



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Σημάτων, Ελέγχου και Ρομποτικής

Πειραματική Αναγνώριση Δυναμικών Παραμέτρων Ρομποτικού Βραχίονα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Α. ΝΙΝΟΣ

Επιβλέπων : Κων/νος Τζαφέστας
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Σημάτων, Ελέγχου και Ρομποτικής

Πειραματική Αναγνώριση Δυναμικών Παραμέτρων Ρομποτικού Βραχίονα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Α. ΝΙΝΟΣ

Επιβλέπων : Κων/νος Τζαφέστας
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30η Ιουλίου 2014.

.....
Κων/νος Τζαφέστας
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Παπαβασιλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Μαράτος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014

.....
Αλέξανδρος Α. Νίνος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αλέξανδρος Α. Νίνος, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Οι βιομηχανικοί βραχίονες έχουν γίνει ένα απαραίτητο μέσο αυτοματισμού για την αύξηση της ευελιξίας και της παραγωγικότητας. Τα αυξανόμενα πρότυπα ποιότητας και οι νέες εφαρμογές επιβάλλουν αυστηρότερες απαιτήσεις για ακρίβεια, αξιοπιστία και απόδοση. Λόγω της πολύπλοκης μη γραμμικής δυναμικής των ρομπότ, η σχεδίαση του ελέγχου πρέπει να περιλαμβάνει ακριβή δυναμικά ρομποτικά μοντέλα. Η πειραματική αναγνώριση των άγνωστων παραμέτρων αδράνειας είναι μια διαδικασία για την εκτίμηση τέτοιων μοντέλων χρησιμοποιώντας δεδομένα κίνησης κατά την διάρκεια καλά σχεδιασμένων πειραμάτων.

Η πειραματική αναγνώριση του ρομποτικού χειριστή είναι ο μόνος αποτελεσματικός τρόπος για την εύρεση δυναμικών μοντέλων ικανών να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο του βραχίονα. Οι πληροφορίες που προσφέρουν οι εταιρείες παραγωγής των ρομπότ συνήθως είναι ανεπαρκείς ή ανακριβείς, ειδικά για θέματα όπως η τριβή και τα χαρακτηριστικά της σύζευξης των αξόνων. Η άμεση μέτρηση των φυσικών παραμέτρων δεν είναι ρεαλιστική λόγω της πολυπλοκότητας των εξαρτημάτων.

Στην παρούσα εργασία ακολουθείται το βασικό πρότυπο της αναγνώρισης των ρομποτικών παραμέτρων όπως υπάρχει στην βιβλιογραφία, όμως σε κάθε βήμα εφαρμόζονται οι διαφορετικές τεχνικές που βρέθηκαν. Το ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε είναι το Katana 450 και το λογισμικό διασύνδεσης είναι το ROS Fuerte. Πολύ σημαντική είναι η εύρεση βέλτιστων τροχιών διέγερσης που θα μπορούν να διεγείρουν επαρκώς το βραχίονα, αυτό έγινε χρησιμοποιώντας το Global Optimization Toolbox του Matlab. Κατά την διάρκεια του πειράματος αναγνώρισης απαραίτητη είναι η απόκτηση δεδομένων για την γωνία και την ροπή των αξόνων, για αυτό έγιναν μερικές τροποποιήσεις στο λογισμικό. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζεται το άγνωστο σετ παραμέτρων καθώς και η τυπική τους απόκλιση. Με το πείραμα της επαλήθευσης υπολογίζεται το σφάλμα πρόβλεψης της ροπής για μία νέα τροχιά, συγκρίνοντας διαφορετικές τεχνικές που βρέθηκαν και επιλέγεται ο καλύτερος δυνατός συνδυασμός. Σε μελλοντική εργασία τα υπάρχοντα αποτελέσματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο του βραχίονα, δοκιμάζοντας αλγορίθμους adaptive control υπό την προϋπόθεση αναβάθμισης του.

Λέξεις κλειδιά

Δυναμικό μοντέλο, παράμετροι αδράνειας, αλγόριθμος βελτιστοποίησης, Katana 450, ρομποτικός βραχίονας, ROS Fuerte, σειρές Fourier, τροχιά διέγερσης, τροχιά βελτιστοποίησης, προσαρμοστικός έλεγχος, έλεγχος θέσης, έλεγχος ροπής.

Abstract

The industrial manipulators have become an indispensable tool of automation for increased flexibility and productivity. The increasing quality standards and new applications impose stricter requirements for precision, reliability and performance. Due to the complex nonlinear dynamics of the robot, the control design must include an accurate dynamic robot model. The robotic identification is a technique to estimate such models by collecting data during well-designed experiments.

Experimental robot identification is the only efficient way to obtain accurate robot models. Information provided by robot manufacturers is usually insufficient or inaccurate, especially those dealing with friction and compliance characteristics. Direct measurement of the physical parameters is unrealistic because of the complexity of most robots.

The present study followed the basic pattern of experimental robot identification as it exists in the literature, but in every step a variety of different techniques are applied. The robot used is the Katana 450 and the software interface is the ROS Fuerte. A very important issue is to find optimal trajectories that can excite the robotic arm, this was done by using the Global Optimization Toolbox of Matlab. During the experiment it is necessary to obtain data on the torque and angle of the axes and some modifications on the software had to be made. Using the method of least squares, a set of unknown dynamic parameters was found. The experiment of verification was used to calculate the prediction error of torque, comparing different techniques found in literature and selecting the best possible combination. In future work the existing results could be used to control the arm, testing algorithms of adaptive control, if an upgrade of the controller is completed.

Key words

Dynamic model, inertial parameters, optimization algorithm, Katana 450, robot manipulator, ROS Fuerte, Fourier series, excitation trajectory, validation trajectory, adaptive control, position control, torque control.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή αυτής της εργασίας, κ. Κωνσταντίνο Τζαφέστα, για τη συνεχή καθοδήγηση και εμπιστοσύνη του. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και κυρίως τους γονείς μου, οι οποίοι με υποστήριξαν και έκαναν δυνατή την απερίσπαστη ενασχόλησή μου τόσο με την εκπόνηση της διπλωματικής μου, όσο και συνολικά με τις σπουδές μου.

Αλέξανδρος Α. Νίνος,
Αθήνα, 30η Ιουλίου 2014

Η εργασία αυτή είναι επίσης διαθέσιμη ως Τεχνική Αναφορά , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Σημάτων, Ελέγχου και Ρομποτικής, Εργαστήριο Ρομποτικής και Αυτοματισμού, Ιούλιος 2014.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος σχημάτων	13
1. Εισαγωγή	15
1.1 Κίνητρο της Εργασίας	15
1.2 Σειριακοί ρομποτικοί βραχίονες	16
1.3 Συνεισφορά της παρούσας εργασίας	16
1.4 Οργάνωση της Εργασίας	17
2. Αναγνώριση Παραμέτρων Ρομποτικού Μοντέλου: Θεωρητικό Υπόβαθρο	19
2.1 Εισαγωγή	19
2.2 Εισαγωγή στην Αναγνώριση Παραμέτρων	19
2.3 Προσεγγίσεις στην μοντελοποίηση και την αναγνώριση	20
2.4 Διαδικασία Πειραματικής Αναγνώρισης Παραμέτρων Αδράνειας	21
2.5 Παραγωγή μοντέλου	21
2.5.1 Εξαγωγή δυναμικών εξισώσεων	21
2.5.2 Μοντελοποίηση Τριβής	23
2.5.3 Αδράνεια Ρότορα	24
2.6 Παράμετροι του Μοντέλου Αναγνώρισης	24
2.6.1 Γραμμική Παραμετροποίηση	25
2.6.2 Αναγνωρισιμότητα και ελάχιστο σύνολο παραμέτρων	26
2.7 Σχεδιασμός Πειραματικών Μετρήσεων	26
2.7.1 Διαχωρισμός πειραμάτων	26
2.7.2 Κριτήρια βελτιστοποίησης τροχιάς διέγερσης	27
2.7.3 Παραμετροποίηση της τροχιάς διέγερσης	27
2.8 Τεχνικές Βελτιστοποίησης	28
2.9 Σύνοψη	28
3. Ανάπτυξη Μεθόδων Αναγνώρισης Δυναμικών Παραμέτρων Ρομποτικού Μοντέλου	31
3.1 Εισαγωγή	31
3.2 Παραγωγή Δυναμικού Μοντέλου	31
3.2.1 Γενική Δομή Βραχίονα	31
3.2.2 Δυναμική άκαμπτου σώματος	32
3.2.3 Επιπρόσθετα φαινόμενα	33
3.3 Σχεδίαση Πειράματος Χρησιμοποιώντας Περιοδική Διέγερση	34
3.3.1 Παραμετροποίηση τροχιάς	34

3.3.2	Ιδιότητες της περιοδικής Τροχιάς	35
3.4	Παραγωγή της τροχιάς διέγερσης	36
3.4.1	Γενική Διατύπωση του Προβλήματος	36
3.4.2	Λύση μέσω Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης	36
3.4.3	RTP Τροχιά Διέγερσης	37
3.5	Εκτίμηση Παραμέτρων	37
3.6	Επαλήθευση	38
3.7	Σύνοψη	39
4.	Πειραματική Υλοποίηση στο Ρομποτικό Βραχίονα Katana 450	41
4.1	Υλικό	42
4.1.1	Λειτουργία	42
4.1.2	Σύνδεση	43
4.1.3	Βαθμίδα Ελέγχου (Control Board)	44
4.1.4	Τηλεχειριστήριο B3	47
4.1.5	Μηχανική Ανάλυση	47
4.2	Θεωρητική Ανάλυση, Παράμετροι Denavit – Hartenberg	48
4.3	Λογισμικό Διασύνδεσης	49
4.3.1	Αρχικά Προβλήματα	49
4.3.2	Εγκατάσταση και χρήση Λογισμικού	49
4.4	Σύνοψη	50
5.	Πειραματικά Αποτελέσματα	51
5.1	Εισαγωγή	51
5.2	Χρήση τροχιάς διέγερσης που προέκυψε από αλγόριθμο βελτιστοποίησης	51
5.2.1	Πείραμα Διέγερσης του Βραχίονα	51
5.2.2	Μείωση του Θορύβου των Μετρήσεων της Ροπής	57
5.2.3	Επεξεργασία Δεδομένων	61
5.2.4	Εκτίμηση Παραμέτρων	64
5.2.5	Πείραμα Επαλήθευσης	70
5.3	RTP Τροχιά Διέγερσης	80
5.4	Σφάλμα Πρόβλεψης Ροπής	83
5.5	Σύνοψη	85
5.5.1	Συμπεράσματα	85
6.	Επίλογος	87
6.1	Σύνοψη-Συμπεράσματα	87
6.2	Μελλοντικές Επιλογές	88
6.2.1	Τεχνικά Θέματα	88
6.2.2	Προτεινόμενες Εργασίες	88
	Βιβλιογραφία	89

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Διαφορετικοί τύποι μοντέλων	20
2.2	Τυχαίος σύνδεσμος	25
3.1	Περιγραφή του βραχίονα	32
3.2	Σύνδεσμος του Βραχίονα	33
4.1	Katana 450	41
4.2	Διαστάσεις και επιτρεπόμενη κίνηση	42
4.3	ROS FUERTE	43
4.4	Katana web interface	44
4.5	Control Board	45
4.6	Ψηφιακές είσοδοι έξοδοι	46
4.7	Hardware	47
4.8	Τηλεχειριστήριο	47
4.9	Μηχανική Ανάλυση	48
4.10	Katana	48
4.11	Παράμετροι DH	48
5.1	Matlab, Optimization Toolbox	52
5.2	Τροχιά διέγερσης Γωνιακή Θέση	53
5.3	Τροχιά διέγερσης Γωνιακή Ταχύτητα	54
5.4	Τροχιά διέγερσης Γωνιακή Επιτάχυνση	54
5.5	Παράδειγμα τροχιάς, 1 Άξονας	55
5.6	Τροχιά διέγερσης, 1 άξονας	56
5.7	Τροχιά διέγερσης, 2 άξονας	56
5.8	Τροχιά διέγερσης, 3 άξονας	57
5.9	Άξονας 1, 10 περίοδοι, Γωνιακή θέση	58
5.10	Άξονας 1, 10 περίοδοι, Ροπή	58
5.11	Άξονας 2, 10 περίοδοι, Γωνιακή θέση	59
5.12	Άξονας 2, 10 περίοδοι, Ροπή	59
5.13	Άξονας 3, 10 περίοδοι, Γωνιακή θέση	60
5.14	Άξονας 3, 10 περίοδοι, Ροπή	60
5.15	Άξονας 1, Ταχύτητα	61
5.16	Άξονας 1, Επιτάχυνση	62
5.17	Άξονας 2, Ταχύτητα	62
5.18	Άξονας 2, Επιτάχυνση	63
5.19	Άξονας 3, Ταχύτητα	63
5.20	Άξονας 3, Επιτάχυνση	64
5.21	Άξονας 1, Σύγκριση 2 μεθοδων	65
5.22	Άξονας 2, Σύγκριση 2 μεθοδων	65
5.23	Άξονας 3, Σύγκριση 2 μεθοδων	66
5.24	Άξονας 1, σύγκριση 4 μεθόδων	66
5.25	Άξονας 2, σύγκριση 4 μεθόδων	67

5.26	Άξονας 3, σύγκριση 4 μεθόδων	67
5.27	Άξονας 1, Σύγκριση 2 μεθοδων	68
5.28	Άξονας 2, Σύγκριση 2 μεθοδων	68
5.29	Άξονας 1, σύγκριση 4 μεθόδων	69
5.30	Άξονας 2, σύγκριση 4 μεθόδων	70
5.31	Άξονας 1, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης	71
5.32	Άξονας 2, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης	71
5.33	Άξονας 3, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης	72
5.34	Τροχιά Επαλήθευσης, Γωνία	73
5.35	Τροχιά Επαλήθευσης, Γωνιακή ταχύτητα	73
5.36	Άξονας 1, Επαλήθευση Τροχιάς	74
5.37	Άξονας 2, Επαλήθευση Τροχιάς	75
5.38	Άξονας 3, Επαλήθευση Τροχιάς	76
5.39	Άξονας 1,μοντέλο 2, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης	77
5.40	Άξονας 2,μοντέλο 2, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης	77
5.41	Άξονας 3,μοντέλο 2, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης	78
5.42	Άξονας 1, επαλήθευση τροχιάς	79
5.43	Άξονας 2, επαλήθευση τροχιάς	79
5.44	Άξονας 3, επαλήθευση τροχιάς	80
5.45	PTP Τροχιά Διέγερσης	81
5.46	Άξονας 1,σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης	82
5.47	Άξονας 2,σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης	82
5.48	Άξονας 3,σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης	83
5.49	Άξονας 1,σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης	84
5.50	Άξονας 2,σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης	84
5.51	Άξονας 3,σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης	85

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο της Εργασίας

Από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης, ο κόσμος βρίσκεται συνεχώς αντιμέτωπος με νέες τεχνολογίες και αλλαγές στις προσδοκίες των πελατών. Τα συνεχώς αυξανόμενα πρότυπα ποιότητας, ο διεθνής ανταγωνισμός καθώς και οικονομικοί λόγοι, θέτουν προτεραιότητες στην αξιοπιστία, στην ακρίβεια και κυρίως στην ταχύτητα της διαδικασίας παραγωγής. Η βελτίωση του τελικού προϊόντος είναι το κυρίαρχο κίνητρο πίσω από την εξέλιξη νέων τεχνικών. Αυτή η εξέλιξη συνεχίζεται μέχρι σήμερα καθώς νέες προκλήσεις πρέπει να ξεπεραστούν.

Οι βιομηχανικοί ρομποτικοί βραχίονες έχουν γίνει απαραίτητα μέσα αυτοματισμού, που σκοπό έχουν την αύξηση της παραγωγικότητας και της ευελιξίας των παραγόμενων προϊόντων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εργασίες που δεν μπορούν να εκτελεστούν από ανθρώπους ή επειδή απαιτούν αυξημένη ακρίβεια και ταχύτητα. Επιπλέον τα ρομπότ είναι ικανά να δουλέψουν σε επικίνδυνα περιβάλλοντα με αυξημένο βαθμό αξιοπιστίας. Συνηθισμένοι χώροι εργασίας είναι τα εργοστάσια αυτοκινήτων, όπου χρησιμοποιούνται σε αυτόματες γραμμές παραγωγής. Τυπικές εργασίες περιλαμβάνουν μεταφορά αγαθών, συναρμολογήσεις, κόψιμο, βάνιμο κ.α..

Τα ρομπότ προγραμματίζονται να κάνουν μια συγκεκριμένη εργασία μέσω της μάθησης μιας ακολουθίας διαφορετικών κινήσεων. Σε πολλές σύγχρονες εφαρμογές είναι πολύ σημαντικό το σφάλμα θέσης να είναι ελάχιστο. Παρόλα αυτά, οι συνηθισμένοι βιομηχανικοί ελεγκτές δεν λαμβάνουν υπ' όψιν τους τις μη γραμμικότητες του βραχίονα. Τέτοιες είναι η φυγόκεντρη δύναμη, η βαρυτική δύναμη, η δύναμη Coriolis, η τριβή και η σύζευξη μεταξύ διαφορετικών αξόνων. Αυτές παράγουν σημαντικά σφάλματα από την επιθυμητή θέση. Οι παραπάνω μη γραμμικότητες μπορούν να αντισταθμιστούν με νέους πιο προηγμένους ελεγκτές που χρησιμοποιούν *a priori* γνώση για τον βραχίονα, όπως ελεγκτές υπολογιζόμενης ροπής. Η υλοποίηση τέτοιων προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου προϋποθέτει μια καλή γνώση της δυναμικής συμπεριφοράς του ρομποτικού βραχίονα.

Για πολλά χρόνια, τέτοιες τεχνικές υλοποιούνταν μόνο σε εξειδικευμένα εργαστήρια ρομποτικής. Η εξέλιξη των υπολογιστών το τελευταίο καιρό, έκανε εφικτή την εκτίμηση του δυναμικού μοντέλου του βραχίονα σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η μικρή επανάσταση ανανέωσε το ενδιαφέρον για τέτοιους αλγορίθμους ελέγχου και για ακριβή δυναμικά μοντέλα.

Μια σημαντική πρακτική δυσκολία είναι ότι οι τιμές των παραμέτρων του δυναμικού μοντέλου του βραχίονα δεν είναι γνωστές με ακρίβεια. Επίσης αυτές οι τιμές μπορεί να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, η μάζα και τα χαρακτηριστικά αδράνειας των συνδέσμων επηρεάζονται από τα αντικείμενα που ο βραχίονας μεταφέρει. Στις πιο πολλές εφαρμογές αυτά τα αντικείμενα είναι άγνωστα κάτι που δυσχεραίνει την όλη διαδικασία. Για αυτό η ύπαρξη ενός ακριβούς δυναμικού μοντέλου είναι σχεδόν αδύνατη.

Η παραγωγικότητα στην βιομηχανία επηρεάζεται από την ταχύτητα της επιχείρησης. Για να αυξηθεί η ταχύτητα, είναι απαραίτητο να μειωθεί ο χρόνος εργασίας, αλλά να παραμείνει η ακρίβεια στα επιθυμητά επίπεδα. Αφού βρεθούν αξιόπιστα δυναμικά μοντέλα, μπορούν να εφαρμοστούν κατάλληλοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης της τροχιάς. Οι τελευταίοι λαμβάνουν υπ' όψιν τα φυσικά όρια του βραχίονα όπως: τον χώρο εργασίας, τα όρια της ροπής των κινητήρων και τις δυνάμεις αντίδρασης στην βάση του ρομπότ. Αυτοί οι αλγόριθμοι επιτρέπουν την ισομερή κατανομή φορτίου στους διαφορετικούς κινητήρες του ρομπότ. Έτσι αποτρέπει την υπερφόρτωση του βραχίονα, κάτι που οδηγεί

σε μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Ο ανταγωνισμός δημιουργεί μια αυξανόμενη ζήτηση για βελτίωση της ευελιξίας και της ακρίβειας μέσω off-line προγραμματισμού των ρομπότ. Δεν είναι οικονομικά αποδεκτό να μένει στάσιμος ένας βραχίονας για αρκετό καιρό, λόγω προγραμματισμού του. Προγράμματα προσομοίωσης επιτυγχάνουν τον προγραμματισμό κινήσεων σε έναν εξωτερικό υπολογιστή χωρίς την ανάγκη διακοπής της παραγωγής. Πρακτικά αυτό οδηγεί σε μια σημαντική βελτίωση της ευελιξίας και της παραγωγικότητας.

Μοντέρνα off-line προγράμματα θεωρούν πως υπάρχει μια βασική ακρίβεια θέσης του βραχίονα. Για αρκετά αργές τροχιές η ακρίβεια είναι επαρκής, όμως όταν η ταχύτητα αυξάνει τότε το σφάλμα θέσης είναι μεγάλο. Ο λόγος είναι πως τα παραπάνω προγράμματα λαμβάνουν υπ' όψιν τους μόνο κινηματικά μοντέλα, δηλαδή την γεωμετρική δομή του ρομπότ και τους περιορισμούς σε ταχύτητα και επιτάχυνση. Δεν λαμβάνουν υπ' όψιν τους σύνθετα μη γραμμικά φαινόμενα που κυριαρχούν στις υψηλές ταχύτητες. Το αποτέλεσμα είναι μεγάλα σφάλματα θέσης, κάτι που απαιτεί διορθωτικές κινήσεις που συνήθως είναι χρονοβόρες. Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι για να μπορεί να προγραμματιστεί off-line μια επιθυμητή τροχιά με υψηλές ταχύτητες απαιτούνται δυναμικά μοντέλα.

Τα παραπάνω ήταν το κίνητρο για την έρευνα για μεθόδους πειραματικής αναγνώρισης ρομποτικών βραχιόνων. Σίγουρα υπάρχει ανάγκη για ακριβή δυναμικά μοντέλα και το εύρος των εφαρμογών τους συνέχεια αυξάνεται.

1.2 Σειριακοί ρομποτικοί βραχίονες

Το ρομπότ είναι μια μηχανή σχεδιασμένη να εκτελέσει μία ή περισσότερες εργασίες επανειλημμένα, με ταχύτητα και ακρίβεια. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ρομπότ, οι πιο συνηθισμένοι στην βιομηχανία είναι οι σειριακοί βραχίονες και τα καρτεσιανά ρομπότ. Άλλοι τύποι είναι τα ανθρωποειδή, μηχανές που περπατούν, ρομποτικά χέρια και κινούμενα ρομπότ.

Θα ήταν αδύνατο να εξαχθούν τεχνικές αναγνώρισης που να έχουν εφαρμογή σε όλους αυτούς του διαφορετικούς τύπους. Η έρευνα θα περιοριστεί στους βιομηχανικούς σειριακούς βραχίονες. Οι σύνδεσμοι του ρομπότ θεωρούνται άκαμπτοι και συνδέονται με στροφικές αρθρώσεις, οι οποίοι έχουν ένα βαθμό ελευθερίας. Δημιουργείται λοιπόν μια δομή κινηματικής αλυσίδας με πολλαπλά ξεχωριστά σώματα.

Ένα ρομπότ με 6 διαφορετικές αρθρώσεις είναι αρκετά συνηθισμένος τύπος στο εμπόριο. Οι σύνδεσμοι του μπορούν να χωριστούν σε 2 κατηγορίες, οι τρεις πρώτοι είναι οι άξονες βάσεις και χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση του τελικού εργαλείου δράσης στον επιθυμητό χώρο. Οι τρεις τελευταίοι χρησιμοποιούνται για τον σωστό προσανατολισμό του.

Σε εφαρμοσμένη ρομποτική έρευνα είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται βραχίονες που υπάρχουν και στην βιομηχανία. Σε αυτήν την εργασία θα χρησιμοποιηθεί βραχίονας με ηλεκτρικές μηχανές και όχι κάποια εξειδικευμένη μηχανή. Βέβαια οι τεχνικές που θα παρουσιαστούν μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλους τύπους ρομπότ με μικρές παραλλαγές.

1.3 Συνεισφορά της παρούσας εργασίας

Η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται κυρίως με την αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων ενός ρομπότ μέσω μετρήσεων που έχουν παρθεί κατά την διάρκεια ενός πειράματος. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα γίνεται το πείραμα επαλήθευσης, που στόχο έχει την πρόβλεψη της απαιτούμενης ροπής των κινητήρων για την επίτευξη μιας τυχαίας τροχιάς. Επίσης χρησιμοποιεί διαφορετικές μεθόδους σε κάθε βήμα της διαδικασίας και συγκρίνει τα μεταξύ τους αποτελέσματα. Έτσι μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη λύση από αυτές που προτείνονται στην βιβλιογραφία.

Η τυπική διαδικασία αποτελείται από:

- Την παραγωγή ενός δυναμικού μοντέλου
- Την παραγωγή μιας βελτιστοποιημένης τροχιάς διέγερσης

- Την εκτίμηση των άγνωστων παραμέτρων του μοντέλου
- Την επαλήθευση του μοντέλου

1.4 Οργάνωση της Εργασίας

Αρχικά στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια συνοπτική αναφορά στους διαφορετικούς τρόπους πειραματικής αναγνώρισης που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Επίσης αναφέρονται διαφορετικές μέθοδοι που μπορούν να ακολουθηθούν σε κάθε βήμα. Στο κεφάλαιο 3 επεξηγείται περαιτέρω η συγκεκριμένη διαδικασία που θα ακολουθηθεί κατά την διάρκεια του πειράματος. Στο κεφάλαιο 4 υπάρχει μια μικρή αναφορά για το ρομπότ που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και για το λογισμικό του. Τέλος στο κεφάλαιο 5 υπάρχουν τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία δείχνουν πως το πείραμα της αναγνώρισης ήταν πετυχημένο. Στο κεφάλαιο έξι γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και εξάγονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Κεφάλαιο 2

Αναγνώριση Παραμέτρων Ρομποτικού Μοντέλου: Θεωρητικό Υπόβαθρο

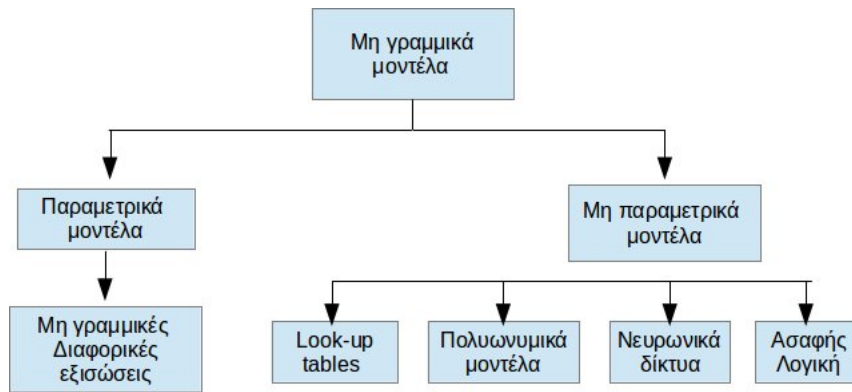
2.1 Εισαγωγή

Οι πρακτικές εφαρμογές των ρομπότ έχουν πολλαπλασιαστεί τα τελευταία χρόνια, οι βραχίονες έχουν γίνει πιο έξυπνοι, πιο δυνατοί και πιο ακριβείς. Η βιβλιογραφία για την ρομποτική είναι πλέον αρκετά εκτενής, ακόμα και το κομμάτι της μοντελοποίησης, αναγνώρισης και ελέγχου πέρασε από μια σημαντική εξέλιξη. Οι πρώτες έρευνες αφορούσαν κυρίως κινηματικά θέματα, όμως η επιθυμητή αύξηση της ταχύτητας ενός βραχίονα έκανε την δυναμική του πολύ σημαντική. Αρχικά αναπτύχθηκαν θεωρητικές μέθοδοι για να περιγράψουν και να ελέγξουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του. Λόγω της αυξημένης υπολογιστικής ισχύς, ιδιαίτερα τις τελευταίες δύο δεκαετίες, έγινε εφικτό να εφαρμοστούν και να ελεγχθούν πειραματικά.

Αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει μια έρευνα στον τομέα της πειραματικής αναγνώρισης, με συγκεκριμένη εφαρμογή σε σειριακούς ρομποτικούς βραχίονες.

2.2 Εισαγωγή στην Αναγνώριση Παραμέτρων

Για την σχεδίαση, προσομοίωση και έλεγχο μηχανοτρονικών συστημάτων απαιτούνται μαθηματικά μοντέλα. Υπάρχουν κυρίως δύο τρόποι για την απόκτηση αυτών των μοντέλων, η θεωρητική μοντελοποίηση, η οποία βασίζεται σε φυσικές ιδιότητες και δεδομένα σχεδίασης και η πειραματική μοντελοποίηση (ή αναγνώριση), η οποία δημιουργεί ένα μοντέλο χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες εισόδους και εξόδους του συστήματος. Σε πολλές περιπτώσεις η βασική μορφή του μοντέλου είναι γνωστή από θεωρητική μοντελοποίηση, αλλά κάποιοι παράμετροι δεν είναι γνωστοί ή αλλάζουν κατά την διάρκεια του χρόνου. Η πιο απλή μέθοδος θα ήταν η χρήση δεδομένων CAD, όμως αυτά δεν είναι αξιόπιστα γιατί διάφορα υλικά, όπως καλώδια και εσωτερικές ηλεκτρονικές συσκευές, δεν περιλαμβάνονται στο μοντέλο. Μία καλύτερη εναλλακτική θα ήταν να απογυμνωθεί το όποιο μηχανοτρονικό σύστημα, στην παρούσα περίπτωση ένας ρομποτικός βραχίονας, και να μετρηθούν όλες οι παράμετροι αδράνειας του. Αυτή η μέθοδος έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορούν να μετρηθούν όλες οι απαιτούμενοι παράμετροι, όπως για παράδειγμα η τριβή. Επίσης η απογύμνωση του ρομπότ είναι μια δύσκολη εργασία και απαιτεί αρκετό χρόνο. Ως εκ τούτου για να αποκτηθούν ακριβή μαθηματικά μοντέλα πρέπει να εφαρμοστούν γενικές μέθοδοι αναγνώρισης. Αυτές στόχο έχουν να προσαρμόζουν μοντέλα που έχουν βρεθεί από θεωρητική μοντελοποίηση στις μετρήσεις που έχουν παρθεί από το σύστημα.



Σχήμα 2.1: Διαφορετικοί τύποι μοντέλων

Οι μέθοδοι αναγνώρισης μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες σύμφωνα με τα μοντέλα που χρησιμοποιούν: γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα, συνεχούς χρόνου και διακριτού χρόνου, παραμετρικά και μη παραμετρικά [20]. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μη γραμμικά μοντέλα εξαιτίας της μη γραμμικότητας των δυναμικών χαρακτηριστικών του βραχίονα. Η εικόνα 2.1 δείχνει την κατηγοριοποίηση των μη γραμμικών μοντέλων. Όταν υπάρχει a priori γνώση για το σύστημα, παραμετρικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Το μοντέλο που εξάγεται, βασίζεται στους νόμους της φυσικής και της μηχανικής και αποτελείται από ένα σετ μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων. Οι άγνωστες παράμετροι έχουν φυσικό νόημα και μπορούν να αναγνωριστούν από τις μετρήσεις. Η μέθοδος της παραμετρικής μοντελοποίησης είναι αρκετά διαδεδομένη στην αναγνώριση ρομποτικών παραμέτρων.

Τα μη παραμετρικά μοντέλα είναι η εναλλακτική όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία για την δομή του μη γραμμικού συστήματος. Οι πίνακες αναζήτησης (look-up tables) περιέχουν τις τιμές της απόκρισης για διαφορετικούς συνδυασμούς εισόδου. Για συστήματα με μεγάλο αριθμό μεταβλητών μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολυωνυμικά μοντέλα. Άλλες δύο δημοφιλείς τεχνικές είναι τα νευρωνικά δίκτυα και η ασαφής λογική (fuzzy logic). Μία περίληψη διαφορετικών μεθοδολογιών για την αναγνώριση μπορεί να βρεθεί στο [32].

Κάποιες φορές η αναγνώριση μπορεί να γίνεται σε πραγματικό χρόνο και να ενσωματώνεται στον νόμο ελέγχου. Έτσι δεν χρειάζεται να σχεδιαστούν ξεχωριστά πειράματα αναγνώρισης παραμέτρων αδράνειας [27]. Ο προσαρμοστικός έλεγχος στην ρομποτική έχει γίνει αρκετά σημαντικός τις τελευταίες δεκαετίες. Έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι που επιτυγχάνουν μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης [6].

Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιούνται μη γραμμικά παραμετρικά μοντέλα. Οι εξισώσεις προκύπτουν σύμφωνα με τις φυσικές ιδιότητες, έτσι μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν όλη η a priori πληροφορία και να ερμηνευτούν οι τιμές των εκτιμώμενων παραμέτρων.

2.3 Προσεγγίσεις στην μοντελοποίηση και την αναγνώριση

Διάφορες προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για την αναγνώριση των παραμέτρων αδράνειας, αυτές μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το μοντέλο και τον τύπο των αισθητήρων που χρησιμοποιούν. Στην κλασική περίπτωση [21], οι παράμετροι εκτιμώνται από τα δεδομένα της κίνησης και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στους κινητήρες, αυτά μπορούν να μετρηθούν από “εσωτερικές” συσκευές μέτρησης. Οι ενσωματωμένοι κωδικοποιητές χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί η γωνιακή θέση ενώ η ροπή των κινητήρων υπολογίζεται μέσω της μέτρησης του ρεύματος στον κινητήρα. Το δυναμικό μοντέλο που σχετίζεται με αυτές τις εισόδους και εξόδους ονομάζεται “εσωτερικό μοντέλο”.

Μια εναλλακτική προσέγγιση χρησιμοποιεί το “εξωτερικό μοντέλο” [28], αυτό σχετίζει την κίνηση του βραχίονα με τις δυνάμεις και ροπές που αναπτύσσονται σε μια πλάκα στην βάση του ρομπότ. Η κίνηση του ρομπότ μπορεί να βρεθεί με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή χρησιμοποιώντας τους εσωτερικούς

κωδικοποιητές, ενώ ένας εξωτερικός αισθητήρας, force/torque platform, μετράει την δύναμη και την ροπή στην βάση [44]. Οι δυνάμεις και οι ροπές μετρώνται για διαφορετικές θέσεις των συνδέσμων. Αυτή η μέθοδος δεν αποδίδει όλες τις άγνωστες παραμέτρους παρά μόνο αυτές που απαιτούνται για να γίνει gravity compensation. Τέλος, έχει αποδειχθεί [9] ότι το εσωτερικό και το εξωτερικό μοντέλο μπορούν να συνδυαστούν σε ένα συνολικό σχέδιο αναγνώρισης. Έτσι μπορεί να βελτιωθεί η ακρίβεια των εκτιμώμενων παραμέτρων και να μειωθεί το σφάλμα πρόβλεψης της ροπής των κινητήρων.

