



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

**Μέτρηση σφαλμάτων θέσης σε
ευθύγραμμες κινήσεις βιομηχανικού
ρομποτικού βραχίονα και μοντελοποίηση
τους με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα**



Διπλωματική Εργασία

Αγγελίδης Αντώνης

Επιβλέπων: Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

**«Το μεγαλύτερο λάθος, που μπορείς να κάνεις στη ζωή σου,
είναι να φοβάσαι συνεχώς ότι θα κάνεις λάθος»**

Elbert Hubbard, (1856-1915)

Ευχαριστίες

Είναι προσωπική μου ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν στη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή μου και επιβλέποντα της εργασίας κο Γ.-Χ. Βοσνιάκο για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε και τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Το ενδιαφέρον και η εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου ήταν καταλυτικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής. Μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα άκρως ενδιαφέρον αντικείμενο και να έρθω σε επαφή με εξοπλισμό που χρησιμοποιείται άμεσα στη βιομηχανία.

Δε θα μπορούσα να παραβλέψω να αναφερθώ στο εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας που υπήρξε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του εργαστηρίου και ιδιαιτέρως τους Υπ. Διδάκτορες Η. Μάτσα και Ν. Κοντολάτη, οι οποίοι αν και δεν είχαν την παραμικρή υποχρέωση, μου αφιέρωσαν χρόνο, συμβουλές και με βοήθησαν σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυψε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το συνάδελφο και προσωπικό φίλο Α. Καραγιαννίδη για τη συνεργασία που είχαμε στο εργαστήριο και την πολύτιμη υποστήριξη που μου παρείχε, καθώς και όλα τα κοντινά μου πρόσωπα που με βοήθησαν με το δικό τους μοναδικό τρόπο. Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τη Χ. Κουλούρη για τη βοήθεια που μου παρείχε στη συγγραφή της εργασίας.

Κλείνοντας θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου και στα αδέρφια μου που με τόση υπομονή και έναν ιδιαίτερο τρόπο μου συμπαραστάθηκαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών και συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου το τελευταίο διάστημα Ταυτόχρονα τους ζητώ συγγνώμη που δεν ήμουν διαθέσιμος και τυπικός απέναντι στις υποχρεώσεις μου. Ελπίζω να φάνηκα αντάξιος των προσδοκιών τους...

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	ii
Ευρετήριο Εικόνων	vii
Ευρετήριο Σχημάτων	viii
Ευρετήριο Πινάκων	xi
Ευρετήριο Διαγραμμάτων	xiii
Περίληψη	xiv
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Γρήγορη ανασκόπηση της Ιστορίας	1
1.2 Βασικές έννοιες ρομποτικής	2
1.2.1 Ανάλυση ελέγχου - Ευαισθησία	2
1.2.2 Ακρίβεια - Επαναληψιμότητα	2
1.2.3 Άκρο βραχίονα	3
1.2.4 Συστήματα συντεταγμένων	4
1.2.5 Άλλες παράμετροι	4
Κεφάλαιο 2: Προγραμματισμός ρομπότ	6
2.1 Μέθοδοι προγραμματισμού	6
2.1.1 Προγραμματισμός με διδασκαλία	7
2.1.2 Ρομποτικές γλώσσες προγραμματισμού	8
2.1.3 Προσομοίωση σε γραφικό περιβάλλον	10
2.2 CAD, Virtual Reality, Augmented Reality	11
2.3 Τύποι αρχείων CAD	12
2.3.1 Πρότυπο STL	13
Κεφάλαιο 3: Σφάλματα ρομπότ	14
3.1 Εισαγωγή	14
3.1.1 ISO 9283	14
3.1.2 Παράγοντες σφαλμάτων	16
3.2 Σφάλματα ακρίβειας	18
3.3 Κινηματικά και σφάλματα ρύθμισης ρομπότ	19

3.4	Τυχαία σφάλματα	19
3.5	Σφάλματα φορτίου	20
3.5.1	Παρέκκλιση άκρου	20
3.5.2	Διάκενο γρاناζιών	21
3.5.3	Θερμοκρασιακά σφάλματα	22
3.5.4	Δυναμικά σφάλματα επιτάχυνσης	22
3.5.5	Συνισταμένη σφαλμάτων φορτίου	23
3.6	Ρύθμιση ρομπότ με βάση μοντέλα σφαλμάτων	23
Κεφάλαιο 4: Θεωρία κινηματικής ρομπότ.....		24
4.1	Εισαγωγή.....	24
4.2	Βασικές έννοιες κινηματικής	24
4.2.1	Τελεστές μεταφοράς.....	24
4.2.2	Τελεστές στροφής.....	26
4.2.3	Τελεστές μετασχηματισμού.....	27
4.2.4	Συνήθη πλαίσια.....	28
4.3	Ευθεία κινηματική βραχίονα	29
4.3.1	Περιγραφή μελών και παραμέτρων βραχίονα.....	29
4.3.2	Παράμετροι Denavit – Hartenberg (DH).....	30
4.3.3	Μετασχηματισμοί μελών.....	31
4.3.4	Εφαρμογή για ρομπότ 6 DOF.....	31
4.4	Αντίστροφη κινηματική βραχίονα	33
4.4.1	Επιλυσιμότητα	34
Κεφάλαιο 5: Βιβλιογραφική ανασκόπηση		37
Κεφάλαιο 6: Περιγραφή εξοπλισμού		48
6.1	Εισαγωγή.....	48
6.2	Ο ρομποτικός βραχίονας Staubli RX 90	48
6.2.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	49
6.3	LDDM Optodyne MCV-500.....	49
6.3.1	Αρχή λειτουργίας	50
6.3.2	Περιγραφή εξαρτημάτων.....	51
6.3.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	54
6.3.4	Ακρίβεια και σφάλματα οργάνου.....	54

6.3.5	Σταθερή βάση στήριξης και ευθυγράμμισης	56
6.3.6	Μεθοδολογία εύκολης ευθυγράμμισης.....	57
6.3.7	Λογισμικό	59
6.4	IScan M300 της IMetric 3D GmbH	59
6.4.1	Αρχή λειτουργίας	60
6.4.2	Navigation	63
6.4.3	Περιγραφή εξοπλισμού	64
6.4.4	Τεχνικά Χαρακτηριστικά	66
6.4.5	Ακρίβεια και σφάλματα συστήματος	66
6.4.6	Ρύθμιση – αντιστάθμιση συστήματος.....	70
6.4.7	Λογισμικό	71
Κεφάλαιο 7:	Μετρήσεις - Δεδομένα.....	72
7.1	Εισαγωγή.....	72
7.2	Ρύθμιση βραχίονα και επιλογή τροχιάς	72
7.3	Μέτρηση LDDM Optodyne MCV500.....	74
7.3.1	Ρύθμιση παραμέτρων – διάφορες ενέργειες.....	75
7.3.2	Αποτελέσματα LDDM Optodyne MCV500.....	76
7.4	Μέτρηση IScan M300 IMetric.....	82
7.4.1	Ρύθμιση παραμέτρων – διάφορες ενέργειες.....	83
7.4.2	Προγραμματισμός Matlab	89
7.4.3	Αποτελέσματα IScan M300 IMetric	93
Κεφάλαιο 8:	Επεξεργασία – Μοντελοποίηση	98
8.1	Επεξεργασία των μετρήσεων.....	98
8.1.1	LDDM Optodyne MCV 500.....	98
8.1.2	IScan M300 IMetric	112
8.1.3	Σύγκριση μεθόδων	119
8.2	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ).....	121
8.2.1	Ο τεχνητός νευρώνας.....	121
8.2.2	Συναρτήσεις ενεργοποίησης	122
8.2.3	Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (feedforward)	123
8.2.4	Εκπαίδευση ΤΝΔ	124
8.2.5	Κριτήρια τερματισμού	124

8.2.6 ΤΝΔ και ρομποτικοί βραχίονες	125
8.3 Μοντελοποίηση	125
Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα – Έρευνα.....	133
9.1 Ανασκόπηση μελέτης.....	133
9.1.1 Μετρήσεις	133
9.1.2 Εξοπλισμός	134
9.1.3 Μοντελοποίηση	134
9.2 Περαιτέρω έρευνα	135
Βιβλιογραφία.....	136
Παράρτημα Α	140
Παράρτημα Β (κώδικες).....	145

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Teach Pendant για τον Staubli RX90 (Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών ΕΜΠ	8
Εικόνα 2.2: Εικονικό μοντέλο κυττάρου φόρτωσης-εκφόρτωσης τórνου από τον ρομποτικό βραχίονα STAUBLI RX90	12
Εικόνα 2.3: Πλέγμα αρχείου STL απλής επιφάνειας από το πρόγραμμα Meshlab.....	13
Εικόνα 5.1: Εικονικό ρομπότ σε πραγματικό περιβάλλον, καθαρισμός μινιατούρας αεροπλάνου [29].....	47
Εικόνα 6.1: Ανακλαστήρας 90°, αισθητήρες, μαγνητική βάση στήριξης.....	53
Εικόνα 6.2: Βάση στήριξης κεφαλής Optodyne laser	57
Εικόνα 6.3: Μοτίβο μετατοπισμένο ημιτονοειδώς με διαφορά φάσης $\theta = \pi/2$ (Phase shift).....	62
Εικόνα 6.4: Κωδικοποιημένοι στόχοι (πάνω αριστερά), απλοί στόχοι (κάτω αριστερά), προσημασμένο πλαίσιο για χρήση σε 3D scanning (δεξιά) ...	64
Εικόνα 6.5: Το σύστημα IScan M300 της IMetric	65
Εικόνα 6.6: Πλάκα αντιστάθμισης (A) και βαθμονομημένη βάση (B)	66
Εικόνα 6.7: Αναφορά προγράμματος IScan ύστερα από επιτυχημένη αντιστάθμιση σφαλμάτων	70
Εικόνα 7.1: Τοποθέτηση στόχου και απόσταση laser του πειράματος	73
Εικόνα 7.2: Παράθυρο ρυθμίσεων Optodyne laser	75
Εικόνα 7.3: Διάταξη βραχίονα – Iscan M300.....	83
Εικόνα 7.4: Κυκλική διαμόρφωση άκρου βραχίονα.....	84
Εικόνα 7.5: Διάταξη μέτρησης με τις κάμερες V 70	95
Εικόνα 8.1: Τοπολογία ΤΝΔ στο περιβάλλον Matlab	128
Εικόνα 8.2: Αναφορά κώδικα Matlab	129

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Σχέση ακρίβειας και ευαισθησίας ρομπότ υπό ιδανικές συνθήκες 3	
Σχήμα 2.1: Τροχιά άκρου βραχίονα με κίνηση α) από σημείο σε σημείο και β) σε ευθεία γραμμή	10
Σχήμα 3.1: Ακρίβεια και επαναληψιμότητα	16
Σχήμα 3.2: Σφάλματα ρομποτικού συστήματος.....	17
Σχήμα 3.3: Διακριτά σημεία προσπέλασης άκρου σε έναν άξονα.....	18
Σχήμα 3.4: Σφάλμα λόγω κινηματικού μοντέλου – calibration του ρομπότ	19
Σχήμα 3.5: Τυχαία σφάλματα – επαναληψιμότητα	19
Σχήμα 3.6: Παρέκκλιση ‘δ’ του άκρου λόγω φορτίου	20
Σχήμα 3.7: Διάκενο δοντιών συστήματος μετάδοσης κίνησης (Backlash).....	22
Σχήμα 4.1: Διάνυσμα μεταφοράς ${}^A P_{Trans}$	25
Σχήμα 4.2: Στροφή διανύσματος P και πλαισίου ως προς τον άξονα Z κατά 40°	26
Σχήμα 4.3: Επώνυμα πλαίσια	29
Σχήμα 4.4: Απεικόνιση παραμέτρων μελών βραχίονα.....	30
Σχήμα 4.5: Προσάρτηση πλαισίων σε βραχίονα 6 DOF	32
Σχήμα 4.6: Χώρος εργασίας (πλάγια όψη)	34
Σχήμα 4.7: Χώρος εργασίας (κάτοψη).....	35
Σχήμα 4.8: Δύο λύσεις για προσέγγιση ενός σημείου (elbow-in and out)	35
Σχήμα 5.1: Διάταξη μέτρησης με θεοδόλιχους	38
Σχήμα 5.2: Σύστημα αναφοράς και μέτρησης.....	39
Σχήμα 5.3: Στόχος του ρομπότ (peg in the hole)	41
Σχήμα 5.4: Μετρητική διάταξη	41

Σχήμα 5.5: Μεθοδολογία μοντελοποίησης και αντιστάθμισης σφαλμάτων σε ρομποτικούς βραχίονες	42
Σχήμα 5.6: Σφάλματα θέσης ανάλογα με τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη	43
Σχήμα 5.7: Σφάλματα θέσης (διακεκομμένη γραμμή) για συγκεκριμένη τροχιά. (Αριστερά - εκτίμηση με χρήση πολυωνύμου Fourier με μία αρμονική και δεξιά- με δύο αρμονικές)	44
Σχήμα 5.8: Προσέγγιση σφαλμάτων θέσης (μαύρη γραμμή) για συγκεκριμένη τροχιά (δεξιά – πολυώνυμο 1 ^{ου} βαθμού αριστερά – πολυώνυμο 2 ^{ου} βαθμού)	45
Σχήμα 5.9: Τα προσαρτημένα συστήματα συντεταγμένων του 5 DOF βραχίονα	46
Σχήμα 5.10: Δημιουργία τροχιάς κίνησης βραχίονα (με βάση προσχεδιασμένης τροχιάς) μέσω επεξεργασίας εικόνας από οπτικά αισθητήρια.....	47
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα εργασιών για off-line προγραμματισμό [28]	47
Σχήμα 6.1: Συμβολόμετρο μίας συχνότητας	50
Σχήμα 6.2: Αρχή λειτουργίας μοντέλου MCV-500 της Optodyne Inc.....	51
Σχήμα 6.3: Κεφαλή MCV-500.....	51
Σχήμα 6.4: Τροφοδοτικό – μονάδα επεξεργασίας MCV-500	52
Σχήμα 6.5: αντανακλαστικός φακός τύπου γωνιακού κύβου	53
Σχήμα 6.6: Σφάλμα Abbe'	56
Σχήμα 6.7: Διαδικασία ευθυγράμμισης.....	58
Σχήμα 6.8: Αρχή της τριγωνοποίησης.....	60
Σχήμα 6.9: Συσχέτιση των: Λειτουργία ματιών (αριστερά) και ανάλογη λειτουργία με κάμερες (δεξιά)	61
Σχήμα 6.10: Καταγραφή μοτίβου με δύο κάμερες μη-συμμετρικά τοποθετημένες.....	63
Σχήμα 6.11: Είδη αλλοιώσεων φακών.....	68
Σχήμα 6.12: Μορφές αλλοιώσεων ακτινικού τύπου (radial)	68

Σχήμα 6.13: Εφαπτομενικές αλλοιώσεις φακών	69
Σχήμα 7.1: Σχηματική αναπαράσταση περιβάλλοντα χώρου του εκτεταμένου βραχίονα	73
Σχήμα 7.2: Μέτρηση με 3D σαρωτή βασισμένο σε τρίποδο.....	83
Σχήμα 7.3: Οπτική κύκλου υπό γωνία	85
Σχήμα 7.4: Μερικά από τα σχήματα που δοκιμάστηκαν	86
Σχήμα 7.5: Τελικός στόχος επιλογής για τη διαδικασία των μετρήσεων.....	87
Σχήμα 7.6: Μετατροπή πραγματικού στόχου σε νέφος σημείων.....	87
Σχήμα 7.7: Πάνω: χάρτης σφαλμάτων αριστερής και δεξιάς κάμερας, Κάτω: σετ 5 σαρώσεων (μετατόπιση 50 mm) με όλα τα δεδομένα (αριστερά) και με αποκοπή των περιττών (δεξιά).....	88
Σχήμα 7.8: Μέθοδος LSF – ελαχιστοποίηση αποστάσεων για $y \sim x$ και $x \sim y$ αντίστοιχα [39].....	90
Σχήμα 7.9: Μέθοδος PCA – ελαχιστοποίηση αποστάσεων [39]	90
Σχήμα 7.10: Ιδιοδιανύσματα (χρώμα) για παράσταση των 3 αξόνων του νέφους σημείων [40]	91
Σχήμα 7.11: Το αρχικό νέφος σημείων, η προβολή τους στο επίπεδο και το τελικό νέφος σημείων [40]	91
Σχήμα 7.12: Βέλτιστο επίπεδο του νέφους σημείων	93
Σχήμα 7.13: Μεγέθυνση τμήματος από το Σχήμα 7.12.....	93
Σχήμα 7.14: Fitting έλλειψης	94
Σχήμα 7.15: Μεγέθυνση τμήματος από το Σχήμα 7.14.....	94
Σχήμα 7.16: Σετ μετρήσεων Matlab.....	95
Σχήμα 8.1: Τεχνητός νευρώνας.....	122
Σχήμα 8.2: Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο	122
Σχήμα 8.3: Τυπικές συναρτήσεις ενεργοποίησης ΤΝΔ.....	123

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 4.1: Παράμετροι Denavit – Hartenberg μελών ρομπότ 6 DOF	32
Πίνακας 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά βραχίονα Staubli RX 90 [30]	49
Πίνακας 6.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά LDDM MCV-500 της Optodyne inc.	54
Πίνακας 6.3: Όγκος σάρωσης ανάλογα με το μοντέλο καμερών.....	65
Πίνακας 6.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά IScan M300	66
Πίνακας 6.5: Ακρίβεια συστήματος IScan M300 [35].....	67
Πίνακας 7.1: Παράμετροι βραχίονα για την εκτέλεση των μετρήσεων.....	74
Πίνακας 7.2: Σετ μετρήσεων 1 – 5 (σε mm).....	77
Πίνακας 7.3: Σετ μετρήσεων 6 – 10 (σε mm).....	79
Πίνακας 7.4: Σετ μετρήσεων 11 – 15 (σε mm).....	81
Πίνακας 7.5: Αποστάσεις κέντρων - αποτελέσματα IScan M300 και Matlab με κάμερες V 400 (σε mm)	96
Πίνακας 7.6: Αποστάσεις κέντρων - Αποτελέσματα IScan M300 και Matlab με κάμερες V 70 (σε mm)	97
Πίνακας 8.1: Σφάλμα ανά βήμα Σετ 1-5 (σε mm).....	101
Πίνακας 8.2: Σφάλμα ανά βήμα Σετ 6-10 (σε mm).....	103
Πίνακας 8.3: Σφάλμα ανά βήμα Σετ 11 – 15 (σε mm).....	105
Πίνακας 8.4: Επαλήθευση επαναληψιμότητας Staubli RX 90 στα $\pm 0,02$ mm	109
Πίνακας 8.5: Ανά βήμα και συνολικό σφάλμα της τροχιάς προς μοντελοποίηση (σε mm).....	110
Πίνακας 8.6: Ανά βήμα και συνολικό σφάλμα γεωμετρικής και γραμμικής προσέγγισης του IScan M300 με χρήση του εξαρτήματος καμερών V 400 (σε mm).....	114
Πίνακας 8.7: Ανά βήμα και συνολικό σφάλμα θέσης γραμμικής προσέγγισης IScan M300 με χρήση του εξαρτήματος καμερών V 70 (σε mm).....	117

Πίνακας 8.8: Ανά βήμα και συνολικό σφάλμα μετρήσεων επαλήθευσης ΤΝΔ (σε mm)	127
Πίνακας 8.9: Τα καλύτερα εκπαιδευμένα δίκτυα για το κάθε συνδυασμό συναρτήσεων ενεργοποίησης	128
Πίνακας 8.10: Συγκριτικός πίνακας συνδυασμών των συναρτήσεων ενεργοποίησης.....	130

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 8.1: Σφάλμα ανά βήμα Σετ 1 - 15	107
Διάγραμμα 8.2: Σφάλμα ανά βήμα της τροχιάς προς μοντελοποίηση.....	111
Διάγραμμα 8.3: Συνολικός χάρτης σφάλματος επιλεγμένης τροχιάς.....	111
Διάγραμμα 8.4: Ανά βήμα σφάλμα θέσης IScan M300 με κάμερες V 400 (γεωμετρική προσέγγιση)	115
Διάγραμμα 8.5: Συνολικό σφάλμα θέσης IScan M300 με κάμερες V 400 (γεωμετρική προσέγγιση)	115
Διάγραμμα 8.6: Ανά βήμα σφάλμα θέσης IScan M300 με κάμερες V 70 (γραμμική προσέγγιση).....	118
Διάγραμμα 8.7: Συνολικό σφάλμα θέσης IScan M300 με κάμερες V 70 (γραμμική προσέγγιση).....	118
Διάγραμμα 8.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων IScan V 70 με το μέσο όρο των μετρήσεων του Ortodyne laser	120
Διάγραμμα 8.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων IScan V 70 με τη 1 ^η μέτρηση του Ortodyne laser	120
Διάγραμμα 8.10: Προσομοίωση ΤΝΔ στα δεδομένα εκπαίδευσης	131
Διάγραμμα 8.11: Προσομοίωση ΤΝΔ στα δεδομένα επικύρωσης.....	131
Διάγραμμα 8.12: Σφάλματα θέσης της τροχιάς μετά την αντιστάθμισή τους από το ΤΝΔ.....	132
Διάγραμμα 8.13: Σφάλματα θέσης των σημείων επικύρωσης μετά την αντιστάθμισή τους από το ΤΝΔ	132

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση σφάλματος θέσης άκρου (end effector) και μοντελοποίησής του με τη μέθοδο των νευρωνικών δικτύων. Ο ρομποτικός βραχίονα που χρησιμοποιήθηκε είναι ο STAUBLI RX-90 6 DOF και βρίσκεται στις κτηριακές εγκαταστάσεις της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Βασική προϋπόθεση και απαίτηση, προτού αρχίσει κάποιος τη διαδικασία των μετρήσεων, είναι η εξοικείωσή του με το ρομπότ και η κατανόηση βασικών κινηματικών μοντέλων που αυτό ακολουθεί. Αυτός είναι γενικός κανόνας στην περίπτωση χρήσης οποιουδήποτε παρόμοιου βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα, καθώς πέρα από το στόχο της σωστής διεκπεραίωσης της εργασίας, τίθεται και θέμα ασφάλειας και ακεραιότητας τόσο των ανθρώπων-χειριστών όσο και του ίδιου του εξοπλισμού.

Η μέτρηση ακρίβειας της κίνησης ενός ρομποτικού βραχίονα είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία λόγω των πολλών παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Στις μετρήσεις υπεισέρχονται πολλών ειδών σφάλματα. Για αυτόν ακριβώς το λόγο έχουν δημιουργηθεί διάφορες μέθοδοι που προσπαθούν να προσεγγίσουν τα σφάλματα αυτά με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Στην παρούσα εργασία, αρχικά, γίνεται η βασική απλοποίηση μέτρησης σφάλματος σε μία ευθεία και μόνο (με συγκεκριμένη αρχή και τέλος), ενώ οι διάφορες παράμετροι όπως ταχύτητα, επιτάχυνση, βάρος, κλπ. μένουν σταθερές. Επόμενο βήμα, είναι η χρήση του μετρολογικού εξοπλισμού που διατίθεται στο εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών για τη μέτρηση του σφάλματος και η επεξεργασία των δεδομένων για περαιτέρω χρήση. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μετρητικές διατάξεις : α) το σύστημα LDDM MCV-500 της Optodyne Inc. και β) το σύστημα IScan M300 της εταιρίας IMetric. Τέλος, τα επεξεργασμένα δεδομένα των μετρήσεων εισάγονται στο περιβάλλον προγραμματισμού της Matlab, όπου και γίνεται η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου ως μέθοδος διόρθωσης της ιδανικής τροχιάς του ρομπότ.

Η εργασία χωρίζεται σε θεματικές ενότητες ανάλογα με το περιεχόμενο που διαπραγματεύονται, ενώ έγινε προσπάθεια καταγραφής της διαδικασίας με τη σειρά που πραγματικά έγινε στο εργαστήριο.

Τα κεφάλαια 1 έως και 4 συνιστούν τη θεωρία που χρησιμοποιήθηκε. Πιο συγκεκριμένα:

Στο κεφάλαιο 1 εξετάζονται βασικές έννοιες τις ρομποτικής χρήσιμες για την περαιτέρω κατανόηση αυτής της μελέτης.

Στο κεφάλαιο 2 αναφέρονται διάφοροι τρόποι προγραμματισμού βιομηχανικών ρομποτικών βραχιόνων και τρόποι επικοινωνίας τους με προγράμματα μοντελοποίησης τύπου CAD.

Στο κεφάλαιο 3 εξετάζονται τα σφάλματα που εισάγονται στο σύστημά μας καθώς και οι λόγοι που αυτά εμφανίζονται.

Τέλος, στο κεφάλαιο 4, κυρίως για την πληρότητα της εργασίας γίνεται μια επισκόπηση του μαθηματικού υπόβαθρου της ευθείας κινηματικής, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για ένα 6 DOF βραχίονα και γίνεται μικρή εισαγωγή στην αντίστροφη κινηματική.

Το κεφάλαιο 5 αποτελεί τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και τις πηγές από τις οποίες προέκυψαν οι διάφορες ιδέες και μέθοδοι.

Τα κεφάλαια 6 έως 9 περιλαμβάνουν στην ουσία τη δουλειά και μελέτη του συγγραφέα αυτής της διπλωματικής.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται μια εκτενής παρουσίαση του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε. Γίνεται αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά, τον τρόπο συνδεσμολογίας, τους τρόπους αντιστάθμισης και ρύθμισης και τη χρήση του λογισμικού με τον οποίο ο εξοπλισμός συνεργάζεται.

Στο κεφάλαιο 7 περιγράφεται το πείραμα. Αναλύονται οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη, οι τυχόν υποθέσεις απλοποίησης χωρίς όμως κατάργηση της γενικότητας, η διάταξη του πειράματος (τοπολογία) και εν τέλει τα τελικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις.

Στο κεφάλαιο 8 μπαίνουμε στο τμήμα της μοντελοποίησης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Ύστερα από μια μικρή εισαγωγή στα ΤΝΔ, περιγράφεται η διαδικασία προετοιμασίας των δεδομένων για χρήση και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Τέλος, στο κεφάλαιο 9 σχολιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας, εξάγονται συμπεράσματα και παρατίθενται προτάσεις για μελλοντικές έρευνες. Ακολουθεί η βιβλιογραφία και τα παραρτήματα Α, Β.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γρήγορη ανασκόπηση της Ιστορίας

Τα ρομπότ, στη σημερινή εποχή, αποτελούν τη ραχοκοκαλιά της βιομηχανικής παραγωγής. Χιλιάδες κατασκευαστές στηρίζονται στη παραγωγικότητα, την αυξημένη επίδοση και την οικονομία που τους παρέχει ο μοντέρνος βιομηχανικός αυτοματισμός. Για να φτάσουμε όμως σε αυτό το σημείο, όπου ρομπότ 6 αρθρώσεων εφοδιασμένα με αυτόνομους ελεγκτές στηρίζουν μια ολόκληρη βιομηχανία, χρειάστηκε πολύς χρόνος, εξέλιξη και αναρίθμητα πειράματα.

Όλα ξεκίνησαν από τον George Charles Devol ο οποίος συχνά αποκαλείται ο “πατέρας” της ρομποτικής. Ο Devol καθιέρωσε τον όρο βιομηχανικό ρομπότ το 1954, ενώ λίγα χρόνια αργότερα, το 1956 μαζί με τον Joseph F. Engelberger ίδρυσαν τη πρώτη εταιρία ρομποτικής, ονόματι Unimation. Η εξέλιξη πάνω στα βιομηχανικά ρομπότ συνεχίστηκε με κύριο πρωταγωνιστή την Unimation, έως και το 1970 όπου έχουμε την εμφάνιση μεγάλων Ιαπωνικών εταιριών στον τομέα. Το 1969 ο V. Scheinman στο πανεπιστήμιο του Stanford κατασκευάζει ρομπότ 6 αρθρώσεων με ηλεκτροκινητήρες, ενώ αργότερα σε συνεργασία με τη Unimation κατασκευάζει ένα δεύτερο ρομποτικό βραχίονα 6 αρθρώσεων ονόματι PUMA. Στην Ευρώπη έχουμε την εμφάνιση μεγάλων εταιριών όπως την ABB Robotics και KUKA Robotics, ενώ στην Αμερική τις General Electric, General Motors, Adept Technology. Το 1984 η Unimation εξαγοράζεται από την αμερικανική Westinghouse Electric Corporation και στη συνέχεια πωλείται, το 1988, στη Γαλλική εταιρία Staubli Faverges SCA, η οποία μέχρι και σήμερα δραστηριοποιείται στον τομέα. Οι δαπάνες και ο ενθουσιασμός για τον τομέα της ρομποτικής όμως, σε πολλές περιπτώσεις δε συμβάδιζε με την κατανόηση των βασικών αρχών που τη διέπουν και οδήγησε πολλές εταιρίες σε αδιέξοδο. Στην Αμερική η αγορά των ρομποτικών βραχιόνων σχεδόν εξαφανίστηκε ενώ σε Ευρώπη και Ιαπωνία

άκμασε. Λίγες μη Ιαπωνικές παραμένουν στην αγορά μεγαλύτερες των οποίων είναι: η αμερικανική Adept Technology, η γαλλική Staubli-Unimation, η ελβετική ABB, η γερμανική KUKA Robotics και η ιταλική Comau. [1] [2]

1.2 Βασικές έννοιες ρομποτικής

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία αναφορά και επεξήγηση των βασικών εννοιών της ρομποτικής, ούτως ώστε να γίνει ευκολότερη η κατανόηση των επόμενων κεφαλαίων.

1.2.1 Ανάλυση ελέγχου - Ευαισθησία

Ανάλυση ελέγχου είναι η μικρότερη μεταβολή θέσης, που μπορεί να μετρήσει η διάταξη ανάδρασης θέσης – αισθητήρας ή να εκτελέσει ο επενεργητής του ρομπότ, οποιαδήποτε από τις δύο είναι μεγαλύτερη [3]. Με άλλα λόγια υπάρχουν δύο συνιστώσες. Πρώτη είναι η ανάλυση του ελεγκτή, δηλαδή η δυνατότητα χωρισμού μιας απόστασης σε πολύ μικρά τμήματα που εξαρτάται από τα bit μνήμης που έχει διαθέσιμα. Δεύτερη συνιστώσα είναι η ανάλυση των επενεργητών που εξαρτάται από την κατασκευή τους και τα ηλεκτρομηχανικά τους μέρη. Παραδείγματος χάριν, αν έχουμε ένα περιστρεφόμενο οπτικό κωδικοποιητή, σε μια περιστροφική άρθρωση, ο οποίος μετράει μεταβολές 0.01 μοιρών αλλά ο κινητήρας-servo που κινεί την άρθρωση έχει ανάλυση 0.5 μοιρών τότε η ανάλυση ελέγχου είναι 0.5 μοίρες.

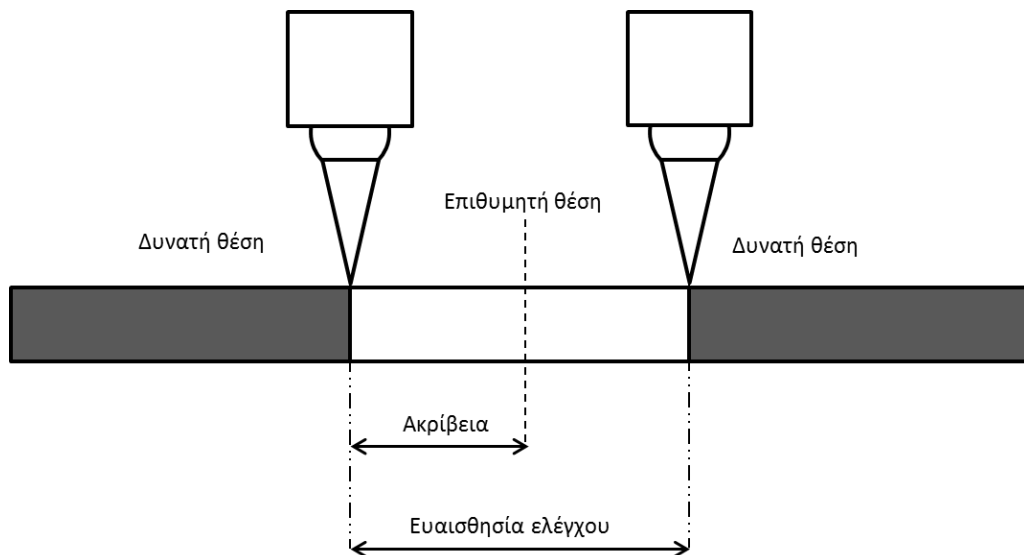
1.2.2 Ακρίβεια - Επαναληψιμότητα

Ακρίβεια είναι το πόσο κοντά σε ένα προκαθορισμένο σημείο δύναται το ρομπότ να τοποθετήσει το άκρο του βραχίονα.

Επαναληψιμότητα είναι πόσο κοντά μεταξύ τους είναι τα σημεία που φτάνει το άκρο του βραχίονα, εκτελώντας την ίδια εντολή κατ' επανάληψη [4]. Είναι, δηλαδή, η μέτρηση του σφάλματος ή της τυπικής απόκλισης όταν επαναλαμβανόμενα μετακινούμαστε σε ένα ορισμένο σημείο. Η επαναληψιμότητα είναι συνήθως μικρότερη της ακρίβειας.

Συνήθως υπάρχει σύγχυση μεταξύ των τριών εννοιών που αναπτύχθηκαν παραπάνω και περαιτέρω ανάλυσή τους θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο. Αρκεί εδώ να αναφέρουμε ότι η ακρίβεια εξαρτάται από την ευαισθησία ελέγχου αλλά και από πολλές άλλες παραμέτρους όπως π.χ. τυχαία σφάλματα. Σε ιδανικές συνθήκες, όπου δεν εισάγονται σφάλματα στο σύστημα, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\text{ακρίβεια} = \frac{\text{ευαισθησία ελέγχου}}{2}$$



Σχήμα 1.1: Σχέση ακρίβειας και ευαισθησίας ρομπότ υπό ιδανικές συνθήκες

1.2.3 Άκρο βραχίονα

Το άκρο του βραχίονα (end effector) αποτελεί το πιο σημαντικό τμήμα ενός ρομπότ. Όπως είδαμε παραπάνω, οι ορισμοί της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας ενός ρομπότ γίνονται αναφορικά με το άκρο. Εκεί γίνεται άμεσα η επαφή του ρομπότ με το περιβάλλον και η εκτέλεση της εργασίας που του έχει ανατεθεί. Συνήθως τα άκρα ρομποτικών βραχιόνων είναι αρπάγες ή κάποιο εργαλείο χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν και πιο εξειδικευμένες κατασκευές όπως π.χ. "πιστόλι" ψεκασμού πλάσματος.

1.2.4 Συστήματα συντεταγμένων

Για την έκφραση της θέσης των διαφόρων μελών του βραχίονα χρησιμοποιούνται κυρίως τα ακόλουθα τρία (3) συστήματα συντεταγμένων.

- 1) Παγκόσμιες συντεταγμένες: Ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων τοποθετείται στη βάση του ρομπότ και όλες οι θέσεις των διαφόρων μερών του, εκφράζονται αναφορικά με αυτή.
- 2) Συντεταγμένες άκρου-εργαλείου: Εδώ το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων τοποθετείται στο άκρο του βραχίονα λαμβάνοντας πάντα υπόψη και την περιστροφή του.
- 3) Συντεταγμένες αρθρώσεων: Η θέση της κάθε άρθρωσης (π.χ. γωνίες όλων των περιστροφικών αρθρώσεων) χρησιμοποιείται για τη περιγραφή της θέσης του ρομπότ.

1.2.5 Άλλες παράμετροι

Επιπρόσθετες παράμετροι που παίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλές εφαρμογές και μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια ενός ρομποτικού βραχίονα είναι οι:

- 1) Ταχύτητα: Αναφέρεται στη μέγιστη ταχύτητα που είναι εφικτό να υπάρξει στο άκρο του βραχίονα ή που μπορεί να επιτύχει μία άρθρωση. Δεν υπάρχει ακριβές νούμερο καθώς η ταχύτητα μεταβάλλεται δυναμικά καθώς το ρομπότ μετακινείται από θέση σε θέση και αλλάζει τη γεωμετρία του. Για αυτό το λόγο αναφερόμαστε, κυρίως, στη μέγιστη δυνατή ασφαλή ταχύτητα χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δε μπορούμε να την υπερβούμε (πάντα με προσοχή).
- 2) Επιτάχυνση: Το πόσο γρήγορα μπορεί ένα ρομπότ να επιταχύνει/επιβραδύνει μια άρθρωση. Π.χ. εκτελώντας μια πολύ μικρή κίνηση θα προλάβει το ρομπότ να αποκτήσει την επιθυμητή ταχύτητα προτού φτάσει στο στόχο; Ή θα μπορέσει να ακολουθήσει μία τροχιά με πολλές αλλαγές κατεύθυνσης;

- 3) Φορτίο: Το μέγιστο φορτίο που είναι ικανός να χειριστεί ένας βραχίονας, χωρίς να έχουμε σημαντική απώλεια ακρίβειας. Το φορτίο με το οποίο επιβαρύνονται οι ενεργοποιητές και το σύστημα διεύθυνσης είναι συνάρτηση: α) της συγκεκριμένης διαμόρφωσης του βραχίονα, β) του χρόνου υποστήριξης του φορτίου και γ) του τρόπου δυναμικής διαχείρισης του φορτίου, που εξαρτάται από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται εξαιτίας της κίνησης και των αδρανειακών φαινομένων. [3]

Όπως διαπιστώνουμε, όλες οι προαναφερθείσες παράμετροι αλληλοεξαρτώνται έως σε ένα βαθμό ενώ παίζουν σημαντικό ρόλο στο χαρακτηρισμό της ακρίβειας και επαναληψιμότητας ενός ρομποτικού βραχίονα.

Κεφάλαιο 2: Προγραμματισμός ρομπότ

Η εξέλιξη των βιομηχανικών ρομπότ μαζί με τη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων και κατ' επέκταση της υπολογιστικής ισχύς, έχει οδηγήσει στην δυνατότητα εκτέλεσης πολύπλοκων εργασιών και μαζικής παραγωγής αγαθών. Η βιομηχανική παραγωγή, πλέον, αποτελείται από ομάδες ρομποτικών βραχιόνων (κύτταρα) τα οποία είτε εκτελούν μεμονωμένες εργασίες είτε συνεργάζονται με άλλα κύτταρα για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής (π.χ. αυτοκινητοβιομηχανία). Όπως γίνεται αντιληπτό, ο προγραμματισμός αυτών των κυττάρων με τους παραδοσιακούς τρόπους προγραμματισμού (π.χ. με διδασκαλία) όχι μόνο είναι υπερβολικά χρονοβόρος και προϋποθέτει μεγάλα κόστη (λόγο χρήσης ανθρωπίνου δυναμικού και απασχόλησης μηχανημάτων) αλλά επίσης κρύβει τον κίνδυνο εισαγωγής σφαλμάτων αφού εξαρτάται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από την ικανότητα και εμπειρία του χειριστή/προγραμματιστή. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι προγραμματισμού όπως με χρήση γλωσσών προγραμματισμού ή κινηματικής προσομοίωσης σε γραφικό περιβάλλον.

2.1 Μέθοδοι προγραμματισμού

Για τα βιομηχανικά ρομπότ που διαθέτουν υπολογιστές-ελεγκτές μπορούν να διακριθούν τρεις μέθοδοι προγραμματισμού [5]. Αυτές είναι:

- 1) Με διδασκαλία σημείο-σημείο (Leadthrough on-line programming)
- 2) Με γλώσσα προγραμματισμού για ρομπότ (on-line και off-line programming)
- 3) Με προσομοίωση σε γραφικό περιβάλλον (off-line programming)

Πιο αναλυτικά έχουμε:

2.1.1 Προγραμματισμός με διδασκαλία

Με αυτή τη μέθοδο, η απαιτούμενη τροχιά “διδάσκεται” στο ρομπότ και αποθηκεύεται στη μνήμη του ελεγκτή για μελλοντική αναπαραγωγή της κίνησης. Ο χρήστης, δηλαδή, μετακινεί το ρομπότ “χειροκίνητα” στα σημεία που επιθυμεί και τα αποθηκεύει ένα ένα με τη σειρά στον ελεγκτή του ρομπότ. Ο όρος on-line programming σημαίνει πως το ρομπότ κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού του χρησιμοποιείται άμεσα και άρα δεν είναι δυνατή η οποιαδήποτε εκμετάλλευσή του. Η μετακίνηση του βραχίονα στα διάφορα σημεία γίνεται με τους εξής τρόπους:

- 1) Εντολές θέσης: Δίνονται από το χρήστη οι συντεταγμένες του επιθυμητού σημείου (x y z) στη γραμμή εντολών του προγράμματος του ρομπότ και αποθηκεύονται ως μεταβλητές θέσης τις οποίες μπορεί αυτό αργότερα να διαβάσει και να εκτελέσει. Προϋπόθεση είναι οι συντεταγμένες των σημείων αναφορικά με το ρομπότ να είναι γνωστές.
- 2) Τροφοδοτούμενη διδασκαλία με teach pendant: Είναι στην ουσία ένα χειριστήριο το οποίο επιτρέπει τη χειροκίνητη μετατόπιση των αξόνων του βραχίονα αναφορικά με το σύστημα συντεταγμένων που έχει επιλεγεί. Συνήθως, υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης και άλλων παραμέτρων ενός ρομπότ όπως π.χ. η ταχύτητα ώστε ο χρήστης να μπορεί να προσεγγίσει ένα σημείο με χαμηλή ταχύτητα και άρα μεγαλύτερη ακρίβεια. Στη συνέχεια το σημείο αποθηκεύεται με τον ίδιο τρόπο όπως προηγουμένως. Χαρακτηριστικό, επίσης, είναι το κόκκινο κουμπί άμεσης ακινητοποίησης του ρομπότ σε περίπτωση ανάγκης. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται το teach pendant που διαθέτει ο ελεγκτής του ρομποτικού βραχίονα του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών Ε.Μ.Π. και οι λειτουργίες που διαθέτει.
- 3) Χειροκίνητη διδασκαλία ή μέθοδος “περάσματος”: Ο χειριστής έχει τη δυνατότητα με συγκεκριμένη εντολή να θέσει τον βραχίονα σε “χαλάρωση” και να είναι δυνατή η μετακίνησή του, κατά μήκος της επιθυμητής τροχιάς, με το χέρι. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας ο ελεγκτής τραβάει τα δεδομένα της τροχιάς και μπορεί να την αναπαραγάγει με μεγάλη ακρίβεια. Όπως καταλαβαίνουμε, χρησιμοποιείται κυρίως για συνεχείς πορείες με ομαλές καμπύλες που δύσκολα καταγράφονται με τη χρήση των δύο παραπάνω μεθόδων. Σε περίπτωση μεγάλων βραχιόνων χρησιμοποιούνται βοηθητικά μηχανήματα για την μετακίνησή τους πάνω στην επιθυμητή τροχιά.



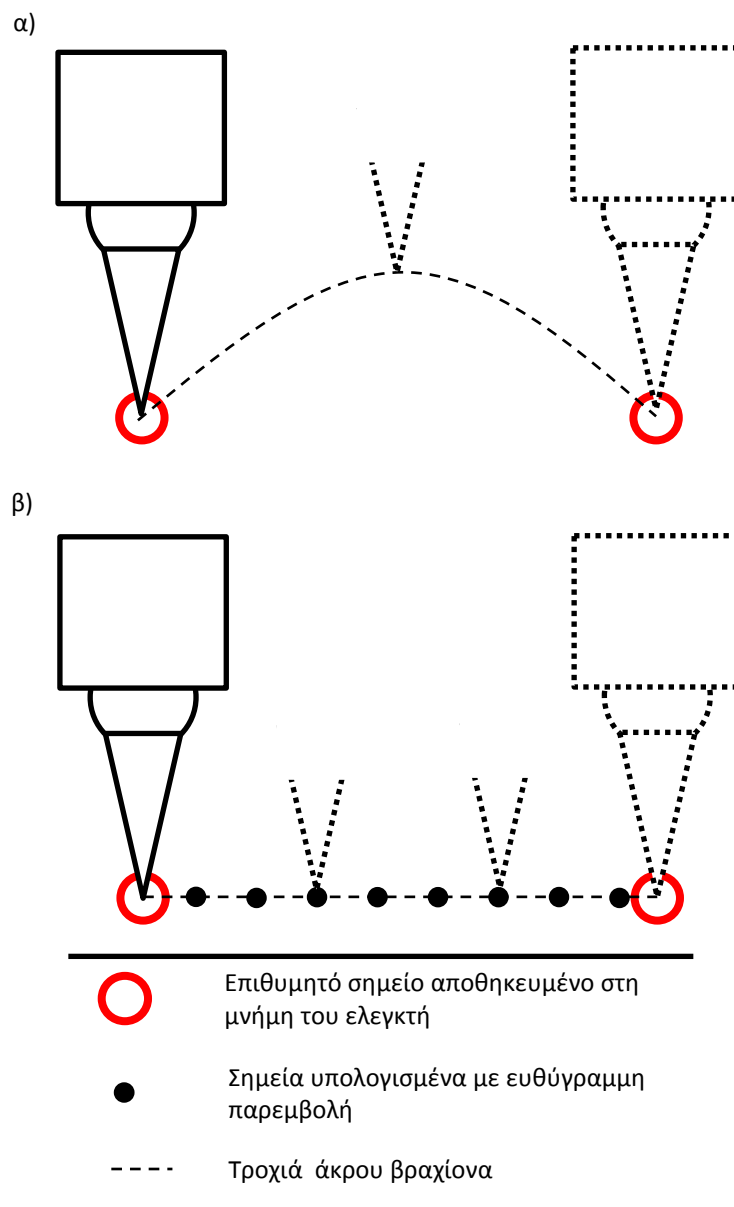
Εικόνα 2.1: Teach Pendant για τον Staubli RX90 (Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών ΕΜΠ)

2.1.2 Ρομποτικές γλώσσες προγραμματισμού

Η μέθοδος προγραμματισμού με γλώσσες προγραμματισμού ρομπότ είναι παρόμοια με αυτή σε έναν απλό Η/Υ. Χρησιμοποιούνται γλώσσες υψηλού επιπέδου (π.χ. VAL ή η πιο πρόσφατη έκδοσή της V+) όπου διάφορα προφίλ κίνησης περιγράφονται από λέξεις (π.χ. MOVE). Έχουμε, δηλαδή, ένα συνδυασμό λεκτικών όρων και μεθόδων διδασκαλίας. Οι λεκτικοί όροι περιγράφουν συνήθως την κίνηση, ενώ οι μέθοδοι διδασκαλίας καθορίζουν τη θέση του ρομπότ και τον προσανατολισμό του, κατά τη διάρκεια αλλά και στο τέλος της κίνησης.

Ο προγραμματισμός κίνησης με μια απλή εντολή, όπως η MOVE, σε ένα ρομπότ 6 περιστροφικών αρθρώσεων (Staubli RX90) μπορεί να εκτελεστεί με διάφορους τρόπους [5]. Παραδείγματος χάριν, αν ζητηθεί στο ρομπότ να πάει από ένα σημείο σε ένα άλλο τότε, συνήθως, ο ελεγκτής υπολογίζει τις γωνίες που πρέπει να διανύσει κάθε άρθρωση και το χρόνο που απαιτείται. Κατόπιν, τις κινεί όλες με κατάλληλη ταχύτητα, διαφορετική στην κάθε μία, ώστε να ξεκινάνε από το ένα σημείο και να σταματάνε στο άλλο ταυτόχρονα.

Με αυτόν τον τρόπο καταλαβαίνουμε ότι τόσο η τροχιά που θα ακολουθήσει ο βραχίονας όσο και ο προσανατολισμός του κατά τη διάρκεια της κίνησης είναι απροσδιόριστες. Η κίνηση, επομένως, γίνεται κυρίως με κριτήριο την επίτευξη της ταχύτερης μετάβασης στο επιθυμητό σημείο. Στην περίπτωση που θέλουμε ανάμεσα στα επιθυμητά σημεία μία συγκεκριμένη τροχιά (π.χ. ευθεία γραμμή-εντολή MOVES) τότε ο ελεγκτής χρησιμοποιεί ευθύγραμμη ή κυκλική παρεμβολή ώστε να υπολογίσει τα απαραίτητα σημεία στο χώρο από τα οποία πρέπει να περάσει το άκρο του βραχίονα προτού φτάσει στο τελικό σημείο.



Σχήμα 2.1: Τροχιά άκρου βραχίονα με κίνηση α) από σημείο σε σημείο και β) σε ευθεία γραμμή

Η μέθοδος αυτή μπορεί να γίνει είτε on-line, δηλαδή άμεσα γίνεται ο προγραμματισμός στον ελεγκτή με σταματημένο το ρομπότ, είτε off-line όπου ο προγραμματιστής φτιάχνει τον απαραίτητο κώδικα “σπίτι” και απλά τον φορτώνει στον ελεγκτή χωρίς να χρειαστεί διακοπή της λειτουργίας.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου σε σχέση με αυτή της διδασκαλίας είναι σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε δυνατότητα εκμετάλλευσης αισθητήρων οι οποίοι μπορούν να δίνουν αναλογικό/ψηφιακό σήμα, βελτιωμένο έλεγχο εξοπλισμού με σήματα εισόδου/εξόδου (I/O signals), καλύτερη επεξεργασία δεδομένων, επεκτάσιμη προγραμματιστική λογική, επικοινωνία με άλλα συστήματα (ή κύτταρα).

2.1.3 Προσομοίωση σε γραφικό περιβάλλον

Αυτή η μέθοδος βασίζεται σε πλατφόρμες προσομοίωσης με γραφικό περιβάλλον, στις οποίες ο προγραμματισμός και η εκτέλεση των εντολών αναπαρίστανται με τη χρήση εικονικών 3D μοντέλων των πραγματικών αντικειμένων. Σαν αποτέλεσμα, ο προγραμματιστής του ρομπότ δε χρειάζεται να γνωρίζει κάποια γλώσσα προγραμματισμού παρά μόνο το πρόγραμμα με το οποίο κάνει την προσομοίωση.

Ο off-line προγραμματισμός με προσομοίωση αποτελεί ένα πανίσχυρο εργαλείο για τη βιομηχανία καθώς γλιτώνει χρόνο και χρήμα για το σχεδιασμό ενός κυττάρου. Η δυνατότητα να αναλύσει πως ένα “κύτταρο εργασίας” θα δουλεύει προτού γίνει η οποιαδήποτε επένδυση κεφαλαίου σε εξοπλισμό, δίνει τεράστιο προβάδισμα σε μια εταιρία και καθιστά τη μετάβαση από το σχεδιασμό στη κατασκευή πιο ομαλή [6]. Επιπροσθέτως, επιτρέπει τη μελέτη πολλών διαφορετικών περιπτώσεων έως ότου βρεθεί η βέλτιστη, όπως π.χ. χρήση διαφορετικών παραμέτρων για βαφή, και επιτρέπει τη διόρθωση ενδεχόμενων σφαλμάτων που θα προέκυπταν στην πραγματικότητα. Πέρα από τη βιομηχανία, η προσομοίωση σε γραφικό περιβάλλον είναι και για την ακαδημαϊκή κοινότητα ένας τρόπος έμμεσης επαφής με το προγραμματισμό ρομπότ.

Στην περίπτωση αυτή, ο όρος off-line αναφέρεται στη δυνατότητα να μεταφέρουμε προγράμματα για ρομπότ που έχουν προκύψει από μία προσομοίωση στο πραγματικό ρομπότ-κύτταρο (downloading) και

αντίστροφα. Δηλαδή, να μεταφέρουμε ένα πρόγραμμα από τον ελεγκτή ενός ρομπότ-κυττάρου σε ένα εικονικό μοντέλο προσομοίωσης (uploading).

Παρόλα τα πλεονεκτήματα που μας παρέχει η προσομοίωση, προκύπτουν κάποια νέα προβλήματα που αν δεν ληφθούν υπόψη και δεν αντιμετωπιστούν καθιστούν αυτή τη μέθοδο ακατάλληλη. Σε ένα τέλειο περιβάλλον, όπου η κατασκευή ρομπότ θα γινόταν χωρίς ατέλειες, οποιοδήποτε πρόγραμμα από μια προσομοίωση θα μπορούσε να γίνει download σε έναν ελεγκτή ρομπότ και να λειτουργεί άψογα. Στην πραγματικότητα όμως αυτό το περιβάλλον υπάρχει μόνο στον Η/Υ όπου τα πραγματικά αντικείμενα έχουν μετατραπεί σε πλήρως ορισμένες οντότητες με συγκεκριμένες διαστάσεις. Στο φυσικό κόσμο όμως, έχουμε κατασκευαστικές ατέλειες, αλλαγή συνθηκών περιβάλλοντος και πολλών ειδών σφάλματα που εισάγονται στο σύστημα. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η λανθασμένη τοποθέτηση του ρομπότ στο χώρο καθώς και ο κίνδυνος συγκρούσεων και φθορών (σε περίπτωση μεγάλων αποκλίσεων). Επισημαίνεται πως κύριο ρόλο παίζει ο τύπος της εργασίας που θέλουμε να κάνουμε και το περιθώριο σφάλματος που υπάρχει μέχρι αυτή να καταστεί αδύνατη. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να περιορισθεί με συγκεκριμένες ενέργειες από το μηχανικό που χειρίζεται το σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, πρώτο βήμα είναι η δημιουργία του εικονικού περιβάλλοντος, όσο πιο πιστού με την πραγματικότητα γίνεται. Αυτό απαιτεί καλή γνώση του εκάστοτε πακέτου προσομοίωσης που χρησιμοποιείται όπως και διάφορα προγράμματα CAD για τη δημιουργία των 3D μοντέλων. Δεύτερο βήμα είναι η σωστή ρύθμιση του ρομπότ αλλά και η δημιουργία χαρτών σφάλματος οι οποίοι θα χρησιμοποιούνται για την ανατροφοδότηση του μοντέλου προσομοίωσης το οποίο με τη σειρά του θα βγάζει διορθωμένα αποτελέσματα.

