



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ & Α.Ε
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**Σχεδιασμός, Υλοποίηση και Έλεγχος Ρομποτικών Βραχιόνων για
Ρομπότ Διαστημικού Εξομοιωτή**

Γεώργιος Παπαστεργίου

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2015

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και τον έλεγχο των ρομποτικών βραχιόνων του δεύτερου ρομπότ του επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή, που αναπτύσσεται στα πλαίσια του ερευνητικού έργου του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ο διαστημικός εξομοιωτής αποτελείται από δύο παρόμοια, αυτόνομα ρομπότ, τα οποία δύνανται να αιωρούνται επί της λείας επιφάνειας τραπέζης γρανίτη, με χρήση αεροεδράνων. Κατ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται άνευ τριβής κίνηση των ρομπότ στο επίπεδο, η οποία εξομοιώνει τις συνθήκες έλλειψης βαρύτητας του διαστήματος. Τα ρομπότ μπορούν να κινούνται ελεγχόμενα καθώς διαθέτουν έξι προωθητήρες και έναν σφόνδυλο αντίδρασης έκαστο, και οι θέσεις τους στο επίπεδο είναι γνωστές μέσω συστημάτων παρακολούθησης που βασίζονται σε μία κάμερα και οπτικούς αισθητήρες. Ο διαστημικός εξομοιωτής επιτρέπει την πειραματική επαλήθευση αλγορίθμων ελέγχου, δυναμικών μοντέλων, μεθόδων πρόσδεσης και συνεργασίας των ρομπότ, καθώς και την επαλήθευση της λειτουργικότητας εξαρτημάτων.

Οι ρομποτικοί βραχίονες που σχεδιάστηκαν για το δεύτερο ρομπότ διαθέτουν δύο βαθμούς ελευθερίας με δύο περιστροφικές αρθρώσεις έκαστος, που μπορούν να περιστρέφονται γύρω από άξονες κάθετους στο οριζόντιο επίπεδο. Είναι προσδεμένοι σε αποσπώμενη από το κυρίως σώμα του ρομπότ βάση και έχουν δυνατότητα πλήρους αναδίπλωσης. Τα άκρα των βραχιόνων είναι κατάλληλα σχεδιασμένα για τοποθέτηση διαφόρων εργαλείων ή/και αισθητήρων δύναμης και ροπής. Έκαστος βραχίονας κινείται χάριν δύο DC ηλεκτροκινητήρων μετά πλανητικών μειωτήρων, οι οποίοι προκρίθηκε να τοποθετηθούν αμφότεροι στη βάση των βραχιόνων, για λόγους μείωσης της ροπής αδράνειας και επίτευξης ευνοϊκού κέντρου μάζας. Συνεπώς, απαιτείται σύστημα μετάδοσης για τη δεύτερη άρθρωση κάθε βραχίονα, το οποίο υλοποιείται με ιμάντες χρονισμού και οδοντωτούς τροχούς. Η κατασκευή των δύο βραχιόνων και της βάσης αποτελείται από 105 εξαρτήματα, 34 εκ των οποίων προμηθεύτηκαν από την αγορά – τα υπόλοιπα κατασκευάστηκαν εξολοκλήρου στο εργαστήριο.

Για τις ανάγκες προσομοίωσης αναπτύχθηκε το πλήρες δυναμικό μοντέλο του δεύτερου ρομπότ, κατά τη μέθοδο Euler – Lagrange. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε ένας νόμος μη γραμμικού PD ελέγχου που αξιοποιεί το μοντέλο του ρομπότ και υπολογίστηκαν οι απαιτούμενες δυνάμεις και ροπές των επενεργητών του συστήματος. Επίσης σχεδιάστηκαν τροχιές στο Καρτεσιανό επίπεδο και στο πεδίο

των αρθρώσεων, κατάλληλες για κίνηση του τελικού σημείου δράσης κάθε βραχίονα σε ευθεία γραμμή και για περιστροφή των αρθρώσεων του, αντίστοιχα. Τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη ενός μοντέλου για προσομοιώσεις σε Simulink και ενός ισοδύναμου αλγορίθμου για έλεγχο πραγματικού χρόνου σε Simulink Real-Time.

Εν τέλει, διεξήχθησαν πειράματα και διαπιστώθηκε η ορθή λειτουργία των ρομποτικών βραχιόνων και του αλγορίθμου ελέγχου. Επιπλέον, διαπιστώθηκε η συμβατότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων των πειραμάτων και των προσομοιώσεων.

Abstract

This thesis deals with the design, implementation and control of robotic manipulators for the second robot of the planar space emulator that is developed within the framework of the research work of the Control Systems Lab, of the National Technical University of Athens.

The space emulator consists of two similar, autonomous robots, which can hover over the smooth surface of a granite table, by using air bearings. In this way, the frictionless motion of the robots on a plane is achieved, which emulates the zero gravity conditions in space. The robots can move under control since they are equipped with six thrusters and a reaction wheel each and their locations on the plane are known through monitoring systems based on a camera and optical sensors. The space emulator enables the experimental verification of control algorithms, dynamic models, docking and cooperation procedures, as well as verification of component functionality.

The robotic manipulators that were designed for the second robot have two degrees of freedom with two rotary joints each that can rotate about axes perpendicular to the horizontal plane. They are mounted on a chassis that is detachable from the main body of the robot and are capable of folding fully. The ends of the manipulators are properly designed for mounting various tools and/or force and torque sensors. Each manipulator is powered by two DC electric motors with planetary gearboxes. It was deemed best that both of them be placed on the chassis of the manipulators, in order to achieve reduced moment of inertia and a favorable center of mass location. Therefore, a transmission system is required for each manipulator's second joint, which is implemented via timing belts and pulleys. The assembly of the two manipulators and the chassis comprises of 105 parts, 34 of which were supplied by the market; the rest were manufactured in-house.

For simulation purposes, the second robot's full dynamic model was developed, based on the Euler – Lagrange method. Subsequently, a non-linear model based PD control law was applied and the required actuators' forces and torques were calculated. Furthermore, trajectory planning was implemented in the Cartesian plane and the joint space, suitable for straight line movement of the end effector of each manipulator and for its joints' rotation, respectively. All of the above were utilized for the development of a simulation model in Simulink and the development of an equivalent algorithm for real time control in Simulink Real-Time.

Finally, experiments were conducted which verified that the robotic manipulators and the control algorithm operate properly. In addition, the compatibility between the results of the experiments and the simulations was verified.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω δεόντως τον επιβλέποντα της εργασίας μου καθηγητή κ. Ε. Παπαδόπουλο για την άψογη επικοινωνία, τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση που μου προσέφερε. Ομοίως, τον υποψήφιο διδάκτορα Ι. Παρασκευά για τη συνεχή υποστήριξη και την εποικοδομητική συνεργασία και τον διδάκτορα Γ. Ρεκλείτη για τη συνδρομή του σε κάποια στάδια της εργασίας μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον κ. Ν. Γαλάνη για τη βοήθεια και την προθυμία του να μου μεταδώσει ένα μικρό μέρος των γνώσεών του στον τομέα των κατεργασιών. Τέλος, ευχαριστώ τα μέλη του εργαστηρίου για το φιλικό κλίμα συνεργασίας και τη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Πρόλογος

Η αλματώδης τεχνολογική ανάπτυξη των τελευταίων ετών επέτρεψε στην ανθρωπότητα να ξεπεράσει τα γήινα σύνορα και να εδραιώσει δραστηριότητα στο διάστημα. Καθημερινά σχεδόν πραγματοποιούνται διαστημικές αποστολές ερευνητικού, εμπορικού ή στρατιωτικού ενδιαφέροντος, ωστόσο το διάστημα παραμένει αφιλόξενος και επικίνδυνος προορισμός. Γι' αυτό το λόγο, οι περισσότερες αποστολές είναι μη επανδρωμένες, ευρέως δε χρησιμοποιείται η ρομποτική τεχνολογία.

Η ανάπτυξη ρομπότ για διαστημικές εφαρμογές παρουσιάζει μεγάλες και ποικίλες προκλήσεις, διότι στο περιβάλλον δράσης τους επικρατούν συνθήκες ακραίων θερμοκρασιών, υψηλής ακτινοβολίας και έλλειψης βαρύτητας. Η έλλειψη βαρύτητας συνεπάγεται αυξημένη πολυπλοκότητα κατά τη θεωρητική μελέτη αυτόνομων ρομπότ, ιδιαίτερος όταν απαιτείται αλληλεπίδρασή τους με άλλα σώματα. Επιπλέον, η πειραματική μελέτη των ρομπότ στο διάστημα είναι ασύμφορη, πράγμα που οδήγησε στην ανάγκη εξομοίωσης των συνθηκών έλλειψης βαρύτητας στο περιβάλλον της γης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ποικίλων μεθόδων, όπως: παραβολικές πτήσεις, υποβρύχια πειράματα, συστήματα ανάρτησης, επίπεδοι εξομοιωτές. Η τελευταία μέθοδος είναι η πλέον διαδεδομένη και ευέλικτη, εφαρμόζεται δε και στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ο επίπεδος διαστημικός εξομοιωτής του εργαστηρίου αποτελείται από δύο ρομπότ που δύνανται να κινούνται αυτόνομα, οριακά αιωρούμενα επί της επιφάνειας μίας επίπεδης και λείας τράπεζας γρανίτη. Κατ' αυτό τον τρόπο, εξομοιώνει τις συνθήκες έλλειψης βαρύτητας σε δύο διαστάσεις με την άνευ τριβής κίνηση των ρομπότ επί της επίπεδης επιφάνειας. Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η συμβολή στην ανάπτυξη του εν λόγω εξομοιωτή, με τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και τον έλεγχο ρομποτικών βραχιόνων για το δεύτερο ρομπότ.

Ρομποτικοί βραχίονες ήδη χρησιμοποιούνται για πολλές εργασίες στον ISS¹ και σε αποστολές διαστημικών λεωφορείων· παράλληλα, διεξάγεται συνεχής έρευνα με σκοπό την περαιτέρω αξιοποίηση βραχιόνων σε διαστημικά ρομπότ, καθώς προσφέρουν πολλές δυνατότητες με μεγάλη ευελιξία. Ο ISS διαθέτει το σύστημα

¹ International Space Station – Διεθνής Διαστημικός Σταθμός

ρομποτικών βραχιόνων Mobile Servicing System [34], που περιλαμβάνει τα συστήματα βραχιόνων Canadarm2 [20], [44] και Dextre [41], [6], και το European Robotic Arm [7]. Χρησιμοποιούνται για εργασίες συναρμολόγησης, εγκατάστασης και συντήρησης ηλιακών πάνελ και άλλου εξοπλισμού, εξωτερικής οπτικής επιθεώρησης του σταθμού, χειρισμού και τοποθέτησης φορτίων και υποστήριξης των αστροναυτών σε εργασίες τους στο εξωτερικό του σταθμού². Επιπλέον, ο ISS διαθέτει τον ρομποτικό βραχίονα JEMRMS³ [5] που αποτελεί μέρος του συστήματος Kibo [33] και προορίζεται για έρευνα επιστημονικού περιεχομένου.

Σε αποστολές διαστημικών λεωφορείων το συνηθέστερο σύστημα ρομποτικού βραχίονα είναι το SRMS⁴, γνωστό και ως Canadarm [8], το οποίο χρησιμοποιείται για σύλληψη, οδήγηση και τοποθέτηση φορτίων. Επίσης, ρομποτικοί βραχίονες αναπτύσσονται και για συστήματα μικρότερων διαστάσεων, όπως το Orbital Express [3] που διαθέτει τον βραχίονα OEDMS⁵. Το εν λόγω σύστημα χρησιμοποιήθηκε σε πειράματα για on-orbit servicing [22]. Σκοπός του βραχίονα OEDMS ήταν η σύλληψη ενός μικρού δορυφόρου και η μεταφορά φορτίων σε αυτόν.

Στη μελέτη και ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων συμβάλλουν οι επίπεδοι διαστημικοί εξομοιωτές, όπως αυτός του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου που αφορά η παρούσα εργασία.

² space walks

³ Japanese Experiment Module Remote Manipulator System

⁴ Shuttle Remote Manipulator System

⁵ Orbital Express Demonstration Manipulator System

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| Περίληψη | 3 |
| Abstract | 5 |
| Ευχαριστίες | 7 |
| Πρόλογος..... | 8 |
| Περιεχόμενα | 10 |
| Κατάλογος Σχημάτων..... | 13 |
| Πίνακας Συμβόλων | 16 |
| 1 Εισαγωγή | 21 |
| 1.1 Σκοπός της εργασίας..... | 21 |
| 1.2 Περιγραφή του επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή του εργαστηρίου | 22 |
| 1.2.1 Τράπεζα γρανίτη | 22 |
| 1.2.2 Σύστημα παρακολούθησης της στάσης των ρομπότ | 23 |
| 1.2.3 Ρομπότ | 24 |
| 1.3 Σχετική έρευνα..... | 28 |
| 1.4 Δομή της εργασίας | 32 |
| 2 Σχεδιασμός και κατασκευή των ρομποτικών βραχιόνων..... | 33 |
| 2.1 Προσδιορισμός γενικών απαιτήσεων | 34 |
| 2.2 Επιλογή γενικής κατασκευαστικής λύσης/υλοποίησης | 35 |
| 2.2.1 Κριτήρια αξιολόγησης συστημάτων μετάδοσης..... | 35 |
| 2.2.2 Το κινητήριο σύστημα των ρομποτικών βραχιόνων | 37 |
| 2.2.3 Άλλα συστήματα κίνησης/μετάδοσης | 39 |
| 2.2.4 Συστήματα μετάδοσης για τη δεύτερη άρθρωση..... | 43 |
| 2.3 Αρχικό σχέδιο λύσης | 47 |
| 2.3.1 Βασικός σκελετός των συνδέσμων των ρομποτικών βραχιόνων | 48 |
| 2.3.2 Σύστημα πρόσδεσης βραχιόνων στο κυρίως σώμα του ρομπότ | 49 |
| 2.3.3 Σύστημα μετάδοσης | 51 |
| 2.4 Τελικό σχέδιο και προσδιορισμός προδιαγραφών εξαρτημάτων | 54 |
| 2.4.1 Επιλογή ιμάντων και συνεργαζόμενων οδοντωτών τυμπάνων | 55 |
| 2.4.2 Προσδιορισμός διαστάσεων των συνδέσμων | 58 |
| 2.4.3 Συστήματα προέντασης ιμάντων..... | 60 |
| 2.4.4 Εδράσεις αξόνων των αρθρώσεων | 64 |
| 2.5 Κατασκευή εξαρτημάτων | 65 |
| 2.6 Συναρμολόγηση | 67 |
| 3 Δυναμική μοντελοποίηση του ρομπότ..... | 71 |
| 3.1 Μέθοδος Euler – Lagrange..... | 72 |
| 3.2 Δυναμικό μοντέλο του ρομπότ..... | 73 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.1 Παραδοχές | 73 |
| 3.2.2 Ορισμός βασικών μεγεθών | 75 |
| 3.2.3 Προσδιορισμός των βαθμών ελευθερίας του συστήματος | 77 |
| 3.2.4 Επιλογή κατάλληλων γενικευμένων συντεταγμένων | 78 |
| 3.2.5 Υπολογισμός των όρων T και V | 79 |
| 3.2.6 Υπολογισμός του αριστερού μέλους της εξίσωσης Lagrange και πινακοποίηση..... | 82 |
| 3.2.7 Εύρεση των γενικευμένων δυνάμεων και ροπών..... | 83 |
| 4 Αυτόματος έλεγχος και σχεδιασμός τροχιάς | 88 |
| 4.1 Νόμος Ελέγχου | 88 |
| 4.2 Εντολές ελέγχου επενεργητών | 91 |
| 4.3 Σχεδιασμός τροχιών για ρομποτικό βραχίονα | 95 |
| 4.3.1 Γενικά | 96 |
| 4.3.2 Τροχιά στο χώρο των αρθρώσεων με πολυώνυμο τρίτου βαθμού | 97 |
| 4.3.3 Τροχιά ευθύγραμμης κίνησης του τελικού σημείου δράσης στον Καρτεσιανό χώρο | 98 |
| 4.3.4 Προσπελάσιμος χώρος εργασίας..... | 103 |
| 5 Λογισμικό | 106 |
| 5.1 Περί Simulink και Simulink Real-Time | 106 |
| 5.2 Καλές πρακτικές για Simulink και Simulink Real-Time | 110 |
| 5.3 Μοντέλο προσομοίωσης σε Simulink και πρόγραμμα ελέγχου RT.... | 113 |
| 5.3.1 UDP Receive..... | 116 |
| 5.3.2 Command Parser | 117 |
| 5.3.3 Trajectory Planning | 119 |
| 5.3.4 Model based PD controller | 120 |
| 5.3.5 Actuators' Control και σύνδεση με Servo Drive..... | 122 |
| 5.3.6 Plant Model | 127 |
| 5.3.7 Sensors' Feedback..... | 128 |
| 5.4 Γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI)..... | 130 |
| 6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων και πειραμάτων | 132 |
| 6.1 Έλεγχος ενός βραχίονα με σταθερό το σώμα του ρομπότ | 133 |
| 6.1.1 Στροφή της πρώτης άρθρωσης με σταθερή τη δεύτερη..... | 133 |
| 6.1.2 Στροφή της δεύτερης άρθρωσης με σταθερή την πρώτη..... | 138 |
| 6.1.3 Ίση και αντίρροπη στροφή των δύο αρθρώσεων | 142 |
| 6.1.4 Ίση και ομόρροπη στροφή των δύο αρθρώσεων | 146 |
| 6.1.5 Ευθύγραμμη, οριζόντια κίνηση του τελικού σημείου δράσης | 150 |
| 6.1.6 Ευθύγραμμη, κάθετη κίνηση του τελικού σημείου δράσης..... | 154 |
| 6.1.7 Ευθύγραμμη, διαγώνια κίνηση του τελικού σημείου δράσης..... | 158 |
| 6.2 Έλεγχος ενός βραχίονα με το σώμα του ρομπότ σε κίνηση | 161 |
| 6.2.1 Μέθοδος διεξαγωγής του πειράματος και περιορισμοί..... | 162 |
| 6.2.2 Αποτελέσματα του πειράματος | 164 |
| 7 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία | 170 |
| 7.1 Συμπεράσματα | 170 |