2.4 Διαδικασία Πειραματικής Αναγνώρισης Παραμέτρων Αδράνειας

Η παρακάτω διαδικασία για την πειραματική αναγνώριση παραμέτρων ενός ρομποτικού συστήματος είναι η πιο συνηθισμένη στην βιβλιογραφία [1, 4, 22]

- Αρχικά περιγράφεται το δυναμικό μοντέλο αναγνώρισης του βραχίονα, αυτό βασίζεται κυρίως σε φυσικές ιδιότητες
- Υπολογίζεται το ελάχιστο σετ των παραμέτρων αδράνειας που είναι προς αναγνώριση. Είναι δυνατόν να γίνουν απλοποιήσεις παραμελώντας την συνεισφορά που έχουν συγκεκριμένες παράμετροι στην ροπή των συνδέσμων.
- Πρέπει να σχεδιαστούν κατάλληλες τροχιές διέγερσης για να υπάρξει καλή ποιότητα μετρούμενων δεδομένων. Αυτό περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλης παραμετροποίησης της τροχιάς και ενός κριτηρίου βελτιστοποίησης.
- Εκτέλεση του πειράματος αναγνώρισης κατά την διάρκεια του οποίου γίνονται μετρήσεις για την κίνηση και την ροπή των κινητήρων.
- Λαμβάνονται εκτιμήσεις των άγνωστων δυναμικών παραμέτρων εφαρμόζοντας έναν κατάλληλο αλγόριθμο.
- Γίνεται πειραματική επαλήθευση του αναγνωρισμένου δυναμικού μοντέλου. Αυτό επιτυγχάνεται συγκρίνοντας την πραγματική ροπή με αυτήν που προβλέπει το μοντέλο για μια δεδομένη τροχιά, διαφορετική από την τροχιά διέγερσης.

2.5 Παραγωγή μοντέλου

Ένας ρομποτικός βραχίονας είναι κατασκευασμένος με μηχανικά μέρη τα οποία είναι συνδεδεμένα μέσω συνδέσμων.

2.5.1 Εξαγωγή δυναμικών εξισώσεων

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν 2 μέθοδοι για να αποκτηθεί ένα μοντέλο αναγνώρισης της δυναμικής του βραχίονα. Η πρώτη χρησιμοποιεί την ολική ενέργεια του συστήματος, ενώ η δεύτερη βασίζεται στις εξισώσεις κίνησης.

1. Ενεργειακή Προσέγγιση

Το μοντέλο εξάγεται εφαρμόζοντας το θεώρημα διατήρησης της ενέργειας. Στο [13, 26] η ολική ενέργεια εκφράζεται ως:

$$E_{total} = \int_a^b \tau^T \dot{q} dt \quad (2.1)$$

$$E_{total} = \Phi(q, \dot{q}) \theta \quad (2.2)$$

Οι μεταβλητές a και b αναπαριστούν τον αρχικό και τον τελικό χρόνο του πειράματος, τ είναι το διάνυσμα των ροπών των κινητήρων, q το διάνυσμα της γωνιακής θέσης και \dot{q} το διάνυσμα των ταχυτήτων. Μια κατάλληλη παραμετροποίηση δίνει ένα μοντέλο που είναι γραμμικό ως προς τις παραμέτρους: Φ είναι ο πίνακας αναγνώρισης και θ είναι οι άγνωστοι παράμετροι. Το μοντέλο αναγνώρισης είναι συνάρτηση της ταχύτητας και της γωνιακής θέσης, για αυτό δεν χρειάζεται εκτίμηση της επιτάχυνσης. Για να βρεθεί το σετ των εξισώσεων από το οποίο θα εκτιμηθούν οι παράμετροι, πρέπει να υπολογιστεί το ολοκλήρωμα. Για να γίνει αυτό πρέπει διαιρεθεί ο χρόνος πειράματος σε k διαστήματα και για κάθε ένα από αυτά να λυθεί το ολοκλήρωμα. Τέλος θα μπορούσε να υπολογιστεί και η επίδραση της τριβής στο σύστημα προσθέτοντας ακόμα έναν όρο όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$E_{total} = \int_a^b \tau^T \dot{q} dt + \int_a^b \tau_f^T \dot{q} dt \quad (2.3)$$

2. Προσέγγιση Δυναμικού Μοντέλου

Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του βραχίονα και σχετίζει την κίνηση των συνδέσμων με την ροπή των κινητήρων [4, 24], η δυναμική ενός ρομποτικού βραχίονα με περιστροφικούς άξονες μπορεί να περιγραφεί επαρκώς χρησιμοποιώντας τις παρακάτω γνωστές εξισώσεις κίνησης [39]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (2.4)$$

Όπου q είναι το διάνυσμα της γωνιακής θέσης της άρθρωσης, $M(q)$ είναι ο συμμετρικός, θετικά ορισμένος πίνακας αδράνειας, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ είναι ένα διάνυσμα που περιέχει όλους τους όρους που προκύπτουν από το φαινόμενο Coriolis και τις φυγόκεντρες δυνάμεις, $g(q)$ αναπαριστά το διάνυσμα των ροπών βαρύτητας και τ είναι το διάνυσμα των ροπών των αρθρώσεων.

Έχουν προταθεί αρκετοί αλγόριθμοι ικανοί να παράξουν αυτές τις δυναμικές εξισώσεις κίνησης, όπως η μέθοδος Newton-Euler [4] και η μέθοδος Lagrange [42]. Το πλεονέκτημα της πρώτης είναι ότι έχει μικρότερη πολυπλοκότητα, ενώ της δεύτερης είναι πως κάθε παράμετρος έχει ξεκάθαρο φυσικό νόημα. Παρόλα αυτά και οι δύο καταλήγουν σε ένα μοντέλο της μορφής $\tau = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, \theta)$ το οποίο είναι μη γραμμικό ως προς τις παραμέτρους αδράνειας. Όμως χρησιμοποιώντας βαρυκεντρικές παραμέτρους [36] το σετ των εξισώσεων μπορεί να ανακατασκευαστεί και να γίνει γραμμικό ως προς τις άγνωστες παραμέτρους $\tau = \Phi(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta$. Η γραμμικότητα είναι πολύ σημαντική καθώς επιτρέπει την χρήση αλγορίθμων εκτίμησης γραμμικών παραμέτρων. Τέλος η έννοια της τριβής μπορεί να εισαχθεί στο δυναμικό μοντέλο προσθέτοντας παραπάνω όρους στην εξίσωση.

3. Σύγκριση μεταξύ ενεργειακής προσέγγισης και προσέγγισης δυναμικού μοντέλου

Στα [16, 26] έχουν συγκριθεί οι δύο μέθοδοι, τα συμπεράσματα είναι τα παρακάτω:

- Η ενεργειακή προσέγγιση δεν προϋποθέτει τον υπολογισμό ή την μέτρηση της επιτάχυνσης, άρα παρέχει λιγότερη πληροφορία.
- Και στις δύο περιπτώσεις είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί μια “καλή” τροχιά διέγερσης, αυτή θα πρέπει να διεγείρει όσο καλύτερα γίνεται την πληροφορία που υπάρχει στις εξισώσεις του μοντέλου.
- Αν οι μετρήσεις από την κίνηση του βραχίονα δεν ταιριάζουν με κάποια αναλυτική περιγραφή, δεν μπορεί να εφαρμοστεί αναλυτική διαφορίση. Οπότε είναι απαραίτητη η χρήση τεχνικών αριθμητικής διαφορίσης για να μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Η ενεργειακή προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα πως δεν χρειάζεται πληροφορία για την επιτάχυνση άρα δεν υπεισέρχεται το σφάλμα που υπάρχει σε αυτήν.

Σε αυτήν την εργασία θα χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση δυναμικού μοντέλου για να παραχθούν οι εξισώσεις του μοντέλου. Η επιλογή επηρεάστηκε από το γεγονός ότι το δυναμικό μοντέλο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον έλεγχο του βραχίονα.

2.5.2 Μοντελοποίηση Τριβής

Είναι ιδιαίτερα γνωστό ότι η τριβή αποτελεί μια σημαντική πηγή διαταράξεων που επηρεάζουν την ποιότητα της κίνησης. Για αυτό πρέπει να συμπεριληφθεί σαν ένα επιπρόσθετο στοιχείο στην μοντελοποίηση του ρομπότ. Η κλασική προσέγγιση περιγράφει την τριβή σαν μία μη γραμμική και ασυνεχή συνάρτηση της σχετικής ταχύτητας των δύο επιφανειών επαφής. Το μοντέλο συχνά περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες.

- Την τριβή Coulomb που περιγράφεται ως

$$\tau_c = f_c \text{sign}(\dot{q}_i) \quad (2.5)$$

που έχει σαν αποτέλεσμα ασυνέχεια όταν η ταχύτητα γίνεται μηδέν.

- Την ιξώδη (viscous) τριβή που παρέχει μια γραμμική σχέση με την ταχύτητα

$$\tau_{visc} = f_u \text{sign}(\dot{q}_i) \quad (2.6)$$

όπου f_u είναι ο συντελεστής ιξώδους τριβής.

- Το μοντέλο τριβής Stribeck περιλαμβάνει το φαινόμενο κατά το οποίο για χαμηλή ταχύτητα η τριβή έχει αρκετά υψηλή τιμή, ενώ καθώς αυξάνεται η ταχύτητα η τιμή της τριβής πέφτει. Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιείται εκθετική συνάρτηση.

$$\tau_s = f_s e^{-q/q_s} \text{sign}(\dot{q}_i) \quad (2.7)$$

όπου f_s είναι η στατική δύναμη όταν η ταχύτητα είναι μηδέν και q_s είναι η κρίσιμη ταχύτητα Stribeck.

Κατά την αναγνώριση των παραμέτρων, ένα μοντέλο που περιλαμβάνει ιξώδης και Coulomb τριβή εφαρμόζεται αρκετά συχνά [3, 7, 16, 33]. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι γραμμικό ως προς τις παραμέτρους, κάτι που απλοποιεί την εκτίμηση παραμέτρων. Αφού είναι αρκετά δύσκολο να εξαχθεί ένα απλό μοντέλο για τις στατικές επιδράσεις σε χαμηλή ταχύτητα [1], το μοντέλο τριβής μπορεί να περιοριστεί για συγκεκριμένη διακύμανση της ταχύτητας.

$$\tau_f = \begin{cases} f_c \text{sign}(\dot{q}) + f_u \dot{q} & |\dot{q}| \geq \dot{q}_{min} \\ 0 & |\dot{q}| \leq \dot{q}_{min} \end{cases} \quad (2.8)$$

όπου το \dot{q}_{min} είναι ένα κατάλληλο κατώφλι ταχύτητας.

Το παραπάνω μοντέλο όμως δεν είναι κατάλληλο για να περιγράψει πλήρως πειραματικά δεδομένα. Μια καλύτερη περιγραφή [10] είναι η παρακάτω:

$$\tau_f = f_0 + f_1 \text{sign}(\dot{q}) + f_2 \dot{q} + f_3 q^{1/3} \quad (2.9)$$

$$\tau_f = f_0 + f_1 \text{sign}(\dot{q}) + f_2 \dot{q} + f_3 \arctan(f_4 \dot{q}) \quad (2.10)$$

Αυτά τα μοντέλα παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα από την κλασική περίπτωση. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι παράμετροι δεν αναπαριστούν πλέον φυσικές ιδιότητες. Επιπλέον, η ασυνέχεια, όταν η ταχύτητα είναι μηδέν, συνεχίζει να υπάρχει. Παρόλα αυτά μπορεί να εξαλειφθεί αντικαθιστώντας τον όρο του Coulomb με μια κατάλληλη προσέγγιση, για παράδειγμα με $f_i \arctan(c_i \dot{q})$, όπου c_i μια κατάλληλη σταθερά [19].

Κάποια μοντέλα έχουν παρουσιαστεί [37] με σκοπό να μοντελοποιήσουν την τριβή σε ένα harmonic drive gear. Η ιξώδης τριβή επεκτείνεται με ένα μη γραμμικό κυβικό όρο:

$$\tau_{visc} = f_1\dot{q} + f_2q^3 \quad (2.11)$$

Για την στατική τριβή, ένα παραλλαγμένο μοντέλο τριβής Coulomb χρησιμοποιείται.

$$\tau_{stat1} = (f_c + f_s e^{-|\dot{q}/\dot{q}_s|d_s}) \text{sign}(\dot{q}) \quad (2.12)$$

$$\tau_{stat2} = f_c \arctan(\dot{q}/\dot{q}_1) + f_s \dot{q}/\dot{q}_1 e^{-|\dot{q}/\dot{q}_s|d_s} \quad (2.13)$$

ο δείκτης c δείχνει την τριβή Coulomb και ο δείκτης s σχετίζεται με το κομμάτι της μοντελοποίησης του φαινομένου Stribeck. Οι σταθερές $f_s, \dot{q}_s, \dot{q}_1, \dot{q}_2$ μπορούν να βρεθούν πειραματικά. Στο τελευταίο μοντέλο δεν υπάρχει ασυνέχεια όταν η ταχύτητα γίνεται μηδέν.

Τυπικά κατά την διάρκεια της αναγνώρισης, το ρομπότ πρέπει να “ζεσταθεί” για κάποιον χρόνο έτσι ώστε να φτάσει σε κατάλληλη θερμοκρασία. Πειράματα έχουν δείξει πως μετά από μια μικρή διακοπή στις μετρήσεις, η τριβή γίνεται αρκετά μεγαλύτερη. Για αυτό το λόγο δεν γίνεται να υπάρξουν οι ίδιες συνθήκες κάθε φορά. Επιπλέον η τριβή μπορεί να είναι συνάρτηση όχι μόνο της ταχύτητας αλλά και της ροπής του κινητήρα. Αυτά τα φαινόμενα οδηγούν σε συστηματικά λάθη, ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί μια αρκετά καλή τροχιά διέγερσης.

2.5.3 Αδράνεια Ρότορα

Κάθε σύνδεσμος σε ένα σειριακό βραχίονα οδηγείται από μια μηχανή μέσω μιας μονάδας μετάδοσης. Αυτές οι μονάδες είναι συνήθως σχέσεις μείωσης μ_i μεταξύ 50 και 100 και στην περίπτωση αρμονικής οδήγησης μέχρι και 200. Όταν η αδράνεια του ρότορα είναι σχετικά μικρή, είναι συνηθισμένη πρακτική να προστίθεται στην αδράνεια του αντίστοιχου συνδέσμου του δυναμικού μοντέλου.

Παρόλα αυτά έχειδειχθεί [8, 40] πως το αποτέλεσμα της αδράνειας γρήγορα περιστρεφόμενων κινητήρων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, καθώς η αδράνεια του ρότορα πολλαπλασιάζεται με το τετράγωνο της σχέσης μετάδοσης. Οι επιπρόσθετες συνεισφορές πρέπει να εισαχθούν στα μη διαγώνια στοιχεία του ταυστή αδράνειας, για να αντιπροσωπεύσουν το φαινόμενο Coriolis και την φυγόκεντρο δύναμη της σχετικής κίνησης του ρότορα.

Κατά την εξαγωγή του δυναμικού μοντέλου μπορούν να θεωρηθούν ξεχωριστές συνεισφορές για το σύνδεσμο και για τον ρότορα [35, 40]. Ο όρος $\mu_i^2 I_m$ μπορεί να προστεθεί στην αδράνεια του συνδέσμου όταν

$$e_{m_{i+1}}^T \omega_i = 0 \quad (2.14)$$

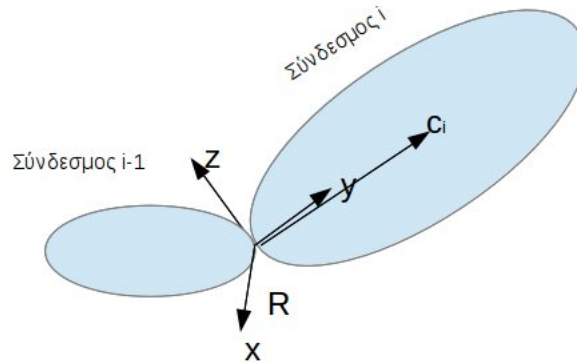
όπου ω_i είναι η γωνιακή ταχύτητα του συνδέσμου i στον οποίο είναι συνδεδεμένος ο κινητήρας και $e_{m_{i+1}}^T$ είναι το διάνυσμα που βρίσκεται κατά μήκος του άξονα περιστροφής του ρότορα. Θεωρείται ότι ο σύνδεσμος $i+1$ είναι παράλληλος στον άξονα περιστροφής του ενεργοποιητή (ρότορα) $i+1$. Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει ότι αυτή η απλοποίηση, επιτρέπεται για κινητήρες συνδεδεμένους με συνδέσμους που έχουν γωνιακή ταχύτητα μηδέν ή κάθετη στον άξονα κίνησης του ρότορα, για κάθε δυνατή διαμόρφωση του βραχίονα.

2.6 Παράμετροι του Μοντέλου Αναγνώρισης

Στο προηγούμενο μέρος βρέθηκαν οι δυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν τον βραχίονα, σε αυτό το κεφάλαιο αυτές θα ξαναγραφτούν σε μια κατάλληλη μορφή για το πείραμα της αναγνώρισης. Ένας κατάλληλος μετασχηματισμός επιτρέπει να ξαναγραφτούν οι εξισώσεις σε μορφή γραμμική ως προς τις παραμέτρους είναι ο παρακάτω:

Κάθε σύνδεσμος i χαρακτηρίζεται από 10 παραμέτρους αδράνειας:

- Την μάζα m_i
- Την θέση του κέντρου βάρους $c_i = [c_{x,i}, c_{y,i}, c_{z,i}]^T$ εκφρασμένο στο πλαίσιο του συνδέσμου R όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 2.2: Τυχαίος σύνδεσμος

- Τα έξι στοιχεία του τανυστή αδράνειας $[I_{xx,i}, I_{yy,i}, I_{zz,i}, I_{xy,i}, I_{yz,i}, I_{xz,i}]$ εκφρασμένα σε σχέση με το κέντρο βάρους

Σε αυτό το σετ παραμέτρων αδράνειας μπορεί να προστεθεί η αδράνεια του ηλεκτρικού κινητήρα και ο συντελεστής τριβής. Άρα για κάθε βαθμό ελευθερίας του βραχίονα απαιτείται η εύρεση ενός διάνυσματος με τουλάχιστον 13 αγνώστους (σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί μοντέλο Coulomb και ιξώδους τριβής). Για την συνολική δομή του βραχίονα με n βαθμούς ελευθερίας, πρέπει να υπάρξει ένα διάνυσμα παραμέτρων $\theta_{full} = [p_1^T, p_2^T, \dots, p_n^T]$ το οποίο περιέχει $13n$ παραμέτρους.

2.6.1 Γραμμική Παραμετροποίηση

Οι δυναμικές εξισώσεις του βραχίονα είναι τελικά μια μη γραμμική συνάρτηση F των στοιχείων θ_{full} .

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (2.15)$$

$$F(q, \dot{q}, \ddot{q}, \theta_{full}) = \tau \quad (2.16)$$

Ευτυχώς υπάρχουν άλλες παραμετροποιήσεις και μετασχηματισμοί παραμέτρων που έχουν προταθεί και επιτρέπουν την μετατροπή των εξισώσεων σε γραμμικές ως προς το σετ των άγνωστων δυναμικών παραμέτρων.

$$\tau = \Phi(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta_{linear} \quad (2.17)$$

Όπου Φ είναι ο πίνακας αναγνώρισης και θ_{linear} είναι το διάνυσμα των μετασχηματισμένων παραμέτρων. Το δυναμικό μοντέλο μπορεί να είναι ήδη γραμμικό ως προς την ροπή αδράνειας του ρότορα και τους συντελεστές τριβής, σε περίπτωση που επιλέχθηκε μοντέλο τριβής που να είναι γραμμικό ως προς τις άγνωστες παραμέτρους. Επομένως οι αντίστοιχοι παράμετροι δεν χρειάζεται να υποστούν κάποιο μετασχηματισμό. Η ιδιότητα της γραμμικότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς απλοποιείται η εκτίμηση των παραμέτρων.

Ένας κοινός μετασχηματισμός χρησιμοποιεί ροπή αδράνειας πρώτης και δεύτερης τάξης [4, 23, 40]:

$$p_{linear} = [m_s s_x s_y s_z I_{xx}^R I_{yy}^R I_{zz}^R I_{xy}^R I_{yz}^R I_{xz}^R f_c f_u]^T \quad (2.18)$$

Οι ροπές πρώτης τάξης: $s_i = m_i c_i$. Οι ροπές δεύτερης τάξης παράγουν τον τανυστή αδράνειας εκφρασμένο ως προς την βάση του πλαισίου του συνδέσμου. Άλλες παραμετροποιήσεις όπως οι βαρυκεντρικοί παράμετροι [36] αμέσως οδηγούν σε ένα μοντέλο γραμμικό και ελάχιστο ως προς τις παραμέτρους.

2.6.2 Αναγνωρισιμότητα και ελάχιστο σύνολο παραμέτρων

Γενικά, δεν μπορούν να βρεθούν όλοι οι παράμετροι του δυναμικού μοντέλου. Η μη αναγνωρισιμότητα οφείλεται στο ότι η κινηματική κατασκευή περιορίζει την σχετική κίνηση μεταξύ των συνδέσμων. Για να μπορεί να γίνει εκτίμηση όλων των άγνωστων παραμέτρων, ο Ιακωβιανός του μοντέλου αναγνώρισης, ως προς τις άγνωστες παραμέτρους, πρέπει να είναι πλήρους βαθμού [38]. Ο πίνακας Φ γενικά δεν είναι πλήρους βαθμού. Οι δυναμικές παράμετροι μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: πλήρως αναγνωρίσιμες, αναγνωρίσιμες σε γραμμικούς συνδυασμούς και μη αναγνωρίσιμες [4].

Το σετ των δυναμικών παραμέτρων μπορεί να απλοποιηθεί έτσι ώστε να εξασφαλιστούν οι βασικές παράμετροι αδράνειας [30, 42]. Το βασικό σετ ορίζεται ως το ελάχιστο σετ των παραμέτρων που απαιτούνται για να περιγραφεί το μοντέλο. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να βρεθούν από τις παραμέτρους αδράνειας, διαγράφοντας όσες δεν επηρεάζουν το δυναμικό μοντέλο και ανασυντάσσοντας άλλες σε γραμμικούς συνδυασμούς. Επιπλέον είναι εφικτό να εισαχθούν επιπλέον απλοποιήσεις, αμελώντας την δύναμη Coriolis και την φυγόκεντρη δύναμη. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται το condition number του πίνακα αναγνώρισης, αφού οι λιγότερο σημαντικοί παράμετροι διαγράφονται. Σε υψηλές ταχύτητες όμως αυτοί οι όροι μπορεί να γίνουν αρκετά σημαντικοί, κάτι που οδηγεί σε συστηματικά λάθη.

Το βασικό σετ μπορεί να βρεθεί, λαμβάνοντας υπ' όψιν τον βαθμό του πίνακα αναγνώρισης Φ . Μια διαδικασία για να γίνει αυτό βασίζεται στην εξίσωση 2.16 και προτείνεται από [14], ενώ ο [12] προτείνει μια μέθοδο για να βρεθεί το ελάχιστο σετ βαρυκεντρικών παραμέτρων.

2.7 Σχεδιασμός Πειραματικών Μετρήσεων

Ένα σημαντικό ζήτημα της αναγνώρισης των δυναμικών παραμέτρων είναι η επιλογή της τροχιάς διέγερσης, καθώς πρέπει να διεγείρει επαρκώς το σύστημα έτσι ώστε να εκτιμηθούν όλες οι άγνωστοι παράμετροι του μοντέλου. Εάν δεν υφίσταται αυτή η προϋπόθεση, κάποιοι παράμετροι μπορεί να είναι μη αναγνωρίσιμοι ή πολύ ευαίσθητοι λόγω του θορύβου των μετρούμενων δεδομένων. Η ποιότητα του αποτελέσματος της εκτίμησης των παραμέτρων εξαρτάται από την ποιότητα των διαθέσιμων σημάτων εισόδου εξόδου, είναι δηλαδή άμεσα εξαρτώμενη από την επιλογή της τροχιάς διέγερσης.

Για πρώτη φορά παρατηρήθηκε η σημασία μιας καλής τροχιάς διέγερσης στο [2], ενώ αργότερα και άλλοι ερευνητές χρησιμοποίησαν τα πλεονεκτήματα της [5, 15].

Η σχεδίαση μιας καλής τροχιάς διέγερσης περιλαμβάνει τον αριθμό των συνδέσμων που θα διεγερθούν, την επιλογή μια παραμετροποίησης της τροχιάς και ενός κριτηρίου βελτιστοποίησης. Τέλος θα πρέπει να λυθεί το πρόβλημα ελαχιστοποίησης χρησιμοποιώντας κάποιον αλγόριθμο.

2.7.1 Διαχωρισμός πειραμάτων

Αρχικά πρέπει να αποφασιστεί εάν όλες οι παράμετροι θα αναγνωριστούν σε ένα μόνο πείραμα ή σε ξεχωριστά πειράματα και ποιοι σύνδεσμοι θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε πείραμα. Ο πίνακας αναγνώρισης έχει τριγωνική μορφή λόγω της σειριακής κατασκευής του βραχίονα. Αυτό σημαίνει ότι η ροπή του τελευταίου κινητήρα καθορίζεται μόνο από τις παραμέτρους αδράνειας του τελευταίου σώματος (και του ωφέλιμου φορτίου), ενώ η ροπή του πρώτου κινητήρα επηρεάζεται από τις παραμέτρους αδράνειας όλου του βραχίονα.

Η αναγνώριση του μοντέλου τριβής μπορεί να γίνει για κάθε σύνδεσμο ξεχωριστά, πριν γίνει το πείραμα της αναγνώρισης. Για να συλλεχθούν δεδομένα για το μοντέλο τριβής, κάθε άξονας κινείται (ξεχωριστά) με σταθερή ταχύτητα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διαφορετικές ταχύτητες.

Στην παρούσα εργασία θα αναγνωριστούν όλοι οι παράμετροι σε ένα πείραμα χρησιμοποιώντας μία τροχιά διέγερσης. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να μην είναι κατάλληλη για όλες τις περιπτώσεις. Για παράδειγμα σε βραχίονες που χρησιμοποιούν υδραυλικούς ενεργοποιητές, το αποτέλεσμα πιθανόν να μην ήταν επιτυχημένο.

2.7.2 Κριτήρια βελτιστοποίησης τροχιάς διέγερσης

Μια κατάλληλη επιλογή της τροχιάς μπορεί να εξασφαλίσει την διέγερση του συνολικού συστήματος έτσι ώστε όλοι οι παράμετροι να μπορούν να αναγνωριστούν με ακρίβεια. Για αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές βελτιστοποίησης. Στο [2] προτείνεται η ελαχιστοποίηση του αριθμού κατάστασης (condition number) του πίνακα αναγνώρισης, ο οποίος ορίζεται ως

$$\text{cond}(\Phi) = \sigma_{max}(\Phi)/\sigma_{min}(\Phi) \quad (2.19)$$

όπου σ_{max} και σ_{min} είναι η μεγαλύτερη και η μικρότερη singular value του Φ . Ένας μικρός condition Number μειώνει την ευαισθησία της λύσης των ελαχίστων τετραγώνων, ως προς το σφάλμα των μετρούμενων ροπών [2, 18].

Εάν υπάρχει μία εκ των προτέρων γνώση για το διάνυσμα παραμέτρων θ , τότε ο πίνακας αναγνώρισης μπορεί να μετατραπεί σε [34]

$$\Phi_w = \Phi \text{diag}(\theta) \quad (2.20)$$

Εάν ο condition number του παραπάνω πίνακα είναι ένα τότε όλοι οι παράμετροι μπορούν να εκτιμηθούν με την ίδια σχετική ακρίβεια.

Ένα ακόμη κριτήριο είναι η μεγιστοποίηση της μικρότερης singular value, καθώς αυτό θα εξασφάλιζε μικρή τυπική απόκλιση για κάθε παράμετρο [34, 2, 22]. Συνδυάζοντας αυτό το κριτήριο με το προηγούμενο προκύπτει ότι πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η παρακάτω τιμή:

$$\text{cond}(\Phi) + \lambda \frac{1}{\sigma_{min}(\Phi)} \quad (2.21)$$

όπου η μεταβλητή λ δείχνει την σχετική σημασία των δύο κριτηρίων.

Ένα λιγότερο διαδεδομένο κριτήριο βασίζεται στην μονοδιάστατη μέτρηση του πίνακα διακύμανσης. Το d-optimal κριτήριο είναι ελκυστικό επειδή εγγυάται την ελάχιστη αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων όταν μόνο οι μετρήσεις των ροπών έχουν θόρυβο και ο πίνακας αναγνώρισης δεν έχει [29, 43]. Στόχος λοιπόν είναι η ελαχιστοποίηση του :

$$-\log \det(\Phi^T \Sigma^{-1} \Phi) \quad (2.22)$$

όπου Σ είναι ο διαγώνιος πίνακας διακύμανσης των ροπών των κινητήρων.

Πρέπει να επισημανθεί ότι οι τροχιές διέγερσης δεν θα έπρεπε να διεγείρουν μη μοντελοποιημένες δυναμικές όπως ευκαμψία συνδέσμων. Όλα τα προτεινόμενα κριτήρια βελτιστοποίησης αποτυγχάνουν να συμπεριλάβουν αυτήν την προϋπόθεση.

2.7.3 Παραμετροποίηση της τροχιάς διέγερσης

Η επιλογή της παραμετροποίησης για την τροχιά διέγερσης είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα, καθώς καθορίζει άμεσα τον αριθμό των παραμέτρων για το πρόβλημα βελτιστοποίησης και την δυσκολία για τον υπολογισμό της ταχύτητας και της επιτάχυνσης από την μέτρηση της θέσης.

Κάποιοι ερευνητές [17] χρησιμοποιούν πολυώνυμα πέμπτου βαθμού, εκτιμώντας την ταχύτητα και την επιτάχυνση μέσω ζωνοπερατών φίλτρων. Άλλοι χρησιμοποιούν μεθόδους με λιγότερες παραμέτρους για να μειώσουν τον υπολογιστικό χρόνο. Θεωρούν για κάθε άξονα 3 σημεία και μια πολυώ-

νυμική τροχιά 7 βαθμού που τα συνδέει [10]. Η επιτάχυνση και η ταχύτητα είναι μηδέν στο αρχικό και στο τελικό σημείο. Η παρεμβολή της τροχιάς για κάθε άξονα είναι η παρακάτω:

$$q(t) = \sum_{i=1}^6 \alpha_i t^i + (d_1 + d_2 t) \sum_{i=1}^6 \beta_i t^i \quad (2.23)$$

όπου το α υπολογίζεται ώστε να λυθούν οι οριακές συνθήκες και το β οι ομοιογενείς οριακές συνθήκες. Αλλάζοντας τα d_1, d_2 μπορούν να προκύψουν διαφορετικές τροχιές. Η χρήση πολωνύμων 7 βαθμού εγγυάται ότι δεν θα υπάρχουν τινάγματα και δονήσεις, έτσι ώστε να μην διεγερθεί η ελαστικότητα των συνδέσμων.

Σε πιο πρόσφατες έρευνες [11] χρησιμοποιείται τραπεζοειδές προφίλ κίνησης γύρω από ένα σημείο ισορροπίας. Το μοναδικό πλεονέκτημα είναι ότι τέτοιες τροχιές μπορούν να πραγματοποιηθούν από όλους τους ελεγκτές.

Σε μια διαφορετική προσέγγιση [1], ερευνητές πρώτα βρίσκουν βέλτιστα σημεία στην τροχιά και έπειτα χρησιμοποιούν πολυώνυμο πέμπτου βαθμού που θα διαπερνάει αυτά τα σημεία.

Τέλος το 1996 ο Swevers στο [21] εισάγει την ιδέα της περιοδικής διέγερσης. Η τροχιά διέγερσης αποτελείται από ένα άθροισμα αρμονικών συναρτήσεων:

$$q_i = q_{i,0} + \sum_{k=1}^N \alpha_{i,k} \sin(k\omega_f t) + \beta_{i,k} \cos(k\omega_f t) \quad (2.24)$$

Η παραπάνω τροχιά μπορεί να υλοποιηθεί αρκετά δύσκολα από ένα βιομηχανικό ελεγκτή, παρόλα αυτά έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Αυτά θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο, καθώς αυτή η τροχιά θα χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο πείραμα.

2.8 Τεχνικές Βελτιστοποίησης

Η βελτιστοποίηση είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την επιστήμη και την μηχανική. Σε πολλές εφαρμογές σχεδίασης, πρέπει να επιλεγούν παράμετροι που είναι βέλτιστοι ως προς μια έννοια. Μια σειρά από αληθινά προβλήματα μπορούν να εκφραστούν ως προβλήματα βελτιστοποίησης, συνήθως με διάφορους περιορισμούς. Μια συνάρτηση κόστους γίνεται να ποσοτικοποιήσει την απόδοση μιας επιλογής σχεδίασης ως συνάρτηση των μεταβλητών σχεδίασης. Ο στόχος είναι να βρεθούν οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης που βελτιστοποιούν την συνάρτηση κόστους και ικανοποιούν τους περιορισμούς. Μια αναλυτική προσέγγιση μπορεί να βρεθεί στην βιβλιογραφία [31]

Δεν υπάρχει κάποιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης ικανός να λύσει όλα τα προβλήματα. Υπάρχει όμως ένας μεγάλος αριθμός αλγορίθμων, ο κάθε ένας από τους οποίους είναι κατάλληλος για διαφορετικές εφαρμογές. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων είναι ο linear programming (LP), linear least squares (LLS) και ο quadratic programming (QP), ενώ ο Sequential quadratic programming (SQP) είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς και πιο συχνούς στην χρήση.

Ιδανικά, κάθε αλγόριθμος θα έπρεπε να επιστρέφει το ολικό ελάχιστο. Δυστυχώς αυτό δεν μπορεί να συμβαίνει. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι η συνάρτηση κόστους μπορεί να έχει πολλά τοπικά ελάχιστα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Οι συνηθισμένες τεχνικές nonlinear programming αποδείχθηκαν αποτυχημένες για την λύση τέτοιων προβλημάτων, καθώς δεν εγγυώνται ότι θα βρουν το ολικό ελάχιστο.

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην εύρεση ενός καλού τοπικού ελαχίστου.

2.9 Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια επισκόπηση της βιβλιογραφίας στην πειραματική ρομποτική αναγνώριση. Διαφορετικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούν εσωτερικά και εξωτερικά μοντέλα

αλλά και οι δύο ακολουθούν παρόμοιες διαδικασίες. Η παραγωγή του μοντέλου της δυναμικής του άκαμπτου σώματος βασίζεται είτε στην ενεργειακή προσέγγιση είτε στις διαφορικές εξισώσεις. Οι τελευταίες είναι πιο κατάλληλες για τον έλεγχο του συστήματος. Το παραπάνω μοντέλο μπορεί να επεκταθεί έτσι ώστε να προβλέπει επιπλέον φαινόμενα όπως η τριβή. Για να εξασφαλιστεί η ικανοποιητική διέγερση του συστήματος, παρουσιάστηκαν αρκετές παραμετροποιήσεις της τροχιάς διέγερσης, οι οποίες βελτιστοποιούνται χρησιμοποιώντας κατάλληλα κριτήρια. Τέλος παρουσιάστηκαν αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που μπορούν να βρουν ένα 'καλό' τοπικό ελάχιστο.