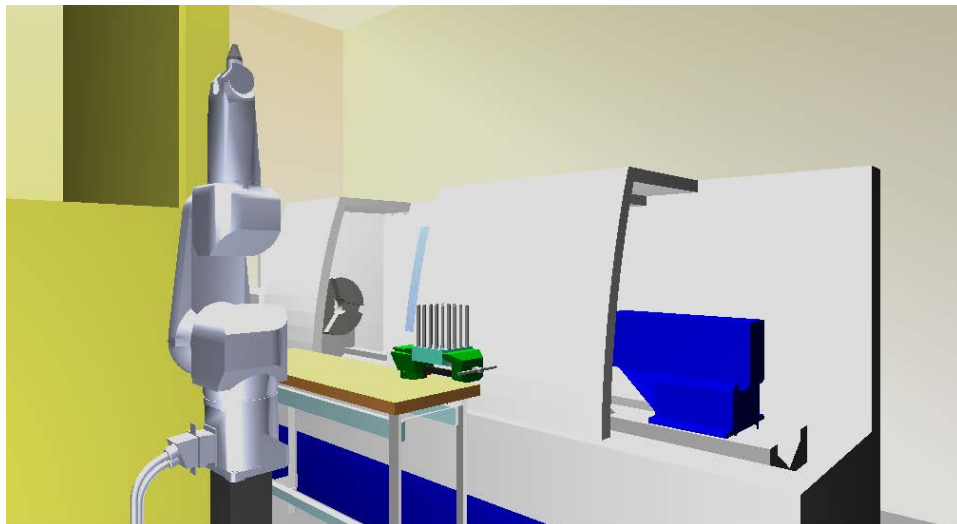
Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι στην ουσία η “χαρτογράφηση” των σφαλμάτων και η διόρθωσή τους για χρήση σε ένα πακέτο προσομοίωσης όπως το VIRTTOOLS, Delmia, RobCAD, MotoSim, KUKA-Sim, 3D studio, κλπ.

2.2 CAD, Virtual Reality, Augmented Reality

Όπως διαπιστώνεται, οι πλατφόρμες προσομοίωσης στηρίζονται κυρίως σε συστήματα CAD (Computer Aided Design) ή τεχνολογίες Virtual Reality (VR), ενώ σχετικά νέο πεδίο έρευνας είναι η τεχνολογία Augmented Reality (AR). Σε αντίθεση με τα συστήματα VR, όπου απαιτείται η ολοκληρωτική αναπαράσταση του φυσικού περιβάλλοντος με 3D μοντέλα, στα AR

συστήματα τα εικονικά αντικείμενα συνυπάρχουν με τα πραγματικά στον ίδιο χώρο. Ο προγραμματιστής του ρομπότ έχει καλύτερη εποπτεία του χώρου γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσης της όλης διαδικασίας καθώς και την αισθητή μείωση της αναγκαιότητας για μοντελοποίηση όλων των φυσικών αντικειμένων σε εικονικά. Ένα παράδειγμα εφαρμογής είναι η τοποθέτηση ενός εικονικού ρομποτικού βραχίονα σε ένα φυσικό χώρο και ο προγραμματισμός του έτσι ώστε να αποφεύγει πιθανά εμπόδια κατά μια συγκεκριμένη κίνηση. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται μόνο το 3D μοντέλο του βραχίονα και με ελάχιστο κόστος μπορούμε να αποφασίσουμε αν η τοποθέτηση και λειτουργία ενός πραγματικού ρομπότ στο σημείο αυτό είναι εφικτή ή όχι.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η μοντελοποίηση ενός κυττάρου φόρτωσης-εκφόρτωσης τήνου σε VR. Ο προγραμματιστής μπορεί να κάνει προσομοίωση της διαδικασίας προτού στείλει (download) τον σωστό κώδικα στον ελεγκτή του ρομπότ.



Εικόνα 2.2: Εικονικό μοντέλο κυττάρου φόρτωσης-εκφόρτωσης τήνου από τον ρομποτικό βραχίονα STAUBLI RX90

2.3 Τύποι αρχείων CAD

Η τεχνολογία CAD παίζει πρωτεύοντα ρόλο στη βιομηχανία παραγωγής. Η αυξημένη παραγωγικότητα που προσφέρει στο μηχανολογικό σχεδιασμό είναι κοινώς αποδεκτή και για αυτό χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς όπως αυτοκινητοβιομηχανία, αεροναυπηγική, ναυπηγική, αρχιτεκτονική, κτλ. Κατά

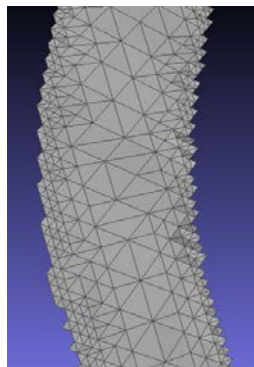
συνέπεια, είναι φυσική και η ύπαρξη πολλών διαφορετικών πακέτων CAD όπως το SolidWorks, Autodesk Inventor, Catia, Pro/ENGINEER, κτλ.

Η ύπαρξη, όμως, όλων αυτών των πακέτων δημιουργεί την ανάγκη επικοινωνίας-συνεργασίας μεταξύ τους. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με τη δημιουργία πρότυπων μορφών αρχείων τα οποία είναι κοινά για όλους [7]. Τα πιο διαδεδομένα πρότυπα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι τα: IGES(Initial Graphics Exchange Standard), SET (Standard d' Echange et de Transfert), STEP (Standard for the Exchange of Product model data) και STL (Standard Transform Language). Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής θα αναφερθούμε μόνο στο πρότυπο STL που χρησιμοποιείται κατά την επεξεργασία των μετρήσεων.

2.3.1 Πρότυπο STL

Το πρότυπο STL, το οποίο προέρχεται από το CAD πρόγραμμα στερεολιθογραφίας που δημιουργήθηκε από τη 3D Systems, περιγράφει τη γεωμετρία επιφάνειας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου αγνοώντας χαρακτηριστικά όπως χρώμα, υφή, κτλ. Το πρότυπο STL υφάρχει σε δύο μορφές, ASCII (μορφή κειμένου) και binary (δυαδική μορφή) με τη δεύτερη να είναι κοινώς αποδεκτή, κυρίως λόγω του μικρού μεγέθους αρχείων που προκύπτουν από ένα μοντέλο CAD. Η επιφάνεια χωρίζεται σε μικρά ακανόνιστα τρίγωνα με γνωστές τις συντεταγμένες των κορυφών τους και το κάθετο διάνυσμα [7]. Η σειρά με την οποία καταγράφονται οι κορυφές των τριγώνων ακολουθεί τον κανόνα του δεξιού χεριού για τρισδιάστατα συστήματα συντεταγμένων.

Πλεονέκτημα των αρχείων STL, και κυρίως της μορφής ASCII, είναι η εύκολη εξαγωγή πληροφοριών για τη γεωμετρία της επιφάνειας σε μορφή νέφους σημείων με τρισδιάστατες συντεταγμένες.



Εικόνα 2.3: Πλέγμα αρχείου STL απλής επιφάνειας από το πρόγραμμα Meshlab

Κεφάλαιο 3: Σφάλματα ρομπότ

3.1 Εισαγωγή

Στο 1^ο Κεφάλαιο δώσαμε απλά τους ορισμούς βασικών εννοιών της ρομποτικής, όπως ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσουμε πως προκύπτουν αυτές οι έννοιες και τί παράμετροι λαμβάνονται υπόψη.

3.1.1 ISO 9283

Το πρότυπο ISO 9283 (Manipulating industrial robots—performance criteria and related test methods) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας ενός άκρου ρομποτικού βραχίονα [8]. Για τη μέτρηση γίνεται η θεώρηση δυσμενών συνθηκών, δηλαδή η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας και το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο. Συνοπτικά το πρωτόκολλο αναφέρει

- 1) Προθέρμανση του ρομπότ πριν την έναρξη των μετρήσεων, μέχρι να επέλθει σε κατάσταση μόνιμης λειτουργίας (π.χ. θερμική σταθερότητα των κινητήρων και των συστημάτων μετάδοσης κίνησης).
- 2) Ξεκινώντας από ένα συγκεκριμένο σημείο, προγραμματίζουμε το ρομπότ να περάσει από 3-4 διαφορετικά σημεία (αποθηκευμένα στον ελεγκτή) με τη σειρά και να επιστρέψει στο αρχικό, μετρώντας το σφάλμα μετατόπισης στη τελική θέση.

- 3) Το βήμα 2 γίνεται πολλές φορές όπου σε κάθε μία μετράμε (συνήθως με 2 κάμερες και ένα οπτικό στόχο πάνω στο ρομπότ) το σφάλμα μετατόπισης στη τελική θέση. Επαναληψιμότητα ορίζεται ως η τυπική απόκλιση των παραπάνω σετ μετρήσεων στις τρεις διαστάσεις.

Το απλό μαθηματικό μοντέλο με N μετρήσεις, αρχικές συντεταγμένες σημείου (X_a, Y_a, Z_a) και τελικές συντεταγμένες μετά από τη κίνηση (X_b, Y_b, Z_b) είναι [8]:

Μέσος όρος για κάθε διάσταση:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad \bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i$$

Τυπική απόκλιση:

$$l_i = \sqrt{(X_i - \bar{X})^2 + (Y_i - \bar{Y})^2 + (Z_i - \bar{Z})^2}$$

$$\bar{l} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i$$

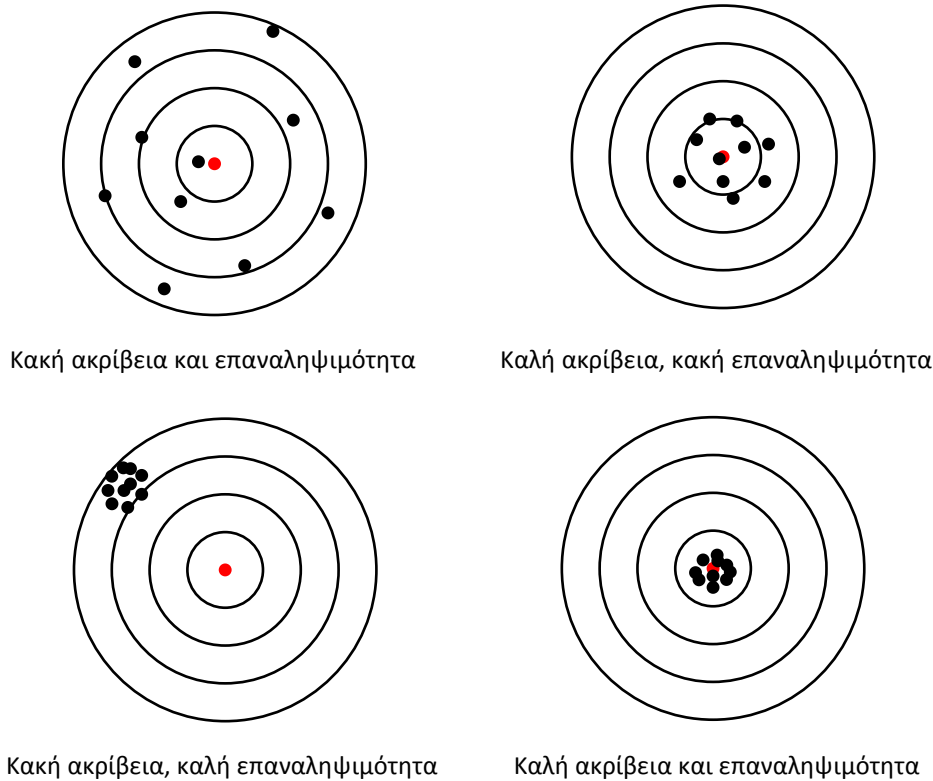
$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (l_i - \bar{l})^2}{N - 1}}$$

Η επαναληψιμότητα ορίζεται ως:

$$Reapitability = \bar{l} + 3 * S_l$$

Δηλαδή, το άκρο του βραχίονα σε κάθε κίνηση, έχει πιθανότητα 99,8% να βρίσκεται εντός του εύρους επαναληψιμότητας.

Μία εποπτική παρουσίαση της επαναληψιμότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [9].



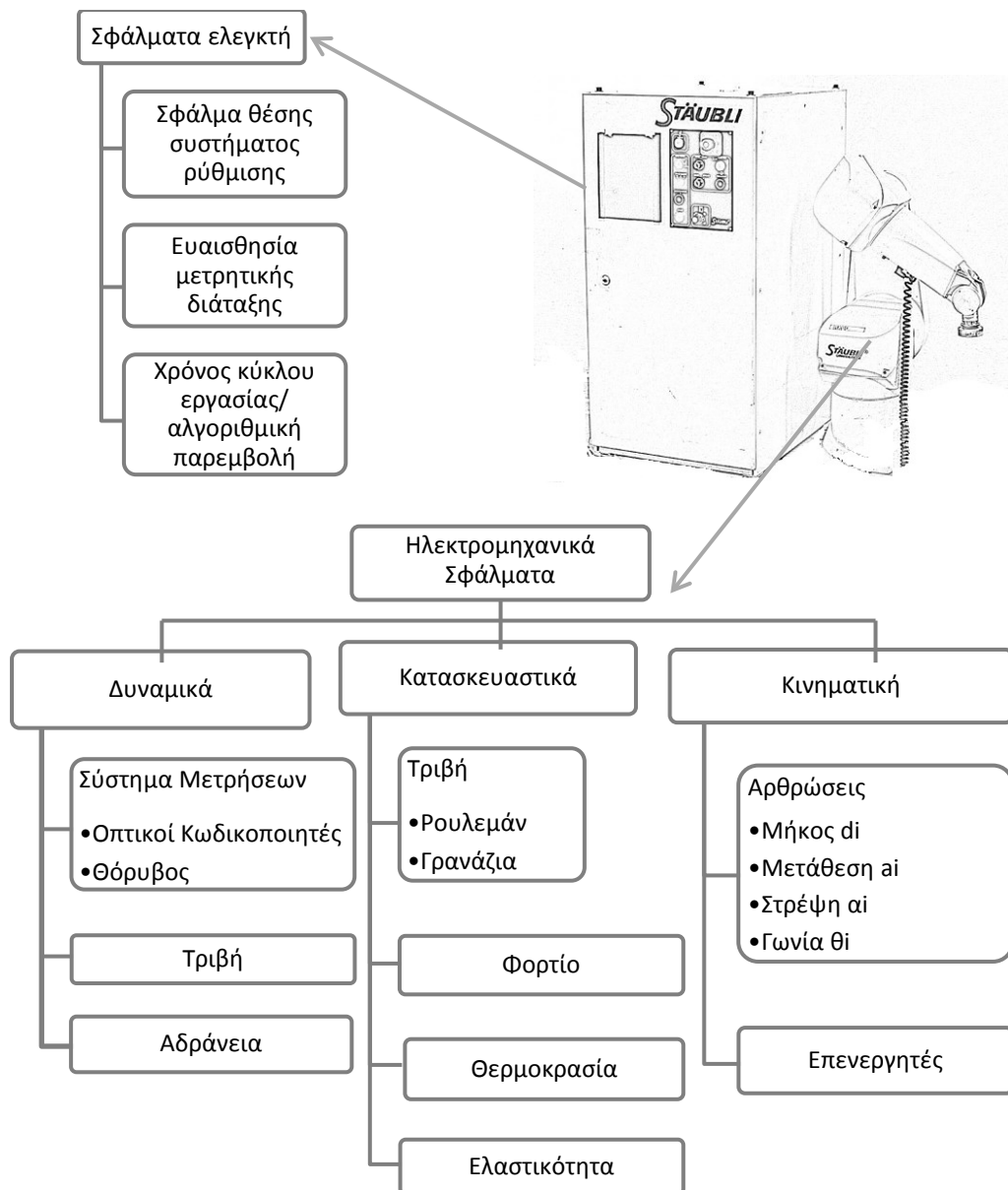
Σχήμα 3.1: Ακρίβεια και επαναληψιμότητα

3.1.2 Παράγοντες σφαλμάτων

Όπως διαπιστώνουμε, οι ορισμοί της ακρίβειας και επαναληψιμότητας δεν είναι μονοσήμαντοι καθώς εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους όπως κατασκευαστικές ανοχές, είδος υπολογιστικών αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται, ευαισθησία συστήματος, τυχαία σφάλματα, κτλ. Επομένως, κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός αυτών των σφαλμάτων και η αντιστάθμισή τους για τη βελτίωση της ακρίβειας-επαναληψιμότητας. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αντιστάθμισης όπως, μεγαλύτερη ακρίβεια κατασκευής και τακτική ρύθμιση της μηχανής, υπολογιστικοί αλγόριθμοι αντιστάθμισης ή συνδυασμός τους. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται όμως, πλησιάζουμε όλο και πιο κοντά στο σημείο που η κατασκευή μιας μηχανής ακριβείας (precise- ultra precise machining) τείνει να έχει εκθετική αναλογία κόστους. Για αυτόν το λόγο, η αγορά τείνει στην ανάπτυξη υπολογιστικών

αλγορίθμων που θα υπολογίζουν τα σφάλματα κίνησης σε ένα ρομπότ και θα τα αντισταθμίζουν.

Πρώτο βήμα, λοιπόν, είναι η διάκριση του εκάστοτε παράγοντα σφάλματος και η κατηγοριοποίησή του. Έτσι δημιουργείται ένας συνοπτικός “χάρτης” σφαλμάτων και να υπάρχει η εποπτεία, για το ποιά σφάλματα επηρεάζουν σημαντικά το σύστημα, ποιά αντισταθμίζονται και ποιά δε μπορούμε να προβλέψουμε. Στο σχήμα 3.2 βλέπουμε τα σφάλματα που επηρεάζουν ένα ρομποτικό σύστημα [9].



Σχήμα 3.2: Σφάλματα ρομποτικού συστήματος

Βεβαίως, υπάρχουν πολλά μοντέλα κατηγοριοποίησης αυτών των σφαλμάτων όπως π.χ. σε 4 βασικές κατηγορίες:

- 1) σφάλματα ψηφιοποίησης
- 2) σφάλματα ρύθμισης του ρομπότ
- 3) ντετερμινιστικά μοντέλα κινηματικών σφαλμάτων
- 4) στοχαστικά μοντέλα κινηματικών σφαλμάτων.

Σημασία έχει, πως ο προγραμματισμός ρομπότ, και κυρίως ο off-line, απαιτεί τη χρήση αισθητήρων ως εντοπιστές των σφαλμάτων και έμμεσα αντισταθμιστές αυτών.

3.2 Σφάλματα ακρίβειας

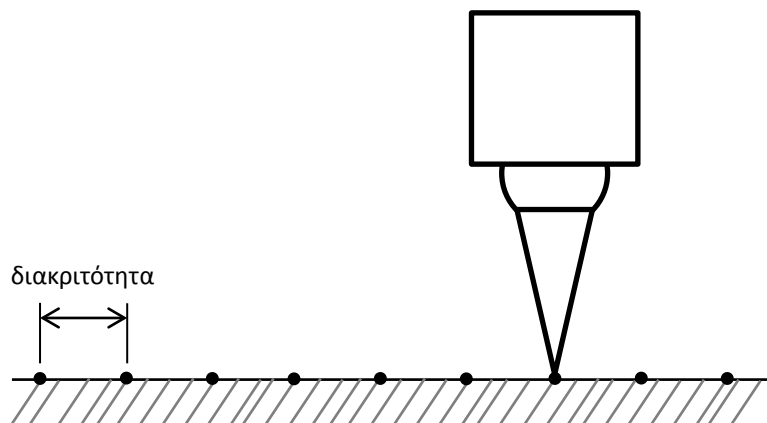
Όπως έχουμε αναφέρει, η ευαισθησία-διακριτότητα ενός ελεγκτή είναι η δυνατότητα του να χωρίσει μια απόσταση σε πολλά διακριτά σημεία τα οποία μπορεί να προσπελάσει το άκρο του βραχίονα. Π.χ. σε ένα σύστημα με διακριτότητα 1mm το πρόβλημα προκύπτει όταν ο χειριστής ζητήσει μια θέση π.χ. 38,3mm. Το άκρο μπορεί να πάει όμως μόνο στη κοντινότερη θέση των 38mm, δημιουργώντας έτσι σφάλμα ακρίβειας των 0,3mm.

Η διακριτότητα εξαρτάται από τα bit μνήμης του ελεγκτή και ισχύει ο τύπος:

$$\# \text{ διακριτών σημείων} = 2^n$$

Όπου n ο αριθμός των bit μνήμης.

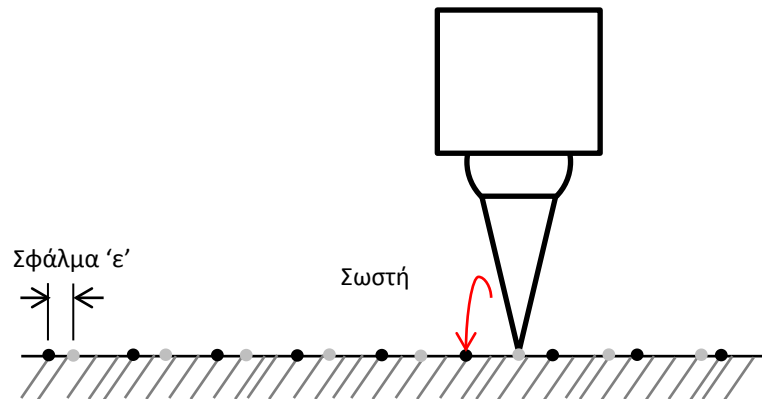
Π.χ. για 8 bit μνήμης θα έχουμε 256 διακριτά σημεία.



Σχήμα 3.3: Διακριτά σημεία προσπέλασης άκρου σε έναν άξονα

3.3 Κινηματικά και σφάλματα ρύθμισης ρομπότ

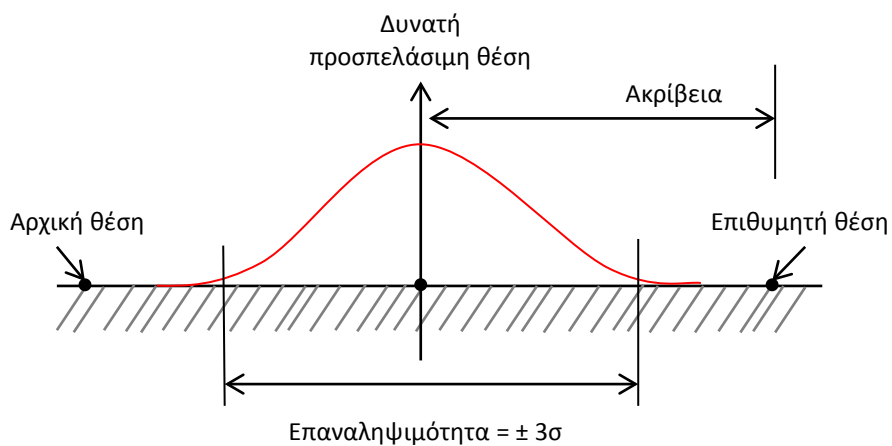
Στην ουσία, τα κινηματικά και τα σφάλματα ρύθμισης ρομπότ μετατοπίζουν τα σημεία του χώρου εργασίας, δημιουργώντας έτσι ένα σφάλμα 'ε' διαφορετικό σε κάθε θέση.



Σχήμα 3.4: Σφάλμα λόγω κινηματικού μοντέλου – calibration του ρομπότ

3.4 Τυχαία σφάλματα

Τα τυχαία σφάλματα είναι ο λόγος που το άκρο αποκλίνει κάθε φορά που επιστρέφει σε ένα ακριβές σημείο. Πειραματικά προκύπτει μια κανονική κατανομή γύρω από το σημείο (επαναληψιμότητα).



Σχήμα 3.5: Τυχαία σφάλματα – επαναληψιμότητα

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής η ακρίβεια ενός ρομπότ θα μπορούσε να εκφραστεί ως:

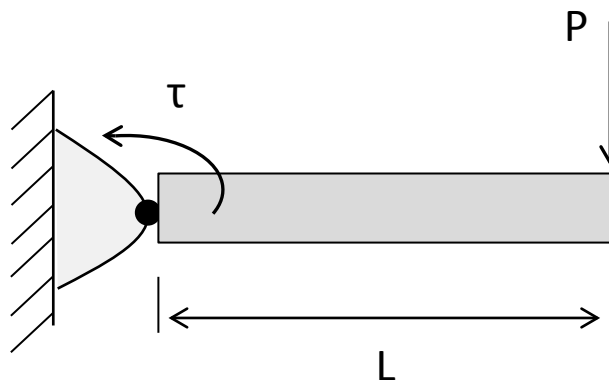
$$\text{Ακρίβεια} = (\text{δυνατή θέση} - \text{επιθυμητή}) + \varepsilon$$

3.5 Σφάλματα φορτίου

Το φορτίο στο άκρο του βραχίονα μπορεί να επηρεάσει την κίνηση του ρομπότ με διάφορους τρόπους. Σημαντικό ρόλο παίζει τόσο η στατική όσο και η κινηματική. Στατικά φαινόμενα είναι, η παρέκκλιση του βραχίονα προς τα κάτω λόγω βαρύτητας, δημιουργία διάκενων στα δόντια των γραναζιών (backlash) και αλλαγή διαστάσεων έμμεσα λόγω αλλαγών θερμοκρασίας. Τα δυναμικά φαινόμενα αναφέρονται κυρίως στην επιτάχυνση του βραχίονα και τις δυνάμεις αδράνειας που προκαλούν παρεκκλίσεις στους άξονες. Βέβαια, τα δυναμικά φαινόμενα επηρεάζουν σημαντικά το σύστημα όταν έχουμε μεγάλες ταχύτητες ή θέλουμε να ακολουθήσουμε συνεχή τροχιά. [10]

3.5.1 Παρέκκλιση άκρου

Έστω ότι θεωρούμε ένα μέλος του βραχίονα ως μία μεταλλική πακτωμένη δοκό όπου στο άκρο της υπάρχει το φορτίο που επιθυμούμε να χειριστούμε. Τα γεωμετρικά μεγέθη είναι γνωστά.



Σχήμα 3.6: Παρέκκλιση 'δ' του άκρου λόγω φορτίου

Η παρέκκλιση του άκρου δ λόγω της δύναμης P υπολογίζεται από το τύπο

$$\delta_{φορτίου} = \frac{PL^3}{3EI}$$

Όπου E η σταθερά του Young για το υλικό που έχει το μέλος και I η ροπή αδρανείας για τη συγκεκριμένη γεωμετρία διατομής.

Προσοχή πρέπει να δοθεί στο ότι θεωρήσαμε πως το βάρος του ίδιου του βραχίονα (W) δεν επηρεάζει την παρέκκλιση του άκρου. Σε περιπτώσεις, όμως, που πρέπει να το λάβουμε υπόψη το νέο δ προκύπτει ως:

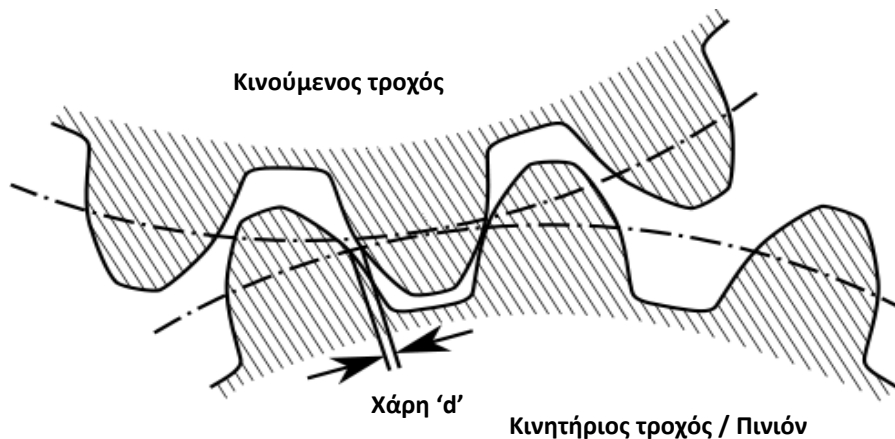
$$\delta_{ολοκό} = \delta_{φορτίου} + \delta_W$$

Σημαντική παρατήρηση είναι η κυβική αναλογία που έχει το μήκος του μέλους του βραχίονα με την παρέκκλιση δ . Αυτό σημαίνει πως στην περίπτωση που έχουμε 2 ίδια μέλη συνδεδεμένα με μία άρθρωση και το φορτίο στο άκρο, η παρέκκλιση θα αυξανόταν 8 φορές σε σχέση με το ένα μέλος. Αντίστοιχα για τρία μέλη θα είχαμε αύξηση 27 φορές! Καταλαβαίνουμε λοιπόν πόσο σημαντικό ρόλο μπορεί να παίζει η γεωμετρία της τοποθεσίας του βραχίονα σε συνδυασμό με ένα φορτίο, στο συνολικό σφάλμα του άκρου του βραχίονα.

3.5.2 Διάκενο γραναζιών

Έστω ' d ' το διάκενο που δημιουργείται ανάμεσα στα δόντια του κινητήριου τροχού με του κινούμενου. Αυτό σημαίνει πως όταν το κινητήριο γρανάζι (σχέση μετάδοσης 1:1) κινηθεί κατά απόσταση X θα πρέπει πρώτα να διανύσει την απόσταση ' d ' του διακένου και έπειτα να μεταδώσει την κίνηση στον κινούμενο τροχό, ο οποίος θα κινηθεί κατά $X-d$ (βλ. σχήμα 3.7). Το σφάλμα αυτό πολλαπλασιάζεται ανάλογα με τη σχέση μετάδοσης ενώ μπορεί να αυξηθεί ανάλογα και με το φορτίο. [10]

Το παραπάνω σφάλμα μπορούμε να το εξαλείψουμε με την κατασκευή μεγάλης ακριβείας γραναζιών ή χρήση γραναζιών anti-backlash που χρησιμοποιούν ελατήρια για να κρατούν το κινητήριο γρανάζι πάντα σε επαφή με το κινούμενο. Η μέθοδος χρήσης λογισμικού αντιστάθμισης αυτού του σφάλματος είναι επίσης ευρείας αποδοχής.



Σχήμα 3.7: Διάκενο δοντιών συστήματος μετάδοσης κίνησης (Backlash)

3.5.3 Θερμοκρασιακά σφάλματα

Όσον αφορά τα θερμοκρασιακά σφάλματα ισχύει ο γνωστός τύπος:

$$\delta_{\text{θερμικό}} = L * a * \Delta T$$

Όπου

L: μήκος

a: συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής

ΔT : θερμοκρασία λειτουργίας – θερμοκρασία ρύθμισης της μηχανής

Το σφάλμα λόγω θερμοκρασιακής διαστολής/συστολής μπορεί να επηρεάζει σημαντικά το σύστημά μας. Εξ΄ου και στο πρωτόκολλο ISO 9283 απαιτούνται συνθήκες μόνιμης λειτουργίας για οποιαδήποτε περαιτέρω μέτρηση.

3.5.4 Δυναμικά σφάλματα επιτάχυνσης

Τα δυναμικά σφάλματα επιτάχυνσης παίζουν σημαντικό ρόλο όταν υπάρχουν μεγάλες ταχύτητες και φορτία. Έχουμε την εμφάνιση δυνάμεων που προκαλούν λυγισμό στα μέλη του βραχίονα και που πρέπει να ληφθούν

υπόψη στους προηγούμενους υπολογισμούς μας. Σε βραχίονες πολλών μελών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι ακτινικές, φυγοκεντρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται.

3.5.5 Συνισταμένη σφαλμάτων φορτίου

Όλα τα παραπάνω είδη σφαλμάτων για μια συγκεκριμένη θέση θα πρέπει να υπολογίζονται για τον κάθε άξονα του ρομπότ ξεχωριστά ώστε με σύνθεση των καρτεσιανών αυτών στοιχείων να προκύπτει το συνολικό σφάλμα.

$$\delta_{total} = \sqrt{\left(\sum \Sigma \delta_{xi}\right)^2 + \left(\sum \Sigma \delta_{yi}\right)^2 + \left(\sum \Sigma \delta_{zi}\right)^2}$$

3.6 Ρύθμιση ρομπότ με βάση μοντέλα σφαλμάτων

Λαμβάνοντας υπόψη όσα έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής, η αντιστάθμιση σφαλμάτων ενός ρομπότ και η σωστή ρύθμισή του για τον off-line προγραμματισμό του, είναι μια διαδικασία αρκετά επίπονη. Ο μηχανικός θα πρέπει να αποφασίσει σε ποιες παραμέτρους θα δώσει προσοχή, ποιες μπορεί να μετρήσει και να αντισταθμίσει και να φτιάξει ένα μοντέλο που θα τις περιλαμβάνει.

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται προσπάθεια αντιστάθμισης αυτών των σφαλμάτων θεωρώντας όμως διάφορες παραδοχές που κάνουν το πρόβλημα πιο απλό.

Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει μικρή βιβλιογραφική ανασκόπηση του πως έχει αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα μέχρι στιγμής και τι θεωρίες έχουν εφαρμοστεί.

Κεφάλαιο 4: Θεωρία κινηματικής ρομπότ

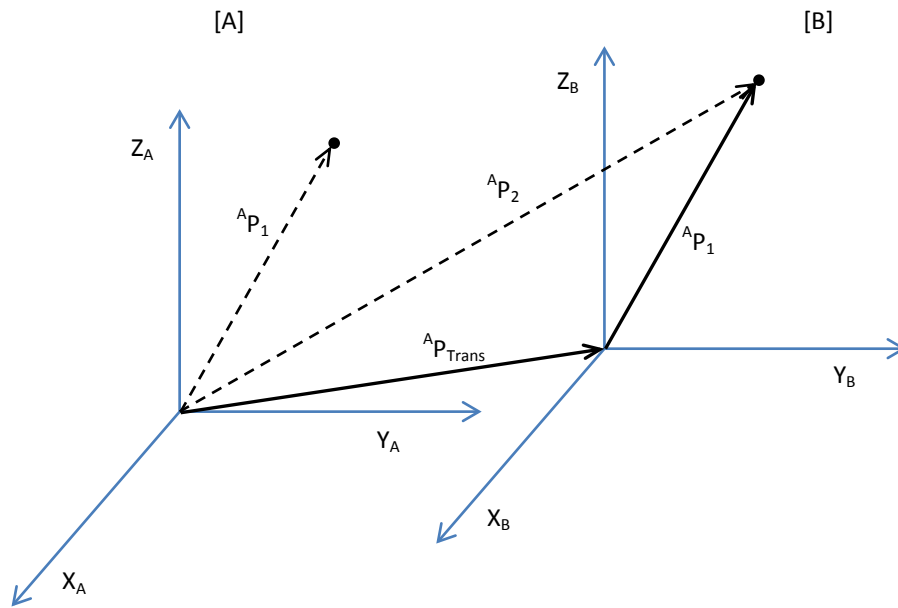
4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά σε βασικές σχέσεις τις κινηματικής ρομποτικών βραχιόνων, κυρίως για λόγους πληρότητας της εργασίας. Η κινηματική, αναλύει τη κίνηση του ρομπότ χωρίς να εξετάζει τις δυνάμεις που την προκαλούν (δυναμική). Παρακάτω θα εξετάσουμε τη θέση και το προσανατολισμό των μελών ενός βραχίονα σε στατική κατάσταση.

4.2 Βασικές έννοιες κινηματικής

4.2.1 Τελεστές μεταφοράς

Με τον όρο μεταφορά εννοούμε τη μετατόπιση ενός σημείου στο χώρο, κατά το μήκος και τη διεύθυνση συγκεκριμένου διαστήματος. Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι έχουμε ένα σημείο αναφορικά με ένα συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων (πλαίσιο B) που ορίζεται από ένα διάνυσμα θέσης ${}^A P_1$ και θέλουμε να το εκφράσουμε αναφορικά με ένα άλλο πλαίσιο A το οποίο έχει ίδιο προσανατολισμό με το B (σχήμα 4.1). Το μόνο χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα δύο συστήματα είναι η μεταξύ τους απόσταση στο χώρο. Η μεταφορά είναι στην ουσία ένα διάνυσμα ${}^A P_{trans}$ που συνδέει την αρχή των αξόνων των δύο πλαισίων μεταξύ τους.



Σχήμα 4.1: Διάνυσμα μεταφοράς ${}^A P_{Trans}$

Ισχύει η σχέση

$${}^A P_2 = {}^A P_{Trans} + {}^A P_1$$

Η παραπάνω σχέση με χρήση του τελεστή μεταφοράς μετατρέπεται σε

$${}^A P_2 = D_{P(q)} \cdot {}^A P_1$$

Όπου

$$D_{P(q)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_x \\ 0 & 1 & 0 & q_y \\ 0 & 0 & 1 & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Και q_x , q_y , q_z οι συνιστώσες του διανύσματος μεταφοράς.

4.2.2 Τελεστές στροφής

Οι τελεστές στροφής επενεργούν πάνω σε ένα διάνυσμα και το στρέφουν κατά R , μετασχηματίζοντάς το έτσι σε ένα άλλο διάνυσμα. Με τον ίδιο τρόπο επενεργούν και στα πλαίσια. Ο ίδιος πίνακας που στρέφει ένα διάνυσμα κατά R , περιγράφει και ένα πλαίσιο που υποβάλλεται σε στροφή R ως προς κάποιο πλαίσιο αναφοράς [3]. Η μαθηματική έκφραση των παραπάνω είναι:

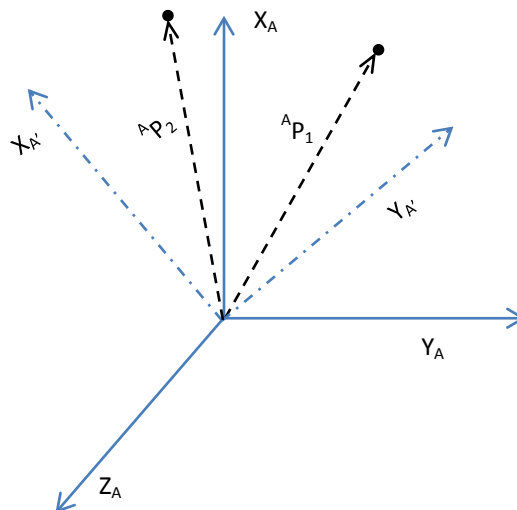
$${}^A P_2 = R_j(\theta) \cdot {}^A P_1$$

Όπου $R_j(\theta)$ ο τελεστής στροφής κατά άξονα j και γωνία θ .

Παραδείγματος χάριν, ο τελεστής στροφής ενός πλαισίου κατά τον άξονα Z για θ μοίρες είναι:

$$R_Z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Είναι σαφές πως ο πίνακας στροφής μπορεί να γραφτεί και ως 3×3 αλλά για να έχουμε τη δυνατότητα πράξεων σε συνδυασμό με το πίνακα μεταφοράς υιοθετείται η μορφή 4×4 .



Σχήμα 4.2: Στροφή διανύσματος P και πλαισίου ως προς τον άξονα Z κατά 40°

Σε επέκταση των παραπάνω, η αναπαράσταση ενός πλαισίου B το οποίο είναι στραμμένο αναφορικά με ένα πλαίσιο A μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους.

Μερικές από τις μεθόδους αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά στο σημείο αυτό [3]:

Γωνίες στροφής ως προς σταθερούς άξονες X-Y-Z (X-Y-Z fixed angles)

Κάθε μια από τις στροφές, γίνεται ως προς έναν από τους άξονες του σταθερού πλαισίου A με τη σειρά που αναγράφονται. Ο όρος «σταθερός», απορρέει από το γεγονός προσδιορισμού των γωνιών ως προς ένα σταθερό πλαίσιο αναφοράς.

Γωνίες στροφής Euler ως προς Z-Y-X

Η στροφή γίνεται κάθε φορά ως προς κάποιον άξονα του κινούμενου συστήματος B με τη σειρά που αναγράφονται και όχι ως προς το σταθερό πλαίσιο A.

Γωνίες στροφής Euler ως προς Z-Y-Z

Όμοια με την παραπάνω αλλά γίνεται χρήση διαφορετικών αξόνων.

Αναφέρεται πως γενικά υπάρχουν στο σύνολο 24 συμβάσεις στροφής με 12 από αυτές να αναφέρονται σε στροφή ως προς σταθερούς άξονες και οι υπόλοιπες σε γωνίες Euler.

4.2.3 Τελεστές μετασχηματισμού

Οι τελεστές μετασχηματισμού στην ουσία είναι ένας συνδυασμός των τελεστών μεταφοράς και στρέψης. Δηλαδή, στρέφουν και μεταθέτουν ταυτόχρονα ένα διάνυσμα ${}^A P$, υπολογίζοντας έτσι το νέο διάνυσμα ${}^B P$ [11].

$$\begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B T_A \cdot \begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix}$$

Όπου ${}^B T_A$ ο τελεστής μετασχηματισμού

$${}^B T_A = \left[\begin{array}{ccc|c} {}^B R_A & & & {}^B P_{Trans} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

Η μέθοδος του μετασχηματισμού μπορεί να εφαρμοστεί και σε πιο σύνθετα συστήματα. Έστω ένα διάνυσμα ${}^C P$ (αναφορικά με το πλαίσιο C) το οποίο θέλουμε να εκφράσουμε αναφορικά με το πλαίσιο A. Το πλαίσιο C είναι γνωστό ως προς το πλαίσιο B και το B είναι γνωστό ως προς το A. Η διαδικασία που εφαρμόζεται είναι πρώτα μετασχηματισμός του ${}^C P$ στο ${}^B P$ και μετά του ${}^B P$ στο ${}^A P$. Δηλαδή:

$${}^B P = {}^B T_C \cdot {}^C P$$

και

$${}^A P = {}^A T_B \cdot {}^B P$$

Με συνδυασμό τους προκύπτει:

$${}^A P = {}^A T_B {}^B T_C \cdot {}^C P$$

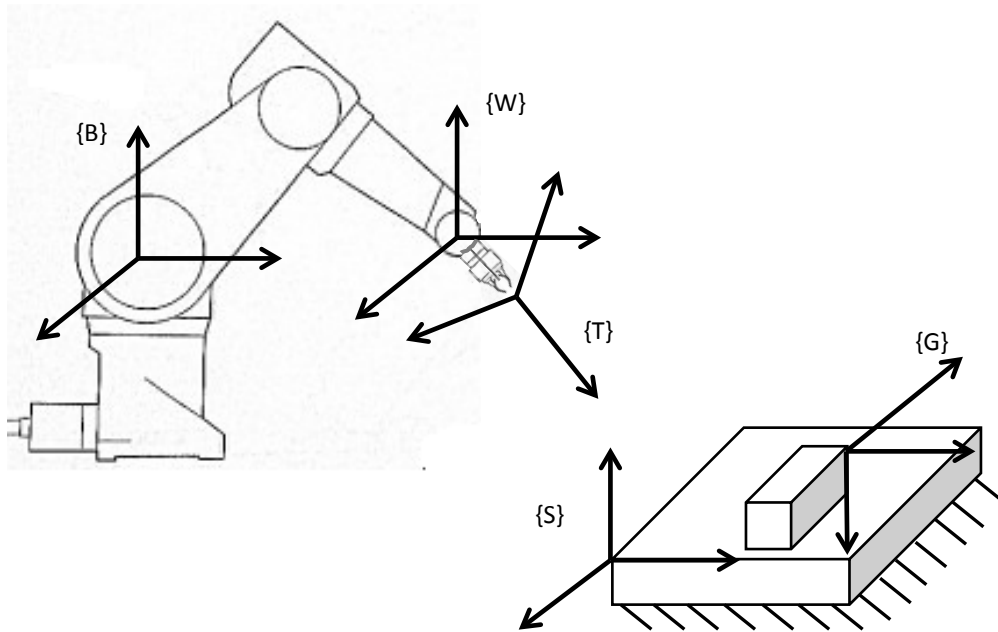
Με τον ίδιο τρόπο δουλεύουμε και για περισσότερα πλαίσια.

4.2.4 Συνήθη πλαίσια

Αλλιώς επώνυμα ή καθιερωμένης χρήσης πλαίσια, τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά και με καθιερωμένο τρόπο, διευκολύνοντας έτσι το κινηματικό προγραμματισμό [3]. Όλες οι κινήσεις του ρομπότ μπορούν να περιγραφούν αναφορικά με αυτά τα πλαίσια (βλ. Σχήμα 4.3). Έχουμε:

- 1) Το πλαίσιο βάσης {B}
- 2) Το πλαίσιο σταθμού εργασίας {S}
- 3) Το πλαίσιο καρπού του βραχίονα {W}
- 4) Το πλαίσιο εργαλείου {T}
- 5) Το πλαίσιο στόχευσης {G}

Η χρήση τους βοηθά στην κατάρτιση μιας ενιαίας γλώσσας περιγραφής των ενεργειών των ρομπότ.



Σχήμα 4.3: Επώνυμα πλαίσια

4.3 Ευθεία κινηματική βραχίονα

4.3.1 Περιγραφή μελών και παραμέτρων βραχίονα

Κάθε διάταξη με μορφή αλυσίδας σωμάτων που συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις μπορεί να θεωρηθεί ως βραχίονας. Τα σώματα αυτά καλούνται μέλη του βραχίονα και αριθμούνται από το 0 για την ακίνητη βάση μέχρι η για το ελεύθερο άκρο του βραχίονα. Εν συνεχεία, δύο γειτονικά μέλη συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας άρθρωσης. Σε κάθε άρθρωση ορίζουμε τον άξονά της με συγκεκριμένο τρόπο. Ως άξονας i , ορίζεται η ευθεία του χώρου ή η διεύθυνση του διανύσματος γύρω από την οποία στρέφεται το μέλος i σε σχέση με το μέλος $i-1$ [11].

Για κάθε ζεύγος αξόνων στο χώρο, ορίζουμε την παράμετρο «μήκος» μέλους και υπάρχει μια συγκεκριμένη μέθοδος μέτρησής της. Πιο συγκεκριμένα η απόσταση αυτή μετριέται πάνω στην ευθεία που είναι κάθετη και στους δύο άξονες και για το μέλος $i-1$ συμβολίζεται ως a_{i-1} .

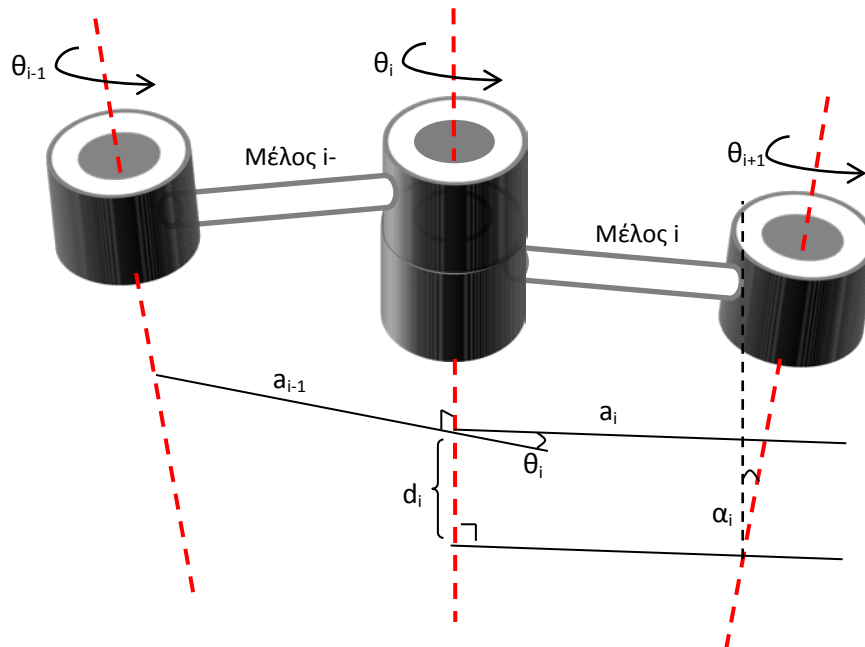
Μια δεύτερη παράμετρος είναι η «στρέψη» του μέλους αναφορικά με το γειτονικό του. Έστω ένα επίπεδο κάθετο στην κοινή κάθετο των δύο αξόνων.

Προβάλλουμε τους δύο άξονες στο επίπεδο αυτό και μετράμε τη μεταξύ τους γωνία, η οποία για το μέλος $i-1$ αναφορικά με το i συμβολίζεται ως α_{i-1} .

Μια τρίτη παράμετρος είναι η «μετάθεση» μέλους, d_i . Όπως αναφέραμε δύο γειτονικά μέλη έχουν ένα κοινό άξονα, τον άξονα της άρθρωσης, που τα συνδέει. Η μετρούμενη απόσταση μεταξύ των δύο μελών, πάνω σε αυτόν τον άξονα ονομάζεται μετάθεση μέλους.

Τέλος, η σχετική στροφή των δύο γειτονικών μελών ως προς τον κοινό τους άξονα είναι η τέταρτη παράμετρος ονόματι «γωνία άρθρωσης» και συμβολίζεται με θ_i .

Για την καλύτερη κατανόηση δίνεται μια παραστατική απεικόνισή τους στο σχήμα 4.4 :



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση παραμέτρων μελών βραχίονα

Παρατηρούμε ότι στα άκρα της αλυσίδας ισχύει $a_0=a_n=0$ και $\alpha_0=\alpha_n=0$ ενώ οι d_1 και θ_1 μηδενίζονται όταν έχουμε περιστροφική και πρισματική άρθρωση αντίστοιχα.

4.3.2 Παράμετροι Denavit – Hartenberg (DH)

Οι παραπάνω τέσσερις παράμετροι που ορίστηκαν ονομάζονται παράμετροι Denavit – Hartenberg και αποτελούν μια μέθοδο αναπαράστασης μηχανισμών [3]. Τελικά, ένα οποιοδήποτε ρομπότ μπορεί να περιγραφεί από κινηματική άποψη με την απόδοση τιμών στα τέσσερα αυτά μεγέθη για κάθε μέλος του. Για παράδειγμα, η περιγραφή της κινητικής κατάστασης ενός ρομπότ περιστροφικών αρθρώσεων 6 DOF (όπως το Staubli RX90 του εργαστηρίου) σε στάση, απαιτεί τον προσδιορισμό 18 αριθμών – παραμέτρων.

4.3.3 Μετασχηματισμοί μελών

Έστω ότι θέλουμε να περιγράψουμε τη θέση και τον προσανατολισμό του μέλους n σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη του μέλους 0. Η διαδικασία έχει ήδη αναφερθεί και είναι 1) η προσάρτηση πλαισίων σε κάθε μέλος και 2) οι αλυσιδωτοί μετασχηματισμοί των πλαισίων των γειτονικών μελών μέχρι να φτάσουμε στο επιθυμητό. Στην ουσία, δηλαδή, το πρόβλημα της κινηματικής κατακερματίζεται σε n επιμέρους προβλήματα της μορφής:

$${}^{i-1}P = {}^{i-1}T {}^iP$$

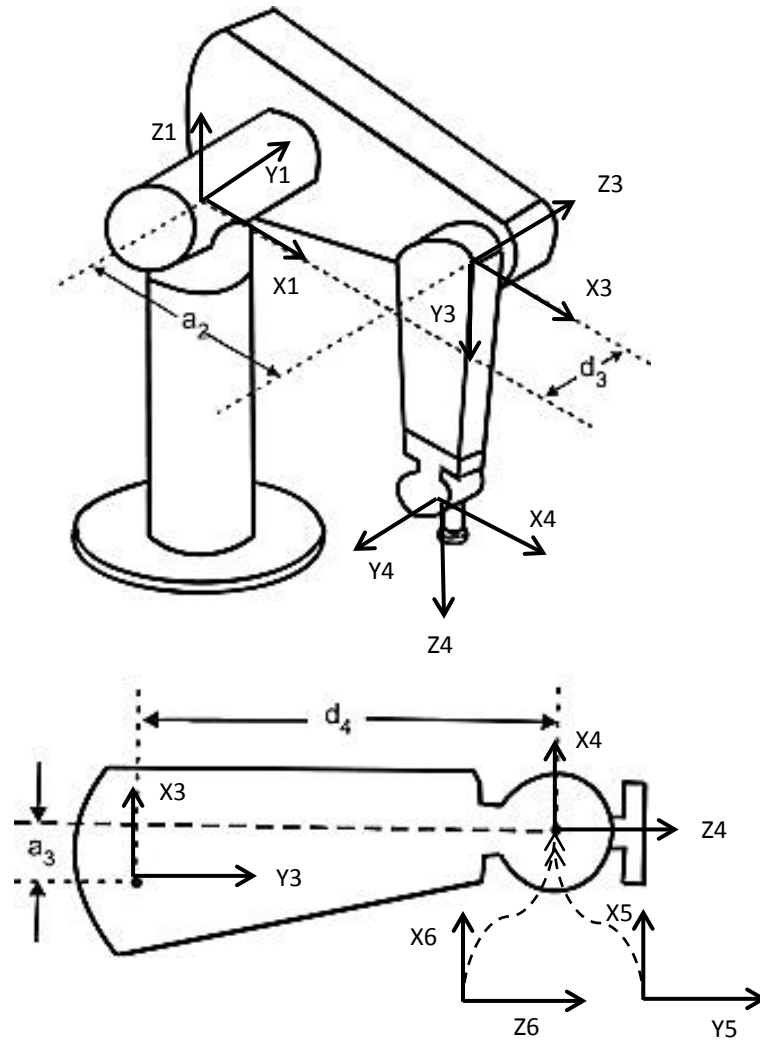
Όπου

$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos a_{i-1} & \cos\theta_i \cos a_{i-1} & -\sin a_{i-1} & -\sin a_{i-1} d_i \\ \sin\theta_i \sin a_{i-1} & \cos\theta_i \sin a_{i-1} & \cos a_{i-1} & \cos a_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.3.4 Εφαρμογή για ρομπότ 6 DOF

Έστω ένας βραχίονας περιστροφικών αρθρώσεων 6 DOF του οποίου το πλαίσιο 0 ταυτίζεται με το πλαίσιο 1 όταν η θ_1 είναι μηδενική και πως στη στάση που το μελετάμε οι άξονες των αρθρώσεων 4,5 και 6 είναι κάθετοι μεταξύ τους (και τέμνονται σε ένα σημείο).