| | |
|---|------------|
| 7.2 Μελλοντική εργασία..... | 172 |
| Βιβλιογραφία..... | 173 |
| Παράρτημα | 177 |
| A. Εγχειρίδια προδιαγραφών Hardware..... | 177 |
| B. Κατάλογος αγορών. | 184 |
| Γ. Πίνακες M , C και J_{act} της εξίσωσης Lagrange..... | 185 |
| Δ. Τιμές παραμέτρων στα πειράματα..... | 191 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | | |
|-------------|--|----|
| Σχήμα 1-1. | Τράπεζα γρανίτη. | 23 |
| Σχήμα 1-2. | Τα δύο ρομπότ επί της τραπέζης γρανίτη | 24 |
| Σχήμα 1-3. | Ο σκελετός του δεύτερου ρομπότ με μία φιάλη CO ₂ | 25 |
| Σχήμα 1-4. | Ζεύγος προωθητήρων με αντίρροπα ακροφύσια. | 25 |
| Σχήμα 1-5. | Σφόνδυλος αντίδρασης (reaction wheel). | 26 |
| Σχήμα 1-6. | Οι ρομποτικοί βραχίονες πρώτου ρομπότ. | 27 |
| Σχήμα 1-7. | Free Flyers, Stanford University. | 29 |
| Σχήμα 1-8. | SPHERES, επίπεδος διαστημικός εξομοιωτής. | 30 |
| Σχήμα 1-9. | SPHERES, ISS. | 31 |
| Σχήμα 1-10. | SPHERES, επίπεδος διαστημικός εξομοιωτής. | 31 |
| Σχήμα 2-1. | Διαμόρφωση με 2 ρομπότ. Στα αριστερά το σταθερό ρομπότ | 39 |
| Σχήμα 2-2. | Μετάδοση στη δεύτερη άρθρωση μέσω Right angle bevel | 41 |
| Σχήμα 2-3. | Κατακόρυφη τοποθέτηση και πρόσδεση κινητήριου | 41 |
| Σχήμα 2-4. | Σύγκριση μεταξύ Spiroid και Bevel gear. | 42 |
| Σχήμα 2-5. | Μειωτήρας τύπου Harmonic Drive. | 42 |
| Σχήμα 2-6. | Υλοποίηση ρομποτικού βραχίονα με ράβδους ώθησης-έλξης. ... | 44 |
| Σχήμα 2-7. | Μετάδοση με ελασματοταινία. | 45 |
| Σχήμα 2-8. | Εύκαμπτοι άξονες. | 46 |
| Σχήμα 2-9. | Μορφή σκελετού των συνδέσμων των βραχιόνων σε κάτοψη | 48 |
| Σχήμα 2-10. | Εξάρτημα προσαρμογής μήκους στο άκρο | 49 |
| Σχήμα 2-11. | Σύστημα πρόσδεσης βραχιόνων στο κυρίως σώμα. | 50 |
| Σχήμα 2-12. | Η βάση πρόσδεσης των βραχιόνων σε σύνδεση με το σασί. | 50 |
| Σχήμα 2-13. | Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται κατά σειρά | 51 |
| Σχήμα 2-14. | Φαίνεται ο πρώτος σύνδεσμος ενός βραχίονα | 52 |
| Σχήμα 2-15. | Φαίνεται το κινητήριο σύστημα που συνδέεται μέσω ιμάντων | 52 |
| Σχήμα 2-16. | Το τεμάχιο που παρουσιάζεται ημιδιαφανές συνδέει τον άξονα.. | 53 |
| Σχήμα 2-17. | Τα άκρα των ευθύγραμμων τμημάτων (2) και (3) ταυτίζονται | 53 |
| Σχήμα 2-18. | Ο κύριος και ο δευτερεύον άξονας της πρώτης άρθρωσης. | 54 |
| Σχήμα 2-19. | Είδη οδοντωτών ιμάντων. | 56 |
| Σχήμα 2-20. | Η χαρακτηριστική λειτουργία των κινητήρων. | 57 |
| Σχήμα 2-21. | Οδοντωτό τύμπανο σε συναρμογή ακτινικού κοχλία με άξονα. ... | 58 |
| Σχήμα 2-22. | Συνεργασία των δύο συνδέσμων ενός βραχίονα | 59 |
| Σχήμα 2-23. | Άνοψη της βάσης πρόσδεσης των βραχιόνων | 61 |
| Σχήμα 2-24. | Σύστημα προέντασης στο κάτω μέρος της βάσης πρόσδεσης ... | 61 |
| Σχήμα 2-25. | Σύστημα προέντασης στη δεύτερη άρθρωση. | 62 |
| Σχήμα 2-26. | Οδήγηση του ιμάντα εντός του πλαισίου του συνδέσμου. | 63 |
| Σχήμα 2-27. | Τα δύο τύμπανα οδήγησης του ιμάντα τονισμένα | 63 |
| Σχήμα 2-28. | Πρώτη άρθρωση σε τομή. Τονισμένα τα κουζινέτα. | 64 |
| Σχήμα 2-29. | Δεύτερη άρθρωση σε τομή. Τονισμένα τα κουζινέτα. | 65 |
| Σχήμα 2-30. | Άποψη του ρομπότ με έναν βραχίονα. | 68 |
| Σχήμα 2-31. | Η πρώτη άρθρωση ενός βραχίονα. Το συνδετικό εξάρτημα | 68 |
| Σχήμα 2-32. | Η δεύτερη άρθρωση ενός βραχίονα. Το συνδετικό εξάρτημα | 69 |
| Σχήμα 2-33. | Εξωτερική άποψη της δεύτερης άρθρωσης ενός βραχίονα | 69 |
| Σχήμα 2-34. | Εσωτερική άποψη της δεύτερης άρθρωσης ενός βραχίονα | 70 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 2-35. Άνοψη της βάσης πρόσδεσης των βραχιόνων | 70 |
| Σχήμα 3-1. Ορισμός βασικών μεγεθών | 77 |
| Σχήμα 3-2. Επιλογή γενικευμένων συντεταγμένων | 79 |
| Σχήμα 3-3. Δυνάμεις και ροπές επενεργητών. | 83 |
| Σχήμα 3-4. Ορισμός γενικευμένων δυνάμεων και ροπών. | 84 |
| Σχήμα 4-1. Δομικό διάγραμμα PD ελέγχου δυνάμεων και ροπών..... | 89 |
| Σχήμα 4-2. Παράδειγμα τροχιάς μεταβλητών αρθρώσεων | 96 |
| Σχήμα 4-3. Παράδειγμα πορείας στον χώρο των αρθρώσεων | 96 |
| Σχήμα 4-4. Δομικό διάγραμμα – Σύνδεση τροχιάς σε έλεγχο. | 97 |
| Σχήμα 4-5. Δομικό διάγραμμα – Σύνδεση τροχιάς Καρτεσιανού χώρου | 99 |
| Σχήμα 4-6. Οι τροχιές x_e , y_e και η πορεία στον Καρτεσιανό χώρο. | 100 |
| Σχήμα 4-7. Αντίστροφη κινηματική σε βραχίονα δύο αρθρώσεων | 101 |
| Σχήμα 4-8. Elbow up/down configurations..... | 102 |
| Σχήμα 4-9. Προσπελάσιμος χώρος εργασίας | 103 |
| Σχήμα 4-10. Προσπελάσιμος χώρος εργασίας για τους δύο βραχίονες | 104 |
| Σχήμα 5-1. Περιβάλλον διεπαφής Simulink | 107 |
| Σχήμα 5-2. Μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας σε δίκτυο | 107 |
| Σχήμα 5-3. Διαμόρφωση συστήματος για δοκιμές με Simulink Real-Time .. | 108 |
| Σχήμα 5-4. Software-In-the-Loop..... | 109 |
| Σχήμα 5-5. Hardware-In-the-Loop | 109 |
| Σχήμα 5-6. Το πολύπλοκο γραφικό διάγραμμα στα αριστερά | 110 |
| Σχήμα 5-7. Υποσυστήματα τύπου “Triggered” και “Enabled” | 113 |
| Σχήμα 5-8. Μοντέλο προσομοίωσης σε Simulink. | 114 |
| Σχήμα 5-9. Πρόγραμμα Ελέγχου για Simulink Real-Time | 115 |
| Σχήμα 5-10. UDP Receive..... | 116 |
| Σχήμα 5-11. Απευθείας εισαγωγή εντολής στο μπλοκ “Command”..... | 117 |
| Σχήμα 5-12. Command Parser. | 118 |
| Σχήμα 5-13. Υποσύστημα “Trajectory Planning” | 120 |
| Σχήμα 5-14. Υποσύστημα “Model based PD controller”..... | 122 |
| Σχήμα 5-15. Actuators’ Control..... | 123 |
| Σχήμα 5-16. Υποσύστημα “Plant Model” | 127 |
| Σχήμα 5-17. Sensors’ Feedback..... | 128 |
| Σχήμα 5-18. Encoder Reader. | 130 |
| Σχήμα 5-19. Περιβάλλον GUI. | 131 |
| Σχήμα 6-1. Αποτελέσματα για την πρώτη άρθρωση | 134 |
| Σχήμα 6-2. Αποτελέσματα για τη δεύτερη άρθρωση | 135 |
| Σχήμα 6-3. Αποτελέσματα ζήτησης ροπής των κινητήρων..... | 136 |
| Σχήμα 6-4. Μετάβαση της απόκρισης σε μόνιμη κατάσταση..... | 137 |
| Σχήμα 6-5. Αποτελέσματα για την πρώτη άρθρωση | 139 |
| Σχήμα 6-6. Αποτελέσματα για τη δεύτερη άρθρωση | 140 |
| Σχήμα 6-7. Αποτελέσματα ζήτησης ροπής των κινητήρων..... | 141 |
| Σχήμα 6-8. Αποτελέσματα για την πρώτη άρθρωση | 143 |
| Σχήμα 6-9. Αποτελέσματα για τη δεύτερη άρθρωση | 144 |
| Σχήμα 6-10. Αποτελέσματα ζήτησης ροπής των κινητήρων..... | 145 |
| Σχήμα 6-11. Αποτελέσματα για την πρώτη άρθρωση | 147 |
| Σχήμα 6-12. Αποτελέσματα για τη δεύτερη άρθρωση | 148 |
| Σχήμα 6-13. Αποτελέσματα ζήτησης ροπής των κινητήρων..... | 149 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 6-14. Αποτελέσματα για τη θέση του τελικού σημείου δράσης | 150 |
| Σχήμα 6-15. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα x_e της θέσης..... | 151 |
| Σχήμα 6-16. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα y_e της θέσης | 152 |
| Σχήμα 6-17. Το μέτρο του σφάλματος θέσης του τελικού σημείου δράσης ... | 153 |
| Σχήμα 6-18. Αποτελέσματα για τη θέση του τελικού σημείου δράσης | 155 |
| Σχήμα 6-19. Το μέτρο του σφάλματος θέσης του τελικού σημείου δράσης ... | 155 |
| Σχήμα 6-20. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα x_e της θέσης..... | 156 |
| Σχήμα 6-21. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα y_e της θέσης | 157 |
| Σχήμα 6-22. Αποτελέσματα για τη θέση του τελικού σημείου δράσης..... | 158 |
| Σχήμα 6-23. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα x_e της θέσης..... | 159 |
| Σχήμα 6-24. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα y_e της θέσης | 160 |
| Σχήμα 6-25. Το μέτρο του σφάλματος θέσης του τελικού σημείου δράσης ... | 161 |
| Σχήμα 6-26. Υποσύστημα “Sensors' Feedback” | 164 |
| Σχήμα 6-27. Γραμμική παρεμβολή | 164 |
| Σχήμα 6-28. Η κίνηση του σώματος του ρομπότ | 165 |
| Σχήμα 6-29. Τα σφάλματα του τελικού σημείου δράσης..... | 166 |
| Σχήμα 6-30. Η ζήτηση ροπής από τους κινητήρες. | 167 |
| Σχήμα 6-31. Αποτελέσματα για την πρώτη άρθρωση | 167 |
| Σχήμα 6-32. Αποτελέσματα για τη δεύτερη άρθρωση | 168 |

Πίνακας Συμβόλων

| | | |
|--------------------|---|--|
| τ_{ma} | → | Ροπή στην έξοδο των κινητήρων των βραχιόνων. |
| τ_{ma}^{\max} | → | Μέγιστη ροπή κινητήρων βραχιόνων. |
| n | → | Λόγος μείωσης πλανητικών μειωτήρων. |
| η | → | Βαθμός απόδοσης πλανητικών μειωτήρων. |
| τ_g^{\max} | → | Μέγιστη ροπή εξόδου πλανητικών μειωτήρων. |
| τ_g | → | Ροπή στην έξοδο των πλανητικών μειωτήρων. |
| ω_{ma} | → | Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα βραχίονα. |
| ω_g | → | Ταχύτητα περιστροφής πλανητικού μειωτήρα. |
| L | → | Ο όρος Lagrange. |
| T | → | Η κινητική ενέργεια του συστήματος. |
| V | → | Η δυναμική ενέργεια του συστήματος. |
| Q | → | Το διάνυσμα γενικευμένων δυνάμεων και ροπών. |
| q_j | → | Οι γενικευμένες συντεταγμένες. |
| δW | → | Το δυνατό έργο. |
| δq | → | Οι δυνατές μετατοπίσεις. |
| m_B | → | Η συνολική μάζα του κυρίως σώματος του ρομπότ. |
| I_B | → | Η ροπή αδράνειας του κυρίως σώματος του ρομπότ. |
| a_B | → | Η απόσταση που ορίζει τη θέση του κέντρου μάζας του σώματος του ρομπότ. |
| d_B | → | Η γωνία που ορίζει τη θέση του κέντρου μάζας του σώματος του ρομπότ. |
| d_{Ba} | → | Το ήμισυ της γωνίας μεταξύ της πρώτης άρθρωσης του πρώτου βραχίονα, του κέντρου συμμετρίας του σώματος του ρομπότ και της πρώτης άρθρωσης του δεύτερου βραχίονα. |
| r_1 | → | Η απόσταση μεταξύ του κέντρου συμμετρίας του σώματος του ρομπότ και της πρώτης άρθρωσης. |
| r_2 | → | Η ακτίνα του νοητού κύκλου επί του οποίου είναι συμμετρικά τοποθετημένα τα ζεύγη των προωθητήρων. |
| m_1 | → | Η συνολική μάζα του πρώτου συνδέσμου ενός βραχίονα. |
| m_2 | → | Η συνολική μάζα του δεύτερου συνδέσμου ενός βραχίονα. |
| I_1 | → | Η ροπή αδράνειας του πρώτου συνδέσμου. |
| I_2 | → | Η ροπή αδράνειας του δεύτερου συνδέσμου. |
| a_1 | → | Το μήκος του πρώτου συνδέσμου. |
| a_2 | → | Το μήκος του δεύτερου συνδέσμου. |