Κεφάλαιο 3

Ανάπτυξη Μεθόδων Αναγνώρισης Δυναμικών Παραμέτρων Ρομποτικού Μοντέλου

3.1 Εισαγωγή

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι για την αναγνώριση των παραμέτρων ενός ρομποτικού βραχίονα και ο κάθε ένας έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα. Κατά την διάρκεια της πρακτικής εφαρμογής θα πρέπει να έχουν γίνει οι τελικές επιλογές που θα ολοκληρώνουν τα διαφορετικά στοιχεία έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί μια συνεκτική διαδικασία. Αυτό το κεφάλαιο παρέχει λεπτομέρειες που αφορούν την αναγνώριση και την εφαρμογή του πειράματος σε έναν βραχίονα. Αρχικά περιγράφεται η δομή του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί, το οποίο είναι γραμμικό ως προς τις άγνωστες παραμέτρους αδράνειας. Έπειτα ακολουθεί η σχεδίαση μιας βέλτιστης τροχιάς που είναι ικανή να διεγείρει τα χαρακτηριστικά του βραχίονα. Η παραπάνω τροχιά πρέπει να υλοποιηθεί σε έναν ρομποτικό βραχίονα. Κατά την διάρκεια του πειράματος γίνονται μετρήσεις για την γωνιακή θέση και την ροπή των αξόνων. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται να βρεθεί ένα σετ παραμέτρων αδράνειας χρησιμοποιώντας τεχνικές ελαχίστων τετραγώνων. Τέλος, γίνεται ένα πείραμα επαλήθευσης που δείχνει αν το πείραμα της αναγνώρισης ήταν επιτυχές ή όχι.

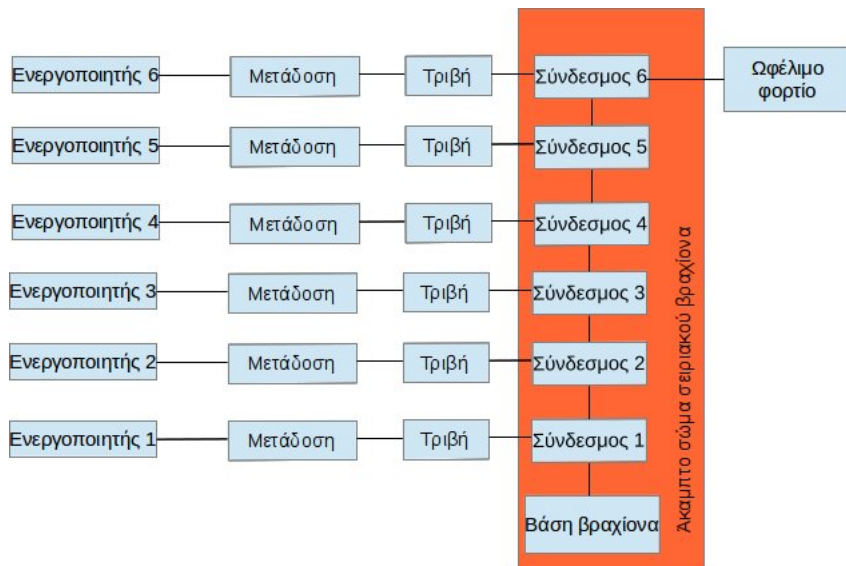
3.2 Παραγωγή Δυναμικού Μοντέλου

Το δυναμικό μοντέλο του ρομπότ είναι το πιο σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας. Ένα καλό μοντέλο πρέπει να ικανοποιεί 2 αντικρουόμενους στόχους. Πρέπει να περιλαμβάνει αρκετή λεπτομέρεια για να περιγράψει την πραγματική συμπεριφορά του βραχίονα και πρέπει να επιτρέπει αρκετά ακριβή εκτίμηση των άγνωστων παραμέτρων αδράνειας. Ο απαραίτητος βαθμός λεπτομέρειας εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και από την απαιτούμενη ακρίβεια. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα, το πρώτο [25] βασίζεται σε βαρυκεντρικούς παραμέτρους και δεν λαμβάνει ξεχωριστά υπ' όψιν την αδράνεια του ρότορα των κινητήρων. Το δεύτερο βασίζεται στις παραμέτρους Newton-Euler και λαμβάνει ξεχωριστά υπ' όψιν την αδράνεια του ρότορα [41].

3.2.1 Γενική Δομή Βραχίονα

Ένας ρομποτικός βραχίονας αποτελείται από αρκετά τμήματα που είναι συνδεδεμένα και αλληλεπιδρούν έτσι ώστε να εκτελεστεί μία εργασία. Η 3.1 δίνει μια σχηματική αναπαράσταση ενός τέτοιου βραχίονα.

Η δομή του ρομπότ μπορεί να χωριστεί σε μια κάθετη και σε μια οριζόντια διεύθυνση. Η κάθετη αναπαριστά την σειριακή κατασκευή, όπου όλοι οι σύνδεσμοι είναι διασυνδεδεμένοι δημιουργώντας μια αλυσίδα. Αυτό το υποσύστημα δημιουργεί ένα άκαμπτο σώμα και εισάγει μη γραμμικά φαινόμενα σύζευξης μεταξύ των αξόνων. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα μοντέλα που περιγράφουν αυτό το φαινόμενο και έχουν παρουσιαστεί αρκετοί αλγόριθμοι όπως οι αναδρομικές εξισώσεις Newton-Euler.



Σχήμα 3.1: Περιγραφή του βραχίονα

Όσον αφορά την οριζόντια διεύθυνση την δομής του βραχίονα, αυτή αποτελείται από τον ενεργοποιητή, το σύστημα μετάδοσης την τριβή και το σύνδεσμο του ρομπότ. Οι ενεργοποιητές παράγουν την απαιτούμενη ροπή για να οδηγήσουν τον βραχίονα. Οι σερβοκινητήρες έχουν σχετικά μικρή αδράνεια ρότορα, όμως στο στάδιο της επιτάχυνσης αρκετή από την παραγόμενη ροπή οφείλεται στην αδράνεια αυτή. Αυτό συμβαίνει εξ αιτίας της υψηλής σχέσης μετάδοσης που έχει ως αποτέλεσμα τις υψηλές ταχύτητες του ρότορα.

Για να απλοποιηθεί το μοντέλο, οι δυναμικές παράμετροι εκφράζονται στην πλευρά των συνδέσμων και όχι στην πλευρά των ενεργοποιητών. Για αυτό οι μετρούμενες ροπές και γωνίες πρέπει να μετασχηματιστούν στην πλευρά των συνδέσμων του ρομπότ. Η αδράνεια του ρότορα μετασχηματίζεται πολλαπλασιάζοντας την με το τετράγωνο της σχέσης μετάδοσης. Η τριβή πρέπει να προστεθεί σε αυτές τις συνιστώσες αφού καταναλώνει μέρος της παραγόμενης ροπής. Οι απώλειες από τριβή οφείλονται κυρίως στον κινητήρα και στην μετάδοση της κίνησης, όμως κατά την αναγνώριση δεν είναι δυνατόν να ξεχωριστούν οι δύο διαφορετικές πηγές. Τέλος, το ωφέλιμο φορτίο συνδέεται στον τελευταίο σύνδεσμο του ρομπότ. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια του πειράματος δεν χρησιμοποιήθηκε ούτε κάποια αρπάγη ούτε φορτίο.

3.2.2 Δυναμική άκαμπτου σώματος

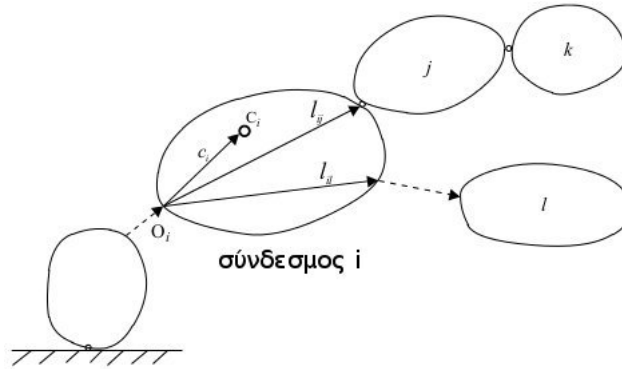
Η δυναμική του σώματος είναι κεντρικό κομμάτι στην δομή του βραχίονα. Η εξίσωση της αντίστροφης δυναμικής:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (3.1)$$

επιστρέφει την απαιτούμενη ροπή για μια επιθυμητή κίνηση των συνδέσμων του ρομπότ. Για να υπάρξει γραμμικότητα ως προς τις άγνωστες παραμέτρους, πρέπει να επιλεγεί μια κατάλληλη παραμετροποίηση. Δηλαδή δεν θα χρησιμοποιηθούν οι κλασσικές παράμετροι m , c , I για την μάζα, το κέντρο βάρους και τον τανυστή αδράνειας αντίστοιχα, αλλά θα προτιμηθούν οι βαρυκεντρικοί και οι παράμετροι Newton-Euler.

1. Βαρυκεντρικοί παράμετροι

Οι συγκεκριμένοι παράμετροι συνδυάζουν τις παραμέτρους αδράνειας διαφορετικών σωμάτων. Οι παράμετροι για τον σύνδεσμο i (3.2) ορίζονται ως εξής



Σχήμα 3.2: Σύνδεσμος του Βραχίονα

- Βαρυκεντρική μάζα: $\tilde{m}_i = m_i + \sum_{j>i} m_j$ η οποία ορίζεται ως η μάζα του συνδέσμου επαυξημένη κατά την συνολική μάζα όλων των απογόνων ($j>i$). Για ένα σειριακό βραχίονα, οι απόγονοι είναι οι επόμενοι σύνδεσμοι στην αλυσίδα μέχρι το τελικό στοιχείο δράσης και το ωφέλιμο φορτίο.
- Βαρυκεντρική ροπή: $b_i = m_i c_i + \sum_{j>i} m_j l_{ij}$, όπου l_{ij} είναι το διάνυσμα που δείχνει την μετατόπιση του j συνδέσμου ως προς τον σύνδεσμο i . Αφού αυτό το διάνυσμα ορίζεται μόνο για διαδοχικούς συνδέσμους, μπορεί να οριστεί ως $l_{ik} = l_{ij}$ για $i < j \leq k$
- Βαρυκεντρικός τανυστής: $K_i = I_i - m_i \tilde{c}_i \tilde{c}_i - \sum_{j>i} m_j \tilde{l}_{ij} \tilde{l}_{ij}$ όπου $\tilde{\cdot}$ εννοείται ο τανυστής που δείχνει το εξωτερικό γινόμενο. Για παράδειγμα:

$$\tilde{c}_i = \begin{pmatrix} 0 & -c_{z,i} & c_{y,i} \\ c_{z,i} & 0 & -c_{x,i} \\ -c_{y,i} & c_{x,i} & 0 \end{pmatrix}$$

Η χρήση αυτών των παραμέτρων παρέχει ένα μοντέλο για τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ρομπότ, το οποίο είναι γραμμικό σε συνδυασμό με τις παραμέτρους αδράνειας των συνδέσμων και του ωφέλιμου φορτίου. Επιπλέον υπάρχουν κανόνες που μας δίνουν ένα ελάχιστο σετ με δυναμικές παραμέτρους. Η αρνητική πλευρά της χρήσης των παραμέτρων εμφανίζεται όταν χρειάζεται να γίνει αναγνώριση φορτίου. Όπως έχει ήδη ειπωθεί οι παράμετροι του κάθε συνδέσμου εξαρτώνται από τους επόμενους συνδέσμους, άρα κάποιοι βαρυκεντρικοί παράμετροι αλλάζουν όταν αλλάζει το φορτίο στον τελευταίο σύνδεσμο. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι πως δεν έχουν φυσική σημασία.

2. Παράμετροι Newton-Euler

- η μάζα m_i
- Η ροπή (first order) $s_i = m_i c_i$, όπου c_i είναι το κέντρο βάρους εκφρασμένο στον i σύνδεσμο.
- Ο τανυστής αδράνειας εκφρασμένος στο πλαίσιο του συνδέσμου και όχι στο κέντρο βάρους.

Με αυτές τις παραμέτρους δεν παρουσιάζονται τα 2 μειονεκτήματα που εμφανίστηκαν στους βαρυκεντρικούς.

3.2.3 Επιπρόσθετα φαινόμενα

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1 ένας ρομποτικός βραχίονας εμπεριέχει και άλλα χαρακτηριστικά εκτός από την αδράνεια των συνδέσμων. Σίγουρα η δυναμική του άκαμπτου σώματος είναι το

πιο σημαντικό στοιχείο, όμως φαινόμενα όπως η τριβή και η αδράνεια του ρότορα είναι απαραίτητα για να εξαχθεί ένα ακριβές δυναμικό μοντέλο. Τα παρακάτω φαινόμενα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν.

- Κινηματική βαθμονόμηση: κάθε μηχανική κατασκευή εμπεριέχει μικρή απόκλιση από την αρχική προδιαγραφή η οποία επιδρά στην ακρίβεια της θέσης του βραχίονα. Μια διαδικασία βαθμονόμησης είναι απαραίτητη ώστε να αναγνωριστούν ακριβές γεωμετρικά και κινηματικά μοντέλα. Αυτή η πληροφορία πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του δυναμικού μοντέλου.
- Συνεισφορά της αδράνειας του ρότορα: καθώς ο κινητήρας κινείται με πολύ υψηλή ταχύτητα, εισάγει μια επιπρόσθετη σύζευξη μεταξύ των διαφορετικών συνδέσμων η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική.
- Τριβή: αυτό το φαινόμενο υπάρχει σε κάθε μηχανήμα και καταναλώνει ένα σημαντικό μέρος της ροπής του κινητήρα. Για αυτό απαιτείται ένα ακριβές μοντέλο που περιγράφει την πραγματική φυσική συμπεριφορά.

3.3 Σχεδίαση Πειράματος Χρησιμοποιώντας Περιοδική Διέγερση

Το επόμενο βήμα στην διαδικασία της αναγνώρισης είναι η σχεδίαση και η εκτέλεση μίας τροχιάς ικανής να διεγείρει τα χαρακτηριστικά του βραχίονα. Η σχεδίαση του πειράματος περιλαμβάνει την επιλογή μιας παραμετροποίησης για την τροχιά που θα ακολουθήσει ο βραχίονας, καθώς και την εύρεση των παραμέτρων που θα οδηγήσουν σε μια βέλτιστη τροχιά. Κατά την σχεδίαση είναι σημαντικό να μελετηθεί εάν η διέγερση είναι αρκετή για να παρέχει ακριβής και γρήγορη εκτίμηση των παραμέτρων υπό την επίδραση θορύβου. Επίσης πρέπει η επεξεργασία των δεδομένων να γίνεται με απλό τρόπο και να εξάγονται ακριβή αποτελέσματα.

3.3.1 Παραμετροποίηση τροχιάς

Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί για να επιτευχθεί η επιθυμητή διέγερση του βραχίονα. Ο Swevers [21] πρότεινε μια περιοδική διέγερση, χρησιμοποιώντας σειρές Fourier. Έτσι όλα τα μετρούμενα σήματα είναι περιοδικά. Η γωνία του κάθε άξονα γράφεται σαν ένα άθροισμα αρμονικών ημίτονων και συνημίτονων:

$$q_i = q_{i,0} + \sum_{k=1}^N \alpha_{i,k} \sin(k\omega_f t) + \beta_{i,k} \cos(k\omega_f t) \quad (3.2)$$

όπου ω_f είναι η θεμελιώδης συχνότητα της πεπερασμένης σειράς Fourier και t είναι ο χρόνος. Η τροχιά έχει περίοδο $T_f = 2\pi/\omega_f$ και κάθε σειρά περιέχει $2N+1$ παραμέτρους: τα πλάτη $\alpha_{i,k}$ και $\beta_{i,k}$ του ημίτονου και συνημίτονου, για $k=1$ μέχρι N , και $q_{i,0}$ είναι η αρχική επιθυμητή θέση του άξονα. Κατάλληλες τιμές για τις παραπάνω μεταβλητές μπορούν να βρεθούν λύνοντας ένα σύνθετο μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς όπως θα δούμε παρακάτω. Η θεμελιώδης συχνότητα είναι ίδια για όλους τους άξονες, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την περιοδική διέγερση του ρομποτικού βραχίονα (periodic robot excitation). Προκύπτουν έτσι τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Time domain data averaging, έτσι ώστε να βελτιωθεί ο σηματοθορυβικός λόγος των δεδομένων του πειράματος.
- Εκτίμηση της διακύμανσης του θορύβου μέτρησης από την διακύμανση του δείγματος.
- Εύρεση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης με αναλυτικό τρόπο μετρώντας μόνο την γωνιακή θέση των αξόνων.
- Δυνατότητα καθορισμού του εύρους ζώνης της τροχιάς διέγερσης.
- Μείωση του χρόνου πειράματος

3.3.2 Ιδιότητες της περιοδικής Τροχιάς

Ο σηματοθορυβικός λόγος των μετρούμενων σημάτων μπορεί να βελτιωθεί με data-averaging, το οποίο είναι εφικτό λόγω της περιοδικότητας των δεδομένων. Ο μέσος όρος της θέσης και της ροπής μπορεί να βρεθεί εύκολα από τους παρακάτω τύπους:

$$\tilde{q} = 1/M \sum_{m=1}^M q_m \quad (3.3)$$

$$\tilde{\tau} = 1/M \sum_{m=1}^M \tau_m \quad (3.4)$$

όπου M είναι ο αριθμός των περιόδων, q_m και τ_m είναι η θέση και η ροπή του κινητήρα για την m περίοδο της τροχιάς. Η βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου είναι πολύ σημαντική καθώς η μετρούμενη ροπή συνήθως έχει μεγάλο σφάλμα μέτρησης. Αυτή η τεχνική είναι προτιμότερη από ένα βαθυπερατό φίλτράρισμα, καθώς το φίλτρο χρωματίζει τον θόρυβο και κάνει πιο σύνθετη την εκτίμηση των παραμέτρων [38].

Η διακύμανση του θορύβου στα μετρούμενα σήματα μπορεί να υπολογιστεί με τους παρακάτω τύπους:

$$\sigma_q^2 = \frac{1}{MK - 1} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (q_m(k) - \tilde{q}(k))^2 \quad (3.5)$$

$$\sigma_\tau^2 = \frac{1}{MK - 1} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (\tau_m(k) - \tilde{\tau}(k))^2 \quad (3.6)$$

όπου K είναι ο αριθμός των δειγμάτων για κάθε περίοδο, οι δείκτες k και m δείχνουν το k δείγμα και την m περίοδο. Για να βρούμε την διακύμανση του θορύβου του μέσου όρου της ροπής και της θέσης, διαιρούμε τους 2 τύπους με τον αριθμό των περιόδων M . Έτσι τα αποτελέσματα του θορύβου μπορούν να μειωθούν αν το πείραμα διαρκέσει περισσότερο χρόνο και υπάρξουν δεδομένα από περισσότερες περιόδους.

Ο υπολογισμός της ταχύτητας και επιτάχυνσης μπορεί να γίνει με αναλυτικό τρόπο χρησιμοποιώντας την μετρούμενη γωνιακή θέση, αυτό είναι εφικτό καθώς τα σήματα είναι περιοδικές σειρές Fourier.

$$\dot{q}_i(t) = \sum_{k=1}^N (\alpha_{i,k} k \omega_f \cos(k \omega_f t) - \beta_{i,k} k \omega_f \sin(k \omega_f t)) \quad (3.7)$$

$$\ddot{q}_i(t) = \sum_{k=1}^N (-\alpha_{i,k} k^2 \omega_f^2 \sin(k \omega_f t) - \beta_{i,k} k^2 \omega_f^2 \cos(k \omega_f t)) \quad (3.8)$$

Για την αναλυτική διαφορίση η μετρούμενη γωνιακή θέση πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε ένα πεπερασμένο άθροισμα ημίτονων και συνημίτονων. Αυτό το άθροισμα διαφορίζεται μία ή δύο φορές και το αποτέλεσμα είναι η ταχύτητα και η επιτάχυνση αντίστοιχα.

Η επιλογή της βασικής συχνότητας και των αρμονικών δίνει την δυνατότητα επιλογής του εύρους ζώνης. Η μεγαλύτερη συχνότητα μπορεί να επιλεγεί να είναι μικρότερη της συχνότητας συντονισμού του βραχίονα. Αυτό το κριτήριο σχεδίασης δεν είναι διαθέσιμο σε τυχαίες σημείο προς σημείο κινήσεις. Είναι προφανές ότι η περιοδική διέγερση δίνει αρκετά πλεονεκτήματα για αυτό και θα χρησιμοποιηθεί στην σχεδίαση του πειράματος, κατά την διάρκεια του οποίου όλοι οι άξονες θα διεγερθούν ταυτόχρονα.

3.4 Παραγωγή της τροχιάς διέγερσης

Παρόλο που η περιοδική διέγερση έχει αρκετά πλεονεκτήματα, υπάρχει το πρόβλημα της εύρεσης των παραμέτρων της βέλτιστης τροχιάς, το οποίο είναι αρκετά σύνθετο. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να μελετηθεί αυτό το πρόβλημα.

3.4.1 Γενική Διατύπωση του Προβλήματος

Μόλις επιλεγεί μια παραμετροποίηση της τροχιάς, πρέπει να βρεθούν οι κατάλληλες παράμετροι ώστε η τροχιά που προκύπτει να δίνει ένα καλό σηματοθορυβικό λόγο και να είναι ικανή να παρέχει ακριβή εκτίμηση παραμέτρων, ακόμα και υπό την επίδραση διαταράξεων. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά κριτήρια που εκφράζουν την απόδοση μιας τροχιάς. Το σημαντικότερο εκ των οποίων είναι ο αριθμός κατάστασης του πίνακα κατάστασης.

Ουσιαστικά η βέλτιστη τροχιά πρέπει να καλύπτει όσο περισσότερο χώρο εργασίας γίνεται και να χρησιμοποιήσει την μέγιστη ταχύτητα και επιτάχυνση. Όπως φαίνεται και από την 3.1 για να διεγερθεί επαρκώς η αδράνεια του βραχίονα πρέπει η επιτάχυνση να είναι αρκετά μεγάλη. Επίσης για να ληφθεί υπ' όψιν το φαινόμενο Coriolis πρέπει η ταχύτητα να είναι αρκετά υψηλή. Τέλος οι γωνιακές θέσεις πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε η δύναμη της βαρύτητας να αναγκάζει τους κινητήρες να παράγουν αρκετή ροπή.

Προφανώς η βέλτιστη τροχιά εξαρτάται από τον εκάστοτε βραχίονα, δηλαδή πρέπει κάθε φορά να λαμβάνονται υπ' όψιν τα όρια και οι περιορισμοί του.

- Μέγιστη q_{max} και ελάχιστη q_{min} γωνιακή θέση.
- Μέγιστη ταχύτητα \dot{q}_{max} και μέγιστη επιτάχυνση \ddot{q}_{max} .
- Περιορισμοί που επιβάλλονται από το περιβάλλον του ρομπότ για να αποφευχθεί κάποια σύγκρουση. Για παράδειγμα αφού υπολογιστεί το ευθύ γεωμετρικό μοντέλο μπορεί να υπεισέλθει κάποιος περιορισμός στο ύψος.
- Μέγιστη ροπή του κινητήρα τ_{max} , η οποία οφείλεται σε κάποιο μέγιστο ρεύμα του κινητήρα. Για να εκτιμηθεί μία μέγιστη ροπή είναι απαραίτητη μια αρχική εκτίμηση των παραμέτρων που είναι προς εύρεση.
- Να μην διεγερθούν φαινόμενα που δεν έχουν ληφθεί υπ' όψιν στον μοντέλο, όπως η ελαστικότητα των συνδέσμων.

Είναι αδύνατον να ποσοτικοποιηθεί ο τελευταίος περιορισμός, καθώς τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται θεωρούν ότι ο βραχίονας είναι άκαμπτο σώμα. Οι απαιτούμενοι παράμετροι μπορούν να βρεθούν είτε με κάποιον αλγόριθμο βελτιστοποίησης είτε με κάποια ευρετική λύση.

3.4.2 Λύση μέσω Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης

Αρχικά πρέπει να οριστεί μία συνάρτηση κόστους ή ένα κριτήριο βελτιστοποίησης που θα μετράει πόσο καλή είναι η τροχιά σαν συνάρτηση των παραμέτρων. Έπειτα πρέπει να οριστούν οι παραπάνω περιορισμοί που αφορούν τα φυσικά όρια του βραχίονα. Σε αυτήν την εργασία ως συνάρτηση κόστους θεωρείται ο αριθμός κατάστασης του πίνακα κατάστασης $R(q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t))$. Το πρόβλημα μπορεί να εκφραστεί ως: Ελαχιστοποίηση $\text{cond}(R)$ με τους παρακάτω περιορισμούς:

$$q_{min} \leq q(\alpha) \leq q_{max} \quad (3.9)$$

$$\dot{q}_{min} \leq \dot{q}(\alpha) \leq \dot{q}_{max} \quad (3.10)$$

$$\ddot{q}_{min} \leq \ddot{q}(\alpha) \leq \ddot{q}_{max} \quad (3.11)$$

$$r_{min} \leq r(q(\alpha)) \leq r_{max} \quad (3.12)$$

$$h_{min} \leq h(q(\alpha)) \leq h_{max} \quad (3.13)$$

$$\tau_{min} \leq R(q(\alpha), \dot{q}(\alpha), \ddot{q}(\alpha))\theta \leq \tau_{max} \quad (3.14)$$

όπου r η ακτίνα του βραχίονα και h το ύψος. Ο τελευταίος περιορισμός δεν λήφθηκε υπ' όψιν καθώς δεν υπήρχε εκ των προτέρων γνώση του διανύσματος παραμέτρων θ .

Αυτό το πρόβλημα λοιπόν θα έχει ως λύση το διάνυσμα α , το οποίο περιλαμβάνει τα $q_{i,0}, a_{i,k}$ και $b_{i,k}$ για όλους τους συνδέσμους. Η θεμελιώδης συχνότητα και ο αριθμός των αρμονικών πρέπει να επιλεγεί ξεχωριστά.

Ο αριθμός των αρμονικών ορίζει το εύρος ζώνης της επιθυμητής τροχιάς. Η ελάχιστη συχνότητα είναι σταθερή και ίση με την θεμελιώδη συχνότητα της σειράς Fourier. Όσο περισσότεροι όροι υπάρχουν τόσο δυσκολότερο είναι να βρεθεί λύση στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε ο αριθμός των αρμονικών να είναι 5.

Η θεμελιώδης συχνότητα επηρεάζει την διάρκεια μιας περιόδου:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_f} \quad (3.15)$$

έχοντας λοιπόν μεγάλο ω_f προκύπτει μικρή περίοδος, οπότε κάνοντας το πείραμα πολλές φορές βελτιώνεται ο σηματοθορυβικός λόγος. Από την άλλη μεριά έχοντας μεγαλύτερη περίοδο μπορούν να παρθούν περισσότερα δείγματα, θεωρώντας σταθερή περίοδο δειγματοληψίας, τα οποία είναι απαραίτητα για μια επιτυχημένη εκτίμηση παραμέτρων. Επιπλέον επιτρέπει την διέγερση του βραχίονα σε ένα μεγαλύτερο χώρο εργασίας, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς σε ταχύτητα και επιτάχυνση. Δηλαδή αν κάποιος άξονας του βραχίονα έχει χαμηλή επιτάχυνση, πρέπει να του δοθεί αρκετός χρόνος ώστε να φτάσει στην μέγιστη ταχύτητα.

Ο αριθμός των περιόδων σε συνδυασμό με την διάρκεια της μίας περιόδου καθορίζει την διάρκεια του πειράματος. Αυτή η παράμετρος πρέπει να επιλεγεί ώστε παίρνοντας τον μέσο όρο των δειγμάτων να επιτυγχάνεται μείωση των επιπέδων του θορύβου. Στην συγκεκριμένη εργασία θα γίνουν 10 περίοδοι και η κάθε περίοδος θα έχει διάρκεια 10 δευτερόλεπτα.

Ο ίδιος ο ελεγκτής του ρομπότ εισάγει έναν επιπρόσθετο περιορισμό. Η υλοποίηση μίας τόσο σύνθετης τροχιάς που περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό ημίτονων και συνημίτονων δεν είναι δυνατή σε όλους τους βιομηχανικούς βραχίονες.

Σε επόμενο κεφάλαιο θα δειχθεί πως λύνονται προβλήματα τέτοιου είδους χρησιμοποιώντας το Optimization Toolbox του Matlab και πως θα προγραμματιστεί το ρομπότ για την υλοποίηση μιας απαιτητικής τροχιάς.

3.4.3 PTP Τροχιά Διέγερσης

Θα χρησιμοποιηθεί μία επιπλέον τροχιά για την διέγερση του βραχίονα. Αυτή θα είναι μια PTP (point to point) κίνηση και των τριών αξόνων του ρομπότ η οποία επιλέχθηκε έτσι ώστε να καλύπτεται αρκετός χώρος εργασίας του ρομπότ. Τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με την τροχιά που προέκυψε από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

3.5 Εκτίμηση Παραμέτρων

Το επόμενο βήμα στην διαδικασία της αναγνώρισης είναι η εκτίμηση των παραμέτρων του ρομποτικού βραχίονα [43, 15]. Η επιλογή μιας κατάλληλης μεθόδου είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ ακρίβειας και περιπλοκότητας υλοποίησης.

Αρχικά θα βρεθεί το δυναμικό μοντέλο, για κάθε ένα από τους τρεις άξονες του βραχίονα, για κάθε χρονική στιγμή που λαμβάνονται δεδομένα από το ρομπότ (περίπου κάθε 150 ms). Έπειτα θα εφαρμοστεί η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για να βρεθούν 3 διαφορετικά σετ παραμέτρων όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις (για τον πρώτο άξονα).

$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} \phi_1(q_{1t_1}, \dot{q}_{1t_1}, \ddot{q}_{1t_1}) \\ \phi_1(q_{1t_2}, \dot{q}_{1t_2}, \ddot{q}_{1t_2}) \\ \vdots \\ \vdots \\ \phi_1(q_{1t_K}, \dot{q}_{1t_K}, \ddot{q}_{1t_K}) \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

$$\tau_1 = \begin{pmatrix} \tau_{1t_1} \\ \tau_{1t_2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \tau_{1t_K} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Αυτά οδηγούν στην γραμμική εξίσωση:

$$\tau_1 = \Phi_1(q_{1t_1}, \dot{q}_{1t_1}, \ddot{q}_{1t_1})\theta_1 + \epsilon_1 \quad (3.18)$$

όπου ϵ_1 αναπαριστά το σφάλμα λόγω του θορύβου μέτρησης. Θεωρείται ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή και έχει μέση τιμή 0. Η λύση δίνεται από :

$$\hat{\theta}_{1LS} = \Phi_1^{-1}\tau_1 \quad (3.19)$$

Με την ίδια διαδικασία υπολογίζονται και οι παράμετροι για τους άλλους δύο άξονες.

3.6 Επαλήθευση

Η επαλήθευση είναι πολύ σημαντικό μέρος της όλης διαδικασίας, έτσι ώστε να ελεγχθεί εάν η αναγνώριση μπορεί να έχει πρακτική εφαρμογή. Σε περίπτωση που τα αποτελέσματα δεν είναι τα επιθυμητά μπορεί να χρειαστεί να ανασχεδιαστούν κομμάτια του πειράματος. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν κυρίως 2 τρόποι επαλήθευσης. Ο πρώτος βρίσκει το σφάλμα της προβλεπόμενης ροπής και ο δεύτερος ελέγχει την ακρίβεια των εκτιμώμενων παραμέτρων. Συνήθως ο πρώτος χρησιμοποιείται σε model-based control, ενώ ο δεύτερος σε εφαρμογές αναγνώρισης φορτίου.

Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο πρέπει να γίνει μια προσομοίωση του συστήματος χρησιμοποιώντας τις εκτιμώμενες παραμέτρους. Συγκεκριμένα υπολογίζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις αντίστροφης δυναμικής η απαιτούμενη ροπή, για να επιτευχθεί μια επιθυμητή τροχιά. Αυτή πρέπει να είναι διαφορετική από την τροχιά διέγερσης. Τα ακόλουθα κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί η εγκυρότητα των εκτιμώμενων ροπών.

- Σύγκριση προβλεπόμενης και πραγματικής ροπής: η σχεδίαση στο ίδιο πλαίσιο δύο ροπών μπορεί να οπτικοποιήσει το σφάλμα, έτσι εύκολα μπορεί βρεθεί αν παρουσιάζουν ομοιότητες.
- Λάθος πρόβλεψης: η χρήση της διαφοράς μεταξύ της προβλεπόμενης και της μετρούμενης ροπής $\epsilon = \tau - \Phi(q_{t_1}, \dot{q}_{t_1}, \ddot{q}_{t_1})$.
- Μέσο τετραγωνικό σφάλμα: ένα αντικειμενικό κριτήριο είναι η RMS τιμή του σφάλματος, αυτή μπορεί να βρεθεί από τον παρακάτω τύπο:

$$\Delta\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \epsilon_k^2} \quad (3.20)$$

$$\Delta\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{K}(\tau - \Phi(q_{t1}, \dot{q}_{t1}, \ddot{q}_{t1})\theta)^T(\tau - \Phi(q_{t1}, \dot{q}_{t1}, \ddot{q}_{t1})\theta)} \quad (3.21)$$

όπου K είναι ο αριθμός των δειγμάτων που λαμβάνονται σε κάθε περίοδο. Αυτή η RMS τιμή δείχνει την αβεβαιότητα που υπάρχει στην πρόβλεψη της ροπής. Το αποτέλεσμα μπορεί να συγκριθεί με το επίπεδο θορύβου μέτρησης της ροπής των κινητήρων. Όσο πιο κοντά είναι οι δύο τιμές, τόσο πιο καλά περιγράφει το μοντέλο την δυναμική του συστήματος.

3.7 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό συζητήθηκε η διαδικασία της πειραματικής αναγνώρισης χρησιμοποιώντας περισσότερες λεπτομέρειες. Δείχθηκε ότι η χρήση βαρυκεντρικών και Newton-Euler παραμέτρων προσφέρει ένα μοντέλο άκαμπτου σώματος γραμμικό ως προς τις άγνωστες παραμέτρους. Το πείραμα της αναγνώρισης θα βασίζεται σε περιοδικές τροχιές διέγερσης που σύμφωνα με την βιβλιογραφία προσφέρουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με απλές PTP κινήσεις. Τίθεται το κύριο πρόβλημα, που είναι η εύρεση μιας βελτιστοποιημένης τροχιάς, και δίνονται στοιχεία για το κριτήριο ελαχιστοποίησης καθώς και για τους περιορισμούς που υπάρχουν. Η εκτίμηση των παραμέτρων μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές ελαχίστων τετραγώνων, αφού το δυναμικό μοντέλο είναι γραμμικό ως προς τις άγνωστες παραμέτρους. Τέλος διατυπώθηκαν κριτήρια επαλήθευσης για να διαπιστωθεί η ακρίβεια με την οποία προβλέπεται η ροπή για κάποια διαφορετική τροχιά που έχει επιλεγεί για αυτόν τον σκοπό.

