

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Πάλλα Ελευθερία

Εκμετάλλευση των σφαλμάτων Abbé
στον προσδιορισμό συνιστωσών του ογκομετρικού σφάλματος
κέντρου κατεργασιών CNC με χρήση laser

Διπλωματική εργασία

Επιβλέπων : Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Ρώτησαν τον κ. Κ. : Τι φτιάχνετε τώρα;

Ο κ. Κ. αποκρίθηκε : *Κουράζομαι πάρα πολύ,
ετοιμάζω το επόμενο λάθος μου.*

Μπέρτολτ Μπρεχτ
(Οι ιστορίες του κ. Κόουερ)

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον καθηγητή κ. Γ.-Χ. Βοσνιάκο για τις συμβουλές, την καθοδήγηση και την - χωρίς φειδώ- βοήθεια του. Μου διέθεσε χρόνο και γνώσεις και με ενέπνευσε με ιδέες, όχι μόνο κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησης μου στην σχολή. Περισσότερο από όλα, τον ευχαριστώ για το εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας, την στήριξη και την εμπιστοσύνη του.

Νοιώθω τυχερή για την δυνατότητα που μου δόθηκε να δουλεύω καθημερινά στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Ιδιαίτερος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Υπ. Διδάκτορες: κ. Ξ. Γωγουβίτη και κ. Ν. Κοντολάτη. Είμαι ευγνώμων για την προθυμία τους, τον χρόνο που μου διέθεταν και τις ιδέες που μοιράζονταν μαζί μου. Η βοήθεια τους, σε όλους τους τομείς, ήταν πολύτιμη.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τον Διδάκτορα κ. Π. Μπενάρδο για την ουσιαστική συμβολή του και την καταλυτική βοήθεια που μου προσέφερε.

Δεν θα είχα το θάρρος να κοιτάξω σφάλματα και λάθη κατάματα, είτε σε μηχανολογικό είτε σε ανθρώπινο επίπεδο, αν δεν μεγάλωνα περιτριγυρισμένη από την αγάπη, την συνεχή υποστήριξη και την αμέριστη κατανόηση της οικογένειας μου. Θα ήθελα για αυτό να ευχαριστήσω την μητέρα μου, τον πατέρα μου και την αδερφή μου. Η παρουσία τους στην ζωή μου αποτελεί βασικό παράγοντα αντιστάθμισης κάθε σφάλματος. . .

Περιεχόμενα

Ευρετήριο σχημάτων	6
Ευρετήριο πινάκων.....	8
Ευρετήριο γραφημάτων	11
Ευρετήριο εικόνων.....	13
Πρόλογος.....	14
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή.....	16
1.1 Μετρολογία εργαλειομηχανών	16
1.2 Σκοπός της μετρολογίας εργαλειομηχανών	16
1.2.1 Καθορισμός της ικανότητας της εργαλειομηχανής προς επίτευξη δεδομένων ανοχών	17
1.2.2 Αντιστάθμιση των μετρούμενων σφαλμάτων.....	17
1.3 Τρόποι αντιστάθμισης των σφαλμάτων	19
Κεφάλαιο 2 – Σφάλματα Εργαλειομηχανών	20
2.1 Εισαγωγή.....	20
2.2 Γεωμετρικά-κινηματικά σφάλματα	22
2.2.1 Γεωμετρικά σφάλματα	22
2.2.2 Κινηματικά σφάλματα	23
2.3 Θερμικώς επαγόμενα σφάλματα.....	23
2.4 Σφάλματα που οφείλονται σε κοπτικές δυνάμεις	23
2.5 Μοντέλοποίηση των σφαλμάτων	24
2.6 Μεθοδος Σύνθεσης Σφαλμάτων	25
2.6.1 Ογκομετρικό Σφάλμα.....	25
2.6.2 Εξαγωγή του μοντέλου ογκομετρικού σφάλματος.....	26
Κεφάλαιο 3 – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	28

Κεφάλαιο 4 – Πρότυπα Μέτρησης Ακρίβειας Θέσης.....	41
4.1 Εισαγωγή.....	41
4.2 Τα πρότυπα μέτρησης ακρίβειας θέσης: σύντομη αναφορά	42
4.2.1 ISO 230-2.....	42
4.2.2 ASME B5.54/ B5.57	44
4.2.3 NMTBA	44
4.2.4 VDI 3441	45
4.3 Τα πρότυπα μέτρησης ακρίβειας θέσης: σύγκριση	47
4.4 Το πρότυπο ISO 230-2.....	48
4.4.1 Γενικά για το ISO 230	48
4.4.2 Το πρότυπο ISO 230-2 (1997)	49
4.5 ISO-230-2:2006	62
Κεφάλαιο 5 - Διαθέσιμος Εξοπλισμός Διαδικασία μετρήσεων.....	63
5.1 Εισαγωγή.....	63
5.2 Συμβολόμετρο	63
5.2.1 Συμβολόμετρο μίας συχνότητας.....	63
5.2.2 Συμβολόμετρο δύο συχνοτήτων.....	64
5.3 Σύστημα Μέτρησης Μετατοπίσεων Laser Doppler.....	65
5.3.1 Σύγκριση LDDM με συμβατικά συμβολόμετρα.....	66
5.4 Διαθέσιμος εξοπλισμός.....	68
5.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά	69
5.4.2 Δυνατότητες	70
5.4.3 Επιπλέον βάση που δεν περιεχόταν στον αρχικό εξοπλισμό	70
5.5 Λογισμικό LDDM.....	74
5.5.1 Πρόγραμμα γραμμικών μετρήσεων	75
5.5.2 Πρόγραμμα ανάλυσης δεδομένων	77
5.6 Το κέντρο κατεργασιών στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.....	77
5.7 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας	79
5.8 Ανοχή ευθυγράμμισης και ευαισθησία στην ευθυγράμμιση.....	83
5.8.1 Διαδικασία ευθυγράμμισης	83
5.8.2 Γωνιακός κύβος	84

5.8.3 Μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης.....	85
5.8.4 Ανοχή Ευθυγράμμισης.....	88
5.8.5 Ευαισθησία στην Ευθυγράμμιση.....	88
5.9 Ακρίβεια Μετρήσεων	90
5.9.1 Σφάλματα του μετρητικού οργάνου	90
5.9.2 Σφάλματα λόγω μεταβολών στο περιβάλλον.....	91
5.9.3 Σφάλματα εγκατάστασης.....	91
5.9.4 Τυχαίοι παράγοντες που επιδρούν στην ακρίβεια των μετρήσεων.....	93
Κεφάλαιο 6 - Προσδιορισμός συνιστωσών του ογκομετρικού σφάλματος: πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα	95
6.1 Συνιστώσες ογκομετρικού σφάλματος και δυνατότητα μέτρηση τους.....	95
6.2 Αλληλοσυσχέτιση σφαλμάτων	99
6.3 Σφάλμα Abbé	99
6.4 Η δομή του κέντρου κατεργασιών HAAS TM-1.....	103
6.5 Ορισμός Abbé offset στην εργαλειομηχανή του πειράματος	104
6.6 Προσδιορισμός συνιστωσών του ογκομετρικού σφάλματος του κέντρου κατεργασιών HAAS ToolRoom Mill TM -1	106
6.7 Αποτελέσματα μετρήσεων και ανάλυση.....	109
6.7.1 Άξονας x.....	110
6.7.1.1 Μετρήσεις κατά τον άξονα x	110
6.7.1.2 Ανάλυση κατά άξονα x	118
6.7.1.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων άξονα x.....	120
6.7.2 Άξονας y.....	121
6.7.2.1 Μετρήσεις κατά τον άξονα y	121
6.7.2.2 Ανάλυση κατά άξονα y	129
6.7.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων άξονα y.....	131
6.7.3 Άξονας z.....	132
6.7.3.1 Μετρήσεις κατά τον άξονα z	132
6.7.3.2 Ανάλυση κατά άξονα z	140
6.7.3.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων άξονα z.....	142

Κεφάλαιο 7 - Συμπεράσματα	143
7.1 Εισαγωγή.....	143
7.2 Συμπεράσματα για την μέθοδο.....	144
7.3 Συμπεράσματα για το κέντρο κατεργασιών HAAS ToolRoom Mill	145
7.4 Κρίσεις πάνω στο πρότυπο ISO 230-2: 1997	146
7.5 Καταληκτικά συμπεράσματα	147
7.6 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	148
Βιβλιογραφία.....	149

Ευρετήριο σχημάτων

σχήμα 1.1: Η εξέλιξη της επιτευχθείσας ακρίβειας	18
σχήμα 2.1: επισκόπηση των συνισταμένων του σφάλματος εργαλειομηχανής και των παραγόντων από τους οποίους εξαρτώνται	21
σχήμα 2.2: σχετική θέση του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου	25
σχήμα 3.1: διάγραμμα της μηχανής μέτρησης συντεταγμένων και των ανεξάρτητων συστημάτων συντεταγμένων	29
σχήμα 3.2: σύστημα συντεταγμένων στο κέντρο κατεργασιών	33
σχήμα 3.3: συστήματα συντεταγμένων τριαξονικού οριζόντιου κέντρου κατεργασιών	36
σχήμα 3.4: προσέγγιση γωνιακών σφαλμάτων μέσω γραμμικών	38
σχήμα 4.1: καμπύλη που βασίζεται στις πραγματικές θέσεις που προκύπτουν από πέντε σειρές μετρήσεων όταν η θέση στόχος προσεγγίζεται πάντα από την ίδια κατεύθυνση	42
σχήμα 4.2: καμπύλη που βασίζεται στις πραγματικές θέσεις που προκύπτουν από πέντε σειρές μετρήσεων όταν η θέση στόχος προσεγγίζεται και από την αντίθετη κατεύθυνση	43
σχήμα 4.3: ακρίβεια θέσης, επαναληψιμότητα άξονα κατά ISO 230-2	43
σχήμα 4.4: αβεβαιότητα θέσης, σφάλμα αντιστρεψιμότητας κατά VDI 3441	45
σχήμα 4.5: διασπορά θέσης κατά VDI 3441	46
σχήμα 4.6: απόκλιση θέσης κατά VDI 3441	46
σχήμα ISO 230-2.1: καθιερωμένος κύκλος δοκιμών	55
σχήμα ISO 230-2.2: δι-κατευθυντική ακρίβεια και επαναληψιμότητα τοποθέτησης..	60
σχήμα ISO 230-2.3: μόνο-κατευθυντική ακρίβεια και επαναληψιμότητα τοποθέτησης	60
σχήμα ISO 230-2.4: βηματικός κύκλος δοκιμών	61
σχήμα 5.1: αρχή συμβολόμετρου Michelson	64
σχήμα 5.2: αρχή συμβολόμετρου δύο συχνοτήτων	65
σχήμα 5.3: αρχή LDDM	66
σχήμα 5.4: λεπτομέρεια της βάσης Stable-laser positioner: η συσκευή συγκράτησης	72
σχήμα 5.5: οι άξονες προσαρμογής ακρίβειας της βάσης Stable-laser positioner...	74
σχήμα 5.6: δέσμη φωτός που προσπίπτει πάνω σε γωνιακό κύβο επιστρέφει σε παράλληλη διαδρομή	84

σχήμα 5.7: όταν η δέσμη φωτός προσπίπτει στην επιφάνεια του γωνιακού κύβου επιστρέφει πάντα στην πηγή της	84
σχήμα 5.8: σφάλμα Abbé	92
σχήμα 5.9 σφάλμα συνημιτόνου	92
σχήμα 6.1: οι παράγοντες σφάλματος της εργαλειομηχανής προς εξετάση	95
σχήμα 6.2: γραμμικό σφάλμα θέσης.....	96
σχήμα 6.3: τα γωνιακά σφάλματα yaw, pitch,roll όταν η κίνηση του τραπέζιού της εργαλειομηχανής μας γίνεται κατά μήκος του x άξονα	97
σχήμα 6.4: γωνιακό σφάλμα yaw λόγω χαλάρωσης των οδηγών του τραπέζιού	97
σχήμα 6.5: γωνιακό σφάλμα pitch λόγω στρέβλωσης, λυγισμού ή κάμψης των οδηγών του τραπέζιού	97
σχήμα 6.6: σφάλμα Abbé	100
σχήμα 6.7: γραμμικό σφάλμα που προκαλείται από την γωνία pitch $\widehat{Ay}x$ λόγω γωνιακού σφάλματος ε_{yx}	102
σχήμα 6.8: γραμμικό σφάλμα που προκαλείται από την γωνία pitch \widehat{Az} λόγω γωνιακού σφάλματος ε_{zx}	102
σχήμα 6.9: σκαρίφημα της μηχανής	104
σχήμα 6.10: Abbé offset άξονα x.....	105
σχήμα 6.11: Abbé offset άξονα y	105
σχήμα 6.12: Abbé offset άξονα z	105
σχήμα 6.13: επίδραση γωνιακού σφάλματος ε_{yx} κατά την μετατόπιση στον άξονα x	107
σχήμα 6.14 επίδραση γωνιακού σφάλματος ε_{xy} κατά την μετατόπιση στον άξονα y	108

Ευρετήριο Πινάκων

πίνακας 2.1: οι 21 παράγοντες σφάλματος ενός κάθετου κέντρου κατεργασιών τριών αξόνων	22
πίνακας 3.1: παραμετρικές εκφράσεις σφαλμάτων Y και Z άξονα	39
πίνακας 4.1: συγκριτικός πίνακας προτύπων	47
πίνακας ISO 230- 2.1: τυπικά αποτελέσματα ελέγχου ακρίβειας γραμμικού άξονα εως 2000m.....	59
πίνακας 5.1: συγκριτικός πίνακας τεχνολογιών LDDM και της συμβολομετρίας Michelson.....	67
πίνακας 5.2: μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης, $x=417.500\text{mm}$	86
πίνακας 5.3: μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης, $x=417.180\text{mm}$	87
πίνακας 5.4: μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης, $x=417.180\text{mm}$	87
πίνακας 5.5: μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης, ανάλυση μέσης απόκλισης κάθε θέσης για τις 3 μετρήσεις.....	89
πίνακας 5.6: μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης ανάλυση παραμέτρων ISO για τις 3 μετρήσεις.....	89
πίνακας 5.7: σφάλματα θέσεως μετά από 5 δι-κατευθυντικές σειρές μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x.....	94
πίνακας 5.8: εύρεση παραμέτρων κατά ISO μετά από 5 δι-κατευθυντικές σειρές μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x	94
πίνακας 6.1: κίνηση κατά μήκος x άξονα – ποια offset παράγουν σφάλμα Abbé για δεδομένο γωνιακό σφάλμα.....	101
πίνακας 6.2: κίνηση κατά μήκος y άξονα – ποια offset παράγουν σφάλμα Abbé για δεδομένο γωνιακό σφάλμα.....	101
πίνακας 6.3: κίνηση κατά μήκος z άξονα – ποια offset παράγουν σφάλμα Abbé για δεδομένο γωνιακό σφάλμα	101
πίνακας 6.4: υπολογισμός $\sin A_y$ και $1-\cos A_z$ για χαρακτηριστικές τιμές των γωνιακών σφαλμάτων	103
πίνακας 6.5: αποτελέσματα από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος άξονα x ..	110
πίνακας 6.6: σφάλματα θέσεως από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x.....	111
πίνακας 6.7: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x.....	111
πίνακας 6.8: αποτελέσματα από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος άξονα x..	114
πίνακας 6.9: σφάλματα θέσεως από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x.....	115

πίνακας 6.10: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x.....	115
πίνακας 6.11: εύρεση σφάλματος θέσης και γωνιακού σφάλματος pitch ε_{yx} κατά μήκος του άξονα x.....	118
πίνακας 6.12: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα x που προκύπτουν από τις δύο μετρήσεις	119
πίνακας 6.13: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα x που προκύπτουν από μετρήσεις σε τυχαίες θέσεις y και τυχαία Abbé offset	119
πίνακας 6.14: αποτελέσματα από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y	121
πίνακας 6.15: σφάλματα θέσεως από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y	122
πίνακας 6.16: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y.....	122
πίνακας 6.17: σφάλματα θέσεως από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y	125
πίνακας 6.18: σφάλματα θέσεως από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y	126
πίνακας 6.19: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y	126
πίνακας 6.20: εύρεση σφάλματος θέσης και γωνιακού σφάλματος pitch ε_{xy} κατά μήκος του άξονα y.....	129
πίνακας 6.21: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα y που προκύπτουν από τις δύο μετρήσεις	130
πίνακας 6.22: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα y που προκύπτουν από μετρήσεις σε τυχαίες θέσεις y και τυχαία Abbé offset	130
πίνακας 6.23: αποτελέσματα από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z	132
πίνακας 6.24: σφάλματα θέσεως από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z.....	133
πίνακας 6.25: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z.....	133
πίνακας 6.26: αποτελέσματα από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος άξονα z	136
πίνακας 6.27: σφάλματα θέσεως από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z.....	137
πίνακας 6.28: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z	137
πίνακας 6.29: εύρεση σφάλματος θέσης και γωνιακού σφάλματος pitch ε_{xz} κατά μήκος του άξονα z.....	140

πίνακας 6.30: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα z που προκύπτουν από τις δύο μετρήσεις	141
πίνακας 6.31: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα z που προκύπτουν από μετρήσεις σε τυχαίες θέσες y και τυχαία Abbé offset	141

Ευρετήριο γραφημάτων

γράφημα 6.1: σφάλμα θέσης – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)	112
γράφημα 6.2: μέσο σφάλμα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)	112
γράφημα 6.3: αντιστρεψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)	113
γράφημα 6.4: επαναληψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)	113
γράφημα 6.5: σφάλμα θέσης – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)	116
γράφημα 6.6: μέσο σφάλμα– θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)	116
γράφημα 6.7: αντιστρεψιμότητα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)	117
γράφημα 6.8: επαναληψιμότητα– θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)	117
γράφημα 6.9: γωνιακό σφάλμα pitch ε_{yx} – θέση κατά μήκος άξονα x	118
γράφημα 6.10: σφάλμα θέσης Dx – θέση κατά μήκος άξονα x	119
γράφημα 6.11: σφάλμα θέσης – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)	123
γράφημα 6.12: μέσο σφάλμα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)	123
γράφημα 6.13: αντιστρεψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)	124
γράφημα 6.14: επαναληψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)	124
γράφημα 6.15: σφάλμα θέσης – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)	127
γράφημα 6.16: μέσο σφάλμα– θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)	127
γράφημα 6.17: αντιστρεψιμότητα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)	128
γράφημα 6.18: επαναληψιμότητα– θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)	128
γράφημα 6.19: γωνιακό σφάλμα pitch ε_{xy} – θέση κατά μήκος άξονα y	129

γράφημα 6.20: σφάλμα θέσης Dy – θέση κατά μήκος άξονα y	130
γράφημα 6.21: σφάλμα θέσης – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)	134
γράφημα 6.22: μέσο σφάλμα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)	134
γράφημα 6.23: αντιστρεψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)	135
γράφημα 6.24: επαναληψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)	135
γράφημα 6.25: σφάλμα θέσης – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)	138
γράφημα 6.26: μέσο σφάλμα– θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)	138
γράφημα 6.27: αντιστρεψιμότητα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)	139
γράφημα 6.28: επαναληψιμότητα– θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)	139
γράφημα 6.29: γωνιακό σφάλμα $\text{pitch } \varepsilon_{xz}$ – θέση κατά μήκος άξονα z	140
γράφημα 6.30: σφάλμα θέσης Dz – θέση κατά μήκος άξονα z	141

Ευρετήριο εικόνων

εικόνα 5.1: το σύστημα LDDM της συλλογής MCV-500 της Optodyne Inc.	69
εικόνα 5.2: η βάση Stable-laser positioner.....	71
εικόνα 5.3: συγκράτηση του τεμαχίου που έρχεται σε επαφή με το laser – πρώτο στάδιο κατεργασίας.....	72
εικόνα 5.4: κοπή αυλακιών στην πλευρά του τεμαχίου που έρχεται σε επαφή με το laser, για να επιτύχουμε το ελάχιστο δυνατό βάρος.....	73
εικόνα 5.5: δημιουργία πατούρας στην πλευρά του τεμαχίου που έρχεται σε επαφή με την συσκευή συγκράτησης, ώστε να επιτύχουμε την σωστή και ασφαλή συνεργασία των δύο.....	73
εικόνα 5.6: δημιουργία δύο μεγάλων οπών για να επιτύχουμε το ελάχιστο δυνατό βάρος	73
εικόνα 5.7: το κεντρικό menu του λογισμικού.....	75
εικόνα 5.8: καθορισμός χαρακτηρισικών μέτρησης.....	76
εικόνα 5.9: παράθυρο μετρήσεων	77
εικόνα 5.10: η μηχανή HAAS ToolRoom Mill TM-1 του εργαστηρίου του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών	78
εικόνα 5.11: μέτρηση κατά μήκος x άξονα	81
εικόνα 5.12: μέτρηση κατά μήκος y άξονα	82
εικόνα 5.13: μέτρηση κατά μήκος z άξονα	82
εικόνα 5.14: παράθυρο μετρήσεων – γραμμή έντασης.....	83
εικόνα 5.15: το αντανakλασικό πλαίσιο από γωνιακούς κύβους στην σελήνη.....	85
εικόνα 6.1: μέτρηση roll με ηλεκτρονικές στάθμες	98

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη μεθοδολογίας η οποία να καθιστά δυνατή τη μέτρηση και τη μελέτη των γεωμετρικών σφαλμάτων εργαλειομηχανών. Στόχος ήταν ο προσδιορισμός συνιστωσών του ογκομετρικού σφάλματος κέντρου κατεργασιών CNC.

Η συνολική ογκομετρική ακρίβεια μιας εργαλειομηχανής περικλείει πληροφορίες για την σχετική θέση εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου σε κάθε τυχαίο σημείο του χώρου εργασίας. Λόγω της αλληλεπίδρασης των σφαλμάτων της εργαλειομηχανής, προς το παρόν δεν φαίνεται δυνατόν να χαρακτηριστεί η ακρίβεια της μηχανής σε όλο τον όγκο της μόνο με μία παράμετρο. Στην πράξη η εφαρμογή της έννοιας της ογκομετρικής ακρίβειας περιέχει τον προσδιορισμό παραμέτρων του σφάλματος και τον συνδυασμό τους ώστε να εκτιμηθεί η συμπεριφορά της εργαλειομηχανής στο σύνολο του όγκου εργασίας της.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η αλληλεπίδραση των γραμμικών και των γωνιακών σφαλμάτων. Εκμεταλλευόμενοι το σφάλμα Abbé, που απορρέει από το γωνιακά σφάλμα και επιδρά στα γραμμικά, αναπτύξαμε μία μεθοδολογία προσέγγισης των συνισταμένων του ογκομετρικού σφάλματος με στόχο να μην είναι πολύπλοκη ή χρονοβόρα ώστε να είναι εύκολα εφαρμόσιμη και στην βιομηχανία ή τα μηχανουργεία. Με χρήση του διαθέσιμου εξοπλισμού διεξήχθησαν μετρήσεις και τα πειραματικά αποτελέσματα αναλύθηκαν με σκοπό την άντληση πληροφοριών για την εκτίμηση της ογκομετρικής ακρίβειας της μηχανής.

Η εργασία είναι δομημένη σε επτά κεφάλαια. Συγκεκριμένα:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγική αναφορά στην μετρολογία εργαλειομηχανών και στους σκοπούς που υπηρετεί.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θεμελιώνεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται ο ορισμός του σφάλματος εργαλειομηχανής και οι κατηγοριοποιήσεις του ενώ αναλύονται οι πηγές των σφαλμάτων. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση των σφαλμάτων προχωράμε από την μεμονωμένη ανάλυση κάθε σφάλματος στην μοντελοποίηση αυτών σε ένα συνολικό. Παρουσιάζονται οι μέθοδοι μοντελοποίησης και επικεντρωνόμαστε στην “μέθοδο σύνθεσης σφάλματος”, η οποία βασίζεται στην ιδέα του ογκομετρικού σφάλματος. Τέλος, περιγράφονται οι βασικές τεχνικές εξαγωγής του μοντέλου ογκομετρικού σφάλματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας παρατίθεται η βιβλιογραφική έρευνα που αφορά τα γεωμετρικά μοντέλα σφαλμάτων. Περιγράφονται συνοπτικά οι μεθοδολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί καθώς και η βελτίωση της ακρίβειας που επιτεύχθηκε από την κάθε μία. Η έκφραση του γεωμετρικού σφάλματος αρχικά πραγματοποιοιείτο με την χρήση τριγωνομετρικών σχέσεων, στην συνέχεια μέσω διανυσματικών απεικονίσεων

με την χρήση αναλυτικής γεωμετρίας ενώ η αλματώδης εξέλιξη ήρθε με την μετάβαση στην κινηματική στερεού σώματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα πρότυπα μέτρησης της ακρίβειας θέσης. Η αναφορά αυτή είναι απαραίτητη διότι ο προσδιορισμός των σφαλμάτων μίας εργαλειομηχανής γίνεται μέσα από την ακρίβεια της, η οποία εντούτοις δεν ορίζεται με τον ίδιο τρόπο παγκοσμίως. Ακολουθεί μία συγκριτική παράθεση των προτύπων. Τέλος, παρατίθεται το πρότυπο ISO-230-2:1997, το οποίο ακολουθήθηκε τόσο κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων όσο και κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων μας, και δίνονται οι ορισμοί των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των αποτελεσμάτων

Το πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας αναφέρεται στον τρόπο υλοποίησης των μετρήσεων σφαλμάτων στις εργαλειομηχανές. Παρουσιάζεται ο διαθέσιμος εξοπλισμός του εργαστηρίου καθώς και τα χαρακτηριστικά κι οι δυνατότητες του. Στη συνέχεια περιγράφεται η πειραματική διαδικασία. Επειδή η πειραματική διαδικασία καθορίστηκε από τους περιορισμούς που τίθενται από τον εξοπλισμό, στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου μας απασχολούν τα ζητήματα που αφορούν στο μετρητικό όργανο και την ακρίβεια των μετρήσεων.

Το έκτο κεφάλαιο αποτελεί την παρουσίαση του πειραματικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Εδώ αναλύονται οι συνιστώσες του ογκομετρικού σφάλματος και οι δυνατότητες μέτρησής τους με τον διαθέσιμο εξοπλισμό. Διερευνάται η αλληλοσυσχέτιση των σφαλμάτων και αναπτύσσεται η μεθοδολογία για την εκμετάλλευση της επίδρασης των γωνιακών σφαλμάτων μέσω του απορρέοντος σφάλματος Abbé. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε κέντρο κατεργασιών του εργαστηρίου του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και αναλύονται.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται όλα τα συμπεράσματα τα οποία μπορούν να εξαχθούν από την μελέτη που διενεργήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Μετρολογία εργαλειομηχανών

Εργαλειομηχανές ονομάζονται οι μηχανές που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση κατεργασιών [1]. Το αποτέλεσμα μίας κατεργασίας είναι ένα τεμάχιο που είτε θα συναρμολογηθεί με άλλα με ορισμένο τρόπο για να αποτελέσουν ένα καινούργιο προϊόν είτε θα χρειαστεί να συνεργαστεί με άλλα ώστε να επιτευχθούν κάποιες επιθυμητές λειτουργίες. Και στις δύο περιπτώσεις είναι φανερό πως το τεμάχιο πρέπει μετά την κατεργασία να ικανοποιεί κάποιες απαιτήσεις μορφής και διαστάσεων.

Στην πράξη, βέβαια, η κατασκευή των κομματιών αναπόφευκτα αποκλίνει από τις ιδανικές διαστάσεις και την ιδανική γεωμετρία που προβλέπεται κατά τον μηχανολογικό σχεδιασμό. Για αυτό για την κατεργασία κάθε τεμαχίου υπάρχουν καθορισμένα επιτρεπτά όρια απόκλισης που θεωρούμε ότι εξασφαλίζουν την ποιότητα, την λειτουργικότητα και την συναρμο-λογησιμότητά του (ανοχές) [2]. Επομένως, όταν επιλέγουμε να κατεργαστούμε ένα τεμάχιο σε κάποια εργαλειομηχανή ένα από τα βασικά θέματα που χρειάζεται να γνωρίζουμε είναι αν εκείνη θα μας εξασφαλίσει πως το τελικό προϊόν μετά την κατεργασία θα βρίσκεται μέσα στα όρια αυτά. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό δίνεται μέσω από την μετρολογία εργαλειομηχανών.

1.2 Σκοπός της μετρολογίας εργαλειομηχανών

Όπως ακριβώς αναφέρεται και στην βιβλιογραφία [3] όταν μιλάμε για μετρολογία εργαλειομηχανών αναφερόμαστε σε μετρήσεις της ακρίβειας των εργαλειομηχανών με σκοπό:

- i) να είναι γνωστή η ικανότητά τους προς επίτευξη δεδομένων ανοχών του κατεργαζόμενου τεμαχίου και
- ii) την αντιστάθμιση των μετρούμενων σφαλμάτων μέσω του hardware/software.

1.2.1 Καθορισμός της ικανότητας της εργαλειομηχανής προς επίτευξη δεδομένων ανοχών

Ως ακρίβεια ορίζεται ο βαθμός συμφωνίας της μορφής και των διαστάσεων του έτοιμου τεμαχίου που κατεργαστήκαμε στην εργαλειομηχανή με αυτές που απαιτούνταν [4]. Κατ' επέκταση, μέσω της ακρίβειας καθορίζεται κι η ικανότητα της εργαλειομηχανής προς επίτευξη δεδομένων ανοχών.

Έχοντας γνώση της ακριβείας των εργαλειομηχανών που έχουμε στην διάθεση μας μπορούμε να τις κατηγοριοποιήσουμε ως προς την ακρίβεια τους και να αναθέτουμε σε κάθε μία κατεργασίες ανάλογης ακρίβειας. Αυτό είναι καίριο για την παραγωγικότητα μιας βιομηχανίας ή ενός μηχανουργείου , αλλά αποτελεί και την οικονομικά βέλτιστη λύση.

Ο καθορισμός της ακρίβειας της εργαλειομηχανής μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: έμμεσα με τον έλεγχο των διαστάσεων ενός τελικού τεμαχίου, κι άμεσα με την μέτρηση της ακρίβειας θέσης και της επαναληψιμότητας της ίδιας της εργαλειομηχανής. Σε μία βιομηχανία κι οι δύο τρόποι συνδυάζονται : ο πρώτος εξασφαλίζει την επιθεώρηση των τελικών κομματιών, αλλά είναι χρονοβόρος αφού ένα τεμάχιο που χρειάζεται 3 ώρες για να κατασκευαστεί μπορεί να χρειαστεί ακόμα και 7ώρες για να ελεγχθεί σε μία CMM [31]. Ο δεύτερος εξασφαλίζει μία γενική εποπτεία της εργαλειομηχανής αλλά ο χρόνος που ξοδεύεται για να ελεγχθεί η εργαλειομηχανή είναι χρόνος που η μηχανή δεν είναι παραγωγική.

1.2.2 Αντιστάθμιση των μετρούμενων σφαλμάτων

Είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστεί μία τέλεια εργαλειομηχανή, κι ακόμα κι αν υποθέσουμε πως πετυχαίνεται ο τέλειος σχεδιασμός, η ακρίβεια της μηχανής αλλάζει κάθε φορά που αυτή υπόκειται σε διαφορετικά θερμικά φορτία και κοπτικές δυνάμεις. Η επίδραση των θερμικών σφαλμάτων και των σφαλμάτων που προκαλούνται από τις δυνάμεις κοπής δεν μπορεί να ληφθεί ολοκληρωτικά υπ' όψη ούτε καν στην πιο λεπτομερή σχεδίαση μιας μηχανής.

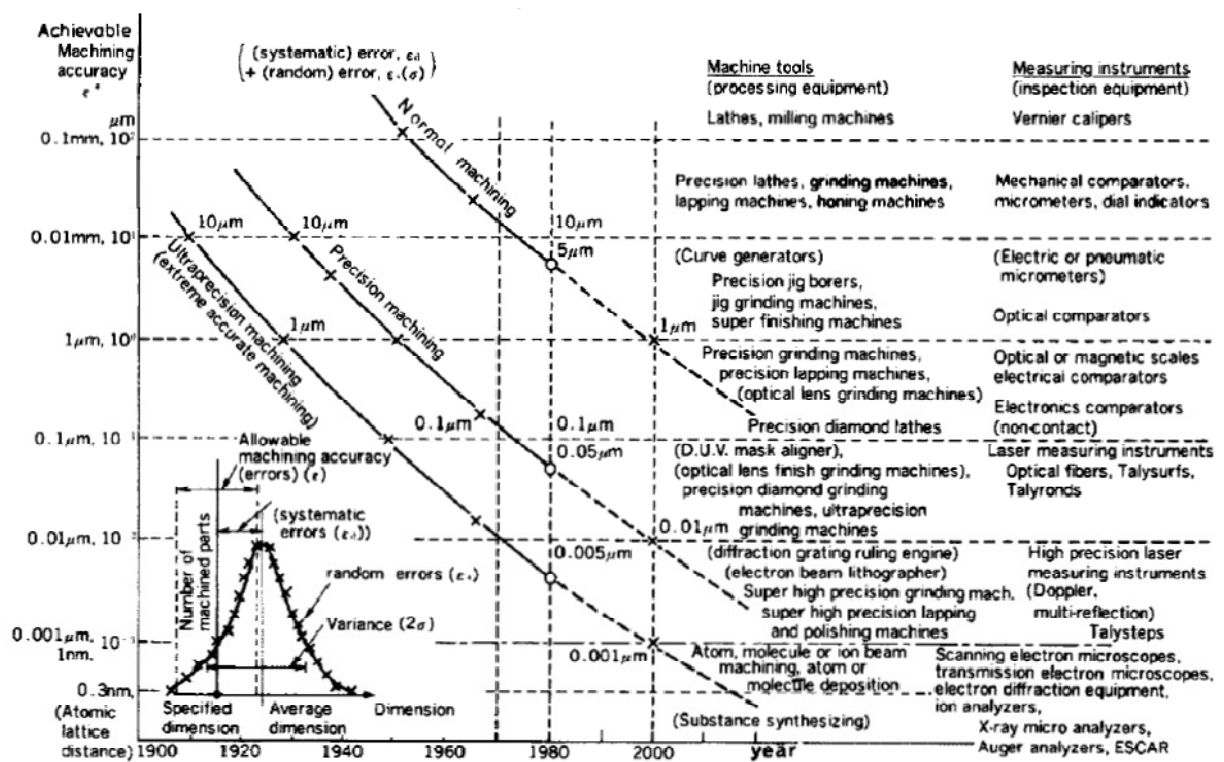
Ο N. Taniguchi [51] σε άρθρο του αναφέρθηκε στην εξέλιξη της ακρίβειας που είχε επιτευχθεί από τις εργαλειομηχανές τα τελευταία 70 χρόνια έως το 1980. Με βάση τα στοιχεία αυτά κάνει μία πρόβλεψη για την ακρίβεια που θα επιτευχθεί στο μέλλον. Τα αποτελέσματα του τα παρουσίασε χαρακτηριστικά σε ένα γράφημα (σχήμα 1.1), στο οποίο μπορούμε να διακρίνουμε ότι στην εποχή μας δεν υπάρχουν μεγάλα περιθώρια για να εναποθέσουμε τις ελπίδες μας για μεγαλύτερη ακρίβεια απλώς στην εξέλιξη των εργαλειομηχανών – δεδομένου ότι έχουμε καταφέρει πλέον να είμαστε πολύ κοντά στην μέγιστη ακρίβεια που φαίνεται να μπορεί να επιτευχθεί.

Ούτως ή άλλως, το να σχεδιαστεί μία πολύ ακριβής μηχανή περιέχει ένα μεγάλο κόστος.

Ένα πιο εύκολα πραγματοποιήσιμο σχέδιο είναι να παρακολουθούμε, ή να μετράμε το μέγεθος του σφάλματος και να αντισταθμίζουμε τις αλλαγές στην ζητούμενη θέση

του κάθε άξονα – κάτι το οποίο είναι εφαρμόσιμο μόνο σε εργαλειομηχανές CNC. Για σφάλματα συστηματικά ή επαναληπτικά, που μετριοούνται και αποθηκεύονται, αυτή η στρατηγική αντιστάθμισης είναι πλήρως αποτελεσματική [4].

Για τους παραπάνω λόγους η τεχνική της αντιστάθμισης των σφαλμάτων κερδίζει συνεχώς έδαφος και λόγω της εύκολης εκτέλεσης αλλά και του λογικού της κόστους. Αυτή η τεχνική μας επιτρέπει να μιλάμε για ακρίβεια και παραγωγή υψηλών προδιαγραφών ακόμα κι όταν χρησιμοποιούμε μία εργαλειομηχανή μέτριας ακριβείας [4].



σχήμα 1.1: η εξέλιξη της επιτευχθείσας ακριβείας [51]

1.3 Τρόποι αντιστάθμισης των σφαλμάτων

Υπάρχουν δύο θεμελιώδεις τρόποι για να αντισταθμίσουμε τα σφάλματα στις εργαλειομηχανές.

Ο πρώτος αφορά τεχνικές που επεμβαίνουν στο hardware της μηχανής, και ο δεύτερος αφορά τεχνικές με τις οποίες επεμβαίνουμε στο λογισμικό της και διορθώνοντας τις συντεταγμένες του κινούμενου μέρους (άξονα). Για τα δύο διαφορετικά αυτά είδη τεχνικών χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές φράσεις-κλειδιά: error lapping και error mapping and compensating [5].

Οι συνθήκες που πρέπει να πληρούνται ώστε να αξίζει πραγματικά η αντιστάθμιση των σφαλμάτων διευκρινίζονται από τους S. Santori και G. X. Zhang [5]:

- i) μόνο τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να αντισταθμιστούν
- ii) για να αντισταθμιστεί το συστηματικό σφάλμα πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το τυχαίο, δηλαδή πρέπει να έχει εξασφαλισθεί η επαναληψιμότητα της μηχανής
- iii) τα αναμενόμενα πλεονεκτήματα (όπως βελτίωση ακρίβειας) πρέπει να δικαιολογούν το κόστος αντιστάθμισης
- iv) ο ρυθμός μεταβολής των σφαλμάτων στο χώρο πρέπει να είναι χαμηλότερος συγκριτικά με τα διαστήματα των διαστασιακών προτύπων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των σφαλμάτων.
- v) η μηχανή πρέπει να έχει ένα απόλυτο σύστημα συντεταγμένων, η αβεβαιότητα της αρχής του οποίου πρέπει να είναι μικρότερη από το ρυθμό μεταβολής των σφαλμάτων στο χώρο.
- vi) η απόδοση του κινητήρα ή/και του υπολογιστή πρέπει να είναι επαρκής
- vii) μηχανής πρέπει να είναι διαθέσιμο ένα κατάλληλο μοντέλο της, του οποίου οι παράμετροι θα μπορούν να μετρηθούν πειραματικά, και από το οποίο θα μπορεί να εξαχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο σφαλμάτων.

Σφάλματα Εργαλειομηχανών

2.1 Εισαγωγή

Το σφάλμα ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της πραγματικής απόκρισης της μηχανής σε μία εντολή, που δίδεται σύμφωνα με το αποδεκτό πρωτόκολλο της λειτουργίας της, και της απόκρισης σε αυτή την εντολή που αναμενόταν σύμφωνα με το πρωτόκολλο αυτό [6].

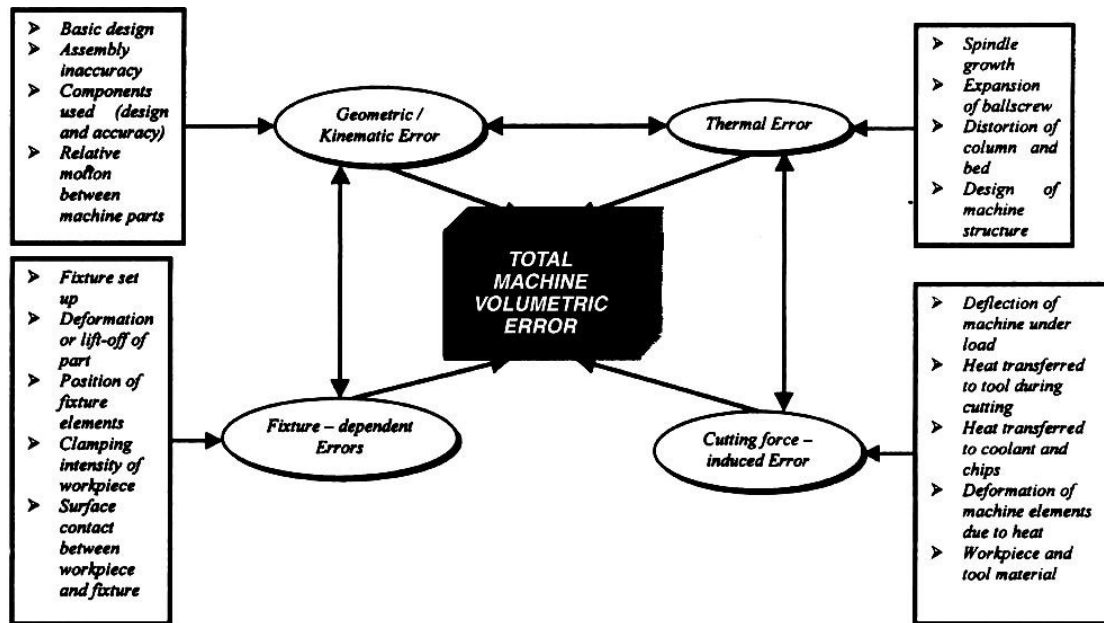
Τα σφάλματα καταρχάς μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες υπό τους τίτλους ψευδοστατικά και δυναμικά σφάλματα.

- Τα ψευδοστατικά σφάλματα είναι αυτά ανάμεσα στο εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο, τα οποία μεταβάλλονται πολύ αργά με το χρόνο και σχετίζονται με τη δομή της εργαλειομηχανής αυτής καθ' αυτής. Σε αυτή την κατηγορία των σφαλμάτων περιλαμβάνονται τα γεωμετρικά/κινηματικά σφάλματα, σφάλματα που οφείλονται στο βάρος των μερών της μηχανής και τα σφάλματα που οφείλονται σε θερμικά εισαγόμενες τάσεις και ελαστικές παραμορφώσεις.
- Τα δυναμικά σφάλματα εξαρτώνται βασικά από τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας της μηχανής και οφείλονται σε ταλαντώσεις του κύριου σώματος της μηχανής, σφάλματα περιστροφής της ατράκτου κλπ. Το συνολικό σφάλμα μίας εργαλειομηχανής συνίσταται κατά 70% από ψευδοστατικά σφάλματα. [12]

Μία δεύτερη κατηγοριοποίηση των σφαλμάτων μπορεί να γίνει με βάση την πηγή των σφαλμάτων. Διακρίνουμε [4,7,8,9]:

- γεωμετρικά σφάλματα της δομής της μηχανής και των μερών της.
- κινηματικά σφάλματα
- σφάλματα που εισάγονται από θερμικές παραμορφώσεις
- σφάλματα που προκαλούνται από τις κοπτικές δυνάμεις
- σφάλματα λόγω της μη-ομοιογένειας των υλικών
- σφάλματα που οφείλονται στην συναρμολόγηση της μηχανής
- σφάλματα οργάνων
- σφάλματα λόγω της φθοράς των εργαλείων
- σφάλματα συγκράτησης
- σφάλματα που προκαλούνται από διάφορες άλλες πηγές κυρίως του συστήματος ελέγχου, όπως σφάλματα σερβομηχανισμού, σφάλματα προφίλ και σφάλματα αλγοριθμικής παρεμβολής

Γενικότερα μπορούμε να ομαδοποιήσουμε τα παραπάνω σφάλματα σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Είναι τα γεωμετρικά-κινηματικά σφάλματα, θερμικώς επαγόμενα σφάλματα και σφάλματα που οφείλονται στις κοπτικές δυνάμεις. Περισσότερο από το 50% του ολικού σφάλματος κάθε εργαλειομηχανής οφείλεται στις δύο πρώτες κατηγορίες, από τις τρεις που μόλις αναφέρθηκαν [10,11].



σχήμα 2.1 : επισκόπηση των συνισταμένων του σφάλματος εργαλειομηχανής και των παραγόντων από τους οποίους εξαρτώνται [12]

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας θα μας απασχολήσουν μόνο τα γεωμετρικά σφάλματα – τα οποία και θα αναλυθούν εκτενώς σε επόμενα κεφάλαια. Θεωρήθηκε σκόπιμο, όμως, για λόγους πληρότητας, να παρουσιαστούν συνοπτικά κι οι τρεις κατηγορίες σφαλμάτων.

2.2 Γεωμετρικά-κινηματικά σφάλματα

2.2.1 Γεωμετρικά σφάλματα

Τα γεωμετρικά σφάλματα είναι τα σφάλματα που υπάρχουν στην μηχανή ως αποτέλεσμα του βασικού σχεδιασμού της. Είναι σφάλματα που ενσωματώνονται μέσα στην μηχανή κατά την διάρκεια της συναρμολόγησης και σφάλματα που εμπεριέχονται στα στοιχεία που συνέθεσαν την μηχανή. Οι συνέπειες των παραπάνω μεταβάλλονται σταδιακά λόγω της φθοράς των εξαρτημάτων της εργαλειομηχανής.

Τα γεωμετρικά σφάλματα έχουν πολλές συνιστώσες, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι το σφάλμα γραμμικής μετατόπισης, η ευθύτητα, η επιπεδότητα κίνησης, η γωνία κλίσης ατράκτου, το σφάλμα καθετότητας, και το σφάλμα αξονικής χάρης [12].

Η συνέπεια των γεωμετρικών σφαλμάτων είναι η δημιουργία σφαλμάτων καθετότητας και παραλληλίας μεταξύ των κινούμενων στελεχών της εργαλειομηχανής. Παρουσιάζονται σαν σφάλματα θέσης και προσανατολισμού του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο [13]. Σύμφωνα με κάποιες μελέτες τα γεωμετρικά σφάλματα ξεπερνούν το 40% του συνολικού σφάλματος που παρουσιάζει μία εργαλειομηχανή [15].

Για παράδειγμα σε ένα κάθετο κέντρο κατεργασιών 3 αξόνων υπάρχουν 21 παράγοντες γεωμετρικών σφαλμάτων [14].

	Αριθμός παραγόντων σφάλματος
Γραμμικά Σφάλματα Θέσεως (σφάλματα μετατόπισης)	3
Σφάλματα ευθύτητας	6
Γωνιακά σφάλματα	9
Σφάλματα καθετότητας αξόνων	3
Σύνολο παραγόντων σφάλματος	21

πίνακας 2.1: οι 21 παράγοντες σφάλματος ενός κάθετου κέντρου κατεργασιών τριών αξόνων

Αντίστοιχα, σε ένα κέντρο κατεργασιών 5 αξόνων υπάρχουν 52 γεωμετρικά σφάλματα [49].

2.2.2 Κινηματικά σφάλματα

Τα κινηματικά σφάλματα αναφέρονται στη σχετική κίνηση των κινούμενων στοιχείων της μηχανής, που είναι απαραίτητη για να ικανοποιούνται οι λειτουργικές προϋποθέσεις. Τα σφάλματα αυτά είναι ιδιαίτερος σημαντικά κατά την διάρκεια συνδυασμένων κινήσεων διαφορετικών αξόνων, όπως στην περίπτωση της κοπής γραναζιών ή της κοπής προφίλ, όπου ο συγχρονισμός περιστροφικής-γραμμικής ή γραμμικής-γραμμικής κίνησης είναι κρίσιμος. Τα σφάλματα αυτά παρουσιάζονται κατά την διάρκεια εκτέλεσης ευθύγραμμικής, κυκλικής ή άλλου τύπου αλγοριθμικής παρεμβολής και είναι πιο έντονα κατά την διάρκεια εκτέλεσης κατεργασίας [12].

2.3 Θερμικώς επαγόμενα σφάλματα

Τα σφάλματα αυτά προκαλούνται από τις θερμοκρασιακές αλλαγές του περιβάλλοντος, τις τοπικές πηγές θερμότητας που δημιουργούνται από την λειτουργία των κινητήρων των αξόνων, την τριβή στα ρουλεμάν και βέβαια την θερμότητα που επάγεται κατά την κοπή. Τα παραπάνω προκαλούν διαστολή, συστολή και παραμόρφωση στην δομή της εργαλειομηχανής και οδηγούν σε σφάλματα στη σχετική θέση του κοπτικού εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Τα στοιχεία της μηχανής που επηρεάζονται ιδιαίτερα από θερμικές παραμορφώσεις είναι οι άτρακτοι και οι ένσφαιροι κοχλίες κίνησης [14].

Μία τεχνική που μπορεί να εφαρμοστεί για τα σφάλματα λόγω των μεταβολών θερμοκρασίας είναι η χρησιμοποίηση υλικών, όπως σκυρόδεμα και πλαστικά ενισχυμένα με ίνες, για την κατασκευή της εργαλειομηχανής. Αυτή η τεχνική εξάλειψης των σφαλμάτων είναι αρκετά ακριβής, όμως έχει αποδειχθεί πως από άποψη κόστους είναι πιο αποτελεσματικό να αντισταθμίζουμε τα θερμικά σφάλματα.

Η διαδικασία που εφαρμόζεται πιο συχνά είναι η μέτρηση των θερμοκρασιών σε κρίσιμα σημεία της εργαλειομηχανής και παράλληλα των σφαλμάτων που επιτρέπονται στην μηχανή σε αυτές τις θερμοκρασιακές καταστάσεις. Αναλύοντας τις δύο αυτές ομάδες δεδομένων μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο ώστε να προσδιορίζουμε το σφάλμα με βάση τα εκάστοτε δεδομένα θερμοκρασίας. Οπότε, έχουμε ένα μοντέλο που είναι ικανό να προσδιορίζει το σφάλμα της εργαλειομηχανής για κάθε θερμοκρασία. Με βάση αυτό το μοντέλο υπολογίζονται οι τιμές αντιστάθμισης των σφαλμάτων, οι οποίες και ενσωματώνονται στους σχετικούς άξονες για να επιτευχθεί η αντιστάθμιση [13].

2.4 Σφάλματα που οφείλονται σε κοπτικές δυνάμεις

Οι περισσότερες έρευνες που αφορούν στην αντιστάθμιση σφαλμάτων εργαλειομηχανών δεν λαμβάνουν υπόψη τους τα σφάλματα λόγω των κοπτικών δυνάμεων. Ο λόγος που συμβαίνει κάτι τέτοιο είναι, όπως θερμούν πολλοί ερευνητές τα σφάλματα αυτά μπορούν να αμεληθούν, διότι οι κοπτικές δυνάμεις που τα προκαλούν είναι πολύ μικρές. Βέβαια οι μοντέρνες τεχνικές κατεργασιών

περιλαμβάνουν την κατεργασία σκληρυμένου χάλυβα κατευθείαν στην τελική μορφή του. Εκεί οι κοπτικές δυνάμεις είναι αρκετά μεγάλες και δεν δικαιολογείται η παράβλεψη τους. Στις περιπτώσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες ή ηλεκτρο-μηκυνσιόμετρα για τον προσδιορισμό αυτών των σφαλμάτων [12].

2.5 Μοντέλοποίηση των σφαλμάτων

Προηγουμένως αναλύθηκαν οι κατηγορίες των σφαλμάτων εργαλειομηχανών. Κατά την φάση της αντιστάθμισης των σφαλμάτων, όμως, πρέπει να λάβουμε υπ' όψη μας την αλληλεπίδραση όλων αυτών των σφαλμάτων κι όχι να αναλύουμε κάθε ένα μεμονωμένα. Ο λόγος που η ξεχωριστή πληροφορία για κάθε σφάλμα δεν μπορεί να είναι άμεσα χρήσιμη είναι πως δεν μας παρέχει καμία πληροφορία για το σφάλμα σε ένα τυχαίο σημείο του τρισδιάστατου χώρου εργασίας.

Υπάρχουν πέντε μέθοδοι μοντελοποίησης των σφαλμάτων που μας επιτρέπουν να προχωρήσουμε στην αντιστάθμιση τους, όπως αναφέρονται από τους Ramesh et al [12] :

i) Μέθοδος Βαθμονόμησης Πλέγματος: αυτή η μέθοδος μετράει το σφάλμα σε ορισμένα σημεία του πλέγματος του όγκου εργασίας και μπορεί με παρεμβολή να υπολογίσει το σφάλμα στην πραγματική θέση του εργαλείου.

ii) Μέθοδος Σχεδιασμού Τεχνήματος: χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει τοπικά γεωμετρικά και θερμικά σφάλματα. Με αυτήν την μέθοδο δεν μετριοούνται άμεσα τα σφάλματα, αλλά η εκάστοτε τοπική τιμή του σφάλματος υπολογίζεται μέσω της μέτρησης των συντεταγμένων ενός ειδικά σχεδιασμένου αντικειμένου.

iii) Μέθοδος Μετρολογικού Πλαισίου: αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για να μετρηθούν επιμέρους γεωμετρικά και θερμικά σφάλματα χρησιμοποιώντας οπτικά συστήματα τοποθετημένα πάνω στην μηχανή με σκοπό να μετρούν τα σφάλματα πραγματικού χρόνου, αποκλείοντας έτσι κάποιες μετρήσεις μη πραγματικού χρόνου.

iv) Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων: η μέθοδος χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τα θερμικά σφάλματα μέσω θερμοελαστικών παραμορφώσεων και ανάλυσης της μεταφοράς θερμότητας από την μηχανή. Η μέθοδος αυτή είναι ακριβή και έχει δειχτεί πως συνήθως δεν είναι τόσο ακριβής [21].

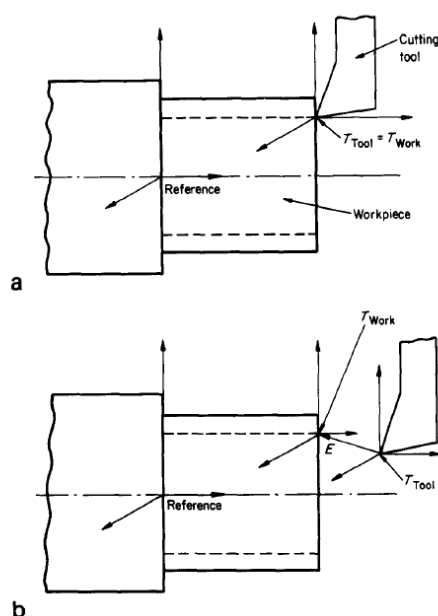
v) Μέθοδος Σύνθεσης Σφάλματος: μοντελοποιεί τα γεωμετρικά και θερμικά σφάλματα και παρουσιάζει το ολικό σφάλμα σε αντιστοιχία με τα επιμέρους σφάλματα.

Από τους παραπάνω πέντε τρόπους μόνο το μοντέλο της Μεθόδου Σύνθεσης Σφάλματος προσφέρει μία συνολική απεικόνιση του σφάλματος και καθιστά δυνατή τη συνολική διόρθωση των σφαλμάτων.

2.6 Μεθοδος Σύνθεσης Σφαλμάτων

2.6.1 Ογκομετρικό Σφάλμα

Το κρίσιμο κατά την κατεργασία είναι το κοπτικό εργαλείο- σε κάθε κίνηση- να βρίσκεται στην επιθυμητή θέση πάνω στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Για αυτό το λόγο όταν συνθέτουμε όλα τα σφάλματα της εργαλειομηχανής σε ένα συνολικό σφάλμα με τη μέθοδο σύνθεσης σφαλμάτων, μας ενδιαφέρει να έχουμε μία σχέση που να εκφράζει το σχετικό σφάλμα ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το προς κατεργασία τεμάχιο. Στο σχήμα 2.2 δίδεται χαρακτηριστικά η σχετική θέση του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου σε τόρνο. Η περίπτωση (a) αναφέρεται στην ιδανική κοπή ενώ στο σχήμα (b) φαίνεται η περίπτωση πραγματικής κοπής. Στην περίπτωση b, το διάνυσμα E, εκφράζει ακριβώς το ζητούμενο σχετικό σφάλμα ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το προς κατεργασία τεμάχιο.



σχήμα 2.2: σχετική θέση κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου [7]

Το σφάλμα αυτό ονομάζεται ογκομετρικό σφάλμα και ουσιαστικά μας δίνει την δυνατότητα της καθολικής εποπτείας μιας συνισταμένης αντί για την ανεξάρτητη παρατήρηση των επιμέρους συνιστωσών του σφάλματος. Οι McKeown και Loxham παρουσίασαν για πρώτη φορά τον όρο ογκομετρική ακρίβεια το 1973. Την όρισαν ως την ικανότητα μίας εργαλειομηχανής να παράγει ακριβή τρισδιάστατα τεμάχια [49]. Το ογκομετρικό σφάλμα ορίζεται από τους Yang et al [29] ως η ανακολουθία ανάμεσα στο εργαλείο και το προς κατεργασία τεμάχιο και αναφέρεται στο άκρο του κοπτικού εργαλείου.

Γενικά, ανάμεσα στα σφάλματα εργαλειομηχανών, τη μέγιστη συνεισφορά στην διαμόρφωση του ογκομετρικού σφάλματος έχουν τα θερμικά και τα γεωμετρικά σφάλματα [24]. Οι διορθωτικές κινήσεις που γίνονται στην φάση της αντιστάθμισης σε μία εργαλειομηχανή τριών αξόνων που σχηματίζουν καρτεσιανό σύστημα μπορούν εφαρμοστούν μόνο για τα μεταφορικά σφάλματα στους τρεις ορθογώνιους

άξονες [22]. Ως αποτέλεσμα, αυτό που φανερώνεται κατευθείαν ως δυνατότητα είναι η σύνθεση των 21 παραγόντων γεωμετρικού σφάλματος που συνδέονται με τους τρεις άξονες της εργαλειομηχανής για να σχηματίσουν τις ποσότητες διόρθωσης στις διευθύνσεις των τριών αξόνων. Για να συνδέσουν και τα θερμικά σφάλματα με τους άξονες της εργαλειομηχανής οι Chen et al [12] πρότειναν ένα νέο μοντέλο 32 παραγόντων το οποίο συνδυάζει τα γεωμετρικά με τα θερμικά σφάλματα. Τα 11 επιπλέον σφάλματα αντιπροσωπεύουν τις επιδράσεις των θερμικών φαινομένων στο κέντρο κατεργασιών.

2.6.2 Εξαγωγή του μοντέλου ογκομετρικού σφάλματος

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές για να μοντελοποιήσουμε το ογκομετρικό σφάλμα.

