρακτηριστικά φρεζοκεφαλής. (Πηγή: Mitsubishi Materials, 2009-2010)



Σχήμα 4.1-3: Πλάγια όψη φρεζοκεφαλής. (Πηγή: Mitsubishi Materials, 2009-2010)

Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε με έναν αισθητήρα αφής (touch-trigger probe ή TTP). Πρώτα ακολουθήθηκε η διαδικασία σεταρίσματος της Μηχανής Μέτρησης Συντεταγμένων. Η τοποθέτηση του αισθητήρα αφής και έπειτα η μέτρηση της σφαίρας που λειτουργεί σαν σημείο αναφοράς. Η μέτρηση πραγματοποιείται με την επαφή της ακίδας του αισθητήρα πάνω στη σφαίρα, σε σημεία από διάφορα επίπεδα και περιμετρικά της σφαίρας, ώστε να πάρουμε όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία (16 περίπου). Στον υπολογιστή εμφανίζονται οι συντεταγμένες από τα σημεία που παίρνουμε και το σφάλμα της μέτρησης. Εάν το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από το επιθυμητό πιέζουμε το πλήκτρο επιστροφής στην μέτρηση και ξαναμετράμε την σφαίρα. Όταν πάρουμε την επιθυμητή μέτρηση που θέλουμε με το σφάλμα που μας ικανοποιεί τότε το σετάρισμα έχει πραγματοποιηθεί.

Στη συνέχεια συνεχίζουμε με την τοποθέτηση του αντικειμένου προς μέτρηση, της φρεζοκεφαλής με 5 δόντια κοπής, Mitsubishi Materials SE300-100A05R. Για την περίπτωση αυτή, παίρνουμε σημεία περιμετρικά της κεφαλής, κρατώντας τον άξονα z σταθερό. Παίρνουμε συνολικά 149 σημεία μέτρησης, όπου οι ακριβείς θέσεις τους δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.1-2.

Σημεία	X	Y	Z
1	372.165	168.733	-442.023
2	372.700	169.575	-442.022
3	375.103	171.014	-442.026
4	376.041	170.224	-442.025

Πίνακας 4.1-2: Συντεταγμένες σημείων μέτρησης

Σημεία	X	Y	Z
5	376.679	169.457	-442.023
6	379.448	161.806	-442.026
7	380.247	160.491	-442.025
8	381.156	158.873	-442.026
9	382.000	157.227	-442.027
10	382.757	155.611	-442.029
11	383.449	153.983	-442.028
12	384.459	151.268	-442.028
13	384.973	149.666	-442.028
14	385.368	148.268	-442.028
15	385.833	146.406	-442.029
16	386.347	143.848	-442.028
17	386.542	142.604	-442.029
18	386.793	140.662	-442.028
19	386.970	138.591	-442.027
20	387.064	136.250	-442.028
21	387.020	133.362	-442.028
22	386.875	131.145	-442.028
23	386.628	128.911	-442.026
24	386.337	127.027	-442.025
25	385.563	125.879	-442.023
26	384.829	125.571	-442.023
27	383.440	125.058	-442.023
28	381.898	124.459	-442.022
29	380.590	123.749	-442.023
30	379.816	123.198	-442.022
31	377.394	110.847	-442.023
32	378.137	110.631	-442.022
33	379.169	110.328	-442.020

Πίνακας 4.1-2: Συντεταγμένες σημείων μέτρησης

Σημεία	X	Y	Z
34	380.041	109.970	-442.018
35	381.359	108.738	-442.020
36	381.371	107.749	-442.020
37	380.929	107.104	-442.020
38	380.266	106.198	-442.021
39	379.855	105.638	-442.021
40	379.063	104.629	-442.021
41	378.489	104.418	-442.019
42	373.612	101.648	-442.021
43	372.558	100.573	-442.021
44	371.729	99.771	-442.022
45	371.150	99.236	-442.022
46	370.194	98.379	-442.023
47	368.646	97.100	-442.024
48	367.729	96.379	-442.023
49	366.605	95.546	-442.022
50	364.902	94.381	-442.022
51	363.330	93.391	-442.022
52	360.645	91.873	-442.020
53	359.609	91.350	-442.022
54	355.902	89.717	-442.028
55	354.477	89.177	-442.029
56	352.399	88.481	-442.028
57	350.628	87.971	-442.027
58	348.049	87.359	-442.026
59	346.859	87.116	-442.026
60	343.066	88.059	-442.024
61	342.043	89.347	-442.025
62	340.968	90.567	-442.024
63	339.421	91.815	-442.023

Πίνακας 4.1-2: Συντεταγμένες σημείων μέτρησης

Σημεία	X	Y	Z
64	326.972	90.075	-442.022
65	326.993	89.116	-442.022
66	327.013	87.935	-442.021
67	326.820	86.586	-442.020
68	326.747	86.417	-442.019
69	325.815	85.450	-442.019
70	325.331	85.386	-442.019
71	324.801	85.530	-442.020
72	324.179	85.721	-442.020
73	323.194	86.043	-442.019
74	322.752	86.187	-442.019
75	317.539	90.679	-442.021
76	316.800	91.033	-442.021
77	315.231	91.815	-442.021
78	312.328	93.447	-442.021
79	309.852	95.051	-442.021
80	307.868	96.503	-442.020
81	305.660	98.312	-442.019
82	303.637	100.168	-442.019
83	301.778	102.073	-442.019
84	300.040	104.052	-442.020
85	298.163	106.469	-442.020
86	296.401	109.051	-442.019
87	295.471	110.571	-442.017
88	295.847	114.193	-442.020
89	296.835	115.927	-442.020
90	297.234	116.832	-442.018
91	297.798	119.062	-442.020
92	297.818	119.240	-442.019
93	293.119	129.049	-442.012