Πρώτο βήμα είναι η προσάρτηση κατάλληλων πλαισίων στο κάθε μέλος (βλ. Σχήμα 4.5) και η εύρεση των παραμέτρων DH.



Σχήμα 4.5: Προσάρτηση πλαισίων σε βραχίονα 6 DOF

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	-90°	0	0	θ_2
3	0	α_2	d_3	θ_3
4	-90°	α_3	d_4	θ_4
5	90°	0	0	θ_5
6	-90°	0	0	θ_6

Πίνακας 4.1: Παράμετροι Denavit – Hartenberg μελών ρομπότ 6 DOF

Οι πίνακες μετασχηματισμού για κάθε μέλος είναι:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & \alpha_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -\sin\theta_4 & -\cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_6 & -\cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Με πολλαπλασιασμό αυτών των πινάκων προκύπτει ο ζητούμενος πίνακας μετασχηματισμού για το άκρο αναφορικά με το πλαίσιο βάσης του βραχίονα.

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6$$

4.4 Αντίστροφη κινηματική βραχίονα

Όσον αφορά την αντίστροφη κινηματική, θα γίνει αναφορά σε λίγα βασικά πράγματα εισαγωγικού επιπέδου καθώς περαιτέρω ανάλυση ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της διπλωματικής.

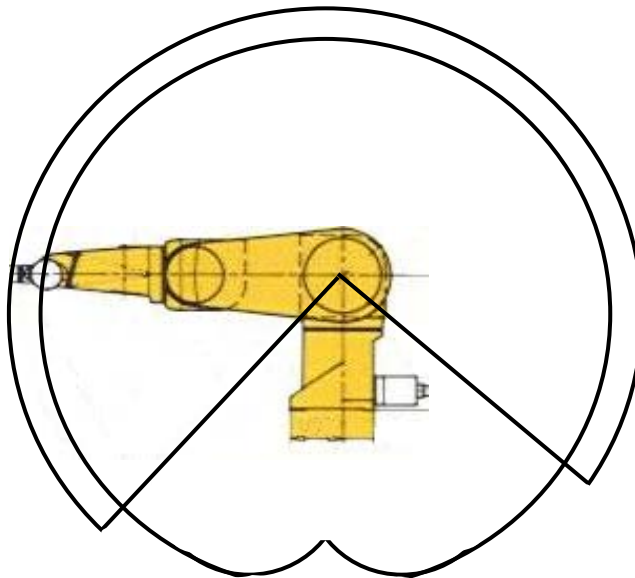
Το πρόβλημα στην αντίστροφη κινηματική ανάγεται σε πρόβλημα υπολογισμού των κατάλληλων γωνιών για την τοποθέτηση του πλαισίου {T} σε μια προεπιλεγμένη θέση ως προς το πλαίσιο {S}. Με λίγα λόγια, γνωρίζοντας τις συντεταγμένες χώρου του άκρου προσπαθούμε να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες των αρθρώσεων του ρομπότ [3]. Είναι αρκετά δυσκολότερη η επίλυση του καθώς τίθενται θέματα επιλυσιμότητας όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα.

4.4.1 Επιλυσιμότητα

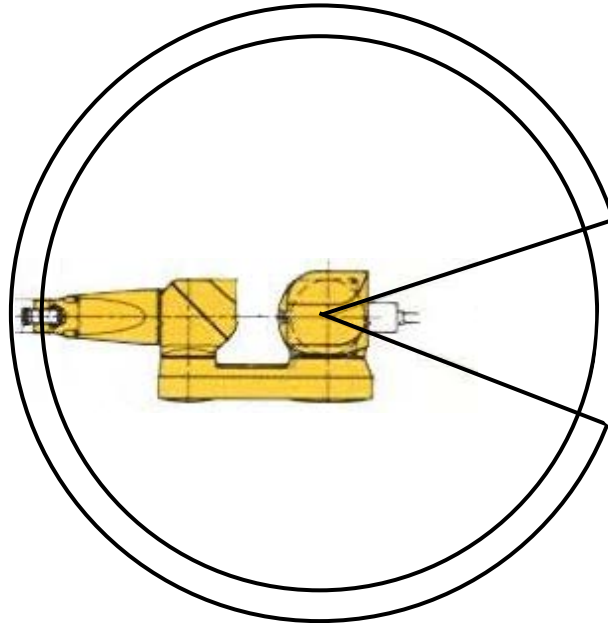
Οι εξισώσεις κινηματικής του βραχίονα συνιστούν ένα μη γραμμικό πρόβλημα με το οποίο, όταν κάποιος καταπιάνεται έχει να αντιμετωπίσει α) το πρόβλημα της ύπαρξης της λύσης, β) το πρόβλημα ύπαρξης πολλών λύσεων και γ) το πρόβλημα επιλογής κατάλληλης μεθόδου επίλυσης.

A) Ύπαρξη λύσεων

Η ύπαρξη λύσεων έχει άμεση σχέση με το χώρο εργασίας του βραχίονα. Χρησιμοποιούνται οι εξής δύο ορισμοί: 1) Χώρος εργασίας μέγιστης επιδεξιότητας, όπου το άκρο του βραχίονα έχει πρόσβαση σε κάθε σημείο του χώρου με όλες τις πιθανές τιμές του προσανατολισμού, και 2) απλώς προσβάσιμος χώρος λειτουργίας, όπου το άκρο του βραχίονα έχει πρόσβαση σε κάθε σημείο για μία τουλάχιστον τιμή του προσανατολισμού του.



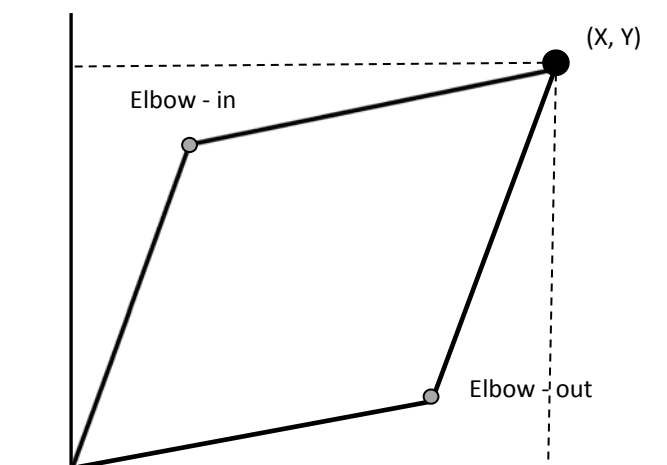
Σχήμα 4.6: Χώρος εργασίας (πλάγια όψη)



Σχήμα 4.7: Χώρος εργασίας (κάτοψη)

Β) Πολλαπλές λύσεις

Πολλαπλές λύσεις έχουμε όταν τα σημεία του χώρου εργασίας προσεγγίζονται με τον ίδιο προσανατολισμό με παραπάνω από ένα τρόπο. Το γεγονός ύπαρξης εναλλακτικών λύσεων μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα αφού μιας και ο βραχίονας θα πρέπει να διαθέτει τη δυνατότητα βέλτιστης λύσης. Ένα παράδειγμα πολλαπλών λύσεων φαίνεται στο Σχήμα 4.8, ενώ για ένα βραχίονα 6 DOF τύπου Staubli RX90 για ορισμένα σημεία υπάρχουν μέχρι και 8 διαφορετικές λύσεις!



Σχήμα 4.8: Δύο λύσεις για προσέγγιση ενός σημείου (elbow-in and out)

Επισημαίνεται πως απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην περίπτωση των πολλαπλών λύσεων καθώς τότε το ρομπότ επιλέγει την τροχιά με δικά του κριτήρια (συνήθως της μικρότερης απόστασης) και στην περίπτωση εμποδίων μέσα στο χώρο εργασίας υπάρχει ο κίνδυνος συγκρούσεων.

Γ) Μέθοδος επίλυσης

Επιλύσιμος θεωρείται ένας βραχίονας όταν οι τιμές των μεταβλητών των αρθρώσεων του μπορούν να προσδιοριστούν αλγοριθμικά. Αυτό στην ουσία αποκλείει τη χρήση επαναληπτικών μεθόδων οι οποίες δεν εγγυούνται εύρεση όλων των λύσεων. Προσοχή δίνεται στις μεθόδους που δίνουν λύσεις κλειστού τύπου: την αλγεβρική και τη γεωμετρική μέθοδο. Μια συνθήκη, ικανή να εξασφαλίσει την ύπαρξη λύσεων κλειστού τύπου, για έναν βραχίονα με έξι περιστροφικές αρθρώσεις, είναι η ύπαρξη σημείου τομής τριών γειτονικών αξόνων.

Κεφάλαιο 5: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

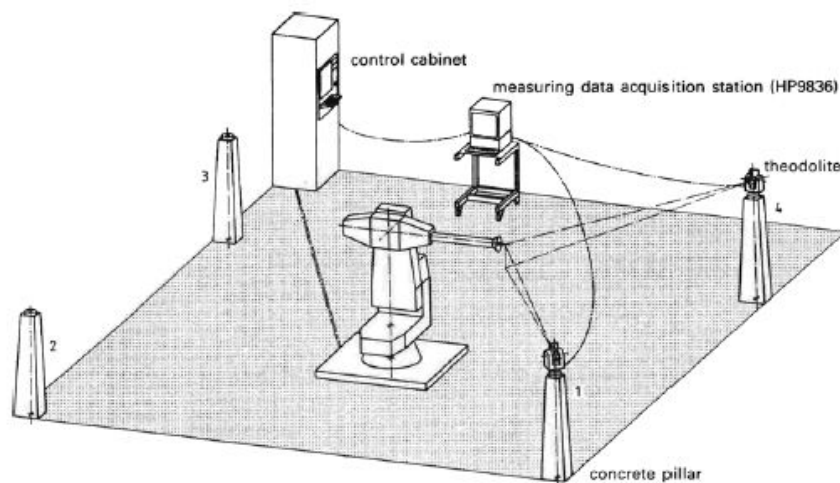
Κάνοντας μια ανασκόπηση στη διεθνή βιβλιογραφία συνειδητοποιούμε πως όσον αφορά τη μέτρηση και αντιστάθμιση σφαλμάτων κίνησης ρομπότ υπάρχει πλούσιο υλικό.

Μια πληθώρα τρόπων μοντελοποίησης, μέτρησης και διόρθωσης σφαλμάτων τίθενται υπό συζήτηση στα [12], [13], [14]. Ο Jang [15] παρουσιάζει μια μέθοδο αντιστάθμισης βασισμένη στο χωρισμό του βραχίονα σε κομμάτια. Για κάθε κομμάτι καταστρώνει μια εξίσωση διόρθωσης σφάλματος το οποίο μετράει με ένα σύστημα κάμερας – LED υπερύθρων. Ο Newman [16] αντισταθμίζει σφάλματα σε ένα βραχίονα Motoman P-8 χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλυσης κυκλικών σημείων. Επιπροσθέτως, οι Driels και Pathre [17] εξετάζουν κατά πόσο επηρεάζουν την ταυτοποίηση των κινηματικών παραμέτρων ενός ρομπότ οι αρχικές εκτιμήσεις των: παραμέτρων, μετρητικής ακρίβειας και θορύβου, ανάλυση κωδικοποιητή, αβεβαιότητας και αριθμού πειραμάτων. Ο G. Zak [18] προτείνει μια μεθοδολογία εκτίμησης των κινηματικών παραμέτρων, όπου ο κλασικός αλγόριθμος προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων αντικαθιστάται από έναν σταθμισμένο αλγόριθμο ελαχίστων τετραγώνων. Επιπλέον, υποστηρίζει πως είναι δυνατό να βελτιωθεί η εκτίμηση των παραμέτρων χωρίς να αυξηθεί ο αριθμός των πειραμάτων. Ο J.M. Renders [19] παρουσιάζει μια άλλη τεχνική εκτίμησης κινηματικών παραμέτρων με χρήση αλγορίθμου μέγιστων πιθανοτήτων σε αναδρομική μορφή που απαιτεί αρκετή υπολογιστική ισχύ. Ο Ph. Drouet [20] δημιούργησε μια μέθοδο αντιστάθμισης γεωμετρικών και σφαλμάτων ελαστικότητας σε ιατρικό βραχίονα 6 DOF, με χρήση γραμμικών μοντέλων με παραμέτρους τη δεδομένη ρύθμιση του βραχίονα (ταχύτητες, επιταχύνσεις) και του φορτίου. Ο A. Omodei [21] ύστερα από έρευνα τριών διαφορετικών αλγορίθμων εκτίμησης κινηματικών παραμέτρων (μη- γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων, γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων και φίλτρα Kalman) κατέληξε

ότι τα φίλτρα Kalman είναι η καλύτερη μέθοδος από πλευρά ταχύτητας, αξιοπιστίας και ότι δίνει μια εκτίμηση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων.

Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση [22] ο J. O. Berg θέτει το πρόβλημα της ακρίβειας ενός ρομπότ και την αντιστάθμισή του αναφορικά με το προγραμματισμό του. Αναφέρει τη δυνατότητα μεταφοράς του πραγματικού κόσμου σε ένα εικονικό μοντέλο με χρήση λογισμικού CAM αλλά τονίζει την αδυναμία της ακριβούς αυτής μετάβασης. Ο ίδιος υποστήριξε πως μόνο στον off-line προγραμματισμό έχει σημασία ο όρος 'ακρίβεια θέσης' και 'σφάλμα θέσης'. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται κυρίως ,στον off-line προγραμματισμό είναι το σύστημα βάσης του ρομπότ. Με βάση αυτό το σύστημα η κινηματική του ρομπότ μπορεί να περιγράψει την κίνησή του μόνο προσεγγιστικά και αυτό γιατί δεν λαμβάνει υπόψη τις κατασκευαστικές ανοχές και ελαστικότητες του ρομπότ. Η όλη ιδέα είναι η σύνδεση αυτού του συστήματος συντεταγμένων με ένα δεύτερο σύστημα το οποίο θα περιγράφει την πραγματική κίνηση που λαμβάνει χώρα.

Για τη διαδικασία μέτρησης του σφάλματος θέσης χρησιμοποίησε ψηφιακούς θεοδόλιχους. Οι θεοδόλιχοι μετράνε γωνίες και με συγκεκριμένη διάταξη την πραγματική θέση του άκρου του βραχίονα αναφορικά με ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων. Αν οι παράμετροι μετατροπής από το σύστημα συντεταγμένων της μέτρησης στο άγνωστο σύστημα βάσης του ρομπότ, ήταν γνωστοί τότε θεωρητικά θα μπορούσε να γίνει άμεση μέτρηση της ακρίβειας θέσης του ρομπότ. Η διάταξη μέτρησης (σχήμα 5.1) αποτελείται από 4 θεοδόλιχους σε διάταξη τετραγώνου - ένας σε κάθε κορυφή- ενώ ο βραχίονας βρίσκεται στο κέντρο του τετραγώνου, δηλαδή στη τομή των δύο διαγωνίων.



Σχήμα 5.1: Διάταξη μέτρησης με θεοδόλιχους

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη μετατροπή από το σύστημα μετρήσεων στο σύστημα αναφοράς του ρομπότ είναι:

$$\mathbf{X}_{R,i} = \mathbf{T} + \mu \mathbf{D} \mathbf{X}_{M,i}$$

Όπου

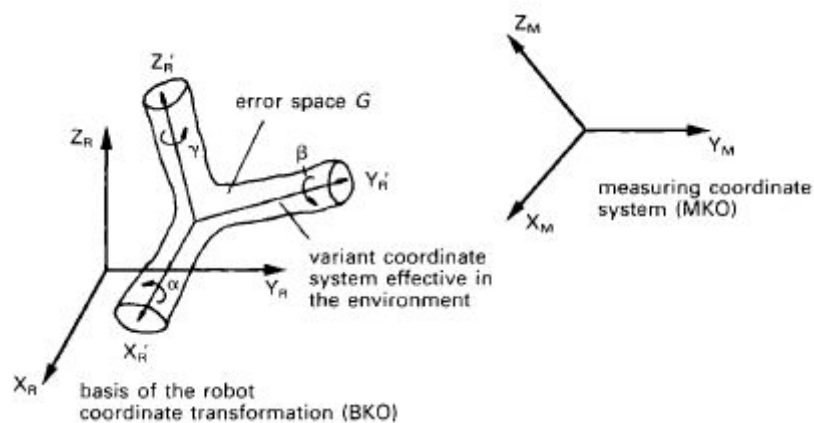
$$\mathbf{X}_{R,i} = \begin{bmatrix} x_{R,i} \\ y_{R,i} \\ z_{R,i} \end{bmatrix} : \text{η } i\text{-οστή θέση στις αναφορικές συντεταγμένες του ρομπότ}$$

$$\mathbf{X}_{M,i} = \begin{bmatrix} x_{M,i} \\ y_{M,i} \\ z_{M,i} \end{bmatrix} : \text{η } i\text{-οστή θέση στο σύστημα συντεταγμένων μέτρησης (πραγματική θέση)}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} : \text{πίνακας μετατροπής μετατομίσεων από το σύστημα μετρήσεων σε αυτό του ρομπότ}$$

μ : Κλίμακα

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}(x, \alpha) \mathbf{D}(y, \beta) \mathbf{D}(z, \gamma) : \text{πίνακας περιστροφής}$$



Σχήμα 5.2: Σύστημα αναφοράς και μέτρησης

Εννοείται πως για την εύρεση των ζητούμενων παραμέτρων απαιτούνται μετρήσεις πολλών σημείων για στατιστικούς λόγους και εξαγωγή αυτών με

χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Το τελικό σφάλμα θέσης στις τρεις διαστάσεις μπορεί τελικά να αποτυπωθεί ως:

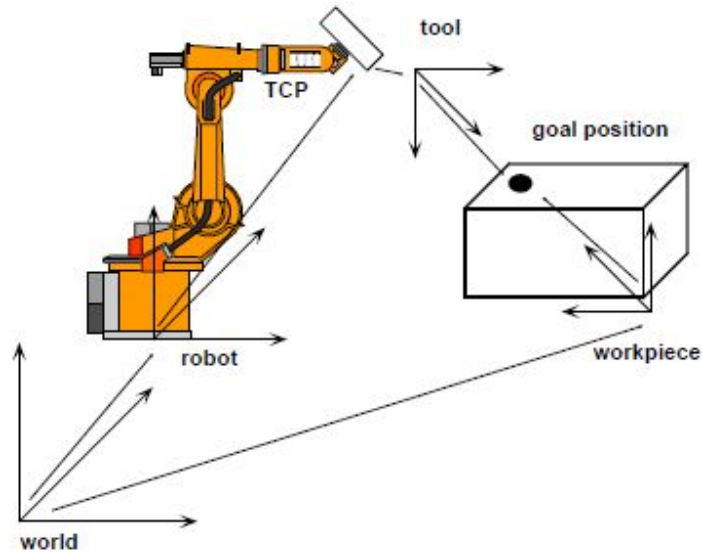
$$V_i = T + \mu DX_{M,i} - X_{R,i}$$

Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων χρησιμοποίησε τρεις διαφορετικούς ρομποτικούς βραχίονες KUKA.

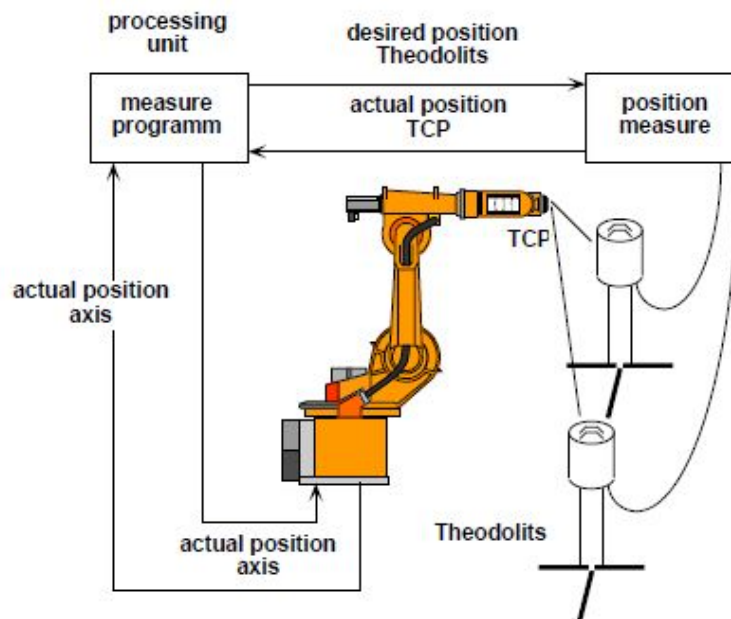
Οι Bernhardt et al στην αναφορά [23] κάνουν προσπάθεια αντιστάθμισης του σφάλματος του ρομπότ με χρήση ενός στατικού μοντέλου που περιέχει τις παραμέτρους που επηρεάζουν το σύστημα. Τονίζουν πόσο σημαντική είναι η σωστή ρύθμιση το ρομπότ λαμβάνοντας υπόψη και τα κατασκευαστικά σφάλματα. Διευκρινίζουν πως μόνο στη περίπτωση ενός 'τέλειου' κόσμου όπου τα πραγματικά αντικείμενα μπορούν να περιγραφούν επακριβώς από ένα 3D εικονικό μοντέλο έχει νόημα να μιλάμε για αυτόματο προγραμματισμό ρομπότ (off-line). Αυτός ο κόσμος δεν υπάρχει και για αυτό η εύρεση των παραμέτρων που επηρεάζουν το σύστημα, κατέχει πρωτεύοντα ρόλο.

Στόχος του πειράματος τους, είναι η τοποθέτηση ενός αντικειμένου σε μια συγκεκριμένη θέση με συγκεκριμένο προσανατολισμό (peg in the hole). Το μετρητικό σύστημα του ρομπότ μετράει την περιστροφή του άξονα των κινητήρων και επομένως δεν λαμβάνει υπόψη μηχανικές παρεκκλίσεις όπως ελαστικότητα γραναζιών, κατασκευαστικές ατέλειες, κλπ. Η κατασκευή συστημάτων μεγάλης ακρίβειας είναι πολλές φορές απαγορευτική λόγω του μεγάλου κόστους για αυτό το λόγο σημαντικό ρόλο παίζουν νέες τεχνικές αντιστάθμισης σφαλμάτων όπως αυτή της μοντελοποίησής τους σε ένα υπολογιστικό μοντέλο που θα συνεργάζεται με τον ελεγκτή του ρομπότ και θα το καθοδηγεί στις σωστές πραγματικά θέσεις.

Η μετρητική διάταξη είναι παρόμοια με αυτή της προηγούμενης αναφοράς (σχήμα 5.3) χρησιμοποιώντας ψηφιακούς θεοδόλιχους για τη μέτρηση του σφάλματος θέσης.



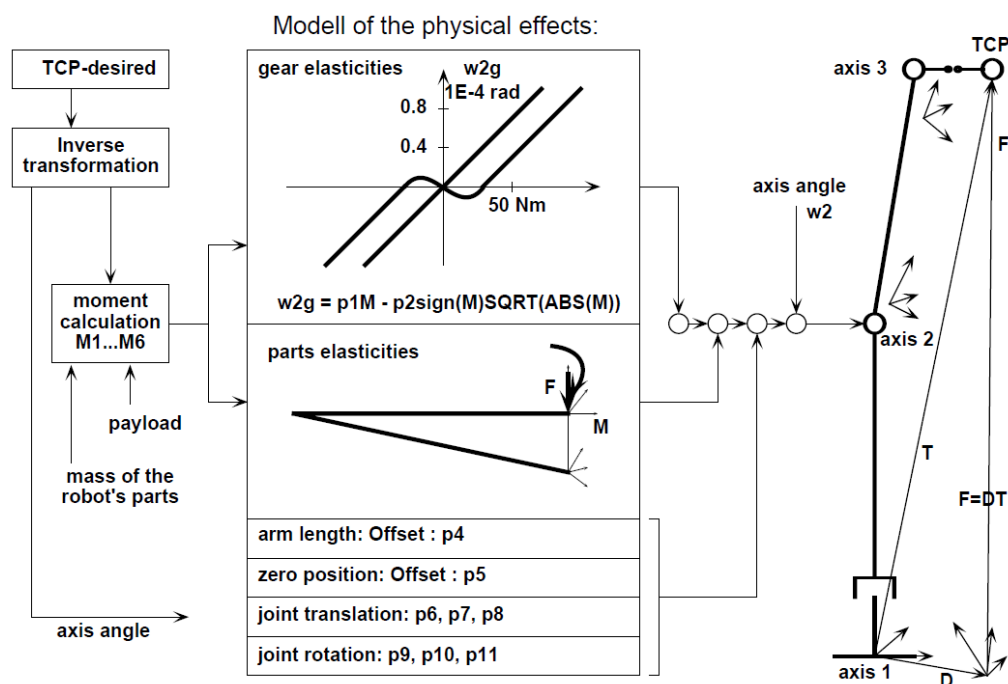
Σχήμα 5.3: Στόχος του ρομπότ (peg in the hole)



Σχήμα 5.4: Μετρητική διάταξη

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη μοντελοποίηση του σφάλματος είναι η εξής: Δημιουργείται πρώτα ένα στατικό μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει τις φυσικές παραμέτρους που προκαλούν τις αποκλίσεις στην κίνηση του βραχίονα. Αυτές οι παράμετροι ταυτοποιούνται μέσω πολλών μετρήσεων με τους θεοδόλιχους και αντιστοιχίζονται με τις συντεταγμένες των αρθρώσεων. Το μοντέλο που περιγράφει την κίνηση του άκρου του ρομπότ φαίνεται στο

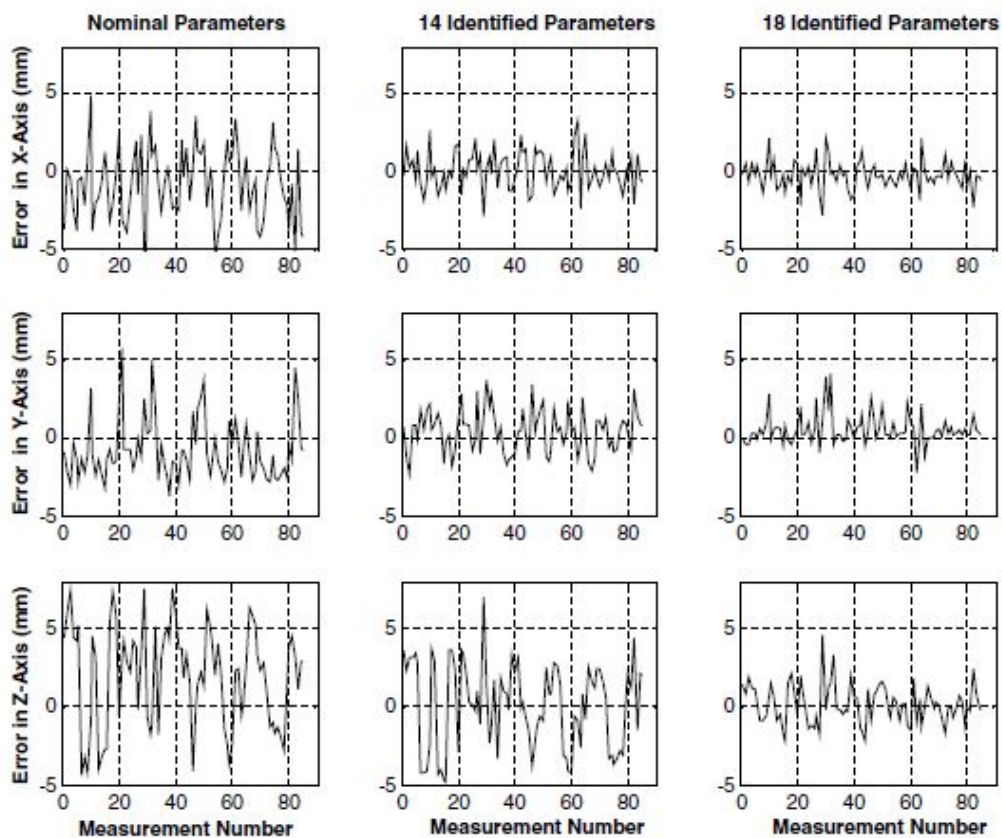
σχήμα 5.5 και ξεκινάει από την εισαγωγή των επιθυμητών συντεταγμένων αρθρώσεων (TCP-desired). Μέσω αντίστροφης κινηματικής οι συντεταγμένες αρθρώσεων μετατρέπονται σε συντεταγμένες χώρου XYZ και σε συνδυασμό με το μοντέλο σφαλμάτων που περιγράψαμε παραπάνω προκύπτει η τελική πραγματική θέση του άκρου. Παρατηρούμε ότι οι αρχικές παράμετροι για το μοντέλο σφαλμάτων είναι το φορτίο του βραχίονα και το βάρος των ίδιων των μελών του.



Σχήμα 5.5: Μεθοδολογία μοντελοποίησης και αντιστάθμισης σφαλμάτων σε ρομποτικούς βραχίονες

Στη βιβλιογραφία [24] γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης σφαλμάτων θέσης του βραχίονα με χρήση αναλυτικών συναρτήσεων όπως τα πολυώνυμα Fourier. Για τις πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιείται ο ρομποτικός βραχίονας Motoman SK 120.

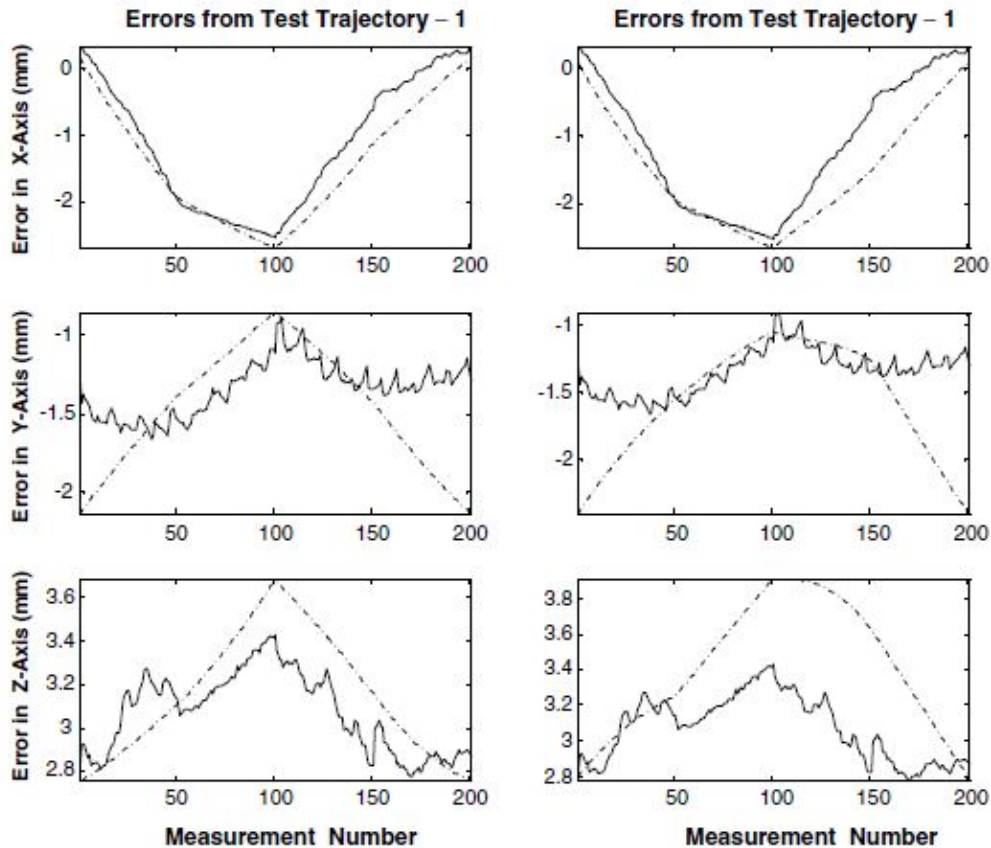
Τα δεδομένα θέσης που απαιτούνται προκύπτουν από διάταξη μέτρησης συμβολόμετρου (laser) ενώ οι σταθερές των πολυωνύμων και οι κινηματικές παράμετροι καθορίζονται από τα δεδομένα θέσης συγκεκριμένης, γνωστής, γεωμετρίας του ρομπότ. Τα προσεγγιστικά σφάλματα που προκύπτουν από τα πολυώνυμα, σε επόμενο βήμα, διορθώνονται με χρήση μιας πρώτης τάξης προσέγγισης του αντίστροφου κινηματικού μοντέλου. Ο βραχίονας Motoman SK 120 είναι τύπου closed chain robot και παρακάτω φαίνονται τα σφάλματα θέσης στους τρεις άξονες για ονομαστικές τιμές όλων των παραμέτρων, για τις μετρούμενες τιμές των παραμέτρων εκτός αυτών της κλειστής αλυσίδας και για τις μετρούμενες τιμές όλων των παραμέτρων.



Σχήμα 5.6: Σφάλματα θέσης ανάλογα με τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη

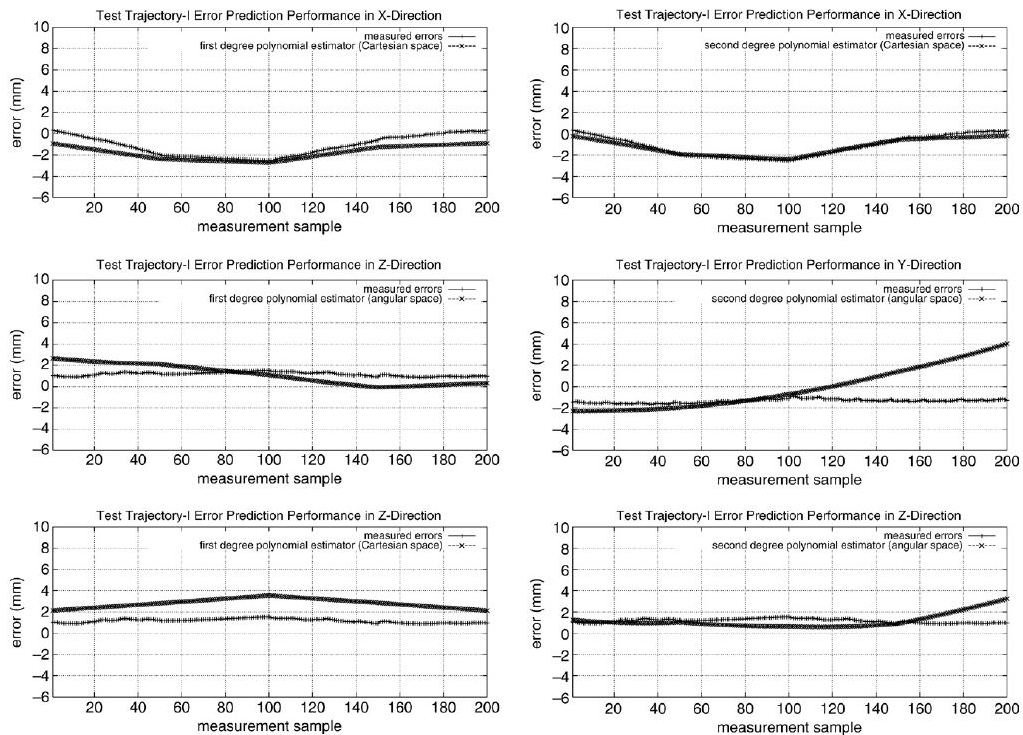
Ο αλγόριθμος που παρουσιάζει σε τέσσερα βήματα είναι: 1) επιλογή τύπου του πολυωνύμου που θα χρησιμοποιηθεί π.χ Fourier 2) επιλογή του βαθμού της συνάρτησης 3) εκτίμηση των αριθμητικών τιμών των σταθερών και επικύρωση του επιλεγμένου βαθμού της συνάρτησης μέσω των δεδομένων μέτρησης και 4) επιλογή μιας γνωστής συγκεκριμένης τροχιάς στο καρτεσιανό χώρο για διόρθωση του σφάλματος.

Μια γρήγορη επισκόπηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου που προτείνει φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.7: Σφάλματα θέσης (διακεκομμένη γραμμή) για συγκεκριμένη τροχιά. (Αριστερά - εκτίμηση με χρήση πολυωνύμου Fourier με μία αρμονική και δεξιά- με δύο αρμονικές)

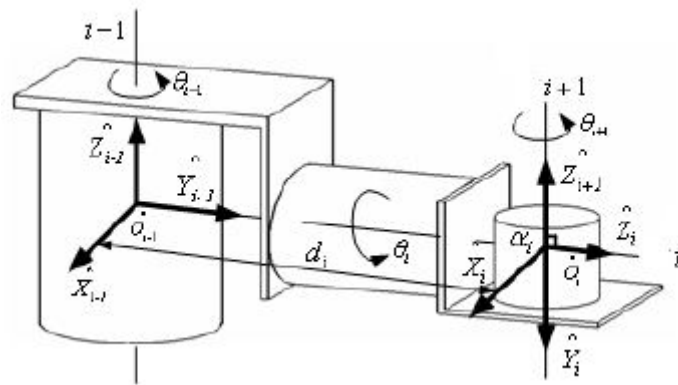
Σε συνέχεια της παραπάνω έρευνας στην αναφορά [25] η εκτίμηση των ζητούμενων παραμέτρων του πολυωνύμου που χρησιμοποιείται γίνεται με τη μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization method - PSO). Πρόκειται για ένα στοχαστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί πληθυσμό σημείων βελτιστοποίησης. Η ανάπτυξή τους βασίστηκε στην προσπάθεια προσομοίωσης της κίνησης ενός σμήνους πτηνών ή κοπαδιού ψαριών ως μέρος μιας κοινωνιο - γνωστικής μελέτης πάνω στην ιδέα της συλλογικής νοημοσύνης των βιολογικών πληθυσμών. Υπάρχουν διάφορες μορφές αυτού του αλγορίθμου με χρήση ,εδώ, της βασικής μορφής.



Σχήμα 5.8: Προσέγγιση σφαλμάτων θέσης (μαύρη γραμμή) για συγκεκριμένη τροχιά (δεξιά – πολυώνυμο 1^{ου} βαθμού αριστερά – πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού)

Οι Jian Yin και Yu Gao [26] μέσω ευθείας κινηματικής υπολογίζουν τις πραγματικές παραμέτρους DH ενός βραχίονα 5 DOF του οποίου το άκρο κάνει μια συγκεκριμένη κίνηση από σημείο σε σημείο με διαφορετικό όμως προσανατολισμό στο κάθε ένα.

Πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός παραμέτρων λειτουργίας του ρομπότ όπως η ταχύτητα λειτουργίας και το φορτίο. Στη συνέχεια, για την πρόβλεψη της κίνησης και του προσανατολισμού του άκρου, δοσμένων συντεταγμένων αρθρώσεων, απαιτείται το ευθύ κινηματικό μοντέλο του ρομπότ. Για να γίνει αυτό αντιστοιχίζουν σε κάθε άρθρωση ένα σύστημα συντεταγμένων, όπου με τη χρήση των πινάκων μεταφοράς και περιστροφής θα καταλήξουν στις καρτεσιανές συντεταγμένες του άκρου.

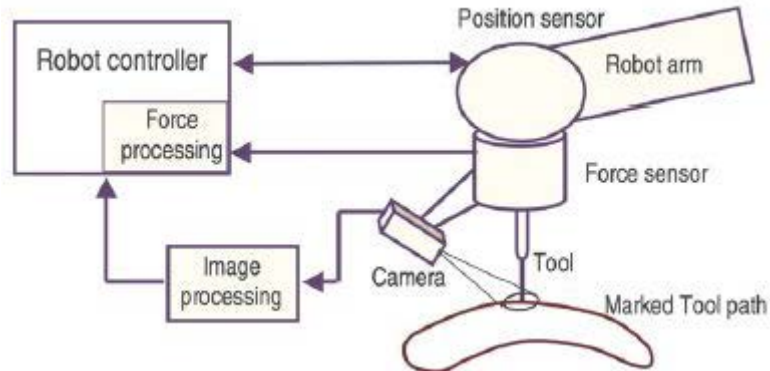


Σχήμα 5.9: Τα προσαρτημένα συστήματα συντεταγμένων του 5 DOF βραχίονα

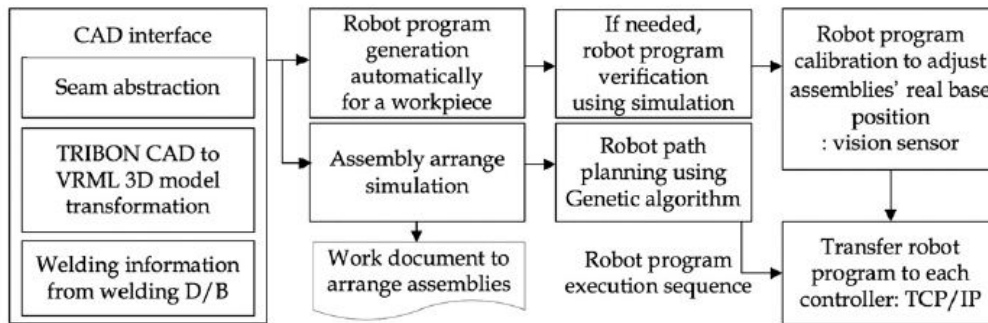
Για τον υπολογισμό των πραγματικών παραμέτρων DH χρησιμοποιήθηκε μετρητική διάταξη συμβολόμετρου LTD 840. Αφού η κεφαλή του laser ευθυγραμμιστεί με το στόχο – κάτοπτρο, το ρομπότ ξεκινά την κίνησή του προκαθορισμένης τροχιάς. Έχουμε την εμφάνιση του φαινομένου Doppler και η αλλαγή συχνότητας της ακτίνας στη κεφαλή του laser μεταφράζεται ως σχετική μετατόπιση από το αντίστοιχο λογισμικό της μετρητικής διάταξης. Για να μπορεί ο στόχος να είναι πάντα ευθυγραμμισμένος με την κεφαλή καθόλη τη διάρκεια της κίνησης, χρησιμοποιείται ένα σύστημα γυροσκοπίου – κινητήρων. Οι γωνίες των αξόνων του γυροσκοπίου καταγράφονται από οπτικούς κωδικοποιητές.

Η ιδέα έγκειται στο γεγονός ότι, γνωρίζοντας τις παραμέτρους DH του κατασκευαστή αλλά και τις πραγματικές, μπορούμε μέσω του ευθύ κινηματικού μοντέλου του ρομπότ να προβλέψουμε την απόκλιση που θα έχει το άκρο του βραχίονα σε μια προκαθορισμένη κίνηση με τυχαίο προσανατολισμό.

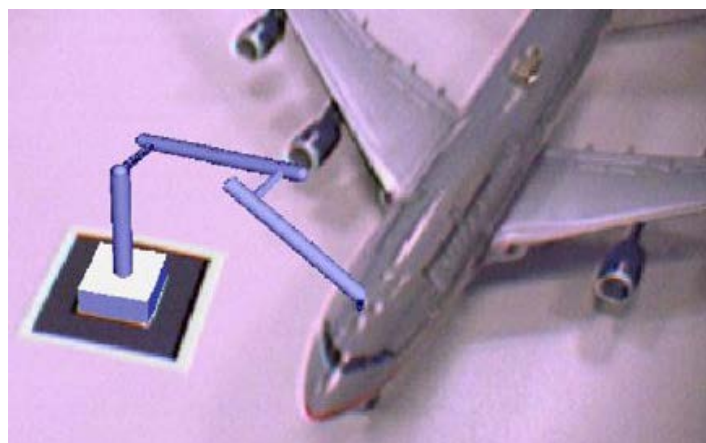
Τέλος, στη βιβλιογραφική αναφορά [27] γίνεται μια πιο εξελιγμένη προσέγγιση προγραμματισμού ρομπότ όπως αυτή του on-line προγραμματισμού με διόρθωση ή δημιουργίας τροχιάς μέσω μεθόδων οπτικού ελέγχου. Για τον off-line προγραμματισμό εξηγεί ποια είναι τα απαραίτητα βήματα ενώ αναφέρεται και στον προγραμματισμό σε Augmented Reality μεθόδους.



Σχήμα 5.10: Δημιουργία τροχιάς κίνησης βραχίονα (με βάση προσχεδιασμένης τροχιάς) μέσω επεξεργασίας εικόνας από οπτικά αισθητήρια.



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα εργασιών για off-line προγραμματισμό [28]



Εικόνα 5.1: Εικονικό ρομπότ σε πραγματικό περιβάλλον, καθαρισμός μινιατούρας αεροπλάνου [29]

Κεφάλαιο 6: Περιγραφή εξοπλισμού

6.1 Εισαγωγή

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι , κατ' αρχήν, η μέτρηση σφαλμάτων θέσης του άκρου ρομποτικού βραχίονα και εν συνεχεία η μοντελοποίησή τους με τη μέθοδο των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε το χώρο και τις συνθήκες που έγιναν τα πειράματα καθώς επίσης και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε.

6.2 Ο ρομποτικός βραχίονας Staubli RX 90

Ο ρομποτικός βραχίονας που διαθέτει ο τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών είναι το μοντέλο RX 90 της εταιρίας STAUBLI (www.staubli.com). Εντάσσεται στη κατηγορία special robots και πιο συγκεκριμένα στα paint robots, δηλαδή κατάλληλο για εργασίες βαφής ή ψεκασμού. Στο εργαστήριο χρησιμοποιείται κυρίως για πειράματα ψεκασμού πλάσματος.

Ο κωδικός ονομασίας που το περιγράφει είναι:

RX	9	0
(1)	(2)	(3)

(1): Οικογένεια RX

(2): Η μέγιστη απόσταση μεταξύ αρθρώσεων 2 και 5 σε δεκατόμετρα (dm)

(3): Αριθμός ενεργών αρθρώσεων:

- 0 = 6 ενεργές αρθρώσεις.

6.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του βραχίονα φαίνονται συνοπτικά στο παρακάτω πίνακα:

Μοντέλο	RX 90
Βαθμοί ελευθερίας	6
Ονομαστικό φορτίο	6 kg
Μέγιστο φορτίο	11 kg*
Μέγιστη έκταση	985 mm
Επαναληψιμότητα	±0.02 mm
Κατηγορία	II 2G D, EEx p ia ή EEx pem ib IP65
Περιβάλλον εργασίας	Group II Category 2,3 Zone 1,2,21,22 Class I, II, III, Div. 1 & 2
Ευρώπη:	
Αμερική:	
Στήριξη	Δάπεδο / οροφή

*Το φορτίο μπορεί να αυξηθεί σε χαμηλές ταχύτητες, μέχρι μέγιστη τιμή 11 kg για συγκεκριμένη γεωμετρία του βραχίονα

Πίνακας 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά βραχίονα Staubli RX 90 [30]

Ο ελεγκτής του ρομπότ είναι ο CS7 και ο προγραμματισμός του επιτυγχάνεται μέσω τερματικού με χρήση της ρομποτικής γλώσσας V+ (εξέλιξη της VAL). Επίσης, είναι εξοπλισμένος με teach pendant (βλ. Εικόνα 2.1) που διευκολύνει στον έλεγχο του βραχίονα (κυρίως σε έκτακτες καταστάσεις) καθώς αυτός βρίσκεται μακριά από τον ελεγκτή.

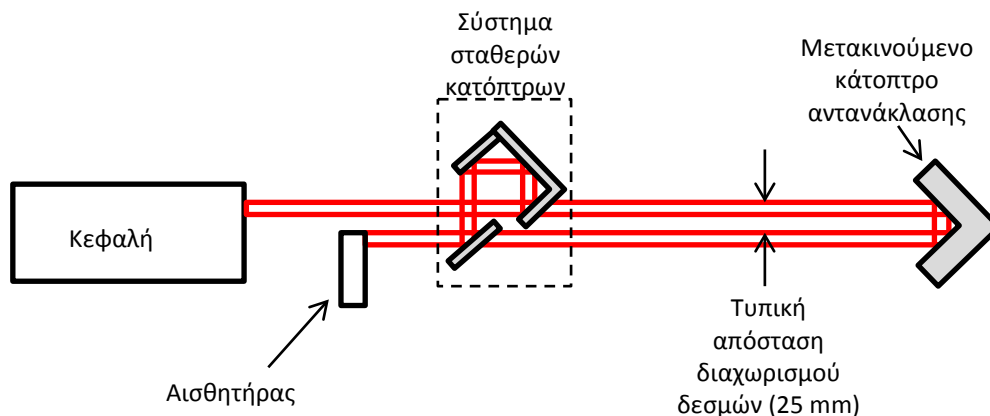
Τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του βραχίονα επισυνάπτονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

6.3 LDDM Optodyne MCV-500

Η πρώτη μετρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι το σύστημα μέτρησης μετατοπίσεων LDDM (Laser Doppler Displacement Meter) MCV-500 της εταιρίας Optodyne Inc [31]. Ανήκει στην οικογένεια συμβολόμετρων δύο συχνοτήτων που ως αρχή λειτουργίας έχουν το φαινόμενο Doppler, όπως θα δούμε παρακάτω. Κύρια χρήση του είναι η μέτρηση σφαλμάτων θέσης εργαλειομηχανών αλλά, παρόλα αυτά, μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί και σε ρομποτικούς βραχίονες αρκεί η ευθυγράμμιση να είναι σωστή και οι διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν καλά ορισμένοι.

6.3.1 Αρχή λειτουργίας

Συμβολόμετρο είναι το όργανο με το οποίο είναι δυνατό να προκληθούν φαινόμενα συμβολής και να μετρηθούν με τη βοήθειά τους ορισμένα μεγέθη, όπως, για παράδειγμα, πολύ μικρά μήκη κύματος, δείκτες διάθλασης, μικρές διαφορές μήκους κύματος κλπ. Το όργανο αυτό μας επιτρέπει να υποδιαιρέσουμε σε δύο δέσμες τα κύματα που προέρχονται από μια μοναδική πηγή, υποχρεώνοντάς τις να ακολουθήσουν μια διαφορετική διαδρομή, κατά μήκος της οποίας προκαλείται μια μετατόπιση φάσης που σχετίζεται με το υπό μέτρηση φυσικό μέγεθος και, τέλος, να επιπροστεθούν και πάλι οι δύο δέσμες. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένας διαιρέτης της δέσμης του φωτός και δύο κάτοπτρα (ένα σταθερό και ένα κινητό). Οι δέσμες, επειδή είναι εκτός φάσης, δίνουν αφορμή σε φαινόμενα συμβολής. Αυτά είναι τα συμβολόμετρα μίας συχνότητας ή συμβατικά τύπου Michelson αφού στον οπτικό αισθητήρα επιστρέφει μία δέσμη. Καταλαβαίνουμε πως αυτή η διάταξη είναι ογκώδης λόγω των οπτικών μερών όπως επίσης και ότι σημαντικό ρόλο παίζει η καλή ευθυγράμμιση.

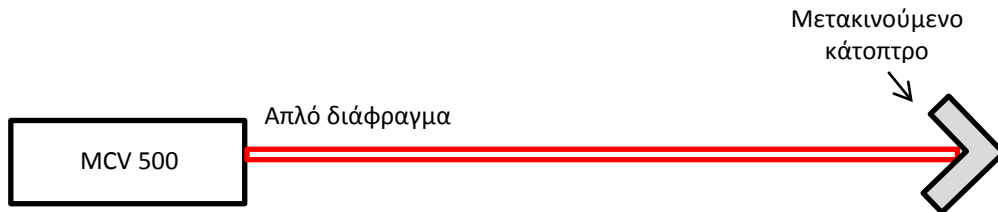


Σχήμα 6.1: Συμβολόμετρο μίας συχνότητας

Ένα δεύτερο είδος συμβολόμετρων είναι αυτά των δύο συχνοτήτων που βασίζονται στο φαινόμενο Doppler. Έχουμε δύο δέσμες: τη δέσμη αναφοράς και τη δέσμη μέτρησης. Οι δύο δέσμες, έχοντας διαφορετικές συχνότητες, συμβάλλουν και η συχνότητα του σήματος παρεμβολής μετράτε ως διαφορά φάσης. Αν επιπλέον ο στόχος – κάτοπτρο μετατοπιστεί τότε η συχνότητα μέτρησης αλλάζει κατά $\pm \Delta f$ και συγκρινόμενη με τη δέσμη αναφοράς αλλά

και με τη μέτρηση του προηγούμενου κύκλου, προκύπτει η μετατόπιση του κινητού κατόπτρου σε μορφή μεταβολής συχνότητας.

Πιο συγκεκριμένα για το μοντέλο MCV-500, η κατασκευή του είναι αρκετά συμπαγής καθώς έχει μία δίοδο και για τις δύο δέσμες. Χρησιμοποιεί ηλεκτρο-οπτικό αισθητήρα ο οποίος ανιχνεύει τη μεταβολή συχνότητας μιας δέσμης και τη μεταφράζει μέσω της μονάδας επεξεργασίας σε μετατόπιση.