- Η πρώτη βασίζεται στο ότι το σύστημα κίνησης της εργαλειομηχανής μπορεί να θεωρηθεί ως μία σειρά από κινητούς συνδέσμους. Κάθε σύνδεσμος μπορεί να θεωρηθεί ως στερεό σώμα που κινείται σε μία καθορισμένη άρθρωση. Συνεπώς, είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουμε τις αρχές της κινηματικής του στερεού σώματος για να μοντελοποιήσουμε κάθε μέλος του συστήματος συνδέσμων της εργαλειομηχανής. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ομογενείς πίνακες μετασχηματισμού για να αναπαραστήσουν τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων κάθε στερεού σώματος ως προς το σύστημα αναφοράς. Υπάρχουν δύο είδη μετασχηματισμών που ονομάζονται μετασχηματισμοί μορφής και άρθρωσης. Όταν η σχετική θέση και ο προσανατολισμός δύο συστημάτων συντεταγμένων παραμένουν σταθερά σε οποιαδήποτε κατάσταση του συστήματος συνδέσμων τότε ο μετασχηματισμός καλείται μετασχηματισμός μορφής. Όταν είναι δυνατή η σχετική κίνηση των δύο συστημάτων συντεταγμένων τότε ο μετασχηματισμός καλείται μετασχηματισμός άρθρωσης. Το σύστημα συνδέσμων που απεικονίζει την εργαλειομηχανή, συνεπώς, αποτελείται από μία σειρά εναλλασσόμενων μετασχηματισμών σχήματος και συνδέσμων. Επειδή όμως οι σύνδεσμοι δεν είναι ιδανικοί, τα σφάλματα της εργαλειομηχανής συνεισφέρουν στην μη ακρίβεια των κινήσεων μεταξύ τους. Κάθε σύνδεσμος φέρει τα δικά του στοιχεία σφάλματος. Οπότε πρέπει να συνεχίσουμε αναλύοντας κάθε τύπο σφάλματος και την επίδραση του στο άκρο του εργαλείου, την οποία ορίζουμε στο μοντέλο ομογενών πινάκων μετασχηματισμού. Τελικά, η θέση του εργαλείου μπορεί να βρεθεί με τον πολλαπλασιασμό των πινάκων μετασχηματισμού των σφαλμάτων των συνδέσμων. Τριγωνομετρικές κι αλγεβρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται επίσης με σκοπό να εξαχθεί μία έκφραση για το ογκομετρικό σφάλμα. [12].
- Στην δεύτερη τεχνική μοντελοποίησης χρησιμοποιείται διανυσματική αναπαράσταση της εργαλειομηχανής, θεωρώντας και πάλι πως ισχύουν οι υποθέσεις της μηχανικής στερεού σώματος. Εφόσον, όπως ήδη αναφέραμε, οι διορθωτικές κινήσεις μπορούν να εφαρμοστούν στους άξονες της εργαλειομηχανής, τότε με την μοντελοποίηση σκοπεύουμε να συνθέσουμε όλους τους παράγοντες του σφάλματος σε ένα συνολικό που ορίζεται από τρεις συνιστώσες, οι οποίες θα αντιπροσωπεύουν τις ποσότητες διόρθωσης. Κάθε κινούμενο μέρος της εργαλειομηχανής εκλαμβάνεται ως ένα τρισδιάστατο δομικό διάνυσμα. Κάθε στιγμή, η θέση αναφοράς του τεμαχίου

και η θέση της άκρης του εργαλείου μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των κινούμενων δομικών διανυσμάτων. Οι δύο θέσεις πρέπει ιδανικά να ταυτίζονται. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας τις τρεις γραμμικές εξισώσεις θα μπορούμε να υπολογίσουμε τις ποσότητες διόρθωσης μόνο αν έχουν μετρηθεί και οι 21 παράγοντες σφάλματος (ή οι 32 αν δουλεύουμε με μοντέλο και θερμικών σφαλμάτων) [12].

Γενικά, ένα μοντέλο ογκομετρικού σφάλματος πρέπει να πληρεί τα τρία παρακάτω κριτήρια [31], [7]:

- i) πρέπει να χωρίζει την εργαλειομηχανή στα βασικά στοιχεία της και να τα συνδέει το ένα με το άλλο
- ii) να μπορεί εύκολα να μεταφράζεται σε λογισμικό αντιστάθμισης
- iii) να αποτελείται από σταθερά συναρτησιακά στοιχεία και να είναι διαρθρωμένο ώστε να μπορεί να εφαρμόζεται σε εργαλειομηχανές διαφορετικών δομών.

Κεφάλαιο 3

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Οι πρώιμες μελέτες, όπως αυτή του D. Leete [21], [23], [37], μελέτησαν τα σφάλματα των εργαλειομηχανών θεμελιωδώς ως προς την γεωμετρία τους και δημιούργησαν γεωμετρικά μοντέλα σφαλμάτων χρησιμοποιώντας τριγωνομετρικές σχέσεις. Ο Leete διατύπωσε μαθηματικές εκφράσεις για τα σφάλματα κάθε άξονα (x,y,z) μετρώντας τις αλλαγές στην απόσταση δύο αισθητήρων από ένα επίπεδο αναφοράς. Επίσης, βελτιστοποίησε την θέση των αισθητήρων και των επιπέδων. Ωστόσο, η προσέγγιση του υπέθετε πως οι άξονες είναι ευθύγραμμοι και δεν υπάρχουν σφάλματα στην ακρίβεια θέσης.

Αργότερα, οι French και Humphries [33] κι οι Love και Scarr [33] χρησιμοποίησαν κι αυτοί τριγωνομετρικές σχέσεις για να φθάσουν σε γεωμετρικά μοντέλα σφαλμάτων.

Ο Schultschik [25] διατύπωσε έναν μαθηματικό τύπο για την σύνθεση των σφαλμάτων βασισμένο σε μία διανυσματική απεικόνιση του ογκομετρικού σφάλματος.

Οι Hocken et al [24] [37] χρησιμοποίησαν μετασχηματισμό πινάκων για να μοντελοποιήσουν τα γωνιακά σφάλματα μίας μηχανής μέτρησης συντεταγμένων.

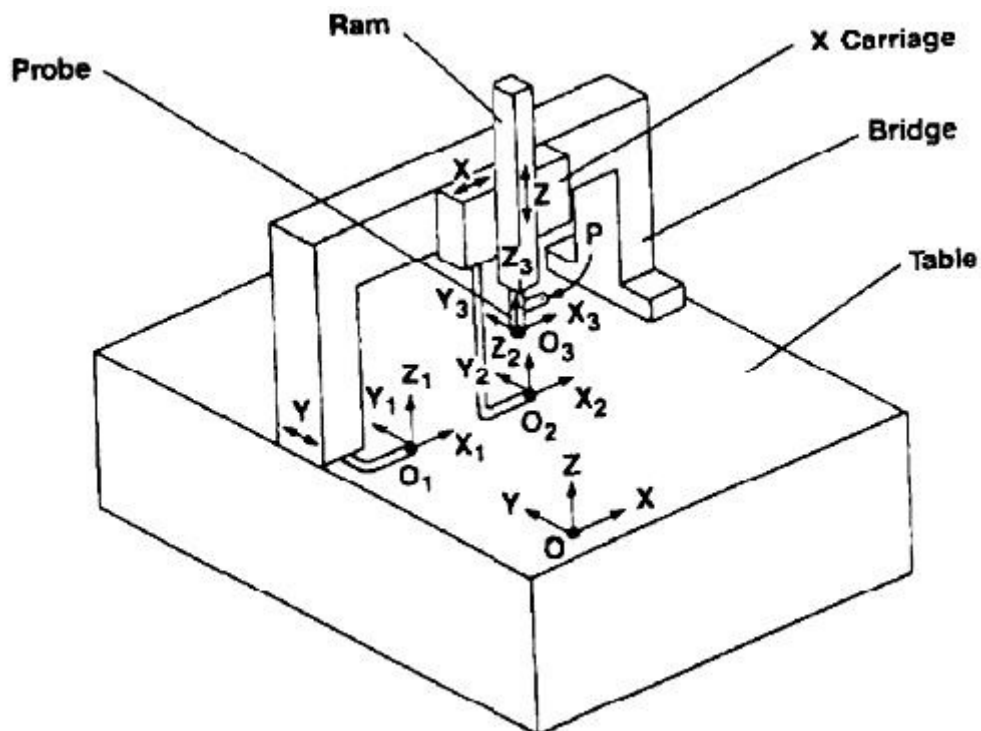
Οι Dufour και Gropetti [33] ανέφεραν για πρώτη φορά την μέθοδο του πίνακα σφάλματος (error matrix). Τα στοιχεία του διανύσματος σφάλματος σε διαφορετικές θέσεις της μηχανής αποθηκεύονται για διαφορετικές θερμικές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης. Με παρεμβολή ανάμεσα στις αποθηκευμένες τιμές μπορεί να επιτευχθεί σε κάθε θέση διόρθωση και αντιστάθμιση των σφαλμάτων.

Γενικά μέχρι το 1980 οι περισσότερες μεθοδολογίες χρησιμοποιούσαν αναλυτική γεωμετρία, διανυσματική απεικόνιση και πίνακες σφαλμάτων. Ο Portman [33] εισήγαγε τις αρχές της κινηματικής στερεού σώματος για να οδηγηθεί στην έκφραση του γεωμετρικού σφάλματος. Όπως έχει ήδη αναλυθεί, η κινηματική απεικόνιση μίας μηχανής αποτελείται από μία σειρά συνδέσμων κι αρθρώσεων. Συνεπώς, το σύστημα συνδέσμων που απεικονίζει την εργαλειομηχανή αποτελείται από μία σειρά εναλλασσόμενων μετασχηματισμών μορφής κι αρθρώσεων. Επειδή αρκετές εργαλειομηχανές, (όπως π.χ. κέντρα κατεργασιών τριών αξόνων) δουλεύουν γενικά με ορθογώνιους άξονες, είναι δυνατό να εκφράζουμε τους μετασχηματισμούς ως στοιχειώδεις ομογενείς μετασχηματισμούς καθαρής μετατόπισης.

Αργότερα ο Donmez [33] εξήγαγε τους μετασχηματισμούς για ένα κέντρο τόννευσης.

Οι Duffie et al. [35] κατασκεύασαν ένα κινηματικό μοντέλο για να μετρήσουν και να αναγνωρίσουν τα σφάλματα ενός αναλογικού αισθητήρα επαφής. Τα σφάλματα στην συνέχεια αντισταθμίστηκαν και το μέσο σφάλμα του αισθητήρα μειώθηκε κατά σχεδόν 10 φορές.

Οι Zhang et al. [26] εφάρμοσαν ένα μαθηματικό μοντέλο ογκομετρικού σφάλματος σε μία μηχανή CMM βασισμένοι στην υπόθεση στερεού σώματος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 όρισαν τέσσερα ανεξάρτητα συστήματα συντεταγμένων.



σχήμα 3.1: διάγραμμα της μηχανής μέτρησης συντεταγμένων και των ανεξάρτητων συστημάτων συντεταγμένων [26]

Για κίνηση κατά μία ονομαστική απόσταση Y , η πραγματική τιμή της θέσης του O_1 ως προς το σύστημα αναφοράς της μηχανής O δίνεται από το διάνυσμα:

$$\overrightarrow{OO_1} = \begin{pmatrix} \delta_x(Y) \\ Y - \delta_y(Y) \\ \delta_z(Y) \end{pmatrix} \quad (1a)$$

Ταυτόχρονα, το σύστημα συντεταγμένων O_1 περιστρέφεται ως προς το σύστημα αναφοράς λόγω των γωνιακών σφαλμάτων. Αυτή η περιστροφή εκφράζεται από τον πίνακα:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_z(Y) & -\varepsilon_y(Y) \\ -\varepsilon_z(Y) & 1 & \varepsilon_x(Y) \\ \varepsilon_y(Y) & -\varepsilon_x(Y) & 1 \end{pmatrix} \quad (1b)$$

Αναλόγως, για κίνηση κατά μία ονομαστική απόσταση X και Z , έχουμε δύο επιπλέον διανύσματα και πίνακες περιστροφών:

$$\overrightarrow{O_1 O_2} = \begin{pmatrix} X - \delta_x(X) \\ -X \cdot a + \delta_y(X) \\ \delta_z(X) \end{pmatrix} \quad R_2 = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_z(X) & -\varepsilon_y(X) \\ -\varepsilon_z(X) & 1 & \varepsilon_x(X) \\ \varepsilon_y(X) & -\varepsilon_x(X) & 1 \end{pmatrix} \quad (2a,b)$$

$$\overrightarrow{O_2 O_3} = \begin{pmatrix} Z \cdot \beta_1 + \delta_x(Z) \\ -Z \cdot \beta_2 + \delta_y(Z) \\ \delta_z(Z) \end{pmatrix} \quad R_3 = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_z(Z) & -\varepsilon_y(Z) \\ -\varepsilon_z(Z) & 1 & \varepsilon_x(Z) \\ \varepsilon_y(Z) & -\varepsilon_x(Z) & 1 \end{pmatrix} \quad (3a,b)$$

Επειδή επέλεξαν τον άξονα Y ως αρχική γραμμή για την αντιστάθμιση καθετότητας και το επίπεδο X - Y ως αναφορά για την καθετότητα του Z , για αυτό και στα παραπάνω διανύσματα εμφανίζεται η γωνία a των αξόνων X , Y και οι γωνίες β_1 και β_2 του άξονα z ως προς το επίπεδο X - Y .

Συνεπώς, οι συντεταγμένες ενός τυχαίου σημείου P ως προς το σύστημα αναφοράς (X', Y', Z'), το οποίο έχει συντεταγμένες (X_P, Y_P, Z_P) ως προς O_3 , ορίστηκαν από την εξίσωση (4):

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OO_1} + R_1^{-1} (R_2^{-1} (R_3^{-1} \overrightarrow{O_3 P} + \overrightarrow{O_2 O_3})) + \overrightarrow{O_1 O_2} \quad (4)$$

Αναλύοντας την διανυσματική εξίσωση (4) διαμορφώνονται οι απαραίτητες εξισώσεις για τον καταμερισμό του συνολικού σφάλματος:

$$\Delta x = -\delta_x(X) + \delta_x(Y) + \delta_x(Z) - Z \cdot \beta_1 + Z \cdot \varepsilon_y(X) + Z \cdot \varepsilon_y(Y) - Y_P (\varepsilon_z(X) + \varepsilon_z(Y) + \varepsilon_z(Z)) + Z_P (\varepsilon_y(X) + \varepsilon_y(Y) + \varepsilon_y(Z))$$

$$\Delta y = -\delta_y(Y) + \delta_y(X) + \delta_y(Z) - X \cdot a - Z \cdot \beta_2 + X \cdot \varepsilon_z(Y) + Z \cdot \varepsilon_x(Y) - X_P (\varepsilon_z(X) + \varepsilon_z(Y) + \varepsilon_z(Z)) + Z_P (\varepsilon_x(X) + \varepsilon_x(Y) + \varepsilon_x(Z)) - Z \cdot \varepsilon_x(X)$$

$$\Delta z = \delta_z(Z) + \delta_z(X) + \delta_z(Y) - X \cdot \varepsilon_y(Y) + X_P (\varepsilon_y(X) + \varepsilon_y(Y) + \varepsilon_y(Z)) + Y_P (\varepsilon_x(X) + \varepsilon_x(Y) + \varepsilon_x(Z))$$

Για να ολοκληρώσουν το μοντέλο τους πρόσθεσαν και διόρθωση για τα θερμικά σφάλματα, η ανάλυση των οποίων ξεπερνά τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα αποτελέσματά τους, που δείχνουν ότι επιτεύχθηκε

βελτίωση κατά παράγοντα μεγαλύτερο του δέκα, απέδειξαν πως η αντιστάθμιση σφαλμάτων αποτελεί έναν δυναμικό και οικονομικό τρόπο βελτίωσης της ακρίβειας των CMM.

Η κινηματική στερεού σώματος χρησιμοποιήθηκε κι από τους Ferreira και Liu το 1986 [33] στην μοντελοποίηση και αντιστάθμιση γεωμετρικών σφαλμάτων μίας τριαξονικής εργαλειομηχανής. Το ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του μοντέλου τους είναι πως οι συντελεστές του προέρχονται από μετρήσεις των στοιχείων του συνολικού σφάλματος σε έναν ελάχιστο αριθμό μόλις εννέα σημείων. Αυτό δίνει την δυνατότητα εύκολης ενημέρωσης του μοντέλου.

Η πλειονότητα των - μέχρι το 1986- τεχνικών μπορεί εν τέλει να καταλήγει σε ένα συνολικό μοντέλο σφάλματος που έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στην αντιστάθμιση των σφαλμάτων των εργαλειομηχανών, όμως υστερεί στην διατύπωση ενός απλού και γενικού μοντέλου που θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε εργαλειομηχανή οποιασδήποτε διάταξης [32]. Έτσι, οι Donmez et al. [7] εισήγαγαν στις εργαλειομηχανές μία ιδιαίτερος χρήσιμη μέθοδο, που εφαρμοζόταν ήδη στις μηχανές μέτρησης συντεταγμένων. Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι βασισμένο στην κινηματική στερεού σώματος και χρησιμοποιήθηκε για να υπολογίζει το συνολικό σφάλμα θέσης του εργαλείου κέντρων κατεργασιών λαμβάνοντας ως δεδομένα έναν μεγάλο αριθμό γεωμετρικών και θερμικών σφαλμάτων της εργαλειομηχανής. Η μεθοδολογία τους επιβεβαιώθηκε σε ένα κέντρο τόννευσης και τα αποτελέσματα έδειξαν βελτίωση της ακρίβειας κατά περισσότερο από 20 φορές.

Οι Eman et al. [32] παρουσίασαν κι εκείνοι μία γενική μεθοδολογία, η οποία αφορά στα σφάλματα που προέρχονται από την γεωμετρία και τη σχετική κίνηση μεταξύ των αρθρώσεων. Η μεθοδολογία διατυπώθηκε έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε πολυαξονική εργαλειομηχανή.

Η μεθοδολογία βασίζεται στις αρχές της μηχανικής στερεού σώματος και χρησιμοποιεί ομογενείς πίνακες μετασχηματισμού. Το συνολικό σφάλμα εκφράζεται ως γραμμικός μετασχηματισμός των συνιστωσών του. Οι πίνακες, που εμφανίζονται ως συντελεστές κάθε συνιστώσας, κατασκευάζονται από τις μετρούμενες τιμές των παραμέτρων της εκάστοτε εργαλειομηχανής. Αυτό συνεπάγεται πως τα στοιχεία των πινάκων αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές βαρύτητας με την αναλογία με την οποία η κάθε συνιστώσα του σφάλματος συνεισφέρει στο συνολικό σφάλμα. Με αυτό τον τρόπο η μεθοδολογία αυτή εκφράζει ξεκάθαρα την συνεισφορά της κάθε συνιστώσας στο συνολικό σφάλμα. Δίνεται, κατά συνέπεια, η δυνατότητα να εντοπισθούν πιθανές περιοχές του συνολικού χώρου εργασίας της μηχανής στις οποίες μπορούν να επιτευχθούν τα μεγαλύτερα επίπεδα ακρίβειας.

Ο Kurtoglu [30] αξιοποίησε ένα μεγάλο μέρος της προηγούμενης έρευνας και απέδειξε την αποτελεσματικότητα της αντιστάθμισης και των διορθώσεων. Τα αποτελέσματα του παρέχουν αύξηση της ακρίβειας μεγαλύτερη του 70%.

Οι Kim και Kim [36] ανέπτυξαν μία καινούργια προσέγγιση του ογκομετρικού σφάλματος. Κι εδώ 4x4 ομογενείς μετασχηματισμοί χρησιμοποιούνται για να ληφθούν 21 όροι γεωμετρικού σφάλματος τριαξονικής εργαλειομηχανής. Ανέπτυξαν

ένα γενικευμένο μοντέλο γεωμετρικού σφάλματος και εξέτασαν τις συνέπειες της κάθε συνιστώσας στην ογκομετρική ακρίβεια του τελικού σημείου κοπής. Σε αντίθεση με τα μέχρι τότε γεωμετρικά μοντέλα που ήταν εξεζητημένα και πολύπλοκα, το μοντέλο των Kim και Kim πέτυχε να είναι κατάλληλο για αξιολόγηση του ογκομετρικού σφάλματος σε πραγματικό χρόνο και για on-line αντιστάθμιση σφαλμάτων.

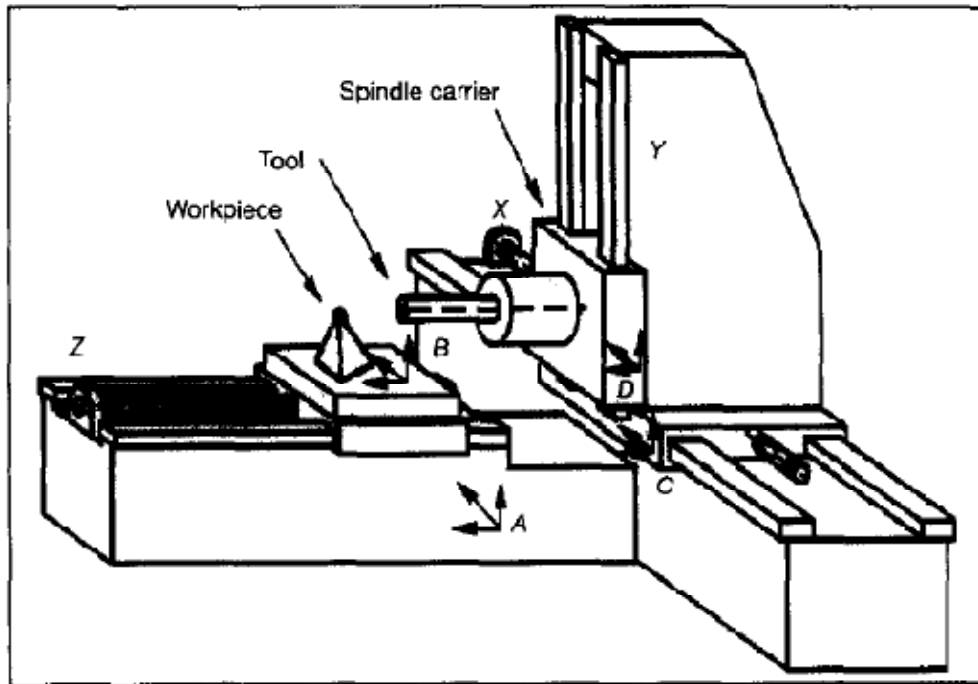
Οι Lin και Ehmman [27] ανέπτυξαν ένα γενικευμένο μοντέλο γραμμικών σφαλμάτων για πολυαξονικές εργαλειομηχανές. Το μοντέλο τους δομήθηκε κατ' αναλογία με τη λύση ευθείας κινηματικής στα προβλήματα ρομποτικής. Η δουλειά τους βασίστηκε αρκετά στο έργο που είχε κάνει ο Wu για την ανάλυση ακρίβειας σε ρομπότ με βάση την κινηματική.

Οι Chen et al. [21] [37] ολοκλήρωσαν ένα σύστημα γεωμετρικής και θερμικής αντιστάθμισης τριαξονικού κέντρου κατεργασιών. Έλαβαν υπόψη και τις επιπτώσεις εξαιτίας της γενίκευσης της υπόθεσης του στερεού σώματος. Το μοντέλο που ανέπτυξαν περιείχε 32 στοιχεία σφάλματος διότι ενσωμάτωσαν σε αυτό και τις θερμικές επιδράσεις στην εργαλειομηχανή. Έγινε εφαρμογή του μοντέλου σε οριζόντιο κέντρο κατεργασιών. Η ακρίβεια που επιτεύχθηκε μετά την αντιστάθμιση μετρήθηκε ως βελτιωμένη κατά δέκα φορές στην επιθεώρηση της μηχανής και βελτιωμένη κατά πέντε φορές στην ακρίβεια κατεργαζόμενου τεμαχίου κατά την διάρκεια των δοκιμαστικών κοπών.

Οι Ferreira και Liu [24] συνέχισαν να εργάζονται πάνω στο μοντέλο που είχαν ήδη παρουσιάσει. Θεώρησαν πως οι συνιστώσες του συνολικού σφάλματος είναι όλες γραμμικές και τις συνδύασαν για να κατασκευάσουν ένα παραμετρικό μοντέλο σφάλματος.

Οι Yang et al. [21], το 1996, εργάστηκαν πάνω σε ένα κέντρο κατεργασιών και χρησιμοποίησαν την τεχνική με τον ομογενή μετασχηματισμών συντεταγμένων για να καταλήξουν σε ένα ογκομετρικό σφάλμα με σύνθεση γεωμετρικών και θερμικών σφαλμάτων. Όρισαν τα συστήματα συντεταγμένων όπως φαίνονται στο σχήμα 3.2.

Ως σύστημα αναφοράς όρισαν το A, το σύστημα συντεταγμένων στη βάση του τραπεζιού. Η διαδικασία που ακολούθησαν για να δημιουργήσουν το μοντέλο σύνθεσης του ογκομετρικού σφάλματος είναι η ακόλουθη: Για το οριζόντιο κέντρο κατεργασιών που μελετήθηκε στη συγκεκριμένη έρευνα, η άκρη του εργαλείου πρώτα εκφράστηκε ως προς το σύστημα συντεταγμένων του φορέα της ατράκτου D, έπειτα μετασχηματίστηκε στο σύστημα συντεταγμένων C του φορέα του άξονα κίνησης x, και τελικά μετασχηματίστηκε στο σύστημα αναφοράς A.



σχήμα 3.2: συστήματα συντεταγμένων στο κέντρο κατεργασιών [21]

Η εξίσωση (5) περιγράφει τους μετασχηματισμούς:

$$\vec{T}_A(t) = \tau_A^C \tau_C^D \vec{T}_D(t) \quad (5)$$

$\vec{T}_D(t)$: διάνυσμα της άκρης του εργαλείου στο σύστημα συντεταγμένων D.

τ_A^C : πίνακας μετασχηματισμού από το σύστημα συντεταγμένων D στο C.

τ_C^D : πίνακας μετασχηματισμού από το σύστημα συντεταγμένων C στο A.

$\vec{T}_A(t)$: διάνυσμα της άκρης του εργαλείου στο σύστημα συντεταγμένων A.

Με παρόμοιο τρόπο για κατεργαζόμενο τεμάχιο πρώτα εκφράστηκε ως προς το σύστημα συντεταγμένων B και μετά μετασχηματίστηκε στο A. Η εξίσωση (6) περιγράφει τους μετασχηματισμούς λαμβάνοντας υπ' όψιν το διάνυσμα σφάλματος:

$$(\vec{W} + \Delta\vec{W})_A = \tau_A^B (\vec{W} + \Delta\vec{W})_B \quad (6)$$

$(\vec{W} + \Delta\vec{W})_B$: ιδανικό διάνυσμα του τεμαχίου \vec{W} και διάνυσμα σφάλματος $\Delta\vec{W}$ εκφρασμένα στο σύστημα συντεταγμένων B.

τ_A^B : πίνακας μετασχηματισμού από το σύστημα συντεταγμένων B στο A.

$(\vec{W} + \Delta\vec{W})_A$: ιδανικό διάνυσμα του τεμαχίου \vec{W} και διάνυσμα σφάλματος $\Delta\vec{W}$ εκφρασμένα στο σύστημα συντεταγμένων A.

Εξισώνοντας το $\vec{T}_A(t)$ με το $(\vec{W} + \Delta\vec{W})_A$, κατέληξαν στην εξίσωση (7):

$$\tau_A^C \tau_C^D \vec{T}_D(t) = \tau_A^B (\vec{W} + \Delta\vec{W})_B \quad (7)$$

Από την εξίσωση (7) προέκυψε το διάνυσμα σφάλματος.

Το ιδανικό διάνυσμα του τεμαχίου είναι:

$$\vec{W}_B = \begin{Bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_x + Oxy_x + Ozx_x + x \\ T_y + Oxy_y + Ozx_y + y \\ T_z + L + Oxy_z + Ozx_z + z \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

όπου

W_x, W_y, W_z : οι συντεταγμένες του τεμαχίου

T_x, T_y, T_z : οι συντεταγμένες της άκρης του εργαλείου (πρότυπου μήκους)

L : η αντιστάθμιση μήκους του εργαλείου

x : η διαδρομή που διένυσε το εργαλειοφορέιο στον άξονα x

y : η διαδρομή που διένυσε ο φορέας της ατράκτου στον άξονα y

z : η διαδρομή που διένυσε το εγκάρσιο εργαλειοφορέιο στον άξονα z

Oxy_x, Oxy_y, Oxy_z : η απόσταση της αρχής του άξονα y, Oy , από την αρχή του άξονα x, Ox , στις τρεις διευθύνσεις.

Ozx_x, Ozx_y, Ozx_z : η απόσταση της αρχής του άξονα x, Ox , από την αρχή του άξονα z, Oz , στις τρεις διευθύνσεις.

Θεώρησαν, χωρίς βλάβη της γενικότητας, πως η αρχή O_A του συστήματος αναφοράς ταυτίζεται με την αρχή O_x . Κάθε στοιχείο της εξίσωσης (7) μπορεί να γραφτεί ως πίνακας που συγκροτείται από τα στοιχεία του ογκομετρικού σφάλματος όπως εξηγείται παρακάτω:

$$\vec{T}_D(t) = \begin{Bmatrix} T_x + \Delta S_x + \varepsilon_{\beta_s} L \\ T_y + \Delta S_y + \varepsilon_{\alpha_s} L \\ T_z + \Delta S_z + L \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$\tau_A^C = \begin{Bmatrix} 1 & -\varepsilon_{\gamma x}(t) & \varepsilon_{\beta x}(t) & Ozx_x + \Delta zx_x(t) + \delta_{xx}(t) + x \\ \varepsilon_{\gamma x}(t) & 1 & -\varepsilon_{\alpha x}(t) & Ozx_y + \Delta zx_y(t) + \delta_{yx}(t) \\ -\varepsilon_{\beta x}(t) & \varepsilon_{\alpha x}(t) & 1 & Ozx_z + \Delta zx_z(t) + \delta_{zx}(t) - S_{zx}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$\tau_C^D = \begin{Bmatrix} 1 & -\varepsilon_{\gamma y}(t) & \varepsilon_{\beta y}(t) & Oxy_x + \Delta xy_x(t) + \delta_{xy}(t) - S_{xy}(t)y \\ \varepsilon_{\gamma y}(t) & 1 & -\varepsilon_{\alpha y}(t) & Oxy_y + \Delta xy_y(t) + \delta_{yy}(t) + y \\ -\varepsilon_{\beta y}(t) & \varepsilon_{\alpha y}(t) & 1 & Oxy_z + \Delta xy_z(t) + \delta_{zy}(t) - S_{zy}(t)y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$\tau_A^C = \begin{Bmatrix} 1 & -\varepsilon_{yz}(t) & \varepsilon_{\beta z}(t) & \delta_{xz}(t) \\ \varepsilon_{\gamma y}(t) & 1 & -\varepsilon_{az}(t) & \delta_{yz}(t) \\ -\varepsilon_{\beta z}(t) & \varepsilon_{az}(t) & 1 & \delta_{zz}(t) + z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

όπου:

$\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$: σφάλμα γραμμικής μετατόπισης κατά μήκος του άξονα x,y,z.

$\delta_{yx}, \delta_{zx}, \delta_{xy}, \delta_{zy}, \delta_{xz}, \delta_{yz}$: σφάλματα ευθύτητας, το δ δηλώνει το σφάλμα μεταφοράς, ο πρώτος δείκτης δείχνει την διεύθυνση του σφάλματος κι ο δεύτερος αναφέρεται στην διεύθυνση της κίνησης του οδηγού.

$\varepsilon_{yx}, \varepsilon_{zx}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{zy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$: γωνιακό σφάλμα, όπου το ε το γωνιακό σφάλμα, ο πρώτος δείκτης περιγράφει τον άξονα του σφάλματος κι ο δεύτερος αναφέρεται στην διεύθυνση της κίνησης του οδηγού.

S_{xy}, S_{zx}, S_{yz} : σφάλμα καθετότητας ανάμεσα σε κάθε ζευγάρι αξόνων.

$\Delta S_x, \Delta S_y, \Delta S_z$: η μετατόπιση της ατράκτου για γνωστό μήκος άκρης εργαλείου στις διευθύνσεις x,y,z.

$\varepsilon_{xs}, \varepsilon_{ys}$: η κλίση της ατράκτου γύρω από τον x και y άξονα.

$\Delta z_{xx}, \Delta z_{xy}, \Delta z_{xz}$: θερμική μετατόπιση της αρχής του συστήματος συντεταγμένων O_x σε σχέση με το O_z στις διευθύνσεις x,y,z.

$\Delta x_{yx}, \Delta x_{yy}, \Delta x_{yz}$: αρχική θερμική μετατόπιση της αρχής του συστήματος συντεταγμένων O_y σε σχέση με το O_x στις διευθύνσεις x,y,z.

Αγνοώντας τους όρους ανώτερης τάξης, το ογκομετρικό σφάλμα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο υπολογίστηκε από την εξίσωση (7) αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (8)-(12).

Οπότε το ΔW είναι ίσο με:

$$\Delta W_x = \Delta z_{xx}(t) + \Delta x_{yx}(t) + \Delta S_x(t) + \delta_{xx}(t) + \delta_{xy}(t) - \delta_{xz}(t) + L\varepsilon_{\beta s}(t) + (T_z + L + Oxy_z) \varepsilon_{\beta x}(t) + (T_z + L) \varepsilon_{\beta y}(t) + (T_z + L + Ozx_z - Oxy_z - z) \varepsilon_{\beta z}(t) - (T_y + Oxy_y + y) \varepsilon_{\gamma x}(t) + T_y \varepsilon_{\gamma x}(t) + (T_y + Oxy_y + y + Ozx_y) \varepsilon_{\gamma z}(t) - yS_{xy}$$

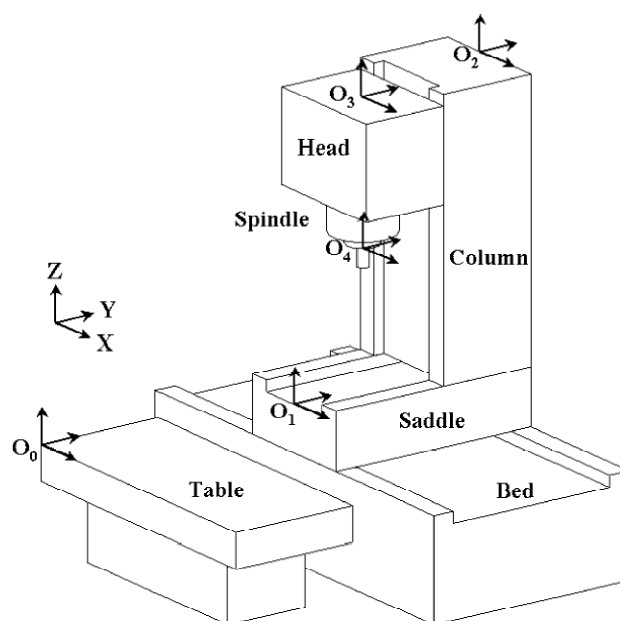
$$\Delta W_y = \Delta z_{xy}(t) + \Delta x_{yy}(t) + \Delta S_y(t) + \delta_{yx}(t) + \delta_{yy}(t) - \delta_{yz}(t) + L\varepsilon_{as}(t) - (T_z + L + Oxy_z) \varepsilon_{ax}(t) - (T_z + L) \varepsilon_{ay}(t) + (T_z + L + Oxy_z - Ozx_z - z) \varepsilon_{az}(t) - (T_x + Oxy_x) \varepsilon_{\gamma x}(t) + T_x \varepsilon_{\gamma y}(t) + (T_x + Oxy_x + x + Ozx_x) \varepsilon_{\gamma z}(t)$$

$$\Delta W_z = \Delta z_{xz}(t) + \Delta x_{yz}(t) + \Delta S_z(t) + \delta_{zy}(t) + \delta_{zx}(t) - \delta_{zz}(t) + L\varepsilon_{\beta s}(t) + (T_y + Oxy_y + y) \varepsilon_{ax}(t) + T_y \varepsilon_{ay}(t) + (T_y + y + Oxy_y - Ozx_y) \varepsilon_{az}(t) - (T_x + Oxy_x) \varepsilon_{\beta x}(t) + T_x \varepsilon_{\beta y}(t) + (T_x + Oxy_x + x + Ozx_x) \varepsilon_{\beta z}(t) - xS_{zx} - yS_{zy}$$

Οι Okafor και Ertekin [14] συνέθεσαν τα σφάλματα της εργαλειομηχανής σε μία έκφραση ογκομετρικού σφάλματος. Το μοντέλο διαμορφώθηκε για ένα κάθετο κέντρο. Η μοντελοποίηση έγινε χρησιμοποιώντας κινηματική στερεού σώματος και ομογενείς μετασχηματισμούς πινάκων. Ανάλογα με τις προηγούμενες μελέτες, κατασκευάστηκε πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού που αντιπροσώπευε την σχετική θέση και τον προσανατολισμό του κοπτικού εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Οι συνιστώσες του ογκομετρικού σφάλματος ορίστηκαν από το διάνυσμα θέσης των πινάκων ομογενούς μετασχηματισμού. Συνεπώς από το μοντέλο του ογκομετρικού σφάλματος και τις μετρούμενες τιμές σφαλμάτων, μπόρεσαν να υπολογισθούν οι συνιστώσες του ογκομετρικού σφάλματος στις X, Y, Z.

Οι Yang et al. [29] χρησιμοποίησαν το μοντέλο σύνθεσης ογκομετρικού σφάλματος που είχε επεξηγηθεί στην μελέτη των Yang et al. [21] και το εφάρμοσαν σε οριζόντιο κέντρο κατεργασιών. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα τους παρατηρήθηκε μείωση του ογκομετρικού σφάλματος της μηχανής κατά 88%.

Οι Jung. et al. [34] χρησιμοποίησαν ένα παραμετρικό μοντέλο σφάλματος για να αναλύσουν τα σφάλματα της εργαλειομηχανής μέσα στο χώρο εργασίας της. (σχήμα 3.3)



σχήμα 3.3: συστήματα συντεταγμένων τριαξονικού οριζόντιου κέντρου κατεργασιών [34]

Τα σφάλματα θέσης παρήχθησαν χρησιμοποιώντας πίνακες ομογενών μετασχηματισμών.

$$[{}^{ref}T_{tool}] = [{}^{ref}T_{saddle}E_{saddle}][{}^{saddle}T_{column}E_{column}][{}^{column}T_{head}E_{head}][{}^{head}T_{tool}]$$

$$[{}^{ref}T_{tool}] = [{}^0T_1E_1][{}^1T_2E_2][{}^2T_3E_3][{}^3T_4]$$

$${}^0T_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad E_1 = \begin{vmatrix} 1 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx} & \delta_{xx} \\ \varepsilon_{zx} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \delta_{yx} \\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 1 & \delta_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$${}^1T_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad E_2 = \begin{vmatrix} 1 & -\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{yy} & \delta_{xy} - S_{xy}y \\ \varepsilon_{zy} & 1 & -\varepsilon_{xy} & \delta_{yy} \\ -\varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy} & 1 & \delta_{zy} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$${}^2T_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad E_3 = \begin{vmatrix} 1 & -\varepsilon_{zz} & \varepsilon_{yz} & \delta_{xz} - S_{xz}z \\ \varepsilon_{zz} & 1 & -\varepsilon_{xz} & \delta_{yz} - S_{yz}z \\ -\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{xz} & 1 & \delta_{zz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$${}^3T_4 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L \end{vmatrix}$$

όπου :

δ_{ii} ($i=x,y,z$) δηλώνει το γραμμικό σφάλμα κατά μήκος του i άξονα,

δ_{ij} ($i=x,y,z$ και $i \neq j$) δηλώνει το σφάλμα ευθύτητας στην διεύθυνση του i άξονα όταν η κίνηση γίνεται κατά μήκος του j άξονα.

ε_{ij} δηλώνει τα γωνιακά σφάλματα περί τον i άξονα όταν η κίνηση γίνεται κατά μήκος του j ,

S_{ij} δηλώνει το σφάλμα παραλληλότητας ανάμεσα στους άξονες.

L είναι το ιδανικό μήκος του εργαλείου στον άξονα z .

Πολλαπλασιάζοντας τους πίνακες και αμελώντας τους όρους ανώτερης τάξης, προέκυψε το σφάλμα θέσης για κάθε άξονα αναφορικά με την θέση των αξόνων και τις συνιστώσες του σφάλματος:

$$\begin{aligned} \Delta V_x &= \delta_{xx} + \delta_{xy} + \delta_{xz} - y(\varepsilon_{zx} + S_{xy}) + z(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} - S_{xz}) \\ &+ L(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yz}) + z(\varepsilon_{xy}\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{xy}S_{yz} + \varepsilon_{zy}S_{yz}) + L(\varepsilon_{xy}\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{xz}\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{xz}\varepsilon_{zy}) + \varepsilon_{yx}(\delta_{zy} + \delta_{zz}) \\ &- \varepsilon_{zx}(\delta_{yy} + \delta_{yz}) + \delta_{zz}\varepsilon_{yy} - \delta_{yz}\varepsilon_{zy} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_y &= \delta_{yx} + \delta_{yy} + \delta_{yz} - z(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} - S_{yz}) \\ &+ L(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{xz}) + z(\varepsilon_{yy}\varepsilon_{zx} - \varepsilon_{zx}S_{xz} - \varepsilon_{zy}S_{xz}) + L(\varepsilon_{yy}\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{yz}\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{yz}\varepsilon_{zy}) - y\varepsilon_{zx}S_{xy} + \varepsilon_{xx}(\delta_{zy} + \delta_{zz}) \\ &- \delta_{xz}(\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zy}) - \delta_{zz}\varepsilon_{xy} + \delta_{xy}\varepsilon_{zx} \end{aligned}$$

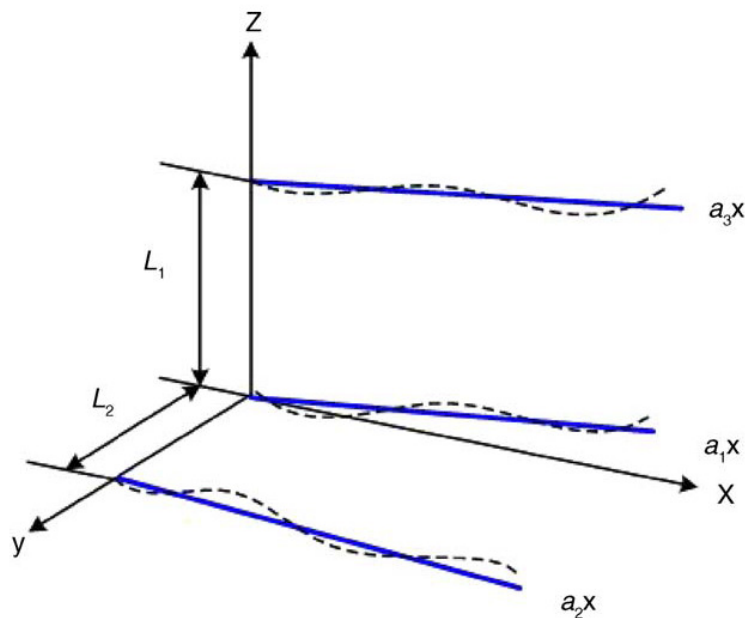
$$\Delta V_z = \delta_{zx} + \delta_{zy} + \delta_{zz} + y\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xx}(\delta_{yy} + \delta_{yz}) - \varepsilon_{yx}(\delta_{xy} + \delta_{xz} - yS_{xy}) + \delta_{yz}\varepsilon_{xy} - \delta_{xz}\varepsilon_{yy} -$$

$$z(\varepsilon_{xx}\varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yx}S_{xz} + \varepsilon_{yy}S_{xz} - \varepsilon_{xx}S_{yz}) - L(\varepsilon_{xx}\varepsilon_{xy} + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{xz} + \varepsilon_{xy}\varepsilon_{xz} + \varepsilon_{yx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yx}\varepsilon_{yz} + \varepsilon_{yy}\varepsilon_{yz})$$

Το συνολικό ογκομετρικό σφάλμα εκφράζεται ως:

$$\Delta V_{\text{total}} = (\Delta V_y^2 + \Delta V_z^2 + \Delta V_x^2)^{1/2}$$

Έπειτα, οι εκφράσεις παραμετροποιήθηκαν με την προσέγγιση των συνιστωσών του σφάλματος με πολυωνυμικές συναρτήσεις. Καταρχάς, υποθέτοντας ότι τα γραμμικά σφάλματα κάθε άξονα είναι γραμμική συνάρτηση των θέσεων του άξονα, μπορούν να απλοποιηθούν ως: $\delta_{xx}=ax$, $\delta_{yy}=by$, $\delta_{zz}=cz$ όπου a , b , c . Τα γωνιακά σφάλματα μπορούν να προσδιορισθούν μετρώντας τα γραμμικά σφάλματα σε διάφορες θέσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.



σχήμα 3.4: προσέγγιση γωνιακών σφαλμάτων μέσω γραμμικών [34]

Όπως φαίνεται στο σχήμα μετρήθηκαν τα γραμμικά σφάλματα τρεις φορές κατά μήκος του x άξονα σε διαφορετικές θέσεις στον y , z άξονα. Βασισμένοι στην αρχή του Abbe, εξέφρασαν τα γωνιακά σφάλματα pitch και yaw με τους τύπους:

$$\varepsilon_{yx} = \varepsilon_y(x) = \frac{a_2 - a_1}{L_1} = f_1 x \quad (13)$$

$$\varepsilon_{zx} = \varepsilon_z(x) = \frac{a_3 - a_1}{L_{21}} = f_2 x \quad (14)$$

Με ανάλογο τρόπο μπορεί το γωνιακό σφάλμα roll να εκφρασθεί με την ακόλουθη εξίσωση: $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_x(x) = f_3 x$ (15)

Το σφάλμα ευθύτητας του x άξονα προκύπτει από το γωνιακό σφάλμα (13). Τα σφάλματα οριζόντιας και κάθετης ευθύτητας βρίσκονται ολοκληρώνοντας το

γωνιακό σφάλμα κατά μήκος του κινούμενου άξονα: $\delta_{zx} = \int_0^x \varepsilon_{yx} dx = \frac{f_1}{2} x^2$ (4),
 $\delta_{yx} = \int_0^x \varepsilon_{zx} dx = \frac{f_2}{2} x^2$ (16)

Για τον y και z άξονα με ανάλογες μεθόδους καταλήγουμε σε ανάλογες εκφράσεις. Αύτες φαίνονται στον πίνακα 3.1, όπως αυτός διαμορφώθηκαν από τους Jung et al.

Parameterized error components of Y and Z axes		
Y axis	Angular pitch motion error	$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_x(y) = g_1 y$
	Angular yaw motion error	$\varepsilon_{zy} = \varepsilon_z(y) = g_2 y$
	Angular roll motion error	$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_y(y) = g_3 y$
	Vertical straightness error	$\delta_{zy} = \int_0^y \varepsilon_{xy} dy = \frac{g_1}{2} y^2$
	Horizontal straightness error	$\delta_{xy} = \int_0^y \varepsilon_{zy} dy = \frac{g_2}{2} y^2$
Z axis	Angular pitch motion error	$\varepsilon_{xz} = \varepsilon_x(z) = h_1 z$
	Angular yaw motion error	$\varepsilon_{yz} = \varepsilon_y(z) = h_2 z$
	Angular roll motion error	$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_z(z) = h_3 z$
	Vertical straightness error	$\delta_{yz} = \int_0^z \varepsilon_{xz} dz = \frac{h_1}{2} z^2$
	Horizontal straightness error	$\delta_{xz} = \int_0^z \varepsilon_{yz} dz = \frac{h_2}{2} z^2$

πίνακας 3.1: παραμετρικές εκφράσεις σφαλμάτων Y και Z άξονα [34]

Τα σφάλματα παραλληλότητας ανάμεσα στους άξονες S_{xy} , S_{yz} , S_{zx} θεωρούνται από μόνα τους παράμετροι. Μετά από τις παραμετροποιήσεις το μοντέλο ογκομετρικού σφάλματος εκφράστηκε ως εξής:

$$\Delta V_x = (\alpha + Lf_1)x + (Lg_3 + S_{xy})y + (Lh_2 - S_{zx})z + (-f_2bf_2 + Lf_2g_1)xy + (g_3 + cg_3 + Lh_1g_2 + S_{yz}g_2)yz + (f_1 + cf_1 + Lf_2h_1 + f_2S_{yz})zx + (f_2g_1)xyz + (\frac{1}{2}g_2)y^2 + (\frac{1}{2}h_2)z^2 + (\frac{1}{2}g_1f_1)y^2x - (\frac{1}{2}h_1g_2)z^2y - (\frac{1}{2}h_1f_2)z^2x$$

$$\Delta V_y = (-Lf_3)x + (b - Lg_1)y + (-Lh_1 - S_{yz})z + (-cg_1 + Lg_3f_2 - S_{xy}f_2)xy + (-g_1 + h_2g_2)yz + (-f_3 + Lh_2f_2 - f_2S_{zx})zx + (f_2g_3)xyz + (\frac{1}{2}f_1 - cf_3)x^2 + (-\frac{1}{2}g_1f_3 + \frac{1}{2}g_2f_2)y^2x + (\frac{1}{2}h_2f_2)z^2y - (\frac{1}{2}h_2f_2)z^2y$$

$$\Delta V_z = cz + (f_3 + bf_3 - Lf_3g_1 - Lf_1g_3 + f_1S_{xy})xy - (f_3g_1 + f_1g_3)xyz + (-Lg_1h_1 - Lg_3h_2 + g_3S_{yz})yz + (-Lf_3h_1 + Lf_1h_2 + f_1S_{zx}f_3S_{yz})zx + (\frac{1}{2}f_1)x^2 + (\frac{1}{2}g_1)y^2 + (\frac{1}{2}h_1f_3 + \frac{1}{2}h_2f_1)z^2x + (\frac{1}{2}g_2f_1 - \frac{1}{2}h_2g_3)z^2y + (\frac{1}{2}g_2f_1)y^2x\sqrt{2}$$

Συνδυάζοντας τις f_i, g_i, h_i παραμέτρους ορίστηκαν οι καινούργιες παράμετροι F_i , G_i , H_i και το μοντέλο ογκομετρικού σφάλματος επαναδιατυπώθηκε ως εξής:

$$\Delta V_x = F_1(x) + F_2(Lx + zx) + F_3(Ly + yz) + F_4(y) + F_5(Lz + \frac{1}{2}z^2) + F_6(-z) + F_7(-xy) + F_8(Lxy + xyz) + F_9(yz) + F_{10}(Ly - \frac{1}{2}z^2y) + F_{11}(zx) + F_{12}(Lzx - z^2x) + F_{13}(\frac{1}{2}yz) + F_{14}(y^2x)$$

$$\Delta V_y = G_1(-Lx) + G_2(y) + G_3(-Ly) + G_4(-Lz) + G_5(-z) + G_6(-xy) + G_7(Lxy + xyz) + G_8(-yz) + G_9(yz + \frac{1}{2}z^2x) + G_{10}(-zx) + G_{11}(Lzx + \frac{1}{2}z^2x) + G_{12}(x^2) + G_{13}(\frac{1}{2}y^2x)$$

$$\Delta V_z = H_1(z) + H_2(xy) + H_3(-Lxy - xyz) + H_4(-Lxyz + \frac{1}{2}z^2y) + H_5(-Lyz - \frac{1}{2}z^2y) + H_6(yz) + H_7(Lzx - \frac{1}{2}z^2x) + H_8(zx) + H_9(\frac{1}{2}x^2) + H_{10}(\frac{1}{2}y^2)$$

Όπως φαίνεται για κάθε άξονα χρειάζονται να προσδιορισθούν 14, 13 και 10 παράμετροι αντίστοιχα. Για παράδειγμα, για τον άξονα x χρειάζονται 14 εξισώσεις για να δοθεί μία ακριβής λύση:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{x_1} \\ \Delta_{x_2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta_{x_{14}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & Lx_1 + z_1x_1 & Ly_2 + y_2z_2 & \dots & y_1^2x_1 \\ x_2 & Lx_2 + z_2x_2 & Ly_2 + y_2z_2 & \dots & y_2^2x_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ x_{14} & Lx_{14} + z_{14}x_{14} & Ly_{14} + y_{14}z_{14} & \dots & y_{14}^2x_{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ F_{14} \end{bmatrix}$$

$$[e_x] = [X][F]$$

Όπου e_x είναι το διάνυσμα σφάλματος θέσης του x άξονα όπως μετρήθηκε στις συγκεκριμένες θέσεις (x_i, y_i, z_i) του χώρου εργασίας της εργαλειομηχανής, $[X]$ είναι ένας τετραγωνίστιμος πίνακας τα στοιχεία του οποίου είναι συναρτήσεις των θέσεων του άξονα και του μήκους του εργαλείου. Το διάνυσμα της παραμέτρου $[F]$ βρέθηκε από τους Jung et al. χρησιμοποιώντας εκτίμηση ελαχιστών τετραγώνων: $[F] = (X^T X)^{-1} X^T [e_x]$

Αναλόγως εκτιμήθηκαν και τα διανύσματα των παραμέτρων $[G]$ και $[H]$. Οι πειραματικές τους μετρήσεις έδειξαν μείωση των σφαλμάτων κατά 90, 78 και 92 % στις διευθύνσεις των x, y, z μετά την αντιστάθμιση.

Οι Lee et al. [22] μέτρησαν 18 γεωμετρικά σφάλματα σε μία μικροεργαλειομηχανή και τα μοντελοποίησαν χρησιμοποιώντας την μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Μελετώντας το χαρακτηριστικά του προτεινόμενου μετρικού συστήματος δημιούργησαν ένα μοντέλο ογκομετρικού σφάλματος βασισμένο στην κινηματική αλυσίδα το οποίο χρησιμοποίησαν για την αντιστάθμιση. Τα μεταφορικά σφάλματα μειώθηκαν σε λιγότερο από 1.2μm και τα σφάλματα παραλληλότητας ελαττώθηκαν πολύ κοντά στο μηδέν.

Πρότυπα Μέτρησης Ακρίβειας Θέσης

4.1 Εισαγωγή

Ο ορισμός της ακρίβεια της εργαλειομηχανής δόθηκε στο πρώτο κεφάλαιο ως ο βαθμός συμφωνίας της μορφής και των διαστάσεων του έτοιμου τεμαχίου που καταργαστήκαμε στην εργαλειομηχανή με αυτές που απαιτούνταν [4].

Στην πράξη, η έννοια της ακρίβειας της εργαλειομηχανής έχει υιοθετηθεί παγκοσμίως ως η ικανότητα της να τοποθετεί την άκρη του εργαλείου στο σημείο που έχει προγραμματιστεί [43]. Εντούτοις, υπάρχουν πολλοί τρόποι ορισμού της ικανότητας αυτής. Σε μια ιαπωνική εργαλειομηχανή ο κατασκευαστής συνήθως σημειώνει την ακρίβεια της αναφερόμενος σε κάποιο από τα πρότυπα JIS B 6201, JIS B 6336 ή JIS B 6338. Αντίθετα, στην Γερμανία αναφέρονται στο VDI 3441. Στην Αμερική το 1968 εκδόθηκε μία μελέτη από τον Σύλλογο Κατασκευαστών Εργαλειομηχανών που αφορούσε τις μετρήσεις ακρίβειας θέσης κι εκεί παρουσιάστηκε το πρότυπο NMTBA. Ενώ και ο διεθνής και ο αμερικάνικος οργανισμός τυποποίησης (ISO και ANSI) έχουν εκδώσει τα δικά τους πρότυπα ISO-230 και ASME B5.54, ASME B5.57 αντίστοιχα.

Η ίδια εργαλειομηχανή μπορεί να δώσει διαφορετικά αριθμητικά αποτελέσματα ακρίβειας και επαναληψιμότητας ανάλογα με το πρότυπο κατά το οποίο γίνονται οι μετρήσεις [42]. Για αυτό το λόγο παρακάτω θα γίνει μία σύντομη αναφορά σε κάθε πρότυπο καθώς και μία αναλυτική σύγκριση μεταξύ τους. Στην αναφορά δεν θεωρήθηκε σκόπιμο να συμπεριληφθεί το JIS B διότι το λογισμικό του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε δεν υποστηρίζει την ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με το πρότυπο αυτό.

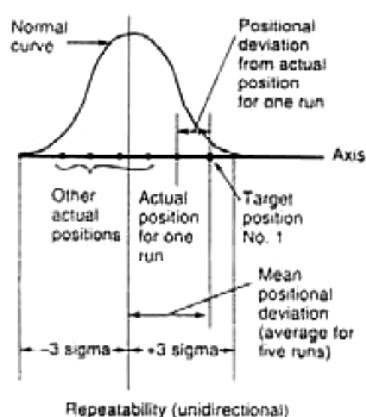
4.2 Τα πρότυπα μέτρησης ακρίβειας θέσης: σύντομη αναφορά

4.2.1 ISO 230-2

Η λογική της λήψης μετρήσεων για την διαπίστωση της ακριβείας, βασίζεται στο ότι υποθέτουμε πως σε κάθε θέση-στόχο, κατά μήκος του άξονα της διαδρομής που γίνεται μέτρηση, μπορούμε να αντιστοιχίζουμε μία καμπύλη κανονικής κατανομής. Εφόσον υπάρχει ένας αριθμός από διαφορετικά πραγματικά σημεία θέσης, εξαρτώμενος από τον αριθμό των σειρών μετρήσεων που έχουν ληφθεί, είναι δυνατόν να ορισθεί μία τυπική απόκλιση (s) για την κανονική καμπύλη η οποία προκύπτει από την πραγματική θέση των σημείων.

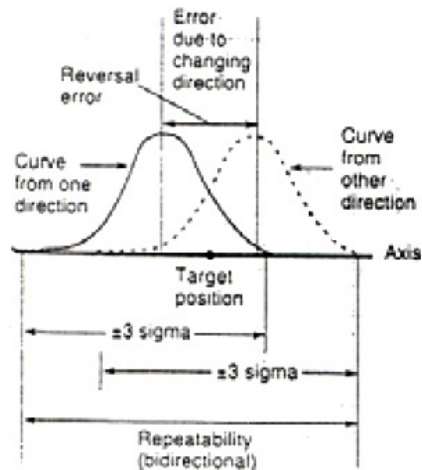
Ένα εύρος περίπου ± 3 τυπικών αποκλίσεων μπορεί να καλύψει περίπου το 99,74% όλων των πιθανών πραγματικών θέσεων οι οποίες θα προέκυπταν από έναν άπειρο αριθμό κινήσεων προς το σημείο-στόχο. Το εύρος αυτό καλείται επαναληψιμότητα και αναφέρεται στην συγκεκριμένη θέση-στόχο.

Η κωδονοειδής καμπύλη που φαίνεται στο σχήμα 4.1 βασίζεται στις πραγματικές θέσεις που προκύπτουν από πέντε σειρές μετρήσεων όταν η θέση στόχος προσεγγίζεται πάντα από την ίδια κατεύθυνση.