Κεφάλαιο 4

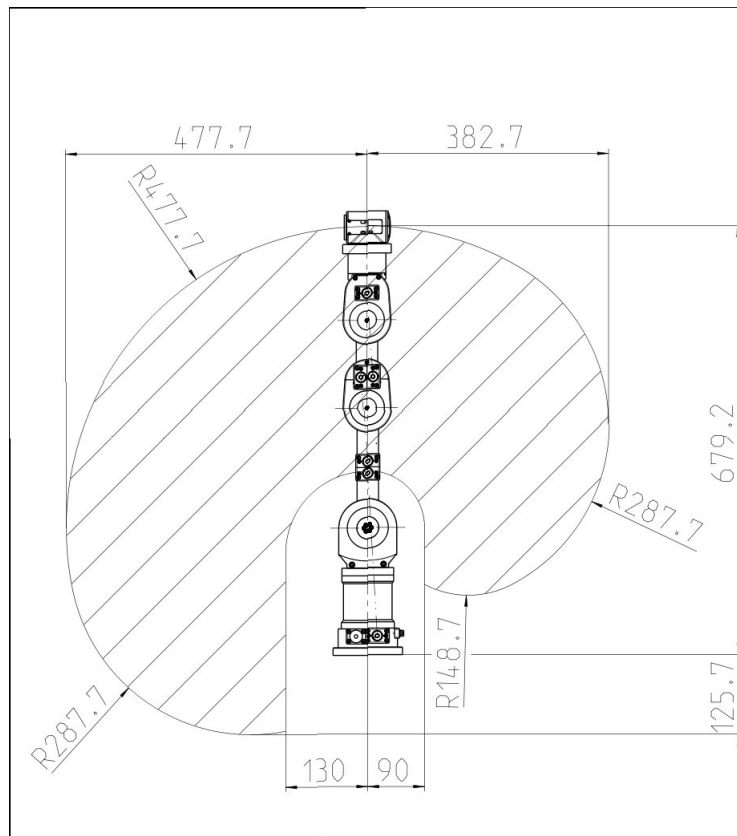
Πειραματική Υλοποίηση στο Ρομποτικό Βραχίονα Katana 450



Σχήμα 4.1: Katana 450

4.1 Υλικό

Ο ρομποτικός βραχίονας Katana 450 είναι δημιουργία της ελβετικής εταιρίας Neuronics AG. Έχει έξι βαθμούς ελευθερίας και περιλαμβάνει 6 περιστροφικές αρθρώσεις και την αρπάγη ως τελικό στοιχείο δράσης. Η τελευταία εκτελεί μόνο κινήσεις ανοίγματος και κλεισίματος. Η ακόλουθη εικόνα περιγράφει τα χαρακτηριστικά του ρομπότ καθώς και τα μήκη κάθε βραχίονα.



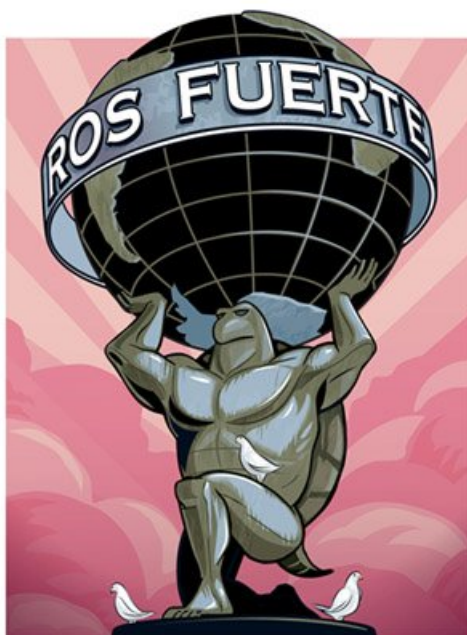
Σχήμα 4.2: Διαστάσεις και επιτρεπόμενη κίνηση

4.1.1 Λειτουργία

Για να τεθεί το ρομπότ σε λειτουργία για πρώτη φορά, χρειάστηκαν τα ακόλουθα εξαρτήματα:

- Ρομποτικός βραχίονας Katana 450
- Καλώδιο τροφοδοσίας
- Καλώδιο Ethernet
- USB καλώδιο
- Κατάλληλο λογισμικό: Katana4d ή KNI ή Robot Operating System (ROS)

Το Katana 4D είναι το πρόγραμμα, που έχει δημιουργηθεί από τη Neuronics AG και παρέχει στον χρήστη ένα εύχρηστο περιβάλλον ελέγχου του ρομπότ. Το KNI είναι βιβλιοθήκη, η οποία παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα ελέγχου του ρομπότ μέσω διαφόρων γλωσσών. Για απευθείας προγραμματισμό χρησιμοποιείται η γλώσσα C++ είτε η γλώσσα C, στο περιβάλλον του Matlab και στο περιβάλλον του Labview χρησιμοποιείται το αρχείο wrapper.dll ως διεπαφή μέσω αυτών των περιβαλλόντων προγραμματισμού και των κλάσεων της γλώσσας C++.



Σχήμα 4.3: ROS FUERTE

4.1.2 Σύνδεση

Το Katana 450 μπορεί να συνδεθεί με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω ενός πρότυπου Ethernet ή μέσω ενός καλωδίου USB.

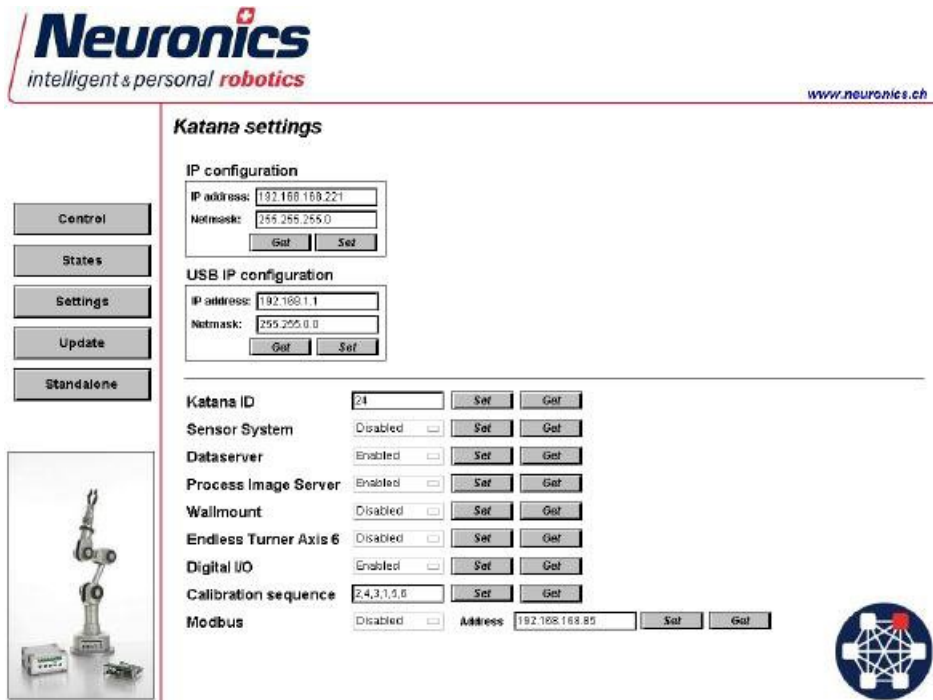
Σύνδεση μέσω καλωδίου Ethernet

Η σύνδεση του Katana με τον υπολογιστή γίνεται είτε μέσω ενός τοπικού δικτύου LAN, χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο Ethernet. Το Katana αποκτά μια στατική IP διεύθυνση:

IP address: 192.168.168.232

Network Mask: 255.255.255.0

Στην πρώτη φάση διαμόρφωσης, πρέπει να τεθεί η διεύθυνση IP του υπολογιστή, με σκοπό τη δυνατότητα σύνδεσης με το Katana. Αυτή έχει τεθεί ως : 192.168.168.200 / 255.255.255.0. Μετά την αποκατάσταση σύνδεσης για πρώτη φορά, μπορεί να γίνει αλλαγή της IP του Katana για να συνδεθεί στα πλαίσια του τοπικού δικτύου. Για να γίνει αυτό, ανοίγουμε ένα πρόγραμμα περιήγησης διαδικτύου (internet browser) και συνδεόμαστε στο ενσωματωμένο web interface του Katana 450: <http://192.168.168.232> , το οποίο έχει την παρακάτω μορφή.



Σχήμα 4.4: Katana web interface

Σύνδεση μέσω καλωδίου USB

Το Katana τίθεται σε λειτουργία και συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω του καλωδίου συσκευής USB. Στα Windows, το Katana αναγνωρίζεται αυτόματα ως USB Ethernet κάρτα. Στην πρώτη σύνδεση του Katana μέσω USB, ανοίγει ένα παράθυρο (wizard) εγκατάστασης του νέου υλικού και αφού επιλεγεί η θέση, όπου περιέχεται ο οδηγός εγκατάστασης (driver), το Katana εγκαθίσταται ως συσκευή Network. Στη συνέχεια, πρέπει να ενεργοποιηθεί το TCP/IP πρωτόκολλο και να εισαχθεί η ακόλουθη διεύθυνση IP:

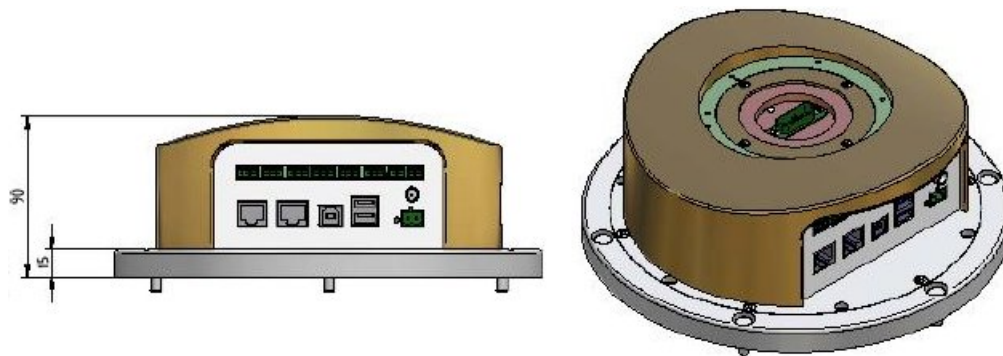
Διεύθυνση IP: 192.168.1.1

Subnet mask: 255.255.0.0

Η σύνδεση αποκαθίσταται και μπορεί να ελεγχθεί για την ορθότητα της λειτουργίας της με την εντολή ping χρησιμοποιώντας ένα terminal ως εξής: ping 192.168.1.1

4.1.3 Βαθμίδα Ελέγχου (Control Board)

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τις συνδέσεις στη βαθμίδα ελέγχου του Katana. Περιγράφεται μια σειρά από πρότυπα συνδέσεων, που αποτελούνται από ψηφιακές εισόδους/εξόδους I/O για διάφορες απαιτήσεις σύνδεσης. Η βαθμίδα ελέγχου, όπως είναι εμφανές, είναι πρακτικά ένα αναπόσπαστο κομμάτι του Katana 450. Συνδέεται με το Katana σε μια ενσωματωμένη υποδοχή σύνδεσης, SUB-D. Μια ενσωματωμένη βάση δύο επιπέδων επιτρέπει ασφαλή τοποθέτηση του ρομπότ και παρέχει διάφορες επιλογές συμπεριφοράς.



Σχήμα 4.5: Control Board

Κόμβος Ethernet

Η βάση ελέγχου παρέχει πλήρη TCP/IP υποστήριξη για εφαρμογές LAN και Web. Η IP της βάσης ελέγχου είναι καθορισμένη και μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί, ώστε να «συναντήσει» τη διάταξη του δικτύου – στόχου. Τα λογισμικά ελέγχου (software), Katana4, KNI και ROS, μπορούν να συνδεθούν μέσω θύρας Ethernet ή θύρας USB. Οι συνδέσεις Ethernet επιτρέπουν εύκολη σύνδεση με βιομηχανικές συσκευές Ethernet, με συσκευές αναλογικών και ψηφιακών εισόδων, μέσω ModBus/TCP πρωτοκόλλου, όπως επίσης και συνδέσεις με PLC. Παρέχεται δυνατότητα σύνδεσης με άλλα δίκτυα, όπως το Profinet ή το EtherCAT, μέσω μετατροπέων δικτύου ModBus/TCP. Το Katana έχει έναν ενσωματωμένο κόμβο Ethernet, ο οποίος καταλήγει σε δύο RJ4 υποδοχές. Η θύρα Ethernet είναι ένα από τα δύο πρότυπα συνδέσεων, διαθέσιμα για επικοινωνία με το KNI, το Katana4D και το ROS.

Εξυπηρετητής USB

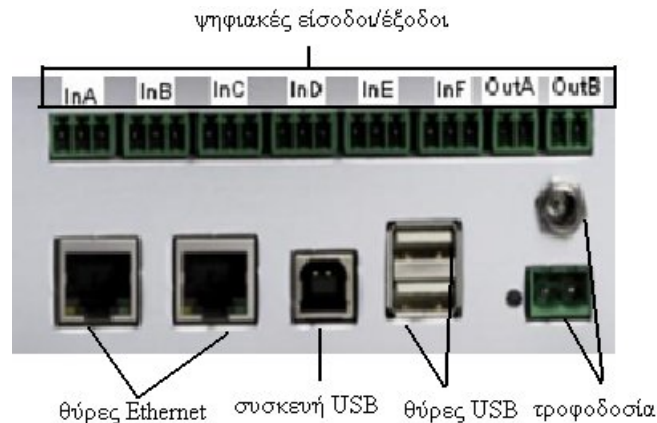
Ο εξυπηρετητής USB καταλήγει σε δύο υποδοχές σύνδεσης USB. Αυτές χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του τηλεχειριστηρίου, για συγκεκριμένες συνδέσεις με τις περιφερειακές συσκευές, για αποθήκευση προγράμματος με λειτουργία standalone και για αναβάθμιση του λογισμικού (firmware).

Συσκευή USB

Η ενσωματωμένη θύρα συσκευής USB χρησιμοποιείται ως εναλλακτική της θύρας Ethernet για λόγους επικοινωνίας, ειδικά αν το Katana δε μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Προσφέρει μια σημείο-προς-σημείο σύνδεση στο ρομπότ, ενώ χρησιμοποιεί το TCP/IP πρωτόκολλο.

Τροφοδοσία

Η υποδοχή για τροφοδοσία φαίνεται στην εικόνα 4.6. Προσφέρει παροχή 24 Volts σε περιφερειακές συσκευές.



Σχήμα 4.6: Ψηφιακές εισόδου έξοδοι

Ψηφιακές Είσοδοι/Έξοδοι (IOs)

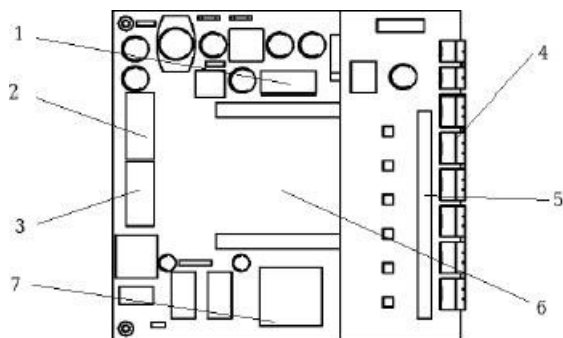
Το Katana 450 παρέχει ένα σύνολο οκτώ ψηφιακών εισόδων/εξόδων, οι έξι από τις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εισόδοι και οι δύο ως έξοδοι. Από τις έξι εισόδους, οι δύο έχουν εκχωρηθεί σε ειδικές λειτουργίες Power Fail και Soft Stop.

- 4 ψηφιακές εισόδοι για γενική χρήση (InA, InB, InC, InD).
- Soft Stop: επιτρέπει τη διακοπή ενός προγράμματος του Katana, πατώντας ένα εξωτερικό κουμπί. (InE)
- UPS είσοδος για να τεθεί το Katana σε θέση ασφαλείας, όταν η κεντρική τροφοδοσία έχει υποβαθμιστεί ή διακοπεί. (InF)
- 2 ψηφιακές έξοδοι (OutA, OutB).
- Συνολική πηγή ρεύματος: μέγιστο 0.5A.
- Τροφοδοσία 24V.

Συστατικά Μέρη της Βάσης Ελέγχου

Η βαθμίδα ελέγχου του Katana 450 έχει, εκτός από συνδέσεις στην εμπρόσθια πλευρά της, τις παρακάτω σχετικές υποδοχές, όταν παραλαμβάνεται ως ξεχωριστό τμήμα:

1. Πρώτη σειριακή θύρα (για εσωτερική χρήση μόνο)
2. CAN 1 (άξονες) και CAN 2 (αισθητήρες), εσωτερική τροφοδοσία
3. Δεύτερη σειριακή θύρα (για εσωτερική χρήση μόνο)
4. Ψηφιακή I/O
5. Jumpers
6. Βάση επεξεργαστή
7. FPGA



Σχήμα 4.7: Hardware

Χαρακτηριστικά της Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας (CPU)

- PPC MPC5200 750MIPS
- FPGA στη βάση
- 32 MB Flash Μνήμη
- 64 MB RAM

4.1.4 Τηλεχειριστήριο B3

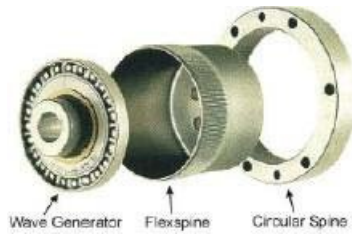


Σχήμα 4.8: Τηλεχειριστήριο

Είναι δυνατόν να εκτελέσουμε ένα πρόγραμμα κατευθείαν από το ρομπότ, χωρίς να χρειαστεί να το συνδέσουμε σε έναν εξωτερικό υπολογιστή. Τέτοια προγράμματα είτε έχουν δημιουργηθεί από ένα υπάρχον πρόγραμμα Katana4D, είτε έχουν γραφτεί σε γλώσσα C++, χρησιμοποιώντας ένα ειδικό μέσο διασύνδεσης ανεξάρτητης μορφής (standalone). Το τηλεχειριστήριο B3 έχει τρία πλήκτρα με τρία αντίστοιχα LEDs: PLAY, AXIS, και POWER. Συνδέεται μέσω καλωδίου USB με το Katana.

4.1.5 Μηχανική Ανάλυση

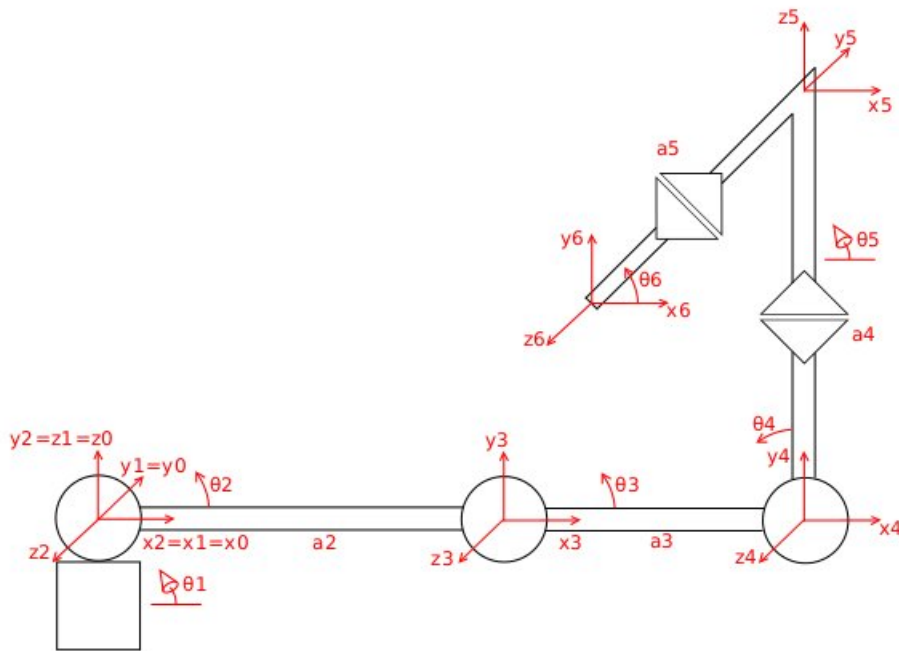
Η βαθμίδα ελέγχου και ο βραχίονας είναι φτιαγμένα από στρώσεις αλουμινίου. Για να εξασφαλιστεί η ακριβής τοποθέτηση με την ελάχιστη διαδρομή κίνησης για κάθε άξονα, έχουν τοποθετηθεί Harmonic Drives όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.9. Για την κίνηση, χρησιμοποιούνται κινητήρες FaulhaberR DC με ψήκτρες. Είναι εξοπλισμένοι με υψηλής ανάλυσης ψηφιακούς κωδικοποιητές (encoders).



Σχήμα 4.9: Μηχανική Ανάλυση

4.2 Θεωρητική Ανάλυση, Παράμετροι Denavit – Hartenberg

Για την ανάλυση της ορθής και της αντίστροφης κινηματικής λειτουργίας ενός ρομποτικού βραχίονα, μπορούμε να ακολουθήσουμε τη μέθοδο Denavit–Hartenberg (D–H). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ένα ελάχιστο πλήθος παραμέτρων για την πλήρη περιγραφή της κινηματικής αλυσίδας. Για να υπολογίσουμε τις παραμέτρους αυτές πρέπει, πρώτα, να ορίσουμε τα κέντρα, O_i , των πλαισίων κάθε άρθρωσης. Για τον καθορισμό των κέντρων των πλαισίων i (όπου i είναι η εκάστοτε άρθρωση του ρομπότ), χρησιμοποιούμε ένα στιγμιότυπο θέσης του Katana. Παρακάτω, φαίνεται σχηματικά το στιγμιότυπο του Katana, πάνω στο οποίο πραγματοποιήθηκε η μέθοδος D-H, όπως ακριβώς το δίνει ο κατασκευαστής και ακολουθεί ο πίνακας με τις παραμέτρους D-H.



Σχήμα 4.10: Katana

Joint	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$\theta_1 = 0$	0	0	0
2	$\theta_2 = 0$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
3	$\theta_3 = 0$	0	a_2	0
4	$\theta_4 = 0$	0	a_3	0
5	$\theta_5 = 0$	a_4	0	$-\frac{\pi}{2}$
6	$\theta_6 = 0$	a_5	0	$\frac{\pi}{2}$

Σχήμα 4.11: Παράμετροι DH

Link	Length [mm]
a2	190
a3	139
a4	147.3
a5	37.5

4.3 Λογισμικό Διασύνδεσης

4.3.1 Αρχικά Προβλήματα

Τα πιο μεγάλα προβλήματα που προέκυψαν κατά την διάρκεια της παρούσας εργασίας αφορούσαν το λογισμικό του ρομπότ. Αρχικά έγινε προσπάθεια να γραφτούν προγράμματα χρησιμοποιώντας το Unikit (στην γλώσσα προγραμματισμού Python), ένα νέο λογισμικό που πρότεινε στο εργαστήριο η Neuronics AG. Χρησιμοποιώντας αυτό, θεωρητικά, θα ήταν δυνατός ο έλεγχος της ροπής των κινητήρων, για αυτό μελετήθηκαν κατάλληλοι αλγόριθμοι προσαρμοστικού ελέγχου που τελικά δεν χρησιμοποιήθηκαν. Έπειτα από κάποιο καιρό, η εταιρεία ενημέρωσε το εργαστήριο ότι χρειάζεται επιπλέον τεχνικός εξοπλισμός για να μπορεί να πραγματοποιηθεί επιτυχής σύνδεση μεταξύ υπολογιστή και ρομπότ χρησιμοποιώντας το παραπάνω λογισμικό.

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν οι βιβλιοθήκες λογισμικού KNI. Έγινε επιτυχής σύνδεση υπολογιστή με ρομπότ και πραγματοποιήθηκαν απλές κινήσεις του KATANA χρησιμοποιώντας προγράμματα που γράφτηκαν σε C++. Έτσι επιτεύχθηκαν PTP (point to point) τροχιές για κάθε άξονα ξεχωριστά αλλά και για το τελικό εργαλείο δράσης του ρομπότ. Επίσης έγινε δυνατή η βηματική μετακίνηση του κάθε άξονα χρησιμοποιώντας το πληκτρολόγιο. Τέλος γράφτηκαν προγράμματα που πραγματοποιούν επιθυμητές PTP τροχιές και διαβάζουν από το KATANA την γωνιακή θέση και την ροπή των κινητήρων. Το πρόβλημα που προέκυψε ήταν η αδυναμία διεξαγωγής τροχιάς με συγκεκριμένη γωνιακή θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση κάθε χρονική στιγμή. Η εταιρεία κατασκευής ενημέρωσε το εργαστήριο καθυστερημένα ότι υπάρχει κάποιο τεχνικό πρόβλημα.

4.3.2 Εγκατάσταση και χρήση Λογισμικού

Τελικά χρησιμοποιήθηκε το ανοιχτό λογισμικό ROS, το οποίο παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να θέτει επιθυμητά σημεία που πρέπει να περάσει ο άξονας του ρομπότ κάθε 1 δευτερόλεπτο. Ο υπολογιστής στον οποίο εγκαταστάθηκε το ROS είχε λειτουργικό σύστημα Ubuntu 12.04 LTS καθώς το ROS λειτουργεί μόνο σε περιβάλλοντα Linux. Για την επιτυχή εγκατάσταση του λογισμικού ακολουθήθηκαν τα βήματα που υπάρχουν στην σελίδα:

<http://wiki.ros.org/fuerte/Installation/Ubuntu>

Το επόμενο βήμα ήταν να πραγματοποιηθούν τα ROS Tutorials που υπάρχουν στην σελίδα:

<http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials>

Έπειτα έγινε εγκατάσταση του πακέτου που αφορά τον βραχίονα Katana, αυτό βρέθηκε στην σελίδα:

<http://wiki.ros.org/uos-ros-pkg>

Από το παραπάνω πακέτο χρησιμοποιήθηκε μόνο το stack katana driver, οι οδηγίες χρήσης υπάρχουν στην σελίδα:

http://wiki.ros.org/katana_driver

Για να ξεκινήσει η επικοινωνία με το katana πρέπει αρχικά να τρέξουν οι παρακάτω εντολές σε ένα terminal:

```
export KATANA_TYPE="katana_450_6m90a"
roslaunch katana katana.launch
```

Η πρώτη δείχνει το μοντέλο του βραχίονα θα χρησιμοποιηθεί, ενώ η δεύτερη ανοίγει το "node" του katana.

Για να μετακινηθούν οι άξονες του ρομπότ χρησιμοποιώντας το πληκτρολόγιο, πρέπει να ανοιχθεί διαφορετικό terminal και να εκτελεστεί η εντολή:

```
roslaunch katana_teleop katana_teleop_key.launch
```

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μέχρι 15 σημεία του χώρου εργασίας του βραχίονα, τα οποία να απέχουν χρονικά 1 δευτερόλεπτο. Αυτό είναι εφικτό μέσω της εντολής:

```
roslaunch katana_tutorials follow_joint_trajectory_client.launch
```

Η τροχιά που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να αλλαχθεί στο αρχείο `follow_joint_trajectory_client.cpp`, αυτό υπάρχει στον παρακάτω φάκελο: `ros/uos-ros-pkg/katana_driver/katana_tutorials`. Ο κώδικας είναι γραμμένος σε C++ και επιτρέπει στον χρήστη να θέτει επιθυμητά σημεία που θα περάσει ο κάθε άξονας του ρομπότ κάθε ένα δευτερόλεπτο. Για το κομμάτι της αναγνώρισης των δυναμικών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν δέκα διαφορετικά σημεία για τους τρεις πρώτους άξονες.

Το ROS προσφέρει την δυνατότητα στον χρήστη να αποθηκεύει σε ένα αρχείο την τιμή για την γωνιακή θέση κάθε άξονα του ρομπότ. Ο χρήστης πρέπει να τρέξει σε ένα terminal την εντολή:

```
rostopic echo -p /joint_states > log.txt
```

και αφού δημιουργηθεί το αρχείο `log.txt`, θα γράφονται σε ξεχωριστές γραμμές η χρονική στιγμή και η γωνιακή θέση κάθε άξονα. Για την αποθήκευση της ροπής πρέπει να πραγματοποιηθούν αλλαγές στο κώδικα του αρχείου `katana.cpp` που βρίσκεται στον φάκελο `ros/uos-ros-pkg/katana_driver/katana`.

4.4 Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο ρομποτικός βραχίονας Katana 450 της Neuronics AG. Αναλύθηκε τόσο hardware που χρησιμοποιείται όσο και το software. Σημειώθηκαν τα προβλήματα που προέκυψαν με το λογισμικό και παρουσιάστηκε το ROS, το οποίο τελικά χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του βραχίονα.

Κεφάλαιο 5

Πειραματικά Αποτελέσματα

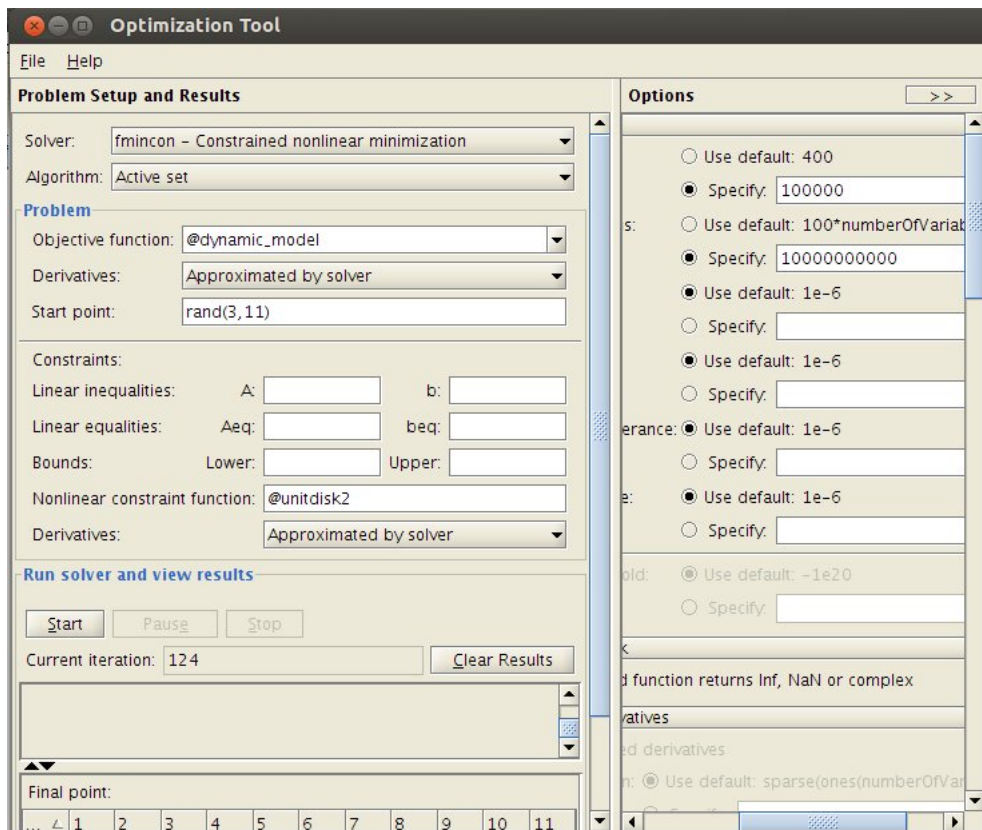
5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται πειραματικά δεδομένα που έχουν αποκτηθεί από έναν πραγματικό ρομποτικό βραχίονα, γίνεται η παρουσίαση του πειράματος και δίνονται οι τροχιές διέγερσης και επαλήθευσης. Τέλος γίνεται σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν.

5.2 Χρήση τροχιάς διέγερσης που προέκυψε από αλγόριθμο βελτιστοποίησης

5.2.1 Πείραμα Διέγερσης του Βραχίονα

Σύμφωνα με την παραπάνω θεωρία θα βρεθεί μια κατάλληλη τροχιά διέγερσης. Η θεμελιώδης συχνότητα της τροχιάς τίθεται ίση με 0.1 Hz , που σημαίνει ότι η περίοδος θα είναι 10 δευτερόλεπτα. Η τροχιά αποτελείται από 5 όρους Fourier άρα υπάρχουν 11 άγνωστοι παράμετροι για κάθε σύνδεσμο. Για την εύρεση της λύσης χρησιμοποιήθηκε το Optimization toolbox του Matlab, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 5.1.



Σχήμα 5.1: Matlab, Optimization Toolbox

Υπάρχουν αρκετοί διαθέσιμοι solvers ικανοί να λύσουν το μη γραμμικό πρόβλημα, μετά από διαφορετικές προσπάθειες προτιμήθηκε ο fmincon – constrained non linear optimization και ο αλγόριθμος Active set. Η συνάρτηση dynamic_model υπολογίζει το condition number του δυναμικού μοντέλου και η συνάρτηση unitdisk2 περιέχει τους περιορισμούς του βραχίονα (γωνιακή θέση, γωνιακή ταχύτητα, γωνιακή επιτάχυνση). Λόγω του σύνθετου προβλήματος και του μεγάλου αριθμού των μεταβλητών δεν είναι δυνατόν να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Το πρόγραμμα θα επιστρέφει ένα τοπικό ελάχιστο στο οποίο έφτασε, αφού όμως δοκιμάσει πολλές διαφορετικές αρχικές συνθήκες. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η τιμή που προέκυψε είναι 11,1.

Περίοδος Δειγματοληψίας

Κατά την διάρκεια του πειράματος μετρώνται οι γωνιακές θέσεις των αξόνων στους οποίους θα γίνει αναγνώριση και η ροπή ενός κινητήρα κάθε φορά. Για την μέτρηση της ροπής του κάθε κινητήρα απαιτούνται 90msec περίπου. Για την μέτρηση της γωνιακής θέσης (όλων των αξόνων ταυτόχρονα) ο χρόνος δειγματοληψίας δεν είναι σταθερός. Το πρώτο δείγμα έρχεται σε 40 msec, το δεύτερο σε 80msec και το τρίτο σε 70msec. Αυτό επαναλαμβάνεται περιοδικά. Επίσης στα πρώτα 2 δευτερόλεπτα της κίνησης δεν λαμβάνονται δεδομένα, κάτι που συμβαίνει κάθε φορά που ο βραχίονας αρχίζει την κίνηση του από στάση. Τα παραπάνω δεδομένα αποτρέπουν την διενέργεια ενός μόνο πειράματος. Έτσι πρέπει να πραγματοποιηθούν τρία πειράματα, ένα για κάθε άξονα, έτσι ώστε κάθε φορά να μετρείται η ροπή διαφορετικού κινητήρα και οι θέσεις όλων των αξόνων. Η περίοδος δειγματοληψίας είναι συνολικά μεταξύ 130 και 170 msec.