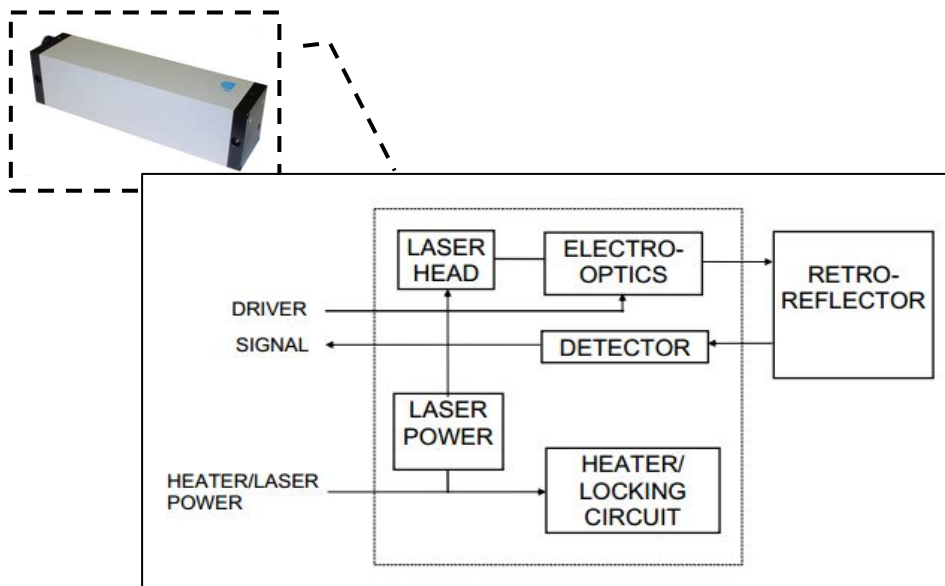


Σχήμα 6.2: Αρχή λειτουργίας μοντέλου MCV-500 της Optodyne Inc.

6.3.2 Περιγραφή εξαρτημάτων

Κεφαλή laser (L - 109)

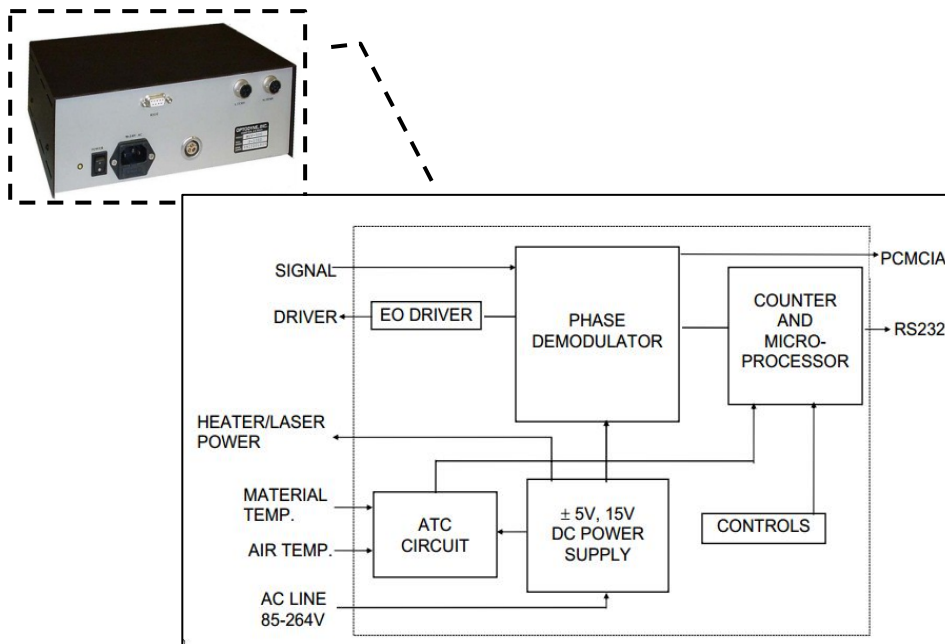
Όπως αναφέραμε η κεφαλή του laser MCV-500 αποτελείται από επιμέρους κυκλώματα τα οποία κάνουν την όλη κατασκευή συμπαγή και ελαφριά. Περιλαμβάνει ένα σωλήνα – πηγή HeNe laser, ένα ηλεκτρο – οπτικό κύκλωμα ανίχνευσης μεταβολής συχνότητας Doppler, φωτοανιχνευτή και θερμαντήρα.



Σχήμα 6.3: Κεφαλή MCV-500

Μονάδα επεξεργασίας (P – 108D)

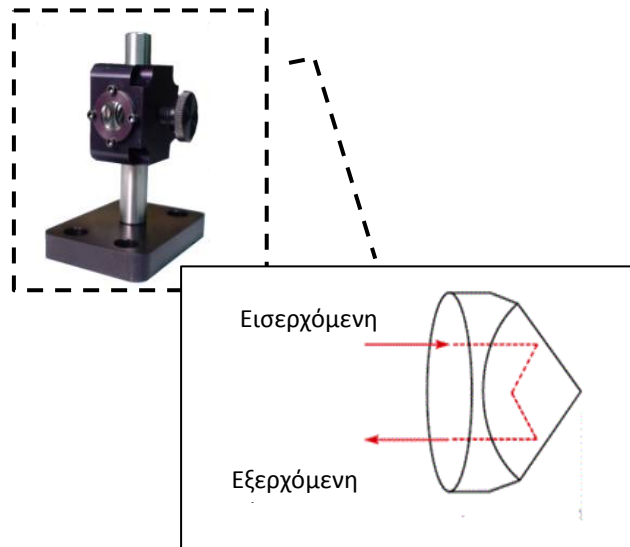
Η μονάδα επεξεργασίας παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για τη λειτουργία της πηγής laser, τα ηλεκτρο-οπτικά συστήματα της κεφαλής, τον επεξεργαστή σημάτων και τον θερμαντήρα. Οι θύρες επικοινωνίας είναι μία RS232 για σύνδεση με Η/Υ και δύο υποδοχές σύνδεσης αισθητήρων πίεσης/θερμοκρασίας και θερμοκρασίας υλικού για αντιστάθμιση των μετρήσεων ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες.



Σχήμα 6.4: Τροφοδοτικό – μονάδα επεξεργασίας MCV-500

Αντανεκλαστικός φακός (R - 102)

Ο αντανεκλαστικός χρησιμοποιείται σαν στόχος για την κεφαλή laser. Είναι ένας γωνιακός κύβος ο οποίος αντανεκλά τη δέσμη laser παράλληλα πίσω ακριβώς στην πηγή από όπου προήλθε, ανεξάρτητα από τη γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας πάνω του. Η χρήση του γωνιακού κύβου παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς η ευθυγράμμιση με την κεφαλή, στην αρχή και κατά τη διάρκεια της κίνησης, δε χρειάζεται να είναι απολύτως ακριβής (η ευθυγράμμιση είναι μία διαδικασία επίπονη).



Σχήμα 6.5: αντανακλαστικός φακός τύπου γωνιακού κύβου

Παρελκόμενα εξοπλισμού

Πέρα από τα εξαρτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω ο εξοπλισμός του MCV-500 περιέχει επίσης:

- Αισθητήρες θερμοκρασίας (IATCP)
- Ανακλαστικό καθρέπτη 90° (LD -37)
- Μαγνητική βάση στήριξης (LD -03)
- Αντάπτορα στήριξης κεφαλής (LD -14D)
- Καλώδια σύνδεσης κεφαλής – μονάδας επεξεργασίας
- Λογισμικό ανάλυσης μετρήσεων (W 500)
- Εγχειρίδιο χρήσης
- Βαλίτσα μεταφοράς



Εικόνα 6.1: Ανακλαστήρας 90°, αισθητήρες, μαγνητική βάση στήριξης

6.3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετρητικού συστήματος MCV-500, όπως δίνονται από τον κατασκευαστή, είναι:

Μοντέλο	MCV - 500
Τυπική Ανάλυση	0.01 μm
Ακρίβεια συστήματος	1 ppm = 1 $\mu\text{m}/\text{m}$
Μέγιστη ακτίνα μέτρησης	15 m
Σταθερότητα laser	0.1 ppm*
Θερμοκρασία λειτουργίας	15 – 32°C

*Η τιμή είναι για πίεση 759.46 mmHg και 20°C αλλιώς είναι ± 1 ppm με χρήση αισθητήρων αντιστάθμισης

Πίνακας 6.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά LDDM MCV-500 της Optodyne inc.

6.3.4 Ακρίβεια και σφάλματα οργάνου

Όπως συμβαίνει με κάθε όργανο, έτσι και εδώ, έχουμε την παρεμβολή σφαλμάτων στις μετρήσεις μας. Η συνολική ακρίβεια του οργάνου όμως, δεν εξαρτάται μόνο από τα σφάλματα του ίδιου αλλά και από εξωτερικές πηγές σφάλματος όπως είναι οι μεταβολές του περιβάλλοντος και ο ανθρώπινος παράγοντας. Πιο συγκεκριμένα, το συνολικό σφάλμα του συστήματος είναι η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των επιμέρους σφαλμάτων και εκφράζεται σε μονάδες μήκους. Τα σφάλματα συνήθως είναι ανάλογα του μήκους μέτρησης αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις όπου αυτά είναι ανεξάρτητα (π.χ σταθερή τιμή σε κάθε μέτρηση).

Τα συνηθέστερα σφάλματα που εμφανίζονται σε μετρήσεις του MCV-500 και μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις μετρήσεις όπως αναφέρονται από τον κατασκευαστή είναι με τη σειρά:

Σφάλματα μήκους κύματος laser

Η ακρίβεια ενός laser εξαρτάται από το μήκος κύματός του. Για ένα τυπικό σύστημα LDDM η ακρίβεια μήκους κύματος είναι 1 ppm ενώ για μετρήσεις ακριβείας φτάνει τα 0.002 ppm.

Σφάλματα ηλεκτρονικών κυκλωμάτων

Η τιμή αυτού του σφάλματος είναι σταθερή και εξαρτάται από την ανάλυση του μετρητικού συστήματος. Η τυπική τιμή είναι στα 0.01 μm .

Οπτική μη-γραμμικότητα

Στο σύστημα LDDM η δέσμη δεν είναι πολωμένη και άρα δεν έχουμε εμφάνιση αυτού του σφάλματος.

Σφάλμα ατμοσφαιρικής αντιστάθμισης

Εξαρτάται από την ακρίβεια/ευαισθησία των αισθητήρων πίεσης/θερμοκρασίας αλλά και τον τρόπο που μεταβάλλονται οι συνθήκες αυτές κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Θερμικά σφάλματα λόγω διαστολής

Η μεταβολή της μετρούμενης γεωμετρίας λόγω θερμοκρασιακής διαστολής μπορεί να εισάγει σημαντικό σφάλμα στις μετρήσεις. Είναι απαραίτητο να ξέρουμε το συντελεστή θερμικής διαστολής του υλικού που μετράμε ενώ επίσης ρόλο παίζει (όπως και προηγουμένως) η ακρίβεια του αισθητήρα θερμοκρασίας του υλικού.

Θερμικά φαινόμενα στα οπτικά εξαρτήματα

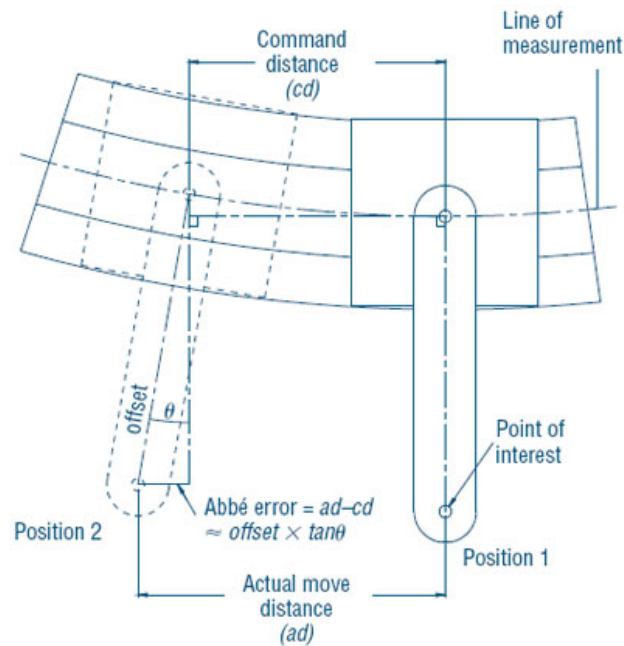
Η μεταβολή της θερμοκρασίας του αντανακλαστικού φακού μπορεί να αλλάξει το μήκος της διαδρομής της δέσμης και αυτή η μεταβολή να εμφανίζεται ως μετατόπιση στις μετρήσεις μας. Η τυπική τιμή μετατόπισης είναι $0.2 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Η χρήση ανακλαστικών κατόπτρων εξαλείφει αυτό το πρόβλημα.

Σφάλμα 'νεκρής διαδρομής' (dead path error)

Ως νεκρή διαδρομή ορίζεται η απόσταση που βρίσκεται ανάμεσα στην κεφαλή και στο αρχικό σημείο της μέτρησης χωρίς όμως αυτή να είναι ενεργή, χωρίς δηλαδή να μας ενδιαφέρει η μέτρηση σφάλματος μέσα στα όριά της. Ελαχιστοποίηση αυτού του σφάλματος γίνεται με ελαχιστοποίηση αυτής της απόστασης. Στην παρούσα εργασία η 'νεκρή διαδρομή' ήταν η ελάχιστη δυνατή.

Σφάλματα Abbé

Εμφανίζονται όταν η μέτρηση δε γίνεται στον επιθυμητό άξονα αλλά σε έναν μετατοπισμένο άξονα σε σχέση με αυτόν, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει στην κίνηση κάποιο γωνιακό σφάλμα. Για καλύτερη κατανόηση παρατίθεται το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.6: Σφάλμα Abbe'

Σφάλμα συνημίτονου

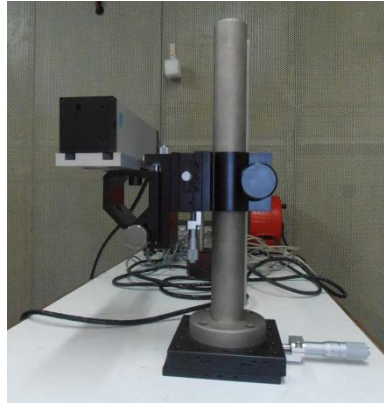
Όπως καταλαβαίνουμε κακή ευθυγράμμιση της ακτίνας laser με τον άξονα της κίνησης, οδηγεί σε απόκλιση ανάμεσα στη μετρούμενη και την πραγματική τιμή απόστασης.

Τέλος, τα σφάλματα που δε μπορούμε να προσδιορίσουμε, όπως οι ταλαντώσεις και οι θόρυβοι δε λαμβάνονται υπόψη με την προϋπόθεση ότι δεν επηρεάζουν σημαντικά το σύστημα. Ο τρόπος να το διαπιστώσουμε αυτό είναι οι πειραματικές επαναλήψεις. Πρέπει το δείγμα του πειράματος να είναι ικανοποιητικό ώστε μέσα από την ανάλυση των δεδομένων και την εύρεση των τυπικών αποκλίσεων να αποφανθούμε αν όντως υπάρχει τυχαίο σφάλμα και σε τι ποσοστό κυμαίνεται αυτό. Μετρήσεις με μεγάλα τυχαία σφάλματα δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, ενώ οι παράγοντες που τα προκαλούν θα πρέπει να εξαλειφθούν.

6.3.5 Σταθερή βάση στήριξης και ευθυγράμμισης

Αναφέραμε πως σημαντικό ρόλο στη χρήση μετρητικών οργάνων τύπου συμβολόμετρου παίζει η καλή ευθυγράμμιση της ακτίνας του laser με τον άξονα κίνησης που μετράμε. Μια τέτοια διαδικασία με τη χρήση της μαγνητικής βάσης και το χέρι είναι αρκετά δύσκολη έως αδύνατη αν θέλουμε να επιτύχουμε καλή ακρίβεια. Για αυτό το λόγο, για τη στήριξη της κεφαλής

laser και την ευθυγράμμισή της χρησιμοποιούμε τη βάση στήριξης ακριβείας (της εταιρίας Melles Griot) που διατίθεται στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.



Εικόνα 6.2: Βάση στήριξης κεφαλής Orptodyne laser

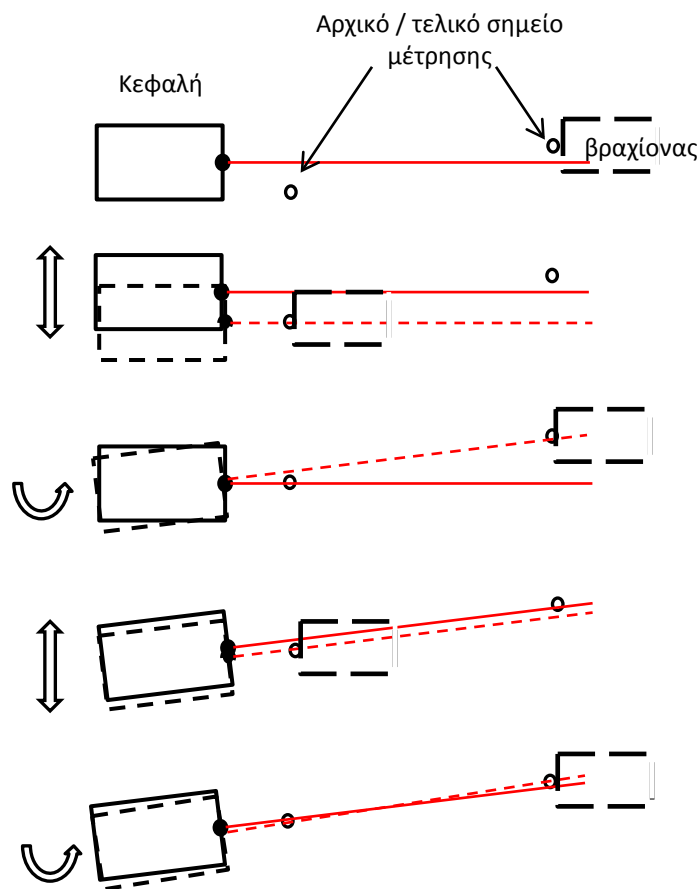
Πρωταρχικός ρόλος αυτής της βάσης ήταν να συγκρατεί κυλινδρικό laser και όχι το τετραγωνικής διατομής MCV-500. Παρόλα αυτά σε εκπόνηση προηγούμενης διπλωματικής που έκανε χρήση του εξοπλισμού, σχεδιάστηκε και φτιάχτηκε ειδική βάση που δέχεται επακριβώς και με όσο το δυνατό βέλτιστα κριτήρια (μικρές ανοχές, ελάχιστο βάρος) την κεφαλή.

Η χρήση αυτής της βάσης παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η κεφαλή μπορεί να τοποθετηθεί σε ανεξάρτητα, από το σώμα που μετράμε, μη μεταλλικά σημεία όπου δεν υπάρχουν έντονες ταλαντώσεις αλλά και να αποσβέσει αυτές που εμφανίζονται, ελαχιστοποιώντας έτσι το τυχαίο σφάλμα. Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημα που μας δίνει είναι η δυνατότητα μικρομεταχειρίσεων της κεφαλής. Για κάθε κατεύθυνση έχει ενσωματωμένα μικρόμετρα που επιτρέπουν όχι μόνο κινήσεις ακριβείας στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα αλλά και ρυθμίσεις pitch, yaw.

6.3.6 Μεθοδολογία εύκολης ευθυγράμμισης

Η διαδικασία της ευθυγράμμισης, ειδικά στην αρχή της 'γνωριμίας' με τον εξοπλισμό μπορεί να γίνει επίπονη και ειδικά, όταν χρησιμοποιείται σε ρομποτικούς βραχίονες όπου η κίνηση μπορεί να έχει οποιαδήποτε διεύθυνση στο χώρο (σε αντίθεση με τις εργαλειομηχανές όπου οι άξονες κινούνται κάθετα, οπότε μια αρχική τοποθέτηση με το χέρι μπορεί να είναι αρκετά κοντά στην επιθυμητή). Παρόλα αυτά, η διαδικασία ευθυγράμμισης μπορεί να γίνει αρκετά πιο εύκολη αν κάποιος σκεφτεί απλά και «γεωμετρικά».

Στόχος μας είναι να ενώσουμε δύο σταθερά σημεία (αρχικό και τελικό σημείο μέτρησης) με μία συγκεκριμένη ευθεία (δέσμη laser) την οποία ελέγχουμε από ένα τρίτο σημείο, αυτό της κεφαλής του laser. Έστω ότι ένας κύκλος ακτίνας R του οποίου το κέντρο συμπίπτει με την κεφαλή του laser και ότι το αρχικό σημείο μέτρησης είναι σχεδόν στο κέντρο του κύκλου ενώ το τελικό σημείο μέτρησης βρίσκεται σε ακτίνα R . Από τη γεωμετρία γνωρίζουμε ότι το τόξο κύκλου γωνίας θ μοιρών είναι ανάλογο της ακτίνας r που επιλέγουμε ($arc = \pi * r * \theta / 180$). Έτσι, μια μικρή περιστροφή $d\theta$ θα οδηγήσει το ίχνος του laser να διανύσει μηδαμινό τόξο σε σχέση με το σημείο κοντά στο κέντρο του κύκλου αλλά πολύ μεγάλο σε απόσταση R . Αντίθετα, μια μετατόπιση του κέντρου του κύκλου κατά x θα οδηγήσει στην ίδια μετατόπιση του ίχνους του laser σε οποιαδήποτε ακτίνα. Η απλή 'μετάφραση' του παραπάνω σκεπτικού είναι πως για σημεία κοντά στην κεφαλή του laser ρυθμίζουμε τους άξονες μετατόπισης x, z και για τα μακρινά σημεία ρυθμίζουμε τους άξονες περιστροφής $pitch, yaw$. Κάνοντας αυτή τη διαδικασία εναλλάξ για το αρχικό και τελικό σημείο μέτρησης μέσα σε ελάχιστο χρόνο μπορούμε να επιτύχουμε την επιθυμητή καλή ευθυγράμμιση.



Σχήμα 6.7: Διαδικασία ευθυγράμμισης

Σε περίπτωση που το αρχικό σημείο απέχει και αυτό αρκετά από την κεφαλή του laser (π.χ. βρίσκεται στο μέσο της συνολικής απόστασης κεφαλής – τελικού σημείου), η διαδικασία γίνεται λίγο πιο πολύπλοκη καθώς για αυτό το σημείο ίσως χρειαστεί να ρυθμίσουμε τις μετατοπίσεις αλλά και τις περιστροφές σε μικρότερο όμως βαθμό από το τελικό σημείο. Γενικά πάντως, με βάση τη θεωρία των σφαλμάτων, αυτή η περίπτωση ταυτόχρονα σημαίνει μεγαλύτερη ‘νεκρή απόσταση’ άρα και σφάλμα και θα πρέπει να αποφεύγεται όποτε αυτό είναι εφικτό.

6.3.7 Λογισμικό

Το λογισμικό που συνοδεύει το μετρητικό όργανο είναι ένα μετρολογικό πρόγραμμα φτιαγμένο από την ίδια εταιρία. Η έκδοση που ήταν διαθέσιμη στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκε είναι η 2.61 ενώ για πιο καινούρια συστήματα αυτή έχει αναβαθμιστεί (χωρίς να σημαίνει ότι έχουν αλλάξει οι βασικές λειτουργίες). Αναλυτική παρουσίαση των λειτουργιών του λογισμικού υπάρχει στο εγχειρίδιο χρήσης που παρέχει ο κατασκευαστής, ενώ οι ρυθμίσεις που μας απασχόλησαν θα αναφερθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Σε γενικές γραμμές η χρήση του είναι απλή και κατανοητή.

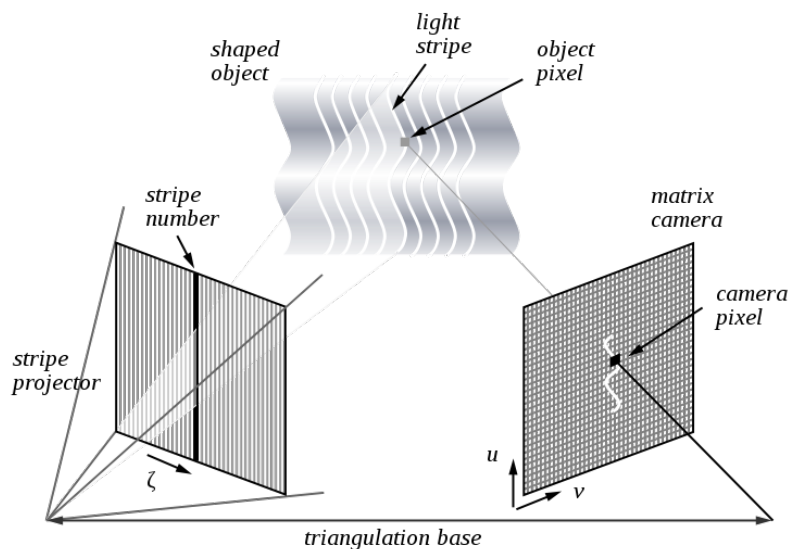
6.4 IScan M300 της IMetric 3D GmbH

Ο δεύτερος μετρητικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε (για λόγους που θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο) είναι το σύστημα IScan M300 της ελβετικής εταιρίας IMetric 3D GmbH (www.imetric.com). Πρόκειται για εξοπλισμό καινούριας τεχνολογίας η οποία βασίζεται κατά κόρον στην τεχνητή όραση (computer vision) και αναγνώριση 3D γεωμετριών μέσω προβολής δομημένου άσπρου φωτός και ανίχνευσής του από εγκατεστημένες κάμερες στο χώρο. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε εφαρμογές rapid prototyping, 3D printing, reverse engineering, κλπ. Ο νεοαποκτηθέντας εξοπλισμός (του εργαστηρίου του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών) έχει αρκετές δυνατότητες και λειτουργίες τις οποίες εμείς, λόγω της φύσης της παρούσας διπλωματικής, δε μπορέσαμε να εκμεταλλευτούμε. Παρόλο αυτά, θα γίνει μια προσπάθεια ανασκόπησης τους.

6.4.1 Αρχή λειτουργίας

Το IScan M300 είναι στην ουσία ένας τρισδιάστατος σαρωτής δομημένου φωτός. Περιληπτικά η όλη διαδικασία περιλαμβάνει την κατάλληλη “κωδικοποίηση” της επιφάνειας του αντικειμένου μέσω προβολής φωτεινού σχηματισμού (pattern), την απεικόνισή της από μια ή περισσότερες μηχανές και την 3D ανακατασκευή της επιφάνειας μέσω της αυτόματης αντιστοίχισης του προβαλλόμενου σχηματισμού με τις εικονοψηφίδες (pixel) των ψηφιακών εικόνων.

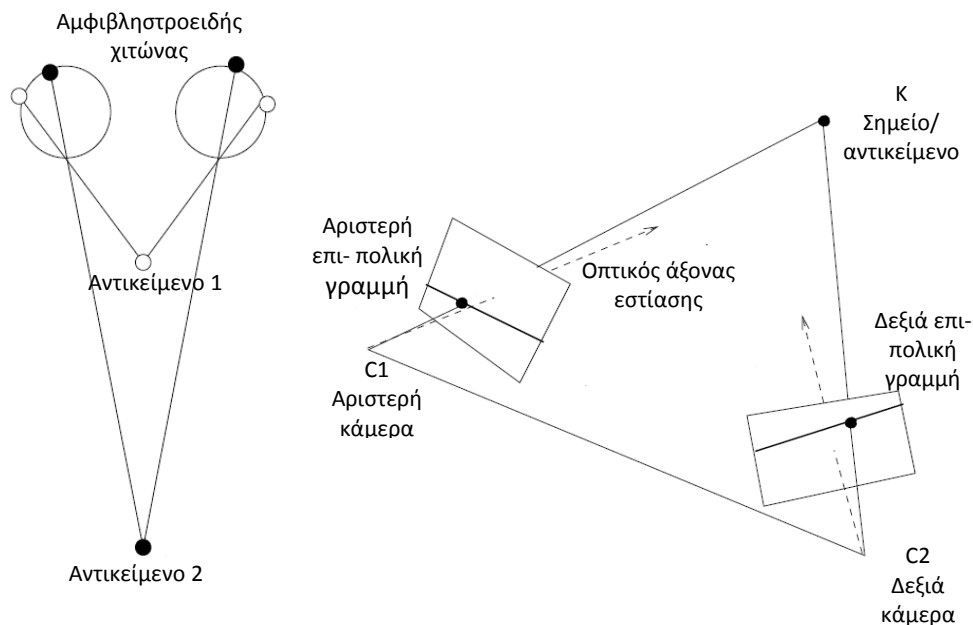
Με τον όρο δομημένο φως εννοούμε μια φωτεινή εικόνα με συγκεκριμένο δομημένο σχηματισμό όπως ασπρόμαυρες, γκρίζες ή έγχρωμες λωρίδες. Χρησιμοποιώντας έναν προβολέα, προβάλλουμε μια αλληλουχία αυτών των εικόνων πάνω στην επιφάνεια που θέλουμε, ενώ ταυτόχρονα καταγράφουμε το αντικείμενο με κάμερες – ψηφιακές μηχανές από διαφορετική οπτική γωνία. Οι σχηματισμοί που προβάλλουμε, παρουσιάζονται από την οπτική γωνία των καμερών παραμορφωμένες ανάλογα με την επιφάνεια που καλύπτουν. Με συνδυασμό πολλών τέτοιων λήψεων σε πολλές διαφορετικές θέσεις μπορούμε να εξάγουμε τις τρισδιάστατες συντεταγμένες κάθε σημείου πάνω στο αντικείμενο αναφορικά πάντα με ένα σύστημα αναφοράς. Η παραπάνω διαδικασία βασίζεται στην αρχή της τριγωνοποίησης (triangulation, βλ. Σχήμα 6.8) και χρησιμοποιείται σχεδόν από όλα τα συστήματα τρισδιάστατης σάρωσης.



Σχήμα 6.8: Αρχή της τριγωνοποίησης

Εννοείται πως είναι απαραίτητη η γνώση της εσωτερικής γεωμετρίας του προβολέα και της φωτογραφικής μηχανής καθώς και της σχετικής θέσης τους στον χώρο ώστε να ανακατασκευαστεί η επιφάνεια του αντικειμένου με τριγωνισμό των ομόλογων ακτινών.

Όπως αναφέραμε, για να μπορέσουμε να εξάγουμε τις τρισδιάστατες συντεταγμένες, άρα και το βάθος πεδίου ενός αντικειμένου, πρέπει να γίνουν λήψεις από διαφορετικές γωνίες. Με άλλα λόγια, όπως ακριβώς έχουμε δύο μάτια και ο διαφορετικός τρόπος προβολής των αντικειμένων στον αμφιβληστροειδή χιτώνα μας δίνει τη δυνατότητα αντίληψης σχετικών αποστάσεων, έτσι και εδώ χρειαζόμαστε το λιγότερο δύο κάμερες ώστε να έχουμε την εποπτεία του βάθους. (βλ. Σχήμα 6.9) [32].



Σχήμα 6.9: Συσχέτιση των: Λειτουργία ματιών (αριστερά) και ανάλογη λειτουργία με κάμερες (δεξιά)

Τα μοτίβο φωτός που προβάλλονται μπορούν να είναι πολλών ειδών καθένα από τα οποία λειτουργεί με το δικό του τρόπο. Αναφορικά υπάρχουν τα binary coded patterns και Grey-code binary patterns, grey level patterns, phase shift, υβριδικές μέθοδοι που συνδυάζουν τα παραπάνω και τέλος μέθοδοι που χρησιμοποιούν χρώματα. Το IScan M300 χρησιμοποιεί τη μέθοδο phase shift την οποία εξηγούμε παρακάτω.

Μέθοδος Phase Shift

Είναι από τις πιο γνωστές μεθόδους προβολής μοτίβο ασπρόμαυρων κάθετων ή οριζόντιων ριγών [33]. Πιο συγκεκριμένα, προβάλλεται

ημιτονοειδώς ένα σεντ του μοτίβου με ελάχιστο αριθμό τριών συνεχόμενων φάσεων. Η ένταση (0-1, μαύρο-άσπρο) ενός pixel της κάμερας σε σχέση με το προβαλλόμενο μοτίβο περιγράφεται από τις εξισώσεις [34]:

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) + I_G(x, y)\cos(\varphi(x, y) - \theta)$$

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) + I_G(x, y)\cos(\varphi(x, y))$$

$$I_3(x, y) = I_0(x, y) + I_G(x, y)\cos(\varphi(x, y) + \theta)$$

Όπου

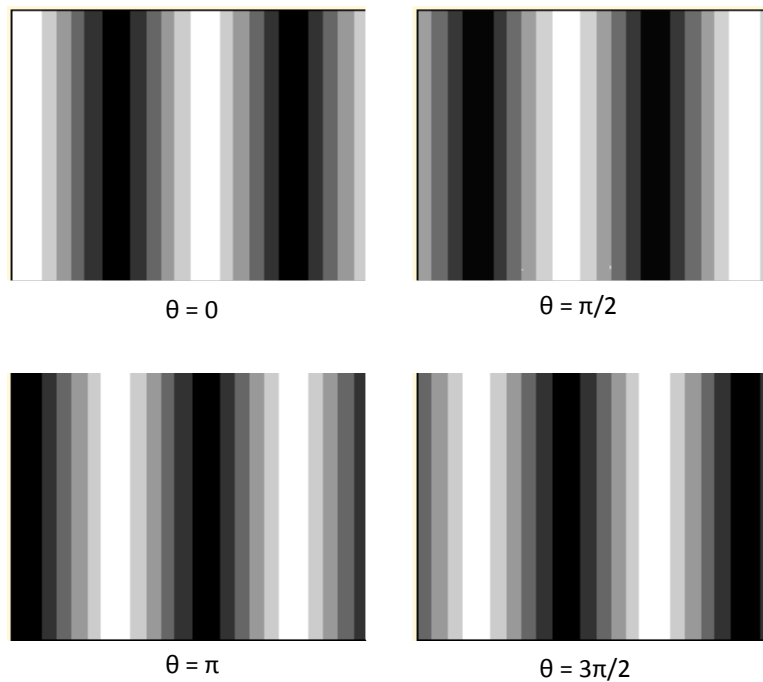
$I_{1-3}(x, y)$: οι εντάσεις των pixel για τις 3 φάσεις

$I_0(x, y)$: ένταση φόντου

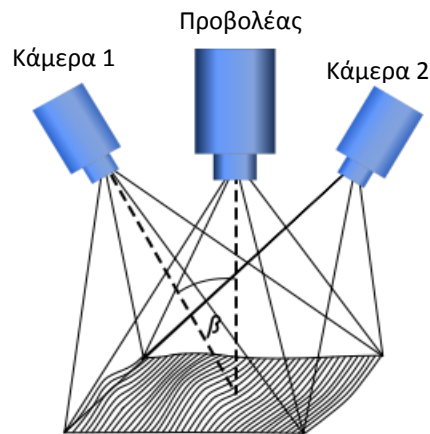
$I_G(x, y)$: διαμόρφωση πλάτους σήματος

$\varphi(x, y)$: φάση

θ : σταθερή γωνία αλλαγής φάσης



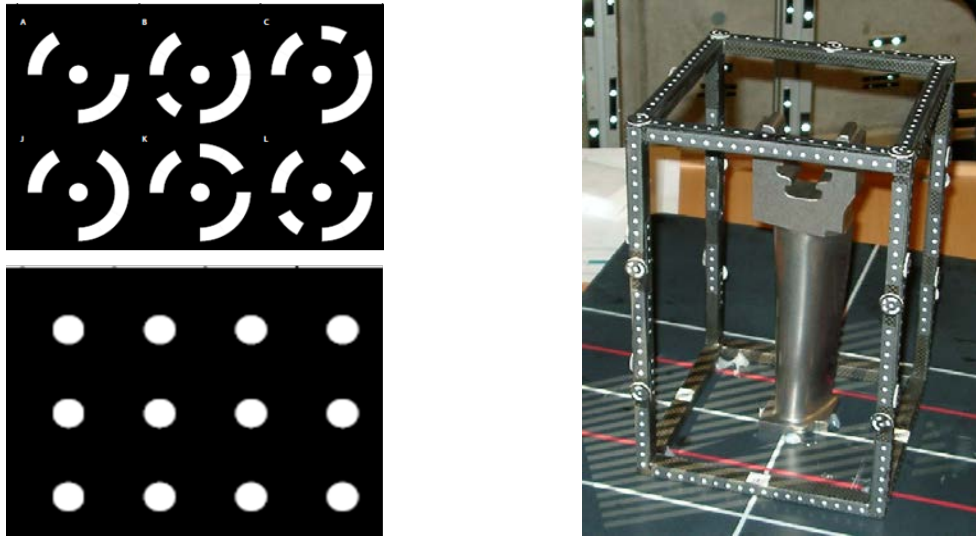
Εικόνα 6.3: Μοτίβο μετατοπισμένο ημιτονοειδώς με διαφορά φάσης $\theta = \pi/2$ (Phase shift)



Σχήμα 6.10: Καταγραφή μοτίβου με δύο κάμερες μη-συμμετρικά τοποθετημένες

6.4.2 Navigation

Ο όρος navigation αναφέρεται στην πλοήγηση – καθοδήγηση της δημιουργίας ενός 3D μοντέλου μέσω χρήσης σημείων αναφοράς. Κάθε σύστημα έχει τη δική του κωδικοποίηση σχημάτων, συνήθως άσπροι κύκλοι με διαφορετική σήμανση στην περίμετρό τους. Ο τρόπος λειτουργίας είναι ο εξής: Σαρώνοντας μία όψη του αντικείμενου έχει ως αποτέλεσμα αυτή η όψη να μοντελοποιηθεί ψηφιακά έχοντας το πραγματικό βάθος πεδίου αλλά πάντα αναφορικά με ένα συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων, αυτό του προβολέα. Για να μπορέσουμε να μοντελοποιήσουμε όλες τις όψεις του αντικείμενου θα πρέπει με σταθερό τον προβολέα (ώστε να μη αλλάξουν οι συντεταγμένες αναφοράς) να περιστρέψουμε το αντικείμενο κατά κάποιες μοίρες (συνήθως 30-45°) και να το σαρώσουμε μέχρι να μοντελοποιηθεί όλο. Για να μπορέσει το λογισμικό να αντιληφθεί αυτή την περιστροφή και να μην τοποθετήσει την νέα όψη πάνω στη προηγούμενη πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τους στόχους ώστε να φτιάξουμε ένα μοτίβο γύρω από το αντικείμενο. Επισημαίνεται πως αυτοί οι στόχοι πρέπει να είναι σε τυχαίες θέσεις, διαφορετικά μια συμμετρική τοποθέτηση θα οδηγούσε σε λανθασμένη αντιστοίχιση συντεταγμένων. Οι στόχοι αυτοί μεταφράζονται από το λογισμικό σε αριθμημένες συντεταγμένες τις οποίες όταν τις δει μετατοπισμένες αντιλαμβάνεται την ακριβή περιστροφή του αντικείμενου και άρα την νέα όψη την προσθέτει αμέσως μετά την προηγούμενή της. Πολλές φορές, όταν έχουμε παρόμοιες γεωμετρίες προς μοντελοποίηση, γίνεται η χρήση προσημασμένων πλαισίων ή κινητήριων βάσεων κάνοντας έτσι τη διαδικασία του navigation αρκετά γρήγορη και εύκολη.



Εικόνα 6.4: Κωδικοποιημένοι στόχοι (πάνω αριστερά), απλοί στόχοι (κάτω αριστερά), προσημασμένο πλαίσιο για χρήση σε 3D scanning (δεξιά)

6.4.3 Περιγραφή εξοπλισμού

Ο εξοπλισμός του IScan M300 αποτελείται από :

- Τον προβολέα
- Τις κάμερες συγκεκριμένης γεωμετρίας (stereo)
- Πλάκες αντιστάθμισης
- Καλώδια συνδεσμολογίας
- Απαραίτητο λογισμικό

Προβολέας

Είναι ένας μικρός φορητός προβολέας ο οποίος συνδέεται σε Η/Υ μέσω θύρας VGA. Συνοδεύεται από ένα τηλεχειριστήριο για απομακρυσμένους χειρισμούς και για να αποφεύγεται οποιαδήποτε επαφή σε περίπτωση που ο προβολέας είναι τοποθετημένος σε συγκεκριμένη θέση για την αρχή των μετρήσεων.

Απαιτείται προσοχή για όλους τους προβολείς, στον τερματισμό της εργασίας να περιμένουμε να σβήσει η λάμπα τους τελείως προτού κόψουμε τη παροχή ρεύματος, καθώς ενδιάμεσα γίνεται η ψύξη της. Σε διαφορετική περίπτωση υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της.

Κάμερες

Είναι το σημαντικότερο μέρος του εξοπλισμού καθώς από τη γεωμετρία τους αλλά και την ποιότητά τους εξαρτάται η ακρίβεια του συστήματος. Όπως

αναφέραμε, χρησιμοποιούνται ως ζεύγη εκατέρωθεν του προβολέα σε μη συμμετρική γεωμετρία και είναι σταθερές πάνω σε μία ράβδο η οποία βιδώνει σε κοινή βάση μαζί του. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η βέλτιστη γεωμετρία του συστήματος. Ο κατασκευαστής διαθέτει αυτά τα ζεύγη καμερών σε διάφορες γεωμετρίες ανάλογα με τον όγκο που θέλουμε να σαρώσουμε.

IScan M300	Όγκος μέτρησης
V 70	70 x 55 mm
V 100	100 x 75 mm
V 130	130 x 100 mm
V 200	200 x 170 mm
V 400	400 x 340 mm

Πίνακας 6.3: Όγκος σάρωσης ανάλογα με το μοντέλο καμερών



Εικόνα 6.5: Το σύστημα IScan M300 της IMetric

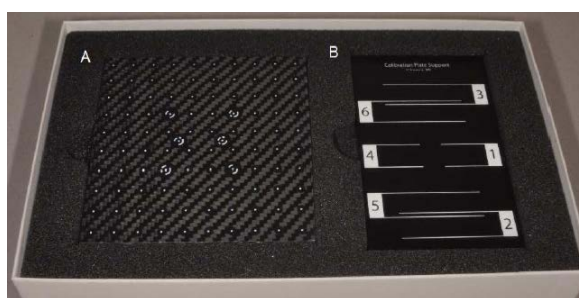
Στο εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών διατίθενται τα μοντέλα V 70 και V 400. Η αλλαγή μεταξύ τους γίνεται με το ειδικό κλειδί που παρέχεται στον εξοπλισμό.

Συνδεσμολογία

Έχουμε δύο βασικά καλώδια, το τροφοδοτικό και τα καλώδια σύνδεσης του συστήματος με Η/Υ. Ο προβολέας συνδέεται στη θύρα VGA ενώ οι κάμερες με USB. Προσοχή θέλει στην περίπτωση που οι USB θύρες του Η/Υ είναι σε μορφή hub και στην οποία η αναγνώριση και των δύο καμερών είναι αδύνατη. Επίσης, αφού χρησιμοποιούμε τη θύρα VGA, για τους σταθερούς Η/Υ (desktop) απαιτείται μία δεύτερη θύρα VGA, DVI ή χρήση της θύρας HDMI για σύνδεση με την οθόνη.

Πλάκες ρύθμισης – αντιστάθμισης

Παρέχονται δύο πλάκες: μία μικρή για χρήση με τις κάμερες V 70 και μία μεγάλη για τις V 400. Και οι δύο πλάκες είναι τετράγωνες ενώ έχουν τη μία πλευρά λευκή και την άλλη με ειδική σήμανση που αποκωδικοποιείται από το λογισμικό. Το μαύρο φόντο αυτής της πλευράς είναι έτσι ώστε να μην προκαλεί ανατακλάσεις. Ο κατασκευαστής τονίζει πως καμιά πλευρά δε πρέπει να έρχεται σε επαφή με κάποιο αντικείμενο ή χέρια (χειρισμός από τα πλάγια μόνο). Η τοποθέτηση των πλακών για τη διαδικασία της αντιστάθμισης γίνεται με χρήση των βαθμονομημένων εντύπων που παρέχονται από τον κατασκευαστή.



Εικόνα 6.6: Πλάκα αντιστάθμισης (A) και βαθμονομημένη βάση (B)

6.4.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

IScan M300	
Μέγεθος	186 – 340 x 200 x 130 mm*
Βάρος	2,4 kg
Τροφοδότηση	95 – 260 V, 50/60 Hz
Κατανάλωση	54 W
Ανάλυση Καμερών	1.3 MP
Χρόνος σάρωσης	2 – 8 sec**
Θερμοκρασία λειτουργίας	10 – 35 °C***

*Ανάλογα με ποιο εξάρτημα καμερών χρησιμοποιείται

**Εξαρτάται από τον Η/Υ και τις ρυθμίσεις ποιότητας σάρωσης

***Αλλαγή θερμοκρασίας κατά 5°C απαιτεί εκ νέου ρύθμιση - αντιστάθμιση

Πίνακας 6.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά IScan M300

6.4.5 Ακρίβεια και σφάλματα συστήματος

Δίνεται ο πίνακας που παρέχει ο κατασκευαστής για την ακρίβεια του συστήματος ανάλογα με το εξάρτημα καμερών που χρησιμοποιείται.

	Measurement Volume	Standoff*	Point Spacing*	Noise*	Accuracy*
IScan M300					
V70	70 × 55 mm	235 mm	0.055 mm	0.0025 mm	0.008 mm
V100	100 × 75 mm	235 mm	0.07 mm	0.003 mm	0.010 mm
V130	130 × 100 mm	235 mm	0.1 mm	0.005 mm	0.014 mm
V200	200 × 170 mm	350 mm	0.15 mm	0.008 mm	0.022 mm
V400	400 × 340 mm	750 mm	0.30 mm	0.0015 mm	0.043 mm

* Better than; depends on object's surface

Πίνακας 6.5: Ακρίβεια συστήματος IScan M300 [35]

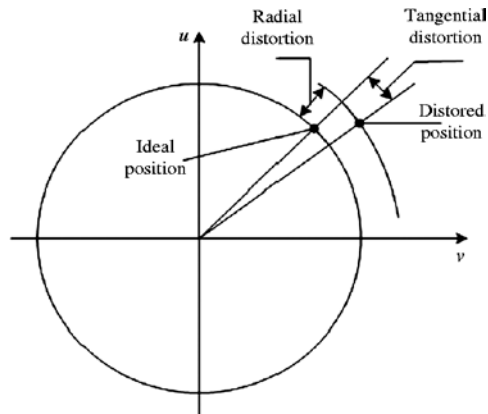
Γενικά, έχουμε εισαγωγή σφαλμάτων λόγω στρεβλώσεων από τα οπτικά μέρη του συστήματος αλλά και από τη γεωμετρική προοπτική που χρησιμοποιείται. Μέσα από μία διαδικασία μετρήσεων μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους του προβολέα σε σχέση με τις κάμερες και να κάνουμε τυχόν διορθώσεις λαμβάνοντας υπόψη οπτικές και γεωμετρικές παρεκκλίσεις. Πιο αναλυτικά [36]:

Σφάλματα καμερών

Αφορά τη συσχέτιση των 3D συντεταγμένων του πραγματικού κόσμου (x, y, z) με τις 2D συντεταγμένες του επιπέδου (x', y'), την εύρεση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κάμερας και τον υπολογισμό των αλλοιώσεων που προκαλούνται στην εικόνα λόγω του φακού. Για να είμαστε σε θέση να εξαγάγουμε τρισδιάστατες πληροφορίες, θα πρέπει να γνωρίζουμε τις σχετικές θέσεις και παραμέτρους των συσκευών μας. Μαθηματικά μοντέλα τύπου pinhole camera χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό.

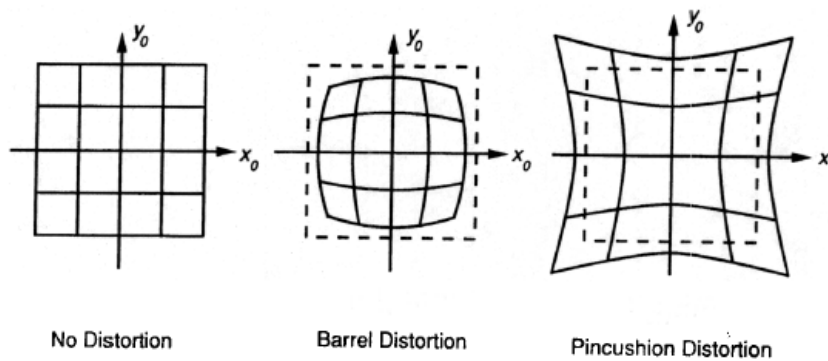
Αλλοιώσεις φακού

Τα σφάλματα φακών όσον αφορά τη γεωμετρία τους ποικίλουν και χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: Τις ακτινικές αλλοιώσεις (radial distortion) που οφείλονται στο σχήμα του φακού και τις εφαπτομενικές (tangential distortion) που προκαλούνται από ατέλειες κατασκευής στη διαδικασία συνένωσης των συστατικών μερών της κάμερας.



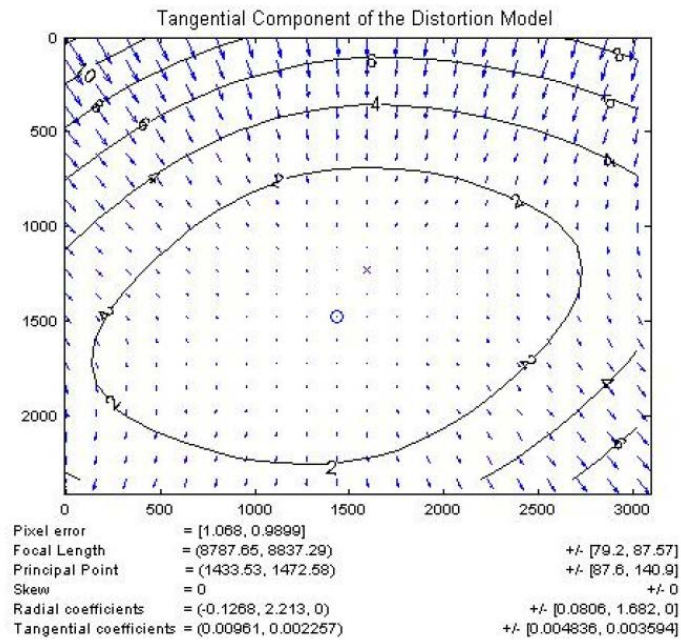
Σχήμα 6.11: Είδη αλλοιώσεων φακών

Το radial distortion εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα της κάμερας. Συνήθως η αλλοίωση αυξάνεται από το κέντρο προς τα άκρα προκαλώντας έτσι αλλαγές στην πραγματική τοποθεσία των pixels.



Σχήμα 6.12: Μορφές αλλοιώσεων ακτινικού τύπου (radial)

Το tangential distortion είναι μία αλλοίωση που προκαλείται από κατασκευαστικές ατέλειες, οι οποίες προκύπτουν από το γεγονός ότι ο φακός της κάμερας δεν είναι ακριβώς παράλληλος με το επίπεδο της προβολής.



Σχήμα 6.13: Εφαπτομενικές αλλοιώσεις φακών

Αντανάκλαστικότητα

Η αντανάκλαση του φωτός από την επιφάνεια του αντικειμένου δρα αρνητικά με δύο τρόπους. Πρώτον, το φως από τον προβολέα αντανακλάται και δεν επιστρέφει στις κάμερες ή αντανακλάται και επιστρέφει σαν πολλαπλά είδωλα προκαλώντας θόρυβο. Επιπλέον, υπάρχει και η περίπτωση όπου η επιφάνεια του αντικειμένου αντανακλά άλλα φωτεινά αντικείμενα του χώρου (αυτό είναι πιο σπάνιο και εύκολα διορθώνεται).

Σφάλματα λόγω χρωμάτων

Το χρώμα και η μη ενιαία κατανομή του στην επιφάνεια επηρεάζει με τον εξής τρόπο: Όσο πιο έντονο (φωτεινό) είναι το χρώμα τόσο πιο πολύ φως επιστρέφει στις κάμερες (γκρι και άσπρο θεωρούνται τα καλύτερα). Όσο πιο ενιαίο είναι το χρώμα της επιφάνειας τόσο καλύτερη ποιότητα έχουν τα δεδομένα.

Θερμοκρασία

Η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα αντικείμενο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων μπορεί να επηρεάσει σοβαρά το αποτέλεσμα. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται η ρύθμιση και αντιστάθμιση του συστήματος εκ νέου.

Θόρυβος

Υπάρχει θόρυβος λόγω του περιβάλλοντος όπως έντονος φωτισμός. Προτείνεται οι μετρήσεις να γίνονται σε σκοτεινό χώρο για βέλτιστα αποτελέσματα.