- a_{c1} → Η απόσταση μεταξύ κέντρου μάζας του πρώτου συνδέσμου και πρώτης άρθρωσης.
- a_{c2} → Η απόσταση μεταξύ κέντρου μάζας του δεύτερου συνδέσμου και δεύτερης άρθρωσης.
- d_{a1} → Η γωνία που ορίζει τη θέση του κέντρου μάζας του πρώτου συνδέσμου.
- d_{a2} → Η γωνία που ορίζει τη θέση του κέντρου μάζας του δεύτερου συνδέσμου.
- I_{ma} → Η ροπή αδράνειας του δρομέα κάθε κινητήρα.
- I_t → Η ροπή αδράνειας του δευτερεύοντος άξονα της πρώτης άρθρωσης.
- x → Η γενικευμένη κατά Χ συντεταγμένη θέσης του κέντρου μάζας του σώματος του ρομπότ.
- y → Η γενικευμένη κατά Υ συντεταγμένη θέσης του κέντρου μάζας του σώματος του ρομπότ.
- θ → Η γενικευμένη συντεταγμένη περιστροφής του συστήματος γύρω από τον κεντροβαρικό άξονα Ζ.
- q_{11} → Η γενικευμένη συντεταγμένη σχετικής περιστροφής της πρώτης άρθρωσης του πρώτου βραχίονα.
- q_{12} → Η γενικευμένη συντεταγμένη σχετικής περιστροφής της δεύτερης άρθρωσης του πρώτου βραχίονα.
- q_{21} → Η γενικευμένη συντεταγμένη σχετικής περιστροφής της πρώτης άρθρωσης του δεύτερου βραχίονα.
- q_{22} → Η γενικευμένη συντεταγμένη σχετικής περιστροφής της δεύτερης άρθρωσης του δεύτερου βραχίονα.
- q → Το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης.
- K_B → Η κινητική ενέργεια του σώματος του ρομπότ.
- P_{ij} → Το διανύσματα θέσης των κέντρων μάζας των συνδέσμων.
- K_{aij} → Η κινητική ενέργεια των συνδέσμων.
- θ_{ij} → Η γωνία στροφής των αξόνων των κινητήρων των βραχιόνων.
- K_{mai} → Η κινητική ενέργεια των δρομέων των κινητήρων των βραχιόνων.
- K_{ii} → Η κινητική ενέργεια του δευτερεύοντος άξονα της πρώτης άρθρωσης.
→ Ο πίνακας μάζας-αδράνειας.
→ Ο πίνακας μη γραμμικών όρων.
- f_i → Οι δυνάμεις που ασκούνται από τους προωθητήρες.
- τ_m → Η ροπή που αποδίδεται από τον κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης.
- n_m → Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του συστήματος του σφονδύλου αντίδρασης και του κινητήρα του.
- τ_{ij} → Η ροπή που ασκείται από τον κινητήρα κάθε βραχίονα.

- Q_{act} → Το διάνυσμα των δυνάμεων και ροπών των επενεργητών.
- Q → Το διάνυσμα γενικευμένων δυνάμεων και ροπών.
- f_x → Η δύναμη που αντιστοιχεί στη γενικευμένη συντεταγμένη x .
- f_y → Η δύναμη που αντιστοιχεί στη γενικευμένη συντεταγμένη y .
- τ_θ → Η ροπή που αντιστοιχεί στη γενικευμένη συντεταγμένη θ .
- $\tau_{q_{ij}}$ → Η ροπή που αντιστοιχεί στη γενικευμένη συντεταγμένη q_{ij} .
- Q^* → Το διάνυσμα που περιλαμβάνει τους όρους: $[f_x^{cm}, f_y^{cm}, \tau_\theta^{cm}, \tau_{ij}^g]^T$.
- f_x^{cm} → Η συνισταμένη των εξωτερικών, μη συντηρητικών δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα του ρομπότ κατά τη διεύθυνση του άξονα των X του απόλυτου συστήματος συντεταγμένων.
- f_y^{cm} → Η συνισταμένη των εξωτερικών, μη συντηρητικών δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα του ρομπότ κατά τη διεύθυνση του άξονα των Y του απόλυτου συστήματος συντεταγμένων.
- τ_θ^{cm} → Η συνισταμένη των ροπών που ασκούνται στο κυρίως σώμα του ρομπότ ως προς τον κεντροβαρικό του άξονα, που οφείλεται στις δυνάμεις λόγω των προωθητήρων και στη ροπή που αποδίδεται προς το σύστημα από τον σφόνδυλο αντίδρασης.
- τ_{ij}^g → Οι ροπές στην έξοδο των μειωτήρων των βραχιόνων.
- Q^{B^*} → Το διάνυσμα που περιλαμβάνει τους όρους: $[f_x^{cm}, f_y^{cm}, \tau_\theta^{cm}]^T$.
- τ_{RW} → Η αποδιδόμενη ροπή από το σύστημα του σφονδύλου αντίδρασης προς το σώμα του ρομπότ.
- Q_{act}^B → Το διάνυσμα που περιέχει τη συνισταμένη κάθε ζεύγους προωθητήρων και το μέγεθος τ_{RW} .
- f_x^{cc} → Οι δυνάμεις των προωθητήρων σε άθροισμα των κατά X συνιστωσών τους στο κέντρο συμμετρίας του σώματος του ρομπότ.
- f_y^{cc} → Οι δυνάμεις των προωθητήρων σε άθροισμα των κατά Y συνιστωσών τους στο κέντρο συμμετρίας του σώματος του ρομπότ.
- τ_θ^{cc} → Η ροπή λόγω προωθητήρων και σφονδύλου αντίδρασης στο κέντρο συμμετρίας του σώματος του ρομπότ.
- A → Πίνακας μετατροπής του Q_{act}^B σε διάνυσμα των f_x^{cc} , f_y^{cc} και τ_θ^{cc} .
- q_{ij}^g → Οι γωνίες στροφής στην έξοδο των μειωτήρων των βραχιόνων.
- $\delta\rho$ → Το διάνυσμα δυνατών μετατοπίσεων που συσχετίζεται με το Q^* .
- Ο πίνακας που μετασχηματίζει το διάνυσμα Q_{act} στο διάνυσμα Q .
- q_d → Το διάνυσμα επιθυμητής θέσης.
- \ddot{q}^* → Το διάνυσμα βοηθητικής επιτάχυνσης.
- K_D → Το διάνυσμα διαφορικών κερδών.

- K_p → Το διάνυσμα αναλογικών κερδών.
 \tilde{M} → Ο πίνακας μάζας-αδράνειας με παραμέτρους από μετρήσεις ή εκτιμήσεις.
 \tilde{C} → Ο πίνακας μη γραμμικών όρων με παραμέτρους από μετρήσεις ή εκτιμήσεις.
 e_j → Το διάνυσμα σφαλμάτων θέσης.
 t_s → Ο χρόνος αποκατάστασης.
 A^+ → Ο ψευδοαντίστροφος του πίνακα A .
 W → Ο Πίνακας συντελεστών βαρύτητας.
 \tilde{Q}_{act}^B → Το τροποποιημένο διάνυσμα Q_{act}^B .
 ω_{ms} → Το όριο ταχύτητας περιστροφής κορεσμού του κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης.
 V_k → Η ονομαστική τάση του κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης.
 R_a → Η αντίσταση του τυλίγματος του τυμπάνου του κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης.
 k_t → Η σταθερά ροπής του κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης.
 ω_m → Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης.
 $\tau_{m,a}$ → Η μέγιστη δυνατή απόδοση ροπής του κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης υπό την ταχύτητα ω_m .
 $\tau_{RW,a}$ → Η πραγματικά αποδιδόμενη ροπή από το σύστημα του σφονδύλου αντίδρασης προς το ρομπότ, σε περίπτωση που ο κινητήρας του είναι σε κορεσμό.
 f_a → Το μέτρο της δύναμης που απαιτείται από κάθε ζεύγος προωθητήρων για να καλυφθεί το έλλειμμα ροπής λόγω κορεσμού του κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης.
 $f_{i,a}$ → Οι διορθωμένες κατά f_a δυνάμεις των ζευγών των προωθητήρων.
 f_{max} → Το άνω όριο ικανότητας απόδοσης δύναμης των προωθητήρων.
 f_{min} → Το κάτω όριο ικανότητας απόδοσης δύναμης των προωθητήρων.
 τ_{lim} → Η μέγιστη επιτρεπόμενη ροπή εξόδου των μειωτήρων των βραχιόνων.
 q_o → Οι αρχικές γωνίες αρθρώσεων βραχίονα.
 q_f → Οι τελικές γωνίες αρθρώσεων βραχίονα.
 t_f → Η χρονική διάρκεια της κίνησης σε τροχιά.
 q_d → Οι ζητούμενες γωνίες αρθρώσεων βραχίονα.
 X_e → Η απόλυτη θέση του τελικού σημείου δράσης στο επίπεδο.
 X_{eo} → Η απόλυτη αρχική θέση του τελικού σημείου δράσης στο επίπεδο.
 X_{ef} → Η απόλυτη τελική του τελικού σημείου δράσης στο επίπεδο.
 t_b → Η χρονική διάρκεια της επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης της κίνησης σε

τροχιά.

- γ_x → Η σταθερά της κατά X επιτάχυνσης.
- γ_y → Η σταθερά της κατά Y επιτάχυνσης.
- X_J → Η διανυσματική θέση της πρώτης άρθρωσης ενός βραχίονα στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων.
- X_d → Διάστημα που εκφράζει τη σχετική θέση του τελικού σημείου δράσης ενός βραχίονα ως προς τη θέση της πρώτης άρθρωσής του.
- i_d → Το απαιτούμενο ρεύμα τροφοδοσίας ενός κινητήρα των βραχιόνων.
- K → Η σταθερά ροπής των κινητήρων των βραχιόνων.
- i_{max} → Το μέγιστο ρεύμα τροφοδοσίας των κινητήρων των βραχιόνων.
- f_{PWM}^{Block} → Ο ρυθμός εκτέλεσης του μπλοκ δημιουργίας του PWM σήματος.
- $f_{control}$ → Ο ρυθμός εκτέλεσης του υποσυστήματος ελέγχου.
- f_{PWM}^{Pulse} → Η συχνότητα των παλμών του PWM σήματος.
- res_{duty} → Η ανάλυση του PWM σήματος.

1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο δηλώνεται ο σκοπός της εργασίας, γίνεται σύντομη περιγραφή του επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή του εργαστηρίου και αναφορά σε άλλα παρόμοια συστήματα.

1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και ο έλεγχος των ρομποτικών βραχιόνων του δεύτερου ρομπότ του επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή που αναπτύσσεται στα πλαίσια του ερευνητικού έργου του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου⁶, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου⁷. Πρόκειται για δύο όμοιους,

⁶ Control Systems Laboratory – CSL

⁷ National Technical University of Athens – NTUA

αποσπώμενους βραχίονες, με δύο βαθμούς ελευθερίας και δύο περιστροφικές αρθρώσεις έκαστος, που μπορούν να περιστρέφονται γύρω από άξονες κάθετους στο οριζόντιο επίπεδο. Επίσης η εργασία περιλαμβάνει την ανάπτυξη του δυναμικού μοντέλου του ρομπότ φέροντος τους βραχίονες και προγράμματος ελέγχου, ώστε να εκτελούνται εργασίες από τους βραχίονες σύμφωνα με τις εντολές του χρήστη του συστήματος.

1.2 Περιγραφή του επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή του εργαστηρίου

Ο διαστημικός εξομοιωτής του εργαστηρίου εξομοιώνει τις συνθήκες έλλειψης βαρύτητας σε δύο διαστάσεις με την άνευ τριβής κίνηση ρομπότ επί επίπεδης επιφάνειας. Αποτελείται από δύο αυτόνομα ρομπότ τα οποία φέρουν φιάλες πεπιεσμένου αερίου και δύνανται να αιωρούνται με χρήση αεροστατικών εδράνων πορώδους γραφίτη⁸ [24] σε ελάχιστο ύψος από την επιφάνεια μίας επίπεδης και λείας τράπεζας γρανίτη (Σχήμα 1-1). Η θέση και ο προσανατολισμός των ρομπότ επί της τραπέζης παρακολουθείται μέσω κάμερας, η οποία βρίσκεται σταθερά τοποθετημένη πάνω από την επιφάνεια της τράπεζας. Η συγκεκριμένη μέθοδος εξομοίωσης διαστημικού περιβάλλοντος είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη, διότι μπορεί να επιτύχει ακριβή εξομοίωση συνθηκών μηδενικής βαρύτητας στο επίπεδο με σχετικά μικρό κόστος. Επιτρέπει εργαστηριακές δοκιμές και πειράματα με ένα ή περισσότερα ρομπότ προς επαλήθευση αλγορίθμων ελέγχου, δυναμικών μοντέλων, λειτουργικότητας εξαρτημάτων και μεθόδων πρόσδεσης [30] και συνεργασίας μεταξύ των ρομπότ. Στη συνέχεια παρουσιάζονται λεπτομερέστερα τα υποσυστήματα που συνθέτουν τον επίπεδο διαστημικό εξομοιωτή του εργαστηρίου.

1.2.1 Τράπεζα γρανίτη

Η τράπεζα από γρανίτη αποτελεί την επίπεδη επιφάνεια διαστάσεων 2.2m x 1.8m επί της οποίας κινούνται τα ρομπότ. Η επιφάνειάς της είναι πολύ μικρής τραχύτητας, μικρότερης των 5μm, ώστε να επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση των τριβών μεταξύ αυτής και των αεροστατικών εδράνων των ρομπότ κατά την οριακή αιώρησή τους. Η κατασκευή της είναι ιδιαίτερα στιβαρή, μάζας περίπου 3500kg, καθώς κάθε ταλάντωση είναι ανεπιθύμητη. Στηρίζεται σε έξι πόδια με δυνατότητα ρύθμισης της

⁸ Porous air-bearings

κλίσης της επιφάνειάς της. Η κλίση πρέπει να ελέγχεται και να μηδενίζεται προτού διεξαχθούν πειράματα, προς αποφυγή αλλοίωσής των.



Σχήμα 1-1. Τράπεζα γρανίτη.