Πίνακας 4.1-2: Συντεταγμένες σημείων μέτρησης

Σημεία	X	Y	Z
94	291.576	129.424	-442.018
95	290.872	129.135	-442.012
96	289.935	128.734	-442.011
97	289.111	128.472	-442.019
98	288.528	130.600	-442.021
99	286.454	131.722	-442.019
100	286.394	132.653	-442.017
101	288.788	139.104	-442.018
102	289.019	141.345	-442.019
103	289.627	145.137	-442.017
104	290.389	148.330	-442.016
105	290.722	149.496	-442.016
106	291.854	152.849	-442.019
107	292.797	155.163	-442.019
108	293.843	157.388	-442.019
109	294.346	158.372	-442.017
110	296.095	161.411	-442.017
111	297.075	162.923	-442.016
112	297.937	164.169	-442.012
113	299.178	165.828	-442.016
114	300.493	167.424	-442.016
115	302.666	169.813	-442.014
116	303.946	171.075	-442.016
117	306.535	172.301	-442.016
118	308.279	171.754	-442.016
119	310.484	171.127	-442.017
120	312.541	170.973	-442.016
121	313.289	171.032	-442.016
122	322.032	179.120	-442.019
123	321.188	180.347	-442.018

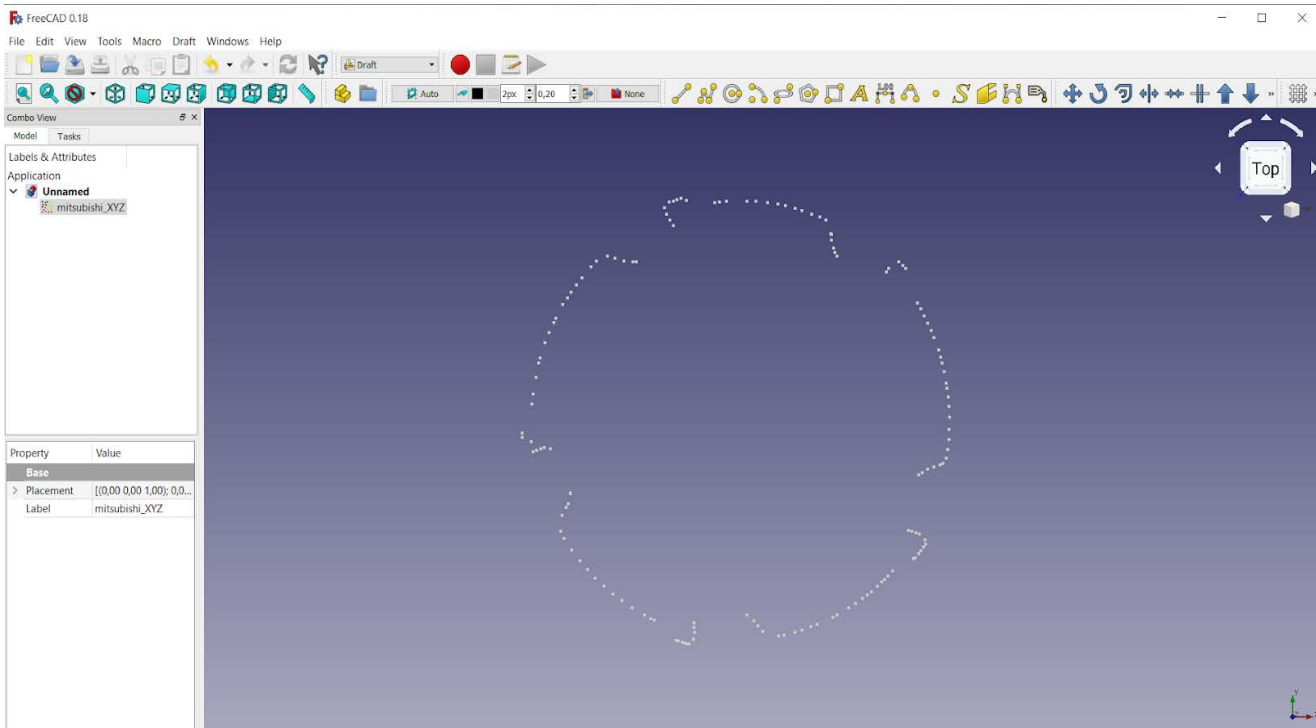
Πίνακας 4.1-2: Συντεταγμένες σημείων μέτρησης

Σημεία	X	Y	Z
124	320.375	181.655	-442.016
125	319.971	183.118	-442.010
126	321.066	184.328	-442.013
127	322.132	184.632	-442.014
128	322.934	184.864	-442.014
129	323.892	185.136	-442.014
130	325.209	184.742	-442.011
131	331.718	184.286	-442.018
132	332.844	184.418	-442.018
133	334.582	184.550	-442.022
134	339.368	184.635	-442.018
135	341.514	184.518	-442.018
136	344.187	184.256	-442.020
137	346.718	183.863	-442.020
138	348.444	183.515	-442.019
139	350.671	182.956	-442.018
140	352.329	182.488	-442.019
141	354.632	181.718	-442.020
142	356.515	180.989	-442.021
143	358.028	180.346	-442.018
144	359.206	177.175	-442.018
145	359.198	177.298	-442.019
146	359.361	175.795	-442.018
147	359.766	174.036	-442.018
148	360.146	173.072	-442.019
149	360.533	172.314	-442.018