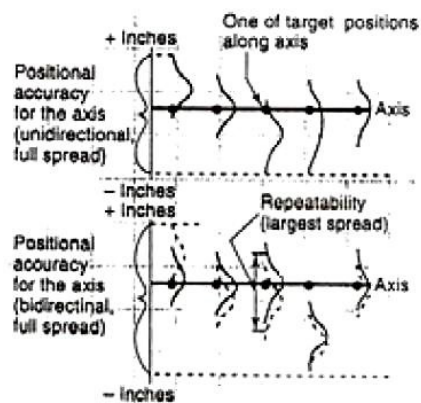
σχήμα 4.1: καμπύλη που βασίζεται στις πραγματικές θέσεις που προκύπτουν από πέντε σειρές μετρήσεων όταν η θέση στόχος προσεγγίζεται πάντα από την ίδια κατεύθυνση. [43]

Αν η θέση-στόχος προσεγγιστεί και από την αντίθετη κατεύθυνση ορίζεται μία δεύτερη κανονική καμπύλη όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.



σχήμα 4.2: καμπύλη που βασίζεται στις πραγματικές θέσεις που προκύπτουν από πέντε σειρές μετρήσεων όταν η θέση στόχος προσεγγίζεται και από την αντίθετη κατεύθυνση [43]

Οι δύο καμπύλες δεν ταυτίζονται λόγω του σφάλματος αντιστρεψιμότητας το οποίο οφείλεται βασικά στην αξονική χάρη του συστήματος. Για να προσδιορίσουμε την ακρίβεια θέσης μίας εργαλειομηχανής είναι απαραίτητο για έναν αριθμό ορισμένων θέσεων-στόχων κατά μήκος του άξονα της διαδρομής να ορισθεί το εύρος $\pm 3s$, βασισμένο στις πραγματικές θέσεις. Για κάθε σημείο-στόχο μπορεί να ορισθεί μία θεωρητική κανονική καμπύλη – ή δύο κανονικές καμπύλες στην περίπτωση προσέγγισης δύο κατευθύνσεων. Τότε το συνολικό εύρος ανάμεσα στο υψηλότερο σημείο από όλες τις καμπύλες και το χαμηλότερο ονομάζεται ακρίβεια θέσης κατά το ISO 230-2, ακρίβεια (σχήμα 4.3).



σχήμα 4.3: ακρίβεια θέσης, επαναληψιμότητα άξονα κατά ISO 230-2 [43]

Η επαναληψιμότητα ενός άξονα είναι το μεγαλύτερο εύρος μίας καμπύλης (εάν πρόκειται για μονοκατευθυντικές σειρές μετρήσεων) ή δύο καμπύλων (εάν πρόκειται για δι-κατευθυντικές σειρές μετρήσεων) στην θέση ενός στόχου. (σχήμα 4.3)

Ο εμπειρικός κανόνας δείχνει πως η επαναληψιμότητα είναι συνήθως το μισό της ακρίβειας θέσης, παρόλα αυτά υπάρχουν εξαιρέσεις. Η μέθοδος ανάλυσης του ISO 230-2 επιλέγει την χειρότερη ακρίβεια θέσης και περικλείει σχεδόν το 100% της πιθανής ανακρίβειας. Για το λόγο αυτόν αναμένεται ότι, επιλέγοντας τις παραμέτρους αντιστάθμισης μέσα από ανάλυση κατά ISO, η μέση επίδοση της εργαλειομηχανής θα βελτιωθεί.

4.2.2 ASME B5.54/ B5.57

Το πρότυπο ASME θεωρείται πανομοιότυπο με το ISO και πλήρως ταυτισμένο με αυτό ως προς τους υπολογισμούς και την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων. Η ακρίβεια θέσης και η επαναληψιμότητα προσεγγίζεται ακριβώς όπως και στο ISO – με την επιπλέον πληροφορία ότι το ASME περιλαμβάνει και παράγραφο για τα περιοδικά σφάλματα.

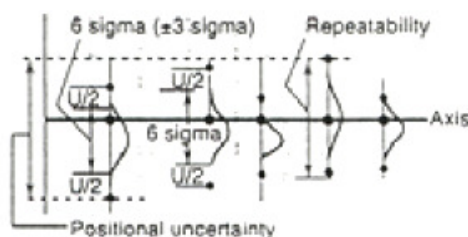
4.2.3 NMTBA

Για δεκαετίες στην Αμερική βασιζονταν στο πρότυπο του NMTBA. Οι ορισμοί στο NMTBA είναι παρεμφερείς με αυτούς του προτύπου του ISO. Μία διαφορά είναι ότι το NMTBA συνιστά την μονο-κατευθυντική προσέγγιση των θέσεων-στόχων ενώ το ISO την δι-κατευθυντική. Μία άλλη διαφορά είναι ότι το πρότυπο NMTBA χρησιμοποιεί τον όρο κυλιόμενη κλίμακα (όπως και το VDI), στον οποίο η ακρίβεια εξαρτάται από το μήκος του άξονα, ενώ στο ISO δεν λαμβάνεται υπόψη αυτός ο παράγοντας. Έδώ όμως πρέπει να σημειώσουμε πως το πρότυπο NMTBA – το οποίο εκδόθηκε το 1968 και ανανεώθηκε το 1972- μπορεί ως προς αυτό το σημείο να θεωρηθεί ξεπερασμένο. Κι αυτό γιατί το σημερινό το σύστημα ελέγχου των εργαλειομηχανών διορθώνει θέματα όπως η αντιστάθμιση των κοχλιών κίνησης κι έτσι πραγματοποιείται έτσι η ρύθμιση των σφαλμάτων κατά μήκος της διαδρομής του άξονα, ανεξαρτήτως του μήκους του. Η τελευταία από τις βασικές διαφορές είναι ότι το NMTBA αναφέρεται και σε θετικές και αρνητικές τιμές, ενώ το γερμανικό VDI και το πρότυπο ISO αναφέρονται σε απόλυτες τιμές, οι οποίες –σε πρακτικό επίπεδο- είναι ισοδύναμες με τις προσημασμένες ποσότητες. Παραδείγματος χάριν, αυτό σημαίνει πως το $+0,0002in$ και $-0,0002in$, δηλαδή οι $\pm 0,0002in$ στο NMTBA είναι αντίστοιχα $0,0004in$ στο ISO ή στο VDI. Και οι δύο εκφράσεις ερμηνεύονται με τον ίδιο τρόπο όμως τεχνικά είναι διαφορετικές. Γενικά, μπορούμε να σημειώσουμε ότι το NMTBA είναι το πιο αυστηρό πρότυπο.

4.2.4 VDI 3441

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στο γερμανικό πρότυπο VDI είναι παρόμοιες με αυτές του ISO και του NMTBA. Για να είμαστε ακριβείς μάλιστα, το πρότυπο ISO είναι αυτό που είναι παρόμοιο με το VDI και το NMTBA, αφού είχαν αναπτυχθεί πριν το ISO και είναι εμφανές πως χρησιμοποιήθηκαν ως μοντέλα για το ISO. Παρότι οι υπολογισμοί και οι ορισμοί διαφέρουν, τα σημαντικά αποτελέσματα των υπολογισμών, τα οποία είναι η ακρίβεια θέσης και η επαναληψιμότητα, είναι πολύ κοντά για τις τρεις περιπτώσεις. Η γερμανική μέθοδος VDI είναι πολυπλοκότερη από τις άλλες και κάποιιοι όροι που χρησιμοποιεί είναι δυσνόητοι αν δεν αναλυθούν αρκετά.

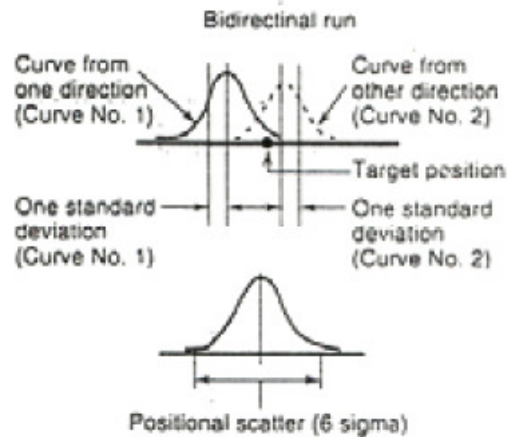
Ο όρος ακρίβεια θέσης δεν έχει έναν μοναδικό μαθηματικό ορισμό όπως στο ISO. Σε αντίθεση, αναλύεται σε τέσσερις, μαθηματικά ορισμένους, παράγοντες: αβεβαιότητα θέσης, διασπορά θέσης, σφάλμα αντιστρεψιμότητας και απόκλιση θέσης. Ο κοντινότερος παράγοντας της ακρίβειας θέσης του ISO στο VDI είναι η αβεβαιότητα θέσης. Παρότι οι δύο όροι υπολογίζονται διαφορετικά, οι τελικές τιμές είναι πολύ κοντά: κάθε ένας μετράει το μέγιστο εύρος των κανονικών καμπύλων κατά μήκος του άξονα. (σχήμα 4.4)



σχήμα 4.4: αβεβαιότητα θέσης, σφάλμα αντιστρεψιμότητας κατά VDI 3441 [43]

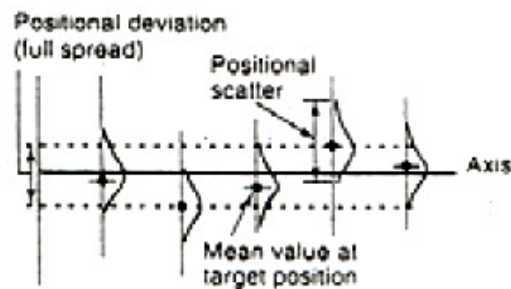
Η διαφορά έγκειται στο πως υπολογίζονται αυτές οι καμπύλες. Οι οδηγίες του VDI συνδυάζουν δι-κατευθυντικές κανονικές καμπύλες σε μία κανονική καμπύλη, που ορίζεται ως διασπορά θέσης. Αυτό επιτυγχάνεται υπολογίζοντας τον μέσο όρο κι έπειτα πολλαπλασιάζοντας την μέση τυπική απόκλιση με το έξι (σχήμα 4.5).

Κατόπιν, το σφάλμα αντιστρεψιμότητας (U) διαιρείται με το 2 και κάθε μισό προστίθεται στα άκρα της κανονικής καμπύλης που προήλθε από τον μέσο όρο (δηλαδή στη διασπορά θέσης). Αυτό φαίνεται ως U/2 στο σχήμα 4.4.



σχήμα 4.5: διασπορά θέσης κατά VDI 3441 [43]

Ο όρος απόκλιση θέσης όπως περιγράφεται στο VDI διαφέρει από τον ίδιο όρο που αναφέρεται στο πρότυπο ISO. Στο πρότυπο ISO ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στην θέση του στόχου και την πραγματική θέση (σχήμα 1). Στο πρότυπο του VDI ορίζεται ως η μέγιστη διαφορά των μέσων τιμών των πραγματικών τιμών από τις ξεχωριστές θέσεις των στόχων πάντων στον άξονα. (σχήμα 4.6)



σχήμα 4.6: απόκλιση θέσης κατά VDI 3441 [43]

Το τελικό αποτέλεσμα για την επαναληψιμότητα σε έναν άξονα είναι πολύ κοντά σε αυτόν του ISO, σε αυτό η επαναληψιμότητα βασίζεται στην θέση-στόχο που έχει τη μέγιστη διασπορά θέσης και σφάλμα αντιστρεψιμότητας. Πρέπει να σημειώσουμε εδώ πως το VDI δεν είναι κάποιο πρότυπο που εκδίδεται στα πλαίσια του συστήματος DIN αλλά πρόκειται για προτεινόμενες οδηγίες.

4.3 Τα πρότυπα μέτρησης ακρίβειας θέσης: σύγκριση

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται τα πρότυπα ISO 230-2, VDI 3441 και NMTBA [43]. Επειδή οι μετρήσεις μας αναλύθηκαν με το πρότυπο ISO 230-2, η σύγκριση αναπτύσσεται με άξονα το πρότυπο αυτό.

Ορισμός / Πληροφορία	ISO	VDI	NMTBA
θέση στόχου	θέση στην οποία το κινούμενο μέρος (άξονας) είναι προγραμματισμένος να φθάσει	ομοίως με ISO	ομοίως με ISO
πραγματική θέση	μετρούμενη θέση στην οποία έφθασε το κινούμενο μέρος	ομοίως με ISO	ομοίως με ISO
απαραίτητος αριθμός στόχων	5 σημεία/ 1m για άξονες έως 2m	εξαρτάται από το μήκος του άξονα. 5 σημεία κατ'ελάχιστο	δεν ορίζεται (στο παράδειγμα που δίνεται είναι 20 τα σημεία)
αριθμό σειρών μετρήσεων	5 σε κάθε κατεύθυνση κατ'ελάχιστον	10 σειρές/1m σε κάθε κατεύθυνση	7 κατ' ελάχιστο
μονο-κατευθυντική/ δι-κατευθυντική	Μία μονοκατευθυντική σειρά περιλαμβάνει μετρήσεις στις οποίες η προσέγγιση του στόχου γίνεται πάντα με την ίδια κατεύθυνση. Μία δι-κατευθυντική σειρά αναφέρεται σε προσέγγιση του στόχου και από τις δύο κατευθύνσεις. προτείνεται η δι-κατευθυντική	ομοίως με ISO προτείνεται η δι-κατευθυντική	ομοίως με ISO προτείνεται η μονο-κατευθυντική
ακρίβεια θέσης	η μέγιστη διαφορά ανάμεσα στις ακραίες τιμές $X+3s$ και $X-3s$ ανεξάρτητα των θέσεων ή τις διευθύνσεις της κίνησης. Εφαρμόζεται και σε μονο-κατευθυντικές και σε δι-κατευθυντικές σειρές μετρήσεων. Εξαιτίας του σφάλματος αντιστρεψιμότητας, το εύρος θα είναι μεγαλύτερο και η ακρίβεια θέσης μικρότερη για την δικατευθυντική.	δεν υπάρχει συγκεκριμένος όρος για την ακρίβεια. Παρόλα αυτά ο όρος «αβεβαιότητα θέσης» που περιγράφεται είναι συμβατός με τον ορισμό του ISO για την ακρίβεια θέσης. Οι υπολογισμοί, όμως, διαφέρουν. (Σχ. 4.4, 4.5)	συγκρίσιμο με το ISO, καλείται όμως ακρίβεια

πίνακας 4.1: συγκριτικός πίνακας προτύπων [43]

4.4 Το πρότυπο ISO 230-2

4.4.1 Γενικά για το ISO 230

Το ISO 230 αποτελεί τον κώδικα ελέγχου των εργαλειομηχανών . Κατά τον χρόνο συγγραφής της παρούσης διπλωματικής απαρτίζεται από 9 τμήματα.

ISO 230-1:1996: Το πρώτο τμήμα αφορά στην γεωμετρική ακρίβεια μηχανών που λειτουργούν χωρίς φορτίο ή σε συνθήκες φινιρίσματος. Ο ισχύον κανονισμός βασίζεται στον πρωταρχικό ISO 230-1:1961, ο οποίος είχε αναθεωρηθεί και το 1986.

ISO 230-2:2006: Το δεύτερο τμήμα αφορά στον καθορισμό της ακρίβειας και επαναληψιμότητας τοποθέτησης αξόνων αριθμητικού ελέγχου. Ορίζονται μέθοδοι για δοκιμή και αξιολόγηση μέσω άμεσων μετρήσεων στους άξονες της μηχανής. Ο ισχύον κανονισμός αποτελεί αναθεώρηση αυτού του ISO 230-2:1997, ενώ η αρχική έκδοση συντάχτηκε το 1988.

ISO 230-3-2007: Το τρίτο τμήμα αφορά στον καθορισμό των θερμικών επιδράσεων. Ορίζει τρία τεστ για τον ορισμό των θερμικών επιδράσεων στις εργαλειομηχανές και μπορεί να εφαρμοστεί σε άξονες μέγιστου μήκους 2000mm (ή σε αντιπροσωπευτικό μήκος ως 2000mm μεγαλύτερων αξόνων). Αποτελεί αναθεώρηση του αντίστοιχου κανονισμού του ISO 230-3-2001.

ISO 230-4:2005: Το τέταρτο τμήμα ορίζει μεθόδους για δοκιμές κυκλικότητας σε εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου. Πρόκειται για την ενημέρωση του ISO 230-4:1996.

ISO 230-5:2000: Το πέμπτο τμήμα αφορά στον καθορισμό της εκπομπής θορύβου.

ISO 230-6:2002: Το έκτο τμήμα αφορά στον καθορισμό της ακρίβειας της διαγώνιας θέσης και τις δοκιμές διαγώνιας μετατόπισης. Οι ολοκληρωμένες δοκιμές της ογκομετρικής επίδοσης μίας εργαλειομηχανής είναι μία δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Αυτό το τμήμα του ISO 230 ορίζει τις δοκιμές διαγώνιας μετατόπισης, οι οποίες επιτρέπουν την εκτίμηση της ογκομετρικής επίδοσης της εργαλειομηχανής.

ISO 230-7:2006: Το έβδομο τμήμα αφορά την γεωμετρική ακρίβεια των αξόνων περιστροφής. Οι άτρακτοι, οι περιστροφικές κεφαλές και τα περιστροφικά τραπέζια μιας εργαλειομηχανής συνιστούν άξονες περιστροφής, οι οποίοι έχουν απρόβλεπτες κινήσεις στον χώρο εξαιτίας διαφόρων πηγών σφαλμάτων.

ISO 230-8:2009: Το όγδοο τμήμα αφορά τον καθορισμό των επιπέδων δόνησης. Επικεντρώνεται στα διάφορα είδη δονήσεων που λαμβάνουν χώρα ανάμεσα στο εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Επιπλέον, παρέχει κάποιες βασικές διαδικασίες μέτρησης για την αξιολόγηση συγκεκριμένων προβλημάτων δόνησης.

ISO 230-9:2005: Το τελευταίο τμήμα αφορά στην εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων εργαλειομηχανών που γίνονται βάση του ISO 230. Παρέχει πληροφορίες και βασικές εξισώσεις για την δυνατότητα υπολογισμού της αβεβαιότητας.

4.4.2 Το πρότυπο ISO 230-2 (1997)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ασχολούμαστε με τον καθορισμό της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας της εργαλειομηχανής, για αυτό και μας αφορά μόνο το δεύτερο τμήμα του ISO 230. Το λογισμικό της Ortophyne που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων, παρέχει την δυνατότητα χειρισμού των δεδομένων μόνο με τα πρότυπα ISO-230-2:1988 και ISO-230-2:1997. Επειδή ακριβώς το λογισμικό δεν είναι ενημερωμένο με το ISO-230-2:2006, παρακάτω θα αναφερθούμε στο πρότυπο ISO-230-2:1997, βάσει του οποίου αναλύθηκαν οι μετρήσεις, στο τέλος θα αναφερθούν τα βασικά σημεία που αναθεωρήθηκαν στο ISO-230-2:2006. Ο ΕΛΟΤ διαθέτει την πλήρη έκδοση του προτύπου στην αγγλική γλώσσα. Στις επόμενες σελίδες παρατίθεται το ISO-230-2:1997, σε ελληνική απόδοση.

Κώδικας δοκιμών για εργαλειομηχανές ISO-230

Τμήμα Δεύτερο (1997) – Καθορισμός της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας τοποθέτησης αξόνων αριθμητικού ελέγχου

Περιεχόμενα:

1. Εισαγωγή
 2. Επισκόπηση
 3. Ορισμοί και σύμβολα
 4. Συνθήκες δοκιμών
 5. Προγραμματισμός δοκιμών
 6. Εκτίμηση των αποτελεσμάτων
 7. Σημεία που θα συμφωνηθούν μεταξύ του προμηθευτή/κατασκευαστή και του χρήστη
 8. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων
- Παράρτημα Α : βηματικός κύκλος
- Παράρτημα Β : βιβλιογραφία

1. Εισαγωγή:

Αυτό το μέρος του προτύπου ISO 230 χρησιμοποιεί την στατιστική επεξεργασία των μετρούμενων τιμών για να προσδιορίσει πολλές παραμέτρους σχετικές με την συμπεριφορά της εργαλειομηχανής. Η υποεπιτροπή SC2 αποφάσισε να χρησιμοποιήσει τις συστάσεις που παρέρχονται από την οδηγία για την έκφραση της αβεβαιότητας των μετρήσεων. (παράρτημα Β - 1)

Η πρώτη τροποποίηση σχετίζεται με την υπόθεση του τύπου της κατανομής των αποκλίσεων θέσης.

Οι τροποποιημένοι ορισμοί σε αυτό το έγγραφο δεν χρησιμοποιούν υποθέσεις για το σχήμα κατανομής, αναφερόμενοι σε «τυπικές αβεβαιότητες» αντί για τυπικές αποκλίσεις. Ο νέος ορισμός της διαστελλόμενης αβεβαιότητας με πολλαπλάσιο παράγοντα το 2 αντί του προηγούμενου 3 επίσης χρησιμοποιείται ακολουθώντας τις συστάσεις της οδηγίας.

Στη δεύτερη τροποποίηση, προκειμένου να επισημανθεί η συστηματική συμπεριφορά των εργαλειομηχανών, η υποεπιτροπή SC2 πρόσθεσε νέους ορισμούς

σε αυτό το έγγραφο, ονομαζόμενοι E (αντίστοιχο με τον όρο «ακρίβεια» του ANSI B5.54) και M (αντίστοιχο με τον όρο «απόκλιση θέσης, Pa» του VDI 3441).

Η υποεπιτροπή SC2 πιστεύει πως με αυτές τις προσθήκες αυτό το μέρος του ISO 230 θα γίνει ευρέως αποδεκτό σε όλες τις χώρες-μέλη του οργανισμού.

2. Επισκόπηση:

Αυτό το μέρος του ISO 230 καθορίζει μεθόδους δοκιμής και προσδιορισμού της ακρίβειας και επαναληψιμότητας τοποθέτησης αριθμητικά ελεγχόμενων αξόνων εργαλειομηχανών με άμεσες μετρήσεις στην εργαλειομηχανή, για κάθε άξονα ξεχωριστά. Οι περιγραφόμενοι μέθοδοι εφαρμόζονται όμοια σε γραμμικούς και περιστροφικούς άξονες. Δεν είναι όμως κατάλληλες όταν πολλαπλοί άξονες δοκιμάζονται ταυτόχρονα. Αυτό το μέρος του ISO 230 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δοκιμές αποδοχής τύπων, δοκιμές σύγκρισης, περιοδικές πιστοποιήσεις, αντιστάθμιση μηχανών κλπ.

Οι εμπλεκόμενες μέθοδοι περιλαμβάνουν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε κάθε θέση. Οι σχετικές παράμετροι ορίζονται και υπολογίζονται όπως περιγράφεται στην οδηγία για την έκφραση της αβεβαιότητας στη μέτρηση. (παράρτημα B -1).

Η οδηγία που περιλαμβάνεται στο παράρτημα A περιγράφει την εφαρμογή ενός προαιρετικού κύκλου δοκιμών, τον βηματικό κύκλο. Τα αποτελέσματα αυτού του κύκλου δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην τεχνική βιβλιογραφία με αναφορά σε αυτό το πρότυπο, ούτε με σκοπούς αποδοχής μίας μηχανής, εκτός από ειδικές γραπτές συμφωνίες μεταξύ του προμηθευτή/κατασκευαστή και του χρήστη. Η απλή αναφορά σε κύκλο δοκιμών σε αυτό το μέρος του προτύπου ISO 230, πάντοτε αναφέρεται στον καθιερωμένο κύκλο δοκιμών.

3. Ορισμοί και σύμβολα:

Για το συγκεκριμένο μέρος του προτύπου ISO 230, ισχύουν οι ακόλουθοι ορισμοί και σύμβολα:

1) διαδρομή άξονα (axis travel): μέγιστη γραμμική διαδρομή, πάνω στην οποία το κινούμενο εξάρτημα δύναται να κινηθεί υπό αριθμητικό έλεγχο.

2) μετρούμενη διαδρομή (measurement travel): τμήμα του άξονα που χρησιμοποιείται για τη λήψη δεδομένων, επιλεγμένη έτσι ώστε το πρώτο και το τελευταίο σημείο-στόχος μπορούν να προσεγγιστούν και από τις δύο κατευθύνσεις (σχήμα ISO 230-2.1).

3) θέση στόχου (target position), P_i ($i=1, \dots, m$): θέση στην οποία το κινούμενο εξάρτημα είναι προγραμματισμένο να κινηθεί. Ο δείκτης i προσδιορίζει την συγκεκριμένη θέση μεταξύ άλλων επιλεγμένων θέσεων σημείων-στόχων κατά μήκος του άξονα.

4) πραγματική θέση (actual position) P_{ij} ($i=1, \dots, m$), ($j=1, \dots, n$): μετρούμενη θέση που προσέγγισε το κινούμενο εξάρτημα κατά την j -οστή προσέγγιση στην i -οστή θέση του σημείου στόχου.

5) απόκλιση της θέσης (derivation of position), $X_{ij} = P_{ij} - P_i$: πραγματική θέση που προσέγγισε το κινούμενο εξάρτημα μείον την θέση του σημείου-στόχου.

6) μονό-κατευθυντική (unidirectional): αναφέρεται στην σειρά των μετρήσεων όπου η προσέγγιση στη θέση του σημείου-στόχου γίνεται πάντοτε με την ίδια κατεύθυνση. Το σύμβολο \uparrow υποδεικνύει ότι η παράμετρος που εξήχθη από μία μέτρηση, έγινε μετά από προσέγγιση κατά την θετική διεύθυνση, ενώ το σύμβολο \downarrow ότι έγινε κατά την αρνητική διεύθυνση, π.χ. $X_{ij} \uparrow$ ή $X_{ij} \downarrow$.

7) δι-κατευθυντική (birectional): αναφέρεται σε μία παράμετρο που εξήχθη από μία σειρά μετρήσεων, που έγιναν μετά από προσέγγιση του σημείου στόχου και των δύο κατευθύνσεων κατά μήκος του άξονα.

8) διευρυμένη αβεβαιότητα (expanded uncertainty): ποσότητα που καθορίζει για το αποτέλεσμα μίας μέτρησης ένα διάστημα που αναμένεται να περιβάλλει μεγάλο τμήμα της κατανομής των τιμών.

9) παράγοντας κάλυψης (coverage factor): αριθμητικός παράγοντας που χρησιμοποιείται ως ένας πολλαπλασιαστής του συνδυασμού της σταθερής αβεβαιότητας, έτσι ώστε να παρουσιάσει την διαστελλόμενη αβεβαιότητα.

10) μέση μονο-κατευθυντική απόκλιση θέσεως σε μία θέση, $\bar{X}_i \uparrow$ ή $\bar{X}_i \downarrow$: αριθμητικός μέσος όρος των αποκλίσεων θέσης που λαμβάνεται από σειρά n μονόδρομων προσεγγίσεων μονής κατεύθυνσης σε μία θέση P_i

$$\bar{X}_i \uparrow = (1/n) * \sum_{j=1 \dots n} X_{ij} \uparrow, \bar{X}_i \downarrow = (1/n) * \sum_{j=1 \dots n} X_{ij} \downarrow$$

11) μέση δι-κατευθυντική απόκλιση θέσεως σε μία θέση, \bar{X}_i : αριθμητικός μέσος όρος των μέσων μόνο-κατευθυντικών αποκλίσεων θέσης που λαμβάνεται από τις δυο κατευθύνσεις προσέγγισης σε μία θέση P_i :

$$\bar{X}_i = (\bar{X}_i \uparrow + \bar{X}_i \downarrow) / 2$$

12) τιμή αντιστρεψιμότητας σε μία θέση, B_i : τιμή διαφοράς μεταξύ των μέσων μονο-κατευθυντικών αποκλίσεων θέσης που λαμβάνεται από τις δυο κατευθύνσεις προσέγγισης σε μία θέση P_i .

$$B_i = \bar{X}_i \uparrow - \bar{X}_i \downarrow$$

13) τιμή αντιστρεψιμότητας ενός άξονα, B : το μέγιστο των απόλυτων τιμών αντιστρεψιμότητας B_i σε όλες τις θέσεις των στόχων κατά μήκος ενός άξονα.

$$B = \max[B_i]$$

14) μέση τιμή αντιστρεψιμότητας ενός άξονα, \bar{B} : αριθμητικός μέσος όρος των τιμών αντιστρεψιμότητας B_i σε όλες τις θέσεις των στόχων κατά του άξονα

$$\bar{B} = (1/m) * \sum_{i=1 \dots m} B_i$$

15) μονο-κατευθυντική επαναληψιμότητα τοποθέτησης σε μία θέση,

$$R_i \uparrow \text{ ή } R_i \downarrow:$$

$$R_{i\uparrow}=4 \cdot s_{i\uparrow} \text{ και } R_{i\downarrow}=4 \cdot s_{i\downarrow}$$

16) δι-κατευθυντική επαναληψιμότητα τοποθέτησης σε μία θέση, R_i :

$$R_i = \max[2 \cdot s_{i\uparrow} - 2 \cdot s_{i\downarrow} + [B_i]; R_{i\uparrow}; R_{i\downarrow}]$$

17) δι-κατευθυντική επαναληψιμότητα τοποθέτησης ενός άξονα, R :

$$R = \max[R_i]$$

18) δι-κατευθυντική συστηματική απόκλιση θέσεως ενός άξονα, E :

$$E = \max[\bar{X}_{i\uparrow}; \bar{X}_{i\downarrow}] - \min[\bar{X}_{i\uparrow}; \bar{X}_{i\downarrow}]$$

19) μέση δι-κατευθυντική απόκλιση θέσεως ενός άξονα, M :

$$M = \max[\bar{X}_i] - \min[\bar{X}_i]$$

20) δι-κατευθυντική ακρίβεια τοποθέτησης ενός άξονα A : εύρος που λαμβάνεται από τον συνδυασμό των δι-κατευθυντικών συστηματικών αποκλίσεων και την εκτίμηση της τυπικής αβεβαιότητας της δι-κατευθυντικής τοποθέτησης επί τον παράγοντα 2

$$A = \max[\bar{X}_{i\uparrow} + 2 \cdot s_{i\uparrow}; \bar{X}_{i\downarrow} + 2 \cdot s_{i\downarrow}] - \min[\bar{X}_{i\uparrow} + 2 \cdot s_{i\uparrow}; \bar{X}_{i\downarrow} + 2 \cdot s_{i\downarrow}]$$

4. Συνθήκες δοκιμών:

A. Περιβάλλον

Προτείνεται ότι ο προμηθευτής/κατασκευαστής μίας μηχανής πρέπει να προσφέρει οδηγίες σχετικές με το ποιο είδος θερμικού περιβάλλοντος θεωρείται αποδεκτό ώστε η μηχανή να αποδώσει την προδιαγραφόμενη ακρίβεια. Τέτοιες οδηγίες θα μπορούσαν να περιέχουν μία προδιαγραφή για τη μέση θερμοκρασία δωματίου, τη μέγιστη τιμή και την συχνότητα των διακυμάνσεων από την παραπάνω μέση θερμοκρασία και τις περιβαλλοντικές θερμοκρασιακές βαθμίδες. Είναι ευθύνη του χρήστη να παρέχει ένα αποδεκτό θερμοκρασιακό περιβάλλον για τον έλεγχο λειτουργίας και απόδοσης της εργαλειομηχανής στο χώρο εγκατάστασης. Στην περίπτωση που ο χρήστης της μηχανής ακολουθεί της οδηγίες που του παρέχονται από τον προμηθευτή/κατασκευαστή, η ευθύνη για την απόδοση της μηχανής σύμφωνα με τις προδιαγραφές μετατίθεται στον προμηθευτή/κατασκευαστή. Ιδανικά, όλες οι διαστασιολογικές μετρήσεις γίνονται όταν και το μετρητικό όργανο και το μετρούμενο αντικείμενο βρίσκονται σε περιβάλλον θερμοκρασίας 20°C. Αν οι μετρήσεις παρθούν σε θερμοκρασίες διαφορετικές των 20°C, τότε πρέπει να εφαρμοστεί διόρθωση για την τιμή του δείκτη NDE (Nomical Differential Expansion) μεταξύ του συστήματος τοποθέτησης του άξονα και του εξοπλισμού δοκιμών. Αυτή η συνθήκη απαιτεί θερμοκρασιακή μέτρηση του εμπλεκόμενου στην τοποθέτηση συστήματος της μηχανής και επίσης του εξοπλισμού δοκιμών. Θα πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι κάθε θερμοκρασιακή μεταβολή από τους 20°C, μπορεί να προκαλέσει μία πρόσθετη αβεβαιότητα συσχετιζόμενη με την αβεβαιότητα στον συντελεστή δραστικής διαστολής που χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση. Μία τυπική τιμή για την προκύπτουσα αβεβαιότητα είναι $\pm 2 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ (βλέπε παράρτημα Β –[2]). Επομένως οι πραγματικές θερμοκρασίες θα καταγράφονται στην

αναφορά της δοκιμής. Ο προμηθευτής/κατασκευαστής της μηχανής θα πρέπει να προμηθεύει τις τιμές των συντελεστών δραστηκής διαστολής των αντίστοιχων αξόνων των συστημάτων τοποθέτησης.

Η μηχανή και το όργανα των μετρήσεων θα πρέπει να βρίσκονται εκτεθειμένα στο περιβάλλον των δοκιμών αρκετά ώστε να φθάσουν σε μία σταθερή θερμικά κατάσταση πριν τις δοκιμές. Θα πρέπει να προστατεύονται από θερμικά ρεύματα και πηγές θερμικής ακτινοβολίας, όπως το ηλιακό φως, οι υπερθερμαντήρες κλπ. Για 12 ώρες πριν και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, οι περιβαλλοντικές θερμοκρασιακές βαθμίδες, σε °C ανά ώρα, θα πρέπει να είναι μέσα σε προσυμφωνημένα όρια, μεταξύ του χρήστη και του προμηθευτή/κατασκευαστή.

B. Μηχανή προς δοκιμή

Η μηχανή θα πρέπει να είναι εντελώς συναρμολογημένη και πλήρως λειτουργική. Όλες οι απαραίτητες ενέργειες καθορισμού στάθμης και ενέργειες γεωμετρικής ισοστάθμισης θα πρέπει να έχουν ολοκληρωθεί ικανοποιητικώς πριν αρχίσουν οι δοκιμές της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας. Εάν χρησιμοποιούνται ενσωματωμένες διαδικασίες αντιστάθμισης κατά τη διάρκεια του κύκλου δοκιμών, αυτό θα πρέπει να δηλώνεται στην αναφορά της δοκιμής. Όλες οι δοκιμές θα πρέπει να εκτελούνται με τη μηχανή σε αφόρτιστη κατάσταση, χωρίς τεμάχιο. Οι τιμές των θέσεων των γλιστρών των αξόνων ή των κινούμενων εξαρτημάτων των αξόνων που δεν βρίσκονται υπό δοκιμή θα πρέπει να δηλώνονται στην αντίστοιχη αναφορά.

Γ. Προθέρμανση μηχανής

Για τη δοκιμή της μηχανής υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, πρέπει να προηγηθεί των δοκιμών μία αρμόζουσα διαδικασία προθέρμανσης που καθορίζεται από τον προμηθευτή/κατασκευαστή ή συμφωνείται μεταξύ αυτού και του χρήστη. Εάν δεν καθορίζονται συγκεκριμένες συνθήκες, οι αρχικές κινήσεις της μηχανής θα περιορίζονται στις απολύτως απαραίτητες για την εγκατάσταση των μετρητικών οργάνων. Οι μη σταθερές θερμικές συνθήκες αναγνωρίζονται ως μία διατεταγμένη πρόοδος αποκλίσεων μεταξύ των επιτυχημένων προσεγγίσεων σε κάθε συγκεκριμένη θέση του σημείου-στόχου. Τέτοιες πηγές θα πρέπει να ελαχιστοποιούνται κατά τη διαδικασία προθέρμανσης.

5. Προγραμματισμός δοκιμών

A. Κατάσταση λειτουργίας

Η μηχανή θα πρέπει να προγραμματίζεται να κινήσει το κινούμενο στέλεχος κατά μήκος του υπό δοκιμή άξονα, και να το τοποθετήσει σε μία σειρά θέσεων των σημείων-στόχων όπου θα παραμείνει σε ακινησία αρκετά ώστε να προσεγγιστεί και να καταγραφεί η πραγματική θέση. Η μηχανή θα πρέπει να προγραμματιστεί να κινήσει μεταξύ των θέσεων των σημείων-στόχων με γνωστή ταχύτητα (feed rate).

B. Επιλογή των θέσεων των σημείων-στόχων

Η τιμή της κάθε θέσης ενός σημείου-στόχου μπορεί αν επιλεγεί ελεύθερα, ακολουθώντας τη γενική μορφή $P_i=(i-1)*p+r$, όπου:

i = ο αριθμός της συγκεκριμένης θέσης ενός σημείου-στόχου

p = μία μεταβλητή που βασίζεται σε ένα ομοιόμορφο διαχωρισμό των σημείων-στόχων πάνω στη μετρούμενη διαδρομή

r = λαμβάνεται μία διαφορετική τιμή σε κάθε θέση σημείου-στόχου, προκαλώντας ένα μη ομοιόμορφο διαχωρισμό των θέσεων των σημείων-στόχων πάνω στη μετρούμενη διαδρομή, ώστε να εξασφαλίσει ότι τα περιοδικά σφάλματα (όπως τα σφάλματα που προκαλούνται από το βήμα του ένσφαιρου κοχλία κίνησης και το βήμα της γραμμικής κλιμακας) λαμβάνεται υπόψη.

Μετρήσεις

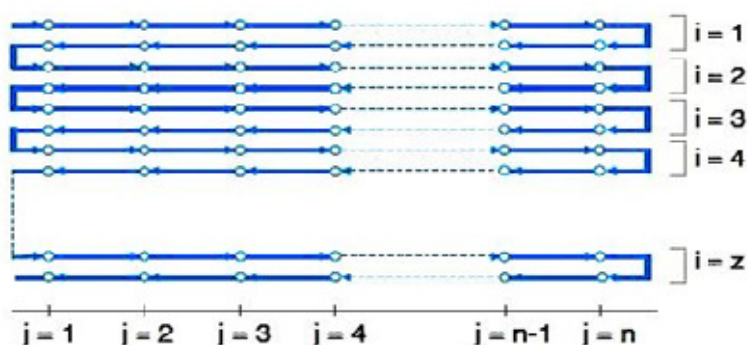
1. Εγκατάσταση και διάταξη μετρητικών οργάνων

Η διάταξη του μετρητικού συστήματος έχει σχεδιαστεί να μετράει τη σχετική μετατόπιση μεταξύ του εξαρτήματος που συγκρατεί το εργαλείο και του εξαρτήματος που συγκρατεί το τεμάχιο στην κατεύθυνση της κίνησης του άξονα υπό δοκιμή. Η θέση του μετρητικού οργάνου θα καταγράφεται στην αναφορά της δοκιμής. Η θέση των ανιχνευτών θερμοκρασίας πάνω στα εξαρτήματα της μηχανής και ο τύπος της διαδικασίας αντιστάθμισης θα δηλώνεται στην αναφορά της δοκιμής.

2. Δοκιμές για γραμμικούς άξονες μήκους έως 2000mm

Σε άξονες μηχανών μήκων διαδρομής έως 2000mm, ορίζεται ως ελάχιστη η επιλογή πέντε θέσεων σημείων-στόχων ανά μέτρο και ολικό ελάχιστο οι πέντε θέσεις σημείων-στόχων. Οι θέσεις επιλέγονται βάση του μαθηματικού τύπου της παραγράφου 5.B. Οι μετρήσεις θα γίνονται σε όλες τις θέσεις των σημείων-στόχων σύμφωνα με τον καθιερωμένο κύκλο δοκιμών (βλέπε σχήμα ISO 230-2.1). Κάθε θέση ενός σημείου-στόχου θα προσεγγιστεί πέντε φορές για κάθε κατεύθυνση.

Παρατήρηση: Η θέση της αλλαγής κατεύθυνσης θα πρέπει να επιλεγεί ώστε να επιτρέπει την κανονική συμπεριφορά της μηχανής [για την επίτευξη της προκαθορισμένης ταχύτητας (feed rate)].



σχήμα ISO 230-2.1: καθιερωμένος κύκλος δοκιμών [44]

3. Δοκιμές για γραμμικούς άξονες μήκους που ξεπερνά τα 2000mm

Για άξονες μήκους που ξεπερνά τα 2000mm, η όλη μετρούμενη διαδρομή του άξονα θα δοκιμαστεί κάνοντας μία μόνο–κατευθυντική προσέγγιση για κάθε κατεύθυνση και για κάθε θέση σημείου-στόχου σύμφωνα με το μαθηματικό τύπο της προηγούμενης παραγράφου, με ένα μέσο μήκος $\rho=250\text{mm}$. Στην περίπτωση όπου ο μετρητικός μεταλλάκτης αποτελείται από αρκετές συντεταγμένες, επιπρόσθετα σημεία-στόχοι πρέπει να επιλεγθούν για να εξασφαλίσουν ότι κάθε συντεταγμένη έχει τουλάχιστον μία θέση ενός σημείου-στόχου. Η δοκιμή που περιγράφεται θα γίνει πάνω σε ένα μήκος διαδρομής 2000mm στην κανονική περιοχή εργασίας όπως συμφωνείται μεταξύ του προμηθευτή/κατασκευαστή και του χρήστη.

6. Εκτίμηση των αποτελεσμάτων

1. Γραμμικοί άξονες μήκους έως 2000mm

Για κάθε θέση σημείου-στόχου P_i και πέντε προσεγγίσεις ($n=5$) σε κάθε κατεύθυνση, υπολογίζονται οι παράμετροι που ορίζονται στην παράγραφο 3. Επιπλέον υπολογίζονται και οι οριακές αποκλίσεις.

$$\bar{X}_i \uparrow + 2 \cdot s_i \uparrow \text{ και } \bar{X}_i \uparrow - 2 \cdot s_i \uparrow$$

$$\bar{X}_i \downarrow + 2 \cdot s_i \downarrow \text{ και } \bar{X}_i \downarrow - 2 \cdot s_i \downarrow$$

2. Γραμμικοί άξονες μήκους που ξεπερνά τα 2000mm

Για κάθε θέση σημείου-στόχου και για μία προσέγγιση ($n=1$) σε κάθε κατεύθυνση, υπολογίζονται οι εφαρμόσιμοι παράμετροι που ορίζονται στην παράγραφο «Ορισμοί και σύμβολα». Οι εκτιμήσεις της σταθερής αβεβαιότητας, επαναληψιμότητας και ακρίβειες είναι μη εφαρμόσιμες.

7. Σημεία που θα συμφωνηθούν μεταξύ του χρήστη και του προμηθευτή/κατασκευαστή

Τα σημεία είναι τα εξής:

- Το μέγιστο ποσοστό της περιβαλλοντικής θερμοκρασιακής βαθμίδας σε °C ανά ώρα, για 12 ώρες πριν και κατά την διάρκεια των μετρήσεων.
- Η θέση του μετρητικού οργάνου και τις θέσεις των ανιχνευτών θερμότητας.
- Η διαδικασία προθέρμανσης που θα προηγηθεί των δοκιμών στη μηχανή.
- Η ταχύτητα προσέγγισης στις θέσεις των σημείων-στόχων.
- Η θέση των γλυστρών ή των κινούμενων εξαρτημάτων τα οποία δεν υπόκεινται σε δοκιμή.
- Ο χρόνος αναμονής σε κάθε θέση του σημείου-στόχου
- Η τοποθεσία-ορισμός της πρώτης και της τελευταίας θέσης των σημείων στόχων.

8. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

A. Μέθοδος παρουσίασης

Η προτεινόμενη μέθοδος παρουσίασης των αποτελεσμάτων είναι γραφική με μία επακόλουθη λίστα αντικειμένων που καταγράφηκαν στην αναφορά δοκιμών, ώστε να αναγνωρισθεί το είδος της μετρητικής εγκατάστασης:

- θέση του μετρητικού οργάνου
- θέση των ανιχνευτών θερμοκρασίας πάνω στα εξαρτήματα της μηχανής και ο τύπος της διαδικασίας αντιστάθμισης
- ημερομηνία δοκιμής
- όνομα και τύπος μηχανής (οριζόντιος ή κάθετος άξονας) και οι συντεταγμένες των διαδρομών των αξόνων
- κατάλογος του εξοπλισμού δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε, συμπεριλαμβανομένων του ονόματος του κατασκευαστή/προμηθευτή του, του τύπου και του σειριακού αριθμού των εξαρτημάτων (π.χ. κεφαλής laser, οπτικά, ανιχνευτές θερμοκρασίας κλπ)
- τύπος της κλίμακας της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε για την τοποθέτηση του άξονα και του συντελεστή θερμικής διαστολής του που χρησιμοποιήθηκε για την διόρθωση του δείκτη NDE- Nomical Differential Expansion (π.χ. ένσφαιρος κοχλίας και περιστροφικός κωδικοποιητής, γραμμική κλίμακα κτλ.)
- ταχύτητα και χρόνος αναμονής σε κάθε θέση σημείου-στόχου, λίστα των καθορισμένων θέσεων σημείων-στόχων
- λειτουργία προθέρμανσης που προηγήθηκε των μετρήσεων στη μηχανή (αριθμός κύκλων και ταχύτητα)
- αριθμός επαναλήψεων (n=1 ή n=5)
- όνομα άξονα υπό δοκιμή και η θέση της γραμμής των μετρήσεων σχετικά με τους άξονες που δεν μετρήθηκαν
- τιμές θερμοκρασίας των ανιχνευτών προσκολλημένων στα σχετικά εξαρτήματα της μηχανής, αντιπροσωπευτικά του τραπέζιου της μηχανής και του τεμαχίου, στην έναρξη και το πέρας της δοκιμής
- εάν είναι εφικτό, οι τιμές της πίεσης του αέρα και της υγρασίας, στην έναρξη και το πέρας της δοκιμής
- τιμές θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, στην έναρξη και το πέρας της δοκιμής
- εάν έγινε χρήση ή όχι ενσωματωμένης διαδικασίας αντιστάθμισης κατά τη δοκιμή
- εάν έγινε χρήση αεροψυκτικών ή λιποψυκτικών

2. Παράμετροι

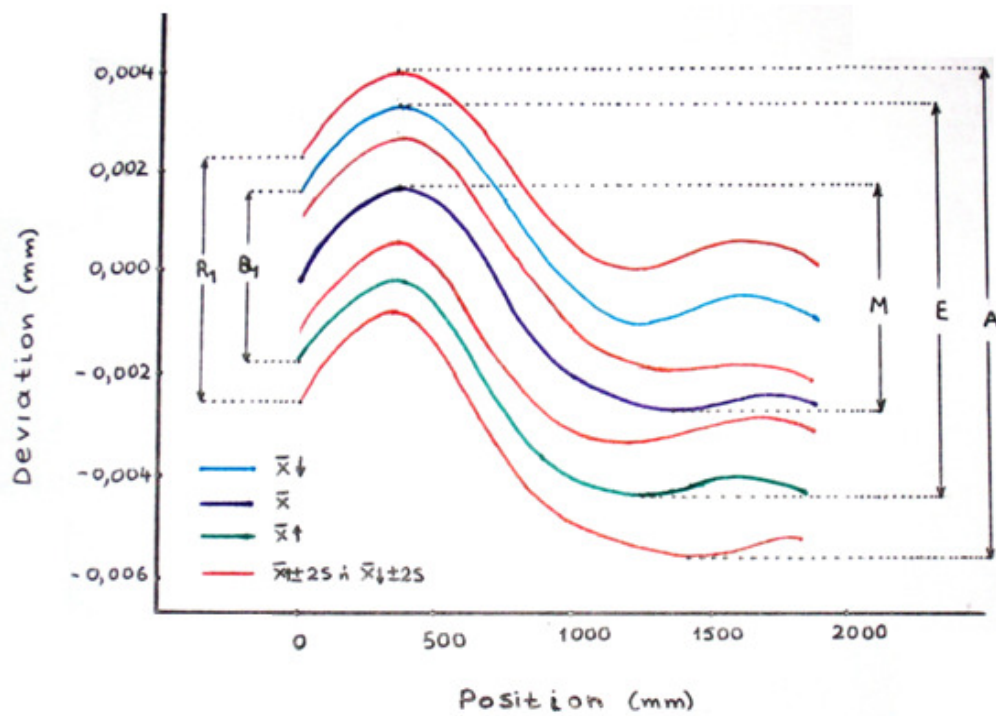
Οι ακόλουθοι παράμετροι (A), (E), (M), (R) και (B) θα προσδιορίζονται αριθμητικώς και αποτελούν βάση για την αποδοχή της μηχανής. Μία παρουσίαση των αποτελεσμάτων του πίνακα ISO 230-2.1 δίνεται στα γραφήματα των σχημάτων ISO 230-2.2 και ISO 230-2.3.

i	n		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		
Target position P_i (mm)	6.711		175.077		353.834		525.668		704.175		881.868		1055.890		1234.304		1408.462		1580.269		1750.920		
Approach direction	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	
Positional derriactions (μm)	j=1	2.3	-1.2	3.6	-0.5	3.5	0.2	3.0	-0.6	1.7	-1.9	0.4	-3.0	-0.4	-3.7	-0.2	-3.7	0.2	-3.5	0.3	-3.2	-0.1	-3.6
	j=2	2.1	-1.7	3.5	-0.9	3.3	-0.6	2.7	-1.2	1.5	-2.3	0.2	-3.5	-0.7	-4.3	-0.6	-4.4	-0.2	-4.3	-0.1	-3.8	-0.6	4.0
	j=3	1.9	-1.9	3.1	-1.1	3.0	-0.7	2.4	-1.3	1.0	-2.9	-0.2	-3.7	-1.0	-4.6	-1.0	-5.1	-1.0	-5.0	-0.9	-4.7	-1.2	-4.5
	j=4	2.8	-1.3	3.7	-0.2	3.8	0.1	3.2	-0.3	1.9	-1.4	0.9	2.8	0.0	-3.6	-0.2	-3.6	0.5	-3.2	0.5	-2.8	0.4	-3.2
	j=5	2.2	-1.9	3.2	-0.8	3.5	-0.7	2.6	-1.3	1.1	-2.3	-0.1	3.7	-0.9	-4.5	-1.1	-4.6	-0.5	-4.5	-0.4	-4.1	-0.9	-4.5
Mean unidirectional positional deviation x_j (μm)	1.3	-1.6	3.4	-0.7	3.4	-0.4	2.8	-0.9	1.4	-2.2	0.2	-3.3	-0.6	-4.1	-0.6	-4.3	-0.2	-4.1	-0.1	3.7	-0.5	-4.0	
Estimator of standard uncertainty s_i (μm)	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	0.3	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	
2. s_i (μm)	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.9	0.6	0.9	0.8	1.1	0.9	0.8	0.9	1.0	0.9	1.3	1.2	1.4	1.1	1.5	1.2	1.2	
$X_i-2 s_i$ (μm)	1.6	-2.3	2.8	-1.4	2.8	-1.8	2.2	-1.9	0.9	-3.2	-0.6	-4.2	-1.4	-5.1	-1.5	-5.5	-1.4	-5.5	-1.3	-5.2	-1.7	-5.1	
$X_i+2 s_i$ (μm)	2.9	-0.9	4.0	0.0	4.0	0.5	3.4	0.0	2.2	-1.1	1.1	-2.5	0.3	-3.2	0.3	-3.0	1.0	-1.7	1.0	-2.3	0.8	-2.8	
Unidirectional repeatability $R_{i=4} s_i$ (μm)	1.3	1.4	1.2	1.5	1.2	1.8	1.2	1.9	1.6	2.2	1.7	1.7	1.7	1.9	1.8	2.5	2.3	2.9	2.3	2.9	2.5	2.3	
Reversal value B_i (μm)	-3.9		-4.1		-3.8		-3.7		-3.6		-3.6		-3.6		-3.7		-3.9		-3.6		-3.5		
Bidirectional repeatability R_i (μm)	5.2		5.4		5.3		5.2		5.5		5.3		5.4		5.8		6.5		6.2		5.9		
Mean bidirectional positional deviation x_j (μm)	0.3		1.4		1.5		0.9		-0.4		-1.5		-2.4		-2.5		-2.2		-1.9		-2.2		

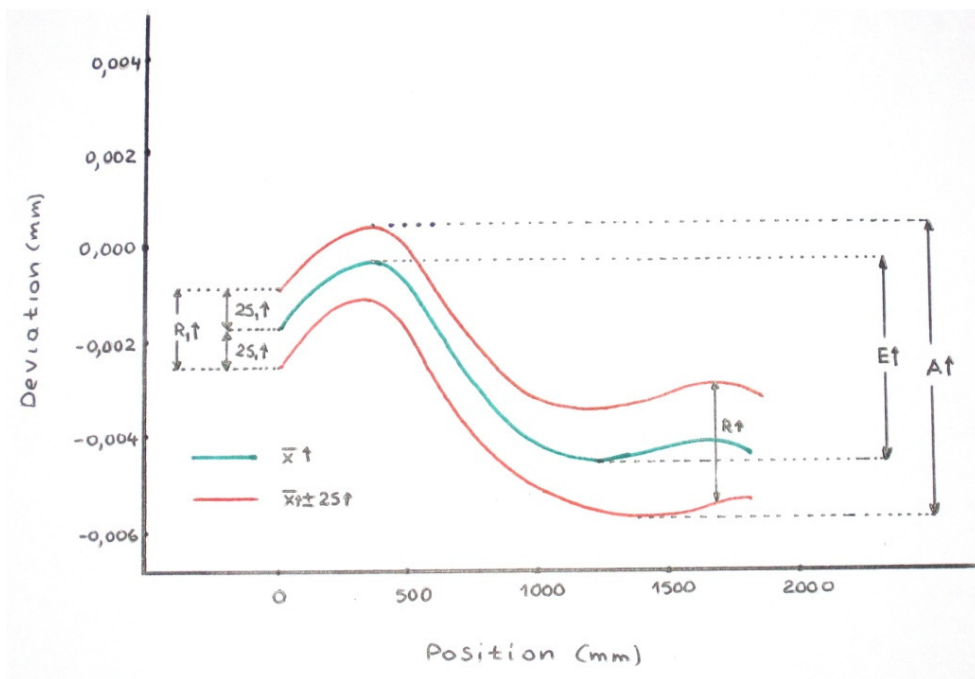
unidirectional↑	Axis deviation (mm)	unidirectional↓	Bidirectional
Not Applicable	Reversal value B	Not Applicable	0.0041 (at i=2)
Not Applicable	Mean reversal value B	Not Applicable	-0,0037
Not Applicable	Range mean bidirectional positional deviation M	Not Applicable	0,0040 (0,0015 - -0,0025)
0.0039 (-0.0004 - -0.0043)	Systematic positional deviation E	0,004 0 (0,0034 - -0,006)	0,0077(0,0034 - -0,0043)
0.0029 (at i=10)	Repeatability of positioning R	0.0025 (at i=11)	0.0065 (i=9)
0.0061 (0.005 - -0.0055)	Accuracy A	0.0057 (0.0040 - -0.0017)	0.0096 (0.0040 - -0.0055)

Date of test		YY/MM/DD	
Name of inspector		E.M.P	
Machine name, type and serial No:		AAA, vertical spindle machining center, ser. No. 1111	
Measuring instrument and serial No:		BBB, serial No: 22222	
Test parameters			
Tested axis:		X	
Type of scale:		Ball screw and rotary encoder	
NDE correction (yes or no):		yes	
Coefficient of thermal expansion of scale (used for NDE correction):		11 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	
Feed rate:		1000mm/min	
dwell time at each target position:		5sec	
Compensation used:		Reversal and leadscrew	
Test location			
Position of axes not under test:		Y=300mm; Z=350mm, C=0 ⁰	
Offset to tool reference (X,Y,Z):		0/0/120mm	
Offset to workpiece reference (X,Y,Z):		0/0/30mm	
Test conditions			
Temperature sensor	Location:	T start (⁰ C):	T end (⁰ C):
Material sensor	Table, X=50mm	21.8	22.9
-arr sensor	Center of work zone	20.6	20.9
-arr pressure:	102.4kPa		
-arr humidity:	60%		

πίνακας ISO 230-2.1: τυπικά αποτελέσματα ελέγχου ακρίβειας γραμμικού άξονα έως 2000m.



σχήμα ISO 230-2.2: δι-κατευθυντική ακρίβεια και επαναληψιμότητα τοποθέτησης

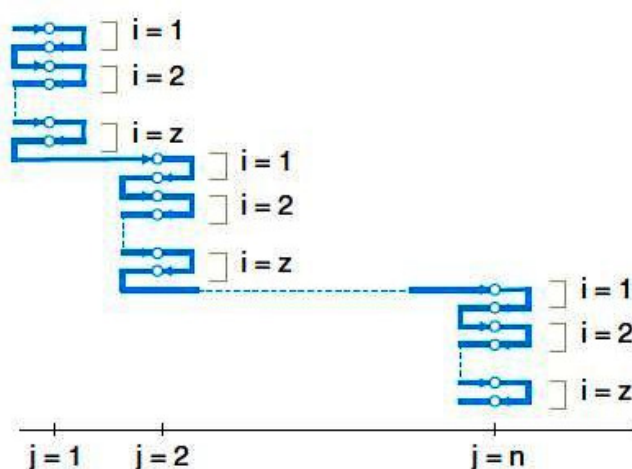


σχήμα ISO 230-2.3: μόνο-κατευθυντική ακρίβεια και επαναληψιμότητα τοποθέτησης

Παραρτήματα

A. Βηματικός κύκλος

Το παράρτημα αυτό αναφέρεται σε ένα εναλλακτικό κύκλο μετρήσεων. Το αποτέλεσμα αυτών των μετρήσεων πιθανόν να διαφέρουν από εκείνα του βασικού κύκλου μετρήσεων. Στον βασικό κύκλο, η προσέγγιση των ακραίων θέσεων και από τις δύο κατευθύνσεις γίνεται με μεγάλη χρονική διαφορά, ενώ στο βηματικό κύκλο η προσέγγιση κάθε θέσης από κάθε κατεύθυνση γίνεται με μικρή χρονική διαφορά και οι μετρήσεις της αρχικής και τελικής θέσης πραγματοποιούνται σε μεγάλο χρονικό διάστημα.