1.2.2 Σύστημα παρακολούθησης της στάσης των ρομπότ

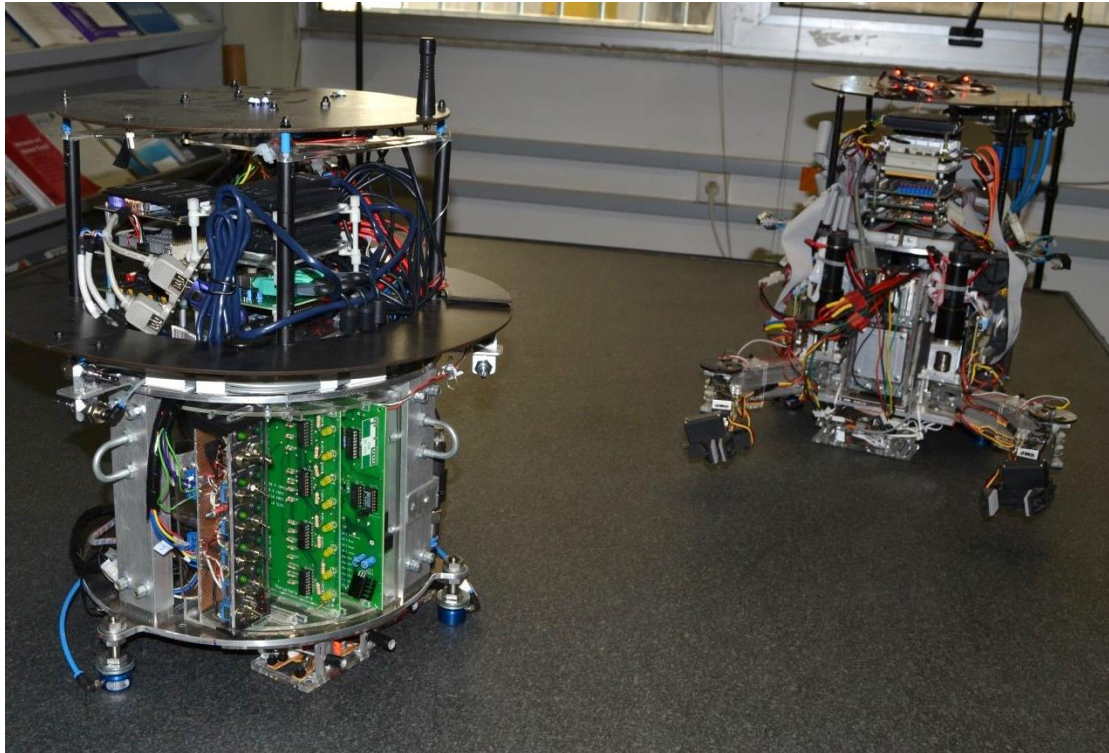
Το σύστημα παρακολούθησης της στάσης των ρομπότ [61], [57], δηλαδή της θέσης και του προσανατολισμού τους στο επίπεδο ως προς απόλυτο σύστημα συντεταγμένων, αποτελείται από μία κάμερα βιομηχανικού τύπου⁹ και από έναν υπολογιστή επιφορτισμένο με τις απαραίτητες εργασίες επεξεργασίας εικόνας και αποστολής των πληροφοριών που προκύπτουν στα ρομπότ, σε πραγματικό χρόνο. Η κάμερα είναι σταθερά τοποθετημένη πάνω από την επιφάνεια της τράπεζας γρανίτη. Σε κάθε κύκλο λειτουργίας λαμβάνει μία φωτογραφία όλης της επιφάνειας και την αποστέλλει στον υπολογιστή. Στη συνέχεια, με τεχνικές επεξεργασίας εικόνας, εντοπίζονται οι θέσεις των φωτεινών LED που βρίσκονται στην επάνω επιφάνεια κάθε ρομπότ. Επειδή για κάθε ρομπότ τα LED είναι τοποθετημένα σε συγκεκριμένο σχηματισμό, είναι δυνατός ο υπολογισμός της στάσης αμφότερων. Τελικά, οι πληροφορίες αποστέλλονται από τον υπολογιστή στα ρομπότ με χρήση πρωτοκόλλου επικοινωνίας UDP. Η συχνότητα εκτέλεσης αυτής της διαδικασίας οριοθετείται από τον ρυθμό ασύρματης αποστολής δεδομένων προς τα ρομπότ στα 5Hz, η δε θέση των ρομπότ προκύπτει με ακρίβεια της τάξης των 2mm. Εναλλακτικά, εάν απαιτείται μεγαλύτερη συχνότητα ή ακρίβεια χρησιμοποιείται το σύστημα PhaseSpace MoCap¹⁰.

⁹ mvBlueFOX, Matrix Vision

¹⁰ motion capturing system

1.2.3 Ρομπότ

Ο διαστημικός εξομοιωτής διαθέτει δύο αυτόνομα ρομπότ (Σχήμα 1-2). Το ρομπότ που αναπτύχθηκε πρώτο είναι πλήρως λειτουργικό, ενώ το δεύτερο είναι υπό κατασκευή ως προς κάποια υποσυστήματα του. Ο γενικός σχεδιασμός είναι ίδιος και για τα δύο ρομπότ και αναλύεται στη συνέχεια σε μηχανικό/ρευστομηχανικό [62] και ηλεκτρικό/ηλεκτρονικό [59] υποσύστημα.



Σχήμα 1-2. Τα δύο ρομπότ επί της τραπέζης γρανίτη κατά τη διεξαγωγή πειράματος

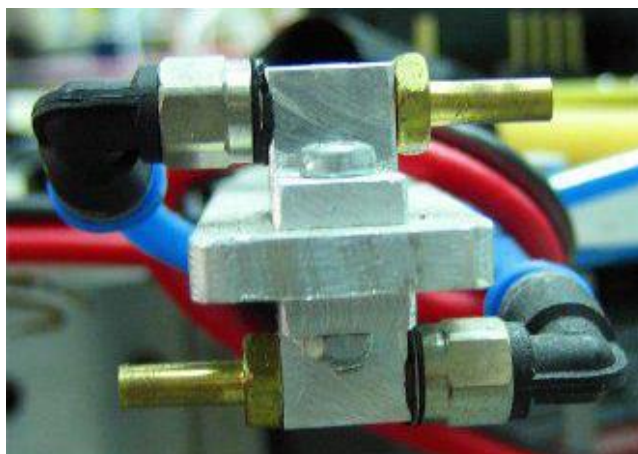
Μηχανικό/ Ρευστομηχανικό υποσύστημα

Ο σκελετός των ρομπότ (Σχήμα 1-3) είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο, υλικό που προσφέρει τον επιθυμητό συνδυασμό αντοχής, στιβαρότητας και κατεργασιμότητας. Επί του σκελετού εδράζονται όλα τα υποσυστήματα. Για την αιώρηση, κάθε ρομπότ χρησιμοποιεί τρία αεροστατικά αεροέδρανα πορώδους γραφίτη, τοποθετημένα συμμετρικά στο κάτω μέρος της κυκλικού σχήματος βάσης του. Η αυτονομία αερίου για την τροφοδοσία των αεροστατικών εδράνων επιτυγχάνεται μέσω φιάλης που περιέχει CO₂ υπό πίεση και βρίσκεται κεντρικά τοποθετημένη σε κάθε ρομπότ (Σχήμα 1-3), προς επίτευξη ευνοϊκότερης θέσης κέντρου μάζας και αδρανειακών χαρακτηριστικών. Η ίδια φιάλη τροφοδοτεί και τους προωθητήρες (thrusters) που διαθέτουν τα ρομπότ, οι ροές των οποίων ελέγχονται από ηλεκτρικές βαλβίδες. Συγκεκριμένα, στο σώμα κάθε ρομπότ είναι συμμετρικά τοποθετημένα τρία ζεύγη προωθητήρων και κάθε ζεύγος περιλαμβάνει δύο

αντίρροπα ακροφύσια (Σχήμα 1-4). Εκτοξεύοντας προωθητικό αέριο προκαλούν ωθήσεις επί του ρομπότ, επιτρέποντας την ελεγχόμενη κίνησή του [56].



Σχήμα 1-3. Ο σκελετός του δεύτερου ρομπότ με μία φιάλη CO₂.

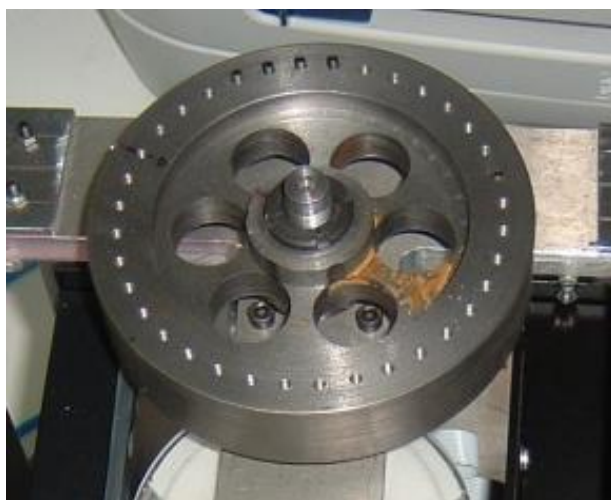


Σχήμα 1-4. Ζεύγος προωθητήρων με αντίρροπα ακροφύσια.

Επιπλέον, το πρώτο ρομπότ¹¹ διαθέτει έναν σφόνδυλο αντίδρασης (Σχήμα 1-5) κεντρικά τοποθετημένο ως προς το σώμα του [64]. Λόγω της έλλειψης τριβής μεταξύ

¹¹ Κατά τη συγγραφή της παρούσης εργασίας ο σφόνδυλος αντίδρασης του δεύτερου ρομπότ ήτο υπό κατασκευή.

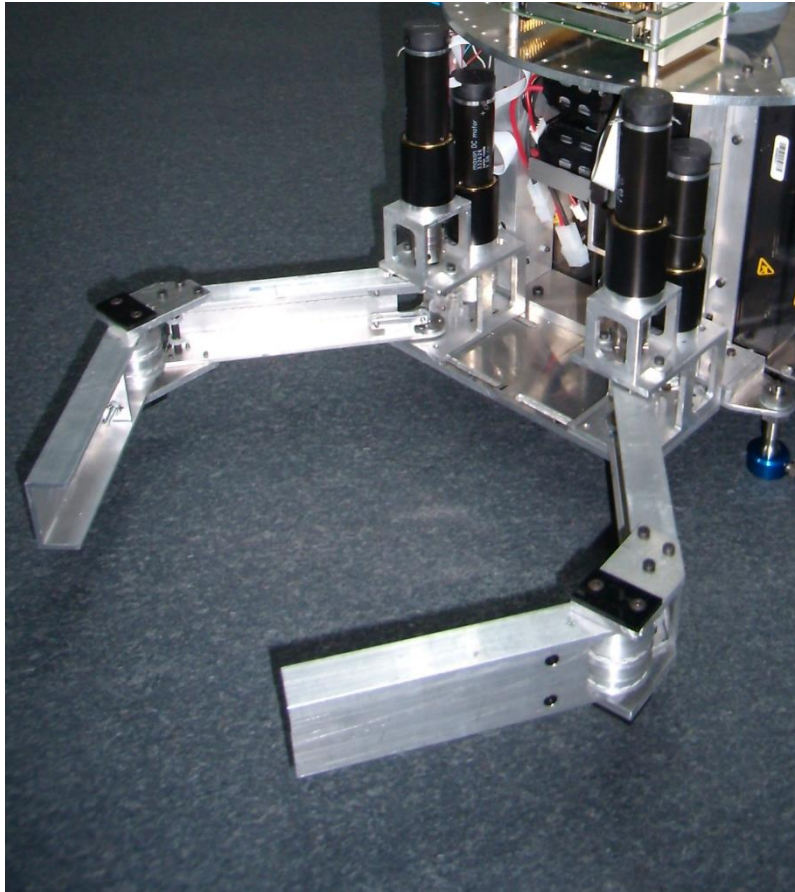
του ρομπότ και της τράπεζας, η περιστροφή του σφονδύλου προκαλεί αντίθετης φοράς περιστροφή του σώματος του ρομπότ, η οποία διέπεται από την αρχή διατήρησης της στροφορμής. Ο σφόνδυλος αντίδρασης χρησιμοποιείται συμπληρωματικά των προωθητήρων με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης προωθητικού αερίου κατά τον έλεγχο του ρομπότ. Αυτή η ανάγκη ελαχιστοποίησης πηγάζει από τα πραγματικά διαστημικά ρομπότ και τα περιορισμένα αποθέματα προωθητικού αερίου που διαθέτουν, σε αντιδιαστολή με το θεωρητικά απεριόριστο απόθεμα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αξιοποιήσει ο ηλεκτροκινητήρας του σφονδύλου αντίδρασης, καθώς υπάρχει δυνατότητα συνεχούς φόρτισης των μπαταριών των ρομπότ από φωτοβολταϊκά συστήματα.



Σχήμα 1-5. Σφόνδυλος αντίδρασης (reaction wheel).

Επίσης, το πρώτο ρομπότ φέρει δύο αποσπώμενους ρομποτικούς βραχίονες, περιστροφικών αρθρώσεων, δύο βαθμών ελευθερίας έκαστος, με δυνατότητα κίνησης παράλληλα της επιφάνειας της τράπεζας (Σχήμα 1-6). Τα κινητήρια συστήματα και των δύο αρθρώσεων κάθε βραχίονα¹² είναι τοποθετημένα στη βάση των βραχιόνων επί του σώματος του ρομπότ, προς επίτευξη ευνοϊκότερης θέσης κέντρου μάζας και αδρανειακών χαρακτηριστικών. Η μετάδοση προς τη δεύτερη άρθρωση του βραχίονα επιτυγχάνεται μέσω συστήματος νημάτων σε ένταση. Στα άκρα των βραχιόνων μπορούν να προσδεθούν εργαλεία (π.χ. αρπάγες) και αισθητήρες. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ρομποτικών βραχιόνων παρόμοιων δυνατοτήτων για το δεύτερο ρομπότ, αποτελεί αντικείμενο της παρούσης εργασίας.

¹² Πρόκειται για δύο όμοια συστήματα DC κινητήρα – πλανητικού μειωτήρα της Maxon Motor.



Σχήμα 1-6. Οι ρομποτικοί βραχίονες πρώτου ρομπότ.

Ηλεκτρικό/Ηλεκτρονικό υποσύστημα

Η ηλεκτρική αυτονομία των ρομπότ επιτυγχάνεται με χρήση επαναφορτιζόμενων μπαταριών λιθίου. Χρησιμοποιούνται δύο ανεξάρτητα κυκλώματα: ένα υψηλής τάσης, που τροφοδοτεί τους σερβοκινητήρες και τις ηλεκτρικές βαλβίδες των προωθητήρων και ένα χαμηλής τάσης, που τροφοδοτεί τον υπολογιστή κάθε ρομπότ.

Οι υπολογιστές και των δύο ρομπότ είναι τύπου PC/104 [35]. Το συγκεκριμένο πρότυπο χρησιμοποιείται ευρέως σε εργαστηριακά περιβάλλοντα, όταν υπάρχουν υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, διότι προσφέρει στιβαρές, ανθεκτικές και αξιόπιστες υλοποιήσεις μικρών διαστάσεων. Κάθε υποσύστημα των υπολογιστών τύπου PC/104 διατίθεται σε κάρτες προτυποποιημένων διαστάσεων και διασύνδεσης, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους τοποθετούμενες η μία επί της άλλης. Διατίθενται κάρτες κεντρικών μονάδων επεξεργασίας, τροφοδοτικών, μονάδων αποθήκευσης και περιφερικών, όπως ψηφιακών και αναλογικών εισόδων/εξόδων, δεκτών GPS, κ.α.

Οι υπολογιστές και των δύο ρομπότ είναι παρόμοιας διαμόρφωσης. Αμφότεροι διαθέτουν κάρτα CPU τύπου x86, κάρτα τροφοδοσίας, κάρτα HDD ή SSD και κάρτες Incremental Encoder [38]. Επιπλέον, ο υπολογιστής του πρώτου ρομπότ διαθέτει

κάρτα ψηφιακών και αναλογικών εισόδων/εξόδων, ενώ ο υπολογιστής του δεύτερου κάρτα μόνο ψηφιακών εισόδων/εξόδων (βλέπε Κεφάλαιο 5.3.5).

Στο κάτω μέρος κάθε ρομπότ είναι τοποθετημένοι οι οπτικοί αισθητήρες και τα ηλεκτρονικά τριών οπτικών ποντικιών προδιαγραφών PC, χαμηλού κόστους [60]. Η ανάγνωση και η κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων που παρέχουν γίνεται από μία πλακέτα Arduino [59]. Στη συνέχεια, η υπολογιζόμενη μετατόπιση και στροφή του ρομπότ αποστέλλεται στον υπολογιστή του και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της στάσης του, συμπληρωματικά των δεδομένων που παρέχει το σύστημα παρακολούθησης μέσω κάμερας. Το σύστημα οπτικών αισθητήρων προσφέρει πολύ μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας από το σύστημα της κάμερας, αλλά συγκεντρώνει γρήγορα οδομετρικό σφάλμα.

Πλέον των αισθητήρων μετατόπισης¹³ τα ρομπότ διαθέτουν αισθητήρες παρακολούθησης της τάσης των μπαταριών τους, της πίεσης των φιαλών αερίου και των ακραίων θέσεων των βραχιόνων¹⁴.

Το ηλεκτρικό/ηλεκτρονικό υποσύστημα των ρομπότ ολοκληρώνουν τα servo drives που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ρεύματος των DC ηλεκτροκινητήρων: Ο υπολογιστής κάθε ρομπότ υπολογίζει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου και τα αποστέλλει στα servo drive μέσω των I/O καρτών του. Στη συνέχεια, τα servo drives τροφοδοτούν με το απαραίτητο ρεύμα τους ελεγχόμενους κινητήρες.