6.4.6 Ρύθμιση – αντιστάθμιση συστήματος

Για τη διόρθωση των παραπάνω σφαλμάτων, όσο γίνεται δυνατό, προτείνεται η ρύθμιση του συστήματος πριν από κάθε μέτρηση. Όπως έχουμε αναφέρει, η διαδικασία στηρίζεται στη σάρωση συγκεκριμένων μοτίβων και στη διόρθωση των παραμέτρων του συστήματος βάση αυτών. Τα βήματα έχουν ως εξής:

- 1) Αφού στήσουμε τον προβολέα (η καλύτερη θέση προβολής που προτείνει ο κατασκευαστής είναι σε κλίση 45° σε σχέση με το αντικείμενο) και κάνουμε τις απαραίτητες συνδεσμολογίες, ανοίγουμε το λογισμικό του IScan και πατάμε στο connect to sensor.
- 2) Όταν το πρόγραμμα εντοπίσει και τις δύο κάμερες πατάμε στο update calibration όπου μας εμφανίζει δύο παράθυρα ένα για κάθε κάμερα και ρυθμίσεις του contrast-exposure
- 3) Ενεργοποιούμε την προβολή του axis cross (default on) και τοποθετούμε την πλάκα αντιστάθμισης με τη λευκή πλευρά πάνω στο έντυπο βαθμονόμησης στη θέση 1. Η πλάκα πρέπει να είναι όσο το δυνατό στο κέντρο εστίασης και των δύο καμερών.
- 4) Ρυθμίζουμε το βάθος του προβολέα από τη ροδέλα που έχει δίπλα στα κουμπιά ρύθμισής του, ώστε ο σταυρός να φαίνεται καθαρά και ρυθμίζουμε το exposure ώστε να μην έχουμε υπέρ-έκθεση.
- 5) Τέλος, προχωρώντας τα βήματα και ακολουθώντας τις οδηγίες στην οθόνη μπορούμε να ολοκληρώσουμε την αντιστάθμιση.

Στο τέλος της διαδικασίας αυτής το πρόγραμμα μας βγάζει μια μικρή αναφορά για τα αποτελέσματα.

```
Stored projector calibration image set 3.
Projector calibration completed in 0.3 seconds.
Projector Calibration Results:
Points   Positions   RMS vx,vy   Max vx,vy
 1202     3           0.0001 0.0001   -0.0010 0.0005
```

Εικόνα 6.7: Αναφορά προγράμματος IScan ύστερα από επιτυχημένη αντιστάθμιση σφαλμάτων

6.4.7 Λογισμικό

Το λογισμικό παρέχει δυνατότητες όπως:

- Έλεγχο σταθερότητας του συστήματος ώστε να ξεκινήσουν οι μετρήσεις.
- Επιλογή navigation με σημεία αναφοράς που έχουμε προεπιλέξει π.χ. από μια φωτογραμμετρική μηχανή, με μετρούμενα σημεία αναφοράς που είναι οι κωδικοποιημένοι στόχοι που αναφέραμε, με συνδυασμό αυτών των δύο ή χωρίς καθόλου navigation.
- Ρυθμίσεις σάρωσης προ του navigation (Pass or Fail per Pixel), όπως απομάκρυνση ‘κακών’ rixel λόγω δραματικής αλλαγής χρώματος, φίλτρα σωστής γεωμετρίας rixel και αντανάκλασης, περιορισμό σάρωσης στον επιθυμητό όγκο και αφαίρεση δεδομένων που προέρχονται από κακή οπτική γωνία.
- Ρυθμίσεις μετά από το navigation (Pass or Fail) όπως: κριτήριο ελάχιστου αριθμού χρησιμοποιούμενων στόχων, κριτήριο ελάχιστης απόστασης μεταξύ των στόχων, ανοχή RMS και μέγιστη ανοχή ανάλογα με το ποσοστό των ‘κακών’ rixel ώστε να επιτευχθεί το navigation – triangulation.
- Επιθεώρηση των σαρωμένων δεδομένων και επεξεργασία τους όπως: διορθώσεις με βάση όλα τα σημεία με χρήση μεθόδων ελαχίστων τετραγώνων, έλεγχος επικάλυψης σημείων, μέθοδοι μείωσης πλεγμάτων, εργαλεία αποκοπής επιθυμητών σημείων ή γεωμετριών.
- Επιλογή αποθήκευσης αρχείων σε μορφή .stl binary ή ASCII .

Τα αρχεία νέφους σημείων που προκύπτουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα σε εφαρμογές μετρήσεων, ενώ για τη μοντελοποίηση του αντικειμένου σε κάποιο πρόγραμμα CAD, χρησιμοποιούνται μοντέλα πολυγωνικών πλεγμάτων, επιφάνειες NURBS ή ακόμα και έτοιμα μοντέλα (solid models). Άλλα προγράμματα που δίνουν τέτοιες δυνατότητες είναι τα: MeshLab, JRC 3D Reconstructor, PolyWorks, Rapidform, Rhino, κλπ.

Κεφάλαιο 7: Μετρήσεις - Δεδομένα

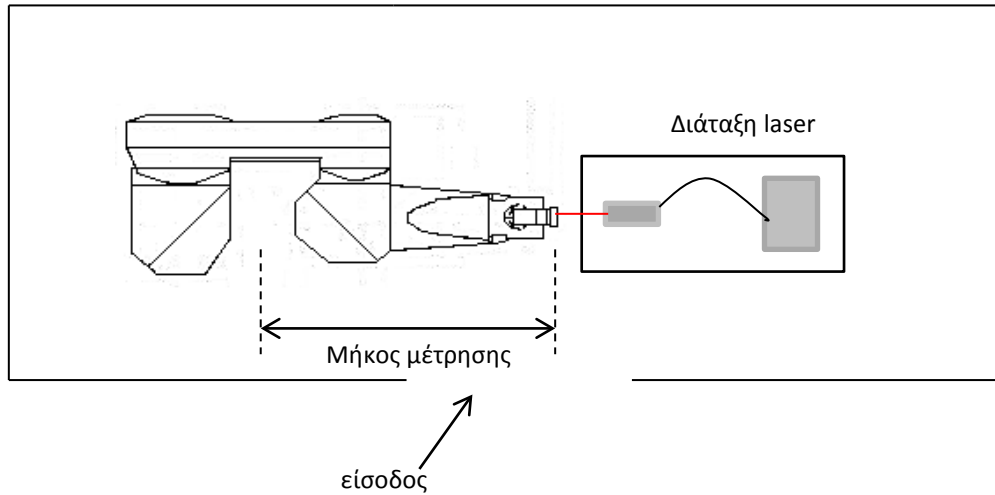
7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική περιγραφή των μετρήσεων και των ενεργειών με τη σειρά που έγιναν όπως επίσης και αναφορά των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση. Επίσης θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δύο μεθόδων (Optodyne laser και IScan).

7.2 Ρύθμιση βραχίονα και επιλογή τροχιάς

Πρώτο βήμα για την όλη διαδικασία, είναι η επιλογή της τροχιάς πάνω στην οποία θα γίνουν οι μετρήσεις καθώς και ο καθορισμός των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη. Για την τροχιά δύο παράμετροι μας επηρεάζουν: ο περιβάλλον χώρος του βραχίονα, δηλαδή τα εμπόδια, και η επιθυμία να καλύψουμε όσο μεγαλύτερο εύρος γωνιών των αρθρώσεων ώστε το τελικό μοντέλο να μοντελοποιεί μια ικανοποιητική απόσταση.

Όσον αφορά το χώρο, υπολογίζοντας και αυτόν που χρειαζόμαστε για την τοποθέτηση του laser, δεν είχαμε και πολλές επιλογές καθώς πλήρη ελευθερία κινήσεων είχαμε μόνο προς μία κατεύθυνση (βλ. Σχήμα 7.1). Επίσης, το ύψος της τροχιάς επιλέχθηκε με βάση το ύψος του laser μαζί με το τραπέζι - βάση και έτσι ώστε να είναι περίπου στη μέση του συνολικού ύψους του χώρου εργασίας. Η κίνηση του βραχίονα είναι από πλήρως μαζεμένος σε πλήρως εκτεταμένος. Μια σχηματική αναπαράσταση φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 7.1: Σχηματική αναπαράσταση περιβάλλοντα χώρου του εκτεταμένου βραχίονα



Εικόνα 7.1: Τοποθέτηση στόχου και απόσταση laser του πειράματος

Για να δημιουργήσουμε επομένως την επιθυμητή τροχιά πρέπει αρχικά να εκπαιδύσουμε το ρομπότ να περνάει από συγκεκριμένα σημεία (τα οποία θα ισαπέχουν το ένα από το άλλο ως προς τον άξονα μέτρησης και θα είναι τα σημεία από τα οποία θα πάρουμε τις μετρήσεις μας). Όπως καταλαβαίνουμε, μια τέτοια διαδικασία με τη μέθοδο διδασκαλίας με teach pendant είναι σχεδόν αδύνατη καθώς δε γνωρίζουμε ούτε αν κινούμαστε πάνω στον επιθυμητό άξονα ούτε αν τα σημεία θα ισαπέχουν. Για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιήσαμε τη ρομποτική γλώσσα V+ με την οποία γράφτηκαν δύο αρχεία κώδικα. Το πρώτο αρχείο μετακινεί το βραχίονα με βήμα 10 mm παράλληλα στον άξονα X του εργαλείου και αποθηκεύει την κάθε θέση σε έναν πίνακα track10[] μέχρι ο βραχίονας να βρεθεί σε πλήρη έκταση. Η i-οστή θέση αριθμεί ως 72ο στοιχείο του πίνακα και άρα πολλαπλασιασμός με το βήμα, μας δίνει μία συνολική απόσταση των

720 mm όπου θα γίνει η μέτρηση. Ο αριθμός των μετρήσεων κρίνεται ικανοποιητικός. Το δεύτερο αρχείο κώδικα είναι αυτό που εκτελεί τη κίνηση του βραχίονα κάνοντας γραμμική παρεμβολή από σημείο σε σημείο του πίνακα track10 [], καθώς η κίνηση πρέπει να είναι ευθύγραμμη. Οι δύο κώδικες V+ μαζί με επεξήγηση επισυνάπτονται στο τέλος της εργασίας στο Παράρτημα Β.

Παρατήρηση: Πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η μετακίνηση του βραχίονα από σημείο σε σημείο με βήμα 10 mm σημαίνει ότι ο βραχίονας τις περισσότερες φορές θα είναι στο ± 0.02 λόγω της επαναληψιμότητας του. Για αυτό το λόγο μετά τη δημιουργία του πίνακα track10 [] απαιτείται διόρθωση όλων των συντεταγμένων του άξονα X ,με το χέρι, σε στρογγυλά νούμερα 0, 10, 20, ..., 720.

Οι παράμετροι του βραχίονα για τις μετρήσεις ορίστηκαν ως εξής:

Παράμετροι RX 90	
Ταχύτητα	50 %
Επιτάχυνση	50 %
Επιβράδυνση	50 %
Φορτίο*	1178.3 gr

*Το βάρος της μαγνητικής στήριξης και του αντανακλαστικού φακού μετρούμενο με ζυγαριά ακριβείας

Πίνακας 7.1: Παράμετροι βραχίονα για την εκτέλεση των μετρήσεων

7.3 Μέτρηση LDDM Optodyne MCV500

Έχοντας ρυθμίσει το ρομπότ, επόμενο βήμα είναι η χρήση του συμβολομέτρου LDDM MCV500. Τοποθετείται πάνω σε ένα τραπέζι (βλ. Σχήμα 7.1) και όσο το δυνατόν κοντινότερα στην εκτεταμένη θέση του βραχίονα χωρίς όμως τον κίνδυνο συγκρούσεων με αυτόν. Συνδέουμε στην κεντρική μονάδα του laser τους αισθητήρες αντιστάθμισης πίεσης και θερμοκρασίας και αυτήν με ένα Η/Υ όπου έχουμε εγκατεστημένο το λογισμικό της Optodyne. Θέτουμε το σύστημα σε λειτουργία και περιμένουμε 30 – 45 λεπτά ώστε να σταθεροποιηθεί η ακτίνα laser. Τον χρόνο αναμονής τον αξιοποιούμε για την ευθυγράμμιση της κεφαλής laser με την τροχιά κίνησης του άκρου, όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 6.3.6. καθώς και για τη ρύθμιση του λογισμικού, όπως περιγράφεται παρακάτω.

7.3.1 Ρύθμιση παραμέτρων – διάφορες ενέργειες

Βασικό, είναι να ελέγξουμε ότι η μπάρα έντασης είναι στο 100% (ελάχιστο 80%) και ότι οι αισθητήρες αντιστάθμισης έχουν συνδεθεί σωστά και λειτουργούν

Οι παράμετροι που ορίστηκαν στο πρόγραμμα φαίνονται στη παρακάτω εικόνα (άξονας μέτρησης, συντεταγμένες αρχικού και τελικού σημείου, αριθμός μετρήσεων, χειροκίνητη λειτουργία).

The screenshot shows the configuration window for an Optodyne laser. It includes an identification section, a laser head direction selection section, and a linear measurement section with various parameters and checkboxes.

Εικόνα 7.2: Παράθυρο ρυθμίσεων Optodyne laser

```
TableLength=720, NumPoints=73, NumRuns=7
Direction=1, Sign=-1, ForwardOnly=-1
StartX= 330, StartY=0, StartZ=0
EndX=1050, EndY=0, EndZ=0
AutoMode=0, ForwardOnly=-1
ATCBoard=-1, ATCVaries=0
MinNumDataAveraging=5
```

7.3.2 Αποτελέσματα LDDM Optodyne MCV500

Πήραμε 15 σετ μετρήσεων των οποίων τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5
0	4E-05	0,000153999	5,39996E-05	1,29999E-05	0,000881993
10	9,973171	9,978061002	9,964945099	9,980443984	9,976624013
20	19,98113	19,98590678	19,97478087	19,99262873	19,97884784
30	29,98709	29,97843668	29,9760447	29,9888956	29,97696469
40	40,00201	40,00324633	39,99516839	40,00310233	39,99765838
50	49,99834	50,00773614	50,00665115	50,00242318	50,00110519
60	59,97424	59,97635221	59,97139825	59,97565122	59,97915319
70	69,9328	69,92760741	69,93094739	69,94099331	69,93078539
80	79,97181	79,961367	79,96636697	79,97350491	79,96426898
90	90,01059	90,0077725	90,00589951	90,01155547	90,01058548
100	100,0164	100,0256272	100,0184783	100,0248002	100,0278362
110	110,0122	110,0153341	110,0031902	110,0222881	110,027516
120	119,9969	119,9905401	119,9899981	120,013428	119,9979781
130	130,0021	129,987195	129,993766	130,0003109	129,987813
140	140,0149	140,0160316	140,0101297	140,0209476	140,0076677
150	150,0337	150,0475862	150,0344043	150,0447163	150,0432103
160	160,0163	160,0274082	160,0073914	160,0292412	160,0313412
170	169,97	169,9687275	169,9701315	169,9835154	169,9804964
180	179,972	179,9661214	179,9735883	179,9747573	179,9746843
190	190,0304	190,0467766	190,0344567	190,0519356	190,0392687
200	200,0705	200,0800062	200,0690173	200,0904761	200,0889971
210	210,0516	210,0511622	210,0636512	210,07916	210,0626412
220	220,0315	220,0191303	220,0413652	220,0360642	220,0332282
230	230,0353	230,038727	230,045664	230,0488139	230,043231
240	240,0723	240,0853285	240,0836365	240,1030044	240,0950574
250	250,0779	250,0858263	250,0797104	250,1087622	250,0951703
260	260,0291	260,0369226	260,0369506	260,0503225	260,0419775
270	270,0236	270,0413094	270,0386774	270,0400314	270,0402294
280	280,0686	280,0889168	280,0788229	280,0973728	280,0841869
290	290,1282	290,1329824	290,1380953	290,1579362	290,1436223
300	300,1096	300,1187353	300,1298822	300,1306932	300,1306932
310	310,074	310,0870414	310,0926313	310,0853384	310,1055322
320	320,0761	320,0925932	320,0964021	320,0975751	320,1062251
330	330,1342	330,1312227	330,1405487	330,1533726	330,1479476

	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5
340	340,1392	340,1470245	340,1527224	340,1629323	340,1515544
350	350,066	350,0953607	350,0827138	350,0893917	350,0973017
360	360,0899	360,1051054	360,1017195	360,1069804	360,1106184
370	370,1661	370,1652948	370,1739528	370,1809787	370,1740158
380	380,1701	380,1979494	380,1922715	380,1865985	380,1981944
390	390,1278	390,1634245	390,1454677	390,1535096	390,1628895
400	400,1214	400,1354706	400,1383456	400,1389845	400,1448755
410	410,1717	410,1717981	410,1824431	410,18564	410,1831971
420	420,1749	420,1859999	420,1909458	420,1873459	420,1970458
430	430,1312	430,146649	430,1330391	430,153149	430,152209
440	440,1601	440,1569088	440,1708777	440,1614497	440,1781956
450	450,2114	450,2321881	450,2274561	450,2220561	450,232881
460	460,2215	460,2422008	460,2248369	460,2446518	460,2414958
470	470,1945	470,2033169	470,197835	470,2117159	470,2148909
480	480,2229	480,2421725	480,2416415	480,2404135	480,2466775
490	490,236	490,2405963	490,2396424	490,2454023	490,2501633
500	500,2124	500,2091564	500,2147034	500,2237093	500,2228693
510	510,2382	510,2516319	510,249104	510,2528199	510,2621249
520	520,2907	520,2930185	520,2883445	520,3065224	520,3029714
530	530,2704	530,2661695	530,2674635	530,2845344	530,2745755
540	540,2386	540,2611934	540,2495635	540,2621364	540,2554024
550	550,2873	550,297094	550,293525	550,3034029	550,3133618
560	560,2733	560,27258	560,2801649	560,2878379	560,2902649
570	570,2914	570,3059836	570,2953037	570,3136485	570,3201465
580	580,3236	580,3243373	580,3365002	580,3477281	580,3431421
590	590,3131	590,3226641	590,3282641	590,340982	590,3318281
600	600,3341	600,3393269	600,3370079	600,3585217	600,3577207
610	610,3296	610,3446197	610,3506226	610,3533426	610,3631265
620	620,3313	620,3372535	620,3418875	620,3573074	620,3544084
630	630,3783	630,386196	630,3978279	630,3995369	630,4051709
640	640,3573	640,367845	640,3787729	640,3852529	640,3884808
650	650,3869	650,4040756	650,4088755	650,4171615	650,4217434
660	660,3968	660,3989554	660,4114634	660,4203363	660,4226793
670	670,4126	670,432758	670,4275721	670,438068	670,4476459
680	680,4245	680,4401568	680,4430128	680,4525147	680,4531497
690	690,438	690,4491246	690,4560075	690,4627315	690,4708664
700	700,4738	700,4821502	700,4813062	700,4970731	700,502162
710	710,4969	710,5042339	710,5077608	710,5203117	710,5214287
720	720,5314	720,5436704	720,5442804	720,5591143	720,5639443

Πίνακας 7.2: Σετ μετρήσεων 1 – 5 (σε mm)

	Run 6	Run 7	Run 8	Run 9	Run 10
0	0,000170999	-2,6999E-05	7,09995E-05	2,99998E-05	2,49998E-05
10	9,971907048	9,973699034	9,978158001	9,967970591	9,978539299
20	19,98840676	19,99161174	19,98546379	19,97809985	19,99579627
30	29,98425164	29,98415564	29,97698469	29,97978918	29,98650647
40	39,99763838	40,00245734	39,99020443	39,99675038	40,00729342
50	50,01051612	50,00183118	50,00323717	50,01070861	50,00777153
60	59,9782342	59,9774242	59,9780952	59,9792782	59,98354185
70	69,93486736	69,93486736	69,92723642	69,93268291	69,94027534
80	79,97150093	79,96471098	79,96342199	79,96898796	79,97647015
90	90,00958748	90,01168747	89,99861257	90,00783099	90,01430095
100	100,0234482	100,0231532	100,0223572	100,0320121	100,024841
110	110,0123871	110,0153521	110,027655	110,0114626	110,0268861
120	120,008844	120,004023	120,004585	119,9949531	120,0177443
130	130,0092378	129,993629	129,985971	130,0022404	130,0031065
140	140,0139846	140,0180586	140,0058767	140,0097317	140,0247635
150	150,0415493	150,0427853	150,0414013	150,0475337	150,0427044
160	160,0223803	160,0274582	160,0258912	160,0219003	160,0362146
170	169,9855134	169,9729515	169,9750475	169,9832689	169,9925521
180	179,9800033	179,9767403	179,9729683	179,9723383	179,9800063
190	190,0526116	190,0487356	190,0342377	190,053477	190,0460919
200	200,0814532	200,0798262	200,0897471	200,0827433	200,0879686
210	210,0689541	210,0714391	210,0718081	210,0629147	210,0889838
220	220,0523841	220,0300432	220,0367822	220,0460831	220,0513622
230	230,0498949	230,0487659	230,047104	230,0445335	230,0534423
240	240,0987114	240,0969674	240,1007444	240,0920993	240,0930861
250	250,0892333	250,0958443	250,1002552	250,0892435	250,1061631
260	260,0500225	260,0368176	260,0430785	260,0483101	260,0586816
270	270,0469853	270,0452333	270,0476643	270,0442392	270,0501328
280	280,1030427	280,0903128	280,1002938	280,0966239	280,1017675
290	290,1492172	290,1533042	290,1550562	290,1427907	290,1603091
300	300,1397411	300,1272392	300,1250753	300,1406198	300,1521843
310	310,1006233	310,0975543	310,1057542	310,1076461	310,1058318
320	320,115357	320,1069021	320,109827	320,1092422	320,1130289
330	330,1530366	330,1562585	330,1595555	330,1528708	330,1617356
340	340,1702783	340,1616433	340,1604164	340,1693849	340,1793036
350	350,0942477	350,0995546	350,1011956	350,0998623	350,1083193
360	360,1192133	360,1128484	360,1276093	360,1149421	360,1303932
370	370,1899517	370,1890737	370,1865147	370,1823047	370,2043567
380	380,2156393	380,2077014	380,2005704	380,2134844	380,2140417
390	390,1582126	390,1662205	390,1659655	390,1684866	390,1770952

	Run 6	Run 7	Run 8	Run 9	Run 10
400	400,1521894	400,1467405	400,1574664	400,1600888	400,1623194
410	410,197178	410,1991609	410,184634	410,1961893	410,2132641
420	420,2111347	420,2074907	420,2130677	420,2083901	420,2152712
430	430,1564259	430,1650739	430,1611899	430,1592436	430,1782066
440	440,1779296	440,1821456	440,1786416	440,1797503	440,1969646
450	450,2505749	450,240809	450,239921	450,2483505	450,2558062
460	460,2464638	460,2552617	460,2535297	460,2534006	460,2705962
470	470,2141789	470,2253008	470,2204538	470,2293526	470,2347676
480	480,2586254	480,2569144	480,2532024	480,2642131	480,2743764
490	490,2567442	490,2668512	490,2634592	490,2678772	490,2776375
500	500,2340232	500,2332832	500,2348372	500,2433832	500,2476689
510	510,2684528	510,2705358	510,2652748	510,2799596	510,2854607
520	520,3030774	520,3081364	520,3205083	520,3130026	520,3304164
530	530,2945423	530,2943363	530,2886644	530,3038163	530,3090127
540	540,2668794	540,2686013	540,2688953	540,2779532	540,288053
550	550,3131008	550,3235048	550,3220638	550,3288691	550,3373337
560	560,2993498	560,3016388	560,3004878	560,309048	560,318067
570	570,3181595	570,3178085	570,3270854	570,3313692	570,337614
580	580,356321	580,357506	580,360569	580,3621716	580,3790477
590	590,339934	590,3692378	590,3482489	590,3476273	590,366731
600	600,3543737	600,3690946	600,3747246	600,3699705	600,3829139
610	610,3661855	610,3673135	610,3791144	610,3811351	610,388174
620	620,3600094	620,3677353	620,3733593	620,3707768	620,3852922
630	630,4145618	630,4084789	630,4175208	630,4269978	630,4355609
640	640,4003878	640,4044047	640,4103707	640,4085155	640,4146162
650	650,4261624	650,4291864	650,4394773	650,4428278	650,45196
660	660,4309352	660,4393941	660,4364562	660,4459084	660,456972
670	670,4485459	670,4526719	670,4614108	670,4675158	670,48105
680	680,4667366	680,4665196	680,4683916	680,4765333	680,490525
690	690,4748974	690,4849523	690,4843283	690,4941887	690,50444
700	700,509176	700,5176179	700,5169699	700,526885	700,5371518
710	710,5321847	710,5375806	710,5358356	710,5467375	710,5581098
720	720,5706892	720,5764722	720,5802831	720,5861537	720,6015415

Πίνακας 7.3: Σειτ μετρήσεων 6 – 10 (σε mm)

	Run 11	Run 12	Run 13	Run 14	Run 15
0	0,000214999	7,99996E-05	0,000208999	0,000133999	9,29995E-05
10	9,968827654	9,976922115	9,978240215	9,971705252	9,970906758
20	19,97009315	19,99345103	19,9800623	19,97801732	19,98756827
30	29,97587062	29,98934905	29,97892741	29,97907941	29,98519788
40	39,98996905	40,01290093	39,99673542	39,99717341	40,00341038
50	49,9991015	50,01329393	49,9988385	50,00485347	50,01012594
60	59,9802861	59,97477212	59,97649372	59,98345169	59,97664673
70	69,92286788	69,94317728	69,93393605	69,93341206	69,93033358
80	79,96163219	79,97630412	79,96684097	79,97202395	79,96398599
90	89,99648652	90,02309288	90,00404188	90,01183183	90,00936935
100	100,0219549	100,0314018	100,0289448	100,0266739	100,0223709
110	110,0182674	110,0196149	110,0322159	110,019279	110,0162705
120	119,992022	120,0118859	120,0077042	120,0023342	120,0045452
130	129,9904705	130,007619	130,0000743	130,0078153	129,9923458
140	140,007174	140,0323878	140,0234393	140,0149923	140,0194743
150	150,0445913	150,0507537	150,0511962	150,0454603	150,0462647
160	160,0326648	160,0272869	160,0393414	160,0323274	160,0304726
170	169,9781016	169,9891231	169,9863228	169,9863488	169,9779207
180	179,9789621	179,9876361	179,9792499	179,9796439	179,9767865
190	190,0363753	190,0599417	190,0534986	190,0448977	190,0566648
200	200,0850556	200,0896655	200,1032104	200,0858465	200,0925344
210	210,0596822	210,0884046	210,0782317	210,0659017	210,0865112
220	220,0433578	220,0583423	220,0540459	220,0528539	220,0471262
230	230,0465183	230,060401	230,062456	230,049286	230,048344
240	240,0932465	240,1010856	240,1161498	240,0914579	240,1011245
250	250,097291	250,1042245	250,1187609	250,095964	250,1086043
260	260,0466728	260,0669528	260,0554463	260,0444014	260,0533434
270	270,0479663	270,058671	270,0582504	270,0444685	270,0602332
280	280,0996265	280,1041361	280,1098122	280,0928153	280,1126347
290	290,1491298	290,1727282	290,162018	290,1458931	290,1719773
300	300,1287414	300,1680068	300,1346043	300,1337523	300,1608372
310	310,109571	310,1207188	310,1161445	310,1095365	310,1176463
320	320,1044235	320,1243297	320,1193276	320,1077426	320,1259422
330	330,1574787	330,1722284	330,1706324	330,1584214	330,1738488
340	340,1527202	340,1960774	340,1710105	340,1632225	340,1854397
350	350,09826	350,1161491	350,1115179	350,1010829	350,1262019
360	360,1284614	360,1338974	360,1292959	360,1234399	360,1388918
370	370,1855566	370,2160554	370,1926407	370,1937996	370,2115484
380	380,2150649	380,2344569	380,2109127	380,2209506	380,2278532
390	390,1738956	390,1887239	390,175958	390,1749619	390,1932734

	Run 11	Run 12	Run 13	Run 14	Run 15
400	400,1653222	400,1770077	400,1593461	400,177354	400,1784814
410	410,1964745	410,2260214	410,204292	410,2123679	410,2219542
420	420,208125	420,2296663	420,2111551	420,2221989	420,2265152
430	430,1622977	430,1826726	430,1714124	430,1765922	430,1837314
440	440,1891991	440,2077136	440,1874884	440,2069273	440,1987353
450	450,2597772	450,2655805	450,2513612	450,2713623	450,263473
460	460,2662457	460,2805437	460,2672812	460,2761827	460,2837999
470	470,2377993	470,2488232	470,2368754	470,2583283	470,2509641
480	480,2674397	480,2892044	480,2724173	480,2836277	480,2934559
490	490,2806691	490,2788819	490,2844554	490,2928213	490,29
500	500,2469178	500,2656314	500,2489047	500,2647762	500,2543012
510	510,2819151	510,2988948	510,2894126	510,2961689	510,296507
520	520,3371283	520,3366292	520,3432974	520,3400225	520,3346459
530	530,3107199	530,3264328	530,3194056	530,3292575	530,323416
540	540,2834836	540,3050226	540,2969828	540,2933717	540,3045322
550	550,3443058	550,3438641	550,3521376	550,3557303	550,350851
560	560,3236926	560,3318789	560,3300308	560,3299276	560,3309101
570	570,3446414	570,3470416	570,3558528	570,3478576	570,3525181
580	580,3732523	580,3930331	580,3904237	580,3866525	580,385056
590	590,3614455	590,381732	590,3848678	590,3674068	590,3793051
600	600,3851828	600,3949308	600,4058978	600,3947229	600,400688
610	610,3928312	610,4030616	610,400465	610,3955151	610,4059181
620	620,3837769	620,4015095	620,3970941	620,3878715	620,4062002
630	630,4474423	630,4545651	630,4470889	630,4441465	630,450759
640	640,4189493	640,4390511	640,4333591	640,4324249	640,4367272
650	650,4531961	650,4717608	650,466492	650,4584131	650,478614
660	660,4518011	660,4760697	660,4625561	660,4694844	660,4791111
670	670,490281	670,4981536	670,4881671	670,4862987	670,5045427
680	680,4867682	680,5140555	680,4993601	680,498558	680,5108896
690	690,5010494	690,5239234	690,5148502	690,5203674	690,5269337
700	700,5406635	700,5529442	700,5493321	700,5537396	700,560415
710	710,5613678	710,5791101	710,575212	710,575128	710,5774325
720	720,601407	720,6142689	720,6142719	720,6118432	720,623983

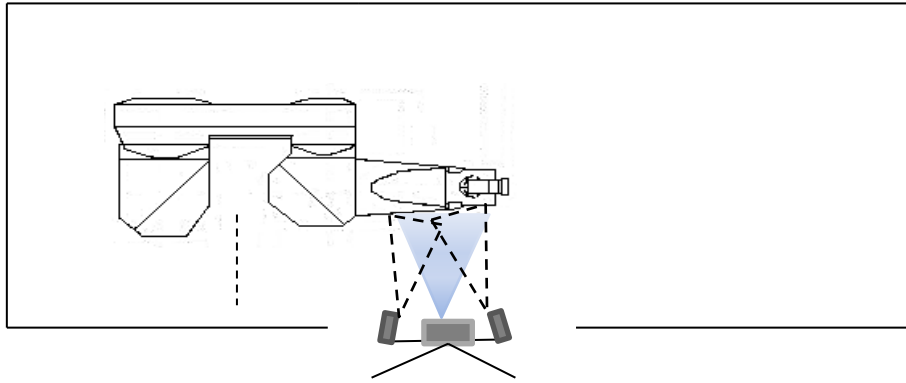
Πίνακας 7.4: Σετ μετρήσεων 11 – 15 (σε mm)

7.4 Μέτρηση IScan M300 IMetric

Η χρήση του 3D σαρωτή IScan M300 είναι αρκετά πιο πολύπλοκη από αυτή του laser, καθώς απαιτεί τη ρύθμιση πολλών παραμέτρων και την κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων ώστε να προκύψουν τα αποτελέσματα στην επιθυμητή τελική μορφή. Στην παρούσα εργασία γίνεται μόνο 1 σετ μετρήσεων με τον σαρωτή καθώς σκοπός είναι η δημιουργία της μεθόδου μέτρησης και η γενίκευσή της. Μια σωστή διαδικασία θα περιλάμβανε τουλάχιστον τόσα σετ μετρήσεων όσα και με το laser πράγμα που όμως είναι αρκετά χρονοβόρο.

Αναφέραμε πως το IScan δίνει την επιλογή στο χρήστη να σαρώσει ένα αντικείμενο χωρίς navigation. Αυτό είναι απλά μια επιλογή και χρησιμοποιείται κυρίως για μετρητικούς λόγους χωρίς όμως να υποστηρίζεται από το αντίστοιχο λογισμικό της IMetric. Για αυτό το λόγο, δημιουργήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα σε περιβάλλον Matlab το οποίο μετά από συγκεκριμένη επεξεργασία των δεδομένων εξάγει τα ζητούμενα σφάλματα. Ας δούμε όμως τη διαδικασία από την αρχή.

Η μετρούμενη τροχιά και απόσταση είναι ακριβώς ίδιες με αυτή του laser και το μόνο που αλλάζει είναι η τοποθέτηση του μετρολογικού εξοπλισμού. Το IScan τοποθετείται στην είσοδο του χώρου έτσι ώστε να προβάλλει το βραχίονα από τα πλάγια (βλ. Σχήμα 7.2) και στηρίζεται από ένα απλό τρίποδο που επιτρέπει τη ρύθμιση όλων των γωνιών. Τα φώτα του χώρου είναι σβηστά για μείωση του θορύβου στις μετρήσεις ενώ οι φακοί που επιλέγονται για αρχική χρήση είναι οι V400. Αν κάποιος παρατηρήσει, θα δει ότι η ακρίβεια του συστήματος με αυτούς τους φακούς πέφτει στα 0.043 mm. Γνωρίζουμε πως για τη μέτρηση σφάλματος, η ακρίβεια του μετρητικού οργάνου πρέπει να είναι τουλάχιστον μία τάξη μικρότερη από αυτής του ρομπότ προϋπόθεση που εδώ δεν υπάρχει (αν θεωρήσουμε ότι η ακρίβεια του ρομπότ είναι κοντά στην τιμή της επαναληψιμότητας). Αν ανατρέξουμε στον Πίνακα 6.5 θα δούμε ότι από τα διαθέσιμα μοντέλα μόνο το V70 ικανοποιεί αυτόν τον περιορισμό. Παρόλα αυτά, η χρήση των καμερών V 70 θα οδηγούσε σε πάρα πολύ χρονοβόρες μετρήσεις καθώς το οπτικό πεδίο του συστήματος αντιστοιχεί σε μία μετατόπιση του βραχίονα (συνυπολογίζοντας και το μέγεθος του στόχου). Για βέλτιστα αποτελέσματα θα αναγκαζόμασταν να μετακινούμε τον προβολέα ανά μία μέτρηση και σαν αποτέλεσμα θα ήταν η συνολική σάρωση 142 σημείων και όχι 85 που έγιναν στην πράξη. Εκ των υστέρων αναφέρουμε ότι τελικά έγινε και χρήση του εξαρτήματος V 70 με τα αποτελέσματα να βγαίνουν άκρως ικανοποιητικά.



Σχήμα 7.2: Μέτρηση με 3D σαρωτή βασισμένο σε τρίποδο



Εικόνα 7.3: Διάταξη βραχίονα – Iscan M300

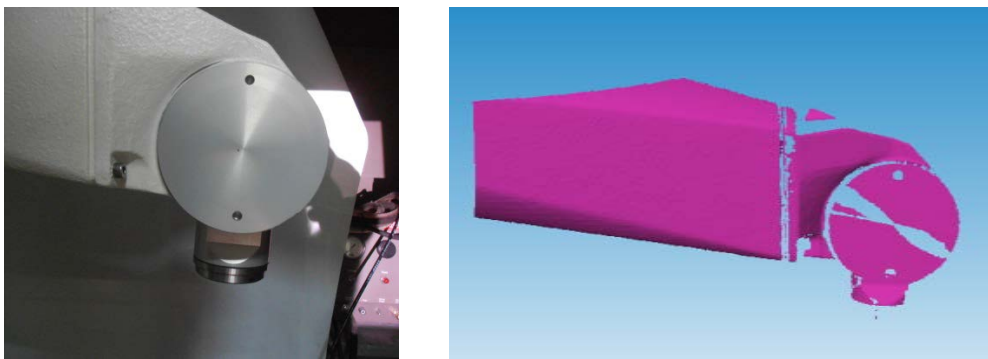
Για τη μείωση των σφαλμάτων από τις αλλοιώσεις του φακού γίνεται προσπάθεια σάρωσης των στόχων κοντά στο κέντρο εστίασης του συστήματος, μετακινώντας τον προβολέα ανά 5-6 μετρήσεις. Η μετακίνηση του προβολέα σημαίνει και αλλαγή των συντεταγμένων αναφοράς, οπότε σε κάθε μία θα πρέπει να σαρώνεται ξανά το τελευταίο σημείο της προηγούμενης. Π.χ. σαρώνουμε τα σημεία 1-2-3 εξάγουμε τις αποστάσεις 1 έως 2 και 2 έως 3 και αφού μετακινήσουμε τον προβολέα πρέπει να σαρώσουμε ξανά το σημείο 3 ώστε να εξάγουμε την απόσταση 3 έως 4 και ου το καθεξής.

7.4.1 Ρύθμιση παραμέτρων – διάφορες ενέργειες

Πρώτος στόχος σάρωσης

Ας υπενθυμίσουμε πρώτα, ότι στόχος μας είναι η μέτρηση αποστάσεων και όχι η μοντελοποίηση του βραχίονα σε 3D και για αυτόν ακριβώς το λόγο δε

χρησιμοποιήσαμε navigation. Κύριο μέλημά μας είναι η εύρεση μιας γεωμετρίας – στόχου τον οποίο θα σαρώνουμε ύστερα από κάθε κίνησή του και θα μετράμε τη σχετική μετατόπισή του. Για να γίνει αυτό, όμως, χρειαζόμαστε κάποια σημεία αναφοράς τα οποία θα παραμένουν αμετάβλητα κατά την κίνηση όπως π.χ. το κέντρο ενός κύκλου ή τετραγώνου. Τέτοια σχήματα χρησιμοποιούνται κατά κόρον στον τομέα της τεχνητής όρασης καθώς οι γεωμετρικές τους ιδιότητες τα καθιστά εύκολα στην αναγνώριση μέσω οπτικής. Το άκρο του βραχίονα Staubli RX 90 και συγκεκριμένα στην άρθρωση 5, έχει κυκλική διαμόρφωση γεγονός που μας επέτρεψε την άμεση έναρξη των μετρήσεων με στόχο τον κύκλο αυτό.



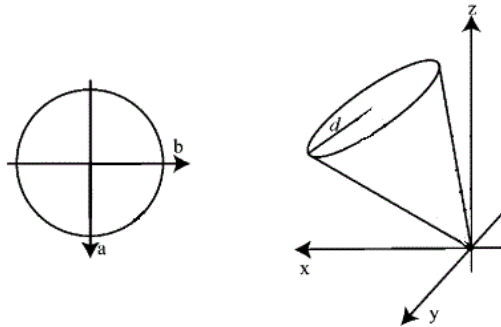
Εικόνα 7.4: Κυκλική διαμόρφωση άκρου βραχίονα

Επιλογή προγράμματος επεξεργασίας

Το πρόγραμμα που παρέχει ο κατασκευαστής εξάγει τις μετρήσεις σε μορφή προτύπου .stl. Απαιτείται, λοιπόν, η περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων ώστε να εξαχθεί το ζητούμενο σφάλμα θέσης. Σαν αρχική ιδέα ήταν η χρήση του προγράμματος Solidworks (ή οποιουδήποτε παρόμοιου) και η επεξεργασία του αρχείου σαν να είναι ένα solid αντικείμενο. Δηλαδή, θα εφαρμόζονταν μέθοδοι reverse engineering, όπου από το περίπου 3D μοντέλο προσπαθούμε να εξάγουμε την πραγματική γεωμετρία – διαστάσεις. Αυτή η διαδικασία απαιτεί καλή γνώση του προγράμματος όπως και εμπειρία με τεχνικές βελτίωσης πλέγματος και προσέγγισης γεωμετριών (splines, nurbs, κλπ.). Η προσπάθεια που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας με αυτή τη μέθοδο μπορεί να χαρακτηριστεί ως ‘αποτυχημένη’ για συγκεκριμένους, όμως, λόγους. Το κυκλικό μέρος του άκρου του ρομπότ σαρώθηκε και εισήχθη στο περιβάλλον Solidworks ανά ζεύγη σωμάτων. Έτσι, σε κάθε αρχείο είχαμε δύο κύκλους τους οποίους, αφού μετατρέπαμε σε solid μοντέλα, μετράγαμε τις αποστάσεις των κέντρων τους. Τα πράγματα δεν είναι, όμως, τόσο απλά καθώς τα αποτελέσματα είχαν απόκλιση από τα

πραγματικά της τάξης μερικών χιλιοστών, την ώρα που εμείς θέλουμε ακρίβεια κάποιων μm. Δύο είναι τα βασικά αίτια είναι:

- 1) Η μετατροπή και διόρθωση του πλέγματος, η προσπάθεια μοντελοποίησης γεωμετριών με καμπύλες και γενικά ο τρόπος χειρισμού τέτοιων προγραμμάτων εξαρτώνται κατά μεγάλο βαθμό από την ικανότητα και εμπειρία του εκάστοτε μηχανικού. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τέτοιες μεθόδους δεν είναι συστηματικά και τα σφάλματα που εισάγονται, για την ακρίβεια που απαιτούμε στη συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι απαγορευτικά.
- 2) Έχουμε παραμορφώσεις των σχημάτων λόγω των γωνιών οπτικής τους. Ένας κύκλος από διαφορετική οπτική γωνία φαίνεται ως έλλειψη (Σχήμα 7.3) και ένα τετράγωνο ως απλό παραλληλόγραμμο. Δηλαδή, οι γνωστές γεωμετρίες που επιλέξαμε ως στόχους τελικά δε μας βοηθάνε αφού μεταβάλλονται καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.



Σχήμα 7.3: Οπτική κύκλου υπό γωνία

Τα παραπάνω προβλήματα μας οδηγούν στην εύρεση μιας άλλης μεθόδου επεξεργασίας των αρχείων νέφους σημείων η οποία βασίζεται σε υπολογιστικές μεθόδους και αλγορίθμους.

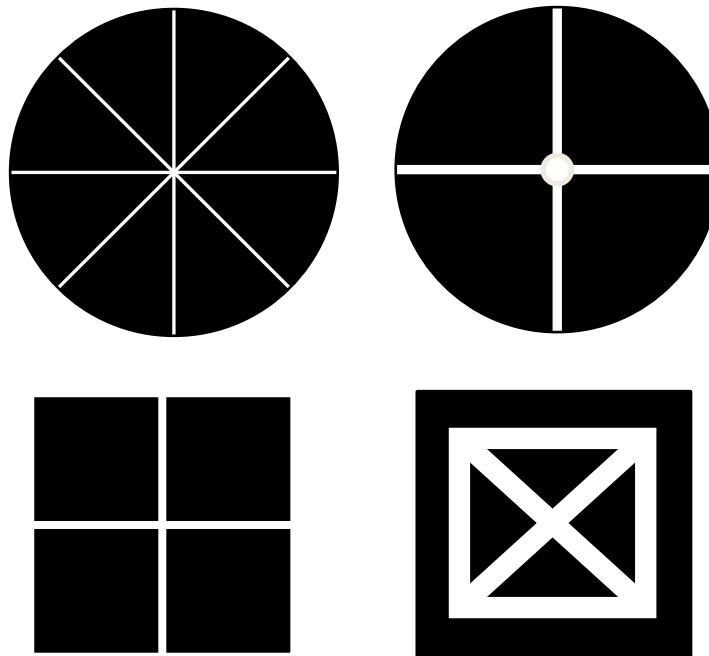
Επιλογή τελικού στόχου

Η επιλογή του πρώτου στόχου σε συνδυασμό με τη χρήση του Solidworks οδήγησαν σε μη ικανοποιητικά αποτελέσματα και για αυτό ερευνάται η αλλαγή τους. Όσον αφορά το στόχο, αν κάποιος παρατηρήσει την Εικόνα 7.1 θα δει πέρα από την αντανάκλαση που δημιουργείται (και ίσως επηρεάζει τη συνολική μέτρηση) ότι το περίγραμμα του κύκλου δεν είναι παντού ευδιάκριτο. Στα σημεία σύνδεσης με τον υπόλοιπο βραχίονα υπάρχει κίνδυνος λανθασμένης αποκοπής του πλέγματος κατά την διάρκεια επεξεργασίας του και άρα εισαγωγή μεγάλων σφαλμάτων. Τέλος, ο κύκλος είναι στην ουσία κυκλικός δίσκος, καθώς το πρόγραμμα πλεγματοποιεί και το εσωτερικό του το οποίο όμως μας είναι άχρηστο. Παρόμοια, λοιπόν, η διαδικασία αφαίρεσης αυτού του περιττού πλέγματος δεν είναι συστηματική

(ίδια) για όλες τις όψεις και άρα έχουμε σφάλματα. Επομένως, με τα παραπάνω κριτήρια δημιουργήθηκαν διάφορες γεωμετρίες ως πιθανοί στόχοι και δοκιμάστηκαν στις μετρήσεις ώστε να επιλέξουμε τη βέλτιστη (αυτή δηλαδή που αναγνωρίζει καλύτερα ο σαρωτής).

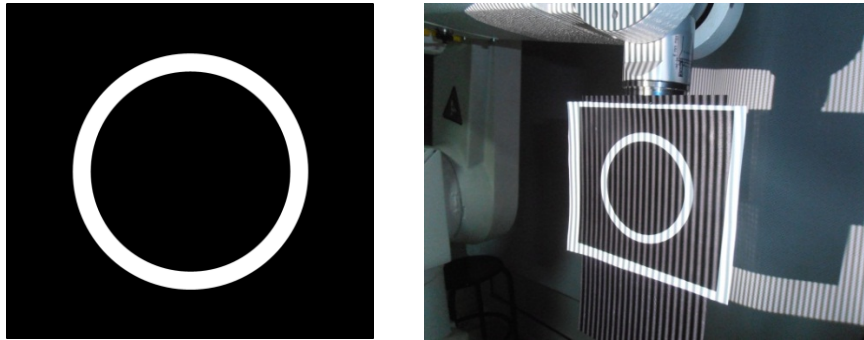
Σε γενικές γραμμές παρατηρήσαμε ότι:

- το μαύρο δεν αντανακλά φως και άρα δε μοντελοποιείται με πλέγμα σε αντίθεση με το άσπρο που φαίνεται έντονα
- ο στόχος πρέπει να έχει γραμμές μεγαλύτερες από κάποιο συγκεκριμένο πάχος και
- πρέπει να αποφεύγονται έντονες ακμές (π.χ. γωνίες 90°)

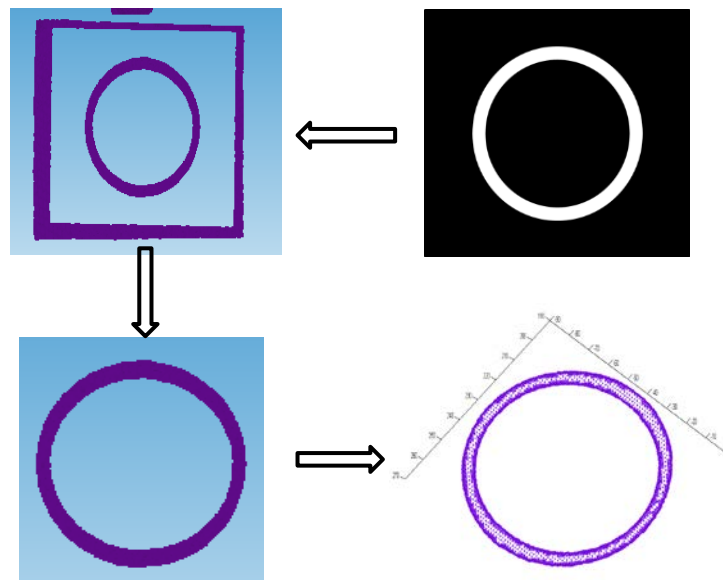


Σχήμα 7.4: Μερικά από τα σχήματα που δοκιμάστηκαν

Ο τελικός στόχος που επιλέχθηκε φαίνεται στο Σχήμα 7.5. Τα πλεονεκτήματά του είναι: ελάχιστο περιττό πλέγμα, διπλή κυκλική πλεγματοποίηση για τον εσωτερικό και εξωτερικό κύκλο (ώστε κατά το fitting καμπυλών να εξισορροπούνται πιθανές γεωμετρικές ανωμαλίες) και απλή γεωμετρία. Επιπλέον, αυτός ο στόχος τοποθετείται στην άρθρωση 6 του βραχίονα οπότε ενδεχόμενες κινήσεις της άρθρωσης 5, αν και πολύ μικρές, δεν επηρεάζουν.



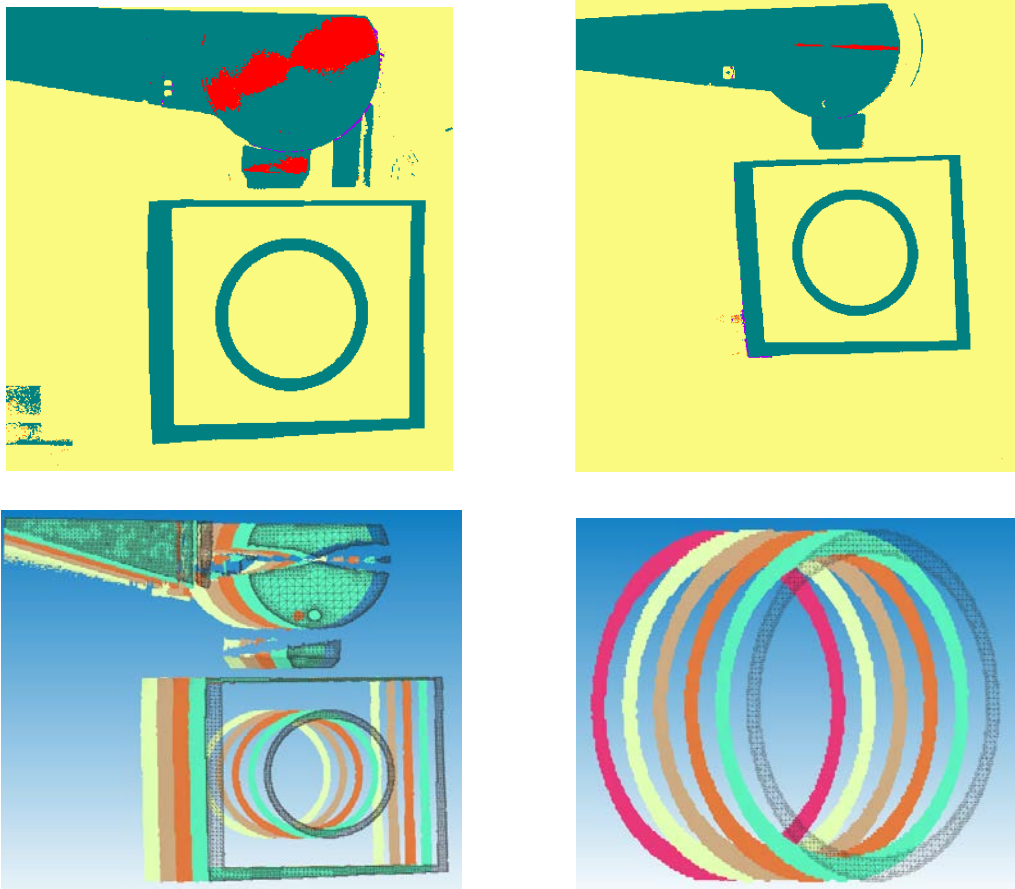
Σχήμα 7.5: Τελικός στόχος επιλογής για τη διαδικασία των μετρήσεων



Σχήμα 7.6: Μετατροπή πραγματικού στόχου σε νέφος σημείων

Λογισμικό Iscan 3D

Η χρήση του Iscan 3D στα πλαίσια της διπλωματικής έγινε σε πολύ βασικό επίπεδο. Με τον εξοπλισμό τοποθετημένο στη σωστή θέση και το σύστημα αντισταθμισμένο ξεκινάμε τις σαρώσεις. Υπενθυμίζουμε ότι η επιλογή για το navigation (στα Edit>Preferences του προγράμματος) είναι στο none, ενώ επίσης πρέπει να ρυθμίσουμε και την έκθεση (exposure) των καμερών για να αποφύγουμε αλλοιώσεις στην εικόνα. Την κάθε εικόνα που σαρώνουμε την αποθηκεύουμε ως .stl αρχείο για περαιτέρω χρήση. Ο βραχίονας χωρίζεται σε 13 τμήματα και οι μετρήσεις γίνονται κατά πλειοψηφία σε ομάδες των πέντε προτού αναγκαστούμε να μετακινήσουμε το τρίποδο και να επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία.



Σχήμα 7.7: Πάνω: χάρτης σφαλμάτων αριστερής και δεξιάς κάμερας, Κάτω: set 5 σαρώσεων (μετατόπιση 50 mm) με όλα τα δεδομένα (αριστερά) και με αποκοπή των περιπτώσεων (δεξιά).

Μετατροπή αρχείων .stl σε .XYZ

Έχοντας μαζέψει όλα τα αρχεία stl των σαρώσεων, τα μετατρέπουμε σε αρχεία .XYZ. Τα αρχεία αυτά είναι raw μορφής, δηλαδή κείμενο, και πιο συγκεκριμένα περιέχουν σε τρεις στήλες (XYZ) τις τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων (κορυφές των τριγώνων στα .stl αρχεία). Η μετατροπή αυτή είναι απαραίτητη, πρώτον, γιατί πρέπει το αρχείο να είναι κατανοητό από εμάς για να το επεξεργαστούμε και δεύτερον, γιατί η πληροφορία των τριγώνων δε μας χρειάζεται για τη μέτρηση αλλά για τη 3D αναπαράσταση επιφάνειας. Η μετατροπή αυτή γίνεται εύκολα είτε από τα λογισμικά που έχουμε προαναφέρει είτε με ατομικούς κώδικες. Στην περίπτωση μας, χρησιμοποιήθηκε το plugin του Solidworks: ScanTo3D καθώς αυτό ήταν εύχρηστο και άμεσα διαθέσιμο από το εργαστήριο. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται διόρθωση πλέγματος πριν τη μετατροπή αρχείων όπως π.χ. μείωση θορύβου (διάσπαρτα σημεία).