Πίνακας 4.1-2: Συντεταγμένες σημείων μέτρησης

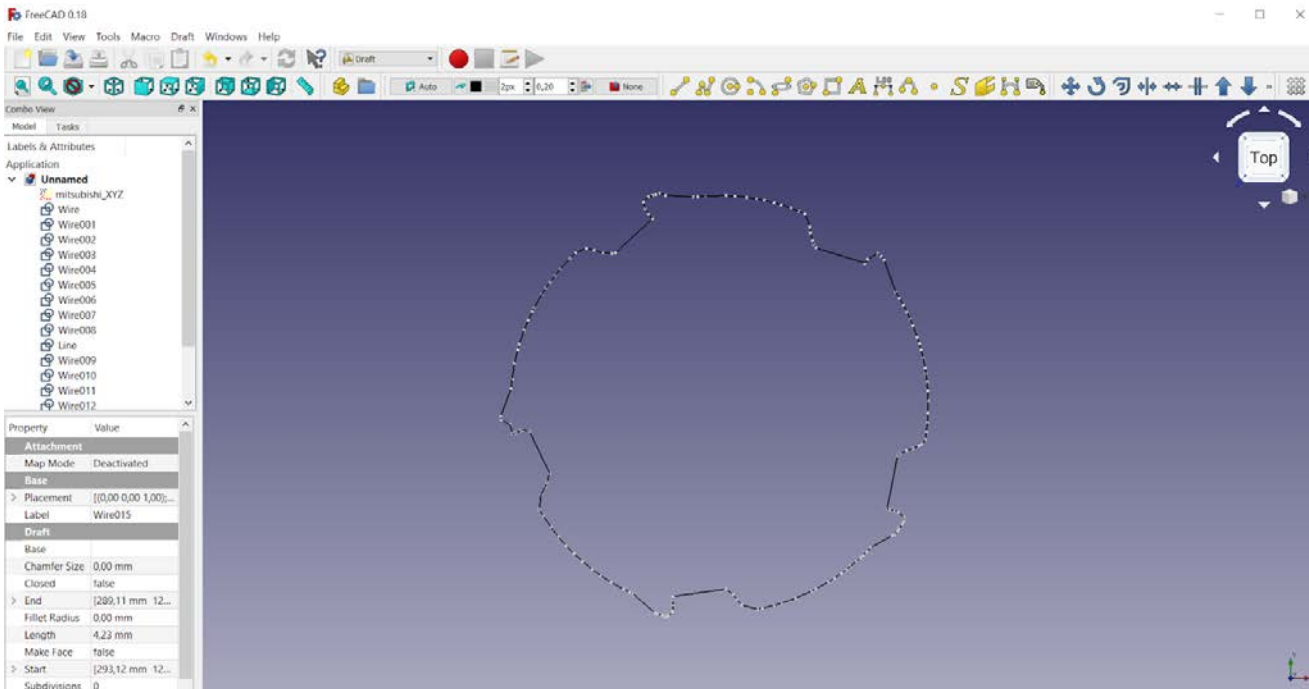
4.2 Αποτελέσματα

Οι συντεταγμένες αυτών των 149 σημείων που πήραμε περιμετρικά της φρεζοκεφαλής εισέρχονται στο λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης FreeCAD και φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 4.2-1.

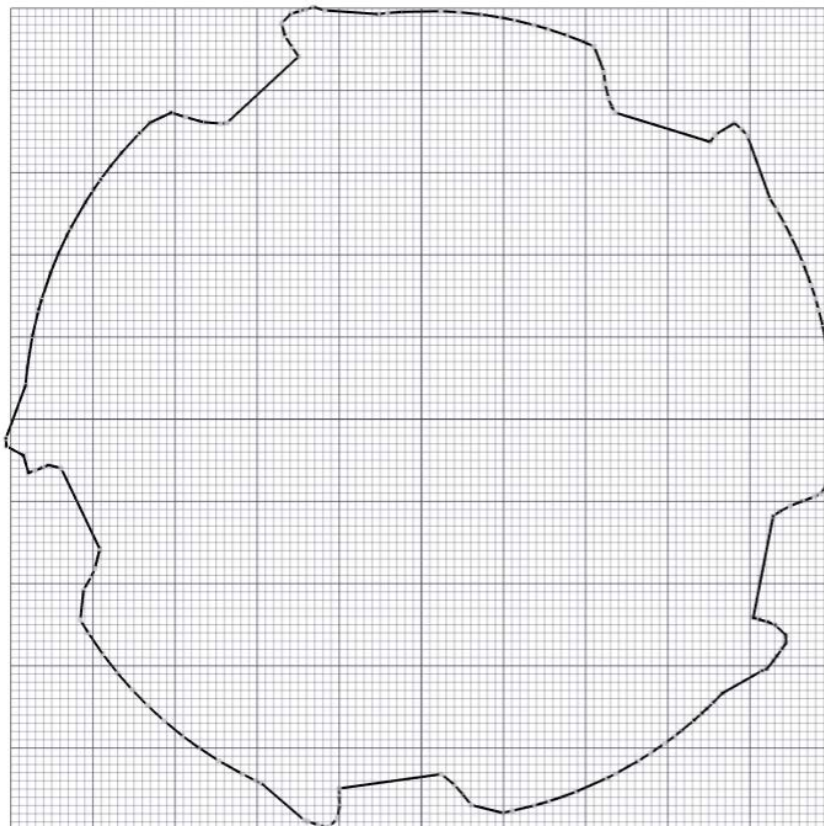


Σχήμα 4.2-1: Τα σημεία της μέτρησης στο CAD.

Στη συνέχεια ενώνουμε τα σημεία προκειμένου να πάρουμε το περίγραμμα της φρεζοκεφαλής που μετρήσαμε, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2-2 και στο Σχήμα 4.2-3.



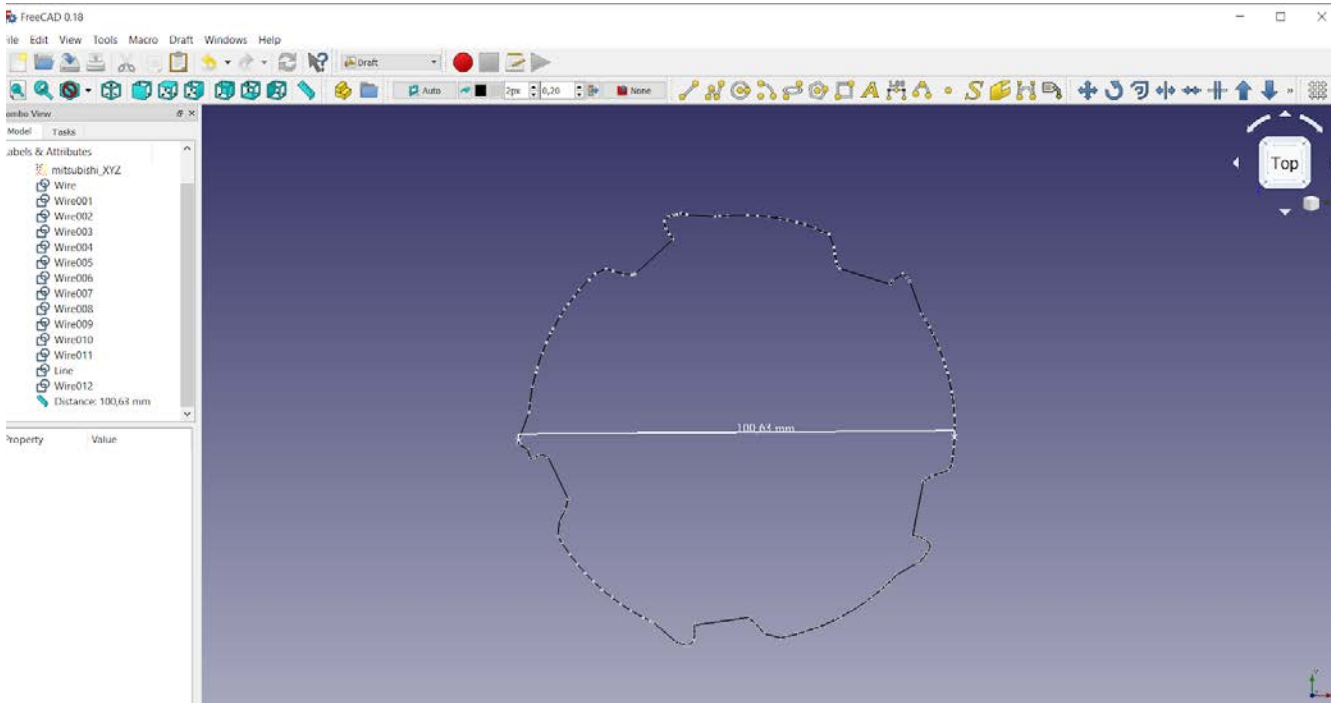
Σχήμα 4.2-2: Η κάτοψη της μέτρησης στο CAD.