1.3 Σχετική έρευνα

Επίπεδοι διαστημικοί εξομοιωτές με λειτουργία που βασίζεται σε αεροέδρανα, παρόμοιοι αυτού του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου έχουν αναπτυχθεί και σε άλλα ερευνητικά κέντρα. Ακολουθεί ενδεικτική παρουσίαση δύο αντιπροσωπευτικών περιπτώσεων:

Free Flyers, Stanford University

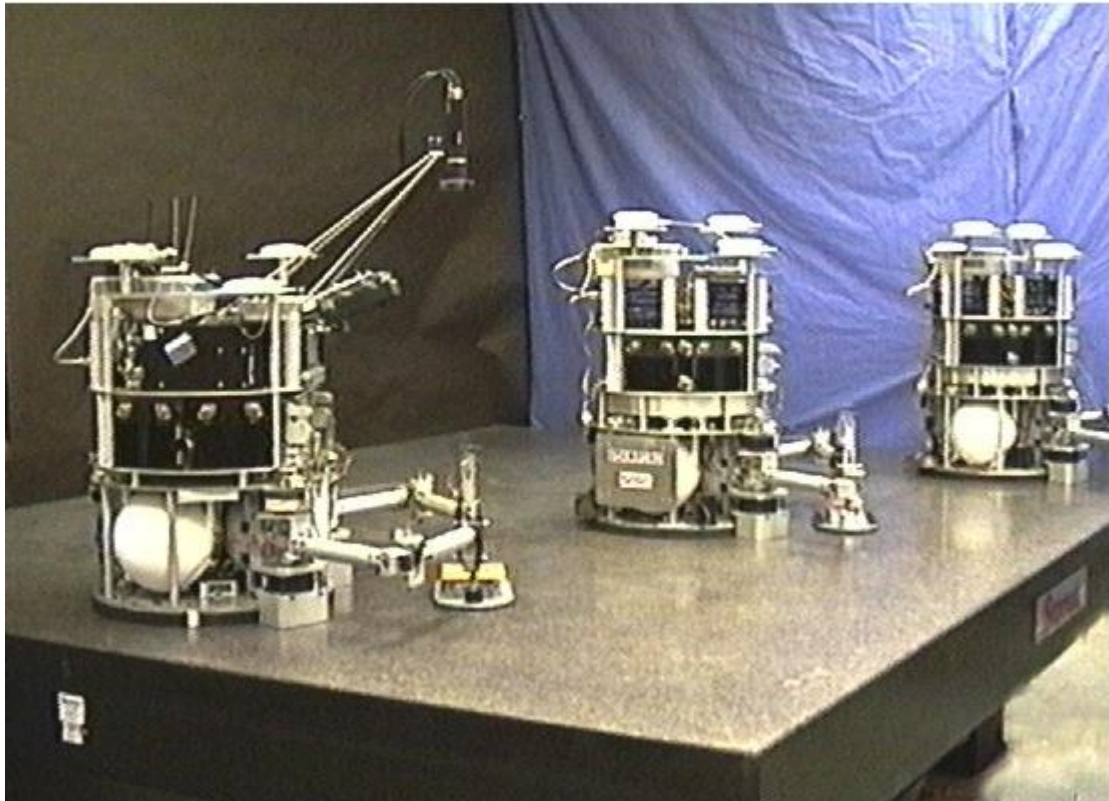
Το εργαστήριο αεροδιαστημικής ρομποτικής¹⁵ του πανεπιστημίου του Stanford είχε αναπτύξει έναν από τους πρώτους επίπεδους διαστημικούς εξομοιωτές – πρόγραμμα Free Flyers (Σχήμα 1-7) [51]. Περιελάμβανε τρία αυτόνομα ρομπότ με αεροέδρανα για αιώρηση επί τραπέζης γρανίτη, προωθητήρες και σφόνδυλο

¹³ Incremental Encoders των κινητήρων και ποντίκια

¹⁴ Hall effect sensors

¹⁵ Aerospace Robotics Laboratory

αδράνειας¹⁶ για κίνηση, ρομποτικούς βραχίονες με πνευματικές αρπάγες, αισθητήρες όρασης και ασύρματη επικοινωνία. Επιπλέον, περιελάμβανε παθητικό στοιχείο, δηλαδή αιωρούμενο αντικείμενο χωρίς επενεργητές, το οποίο χρησιμοποιείτο ως στόχος σε δοκιμές σύλληψης αιωρούμενων αντικειμένων από τα ρομπότ. Η θέση και ο προσανατολισμός των ρομπότ παρακολουθούνταν είτε με σύστημα τεχνητής όρασης¹⁷, είτε με σύστημα βασισμένο σε Pseudolite GPS [54]. Ο εν λόγω διαστημικός εξομοιωτής χρησιμοποιήθηκε σε δοκιμές αλγορίθμων ελέγχου για πτήσεις σε σχηματισμό και σχεδιασμού πορείας. Επιπλέον, έγινε έρευνα με επίκεντρο τις συνεργατικές εργασίες συναρμολόγησης κατασκευών, σε λιγότερα δομημένα περιβάλλοντα. Πρόσφατα, το πανεπιστήμιο του Stanford αποφάσισε την αναβίωση του προγράμματος Free Flyers και την ανάπτυξη καινούριου επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή [42].



Σχήμα 1-7. Free Flyers, Stanford University.

¹⁶ momentum wheel

¹⁷ Επρόκειτο για σύστημα κάμερας τοποθετημένης πάνω από την τράπεζα γρανίτη.

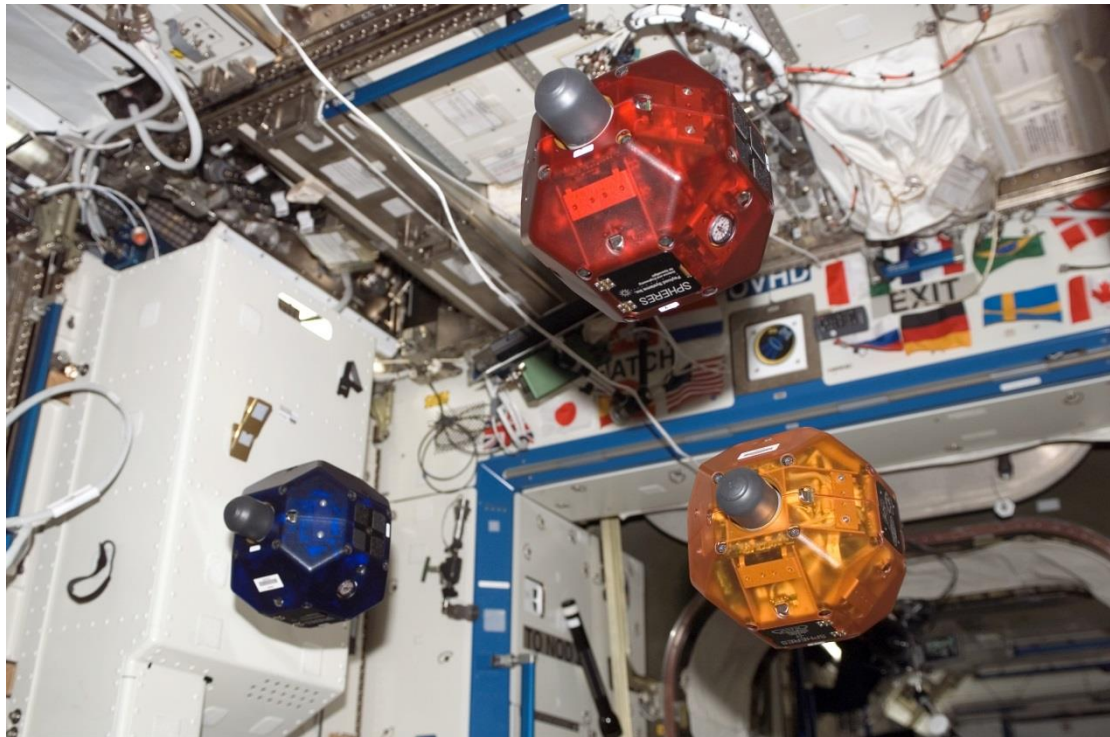
SPHERES, MIT

Το πρόγραμμα SPHERES¹⁸ [47] αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Διαστημικών Συστημάτων του MIT σε συνεργασία με τις NASA, DARPA και Aurora Flight Sciences. Αφορά στην ανάπτυξη ρομπότ/δορυφόρων μικρών διαστάσεων και αλγορίθμων ελέγχου για πτήσεις των, σε διάφορους σχηματισμούς. Στα στάδια της ανάπτυξης των ρομπότ, χρησιμοποιήθηκε ένας επίπεδος διαστημικός εξομοιωτής για τις δοκιμές των αλγορίθμων ελέγχου. Τα ρομπότ προσαρμόστηκαν σε βάσεις με αεροέδρανα, ώστε να αίρονται επί γυάλινης τράπεζας επί της οποίας μπορούσαν να κινούνται με χρήση των προωθητήρων τους (Σχήμα 1-8). Το 2007 τα ρομπότ συμμετείχαν σε αποστολή στον ISS, όπου εκτελέστηκαν πειράματα πτήσεων σε σχηματισμό (Σχήμα 1-9). Προσφάτως χρησιμοποιήθηκαν στον επίπεδο διαστημικό εξομοιωτή για δοκιμές πρόσδεσης (Σχήμα 1-10).

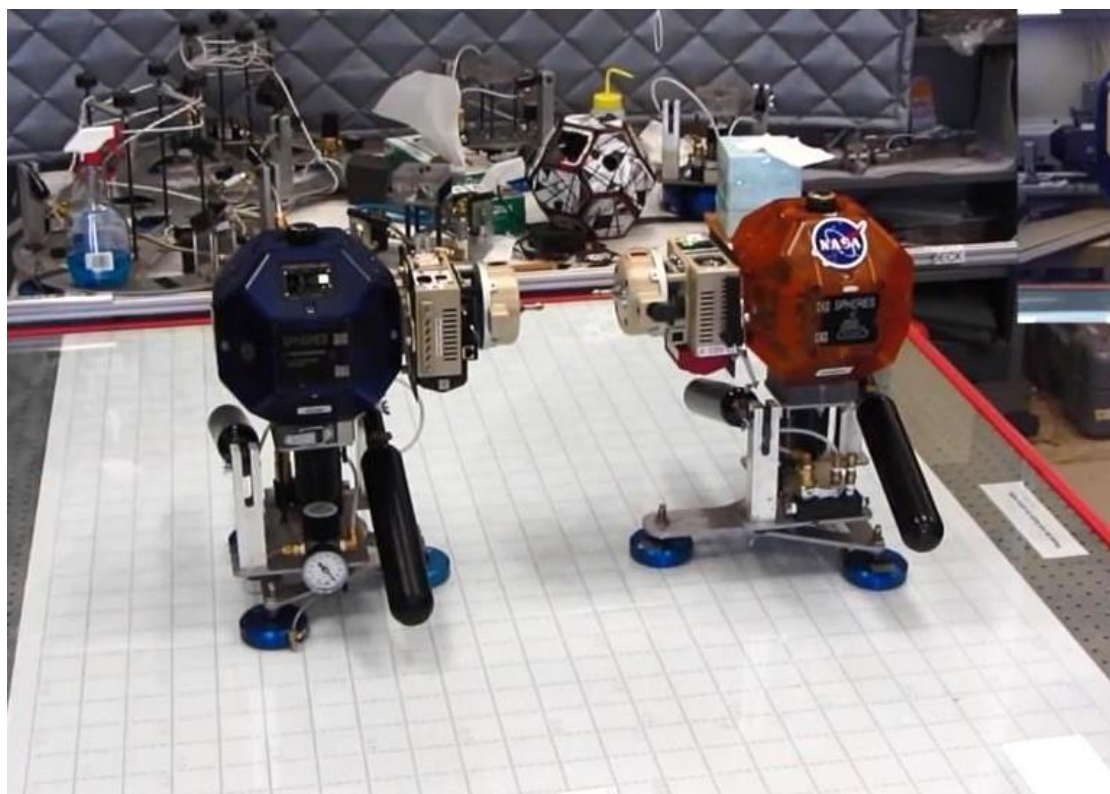


Σχήμα 1-8. SPHERES, επίπεδος διαστημικός εξομοιωτής. Εκτελείται δοκιμή πτήσης σε σχηματισμό ισόπλευρου τριγώνου επί της γυάλινης τράπεζας του διαστημικού εξομοιωτή.

¹⁸ Synchronized Position Hold, Engage, Reorient Experimental Satellites



Σχήμα 1-9. SPHERES, ISS. Εκτελείται πείραμα πήξης σε σχηματισμό ισόπλευρου τριγώνου στον ISS [43].



Σχήμα 1-10. SPHERES, επίπεδος διαστημικός εξομοιωτής. Εκτελείται δοκιμή πρόσδεσης (docking) επί της γυάλινης τράπεζας του διαστημικού εξομοιωτή [45].

1.4 Δομή της εργασίας

1 Εισαγωγή

Δηλώνεται ο σκοπός της εργασίας, γίνεται σύντομη περιγραφή του επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή του εργαστηρίου και αναφορά σε άλλα παρόμοια συστήματα.

2 Σχεδιασμός και Κατασκευή των Ρομποτικών Βραχιόνων

Γίνεται προσδιορισμός των γενικών απαιτήσεων, παρουσιάζονται διαφορετικές επιλογές υλοποίησης και επιλέγεται η πληρούσα τα κριτήρια που τίθενται κατά βέλτιστο τρόπο. Παρουσιάζονται τα σημαντικότερα σημεία του σχεδίου που αναπτύχθηκε και συνοπτικά τα στάδια κατασκευής και συναρμολόγησης.

3 Δυναμική Μοντελοποίηση του Ρομπότ

Παρουσιάζεται η μέθοδος δυναμικής μοντελοποίησης συστημάτων Euler – Lagrange και εφαρμόζεται προς εύρεση του δυναμικού μοντέλου του ρομπότ με δύο βραχίονες.

4 Αυτόματος Έλεγχος και Σχεδιασμός Τροχιών

Παρουσιάζεται μία μέθοδος μη γραμμικού ελέγχου του ρομποτικού συστήματος με βάση το μοντέλο και αναλύεται η μέθοδος μετατροπής των υπολογιζόμενων γενικευμένων δυνάμεων και ροπών σε δυνάμεις ή ροπές που πρέπει να παράγουν οι επενεργητές του συστήματος. Επίσης παρουσιάζεται ο τρόπος ορισμού και δημιουργίας τροχιών στο πεδίο των αρθρώσεων και στο Καρτεσιανό επίπεδο για κινήσεις των αρθρώσεων και του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα αντιστοίχως.

5 Λογισμικό

Γίνεται σύντομη παρουσίαση του Simulink, του Simulink Real-Time και κάποιων καλών πρακτικών προγραμματισμού σε αυτά. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης του ρομποτικού συστήματος σε Simulink και το πρόγραμμα ελέγχου που αναπτύχθηκε για Simulink Real-Time. Παράλληλα αναλύεται η χρησιμότητα και ο τρόπος λειτουργίας των υποσυστημάτων που περιλαμβάνουν.

6 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Πειραμάτων

Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των πειραμάτων που διεξήχθησαν.

7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Γίνεται σύντομη ανασκόπηση της παρούσης εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν και προτείνονται μελλοντικές εργασίες.

2 Σχεδιασμός και κατασκευή των ρομποτικών βραχιόνων

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των ρομποτικών βραχιόνων αποτελείται από τα εξής βασικά στάδια, κατά σειρά:

- Προσδιορισμός γενικών απαιτήσεων.
- Επιλογή γενικής κατασκευαστικής λύσης/υλοποίησης.
- Αρχικό σχέδιο λύσης.
- Τελικό σχέδιο και προσδιορισμός προδιαγραφών εξαρτημάτων.
- Κατασκευή εξαρτημάτων.
- Συναρμολόγηση.

Επισημαίνεται ότι καθ' όλη τη διάρκεια των διαδικασιών εκτελείτο αξιολόγηση των σχεδιαστικών αποφάσεων προς αναζήτηση βέλτιστης υλοποίησης με παράλληλη εισαγωγή των απαραίτητων αλλαγών. Σε πολλές περιπτώσεις εκρίθησαν απαραίτητες οι εκ των υστέρων αλλαγές και βελτιώσεις σε προηγούμενα στάδια,

συνεπώς η προαναφερθείσα κατάταξη των σταδίων είναι ενδεικτική της γενικής πορείας που ακολουθήθηκε.