σχήμα ISO 230-2.4 – βηματικός κύκλος δοκιμών [44]

Οι μετρήσεις σύμφωνα με τον βασικό κύκλο μετρήσεων πιθανόν να παρουσιάζουν τις θερμικές επιδράσεις, που επηρεάζουν διαφορετικά τις διάφορες θέσεις-στόχους κατά μήκος του υπό μέτρηση άξονα. Οι θερμικές επιδράσεις είναι ενδεικτικές στις τιμές αντιστρεψιμότητας B και επαναληψιμότητας R . Στην περίπτωση του βηματικού κύκλου, οι θερμικές επιδράσεις είναι ενδεικτικές στο εύρος των μέσων δι-κατευθυντικών αποκλίσεων θέσης M , ενώ οι τιμές αντιστρεψιμότητας και επαναληψιμότητας θα επηρεασθούν ελάχιστα από την θερμική συμπεριφορά της μηχανής.

B. Βιβλιογραφία

[1] Οδηγία για την έκφραση της αβεβαιότητας στη μέτρηση, BIPM/IEC/FICC/ISO/OIML/IUPAC/IUPAP υποπαράγραφοι 2.3.5 και 2.3.6 και Annex G 1993, ISBN 92-97-10188-9

[2] ANSI B 89.6.2:1988, Περιβαλλοντική θερμοκρασία και υγρασία στις διαστασιολογικές μετρήσεις

4.5 ISO-230-2:2006

Η βασική διαφορά στην αναθεώρηση του ISO 230-2 το 2006 είναι ότι προστέθηκε η δήλωση της αβεβαιότητας της μέτρησης και πλέον πρέπει να περιέχεται κι αυτή στην αναφορά των κύριων παραμέτρων. Μαζί με το πρότυπο παρέχεται και ένα παράρτημα που εξηγεί λεπτομερώς πώς προσδιορίζεται η αβεβαιότητα της μέτρησης. [45]

Διαθέσιμος Εξοπλισμός – Διαδικασία μετρήσεων

5.1 Εισαγωγή

Ο προσδιορισμός των σφαλμάτων πραγματοποιείται με δύο είδη μετρήσεων: την μέτρηση μήκους και την μέτρηση γωνίας. Τα περισσότερα από τα άλλα είδη μετρήσεων π.χ. ευθύτητα, επιπεδότητα, καθετότητα κλπ ανάγονται σε αυτά τα δύο. Η συμβολομετρία υλοποιεί μέτρηση μήκους ως πολλαπλάσιο (ή υποπολλαπλάσιο) του μήκους κύματος μονοχρωματικού φωτός laser. Είναι η πλέον αποδεκτή μέθοδος όταν πρόκειται για μετρήσεις μεγάλης ακριβείας [3].

5.2 Συμβολόμετρο

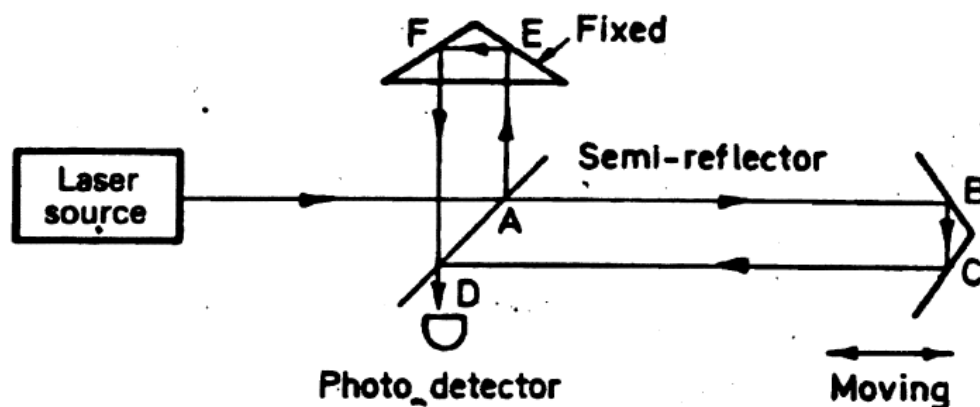
Υπάρχουν δύο είδη συμβολομέτρων: το συμβολόμετρο μίας συχνότητας Michelson και το συμβολόμετρο δύο συχνοτήτων.

5.2.1 Συμβολόμετρο μίας συχνότητας

Το συμβολόμετρο μίας συχνότητας Michelson βασίζεται στην αρχή λειτουργίας του συμβατικού συμβολόμετρου (interferometer). Δέσμη μονοχρωματικού φωτός προσπίπτει σε ημι-επαργυρωμένο κάτοπτρο το οποίο δρα ως διαχωριστής της προσπίπτουσας δέσμης. Το ένα τμήμα της συνεχίζει προς κινητό κάτοπτρο (δέσμη μέτρησης), του οποίου τη μετατόπιση θέλουμε να μετρήσουμε. Το άλλο τμήμα (δέσμη αναφοράς) ανακλάται κατά 90° προς σταθερό κάτοπτρο. Το σταθερό και το κινητό κάτοπτρο ανακλούν τις προσπίπτουσες δέσμες και αυτές συμβάλλουν- στο σημείο συμβολής παρατηρείται η ένταση του φωτός. Λόγω του κινητού κατόπτρου, η ένταση του φωτός στο σημείο συμβολής αυξομειώνεται (μέγιστη τιμή όταν οι δύο κυματομορφές είναι σε φάση και ελάχιστη τιμή μηδέν όταν οι δύο κυματομορφές έχουν διαφορά φάσης 180°). Όταν το κινητό κάτοπτρο μετατοπισθεί κατά μισό μήκος κύματος, το μήκος της δέσμης μεταβάλλεται κατά ένα μήκος κύματος και η ένταση του φωτός διανύει έναν κύκλο αυξομείωσης (μέγιστο-ελάχιστο- μέγιστο). Ένας τέτοιος κύκλος ονομάζεται κροσσός.

Η μέτρηση της μετατόπισης του κινητού κατόπτρου υλοποιείται στην περίπτωση του συμβολόμετρου Michelson σε μέτρηση του αριθμού των κύκλων αυξομείωσης στο

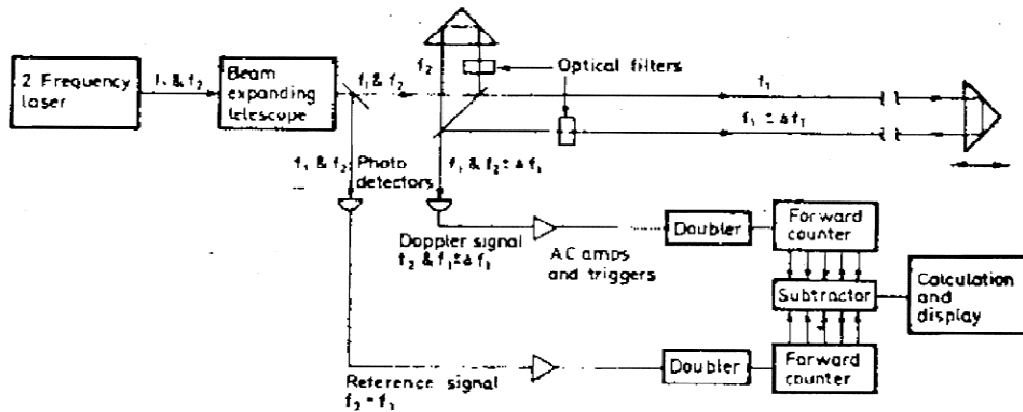
σημείο συμβολής. Συνεπώς, η ανάλυση του οργάνου είναι $\frac{1}{2}$ μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιεί. Η βασική αρχή του οργάνου είναι ότι μετράει μετατόπιση κι όχι απόλυτη θέση, δηλαδή η μέτρηση λαμβάνεται κατά την διάρκεια κίνησης του κατόπτρου [3].(σχήμα 5.1)



σχήμα 5.1: αρχή συμβολόμετρου Michelson [3]

5.2.2 Συμβολόμετρο δύο συχνοτήτων

Το συμβολόμετρο δύο συχνοτήτων έχει παρόμοια αρχή λειτουργίας με του Michelson. Όμως, μετρά διαφορά φάσης των δεσμών μέτρησης και αναφοράς αντί για κροσσούς. Η δέσμη αναφοράς έχει συχνότητα f_2 και η δέσμη μέτρησης f_1 . Οι δύο δέσμες συμβάλλουν και η συχνότητα του σήματος παρεμβολής, εάν δεν έχει μετατοπισθεί το κινητό κάτοπτρο, είναι $f_2 - f_1$. Όταν όμως έχει μετατοπισθεί το κάτοπτρο τότε λόγω φαινομένου Doppler, η συχνότητα της ανακλώμενης δέσμης είναι $f_1 \pm \Delta f_1$ (το πρόσημο ανάλογα με την κατεύθυνση της μετατόπισης). Αντίστοιχα, η συχνότητα του σήματος παρεμβολής θα είναι $f_2 - (f_1 \pm \Delta f_1)$. Σε διακριτά χρονικά σημεία συγκρίνεται η δέσμη αναφοράς (γνωστής συχνότητας) με την δέσμη μέτρησης (άγνωστης συχνότητας). Τα σημεία αλλαγής φάσης, από αρνητική σε θετική, της δέσμης αναφοράς χρησιμοποιούνται για τον ορισμό κύκλων αναφοράς. Η διαφορά φάσης της δέσμης μέτρησης από ένα κύκλο αναφοράς στον επόμενο προστίθενται και δείχνουν μία αντίστοιχη μεταβολή συχνότητας Doppler η οποία συνδέεται με την μετατόπιση του κινητού κατόπτρου. (σχήμα 5.2)



σχήμα 5.2: αρχή συμβολόμετρου δύο συχνοτήτων [3]

5.3 Σύστημα Μέτρησης Μετατοπίσεων Laser Doppler

Για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε σύστημα μέτρησης μετατοπίσεων Laser Doppler (Laser Doppler Displacement Meter, από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως LDDM). Το LDDM είναι μία εφεύρεση του Charles P. Wang και κατοχυρώθηκε το 1987.

Η συσκευή βασίζεται στις αρχές λειτουργίας του radar, το φαινόμενο Doppler και την οπτική των δύο συχνοτήτων (optical heterodyning). Χρησιμοποιεί μία ηλεκτρο-οπτική συσκευή η οποία ανιχνεύει την μεταβολή σε μία συχνότητα laser, που προκαλείται από ένα κινούμενο στόχο λόγω φαινομένου Doppler, με σκοπό να μετρήσει μετατόπιση με μεγάλο βαθμό ακρίβειας. Η συχνότητα της ανακλώμενης δέσμης laser μεταβάλλεται από την κίνηση του ανακλαστικού φακού και είναι ανάλογη της ταχύτητας του. Η διαφορά φάσης είναι ανάλογη της μετατόπισης. Η μεταβολή της συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler εκφράζεται ως [20]:

$$\Delta f = (2f/c)\Delta v$$

Δf : μεταβολή συχνότητας, f : η συχνότητα του laser, Δv : η μεταβολή ταχύτητας του ανακλαστικού φακού και c : η ταχύτητα του φωτός.

$$\text{ή } \Delta\theta = 2\pi(2f/c)\Delta z$$

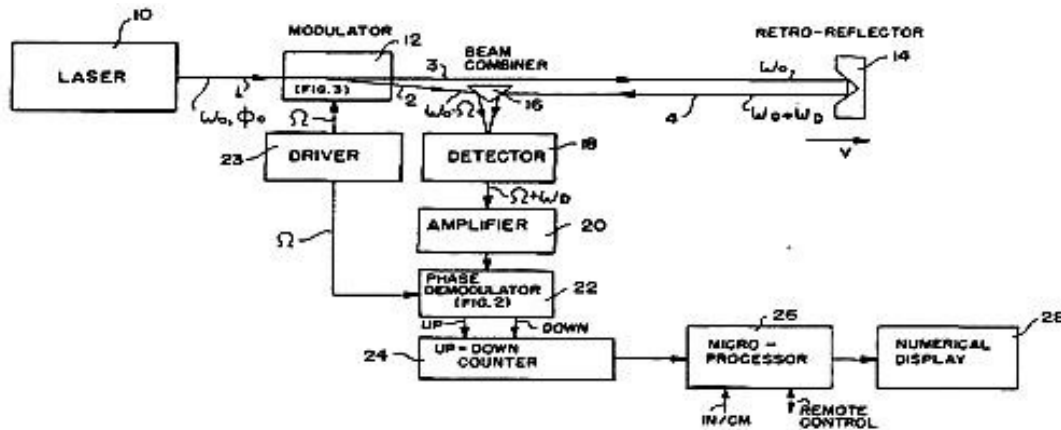
$\Delta\theta$: μεταβολή φάσης, f : συχνότητα του laser, Δz : η μετατόπιση του ανακλαστικού φακού και c : η ταχύτητα του φωτός.

Χρησιμοποιείται ανιχνευτής φάσης για να μετρά την μεταβολή της φάσης του κύματος. Για κάθε μετατόπιση μεγαλύτερη από το μισό μήκος κύματος εκπομπής παλμού, ένας μετρητής αυξάνεται ώστε να καταγράφει τις συνολικές αλλαγές φάσης, δηλαδή $\Delta\phi_{\text{total}} = 2\pi N + \phi$ όπου:

N : ο αριθμός των ημίσεων μήκους κύματος και ϕ : η γωνία φάσης μικρότερη του 2π .

Η συνολική μετατόπιση εκφράζεται ως $\Delta z = c[N + (\varphi/2\pi)]/2f$. Ένας μικροεπεξεργαστής χρησιμοποιείται για να διαβάζει τον μετρητή και την γωνία φάσης και να μετατρέπει τα δεδομένα σε μονάδες μήκους μέτρησης [17],[47] (σχήμα 5.3)

Πρέπει να σημειωθεί πως, όπως κάθε συμβολόμετρο, έτσι και το LDDM μετρά μετατόπιση από μία αρχική θέση που έχει τεθεί ως μηδέν, μέχρι ένα τελικό σημείο (οποιοδήποτε μέσα στο εύρος του οργάνου), κι όχι την απόλυτη θέση.



σχήμα 5.3 : αρχή LDDM [47]

5.3.1 Σύγκριση LDDM με συμβατικά συμβολόμετρα

Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα του LDDM είναι το βολικό του μέγεθος, το ότι είναι εύχρηστο, το ότι η κατασκευή του είναι πιο απλή (γιατί δεν απαιτεί υπερβολική ακρίβεια στην συναρμολόγηση) κι άρα το τελικό κόστος είναι φθηνότερο. Τέλος ένα βασικό πλεονέκτημα είναι πως η χρήση του ανακλαστικού φακού επιτρέπει μεγαλύτερο εύρος ανοχής στην ευθυγράμμιση (ευθυγράμμιση ζωτικής σημασίας θα ήταν ένας καίριος παράγοντας αύξησης του κόστους και του χρόνου χρήσης) [47].

Ακολουθεί ένας συγκριτικός πίνακας των τεχνολογιών LDDM και της συμβολομετρίας Michelson [48].

Τεχνολογία LDDM	Συμβολόμετρο Michelson	Πλεονεκτήματα LDDM
ηλεκτροοπτική και ηλεκτρομαγνητική τεχνολογία αιχμής	τεχνολογία συμβολομέτρου	υψηλή απόδοση, χαμηλό κόστος
δύο συχνοτήτων	μίας συχνότητας	καλύτερη ποιότητα σήματος, μικρότερες παρεμβολές
κλειδωμένη συχνότητα	κλειδωμένη συχνότητα	σταθερή συχνότητα
απλού διαφράγματος	διπλού διαφράγματος	-δυνατότητα μικρότερου αισθητήρα -δυνατότητα επίπεδου καθρέφτη -δυνατότητα μεγαλύτερης \emptyset δέσμης -λιγότερα οπτικά στοιχεία
μικρή κεφαλή laser	μεγάλη κεφαλή laser	ευχρηστία, εύκολη εγκατάσταση, εύκολη μεταφορά, δεν χρειάζεται τρίποδα υποστήριξης
μικρός αντανακλαστικός φακός	μεγάλος αντανακλαστικός φακός	μειωμένο μέγεθος οπτικών εξαρτημάτων, ευχρηστία
δύο στοιχεία προς ευθυγράμμιση	τρία στοιχεία προς ευθυγράμμιση	ευκολότερη και γρηγορότερη εγκατάσταση, συντομότερη εκπαίδευση χρήστη, μεγαλύτερη αποδοτικότητα
χαμηλή εκπομπή ακτινοβολίας Laser	υψηλή εκπομπή ακτινοβολίας Laser	ασφάλεια
ταχύτητα μεταβολής μέτρησης 5m/s	ταχύτητα μεταβολής μέτρησης 2m/s	κατάλληλο και για μηχανές υψηλής γραμμικής ταχύτητας κινήτρου
μεγάλη εμβέλεια	μικρή εμβέλεια	μεγάλη εμβέλεια χωρίς αύξηση της ισχύος του laser
ψηφιακά ηλεκτρονικά		Μεγαλύτερο δυναμικό εύρος

Πίνακας 5.1: συγκριτικός πίνακας των τεχνολογιών LDDM και της συμβολομετρίας Michelson

[48]

5.4 Διαθέσιμος εξοπλισμός

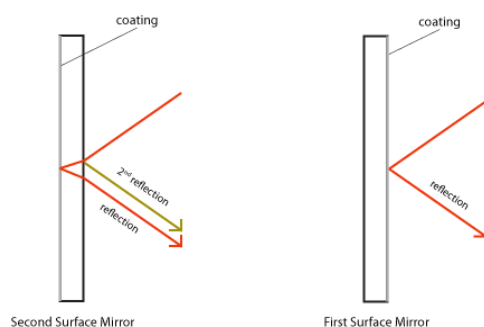
Για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ο υπάρχων εξοπλισμός του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Πρόκειται για το σύστημα LDDM της συλλογής MCV-500 της Optodyne Inc. Η συλλογή περιέχει τα ακόλουθα εξαρτήματα:

i) κεφαλή laser απλού διαφράγματος (L-109): περιλαμβάνει τον σωλήνα HeNe laser, ο οποίος παράγει την δέσμη laser που χρησιμοποιείται στις μετρήσεις. Επίσης περιέχει ηλεκτρο-οπτικό μετατροπέα, φωτοανιχνευτή και θερμαντήρα. Στη συλλογή παρέχεται και ηλεκτρομαγνητική βάση για την συγκράτηση της.

ii) μονάδα επεξεργασίας (P-108D): παρέχει ισχύ για την κεφαλή laser, τα ηλεκτρο-οπτικά, τον επεξεργαστή αναλογικών και ψηφιακών σημάτων και τις υποδοχές εξόδου. Υπάρχουν υποδοχές για καλώδιο σειριακής επικοινωνίας RS232 και για τους ανιχνευτές πίεσης και θερμοκρασίας. Η ανάλυση του είναι 1 μm .

iii) αντανακλαστικός φακός (R-102): είναι ένας γωνιακός κύβος, ο οποίος αντανακλά την ακτίνα laser πίσω στην πηγή σε διαδρομή παράλληλη με την εκπομπή ανεξάρτητα με την γωνία πρόσπτωσης. Επειδή η ακτίνα laser δεν είναι πολωμένη, οποιοσδήποτε επίπεδος καθρέπτης πρώτης επιφάνειας(*) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να οδηγήσει την δέσμη laser με μία γωνία πρόσπτωσης. Η χρήση του πυραμιδοειδή φακού δίνει στο σύστημα ένα μεγάλο πλεονέκτημα, κάνει τη ευθυγράμμιση του κατά την διάρκεια της εγκατάστασης όχι τόσο καίριας σημασίας. Στη συλλογή παρέχεται και ηλεκτρομαγνητική βάση για την συγκράτηση του.

* ένας καθρέπτης πρώτης επιφάνειας είναι φτιαγμένος για εφαρμογές που απαιτούν αυστηρό αντικατοπτρισμό χωρίς αμυδρό δευτερεύον είδωλο (όπως παρατηρείται στους καθρέπτες δεύτερης επιφάνειας). Όλες οι εφαρμογές που χρειάζεται να κατευθυνθεί το φως με συγκεκριμένο τρόπο (π.χ. τηλεσκόπιο, περισκόπια) χρησιμοποιούν τέτοιου είδους καθρέπτες.



iv) αισθητήρας θερμοκρασίας υλικού και ανιχνευτής θερμοκρασίας και πίεσης αέρα (IATCP): χρησιμοποιούνται για την άμεση αντιστάθμιση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Επειδή το όργανο μετράει πολλαπλάσια (ή υποπολλαπλάσια) του μήκους κύματος μέσω παρεμβολής στη σχέση μετατόπισης και αλλαγής συχνότητας, είναι απαραίτητη η αντιστάθμιση στις ατμοσφαιρικές συνθήκες που αλλάζουν το μήκος κύματος του φωτός. Ο χρήστης μπορεί να δώσει τον συντελεστή θερμικής διαστολής του υλικού ώστε να υπολογιστεί ο παράγοντας διόρθωσης λόγω της θερμικής διαστολής.

ν) αντανακλαστικός φακός 90° (LD-37): πρόκειται για έναν επίπεδο καθρέπτη που χρησιμοποιείται για την ανάκλαση κατά 90° της δέσμης laser. Με δύο κοχλίες ρυθμίζεται η γωνία του καθρέπτη και μπορεί να ελεγχθεί η διεύθυνση της δέσμης. Όπως αναφέρθηκε και για τον αντανακλαστικό φακό R-102, ε Ππειδή η ακτίνα laser δεν είναι πολωμένη, οποιοσδήποτε επίπεδος καθρέπτης πρώτης επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να οδηγήσει τη δέσμη laser με μία γωνία πρόσπτωσης.



εικόνα 5.1: το σύστημα LDDM της συλλογής MCV-500 της Optodyne Inc

5.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

- σταθερότητα laser : 0,1 ppm σε συνθήκες πίεσης 759,46mmHg και θερμοκρασίας 20°C – σε άλλες συνθήκες μπορούμε να πετύχουμε ακρίβεια ± 1 ppm με αυτόματη αντιστάθμιση θερμοκρασίας και πίεσης.
- ανάλυση μετρητικού συστήματος: 0,01 μ m
- ακτίνα μέτρησης: 0-15
- συνθήκες περιβάλλοντος : θερμοκρασία 15-32°C, υψόμετρο 0-3000m, υγρασία 0-95%

5.4.2 Δυνατότητες

Οι εφαρμογές του μετρητικού συστήματος μετατοπίσεων Laser Doppler που έχουμε στην διάθεση μας χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- καθορισμός κι αντιστάθμιση των γραμμικών σφαλμάτων μετατόπισης,
- καθορισμός κι αντιστάθμιση των ογκομετρικών σφαλμάτων θέσης
- έλεγχος ακρίβειας προφίλ για τη ρύθμιση σερβομηχανισμών και αξιολόγηση των ταλαντώσεων της κατασκευής.

Γενικά, η συλλογή MCV-500 της Optodyne μπορεί να εκτελέσει:

- διακρίβωση ακρίβειας γραμμικής θέσης
- μέτρηση γωνιακών σφαλμάτων (pitch, yaw)
- διακρίβωση ευθύτητας
- διακρίβωση καθετότητας
- διακρίβωση παραλληλίας
- διακρίβωση επιπεδότητας
- έλεγχο δυναμικών χαρακτηριστικών [κυκλικός έλεγχος (laser/ballbar)]
- μέτρηση σφάλματος περιστροφής της ατράκτου

Συγκεκριμένα, με τον εξοπλισμό της συλλογής MCV-500 που περιγράφηκε στην παράγραφο 6.4 είναι δυνατόν να εκτελεσθεί διακρίβωση ακρίβειας γραμμικής θέσης. Επιπλέον είναι δυνατό να γίνει έμμεση μέτρηση των γωνιακών σφαλμάτων pitch, yaw.

5.4.3 Επιπλέον βάση που δεν περιεχόταν στον αρχικό εξοπλισμό

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρήθηκε χρήσιμο να παρθούν μετρήσεις σε όλο το μήκος των τριών αξόνων της εργαλειομηχανής. Για να επιτευχθεί μέτρηση σε όλο το μήκος των αξόνων x και y έπρεπε αναγκαστικά να στηθεί η κεφαλή του laser εκτός του τραπέζιού της μηχανής. Οπότε και δεν μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την ηλεκτρομαγνητική βάση που περιλαμβάνεται στον εξοπλισμό, αλλά στήσαμε την κεφαλή στην βάση Stable laser positioner πάνω σε τραπέζι απέναντι από την εργαλειομηχανή.

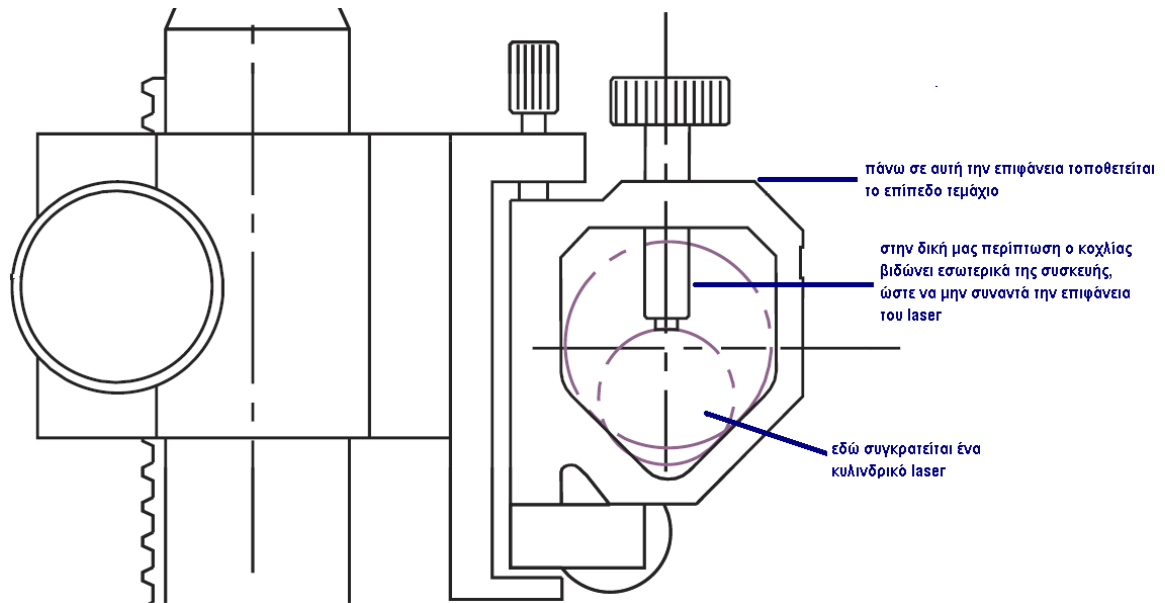
Η βάση Stable-laser positioner (εικόνα 5.2) είναι σχεδιασμένη για να στηρίζει laser κυλινδρικής κεφαλής διαμέτρου 23mm έως 44.5mm. Αυτή η βάση παρότι υπήρχε ήδη στον εξοπλισμό του εργαστηρίου, δεν ήταν συμβατή με το laser σωλήνα τετραγωνικής διατομής του συστήματος LDDM.



εικόνα 5.2 : η βάση Stable-laser positioner

Για να γίνει δυνατό η βάση αυτή να στηρίξει το laser, χρειάστηκε να βρεθεί ένας ασφαλής τρόπος να τοποθετηθεί το laser πάνω από την κυλινδρική συσκευή συγκράτησης – ώστε να ξεπεραστεί το εμπόδιο της τετραγωνικής διατομής. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε επίπεδη βάση πάνω στην οποία μπορούμε να συγκρατήσουμε το laser, εκμεταλλευόμενοι το γεγονός πως η κεφαλή του laser έχει προδιαγραφές από τον κατασκευαστή της να συγκροτείται πάνω στην μαγνητική βάση. Το τεμάχιο με τη σειρά του συγκρατείται με κοχλία στην κυλινδρική συσκευή συγκράτησης της βάσης.

Η κατασκευή του τεμαχίου έγινε από αλουμίνιο στο κέντρο HAAS TM-1, στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, και βασίστηκε σε G-κώδικα της γράφουσας.

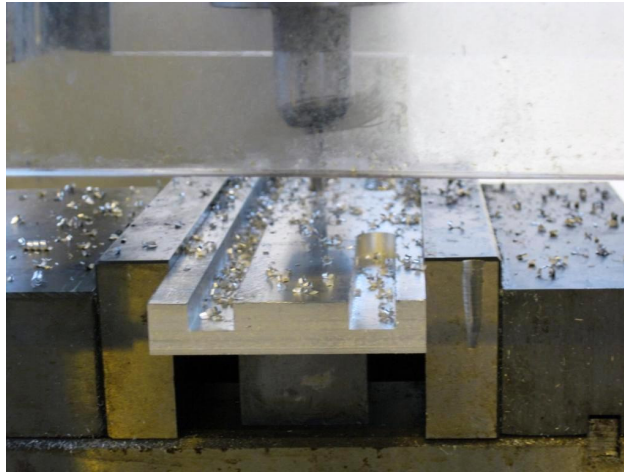


σχήμα 5.4: λεπτομέρεια της βάσης Stable-laser positioner – η συσκευή συγκράτησης

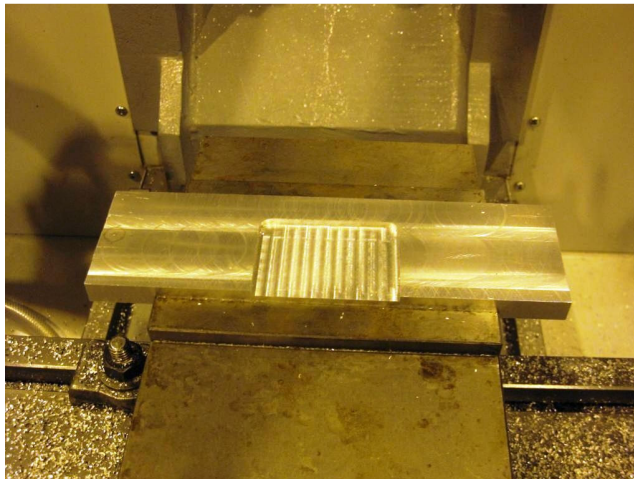
Παρότι δεν αφορά άμεσα την παρούσα διπλωματική εργασία, παρακάτω παραθέτουμε κάποιες φωτογραφίες από την κατασκευή του τεμαχίου. Θεωρούμε πως στα πλαίσια των εκπαιδευτικών στόχων που εξυπηρετεί η διπλωματική εργασία, είναι σημαντική η σύλληψη και πραγματοποίηση της μικροκατασκευής αυτής.



εικόνα 5.3: συγκράτηση του τεμαχίου από αλουμίνιο – πρώτο στάδιο κατεργασίας.



εικόνα 5.4: κοπή αυλακιών στην πλευρά του τεμαχίου που έρχεται σε επαφή με το laser, για να επιτύχουμε το ελάχιστο δυνατό βάρος.

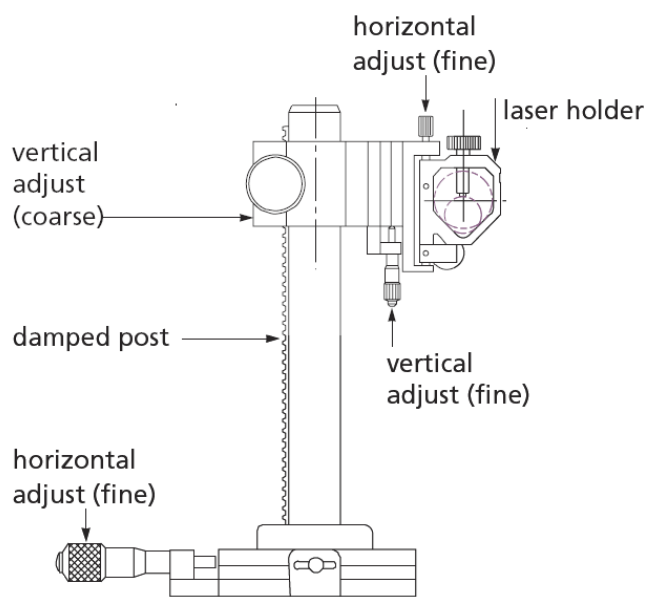


εικόνα 5.5: δημιουργία πατούρας στην πλευρά του τεμαχίου που έρχεται σε επαφή με την συσκευή συγκράτησης, ώστε να επιτύχουμε την σωστή και ασφαλή συνεργασία των δύο.



εικόνα 5.6: δημιουργία δύο μεγάλων οπών για να επιτύχουμε το ελάχιστο δυνατό βάρος.

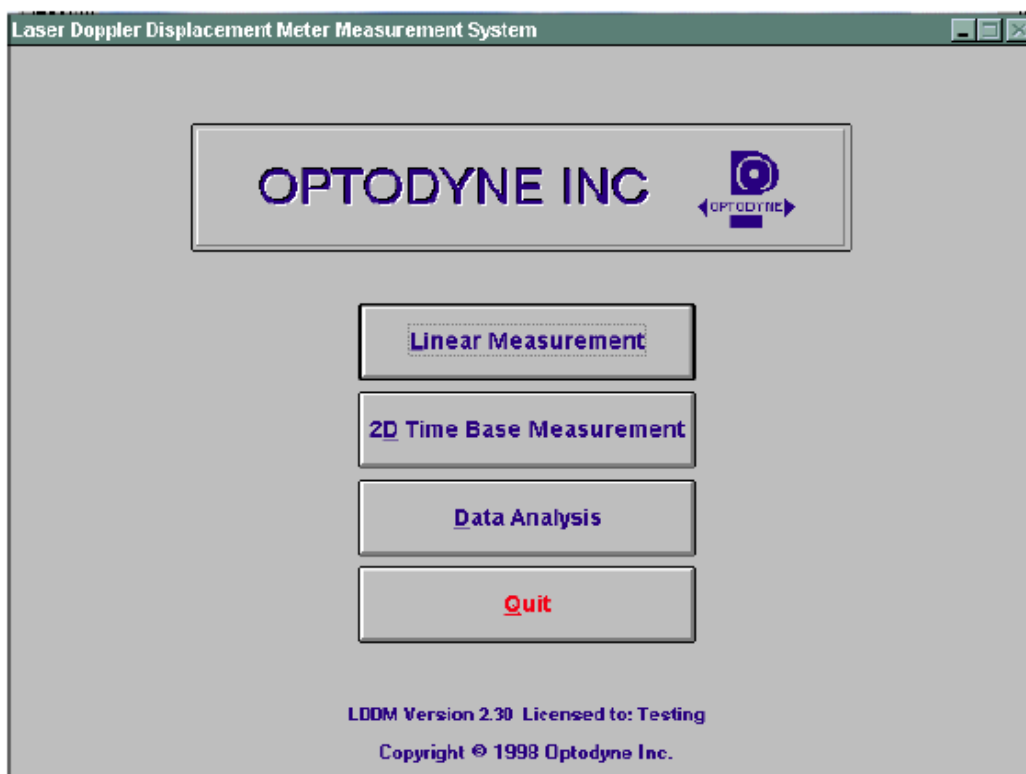
Η βάση Stable-laser positioned έχει και τρεις άξονες προσαρμογής ακριβείας που κάνουν την διαδικασία της ευθυγράμμιση του laser με τον αντανακλαστικό φακό ευκολότερη.



σχήμα 5.5 : οι άξονες προσαρμογής ακριβείας της βάσης Stable-laser positioner

5.5 Λογισμικό LDDM

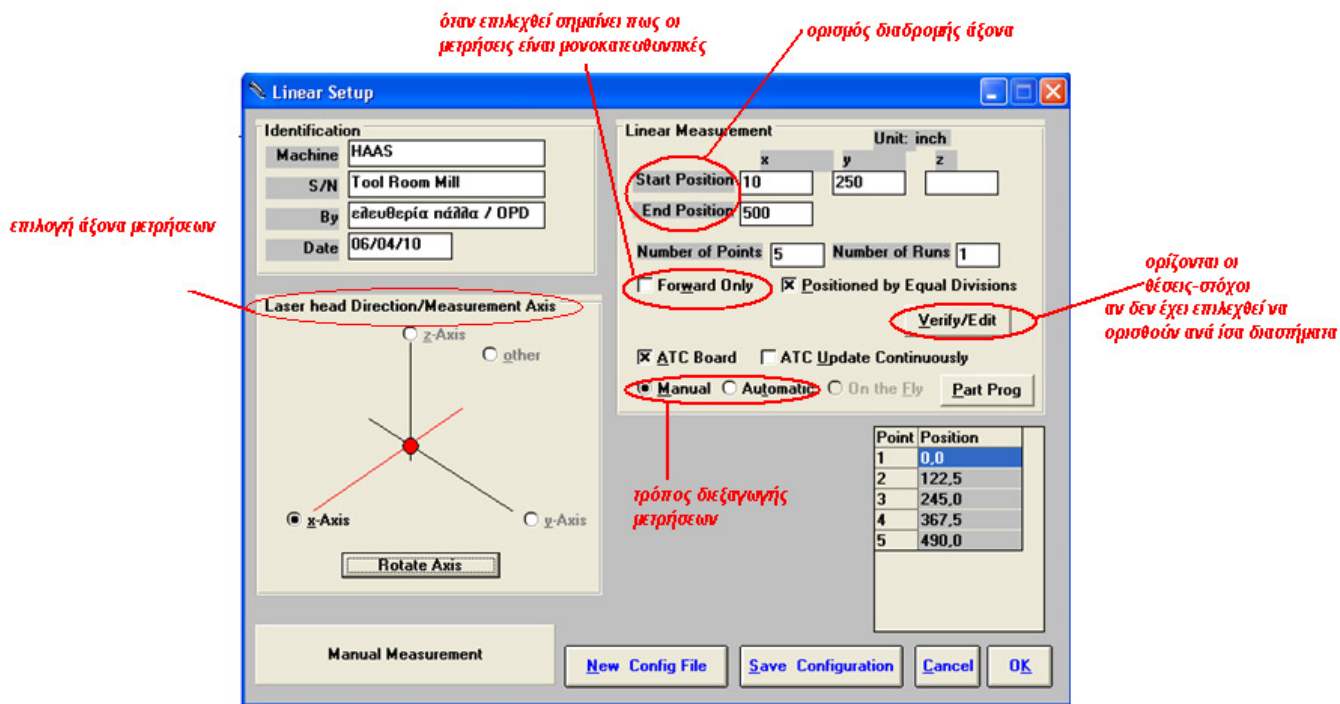
Ο εξοπλισμός συνοδεύεται από ένα μετρολογικό πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των αποκλίσεων θέσης των εργαλειομηχανών. Το λογισμικό είναι εύκολο στο να εγκατασταθεί, γιατί δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις και είναι φιλικό προς τον χρήστη. Αφού το LDDM τοποθετηθεί στην μηχανή προς αντιστάθμιση, ξεκινά η διαδικασία των μετρήσεων και το σύστημα ανιχνεύει τις αποκλίσεις από την θεωρητικά τέλεια μέτρηση. Οι αποκλίσεις αυτές αναλύονται και στη συνέχεια μπορούν να αναχθούν σε συντελεστές διόρθωσης ώστε να γίνει η αντιστάθμιση σφαλμάτων στην μηχανή. Από το κεντρικό menu του λογισμικού μας (εικόνα 5.7) δίνονται οι δυνατότητες είτε να επιλέξουμε το πρόγραμμα των γραμμικών μετρήσεων είτε το πρόγραμμα της ανάλυσης δεδομένων στο στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων. Η επιλογή 2D Time Base Measurement αφορά σε κυκλικούς ελέγχους και δυναμικές μετρήσεις, τις οποίες δεν υποστηρίζει η συλλογή MCV-500 του εργαστηρίου.



εικόνα 5.7: το κεντρικό menu του λογισμικού

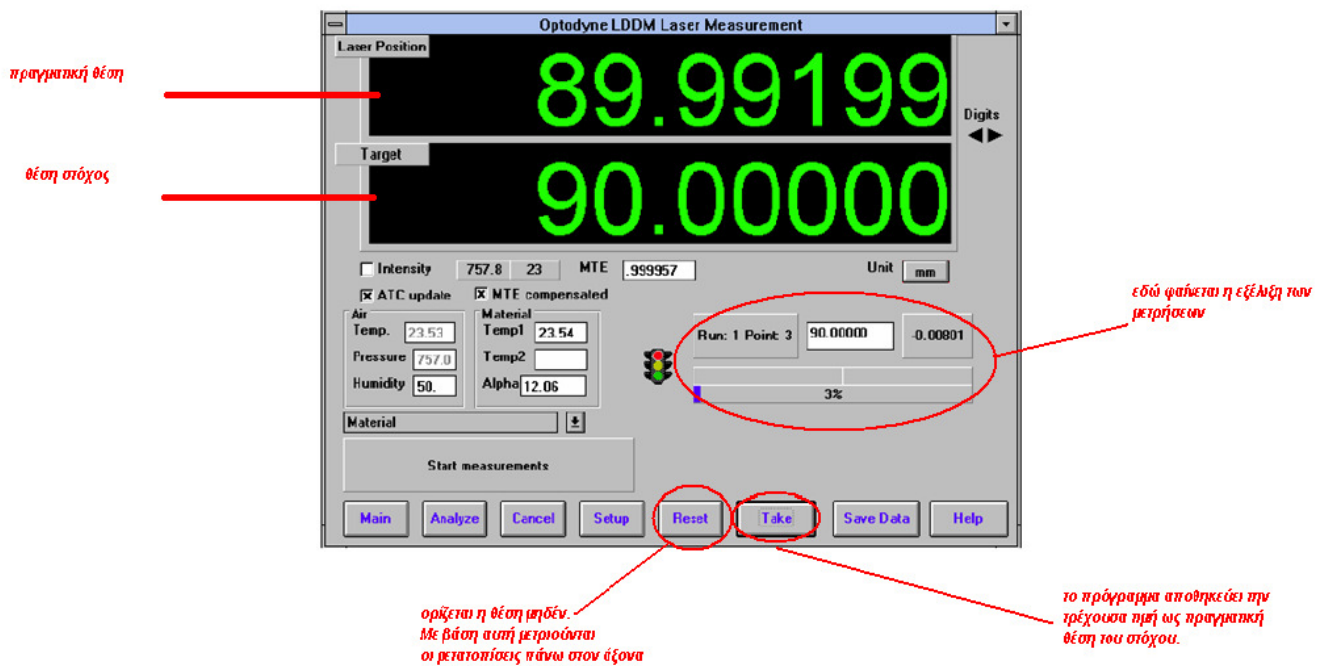
5.5.1 Πρόγραμμα γραμμικών μετρήσεων

Πριν την έναρξη των μετρήσεων πρέπει να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά των σειρών μετρήσεων που θα εκτελεστούν (εικόνα 5.8). Ορίζεται ο άξονας κατά μήκος του οποίου θα γίνουν οι μετρήσεις, ο αριθμός των σημείων που θα εξεταστούν καθώς και ο αριθμός των επαναλήψεων (πόσες σειρές μετρήσεων θα ληφθούν). Χρειάζεται, επίσης, να ορισθεί αν οι μετρήσεις θα είναι μονο-κατευθυντικές ή δι-κατευθυντικές. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα οι μετρήσεις να διεξαχθούν αυτόματα (χωρίς την παρεμβολή χειριστή) είτε χειροκίνητα. Στην δεύτερη περίπτωση κάποιος πρέπει να χειρίζεται την μηχανή και κάθε φορά που φθάνει μία θέση-στόχο (με βάση το σύστημα συντεταγμένων της μηχανής) να ενημερώνει το πρόγραμμα ώστε να αποθηκεύεται η μέτρηση (επιλογή "take", εικόνα 5.9). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όλες οι μετρήσεις έγιναν χειροκίνητα. Η επιλογή αυτή προτείνεται από τον κατασκευαστή όταν δεν πρόκειται για καθιερωμένες μετρήσεις (π.χ. αυτές που γίνονται περιοδικά στην ίδια μηχανή) διότι επιτρέπει στον χειριστή να ελέγχει την διαδικασία καθ' όλη την διάρκεια της.



εικόνα 5.8 : καθορισμός χαρακτηριστικών μέτρησης

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων είναι ανοιχτό το παράθυρο μετρήσεων στον υπολογιστή (εικόνα 5.9). Σε αυτό διακρίνονται κυρίως δύο αριθμοί. Ο πρώτος δηλώνει την εκάστοτε θέση που αναγνωρίζει η κεφαλή του laser. Αυτός ο αριθμός μεταβάλλεται καθώς ο αντανakλαστικός φακός κινείται πάνω στην μηχανή. Ο δεύτερος δείχνει κάθε φορά την θέση στόχο που πρέπει να επιτευχθεί. Τα δεκαδικά ψηφία μπορούν να ορισθούν, ανάλογα με την τάξη της ακρίβειας που μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε, από ένα εως πέντε. Στις μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής επιλέχθηκε να εξετάζουμε την πραγματική θέση με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια : 10^{-5}mm , δηλαδή εκατοστό του μικρού. Η μηχανή στην οποία έγιναν οι μετρήσεις δίνει την δυνατότητα στον χειριστή να προσεγγίσει μία θέση με ανάλυση (βήμα) $1\mu\text{m}$. Η επιλογή παραπάνω δεκαδικών ψηφίων εξυπηρέτησε τον εκπαιδευτικό χαρακτήρα της πειραματικής αυτής διαδικασίας.



εικόνα 5.9 : παράθυρο μετρήσεων

5.5.2 Πρόγραμμα ανάλυσης δεδομένων

Μετά το τέλος των μετρήσεων και αφού αποθηκευτούν τα δεδομένα, μπορούν να επεξεργαστούν από το πρόγραμμα ανάλυσης δεδομένων. Το αρχείο αποθήκευσης περιέχει τις ονομαστικές θέσεις και τις μετρούμενες για κάθε σειρά μετρήσεων, ενώ μπορεί εύκολα να μετατραπεί ώστε να δίνει τις ονομαστικές θέσεις και τις αποκλίσεις σε αυτές για κάθε θέση-στόχο. Για την επεξεργασία των μετρήσεων ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα στα πρότυπα NMTBA, VDI 3441, ASME B5.54, ASME B5.57, ISO-230-2:1988 και ISO-230-2:1997. Μετά την επιλογή του προτύπου το πρόγραμμα υπολογίζει τις παραμέτρους ακρίβειας και επαναληψιμότητας, καθώς κι όλες τις ποσότητες που ορίζονται από το εκάστοτε πρότυπο. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και των παραμέτρων επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας σε κάθε θέση-στόχο.

5.6 Το κέντρο κατεργασιών στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις

Οι μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έλαβαν χώρα στο εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, στο κέντρο κατεργασιών HAAS ToolRoom Mill TM-1.



εικόνα 5.10: η μηχανή HAAS ToolRoom Mill TM -1 του εργαστηρίου του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών [56]

Τα χαρακτηριστικά του κέντρου κατεργασιών δίνονται παρακάτω. [56]

TRAVELS	Metric
X Axis	762 mm
Y Axis	305 mm
Z Axis	406 mm
Spindle Nose to Table (~ min)	102 mm
Spindle Nose to Table (~ max)	508 mm
TABLE	Metric
Length	1213 mm
Width	267 mm
T-Slot Width	16 mm
T-Slot Center Distance	101.6 mm
Number of Std T-Slots	
Max Weight on Table (evenly distributed)	454 kg
SPINDLE	Metric
Max Rating	5.6 kW
Max Speed	4000 rpm
Max Torque	45 Nm @ 1200 rpm

Drive System	
Taper	CT or BT 40
Bearing Lubrication	
Cooling	
FEEDRATES	Metric
Rapids on X	5.1 m/min
Rapids on Y	5.1 m/min
Rapids on Z	5.1 m/min
Max Cutting	5.1 m/min
AXIS MOTORS	Metric
Max Thrust X	8896 N
Max Thrust Y	8896 N
Max Thrust Z	8896 N
TOOL CHANGER (OPT)	Metric
Type	Carousel
Capacity	10
Max Tool Diameter (full)	89 mm
Max Tool Weight	5.4 kg
Tool-to-Tool (avg)	5.7 sec
Chip-to-Chip (avg)	6.5 sec
ACCURACY	Metric
Positioning (\pm)	0.010 mm
Repeatability (\pm)	0.005 mm
GENERAL	Metric
Air Required	113 L/min, 6.9 bar
Power (options may increase requirement)	195-250 VAC/50 A 366-425 VAC/20 A
Machine Weight	1315 kg

Το τραπέζι του κέντρου κατεργασιών είναι από φαιό χυτοσίδηρο (gray cast iron) με τιμή συντελεστή θερμικής διαστολής $\alpha=6.7 \mu\text{in/in}^\circ\text{F}$.

5.7 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία εγκατάστασης και λειτουργίας του μετρητικού συστήματος LDDM που ακολουθήθηκε στην εργαλειομηχανή προς έλεγχο.

Καταρχάς, το μετρητικό σύστημα συναρμολογείται σύμφωνα με τις υποδείξεις του εγχειριδίου χρήσης του. Η μονάδα επεξεργασίας συνδέεται με την κεφαλή του laser, με τον υπολογιστή (με πρωτόκολλο επικοινωνίας RS 232 μέσω σειριακής θύρας) και με τους δύο αισθητήρες για την αντιστάθμιση των συνθηκών περιβάλλοντος. Πρέπει να γίνει έλεγχος ώστε όλα τα καλώδια να είναι σταθερά συνδεδεμένα.

Ανάλογα με τον μετρούμενο άξονα, η κεφαλή εκπομπής του laser πρέπει να τοποθετηθεί (με την βοήθεια είτε της μαγνητικής βάσης είτε της βάσης Stable-laser positioned) ώστε να είναι παράλληλη στον άξονα προς μέτρηση. Πρέπει πάντα να τοποθετείται σε σταθερό και ακίνητο σημείο. Ο αντανακλαστικός φακός τοποθετείται, με χρήση της μαγνητικής βάσης, στο κινούμενο μέρος της μηχανής.

Παρέχουμε ρεύμα στη διάταξη και περιμένουμε 15-30 λεπτά (μέχρι το φως στην κεφαλή του laser να γίνει πράσινο) ώστε να επιτευχθεί η τελική θερμοκρασία στο σωλήνα του laser και να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του. Η κεφαλή εκπομπής του laser (με ή χωρίς τον αντανακλαστικό φακό 90°) και ο αντανακλαστικός φακός πρέπει να βρίσκονται σε νοητή ευθεία ώστε η εκπεμπόμενη κι η επιστρεφόμενη ακτίνα του laser να είναι παράλληλες με τον μετρούμενο άξονα. Για να επιτευχθεί αυτό ακολουθείται η διαδικασία ευθυγράμμισης.

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον έλεγχο της έντασης της ακτίνας ώστε η τιμή της να είναι μεγαλύτερη από το ελάχιστο απαιτούμενο όριο σε όλο το μήκος της μετρούμενης διαδρομής. Η διάταξη λειτουργεί για τιμή έντασης μεγαλύτερη από 20%. Όμως για αξιοπιστία στις μετρήσεις πρέπει να εξασφαλιστεί πως η ένταση είναι μεγαλύτερη από 80% για όλο το μήκος της διαδρομής.

Οι διορθωτικές κινήσεις που γίνονται κατά την διαδικασία της ευθυγράμμισης περιλαμβάνουν την μετακίνηση της θέσης του τραπεζιού της μηχανής – πάνω στο οποίο βρίσκεται ο αντανακλαστικός φακός- και την μετακίνηση της ακτίνας του laser μέσω ρυθμίσεων στην βάση του laser) μέχρι να ευθυγραμμισθούν, όταν η μέτρηση γίνεται στους x, y άξονες. Όταν η μέτρηση αφορά τον z άξονα, η διαδικασία της ευθυγράμμισης περιλαμβάνει μετακίνηση της θέσης του τραπεζιού της μηχανής – πάνω στο οποίο βρίσκεται το laser- και την ρύθμιση του αντανακλαστικού φακού 90°. Μετά την ευθυγράμμιση, η διάταξη είναι έτοιμη για να ξεκινήσουν οι μετρήσεις. Για να λειτουργήσει η αυτόματη αντιστάθμιση θερμοκρασίας και πίεσης, τοποθετείται ο αισθητήρας πίεσης και θερμοκρασίας περιβάλλοντος κοντά στην διαδρομή της ακτίνας laser και ο αισθητήρας θερμοκρασίας υλικού στο τραπέζι της μηχανής.

Στον υπολογιστή ανοίγουμε το πρόγραμμα LDDM και ορίζουμε σε ποιον άξονα γίνονται οι μετρήσεις, το αρχικό και το τελικό σημείο της διαδρομής καθώς και την απόσταση που διανύεται από κάθε σημείο στο επόμενο. Επιπλέον καθορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που θα εκτελεστούν. Μετακινούμε το τραπέζι της μηχανής (ή την άτρακτο, για μέτρηση κατά μήκος του άξονα z) στο σημείο που θα λειτουργήσει ως αρχικό για την μέτρηση. Εκεί πατάμε το “reset” του προγράμματος και έπειτα πατάμε “start”. Πατάμε την επιλογή “take” του προγράμματος για να ληφθεί μέτρηση στο πρώτο σημείο κι έπειτα μετακινούμε το τραπέζι της μηχανής (ή την άτρακτο, για μέτρηση κατά μήκος του άξονα z) στο επόμενο σημείο. Εφόσον η διαδικασία γίνεται χειροκίνητα, πρέπει -αφού η μηχανή σταματήσει στο σημείο που θέλουμε- να περιμένουμε 5 δευτερόλεπτα και μετά να πατήσουμε “take”. Όταν φθάσουμε στο τελικό σημείο της μέτρησης μας, τότε έχει τελειώσει η μονοκατευθυντική μέτρηση. Για δι-κατευθυντικές μετρήσεις, μετακινούμε το τραπέζι λίγο μακρύτερα από το τελικό σημείο, περιμένουμε 5 δευτερόλεπτα και επιστρέφουμε στο τελικό σημείο. Η διαδικασία συνεχίζεται προσεγγίζοντας με τον ίδιο τρόπο αλλά αντίστροφα τα σημεία που έχουν καθοριστεί.

Αφού γίνουν οι απαραίτητες επαναλήψεις, η διαδικασία ολοκληρώνεται και τα δεδομένα των μετρήσεων μπορούν να αποθηκευτούν.

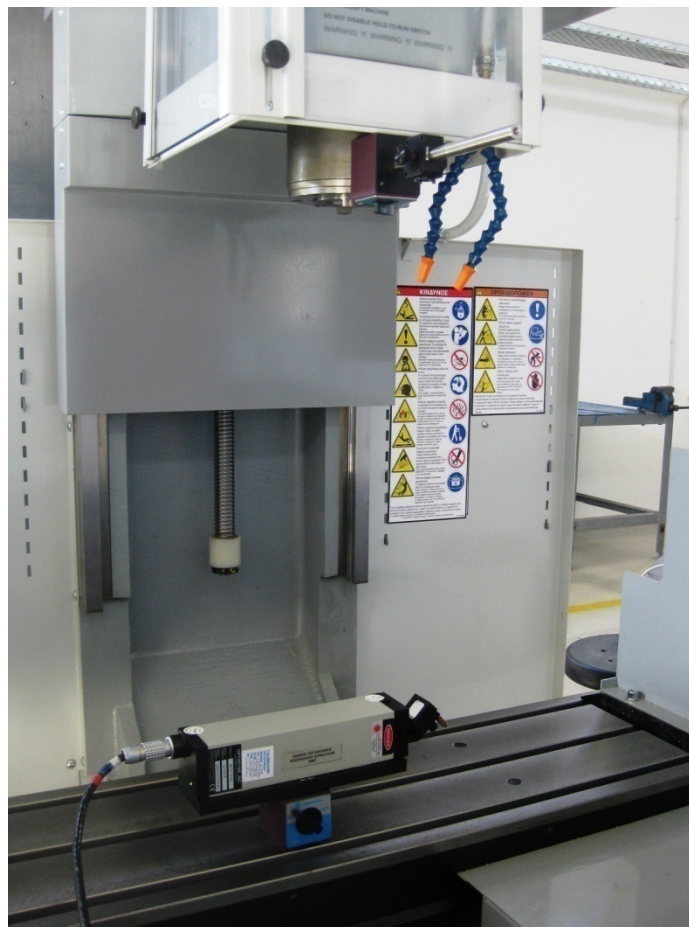
Στο παράθυρο μετρήσεων του λογισμικού του προγράμματος χρειάζεται να έχουμε επιλέξει και το υλικό του τραπέζιού της εργαλειομηχανής ώστε κατά την διάρκεια των μετρήσεων να γίνεται επιτυχώς και η αντιστάθμιση θερμοκρασίας και πίεσης.



εικόνα 5.11: μέτρηση κατά μήκος x άξονα



εικόνα 5.12: μέτρηση κατά μήκος y άξονα



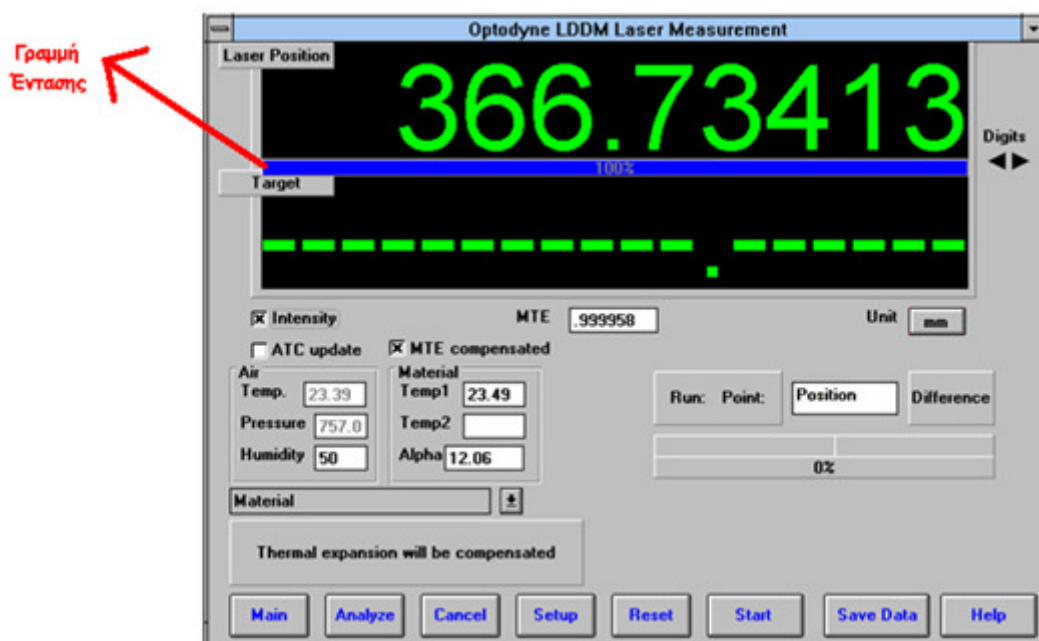
εικόνα 5.13: μέτρηση κατά μήκος y άξονα

5.8 Ανοχή ευθυγράμμισης και ευαισθησία στην ευθυγράμμιση

Ένα βασικό πλεονέκτημα του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 6.3.1, είναι πως η χρήση του ανακλαστικού φακού επιτρέπει μεγαλύτερο εύρος ανοχής στην ευθυγράμμιση. Κατά την διάρκεια της διπλωματικής έγιναν κάποιες μετρήσεις ώστε να γίνει κατανοητό το μέγεθος της ανοχής στην ευθυγράμμιση.