Σχήμα 4.2-3: Η κάτοψη της φρεζοκεφαλής της μέτρησης.

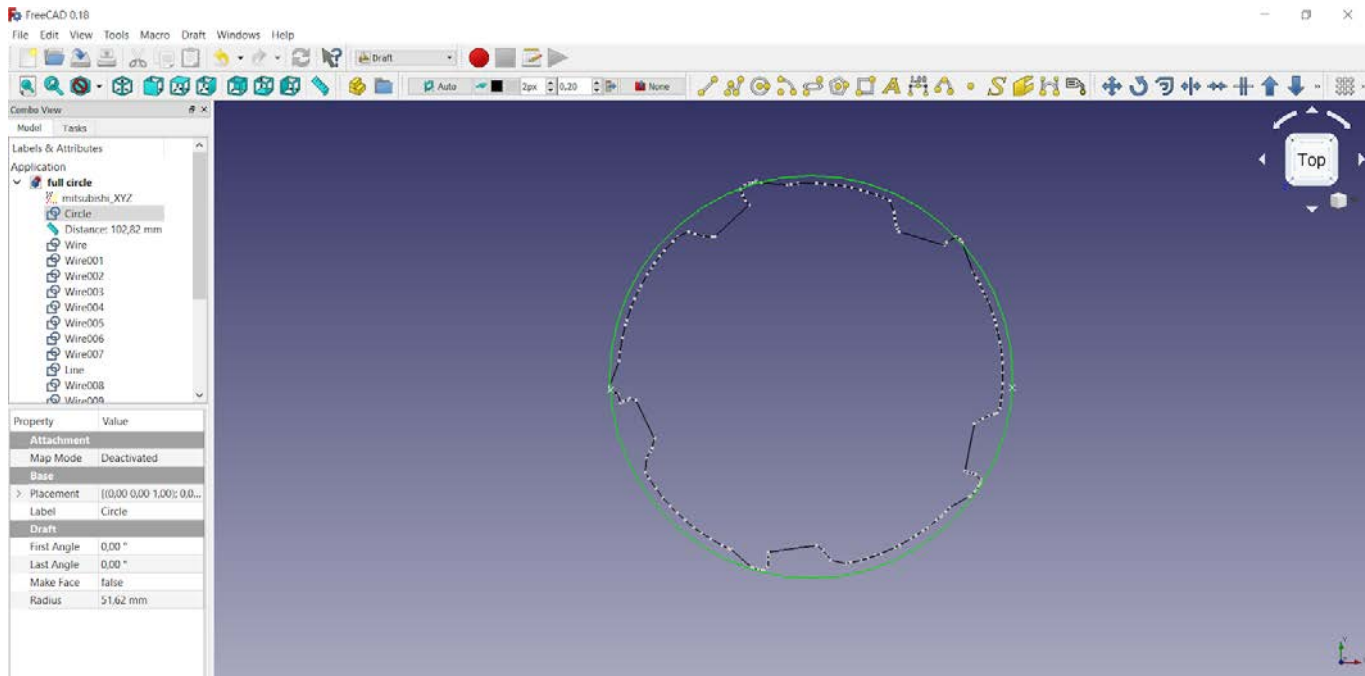
Τα αποτελέσματα που εξάγουμε από τις μετρήσεις μας είναι:

- βλέπουμε στο Σχήμα 4.2-4 ότι η εσωτερική διάμετρος είναι 100.63mm που είναι πολύ κοντά στα 100mm που δίνει ο κατασκευαστής, αλλά με απόκλιση 0.63mm.