2.1 Προσδιορισμός γενικών απαιτήσεων

Ο προσδιορισμός γενικών απαιτήσεων αφορά σε χαρακτηριστικά ουσιώδους σημασίας για τη λειτουργία και τον σκοπό της τελικής κατασκευής, που μπορούν να οριστούν ανεξαρτήτως της υλοποίησης που θα επιλεγεί σε επόμενα στάδια. Η υλοποίηση θα πρέπει να ικανοποιεί πλήρως τις γενικές απαιτήσεις. Ιδανικά, σε αυτό το στάδιο τίθενται απαιτήσεις με γνώμονα τη ζητούμενη λειτουργικότητα και εφαρμογή, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη περιορισμοί που μπορεί να προκύπτουν για πιθανές υλοποιήσεις.

Για τη συγκεκριμένη εργασία ετέθησαν οι ακόλουθες γενικές απαιτήσεις, οι οποίες εκφράζονται κυρίως με περιγραφικό τρόπο:

- Ανάπτυξη δύο όμοιων και συμμετρικών μεταξύ τους ρομποτικών βραχιόνων, για χρήση με το δεύτερο ρομπότ του εξομοιωτή διαστημικού ρομπότ του εργαστηρίου.
- Ο κάθε βραχίονας να διαθέτει δύο περιστροφικές αρθρώσεις με άξονα περιστροφής τον κατακόρυφο, συνεπώς πεδίο κίνησης το επίπεδο.
- Μήκη συνδέσμων (links) αντίστοιχα αυτών των βραχιόνων του πρώτου ρομπότ: 15-20cm για τον πρώτο σύνδεσμο και 10-15cm για τον δεύτερο.
- Να υπάρχει περιοχή του χώρου εργασίας αμοιβαίως προσπελάσιμη και από τους δύο βραχίονες, ώστε να είναι εφικτές οι συνεργατικές εργασίες.
- Δυνατότητα χειρισμού μάζας μέχρι 20kg επί της τραπέζης και σε συνθήκες μηδενικής τριβής με αυτήν, ώστε να είναι εφικτές οι εργασίες με φορτίο άλλο ρομπότ.
- Το κέντρο μάζας του συστήματος των βραχιόνων να είναι όσο γίνεται πιο κοντά στο κέντρο μάζας του κυρίως σώματος του ρομπότ, προς μείωση ανεπιθύμητων φαινομένων κίνησης του σώματος κατά την κίνηση των βραχιόνων.
- Εύκολη σύνδεση και αποσύνδεση των βραχιόνων από το κυρίως σώμα του ρομπότ – modular σχεδιασμός.
- Δυνατότητα πρόσδεσης εργαλείου ή/και αισθητήρα δυνάμεων και ροπών στο άκρο κάθε βραχίονα και προσαρμογής του συνολικού τελικού μήκους του δεύτερου συνδέσμου σε επιθυμητή τιμή.
- Ακρίβεια κίνησης.
- Στιβαρή κατασκευή, με ελάχιστες έως καθόλου ανάγκες συντήρησης.

- Κατά το δυνατόν οδήγηση καλωδίων εσωτερικά των βραχιόνων.
- Δυνατότητα πλήρους αναδίπλωσης των βραχιόνων.
- Κατά το δυνατόν καλαίσθητη, μικρού όγκου και μάζας κατασκευή.

2.2 Επιλογή γενικής κατασκευαστικής λύσης/υλοποίησης

Σε αυτό το στάδιο εξετάζονται διαφορετικές προσεγγίσεις που φαίνεται δυνατό να οδηγήσουν σε κατασκευή που ικανοποιεί όλες τις γενικές απαιτήσεις που ετέθησαν και επιλέγεται η βέλτιστη. Καταρχάς εξετάζονται οι λύσεις που έχουν δοκιμαστεί ευρέως σε παρεμφερείς εφαρμογές και εν συνεχεία άλλες, λιγότερο διαδεδομένες. Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση των δεύτερων είναι ζητούμενο να διαπιστωθεί σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των πρώτων, καθώς η έλλειψη εμπειρίας είναι πιθανό να οδηγήσει σε απρόβλεπτα προβλήματα υλοποίησης, πράγμα που αποτελεί σοβαρό, «έμφυτο» μειονέκτημά τους. Σε αυτό το στάδιο η αξιολόγηση είναι κατά κύριο λόγο εμπειρική, διότι οι περιορισμοί σε χρόνο και χρηματικούς πόρους εμποδίζουν την εκτενέστερη αρχική ανάλυση. Γίνεται προσπάθεια συστηματοποίησης της αξιολόγησης, υπό την έννοια ότι ορίζεται εξ αρχής σύνολο κριτηρίων βάσει των οποίων γίνεται η επιλογή της βέλτιστης συνολικά λύσης.

2.2.1 Κριτήρια αξιολόγησης συστημάτων μετάδοσης

Για τη συγκεκριμένη εργασία, οι γενικές επιλογές κατασκευαστικής λύσης αφορούν στην επιλογή συστήματος μετάδοσης. Το σύστημα μετάδοσης αποτελεί τη βασικότερη σχεδιαστική επιλογή, καθώς καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά και μορφή του συστήματος, εφόσον οι γενικές απαιτήσεις που εδόθησαν επιτρέπουν μεγάλο εύρος επιλογών. Σκοπός είναι η επιλογή της λύσης που θα ικανοποιεί καλύτερα αυτές τις απαιτήσεις, καθώς και τα κριτήρια που θα ορισθούν ακολούθως:

- Κέντρο μάζας – Ροπή αδρανείας
- Ακρίβεια
- Όγκος
- Πολυπλοκότητα κατασκευής
- Ανάγκες συντήρησης
- Κόστος

Κέντρο μάζας – Ροπή αδρανείας

Στις περισσότερες εφαρμογές ρομποτικών βραχιόνων η ελαχιστοποίηση της κινούμενης μάζας του βραχίονα είναι βασικό ζητούμενο, διότι αυξανόμενης της μάζας αυξάνονται και η αδράνεια, το μέγεθος των απαιτούμενων κινητήριων συστημάτων

και το κόστος. Συνήθης τρόπος αντιμετώπισης είναι η τοποθέτηση των κινητήριων συστημάτων στο κυρίως σώμα του ρομπότ με χρήση συστημάτων μετάδοσης κίνησης, προς επίτευξη ευνοϊκότερης θέσης κέντρου μάζας και αδρανειακών χαρακτηριστικών. Αρνητικές επιπτώσεις συνυφασμένες με αυτή την προσέγγιση είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα κατά τον σχεδιασμό και κατασκευή, οι τυχόν ταλαντώσεις και, πιθανά, το αυξημένο κόστος συντήρησης, συνεπώς αποτελεί σημαντικότερη σχεδιαστική επιλογή. Στην περίπτωση των βραχιόνων για διαστημικό ρομπότ, η ελαχιστοποίηση της ροπής αδράνειας των βραχιόνων και η τοποθέτηση του κέντρου μάζας τους όσο γίνεται πιο κοντά στο κυρίως σώμα του ρομπότ είναι έτι σημαντικότερα, διότι ελλείπει τριβής μεταξύ ρομπότ και περιβάλλοντος, κάθε κίνηση των βραχιόνων προκαλεί κίνηση του κυρίως σώματος, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής και της στροφορμής – πράγμα ανεπιθύμητο – και όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα και η ροπή αδράνειας των βραχιόνων σε σχέση με τα αντίστοιχα του κυρίως σώματος του ρομπότ, τόσο εντονότερο γίνεται το εν λόγω φαινόμενο.

Ακρίβεια

Η ακρίβεια των κινήσεων των βραχιόνων, υπό την έννοια της δυνατότητας να εκτελούν τη δοθείσα εντολή με όσο μικρότερη απόκλιση γίνεται, και η επαναληψιμότητα, υπό την έννοια της δυνατότητας να επαναλαμβάνεται η εκάστοτε κίνηση με παρομοίως μικρή απόκλιση και μη αυξανόμενη με τον χρόνο, είναι βασικά ζητούμενα, παρόλο που δεν έχει καθορισθεί η σχετική προδιαγραφή ποσοτικά. Οι λύσεις που θα βρεθούν ικανοποιητικές κατά τα άλλα, θα συγκριθούν μεταξύ τους ως προς την ακρίβεια με αυξημένη βαρύτητα. Επισημαίνεται ότι γενικά η ακρίβεια, όπως ορίσθηκε, εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες – στο παρόν σημείο ενδιαφέρουν αποκλειστικά οι κατασκευαστικές επιλογές υλοποίησης και το πώς αυτές την επηρεάζουν.

Όγκος

Ο μειωμένος όγκος των ρομποτικών βραχιόνων συνήθως συνεπάγεται ευνοϊκότερα αδρανειακά χαρακτηριστικά, πράγμα ιδιαίτερος σημαντικό για τη μελετώμενη εφαρμογή, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Επιπλέον, ο διαθέσιμος χώρος στο κυρίως σώμα του ρομπότ για την πρόσδεση του συστήματος των βραχιόνων είναι πολύ περιορισμένος. Συνεπώς, ζητούμενος είναι ο μικρός όγκος όχι μόνο των βραχιόνων αυτών καθ'αυτών, αλλά και των κινητήριων συστημάτων τους και κάθε άλλου εξαρτήματος που θα τοποθετηθεί στο σύστημα πρόσδεσης των βραχιόνων επί του ρομπότ.

Πολυπλοκότητα κατασκευής

Η μειωμένη πολυπλοκότητα κατασκευής δεν αποτελεί βασικό ζητούμενο, όμως είναι επιθυμητή, εφόσον μπορεί να επιτευχθεί χωρίς ιδιαίτερους συμβιβασμούς, καθώς αυξανόμενη της πολυπλοκότητας αυξάνει και η πιθανότητα λαθών κατά το σχεδιασμό και οι δυσκολίες στην υλοποίηση και χρήση.

Αξιοπιστία

Καθώς η κατασκευή δεν προβλέπεται να βρίσκεται σε συνεχή χρήση ή να λειτουργεί με διακοπές αλλά για μεγάλα χρονικά διαστήματα κάθε φορά, είναι ζητούμενο να απαιτεί μηδενική τακτική συντήρηση, οι δε τυχάιες βλάβες πρέπει να μπορούν να επιδιορθώνονται εύκολα και γρήγορα.

Κόστος

Επισημαίνεται ότι σχεδόν κάθε λύση θα μπορούσε να οδηγήσει σε εξαιρετικά αποτελέσματα, εάν δεν τεθεί περιορισμός κόστους, μέσω της επιλογής υλικών για ειδικές εφαρμογές, εξεζητημένων εξαρτημάτων κ.α. Στη συγκεκριμένη περίπτωση και σύμφωνα με αρχική εκτίμηση, οι κινητήρες αντιστοιχούν σε άνω του 80% του συνολικού κόστους. Το γεγονός ότι τη στιγμή έναρξης της παρούσης εργασίας υπήρχε ήδη άμεσα διαθέσιμο σύστημα κινητήρα-μειωτήρα-incremental encoder, όμοιο με αυτό που επιτυχώς χρησιμοποιείται στο πρώτο ρομπότ του εργαστηρίου, δημιούργησε εκ των πραγμάτων επιπλέον περιορισμό "κόστους" για κάθε λύση που προϋποθέτει αγορά διαφορετικού κινητήριου συστήματος. Προφανώς, ο εν λόγω περιορισμός σχετίζεται με την επιθυμία ελαχιστοποίησης των άμεσα απαιτούμενων κεφαλαίων για αγορές του εργαστηρίου και όχι με το συνολικό κόστος της κατασκευής, στο οποίο προσμετρώνται και τα διαθέσιμα. Αν και, ιδανικά, ο σχεδιασμός κατασκευής πρέπει να επηρεάζεται από τον στόχο για ελάχιστο τελικό κόστος, στη συγκεκριμένη περίπτωση κρίθηκε επιτακτική η χρήση του υπάρχοντος κινητήριου συστήματος. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή του.

2.2.2 Το κινητήριο σύστημα των ρομποτικών βραχιόνων

Το κινητήριο σύστημα των ρομποτικών βραχιόνων είναι ένα προσυναρμολογημένο σύνολο¹⁹ της Maxon Motor αποτελούμενο από:

- DC κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με συλλέκτη, ισχύος 10W και μέγιστης ροπής $\tau_{ma}^{\max} = 136mNm$.

¹⁹ Part number: 332626, αναλυτικά στοιχεία στο Παράρτημα Α.

- Πλανητικό μειωτήρα λόγου μείωσης $n=190:1$, τριών σταδίων, μέγιστης ροπής εξόδου $\tau_g^{\max} = 6.5Nm$, μέγιστης απόδοσης $\eta = 70\%$, μέσης χάρης οδόντων²⁰ 1° .
- Incremental encoder, 1000 CPT²¹, τριών καναλιών (A, B, Index), μαγνητικός.

Για να διαπιστωθεί εν τάχει η επάρκεια ροπής του εν λόγω συστήματος, θα εξεταστεί το μέγεθος της μέγιστης δύναμης που μπορεί να ασκηθεί από το άκρο ενός βραχίονα στην ακραία περίπτωση της πλήρους έκτασής του, με τη ροπή να ασκείται στην άρθρωση σύνδεσης του βραχίονα με το κυρίως σώμα του ρομπότ και το ρομπότ να συγκρατείται σε σταθερή θέση (Σχήμα 2-1). Για τον σκοπό αυτό, διάφορα μεγέθη θα θεωρηθούν κατά προσέγγιση γνωστά, παραδοχή που δε θα επηρεάσει την εγκυρότητα του αποτελέσματος.

Η μέγιστη αποδιδόμενη ροπή περιορίζεται από τις προδιαγραφές του μειωτήρα εφόσον ισχύει:

$$\tau_{ma}^{\max} \cdot n \cdot \eta \approx 18mNm > \tau_g^{\max} \quad 22 \quad (2-1)$$

Συνεπώς για συνολικό μήκος βραχίονα σε έκταση $l = 0.35m$, η μέγιστη ασκούμενη δύναμη από το άκρο είναι:

$$f = \frac{\tau_g^{\max}}{l} \approx 19N \quad (2-2)$$

Για το φορτίο μέγιστης μάζας $m = 20kg$ που ορίζουν οι γενικές απαιτήσεις, η γραμμική επιτάχυνση που προκύπτει είναι:

$$a = \frac{f}{m} \approx 1m/s^2 \quad (2-3)$$

η οποία κρίνεται επαρκής για εξομοιωτή διαστημικού ρομπότ, καθώς οι κινήσεις είναι αργές και απολύτως ελεγχόμενες.

Ομοίως υπολογίζεται η γωνιακή επιτάχυνση, θεωρώντας κεντροβαρική ροπή αδράνειας φορτίου $I = 0.3kgm^2$, αμελώντας τη ροπή αδράνειας του βραχίονα ως τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη²³ και υποθέτοντας σταθερή σύνδεση τύπου πάκτωσης μεταξύ του άκρου του βραχίονα και του ρομπότ-φορτίου. Για απόσταση

²⁰ Backlash

²¹ Counts Per Turn

²² Τα μεγέθη ορίστηκαν πιο πάνω.

²³ Το πρώτο ρομπότ έχει μάζα περίπου 15kg και ροπή αδράνειας $0.23kgm^2$ [63].

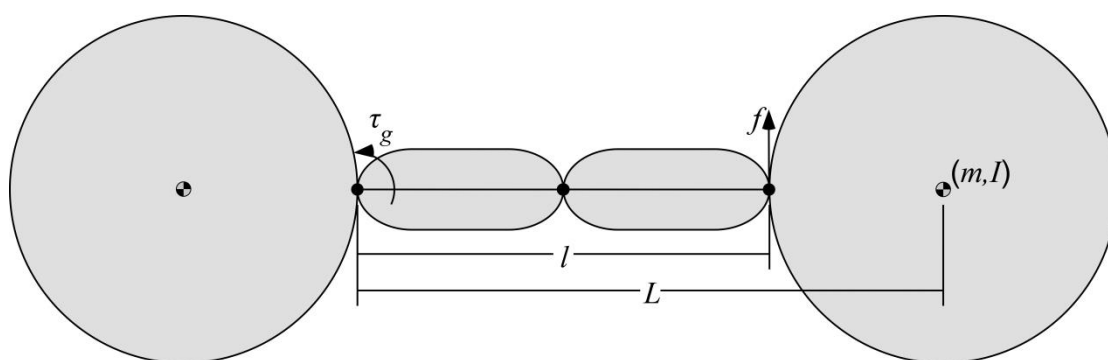
$L=0.5m$ μεταξύ κεντροβαρικού άξονα φορτίου και άξονα περιστροφής της άρθρωσης²⁴ υπολογίζεται η ροπή αδράνειας ως προς τον άξονα περιστροφής κατά το θεώρημα Steiner, ως εξής:

$$I_r = I + m \cdot L^2 = 5.3kgm^2 \quad (2-4)$$

Προκύπτει η γωνιακή επιτάχυνση, η οποία επίσης κρίνεται επαρκής:

$$\gamma = \frac{\tau_g^{\max}}{I_r} = 1.2rad / s^2 \quad (2-5)$$

Τα αποτελέσματα είναι αποδεκτά, πράγμα αναμενόμενο, καθώς τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου κινητήριου συστήματος επιλέχθηκαν καταρχήν για το πρώτο ρομπότ, ώστε να ανταποκρίνονται σε παρόμοιες προδιαγραφές με αυτές που ετέθησαν για το δεύτερο.