5.8.1 Διαδικασία ευθυγράμμισης

Η διαδικασία ευθυγράμμισης γίνεται με σκοπό η ακτίνα του laser να είναι παράλληλη στη διαδρομή του τραπέζιου της εργαλειομηχανής. Η διαδικασία της ευθυγράμμισης διευκολύνεται λογισμικά από την εμφάνιση μίας μπλε γραμμής στο παράθυρο του προγράμματος. Η γραμμή, ανάλογα με το μήκος της, υποδεικνύει την ένταση της ακτίνας που αντιλαμβάνεται η κεφαλή του laser να επιστρέφει από τον αντανακλαστικό φακό. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο λειτουργίας του LDDM, για να μπορέσουν να γίνουν σωστά οι μετρήσεις πρέπει σε όλο το μήκος της διαδρομής η ένδειξη της έντασης να είναι τουλάχιστον 80%.



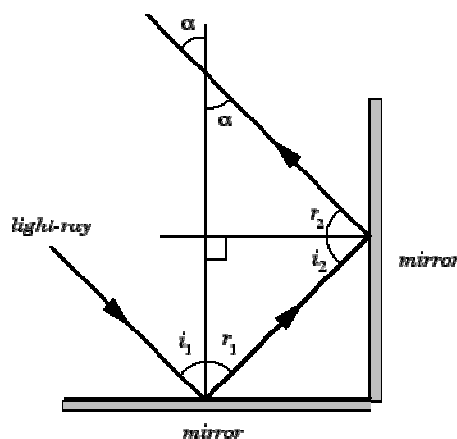
εικόνα 5.14 : παράθυρο μετρήσεων – γραμμή έντασης

Στην παρούσα διπλωματική για όλες τις σειρές μετρήσεων η ένδειξη της έντασης ήταν πάντα 100% σε όλο το μήκος της διαδρομής. Παρόλα αυτά, αυτό το ποσοστό δεν το επιτυγχάνουμε μόνο για μία συγκεκριμένη θέση του αντανακλαστικού φακού απέναντι από την κεφαλή του laser. Δηλαδή, έχοντας ευθυγραμμίσει τον φακό με την κεφαλή laser κι έχοντας ελέγξει πως η ένταση είναι σε όλο το μήκος της διαδρομής στο 100%, μετακινώντας ελάχιστα το τραπέζι της εργαλειομηχανής (πάνω στο οποίο είναι ο φακός) και κρατώντας σταθερή την θέση της κεφαλής παρατηρούμε πως η

ένταση παραμένει 100% - παρότι η ευθυγράμμιση “πειράχτηκε”. Αυτό οφείλεται στο ότι ο αντανακλαστικός φακός είναι γωνιακός κύβος (corner cube).

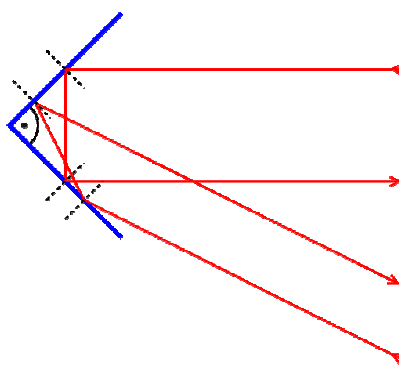
5.8.2 Γωνιακός κύβος

Ο γωνιακός κύβος έχει μία ξεχωριστή ιδιότητα: κάθε δέσμη φωτός που προσπίπτει πάνω του, στέλνεται πίσω σε παράλληλη διαδρομή.



σχήμα 5.6: δέσμη φωτός που προσπίπτει πάνω σε γωνιακό κύβο επιστρέφει σε παράλληλη διαδρομή. [39]

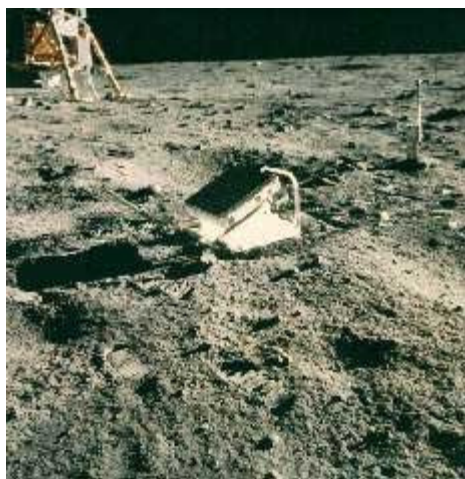
Αυτό διασφαλίζει πως από την στιγμή που η δέσμη φωτός χτυπήσει τον συγκεκριμένο είδος φακού, τότε σε κάθε περίπτωση θα επιστρέψει πίσω στην πηγή της.



σχήμα 5.7 : όταν η δέσμη φωτός προσπίπτει στην επιφάνεια του γωνιακού κύβου, επιστρέφει πάντα στην πηγή της,

Αυτή η ιδιότητα του γωνιακού κύβου τον κάνει ιδιαίτερος χρήσιμο στις εφαρμογές που απαιτούν ευθυγράμμιση, διότι δεν χρειάζεται να ευθυγραμμιστεί απόλυτα με μετρητικά ρολόγια. Έτσι όταν με άλλου είδους κάτοπτρο, η διαδικασία της ευθυγράμμισης είναι ζωτικής σημασίας και ιδιαίτερος χρονοβόρα, στην περίπτωση του γωνιακού κύβου έχουμε κερδίσει μεγαλύτερη ανοχή και λιγότερο χρόνο ευθυγράμμισης.

Αξίζει, εδώ να σημειώσουμε πως αυτή η ιδιότητα είναι ο λόγος που οι αστροναύτες της αποστολής του Apollo 11 άφησαν ένα πλαίσιο που αποτελείτο από 100 αντανakλαστικούς γωνιακούς κύβους στην επιφάνεια της σελήνης (το πλαίσιο αυτό καλείται Laser Ranging Retroreflector). Αυτοί οι αντανakλαστικοί φακοί χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν την απόσταση Γης-Σελήνης μέσω μίας ακτίνας laser που ενεργοποιείται από την Γη, ανακλάται στο πλαίσιο και επιστρέφει στην Γη (η χρονική διάρκεια του ταξιδιού της ακτίνας μετατρέπεται σε απόσταση με ακρίβεια 3cm). Δεκαετίες μετά από την αποστολή του Apollo 11, οι γωνιακοί κύβοι απαιτώντας μηδενική ενέργεια και χωρίς την ανάγκη ευθυγράμμισης λειτουργούν άψογα ως μέρος αυτών των διαπλανητικών μετρήσεων. [40]



εικόνα 5.15: το αντανakλαστικό πλαίσιο από γωνιακούς κύβους στην σελήνη [40]

5.8.3 Μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης

Ο εξοπλισμός στήθηκε, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 5.7, για την μέτρηση κατά μήκος του y άξονα της εργαλειομηχανής. Η κεφαλή του laser ήταν σταθερή σε τραπέζι απέναντι από την εργαλειομηχανή και ο αντανakλαστικός φακός βρισκόταν πάνω στο τραπέζι της μηχανής (σε μαγνητική βάση) και κινείτο κατά μήκος του άξονα y . Στη συνέχεια ακολουθήθηκε η διαδικασία ευθυγράμμισης. Στην θέση $x=417.500\text{mm}$ του τραπεζιού (σύστημα συντεταγμένων της μηχανής) ελέγξαμε πως η ένταση ήταν 100% σε όλο το μήκος του άξονα y . Εκεί ελήφθησαν 5 σειρές μετρήσεων και παραθέτουμε τα αποτελέσματα:

Θέση(mm)	Μέσο Σφάλμα(μm)	2s(μm)
10,0	-0.52	3.88
60,0	-0.58	4.00
110,0	-7.91	0.52
160,0	-15.45	0.47
210,0	-14.62	0.51
290,0	-22.33	0.80
290,0	-26.72	0.59
210,0	-18.95	0.31
160,0	-19.67	0.40
110,0	-11.78	0.56
60,0	-3.93	0.32
10,0	-3.71	0.33

πίνακας 5.2: μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης, $x=417.500\text{mm}$

Το πρότυπο ISO 230-2 μας δίνει τις παρακάτω τιμές για τις κύριες παραμέτρους:

τιμή αντιστρεψιμότητας $B = 4.38\mu\text{m}$ (σημείο 5)

μέση τιμή αντιστρεψιμότητας $\bar{B} = 3.89\mu\text{m}$

μέση δι-κατευθυντική απόκλιση θέσεως $M = 22.41\mu\text{m}$

δι-κατευθυντική συστηματική απόκλιση θέσεως $E = 6.19\mu\text{m}$

δι-κατευθυντική επαναληψιμότητα τοποθέτησης $R = 7.67\mu\text{m}$

δι-κατευθυντική ακρίβεια τοποθέτησης $A = 30.73\mu\text{m}$

Στη συνέχεια μετακινήσαμε το τραπέζι κατά x , με κατεύθυνση προς το μηδέν του συστήματος συντεταγμένων της μηχανής, μέχρι το σημείο που η ένταση έπαψε να είναι πια 100% σε όλο το μήκος του άξονα y . Έπειτα μετακινήσαμε το τραπέζι στην αντίθετη κατεύθυνση, και πάλι με σκοπό να εντοπίσουμε που η ένταση έπαψε να είναι πια 100% σε όλο το μήκος του άξονα y . Σκοπός μας ήταν να εντοπίσουμε τα δύο οριακά σημεία στα οποία η ακτίνα του laser επιστρέφει παράλληλα με την διαδρομή του τραπεζιού της εργαλειομηχανής, σύμφωνα πάντα με το ποσοστό της έντασης που παρατηρούμε στο πρόγραμμα. Τα δύο αυτά σημεία ήταν το $x=417.180\text{mm}$ και $x=418.180\text{mm}$. Σε κάθε ένα από τα ακραία σημεία πάρθηκαν 3 σειρές μετρήσεων.

Παραθέτουμε τα αποτελέσματα:

Θέση(mm)	Μέση Σφάλμα(μm)	2s(μm)
10,0	-1.68	5.3
60,0	-0.15	4
110,0	-8.31	5
160,0	-15.70	5
210,0	-14.87	6
290,0	-22.41	3
290,0	-26.96	5
210,0	-19.17	2
160,0	-19.85	5
110,0	-12.24	2
60,0	-3.04	5.1
10,0	-4.62	4

πίνακας 5.3: μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης, $x=417.180\text{mm}$

Το πρότυπο ISO 230-2 μας δίνει τις παρακάτω τιμές για τις κύριες παραμέτρους:

τιμή αντιστρεψιμότητας $B = 4.55\mu\text{m}$ (σημείο 5)

μέση τιμή αντιστρεψιμότητας $\bar{B} = 3.79\mu\text{m}$

μέση δι-κατευθυντική απόκλιση θέσεως $M = 23.09\mu\text{m}$

δι-κατευθυντική συστηματική απόκλιση θέσεως $E = 26.80\mu\text{m}$

δι-κατευθυντική επαναληψιμότητα τοποθέτησης $R = 8.61\mu\text{m}$

δι-κατευθυντική ακρίβεια τοποθέτησης $A = 31.03 \mu\text{m}$

Θέση(mm)	Μέσο Σφάλμα(μm)	2s(μm)
10,0	0.11	0.27
60,0	0.11	0.58
110,0	-9.16	4.94
160,0	-16.64	5.30
210,0	-13.6	0.78
290,0	-22.63	4.88
290,0	-25.57	0.66
210,0	-18.06	1.00
160,0	-17.72	5.94
110,0	-11.78	0.47
60,0	-2.48	5.05
10,0	-3.71	0.65

πίνακας 5.4: μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης, $x=418.180\text{mm}$

Το πρότυπο ISO 230-2 μας δίνει τις παρακάτω τιμές για τις κύριες παραμέτρους:

τιμή αντιστρεψιμότητας $B = 4.46\mu\text{m}$ (σημείο 4)

μέση τιμή αντιστρεψιμότητας $\bar{B} = 2.29\mu\text{m}$

μέση δι-κατευθυντική απόκλιση θέσεως $M = 22.92\mu\text{m}$

δι-κατευθυντική συστηματική απόκλιση θέσεως $E = 25.68\mu\text{m}$

δι-κατευθυντική επαναληψιμότητα τοποθέτησης $R = 12.32\mu\text{m}$

δι-κατευθυντική ακρίβεια τοποθέτησης $A = 31.03 \mu\text{m}$

5.8.4 Ανοχή Ευθυγράμμισης

Στα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού μας αναφέρεται πως επιτρέπει μεγαλύτερο εύρος ανοχής στην ευθυγράμμιση από ότι τα συμβατικά συμβολόμετρο. Δεν ξεκαθαρίζεται όμως πόσο είναι το εύρος αυτό και πόσο αυτό επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας.

Καταρχάς, όσο αφορά την ευθυγράμμιση κατά y : ξέρουμε βέβαια πως η επιφάνεια του ανακλαστικού φακού και η επιφάνεια της κεφαλής του laser πρέπει να είναι στην ίδια ευθεία ώστε να έχουμε επιτύχει τέλεια ευθυγράμμιση. Αυτό συμβαίνει μόνο για μία συγκεκριμένη θέση του κατόπτρου ως προς την κεφαλή. Μετακινώντας το τραπέζι κατά x κρατώντας σταθερό το laser, ουσιαστικά προσπαθήσαμε να «χαλάσουμε» την αρχική ευθυγράμμιση. Διαπιστώσαμε ότι η κεφαλή του laser δεν καταλαβαίνει διαφορά στην ευθυγράμμιση για εύρος 1mm. Η κεφαλή του laser μέσα σε αυτό το εύρος καταλαβαίνει πως η ακτίνα επιστρέφεται κατά 100%. Θεωρούμε λοιπόν πως ο εξοπλισμός μας εξασφαλίζει 1mm ανοχή στην ευθυγράμμιση.

5.8.5 Ευαισθησία στην Ευθυγράμμιση

Το παραπάνω εύρος ευθυγράμμισης εξασφαλίζει λιγότερο χρόνο ευθυγράμμισης, που είναι κάτι πολύ σημαντικό. Δεν χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε μετρητικά ρολόγια ούτε να προσπαθήσουμε να επιτύχουμε την απόλυτη ευθυγράμμιση. Το μεγάλο ερώτημα όμως είναι, αφού δεν ξέρουμε πότε έχουμε πετύχει την απόλυτη ευθυγράμμιση πως μπορούμε να ξέρουμε πως τα αποτελέσματα μας είναι αξιόπιστα. Οι τρεις διαφορετικές μετρήσεις που παραθέσαμε παραπάνω εκφράζουν τελικά το σφάλμα μετατόπισης ακριβώς του ίδιου σημείου. Ας πάρουμε το παράδειγμα ενός μηχανικού που θα θέλει να μετράει κάθε 6 μήνες το σφάλμα μετατόπισης κατά μήκος του y στο $x=417.500$. Πρέπει να είναι σίγουρος πως οι διαφορές που θα βλέπει από μέτρηση σε μέτρηση θα οφείλονται μόνο στην μηχανή κι όχι στο σφάλμα που εισάγει το διαφορετικό στήσιμο του εξοπλισμού λόγω ανοχής στην ευθυγράμμιση.

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνεται η μέση απόκλιση κάθε θέσης σε μm για τις 3 μετρήσεις

$x=417,18$	$x=417,5$	$x=418,18$	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέσος Όρος	Σφάλμα λόγω ανοχής, ($\pm\mu\text{m}$)
-1.68	-0.52	0.11	0.11	-1.68	-0.696667	0.806667
-0.15	-0.58	0.11	0.11	-0.58	-0.206667	0.316667
-8.31	-7.91	-9.16	-7.91	-9.16	-8.46	0.55
-15.70	-15.45	-16.64	-15.45	-16.64	-15.93	0.48
-14.87	-14.62	-13.6	-13.6	-14.87	-14.363333	0.763333
-22.41	-22.33	-22.63	-22.33	-22.63	-22.456667	0.126667
-26.96	-26.72	-25.57	-25.57	-26.96	-26.416667	0.846667
-19.17	-18.95	-18.06	-18.06	-19.17	-18.726667	0.666667
-19.85	-19.67	-17.72	-17.72	-19.85	-19.08	1.36
-12.24	-11.78	-11.78	-11.78	-12.24	-11.943333	0.163333
-3.04	-3.93	-2.48	-2.48	-3.93	-3.15	0.67
-4.62	-3.71	-3.71	-3.71	-4.62	-4.156667	0.446667
					Μέγιστη Τιμή	1.36
					Ελάχιστη Τιμή	0.126667
					μέσος όρος	0.599722

πίνακας 5.5: μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης, ανάλυση μέσης απόκλισης κάθε θέσης για τις 3 μετρήσεις κατά y

Η μεγαλύτερη διαφορά που παρατηρήθηκε στην ίδια θέση μεταξύ των μετρήσεων ήταν 0,00213 ενώ η ελάχιστη 0,0003. Ο μέσος όρος των διαφορών των ακραίων τιμών στην ίδια θέση ήταν 0,00116. Αυτό μας εξασφαλίζει ακρίβεια για στην απόκλιση θέσης μέχρι και το εκατοστό του χιλιοστού ανεξάρτητα της θέσης ευθυγράμμισης. Μάλιστα στα περισσότερα σημεία και το τρίτο δεκαδικό ψηφίο ήταν ίδιο σε όλες τις μετρήσεις. Αξίζει όμως να δούμε και την γίνεται με τις τιμές των παραμέτρων του προτύπου ISO. Βάσει των οποίων παίρνουμε μία πρώτη γενική εικόνα για τον αν η μηχανή μας καλύπτει σε θέματα ακρίβειας και επαναληψιμότητας. Παρακάτω δίνουμε συνολικά τις τιμές των παραμέτρων κατά ISO.

	B	\bar{B}	M	E	R	A
$x=417.180$	4.38	3.89	22.41	26.19	7.67	30.73
$x=417.500$	4.46	2.99	22.92	25.68	12.32	30.09
$x=418.180$	4.55	3.79	23.09	26.80	8.61	31.03
μέγιστη τιμή	4.55	3.89	23.09	26.80	12.32	31.03
ελάχιστη τιμή	4.38	2.99	22.41	25.68	7.67	30.09
εύρος	0.17	0.9	0.68	1.12	4.65	0.94
μέσος όρος	4.46	3.55	22.807	26.22	9.53	30.62

πίνακας 5.6: μετρήσεις για εύρεση ανοχής ευθυγράμμισης ανάλυση παραμέτρων ISO για τις 3 μετρήσεις κατά y

Η τιμή της παραμέτρου A για την ακρίβεια κινήθηκε σε ένα εύρος 0,94 μm . Δεν μπορούμε, λοιπόν, παρά να επιβεβαιώσουμε πως η αξιοπιστία των μετρήσεων όσο αφορά στην παράμετρο της ακρίβειας δεν είναι αμφισβητήσιμη. Ομοίως η τιμή της αντιστρεψιμότητας (εύρος 0,00017), της μέσης τιμής της αντιστρεψιμότητας

(εύρος 0,0009) και της απόκλισης θέσεως (εύρος 0.00068) εξασφαλίζονται με ακρίβεια τρίτου δεκαδικού ψηφίου, βεβαιώνοντας μας πως η ανοχή στην ευθυγράμμιση δεν πρέπει να μας ανησυχεί όταν συγκρίνουμε τις χαρακτηριστικές παραμέτρους-ακόμη κι αν δεν παίρνουμε υπόψη τα σφάλματα Abbé.

5.9 Ακρίβεια Μετρήσεων

Για τη μέτρηση σφάλματος κάποιας τάξης μεγέθους, το όργανο μέτρησης πρέπει να έχει σφάλμα τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μικρότερο. Όμως, η ακρίβεια του οργάνου δεν είναι παρά ένα μέρος της συνολικής ακρίβειας της μέτρησης. Η ακρίβεια της μέτρησης καθορίζεται από το διανυσματικό άθροισμα των στοιχείων σφάλματος του προϋπολογισμού σφάλματος του συστήματος (error budget). Με βάση τον προϋπολογισμό σφάλματος, η αριθμητική τιμή του συνολικού σφάλματος είναι η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των επιμέρους σφαλμάτων και εκφράζεται σε μονάδες μέτρησης μήκους. Τα σφάλματα αυτά ανάλογα με την πηγή προέλευσης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [17]:

- σφάλματα του μετρητικού οργάνου,
- σφάλματα λόγω μεταβολών στο περιβάλλον
- σφάλματα εγκατάστασης.

Κάποια από αυτά τα σφάλματα είναι ανάλογα του μήκους της μέτρησης ενώ άλλα είναι ανεξάρτητα. Παρακάτω αναφέρονται τα σφάλματα αυτά όπως αναλύονται στο παράρτημα του εγχειριδίου του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, θα σταθούμε στα σφάλματα που επέδρασαν περισσότερο κατά την διάρκεια των μετρήσεων που παρουσιάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

5.9.1 Σφάλματα του μετρητικού οργάνου

α) Μήκος κύματος laser.

Η ακρίβεια του συστήματος laser βασίζεται στην ακρίβεια του μήκους κύματος του laser. Η καθιερωμένη ακρίβεια μήκους κύματος για ένα LDDM είναι 1ppm. Για κεφαλές laser ακριβείας η σταθερότητα είναι 0.002ppm, ενώ η διαπιστωμένη από τη NIST ακρίβεια μήκους κύματος είναι 0.1ppm.

β) Σφάλμα ηλεκτρονικών.

Είναι ένα σταθερό σφάλμα το οποίο και αναφέρεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά ως η ανάλυση του μετρητικού συστήματος. Η καθιερωμένη τιμή για ένα σύστημα LDDM είναι 0,01μm (όπως και στη δική μας περίπτωση).

γ) Οπτική μη-γραμμικότητα.

Αυτή εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της οπτικής διαρροής από την μία διεύθυνση πόλωσης στην άλλη. Στο LDDM η ακτίνα δεν είναι πολωμένη οπότε και δεν εμφανίζεται οπτική μη-γραμμικότητα.

5.9.2 Σφάλματα λόγω μεταβολών στο περιβάλλον

α) Σφάλμα ατμοσφαιρικής αντιστάθμισης.

Το μέγεθος αυτού το σφάλματος εξαρτάται αφενός από την ακρίβεια των αισθητήρων θερμοκρασίας και πίεσης, και αφετέρου από το πόσο αλλάζουν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Σε συνθήκες σταθερής και ομοιόμορφης σύνθεσης αέρα, σφάλμα 1ppm λαμβάνεται από μεταβολή της θερμοκρασίας κατά 1°C ή της σχετικής υγρασίας κατά 80% ή της πίεσης κατά 2,5mmHg. Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό αναφέρεται πως αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0.56°C αντιστοιχεί σε 12,7μmm ανά χιλιοστό μετρήσιμης απόστασης. Αύξηση της πίεσης κατά 2,54mm Hg αντιστοιχεί σε 25.4μmm ανά χιλιοστό μετρήσιμης απόστασης. Τέλος αύξηση της σχετικής υγρασίας κατά 30%RH αντιστοιχεί σε 12,7μmm ανά χιλιοστό μετρήσιμης απόστασης.

Επειδή οι μετρήσεις γίνονταν σε κλειστό χώρο, θεωρούμε ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων οι μεταβολές των ατμοσφαιρικών συνθηκών δεν ήταν τόσο μεγάλες ώστε να μην αντισταθμίζονται μέσω των αισθητήρων.

β) Θερμική διαστολή υλικού.

Εφόσον οι διαστάσεις της εργαλειομηχανής είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, είναι απαραίτητο να γίνεται διόρθωση για πιθανή διαστολή ή συστολή. Το σφάλμα που μπορεί να προκληθεί από την θερμική διαστολή του υλικού εξαρτάται τόσο από την θερμοκρασία της μηχανής όσο και από την ακρίβεια του αισθητήρα θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις γίνονταν σε κλειστό χώρο και θεωρούμε ότι οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας ήταν πολύ μικρές ώστε να είχαμε αλλαγή των διαστάσεων που θα τις επηρέαζε, για να εξασφαλίσουμε όμως την ακρίβεια χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας θερμοκρασίας. Για κάθε μέτρηση δινόταν μέσω του λογισμικού του συστήματος ο συντελεστής θερμικής διαστολής του υλικού ώστε να υπολογιστεί η αντιστάθμιση της θερμικής διαστολής (material thermal expansion compensation, MTE): $MTE=1-\alpha\Delta t$ όπου α :συντελεστής θερμικής διαστολής και $\Delta t=T-68^{\circ}F$

γ) Οπτική θερμική μετατόπιση

Μεταβολή της θερμοκρασίας του αντανακλαστικού φακού κατά την διάρκεια της μέτρησης μπορεί να προκαλέσει αλλαγή στο μήκος της οπτικής διαδρομής το οποίο εμφανίζεται σαν αλλαγή της απόστασης κι άρα της μετρούμενης μετατόπισης. Μία τυπική τιμή για την οπτική θερμική μετατόπιση είναι 0,2μm/°C. Το συγκεκριμένο σφάλμα δεν θεωρήθηκε ότι επηρέαζε τις μετρήσεις μας.

5.9.3 Σφάλματα εγκατάστασης

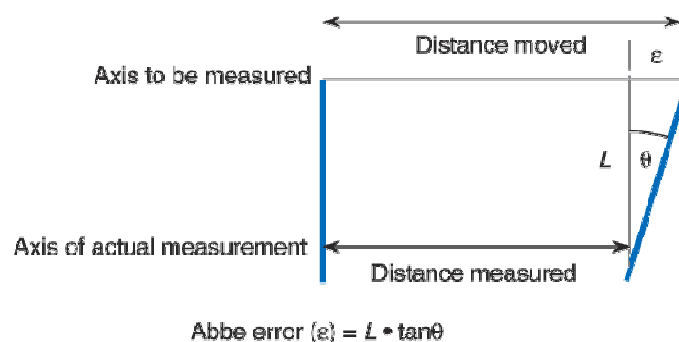
α) Σφάλμα νεκρής διαδρομής.

Το συγκεκριμένο σφάλμα σχετίζεται με τις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά την διάρκεια της μέτρησης. Οφείλεται στο μη-αντισταθμισμένο μήκος της ακτίνας laser μεταξύ της κεφαλής του laser και του αντανακλαστικού φακού στην

θέση μηδέν. Έστω L_1 η νεκρή περιοχή της μετρούμενης από το laser απόστασης (δηλαδή το τμήμα ανάμεσα στην κεφαλή του laser και το σημείο μηδέν της μέτρησης) και L_2 η απόσταση από το σημείο μηδέν της μέτρησης στο πρώτο μετρούμενο σημείο. Εάν αλλάξουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες, τότε αλλάζει το μήκος κύματος σε ολόκληρη την διαδρομή ($L_1 + L_2$), παρόλα αυτά η διόρθωση της ταχύτητας του φωτός που αντισταθμίζει το μήκος κύματος αφορά μόνο στην απόσταση L_2 (εφόσον η απόσταση L_1 έχει καθοριστεί ως μηδενική). Το σφάλμα αυτό μπορεί να ελαχιστοποιηθεί μειώνοντας την απόσταση της νεκρής διαδρομής [16].

β) Σφάλμα Abbé.

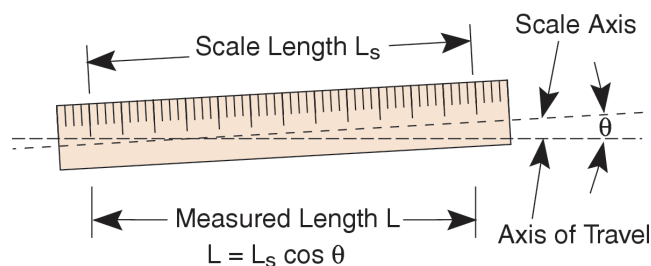
Η μέτρηση μετατόπισης με χρήση συμβολομετρίας εμπεριέχει τον κίνδυνο αλλοίωσης της μέτρησης λόγω σφάλματος Abbé. Το σφάλμα Abbé εκφράζει την μεγέθυνση των γωνιακών σφάλματων λόγω της απόστασης. Προκύπτει όταν η κλίμακα μέτρησης απέχει (είναι παράλληλα μετατοπισμένη) από τον άξονα μέτρησης. (σχήμα 5.8)



σχήμα 5.8: σφάλμα Abbé

γ) Σφάλμα Συνημίτονου.

Λάθος ευθυγράμμιση της ακτίνας του laser με τον μηχανικό άξονα της κίνησης έχει ως αποτέλεσμα απόκλιση ανάμεσα στην τιμή της μετρούμενης απόστασης και της πραγματικής απόστασης που διανύθηκε. Αυτή η απόκλιση ονομάζεται σφάλμα συνημίτονου και ισούται με $\cosine\ error = 1 - \cos\theta$ όπου θ είναι η γωνία της λάθος ευθυγράμμισης. Για μικρές γωνίες θ το σφάλμα συνημίτονου είναι περίπου ίσο με $\theta^2/2$ (όπου θ σε ακτίνια). (σχήμα 5.9)



σχήμα 5.9: σφάλμα συνημίτονου

5.9.4 Τυχαίοι παράγοντες που επιδρούν στην ακρίβεια των μετρήσεων

Οι ταλαντώσεις κι οι δονήσεις του δαπέδου, πιθανές πηγές ηλεκτρομαγνητικού θορύβου κι άλλες διακυμάνσεις στις πειραματικές συνθήκες που είτε δεν γίνεται να προβλεφθούν είτε δεν γίνεται να προσδιορισθούν σε τέτοιο βαθμό που να ληφθούν υπόψη στον προϋπολογισμό σφάλματος, είναι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων μας με τυχαίο τρόπο.

Η ηλεκτρομαγνητική βάση για την συγκράτηση της κεφαλής του laser και του αντανakλαστικού φακού πάνω στην μηχανή ασφαλίζουν σε έναν μεγάλο βαθμό το μετρητικό μας σύστημα από ταλαντώσεις και δονήσεις. Ακόμα κι έτσι, όμως, όπως αναφέρεται και στο εγχειρίδιο της Optodyne, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε πως οι μετατοπίσεις που διαβάζονται από το σύστημα μας δεν επηρεάζονται. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρήθηκε χρήσιμο να ληφθούν μετρήσεις σε όλο το μήκος των τριών αξόνων της εργαλειομηχανής. Για να επιτευχθεί μέτρηση σε όλο το μήκος των αξόνων x και y έπρεπε αναγκαστικά να στηθεί η κεφαλή του laser εκτός του τραπέζιού της μηχανής. Συνεπώς δεν μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την ηλεκτρομαγνητική βάση, αλλά στήσαμε την κεφαλή στην βάση Stable laser positioner (η λειτουργία και χρήση της έχει αναλυθεί στην ενότητα 6.4.3) πάνω σε τραπέζι απέναντι από την εργαλειομηχανή. Η βάση βέβαια τοποθετήθηκε σε τραπέζι ικανής στιβαρότητας, αφού πρώτα παρεμβλήθηκε ελαστική αντιολισθητική επιφάνεια. Δεν γίνεται, παρόλα αυτά, να ισχυριστούμε ότι αυτό δεν είχε κόστος στην ακρίβεια των μετρήσεων. Αυτός ο παράγοντας, λόγω της τυχαιότητάς του, επιδρά στα αποτελέσματα όσο αφορά στην επαναληψιμότητα.

Παρακάτω αναλύονται χαρακτηριστικά κάποιες μετρήσεις ως προς αυτό το ζήτημα, τα συμπεράσματα των οποίων υποστηρίζουν πως η χρησιμοποίηση της βάσης δεν είναι ικανή να πλήξει την αξιοπιστία των μετρήσεων. Ούτως ή άλλως, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής οι μετρήσεις μας δεν είχαν σκοπό την διακρίβωση της μηχανής. Σε κάθε περίπτωση η ακρίβεια που είχαμε και ο βαθμός περιορισμού της επίδρασης των τυχαίων σφαλμάτων που επιτύχαμε, μας ικανοποιούσαν. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται τα σφάλματα θέσεως μετά από 5 δι-κατευθυντικές σειρές μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x . Ακόμα και πριν ελέγξουμε τις παραμέτρους από την ανάλυση κατά ISO 230-2 είναι προφανές πως η επιτευχθείσα επαναληψιμότητα είναι ικανοποιητική, αφού η διαφοροποίηση των μετρήσεων ξεκινά σε επίπεδο μm ή δεκάτου του μm .

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File=C:\Users\pc\Documents\ele\diplomatiki\peiramatiko\along_x_axis_telikes2b.lin Date :05/25/10
 Machine :HAAS S/N :Tool Room Mill By :ελευθερία πάλλια/OPD
 Start Position: (10;215,9;24,65) End Position: (762;215,9;24,65)
 Total Travel = 752, Points = 7 No of Runs= 5
 Pressure: 744,8 Humidity: 50,00 Air Temp: 24,07 Material Temp: 23,73 MTE = .999915

Position,mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
10,0	10,001609	10,001436	10,001558	10,001164	10,000727
135,0	135,087026	135,087361	135,087413	135,087418	135,084899
260,0	260,103089	260,106185	260,105597	260,105807	260,106128
385,0	385,115701	385,115979	385,115962	385,113354	385,116764
510,0	510,123546	510,123802	510,124252	510,124294	510,125356
635,0	635,133946	635,131655	635,132092	635,135198	635,135698
750,0	750,130390	750,130969	750,131207	750,131402	750,132166
750,0	750,127623	750,128144	750,128636	750,128576	750,129576
635,0	635,132876	635,133142	635,133224	635,133290	635,133802
510,0	510,122756	510,122750	510,122779	510,122797	510,123619
385,0	385,114783	385,115249	385,115394	385,114956	385,115963
260,0	260,104948	260,105239	260,104672	260,104709	260,105358
135,0	135,085531	135,086016	135,085370	135,085356	135,085884
10,0	9,999997	10,000145	9,999442	9,998912	9,999612

πίνακας 5.7: σφάλματα θέσεως μετά από 5 δι-κατευθυντικές σειρές μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x

Ακολουθώντας το πρότυπο, βγάζουμε τα εξής αποτελέσματα για τις παραμέτρους.

Position,mm	Mean, mm	2_SIGMA, mm
10,0	0,001299	0,000726
135,0	0,086824	0,002176
260,0	0,105361	0,002585
385,0	0,115552	0,002583
510,0	0,124250	0,001387
635,0	0,133718	0,003614
750,0	0,131227	0,001296
750,0	0,128511	0,001441
635,0	0,133267	0,000676
510,0	0,122940	0,000760
385,0	0,115269	0,000912
260,0	0,104985	0,000615
135,0	0,085631	0,000605
10,0	-0,000378	0,000975

Reversal value, B= 0.002716 (at point=6)
 Mean reversal value, = 0.001144
 Range mean bidirectional positional deviation, M=0.133032
 Systematic deviation of positioning, E= 0.132419 (0.133718, 0.001299) (Forward), 0.133645 (0.133267, -0.000378) (Backward), 0.134096 (0.133718, -0.000378) (Bi-directional).
 Repeatability of positioning, R= 0.007228 (at point=5) (Forward), 0.002882 (at point=6) (Backward), 0.005454 (at point=6) (Bi-directional).
 Accuracy, A= 0.136759 (0.137332, 0.000573) (Forward), 0.135296 (0.133943, -0.001353) (Backward), 0.138685 (0.137332, -0.001353) (Bi-directional).

πίνακας 5.8: εύρεση παραμέτρων κατά ISO μετά από 5 δι-κατευθυντικές σειρές μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x

Δηλαδή η παράμετρος για την ακρίβεια είναι: R=7.23μm για την κίνηση προς τα μπρος, R=2.88μm για την κίνηση προς τα πίσω και R=5.45μm για την δι-κατευθυντική κίνηση.

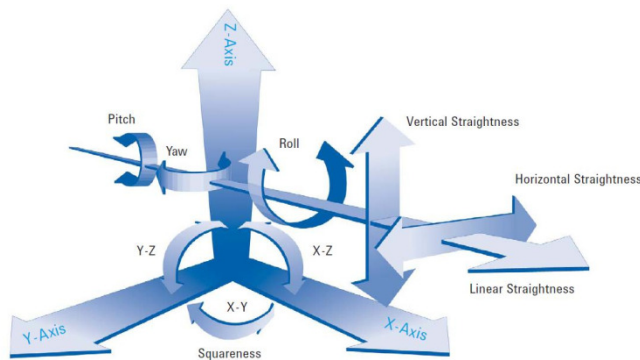
Θεωρούμε ότι η επαναληψιμότητα είναι ικανοποιητική δεδομένων των τεχνικών χαρακτηριστικών της μηχανής μας. Επιπλέον, μετρήσεις που είχαν παρθεί με το ίδιο σύστημα μέτρησης μετατοπίσεων σε τρεις διαφορετικές μηχανές στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας, έδιναν ίδιας τάξης μεγέθους επαναληψιμότητα παρότι εκεί χρησιμοποιήθηκε η μαγνητική βάση για την συγκράτηση της κεφαλής του laser [18].

Κεφάλαιο 6

Προσδιορισμός συνιστωσών του ογκομετρικού σφάλματος: πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

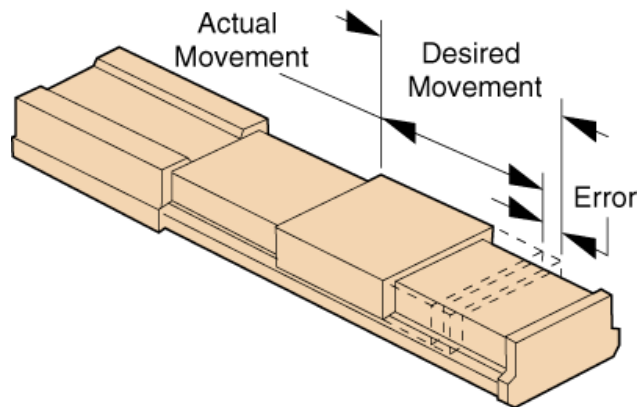
6.1 Συνιστώσες ογκομετρικού σφάλματος και δυνατότητα μέτρησή τους

Η παρακάτω ανάλυση αφορά τριαξονικό κάθετο κέντρο κατεργασιών, ως εκ τούτου θεωρούμε πως το ογκομετρικό σφάλμα αποτελείται από 21 συνιστώσες: 3 σφάλματα θέσεως, 6 σφάλματα ευθύτητας (3 οριζόντιας ευθύτητας και 3 κάθετης ευθύτητας), 9 γωνιακά σφάλματα (yaw-pitch-roll για κάθε άξονα) και 3 σφάλματα καθετότητας αξόνων. (σχήμα 6.1)



σχήμα 6.1 : οι παράγοντες σφάλματος της εργαλειομηχανής προς εξέταση

Το σφάλμα γραμμικής μετατόπισης (ή αλλιώς σφάλμα θέσης) είναι το σφάλμα ευθύτητας κατά μήκος του άξονα της κίνησης (σχήμα 6.2). Είναι το άμεσο αποτέλεσμα σφαλμάτων στο σύστημα μετάδοσης κίνησης όπως εσφαλμένων αρχών ένσφαιρου κοχλία κίνησης ή μη ευθυγράμμιση του και σφαλμάτων σύνδεσης του με το σύστημα ανάδρασης. Επιπλέον, περιλαμβάνει και την μετατόπιση που προκαλείται εξαιτίας των θερμικών επιδράσεων στον ένσφαιρο κοχλία κίνησης [7]. Ο εξοπλισμός που διαθέτουμε μπορεί άμεσα να μετρήσει τα σφάλματα γραμμικής μετατόπισης σε κάθε άξονα της μηχανής με την διαδικασία που έχει αναλυθεί στην παράγραφο 5.7.

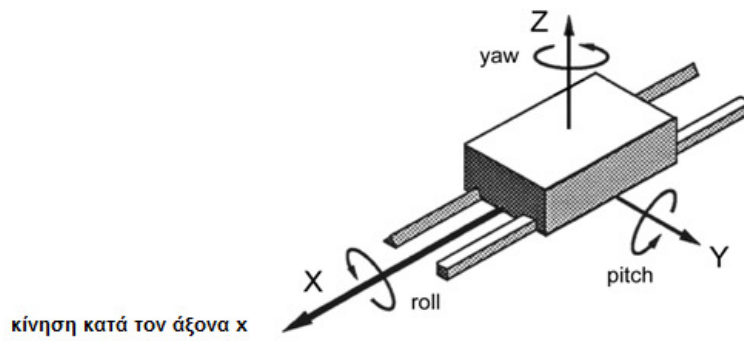


σχήμα 6.2 : γραμμικό σφάλμα θέσης

Τα σφάλματα ευθύτητας δεν έχουν κάποιον γραμμικό όρο, ως εκ τούτου τα 9 σφάλματα προσανατολισμού (οριζόντιας ευθύτητας, κάθετης ευθύτητας και καθετότητας) δεν γίνεται να μετρηθούν με τον εξοπλισμό που έχει ήδη περιγραφεί. Μετριοούνται και αναλύονται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, επίσης θεωρείται πως η ύπαρξη τους δεν επιφέρει κάποια επιβάρυνση στο σφάλμα θέσης κάθε άξονα [49].

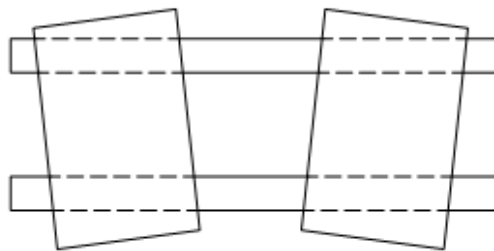
Τα γωνιακά σφάλματα είναι τα σφάλματα περιστροφής που προκαλούνται από την κακή γεωμετρική ακρίβεια στους οδηγούς της εργαλειομηχανής ή την όχι απολύτως ακριβή συναρμολόγηση των δομικών στοιχείων της εργαλειομηχανής (σχήμα 6.3). Η ύπαρξη των γωνιακών σφαλμάτων δεν αναγνωρίζεται εύκολα από τον χρήστη μίας εργαλειομηχανής, τουλάχιστον όχι τόσο εύκολα όσο των υπόλοιπων σφαλμάτων. Αυτό συμβαίνει διότι, σε αντίθεση με τα σφάλματα γραμμικής μετατόπισης, δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο στοιχείο της μηχανής που κυριαρχικά να επιβάλλει την συμπεριφορά των γωνιακών σφαλμάτων. Τα σφάλματα ευθύτητας και καθετότητας τα υποψιάζεται κανείς όταν π.χ. διαπιστώνει ότι η μπροστινή και η πίσω όψη του τελικού τεμαχίου του δεν είναι παράλληλες. Συνήθως, δεν μπορούμε να τα παρατηρήσουμε καν. Η ελαχιστοποίηση των γωνιακών σφαλμάτων είναι όμως κρίσιμη για την τελική ακρίβεια θέσης του εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Τα σφάλματα pitch και yaw είναι οι συνιστώσες του γωνιακού σφαλματος στις κάθετες διευθύνσεις κάθε άξονα. Σε αυτά προβάλλεται βασικά η γεωμετρία των οδηγών και η αλληλεπίδραση των τριβών της εργαλειομηχανής [55].



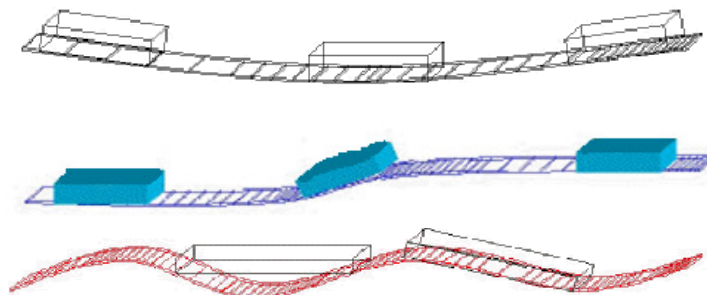
σχήμα 6.3 : τα γωνιακά σφάλματα yaw, pitch, roll όταν η κίνηση του τραπέζιού της εργαλειομηχανής γίνεται κατά μήκος του άξονα x

Τα γωνιακά σφάλματα yaw προκαλούνται βασικά από την αστάθεια της κίνησης κατά μήκος των χαλαρών οδηγών (γλίστρες) της μηχανής. Στο σχήμα 6.4 δίνεται σχηματικά το γωνιακό σφάλμα yaw που εμφανίζει το τραπέζι της εργαλειομηχανής μας καθώς κινείται στον άξονα x.



σχήμα 6.4: γωνιακό σφάλμα yaw λόγω χαλάρωσης των οδηγών του τραπέζιού

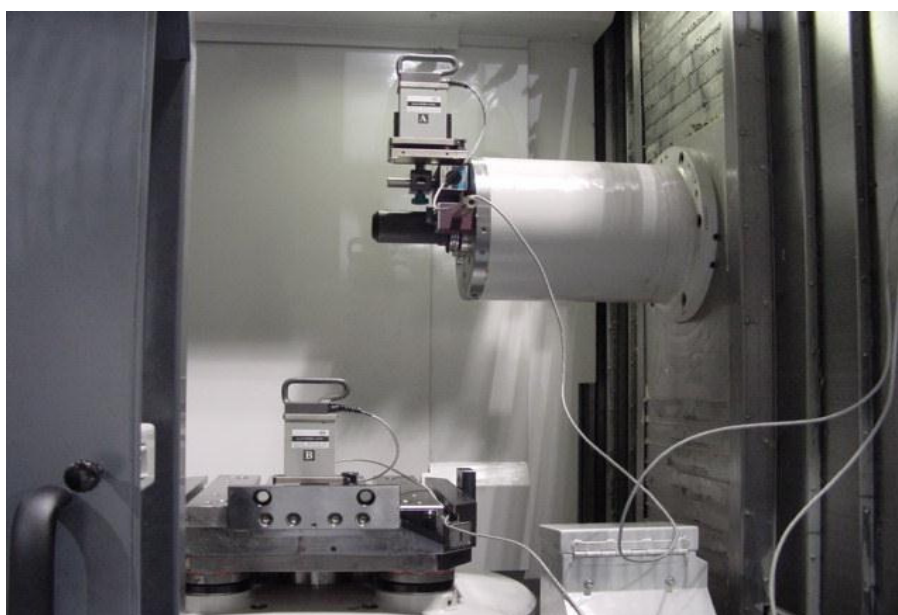
Τα γωνιακά σφάλματα pitch προκαλούνται από φαινόμενα στρέβλωσης, λυγισμού ή κάμψης των οδηγών. Στο σχήμα 6.5 δίνεται σχηματικά το γωνιακό σφάλμα pitch που εμφανίζει το τραπέζι της εργαλειομηχανής καθώς κινείται στον άξονα x.



σχήμα 6.5: γωνιακό σφάλμα pitch λόγω στρέβλωσης, λυγισμού, ή κάμψης των οδηγών του τραπέζιού

Με τον διαθέσιμο εξοπλισμό δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν άμεσα τα γωνιακά σφάλματα yaw και pitch. Η άμεση μέτρησή τους περιλαμβάνει ή εξοπλισμό κεφαλής laser διπλής ακτίνας ή δυο συνδεδεμένες κεφαλές laser. Παρόλα αυτά με μία κεφαλή laser, όπως αυτή που διαθέτουμε, μπορούμε με δύο διαδοχικές παράλληλες μετρήσεις να μετρήσουμε έμμεσα τα γωνιακά σφάλματα yaw και pitch.

Το σφάλμα roll είναι το σφάλμα περιστροφής γύρω από τον άξονα της κίνησης. Δεν γίνεται να μετρηθεί με συμβολόμετρα laser, ακόμα κι όταν ο οπτικός τους εξοπλισμός υποστηρίζει μέτρηση γωνιακών σφαλμάτων [50]. Για αυτό η μόνη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η χρήση ηλεκτρονικών σταθμών προσαρτημένων στους άξονες, οι οποίες μετράνε την περιστροφή κατευθείαν (εικόνα 6.1) [49].



εικόνα 6.1: μέτρηση roll με ηλεκτρονικές στάθμες [57]

Η άμεση συνέπεια που έχουν τα γωνιακά σφάλματα roll, pitch και yaw είναι να μεταβάλλουν το γωνιακό προσανατολισμό του τεμαχίου πάνω στο τραπέζι της μηχανής ή του εργαλείου πάνω στην άτρακτο. Η αλήθεια είναι όμως ότι επηρεάζουν πάντα σε κάποιο βαθμό την γραμμική ακρίβεια θέσης. Επίσης και στα σφάλματα ευθύτητας υπάρχει μία συνιστώσα που προκύπτει από τα υποκείμενα γωνιακά σφάλματα. Σύμφωνα την βιβλιογραφία [16] οι επιπτώσεις γωνιακών σφαλμάτων που κυμαίνονται από $\pm 0.00055^\circ$ ως $\pm 0.0111^\circ$ μπορούν να περιορίζονται μέσα από την αντιστάθμιση σφαλμάτων και τον έλεγχο της εργαλειομηχανής.

6.2 Αλληλοσυσχέτιση σφαλμάτων

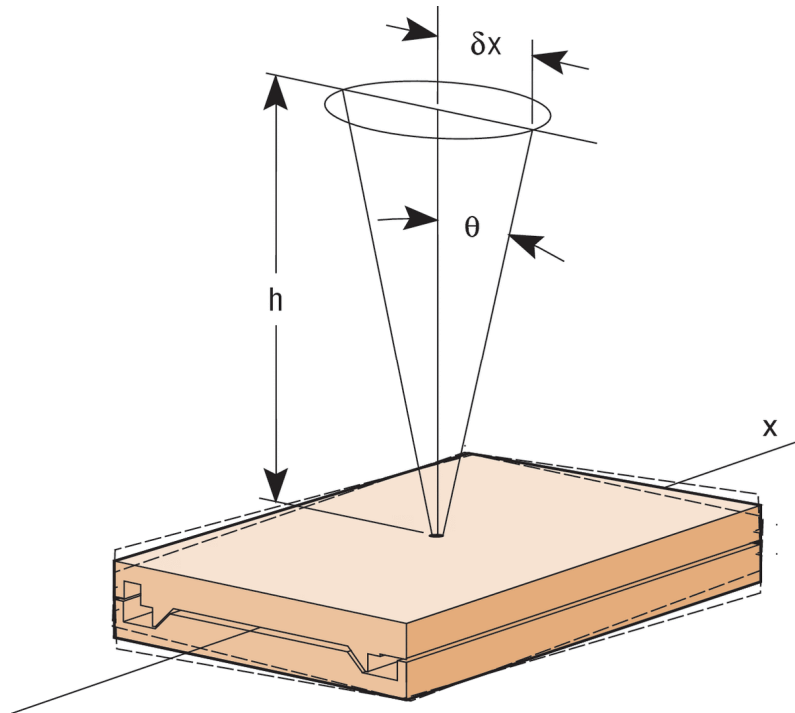
Το ζήτημα είναι, λοιπόν, ότι οι 21 παράγοντες του ογκομετρικού σφάλματος της μηχανής μας είναι θεωρητικά ανεξάρτητοι, αλλά υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των σφαλμάτων αυτών στην πρακτική της μέτρησης τους.

Κάθε σφάλμα γωνιακής περιστροφής προκαλεί και σφάλμα θέσης σε κάθε μετρούμενο σημείο. Εύκολα το διαπιστώσαμε και πειραματικά αυτό: παίρνοντας μετρήσεις κατά μήκος του άξονα σε διάφορες θέσεις y , καταλήγαμε σε διαφορετικά αποτελέσματα στην τιμή του σφάλματος θέσης. Επίσης, παίρνοντας μετρήσεις κατά μήκος του άξονα x αλλά με το κάτοπτρο σε διάφορα ύψη, πάλι είχαμε ως αποτελέσματα διαφορετικές τιμές σφάλματος θέσης. Το ανάλογο συμβαίνει και στις μετρήσεις κατά y και z .

Αυτό, λοιπόν, σημαίνει πως το «καθαρό» σφάλμα θέσης, δηλαδή αυτό χωρίς την επίδραση των γωνιακών σφαλμάτων, δεν είναι αυτό που εμφανίζεται άμεσα με την μέτρηση κατά μήκος του άξονα της διαδρομής. Αυτό που θα προσπαθήσουμε να κάνουμε είναι να εκμεταλλευτούμε την επίδραση των γωνιακών σφαλμάτων στα αποτελέσματα των μετρήσεων γραμμικών σφαλμάτων ώστε να προσδιορίσουμε συνιστώσες του συνολικού σφάλματος.

6.3 Σφάλμα Abbé

Η ουσιαστική επίπτωση που έχουν τα γωνιακά σφάλματα είναι το απορρέον Abbé σφάλμα, το οποίο κι επηρεάζει σημαντικά την γραμμική ακρίβεια θέσης. Το γωνιακό σφάλμα σε συνδυασμό με την υπάρχουσα απόσταση μεταξύ του σημείου που γίνεται η μέτρηση και του στοιχείου που χρησιμοποιείται ως αναφορά για τον καθορισμό της ακρίβειας (η απόσταση αυτή ονομάζεται μετατόπιση Abbé / Abbé offset) προκαλεί γραμμικό σφάλμα στον άξονα της κίνησης. Ο Zhang [52] χαρακτηριστικά αναφέρει πως σε μία μηχανή με Abbé offset 1m, κάτι που δεν είναι ασυνήθιστο στις εργαλειομηχανές, γωνιακό σφάλμα $0,00027^\circ$ μπορεί να προκαλέσει έως και 5 μ m σφάλμα θέσεως.



σχήμα 6.6 : σφάλμα Abbé

Το ζήτημα που προκύπτει είναι ότι στην πράξη η επιφάνεια αναφοράς για τα σφάλματα θέσης δεν είναι παρά θέμα σύμβασης. Κάθε φορά έχει να κάνει με την δομή της μηχανής, τον τρόπο της σχετικής κίνησης των αξόνων αλλά και τον χώρο εργασίας της. Ανατρέχοντας στην βιβλιογραφία είναι προφανές πως ακόμα η μηχανολογική κοινότητα δεν φαίνεται να έχει συμφωνήσει σε κάποιον γενικώς αποδεκτό ορισμό. Αναφορικά, στην βιβλιογραφία [16] και [54] υπάρχουν, χαρακτηριστικά, δύο αντικρουόμενοι ορισμοί.

Το σφάλμα Abbé είναι σαν μία κρυμμένη παγίδα για τον μηχανικό, ταυτόχρονα όμως μπορεί να είναι και ένα δυνατό όπλο για τον προσδιορισμό των σφαλμάτων μίας εργαλειομηχανής. Χρειάζεται να κατανοηθεί πλήρως η δομή κι η λειτουργία της μηχανής ώστε σε πρώτη φάση να εντοπιστούν οι πηγές offset και σε δεύτερη να απομονωθούν με έξυπνες επιλογές θέσεων μέτρησης με σκοπό να τις εκμεταλλευτούμε. Είναι στην κρίση του μηχανικού, αφού μελετήσει την δομή της μηχανής, να αποφασίσει σε ποιους άξονες υπάρχουν offset και πως θα το αντιμετωπίσει στις μετρήσεις του.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής και με βάση την προσέγγιση του σφάλματος Abbé από τον K. McCarthy [16] γίνεται μία προσπάθεια να συγκεντρώσουμε στους πίνακες 6.1, 6.2 και 6.3 τις επιπτώσεις του Abbé offset. Συγκεκριμένα, στους πίνακες αυτούς μπορεί κανείς να βρει σε ποιόν άξονα της εργαλειομηχανής μπορεί να αναγνωριστεί η επίδραση κάθε γωνιακού σφάλματος με την μορφή σφάλματος Abbé σε αντιστοιχία με τον άξονα στο οποίο δεχόμαστε ότι ορίζεται Abbé offset.