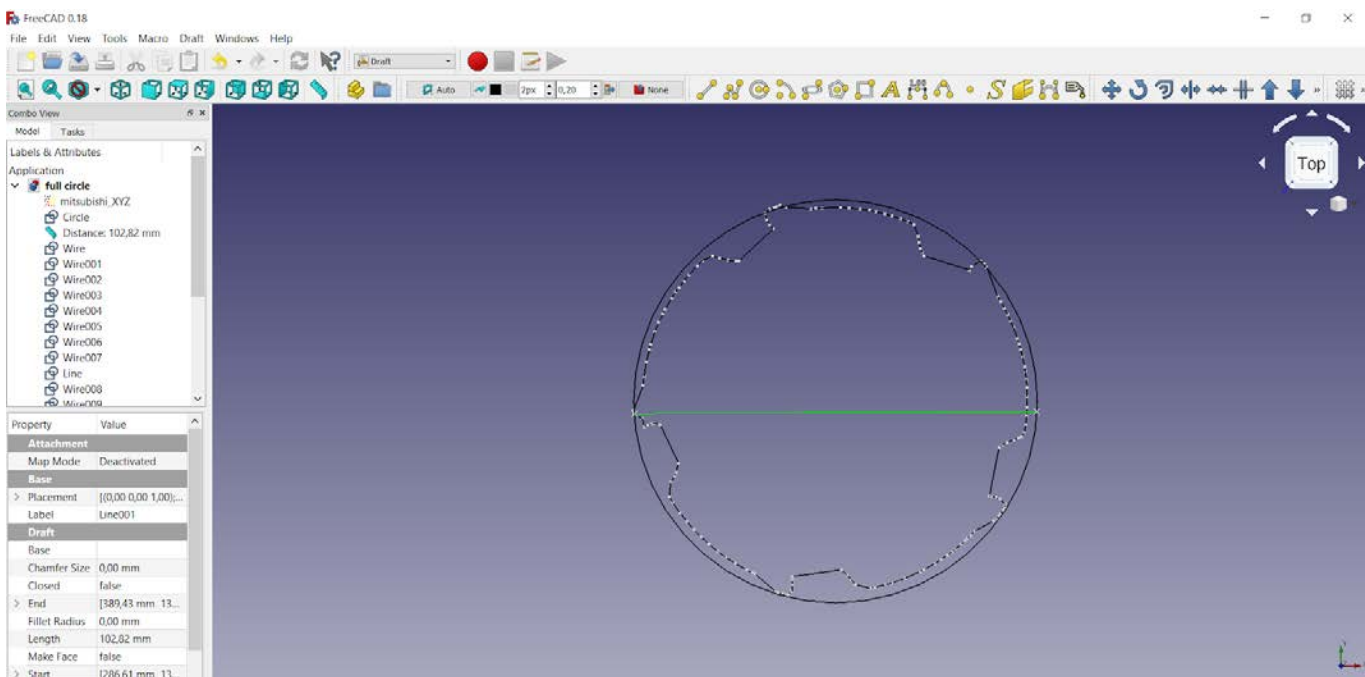


Σχήμα 4.2-4: Η εσωτερική διάμετρος της φρεζοκεφαλής όπως μετρήθηκε.

- Στη συνέχεια φέρουμε εξωτερικό νοητό κύκλο που να τέμνει και τις 5 κόψεις της φρεζοκεφαλής, προς μέτρηση της ακριβής θέσης τους. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 4.2-5. Έπειτα στο Σχήμα 4.2-6 ελέγχουμε την εξωτερική διάμετρο από κόψη σε κόψη, όπου μετριέται στα 102.82 mm και έχει μικρή απόκλιση 0.62 mm από τα 102.2 mm που δίνει ο κατασκευαστής.



Σχήμα 4.2-5: Απεικόνιση του εξωτερικού νοητού κύκλου της φρεζοκεφαλής.



Σχήμα 4.2-6: Απεικόνιση της διαμέτρου του εξωτερικού νοητού κύκλου της φρεζοκεφαλής.

- Για να βρούμε το μήκος του καθενός από τα 5 τόξα που προκύπτουν διαιρώντας τον νοητό εξωτερικό κύκλο από κόψη σε κόψη, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.2-7, 4.2-8, 4.2-9, 4.2-10 και 4.2-11, χρησιμοποιούμε τον τύπο