Σχήμα 2-1. Διαμόρφωση με 2 ρομπότ. Στα αριστερά το σταθερό ρομπότ με έναν βραχίονα σε πλήρη έκταση και ασκούμενη ροπή στην πρώτη άρθρωση. Στα δεξιά το ελεύθερο ρομπότ-φορτίο.

2.2.3 Άλλα συστήματα κίνησης/μετάδοσης

Ακολουθεί απαρίθμηση και σύντομη νύξη στα συστήματα κίνησης/μετάδοσης που προϋποθέτουν διαφορετικό κινητήριο σύστημα και τελικά απορρίφθηκαν.

- Direct drive.
- DC κινητήρες χωρίς συλλέκτη, με μειωτήρα.
- Right angle bevel gearbox²⁵.
- Right angle spiroid gearbox²⁶.
- Harmonic drive.

²⁴ 0.35m, το μήκος του βραχίονα σε έκταση και 0.15m, η ακτίνα του ρομπότ-φορτίου.

²⁵ Κιβώτιο κωνικών τροχών, ορθών αξόνων.

²⁶ Κιβώτιο σπειροειδούς τροχού, ορθών αξόνων.

Direct drive

Ο όρος Direct Drive [29] αποδίδεται σε συστήματα όπου υφίσταται άμεση σύνδεση του κινητήρα με τον εκάστοτε μηχανισμό, χωρίς ενδιάμεση παρεμβολή μειωτήρα ή άλλου συστήματος μείωσης. Το βασικό πλεονέκτημα που παρουσιάζει για την υπό εξέταση εφαρμογή είναι η μεγάλη ακρίβεια με μηδενικό backlash [25]. Επιπλέον, επιτρέπει κατασκευή ανεκτική σε πειράματα κρούσεων, πράγμα μη εφικτό με χρήση μειωτήρων μεγάλου λόγου μείωσης. Το βασικό μειονέκτημα, που τελικά καθιστά την εν λόγω προσέγγιση ασύμφορη, είναι ότι για τον ζητούμενο συνδυασμό σχετικά υψηλής ροπής σε χαμηλή ταχύτητα απαιτείται κινητήρας μεγάλων διαστάσεων και ακριβά ηλεκτρονικά ελέγχου.

DC κινητήρες χωρίς συλλέκτη, με μειωτήρα

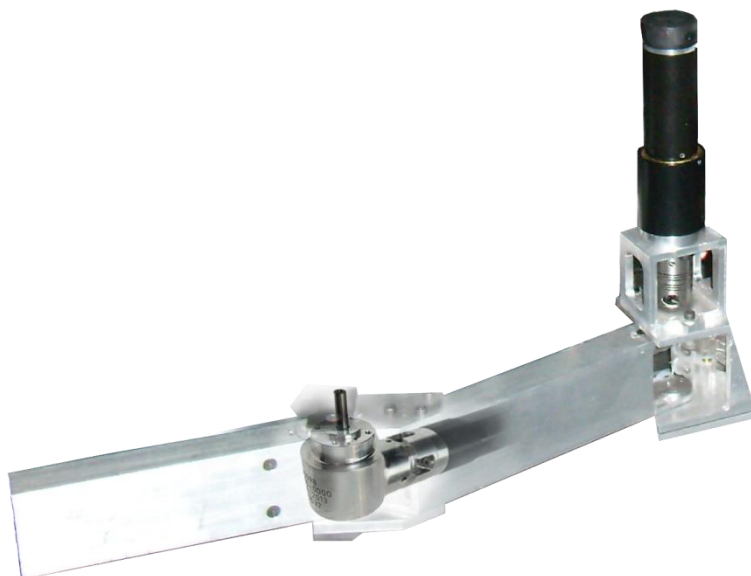
Ο συγκεκριμένος τύπος ηλεκτροκινητήρα [26] προσφέρει γενικά καλύτερη σχέση ροπής-μεγέθους και μεγαλύτερη αξιοπιστία σε βάθος χρόνου σε σύγκριση με τους DC με συλλέκτη. Παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στον έλεγχο και, συμπεριλαμβάνοντας τα απαραίτητα ηλεκτρονικά ελέγχου, μεγαλύτερο κόστος. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή διαπιστώθηκε ότι η διαφορά κόστους είναι μεγάλη, χωρίς τα προσφερόμενα πλεονεκτήματα να την αντισταθμίζουν.

Right angle bevel gearbox

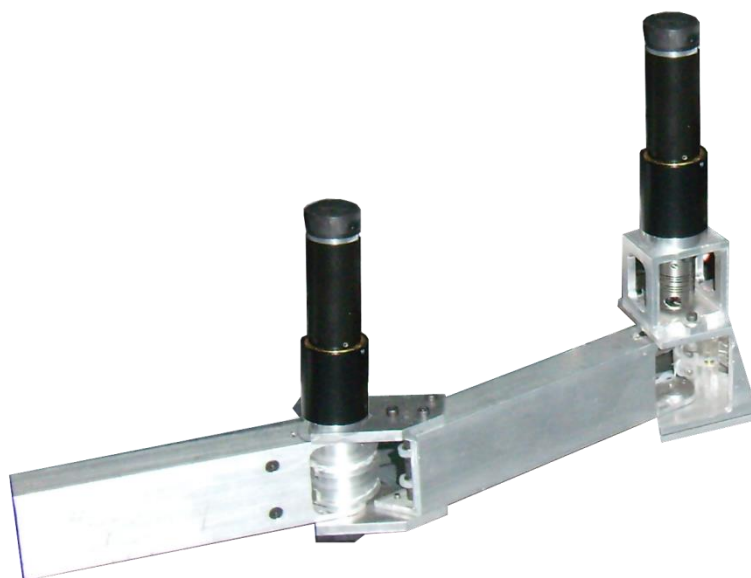
Το συγκεκριμένο είδος κιβωτίου διαθέτει άξονα εξόδου στραμμένο κατά 90 μοίρες σε σχέση με τον άξονα εισόδου. Στη μελετώμενη εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη δεύτερη άρθρωση, με το συνδεδεμένο κινητήριο σύστημα τοποθετημένο εντός του πλαισίου του πρώτου συνδέσμου του βραχίονα, ώστε ο άξονας του κινητήρα του κινητήριου συστήματος να είναι παράλληλος του πρώτου συνδέσμου. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση εμφανίζεται σε mock-up στο Σχήμα 2-2 και εξετάζεται σε αντιπαραβολή με τη διαμόρφωση που εμφανίζεται σε mock-up στο Σχήμα 2-3. Στη πρώτη διαμόρφωση το κινητήριο σύστημα του δεύτερου συνδέσμου έχει τοποθετηθεί κατακόρυφα, σε άμεση σύνδεση με τη δεύτερη άρθρωση, χωρίς παρεμβολή κιβωτίου αλλαγής άξονα.

Όπως φαίνεται, το βασικό πλεονέκτημα της διαμόρφωσης με χρήση κιβωτίου κωνικών τροχών είναι η ευνοϊκότερη θέση του κέντρου μάζας των βραχιόνων, καθώς βρίσκεται πιο κοντά στο κυρίως σώμα του ρομπότ. Επιπλέον, κατά την υποκειμενική κρίση του συγγραφέα, είναι αισθητικά ανώτερη της εναλλακτικής διαμόρφωσης. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται οι σχετικά μεγάλες διαστάσεις του εν λόγω κιβωτίου για τις απαιτούμενες προδιαγραφές ροπής και η επιπλέον μάζα που προσθέτει στην κατασκευή, πράγμα που εν μέρει αναιρεί το όφελος ως προς τη ροπή αδράνειας.

Επιπλέον, τα κιβώτια κωνικών τροχών γενικά παρουσιάζουν μεγάλη χάρη οδόντων, χαρακτηριστικό απολύτως ανεπιθύμητο για εφαρμογές ακριβείας.



Σχήμα 2-2. Μετάδοση στη δεύτερη άρθρωση μέσω Right angle bevel gearbox – mock-up βασισμένο στον αριστερό βραχίονα του πρώτου ρομπότ.

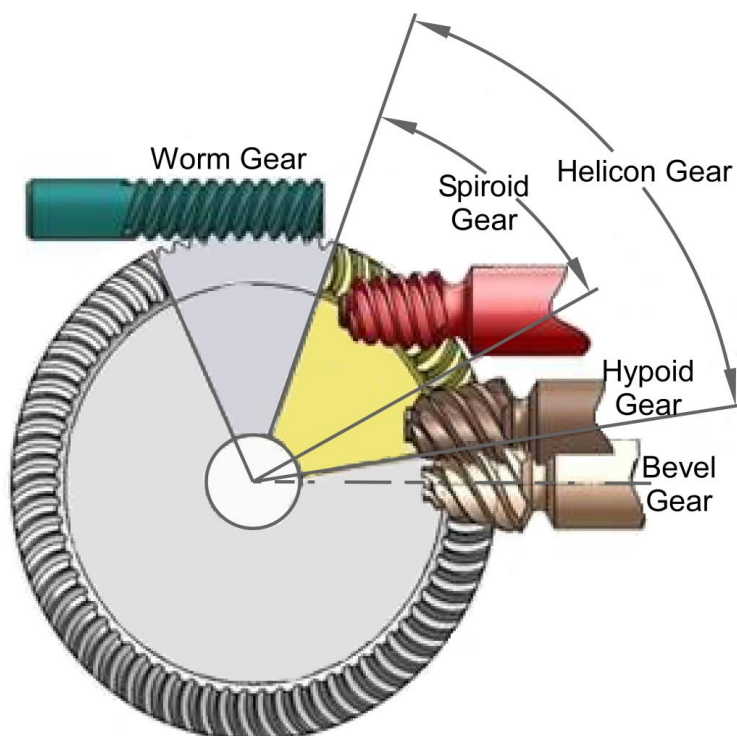


Σχήμα 2-3. Κατακόρυφη τοποθέτηση και πρόσδεση κινητήριου συστήματος στη δεύτερη άρθρωση – mock-up βασισμένο στον αριστερό βραχίονα του πρώτου ρομπότ).

Right angle spiroid gearbox

Το κιβώτιο σπειροειδούς τροχού εγκαθίσταται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που περιγράφηκε για το κιβώτιο κωνικών τροχών και προσφέρει την ίδια λειτουργικότητα. Η διαφορά τους φαίνεται στο Σχήμα 2-4. Προσφέρεται σε μικρότερες διαστάσεις από τα κιβώτια κωνικών τροχών, αποδεκτές για την υπό εξέταση

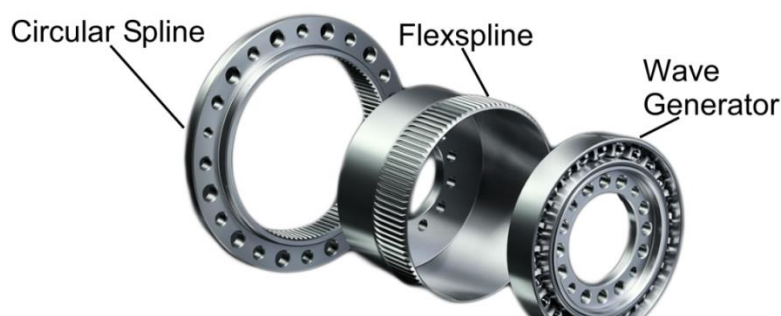
εφαρμογή, και παρουσιάζει σχετικά μικρή χάρη οδόντων. Παράλληλα, σε αντίθεση με τα κιβώτια κωνικών τροχών, γενικά έχει σημαντικό κόστος απόκτησης, εξαιτίας του οποίου δεν προτιμάται για την υπό μελέτη εφαρμογή.



Σχήμα 2-4. Σύγκριση μεταξύ Spiroid και Bevel gear.

Harmonic Drive

Ο όρος Harmonic Drive [32] αναφέρεται σε είδος μειωτήρα (Σχήμα 2-5). Χρησιμοποιούνται ευρέως όταν απαιτείται μηδενική χάρη οδόντων, εξαιρετική ακρίβεια και μεγάλη αξιοπιστία. Επιπλέον, δύνανται να επιτύχουν μεγάλους λόγους μείωσης και σε αρκετά μικρότερες διαστάσεις από αντίστοιχης μείωσης πλανητικούς μειωτήρες. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν την επιλογή τους ιδανική για την εξεταζόμενη εφαρμογή. Ο λόγος που τελικά δε χρησιμοποιήθηκαν είναι το υψηλό κόστος απόκτησης.



Σχήμα 2-5. Μειωτήρας τύπου Harmonic Drive.

2.2.4 Συστήματα μετάδοσης για τη δεύτερη άρθρωση

Κατόπιν της διαπίστωσης ότι, για να επιτευχθεί ευνοϊκό κέντρο μάζας και μικρότερη ροπή αδρανείας των βραχιόνων, θα πρέπει τα κινητήρια συστήματα να τοποθετηθούν επί του κυρίου σώματος του ρομπότ, εξετάζονται συστήματα μετάδοσης για τη δεύτερη άρθρωση. Στην περίπτωση της πρώτης άρθρωσης κρίνεται αποδεκτή η λύση της τοποθέτησης του κινητήριου συστήματός της επί του κατακόρυφου άξονα περιστροφής της. Ο τρόπος πρόσδεσης μελετάται σε επόμενο στάδιο. Ακολουθεί απαρίθμηση και ανάλυση των υπό εξέταση συστημάτων μετάδοσης κίνησης.

- Μετάδοση με νήματα.
- Ράβδοι ώθησης-έλξης.
- Ιμάντες χρονισμού.
- Μετάδοση με αλυσίδα.
- Μετάδοση με ελασματοταινία.
- Εύκαμπτοι άξονες.

Μετάδοση με νήματα

Η μετάδοση μέσω νημάτων αποτελεί λύση μικρού όγκου, χαμηλού κόστους και μέτριας πολυπλοκότητας. Προσφέρεται για εφαρμογές που δεν απαιτούν συνεχόμενη λειτουργία του μηχανισμού με νήματα. Όταν υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας, μεταδιδόμενης ροπής και αξιοπιστίας, η εν λόγω λύση δεν προσφέρει καλά αποτελέσματα, διότι δημιουργεί ανακρίβειες εξαιτίας μικρών γλιστρημάτων του τυλίγματος των νημάτων, η αντοχή των νημάτων ακριβείας (δηλαδή, των μη εκτατών) είναι περιορισμένη και παρουσιάζεται φθορά λόγω τριβής που οδηγεί στη σταδιακή καταστροφή τους.

Μετάδοση μέσω νημάτων χρησιμοποιείται επιτυχώς στους ρομποτικούς βραχίονες του πρώτου ρομπότ του εργαστηρίου. Εντούτοις, έχουν παρουσιαστεί τα προβλήματα αντοχής που οδήγησαν σε σπάσιμο των νημάτων κατά τη χρήση με αυξημένο φορτίο.

Ράβδοι ώθησης-έλξης

Οι μηχανισμοί με ράβδους ώθησης-έλξης²⁷ ενδείκνυνται για μετάδοση όταν αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις. Η λειτουργία τους βασίζεται στη μετάδοση κίνησης

²⁷ Push-Pull rods

σε σύνδεσμο μέσω ράβδων που οδηγούνται από κινητήριο σύστημα και συνδέονται με τον σύνδεσμο με αρθρώσεις. Παράδειγμα τέτοιου μηχανισμού σε εφαρμογή ρομποτικού βραχίονα φαίνεται στο Σχήμα 2-6. Ο όγκος της υλοποίησης είναι γενικά μεγάλος σε σχέση με τον όγκο άλλων, και αυξάνεται όσο μεγαλώνει το απαιτούμενο εύρος κίνησης για κάθε άρθρωση καθώς και ο αριθμός των συνδέσμων. Η κατασκευή μπορεί να γίνει αρκετά πολύπλοκη και η ακρίβεια εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα των αρθρώσεων. Για την υπό μελέτη περίπτωση, οι περιορισμοί όγκου και μάζας αποθαρρύνουν την επιλογή της εν λόγω προσέγγισης.