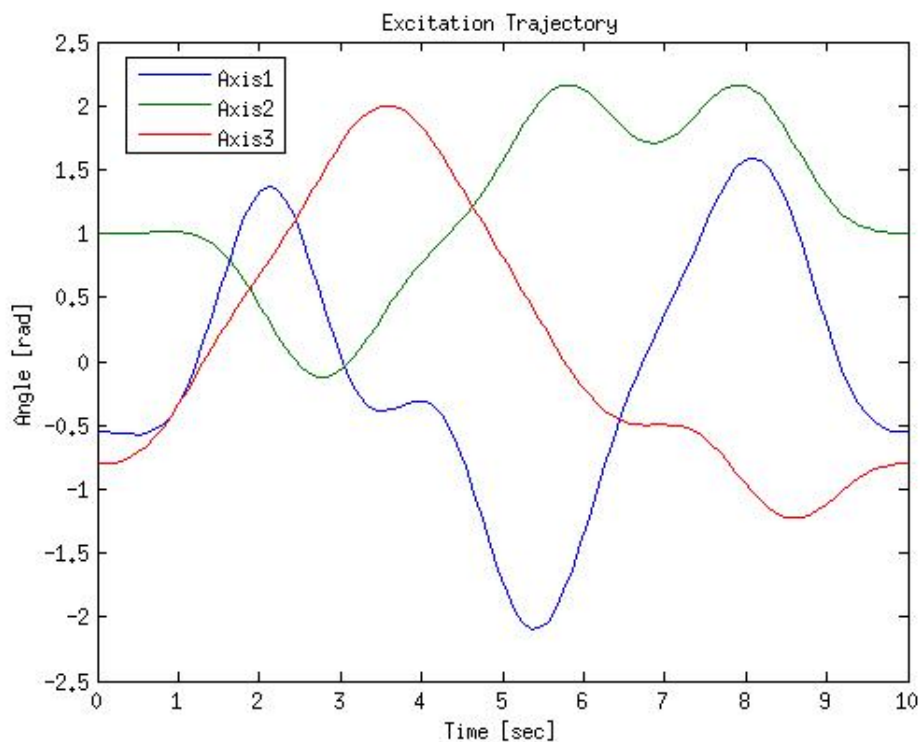
Τριβή

Η διενέργεια πειράματος για την αναγνώριση της τριβής δεν κατέστη δυνατή καθώς τα πρώτα δευτερόλεπτα δεν υπάρχουν δεδομένα, οπότε δεν θα μπορούσαν να προκύψουν συμπεράσματα για

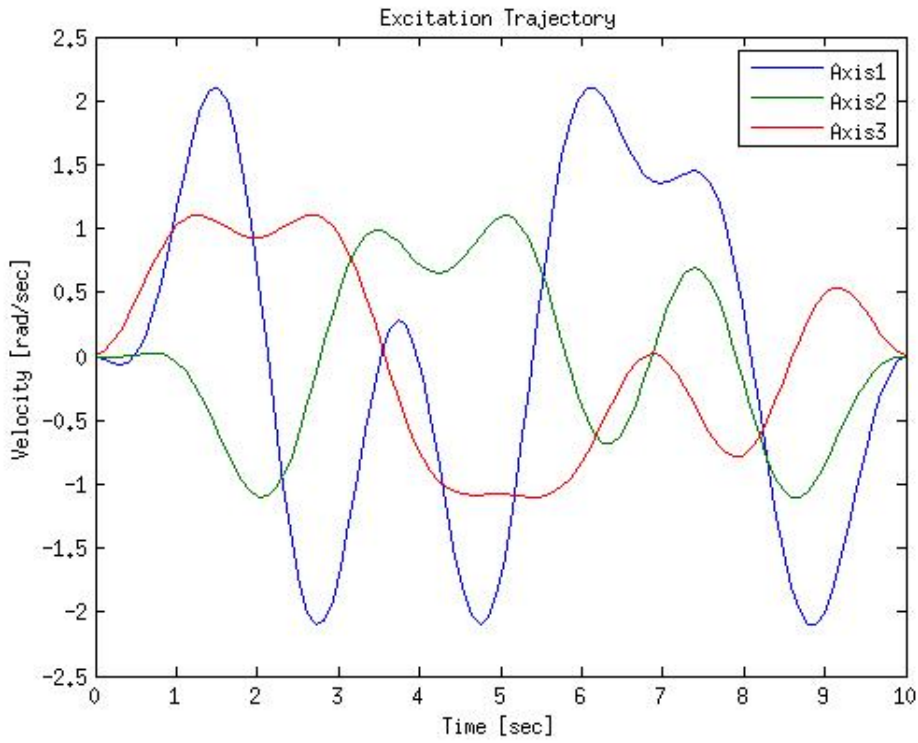
το πιο σημαντικό κομμάτι της τριβής. Επίσης, μετά από επικοινωνία με την εταιρεία κατασκευής των ηλεκτρικών κινητήρων, το εργαστήριο ενημερώθηκε πως η τριβή των κινητήρων είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη ταχύτητα τους.

Τροχιά Διέγερσης

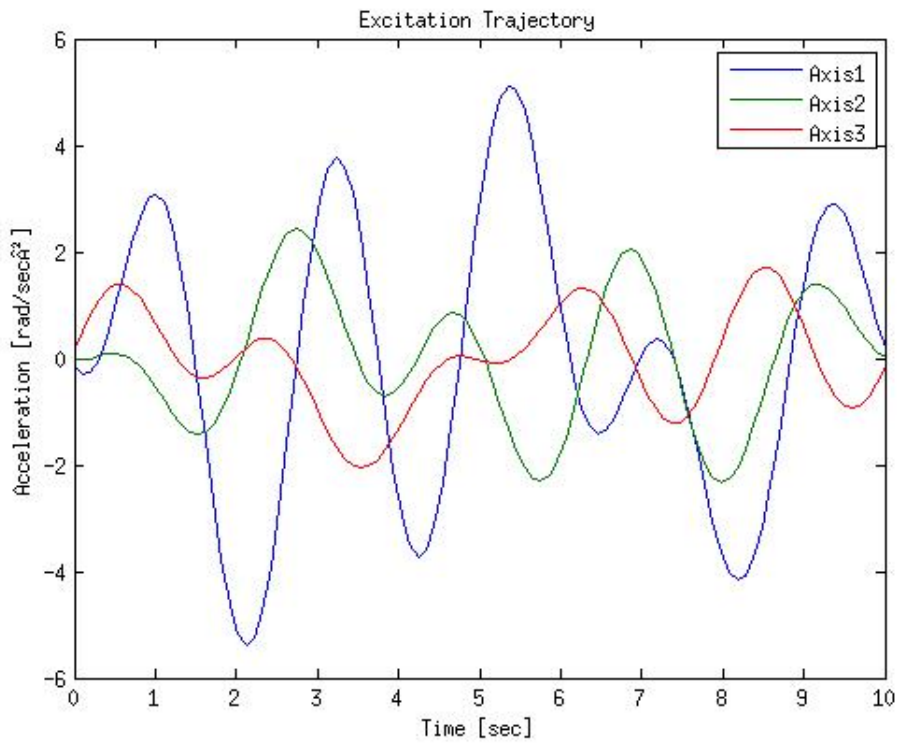
Η τροχιά που βρέθηκε από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, για τους τρεις άξονες φαίνεται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις για την θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2: Τροχιά διέγερσης Γωνιακή Θέση



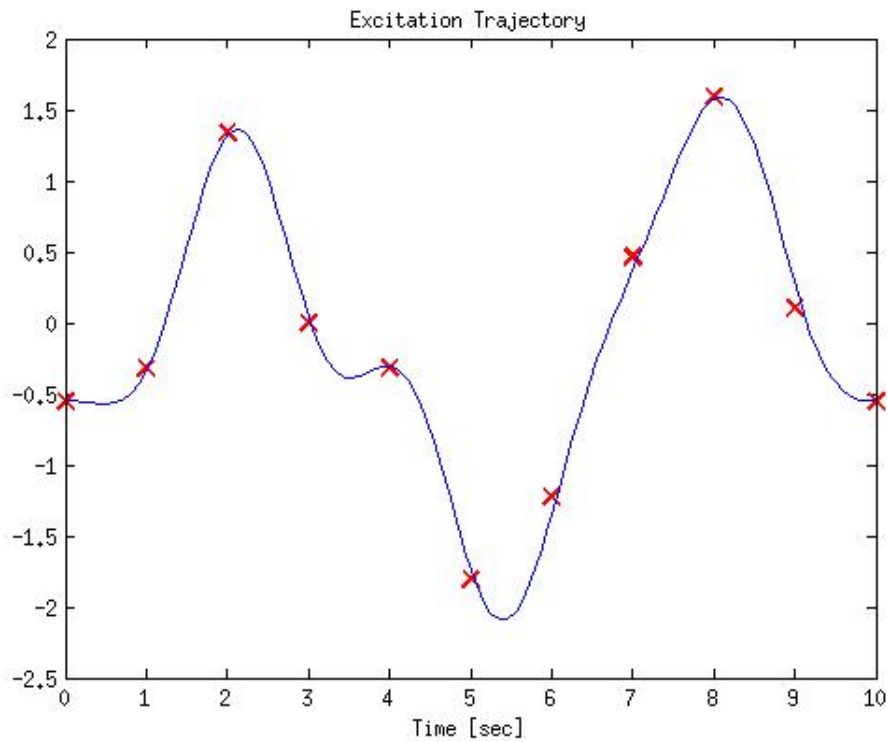
Σχήμα 5.3: Τροχιά διέγερσης Γωνιακή Ταχύτητα



Σχήμα 5.4: Τροχιά διέγερσης Γωνιακή Επιτάχυνση

Η παραπάνω τροχιά υλοποιήθηκε στο ρομποτικό βραχίονα Katana χρησιμοποιώντας το λογισμικό ROS. Το λογισμικό που δόθηκε από την εταιρεία ήταν ανεπαρκές και καθυστέρησε την όλη δια-

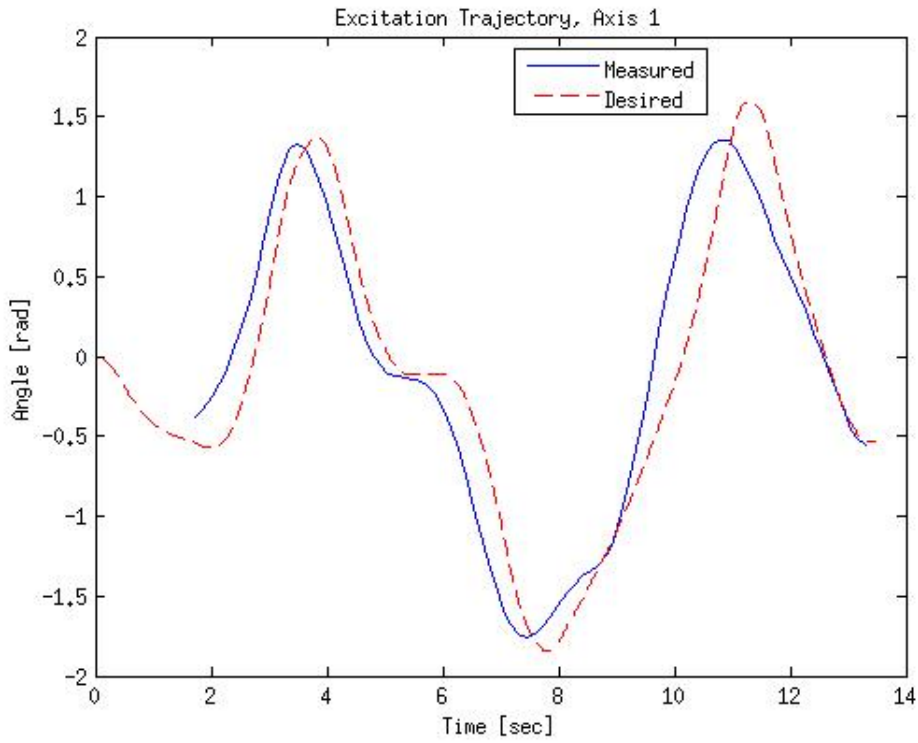
δικασία αρκετούς μήνες. Το ROS προσφέρει την δυνατότητα στον χρήστη να δώσει σημεία που θα ακολουθήσει ο άξονας του βραχίονα. Τα σημεία αυτά έχουν χρονική διαφορά ενός δευτερολέπτου όπως φαίνεται και στο γράφημα 5.5.



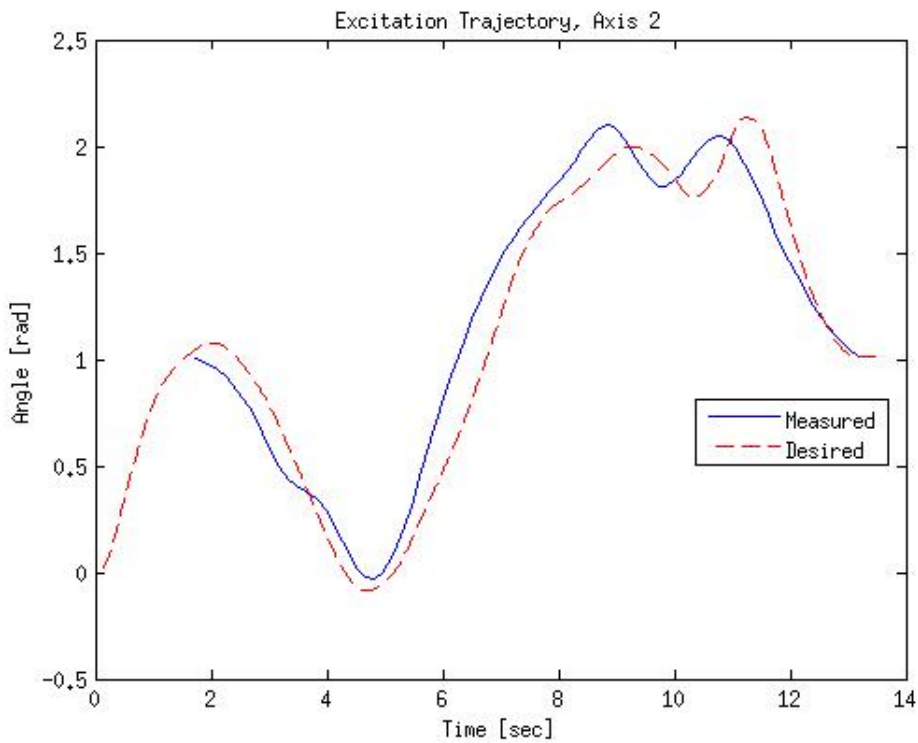
Σχήμα 5.5: Παράδειγμα τροχιάς, 1 Άξονας

Το λογισμικό δοθέντων των παραπάνω σημείων υπολογίζει την κίνηση που θα κάνει ο άξονας. Το αποτέλεσμα δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικό καθώς η συνολική διάρκεια είναι περίπου 14 δευτερόλεπτα, ενώ θα έπρεπε να είναι 10. Η αύξηση του τελικού χρόνου παρατηρήθηκε και σε άλλα πειράματα που έγιναν και οφείλεται στο ότι ο controller του ρομπότ δε μπορεί να εκπληρώσει την μέγιστη ταχύτητα και επιτάχυνση που υπόσχεται ο κατασκευαστής. Αυτές είναι εφικτές μόνο για κινήσεις PTP.

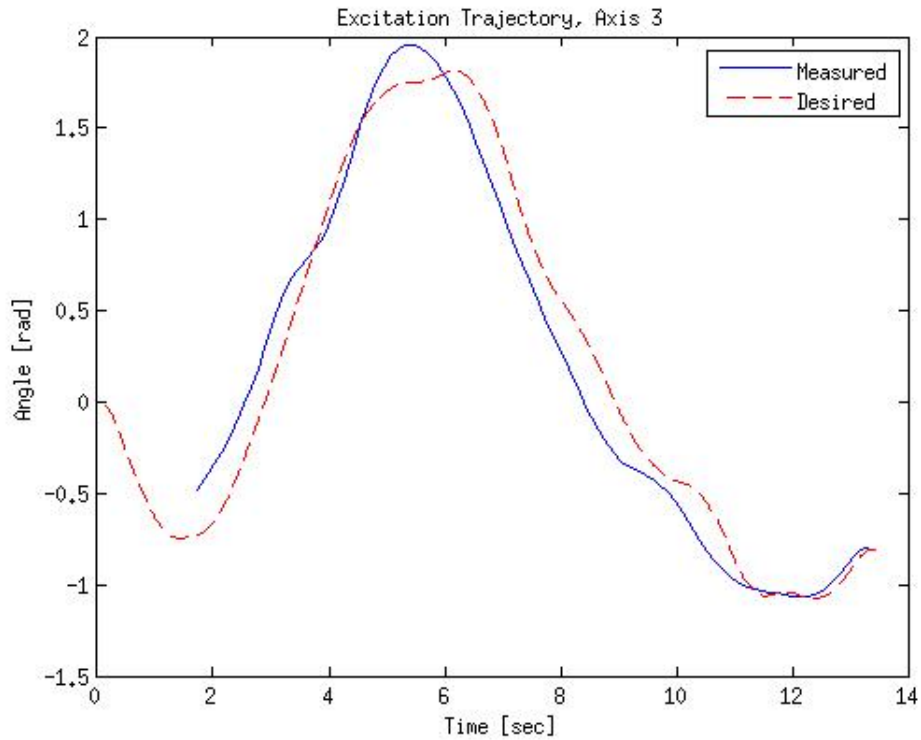
Η σύγκριση μεταξύ της επιθυμητής τροχιάς που παράγει ο controller και της μετρούμενης γωνιακής θέσης φαίνεται στις παρακάτω γραφικές. 5.6 5.7 5.8.



Σχήμα 5.6: Τροχιά διέγερσης, 1 άξονας



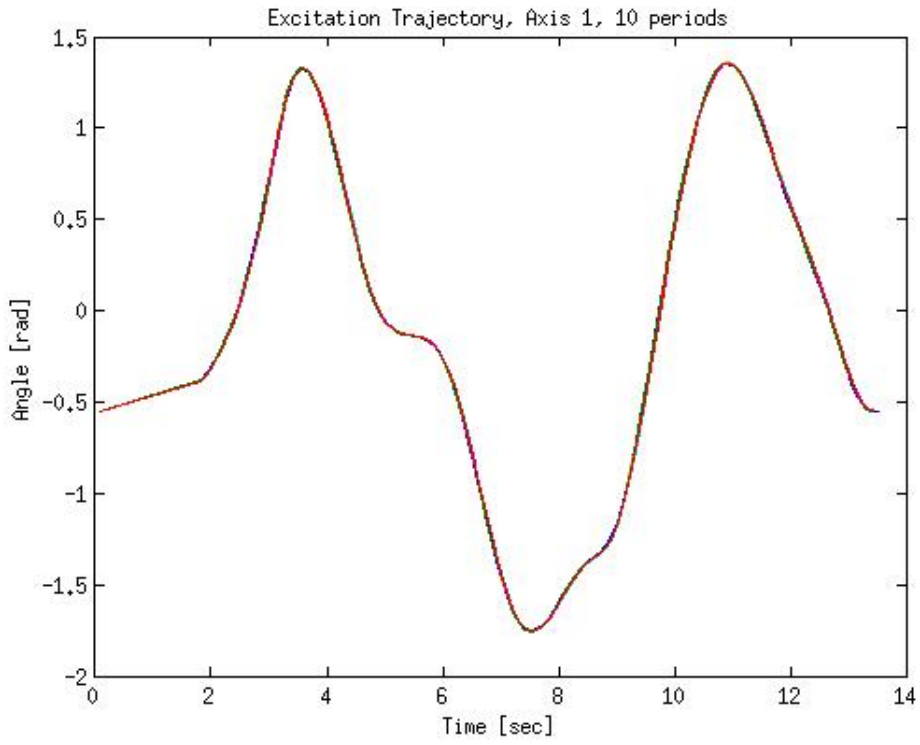
Σχήμα 5.7: Τροχιά διέγερσης, 2 άξονας



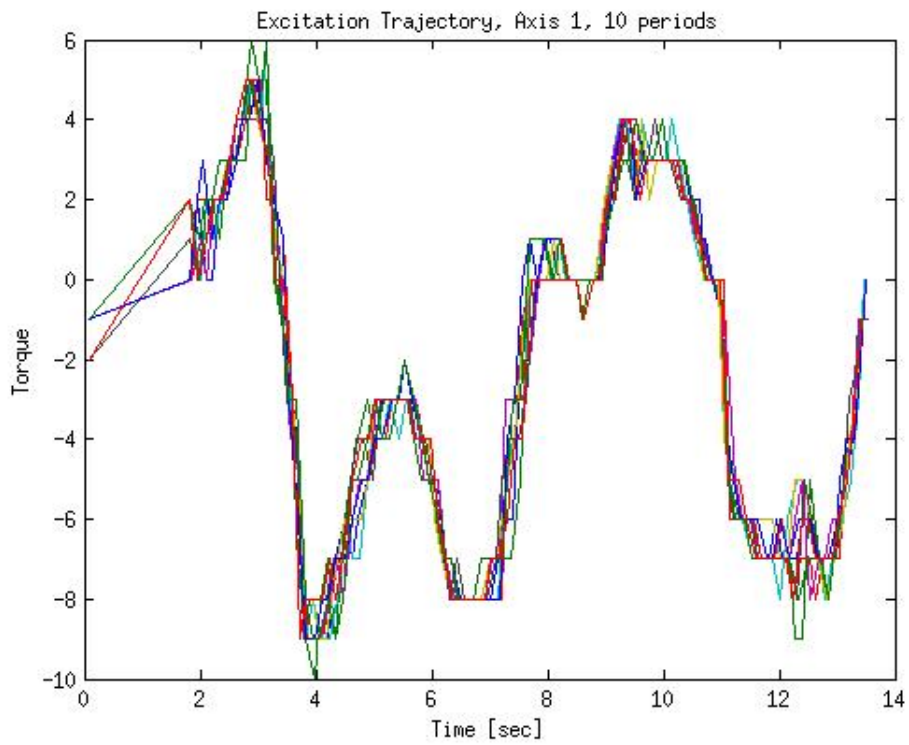
Σχήμα 5.8: Τροχιά διέγερσης, 3 άξονας

5.2.2 Μείωση του Θορύβου των Μετρήσεων της Ροπής

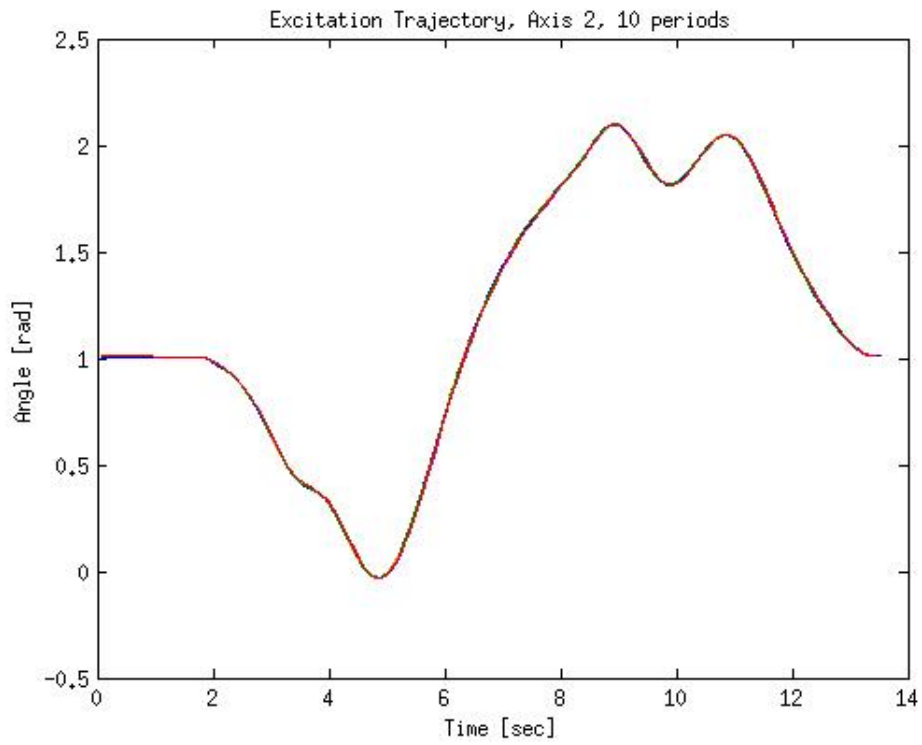
Μετά από σειρά δοκιμών παρατηρήθηκε ότι, στέλνοντας την ίδια επιθυμητή τροχιά στον ελεγκτή του βραχίονα, το αποτέλεσμα της γωνιακής θέσης είχε ελάχιστη διαφορά, υπάρχει δηλαδή μια πολύ καλή επαναληψιμότητα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα γραφήματα 5.9 5.11 5.13 για 10 περιόδους. Η ροπή που ασκείται στον άξονα του ρομπότ διέφερε σημαντικά 5.10 5.12 5.14. Ένα ακόμα πρόβλημα που υπάρχει στην μέτρηση της ροπής είναι ότι δεν είναι γνωστό ποιο φυσικό μέγεθος επιστρέφει η εντολή αυτή. Θα μπορούσε να είναι ρεύμα, ροπή, ποσοστό επί της εκατό της μέγιστης ροπής κ.α.. Η εταιρεία κατασκευής ενημέρωσε ότι δεν μπορεί να βοηθήσει σε αυτό το ζήτημα.



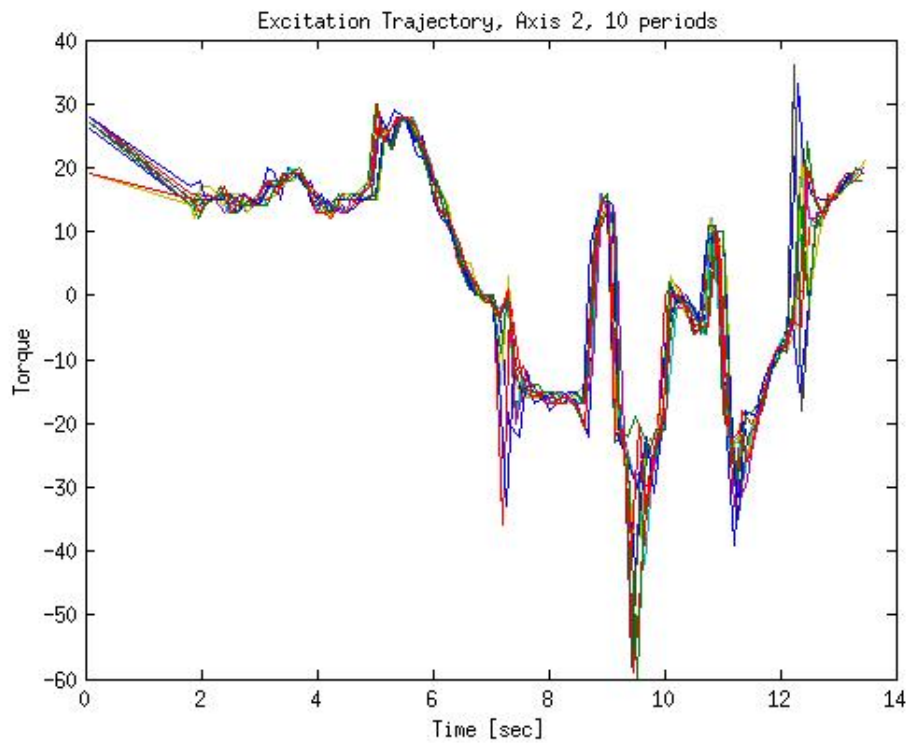
Σχήμα 5.9: Άξονας 1, 10 περίοδοι, Γωνιακή θέση



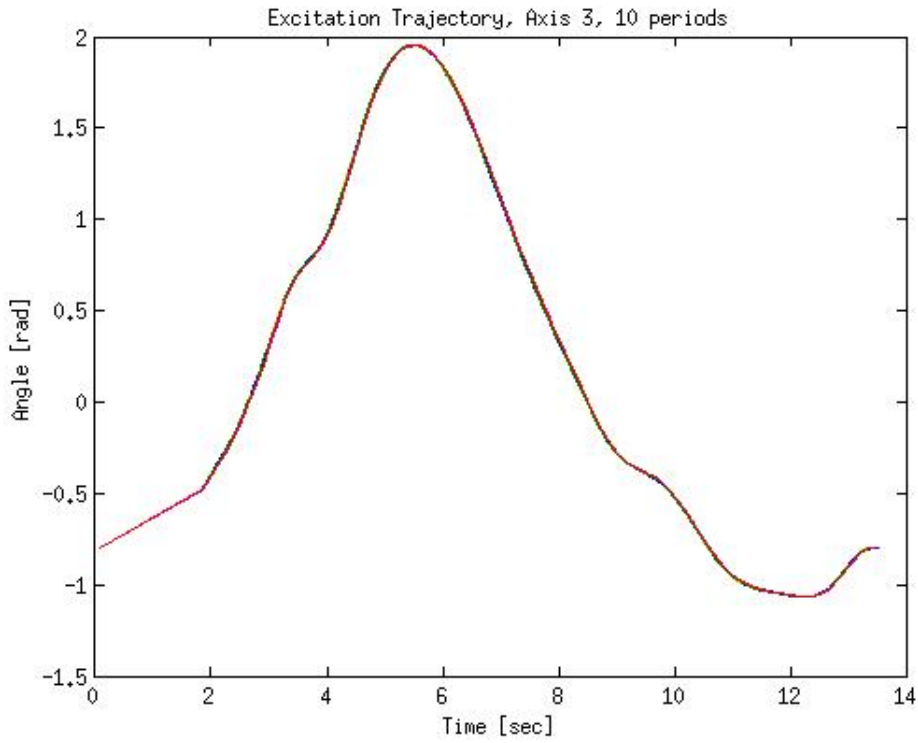
Σχήμα 5.10: Άξονας 1, 10 περίοδοι, Ροπή



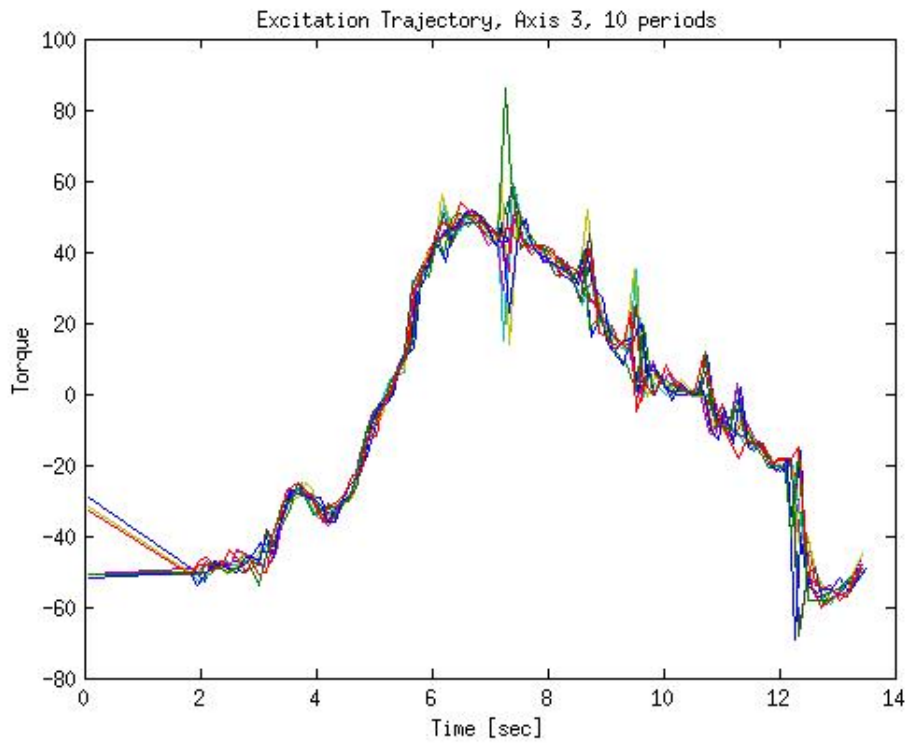
Σχήμα 5.11: Άξονας 2, 10 περίοδοι, Γωνιακή θέση



Σχήμα 5.12: Άξονας 2, 10 περίοδοι, Ροπή



Σχήμα 5.13: Άξονας 3, 10 περίοδοι, Γωνιακή θέση



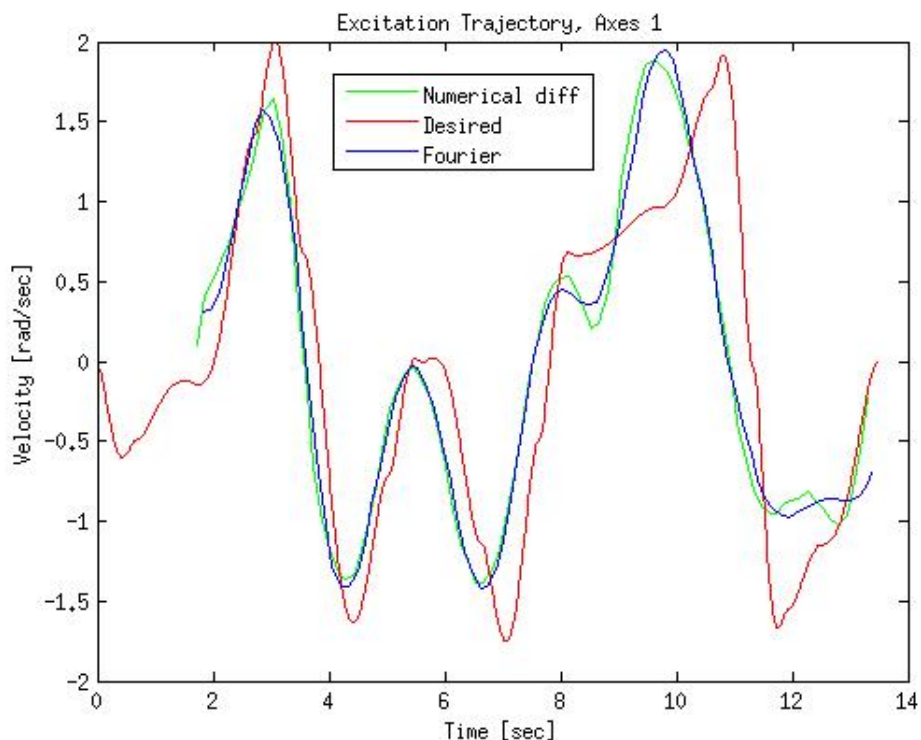
Σχήμα 5.14: Άξονας 3, 10 περίοδοι, Ροπή

Για να μειωθούν τα επίπεδα θορύβου υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές, οι σημαντικότερες όμως είναι δύο. Στην πρώτη εξάγονται 10 διαφορετικά σεντ παραμέτρων, ένα για κάθε περίοδο και το τελικό

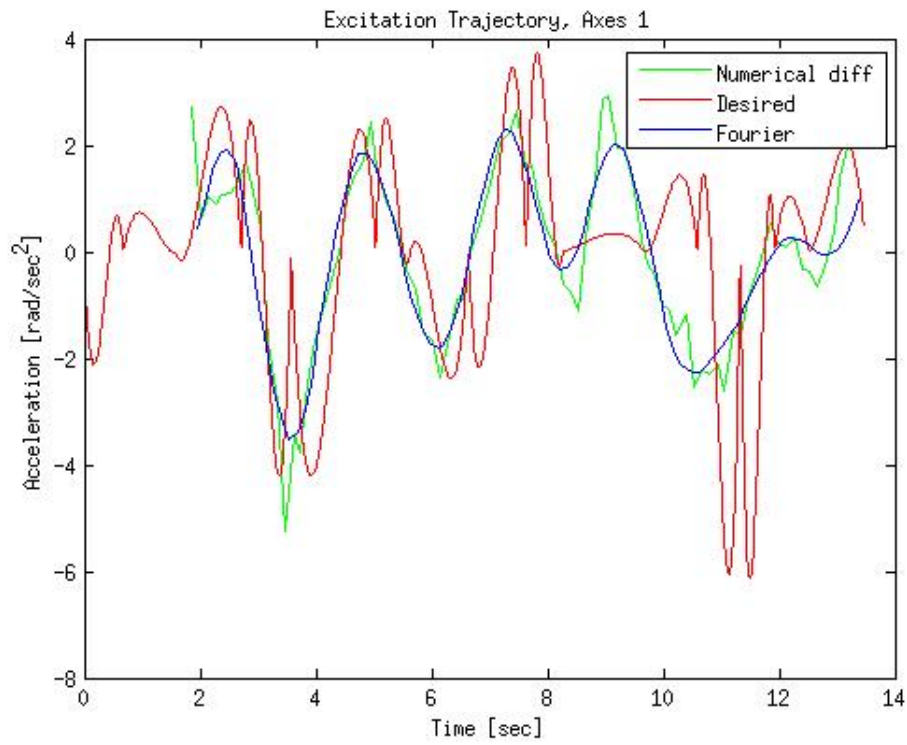
σει παραμέτρων είναι ο μέσος όρος αυτών. Στην δεύτερη [38] βρίσκεται πρώτα ο μέσος όρος για την γωνιακή θέση κάθε άξονα και ο μέσος όρος για την ροπή κάθε άξονα και έπειτα γίνεται η αναγνώριση, δηλαδή προκύπτει ένα διαφορετικό σει παραμέτρων. Ο μόνος τρόπος για να βρεθεί η βέλτιστη λύση είναι μέσω του πειράματος επαλήθευσης που θα ακολουθήσει.