7.4.2 Προγραμματισμός Matlab

Η όλη ιδέα της χρήσης του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της Matlab στηρίζεται στη δυνατότητά του να χρησιμοποιεί αλγοριθμικές μεθόδους για την εύρεση γραμμών τάσεων και την προσέγγιση γεωμετριών σε δεδομένα σετ μετρήσεων. Ο αυτοματοποιημένος αυτός τρόπος προσδίδει στις μετρήσεις μας ένα είδος συστηματικής επεξεργασίας και εξαλείφει τον παράγοντα του τυχαίου σφάλματος (όπως π.χ. επεξεργασία «με το χέρι»). Για ταχύτητα και διευκόλυνση των υπολογισμών γίνεται αναγωγή του 3D χώρου σε 2D και έπειτα προσέγγιση των σχηματισμών των σημείων με χαρακτηριστικές καμπύλες, όπως η έλλειψη. Με την εύρεση και σύγκριση αναφορικών σημείων σε αυτές τις καμπύλες μπορούμε να υπολογίσουμε σχετικές αποστάσεις με ικανοποιητική ακρίβεια.

Η όλη διαδικασία χωρίζεται σε βήματα για τη καλύτερη παρουσίασή της. Οι κώδικες που δημιουργήθηκαν βρίσκονται σε αναλυτική μορφή στο Παράρτημα Β.

Βήμα 1: Φόρτωση των αρχείων

Γράφτηκε κώδικας για την αυτοματοποιημένη φόρτωση των αρχείων. Ο χρήστης ορίζει στο αρχείο MAIN.m τον αριθμό των αρχείων που θέλει να επεξεργαστεί και τη διαδρομή (path) που βρίσκονται. Τα αρχεία πρέπει να είναι της μορφής Part1, Part2, Part3,...(Το όνομα Part προκύπτει από το εξαγόμενο αρχείο Solidworks και μπορεί να αλλάξει).

Βήμα 2: Δημιουργία επιπέδου από νέφους σημείων

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την προσέγγιση ενός νέφους σημείων από ένα επίπεδο. Αυτές είναι η Least Square Fitting (LSF) και η Principal Component Analysis (PCA), με τη δεύτερη να βρίσκει ευρεία αποδοχή σε εφαρμογές 3D Mapping [37] αλλά και να χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

- Least Square Fitting

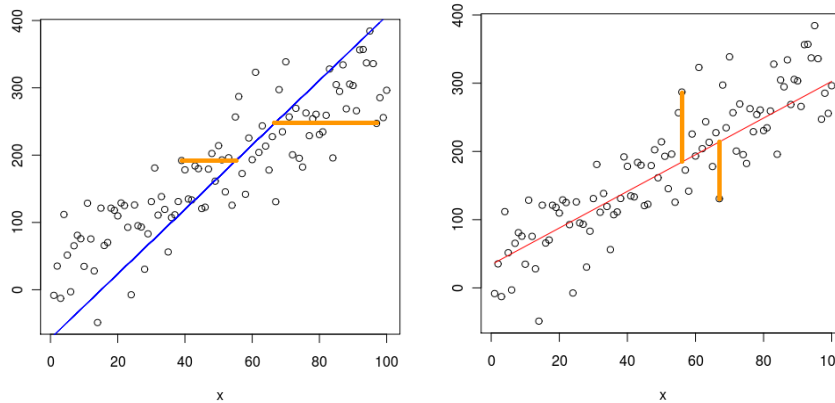
Στον τρισδιάστατο ευκλείδειο χώρο οποιοδήποτε επίπεδο μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$Ax + By + Cz + D = 0$$

όπου A, B, C οι συνιστώσες του κάθετου διανύσματος στο επίπεδο.

Ο αλγόριθμος LSF βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του τετραγώνου του αθροίσματος των σχετικών αποστάσεων όλων των 3d σημείων από το

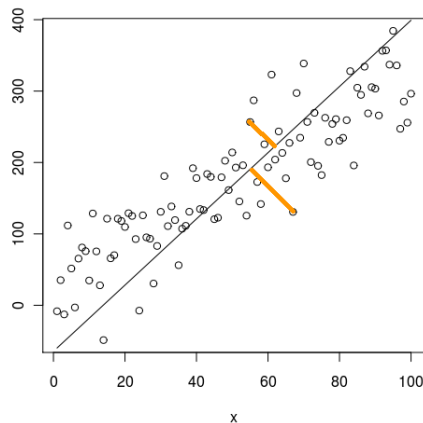
βέλτιστο επίπεδο αναφορικά με ένα σύστημα συντεταγμένων (τεταγμένη και τετμημένη επαγόμενη απόσταση). [38]



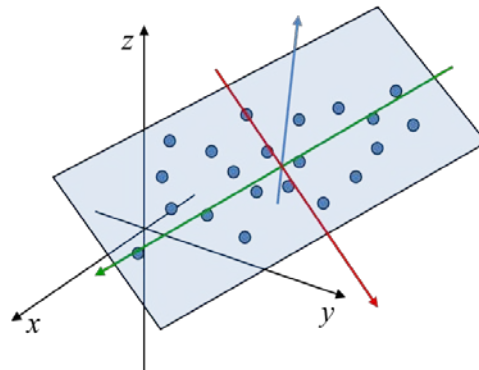
Σχήμα 7.8: Μέθοδος LSF – ελαχιστοποίηση αποστάσεων για $y \sim x$ και $x \sim y$ αντίστοιχα [39]

- Principal Component Analysis

Για άμεση σύγκριση, η μέθοδος PCA βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της κάθετης απόστασης των σημείων από το επίπεδο. Υπολογίζει τα ιδιοδιανύσματα που αντιπροσωπεύουν τους 3 άξονες του νέφους σημείων και τις ιδιοτιμές τους που αντιπροσωπεύουν το τετράγωνο του αθροίσματος των αποκλίσεων αναφορικά με τον κάθε άξονα. Η συνάρτηση Matlab που χρησιμοποιήθηκε είναι η `princomp()`, η οποία εξάγει ως αποτέλεσμα τα ιδιοδιανύσματα - ιδιοτιμές αλλά και όλα τα δεδομένα για το μετασχηματισμό, από τα αρχικά δεδομένα σε αυτά της αναφοράς.



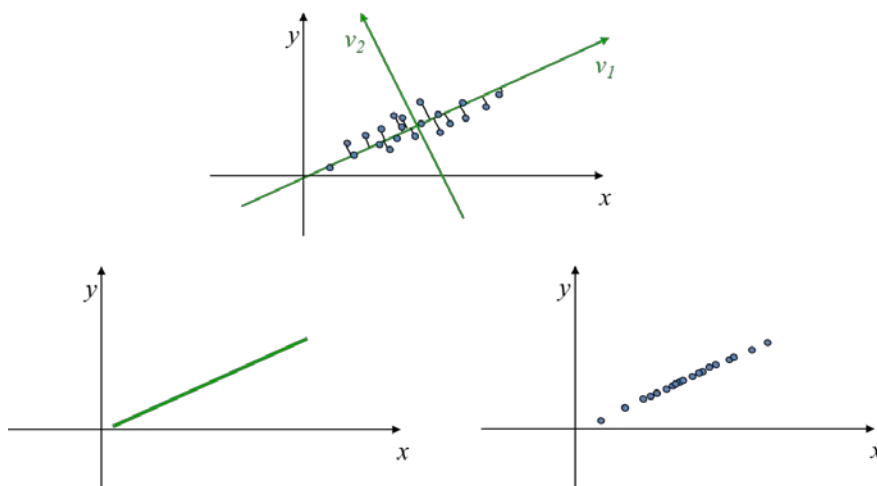
Σχήμα 7.9: Μέθοδος PCA – ελαχιστοποίηση αποστάσεων [39]



Σχήμα 7.10: Ιδιοδιανύσματα (χρώμα) για παράσταση των 3 αξόνων του νέφους σημείων [40]

Βήμα 3: Προβολή των 3D σημείων πάνω στο επίπεδο

Η αναπαράσταση όλων των σημείων πάνω στο βέλτιστο προσεγγιστικό επίπεδο είναι πλέον εύκολη υπόθεση. Γνωρίζοντας τη μέση τιμή των αποκλίσεων των σημείων για κάθε άξονα, δημιουργούμε έναν πίνακα διακυμάνσεων. Σε συνδυασμό με τις γνωστές τιμές των ιδιοδιανυσμάτων και ιδιοτιμών του κάθε σημείου προκύπτει τελικά ένα 3D νέφος σημείων το οποίο όμως περιγράφει μια 2D γεωμετρία, δηλαδή μια γεωμετρία πάνω σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο.



Σχήμα 7.11: Το αρχικό νέφος σημείων, η προβολή τους στο επίπεδο και το τελικό νέφος σημείων [40]

Βήμα 4: Προσέγγιση σημείων με καμπύλες

Ο στόχος που διαλέξαμε για σάρωση είναι ένας κύκλος. Λογικό είναι, επομένως, η επιλογή αλγορίθμων προσέγγισης σημείων με κύκλους. Όμως, με βάση τη θεωρία της οπτικής, για να βλέπουμε τον κύκλο πάντα ως τέλειο κύκλο θα πρέπει να είμαστε σε απολύτως κάθετη οπτική γωνία με αυτόν, από όλες τις θέσεις. Αυτή η προϋπόθεση εννοείται πως δεν είναι δυνατά και άρα αυτή η μέθοδος απορρίπτεται. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι αλγόριθμος προσέγγισης ελλείψεων για λόγους που αναφέραμε παραπάνω (βλ. Σχήμα 7.3). Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι η `fitellipse()` η οποία μας δίνει την επιλογή μεθόδου προσέγγισης και επιστρέφει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της έλλειψης (κέντρο, ακτίνες). (Ο κώδικας προσέγγισης με ελλείψεις βρέθηκε από τη βάση δεδομένων Matlab και δεν αποτελεί προϊόν της παρούσας εργασίας).

Οι επιλογές που έχουμε είναι:

- 1) Γραμμική προσέγγιση με παραμέτρους περιορισμού του Bookstein ή του Trace
- 2) Μη γραμμική προσέγγιση (γεωμετρική παρεμβολή - προσέγγιση)

Εφαρμόζοντας τις μεθόδους αυτές στο δικό μας πείραμα, τα αποτελέσματα είναι σχεδόν όμοια. Ως τελική μέθοδος επιλέγεται η μη γραμμική γεωμετρική προσέγγιση παρά το γεγονός πως η εκτέλεσή της είναι αρκετά πιο αργή.

Βήμα 5: Εξαγωγή των κέντρων και υπολογισμός σχετικών αποστάσεων

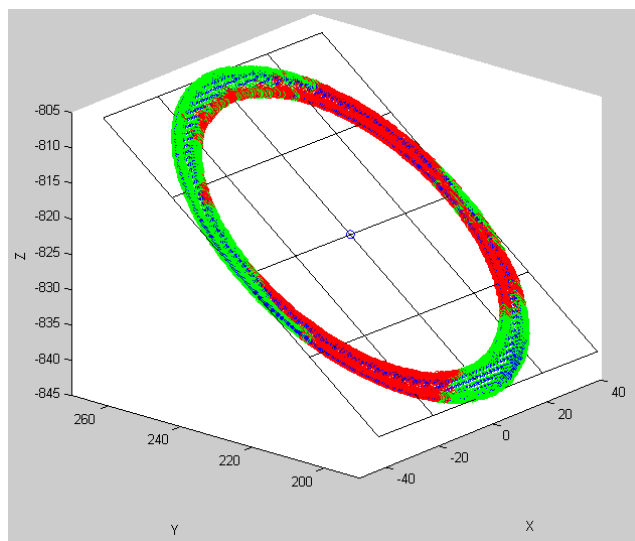
Έχοντας γνωστά τα κέντρα των ελλείψεων και το επίπεδο, μπορούμε να βρούμε τις τρισδιάστατες συντεταγμένες των κέντρων των ελλείψεων (γνωστές είναι μόνο οι x , y αφού το fitting έγινε πάνω σε επίπεδο) και να υπολογίσουμε την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ τους. Με αφαίρεση των αποστάσεων αυτών μεταξύ τους προκύπτει επίσης και το ζητούμενο σχετικό σφάλμα. Η συνάρτηση που κάνει τις παραπάνω λειτουργίες είναι η `DistanceErrors()`.

Βήμα 6: «Πλοτάρισμα» καμπυλών

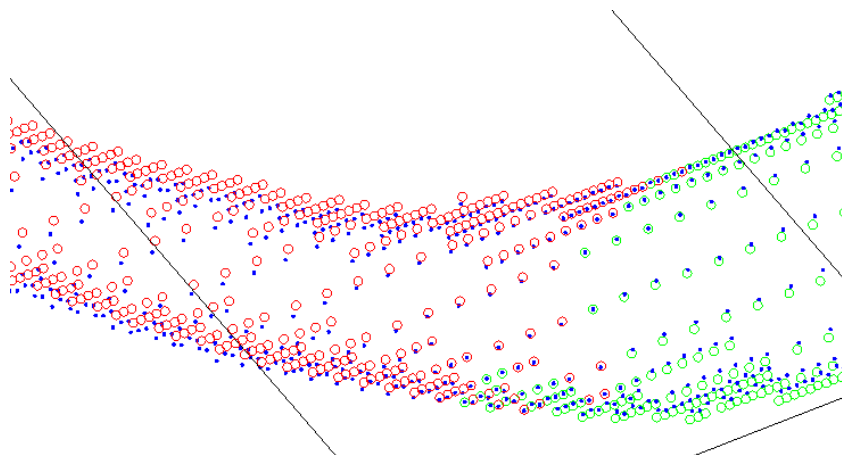
Τελευταίο βήμα, για να έχουμε την εποπτεία όλων των παραπάνω, δημιουργήθηκε ένα κομμάτι κώδικα που «εκτυπώνει» το 3D νέφος σημείων με το βέλτιστο επίπεδο, και έπειτα το 2D νέφος σημείων με την υπολογισμένη έλλειψη.

7.4.3 Αποτελέσματα IScan M300 IMetric

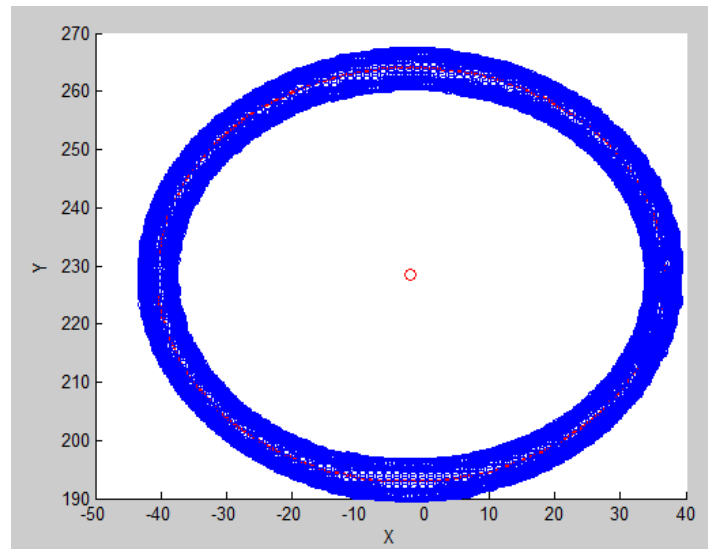
Τα αποτελέσματα του βήματος 6 για κάθε σετ μετρήσεων φαίνονται στο Σχήμα 7.12 και στο Σχήμα 7.14. Στο Σχήμα 7.13 η γραμμή πλέγματος είναι το επίπεδο, με πράσινο χρώμα είναι τα σημεία πάνω από το επίπεδο, με κόκκινο χρώμα τα σημεία κάτω από το επίπεδο, ενώ με μπλε κουκίδα φαίνονται τα ίχνη των προβολών τους. Στο Σχήμα 7.14 έχουμε το 2D νέφος σημείων στο οποίο κάνουμε fit την κόκκινη έλλειψη. Τέλος, στο Σχήμα 7.16 φαίνονται οι μετρήσεις ενός σετ. Συγκρίνοντας τα πλέγματα των επιπέδων, καταλαβαίνουμε πως η κίνηση του άκρου του βραχίονα σε σχέση με το προβολέα έχει κάποιο μικρό βάθος και κλίση.



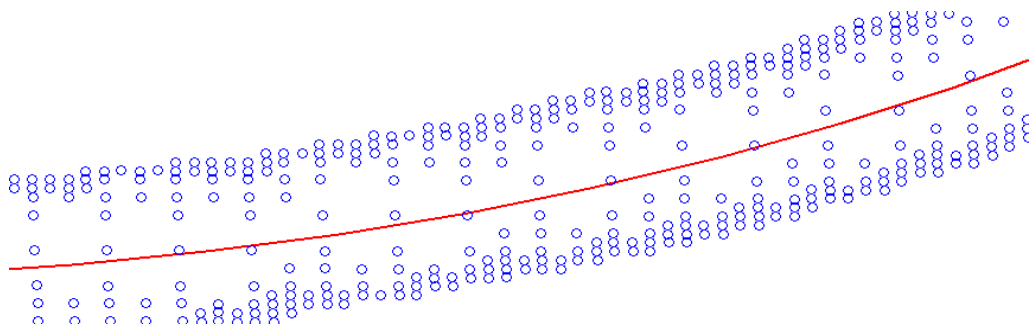
Σχήμα 7.12: Βέλτιστο επίπεδο του νέφους σημείων



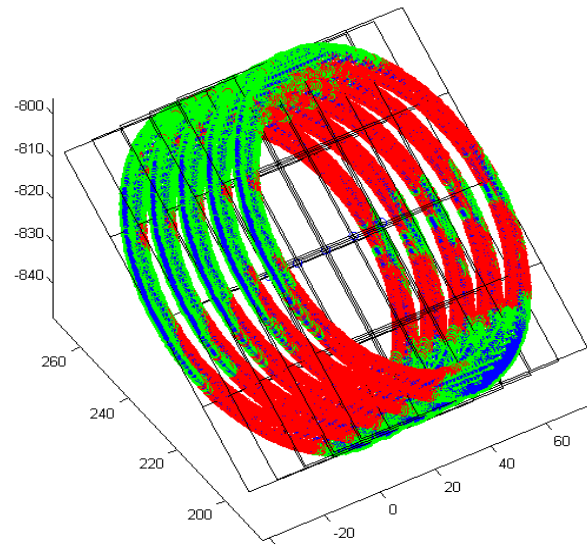
Σχήμα 7.13: Μεγέθυνση τμήματος από το Σχήμα 7.12



Σχήμα 7.14: Fitting έλλειψης

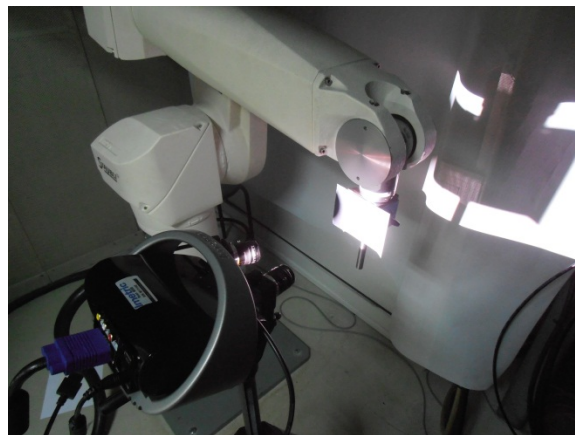


Σχήμα 7.15: Μεγέθυνση τμήματος από το Σχήμα 7.14



Σχήμα 7.16: Σειτ μετρήσεων Matlab

Εκ των υστέρων, και αφού η έρευνα της μεθόδου ολοκληρώθηκε στο επιθυμητό χρονικό όριο, μας δόθηκε η δυνατότητα πειραματισμού με το εξάρτημα καμερών V 70. Οι βασικότερες αλλαγές της διάταξης ήταν: η σμίκρυνση του στόχου (scale down) ώστε να χωράνε 3 διαδοχικές μετατοπίσεις του άξονα στον όγκο μέτρησης και η ελάττωση της απόστασης του σαρωτή από το βραχίονα ώστε το κέντρο εστίασης των καμερών να είναι περίπου πάνω στο στόχο.



Εικόνα 7.5: Διάταξη μέτρησης με τις κάμερες V 70

Ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα της γεωμετρικής και γραμμικής προσέγγισης της έλλειψης με το εξαρτήματα V 400 και μόνο της γραμμικής με το V 70 (προβλήματα τύπου out of Memory της Matlab λόγω πυκνού πλέγματος).

	Γεωμετρική	Γραμμική (Bookstein)		Γεωμετρική	Γραμμική (Bookstein)
0	-	-	37	10,0481	10,0471
1	9,9627	9,9596	38	10,0251	10,0267
2	9,9784	9,9803	39	9,9582	9,9545
3	9,9714	9,9697	40	9,9501	9,9493
4	10,0155	10,0135	41	10,0047	10,0053
5	9,9565	9,9524	42	10,0082	10,0057
6	9,9692	9,9683	43	9,9386	9,9350
7	9,9101	9,9141	44	10,0109	10,0097
8	10,0315	10,0254	45	10,0897	10,0844
9	9,9895	9,9916	46	9,9885	9,9883
10	9,9855	9,9839	47	9,9769	9,9750
11	9,9412	9,9402	48	10,0174	10,0177
12	10,0174	10,0115	49	9,9663	9,9695
13	9,9469	9,9501	50	10,0124	10,0059
14	10,0346	10,0293	51	10,0478	10,0464
15	9,9877	9,9894	52	10,0173	10,0146
16	9,9390	9,9346	53	9,9577	9,9577
17	10,0142	10,0149	54	9,9652	9,9617
18	9,9718	9,9710	55	10,0551	10,0538
19	10,0288	10,0279	56	9,9814	9,9768
20	10,0305	10,0295	57	9,9982	9,9987
21	9,9819	9,9806	58	10,0393	10,0372
22	9,9527	9,9520	59	10,0169	10,0157
23	10,0276	10,0250	60	9,9926	9,9908
24	10,0458	10,0439	61	10,0418	10,0405
25	9,9703	9,96700	62	10,0074	10,0050
26	9,9088	9,91100	63	10,0669	10,0645
27	9,9871	9,98610	64	9,9186	9,9176
28	10,0206	10,0213	65	10,0258	10,0247
29	10,0227	10,0214	66	10,0008	9,9985
30	9,9493	9,9498	67	10,0050	10,0034
31	9,9540	9,9515	68	10,0697	10,0675
32	10,0101	10,0127	69	10,0153	10,0132
33	9,9995	9,9963	70	9,9771	9,97400
34	9,9862	9,9852	71	10,0129	10,0184
35	9,9043	9,9055	72	10,0564	10,0510
36	10,0474	10,0429			

Πίνακας 7.5: Αποστάσεις κέντρων - αποτελέσματα IScan M300 και Matlab με κάμερες V 400 (σε mm)

	Γραμμική (Bookstein)		Γραμμική (Bookstein)
0	-	37	10,05830
1	9,98060	38	10,01870
2	9,99020	39	9,96850
3	9,99600	40	9,99090
4	10,00950	41	10,04370
5	10,01040	42	9,98050
6	9,96180	43	10,0026
7	9,95730	44	10,0283
8	10,04100	45	10,0483
9	10,03020	46	10,0468
10	9,99960	47	9,9518
11	10,00500	48	10,0274
12	9,97620	49	10,0027
13	10,01090	50	9,9760
14	10,00950	51	10,0409
15	10,02110	52	10,0391
16	9,999100	53	9,9869
17	9,957200	54	9,9831
18	9,981000	55	10,0443
19	10,07170	56	9,9898
20	10,02730	57	9,9976
21	9,97290	58	10,0303
22	9,96580	59	9,9776
23	10,00610	60	10,0159
24	10,02980	61	10,0154
25	10,00350	62	10,0153
26	9,96460	63	10,0527
27	9,98930	64	9,98840
28	10,04280	65	10,02460
29	10,04710	66	10,00930
30	9,98110	67	10,0384
31	9,99870	68	10,0077
32	9,98070	69	10,0062
33	10,04800	70	10,0271
34	10,01340	71	10,0150
35	9,93820	72	10,0442
36	10,01270		

Πίνακας 7.6: Αποστάσεις κέντρων - Αποτελέσματα IScan M300 και Matlab με κάμερες V 70 (σε mm)

Κεφάλαιο 8: Επεξεργασία – Μοντελοποίηση

8.1 Επεξεργασία των μετρήσεων

Έχοντας τα δεδομένα των μετρήσεων από τις δύο μεθόδους, επόμενο βήμα είναι η επεξεργασία τους. Θα εξάγουμε τα σφάλματα θέσης για τη τροχιά που μελετάμε και θα συγκρίνουμε τις δύο μεθόδους ως προς την απόδοσή τους.

8.1.1 LDDM Optodyne MCV 500

Ξέρουμε πως η ακρίβεια του laser είναι 1 ppm. Το ppm σημαίνει Parts Per Million και χρησιμοποιείται σαν μονάδα μέτρησης αναλογιών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε:

$$Acc = 1 \text{ ppm} = \frac{1 \mu m}{m} \quad \text{αφού} \quad 1 \mu m = 10^{-6} m$$

Με πρόχειρους υπολογισμούς, η απόσταση που εμείς μετράμε είναι 720 mm ή 0,7 m και άρα η ακρίβεια του laser (αφού η νεκρή απόσταση είναι ελάχιστη) είναι:

$$Acc = \frac{1 \mu m}{m} 0,72 m = 0,72 \mu m = 0,00072 mm$$

Αυτό σημαίνει ότι στα αποτελέσματα (Πίνακας 7.2, Πίνακας 7.3, Πίνακας 7.4) μέχρι το 3ο δεκαδικό, τα ψηφία είναι τα μετρημένα ενώ πέρα από εκεί ίσως είναι τυχαία οπότε και δεν τα λαμβάνουμε υπόψη. Το σίγουρο είναι ότι η

ακρίβεια μειώνεται λόγω διαφορετικών συνθηκών από τις ονομαστικές παρά τη χρήση των αισθητήρων αντιστάθμισης.

Μέθοδος επεξεργασίας

Οι τιμές των αποτελεσμάτων περιλαμβάνουν όλο το μήκος μέτρησης ενώ μέσω του λογισμικού μπορούμε άμεσα να βρούμε την απόκλιση σε κάθε θέση. Θα εξάγουμε δύο ειδών σφάλματα:

- 1) Το ανά βήμα σφάλμα, δηλαδή το σφάλμα θέσης του άκρου ανά 10 mm μετατόπισης το οποίο θα μας βοηθήσει αρκετά στην εποπτεία.
- 2) Το συνολικό σφάλμα θέσης, δηλαδή την απόκλιση του άκρου από την επιθυμητή θέση. Στην ουσία είναι το άθροισμα των ανά βήμα σφαλμάτων.

Το τελικό δείγμα σφαλμάτων θέσης θα προκύψει από τον αριθμητικό μέσο των αντίστοιχων 15 σετ ώστε να αντισταθμιστούν πιθανά τυχαία σφάλματα που έχουν εισαχθεί.

$$E_j = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} e_{j,i}$$

Όπου j: το σημείο μέτρησης (1-72)

i: το σετ μέτρησης

e: το σφάλμα θέσης

Σφάλμα ανά βήμα					
βήμα	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5
1	-0,0269	-0,0221	-0,0351	-0,0196	-0,0243
2	0,0080	0,0078	0,0098	0,0122	0,0022
3	0,0060	-0,0075	0,0013	-0,0037	-0,0019
4	0,0149	0,0248	0,0191	0,0142	0,0207
5	-0,0037	0,0045	0,0115	-0,0007	0,0034
6	-0,0241	-0,0314	-0,0353	-0,0268	-0,0220
7	-0,0414	-0,0487	-0,0405	-0,0347	-0,0484
8	0,0390	0,0338	0,0354	0,0325	0,0335
9	0,0388	0,0464	0,0395	0,0381	0,0463
10	0,0058	0,0179	0,0126	0,0132	0,0173
11	-0,0041	-0,0103	-0,0153	-0,0025	-0,0003
12	-0,0153	-0,0248	-0,0132	-0,0089	-0,0295
13	0,0052	-0,0033	0,0038	-0,0131	-0,0102
14	0,0128	0,0288	0,0164	0,0206	0,0199
15	0,0187	0,0316	0,0243	0,0238	0,0355
16	-0,0174	-0,0202	-0,0270	-0,0155	-0,0119
17	-0,0463	-0,0587	-0,0373	-0,0457	-0,0508
18	0,0019	-0,0026	0,0035	-0,0088	-0,0058
19	0,0584	0,0807	0,0609	0,0772	0,0646
20	0,0402	0,0332	0,0346	0,0385	0,0497
21	-0,0190	-0,0288	-0,0054	-0,0113	-0,0264
22	-0,0200	-0,0320	-0,0223	-0,0431	-0,0294
23	0,0038	0,0196	0,0043	0,0127	0,0100
24	0,0370	0,0466	0,0380	0,0542	0,0518
25	0,0056	0,0005	-0,0039	0,0058	0,0001
26	-0,0488	-0,0489	-0,0428	-0,0584	-0,0532
27	-0,0055	0,0044	0,0017	-0,0103	-0,0017
28	0,0450	0,0476	0,0401	0,0573	0,0440
29	0,0595	0,0441	0,0593	0,0606	0,0594
30	-0,0186	-0,0142	-0,0082	-0,0272	-0,0129
31	-0,0357	-0,0317	-0,0373	-0,0454	-0,0252
32	0,0021	0,0056	0,0038	0,0122	0,0007
33	0,0581	0,0386	0,0441	0,0558	0,0417
34	0,0051	0,0158	0,0122	0,0096	0,0036
35	-0,0733	-0,0517	-0,0700	-0,0735	-0,0543
36	0,0239	0,0097	0,0190	0,0176	0,0133
37	0,0762	0,0602	0,0722	0,0740	0,0634
38	0,0040	0,0327	0,0183	0,0056	0,0242
39	-0,0423	-0,0345	-0,0468	-0,0331	-0,0353

	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5
40	-0,0064	-0,0280	-0,0071	-0,0145	-0,0180
41	0,0503	0,0363	0,0441	0,0467	0,0383
42	0,0031	0,0142	0,0085	0,0017	0,0138
43	-0,0436	-0,0394	-0,0579	-0,0342	-0,0448
44	0,0288	0,0103	0,0378	0,0083	0,0260
45	0,0514	0,0753	0,0566	0,0606	0,0547
46	0,0101	0,0100	-0,0026	0,0226	0,0086
47	-0,0270	-0,0389	-0,0270	-0,0329	-0,0266
48	0,0284	0,0389	0,0438	0,0287	0,0318
49	0,0131	-0,0016	-0,0020	0,0050	0,0035
50	-0,0236	-0,0314	-0,0249	-0,0217	-0,0273
51	0,0258	0,0425	0,0344	0,0291	0,0393
52	0,0526	0,0414	0,0392	0,0537	0,0408
53	-0,0204	-0,0268	-0,0209	-0,0220	-0,0284
54	-0,0317	-0,0050	-0,0179	-0,0224	-0,0192
55	0,0487	0,0359	0,0440	0,0413	0,0580
56	-0,0140	-0,0245	-0,0134	-0,0156	-0,0231
57	0,0181	0,0334	0,0151	0,0258	0,0299
58	0,0323	0,0184	0,0412	0,0341	0,0230
59	-0,0105	-0,0017	-0,0082	-0,0067	-0,0113
60	0,0210	0,0167	0,0087	0,0175	0,0259
61	-0,0045	0,0053	0,0136	-0,0052	0,0054
62	0,0016	-0,0074	-0,0087	0,0040	-0,0087
63	0,0470	0,0489	0,0559	0,0422	0,0508
64	-0,0210	-0,0184	-0,0191	-0,0143	-0,0167
65	0,0297	0,0362	0,0301	0,0319	0,0333
66	0,0099	-0,0051	0,0026	0,0032	0,0009
67	0,0157	0,0338	0,0161	0,0177	0,0250
68	0,0119	0,0074	0,0154	0,0144	0,0055
69	0,0135	0,0090	0,0130	0,0102	0,0177
70	0,0358	0,0330	0,0253	0,0343	0,0313
71	0,0231	0,0221	0,0265	0,0232	0,0193
72	0,0345	0,0394	0,0365	0,0388	0,0425

Πίνακας 8.1: Σφάλμα ανά βήμα Σετ 1-5 (σε mm)

Σφάλμα ανά βήμα					
βήμα	Run 6	Run 7	Run 8	Run 9	Run 10
1	-0,0279	-0,0263	-0,0219	-0,0321	-0,0215
2	0,0165	0,0179	0,0073	0,0101	0,0173
3	-0,0042	-0,0075	-0,0085	0,0017	-0,0093
4	0,0134	0,0183	0,0132	0,0170	0,0208
5	0,0129	-0,0006	0,0130	0,0140	0,0005
6	-0,0323	-0,0244	-0,0251	-0,0314	-0,0242
7	-0,0434	-0,0426	-0,0509	-0,0466	-0,0433
8	0,0366	0,0298	0,0362	0,0363	0,0362
9	0,0381	0,0470	0,0352	0,0388	0,0378
10	0,0139	0,0115	0,0237	0,0242	0,0105
11	-0,0111	-0,0078	0,0053	-0,0205	0,0020
12	-0,0035	-0,0113	-0,0231	-0,0165	-0,0091
13	0,0004	-0,0104	-0,0186	0,0073	-0,0146
14	0,0047	0,0244	0,0199	0,0075	0,0217
15	0,0276	0,0247	0,0355	0,0378	0,0179
16	-0,0192	-0,0153	-0,0155	-0,0256	-0,0065
17	-0,0369	-0,0545	-0,0508	-0,0386	-0,0437
18	-0,0055	0,0038	-0,0021	-0,0109	-0,0125
19	0,0726	0,0720	0,0613	0,0811	0,0661
20	0,0288	0,0311	0,0555	0,0293	0,0419
21	-0,0125	-0,0084	-0,0179	-0,0198	0,0010
22	-0,0166	-0,0414	-0,0350	-0,0168	-0,0376
23	-0,0025	0,0187	0,0103	-0,0015	0,0021
24	0,0488	0,0482	0,0536	0,0476	0,0396
25	-0,0095	-0,0011	-0,0005	-0,0029	0,0131
26	-0,0392	-0,0590	-0,0572	-0,0409	-0,0475
27	-0,0030	0,0084	0,0046	-0,0041	-0,0085
28	0,0561	0,0451	0,0526	0,0524	0,0516
29	0,0462	0,0630	0,0548	0,0462	0,0585
30	-0,0095	-0,0261	-0,0300	-0,0022	-0,0081
31	-0,0391	-0,0297	-0,0193	-0,0330	-0,0464
32	0,0147	0,0093	0,0041	0,0016	0,0072
33	0,0377	0,0494	0,0497	0,0436	0,0487
34	0,0172	0,0054	0,0009	0,0165	0,0176
35	-0,0760	-0,0621	-0,0592	-0,0695	-0,0710
36	0,0250	0,0133	0,0264	0,0151	0,0221
37	0,0707	0,0762	0,0589	0,0674	0,0740
38	0,0257	0,0186	0,0141	0,0312	0,0097
39	-0,0574	-0,0415	-0,0346	-0,0450	-0,0369

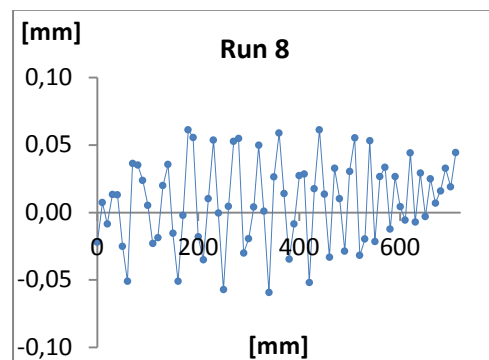
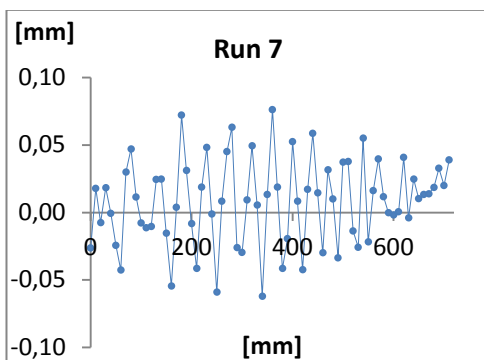
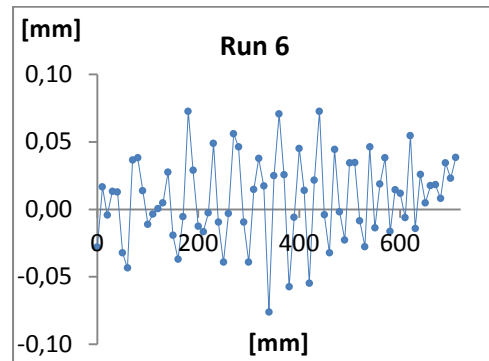
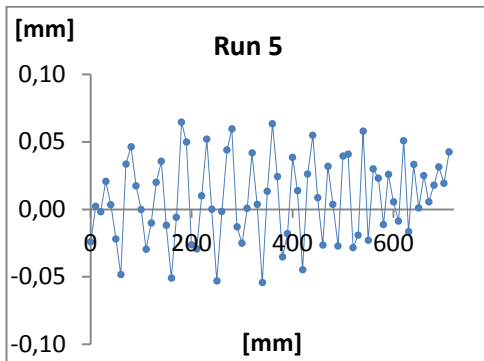
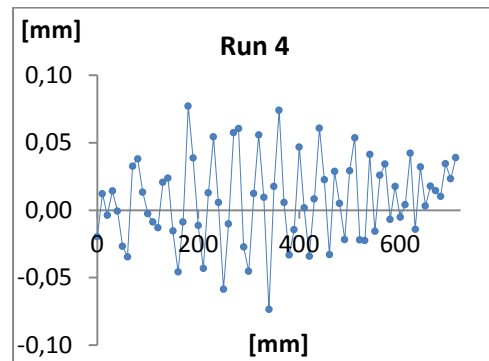
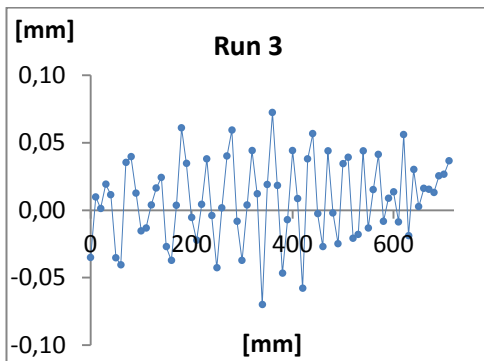
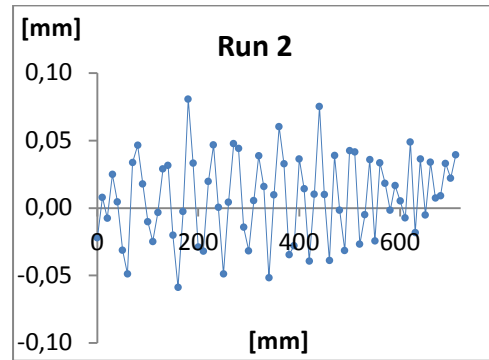
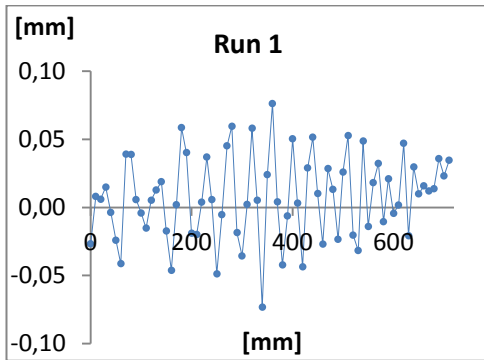
	Run 6	Run 7	Run 8	Run 9	Run 10
40	-0,0060	-0,0195	-0,0085	-0,0084	-0,0148
41	0,0450	0,0524	0,0272	0,0361	0,0509
42	0,0140	0,0083	0,0284	0,0122	0,0020
43	-0,0547	-0,0424	-0,0519	-0,0491	-0,0371
44	0,0215	0,0171	0,0175	0,0205	0,0188
45	0,0726	0,0587	0,0613	0,0686	0,0588
46	-0,0041	0,0145	0,0136	0,0051	0,0148
47	-0,0323	-0,0300	-0,0331	-0,0240	-0,0358
48	0,0444	0,0316	0,0327	0,0349	0,0396
49	-0,0019	0,0099	0,0103	0,0037	0,0033
50	-0,0227	-0,0336	-0,0286	-0,0245	-0,0300
51	0,0344	0,0373	0,0304	0,0366	0,0378
52	0,0346	0,0376	0,0552	0,0330	0,0450
53	-0,0085	-0,0138	-0,0318	-0,0092	-0,0214
54	-0,0277	-0,0257	-0,0198	-0,0259	-0,0210
55	0,0462	0,0549	0,0532	0,0509	0,0493
56	-0,0138	-0,0219	-0,0216	-0,0198	-0,0193
57	0,0188	0,0162	0,0266	0,0223	0,0195
58	0,0382	0,0397	0,0335	0,0308	0,0414
59	-0,0164	0,0117	-0,0123	-0,0145	-0,0123
60	0,0144	-0,0001	0,0265	0,0223	0,0162
61	0,0118	-0,0018	0,0044	0,0112	0,0053
62	-0,0062	0,0004	-0,0058	-0,0104	-0,0029
63	0,0546	0,0407	0,0442	0,0562	0,0503
64	-0,0142	-0,0041	-0,0072	-0,0185	-0,0209
65	0,0258	0,0248	0,0291	0,0343	0,0373
66	0,0048	0,0102	-0,0030	0,0031	0,0050
67	0,0176	0,0133	0,0250	0,0216	0,0241
68	0,0182	0,0138	0,0070	0,0090	0,0095
69	0,0082	0,0184	0,0159	0,0177	0,0139
70	0,0343	0,0327	0,0326	0,0327	0,0327
71	0,0230	0,0200	0,0189	0,0199	0,0210
72	0,0385	0,0389	0,0444	0,0394	0,0434

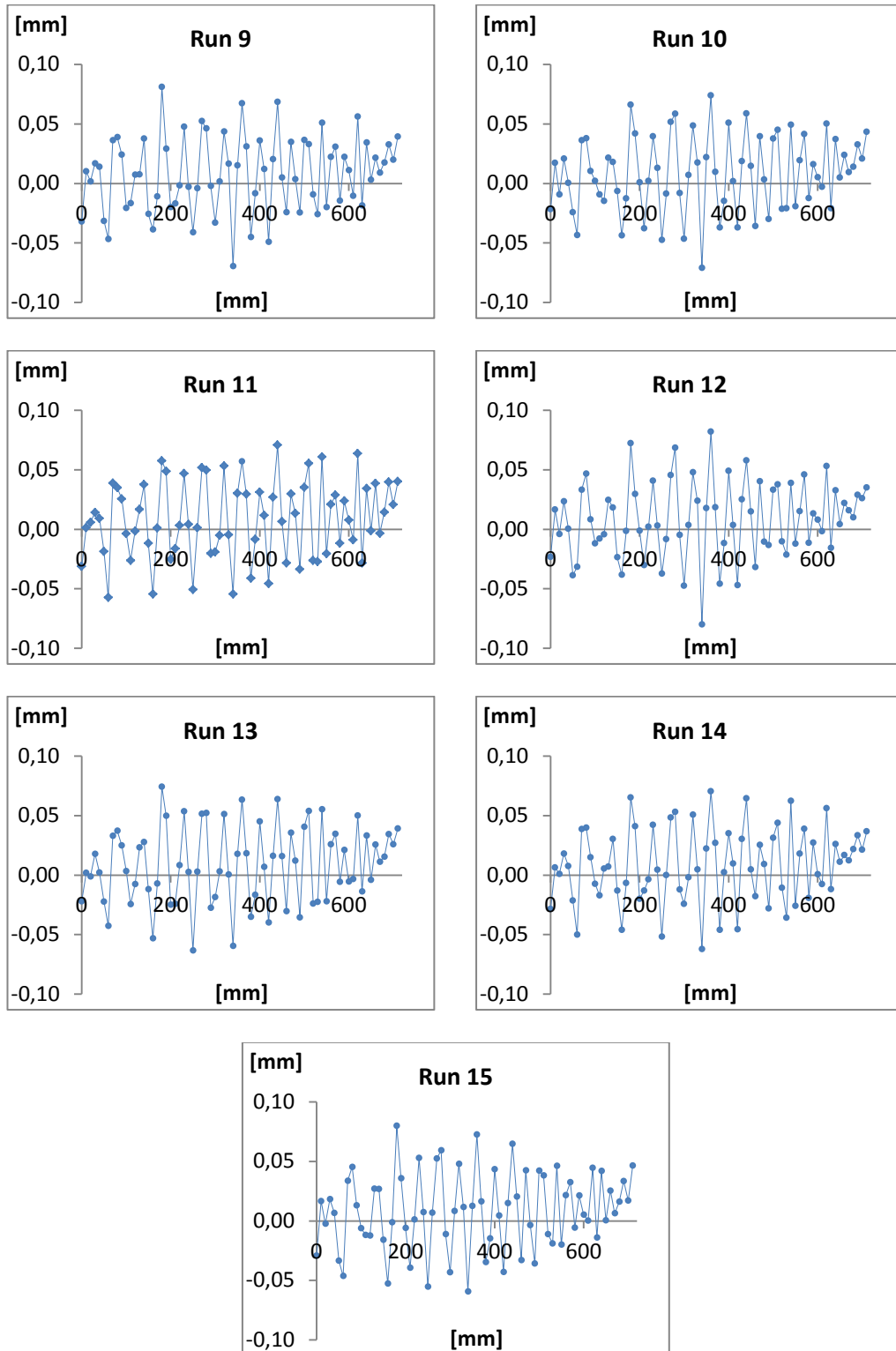
Πίνακας 8.2: Σφάλμα ανά βήμα Σετ 6-10 (σε mm)

Σφάλμα ανά βήμα					
βήμα	Run 11	Run 12	Run 13	Run 14	Run 15
1	-0,0314	-0,0232	-0,0220	-0,0284	-0,0292
2	0,0013	0,0165	0,0018	0,0063	0,0167
3	0,0058	-0,0041	-0,0011	0,0011	-0,0024
4	0,0141	0,0236	0,0178	0,0181	0,0182
5	0,0091	0,0004	0,0021	0,0077	0,0067
6	-0,0188	-0,0385	-0,0223	-0,0214	-0,0335
7	-0,0574	-0,0316	-0,0426	-0,0500	-0,0463
8	0,0388	0,0331	0,0329	0,0386	0,0337
9	0,0349	0,0468	0,0372	0,0398	0,0454
10	0,0255	0,0083	0,0249	0,0148	0,0130
11	-0,0037	-0,0118	0,0033	-0,0074	-0,0061
12	-0,0262	-0,0077	-0,0245	-0,0169	-0,0117
13	-0,0016	-0,0043	-0,0076	0,0055	-0,0122
14	0,0167	0,0248	0,0234	0,0072	0,0271
15	0,0374	0,0184	0,0278	0,0305	0,0268
16	-0,0119	-0,0235	-0,0119	-0,0131	-0,0158
17	-0,0546	-0,0382	-0,0530	-0,0460	-0,0526
18	0,0009	-0,0015	-0,0071	-0,0067	-0,0011
19	0,0574	0,0723	0,0742	0,0653	0,0799
20	0,0487	0,0297	0,0497	0,0409	0,0359
21	-0,0254	-0,0013	-0,0250	-0,0199	-0,0060
22	-0,0163	-0,0301	-0,0242	-0,0130	-0,0394
23	0,0032	0,0021	0,0084	-0,0036	0,0012
24	0,0467	0,0407	0,0537	0,0422	0,0528
25	0,0040	0,0031	0,0026	0,0045	0,0075
26	-0,0506	-0,0373	-0,0633	-0,0516	-0,0553
27	0,0013	-0,0083	0,0028	0,0001	0,0069
28	0,0517	0,0455	0,0516	0,0483	0,0524
29	0,0495	0,0686	0,0522	0,0531	0,0593
30	-0,0204	-0,0047	-0,0274	-0,0121	-0,0111
31	-0,0192	-0,0473	-0,0185	-0,0242	-0,0432
32	-0,0051	0,0036	0,0032	-0,0018	0,0083
33	0,0531	0,0479	0,0513	0,0507	0,0479
34	-0,0048	0,0238	0,0004	0,0048	0,0116
35	-0,0545	-0,0799	-0,0595	-0,0621	-0,0592
36	0,0302	0,0177	0,0178	0,0224	0,0127
37	0,0571	0,0822	0,0633	0,0704	0,0727
38	0,0295	0,0184	0,0183	0,0272	0,0163
39	-0,0412	-0,0457	-0,0350	-0,0460	-0,0346

	Run 11	Run 12	Run 13	Run 14	Run 15
40	-0,0086	-0,0117	-0,0166	0,0024	-0,0148
41	0,0312	0,0490	0,0449	0,0350	0,0435
42	0,0117	0,0036	0,0069	0,0098	0,0046
43	-0,0458	-0,0470	-0,0397	-0,0456	-0,0428
44	0,0269	0,0250	0,0161	0,0303	0,0150
45	0,0706	0,0579	0,0639	0,0644	0,0647
46	0,0065	0,0150	0,0159	0,0048	0,0203
47	-0,0284	-0,0317	-0,0304	-0,0179	-0,0328
48	0,0296	0,0404	0,0355	0,0253	0,0425
49	0,0132	-0,0103	0,0120	0,0092	-0,0035
50	-0,0338	-0,0133	-0,0356	-0,0280	-0,0357
51	0,0350	0,0333	0,0405	0,0314	0,0422
52	0,0552	0,0377	0,0539	0,0439	0,0381
53	-0,0264	-0,0102	-0,0239	-0,0108	-0,0112
54	-0,0272	-0,0214	-0,0224	-0,0359	-0,0189
55	0,0608	0,0388	0,0552	0,0624	0,0463
56	-0,0206	-0,0120	-0,0221	-0,0258	-0,0199
57	0,0209	0,0152	0,0258	0,0179	0,0216
58	0,0286	0,0460	0,0346	0,0388	0,0325
59	-0,0118	-0,0113	-0,0056	-0,0192	-0,0058
60	0,0237	0,0132	0,0210	0,0273	0,0214
61	0,0076	0,0081	-0,0054	0,0008	0,0052
62	-0,0091	-0,0016	-0,0034	-0,0076	0,0003
63	0,0637	0,0531	0,0500	0,0563	0,0446
64	-0,0285	-0,0155	-0,0137	-0,0117	-0,0140
65	0,0342	0,0327	0,0331	0,0260	0,0419
66	-0,0014	0,0043	-0,0039	0,0111	0,0005
67	0,0385	0,0221	0,0256	0,0168	0,0254
68	-0,0035	0,0159	0,0112	0,0123	0,0063
69	0,0143	0,0099	0,0155	0,0218	0,0160
70	0,0396	0,0290	0,0345	0,0334	0,0335
71	0,0207	0,0262	0,0259	0,0214	0,0170
72	0,0400	0,0352	0,0391	0,0367	0,0466

Πίνακας 8.3: Σφάλμα ανά βήμα Σει 11 – 15 (σε mm)





Διάγραμμα 8.1: Σφάλμα ανά βήμα Σετ 1 - 15

Παρατηρήσεις:

- Κοιτώντας τα αποτελέσματα των πινάκων του κεφαλαίου 7.3.2 και με μια γρήγορη ματιά στις τελευταίες μετρήσεις της θέσης 72, παρατηρούμε πως η απόκλιση του βραχίονα αυξάνεται συνεχώς. Το ρομπότ εννοείται πως δεν έχει τόσο μεγάλες αποκλίσεις από μέτρηση σε μέτρηση και άρα καταλαβαίνουμε ότι εισάγεται συστηματικό σφάλμα στο σύστημα μέσω του laser. Κάποιες εκτιμήσεις είναι, ότι αυτό το σφάλμα είναι και συνάρτηση του χρόνου καθώς οι μετρήσεις 1 – 15 έγιναν σε διάστημα 5 ωρών περίπου. Οι προσπάθειες αντιστάθμισης (αισθητήρες, επανέναρξη προγράμματος για κάθε μέτρηση για τυχόν σφάλματα κώδικα) δεν διόρθωσαν την κατάσταση και άρα πιθανότητα το laser χρειάζεται ρύθμιση - αντιστάθμιση. Παρόλα αυτά οι αριθμοί αυτοί καθ' αυτοί δεν αλλάζουν ούτε επηρεάζουν σε καμία περίπτωση τον τρόπο μέτρησης και τη μεθοδολογία που ακολουθείται.
- Η μορφή των καμπυλών στα διαγράμματα 8.1 είναι όμοια σε όλες τις περιπτώσεις γεγονός που ενισχύει τον ισχυρισμό ότι το σφάλμα που εισάγεται από το laser είναι πιθανότατα συστηματικό.
- Εντύπωση μας προκαλεί η μορφή των καμπυλών καθώς δε μπορεί να θεωρηθεί τυχαία. Σύγκριση με το Σχήμα 5.6 για τον άξονα x (που είναι για ένα τελείως διαφορετικό ρομπότ) μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι αποτέλεσμα του κινηματικού μοντέλου του ρομπότ, της ανάλυσης ελέγχου και του τρόπου κίνησής του (επενεργητές).
- Η διαφορά του σφάλματος ανά βήμα ενός δείγματος σε σύγκριση με το αμέσως επόμενο δείγμα, θα έπρεπε να οριοθετείται από την επαναληψιμότητα του ρομπότ, δηλαδή ± 0.02 mm. Δημιουργήθηκε ένα μικρό κομμάτι κώδικα ώστε να εξετάσουμε αν αυτό όντως ισχύει. Με βάση τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 3.1.1 προκύπτει ο Πίνακας 8.4. Παρατηρούμε ότι όντως η επαναληψιμότητα είναι στο ± 0.02 mm με μόνο 4 σημεία να το υπερβαίνουν για λίγο, λόγω πάντα της στατιστικής. (Μην ξεχνάμε ότι οι μετρήσεις δεν έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9283 και άρα αποκλίσεις αρκετά μεγαλύτερες θα ήταν εξίσου αποδεκτές).