$$l = 2\pi r/5,$$

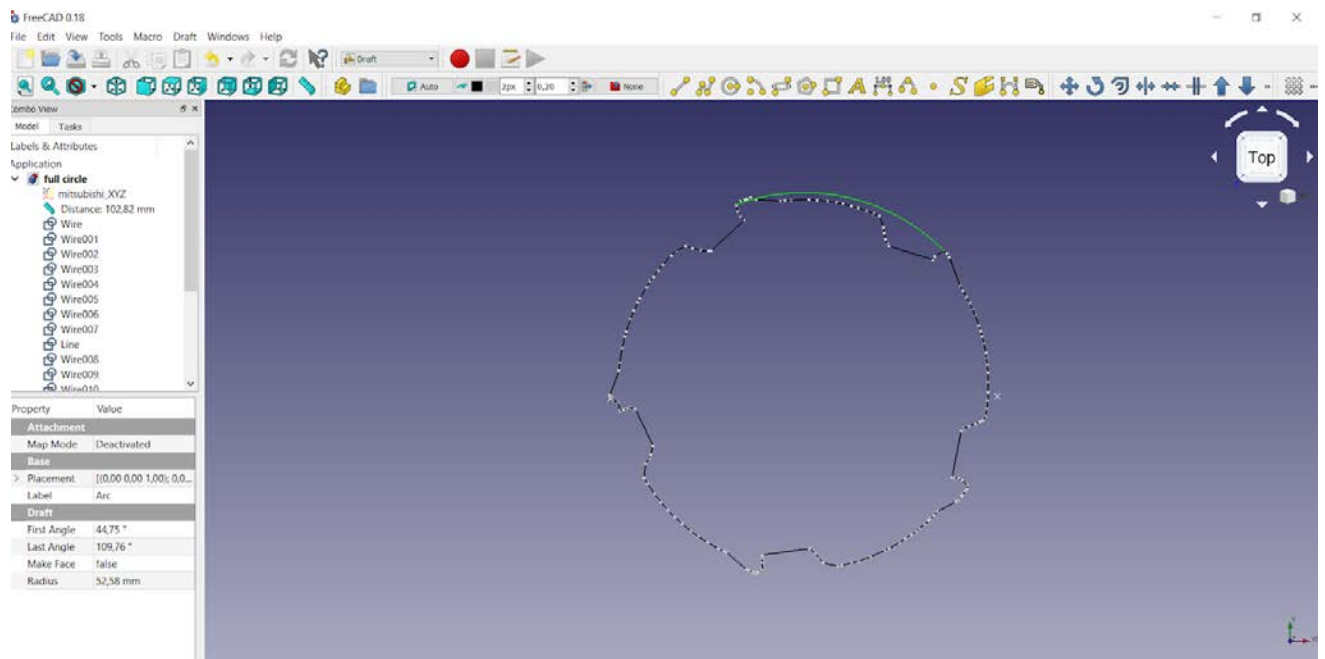
όπου l = μήκος τόξου

r =ακτίνα κύκλου

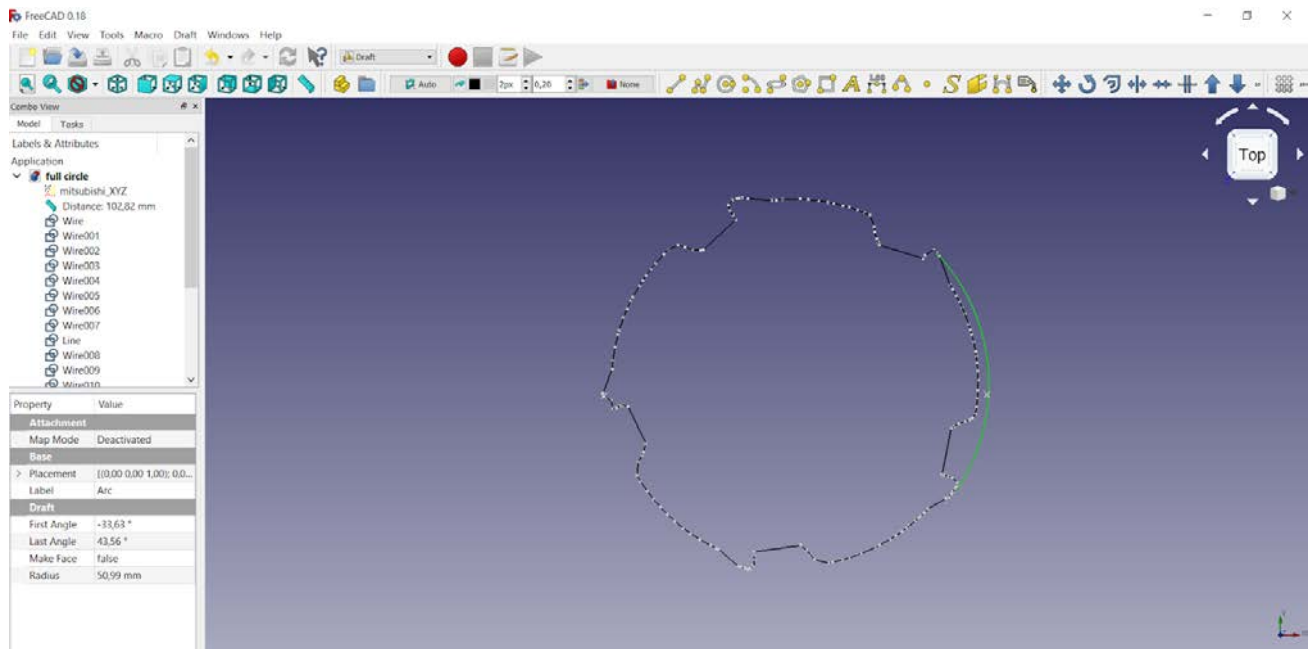
και για $r = 102.82/2$ βρίσκουμε ότι $l = 64.57$ mm.

Άρα βρίσκουμε το μήκος τόξου να είναι 64.57 mm, όταν από τον κατασκευαστή γνωρίζουμε ότι είναι 64.18 mm (διάμετρος= 102.2 mm). Άρα έχουμε μια απόκλιση 0.39 mm.

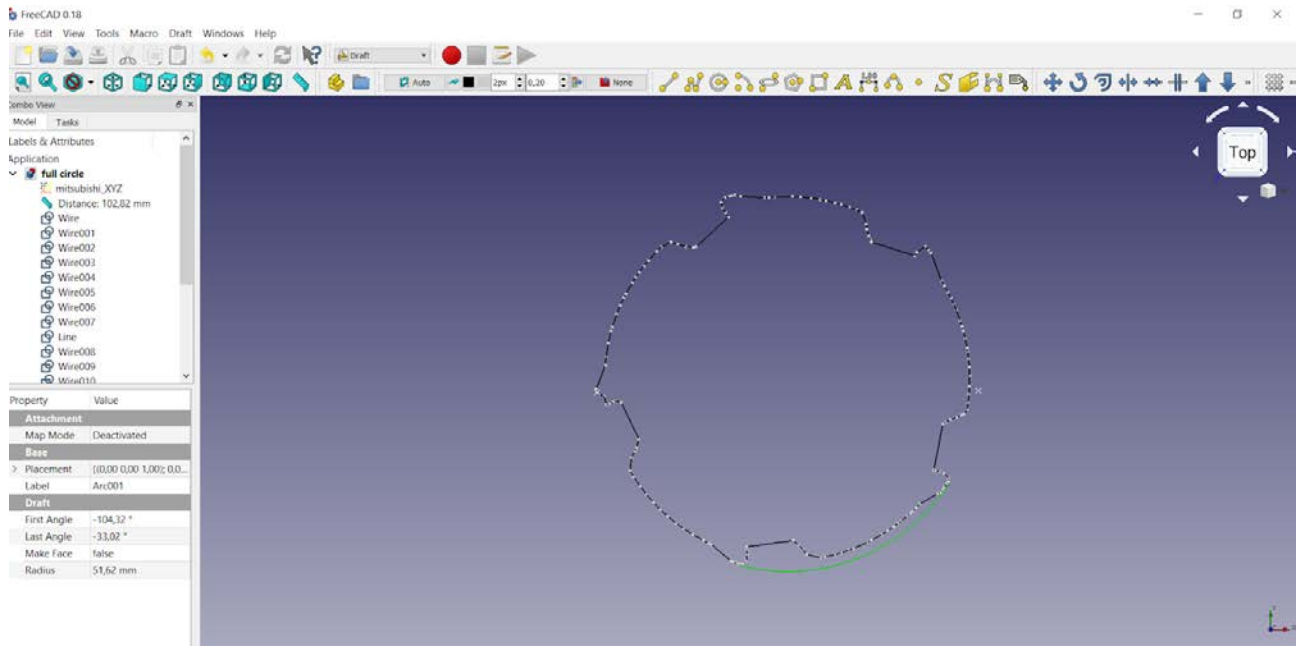
Στα Σχήματα 4.2-7, 4.2-8, 4.2-9, 4.2-10 και 4.2-11 φαίνονται κατά σειρά τα 5 τόξα που σχηματίζονται απο κόψη σε κόψη.