5.2.3 Επεξεργασία Δεδομένων

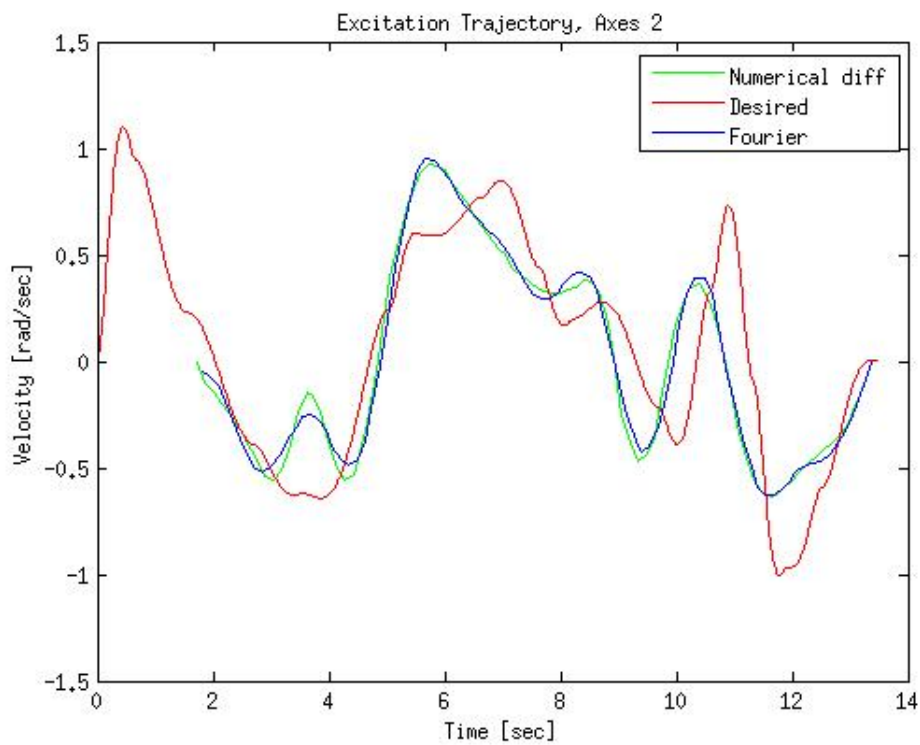
Όπως έγινε γνωστό η μετάδοση των δεδομένων από το Katana γίνεται με αρκετή καθυστέρηση. Ο μέσος χρόνος είναι 150 msec, οπότε προκύπτουν προβλήματα κατά τον υπολογισμό της γωνιακής επιτάχυνσης και της γωνιακής ταχύτητας των αξόνων. Για αυτό θα χρησιμοποιηθεί ένα από τα πλεονεκτήματα που παρέχει η χρήση των περιοδικών τροχιών. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά σε πειράματα αναγνώρισης των άγνωστων δυναμικών παραμέτρων. Καθώς η επιθυμητή τροχιά είναι σειρά Fourier, η πραγματική τροχιά θα μπορούσε να ταιριαστεί (fit) σε μια σειρά Fourier. Για αυτό θα γίνει χρήση του Curve Fitting Toolbox του Matlab. Έπειτα θα μπορεί να πραγματοποιηθεί αναλυτική διαφόριση για να βρεθεί η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με απλή αριθμητική διαφόριση της γωνιακής θέσης. Η διαφορά είναι εμφανής στα παρακάτω γραφήματα 5.155.175.19 5.165.185.20



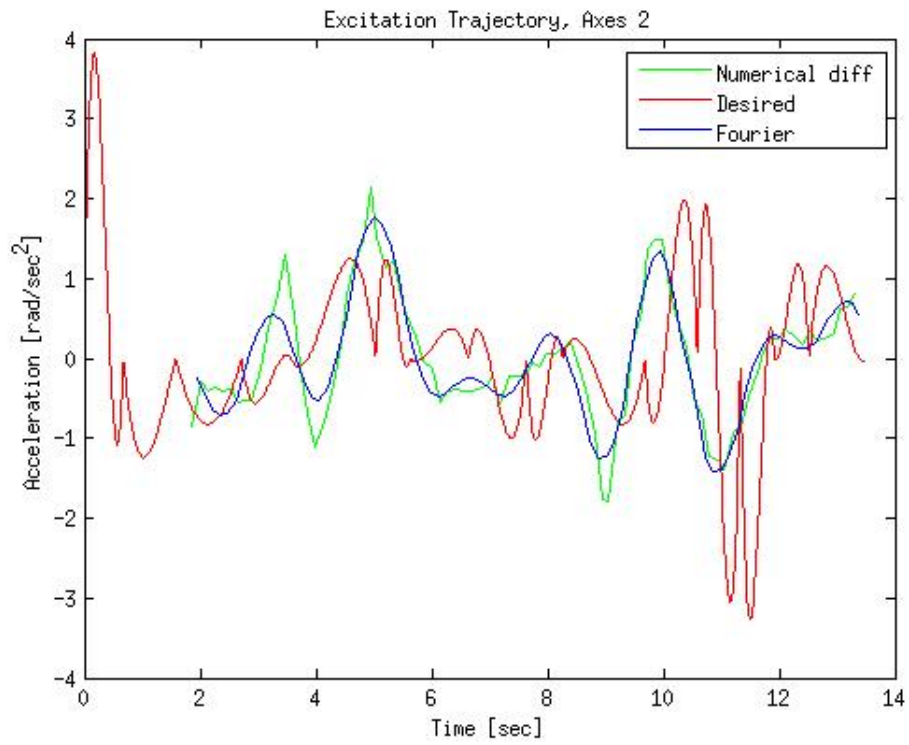
Σχήμα 5.15: Άξονας 1, Ταχύτητα



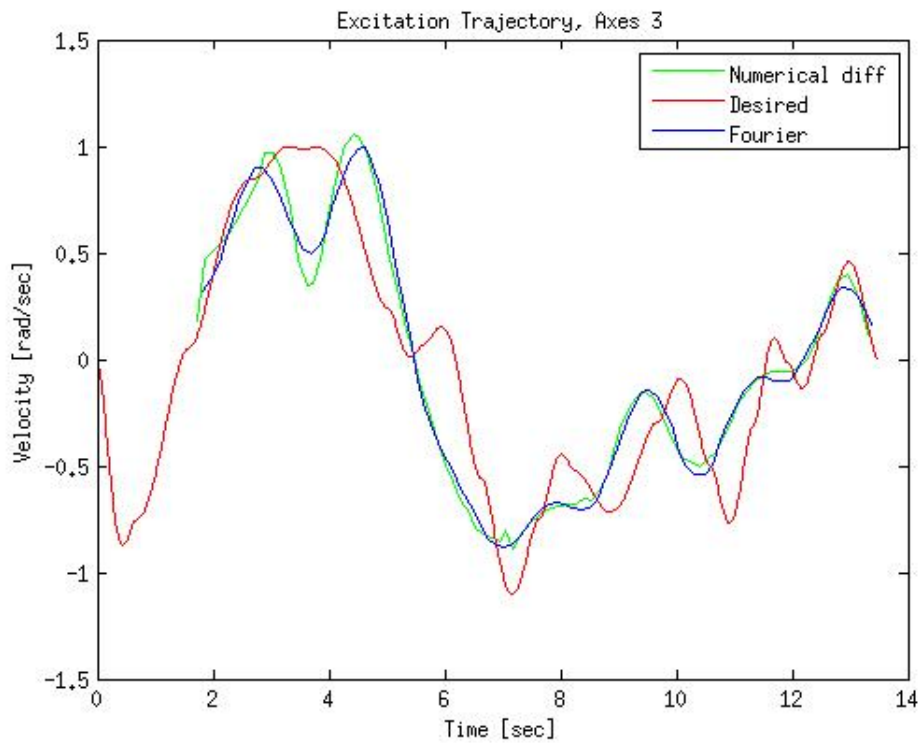
Σχήμα 5.16: Άξονας 1, Επιτάχυνση



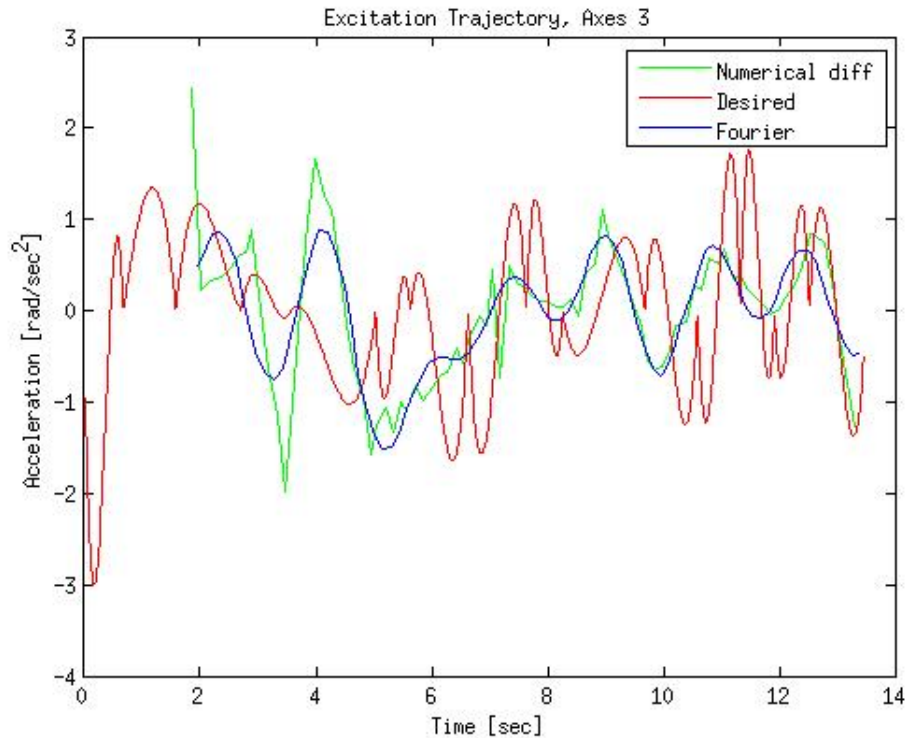
Σχήμα 5.17: Άξονας 2, Ταχύτητα



Σχήμα 5.18: Άξονας 2, Επιτάχυνση



Σχήμα 5.19: Άξονας 3, Ταχύτητα



Σχήμα 5.20: Άξονας 3, Επιτάχυνση

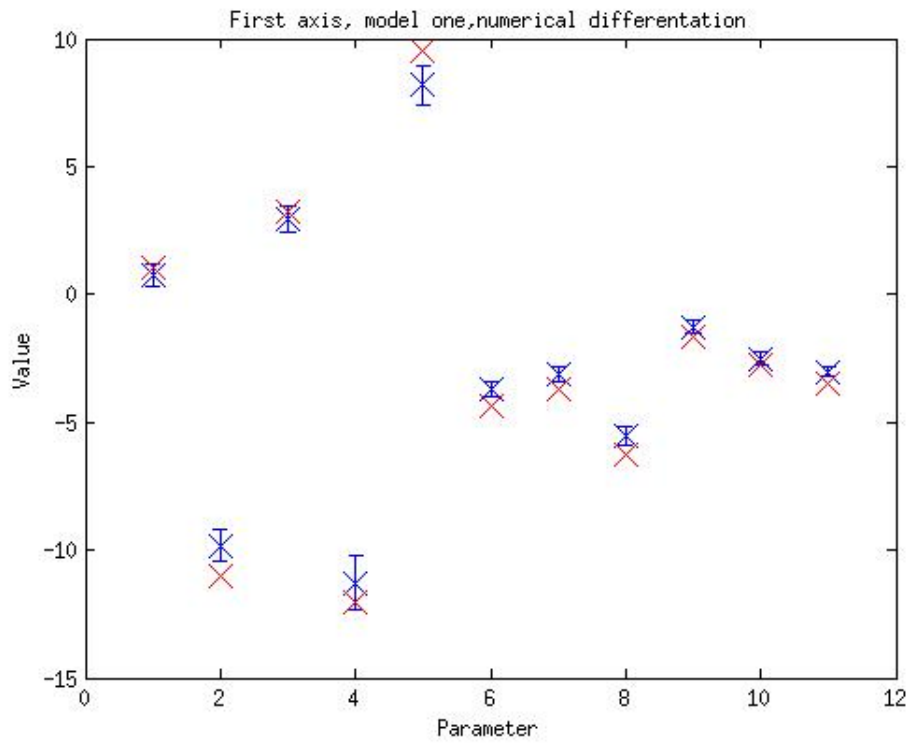
5.2.4 Εκτίμηση Παραμέτρων

Όπως έχει γραφτεί σε προηγούμενο κεφάλαιο θα εφαρμοστεί η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων για την εύρεση τριών σετ παραμέτρων, ένα για κάθε άξονα του βραχίονα. Επίσης θα χρησιμοποιηθούν τα δύο διαφορετικά μοντέλα που έχουν βρεθεί, οι δύο διαφορετικοί τρόποι εκτίμησης της ταχύτητας και της επιτάχυνσης και δύο διαφορετικοί τρόποι για την μείωση του θορύβου της μετρούμενης ροπής.

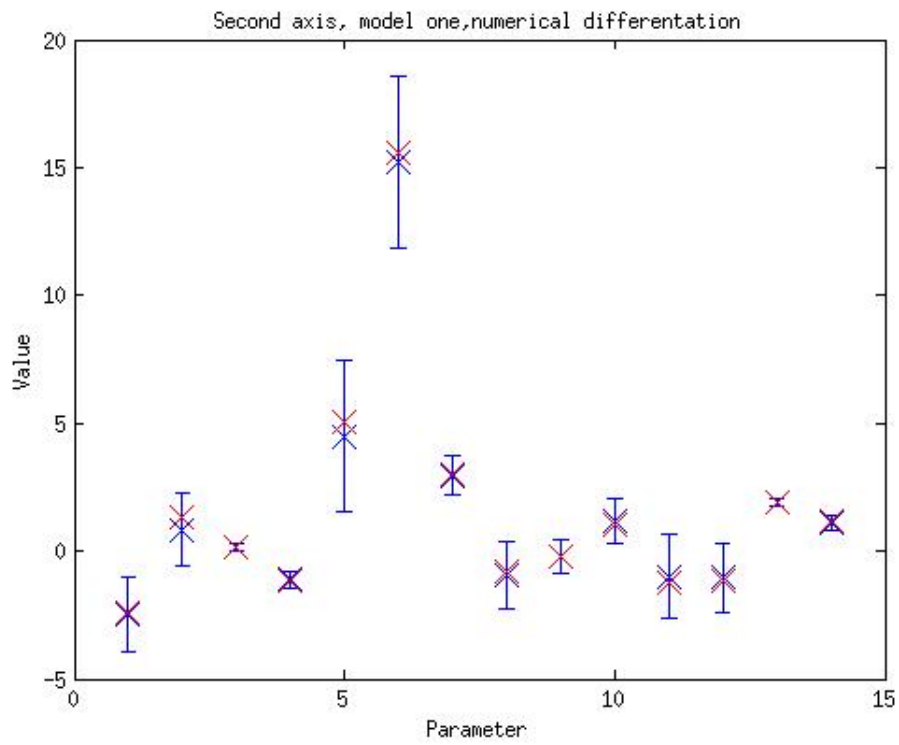
Μοντέλο 1

Το πρώτο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί περιγράφει τον πρώτο άξονα με 11 παραμέτρους, τον δεύτερο άξονα με 14 και τον τρίτο μόλις με 7. Αρχικά η γωνιακή ταχύτητα και επιτάχυνση θα βρεθούν με αριθμητική διαφόριση, έπειτα χρησιμοποιώντας σειρές Fourier και τέλος θα γίνει σύγκριση των δύο μεθόδων.

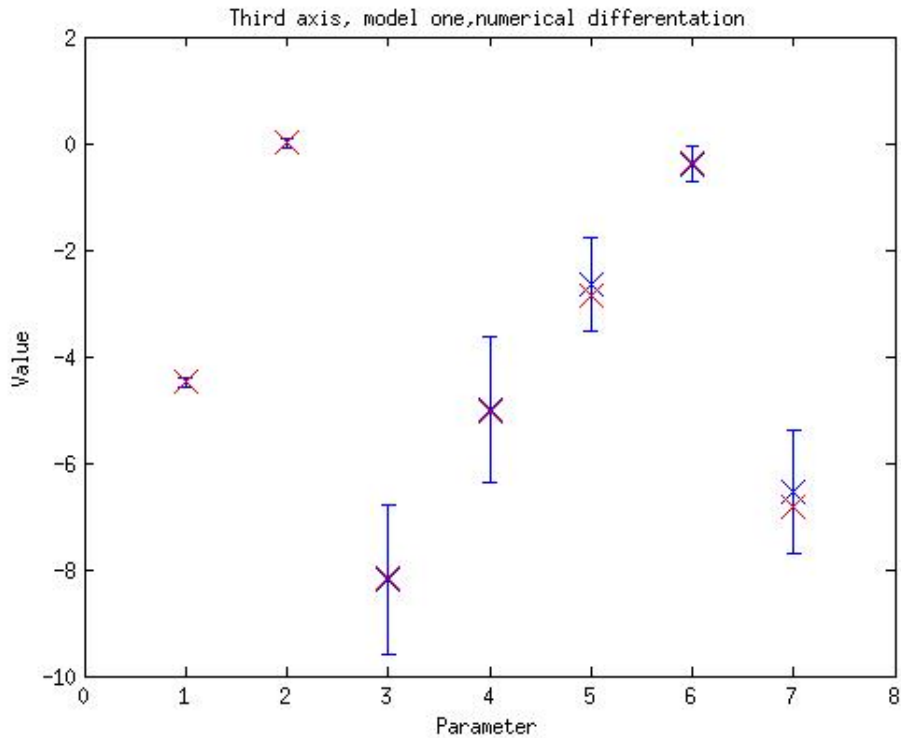
Στα παρακάτω αποτελέσματα φαίνονται τα αποτελέσματα των τιμών των παραμέτρων, η ταχύτητα και η επιτάχυνση βρέθηκε με αριθμητική διαφόριση. Με μπλε χρώμα είναι ο μέσος όρος των παραμέτρων για τα 10 διαφορετικά πειράματα καθώς και η τυπική απόκλιση τους. Με κόκκινο χρώμα είναι οι παράμετροι που βρέθηκαν αφού πρώτα υπολογίστηκε ο μέσος όρος της ροπής και της γωνίας κάθε άξονα. 5.215.225.23.



Σχήμα 5.21: Άξονας 1, Σύγκριση 2 μεθοδων



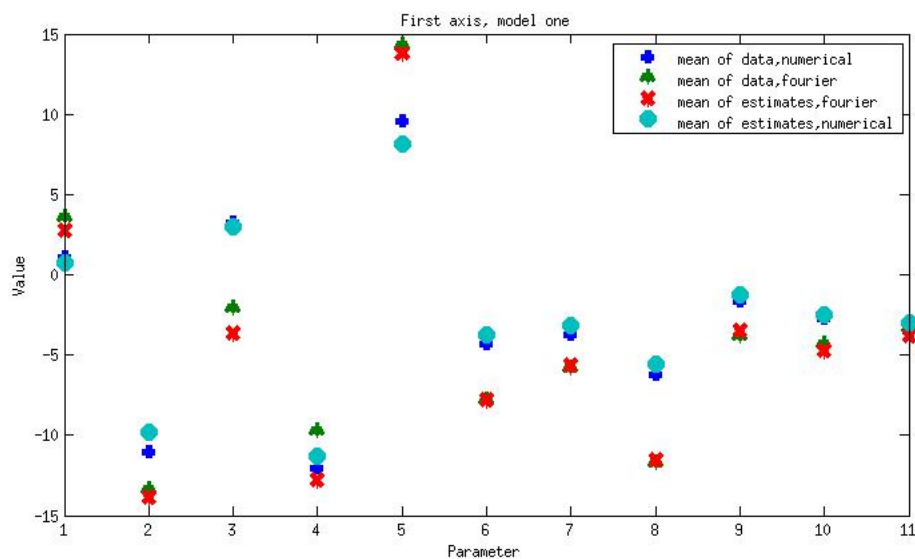
Σχήμα 5.22: Άξονας 2, Σύγκριση 2 μεθοδων



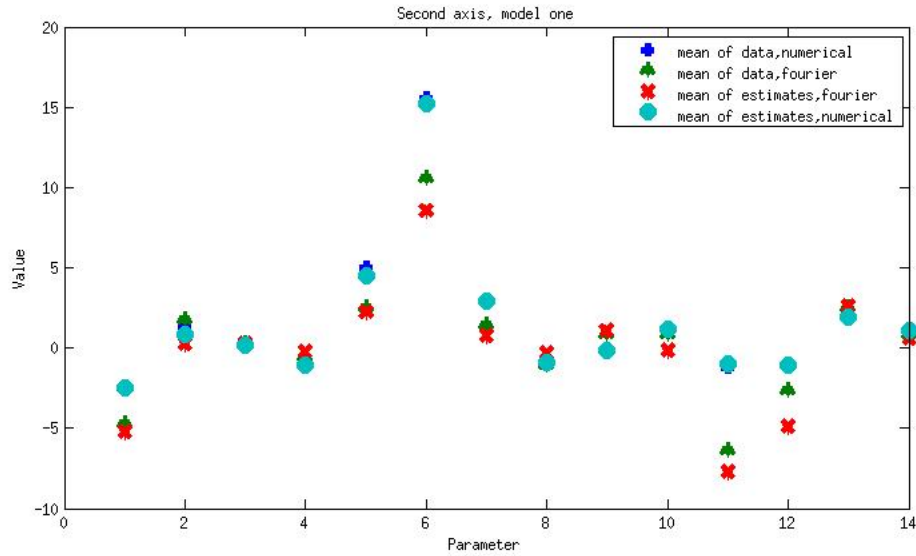
Σχήμα 5.23: Άξονας 3, Σύγκριση 2 μεθοδων

Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι η διακύμανση των παραμέτρων διαφέρει από άξονα σε άξονα. Στον πρώτο είναι ελάχιστη για όλες τις παραμέτρους, στον δεύτερο δύο παράμετροι παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη, ενώ στον τρίτο οι μισοί παράμετροι έχουν αρκετά μεγάλη διακύμανση. Επίσης οι τιμές που βρίσκονται από τους δύο τρόπους μείωσης του θορύβου της ροπής είναι αρκετά κοντά και κάποιες φορές ταυτίζονται. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν σειρές Fourier για τον υπολογισμό της ταχύτητας και της επιτάχυνσης.

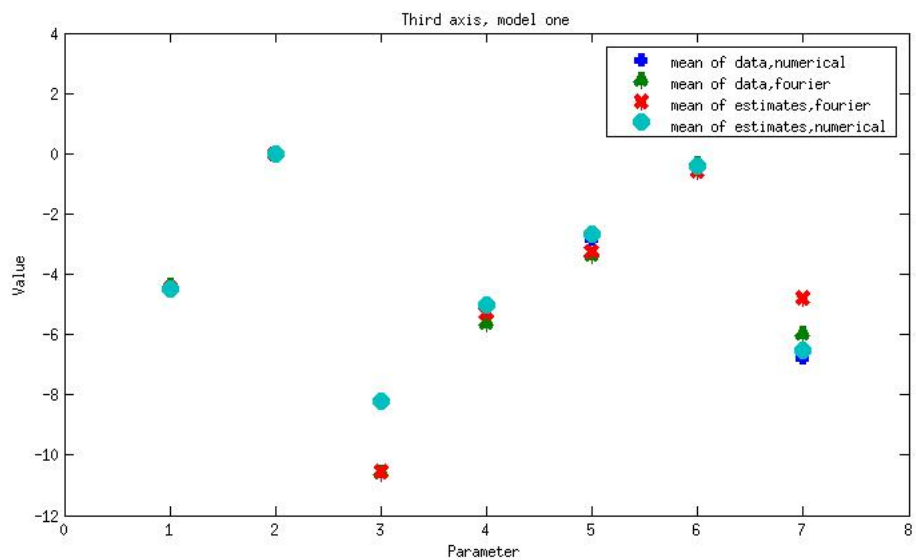
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι παράμετροι που βρέθηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους σε κάθε στάδιο.



Σχήμα 5.24: Άξονας 1, σύγκριση 4 μεθόδων



Σχήμα 5.25: Άξονας 2, σύγκριση 4 μεθόδων

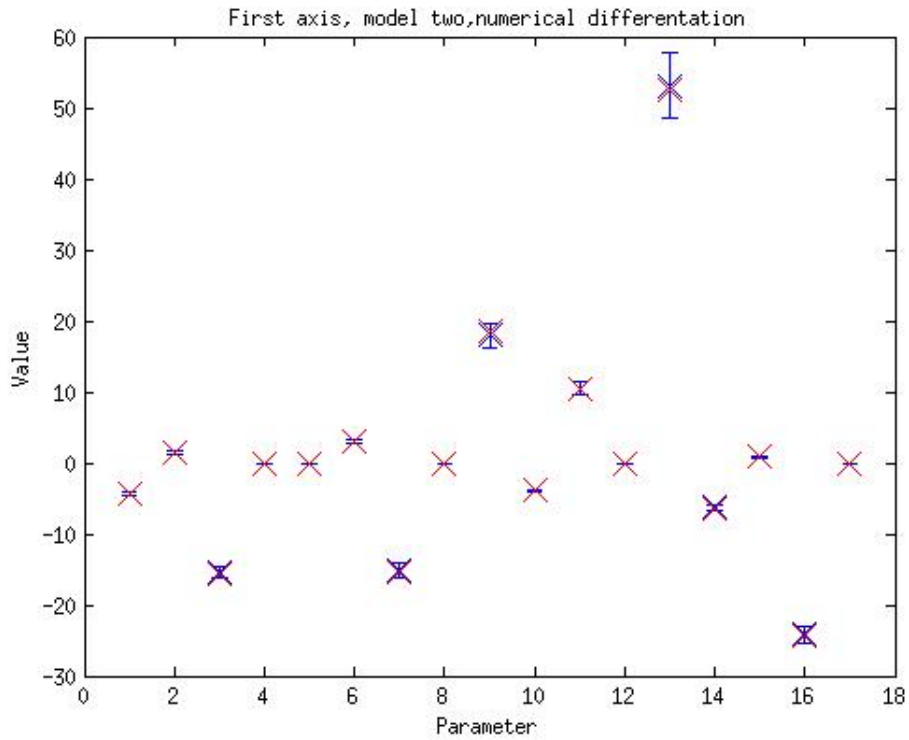


Σχήμα 5.26: Άξονας 3, σύγκριση 4 μεθόδων

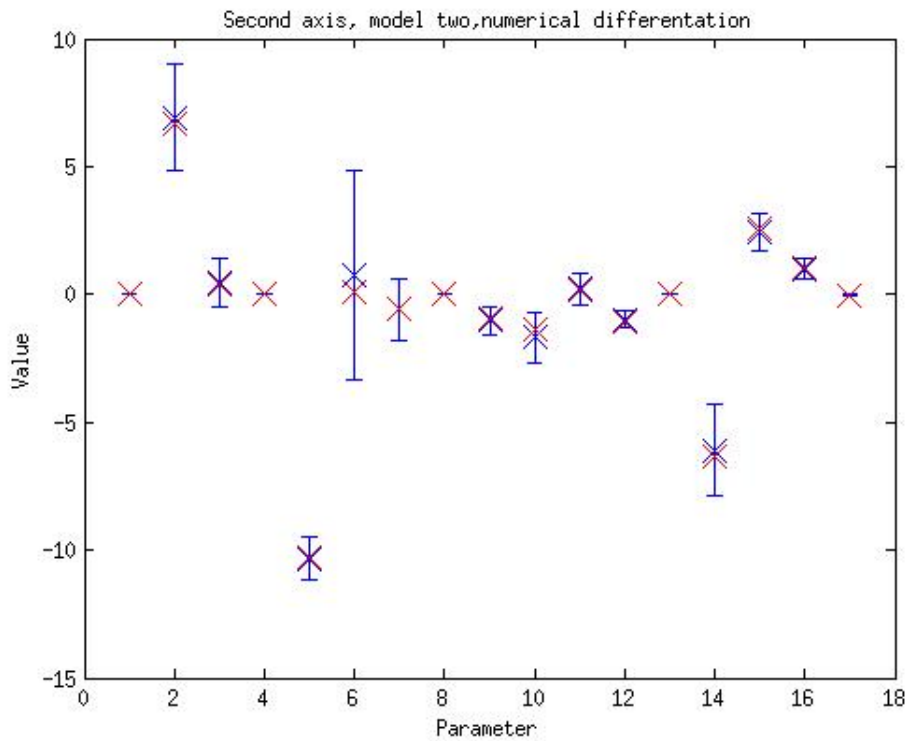
Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως οι δύο τρόποι εύρεσης της ταχύτητας και της επιτάχυνσης αποδίδουν παραπλήσια αποτελέσματα ως προς τις άγνωστες παραμέτρους, ενώ χρησιμοποιώντας τους δύο τρόπους μείωσης του θορύβου της μετρούμενης ροπής προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα για κάποιες παραμέτρους. Ο μοναδικός τρόπος εύρεσης της βέλτιστης λύσης είναι μέσω του πειράματος της επαλήθευσης.

Μοντέλο 2

Στα παρακάτω αποτελέσματα φαίνονται τα αποτελέσματα των τιμών των παραμέτρων, η ταχύτητα και η επιτάχυνση βρέθηκε με αριθμητική διαφόριση. Με μπλε χρώμα είναι ο μέσος όρος των παραμέτρων για τα 10 διαφορετικά πειράματα καθώς και η τυπική απόκλιση τους. Με κόκκινο χρώμα είναι οι παράμετροι που βρέθηκαν αφού πρώτα υπολογίστηκε ο μέσος όρος της ροπής και της γωνίας κάθε άξονα. 5.275.28.



Σχήμα 5.27: Άξονας 1, Σύγκριση 2 μεθοδων

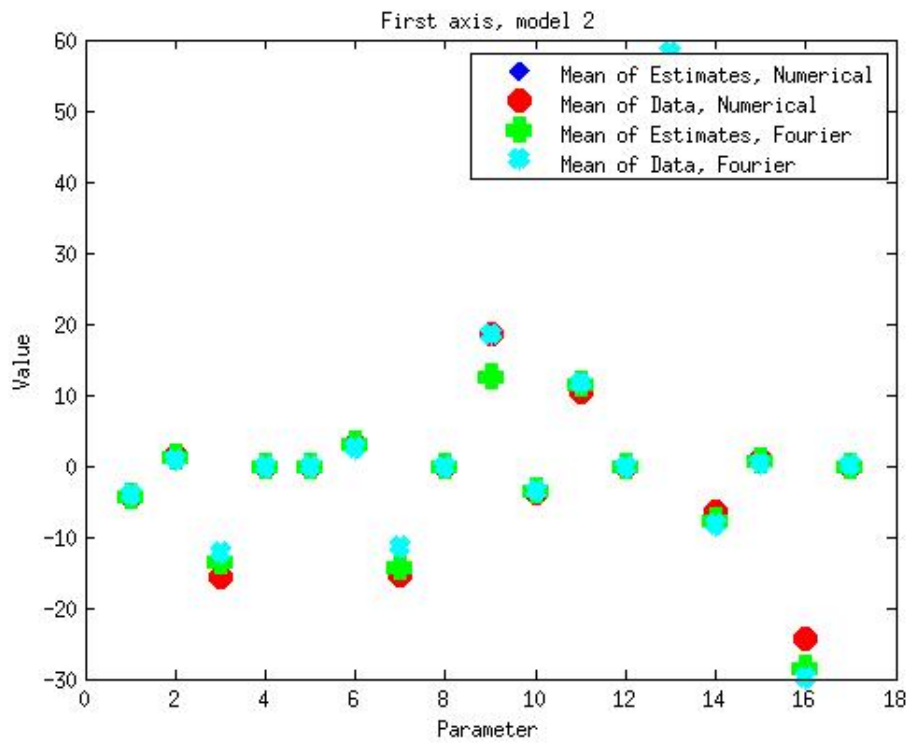


Σχήμα 5.28: Άξονας 2, Σύγκριση 2 μεθοδων

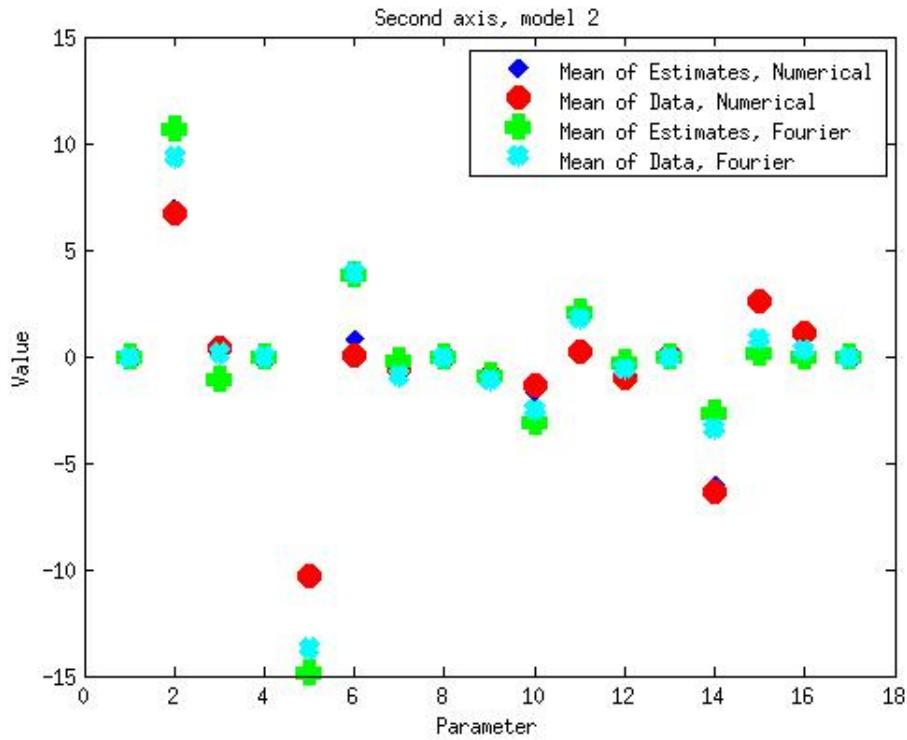
Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι η διακύμανση των παραμέτρων διαφέρει από άξονα σε άξονα. Στον πρώτο είναι ελάχιστη για όλες τις παραμέτρους ενώ στον δεύτερο τρεις παράμετροι παρουσιάζουν

ζουν αρκετά μεγάλη. Για τον τρίτο άξονα τα αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά για αυτό και θα χρησιμοποιηθεί το πρώτο μοντέλο μόνο.

Ακολουθεί η σύγκριση των μέσων όρων των διαφορετικών μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί 5.295.30.