Γωνιακό Σφάλμα	Άξονας offset	Άξονας σφάλματος
ϵ_{xx} (roll)	X	-
ϵ_{xx}	Y	Z
ϵ_{xx}	Z	Y
ϵ_{yx} (pitch)	X	Z
ϵ_{yx}	Y	-
ϵ_{yx}	Z	X
ϵ_{zx} (yaw)	X	Y
ϵ_{zx}	Y	X
ϵ_{zx}	Z	-

Πίνακας 6.1: κίνηση κατά μήκος x άξονα – ποια offset παράγουν σφάλμα Abbe για δεδομένο γωνιακό σφάλμα

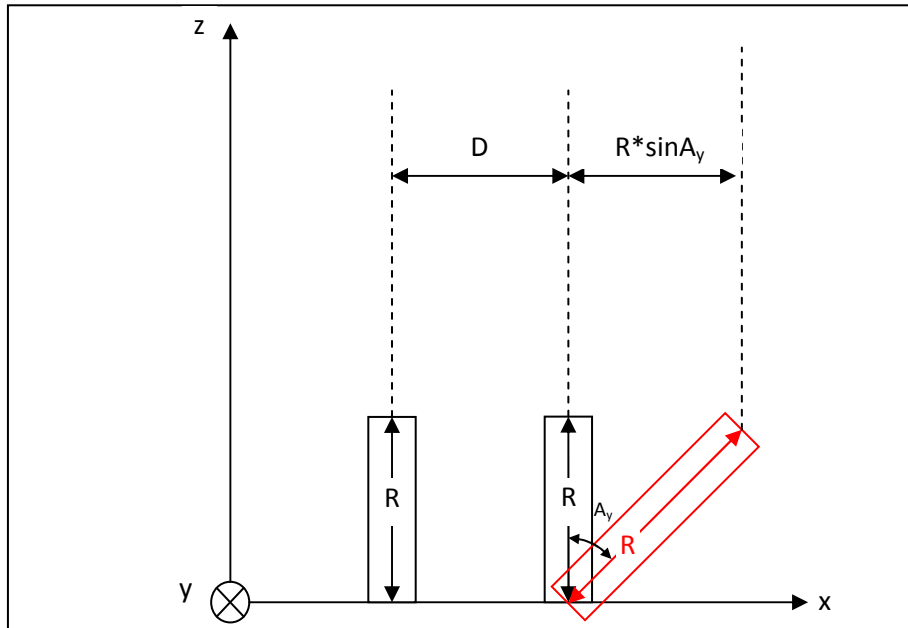
Γωνιακό Σφάλμα	Άξονας offset	Άξονας σφάλματος
ϵ_{yy} (roll)	Y	-
ϵ_{yy}	X	Z
ϵ_{yy}	Z	X
ϵ_{xy} (pitch)	Y	Z
ϵ_{xy}	X	-
ϵ_{xy}	Z	Y
ϵ_{zy} (yaw)	Y	X
ϵ_{zy}	X	Y
ϵ_{zy}	Z	-

Πίνακας 6.2: κίνηση κατά μήκος y άξονα – ποια offset παράγουν σφάλμα Abbe για δεδομένο γωνιακό σφάλμα

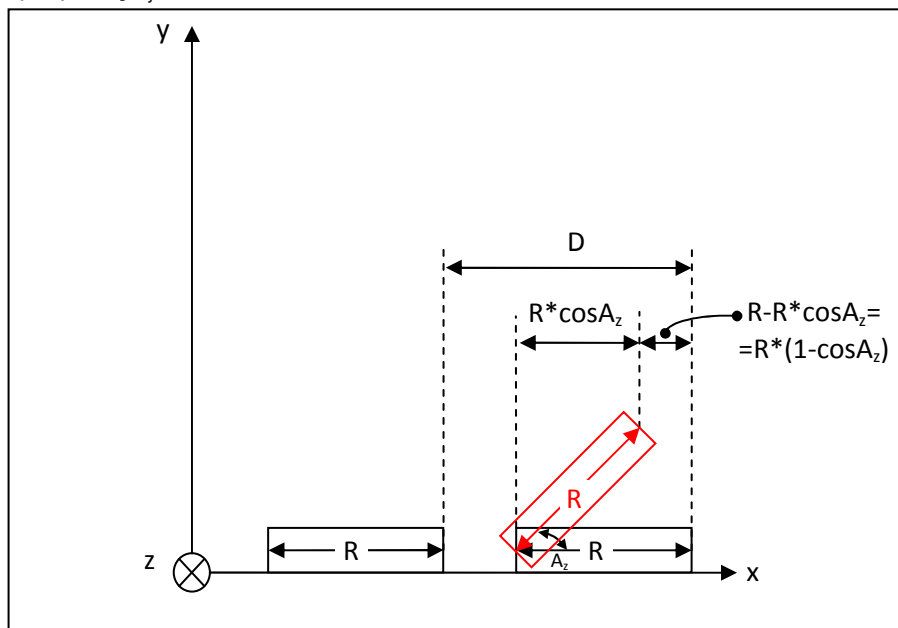
Γωνιακό Σφάλμα	Άξονας offset	Άξονας σφάλματος
ϵ_{zz} (roll)	Z	-
ϵ_{zz}	Y	X
ϵ_{zz}	X	Y
ϵ_{xz} (pitch)	Y	Z
ϵ_{xz}	X	-
ϵ_{xz}	Z	Y
ϵ_{zy} (yaw)	Z	X
ϵ_{yz}	X	Z
ϵ_{yz}	Y	-

Πίνακας 6.3: κίνηση κατά μήκος z άξονα – ποια offset παράγουν σφάλμα Abbe για δεδομένο γωνιακό σφάλμα

Στους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε πως κάθε σφάλμα γωνιακής περιστροφής θεωρούμε πως προκαλεί και σφάλμα θέσης σε κάθε σημείο εκτός από τον άξονα περιστροφής. Αυτό θα το δικαιολογήσουμε για το γωνιακό σφάλμα yaw με κίνηση κατά μήκος του άξονα x, και ακριβώς αναλόγα ισχύει και για τις υπόλοιπες 8 περιπτώσεις. Από το σχήμα 6.7 προκύπτει ότι το γωνιακό σφάλμα ε_{yx} επιβαρύνει το γραμμικό σφάλμα κατά $R \sin A_y$ (θεωρώντας πως για μικρές A_y ισχύει $\sin A_y = \tan A_y$). Αντίστοιχα, από σχήμα 6.8 προκύπτει το γωνιακό σφάλμα ε_{zx} επιβαρύνει το γραμμικό σφάλμα κατά $R(1 - \cos A_z)$. Όπου R το Abbé offset.



σχήμα 6.7: γραμμικό σφάλμα που προκαλείται από την γωνία pitch \widehat{A}_y λόγω γωνιακού σφάλματος ε_{yx}



σχήμα 6.8: γραμμικό σφάλμα που προκαλείται από την γωνία pitch \widehat{A}_z λόγω γωνιακού σφάλματος ε_{zx}

Στον πίνακα 6.4 υπολογίζονται τα $\sin A_y$ και $1-\cos A_z$ για χαρακτηριστικές τιμές γωνιακών σφαλμάτων

γωνία A (degrees)	$\sin A_y$	$1-\cos A_z$	$\sin A_y/1-\cos A_z$
0,001	1,74528E-05	1,523E-10	114595
0,005	8,72639E-05	3,80749E-09	22919
0,1	0,001745277	1,523E-06	1146
0,5	0,008726278	3,80747E-05	229
1	0,017451892	0,000152296	115
2	0,034898468	0,000609137	57
3	0,052334414	0,001370384	38
4	0,06975442	0,002435806	29
5	0,087153179	0,003805078	23

πίνακας 6,4: υπολογισμός $\sin A_y$ και $1-\cos A_z$ για χαρακτηριστικές τιμές γωνιακών σφαλμάτων.

Δεδομένου πως τα γωνιακά σφάλματα που συναντάμε στις εργαλειομηχανές συνήθως δεν θα ξεπερνούν την 1° , είναι λογικό να αμελούμε την επίδραση του γωνιακού σφάλματος περί του άξονα περιστροφής στην γραμμική ακρίβεια – αφού είναι χιλιάδες φορές μικρότερο των άλλων γωνιακών.

6.4 Η δομή του κέντρου κατεργασιών HAAS TM-1

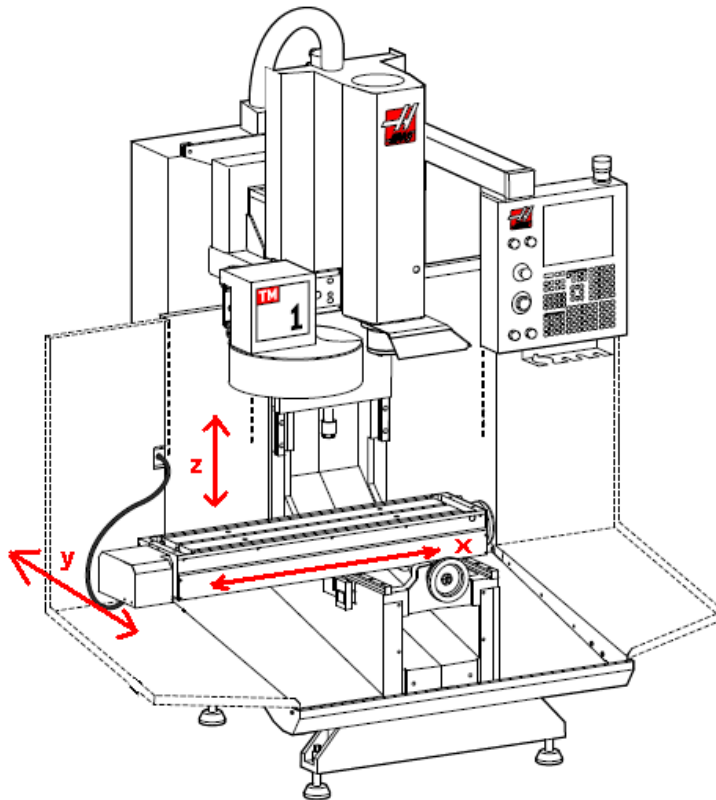
Για να μπορέσουμε να χαρτογραφήσουμε τα σφάλματα στον όγκο εργασίας μίας εργαλειομηχανής χρειάζεται να κατανοήσουμε πολύ καλά την δομή της μηχανής. Αυτό είναι απαραίτητο αφενός για να αναγνωρίσουμε τις πηγές των γεωμετρικών σφαλμάτων και την επίδραση αυτών στην λειτουργία της μηχανής και αφετέρου για να εντοπίσουμε τις πηγές offset κα να μπορέσουμε να τις εκμεταλλευτούμε

Οι μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έλαβαν χώρα στο εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, στην μηχανή HAAS ToolRoom Mill TM -1.

Η κίνηση κατά x και y επιτυγχάνεται από το τραπέζι της εργαλειομηχανής ενώ η κίνηση κατά z από την άτρακτο (σχήμα 6.9). Το τραπέζι κινείται καταρχάς πάνω σε δύο παράλληλους οδηγούς κατά μήκος του άξονα y. Η επιφάνεια των οδηγών απέχει 150mm από την επιφάνεια του τραπεζιού. Πάνω από τους οδηγούς για την κίνηση y βρίσκονται δύο παράλληλοι οδηγοί (κάθετοι με τους προηγούμενους) κατά μήκος του άξονα x. Η επιφάνεια τους απέχει 107mm από την επιφάνεια του τραπεζιού.

Η άτρακτος κινείται πάνω σε δύο παράλληλους οδηγούς κάθετα στο τραπέζι. Η απόσταση της επιφάνειας των οδηγών από το κέντρο της άτρακτου είναι 370.6mm.

Με βάση το σύστημα συντεταγμένων της μηχανής, ο όγκος εργασίας της εργαλειομηχανής είναι από $x=-762\text{mm}$ έως 0mm , $y=-304.800\text{mm}$ έως 0 και $z=-405.779\text{mm}$ έως $+121.271\text{mm}$. Το συνολικό μήκος διαδρομής του άξονα x είναι 762mm, του y 304.800mm και του z 527.05mm.



σχήμα 6.9: σκαρίφημα της μηχανής [56]

Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής, όπως δίδονται από την κατασκευαστική εταιρεία, μας σημειώνεται ότι η ακρίβεια δίδεται $\pm 0.010\text{mm}=\pm 10\mu\text{m}$, επαναληψιμότητα $\pm 0.005\text{mm}=5\mu\text{m}$ και η ανάλυση $1\mu\text{m}$.

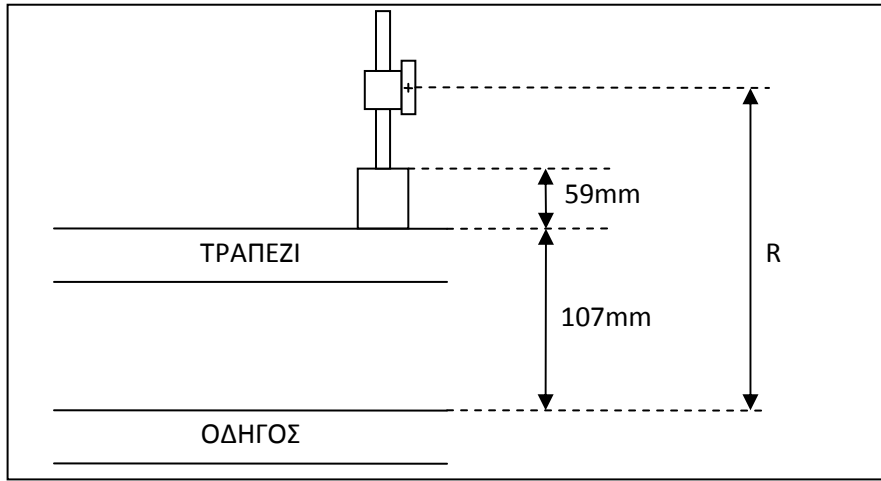
6.5 Ορισμός Abbé offset στην εργαλειομηχανή του πειράματος

Στην παρούσα διπλωματική και για την περίπτωση της μηχανής που περιγράφηκε στην παράγραφο 6.4, θεωρούμε πως το offset προκαλείται από την απόσταση μεταξύ των γλιστρών πάνω στις οποίες κινείται το τραπέζι ή η άτρακτος της μηχανής και του κατόπτρου όπου γίνονται οι μετρήσεις.

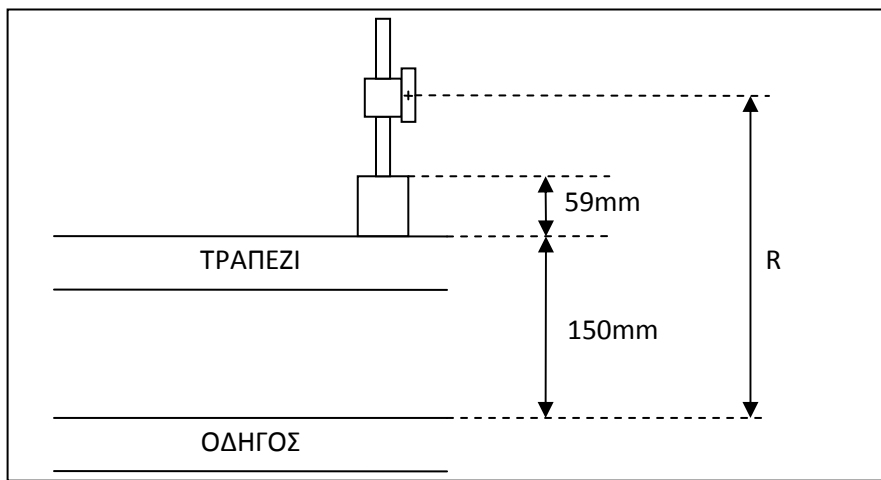
Αποτέλεσμα είναι, κάποια γωνιακά σφάλματα να επιβαρύνουν το αντίστοιχο γραμμικό. Θεωρούμε ότι η επιφάνεια των οδηγών είναι εκεί που εμφανίζεται το καθαρό σφάλμα θέσης, ενώ το γραμμικό σφάλμα που μετράμε εμείς αλλοιώνεται από τα γωνιακά σφάλματα εξαιτίας του Abbé offset.

Στην περίπτωση των μετρήσεων μας το Abbé offset προκαλείται τόσο από την απόσταση των οδηγών από το τραπέζι ή την άτρακτο όσο και από την απόσταση του κατόπτρου από την επιφάνεια του τραπεζιού ή το κέντρο της ατράκτου. Στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα σημειώνεται ως R και θα δηλώνει την συνολική απόσταση του κέντρου του κατόπτρου από την επιφάνεια των οδηγών.

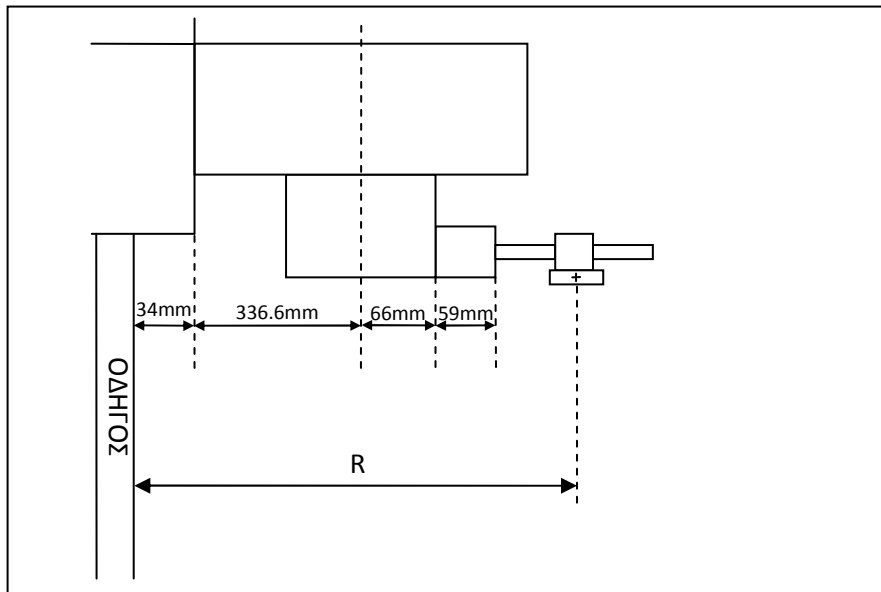
Στα σχήματα 6.10, 6.11 και 6.12 που ακολουθούν ορίζεται το Abbé offset για κάθε άξονα της μηχανής μας.



σχήμα 6.10: Abbé offset άξονα x



σχήμα 6.11: Abbé offset άξονα y



σχήμα 6.12: Abbé offset άξονα z

6.6 Προσδιορισμός συνιστωσών του ογκομετρικού σφάλματος του κέντρου κατεργασιών HAAS ToolRoom Mill TM -1

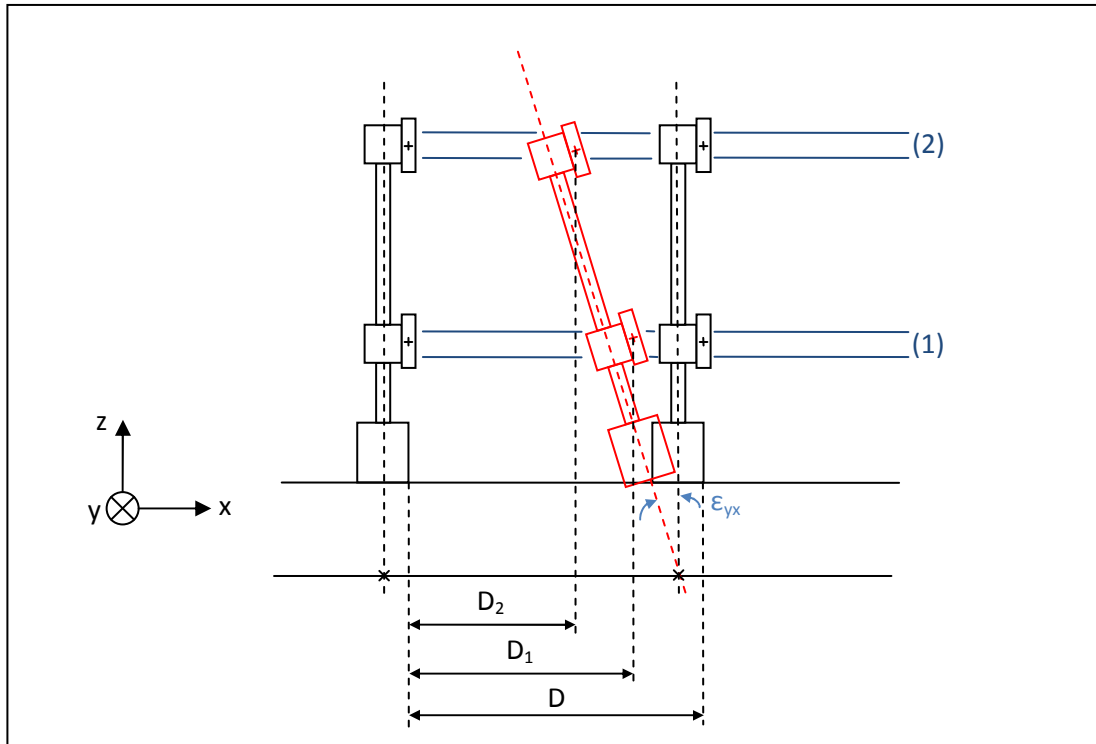
Αν δεν υπήρχαν γωνιακά σφάλματα, τότε το γραμμικό σφάλμα κατά μήκος κάθε άξονα θα ήταν ίδιο ανεξαρτήτως της θέσης στην οποία βρίσκεται το τραπέζι ή του ύψους του κατόπτρου κατά την διάρκεια της μέτρησης. Παίρνοντας μετρήσεις κατά μήκος του άξονα σε δύο τυχαίες και επαρκώς απέχουσες μεταξύ τους θέσεις, μπορούμε πρόχειρα να ελέγξουμε την ύπαρξη σημαντικών ή όχι γωνιακών σφαλμάτων. Αν τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορεί να θεωρηθεί ότι ταυτίζονται, τότε μπορούμε να καταλήξουμε πως τα γωνιακά σφάλματα είναι αμελητέα, αν όμως η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων είναι μεγάλη τότε καταλήγουμε πως η επίδραση των γωνιακών σφαλμάτων παίζει σημαντικό ρόλο. Δεν μπορούμε όμως να βγάλουμε κανένα παραπάνω συμπέρασμα πέραν αυτού κι ούτε μπορούμε να θεωρήσουμε πως μία μέτρηση κατά μήκος του άξονα αρκεί για να μετρήσουμε το γραμμικό σφάλμα.

Η επίπτωση του offset είναι ο κύριος λόγος που όταν μετράμε το γραμμικό σφάλμα κατά μήκος ενός άξονα, τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι διαφορετικά κάθε φορά που η θέση του κατόπτρου ή του τραπέζιου αλλάζει (προϋποθέτοντας, φυσικά, ικανοποιητική επαναληψιμότητα). Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 6.5 θεωρούμε πως υπάρχει offset λόγω της απόστασης μεταξύ των γλιστρών πάνω στις οποίες κινείται το τραπέζι κατά x και y, το οποίο ορίζεται κατά τον άξονα z. Επιπλέον υπάρχει offset λόγω της απόστασης μεταξύ της ατράκτου της μηχανής και του κατόπτρου που αντανακλά την ακτίνα laser, το οποίο ορίζεται στον άξονα y.

A. Μετρήσεις κατά μήκος του x άξονα.

Σκοπός είναι να γίνουν οι μετρήσεις με τέτοιο τρόπο ώστε να απομονωθεί το γραμμικό σφάλμα του άξονα x από το γωνιακό που παράγει σφάλμα Abbé για δεδομένο offset ορισμένο στον άξονα z. Ανατρέχοντας στον πίνακα 6.1 σημειώνουμε πως το γωνιακό σφάλμα που επιβαρύνει το γραμμικό σε αυτή την περίπτωση είναι το pitch ϵ_{yx} .

Για να απομονωθεί το pitch ϵ_{yx} ενώ μετράμε γραμμικά το σφάλμα στο x χρειάζονται δυο μετρήσεις κατά μήκος του άξονα x με το τραπέζι σε σταθερή θέση y και το κάτοπτρο σε δύο διαφορετικά ύψη ώστε να πετύχουμε δυο διαφορετικά Abbé offset. Κατά το δυνατόν πρέπει οι δυο μετρήσεις να εξασφαλίζουν μέγιστη διαφορά $R_1 - R_2$. (σημειώνεται πως το R συμβολίζει την συνολική απόσταση του κέντρου του κατόπτρου από την επιφάνεια των οδηγών). Αν δεν υπήρχε το γωνιακό σφάλμα pitch ϵ_{yx} το laser μετά κάθε μετατόπιση του τραπέζιου θα μετρούσε μόνο το γραμμικό σφάλμα της μετατόπισης D_x . Αντ' αυτού, το laser μετράει μετατόπιση D_1 επειδή το ϵ_{yx} προσθέτει έναν ακόμη όρο στην μετρούμενη μετατόπιση. Όπως έχει δειχθεί και από το σχήμα 6.7 ο όρος αυτός είναι ίσως με $R_1 \sin \epsilon_{yx}$. Επειδή η γωνία pitch ϵ_{yx} είναι πολύ μικρή δικαιολογεί να θεωρήσουμε ότι $\sin \epsilon_{yx} = \epsilon_{yx}$, δηλαδή ισχύει: $D_1 = D_x + R_1 \epsilon_{yx}$. Στην συνέχεια, αυξάνουμε την απόσταση μεταξύ κατόπτρου και τραπέζιου από R_1 σε R_2 , και έτσι το laser μετράει απόσταση D_2 για την οποία αναλόγως ισχύει: $D_2 = D_x + R_2 \epsilon_{yx}$. Τα παραπάνω γίνονται ευκολότερα κατανοητά στο σχήμα 6.13



σχήμα 6.13: επίδραση γωνιακού σφάλματος ϵ_{yx} κατά την μετατόπιση στον άξονα x

Παίρνοντας μετρήσεις σε σημεία κατά μήκος του άξονα x στα διαφορετικά Abbé offset R_1 και R_2 μπορούμε μέσω του συστήματος των δύο εξισώσεων $D_1 = Dx + R_1 \epsilon_{yx}$

$$D_2 = Dx + R_2 \epsilon_{yx}$$

Και αντικαθιστώντας όπου R_1 και R_2 γνωστά Abbé offset και D_1 και D_2 τα μετρούμενα σφάλματα θέσης να καταλήξουμε:

$$\epsilon_{yx} = \frac{D_1 - D_2}{R_1 - R_2} \text{ και } Dx = D_1 - R_1 \epsilon_{yx}$$

B. Μετρήσεις κατά μήκος του y άξονα.

Αναλόγως με προηγουμένως, το γωνιακό σφάλμα που επιβαρύνει το γραμμικό κατά μήκος του y είναι το pitch ϵ_{xy} . Για να απομονωθεί το pitch ϵ_{xy} ενώ μετράμε γραμμικά το σφάλμα στο y χρειάζονται δυο μετρήσεις κατά μήκος του άξονα y με το τραπέζι σε σταθερή θέση x και το κάτοπτρο σε δύο διαφορετικά ύψη ώστε να πετύχουμε δυο διαφορετικά Abbé offset.

Κατά το δυνατόν πρέπει με οι δυο μετρήσεις να εξασφαλίζουν μέγιστη διαφορά $R_1 - R_2$. Με την ίδια ακριβώς διαδικασία, μπορούμε μέσω των εξισώσεων

$$D_1 = Dy + R_1 \epsilon_{xy}$$

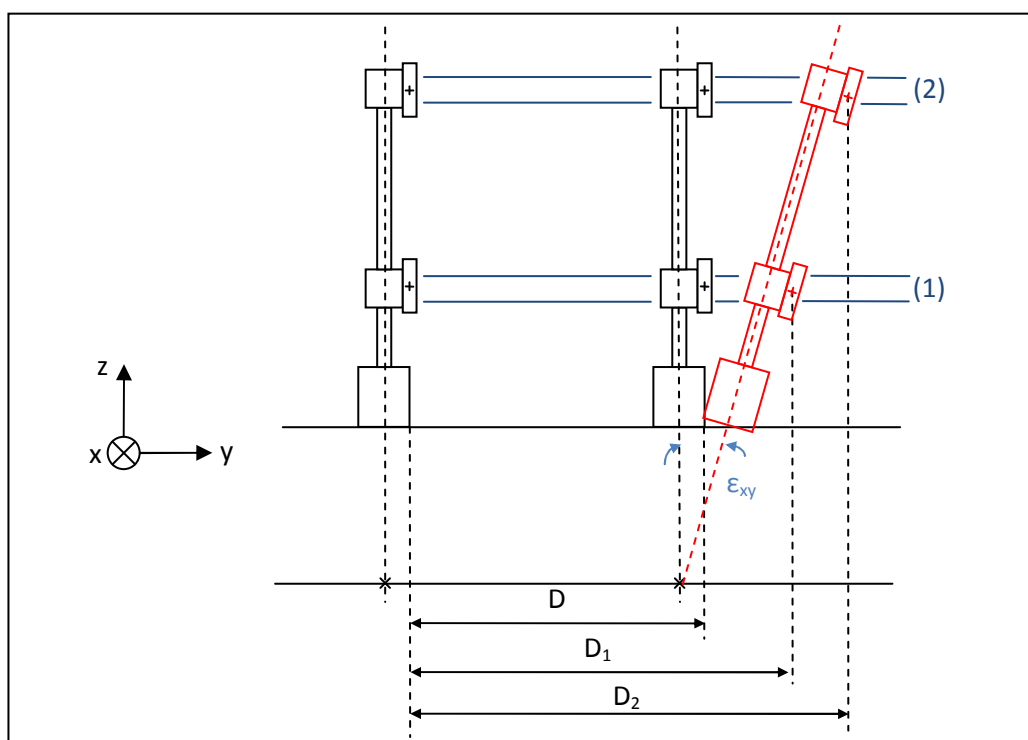
$$D_2 = Dy + R_2 \epsilon_{xy}$$

Και αντικαθιστώντας όπου R_1 και R_2 γνωστά Abbé offset και D_1 και D_2 τα μετρούμενα σφάλματα θέσης να καταλήξουμε:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{D_1 - D_2}{R_1 - R_2} \text{ και } Dy = D_1 - R_1 \varepsilon_{xy}$$

Το σχήμα 6.14 παρουσιάζει, ανάλογα με το σχήμα 6.14, την επίδραση γωνιακού σφάλματος ε_{xy} κατά την μετατόπιση στον άξονα y .

Έχει επιλεγεί από την γράφουσα το πρώτο σχήμα να αποδίδει αρνητικό γωνιακό σφάλμα και το δεύτερο θετικό, για να γίνει κατανοητό πως το σφάλμα Abbé δεν μεγαλώνει πάντα το γραμμικό σφάλμα αλλά μπορεί να το κάνει να φαίνεται και μικρότερο από ό,τι είναι χωρίς την επίδραση του Abbé offset.



σχήμα 6.14: επίδραση γωνιακού σφάλματος ε_{xy} κατά την μετατόπιση στον άξονα y

Γ. Μετρήσεις κατά μήκος του z άξονα

Σκοπός είναι να γίνουν οι μετρήσεις με τέτοιο τρόπο ώστε να απομονωθεί το γραμμικό σφάλμα του άξονα z με το γωνιακό που παράγει σφάλμα Abbé για δεδομένο offset ορισμένο στον άξονα y . Ανατρέχοντας στον πίνακα 6.3 σημειώνουμε πως το γωνιακό σφάλμα που επιβαρύνει το γραμμικό σε αυτή την περίπτωση είναι το pitch ε_{xz} .

Για να απομονωθεί το pitch ε_{xz} ενώ μετράμε γραμμικά το σφάλμα στο z χρειάζονται δυο μετρήσεις κατά μήκος του άξονα z με το τραπέζι σε σταθερή θέση x και το κάτοπτρο σε δύο διαφορετικές αποστάσεις ώστε να πετύχουμε δυο διαφορετικά

Abbé offset. Κατά το δυνατόν πρέπει με οι δυο μετρήσεις να εξασφαλίζουν μέγιστη διαφορά R_1-R_2 (σημειώνεται πως το R συμβολίζει την συνολική απόσταση του κέντρου του κατόπτρου από το κέντρο της ατράκτου). Αν δεν υπήρχε το γωνιακό σφάλμα pitch ϵ_{xz} το laser μετά κάθε μετατόπιση της τραπεζιού θα μετρούσε μόνο το γραμμικό σφάλμα της μετατόπισης D . Αντ' αυτού, το laser μετράει μετατόπιση D_1 επειδή το ϵ_{xz} προσθέτει έναν ακόμη όρο στην μετρούμενη μετατόπιση. Ισχύει: $D_1=Dz+R_1\epsilon_{xz}$. Στην συνέχεια, αυξάνουμε την απόσταση μεταξύ κατόπτρου και ατράκτου από R_1 σε R_2 , και έτσι το laser μετράει απόσταση D_2 για την οποία αναλόγως ισχύει: $D_2=Dz+R_2\epsilon_{yx}$.

Ακριβώς όπως και προηγουμένως ισχύει, αφού R_1 και R_2 γνωστά Abbé offset και D_1 και D_2 τα μετρούμενα σφάλματα θέσης:

$$\epsilon_{xz} = \frac{D_1 - D_2}{R_1 - R_2} \text{ και } Dz = D_1 - R_1 \epsilon_{xz}$$

6.7 Αποτελέσματα μετρήσεων και ανάλυση

Κατά την πειραματική διαδικασία διεξάχθηκαν 2 σειρές μετρήσεων με 5 επαναλήψεις για κάθε σειρά κατά μήκος κάθε άξονα σύμφωνα με τις οδηγίες του ISO-230-2:1997. Λαμβάναμε μετρήσεις για 7,6,7 σημεία κατά μήκος των αξόνων x,y,z αντίστοιχα.

Από αυτές προέκυψαν οι τιμές του σφάλματος θέσης και του γωνιακού σφάλματος pitch βάση των εξισώσεων που εξάγαμε στις ενότητες Α, Β, Γ της παραγράφου 6.5. Επιπλέον για κάθε μέτρηση υπολογίστηκαν και οι παράμετροι που ορίζονται στο ISO 230-2:1997

6.7.1 Άξονας x

6.7.1.1 Μετρήσεις κατά τον άξονα x

A. Μετρήσεις κατά μήκος του άξονα x, με το κάτοπτρο στην θέση $y=278.940\text{mm}$ και Abbé offset $R_1=330.4\text{mm}$

Αποτελέσματα μετρήσεων:

Position Measurement (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_x_axis3.lin
Machine :HAAS S/N :Tool Room Mill By :ελευθερία πάλλα/OPD
Start Position: {10;278,94;0} End Position: {750;278,94;0}
Total Travel = 740, Points = 7 No of Runs= 5
Pressure: 743,92 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,12 Material Temp: 26,03 MTE = ,999927

Position,mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
10,0	10,000006	9,999078	9,997469	9,999590	9,998761
135,0	135,039824	135,039615	135,039411	135,041343	135,040659
260,0	260,127144	260,127884	260,127703	260,128502	260,126351
385,0	385,144845	385,143018	385,145370	385,145614	385,144063
510,0	510,159706	510,157654	510,160458	510,158076	510,159424
635,0	635,178087	635,179182	635,179325	635,179066	635,177789
750,0	750,180112	750,180844	750,181207	750,180763	750,179460
750,0	750,177296	750,177762	750,178492	750,178280	750,176588
635,0	635,175757	635,177089	635,177368	635,177078	635,175367
510,0	510,158779	510,159513	510,163323	510,159485	510,157864
385,0	385,144025	385,144385	385,144412	385,144308	385,142985
260,0	260,126258	260,126558	260,126530	260,126502	260,125070
135,0	135,038643	135,038535	135,040255	135,039906	135,040791
10,0	9,998146	9,997790	9,998465	9,997686	9,996770

πίνακας 6.5: αποτελέσματα από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x

Σφάλματα μετατόπισης σε κάθε θέση:

Position Measurement, Error Analysis (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_x_axis3.lin
 Machine :HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα/OPD
 Start Position: (10;278,94;0) End Position: (750;278,94;0)
 Total Travel = 740, Points = 7 No of Runs= 5
 Pressure: 743,92 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,12 Material Temp: 26,03 MTE = ,999927
 Max Error: 0,181207 Min Error: -0,003230 Mean: 0,117935

Position,mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
10,0	0,000006	-0,000922	-0,002531	-0,000410	-0,001239
135,0	0,039824	0,039615	0,039411	0,041343	0,040659
260,0	0,127144	0,127884	0,127703	0,128502	0,126351
385,0	0,144845	0,143018	0,145370	0,145614	0,144063
510,0	0,159706	0,157654	0,160458	0,158076	0,159424
635,0	0,178087	0,179182	0,179325	0,179066	0,177789
750,0	0,180112	0,180844	0,181207	0,180763	0,179460
750,0	0,177296	0,177762	0,178492	0,178280	0,176588
635,0	0,175757	0,177089	0,177368	0,177078	0,175367
510,0	0,158779	0,159513	0,163323	0,159485	0,157864
385,0	0,144025	0,144385	0,144412	0,144308	0,142985
260,0	0,126258	0,126558	0,126530	0,126502	0,125070
135,0	0,038643	0,038535	0,040255	0,039906	0,040791
10,0	-0,001854	-0,002210	-0,001535	-0,002314	-0,003230

πίνακας 6.6: σφάλματα θέσεως από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x

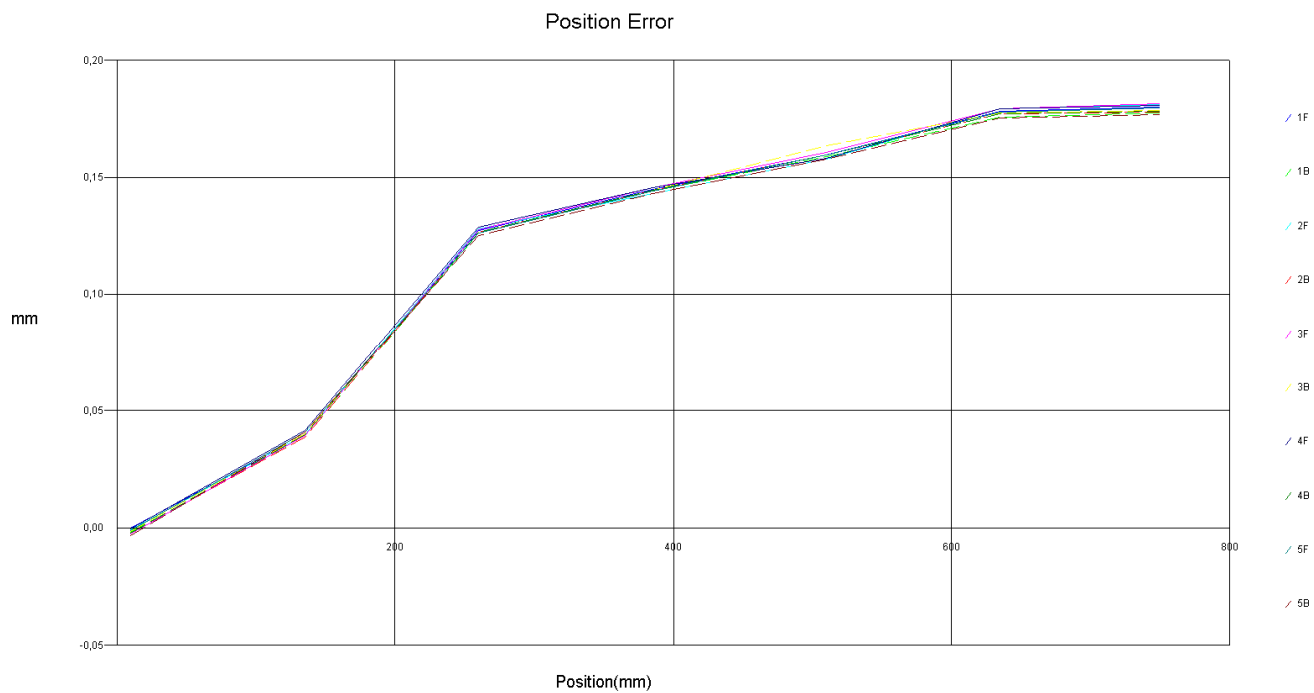
Ανάλυση κατά ISO 230-2 (1997):

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_x_axis3.lin
 Machine :HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα/OPD
 Start Position: (10;278,94;0) End Position: (750;278,94;0)
 Total Travel = 740, Points = 7 No of Runs= 5
 Pressure: 743,92 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,12 Material Temp: 26,03 MTE = ,999927

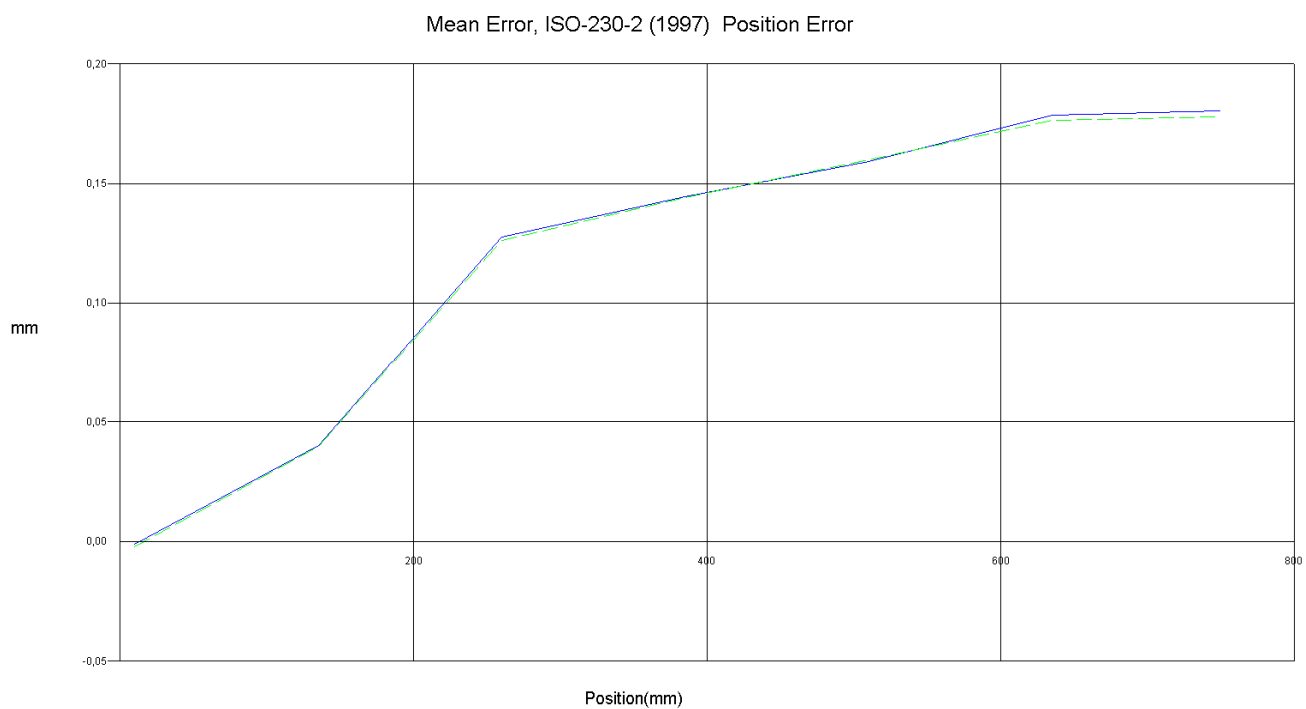
Position,mm	Mean, mm	2 SIGMA, mm
10,0	-0,001019	0,001940
135,0	0,040171	0,001618
260,0	0,127517	0,001624
385,0	0,144582	0,002114
510,0	0,159064	0,002334
635,0	0,178690	0,001401
750,0	0,180477	0,001384
750,0	0,177684	0,001538
635,0	0,176532	0,001807
510,0	0,159793	0,004170
385,0	0,144023	0,001201
260,0	0,126184	0,001268
135,0	0,039626	0,001996
10,0	-0,002228	0,001277

Reversal value, B= 0,002793 (at point=6)
 Mean reversal value, = 0,001124
 Range mean bidirectional positional deviation,
 M=0,180704
 Systematic deviation of positioning, E=
 0,181496 [0,180477, -0,001019] (Forward),
 0,179912 [0,177684, -0,002228] (Backward),
 0,182706 [0,180477, -0,002228] (Bi-directional).
 Repeatability of positioning, R=
 0,004668 (at point=4) (Forward),
 0,008339 (at point=4) (Backward),
 0,007233 (at point=4) (Bi-directional).
 Accuracy, A=
 0,184821 [0,181861, -0,002959] (Forward),
 0,182728 [0,179222, -0,003506] (Backward),
 0,185367 [0,181861, -0,003506] (Bi-directional).

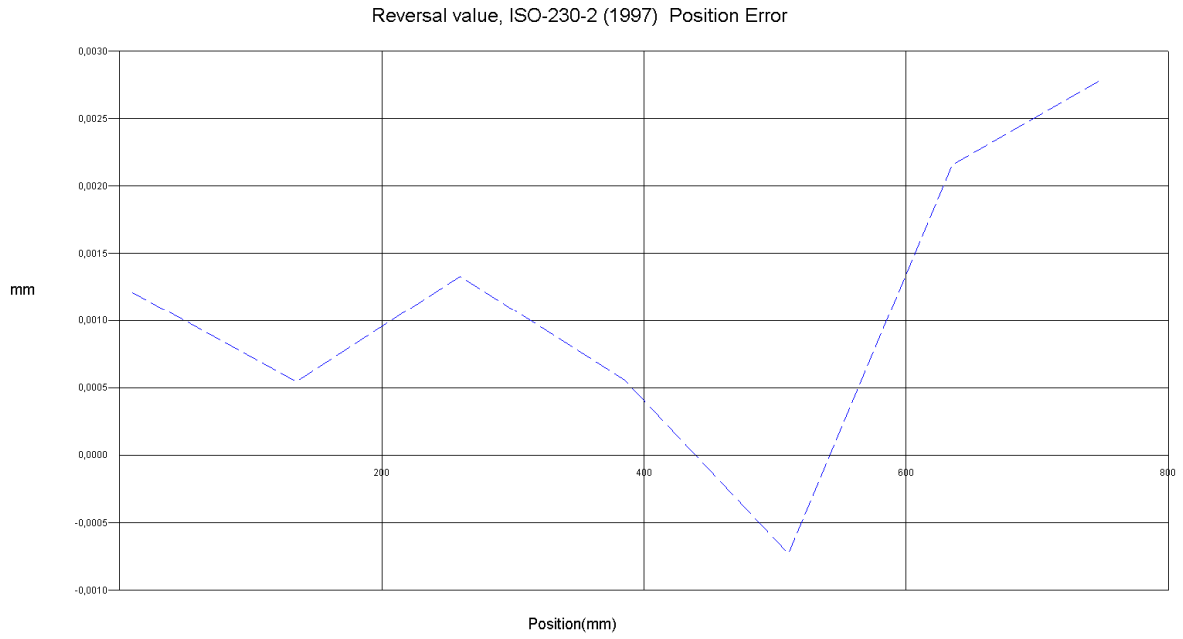
πίνακας 6.7: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x



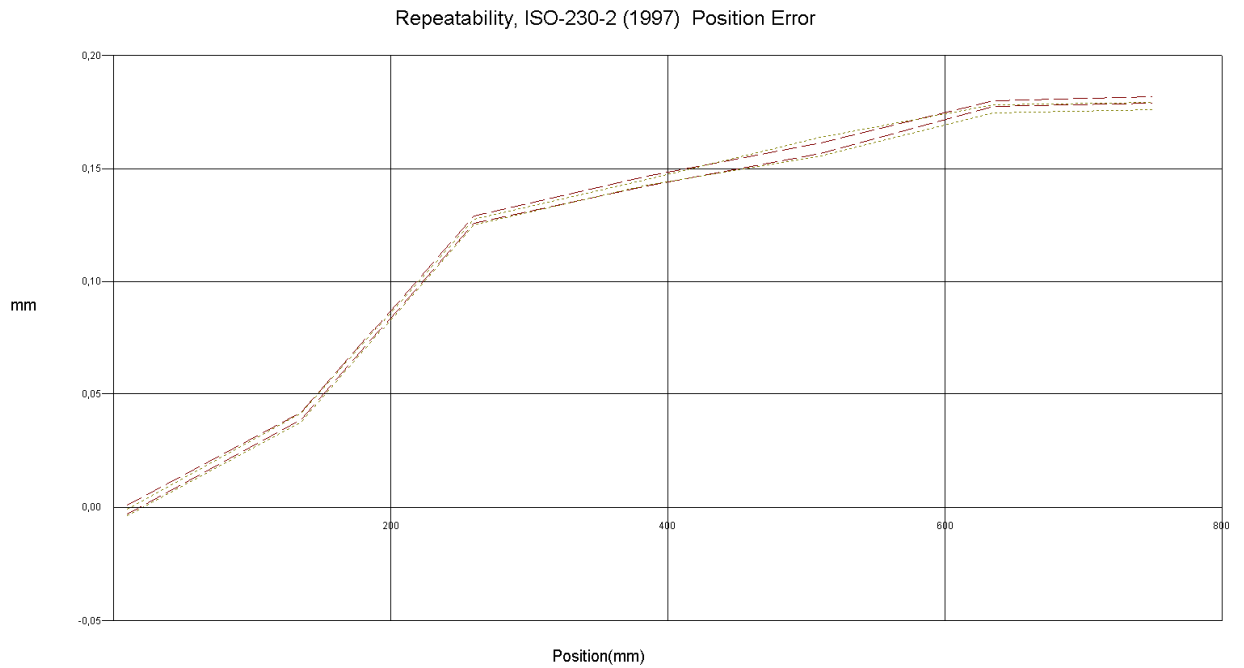
γράφημα 6.1: σφάλμα θέσης – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)



γράφημα 6.2: μέσο σφάλμα –θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)



γράφημα 6.3: αντιστρεψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)



γράφημα 6.4: επαναληψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)

B. Μετρήσεις κατά μήκος του άξονα x, με το κάτοπτρο στην θέση y=278.940mm και Abbé offset R₂=352,6mm

Αποτελέσματα μετρήσεων

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_x_axis4.lin
 Machine : HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα/OPD
 Start Position: (10;278,94;0) End Position: (750;278,94;0)
 Total Travel = 740, Points = 7 No of Runs= 5
 Pressure: 743,04 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,16 Material Temp: 26,03 MTE = ,999927

Position,mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
10,0	10,000210	10,001025	9,998685	9,998463	9,997065
135,0	135,042635	135,043360	135,040708	135,038262	135,039823
260,0	260,133013	260,132379	260,130595	260,130686	260,131345
385,0	385,151330	385,150143	385,149043	385,148711	385,149496
510,0	510,163521	510,166431	510,165123	510,164456	510,164641
635,0	635,186327	635,185081	635,184035	635,182867	635,183591
750,0	750,187617	750,186120	750,185606	750,185006	750,185509
750,0	750,184726	750,183089	750,182586	750,182554	750,182590
635,0	635,183921	635,182374	635,181646	635,181208	635,181263
510,0	510,165940	510,164029	510,163521	510,162953	510,162845
385,0	385,150310	385,148852	385,148009	385,147812	385,147480
260,0	260,132287	260,130986	260,129815	260,129364	260,129152
135,0	135,042337	135,040048	135,039450	135,038876	135,037821
10,0	9,999786	9,997634	9,997457	9,996786	9,996146

πίνακας 6.8: αποτελέσματα από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x

Σφάλματα μετατόπισης σε κάθε θέση:

Position Measurement, Error Analysis (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_x_axis4.lin
 Machine : HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα/OPD
 Start Position: (10;278,94;0) End Position: (750;278,94;0)
 Total Travel = 740, Points = 7 No of Runs= 5
 Pressure: 743,04 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,16 Material Temp: 26,03 MTE = ,999927
 Max Error: 0,187617 Min Error: -0,003854 Mean: 0,121551

Position, mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
10,0	0,000210	0,001025	-0,001315	-0,001537	-0,002935
135,0	0,042635	0,043360	0,040708	0,038262	0,039823
260,0	0,133013	0,132379	0,130595	0,130686	0,131345
385,0	0,151330	0,150143	0,149043	0,148711	0,149496
510,0	0,163521	0,166431	0,165123	0,164456	0,164641
635,0	0,186327	0,185081	0,184035	0,182867	0,183591
750,0	0,187617	0,186120	0,185606	0,185006	0,185509
750,0	0,184726	0,183089	0,182586	0,182554	0,182590
635,0	0,183921	0,182374	0,181646	0,181208	0,181263
510,0	0,165940	0,164029	0,163521	0,162953	0,162845
385,0	0,150310	0,148852	0,148009	0,147812	0,147480
260,0	0,132287	0,130986	0,129815	0,129364	0,129152
135,0	0,042337	0,040048	0,039450	0,038876	0,037821
10,0	-0,000214	-0,002366	-0,002543	-0,003214	-0,003854

πίνακας 6.9: : σφάλματα θέσεως από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x

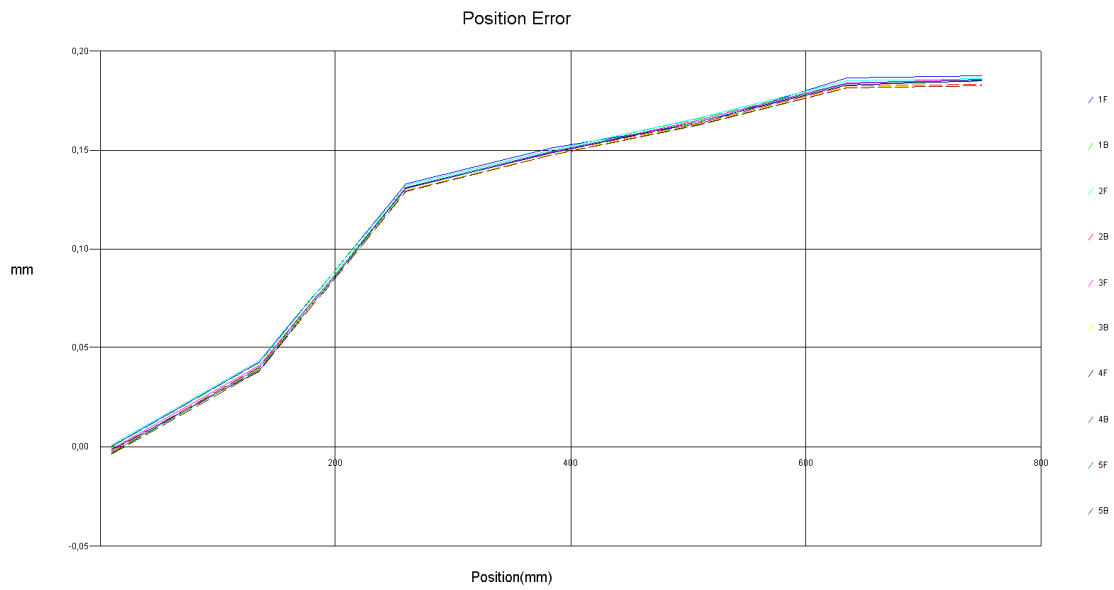
Ανάλυση κατά ISO 230-2 (1997):

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_x_axis4.lin
 Machine : HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα/OPD
 Start Position: (10;278,94;0) End Position: (750;278,94;0)
 Total Travel = 740, Points = 7 No of Runs= 5
 Pressure: 743,04 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,16 Material Temp: 26,03 MTE = ,999927

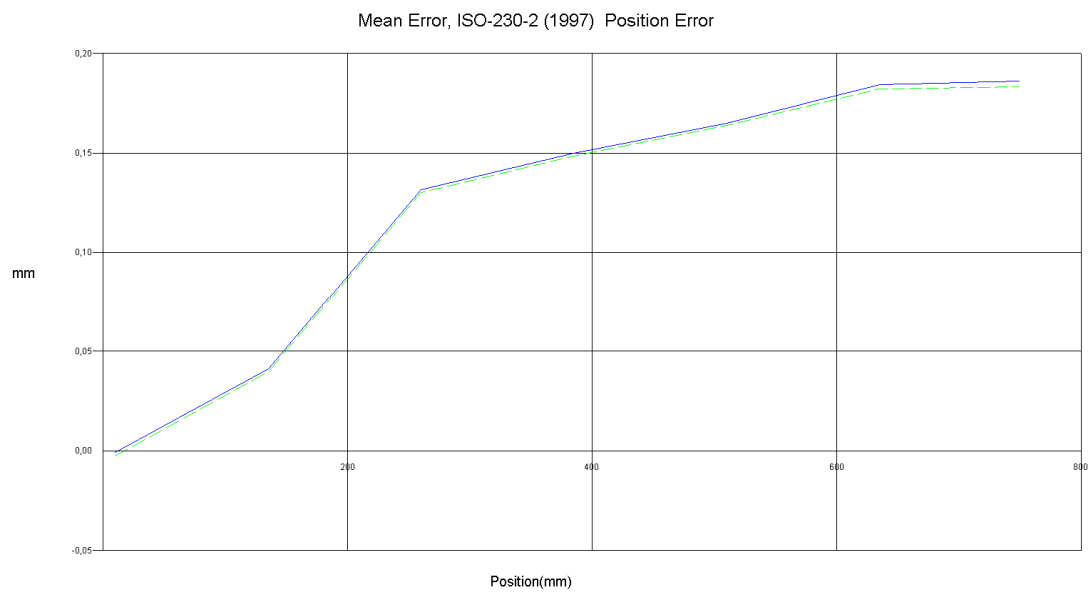
Position, mm	Mean, mm	2_SIGMA, mm
10,0	-0,000910	0,003107
135,0	0,040958	0,004147
260,0	0,131603	0,002124
385,0	0,149745	0,002073
510,0	0,164835	0,002131
635,0	0,184380	0,002704
750,0	0,185972	0,002002
750,0	0,183109	0,001862
635,0	0,182083	0,002256
510,0	0,163857	0,002515
385,0	0,148492	0,002271
260,0	0,130321	0,002616
135,0	0,039707	0,003368
10,0	-0,002438	0,002751

Reversal value, B= 0,002863 (at point=6)
 Mean reversal value, = 0,001636
 Range mean bidirectional positional deviation,
 M=0,186215
 Systematic deviation of positioning, E=
 0,186882 (0,185972, -0,000910) (Forward),
 0,185547 (0,183109, -0,002438) (Backward),
 0,188410 (0,185972, -0,002438) (Bi-directional).
 Repeatability of positioning, R=
 0,008294 (at point=1) (Forward),
 0,006737 (at point=1) (Backward),
 0,008766 (at point=1) (Bi-directional).
 Accuracy, A=
 0,191992 (0,187974, -0,004018) (Forward),
 0,190159 (0,184970, -0,005189) (Backward),
 0,193163 (0,187974, -0,005189) (Bi-directional).