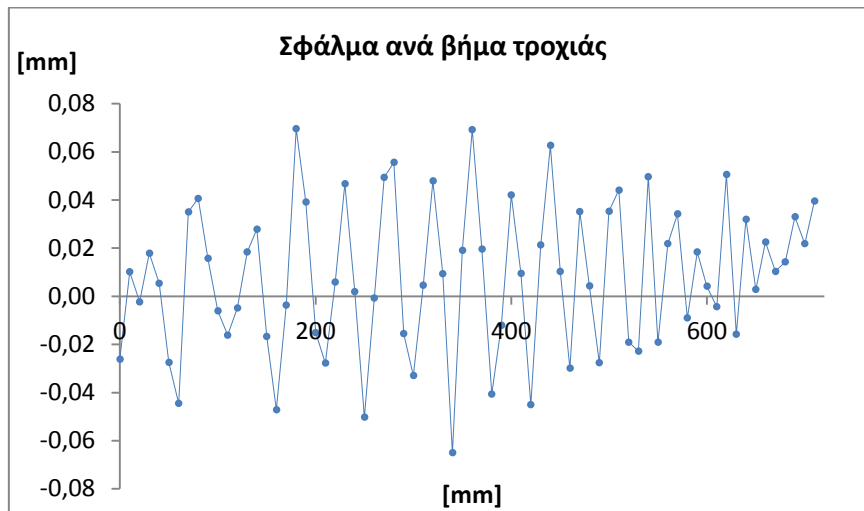
	Επαναληψιμότητα		Επαναληψιμότητα		Επαναληψιμότητα
1	0.0108	25	0.0140	49	0.0172
2	0.0140	26	0.0193	50	0.0156
3	0.0120	27	0.0136	51	0.0121
4	0.0092	28	0.0111	52	0.0179
5	0.0129	29	0.0165	53	0.0172
6	0.0130	30	0.0204	54	0.0194
7	0.0168	31	0.0240	55	0.0194
8	0.0063	32	0.0134	56	0.0104
9	0.0097	33	0.0152	57	0.0135
10	0.0150	34	0.0186	58	0.0192
11	0.0180	35	0.0188	59	0.0202
12	0.0187	36	0.0141	60	0.0191
13	0.0187	37	0.0173	61	0.0154
14	0.0183	38	0.0222	62	0.0100
15	0.0166	39	0.0167	63	0.0159
16	0.0144	40	0.0185	64	0.0158
17	0.0165	41	0.0177	65	0.0120
18	0.0118	42	0.0185	66	0.0129
19	0.0179	43	0.0169	67	0.0180
20	0.0206	44	0.0198	68	0.0141
21	0.0213	45	0.0167	69	0.0097
22	0.0223	46	0.0193	70	0.0091
23	0.0172	47	0.0134	71	0.0069
24	0.0145	48	0.0140	72	0.0090

Πίνακας 8.4: Επαλήθευση επαναληψιμότητας Staubli RX 90 στα $\pm 0,02$ mm

Τέλος, υπολογίζοντας τους αριθμητικούς μέσους των σφαλμάτων βήματος όλων των σετ μετρήσεων και αθροίζοντάς τους, προκύπτει το συνολικό σφάλμα της τροχιάς που θα προσπαθήσουμε να μοντελοποιήσουμε με νευρωνικά δίκτυα.

	Ανά βήμα	Συνολικό		Ανά βήμα	Συνολικό
1	-0,0261	-0,0260	37	0,0693	0,1875
2	0,0101	-0,0159	38	0,0196	0,2071
3	-0,0023	-0,0182	39	-0,0407	0,1664
4	0,0179	-0,0003	40	-0,0120	0,1544
5	0,0054	0,0051	41	0,0421	0,1964
6	-0,0274	-0,0223	42	0,0095	0,2059
7	-0,0445	-0,0669	43	-0,0451	0,1609
8	0,0351	-0,0318	44	0,0213	0,1822
9	0,0407	0,0089	45	0,0627	0,2449
10	0,0158	0,0247	46	0,0103	0,2552
11	-0,0060	0,0187	47	-0,0299	0,2253
12	-0,0162	0,0025	48	0,0352	0,2605
13	-0,0049	-0,0024	49	0,0043	0,2647
14	0,0184	0,0160	50	-0,0276	0,2371
15	0,0279	0,0439	51	0,0353	0,2724
16	-0,0167	0,0272	52	0,0441	0,3166
17	-0,0472	-0,0200	53	-0,0190	0,2975
18	-0,0036	-0,0236	54	-0,0228	0,2747
19	0,0696	0,0460	55	0,0497	0,3244
20	0,0392	0,0851	56	-0,0192	0,3053
21	-0,0151	0,0701	57	0,0218	0,3271
22	-0,0278	0,0422	58	0,0342	0,3613
23	0,0059	0,0482	59	-0,0091	0,3522
24	0,0468	0,0949	60	0,0184	0,3706
25	0,0019	0,0969	61	0,0041	0,3747
26	-0,0503	0,0466	62	-0,0044	0,3704
27	-0,0008	0,0458	63	0,0506	0,4209
28	0,0494	0,0953	64	-0,0158	0,4051
29	0,0556	0,1509	65	0,0320	0,4371
30	-0,0155	0,1354	66	0,0028	0,4399
31	-0,0330	0,1024	67	0,0226	0,4625
32	0,0046	0,1070	68	0,0103	0,4728
33	0,0479	0,1549	69	0,0143	0,4871
34	0,0093	0,1642	70	0,0330	0,5201
35	-0,0651	0,0991	71	0,0219	0,5420
36	0,0191	0,1182	72	0,0396	0,5816

Πίνακας 8.5: Ανά βήμα και συνολικό σφάλμα της τροχιάς προς μοντελοποίηση (σε mm)



Διάγραμμα 8.2: Σφάλμα ανά βήμα της τροχιάς προς μοντελοποίηση



Διάγραμμα 8.3: Συνολικός χάρτης σφάλματος επιλεγμένης τροχιάς

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 8.3, θα μπορούσε κάποιος να υποθέσει ότι καθώς ο ρομποτικός βραχίονας απομακρύνεται από την αρχική θέση και μετατοπίζει το κέντρο βάρους του, λόγω των ροπών που δημιουργούνται πάνω σε αυτόν, το σφάλμα όλο και μεγαλώνει. Αυτό βέβαια είναι απλά μια υπόθεση και θα πρέπει να διερευνηθεί περισσότερο.

8.1.2 IScan M300 IMetric

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων του IScan είναι σαφώς πιο απλή καθώς έχουμε μόνο ένα σετ μέτρησης. Βασικός σκοπός είναι η δημιουργία της μεθόδου και όχι η μέτρηση αυτή καθ' αυτή.

Έχουμε σύνολο δύο σετ μετρήσεων, ένα για κάθε εξάρτημα καμερών που χρησιμοποιήθηκε. Ανατρέχοντας στον πίνακα 6.5 βλέπουμε ότι για το εξάρτημα V400 η ακρίβεια εκτιμάται στα 0.043 mm, ενώ για το V 70 εκτιμάται στα 0.008 mm. Θεωρητικά το V400 είναι ακατάλληλο για τη μέτρηση που κάναμε, ενώ το V70 πρέπει να βγάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

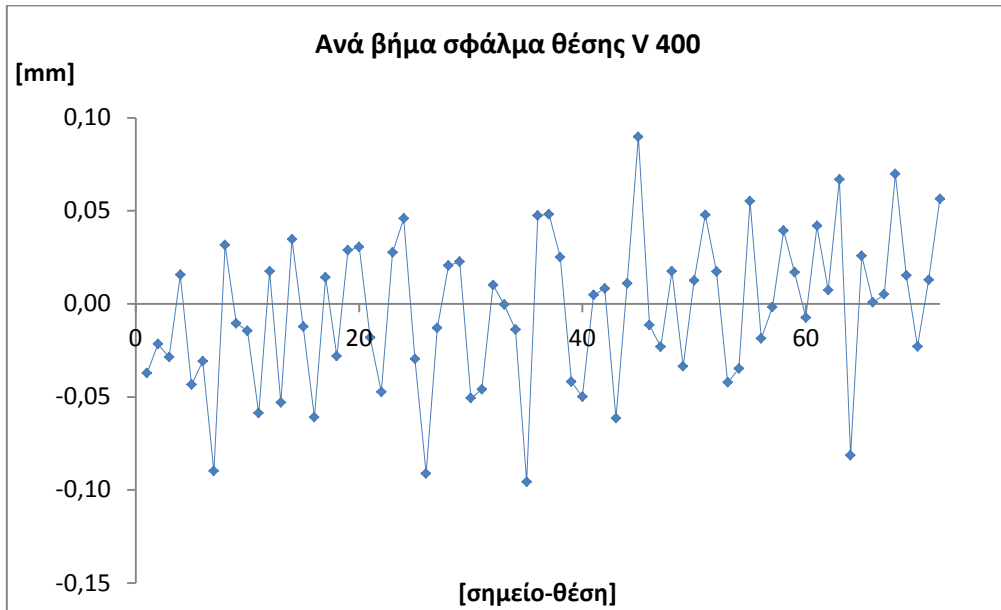
Μέθοδος επεξεργασίας

Η μέθοδος επεξεργασίας και για τις δύο περιπτώσεις εξαρτημάτων είναι ίδια. Πιο συγκεκριμένα, τα συνολικά και ανά βήμα σφάλματα υπολογίζονται αυτόματα από τον κώδικα που έχει δημιουργηθεί (συνάρτηση DistanceErrors()). Τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (για το V400 και V70 με τη σειρά).

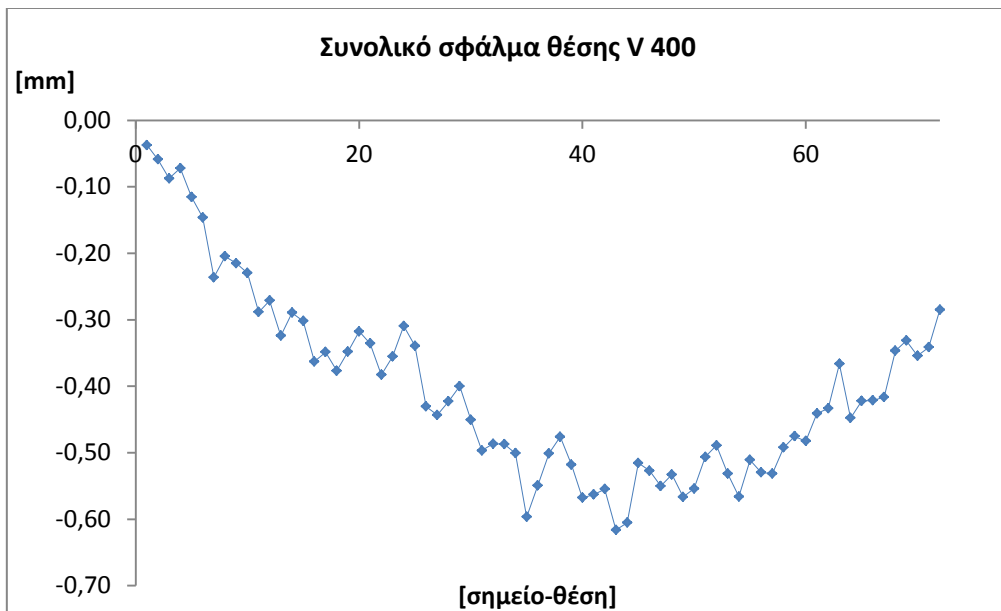
	Γεωμετρική		Γραμμική	
	Ανά βήμα	Συνολικό	Ανά βήμα	Συνολικό
1	-0,0373	-0,0373	-0,0404	-0,0404
2	-0,0216	-0,0589	-0,0197	-0,0601
3	-0,0286	-0,0875	-0,0303	-0,0904
4	0,0155	-0,0720	0,0135	-0,0769
5	-0,0435	-0,1155	-0,0476	-0,1245
6	-0,0308	-0,1463	-0,0317	-0,1562
7	-0,0899	-0,2362	-0,0859	-0,2421
8	0,0315	-0,2047	0,0254	-0,2167
9	-0,0105	-0,2152	-0,0084	-0,2251
10	-0,0145	-0,2297	-0,0161	-0,2412
11	-0,0588	-0,2885	-0,0598	-0,3010
12	0,0174	-0,2711	0,0115	-0,2895
13	-0,0531	-0,3242	-0,0499	-0,3394
14	0,0346	-0,2896	0,0293	-0,3101
15	-0,0123	-0,3019	-0,0106	-0,3207
16	-0,0610	-0,3629	-0,0654	-0,3861
17	0,0142	-0,3487	0,0149	-0,3712
18	-0,0282	-0,3769	-0,0290	-0,4002
19	0,0288	-0,3481	0,0279	-0,3723
20	0,0305	-0,3176	0,0295	-0,3428
21	-0,0181	-0,3357	-0,0194	-0,3622
22	-0,0473	-0,3830	-0,0480	-0,4102
23	0,0276	-0,3554	0,0250	-0,3852
24	0,0458	-0,3096	0,0439	-0,3413
25	-0,0297	-0,3393	-0,0330	-0,3743
26	-0,0912	-0,4305	-0,0890	-0,4633
27	-0,0129	-0,4434	-0,0139	-0,4772
28	0,0206	-0,4228	0,0213	-0,4559
29	0,0227	-0,4001	0,0214	-0,4345
30	-0,0507	-0,4508	-0,0502	-0,4847
31	-0,0460	-0,4968	-0,0485	-0,5332
32	0,0101	-0,4867	0,0127	-0,5205
33	-0,0005	-0,4872	-0,0037	-0,5242
34	-0,0138	-0,5010	-0,0148	-0,5390
35	-0,0957	-0,5967	-0,0945	-0,6335
36	0,0474	-0,5493	0,0429	-0,5906
37	0,0481	-0,5012	0,0471	-0,5435
38	0,0251	-0,4761	0,0267	-0,5168
39	-0,0418	-0,5179	-0,0455	-0,5623

	Γεωμετρική		Γραμμική	
	Ανά βήμα	Συνολικό	Ανά βήμα	Συνολική
40	-0,0499	-0,5678	-0,0507	-0,6130
41	0,0047	-0,5631	0,0053	-0,6077
42	0,0082	-0,5549	0,0057	-0,6020
43	-0,0614	-0,6163	-0,0650	-0,6670
44	0,0109	-0,6054	0,0097	-0,6573
45	0,0897	-0,5157	0,0844	-0,5729
46	-0,0115	-0,5272	-0,0117	-0,5846
47	-0,0231	-0,5503	-0,0250	-0,6096
48	0,0174	-0,5329	0,0177	-0,5919
49	-0,0337	-0,5666	-0,0305	-0,6224
50	0,0124	-0,5542	0,0059	-0,6165
51	0,0478	-0,5064	0,0464	-0,5701
52	0,0173	-0,4891	0,0146	-0,5555
53	-0,0423	-0,5314	-0,0423	-0,5978
54	-0,0348	-0,5662	-0,0383	-0,6361
55	0,0551	-0,5111	0,0538	-0,5823
56	-0,0186	-0,5297	-0,0232	-0,6055
57	-0,0018	-0,5315	-0,0013	-0,6068
58	0,0393	-0,4922	0,0372	-0,5696
59	0,0169	-0,4753	0,0157	-0,5539
60	-0,0074	-0,4827	-0,0092	-0,5631
61	0,0418	-0,4409	0,0405	-0,5226
62	0,0074	-0,4335	0,0050	-0,5176
63	0,0669	-0,3666	0,0645	-0,4531
64	-0,0814	-0,4480	-0,0824	-0,5355
65	0,0258	-0,4222	0,0247	-0,5108
66	0,0008	-0,4214	-0,0015	-0,5123
67	0,0050	-0,4164	0,0034	-0,5089
68	0,0697	-0,3467	0,0675	-0,4414
69	0,0153	-0,3314	0,0132	-0,4282
70	-0,0229	-0,3543	-0,0260	-0,4542
71	0,0129	-0,3414	0,0184	-0,4358
72	0,0564	-0,2850	0,0510	-0,3848

Πίνακας 8.6: Ανά βήμα και συνολικό σφάλμα γεωμετρικής και γραμμικής προσέγγισης του IScan M300 με χρήση του εξαρτήματος καμερών V 400 (σε mm)



Διάγραμμα 8.4: Ανά βήμα σφάλμα θέσης IScan M300 με κάμερες V 400 (γεωμετρική προσέγγιση)



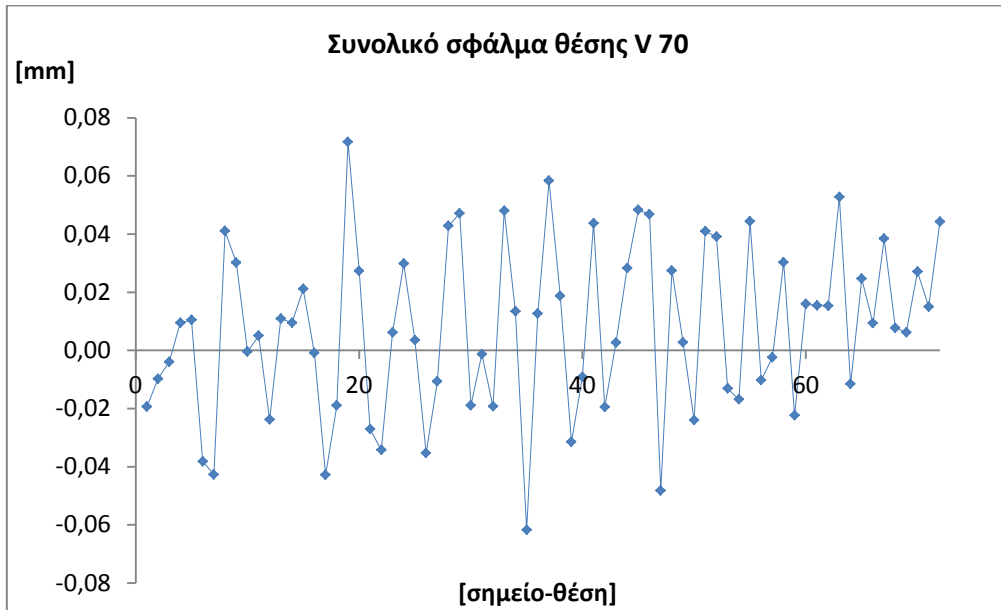
Διάγραμμα 8.5: Συνολικό σφάλμα θέσης IScan M300 με κάμερες V 400 (γεωμετρική προσέγγιση)

Παρατηρήσεις:

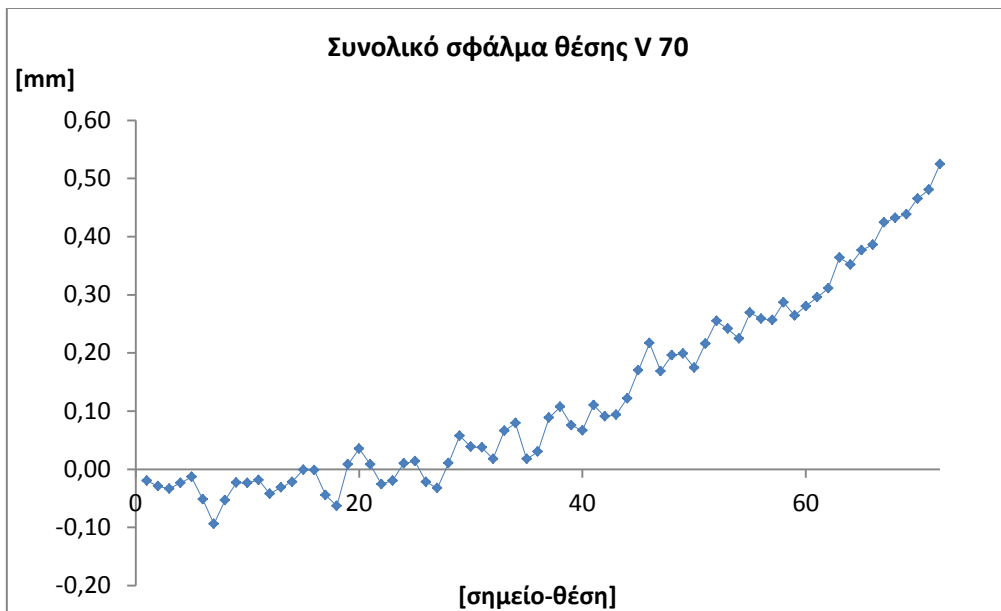
- Με την πρώτη ματιά, στο συνολικό σφάλμα θέσης παρατηρούμε μεγάλη διαφορά σε σχέση με τα αποτελέσματα του Optodyne laser. Για την ακρίβεια, το συνολικό σφάλμα θέσης αφού φτάσει τη μέγιστη τιμή περίπου στο μέσο της τροχιάς, καταλήγει στο άκρο να είναι στη τιμή $-0,2850$. Όχι μόνο η τιμή αλλά και όλη η συμπεριφορά της καμπύλης διαφέρουν αρκετά. Πάντως, το αποτέλεσμα αυτό δε μας εκπλήσσει. Συγκρίνοντας την ακρίβεια του Optodyne laser με αυτή του IScan M300 V 400 σαφώς και επιλέγουμε το laser (για τη συγκεκριμένη πάντα μέτρηση).
- Η γεωμετρική και γραμμική προσέγγιση (Πίνακας 8.6) διαφέρουν. Η γεωμετρική προσέγγιση βγάζει λίγο καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη γραμμική (με την υπόθεση ότι οι μετρήσεις του laser είναι σωστές και το συνολικό σωστό σφάλμα είναι $+0,5$)
- Τα «φτωχά» αποτελέσματα σε καμιά περίπτωση δε σημαίνουν ότι η μέθοδος του 3D σαρωτή είναι ακατάλληλη. Όλα εξαρτώνται από την ακρίβεια του οργάνου μέτρησης και την ακρίβεια του ρομπότ.

Γραμμική			Γραμμική		
	Ανά βήμα	Συνολικό		Ανά βήμα	Συνολικό
1	-0,01940	-0,0194	37	0,05830	0,08860
2	-0,00980	-0,02920	38	0,01870	0,10730
3	-0,00400	-0,03320	39	-0,03150	0,07580
4	0,00950	-0,02370	40	-0,00910	0,06670
5	0,01040	-0,01330	41	0,04370	0,11040
6	-0,03820	-0,05150	42	-0,01950	0,09090
7	-0,04270	-0,09420	43	0,00260	0,09350
8	0,04100	-0,05320	44	0,02830	0,12180
9	0,03020	-0,02300	45	0,04830	0,17010
10	-0,00040	-0,02340	46	0,04680	0,21690
11	0,00500	-0,01840	47	-0,04820	0,16870
12	-0,02380	-0,04220	48	0,02740	0,19610
13	0,01090	-0,03130	49	0,00270	0,19880
14	0,00950	-0,02180	50	-0,02400	0,17480
15	0,02110	-0,00070	51	0,04090	0,21570
16	-0,00090	-0,00160	52	0,03910	0,25480
17	-0,04280	-0,04440	53	-0,01310	0,24170
18	-0,01900	-0,06340	54	-0,01690	0,22480
19	0,07170	0,00830	55	0,04430	0,26910
20	0,02730	0,03560	56	-0,01020	0,25890
21	-0,02710	0,00850	57	-0,00240	0,25650
22	-0,03420	-0,02570	58	0,03030	0,28680
23	0,00610	-0,01960	59	-0,02240	0,26440
24	0,02980	0,01020	60	0,01590	0,28030
25	0,00350	0,01370	61	0,01540	0,29570
26	-0,03540	-0,02170	62	0,01530	0,31100
27	-0,01070	-0,03240	63	0,05270	0,36370
28	0,04280	0,01040	64	-0,01160	0,35210
29	0,04710	0,05750	65	0,02460	0,37670
30	-0,01890	0,03860	66	0,00930	0,38600
31	-0,00130	0,03730	67	0,03840	0,42440
32	-0,01930	0,01800	68	0,00770	0,43210
33	0,04800	0,06600	69	0,00620	0,43830
34	0,01340	0,07940	70	0,02710	0,46540
35	-0,06180	0,01760	71	0,01500	0,48040
36	0,01270	0,03030	72	0,04420	0,52460

Πίνακας 8.7: Ανά βήμα και συνολικό σφάλμα θέσης γραμμικής προσέγγισης IScan M300 με χρήση του εξαρτήματος καμερών V 70 (σε mm)



Διάγραμμα 8.6: Ανά βήμα σφάλμα θέσης IScan M300 με κάμερες V 70 (γραμμική προσέγγιση)



Διάγραμμα 8.7: Συνολικό σφάλμα θέσης IScan M300 με κάμερες V 70 (γραμμική προσέγγιση)

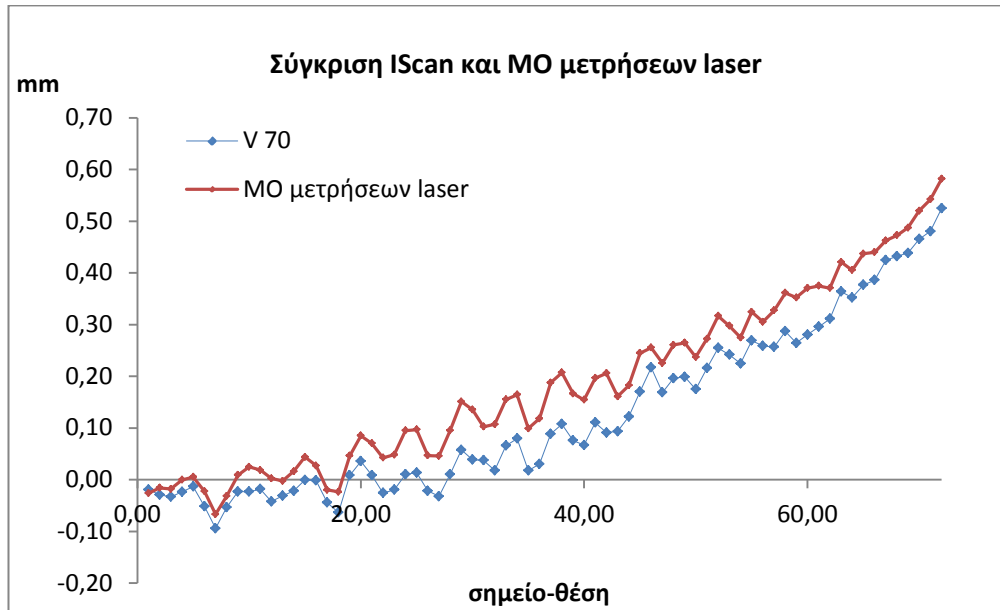
Παρατηρήσεις:

- Με μια γρήγορη ματιά βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα πλησιάζουν πάρα πολύ αυτά του laser. Το συνολικό σφάλμα θέσης στη θέση 72 είναι 0,5246 και ελαφρώς μικρότερο από αυτό του laser. Αν κάποιος λάβει υπόψη του το συστηματικό σφάλμα που εισάγεται στο laser και αντί για το μέσο όρο των μετρήσεων πάρει απλά το πρώτο σετ τότε τα σφάλματα είναι στην ουσία ίδια. Το ίδιο ισχύει και με όλη τη μορφή της καμπύλης.
- Στην ουσία, με αυτή τη μέτρηση και τα αποτελέσματά της επικυρώνουμε ότι η μέτρηση με τον 3D σαρωτή είναι δυνατή και μάλιστα γίνεται με πολύ καλή ακρίβεια.
- Μία γεωμετρική προσέγγιση των ελλείψεων ίσως να έβγαζε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Δυστυχώς, λόγω του πυκνού νέφους σημείων (εξ' ου και η μεγαλύτερη ακρίβεια) η προσομοίωση στο περιβάλλον Matlab ήταν προβληματική. Εκτιμάται ότι κατάλληλες ρυθμίσεις εκχώρησης μνήμης (memory allocation) θα διορθώσουν αυτό τον περιορισμό.

8.1.3 Σύγκριση μεθόδων

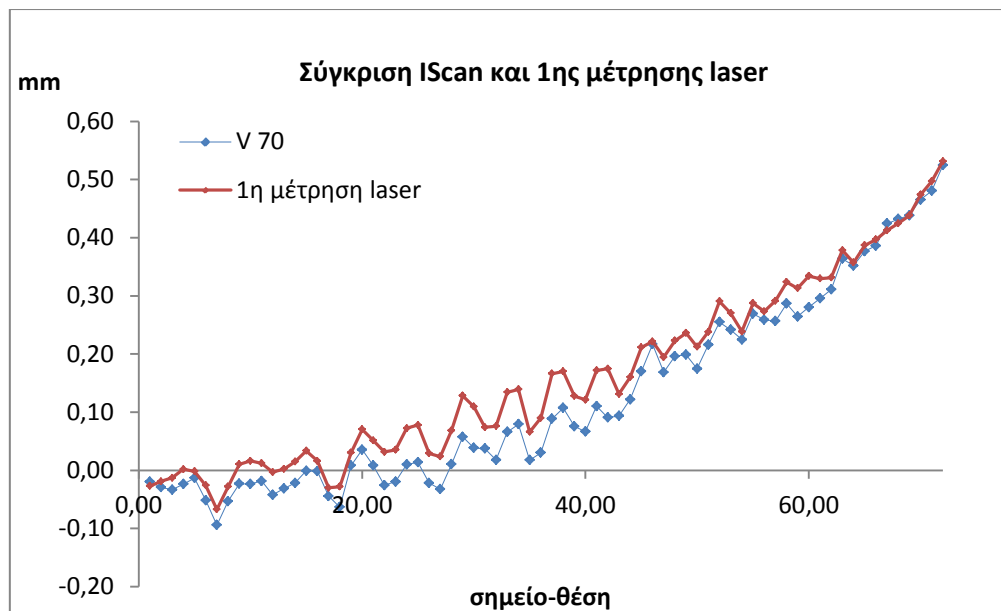
Σε αυτό το σημείο είναι δυνατή η συνολική εκτίμηση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν και η τυπική σύγκρισή τους. Θεωρείται περιττό να εκλάβουμε υπόψη τη μέτρηση με το εξάρτημα V 400.

Μια οπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων φαίνεται παρακάτω.



Διάγραμμα 8.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων IScan V 70 με το μέσο όρο των μετρήσεων του Optodyne laser

Ας δούμε όμως και μια σύγκριση του IScan V 70 με το 1^ο σετ μέτρησης του laser:



Διάγραμμα 8.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων IScan V 70 με τη 1^η μέτρηση του Optodyne laser

Όπως παρατηρούμε η μορφή των καμπυλών είναι ίδια ενώ το μόνο που αλλάζει είναι το πλάτος σε ορισμένα σημεία (κυρίως από τα 20 mm μέχρι τα 50 mm). Η μέγιστη διαφορά στο πρώτο διάγραμμα είναι της τάξης του 11,5 % ενώ στο δεύτερο της τάξης του 8,3%. Είναι πολύ πιθανό, λοιπόν, μία μέτρηση του laser νωρίτερα, χρονικά, από τη 1^η δική μας μέτρηση, να έδινε ακόμα πιο ταιριαστά αποτελέσματα. Για ακόμα μια φορά επιβεβαιώνεται το χρονικά συστηματικό σφάλμα του laser και η ανάγκη ρύθμισής του από την κατασκευάστρια εταιρία (π.χ. διόρθωση σταθερότητας δέσμης)

Τελικά, στην ερώτηση για το ποια από τις δύο μετρήσεις είναι η «πιο σωστή» απάντηση δε μπορεί να δοθεί με σιγουριά καθώς δεν υπάρχει μέτρο σύγκρισης. Ίσως, μια μέτρηση και με τις δύο μεθόδους π.χ. σε μια ήδη σωστά ρυθμισμένη εργαλειομηχανή να δώσει την τελική απάντηση.

8.2 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ)

Πριν μπούμε στο κομμάτι της επεξεργασίας και της μοντελοποίησης, θα κάνουμε μία γρήγορη ανασκόπηση στη θεωρία των νευρωνικών δικτύων.

Τα Τεχνητά Νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) αποτελούν μια προσπάθεια προσέγγισης της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου από μια μηχανή. Η αρχιτεκτονική τους βασίζεται στην αρχιτεκτονική των βιολογικών νευρωνικών δικτύων. Είναι μια συλλογή από νευρώνες που συνδέονται μεταξύ τους. ο κάθε νευρώνας έχει πολλές εισόδους αλλά μία έξοδο, η οποία με τη σειρά της μπορεί να αποτελεί είσοδο σε κάποιον άλλο. Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων διαφέρουν ως προς τη σημαντικότητά τους και προσδιορίζονται από συντελεστές βάρους, ενώ η επεξεργασία που λαμβάνει χώρα καθορίζεται από μια συνάρτηση μεταφοράς. Για να μπορέσει ένα τέτοιο δίκτυο να λειτουργήσει πρέπει πρώτα να υποστεί ένα είδος εκπαίδευσης [41].

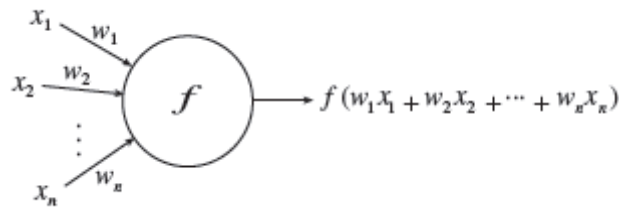
8.2.1 Ο τεχνητός νευρώνας

Ο τεχνητός νευρώνας είναι η βασική μονάδα επεξεργασίας σε ένα ΤΝΔ. Αποτελείται από n συνδέσεις εισόδου, κάθε μία από τις οποίες δέχεται ένα σήμα εισόδου x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) και χαρακτηρίζεται από έναν συντελεστή

βάρους w_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). Επιπρόσθετα, υπάρχει και η x_0 , που είναι μια είσοδος σταθερής διέγερσης με τιμή πάντα 1 και βάρος w_0 και ονομάζεται πόλωση (bias) ή κατώφλι (threshold) του νευρώνα.

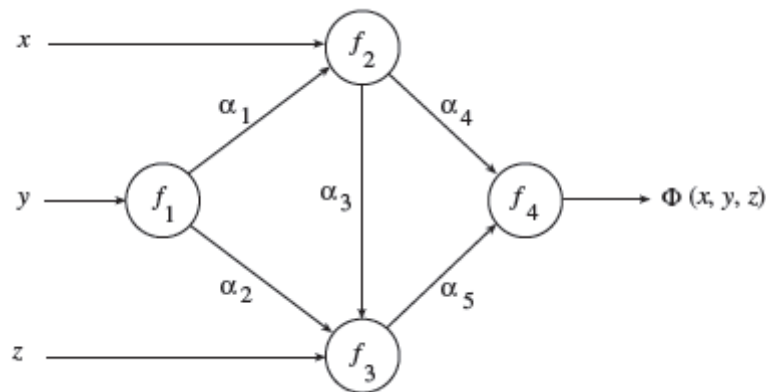
Ο υπολογισμός που επιτελεί ένας νευρώνας διακρίνεται σε δύο στάδια [41]:

- 1) Υπολογισμός της συνολικής εισόδου από έναν αθροιστή
- 2) Μείωση εύρους εξόδου με χρήση μιας συνάρτησης ενεργοποίησης



Σχήμα 8.1: Τεχνητός νευρώνας

Πολλοί νευρώνες μαζί σε μια συγκεκριμένη τοπολογία δημιουργούν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο.



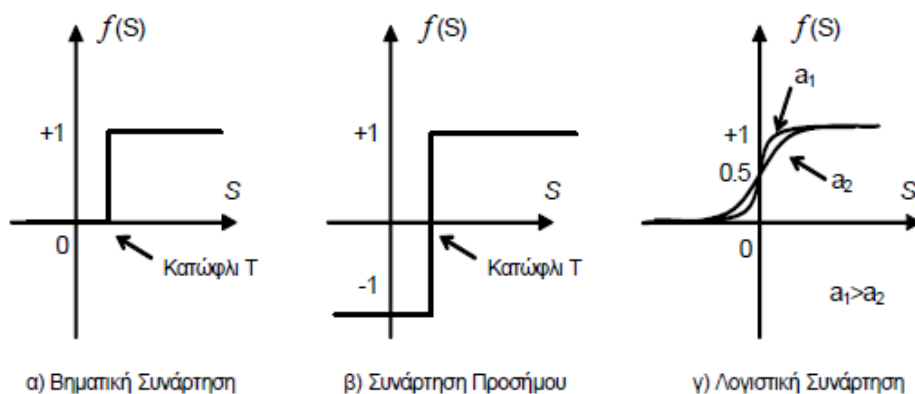
Σχήμα 8.2: Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο

8.2.2 Συναρτήσεις ενεργοποίησης

Η συνάρτηση ενεργοποίησης στο βιολογικό νευρώνα θεωρείται πως είναι η βηματική συνάρτηση ή συνάρτηση κατωφλιού (threshold function):

$$f(u) = \begin{cases} 1, & u \geq 0 \\ 0, & u \leq 0 \end{cases}$$

Στα ΤΝΔ συνήθως χρησιμοποιούμε συναρτήσεις που το γράφημά τους μοιάζει με αυτό της βηματικής, αλλά σε αντίθεση με αυτή είναι συνεχείς και παραγωγίσιμες. Οι συναρτήσεις αυτής της κατηγορίας ονομάζονται σιγμοειδής (sigmoids), διότι το γράφημά τους μοιάζει με τελικό σίγμα (ζ). Ο πιο γνωστός και ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος σιγμοειδούς συνάρτησης είναι η λογιστική (logistic).



Σχήμα 8.3: Τυπικές συναρτήσεις ενεργοποίησης ΤΝΔ

8.2.3 Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (feedforward)

Ανάλογα με τον τρόπο που λαμβάνει χώρα η επεξεργασία των δεδομένων στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρονται τα σήματα διαμέσου των συνδέσεων, διαχωρίζουμε τα δίκτυα αυτά σε δίκτυα προσοτροφοδότησης (feedforward neural networks) και σε δίκτυα αναδρομικά ή ανατροφοδότησης (recurrent neural networks). Στα δίκτυα προσοτροφοδότησης οι έξοδοι από το ένα επίπεδο νευρώνων μεταδίδονται αποκλειστικά και μόνο στα επόμενα επίπεδα. Αντίθετα, στα αναδρομικά δίκτυα ή δίκτυα ανατροφοδότησης οι έξοδοι των νευρώνων ενός επιπέδου μπορεί να συνδέονται ως είσοδοι σε οποιοδήποτε άλλο νευρώνα οποιοδήποτε επιπέδου (ακόμα και προηγούμενου).

8.2.4 Εκπαίδευση ΤΝΔ

Όπως αναφέραμε, για να μπορέσει να λειτουργήσει ένα ΤΝΔ πρέπει πρώτα να εκπαιδευτεί. Ο τρόπος εκπαίδευσής τους είναι με χρήση παραδειγμάτων, μέσω των οποίων μπορούν να εξάγουν ένα γενικό συμπέρασμα για το περιβάλλον και να το προσεγγίζουν [42] [43]. Ένα παράδειγμα περιλαμβάνει μία είσοδο και μία έξοδο για το νευρωνικό, ενώ το σύνολο των παραδειγμάτων αποτελεί το εκπαιδευτικό σύνολο.

Υπάρχουν διάφορα είδη μάθησης [42]:

- **Επιβλεπόμενη μάθηση ή μάθηση με επίβλεψη (supervised learning).** Ορίζεται μια συνάρτηση κόστους, η οποία εκφράζει την απόκλιση του δικτύου από τις επιθυμητές εξόδους και ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης αυτής. Στη μέθοδο αυτή απαιτείται να είναι γνωστή η επιθυμητή απόκριση για τα δεδομένα.
- **Ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning).** Εδώ, το ίδιο το δίκτυο προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει κάποια συνάρτηση που εκφράζει το συνολικό «δυναμικό» του, ώστε να καταλήξει ύστερα από μία δυναμική διαδικασία σε κατάσταση ισορροπίας. Η μάθηση αυτή καθώς προχωρά εξασφαλίζει τη γρηγορότερη σύγκλιση του δικτύου σε μία από τις καταστάσεις ισορροπίας.
- **Μη επιβλεπόμενη μάθηση (unsupervised learning).** Σε αυτόν τον τύπο μάθησης το δίκτυο μεταβάλλει τοπικά τις παραμέτρους ώστε να ικανοποιήσει κάποια συνάρτηση, η οποία είναι χαρακτηριστική του δικτύου και ανεξάρτητη του προβλήματος, δηλαδή των δεδομένων εισόδου.

8.2.5 Κριτήρια τερματισμού

Ο αλγόριθμος ανάστροφης τροφοδότησης γενικά δε συγκλίνει και δεν υφίστανται απόλυτα ορισμένα κριτήρια τερματισμού της λειτουργίας του. Στην πράξη, όμως, εφαρμόζονται κάποια λογικά κριτήρια, τα οποία οδηγούν στον τερματισμό της διαδικασίας εκπαίδευσης. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία ολοκληρωμένη τεχνική αξιολόγησης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Συγκεκριμένα, αξιοποιείται ένα ανεξάρτητο σύνολο προτύπων, που ονομάζεται *σύνολο επικύρωσης ή αξιολόγησης (validation set)*, και με βάση το μέγεθος των σφαλμάτων στο σύνολο αυτό υπολογίζεται

το συνολικό σφάλμα μοντέλου. Επομένως, αν δίνεται ένας αριθμός μοντέλων που έχουν εκπαιδευτεί με βάση το ίδιο *σύνολο εκπαίδευσης*, για να επιλεγεί το καλύτερο υπολογίζεται το σφάλμα καθενός για τα δεδομένα του συνόλου επικύρωσης και τέλος επιλέγεται εκείνο με το μικρότερο σφάλμα επικύρωσης. Συνήθως, για τον υπολογισμό του σφάλματος γενίκευσης του νευρωνικού δικτύου που τελικά επιλέγεται χρησιμοποιείται και ένα τρίτο σύνολο δεδομένων που ονομάζεται *σύνολο ελέγχου* (test set).

Ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί εδώ είναι αυτός της πίσω διάδοσης σφάλματος (Backpropagation) ενώ η μέθοδος εκπαίδευσης χαρακτηρίζεται ως επιβλεπόμενη (δηλαδή ορίζεται μια συνάρτηση κόστους την οποία το δίκτυο προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει.)

8.2.6 ΤΝΔ και ρομποτικοί βραχίονες

Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης των σφαλμάτων θέσης του ρομποτικού βραχίονα με ΤΝΔ. Έχει αναφερθεί ότι τα σφάλματα στο σύστημα μετάδοσης κίνησης [44], τα σφάλματα λόγω κατασκευαστικών παραμορφώσεων [45] καθώς και τα σφάλματα λόγω γεωμετρικών παραμέτρων του μοντέλου του ρομπότ [15] μπορούν να παρουσιαστούν ως μια κυκλική συνάρτηση των γωνιών των αρθρώσεων του. Με βάση αυτό, υποθέτουμε ότι το σφάλμα θέσης μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση των αρθρώσεων, ενώ ταυτόχρονα οι συναρτήσεις που περιγράφουν αυτά τα σφάλματα μπορούν να συνδυαστούν/προστεθούν.

8.3 Μοντελοποίηση

Ύστερα από τα συμπεράσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων μπορούμε με αρκετή σιγουριά να καταλήξουμε ότι ο χάρτης σφάλματος θέσης του ρομπότ έχει τη μορφή του Διαγράμματος 8.9. Τελικά, η καμπύλη που θα μοντελοποιήσουμε θα έχει αυτή τη μορφή ενώ οι αριθμητικές τιμές θα είναι αυτές του μέσου όρου των μετρήσεων του laser (καθώς τα σημεία επαλήθευσης μετρήθηκαν με το laser).

Για την εκπαίδευση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

- 1) Συλλογή των απαραίτητων δεδομένων
- 2) Δημιουργία του νευρωνικού δικτύου και προσδιορισμός των παραμέτρων του
- 3) Εκπαίδευση του δικτύου
- 4) Προσομοίωση του δικτύου για να διαπιστωθεί η καταλληλότητα του

Συλλογή δεδομένων

Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιούμε ως δεδομένα εισόδου τις συντεταγμένες αρθρώσεων J2, J3, J5 του ρομπότ για τις 72 θέσεις που ορίσαμε παραπάνω και κάναμε τις μετρήσεις μας (οι παράμετροι της ταχύτητας, της επιτάχυνσης και του φορτίου είναι σταθερές ¹). Τις τιμές αυτές τις παίρνουμε κατευθείαν από τον ελεγκτή και φαίνονται στο Παράρτημα Α. Ως δεδομένα εκπαίδευσης εξόδου χρησιμοποιούμε τις τιμές του συνολικού σφάλματος της τροχιάς που μετρήσαμε (βλ. Πίνακας 8.5).

Πέρα από την εκπαίδευση, πρέπει να γίνει και η επαλήθευση του δικτύου. Για τη συλλογή των δεδομένων επαλήθευσης έγιναν μετρήσεις σφάλματος θέσης σε τυχαία σημεία πάνω στη τροχιά (17 σημεία). Οι αντίστοιχες συντεταγμένες των αρθρώσεων βρίσκονται στο Παράρτημα Α. Η έξοδος αντίστοιχα των δεδομένων επαλήθευσης είναι τα μετρούμενα συνολικά σφάλματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Να αναφέρουμε ότι κανένα από αυτά τα σημεία δε συμπίπτει με κάποιο από τα σημεία εκπαίδευσης.

¹ Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έγιναν και μετρήσεις με ένα εύρος διαφορετικών ταχυτήτων – επιταχύνσεων χωρίς όμως να παρατηρηθεί μεταβολή του σφάλματος. Αυτό οφείλεται στο μικρό φορτίο. Θα είχε ενδιαφέρον η μέτρηση με διαφορετικά φορτία και κατόπιν η μελέτη του πόσο επηρεάζει η ταχύτητα και η επιτάχυνση για μεγάλα κυρίως φορτία (και άρα μεγαλύτερου εύρους δυναμικά φαινόμενα)

	Ανά βήμα	Συνολικό
1	-0,0008	-0,0008
2	-0,0071	-0,0079
3	-0,007	-0,0149
4	0,0105	-0,0044
5	0,0467	0,0423
6	0,0356	0,0779
7	0,0443	0,1221
8	0,0479	0,1701
9	0,0374	0,2075
10	-0,0215	0,1859
11	0,0437	0,2296
12	0,0198	0,2494
13	0,0694	0,3188
14	0,016	0,3348
15	0,0626	0,3974
16	0,0526	0,4501
17	0,132	0,5821

Πίνακας 8.8: Ανά βήμα και συνολικό σφάλμα μετρήσεων επαλήθευσης ΤΝΔ (σε mm)

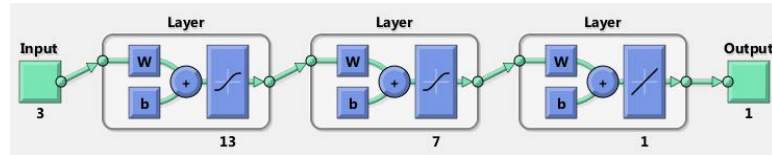
Προσδιορισμός παραμέτρων και εκπαίδευση

Η δημιουργία ενός νευρωνικού δικτύου (τοπολογία) και ο προσδιορισμός των διαφόρων παραμέτρων (π.χ. συναρτήσεις ενεργοποίησης, σύγκλιση) είναι μια διαδικασία αρκετά πολύπλοκη καθώς εξαρτάται άμεσα από το εκάστοτε πρόβλημα που καλείται να λύσει.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείτε είναι ο Levenberg-Marquardt, ο οποίος ελαχιστοποιεί το τετραγωνικό σφάλμα ανάμεσα στο επιθυμητό και το πραγματικό διάνυσμα εξόδου. Η διαδικασία ελαχιστοποίησης υλοποιείται με την ανανέωση βαρών που συνδέουν νευρώνες διαδοχικών επιπέδων και τον εκ νέου υπολογισμό του διανύσματος εξόδου και του τετραγωνικού σφάλματος, με αναδρομικό τρόπο.

Για την εύρεση της βέλτιστης τοπολογίας του δικτύου (με δύο κρυφά επίπεδα) έγινε προσπάθεια εύρεσης αυτοματοποιημένου τρόπου. Δυστυχώς, ύστερα από μικρή βιβλιογραφική έρευνα διαπιστώθηκε πως το πρόβλημα αυτό είναι αρκετά πολύπλοκο και απαιτεί τη χρήση εξελικτικών αλγορίθμων [46], [47]. Θα αρκεστούμε, επομένως, στον πειραματισμό με δοκιμές.

Η τοπολογία του δικτύου που εκλέγεται είναι αυτή με 13 νευρώνες στο 1^ο κρυφό επίπεδο και 7 στο 2^ο.



Εικόνα 8.1: Τοπολογία ΤΝΔ στο περιβάλλον Matlab

Πέρα από την τοπολογία όμως, υπάρχουν και άλλες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως οι συναρτήσεις ενεργοποίησης ή στις πόσες φορές (εποχές) συγκλίνει ο αλγόριθμος.

Η αρχικοποίηση των βαρών στη Matlab γίνεται με τυχαίο τρόπο και το τελικό αποτέλεσμα της εκπαίδευσης εξαρτάται άμεσα από αυτήν. Δηλαδή, με σταθερές παραμέτρους δικτύου όπως τοπολογία, συναρτήσεις ενεργοποίησης και εποχές, η εκπαίδευση του δικτύου δεν είναι μοναδική. Για να μπορέσουμε να επιλέξουμε τις συναρτήσεις ενεργοποίησης αλλά και το καλύτερα εκπαιδευμένο δίκτυο από ένα μεγάλο αριθμό εκπαιδύσεων δημιουργήθηκε κατάλληλος κώδικας (Παράρτημα Β – Netqualification.m).

Η λειτουργία του κώδικα είναι η εξής:

Για τον κάθε συνδυασμό συναρτήσεων ενεργοποίησης (tan-tan, tan-log, log-tan, log-log) εκπαιδεύουμε το δίκτυο τοπολογίας 3-13-7-1 πολλές φορές και κάθε φορά αποθηκεύουμε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) εκπαίδευσης και επικύρωσης. Στο τέλος καταλήγουμε με ένα μεγάλο πίνακα σφαλμάτων όπου με την εύρεση των ελαχίστων του μπορούμε να επιλέξουμε το δίκτυο με την καλύτερη εκπαίδευση. Χρησιμοποιείται, δηλαδή, ως κριτήριο επιλογής το μικρότερο MSE ενώ οι εποχές εκπαίδευσης είναι ίδιες σε όλες τις δοκιμές. Στην παρούσα εργασία το κάθε δίκτυο εκπαιδεύτηκε 40 φορές με 5000 εποχές. Τα αποτελέσματα του κώδικα είναι:

Συναρτήσεις	Ελάχιστο MSE		# εκπαίδευσης
	Εκπαίδευση	Επικύρωση	
tan-tan	7	7	}
tan-log	33	37	
log-tan	8	40	
log-log	26	19	

Πίνακας 8.9: Τα καλύτερα εκπαιδευμένα δίκτυα για το κάθε συνδυασμό συναρτήσεων ενεργοποίησης


```
>> Netqualification
Smallest train and Validation SME for tansig-tansig function is in net 7
=====
Different minimum train and Validation MSE for tansig-logsig
...Choosing according to minimum Validation MSE error
Smallest Validation SME error for tansig-logsig functions is in net 37
=====
Different minimum train and Validation MSE for logsig-tansig
...Choosing according to minimum Validation MSE error
Smallest Validation SME error for logsig-tansig functions is in net 40
=====
Different minimum train and Validation MSE for logsig-logsig
...Choosing according to minimum Validation MSE error
Smallest Validation SME error for logsig-logsig functions is in net 19
=====
-----
Overall Results
MSEtrain  MSEval
      7      7
     33     37
      8     40
     26     19
-----
```

Εικόνα 8.2: Αναφορά κώδικα Matlab

Παρατηρούμε ότι για το συνδυασμό tan – tan έχουμε ελάχιστο MSE για την εκπαίδευση και την επικύρωση ταυτόχρονα. Για αυτό το λόγο επιλέγουμε ως συνάρτηση ενεργοποίησης την tansig – tansig. Το καλύτερα εκπαιδευμένο δίκτυο είναι αυτό της 7^{ης} φοράς (χωρίς να σημαίνει ότι και με τις άλλες συναρτήσεις δε μπορούμε να έχουμε εξίσου καλά αποτελέσματα).

Υπενθυμίζουμε ότι αυτά τα αποτελέσματα είναι για συγκεκριμένη τοπολογία και δε μπορούν να γενικευτούν. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η συνάρτηση tan – tan συμπεριφέρεται καλύτερα για το σετ δεδομένων που έχουμε σε σύγκριση με τους άλλους συνδυασμούς χωρίς όμως να σημαίνει ότι αυτοί απορρίπτονται ως μη κατάλληλοι. Οι διαφορές είναι αρκετά μικρές και ίσως με περαιτέρω έρευνα και διαφορετικά κριτήρια να βρεθεί ένας καταλληλότερος συνδυασμός.

Για τη συνολική εικόνα του αποτελέσματος δημιουργούμε τον παρακάτω πίνακα.