Σχήμα 5.29: Άξονας 1, σύγκριση 4 μεθόδων



Σχήμα 5.30: Άξονας 2, σύγκριση 4 μεθόδων

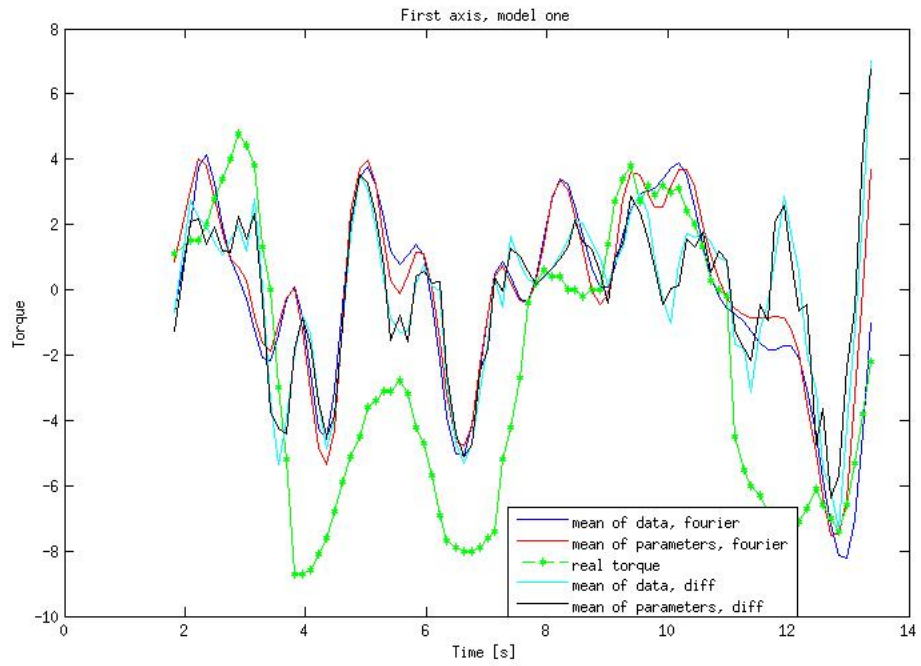
Παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα με το πρώτο μοντέλο.

5.2.5 Πείραμα Επαλήθευσης

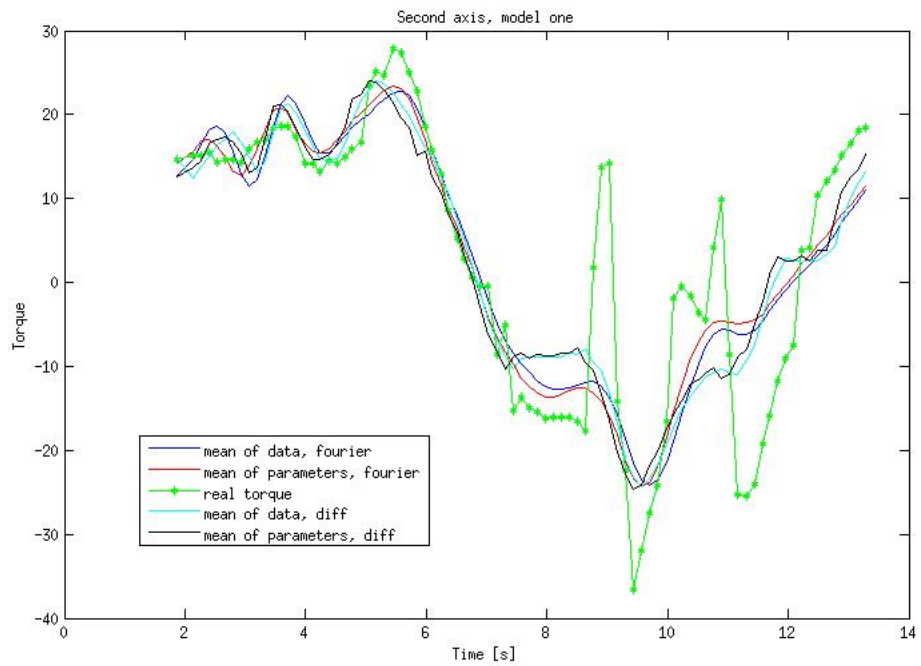
Μοντέλο 1

1. Τροχιά Διέγερσης

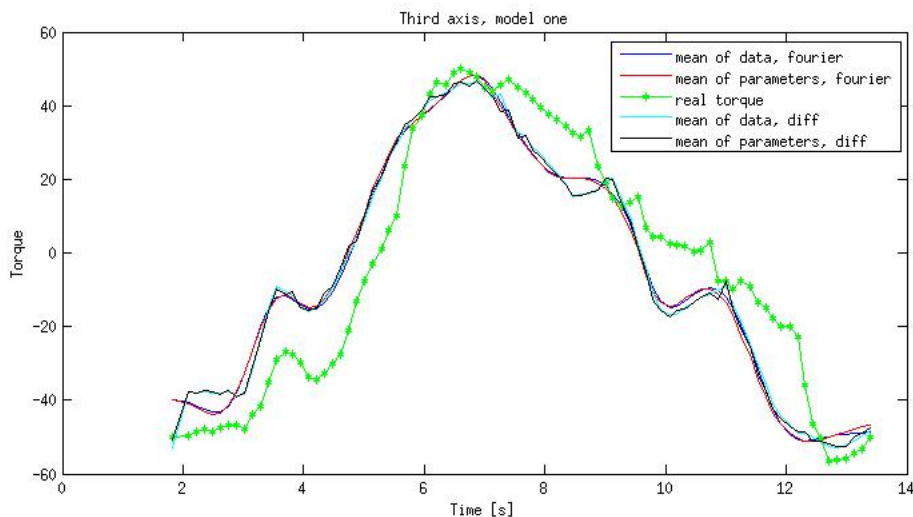
Στις παρακάτω γραφικές φαίνονται τα αποτελέσματα της επαλήθευσης των παραμέτρων αδράνειας, όσον αφορά την ίδια την τροχιά διέγερσης 5.31 5.32 5.33.



Σχήμα 5.31: Άξονας 1, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης



Σχήμα 5.32: Άξονας 2, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης



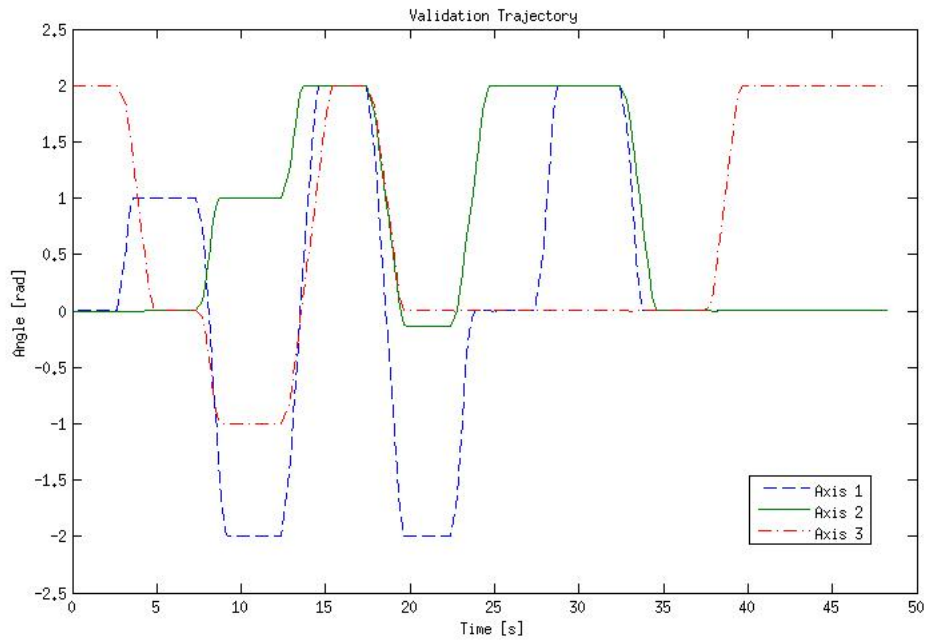
Σχήμα 5.33: Άξονας 3, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την εύρεση του σφάλματος της υπολογιζόμενης ροπής, ο πιο συνηθισμένος είναι η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Κατά μέσο όρο το μικρότερο σφάλμα το έχει η δεύτερη στήλη, χρησιμοποιώντας δηλαδή Fourier και τον μέσο όρο των δεδομένων.

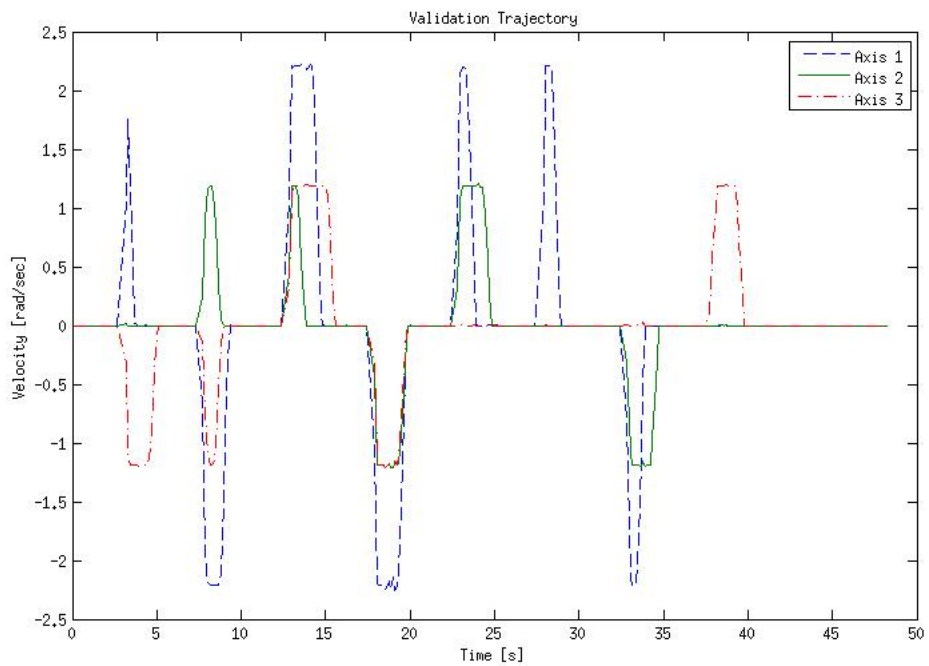
RMSE	Fourier Mean of Parameters	Fourier Mean of Data	Differential mean of Parameters	Differential mean of Data
Axis 1	3,9	3,8	4,2	4,1
Axis 2	7,9	8	8,6	8,2
Axis 3	14,1	13,6	14	13,6

2. Τροχιά Επαλήθευσης

Οι παρακάτω εικόνες 5.34 5.35, δείχνουν μια τροχιά επαλήθευσης σχεδιασμένη ειδικά για τον σκοπό αυτό. Περνάει από 7 σημεία τα οποία έχουν επιλεγεί τυχαία και βρίσκονται στο χώρο εργασίας του ρομπότ. Ο βραχίονας κάνει Point to Point κίνηση, δηλαδή προσπαθεί να τα ακολουθήσει έχοντας αρχικά μέγιστη επιτάχυνση, έπειτα σταθερή μέγιστη ταχύτητα και τελικά μέγιστη επιβράδυνση σταματώντας σε κάθε ένα σημείο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τραπεζοειδές προφίλ ταχύτητας μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων.

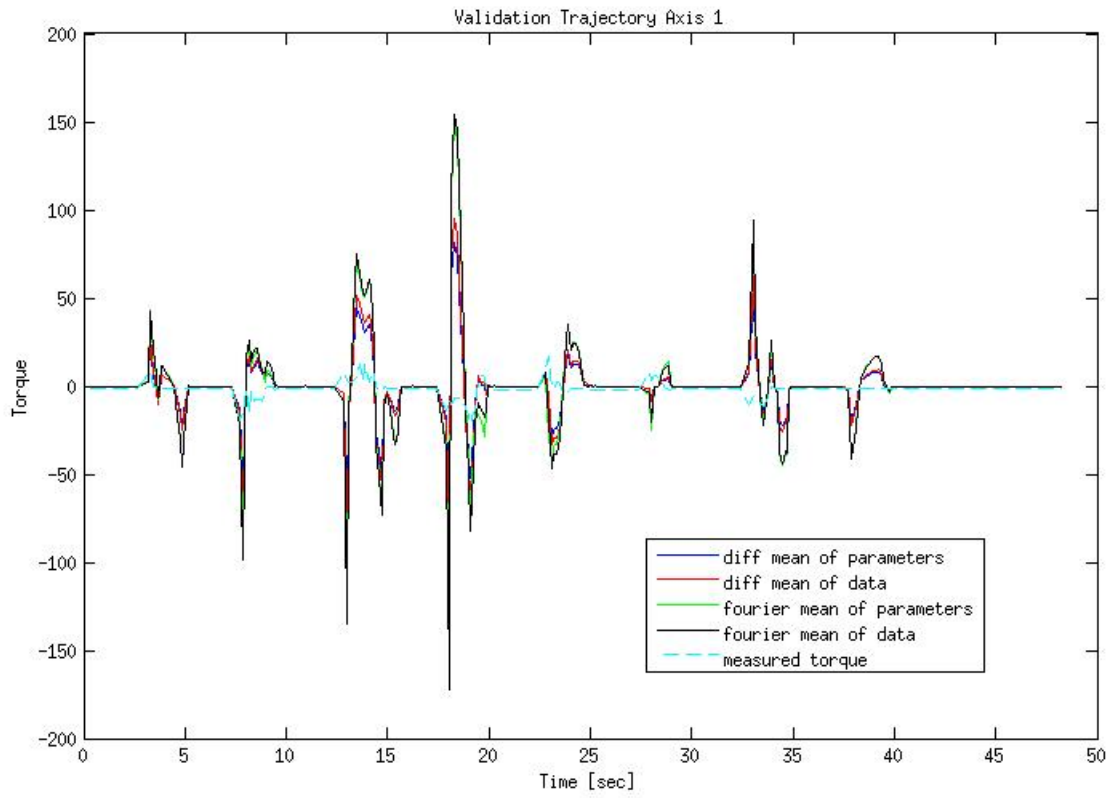


Σχήμα 5.34: Τροχιά Επαλήθευσης, Γωνία

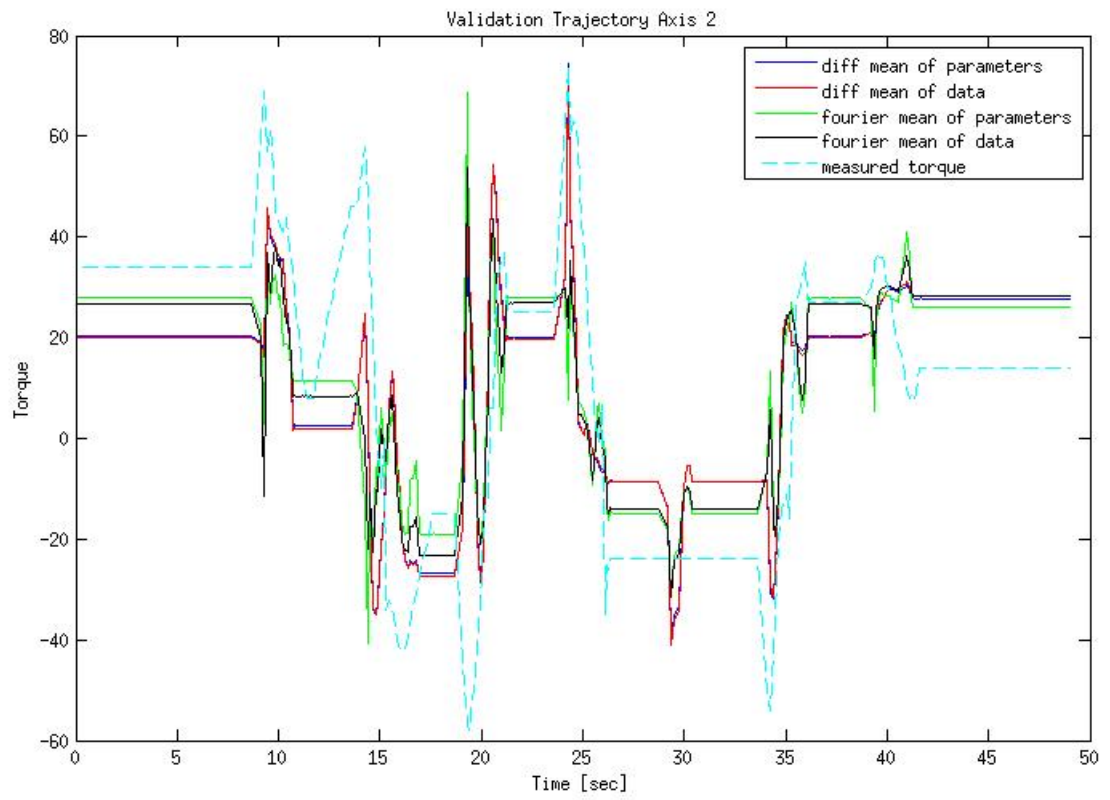


Σχήμα 5.35: Τροχιά Επαλήθευσης, Γωνιακή ταχύτητα

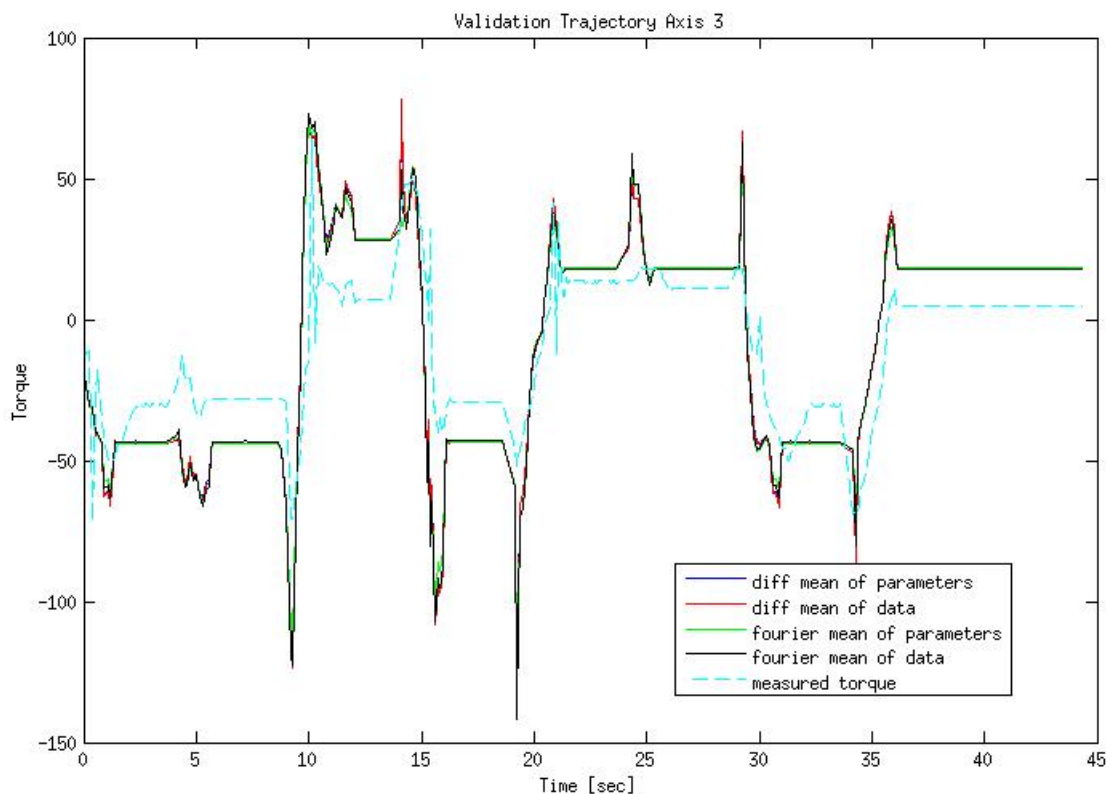
Η πρόβλεψη της ροπής και η μετρούμενη ροπή φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα 5.36 5.37 5.38.



Σχήμα 5.36: Άξονας 1, Επαλήθευση Τροχιάς



Σχήμα 5.37: Άξονας 2, Επαλήθευση Τροχιάς



Σχήμα 5.38: Άξονας 3, Επαλήθευση Τροχιάς

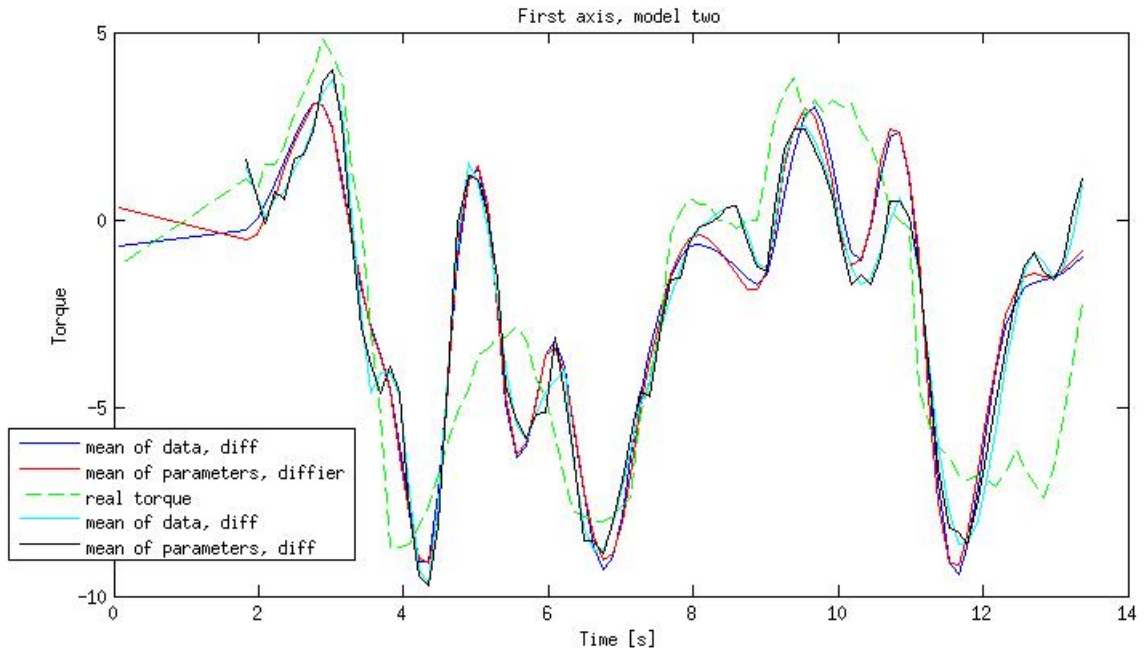
Για να βρεθεί η βέλτιστη μέθοδος θα βρεθεί η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Τα αποτελέσματα για τον πρώτο άξονα δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, για τους άλλους δύο άξονες παρατηρείται μικρό σφάλμα στο δυναμικό κομμάτι της τροχιάς και μεγάλο σφάλμα όταν είναι στάσιμοι. Οι διαφορετικοί μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μικρή διαφορά παρόλο που στην βιβλιογραφία δεν συμβαίνει αυτό.

RMSE	Fourier Mean of Parameters	Fourier Mean of Data	Differential mean of Parameters	Differential mean of Data
Axis 1	20,5	21,3	11,4	13,3
Axis 2	17,2	17,2	18,2	18,5
Axis 3	19,8	20,2	20	20,2

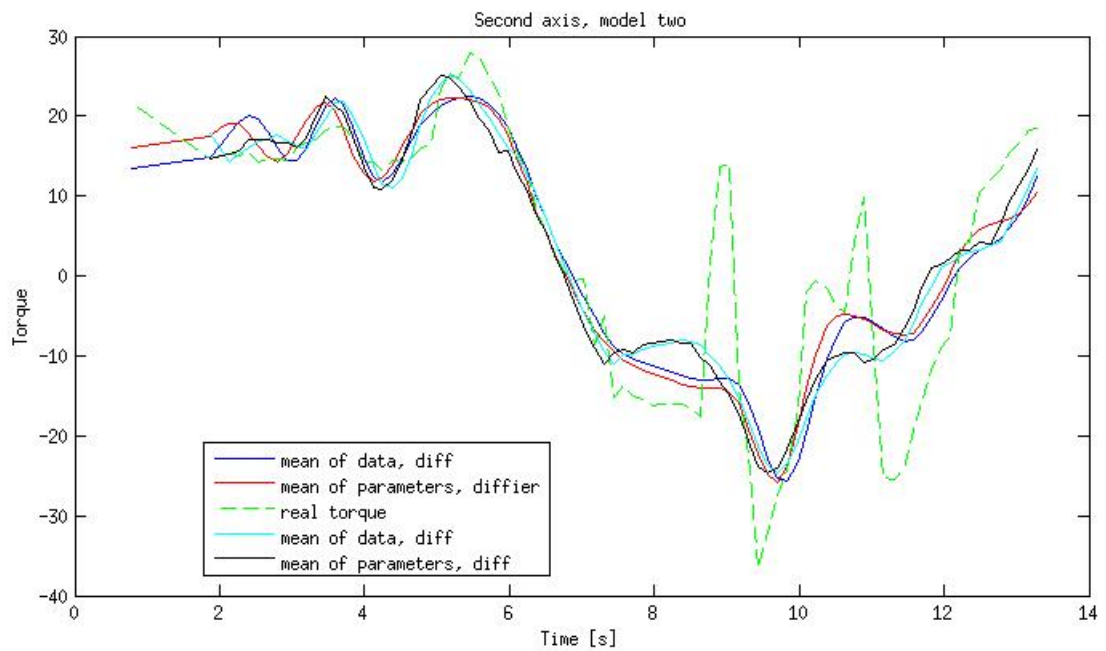
Μοντέλο 2

1. Τροχιά Διέγερσης

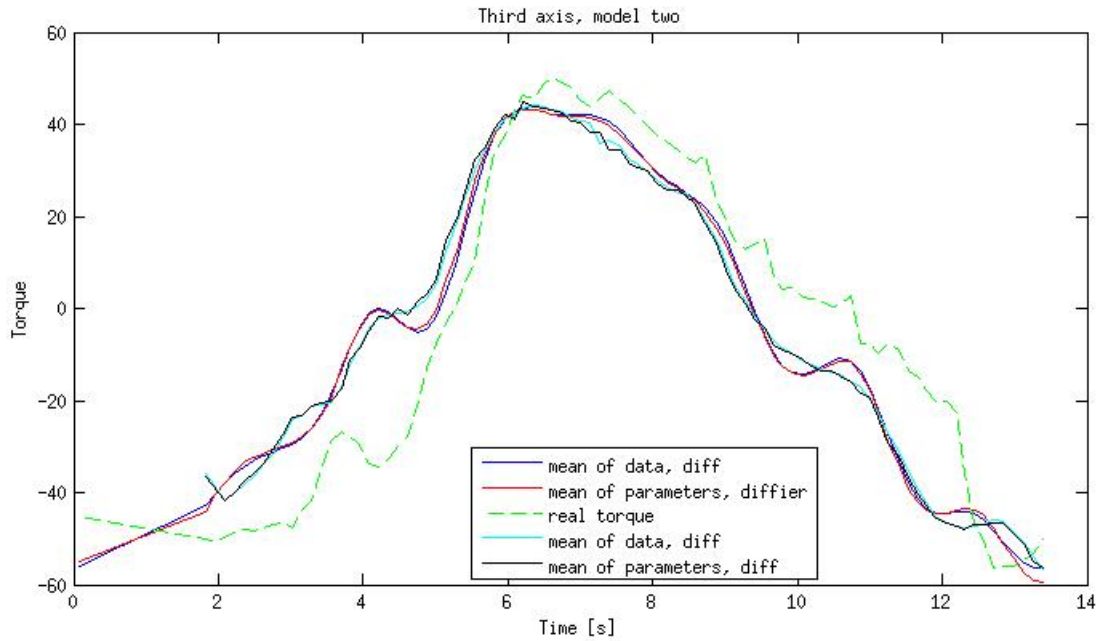
Χρησιμοποιώντας το μοντέλο 2, η πρόβλεψη της ροπής για την τροχιά διέγερσης φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα 5.395.405.41



Σχήμα 5.39: Άξονας 1, μοντέλο 2, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης



Σχήμα 5.40: Άξονας 2, μοντέλο 2, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης



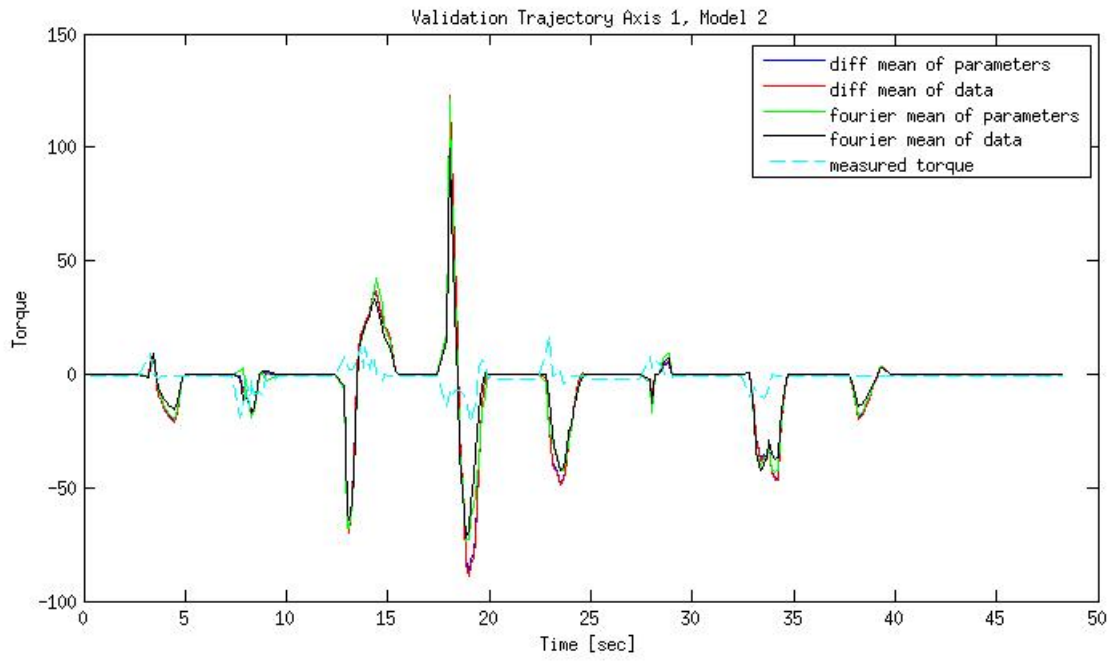
Σχήμα 5.41: Άξονας 3, μοντέλο 2, επαλήθευση τροχιάς διέγερσης

Όπως και για το πρώτο μοντέλο για να βρεθεί η βέλτιστη μέθοδος, θα βρεθεί η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Τα αποτελέσματα και για τους 3 άξονες είναι καλύτερα σε σχέση με το πρώτο μοντέλο. Το σφάλμα είναι ελάχιστο όταν χρησιμοποιούνται σειρές Fourier για την εκτίμηση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης.

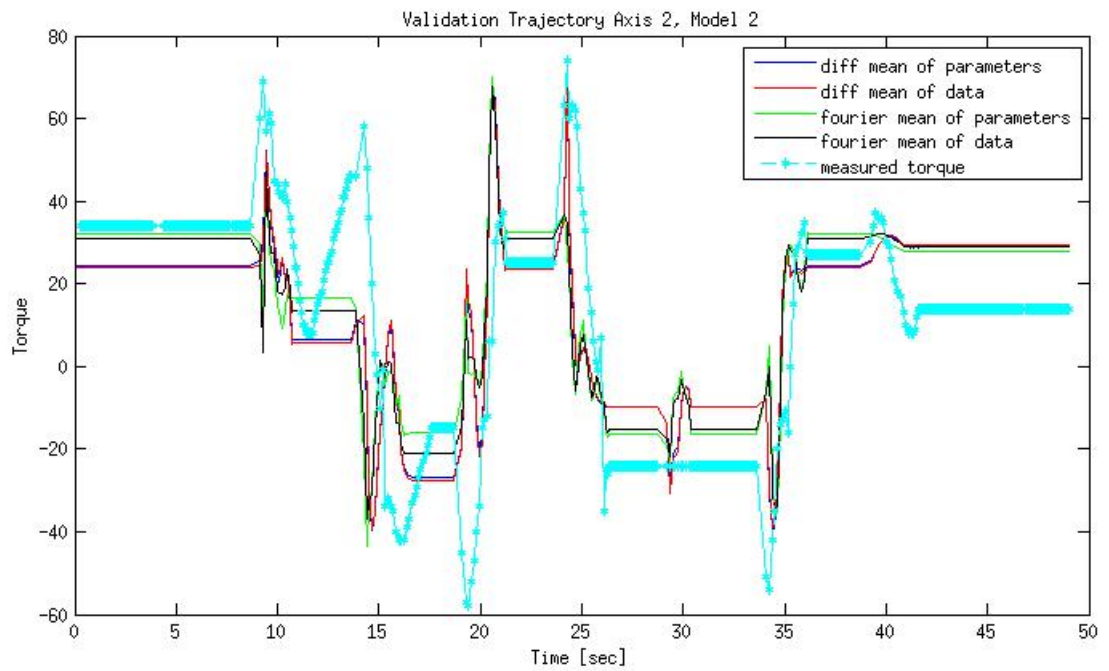
RMSE	Fourier Mean of Parameters	Fourier Mean of Data	Differential mean of Parameters	Differential mean of Data
Axis 1	2,4	2,3	2,4	2,4
Axis 2	7,4	7,7	8,3	8
Axis 3	14,7	14,4	15,6	15,2

2. Τροχιά Επαλήθευσης

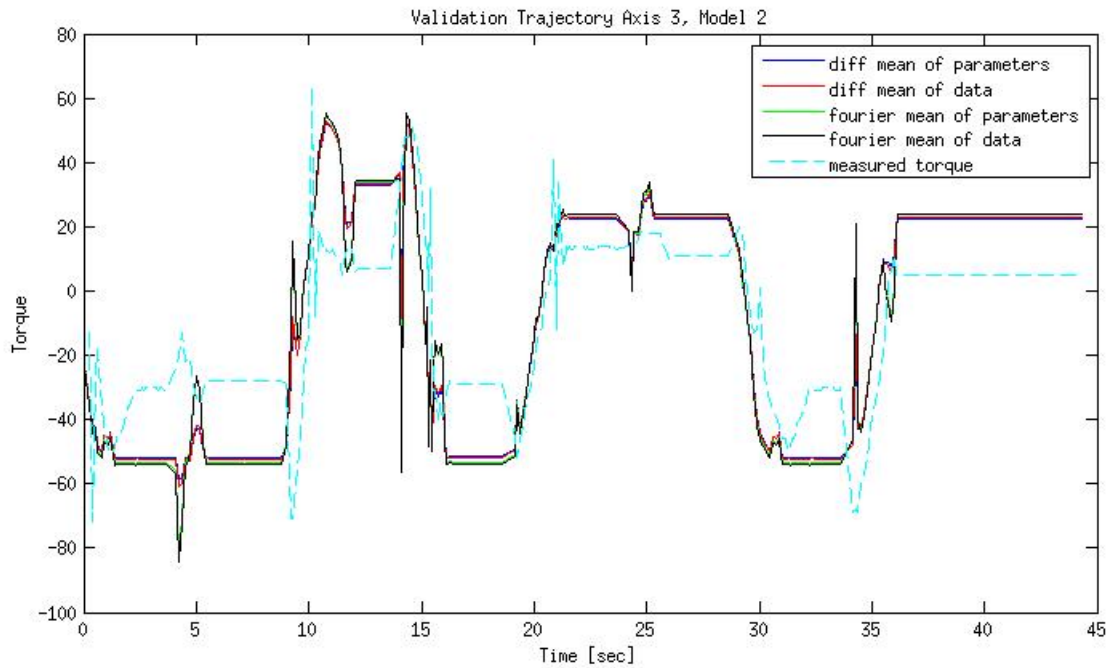
Η πρόβλεψη της ροπής και η μετρούμενη ροπή φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα 5.42 5.43 5.44.