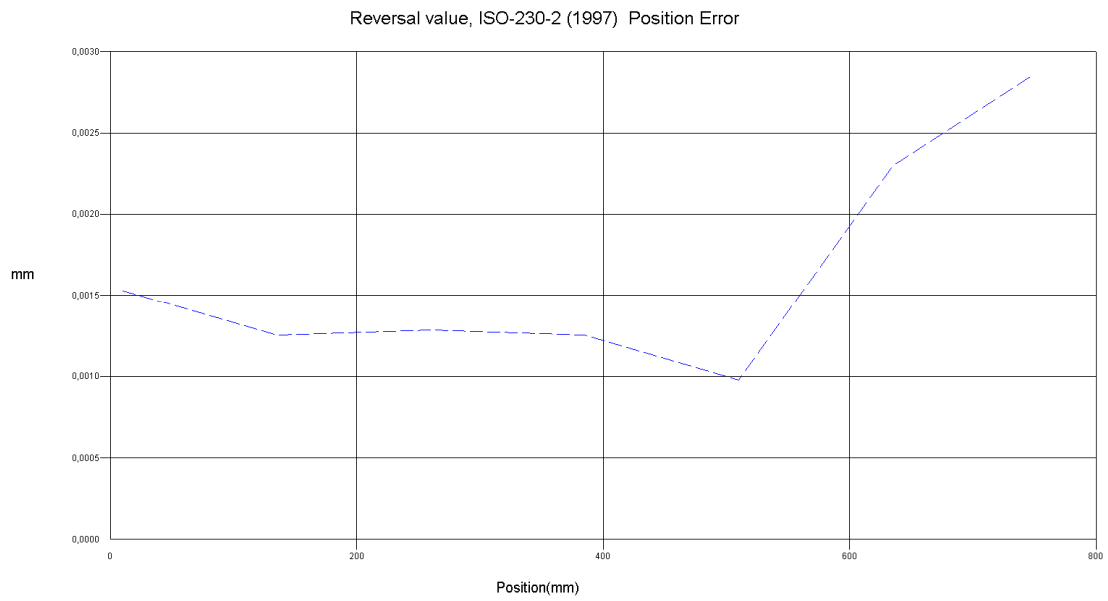
πίνακας 6.10: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x



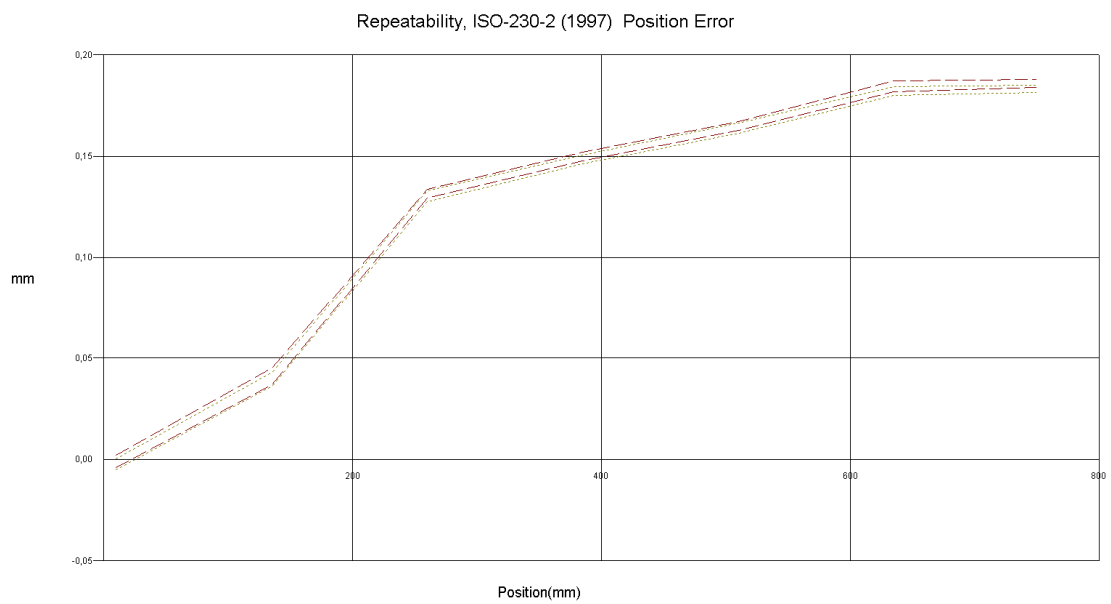
γράφημα 6.5: σφάλμα θέσης – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)



γράφημα 6.6: μέσο σφάλμα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)



γράφημα 6.7: αντιστρεψιμότητα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)



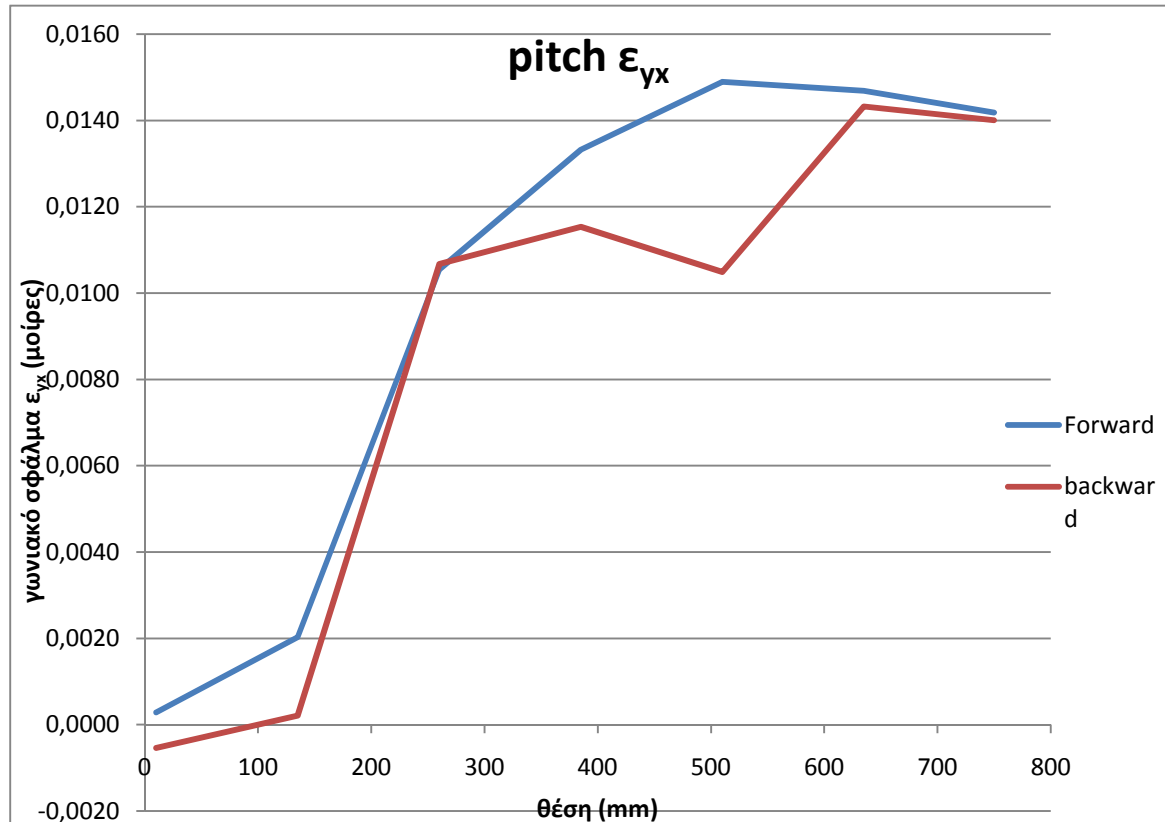
γράφημα 6.8: επαναληψιμότητα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x)

6.7.1.2 Ανάλυση κατά άξονα x

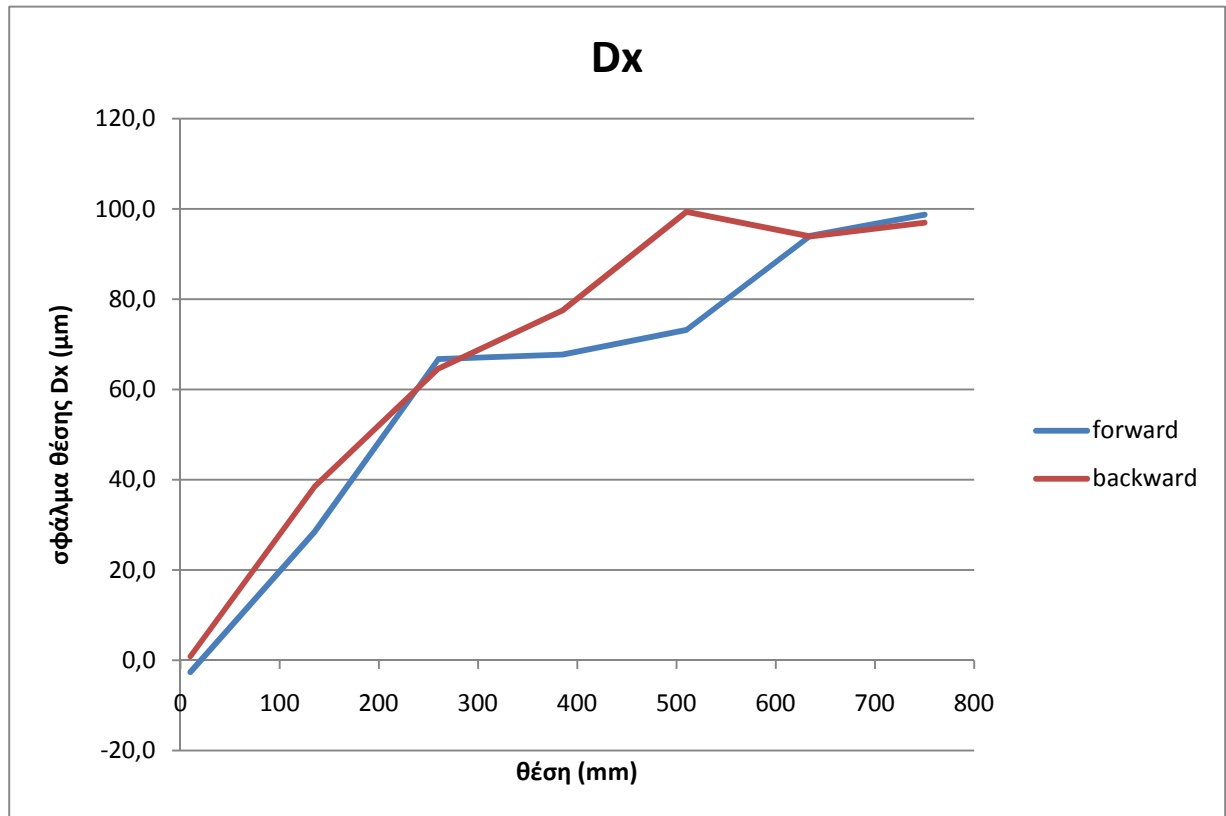
A. Υπολογισμός σφάλματος θέσης D_x και γωνιακού σφάλματος pitch ϵ_{yx}

Θέση (mm)	Dx1 (μm)	R1 (mm)	Dx2(μm)	R2(mm)	ϵ_{yx} (degrees)	Dx (μm)
10	-1,019	330,4	-0,91	352,6	0,000281317	-2,64123423
135	40,171	330,4	40,958	352,6	0,002031161	28,45817117
260	127,517	330,4	131,603	352,6	0,01054552	66,70554054
385	144,582	330,4	149,745	352,6	0,01332514	67,74167568
510	159,064	330,4	164,835	352,6	0,014894322	73,17488288
635	178,69	330,4	184,38	352,6	0,01468527	94,0063964
750	180,477	330,4	185,972	352,6	0,014181996	98,69555856
750	177,684	330,4	183,109	352,6	0,014001334	96,94436036
635	176,532	330,4	182,083	352,6	0,014326526	93,91711712
510	159,793	330,4	163,857	352,6	0,010488741	99,30896396
385	144,023	330,4	148,492	352,6	0,011534002	77,5113964
260	126,184	330,4	130,321	352,6	0,010677146	64,61351351

πίνακας 6.11: εύρεση σφάλματος θέσης και γωνιακού σφάλματος pitch ϵ_{yx} κατά μήκος του άξονα x



γράφημα 6.9: γωνιακό σφάλμα pitch ϵ_{yx} – θέση κατά μήκος του άξονα x



γράφημα 6.10: σφάλμα θέσης Dx – θέση κατά μήκος του άξονα x

B. Παράμετροι Επαναληψιμότητας και Αντιστρεψιμότητας

Παράμετροι που προκύπτουν από τις δύο μετρήσεις

	1 ^η μέτρηση	2 ^η μέτρηση	Μέση Τιμή
R forward	4.6μm	8.2μm	6.4μm
R backward	8.3μm	6.7μm	7.5 μm
R bi-directional	7.2μm	8.7μm	7.95 μm
B	2.7μm	2.8μm	2.75 μm
	1.1μm	1.6μm	1.35 μm

πίνακας 6.12: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα x που προκύπτουν από τις δύο μετρήσεις

Παράμετροι που προκύπτουν από μετρήσεις σε διάφορες θέσεις y και Abbé offset.

	1 ^η μέτρηση	2 ^η μέτρηση	3 ^η μέτρηση	Μέση Τιμή
R forward	6.9μm	7.2μm	5.2μm	6.43
R backward	7.7μm	2.8μm	6.0μm	5.50
R bi-directional	9.7μm	5.4μm	6.1μm	7.06
B	2.8μm	2.7μm	2.7μm	2.73
	1.9μm	1.1μm	1.5μm	1.5

πίνακας 6.13: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα x που προκύπτουν από μετρήσεις σε διάφορες θέσεις y και Abbé offset

6.7.1.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων άξονα x

Το σφάλμα θέσης κυμαίνεται από -2.6 μm έως 99.3 μm . Το εύρος αυτό ξεπερνά την ενδεικτική τιμή του κατασκευαστή για την ακρίβεια, η οποία είναι $\pm 10\mu\text{m}$. Και στην περίπτωση του γραμμικού σφάλματος θέσης παρατηρείται η τάση αύξησης του σφάλματος κατά μήκος του άξονα. Πρέπει να επισημανθεί ότι για εργασίες στην περιοχή $x=0\text{mm}$ με $x=-250\text{mm}$ η εργαλειομηχανή λειτουργεί με χειρότερη ακρίβεια έως 60 μm , που μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικό.

Η δι-κατευθυντική ακρίβεια της πρώτης μέτρησης είναι 185.3 μm ενώ της δεύτερης 193.1 μm . Η διαφορά 7.8 μm στην τιμή της παραμέτρου της ακρίβειας δικαιολογείται από την ύπαρξη γωνιακού σφάλματος pitch.

Το γωνιακό σφάλμα ε_{yx} κυμαίνεται από 0.00028° έως 0,014894°, και αυξάνεται κατά μήκος του άξονα. Γενικά θεωρείται πως σφάλματα που κυμαίνονται έως τις 0,0111° έχουν ελέγξιμες επιπτώσεις στην εργαλειομηχανή [16]. Οπότε στον άξονα x της συγκεκριμένης εργαλειομηχανής ίσως πρέπει να μας ανησυχεί περισσότερο το σφάλμα που εμφανίζεται μετά την θέση 300mm του άξονα. Σε κάθε περίπτωση όμως, εφόσον η εργαλειομηχανή δεν χρησιμοποιείται παρά μόνο για εκπαιδευτικούς σκοπούς, οι τιμές του γωνιακού σφάλματος ε_{yx} δεν θεωρούνται σημαντικές.

Οι συντελεστές που υπολογίστηκαν από τις δύο μετρήσεις δεν αφήνουν περιθώρια για αμφισβήτηση της επαναληψιμότητας ή αντιστρεψιμότητας της μηχανής. Επιπλέον μετρήσεις που έγιναν για να επαληθευτούν οι παράμετροι σε διαφορετικές θέσεις y και τυχαία offset, επιβεβαιώνουν τις αρχικές τιμές των παραμέτρων. Ο μέσος όρος των τιμών για την δικατευθυντική επαναληψιμότητα του άξονα x της εργαλειομηχανής από τις συνολικά 5 μετρήσεις είναι 7,24 μm (με τυπική απόκλιση: 1,55 μm). Η τιμή αυτή δεν θεωρείται ότι διαφέρει σημαντικά από την τιμή 5 μm που δίνει ο κατασκευαστής ως επαναληψιμότητα της εργαλειομηχανής. Η τιμή της αντιστρεψιμότητας είναι άριστη, κι αυτό ήταν αναμενόμενο αφού από τα γραφήματα (1), (5) και (10) παρατηρούμε πως οι καμπύλες για την προσέγγιση ως προς την μία ή την άλλη κατεύθυνση συμπίπτουν.

6.7.2 Άξονας y

6.7.2.1 Μετρήσεις κατά τον άξονα y

A. Μετρήσεις κατά μήκος του άξονα y, με το κάτοπτρο στην θέση x=67.400mm και Abbé offset R₁=310.25mm

Αποτελέσματα μετρήσεων:

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File=H:\πειραματικο\τελδικές\κατά μήκος_y_axis.lin
Machine : HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα/OPD
Start Position: (67,4;10;0) End Position: (67,4;290;0)
Total Travel = 280, Points = 6 No of Runs= 5
Pressure: 743,04 Humidity: 50,00 Air Temp: 25,98 Material Temp: 26,18 MTE = ,999925

Position, mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
10,0	10,000018	9,999608	9,999569	9,999591	9,999830
60,0	59,994283	59,994351	59,994324	59,994707	59,994574
110,0	109,984283	109,984157	109,984163	109,984498	109,984595
160,0	159,977085	159,977147	159,977351	159,977337	159,972923
210,0	210,024585	210,029294	210,029529	210,029176	210,029183
290,0	290,046901	290,047393	290,047580	290,042650	290,047270
290,0	290,042674	290,042868	290,042729	290,042953	290,043026
210,0	210,025532	210,025120	210,025476	210,025211	210,025463
160,0	159,973507	159,973170	159,973410	159,973597	159,973592
110,0	109,980506	109,980748	109,980842	109,980911	109,980625
60,0	59,990276	59,990017	59,990865	59,990934	59,989873
10,0	9,995278	9,995071	9,995420	9,995695	9,995472

πίνακας 6.14: αποτελέσματα από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y

Σφάλματα μετατόπισης σε κάθε θέση:

Position Measurement, Error Analysis (mm) File=H:\πειραματικο\τελδικές\κατά μήκος_y_axis.lin
 Machine : HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα/OPD
 Start Position: (67,4;10;0) End Position: (67,4;290;0)
 Total Travel = 280, Points = 6 No of Runs= 5
 Pressure: 743,04 Humidity: 50,00 Air Temp: 25,98 Material Temp: 26,18 MTE = ,999925
 Max Error: 0,047580 Min Error: -0,027077 Mean: 0,003147

Position, mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
10,0	0,000018	-0,000392	-0,000431	-0,000409	-0,000170
60,0	-0,005717	-0,005649	-0,005676	-0,005293	-0,005426
110,0	-0,015717	-0,015843	-0,015837	-0,015502	-0,015405
160,0	-0,022915	-0,022853	-0,022649	-0,022663	-0,027077
210,0	0,024585	0,029294	0,029529	0,029176	0,029183
290,0	0,046901	0,047393	0,047580	0,042650	0,047270
290,0	0,042674	0,042868	0,042729	0,042953	0,043026
210,0	0,025532	0,025120	0,025476	0,025211	0,025463
160,0	-0,026493	-0,026830	-0,026590	-0,026403	-0,026408
110,0	-0,019494	-0,019252	-0,019158	-0,019089	-0,019375
60,0	-0,009724	-0,009983	-0,009135	-0,009066	-0,010127
10,0	-0,004722	-0,004929	-0,004580	-0,004305	-0,004528

πίνακας 6.15: : σφάλματα θέσεως από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y

Ανάλυση κατά ISO 230-2 (1997):

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File=H:\πειραματικο\τελδικές\κατά μήκος_y_axis.lin
 Machine : HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα/OPD
 Start Position: (67,4;10;0) End Position: (67,4;290;0)
 Total Travel = 280, Points = 6 No of Runs= 5
 Pressure: 743,04 Humidity: 50,00 Air Temp: 25,98 Material Temp: 26,18 MTE = ,999925

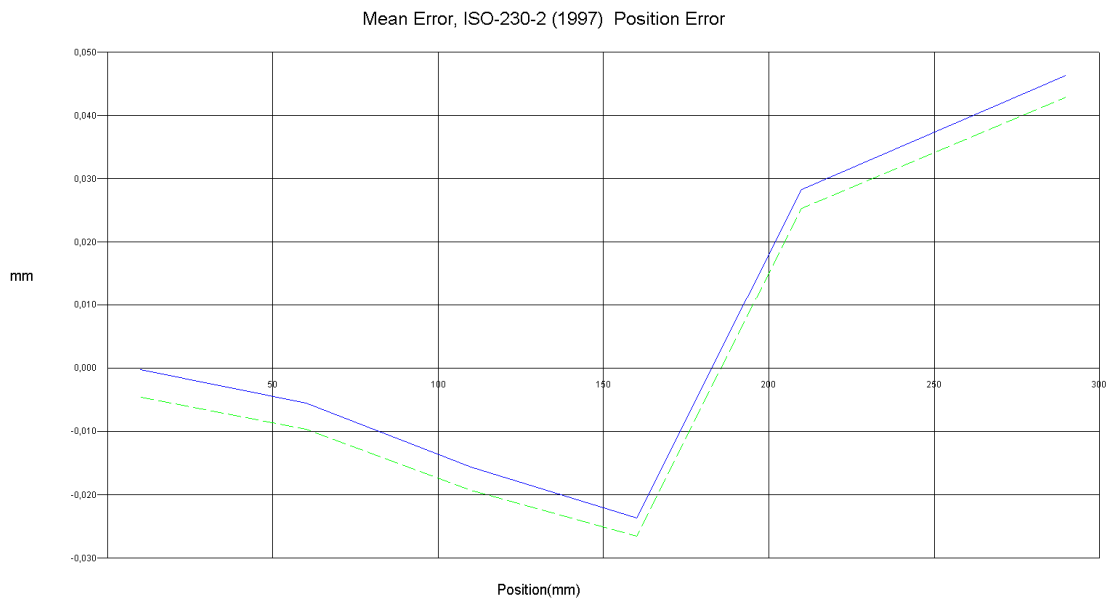
Position, mm	Mean, mm	2_SIGMA, mm
10,0	-0,000277	0,000391
60,0	-0,005552	0,000367
110,0	-0,015661	0,000398
160,0	-0,023631	0,003859
210,0	0,028353	0,004222
290,0	0,046359	0,004176
290,0	0,042850	0,000296
210,0	0,025360	0,000365
160,0	-0,026545	0,000353
110,0	-0,019274	0,000327
60,0	-0,009607	0,000970
10,0	-0,004612	0,000464

Reversal value, B= 0,004336 (at point=0)
 Mean reversal value, = 0,003570
 Range mean bidirectional positional deviation,
 M=0,069692
 Systematic deviation of positioning, E=
 0,069990 (0,046359, -0,023631) (Forward),
 0,069395 (0,042850, -0,026545) (Backward),
 0,072904 (0,046359, -0,026545) (Bi-directional).
 Repeatability of positioning, R=
 0,008445 (at point=4) (Forward),
 0,001940 (at point=1) (Backward),
 0,007982 (at point=5) (Bi-directional).
 Accuracy, A=
 0,078026 (0,050535, -0,027491) (Forward),
 0,070044 (0,043146, -0,026898) (Backward),
 0,078026 (0,050535, -0,027491) (Bi-directional).

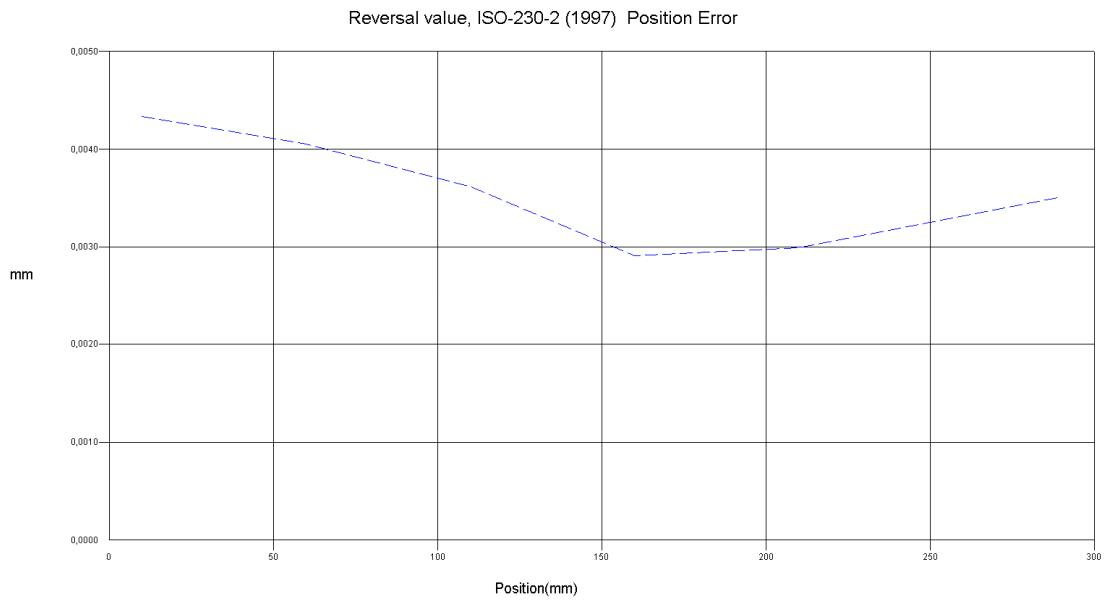
πίνακας 6.16: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y



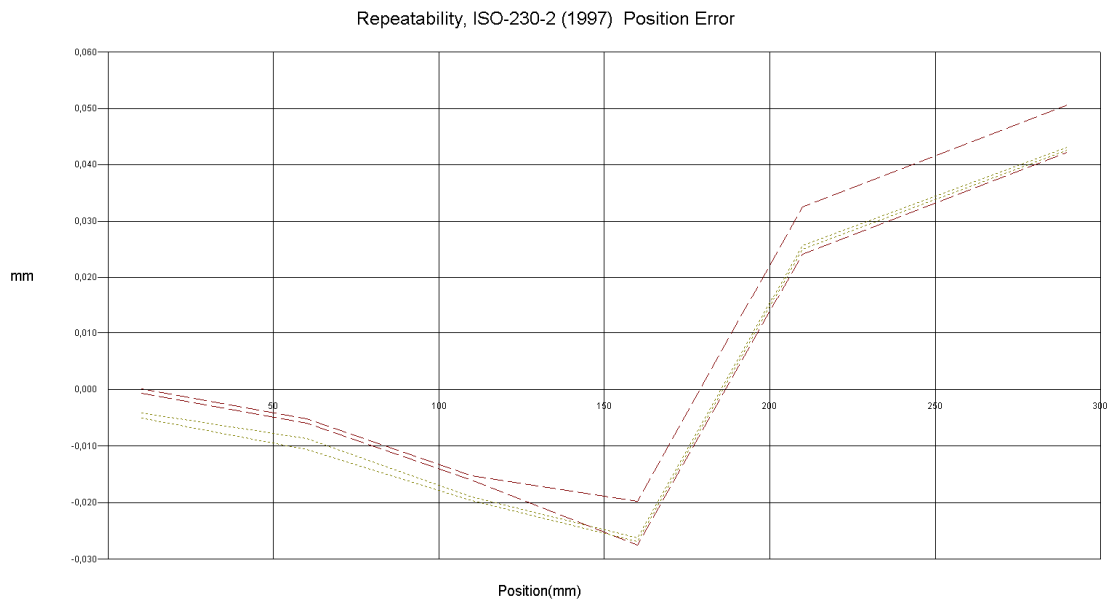
γράφημα 6.11: σφάλμα θέσης – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)



γράφημα 6.12: μέσο σφάλμα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)



γράφημα 6.13: αντιστρεψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)



γράφημα 6.14: επαναληψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)

B. Μετρήσεις κατά μήκος του άξονα y, με το κάτοπτρο στην θέση x=67.400mm και Abbé offset R₂=373.3mm

Αποτελέσματα μετρήσεων:

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_y_axis2.lin
 Machine : HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα/OPD
 Start Position: (67,4;10;0) End Position: (67,4;290;0)
 Total Travel = 280, Points = 6 No of Runs= 5
 Pressure: 743,13 Humidity: 50,00 Air Temp: 25,98 Material Temp: 26,17 MTE = ,999926

Position,mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
10,0	10,000007	10,000578	10,001882	10,000079	10,003883
60,0	59,996355	59,997445	59,998593	60,000546	60,000447
110,0	109,985999	109,986978	109,988290	109,990784	109,986108
160,0	159,979014	159,976365	159,982979	159,984179	159,984411
210,0	210,035716	210,038342	210,037703	210,041825	210,037843
290,0	290,055844	290,057789	290,056384	290,060494	290,060614
290,0	290,051300	290,053413	290,052337	290,055933	290,056178
210,0	210,031869	210,035039	210,032564	210,037439	210,037970
160,0	159,975693	159,976959	159,976145	159,980258	159,980818
110,0	109,982758	109,984240	109,984165	109,986581	109,987450
60,0	59,993105	59,994136	59,994872	59,996404	59,997004
10,0	9,996165	9,997780	10,000027	9,999741	9,999845

πίνακας 6.17: αποτελέσματα από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y

Σφάλματα μετατόπισης σε κάθε θέση:

Position Measurement, Error Analysis (mm) File:H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_y_axis2.lin
 Machine :HAAS S/N :Tool Room Mill By :ελευθερία πάλλα/OPD
 Start Position: (67,4;10;0) End Position: (67,4;290;0)
 Total Travel = 280, Points = 6 No of Runs= 5
 Pressure: 743,13 Humidity: 50,00 Air Temp: 25,98 Material Temp: 26,17 MTE = ,999926
 Max Error: 0,060614 Min Error: -0,024307 Mean: 0,009261

Position, mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
10,0	0,000007	0,000578	0,001882	0,000079	0,003883
60,0	-0,003645	-0,002555	-0,001407	0,000546	0,000447
110,0	-0,014001	-0,013022	-0,011710	-0,009216	-0,013892
160,0	-0,020986	-0,023635	-0,017021	-0,015821	-0,015589
210,0	0,035716	0,038342	0,037703	0,041825	0,037843
290,0	0,055844	0,057789	0,056384	0,060494	0,060614
290,0	0,051300	0,053413	0,052337	0,055933	0,056178
210,0	0,031869	0,035039	0,032564	0,037439	0,037970
160,0	-0,024307	-0,023041	-0,023855	-0,019742	-0,019182
110,0	-0,017242	-0,015760	-0,015835	-0,013419	-0,012550
60,0	-0,006895	-0,005864	-0,005128	-0,003596	-0,002996
10,0	-0,003835	-0,002220	0,000027	-0,000259	-0,000155

πίνακας 6.18: : σφάλματα θέσεως από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y

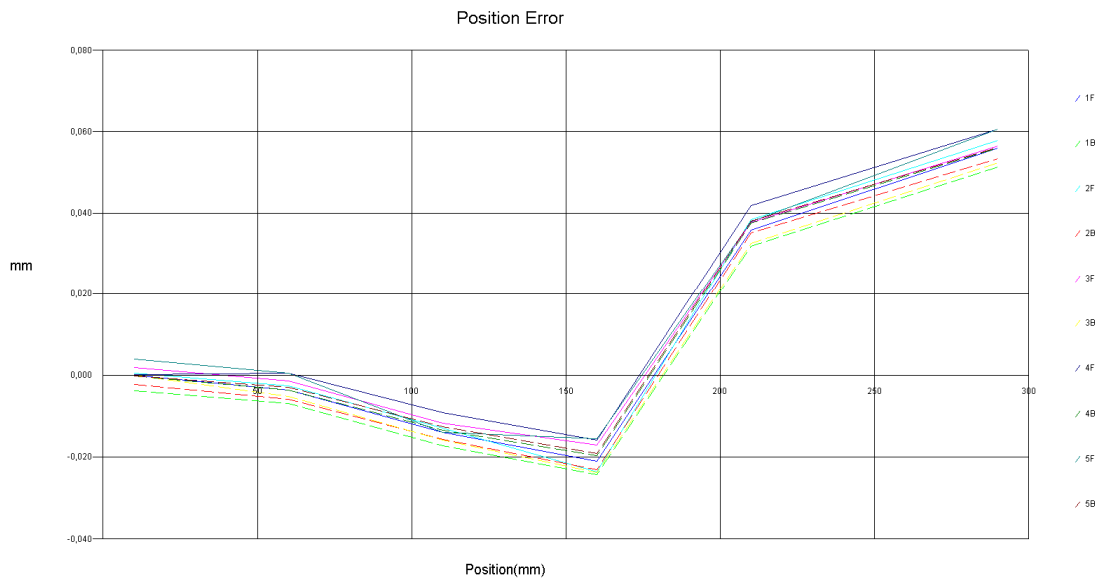
Ανάλυση κατά ISO 230-2 (1997) :

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File:H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_y_axis2.lin
 Machine :HAAS S/N :Tool Room Mill By :ελευθερία πάλλα/OPD
 Start Position: (67,4;10;0) End Position: (67,4;290;0)
 Total Travel = 280, Points = 6 No of Runs= 5
 Pressure: 743,13 Humidity: 50,00 Air Temp: 25,98 Material Temp: 26,17 MTE = ,999926

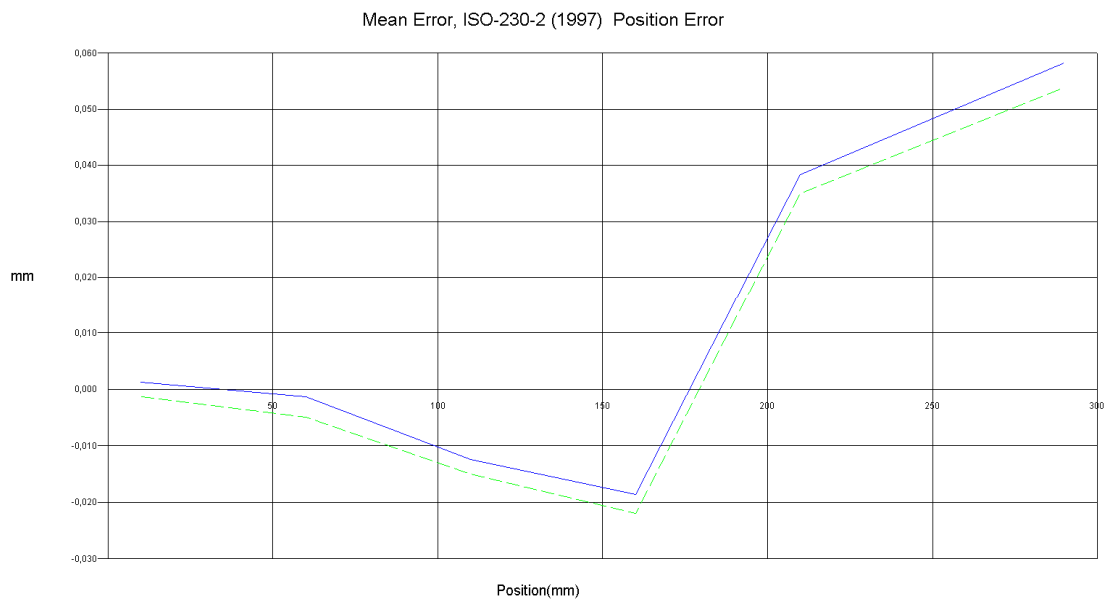
Position, mm	Mean, mm	2_SIGMA, mm
10,0	0,001286	0,003270
60,0	-0,001322	0,003680
110,0	-0,012368	0,003973
160,0	-0,018610	0,007094
210,0	0,038286	0,004435
290,0	0,058225	0,004483
290,0	0,053832	0,004330
210,0	0,034976	0,005523
160,0	-0,022025	0,004783
110,0	-0,014961	0,003847
60,0	-0,004896	0,003208
10,0	-0,001288	0,003380

Reversal value, B= 0,004393 (at point=5)
 Mean reversal value, = 0,003310
 Range mean bidirectional positional deviation,
 M=0,076346
 Systematic deviation of positioning, E=
 0,076836 (0,058225, -0,018610) (Forward),
 0,075857 (0,053832, -0,022025) (Backward),
 0,080250 (0,058225, -0,022025) (Bi-directional).
 Repeatability of positioning, R=
 0,014187 (at point=3) (Forward),
 0,011046 (at point=4) (Backward),
 0,015292 (at point=3) (Bi-directional).
 Accuracy, A=
 0,088413 (0,062709, -0,025704) (Forward),
 0,084970 (0,058162, -0,026808) (Backward),
 0,089517 (0,062709, -0,026808) (Bi-directional).

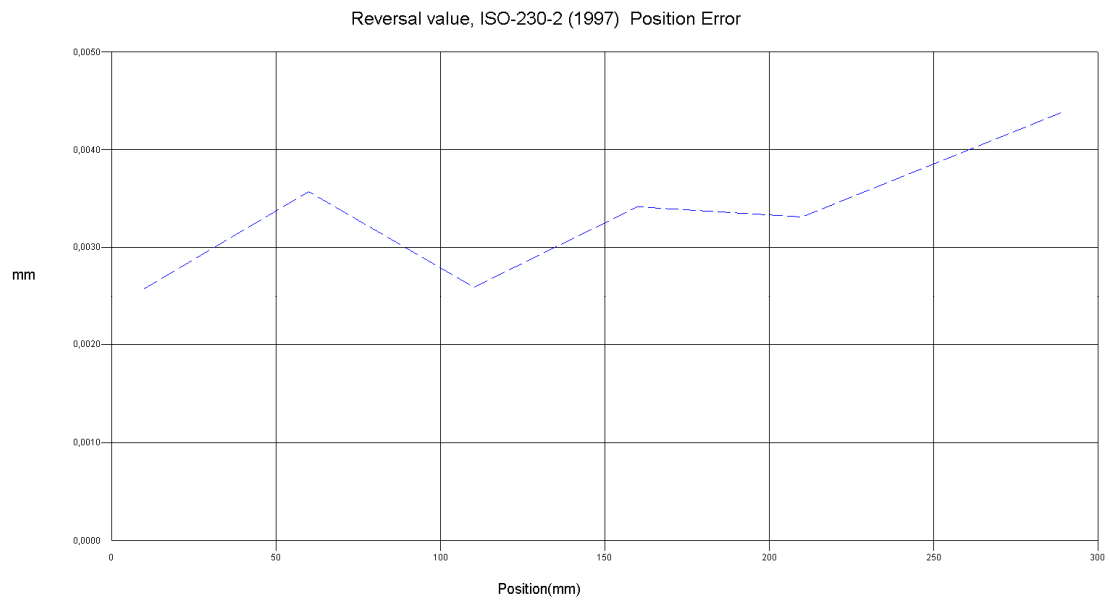
πίνακας 6.19: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y



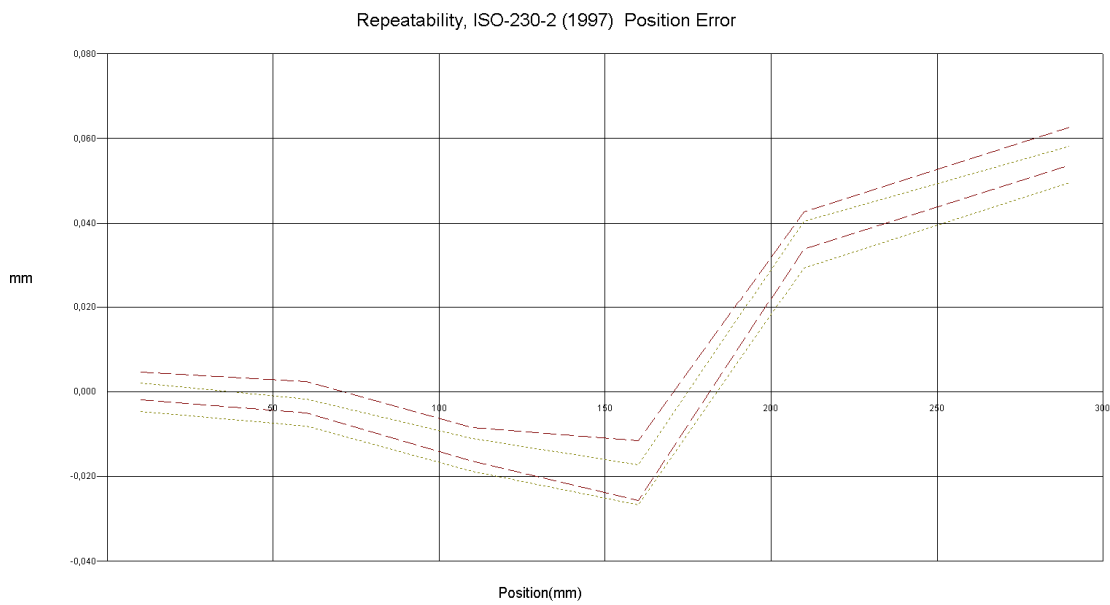
γράφημα 6.15: σφάλμα θέσης – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)



γράφημα 6.16: μέσο σφάλμα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα y)



γράφημα 6.17: αντιστρεψιμότητα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα γ)



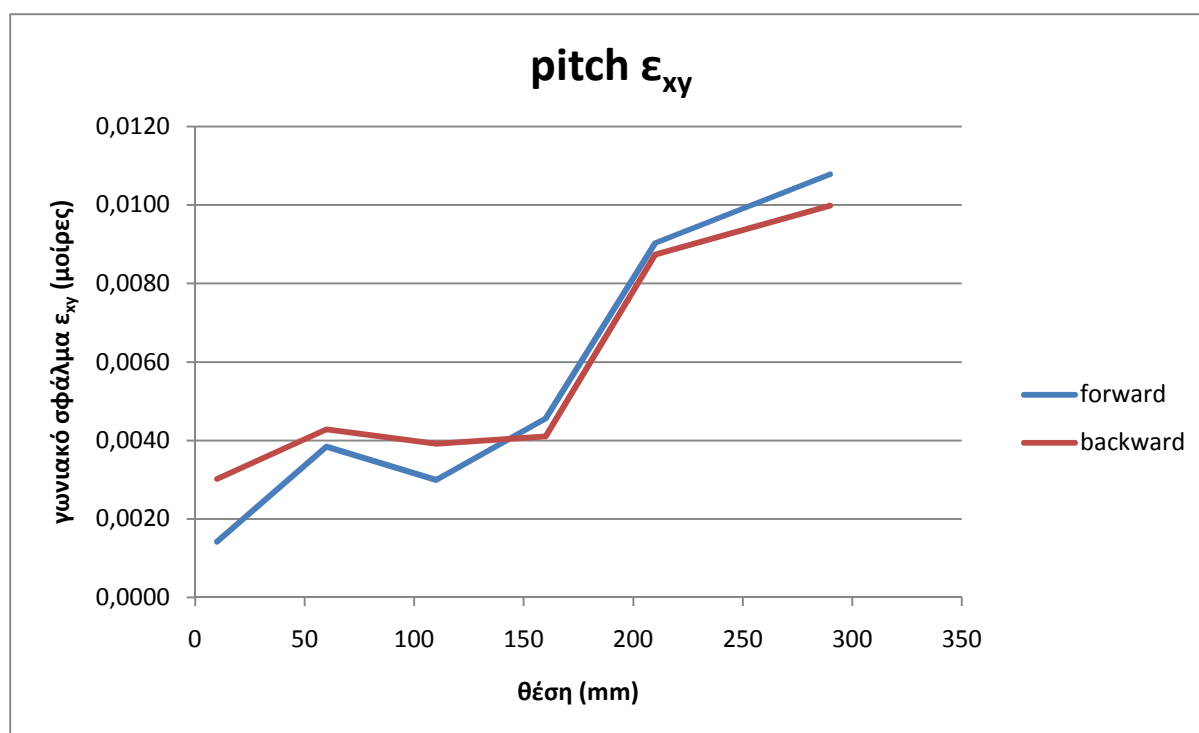
γράφημα 6.18: επαναληψιμότητα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα γ)

6.7.2.2 Ανάλυση κατά άξονα y

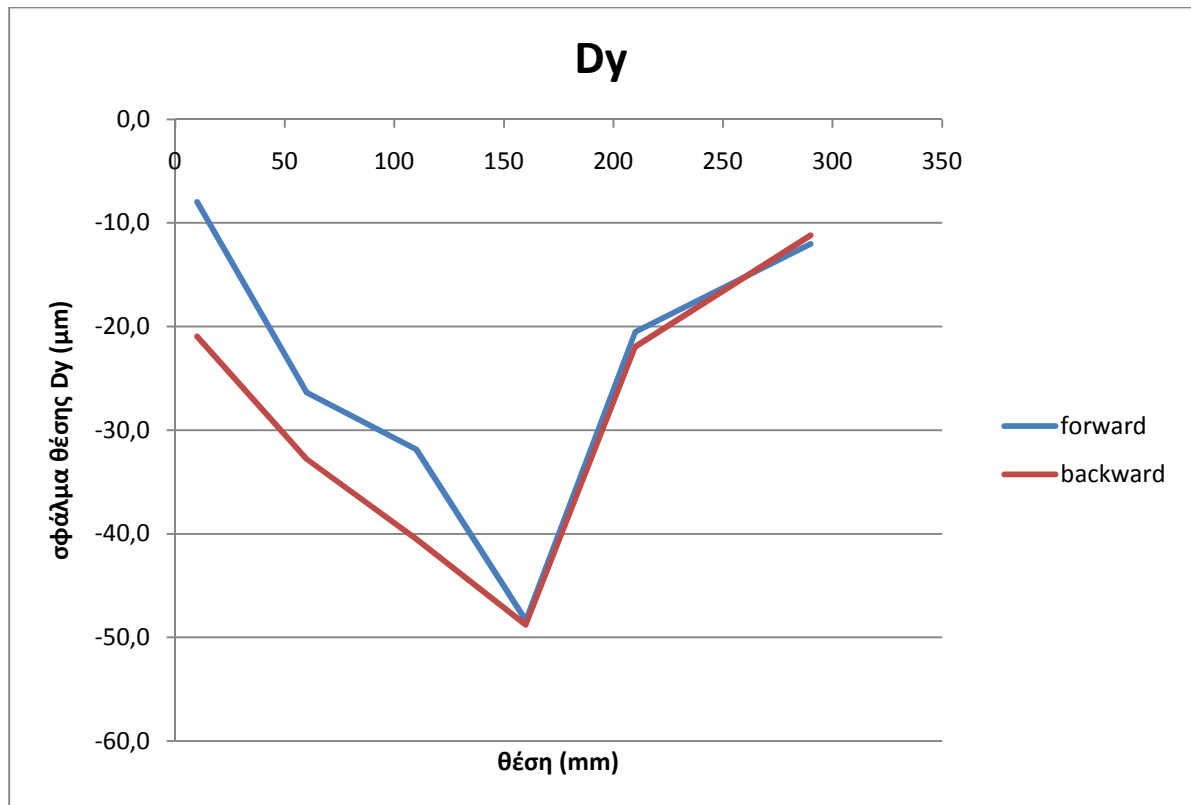
Υπολογισμός σφάλματος θέσης D_y και γωνιακού σφάλματος pitch ϵ_{xy}

Θέση	Dy1(μm)	R1(mm)	Dy2(μm)	R2(mm)	ϵ_{xy} (degree)	Dy(μm)
10	-0,277	310,25	1,286	373,3	0,0014204	-7,96805
60	-5,552	310,25	-1,322	373,3	0,003844	-26,3666
110	-15,661	310,25	-12,368	373,3	0,0029925	-31,8649
160	-23,631	310,25	-18,61	373,3	0,0045628	-48,3378
210	28,353	310,25	38,286	373,3	0,0090265	-20,5243
290	46,359	310,25	58,225	373,3	0,0107831	-12,03
290	42,85	310,25	53,832	373,3	0,0099797	-11,1891
210	25,36	310,25	34,976	373,3	0,0087384	-21,9574
160	-26,545	310,25	-22,025	373,3	0,0041075	-48,7866
110	-19,274	310,25	-14,961	373,3	0,0039194	-40,497
60	-9,607	310,25	-4,896	373,3	0,0042811	-32,7884
10	-4,612	310,25	-1,288	373,3	0,0030206	-20,9684

πίνακας 6.20: εύρεση σφάλματος θέσης και γωνιακού σφάλματος pitch ϵ_{xy} κατά μήκος του άξονα y



γράφημα 6.19: γωνιακό σφάλμα pitch ϵ_{xy} – θέση κατά μήκος του άξονα y)



γράφημα 6.20: σφάλμα θέσης Dy – θέση κατά μήκος του άξονα y

B. Παράμετροι Επαναληψιμότητας και Αντιστρεψιμότητας

Παράμετροι που προκύπτουν από τις δύο μετρήσεις

	1 ^η μέτρηση	2 ^η μέτρηση	Μέση Τιμή
R forward	8.4μm	14.1μm	11.25μm
R backward	1.9μm	11.0μm	6.45μm
R bi-directional	7.9μm	15.25μm	11.58μm
B	4.3μm	4.3μm	4.30μm
	3.5μm	3.3μm	3.40μm

πίνακας 6.21: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα x που προκύπτουν από τις δύο μετρήσεις

Παράμετροι που προκύπτουν από μετρήσεις σε διάφορες θέσεις x και Abbé offset.

	1 ^η μέτρηση	2 ^η μέτρηση	3 ^η μέτρηση	Μέση Τιμή
R forward	16.9μm	9.8μm	7.9μm	11.53μm
R backward	7.9μm	10.1μm	1.1μm	6.36μm
R bi-directional	19.9μm	9.4μm	7.6μm	12.3μm
B	7.5μm	4.5μm	4.3μm	5.43μm
	4.4μm	3. μm	3.8μm	4.00μm

πίνακας 6.22: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα x που προκύπτουν από μετρήσεις σε διάφορες θέσεις x και Abbé offset

6.7.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων άξονα y

Το σφάλμα θέσης κυμαίνεται από -7.96 μm έως -48.78 μm . Το εύρος αυτό ξεπερνά την ενδεικτική τιμή του κατασκευαστή για την ακρίβεια, η οποία είναι $\pm 10\mu\text{m}$. Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί πως το μέγιστο σφάλμα παρατηρείται γύρω από την θέση -160mm του άξονα, ενώ στο υπόλοιπο μήκος η ακρίβεια δεν ξεπερνά τα -40 μm , που κρίνεται ως επαρκής για εκπαιδευτική μηχανή.

Η δι-κατευθυντική ακρίβεια της πρώτης μέτρησης είναι 78 μm ενώ της δεύτερης 89 μm . Η διαφορά 11 μm στην τιμή της παραμέτρου της ακρίβειας δικαιολογείται από την ύπαρξη γωνιακού σφάλματος pitch.

Το γωνιακό σφάλμα ε_{xy} κυμαίνεται από 0.001 $^\circ$ έως 0.0107 $^\circ$, και αυξάνεται κατά μήκος του άξονα. Σε όλο το μήκος του άξονα y το ε_{xy} δεν ξεπερνά τις 0,0111 $^\circ$, οπότε δεν χρειάζεται να ανησυχούμε για σημαντικές επιπτώσεις στην ακρίβεια της μηχανής λόγω του σφάλματος pitch στο y άξονα. Μάλιστα, εφόσον η εργαλειομηχανή δεν χρησιμοποιείται παρά μόνο για εκπαιδευτικούς σκοπούς, οι τιμές του γωνιακού σφάλματος ε_{yx} δεν θεωρούνται σημαντικές.

Οι συντελεστές που υπολογίστηκαν από τις δύο μετρήσεις εκπληρώνουν τις απαιτήσεις της εκπαιδευτικής χρήσης της συγκεκριμένης εργαλειομηχανής. Παρόλα αυτά, η τιμή της επαναληψιμότητας αποκλίνει από την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής. Σύμφωνα και με τις επιπλέον μετρήσεις που πάρθηκαν για να επαληθευτούν οι παράμετροι σε διαφορετικές θέσεις x και τυχαία offset, ο μέσος όρος των τιμών για την δι-κατευθυντική επαναληψιμότητα του άξονα x της εργαλειομηχανής από τις συνολικά 5 μετρήσεις είναι 12.01 μm (με τυπική απόκλιση: 4.81 μm). Η τιμή της αντιστρεψιμότητας είναι ικανοποιητική, αν και δεν κινείται στα άριστα επίπεδα του άξονα x, το οποίο δικαιολογείται βέβαια και λόγω της χειρότερης επαναληψιμότητας στον y.

6.7.3 Άξονας z

6.7.3.1 Μετρήσεις κατά τον άξονα z

A. Μετρήσεις κατά μήκος του άξονα z, με το κάτοπτρο στην θέση $x=215.397\text{mm}$, $y=0\text{mm}$ και Abbé offset $R_1=595.25\text{mm}$

Αποτελέσματα μετρήσεων:

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_z_axis2.lin
Machine : Machine Center S/N :12345 By :OPD
Start Position: (215.397;0;-330) End Position: (215.397;0;115)
Total Travel = 445, Points = 7 No of Runs= 5
Pressure: 744,8 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,27 Material Temp: 26,27 MTE = ,999924

Position,mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
-330,0	-330,000210	-330,009720	-330,016173	-330,022815	-330,030525
-290,0	-289,997796	-290,007473	-290,013980	-290,020582	-290,027566
-205,0	-204,993264	-205,000490	-205,006895	-205,013568	-205,020577
-125,0	-124,986093	-124,994687	-125,001448	-125,007642	-125,014655
-45,0	-44,977504	-44,985608	-44,992192	-44,998633	-45,007482
35,0	35,023455	35,015509	35,009166	35,003155	34,996854
115,0	114,997327	114,990125	114,983678	114,977562	114,971313
115,0	114,995127	114,987637	114,981455	114,975542	114,969079
35,0	35,019227	35,012347	35,005508	34,999489	34,993820
-45,0	-44,983332	-44,990548	-44,997233	-45,003708	-45,007111
-125,0	-124,993554	-125,000462	-125,006943	-125,013866	-125,019647
-205,0	-204,999976	-205,004902	-205,013387	-205,020606	-205,026242
-290,0	-290,008209	-290,015011	-290,021468	-290,028550	-290,032089
-330,0	-330,009442	-330,017798	-330,024767	-330,030037	-330,037877

πίνακας 6.23: αποτελέσματα από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z

Σφάλματα μετατόπισης σε κάθε θέση:

Position Measurement, Error Analysis (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_z_axis2.lin
 Machine : Machine Center S/N : 12345 By : OPD
 Start Position: (215,397;0;-330) End Position: (215,397;0;115)
 Total Travel = 445, Points = 7 No of Runs= 5
 Pressure: 744,8 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,27 Material Temp: 26,27 MTE = ,999924
 Max Error: 0,023455 Min Error: -0,037877 Mean: -0,007814

Position, mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
-330,0	-0,000210	-0,009720	-0,016173	-0,022815	-0,030525
-290,0	0,002204	-0,007473	-0,013980	-0,020582	-0,027566
-205,0	0,006736	-0,000490	-0,006895	-0,013568	-0,020577
-125,0	0,013907	0,005313	-0,001448	-0,007642	-0,014655
-45,0	0,022496	0,014392	0,007808	0,001367	-0,007482
35,0	0,023455	0,015509	0,009166	0,003155	-0,003146
115,0	-0,002673	-0,009875	-0,016322	-0,022438	-0,028687
115,0	-0,004873	-0,012363	-0,018545	-0,024458	-0,030921
35,0	0,019227	0,012347	0,005508	-0,000511	-0,006180
-45,0	0,016668	0,009452	0,002767	-0,003708	-0,007111
-125,0	0,006446	-0,000462	-0,006943	-0,013866	-0,019647
-205,0	0,000024	-0,004902	-0,013387	-0,020606	-0,026242
-290,0	-0,008209	-0,015011	-0,021468	-0,028550	-0,032089
-330,0	-0,009442	-0,017798	-0,024767	-0,030037	-0,037877

πίνακας 6.24: : σφάλματα θέσεως από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z

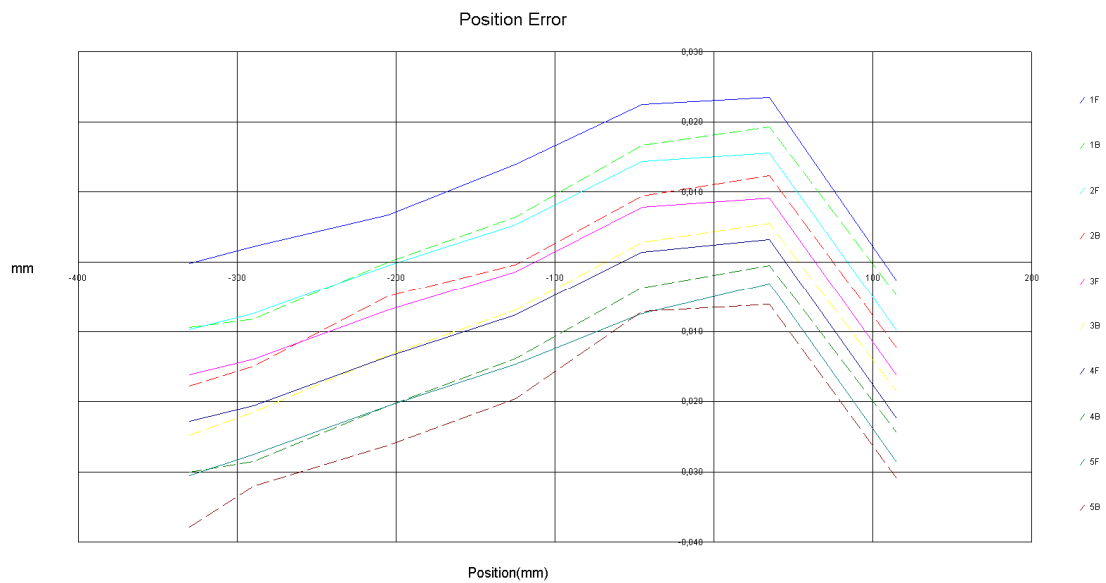
Ανάλυση κατά ISO 230-2 (1997):

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_z_axis2.li
 Machine : Machine Center S/N : 12345 By : OPD
 Start Position: (215,397;0;-330) End Position: (215,397;0;115)
 Total Travel = 445, Points = 7 No of Runs= 5
 Pressure: 744,8 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,27 Material Temp: 26,27 MTE = ,999924

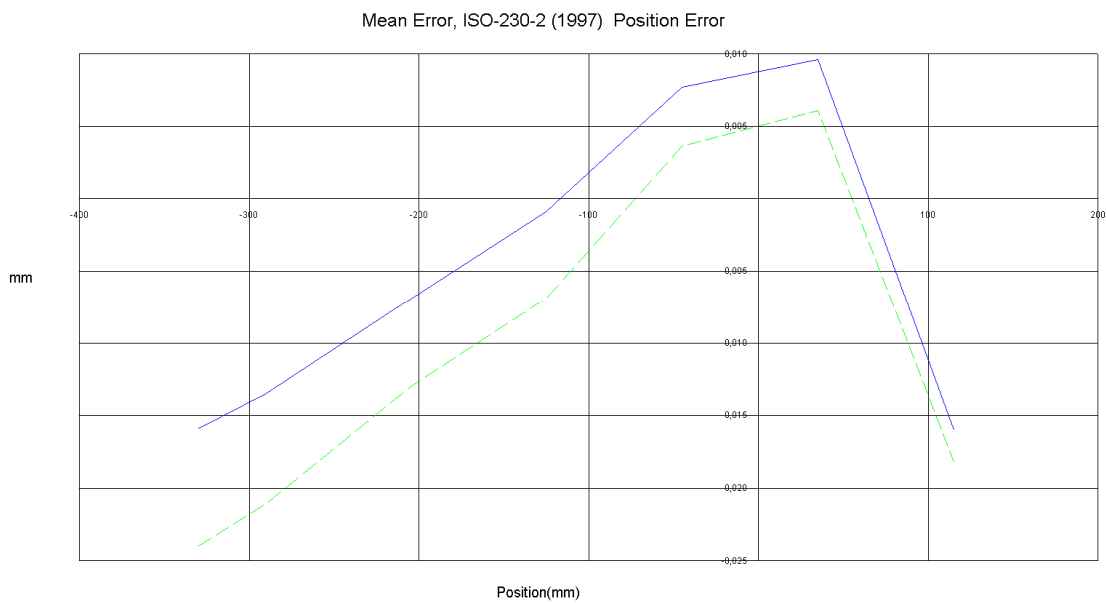
Position, mm	Mean, mm	2_SIGMA, mm
-330,0	-0,015889	0,023370
-290,0	-0,013479	0,023047
-205,0	-0,006959	0,021413
-125,0	-0,000905	0,022200
-45,0	0,007716	0,023115
35,0	0,009628	0,020762
115,0	-0,015999	0,020436
115,0	-0,018232	0,020317
35,0	0,006078	0,020154
-45,0	0,003614	0,019335
-125,0	-0,006895	0,020750
-205,0	-0,013023	0,021646
-290,0	-0,021065	0,019485
-330,0	-0,023984	0,021909

Reversal value, B= 0,008096 (at point=0)
 Mean reversal value, = 0,005374
 Range mean bidirectional positional deviation,
 M=0,027789
 Systematic deviation of positioning, E=
 0,025627 (0,009628, -0,015999) (Forward),
 0,030062 (0,006078, -0,023984) (Backward),
 0,033612 (0,009628, -0,023984) (Bi-directional).
 Repeatability of positioning, R=
 0,046739 (at point=0) (Forward),
 0,043818 (at point=0) (Backward),
 0,053374 (at point=0) (Bi-directional).
 Accuracy, A=
 0,070090 (0,030831, -0,039258) (Forward),
 0,072125 (0,026232, -0,045893) (Backward),
 0,076724 (0,030831, -0,045893) (Bi-directional).