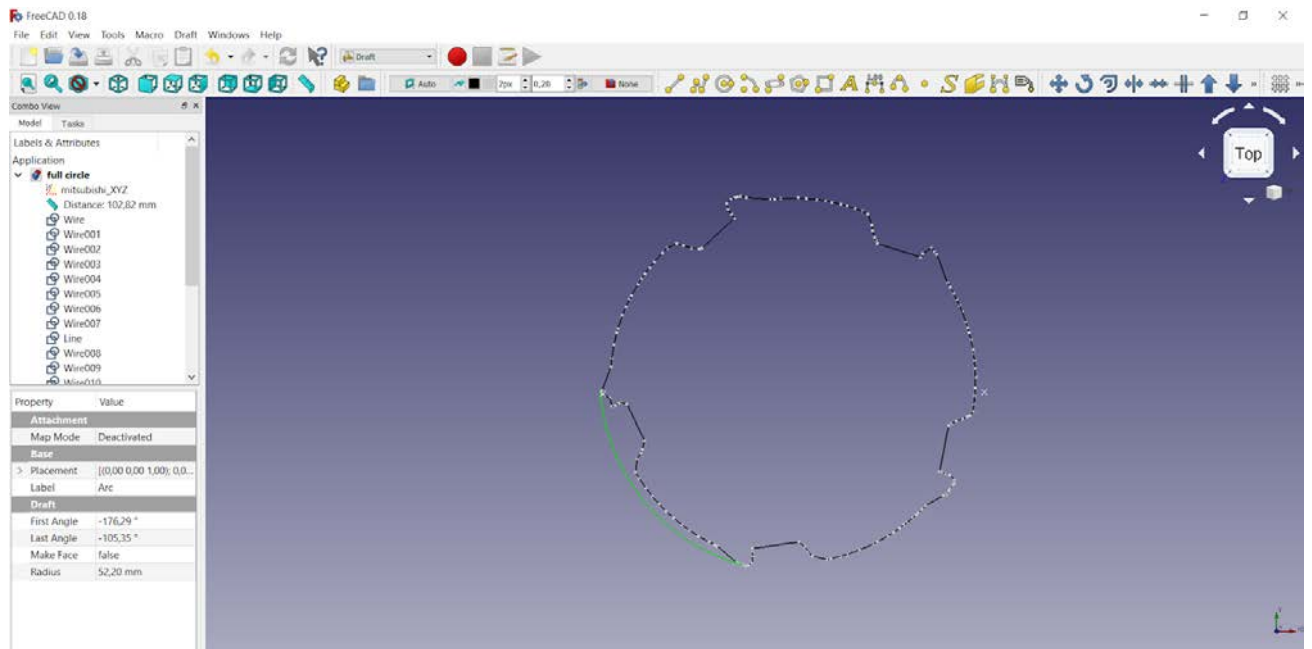
Σχήμα 4.2-7: Άνω τόξο.



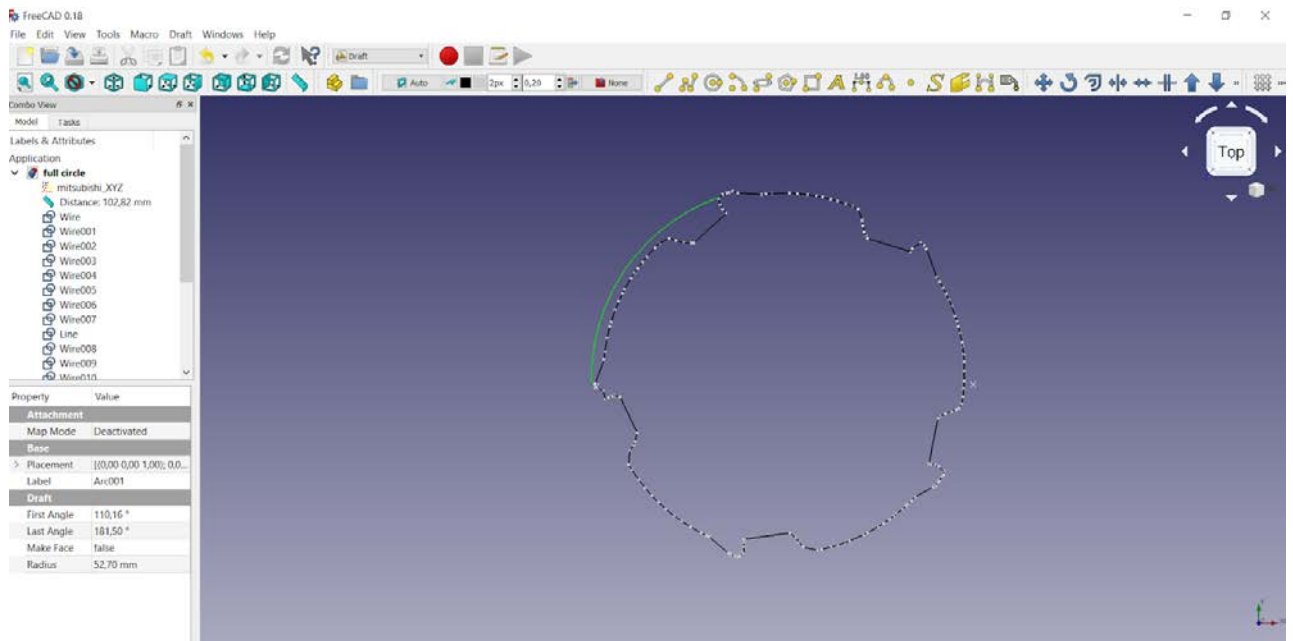
Σχήμα 4.2-8: Άνω δεξιό τόξο.



Σχήμα 4.2-9: Κάτω δεξιό τόξο.



Σχήμα 4.2-10: Κάτω αριστερό τόξο.



Σχήμα 4.2-11: Άνω αριστερό τόξο.

Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο χειροκίνητα χωρίς καμία αλγοριθμική ή άλλου είδους διόρθωση που θα μας βοηθούσε στο να έχουμε πιο ακριβή μέτρηση. Διαφορές της τάξεως του 0.4 mm - 0.6 mm στις μετρήσεις είναι αρκετά μεγάλες και τέτοιο ποσοστό σφάλματος είναι ανεπίτρεπτο στη σύγχρονη βιομηχανία.