Σχήμα 5.42: Αξονας 1, επαλήθευση τροχιάς



Σχήμα 5.43: Αξονας 2, επαλήθευση τροχιάς



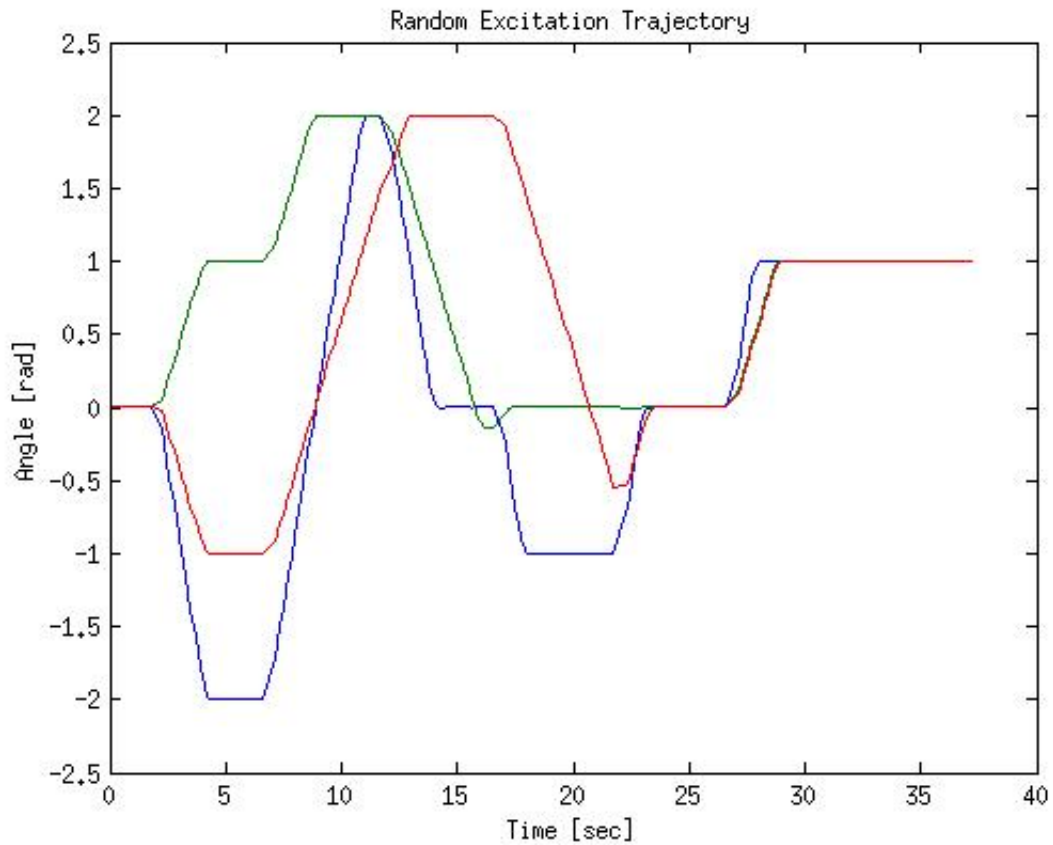
Σχήμα 5.44: Αξονας 3, επαλήθευση τροχιάς

Για να βρεθεί η βέλτιστη μέθοδος θα βρεθεί η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Είναι πάλι ξεκάθαρο πως χρησιμοποιώντας σειρές Fourier το σφάλμα είναι μικρότερο.

RMSE	Fourier Mean of Parameters	Fourier Mean of Data	Differential mean of Parameters	Differential mean of Data
Axis 1	14,7	13	15,7	16
Axis 2	14,3	14,5	16,3	16,6
Axis 3	20,7	21	18,6	18,8

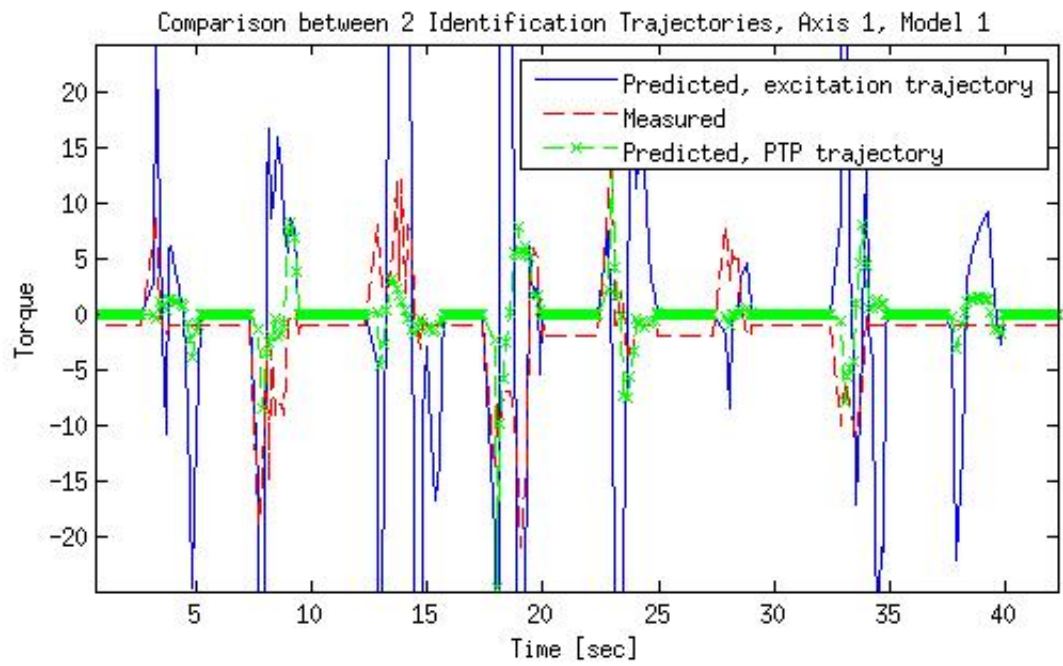
5.3 PTP Τροχιά Διέγερσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθεί μια τροχιά που θα διαπερνά κάποια σημεία του χώρου, τα οποία έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να καλύπτεται αρκετός χώρος εργασίας του βραχίονα. Η κίνηση που θα πραγματοποιήσει ο βραχίονας είναι PTP (point to point) 5.45.

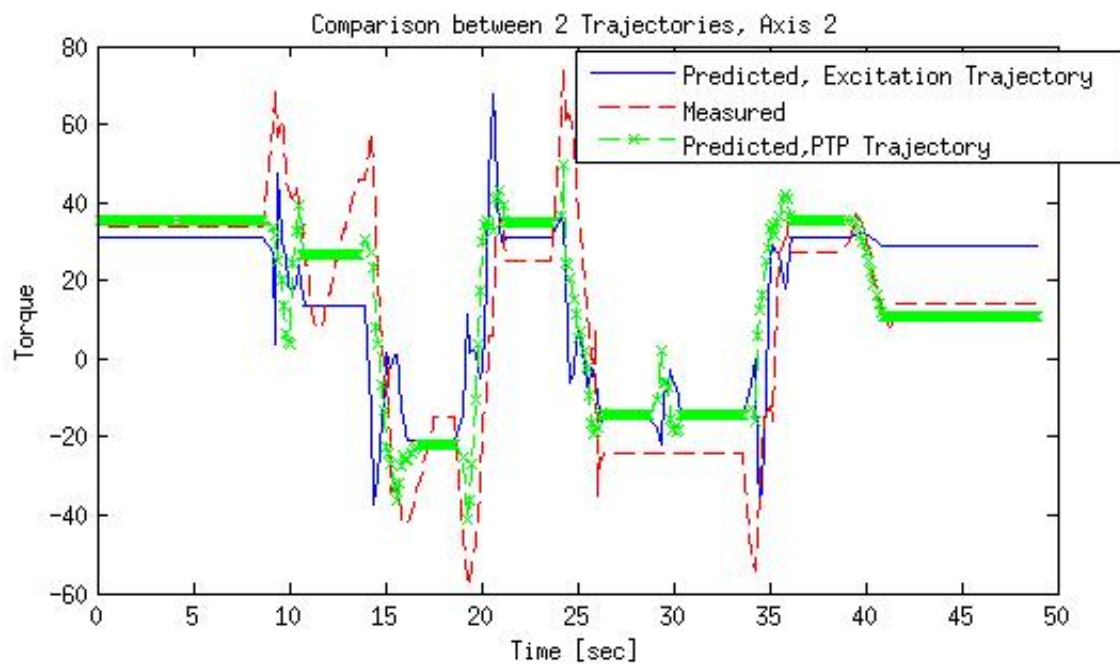


Σχήμα 5.45: PTP Τροχιά Διέγερσης

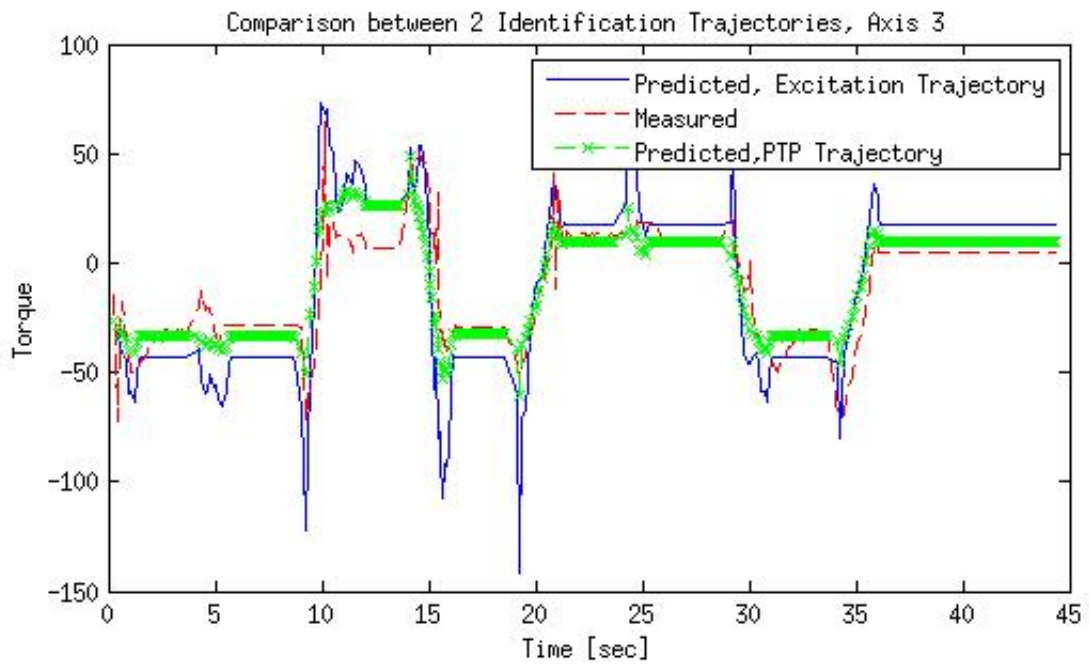
Οι τεχνικές που εφαρμόστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, χρησιμοποιούνται και εδώ για την εύρεση νέων άγνωστων παραμέτρων και την επαλήθευσή τους μέσα από την τροχιά επαλήθευσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σφάλμα είναι μικρότερο σε σχέση με την τροχιά που βρέθηκε από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Για τον πρώτο και τον δεύτερο άξονα χρησιμοποιήθηκε το δεύτερο μοντέλο ενώ για τον τρίτο άξονα χρησιμοποιήθηκε το πρώτο μοντέλο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις επόμενες εικόνες 5.465.475.48.



Σχήμα 5.46: Άξονας 1, σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης



Σχήμα 5.47: Άξονας 2, σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης



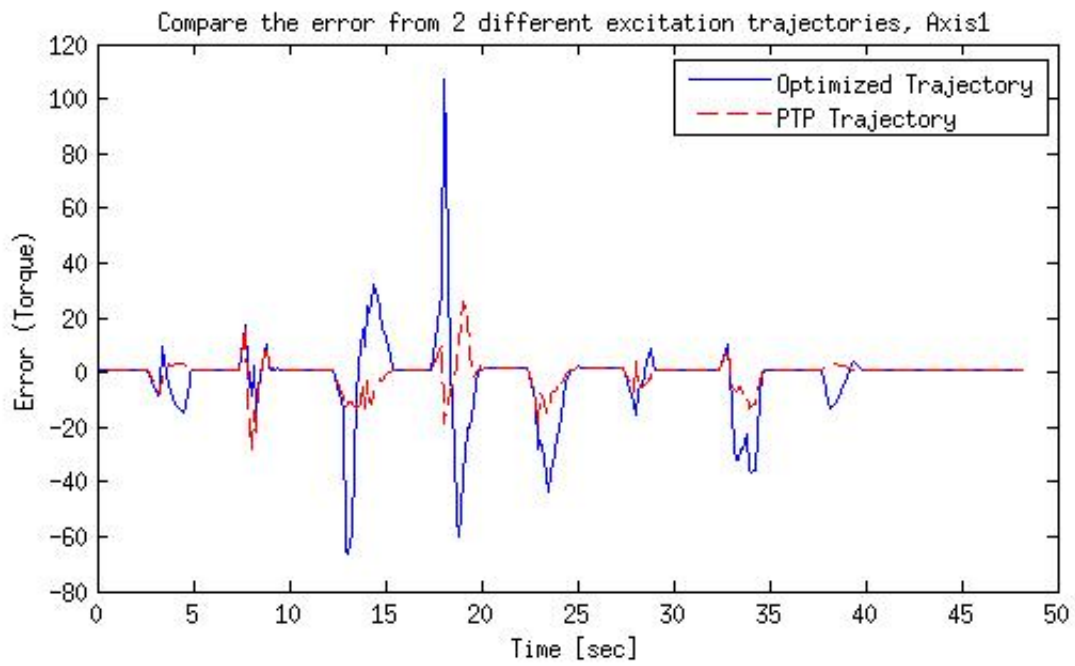
Σχήμα 5.48: Άξονας 3, σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Παρατηρείται ότι χρησιμοποιώντας την PTP τροχιά διέγερσης το σφάλμα είναι σημαντικά μικρότερο.

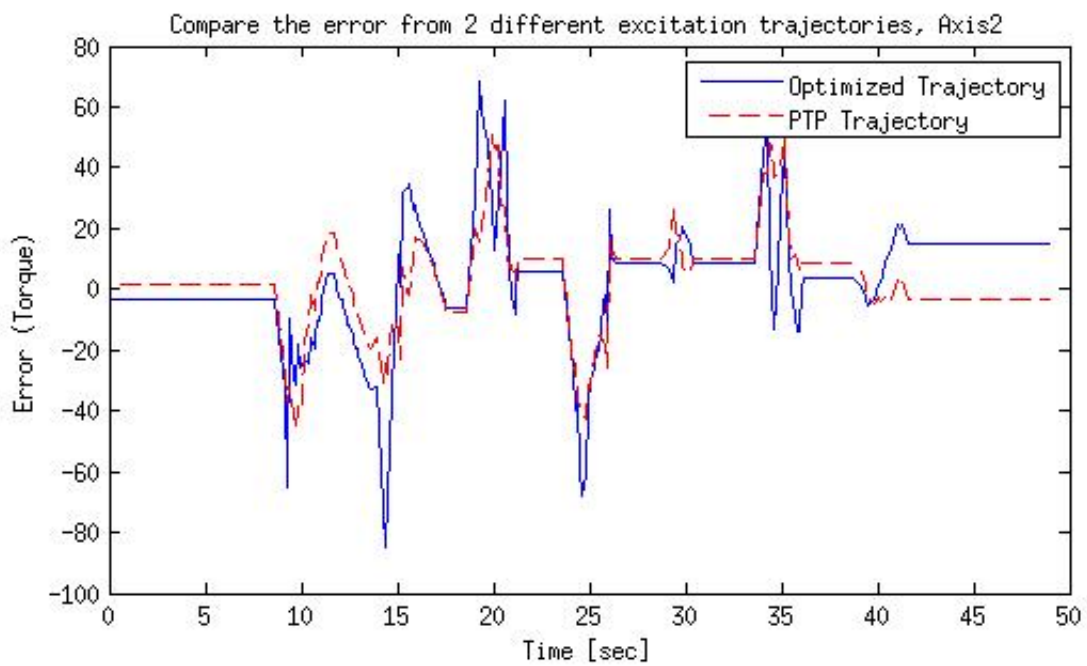
RMSE	Parameters from excitation Trajectory	Parameters from PTP Trajectory
Axis 1	13,3	3,6
Axis 2	16,7	13
Axis 3	20,2	12

5.4 Σφάλμα Πρόβλεψης Ροπής

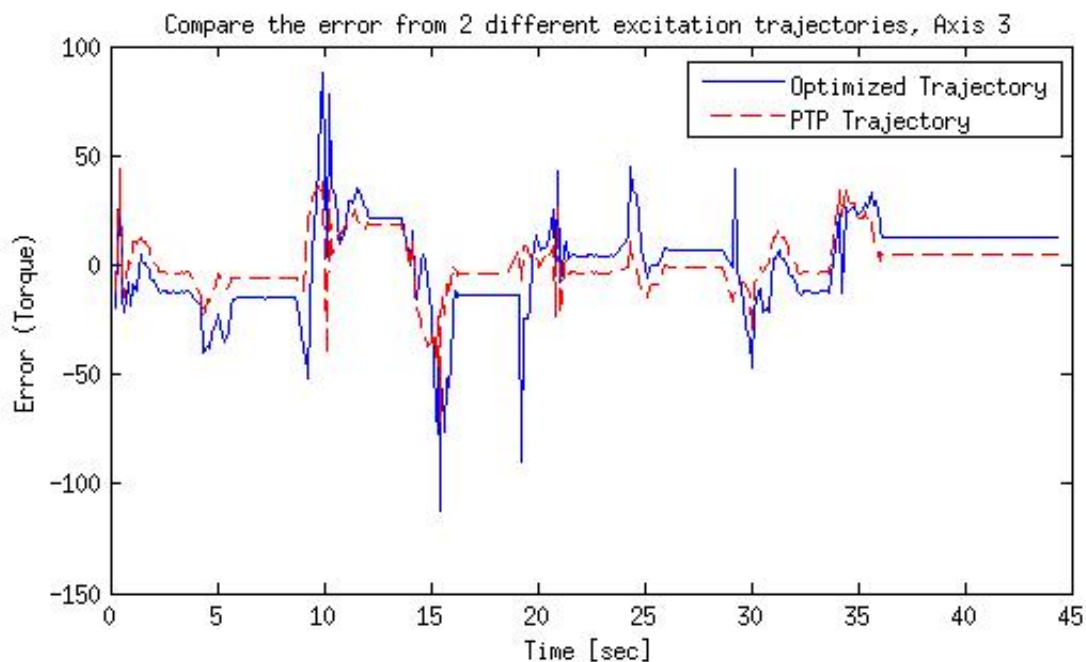
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το μικρότερο σφάλμα επαλήθευσης της ροπής, χρησιμοποιώντας τις δύο διαφορετικές τροχιές διέγερσης 5.495.505.51.



Σχήμα 5.49: Άξονας 1, σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης



Σχήμα 5.50: Άξονας 2, σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης



Σχήμα 5.51: Άξονας 3, σύγκριση 2 τροχιών διέγερσης

5.5 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιήθηκε το Optimization Toolbox του Matlab για να βρεθεί μία βέλτιστη τροχιά διέγερσης που να ικανοποιεί συγκεκριμένους περιορισμούς. Έπειτα αυτή η τροχιά χρησιμοποιήθηκε σαν είσοδος στο Katana για να γίνει το πείραμα της αναγνώρισης. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τρόποι για την εκτίμηση της ταχύτητας, της επιτάχυνσης καθώς και της μετρούμενης ροπής. Υπολογίστηκαν οι άγνωστοι παράμετροι του δυναμικού μοντέλου και εκτιμήθηκε η διακύμανσή τους. Επίσης πραγματοποιήθηκε το πείραμα της επαλήθευσης που στόχο έχει την εκτίμηση της ροπής χρησιμοποιώντας το δυναμικό μοντέλο και τις παραμέτρους που μόλις βρέθηκαν. Τέλος το πείραμα της αναγνώρισης επαναλήφθηκε χρησιμοποιώντας μια PTP τροχιά και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα.

5.5.1 Συμπεράσματα

Βελτιστοποιημένη Τροχιά Διέγερσης

Το πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει από το πρώτο τμήμα του κεφαλαίου, είναι πως επαληθεύτηκε το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης περιοδικών τροχιών, δηλαδή αυτό που επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό της ταχύτητας και της επιτάχυνσης με αναλυτική διαφόριση. Αυτό συμβαίνει καθώς το μέσο σφάλμα είναι μικρότερο σχεδόν πάντα σε σύγκριση με αυτό της αριθμητικής διαφόρισης. Το δεύτερο συμπέρασμα είναι πως το δεύτερο μοντέλο έχει καλύτερα αποτελέσματα για τον πρώτο και τον δεύτερο άξονα, ενώ για τον τρίτο άξονα τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια. Τέλος οι δύο τεχνικές μείωσης του θορύβου μέτρησης της ροπής παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα.

Σύγκριση Τροχιών Διέγερσης

Είναι εμφανές από τους πίνακες σφάλματος, ότι χρησιμοποιώντας μια σωστά επιλεγμένη PTP τροχιά διέγερσης, επιτυγχάνεται πολύ μικρότερο σφάλμα επαλήθευσης σε σχέση με μια βελτιστοποιημένη τροχιά διέγερσης. Αυτό το αποτέλεσμα δεν είναι το αναμενόμενο με βάση την βιβλιογραφία. Μια λογική εξήγηση είναι ότι κατά την υλοποίηση της τροχιάς από το Katana, ο controller δεν επιτυγχάνει τις επιθυμητές τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης που αναφέρει ο κατασκευαστής. Έτσι οι

δυναμικές του βραχίονα δεν διεγείρονται επαρκώς και το πείραμα της αναγνώρισης δεν είναι αρκετά επιτυχημένο. Από την άλλη μεριά, κατά την διάρκεια της τροχιάς διέγερσης με PTP κίνηση, οι άξονες πετυχαίνουν τις μέγιστες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης που αναφέρει το manual του ρομπότ.

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η αυξημένη υπολογιστική ισχύς, έκαναν εφικτή την χρήση τεχνικών ελέγχου χρησιμοποιώντας μοντέλα για βιομηχανικούς βραχίονες. Νέες εφαρμογές, που απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα, θα ωφεληθούν από την χρήση της γνώσης που υπάρχει για το σύστημα κατά την σχεδίαση του ελεγκτή. Η υλοποίηση απαιτεί ακριβή δυναμικά ρομποτικά μοντέλα και πειράματα αναγνώρισης άγνωστων παραμέτρων αδράνειας.

6.1 Σύνοψη-Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάστηκε η πιο συνηθισμένη μεθοδολογία αναγνώρισης παραμέτρων ρομποτικού μοντέλου. Αυτή περιλαμβάνει την δημιουργία ενός μοντέλου γραμμικού ως προς τις άγνωστες παραμέτρους και την εύρεση μιας βελτιστοποιημένης τροχιάς διέγερσης του ρομπότ που να καθιστά εφικτό τον υπολογισμό της ταχύτητας και της επιτάχυνσης με αναλυτικό τρόπο. Η συγκεκριμένη τροχιά υλοποιείται στον ρομποτικό βραχίονα Katana 450 και λαμβάνονται δεδομένα για την γωνιακή θέση και την ροπή. Στο επόμενο βήμα υπολογίζονται οι άγνωστες παράμετροι χρησιμοποιώντας την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και τέλος πραγματοποιείται το πείραμα της επαλήθευσης, κατά το οποίο φαίνεται ότι η αναγνώριση ήταν επιτυχημένη.

Σε κάθε βήμα σχεδόν της διαδικασίας εφαρμόζονται διαφορετικές μέθοδοι που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Έτσι κατά το πείραμα της επαλήθευσης γίνεται να συγκριθούν τα αποτελέσματα τους και να επιλεγεί η καλύτερη δυνατή. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται παρακάτω.

- Κατά την παραγωγή του δυναμικού μοντέλου, βρέθηκαν από την βιβλιογραφία δύο διαφορετικοί τρόποι. Τελικά επιλέγεται ο δεύτερος [25] για τους 2 πρώτους άξονες και ο πρώτος [41] για τον τρίτο άξονα, καθώς παρουσιάζουν μικρότερο σφάλμα πρόβλεψης της ροπής.
- Δοκιμάστηκαν δύο μέθοδοι για την μείωση του θορύβου της μετρούμενης ροπής, οι οποίοι παρουσίασαν κοινά αποτελέσματα.
- Το σφάλμα πρόβλεψης ροπής μειώθηκε αισθητά χρησιμοποιώντας, στο στάδιο της αναγνώρισης, αναλυτικό τρόπο για την εύρεση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης, χάριν στις σειρές Fourier.
- Χρησιμοποιώντας PTP (point to point) τροχιά διέγερσης στο στάδιο της αναγνώρισης επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την βελτιστοποιημένη τροχιά που βρέθηκε. Αυτό οφείλεται στο ότι ο controller του ρομπότ δεν καταφέρνει να ακολουθήσει πιστά την επιθυμητή τροχιά, καθώς δεν επιτυγχάνονται οι ανώτατες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης που εγγυάται ο κατασκευαστής. Αυτές φάνηκε ότι επιτυγχάνονται μόνο με PTP κινήσεις. Έτσι επαληθεύονται οι ερευνητές που θεωρούν ως προϋπόθεση την τήρηση των μεγίστων ορίων ταχύτητας και επιτάχυνσης για ένα πετυχημένο πείραμα αναγνώρισης.

6.2 Μελλοντικές Επιλογές

6.2.1 Τεχνικά Θέματα

Σε περίπτωση μελλοντικής αναβάθμισης του ρομπότ 2 προβλήματα πρέπει να επιδιορθωθούν. Το πρώτο αφορά την μεγάλη περίοδο χρόνου που απαιτείται για να ληφθούν δεδομένα από το ρομπότ. Έχει παρατηρηθεί, ότι κατά μέσο όρο χρειάζονται 150ms για να σταλούν δεδομένα κίνησης για τους έξι άξονες και ροπής για τον ένα κινητήρα ενώ σύγχρονα συστήματα που υπάρχουν στην αγορά επιτυγχάνουν περιόδους της τάξης των 10ms. Το δεύτερο πρόβλημα αφορά τον τρόπο ελέγχου των κινητήρων. Αυτήν τη στιγμή γίνεται μόνο έλεγχος θέσης, ο χρήστης δεν μπορεί να εισάγει επιθυμητή ροπή κάτι που είναι απαραίτητο για την υλοποίηση αλγορίθμων Adaptive Control.

6.2.2 Προτεινόμενες Εργασίες

Σε περίπτωση που οι παραπάνω προϋποθέσεις υλοποιηθούν τότε θα ήταν δυνατό το Katana να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

1. Χρήση αλγορίθμων adaptive control για την υλοποίηση διάφορων τροχιών. Έτσι θα μπορούσε να γίνει σύγκριση του σφάλματος θέσης με τον απλό PD ελεγκτή που χρησιμοποιείται τώρα.
2. Αλληλεπίδραση ρομπότ με περιβάλλον ή με άνθρωπο χρησιμοποιώντας κάποιον αισθητήρα δύναμης και admittance control. Έτσι θα ήταν δυνατή η αντίληψη της δύναμης αντίδρασης και θα μπορούσε να αλλάζει το επιθυμητό πλαίσιο του τελικού στοιχείου δράσης ανάλογα με αυτή.
3. Χρήση απτικών (haptic) συσκευών για τον έλεγχο της θέσης του ρομπότ υπολογίζοντας την ροπή των κινητήρων και χρήση του αισθητήρα δύναμης για εφαρμογή ανάδρασης δύναμης. Έτσι ο χειριστής θα μπορεί να αντιλαμβάνεται αν υπάρχουν εμπόδια στο δρόμο του τελικού εργαλείου δράσης.

Βιβλιογραφία

- [1] G. Antonelli, F. Caccavale, and P. Chiacchio. A systematic procedure for the identification of dynamic parameters of robot manipulators. *Robotica*, 17:427–435, 1999.
- [2] B. Armstrong. On finding exciting trajectories for identification experiments involving systems with nonlinear dynamics. *The International Journal of Robotics Research*, 8:28–48, 1989.
- [3] B. Armstrong-Hélouvy, P. Dupont, and C. Canudas de Wit. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction. *Automatica*, 30(7):1083–1138, 1994.
- [4] C. Atkeson, C. An, and J. Hollerbach. Estimation of inertial parameters of manipulator loads and links. *The International Journal of Robotics Research*, 5(3):101–119, 1986.
- [5] G. Calafiore and M. Indri. Experiment design for robot dynamic calibration. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3303–3309, Leuven, Belgium, 1998.
- [6] C. Canudas de Wit, Siciliano B., and Bastin G. The effects of gear reduction on robot dynamics. In *NASA Conf. on Space Telerobotics*, pages 297–307, Pasadena, CA, 1989.
- [7] P. Canudas de Wit, C. and No \square A. Aubin, and B. Brogliato. Adaptive friction compensation in robot manipulators : Low velocities. *The International Journal of Robotics Research*, 10(3):189–199, 1991.
- [8] J. Chen. The effects of gear reduction on robot dynamics. In *NASA Conf. on Space Telerobotics*, pages 297–307, Pasadena, CA, 1989.
- [9] X. Chenut, J. Samin, J. Swevers, and C. Ganseman. Combining internal and external robot models for improved model parameter estimation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14(5):691–704, 2000.
- [10] M. Daemi and B. Heimann. Identification and compensation of gear friction for modeling of robots. In *11th CISM-IFToMM Symposium on the Theory and Practice of Robots and Manipulators*, pages 89–96, Udine, Italy, 1996.
- [11] M. Daemi and B. Heimann. Separation of friction and rigid body identification for an industrial robot. In *12th CISM-IFToMM Symposium on the Theory and Practice of Robots and Manipulators*, pages 35–42, Paris, France, 1998.
- [12] P. Fisette, B. Rautent, and J.-C. Samin. Minimal dynamic characterization of tree-like multibody systems. *Nonlinear Dynamics*, 9:165–184, 1996.
- [13] M. Gautier and W. Khalil. Identification of the minimum inertial parameters of robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1529–1534, Scottsdale, USA, 1989.
- [14] M. Gautier and W. Khalil. Direct calculation of minimum set of inertial parameters of serial robots. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 6(3):368–373, 1990.

- [15] M. Gautier and W. Khalil. Exciting trajectories for the identification of base inertial parameters of robots. *The International Journal of Robotics Research*, 11:362–375, 1992.
- [16] M. Gautier, W. Khalil, and P. P. Restrepo. Identification of dynamic parameters of a closed loop robot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3045–3050, Nagoya, Japan, 1995.
- [17] M. Gautier and P. Poignet. Extended kalman filtering and weighted least squares dynamic identification of robot. *Control Engineering Practicen*, 9:1361–1372, 2001.
- [18] G. Golub and C. Van Loan. Matrix computations. *The Johns Hopkins University Press*, 1989.
- [19] A. Heim and O. von Stryk. Trajectory optimization of industrial robots with application to computer-aided robotics and robot controllers. *Optimization*, 47:407–420, 2000.
- [20] Rolf Isermann. Modeling, identification and simulation of mechatronic systems. In *14th Triennial World Congress IFAC*, pages 395–404, Beijing, China, 1999.
- [21] Swevers J., Ganseman C., De Schutter J., and Van Brussel H. Experimental robot identification using optimized periodic trajectories. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 10(5):561–577, 1996.
- [22] W. Khalil and E. Dombre. *Modeling, identification and control of robots*. Hermes Penton Ltd, 2002.
- [23] P. Khosla. Categorization of parameters in the dynamic robot model. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 5(3):261–268, 1989.
- [24] P. Khosla and T. Kanade. An algorithm to estimate manipulator dynamics parameters. In *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987.
- [25] Dragan Kostic., Bram de Jager, and Maarten Steinbuch. Modeling and identification for high-performance robot control: An rrr-robotic arm case study. *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*, 12(6):904–919, 2004.
- [26] K. Kozłowski and P. Dutkiewicz. Experimental identification of robot and load dynamics. In *Triennial World Congress IFAC*, pages 397–402, San Francisco, USA, 1996.
- [27] F. Lange and G. Hirzinger. Learning of a controller for nonrecurring fast movements. *Advanced Robotics*, 1996. Special issue on Behavior and Learning.
- [28] G. Liu, K. Iagnemma, S. Dubowsky, and G. Morel. A base force/torque sensor approach to robot manipulator inertial parameter estimation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3316–3321, Leuven, Belgium, 1998.
- [29] L. Ljung. *System identification: theory for the user*. Prentice Hall Inc, New Jersey, 1987.
- [30] H. Mayeda, K. Yoshida, and K. Osuka. Base parameters of manipulator dynamic models. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 6(3):312–321, 1990.
- [31] J. Nocedal and S. J. Wright. *Numerical Optimization..* Springer, 1999.
- [32] M. Onder Efe and O. Kaynak. A comparative study of soft-computing methodologies in identification of robotic manipulators. *Robotics and Autonomous Systems*, 30(3):221–230, February 2000.
- [33] F. Pfeiffer and J. H Izl. Parameter identification for industrial robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1468–1476, Nagoya, Japan, 1995.

- [34] C. Press´ and M. Gautier. New criteria of exciting trajectories for robot identification. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 907–912, Atlanta,USA, 1993.
- [35] B. Raucent. *Identification des parametres dynamiques des robots manipulateurs*. PhD thesis, Universit´ catholique de Louevain, D´partement de M´canique, Louvain-la-neuve, Belgium, 1990.
- [36] B. Raucent and J.-C. Samin. Minimal parameterization of robot dynamic models. *Mechanics of Structures and Machines*, 22(3):371–396, 1994.
- [37] B. Schafer and A. R. da Silva. Space robotics experiments a for increasing dynamics modelling fidelity. In *In European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2000*, Barcelona, 2000.
- [38] J. Schoukens and R. Pintelon. *Identification of linear systems:a practical guideline to accurate modeling..* Pergamon Press, Oxford, 1991.
- [39] L. Sciavicco and B. Siciliano. *Modeling and Control of Robot Manipulators*. Mc Graw Hill, New Jersey, 1996.
- [40] L. Sciavicco, B. Siciliano, and L. Villani. Lagrange and newton-euler dynamic modelling of a gear-driven rigid robot manipulator with inclusion of motor inertia effects. *Advanced Robotics*, 10:317–334, 1996.
- [41] Lorenzo Sciavicco, Bruno Siciliano, and Luigi Villani. Lagrange and newton-euler dynamic modelling of a gear-driven rigid robot manipulator with inclusion of motor inertia effects. *Advanced Robotics*, 10(3):317–334, 1996.
- [42] S.-Y. Sheu and M. Walker. Basis sets for manipulator inertial parameters. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1517–1522, Scottsdale, USA, 1989.
- [43] J. Swevers, C. Ganseman, D. Bilgin, J. De Schutter, and H. Van Brussel. Optimal robot excitation and identification. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13:730–740, 1997.
- [44] H. West, E. Papadopoulos, S. Dubowsky, and H. Cheah. A method for estimating the mass properties of a manipulator by measuring the reaction moments at its base. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1510–1516, Scottsdale, Arizona, 1989.