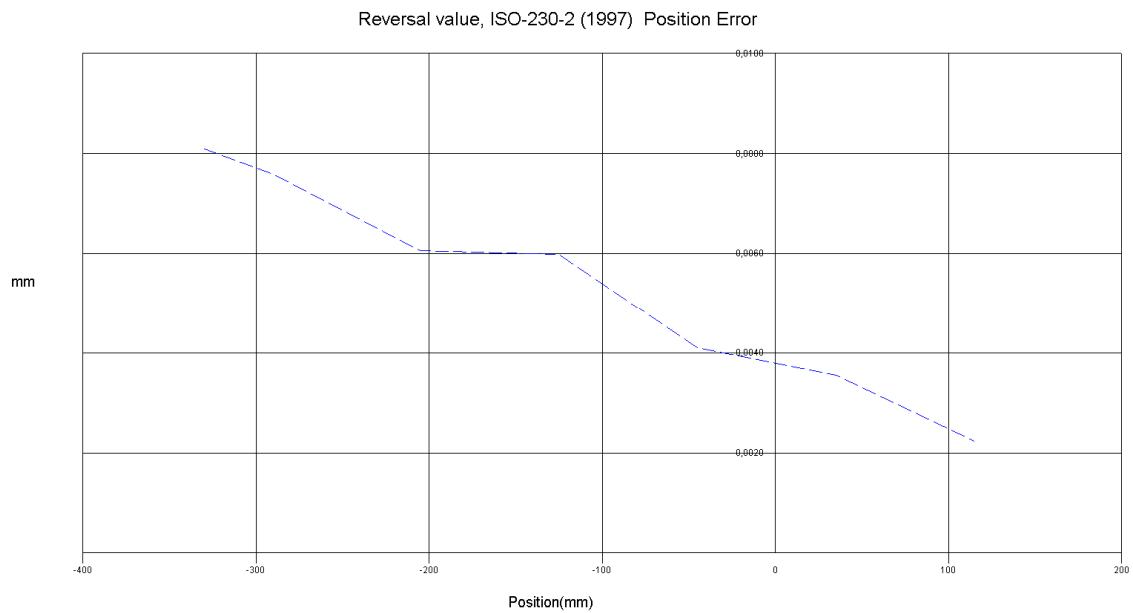
πίνακας 6.25: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z



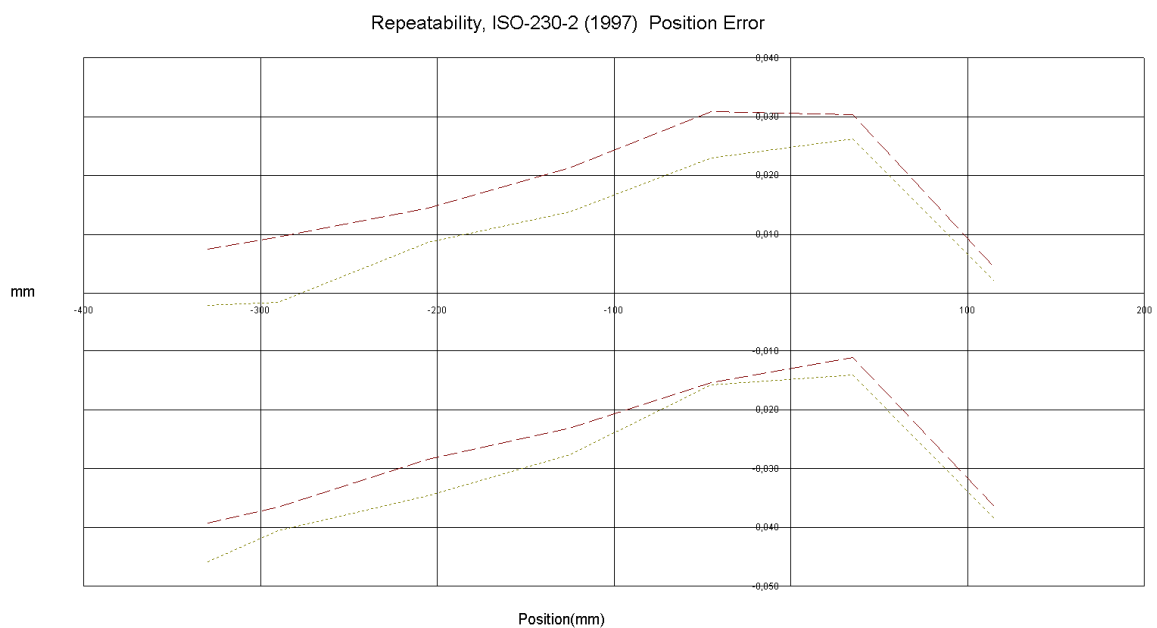
γράφημα 6. 21: σφάλμα θέσης – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)



γράφημα 6.22: μέσο σφάλμα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)



γράφημα 6.23: αντιστρεψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)



γράφημα 6.24: επαναληψιμότητα – θέση (πρώτο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)

B. Μετρήσεις κατά μήκος του άξονα z, με το κάτοπτρο στην θέση $x=215.397\text{mm}$, $y=74\text{mm}$ και Abbé offset $R_2=514.6\text{mm}$

Αποτελέσματα μετρήσεων:

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_z_axis3.lin
 Machine : HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα / OPD
 Start Position: [-215,397;74;-330] End Position: [-215,397;74;115]
 Total Travel = 445, Points = 7 No of Runs= 5
 Pressure: 744,8 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,27 Material Temp: 26,32 MTE = ,999924

Position,mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
-330,0	-330,000042	-330,002089	-330,005560	-330,011178	-330,012577
-290,0	-289,995558	-289,999680	-290,005041	-290,006636	-290,009431
-205,0	-204,988603	-204,992731	-204,995245	-204,998773	-205,001672
-125,0	-124,982571	-124,986381	-124,989407	-124,992567	-124,995513
-45,0	-44,973450	-44,977379	-44,979978	-44,982735	-44,985839
35,0	35,028914	35,025489	35,022818	35,019710	35,015172
115,0	115,007385	115,003717	115,001115	114,995830	114,993726
115,0	115,005164	115,001776	114,999044	114,995857	114,993592
35,0	35,025872	35,022847	35,020114	35,016887	35,014653
-45,0	-44,977090	-44,980433	-44,981546	-44,986200	-44,989168
-125,0	-124,987164	-124,990619	-124,993383	-124,996568	-124,996932
-205,0	-204,993484	-204,996891	-204,998080	-205,003097	-205,005947
-290,0	-290,001024	-290,004510	-290,007818	-290,010985	-290,013788
-330,0	-330,003967	-330,007606	-330,011045	-330,014522	-330,017151

πίνακας 6.26: αποτελέσματα από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z

Σφάλματα μετατόπισης σε κάθε θέση:

Position Measurement, Error Analysis (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_z_axis3.lin
 Machine : HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα / OPD
 Start Position: [-215,397;74;-330] End Position: [-215,397;74;115]
 Total Travel = 445, Points = 7 No of Runs= 5
 Pressure: 744,8 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,27 Material Temp: 26,32 MTE = ,999924
 Max Error: 0,028914 Min Error: -0,017151 Mean: 0,005286

Position, mm	Run #1	Run #2	Run #3	Run #4	Run #5
-330,0	-0,000042	-0,002089	-0,005560	-0,011178	-0,012577
-290,0	0,004442	0,000320	-0,005041	-0,006636	-0,009431
-205,0	0,011397	0,007269	0,004755	0,001227	-0,001672
-125,0	0,017429	0,013619	0,010593	0,007433	0,004487
-45,0	0,026550	0,022621	0,020022	0,017265	0,014161
35,0	0,028914	0,025489	0,022818	0,019710	0,015172
115,0	0,007385	0,003717	0,001115	-0,004170	-0,006274
115,0	0,005164	0,001776	-0,000956	-0,004143	-0,006408
35,0	0,025872	0,022847	0,020114	0,016887	0,014653
-45,0	0,022910	0,019567	0,018454	0,013800	0,010832
-125,0	0,012836	0,009381	0,006617	0,003432	0,003068
-205,0	0,006516	0,003109	0,001920	-0,003097	-0,005947
-290,0	-0,001024	-0,004510	-0,007818	-0,010985	-0,013788
-330,0	-0,003967	-0,007606	-0,011045	-0,014522	-0,017151

πίνακας 6.27: σφάλματα θέσεως από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z

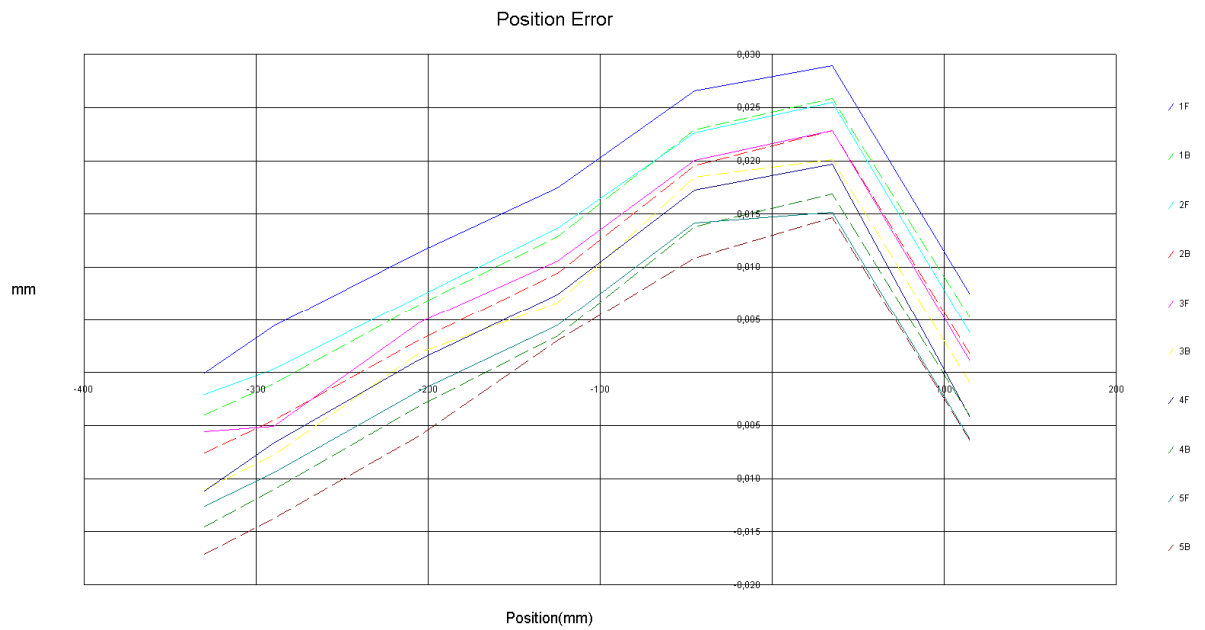
Ανάλυση κατά ISO 230-2 (1997) :

Position Measurement, ISO-230-2 (1997) (mm) File=H:\πειραματικο\τελικές\κατά μήκος_z_axis3.lin
 Machine : HAAS S/N : Tool Room Mill By : ελευθερία πάλλα / OPD
 Start Position: [-215,397;74;-330] End Position: [-215,397;74;115]
 Total Travel = 445, Points = 7 No of Runs= 5
 Pressure: 744,8 Humidity: 50,00 Air Temp: 26,27 Material Temp: 26,32 MTE = ,999924

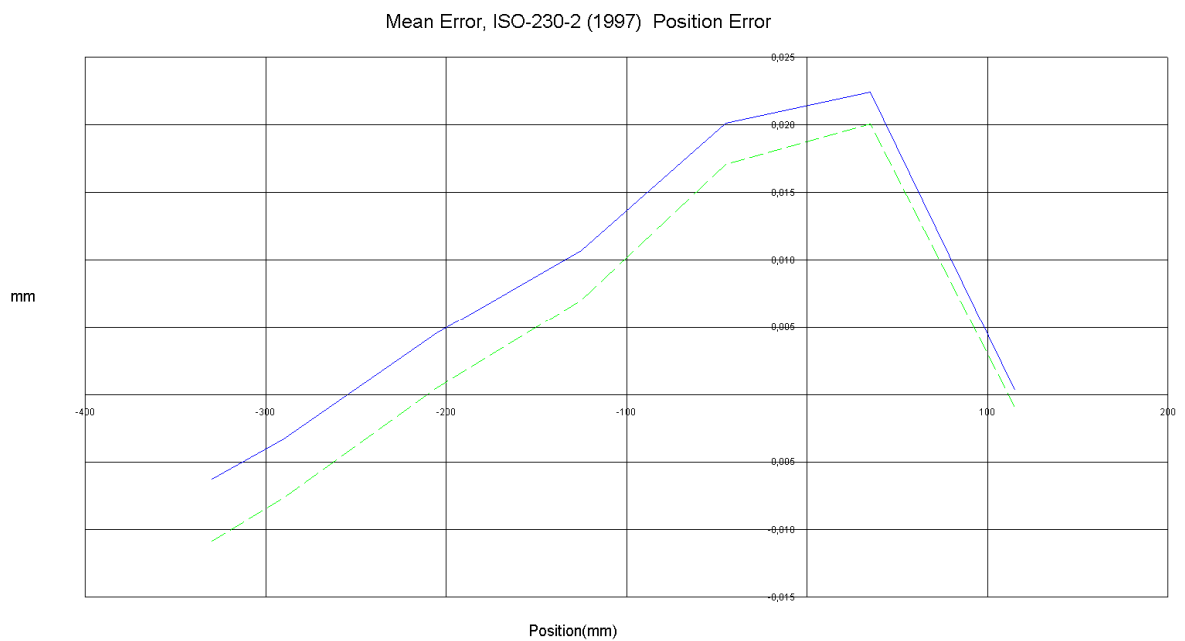
Position, mm	Mean, mm	2_SIGMA, mm
-330,0	-0,006289	0,010984
-290,0	-0,003269	0,011171
-205,0	0,004595	0,010201
-125,0	0,010712	0,010153
-45,0	0,020124	0,009554
35,0	0,022421	0,010565
115,0	0,000355	0,011212
115,0	-0,000913	0,009208
35,0	0,020075	0,008992
-45,0	0,017113	0,009584
-125,0	0,007067	0,008249
-205,0	0,000500	0,009976
-290,0	-0,007625	0,010129
-330,0	-0,010858	0,010541

Reversal value, B= 0,004569 (at point=0)
 Mean reversal value, = 0,003327
 Range mean bidirectional positional deviation,
 M=0,029821
 Systematic deviation of positioning, E=
 0,028710 (0,022421, -0,006289) (Forward),
 0,030933 (0,020075, -0,010858) (Backward),
 0,033279 (0,022421, -0,010858) (Bi-directional).
 Repeatability of positioning, R=
 0,022425 (at point=6) (Forward),
 0,021083 (at point=0) (Backward),
 0,026094 (at point=0) (Bi-directional).
 Accuracy, A=
 0,050259 (0,032986, -0,017273) (Forward),
 0,050466 (0,029067, -0,021400) (Backward),
 0,054385 (0,032986, -0,021400) (Bi-directional).

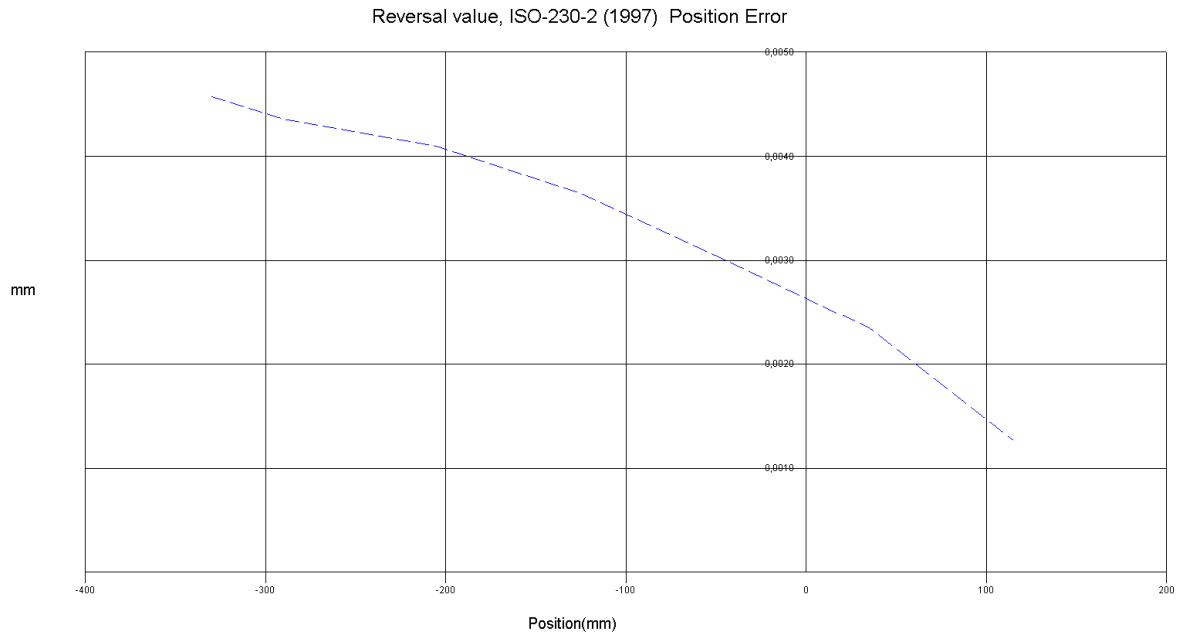
πίνακας 6.28: εύρεση παραμέτρων κατά ISO από το δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z



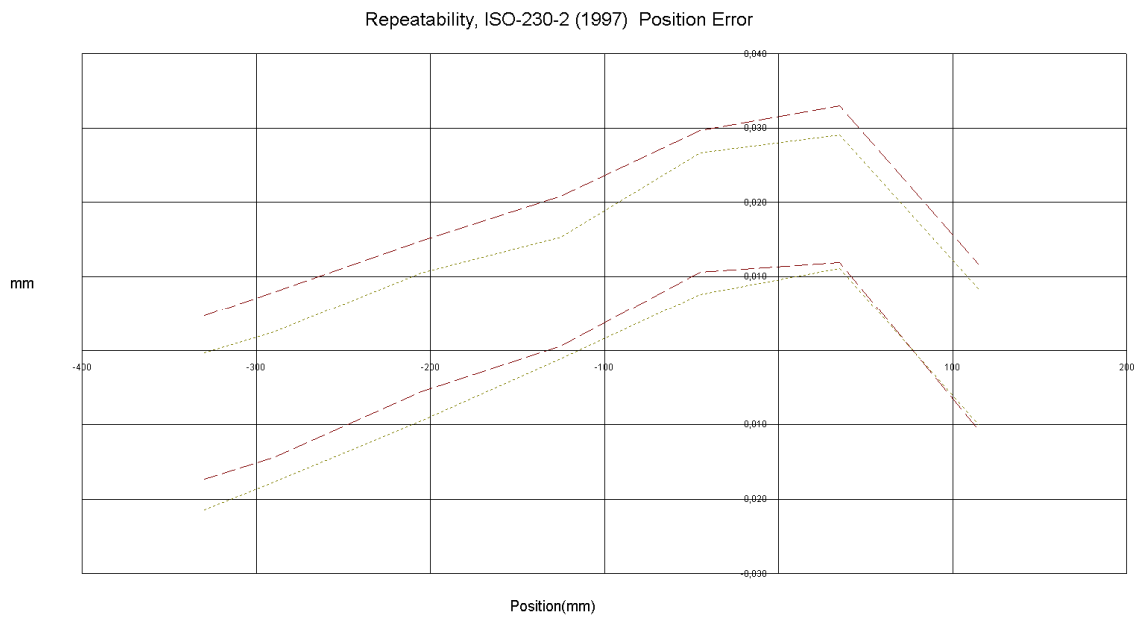
Γράφημα 6.25: σφάλμα θέσης –θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)



γράφημα 6. 26: μέσο σφάλμα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)



γράφημα 6.27: αντιστρεψιμότητα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)



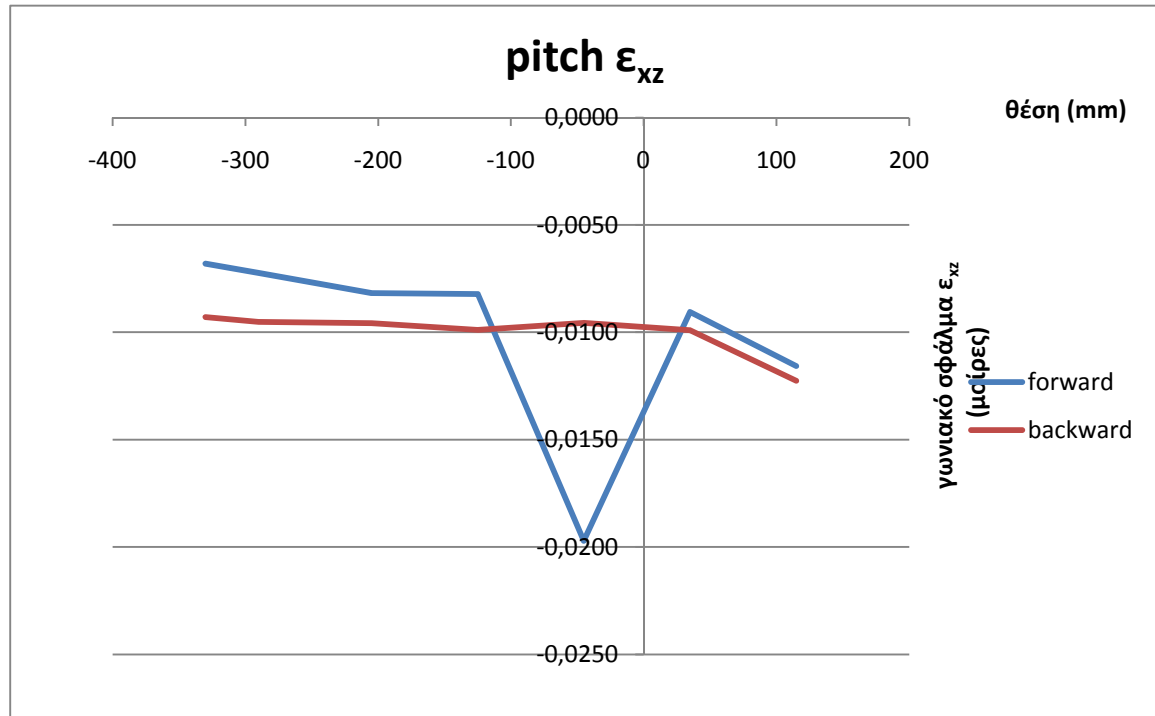
γράφημα 6.28: επαναληψιμότητα – θέση (δεύτερο σετ μετρήσεων κατά μήκος του άξονα z)

6.7.3.2 Ανάλυση κατά άξονα z

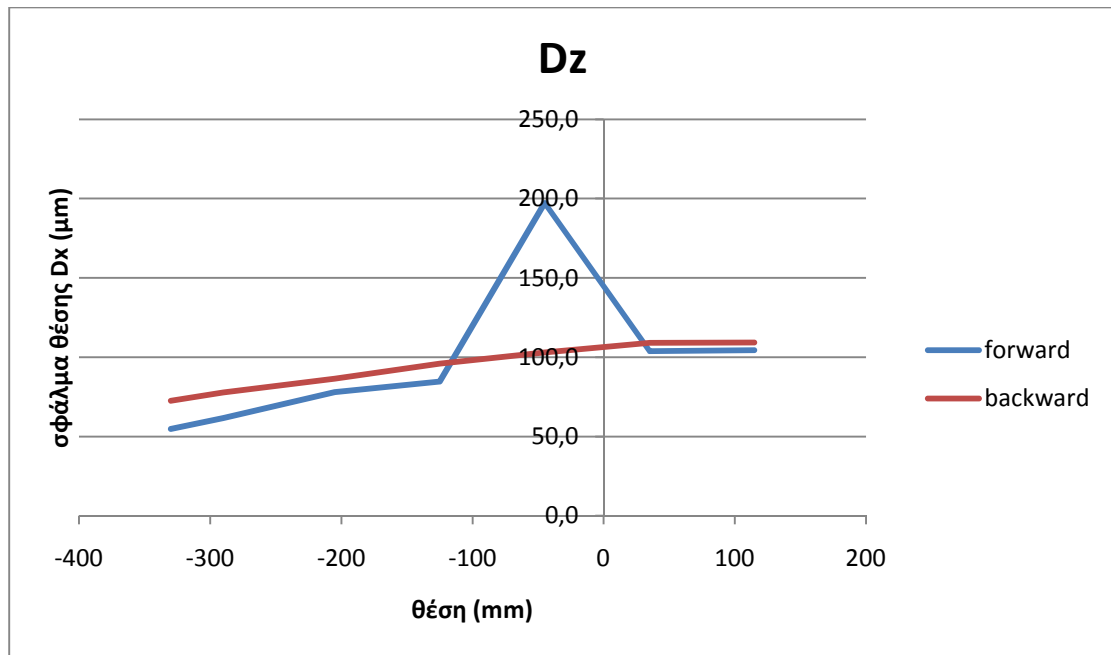
Υπολογισμός σφάλματος θέσης D_z και γωνιακού σφάλματος pitch ϵ_{xz}

Θέση	Dz1(μm)	R1(mm)	Dz2(μm)	R2(mm)	ϵ_{xz} (degrees)	Dz(μm)
-330	-15,889	595,52	-6,289	514,6	-0,006797324	54,76093
-290	-13,479	595,52	-3,269	514,6	-0,007229238	61,66014
-205	-6,959	595,52	4,595	514,6	-0,008180863	78,07113
-125	-0,905	595,52	10,712	514,6	-0,00822547	84,58877
-45	-7,716	595,52	20,124	514,6	-0,019712241	197,1688
35	9,628	595,52	22,421	514,6	-0,009058143	103,7764
115	-15,999	595,52	0,355	514,6	-0,011579525	104,3561
115	-18,232	595,52	-0,913	514,6	-0,012262798	109,2249
35	6,078	595,52	20,075	514,6	-0,00991064	109,0871
-45	3,614	595,52	17,113	514,6	-0,009558029	102,9581
-125	-6,895	595,52	7,067	514,6	-0,009885859	95,85649
-205	-13,023	595,52	0,5	514,6	-0,009575023	86,49772
-290	-21,065	595,52	-7,625	514,6	-0,009516254	77,8449

πίνακας 6.29: εύρεση σφάλματος θέσης και γωνιακού σφάλματος pitch ϵ_{xz} κατά μήκος του άξονα y



γράφημα 6.29: γωνιακού σφάλμα pitch ϵ_{xz} – θέση κατά μήκος του άξονα z



γράφημα 6.30: γραμμικό σφάλμα Dz - θέση κατά μήκος του άξονα z

B. Παράμετροι Επαναληψιμότητας και Αντιστρεψιμότητας

Παράμετροι που προκύπτουν από τις δύο μετρήσεις

	1 ^η μέτρηση	2 ^η μέτρηση	Μέση Τιμή
R forward	46.7 μm	22.4 μm	34.55 μm
R backward	43.8 μm	21.0 μm	32.4 μm
R bi-directional	53.3 μm	26.0 μm	39.65 μm
B	8.0 μm	4.5 μm	6.25 μm
	5.3 μm	3.3 μm	4.3 μm

πίνακας 6.30: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα x που προκύπτουν από τις δύο μετρήσεις

Παράμετροι που προκύπτουν από μετρήσεις σε διάφορες θέσεις x,y και Abbé offset.

	1 ^η μέτρηση	2 ^η μέτρηση	3 ^η μέτρηση	Μέση Τιμή
R forward	11.9 μm	21.2 μm	11.3 μm	14.8 μm
R backward	9.8 μm	17.4 μm	10.4 μm	12.53 μm
R bi-directional	14.6 μm	24.3 μm	13.4 μm	17.43 μm
B	3.7 μm	5.0 μm	3.5 μm	4.06 μm
	3.0 μm	3.7 μm	2.8 μm	3,16 μm

πίνακας 6.31: παράμετροι επαναληψιμότητας και αντιστρεψιμότητας κατά μήκος του άξονα x που προκύπτουν από μετρήσεις σε διάφορες θέσεις x,y και Abbé offset.

6.7.3.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων άξονα z

Το σφάλμα θέσης για τον άξονα z είναι το μεγαλύτερο της εργαλειομηχανής και κυμαίνεται από 54 μm έως 197 μm . Το εύρος αυτό ξεπερνά κατά πολύ την ενδεικτική τιμή του κατασκευαστή για την ακρίβεια, η οποία είναι $\pm 10\mu\text{m}$. Παρόλα αυτά, είναι σημαντικό να παρατηρηθεί εδώ πως στην θέση -45mm και με φορά προσέγγισης προς τα κάτω εμφανίζεται το μέγιστο σφάλμα, 197 μm . Στην ίδια θέσης και με την αντίθετη φορά κατεύθυνσης το σφάλμα είναι σχεδόν υποδιπλάσιο. Στην περιοχή πριν την θέση -100mm και μετά την +35mm το σφάλμα θέσης βρίσκεται κάτω από τα 100 μm .

Η δι-κατευθυντική ακρίβεια της πρώτης μέτρησης είναι 54 μm ενώ της δεύτερης 76 μm . Η διαφορά 22 μm στην τιμή της παραμέτρου της ακρίβειας δικαιολογείται από την ύπαρξη γωνιακού σφάλματος pitch.

Το γωνιακό σφάλμα ϵ_{xy} κυμαίνεται από -0.006° έως $-0,0197^\circ$. Το ζήτημα που εμφανίζεται στον άξονα z είναι ότι ενώ σε όλο το μήκος του άξονα το γωνιακό σφάλμα κυμαίνεται στο, αναμενόμενο με βάση τις αναλύσεις σε άξονα x, y, διάστημα -0.006° έως $-0,0099^\circ$, στην θέση -45mm εμφανίζεται γωνιακό σφάλμα $-0,0197^\circ$. Μάλιστα το σφάλμα είναι τόσο μεγάλο μόνο όταν η άτρακτος προσεγγίζει αυτή την θέση από πάνω, ενώ όταν η ίδια θέση προσεγγίζεται από κάτω το γωνιακό σφάλμα είναι $-0,0095^\circ$.

Η τιμή της επαναληψιμότητας αποκλίνει από την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής και είναι η χειρότερη των τριών αξόνων. Σύμφωνα και με τις επιπλέον μετρήσεις που πάρθηκαν για να επαληθευτούν οι παράμετροι σε διαφορετικές θέσεις x,y και τυχαία offset, ο μέσος όρος των τιμών για την δικατευθυντική επαναληψιμότητα του άξονα x της εργαλειομηχανής από τις συνολικά 5 μετρήσεις είναι 26,32 μm (με τυπική απόκλιση: 14,39 μm). Ο υψηλός μέσος όρος της επαναληψιμότητας σε συνδυασμό με τη πολύ μεγάλη τυπική απόκλιση προβληματίζει. Η τιμή του συντελεστή αντιστρεψιμότητας είναι ικανοποιητική.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μέτρηση και η μελέτη των γεωμετρικών σφαλμάτων κέντρου κατεργασιών ώστε να έχουμε μία εποπτεία του ογκομετρικού σφάλματος μέσα από τον προσδιορισμό των συνιστωσών του.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε θεμελιώθηκε σε ένα θεωρητικό υπόβαθρο. Δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στις πηγές των σφαλμάτων των εργαλειομηχανών και την αλληλεπίδραση τους ώστε να στηριχθεί η αναγκαιότητα μετάβασης από την μεμονωμένη ανάλυση κάθε σφάλματος στην μοντελοποίηση σε ένα συνολικό.

Στην εποχή μας, τα επίπεδα ακρίβειας που μπορούν να επιτευχθούν στα κέντρα κατεργασιών είναι τόσο υψηλά που πλέον δεν υπάρχει κάποια βασική συνιστώσα σφάλματος που να κυριαρχεί στην συμπεριφορά της μηχανής. Τα επιμέρους σφάλματα που συνιστούν το συνολικό είναι όλα επαρκώς μικρά, κι έτσι η μεμονωμένη βελτίωση κάποιων δεν αρκεί για να βελτιωθεί το συνολικό. Αυτό που χρειάζεται είναι η συνδυασμένη βελτίωση όλων. Για αυτό τον λόγο είναι απαραίτητο να μελετάμε και να αντιμετωπίζουμε τα σφάλματα της εργαλειομηχανής ως συνιστώσες του ογκομετρικού σφάλματος που αλληλεπιδρούν και δεν έχει κανένα νόημα να τα αντιμετωπίζουμε ως ανεξάρτητα σφάλματα που συμμετέχουν στο συνολικό.

Στα πλαίσια της εργασίας κατανοήθηκε η επίπτωση του σφάλματος Abbe στην γραμμική ακρίβεια θέσης και η γνώση αυτή χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστούν τα γωνιακά σφάλματα της εργαλειομηχανής, τα οποία δεν ήταν δυνατόν να μετρηθούν άμεσα με τον διαθέσιμο εξοπλισμό.

Η μεθοδολογία αναπτύχθηκε ώστε να είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε κέντρο κατεργασιών CNC, του οποίου είχαμε μελετήσει τη δομή και λειτουργία οπότε είχαμε εντοπίσει τις πηγές offset.

Ακολούθησαν οι μετρήσεις με σκοπό να γίνει μία εκτίμηση του ογκομετρικού σφάλματος μέσω των σφαλμάτων που προσδιορίζονται.

Πριν την διεξαγωγή των μετρήσεων, εξετάστηκαν όλα τα πιθανά σφάλματα του μετρητικού οργάνου και τα σφάλματα εγκατάστασης. Στα πλαίσια της εργασίας εξετάστηκε κι η ανοχή του οργάνου στην ευθυγράμμιση.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ακολουθώντας τις οδηγίες του προτύπου ISO 230-2:1997. Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την ακρίβεια της μηχανής υπολογίστηκαν με βάση τους ορισμούς του ίδιου προτύπου.

7.2 Συμπεράσματα για την μέθοδο

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε έκανε δυνατή τη μέτρηση με χρήση laser γραμμικών σφαλμάτων και την μελέτη γραμμικών και γωνιακών σφαλμάτων ώστε να προσδιοριστούν οι συνιστώσες του ογκομετρικού σφάλματος κέντρου κατεργασιών. Οδηγηθήκαμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το γραμμικό σφάλμα θέσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το σφάλμα εξαιτίας του Abbé offset, εκτός αν οι μετρήσεις γίνονται ακριβώς πάνω στο στοιχείο βάσει του οποίου καθορίζουμε την ακρίβεια.
- Χρειάζεται να κατανοηθεί πλήρως η δομή κι η λειτουργία της μηχανής ώστε να εντοπιστούν οι πηγές offset. Με σωστές επιλογές θέσεων μέτρησης μπορούν να απομονωθούν τα σφάλματα Abbé που επιδρούν σε κάθε άξονα και να μετρηθούν τα γωνιακά σφάλματα.
- Τα γωνιακά σφάλματα μετρώνται με έμμεση μέθοδο. Η διαφορά στα αποτελέσματα δύο παράλληλων μετρήσεων επηρεάζεται αποκλειστικά από το γωνιακό σφάλμα μόνο στο βαθμό που η εργαλειομηχανή έχει καλή επαναληψιμότητα. Αυτό σημαίνει πως η μέθοδος μπορεί αξιόπιστα να εφαρμοστεί μόνο σε μηχανές με καλή επαναληψιμότητα.
- Οι δυο παράλληλες μετρήσεις κατά μήκος κάθε άξονα πρέπει να γίνονται σε δύο ακραίες τιμές offset. Στην προκειμένη περίπτωση, περιορισμοί λόγω του διαθέσιμου εξοπλισμού και της δομής της εργαλειομηχανής δεν επέτρεψαν να πάρουμε παράλληλες μετρήσεις σε μεγάλη μεταξύ τους απόσταση. Αυτό εισήγαγε σφάλμα, το οποίο δεν μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντο αν οι μετρήσεις έχουν τελικό σκοπό την αντιστάθμιση του σφάλματος. Πρέπει να σημειώσουμε ότι στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας ελήφθησαν περισσότερα ζεύγη μετρήσεων για κάθε άξονα κι οι τιμές γωνιακού σφάλματος που προεκύπταν από κάθε ζεύγος διέφεραν μεταξύ τους κατά ποσοότητες μη αμελητέες – κάτι που μας επιβεβαιώνει πως για να ήταν επιτυχημένη η έμμεση μέτρηση γωνιακού σφάλματος χρειαζόταν μεγαλύτερο εύρος τιμών offset.
- Προσδιορίστηκαν 6 από τις 21 συνιστώσες του ογκομετρικού σφάλματος. Μέσω αυτών μπορεί να διαμορφωθεί κάποια αρχική εικόνα για το μέγεθος του ογκομετρικού σφάλματος της εργαλειομηχανής. Ταυτόχρονα, οι προσδιορισμένες συνιστώσες αρκούν για να ορίσουν συνολικά το ογκομετρικό σφάλμα κατά την εκτέλεση συγκεκριμένων ενεργειών και κινήσεων στις κατεργασίες.

7.3 Συμπεράσματα για την ογκομετρική ακρίβεια του κέντρου κατεργασιών HAAS ToolRoom Mill

Το κέντρο κατεργασιών στο οποίο έλαβαν χώρα οι μετρήσεις χρησιμοποιείται βασικά για εκπαιδευτικούς σκοπούς και οι απαιτήσεις ακρίβειας που πρέπει να πληρεί δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές. Ο όγκος εργασίας του κέντρου κατεργασιών ορίζεται στον άξονα x από -762mm ως 0mm, στον άξονα y από -304.800mm ως 0mm και στον άξονα z από -405.779mm έως 121.271mm (με βάση το σύστημα συντεταγμένων της μηχανής).

- Με βάση τις μετρήσεις και την ανάλυση τους μπορούμε να ορίσουμε μία υποπεριοχή του όγκου εργασίας στην οποία η μηχανή δουλεύει βέλτιστα. Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να προσαρμόζουμε τις προγραμματισμένες διαδικασίες που εκτελούνται στο κέντρο κατεργασιών ώστε να δουλεύουμε βασικά στην πιο αξιόπιστη περιοχή. Για το κέντρο κατεργασιών που εξετάστηκε, στο επίπεδο x-y η περιοχή από $x=0\text{mm}$ ως $x=-250\text{mm}$ και από $y=-200\text{mm}$ ως $y=-304.800\text{mm}$ έχει μέγιστο σφάλμα 60 μm στον x άξονα και 20 μm στον y. Στο τμήμα $z=-405.779\text{mm}$ έως $z=-125\text{mm}$ το μέγιστο σφάλμα θέσης είναι 85 μm . Αυτή η υποπεριοχή του όγκου εργασίας μπορεί να χαρακτηριστεί ως βέλτιστη από άποψη σφαλμάτων.
- Κανένας άξονας της μηχανής δεν εμφανίζει γωνιακό σφάλμα μεγαλύτερο των 0.0115° - όμως τα γωνιακά σφάλματα που υπάρχουν σε συνδυασμό με το Abbé offset είναι ικανά να αλλοιώνουν αρκετά τα μετρούμενα γραμμικά σφάλματα. Το «καθαρό» σφάλμα μετατόπισης των αξόνων είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που περιμέναμε με βάση τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Αυτό δικαιολογείται εν μέρει μόνο από τα σφάλματα που δημιουργήθηκαν ενδεχομένως με την μεταφορά και την εγκατάσταση της μηχανής (και που δεν μπορεί να προβλέψει ο κατασκευαστής).
- Η επαναληψιμότητα των αξόνων x και y είναι πάρα πολύ καλή (της τάξης των 7 μm στον άξονα x και των 12 μm στον άξονα y). Είναι πολύ σημαντικό να σημειώσουμε ότι η επαναληψιμότητα είναι η απαραίτητη προϋπόθεση για μία σωστά ελεγχόμενη κατεργασία διότι αφ' ενός εγγυάται υψηλή αξιοπιστία από άποψη παραγωγικότητας στην κατεργασία τελικών κομματιών, αφ' ετέρου είναι μία παράμετρος που δεν μπορούμε να διορθώσουμε.
- Η επαναληψιμότητα στον άξονα z είναι η χειρότερη και των τριών αξόνων και δεν θεωρείται ικανοποιητική (μέση τιμή 26 μm με τυπική απόκλιση 14 μm).
- Η τιμή του συντελεστή αντιστρεψιμότητας του κάθε άξονα της μηχανής είναι ικανοποιητική

7.4 Κρίσεις πάνω στο πρότυπο ISO 230-2: 1997

Το ISO 230-2, όπως και τα υπόλοιπα πρότυπα μέτρησης ακρίβειας θέσης, καθορίζουν της προδιαγραφές για την διαδικασία των μετρήσεων ακρίβειας θέσης και υπολογίζουν από τα αποτελέσματα των μετρήσεων τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την μηχανή. Παρακάτω σημειώνουμε κάποια σχόλια/κρίσεις που αφορούν στο πρότυπο αυτό.

- Οι ολοκληρωμένες μετρήσεις της ογκομετρικής επίδοσης μίας εργαλειομηχανής είναι μία δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία και είναι απαραίτητο το πρότυπο να προτείνει οδηγίες παρουσιάζοντας την λιγότερο περίπλοκη και περισσότερο κατανοητή.
- Το ISO προς το παρόν καλύπτει αυτή την ανάγκη με το πρότυπο 230-6 που αφορά στον καθορισμό της ακρίβειας διαγώνιας θέσης. Πράγματι η διαγώνια μετατόπιση είναι αντιπροσωπευτική του ογκομετρικού σφάλματος όμως δεν αποτελεί διαδικασία μέτρησης του και ασφαλώς δεν μαρτυρά τίποτα για τις συνιστώσες του. Παρότι δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί μία μοναδική και αξιόπιστη τιμή που να εκφράζει την συνολική ογκομετρική ακρίβεια της μηχανής, είναι σκόπιμο να προταθούν πρότυπα και δοκιμές που να συνδυάζουν κάποιες πηγές σφαλμάτων, ώστε να ορίζουν την ογκομετρική ακρίβεια μέσω ενός αριθμού χαρακτηριστικών παραμέτρων.
- Τέλος χρειάζεται να τεθεί κάποιο κριτήριο βάσει του οποίου μπορούμε να κρίνουμε την εκάστοτε μηχανή ως προς την ογκομετρική ακρίβεια της. Ο άνθρωπος τείνει να συνειδητοποιεί ως ακρίβεια εργαλειο-μηχανής μία συγκεκριμένη τιμή και με αριθμητική σύγκριση μπορεί να κατηγοριοποιεί της μηχανές με κριτήριο την ακρίβεια. Η ογκομετρική ακρίβεια όμως δεν έχει μία αντιπροσωπευτική τιμή, κι έτσι δεν είναι εύκολο για τον αγοραστή να μπορεί να συγκρίνει δύο μηχανές ως προς αυτό το κριτήριο. Μία λύση θα ήταν να υπάρχει κάποια επίσημη κατηγοριοποίηση των εργαλειομηχανών με βάση την ογκομετρική ακρίβεια τους. Η μη ύπαρξη επίσημης μίας τέτοιας οδηγίας ως προς αυτό το θέμα είναι η αιτία σύγχυσης, διότι οι κατασκευαστές προτιμούν να αναφέρουν ως ακρίβεια της εργαλειομηχανής αυτήν που θα τους δώσει συγκριτικό πλεονέκτημα στην αγορά χωρίς να διευκρινίζουν κάτι περισσότερο. Το θέμα αυτό το αντιμετωπίσαμε και με την μηχανή πάνω στην οποία έγιναν οι δικές μας μετρήσεις. Ο κατασκευαστής έδινε ως ακρίβεια $\pm 10\mu\text{m}$ χωρίς να συγκεκριμενοποιεί σε ποια συνιστώσα του ογκομετρικού σφάλματος αναφέρεται αυτή.

7.5 Καταληκτικά συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, πρέπει να τονισθούν δύο βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από την μελέτη όσο και από την πειραματική διαδικασία που έγιναν στην παρούσα διπλωματική.

- **Η μέτρηση αποκλειστικά των γραμμικών σφαλμάτων θέσης δεν μπορεί να αποτελέσει από μόνη της χαρακτηριστικό του ογκομετρικού σφάλματος της εργαλειομηχανής ούτε της ακρίβειας της.** Από την μέτρηση μετατόπισης κατά μήκος των αξόνων της μηχανής δεν προκύπτει το “καθαρό» σφάλμα θέσης αλλά ένα σφάλμα αλλοιωμένο από την επίδραση των γωνιακών σφαλμάτων σε συνδυασμό με την μετατόπιση Abbé. Η μοναδική περίπτωση που μπορούμε να ισχυριστούμε το αντίθετο είναι αν θεωρηθεί πως τα σφάλματα μετατόπισης έχουν κυρίαρχο ρόλο στην σύσταση του ογκομετρικού σφάλματος (λόγω κάποιας αστοχίας ή ύπαρξης προβληματικού άξονα). Σε μία σύγχρονη εργαλειομηχανή, όμως, που λειτουργεί χωρίς προβλήματα, δεν είναι βάσιμος ένας τέτοιος ισχυρισμός.
- **Υπάρχει μεγάλη ανάγκη για τον επίσημο ορισμό παραμέτρων που θα αποτελούν κριτήρια ογκομετρικής ακρίβειας καθώς επίσης και για την καθιέρωση μεθόδων μέτρησης των συνιστωσών του ογκομετρικού σφάλματος.** Η έννοια του ογκομετρικού σφάλματος χρησιμοποιείται ευρέως πλέον τόσο από την μηχανολογική κοινότητα όσο και από την βιομηχανία. Με τα επίπεδα ακριβείας που επιτυγχάνουν οι σύγχρονες εργαλειομηχανές, τις περισσότερες φορές είναι αναγκαστικό να μιλάμε σε επίπεδα ογκομετρικού σφάλματος, διότι όλα τα γεωμετρικά σφάλματα είναι τόσο μικρά που η ανεξάρτητη μελέτη τους δεν δίνει επιπλέον πληροφορίες. Παρόλα αυτά, επαφίεται στον κάθε μηχανικό, ανάλογα με την μηχανή προς εξέταση, να μετρήσει και να υπολογίσει τα αλληλεπιδρώντα σφάλματα ως συνιστώσες του ογκομετρικού. Δεν υπάρχει καμία επίσημη οδηγία που να δίνει κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση στον τρόπο μέτρησης κι αξιολόγησης της ογκομετρικής ακρίβειας.

7.6 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Με βάση το γνωστικό υπόβαθρο που αποκτήθηκε από την συγκεκριμένη εργασία, καθώς και τις γενικότερες ανάγκες της βιομηχανίας προς την κατεύθυνση της εκτίμησης του ογκομετρικού σφάλματος μέσα από τον προσδιορισμό των συνιστωσών του, προτείνονται οι ακόλουθοι άξονες για μελλοντικές έρευνες:

- με βάση τις συνιστώσες του ογκομετρικού σφάλματος που προσδιορίζονται είναι ιδιαίτερος χρήσιμο να φτιαχτεί μία «βιβλιοθήκη» τμημάτων των κατεργασιών ή και απλών κινήσεων της ατράκτου, για τις οποίες οι προσδιορισμένες συνιστώσες θα αρκούν για να ορίσουν συνολικά το ογκομετρικό σφάλμα. Σε πολλές εργαλειομηχανές, ιδιαίτερα της βιομηχανία, είναι συνήθως καίριο το ογκομετρικό σφάλμα κατά την κατεργασία συγκεκριμένων τμημάτων τεμαχίων κι όχι το συνολικό της μηχανής. Με αυτό τον τρόπο, δεν χρειάζεται να μοντελοποιείται το συνολικό σφάλμα μα να είναι παραμετρικά μοντελοποιημένο ως προς τις συνιστώσες που μας ενδιαφέρουν.
- προτείνεται σε μελλοντική εργασία να αξιολογηθεί το ογκομετρικό σφάλμα έχοντας συμπεριλάβει και τα γωνιακά σφάλματα γ_{aw} ως συνιστώσες του. Η επίδραση των γωνιακών σφαλμάτων γ_{aw} στο γραμμικό σφάλμα θέσης δεν χρειάστηκε να ληφθεί υπόψη στη συγκεκριμένη εργασία λόγω της επιλογής των θέσεων μέτρησης. (τα ζεύγη παράλληλων μετρήσεων επιλέχθηκαν ώστε να απομονώνεται η επίδραση των πηγών offset που είχαν εντοπισθεί)
- στην παρούσα εργασία στόχος ήταν να αποκτήσουμε μία εικόνα για το συνολικό σφάλμα στον όγκο εργασία της μηχανής. Ως εκ τούτου, θεωρήθηκε σημαντικό να παρθούν μετρήσεις σε όλο το μήκος των αξόνων της μηχανής, οπότε η μηχανή του laser στήθηκε εκτός τραπέζιου σε ειδική βάση για την μέτρηση των αξόνων x και y . Είναι, όμως, ενδιαφέρον να εφαρμοστεί η μεθοδολογία μας με το laser να συγκρατείται πάνω στην άτρακτο της μηχανής ώστε να προσομοιωθεί η θέση τεμαχίου- εργαλείου. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατόν να μελετηθεί, για εκείνη την περιοχή, εάν κάποιες συνιστώσες των γωνιακών σφαλμάτων αλληλοαναιρούνται λόγω της σχετικής θέσης μεταξύ τεμαχίου- εργαλείου.
- στην περίπτωση του z άξονα της συγκεκριμένης εργαλειομηχανής παρατηρήθηκαν διαφορετικές τιμές επαναληψιμότητας σε κάθε σετ των μετρήσεων (οι τιμές αυτές είχαν απόκλιση μεταξύ τους έως και $50\mu m$). Κρίνεται σημαντικό να ερευνηθεί που οφείλονται οι αποκλίσεις αυτές, δεδομένου πως η τιμή της επαναληψιμότητας αποτελεί κριτήριο αξιοπιστίας των έμμεσων μετρήσεων σφαλμάτων.

Βιβλιογραφία

- [1] Λάζαρου Λαζαρίδη, Μηχανουργική τεχνολογία Ίδρυμα Ευγενίδου, 1985
- [2] Μ. Σφαντζικόπουλου, Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών II, 2003
- [3] Γ.–Χ. Βοσνιάκος, Εργαλειομηχανές CAD-Cam- σημειώσεις για το μάθημα Εργαλειομηχανές Αθήνα 2003
- [4] S.M. Wu, J. Ni. , Precision machining without precise machinery, CIRP Annals, Vol. 38 (1) (1989) p. 533-536
- [5] S. Sartori, G. X. Zhang, Geometric Error Measurement and Compensation of Machines, CIRP Annals, Vol. 44 (2) (1995) p. 599-609
- [6] Hocken, R. J. (working group chairman), 1980, Technology of machine tools, Vol. 5: machine tool accuracy, Lawrence Livermore Laboratory report n. UCRL-52960-5, p. 1-85
- [7] M. A. Donmez, D. S. Blomquist, R. J. Hocken, C. R. Liu, M. M. Barash « A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation», Precision Engineering, vol. 8, p.187-196, 1986.
- [8] J. Ni. , CNC machine accuracy enhancement through real-time error compensation, ASME Trans Journal of Manufacturing Science and Engineering 119 (1197) 717-724
- [9] A. H. Slocum, Precision Machine Design, Prentice Hall, 1992
- [10] J. Bryan, International Status of Thermal Error Research, CIRP Annals 39 (2) (1990) 645-656
- [11] M. Weck, P. McKeown, R. Bonse, Reduction and Compensation of Thermal Errors in machine tools, CIRP Annals, vol. 44 (2), p. 589-598, 1995
- [12] R. Ramesh, M. A. Mannan, A.N. Poo «Error compensation in machine tools - a review. Part I : geometric, cutting force induced and fixture-dependent errors», International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40, p.1235-1256, 2000.
- [13] R. Ramesh, M. A. Mannan, A.N. Poo, Error compensation in machine tools - a review. Part II: thermal errors, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40, p.1257-1284, 2000
- [14] A. C Okafor, Yalcin M. Ertekin, Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining centre using rigid body kinematics International Journal of Machine Tools and Manufacture 40 (2000), 1199-1213

- [15] Murphy S. D., In-Process measurement and control, Texton Inc., Pennsylvania 1990
- [16] K. M^cCarthy, «Accuracy in Positioning Systems», The motion control technology conference proceedings, March 19-21, 1991
- [17] Optodyne Inc. «Laser Doppler Displacement Meter: User's Guide, MCV-500»
- [18] Π. Κατσούδας, «Μέτρηση ακρίβειας κατά ISO και αντιστάθμιση σφαλμάτων εργαλειομηχανών CNC με χρήση συστήματος μέτρησης μετατοπίσεων Laser Doppler», διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π, 2006
- [19] R. Alamanza, F. Munoz, M. Mazari « Development of alumini first surface mirrors for solar energy applications», Solar Energy, Vol. 48, no. 5, p. 339-343, 1992
- [20] Hugh D. Young, «Πανεπιστημιακή Φυσική, μέρος Α», εκδόσεις Παπαζήση, 1994
- [21] S. Yang, J. Yuan, J. Ni « Accuracy enhancement of a horizontal machining center by real-time error compensation» Journal of Manufacturing Systems, vol. 15, p.113-118, 1996.
- [22] J. Lee, Y. Liu, S. Yang « Accuracy improvement of miniaturized machine tool: Geometric error modeling and compensation» International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 46, p. 1508-1516, 2006.
- [23] D. J. Leete « Automatic Compensation of Alignment errors in machine tools» International Journal of Machine Tool Design and Research, vol. 1, p. 293-324, 1961.
- [24] P.M. Ferreira, C. R Liu « A method for estimating and compensating quasi-static errors of machine tools», Journal of Engineering for Industry, v.115, p. 149-159, 1993.
- [25] R. Schultschik «The components of the volumetric accuracy» , Annals of the CIRP, vol.25, p.445-448, 1977.
- [26] G. Zhang, C. Wang, X. Hu, F. Jing « Error compensation of Coordinate Measuring Machines», Annals of the CIRP, vol. 34, p.445-448, 1985.
- [27] D. Lin, K. F. Ehmman, Direct volumetric error evaluation for multi-axis machines, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 33, p. 675-693, 1993.
- [28] M. Rahman, J. Heikkala, K. Lappalainen « Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools. Part I: theory», International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol.40, p.1535-1546,2000.
- [29] S. Yang, K. Kim, Y. Park, S. Lee « Error analysis and compensation for the volumetric errors of a vertical machining centre using a hemispherical helix ball bar test» Int. J. Adv. Manuf. Technol, vol. 23, p.495-500, 2004.

- [30] A. Kurtoglu « The accuracy improvement of machine tools», Annals of the CIRP, vol. 39 (1), p.417-419
- [31] Second International Precision Engineering Seminar Review, Precision Engineering - Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, vol.6 (1), p.46-56,1984.
- [32] K. F. Eman, B. T. Wu, M. F. De Vries «A generalized geometric error model for multi-axis machines» Annals of the CIRP, vol.36, p.253-256, 1987.
- [33] P. M. Ferreira, C.R. Liu « A contribution to the analysis and compensation of the geometric error of a machine center», CIRP Annals, vol.35(1), p.259-262, 1986.
- [34] J. Jung, J. Choi, S. Lee « Machining accuracy enhancement by compensating for volumetric errors of a machine tool and on-machine measurement», Journal of Materials Processing Technology vol.174. p.56-66, 2006.
- [35] N. A. Duffie, S. M. Yang « Generation of Parametric Kinematic Error-Correction Functions from Volumetric Error Measurements», Annals of the CIRP, vol. 34(1),1985.
- [36] K. Kim , M. K. Kim «Volumetric accuracy analysis based on generalized geometric error model in multi-axis machine tools», Mech. Mach. Theory, Vol. 26, No. 2, p. 207-219, 1991.
- [37] H. Tajbakhsh, Z. Abadin, P. Ferreira « L_{∞} parameter estimates for volumetric error in modles of machine tools» Precision Engineering, vol. 20, p.179-187, 1997.
- [38] J. Mou, C. R. Liu «A method for enhancing the accuracy of CNC machine tools for on machine inspection», Journal of Manufacturing Systems, vol.11, no. 4, 1992.
- [39] Richard Fitzpatrick, «Electromagnetism and Optics : An introductory course», σημειώσεις διαλέξεων, University of Texas, (πηγή: <http://farside.ph.utexas.edu>)
- [40] Nasa, «Apollo 11 Experiment Still Going Strong after 35 Years» (πηγή: <http://www.jpl.nasa.gov/>)
- [41] ISO-230-2:1997
- [42] S. Klabunde, R. Schmidt « How accurate is your machining center?», The Online Modern Machine Shop, Μάρτιος 1998.
- [43] J. Childs “Machinery Standards”, American Machinist, τεύχος Σεπτεμβρίου 1991.
- [44] R. Farrar, B. Kongmebol, T. Bartholomäus «Specifications don't always tell the whole story», Laser Focus World, έκδοση Αυγούστου 2003.
- [45] B. Mullany «Evaluation and comparison of the different standards used to define the positional accuracy and repeatability of numerically controlled machining center axes», University of North Carol, Οκτώβριος 2007.

- [46] John J. Craig « Εισαγωγή στη Ρομποτική : μηχανική και έλεγχος», εκδόσεις Τζίολα.
- [47] United States Patent,patenet number 4715706 «Laser Doppler Displacement Measuring System and Apparatus, inventor Charles P. Wang».
- [48] <http://www.optodyne.com>, Optodyne Documentation «LDDM Technology vs. Michelson Interferometer Technology».
- [49] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckemann, R. Schmitt, F. Delbressine «Geometric error measurement and compensation of machines, An update», CIRP Annals, vol. 57, p. 660-675, 2008.
- [50] P. Cauchick- Miguel, Tim King, Jim Davis « CMM verification: a survey», Measurement, vol. 17 (1), p.1-16, 1996.
- [51] N. Taniguchi « Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing», CIRP Annals, vol. 32 (2), 1983
- [52] G. Zhang, «Improving the accuracy of angle measurement in machine calibration», CIRP Annals, vol. 35 (1), p. 369- 372, 1986.
- [53] M. Burdekin, C. Voutsadopoulos « Computer aided calibration of the geometric errors of the multi-axis coordinate measuring machines», The institution of Mechanical Engineerings Proceedings, vol 195 (20), p. 231-239, 1981.
- [54] C. Wang, G. Liotto « A theoretical analysis of 4 body diagonal displacement measurement and sequential step diagonal measurement», LAMDAMAP Conference, England, 2003.
- [55] H. J. Pahk, Y. S. Kim, J. H. Moon «A new technique for volumetric error assessment of CNC machine tools incorporating ball bar measurement and 3D volumetric error model», International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 37 (11), p.1583-1596,1997
- [56] <http://www.haascnc.com>
- [57] R. Callaghan «Tools for Improving Machine Tool Volumetric Accuracy», CTMA 2005
- [58] C. Denver Lovett, M. Alkan Donmez « There is no simple volumetric accuracy standard» Manufacturing Engineering, vol. 139 (6), 2007.