	Ελάχιστο Σφάλμα Εκπαίδευσης (mm)			
Συνάρτηση ενεργοποίησης	tan-tan	tan-log	log-tan	log-log
# εκπαίδευσης	7	33	8	26
Μέσο Απόλυτο σφάλμα (MAE)	0,0014	0,0021	0,002	0,0023
Μέσο σφάλμα τετραγώνων (MSE)	0,00152	0,00157	0,00157	0,002
εποχές	3119	1146	1340	1820

	Ελάχιστο Σφάλμα Επικύρωσης (mm)			
Συνάρτηση ενεργοποίησης	tan-tan	tan-log	log-tan	log-log
# εκπαίδευσης	7	37	40	19
Μέσο Απόλυτο σφάλμα (MAE)	0,01	0,0088	0,0085	0,0105
Μέσο σφάλμα τετραγώνων (MSE)	0,0029	0,0029	0,0029	0,0031

Πίνακας 8.10: Συγκριτικός πίνακας συνδυασμών των συναρτήσεων ενεργοποίησης

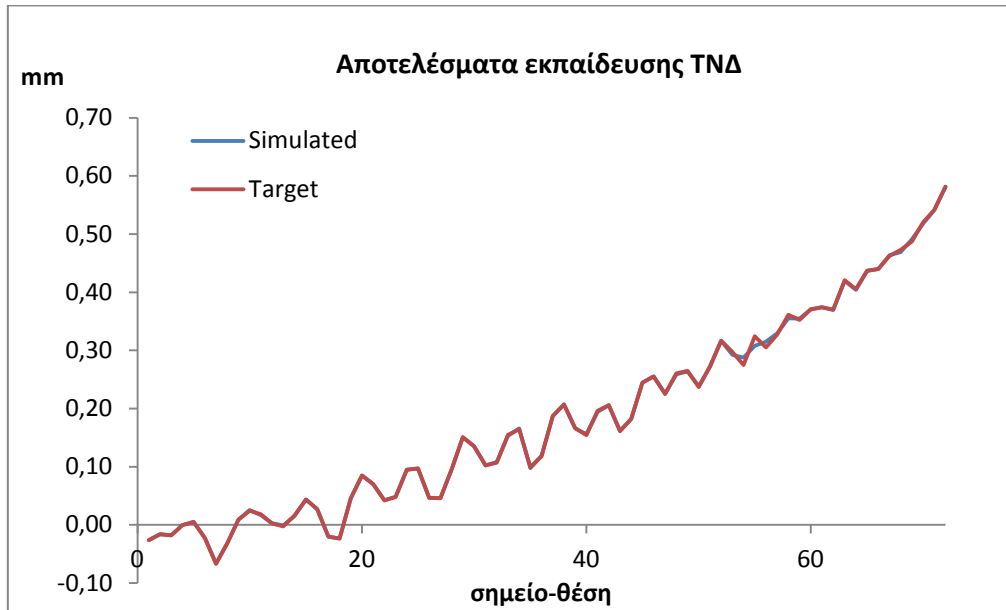
Εκπαίδευση

Η εκπαίδευση του δικτύου έγινε μέσα από την προηγούμενη διαδικασία.

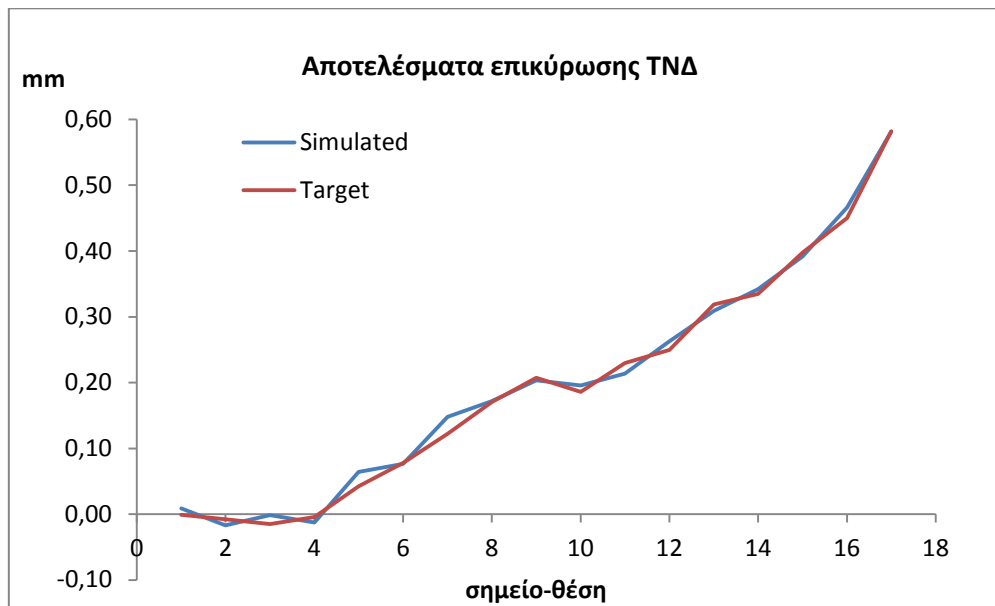
Προσομοίωση – Επαλήθευση αποτελεσμάτων

Τελευταίο βήμα, για να σιγουρευτούμε ότι το εκπαιδευμένο δίκτυο είναι κατάλληλο, είναι η προσομοίωσή του και η οπτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.

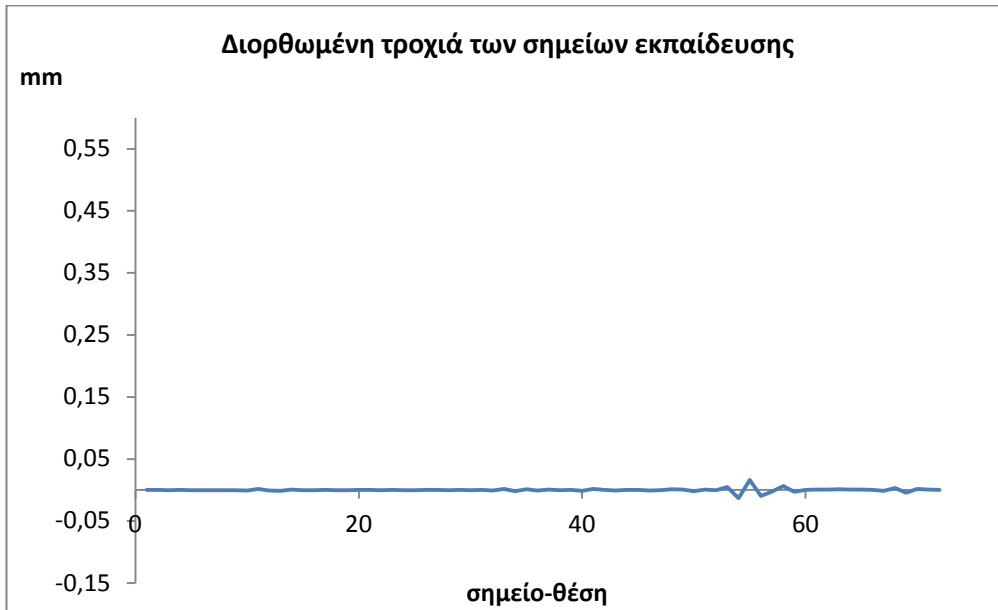
Από τα διαγράμματα 8.10 και 8.11 βλέπουμε ότι τα προσομοιωμένα δεδομένα προσεγγίζουν τα πραγματικά με πολύ καλή ακρίβεια. Καταφέραμε και μοντελοποιήσαμε τα μετρούμενα σφάλματα θέσης ενώ ταυτόχρονα το ΤΝΔ δεν έχασε τη γενικότητά του για όλο το εύρος της κίνησης. Στα διαγράμματα 8.12 και 8.13 βλέπουμε τα αποτελέσματα της αντιστάθμισης του σφάλματος θέσης.



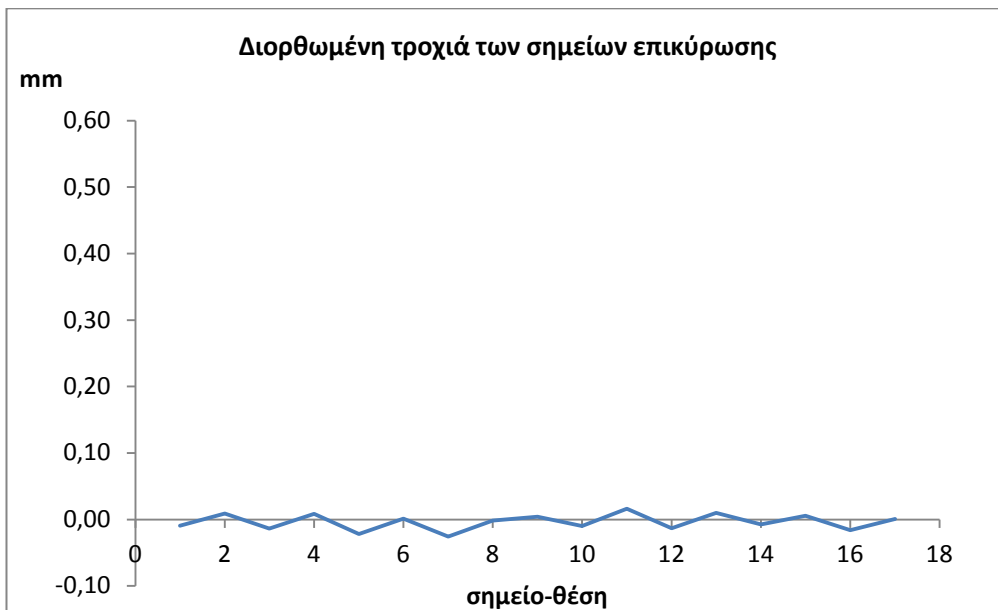
Διάγραμμα 8.10: Προσομοίωση ΤΝΔ στα δεδομένα εκπαίδευσης



Διάγραμμα 8.11: Προσομοίωση ΤΝΔ στα δεδομένα επικύρωσης



Διάγραμμα 8.12: Σφάλματα θέσης της τροχιάς μετά την αντιστάθμισή τους από το ΤΝΔ



Διάγραμμα 8.13: Σφάλματα θέσης των σημείων επικύρωσης μετά την αντιστάθμισή τους από το ΤΝΔ

Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα – Έρευνα

9.1 Ανασκόπηση μελέτης

Το όλο εγχείρημα μέτρησης σφάλματος θέσης ρομποτικού βραχίονα είναι αρκετά πολύπλοκο και απαιτεί τη ρύθμιση και εξέταση πολλών παραμέτρων καθώς και τη διεξαγωγή μεγάλου αριθμού χρονοβόρων πειραμάτων ώστε να θεωρηθεί επιτυχές. Δυστυχώς, στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας ο χρόνος είναι περιορισμένος και για αυτό κάποιες παραδοχές – απλοποιήσεις θεωρούνται απαραίτητες. Ταυτόχρονα όμως, το ίδιο εγχείρημα είναι αρκετά ενδιαφέρον. Η κατανόηση του πως συμπεριφέρονται τα ρομπότ μέσω της κινηματικής τους και η αναζήτηση νέων μεθόδων για τον προγραμματισμό τους, βάζει τον μηχανικό στο επίκεντρο της τεχνολογίας ενώ παράλληλα του προσφέρει γνώσεις από πολλούς διαφορετικούς τομείς.

9.1.1 Μετρήσεις

Όσον αφορά το κομμάτι των μετρήσεων, η δυσκολία έγκειται στη μεγάλη ακρίβεια και μικρή επαναληψιμότητα του ρομποτικού βραχίονα Staubli RX 90. Ο μετρητικός εξοπλισμός πρέπει να είναι καλά ρυθμισμένος ενώ όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν το σύστημα θα πρέπει να ταυτοποιηθούν και να προσδιοριστούν.

Οι παράμετροι ταχύτητα, επιτάχυνση και φορτίο θεωρήθηκαν σταθερές για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Για την ακρίβεια (μετά από μετρήσεις που έγιναν) δε θα είχε πολύ νόημα η εξέταση διαφορετικών ταχυτήτων και επιταχύνσεων με ένα σταθερό μικρό φορτίο (ίσως <3 kg) καθώς η αδράνεια μάζας είναι ο βασικός παράγοντας των κινηματικών και δυναμικών

σφαλμάτων. Η μάζα των μελών του ρομπότ συνήθως είναι υπολογισμένη από τον κατασκευαστή και δεν επηρεάζει από μόνη της.

9.1.2 Εξοπλισμός

Η ακρίβεια του εξοπλισμού LDDM MCV500 είναι πολύ καλή για μετρήσεις κλίμακας δεκάδων μm και αυτό επαληθεύεται από τον Πίνακα 8.4 (επαληθεύτηκε η επαναληψιμότητα του βραχίονα). Παρόλα αυτά εκτιμάται ότι υπεισέρχεται συστηματικό σφάλμα που οφείλεται στην κακή ρύθμιση του laser.

Όσον αφορά το 3D σαρωτή IScan M300, μπορούμε να πούμε ότι επεκτείναμε τη λειτουργία του στο να μετράει αποστάσεις. Η ακρίβειά του εξαρτάται από το εξάρτημα καμερών που χρησιμοποιείται. Για το πείραμά μας, η απόδοση των καμερών V400 δε μπορεί να χαρακτηριστεί ως ικανοποιητική (43μm). Από την άλλη πλευρά, η ακρίβεια των καμερών V 70 είναι πλήρως ικανοποιητική παρά την αβεβαιότητα του σφάλματος που προστίθεται λόγω της μεθόδου προσέγγισης γεωμετριών που χρησιμοποιήθηκε στο περιβάλλον προγραμματισμού Matlab. Βασικό πλεονέκτημα της μέτρησης με το 3D σαρωτή είναι η δυνατότητα πλήρους αυτοματοποίησης της διαδικασίας μέσω καμερών στο χώρο, χωρίς να επηρεάζει τη λειτουργία του βραχίονα.

9.1.3 Μοντελοποίηση

Για το κομμάτι της μοντελοποίησης, η μέθοδος των νευρωνικών δικτύων μπορεί να προσεγγίσει την πραγματική τροχιά του άκρου του βραχίονα με ικανοποιητική ακρίβεια. Εννοείται πως το σφάλμα θέσης δεν αντισταθμίζεται εξ' ολοκλήρου αλλά μπορεί να μειωθεί σε σημαντικό ποσοστό. Η εύρεση της βέλτιστης τοπολογίας παραμένει δύσκολη διαδικασία αλλά πέρα από εκεί, η εκπαίδευση του δικτύου μπορεί να αυτοματοποιηθεί.

Να τονίσουμε πως ο όρος «μοντελοποίηση σφάλματος» απέχει από αυτόν της «αντιστάθμισής» του. Στην ουσία, με τη μοντελοποίηση ξέρουμε το σφάλμα που πρέπει να διορθωθεί αλλά όχι τη μέθοδο με την οποία θα το κάνουμε αυτό. Θα μπορούσαμε π.χ. με σφάλμα -0.1 mm απλά να πούμε στο ρομπότ να κινηθεί κατά 10,1 mm για να διανύσει την απόσταση των 10 mm με βάση πάντα το νευρωνικό δίκτυο. Αυτή η μέθοδος όμως, δεν εγγυάται αποτελέσματα καθώς και η διορθωτική κίνηση θα περιλαμβάνει σφάλματα. Καθώς λοιπόν θα διερευνούμε σε αυτό το επίπεδο, θα καταλήξουμε ότι η

λύση του προβλήματος έγκειται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στην ικανότητα του συστήματος μετάδοσης κίνησης (επενεργητές, κιβώτια) και της ανάλυσης του ελεγκτή να εκτελούν τις απαραίτητες διορθώσεις.

9.2 Περαιτέρω έρευνα

Όπως αναφέραμε, θα είχε αρκετό ενδιαφέρον η μελέτη της συμπεριφοράς του βραχίονα για μεγαλύτερα φορτία. Ο κατασκευαστής εγγυάται καλή ακρίβεια μέχρι 6 kg ενώ αναφέρει ότι και μέχρι 11 kg με συγκεκριμένη χρήση τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Χρειάζεται προσοχή με πόσα κιλά θα πειραματιστούμε και σε τι ταχύτητες. Πάντως μία καλή έρευνα πάνω σε αυτή την κατεύθυνση σε συνδυασμό με μία παρόμοια μέθοδο μοντελοποίησης του σφάλματος με αυτή που έγινε στην παρούσα εργασία θα μπορούσε να επεκτείνει τη λειτουργία του βραχίονα και σε περισσότερα κιλά φορτίου. Επίσης, η ίδια έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί σε κατακόρυφες κινήσεις του άκρου και μετατροπή του βραχίονα από ρομπότ ψεκασμού σε ρομπότ μεταφοράς και τοποθέτησης αντικειμένων μέτριων βαρών (βλ. Παράρτημα Α για το φορτίο).

Μια άλλη κατεύθυνση έρευνας είναι αυτή της πλήρους αυτοματοποίησης των μετρήσεων π.χ. τοποθετώντας συστήματα τύπου 3D σαρωτή στο χώρο θα μπορούσαμε να μετρήσουμε το σφάλμα θέσης σε οποιαδήποτε θέση; Έστω ότι ένα βιομηχανικό ρομπότ κινείται σε συγκεκριμένη τροχιά (όχι αναγκαστικά ευθεία). Μπορούμε να παρακολουθούμε το άκρο του (π.χ. ειδικοί στόχοι) και να μετρήσουμε 3D σφάλματα σε σχέση με ένα σύστημα συντεταγμένων που έχει προκύψει από κάποιο 3D περιβάλλον ή από φωτογραμμετρία;

Τέλος μια πιο «υπολογιστική» έρευνα θα μπορούσε να είναι η εξαγωγή του πραγματικού κινηματικού μοντέλου του ρομπότ (παράμετροι DH) από μετρήσεις σφάλματος θέσης και η σύγκρισή του με αυτό του κατασκευαστή. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατός ο προσδιορισμός του είδους του σφάλματος (κατασκευαστικό, δυναμικό, κινηματικό) που επηρεάζει περισσότερο την κίνηση του βραχίονα και άρα τη δημιουργία ενός πιο ρεαλιστικού χάρτη σφάλματος.

Βιβλιογραφία

- [1] Johanna Wallén, "The history of the industrial robot," LiTH-ISY-R-2853, 2008.
- [2] Yoram Koren, *Robotics for Engineers*. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [3] John J. Craig, "Robot mechanism design," in *Introduction to Robotics, Mechanics and Control*, 3rd ed., 2008, pp. 318-322.
- [4] Γ.Βοσνιάκος, "Εισαγωγή στη Ρομποτική για Συστήματα Κατεργασιών," in *Σημειώσεις μαθήματος Συστήματα Κατεργασιών*.
- [5] M. P. Groover, "Chapter 8," in *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, 3rd ed., 2008.
- [6] Bennett Brumson. (2009, Febr) Robotics Online. [Online]. http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Feature-Article/Robotic-Simulation-and-Off-line-Programming:-From-Academia-to-Industry/content_id/1825
- [7] Vitor Bottazzi and Jaime Fonseca, *Off-line Programming Industrial Robots Based in the Information Extracted From Neutral Files Generated by the Commercial CAD Tools, Industrial Robotics: Programming Simulation and Applications, Low Kin Huat (Ed.), ISBN: 3-86611-286-6, InTech.: Department of Industrial Electronics - University of Minho Portugal, 2006.*
- [8] ISO 9283, *Manipulating industrial robots—performance criteria and related test methods.*: International Standards, 1998.
- [9] K.L. Conrad, T.C. Yih, P.S. Shiakolas, "ON THE ACCURACY, REPEATABILITY, AND DEGREE OF INFLUENCE OF KINEMATICS PARAMETERS FOR INDUSTRIAL ROBOTS," *International Journal of Modelling and Simulation*, Vol. 22, No. 3, 2002.
- [10] http://engineeronadisk.com/V2/book_integration/engineeronadisk-14.html.
- [11] Jennifer Kay, "Introduction to Homogeneous Transformations & Robot Kinematics," Rowan University Computer Science Department, January 2005.
- [12] J.M. Hollerbach and C.W. Wampler, "The calibration index and taxonomy for robot kinematic calibration methods," *International Journal of Robotics*

Research 15 (6),p. 573–591, 1996.

- [13] B.W. Mooring, Z.S. Roth, and M.R. Driels, "Fundamentals of Manipulator Calibration," John Wiley, New York, 1991.
- [14] Z.S. Roth, B.W. Mooring, and B. Ravani, "An overview of robot calibration," IEEE Transactions on Robotics and Automation 3 (5) p.377–385, 1987.
- [15] J.H. Jang, S.H. Kim, and Y.K. Kwak, "Calibration of geometric and non-geometric errors of an industrial robot," Robotica 19,p.311–321, 2001.
- [16] W.S. Newman, C.E. Birkhimer, R.J. Horning, and A.T. Wilkey, "Calibration of a Motoman P8 robot based on laser tracking," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation,p. 3597–, 2000.
- [17] M.R. Driels and U.S. Pathre, "Significance of observation strategy on the design of robot calibration experiments," Journal of Robotic Systems 7 (2),p.197–223., 1990.
- [18] G. Zak, B. Benhabib, R.G. Fenton, and I. Saban, "Application of the weighted least squares parameter estimation method to the robot calibration," ASME Journal of Mechanical Design 116,p. 890–893, 1994.
- [19] J.M. Renders, E. Rossignol, M. Becquet, and R. Hanus, "Kinematic calibration and geometrical parameter identification for robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation 7 (6),p. 721–732, 1991.
- [20] Ph. Drouet, S. Dubowsky, S. Zegloul, and C. Mavroidis, "Compensation of geometric and elastic errors in large manipulators with an application to a high accuracy medical system," Robotica 2,p. 341–352., 2002.
- [21] A. Omodei, G. Legnani, and R. Adamini, "Three methodologies for the calibration of industrial manipulators: experimental results on a SCARA robot," Journal of Robotic Systems 17 (6) ,p. 291–307., 2000.
- [22] J. O. Berg, "Robot Accuracy: A Matter of Programming," 1992.
- [23] Bernhardt R., Albright S., Wörn H., Kyles S.,Albada D.V., Smyth J., Meyer R Schröer K., "Calibration applied to quality control in robot production," 1992.
- [24] G Alici and B Shirinzadeh, "A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing," Mechanism and Machine Theory 40 879–906, 2005.

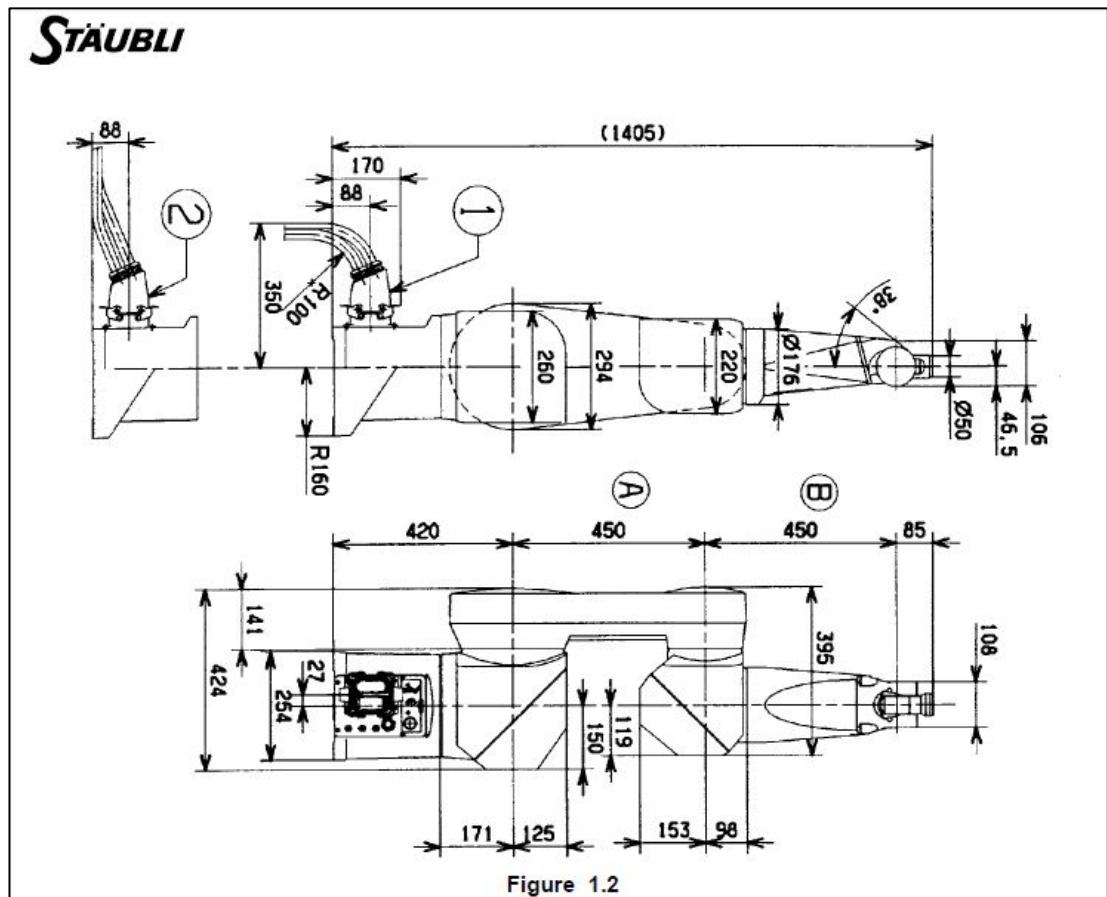
- [25] G. Alici, R. Jagielski, Y. Ahmet Sekercioglu, and B. Shirinzadeh, "Prediction of geometric errors of robot manipulators with Particle Swarm Optimisation method," *Robotics and Autonomous Systems* 54,956–966, 2006.
- [26] J Yin and Y Gao, "Pose Accuracy Calibration of a Serial Five DOF Robot," *Energy Procedia* 14 977-982, 2012.
- [27] H Pan, J Polden, N Larkin, S Van Duin, and J Norrish, "Recent progress on programming methods of industrial robots," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28, 87–94, 2012.
- [28] Kim Chang-Sei, Hong Keum-Shik, Han Hans Yong-Sub, Kim Soo-Ho, and Kwon Soon-Chang, "PC-based off - line programming using VRML for welding robots," *Proceedings of the IEEE conference on robotics, automation and mechatronics*,vol.2,p.949–54, 2004.
- [29] Chong JWS, Ong S, Nee AYC , and Youcef-Youmi K, "Robot programming using augmented reality:An interactive method for planning collision-free paths," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* ,25(3):689–701., 2009.
- [30] <http://www.staubli.com>.
- [31] <http://www.optodyne.com>.
- [32] Computer Vision CITS4240, Stereo and Structured Light, School of Computer Science & Software Engineering, The University of Western Australia.
- [33] G. Vogiatzis, P. H. S. Torr, and R. Cipolla, "Multi-view stereo via volumetric graphcuts," In *CVPR*, volume 1, pages 391–398, 2005.
- [34] Jason Geng, "Structured-light 3D surface imaging: A tutorial," *IEEE Intelligent Transportation System Society*, , 11001 Sugarbush Terrace,Rockville,Maryland 20852, USA, Doc. ID 134160, 2011.
- [35] www.imetric.com.
- [36] IMetric, "IMetric training brochure,".
- [37] Weingarten J.W, Gruener G., and R. Siegwart, "Probabilistic plane fitting in 3d and an application to robotic mapping," *IEEE international conferencec*, Vol.1.,pp.927-932, 2004.
- [38] Chien-Ming H. and Yi-Hsing Tseng, "PLANE FITTING METHODS OF LIDAR POINT CLOUD," Department of Geomatics, National Cheng Kung University, No.1

University Road,.

- [39] JD Long. (2010, September 16) Principal Component Analysis (PCA) vs Ordinary Least Squares (OLS): A Visual Explanation. <http://www.cerebralmastication.com/2010/09/principal-component-analysis-pca-vs-ordinary-least-squares-ols-a-visual-explanation/>.
- [40] Piere Alliez, "Linear Least Squares Fitting," INRIA,.
- [41] Raul Rojas, "Neural Networks:A Systematic Introduction," Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [42] S. Haykin, "NEURAL NETWORKS: A Comprehensive Foundation," Macmillan Publishing Company, N.Y., ISBN 0-02-352761-7, 1994.
- [43] M. T. Hagan, H. B. Demuth, and M. Beale, "NEURAL NETWORK DESIGN," PWS Publishing Company, Boston, ISBN 0-534-94332-2, 1996.
- [44] D.E. Whitney, C.A. Lozinsk, and J.M. Bourke, "Industrial robot forward calibration method," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 108, 1986.
- [45] R.P. Dudd and A.B. Knasinski, "A technique to calibrate industrial robots with experimental verification," IEEE Transactions on Robotics and Automation 6 (1),p.20–30, 1990.
- [46] Matteo Matteucci, "ELearNT: Evolutionary Learning of Rich Neural Network Topologies," Center for Automated Learning and Discovery,School of Computer Science,Carnegie Mellon University, N. CMU-CALD-02-103,.
- [47] E. Vonk, L.C. Jain, L.P.J. Veelenturf, and R. Johnson, "Automatic Generation of a Neural Network Architecture Using Evolutionary Computation," IEEE, 0-8186-7085-1, 1995.
- [48] Lindsay I Smith, "A tutorial on Principal Components Analysis," University of Otago, Department of Computer Science, February 26, 2002.

Παράρτημα Α

Διαστάσεις ρομποτικού βραχίονα Staubli RX 90



Τεχνικά χαρακτηριστικά βραχίονα Staubli RX 90

1.4. PERFORMANCE

See figure 1.4

- ① Brake release access area
- ② Area accessible in righty configuration

	STANDARD ARM
Work envelope	
R.M max. reach between joints 2 and 5	900 mm
R.m min. reach between joints 2 and 5	289 mm
R.b reach between joints 3 and 5	450 mm
Maximum speed at load center of gravity	11 m/s
Repeatability at constant temperature	± 0.02 mm

1.4.1. TORQUE LIMITS

	REFERENCE JOINT		
	JOINT 5 (Z ₆)	JOINT 6 (Z ₇)	
Static torque (Nm)	24 ⁽¹⁾	14 ⁽²⁾	10
Peak torque (Nm)	100 ⁽¹⁾	57 ⁽²⁾	43

- (1) if joint 6 torque = 0
- (2) for maximum torque on joint 6

1.4.2. AMPLITUDE, SPEED AND RESOLUTION

Joint	1	2	3	4 ⁽¹⁾	5	6
Amplitude (°)	320	275	285	540	225	540 ⁽²⁾
Working range distribution (°)	A ± 160	B ± 137.5	C ± 142.5	D ± 270	E +120 -105	F ± 270
Nominal speed (°/s)	236	200	286	401	320	580
Maximum speed (°/s)	356	356	296	409	800	1125 ⁽³⁾
Angular resolution (°·10 ⁻³)	0.87	0.87	0.72	1	1.95	2.75

- (1) For 5-joint arms, joint 4 is fixed. Joint 5 corresponds to joint 4 and joint 6 to joint 5 of the software.
- (2) Multiturn version available as an option.
- (3) without axis 5 interaction.

Low speed for manual control pendant:

- cartesian mode 250 mm/s
- revolute mode: 10% of nominal speeds

Maximum Cartesian speed: 2 m/s

CAUTION:

In some arm configurations, the maximum joint speeds can be reached only if payloads and inertias are reduced.

1.5.1. LOAD CAPACITY (figure 1.5)

Load characteristics:

Load center of gravity position (M): z = 150 mm from centerline of joint 5 and x = 75 mm from centerline of joint 6 (figure 1.5).

Load capacity	Standard arm
At nominal speed ⁽¹⁾	6 kg
At reduced speed ⁽¹⁾	9 kg
In some configurations (consult us)	12 kg

(1) in all configurations and taking maximum inertias into account. See table below.

	NOMINAL INERTIAS (kg.m ²)		MAXIMAL INERTIAS (kg.m ²) ⁽²⁾	
	STANDARD ARM		STANDARD ARM	
For joint 5	0.135		0.675	
For joint 6	0.034		0.170	

(2) under reduced speed and acceleration conditions:

For CS7B: SP60, ACC(8) 50, 50

For CS8: VEL = 60%, ACC = 30%, DEC = 30%

CAUTION:

The nominal values can be exceeded to a certain extent but imply a limitation to the speed and the acceleration of the arm. If these limits are to be exceeded, please consult STÄUBLI.

1.5.2. ATTACHMENT OF ADDITIONAL LOAD ON FOREARM

An additional load can be attached to the forearm using 4 M5 screws; maximum torque is 7 Nm.

Position of 4 M5 tapped holes: See figure 1.6.

DIMENSIONS	STANDARD ARM	LONG ARM
A	167.5 ± 1 mm	272 ± 1 mm
B	6°	4.5°

CAUTION:

The additional load depends on nominal load (see next page); in all cases, do not exceed load characteristics.

Συντεταγμένες άκρου στο χώρο στις θέσεις μετρούμενης τροχιάς

	X/J1	Y/J2	Z/J3	y/J4	p/J5	r/J6
track10[0]	22.244	-330.000	200.874	93.839	176.618	-126.342
track10[1]	22.239	-340.000	200.873	93.845	176.618	-126.336
track10[2]	22.244	-350.000	200.876	93.843	176.617	-126.338
track10[3]	22.240	-360.000	200.876	93.861	176.618	-126.318
track10[4]	22.244	-370.000	200.871	93.834	176.617	-126.346
track10[5]	22.241	-380.000	200.878	93.846	176.618	-126.336
track10[6]	22.244	-390.000	200.869	93.845	176.617	-126.336
track10[7]	22.237	-400.000	200.873	93.831	176.618	-126.350
track10[8]	22.238	-410.000	200.875	93.838	176.618	-126.343
track10[9]	22.239	-420.000	200.869	93.831	176.618	-126.349
track10[10]	22.246	-430.000	200.872	93.846	176.619	-126.333
track10[11]	22.244	-440.000	200.873	93.845	176.617	-126.338
track10[12]	22.239	-450.000	200.880	93.847	176.619	-126.333
track10[13]	22.241	-460.000	200.873	93.835	176.618	-126.344
track10[14]	22.242	-470.000	200.869	93.843	176.617	-126.339
track10[15]	22.239	-480.000	200.874	93.835	176.617	-126.344
track10[16]	22.238	-490.000	200.875	93.831	176.617	-126.349
track10[17]	22.247	-500.000	200.879	93.846	176.618	-126.335
track10[18]	22.240	-510.000	200.877	93.845	176.618	-126.337
track10[19]	22.240	-520.000	200.870	93.846	176.618	-126.332
track10[20]	22.240	-530.000	200.878	93.833	176.619	-126.348
track10[21]	22.239	-540.000	200.870	93.837	176.618	-126.342
track10[22]	22.239	-550.000	200.874	93.843	176.617	-126.337
track10[23]	22.243	-560.000	200.879	93.835	176.618	-126.346
track10[24]	22.240	-570.000	200.875	93.844	176.617	-126.340
track10[25]	22.242	-580.000	200.867	93.838	176.617	-126.342
track10[26]	22.239	-590.000	200.876	93.834	176.618	-126.350
track10[27]	22.242	-600.000	200.879	93.832	176.620	-126.349
track10[28]	22.240	-610.000	200.874	93.846	176.617	-126.336
track10[29]	22.237	-620.000	200.880	93.845	176.618	-126.335
track10[30]	22.241	-630.000	200.873	93.847	176.618	-126.335
track10[31]	22.235	-640.000	200.877	93.831	176.618	-126.350
track10[32]	22.236	-650.000	200.873	93.834	176.618	-126.345
track10[33]	22.247	-660.000	200.871	93.838	176.617	-126.343
track10[34]	22.238	-670.000	200.878	93.843	176.618	-126.338
track10[35]	22.240	-680.000	200.870	93.832	176.617	-126.348
track10[36]	22.242	-690.000	200.870	93.839	176.616	-126.343
track10[37]	22.246	-700.000	200.877	93.832	176.618	-126.350
track10[38]	22.228	-710.000	200.882	93.855	176.618	-126.325
track10[39]	22.248	-720.000	200.882	93.833	176.618	-126.350
track10[40]	22.246	-730.000	200.870	93.843	176.617	-126.339
track10[41]	22.236	-740.000	200.867	93.853	176.616	-126.330
track10[42]	22.231	-750.000	200.865	93.830	176.616	-126.350
track10[43]	22.238	-760.000	200.879	93.844	176.617	-126.335
track10[44]	22.239	-770.000	200.872	93.841	176.617	-126.339
track10[45]	22.233	-780.000	200.874	93.838	176.618	-126.341
track10[46]	22.229	-790.000	200.875	93.852	176.617	-126.328
track10[47]	22.233	-800.000	200.878	93.834	176.617	-126.348
track10[48]	22.242	-810.000	200.872	93.833	176.617	-126.347
track10[49]	22.231	-820.000	200.865	93.831	176.616	-126.346
track10[50]	22.238	-830.000	200.877	93.833	176.618	-126.347
track10[51]	22.251	-840.000	200.874	93.834	176.617	-126.345
track10[52]	22.233	-850.000	200.883	93.835	176.618	-126.344
track10[53]	22.247	-860.000	200.869	93.836	176.616	-126.346
track10[54]	22.241	-870.000	200.885	93.856	176.619	-126.323
track10[55]	22.232	-880.000	200.876	93.840	176.618	-126.337
track10[56]	22.228	-890.000	200.866	93.841	176.617	-126.339
track10[57]	22.233	-900.000	200.877	93.845	176.618	-126.334
track10[58]	22.233	-910.000	200.862	93.830	176.616	-126.348
track10[59]	22.241	-920.000	200.872	93.833	176.617	-126.346
track10[60]	22.242	-930.000	200.877	93.854	176.618	-126.325
track10[61]	22.241	-940.000	200.859	93.839	176.615	-126.342
track10[62]	22.247	-950.000	200.875	93.843	176.616	-126.338
track10[63]	22.234	-960.000	200.871	93.845	176.616	-126.334
track10[64]	22.233	-970.000	200.862	93.831	176.617	-126.348
track10[65]	22.225	-980.000	200.867	93.832	176.616	-126.345
track10[66]	22.242	-990.000	200.881	93.836	176.618	-126.346
track10[67]	22.239	-1000.000	200.868	93.853	176.617	-126.325
track10[68]	22.249	-1010.000	200.877	93.837	176.618	-126.346
track10[69]	22.237	-1020.000	200.874	93.851	176.617	-126.329
track10[70]	22.253	-1030.000	200.881	93.847	176.618	-126.334
track10[71]	22.234	-1040.000	200.879	93.836	176.619	-126.344
track10[72]	22.225	-1050.000	200.865	93.845	176.617	-126.336

Συντεταγμένες αρθρώσεων J2, J3, J6 στις θέσεις μετρούμενης τροχιάς

	J2	J3	J6		J2	J3	J6
track10[1]	-132,243	226,426	89,2	track10[42]	-74,235	177,337	80,279
track10[2]	-130,422	225,44	88,365	track10[43]	-72,992	175,845	80,528
track10[3]	-259,057	224,444	87,573	track10[44]	-71,746	174,332	80,795
track10[4]	-126,88	223,437	86,825	track10[45]	-70,496	172,795	81,081
track10[5]	-125,158	222,421	86,119	track10[46]	-69,239	171,231	81,388
track10[6]	-123,464	221,395	85,452	track10[47]	-67,976	169,642	81,715
track10[7]	-121,8	220,358	84,824	track10[48]	-66,705	168,025	82,061
track10[8]	-120,164	219,312	84,234	track10[49]	-65,423	166,378	82,427
track10[9]	-118,555	218,257	83,68	track10[50]	-64,133	164,698	82,814
track10[10]	-116,972	217,192	83,161	track10[51]	-62,829	162,985	83,224
track10[11]	-115,413	216,117	82,678	track10[52]	-61,512	161,235	83,655
track10[12]	-113,879	215,033	82,226	track10[53]	-60,178	159,447	84,113
track10[13]	-112,365	213,94	81,806	track10[54]	-58,829	157,615	84,592
track10[14]	-110,874	212,838	81,418	track10[55]	-57,457	155,738	85,098
track10[15]	-109,404	211,726	81,06	track10[56]	-56,064	153,812	85,632
track10[16]	-107,952	210,603	80,73	track10[57]	-54,645	151,829	86,195
track10[17]	-10,652	209,472	80,428	track10[58]	-53,197	149,788	86,79
track10[18]	-105,104	208,331	80,154	track10[59]	-51,717	147,679	87,418
track10[19]	-103,705	207,181	79,905	track10[60]	-50,2	145,496	88,083
track10[20]	-102,323	206,019	79,684	track10[61]	-48,639	143,23	88,789
track10[21]	-100,955	204,848	79,487	track10[62]	-47,029	140,87,	89,539
track10[22]	-99,6	203,666	79,316	track10[63]	-45,361	138,402	90,34
track10[23]	-98,259	202,473	79,167	track10[64]	-43,626	135,809	91,196
track10[24]	-96,931	201,271	79,042	track10[65]	-41,809	133,066	92,122
track10[25]	-95,614	200,056	78,939	track10[66]	-39,892	130,144	93,125
track10[26]	-94,307	198,83	78,858	track10[67]	-37,85	127,003	94,226
track10[27]	-93,012	197,594	78,797	track10[68]	-35,647	123,578	95,448
track10[28]	-91,723	196,344	78,761	track10[69]	-33,226	119,772	96,832
track10[29]	-90,445	195,082	78,743	track10[70]	-30,485	115,415	98,449
track10[30]	-89,173	193,808	78,745	track10[71]	-27,216	110,154	100,44
track10[31]	-87,909	192,52	78,769	track10[72]	-22,792	102,925	103,247
track10[32]	-86,65	191,219	78,811				
track10[33]	-85,397	189,904	78,874				
track10[34]	-84,149	188,574	78,955				
track10[35]	-82,904	187,23,	79,056				
track10[36]	-81,662	185,869	79,175				
track10[37]	-80,424	184,492	79,311				
track10[38]	-79,187	183,099	79,468				
track10[39]	-77,95	181,687	79,643				
track10[40]	-76,713	180,256	79,836				
track10[41]	-75,474	178,807	80,048				

Παράρτημα Β (κώδικες)

Κώδικας V+ δημιουργίας σημείων τροχιάς

```
.PROGRAM tracking10()  
;author: Antonis Angelidis  
  
MOVE start ;initialize to avoid collisions  
BREAK  
DELAY 2 ;small delay for no oscillations  
SET track10[0] = HERE  
SET movestep = HERE  
FOR i = 1 TO 72 STEP 1  
    SET movestep = SHIFT (movestep BY 0,-10,0) ;move -10 mm  
                                                ;on Y axis  
  
    MOVES movestep  
    BREAK  
    DELAY 2  
    SET track10[i] = HERE ;save i-th point  
  
END  
.END
```

Κώδικας V+ κίνησης άκρου βραχίονα στην επιθυμητή τροχιά

```
.PROGRAM meamove10()  
;author: Antonis Angelidis  
  
SPEED 50  
ACCEL (8) 50, 50  
FOR j = 1 TO 3 STEP 1 ;repeat whole movement # times  
    MOVES track10[0] ;go to 1st point  
    DELAY 15  
    BREAK  
    SET conpath10[0] = HERE  
    FOR i = 1 TO 72 STEP 1  
        MOVES track10[i] ;move to i-th point  
        DELAY 10  
        BREAK  
        SET conpath10[i,j] = HERE ;save your position in XYZ  
  
    END  
END  
.END
```

Main.m

Table of Contents

User Input	1
Process	1

User Input

```
%Run script to clear workspace
ClearEverything

% Number of files to be processed
numoffiles=4;
% Path of files
datapath= 'C:\DATA\V70\3-7';
% Choose method (1=Bookstein, 2=Trace, 3=Non linear)
method=1;
```

Process

```
% call function for each file
global i;
for i=1:numoffiles
    planeFit(i,datapath,method);
end

% Run script to calculate distance and errors
DistanceErrors
```

Published with MATLAB® 7.13

Planefit.m

Table of Contents

Make variables from data	1
Fit plane to 3d Data	1
Project 3d points onto the plane	1
Fit Ellipse to 2d data	2
Find center of ellipse (3d co-ordinates)	2
Plotting	2

Make variables from data

```
function planefit(filecounter,path,m)

cpath = cd ;      % get current path
cd(path) ;       % redirect to Data directory
s = ['load Part' int2str(filecounter) '.XYZ;']; %file format is Part1,
eval(s);                                               %Part2,Part3,...
s = ['file=Part' int2str(filecounter) ];
eval([s ';' ]);
cd(cpath) ;      % Return to Functions directory

%x,y,z Coordinates of the file i
x=file(:,1);
y=file(:,2);
z=file(:,3);
X=file;
```

Fit plane to 3d Data

```
% Fit plane using PCA method
[coeff,score] = princomp(X);
% Vectors that span the plane
coeff(:,1:2);
% Normal vector of plane
normal = coeff(:,3)
```

Project 3d points onto the plane

```
[n,p] = size(X);
meanX = mean(X,1);
%Projected 2d points of the plane
Xfit = repmat(meanX,n,1) + score(:,1:2)*coeff(:,1:2)';
% Original data minus the fitted points
residuals = X - Xfit;
% The fitted plane minimizes the sum of the squared errors.
error = abs((X - repmat(meanX,n,1))*normal);
```

```
sse = sum(error.^2);
```

Fit Ellipse to 2d data

fitellipse() and plotellipse are Copyright of Richard Brown. This code can be freely used and modified so long as this line is retained

```
switch m
% 1) Linear fit, bookstein constraint
    case 1
        [z, a, b, alpha] = fitellipse([Xfit(:,1) Xfit(:,2)], 'linear');

% 2) Linear fit, Trace constraint
    case 2
        [z, a, b, alpha] = fitellipse([Xfit(:,1) Xfit(:,2)], 'linear',...
                                      'constraint', 'trace');

% 3) Nonlinear fit
    case 3
        [z, a, b, alpha] = fitellipse([Xfit(:,1) Xfit(:,2)]);
    otherwise
        disp ('Wrong method\n');
end
```

Find center of ellipse (3d co-ordinates)

```
% The equation of the fitted plane is (x,y,z)*normal - meanX*normal = 0.
zcenter = (1/normal(3)) * (meanX *normal - (z(1,:)*normal(1) + ...
                                      z(2,:)*normal(2)));

% Make global for DistanceError script
global Centers;
% Create array with all calculated centers
Centers(filecounter,:)= [z(1,:),z(2,:),zcenter];
```

Plotting

```
% 1st Figure
figure(1)
hold on
% Plot the ellipse
p=plotellipse(z, a, b, alpha, '-');
set(p, 'Color', 'red', 'LineWidth', 1.7);
%Plot its center
plot (z(1,:),z(2,:), 'o', 'Color', 'red', 'LineWidth', 1.2);
% Plot the scattered point data
scatter(Xfit(:,1), Xfit(:,2), 'o', 'MarkerEdgeColor', 'b', 'LineWidth', 0.1);
xlabel('X'),ylabel('Y'),zlabel('Z');

% 2nd Figure
figure(2)
hold on
```

```

% Plot the plane, the original data, and their projection to the plane.
[xgrid,ygrid] = meshgrid(linspace(min(X(:,1)),max(X(:,1)),5), ...
                        linspace(min(X(:,2)),max(X(:,2)),5));
zgrid = (1/normal(3)) .* (meanX*normal - (xgrid.*normal(1) +...
                                        ygrid.*normal(2)));
p = mesh(xgrid,ygrid,zgrid,'EdgeColor',[0 0 0],'FaceAlpha',0);

% Find points above and below the plane
above = (X-repmat(meanX,n,1))*normal > 0;
below = ~above;
nabove = sum(above);
% X(above) are the points above the plane and Xfit(above) are the
% projections of these points
X1 = [X(above,1) Xfit(above,1) nan*ones(nabove,1)];
X2 = [X(above,2) Xfit(above,2) nan*ones(nabove,1)];
X3 = [X(above,3) Xfit(above,3) nan*ones(nabove,1)];
% Plot above points and their projections
plot3(X(above,1),X(above,2),X(above,3),'.');
plot3(Xfit(above,1),Xfit(above,2),Xfit(above,3),'o','Color','green',...
      'LineWidth',1.2);

% X(below) are the points below the plane and Xfit(below) are the
% projections of these points
nbelow = sum(below);
X1 = [X(below,1) Xfit(below,1) nan*ones(nbelow,1)];
X2 = [X(below,2) Xfit(below,2) nan*ones(nbelow,1)];
X3 = [X(below,3) Xfit(below,3) nan*ones(nbelow,1)];
% Plot below points and their projections
plot3(X(below,1),X(below,2),X(below,3),'.');
plot3(Xfit(below,1),Xfit(below,2),Xfit(below,3),'o','Color','red',...
      'LineWidth',1.2);

% Plot center of ellipse to make sure its z co-ordinate is right
plot3 (z(1,:),z(2,:),zcenter,'o');
xlabel('X'),ylabel('Y'),zlabel('Z');

end

```

Published with MATLAB® 7.13

DistanceErrors.m

Calculate distance and errors script

```
global Centers;

% Distance between centers of ellipses
for k=1:size(Centers)-1
distance(k)=sqrt((Centers(k,1)-Centers(k+1,1))^2+(Centers(k,2)-...
                Centers(k+1,2))^2+(Centers(k,3)-Centers(k+1,3))^2);
end

distance'

% Step errors (step is 10 mm)
for j=1:size(distance')
    steperrors(j)=(distance(j)-10);
end

steperrors

% Sum error
SumError=0;
for m=1:size(steperrors')
    SumError=SumError+steperrors(m);
end

SumError
```

Published with MATLAB® 7.13

AutoTrain.m

Table of Contents

Auto train nets and find the best	1
Load data sets	1
Create,train,simulate	1
Net qualification	3
Simulate winner net and plot results	3

Auto train nets and find the best

Load data sets

```
warning off
clear all
close all

% Load Input and output training data
load traininput;
load trainoutput;
In_Train=traininput';
Out_Train=trainoutput';

% Load Input and output validation data
load inval;
load outval;
In_Val=inval';
Out_Val=outval';

% Create string array of the combinations
Func={'tansig','logsig'};
```

Create,train,simulate

```
% counter of combination
% 1=tantan,2=tanlog,3=logtan,4=loglog
k=1;
comb=struct();
for function1=1:2
    for function2=1:2
        for counter=1:40           %number of trainings

            % Create NN
            net = newff(minmax(In_Train), [13,7,1],{Func{function1},...
                Func{function2},'purelin'} , 'trainlm');

            % Set parameters
```

```
net.trainParam.epochs = 5000;
net.trainParam.goal= 0.00001;

% Train NN
[net,tr] = train(net,In_Train,Out_Train);

% Test values = Train data
In_Test=In_Train;
Out_Test=Out_Train;

% Simulate NN and create matrix TestResult with the
% outputs
TestResult=sim (net,In_Test);

% Train errors
diafora=Out_Test-TestResult;
[rows,cols]=size(diafora);
comb(k).Error(counter,1)=mae(Out_Test-TestResult);
comb(k).Error(counter,2)=mse(Out_Test-TestResult);
comb(k).Error(counter,3)=((sum(diafora.^2))^0.5)/cols;
[min_perf,min_epoch]=min(tr.perf);
comb(k).Error(counter,4)=min_epoch;
comb(k).Error(counter,5)=min_perf;

% Simulate NN with validation data sets and create matrix
% ValidationResult with the outputs
ValidationResult=sim(net,In_Val);

%Validation errors
diaforaV=Out_Val-ValidationResult;
[rows,cols]=size(diaforaV);
comb(k).ErrorVal(counter,1)=mae(Out_Val-ValidationResult);
comb(k).ErrorVal(counter,2)=mse(Out_Val-ValidationResult);
comb(k).ErrorVal(counter,3)=((sum(diaforaV.^2))^0.5)/cols;

% Get current path
cpath=cd;
% Create name of the nets in format[ Nets #]
s = ['Net' int2str(counter)];
% We have 4 folders named 1,2,3 and 4 each for 1 combination of
% activation functions. Depending on our combination we go to
% the desired folder
p=['cd ' 'C:\Combinations\' ' int2str(k)];
eval(p);
% We save the Net# in the folder
save (s, 'net');
% Return to matlab directory with the .m functions
cd(cpath);

end
% Next combination
k=k+1;
end
```

end

Net qualification

```

Combination={'tansig-tansig';'tansig-logsig';'logsig-tansig';'logsig-logsig'};
for i=1:4
    [C,index1]=min(comb(1,i).Error);
    [B,index2]=min(comb(1,i).ErrorVal);
    if index1(2)==index2(2)
        fprintf('Smallest train and Validation SME for %s function is in net %d\n'...
                ,Combination{i}, index1(2));

        fprintf('=====\n');
    else
        fprintf('Different minimum train and Validation MSE for %s\n',...
                Combination{i});
        fprintf('...Choosing according to minimum Validation MSE error\n');
        fprintf('Smallest Validation SME error for %s functions is in net %d\n'...
                ,Combination{i}, index2(2));

        fprintf('=====\n');
    end

    comparisonarray(i,1)=index1(2);
    comparisonarray(i,2)=index2(2);

end

fprintf('-----\n');
fprintf('Overall Results\n');
fprintf('MSEtrain MSEval\n');
disp (comparisonarray);
fprintf('-----\n');

```

Simulate winner net and plot results

```

TestResult=sim (net,In_Test);
ValidationResult=sim(net,In_Val);

figure (1);
hold on
plot (ValidationResult(1,1:17),'Color','red');
plot (Out_Val(1,1:17));
figure (2);
hold on
plot (TestResult,'Color','red');
plot (Out_Test);

```

Published with MATLAB® 7.13