Είναι έτσι αναγκαίο όσο ποτέ η βελτίωση των μετρήσεων των μηχανών μέτρησης συντεταγμένων. Η χρησιμοποίηση των μεθόδων που αναφέραμε σε αυτή τη διπλωματική εργασία, και η ανάπτυξη καινούργιων είναι απαραίτητες ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και η επίτευξη ακριβέστερων μετρήσεων κάθε λογής εξαρτημάτων που χρειάζονται στην παγκόσμια βιομηχανία.

Κεφάλαιο 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (coordinate measuring machines ή CMM) και πραγματοποιήθηκε τεχνική ανάλυση στον τρόπο λειτουργίας τους αλλά και των χαρακτηριστικών τους.

Στη συνέχεια αναλύθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια στις μετρήσεις των μηχανών αυτών και αναφέρθηκαν μέθοδοι με σκοπό την βελτίωση της ακρίβειας τους. Οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν περιλαμβάνουν τη χρήση αλγοριθμικής διόρθωσης των σφαλμάτων των μετρήσεων, ενδεικτικό σχεδιασμό εξ ολοκλήρου μιας νέας υψηλής ακριβείας CMM καθώς και μια αναλυτική μέθοδο με σκοπό την αύξηση της συνέπειας των μετρήσεων που λαμβάνουμε από μια σειρά μηχανών μέτρησης συντεταγμένων.

Έπειτα πραγματοποιήθηκε μια μελέτη περίπτωσης (case study) στη Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων που βρίσκεται στο Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Αυτή η μελέτη έδειξε πως η έλλειψη διορθωτικών λειτουργιών κατά τη διάρκεια της μέτρησης, επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα μας και είναι ανάγκη να προβούμε σε αυτές τις διορθωτικές κινήσεις για την βελτίωση των μετρήσεων μας.

Μερικά από τα ερωτήματα που έχουν μείνει αναπάντητα και θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω εργασιών είναι ο τρόπος με τον οποίο οι σύγχρονες τελευταίας γενιάς μηχανές CMM λειτουργούν ώστε να ελαχιστοποιούν τα σφάλματα στις μετρήσεις τους και να αυξάνουν την ακρίβεια σε αυτές. Ακόμη, η χρήση πολλαπλών CMM σε διαφορετικά κομμάτια της εφοδιαστικής αλυσίδας και της βιομηχανικής παραγωγής είναι αρκετά σημαντική και μέθοδοι που μπορούν να βελτιώσουν της ακρίβεια των μετρήσεων αυτών χρήζουν περαιτέρω έρευνας.

Βιβλιογραφία

- [1] The History of Metrology from Galileo to Optical Systems (2016). *Creaform*. Accessed December 12, 2022. <https://www.creaform3d.com/blog/the-history-of-metrology-from-galileo-to-optical-systems/>
- [2] Syam Wahyudin (2022). The history and introduction of CMM: the inseparable relation between CMM and GD&T. *Wasy Research*. Accessed December 12, 2022. <https://www.wasyresearch.com/the-history-and-introduction-of-cmm-the-inseparable-relation-between-cmm-and-gd-t/>
- [3] The History of Coordinate Measuring Machines (September 4, 2020). *CMMXYZ*. Accessed December 12, 2022. <https://www.cmmxyz.com/blog/the-history-of-coordinate-measuring-machines-cmmxyz/>
- [4] Coordinate Measuring Machines Information (n.d.). *GlobalSpec*. Accessed December 13, 2022. https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/inspection_tools_instruments/coordinate_measuring_machines_cmm
- [5] CMM (n.d.). *Keyence*. Accessed December 13, 2022. <https://www.keyence.com/products/measure-sys/cmm/>
- [6] Marcin Krawczyk, Adam Gąska and Jerzy Sładek (2015). Determination of the uncertainty of the measurements performed by coordinate measuring machines. *tm - Technisches Messen*, 82(6), 329–338.
- [7] A. Harvie (1986). Factors affecting component measurement on coordinate measuring machines. *Precision Engineering*, 8(1), 13-18.
- [8] Donati F. and Canuto E. (1986). Self-calibration of coordinate measuring machines: theory and first results. *International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC)*.
- [9] M. M. P.A. Vermeulen, P.C. J.N. Rosielle, P. H. J. Schellekens (1998). Design of a High-Precision 3D-Coordinate Measuring Machine. *CIRP Annals*, 47(1), 447-450.
- [10] Breyer, K.H., Pressel, H.G. (1991). Paving the way to thermally stable Coordinate Measuring Machines, *Progress in Precision Engineering*, 56-75.
- [11] Bryan, J.B. (1979). The Abbe Principle revisited, *Precision Engineering*, 1(3), 129-132.
- [12] Kunzmann, H., Trapet, E., Waldele, F. (1990). A Uniform Concept for Calibration, Acceptance Test, and Periodic Inspection of CMMs Using Reference Objects, *Annals of the CIRP*, 39(11), 561-564.
- [13] S.Sartori, P. C. Cresto, M. Di Ciommo και T. K. Kancheva (1988). A way to improve the accuracy of a co-ordinate measuring machine. *Measurement*, 6(2), 50-54.
- [14] P.S. Huang & J.Ni (1995). On-line error compensation of coordinate measuring machines. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(5), 725-738.
- [15] R. J. Hocken, J. A. Simpson, B. Borchardt, J. Lazar, C. Reeve and P. Stein (1977). Three dimensional metrology, *Ann. CIRP*. 26,103.
- [16] Per Saunders, Alan Wilson, Nick Orchard, Neil Tatman and Paul Maropoulos (2014). An Exploration into Measurement Consistency on Coordinate Measuring Machines. *Procedia CIRP*, 25, 19-26.

- [17] JCGM 200. (2008) International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM).
- [18] BS 7172. (1989) Assessment of position, size and departure from nominal form of geometric features.
- [19] Hwang L, Lee H, Ha S. (2002) Hybrid neuro-fuzzy approach to the generation of measuring points for knowledge-based inspection planning. *International Journal of Production Research*, 40(11),2507–2520.
- [20] Moroni G, Petrò S. (2011) Coordinate Measuring Machine Measurement Planning. *Geometric Tolerances*, 111–158.
- [21] Ascione R, Moroni G, Petrò S, Romano D. (2012) Adaptive inspection in coordinate metrology based on kriging models. *Precision Engineering*, 37(1), 44–60.