Σχήμα 2-6. Υλοποίηση ρομποτικού βραχίονα με ράβδους ώθησης-έλξης.

Ιμάντες χρονισμού

Η μετάδοση με ιμάντες χρονισμού²⁸ είναι κατάλληλη για μικρές έως μεγάλες ροπές, ανάλογα με το φάρδος του ιμάντα και το βήμα των οδόντων. Όσο μικρότερο είναι το βήμα, τόσο μειώνεται η ικανότητα μετάδοσης ροπής και αυξάνει η ακρίβεια λόγω της μείωσης της χάρης οδόντωσης. Επιπλέον, τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά εξαρτώνται άμεσα από το προφίλ των οδόντων, συνεπώς είναι ουσιώδες να γίνεται η σωστή επιλογή ανάλογα με την εφαρμογή. Τέλος, η σωστή λειτουργία του ιμάντα προϋποθέτει την κατάλληλη τάνυσή του. Η μετάδοση με ιμάντα για την εξεταζόμενη περίπτωση των ρομποτικών βραχιόνων, προσφέρει τα πλεονεκτήματα της μεγάλης ακρίβειας με σχετικά μικρή πολυπλοκότητα υλοποίησης, κόστος και όγκο. Μειονέκτημα αποτελεί η απαίτηση προστασίας από σκόνη, καθώς συσσωρευόμενη προκαλεί φθορά στον ιμάντα και στα συνεργαζόμενα με αυτόν οδοντωτά τύμπανα. Επιπλέον, ο ιμάντας και τα τύμπανα υφίστανται σταδιακή φθορά εξαιτίας των αναπτυσσόμενων τριβών και τυχαίων "γλιστρημάτων" κατά τη μεταξύ τους

²⁸ Timing belts

συνεργασία. Ωστόσο, η σωστή επιλογή και τάνυση του ιμάντα επιβραδύνει κατά πολύ το πρώτο και εξαλείφει το δεύτερο φαινόμενο.

Μετάδοση με αλυσίδα

Η μετάδοση μέσω αλυσίδας²⁹ βασίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας με αυτή του ιμάντα χρονισμού. Αν και δε χρήζει τάνυσης, απαιτεί μηδενική συντήρηση, δεν επηρεάζεται από σκόνη και παρουσιάζει μηδενική φθορά με το πέρασ του χρόνου, μειονεκτεί έναντι της υλοποίησης με ιμάντα χρονισμού για τη μελετώμενη εφαρμογή, καθώς προσφέρει κακή ακρίβεια εξαιτίας της μεγάλης χάρης οδόντωσης και το κόστος για σχετικά μικρό όγκο είναι μεγάλο.

Μετάδοση με ελασματοταινία

Η μετάδοση με μεταλλική ταινία³⁰ (Σχήμα 2-7) βασίζεται κατά κύριο λόγο σε συνεργασία τριβής λόγω μεγάλων δυνάμεων επαφής μεταξύ των επιφανειών ταινίας και τυμπάνου. Ενδείκνυται για εφαρμογές όπου απαιτείται μεταφορά μεγάλων ροπών, με μηδενική χάρη, μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία. Η εφαρμογή της, όμως, στην υπό εξέταση περίπτωση θα απαιτούσε πολύ στιβαρή κατασκευή, ώστε να είναι επιτεύξιμες οι απαιτούμενες δυνάμεις τάνυσης, αυξάνοντας κατά πολύ τη μάζα, τον όγκο και το κόστος για εδράσεις.



Σχήμα 2-7. Μετάδοση με ελασματοταινία.

²⁹ Chain transmission

³⁰ Metallic tape

Εύκαμπτοι άξονες

Οι εύκαμπτοι άξονες³¹ (Σχήμα 2-8) χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται μετάδοση ροπής ή/και περιστροφικής κίνησης, χωρίς να ενδιαφέρει η ακρίβεια (π.χ. εργαλεία χειρός, ηλεκτρικά παράθυρα, καθρέφτες αυτοκινήτων). Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η απλούστατη υλοποίηση άλλως πολύπλοκων κατασκευών. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θα είχε ίσως ενδιαφέρον η αξιοποίησή τους προς τοποθέτηση των κινητήριων συστημάτων των βραχιόνων σε βέλτιστη θέση, δηλαδή προς το κέντρο συμμετρίας του κυρίως σώματος τους ρομπότ. Εφόσον δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα – θα μπορούσε να γίνει μόνο με συνολικό ανασχεδιασμό του ρομπότ – δεν υφίσταται ο κυριότερος λόγος επιλογής τους. Εξάλλου η υλοποίηση με εύκαμπτους άξονες παρουσιάζει αυξημένο κόστος συγκριτικά με τις εναλλακτικές λύσεις και μεγάλες απώλειες, η δε έλλειψη εμπειρίας χρήσης τους σε παρόμοιες εφαρμογές αποτελεί επιπλέον ανασταλτικό παράγοντα.



Σχήμα 2-8. Εύκαμπτοι άξονες.

³¹ Flexible shafts

Ακολουθεί ο Πίνακας 2-1 όπου συνοψίζονται τα θετικά και τα αρνητικά για κάθε υλοποίηση που μελετήθηκε, ως προς την εφαρμογή στους ρομποτικούς βραχίονες του δεύτερου διαστημικού ρομπότ του εργαστηρίου. Τα θετικά συμβολίζονται με (+), τα θετικά που καθιστούν κάποια λύση σαφώς προτιμότερη των υπολοίπων ως προς ένα κριτήριο με (++), τα αρνητικά με (-) και τα αρνητικά που καθιστούν κάποια λύση σαφώς χειρότερη από τις υπόλοιπες ως προς ένα κριτήριο με (--).

Πίνακας 2-1. Αξιολόγηση συστημάτων μετάδοσης για τους ρομποτικούς βραχίονες.

| | Ακρίβεια | Όγκος | Πολυπλοκότητα κατασκευής | Αξιοπιστία | Κόστος | Σύνολο |
|----------------------------|----------|-------|--------------------------|------------|--------|--------|
| Μετάδοση με νήματα | + | + | + | -- | + | 2 |
| Ράβδοι ώθησης-έλξης | + | -- | - | + | - | -2 |
| Ιμάντες χρονισμού | + | + | + | - | + | 3 |
| Μετάδοση με αλυσίδα | - | - | ++ | + | - | 0 |
| Μετάδοση με ελασματοταινία | ++ | - | - | + | -- | -1 |
| Εύκαμπτοι άξονες | -- | + | + | + | - | 0 |

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, η λύση που ικανοποιεί καλύτερα τα κριτήρια επιλογής και τις απαιτήσεις που ετέθησαν για το σύστημα μετάδοσης είναι αυτή των ιμάντων χρονισμού.

2.3 Αρχικό σχέδιο λύσης

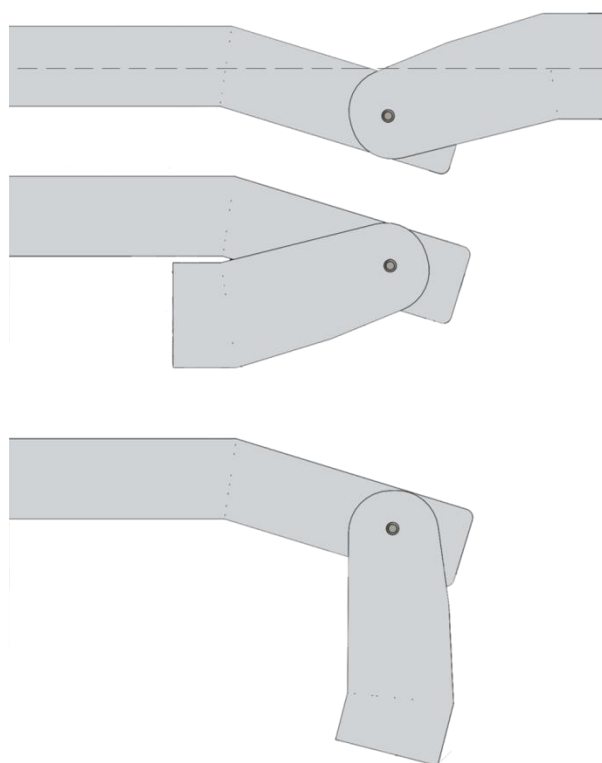
Σε αυτό το στάδιο εκπονείται ένα αρχικό σχέδιο της λύσης που επιλέχθηκε προηγουμένως. Συγκεκριμένα σχεδιάζονται τα εξής:

- Βασικός σκελετός των συνδέσμων του ρομποτικού βραχίονα.
- Σύστημα πρόσδεσης βραχιόνων στο κυρίως σώμα του ρομπότ.
- Σύστημα μετάδοσης.

2.3.1 Βασικός σκελετός των συνδέσμων των ρομποτικών βραχιόνων

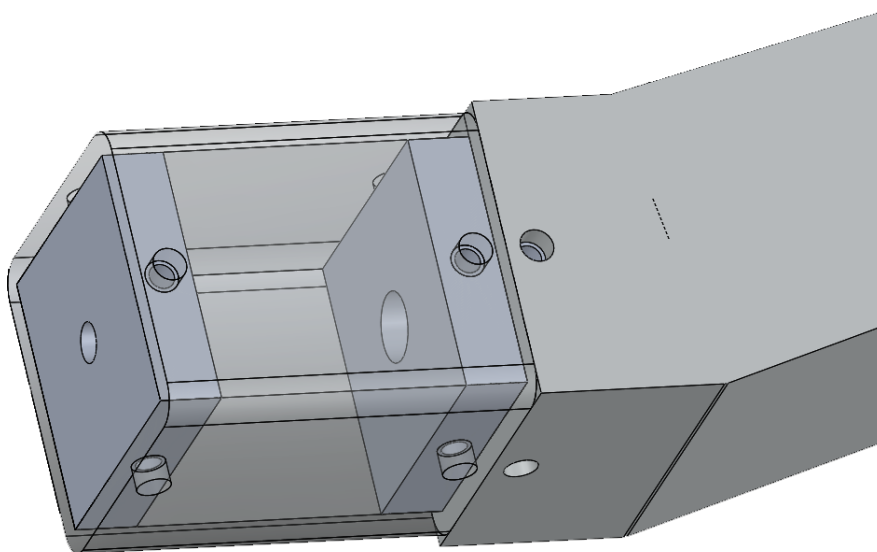
Με δεδομένη την επιλογή για μετάδοση με ιμάντες για τη δεύτερη άρθρωση κάθε βραχίονα, προκύπτει η ανάγκη επιλογής σκελετού για τον πρώτο σύνδεσμο που αφενός να επιτρέπει την κατάλληλη τοποθέτηση του ιμάντα και αφετέρου να τον προστατεύει από τη σκόνη. Οι δυνατές επιλογές είναι πλαίσια ορθογώνιας ή κυκλικής διατομής που πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές στιβαρότητας και αντοχής. Τα πλαίσια κυκλικής διατομής παρουσιάζουν καλύτερη κατανομή τάσεων αλλά και σημαντικές δυσκολίες στη ζητούμενη σύνδεση άρθρωσης με άλλα σώματα λόγω της γεωμετρίας τους. Γι' αυτό, προτιμάται πλαίσιο ορθογώνιας διατομής – ομοίως και για τον δεύτερο σύνδεσμο για λόγους κατασκευαστικής ομοιομορφίας και αισθητικής. Οι διαστάσεις θα καθοριστούν σε επόμενο στάδιο. Το επικρατέστερο υλικό για τον πλαίσιο είναι το αλουμίνιο, διότι προσφέρει τον βέλτιστο συνδυασμό στιβαρότητας, αντοχής, κατεργασιμότητας και κόστους. Επιπλέον, πλαίσια αλουμινίου είναι άμεσα διαθέσιμα στην αγορά σε μεγάλη ποικιλία διαστάσεων.

Ως προς τη μορφή του σκελετού των βραχιόνων, καθοριστικό παράγοντα αποτελεί η απαίτηση για δυνατότητα πλήρους αναδίπλωσης. Παράλληλα, είναι ζητούμενο ο άξονας συμμετρίας των συνδέσμων σε έκταση να ταυτίζεται με τον άξονα που διέρχεται από τις δύο αρθρώσεις και το άκρο του βραχίονα. Βάσει αυτών, προκύπτει ο σχεδιασμός που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-9.



Σχήμα 2-9. Μορφή σκελετού των συνδέσμων των βραχιόνων σε κάτοψη. Ο σκελετός ενός βραχίονα εμφανίζεται κατά σειρά σε πλήρη έκταση, σε πλήρη αναδίπλωση και σε τυχαία θέση.

Στο άκρο του βραχίονα θα προσαρμόζονται εξαρτήματα (π.χ. αρπάγη, probe) διαφορετικών διαστάσεων, με ή χωρίς παρεμβολή αισθητήρα δυνάμεων και ροπών [58]. Γι' αυτό τον λόγο, είναι απαραίτητη η δυνατότητα προσαρμογής του μήκους του δεύτερου συνδέσμου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του τεμαχίου που εμφανίζεται ημιδιαφανές στο Σχήμα 2-10. Το εν λόγω τεμάχιο προβλέπεται να αντικαθίσταται με παρόμοιο κατάλληλου μήκους, ανάλογα με το εξάρτημα που θα προσαρμόζεται στο άκρο του.

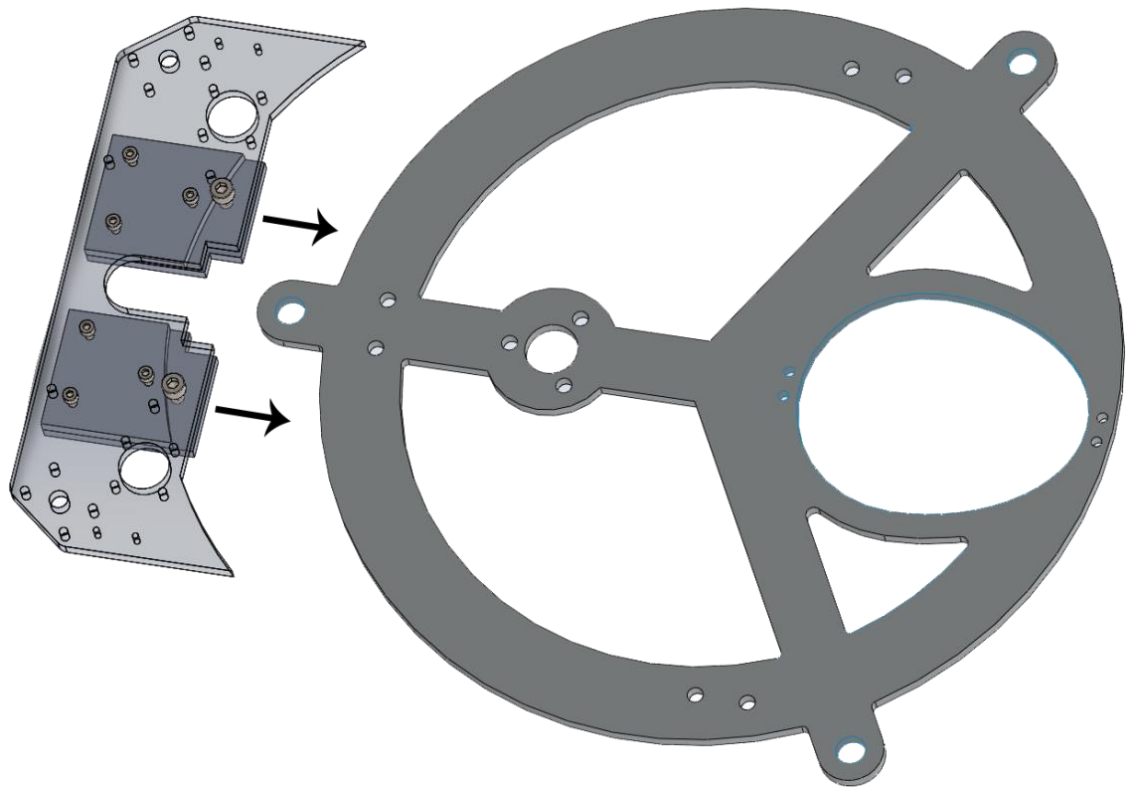


Σχήμα 2-10. Εξάρτημα προσαρμογής μήκους στο άκρο του δεύτερου συνδέσμου.

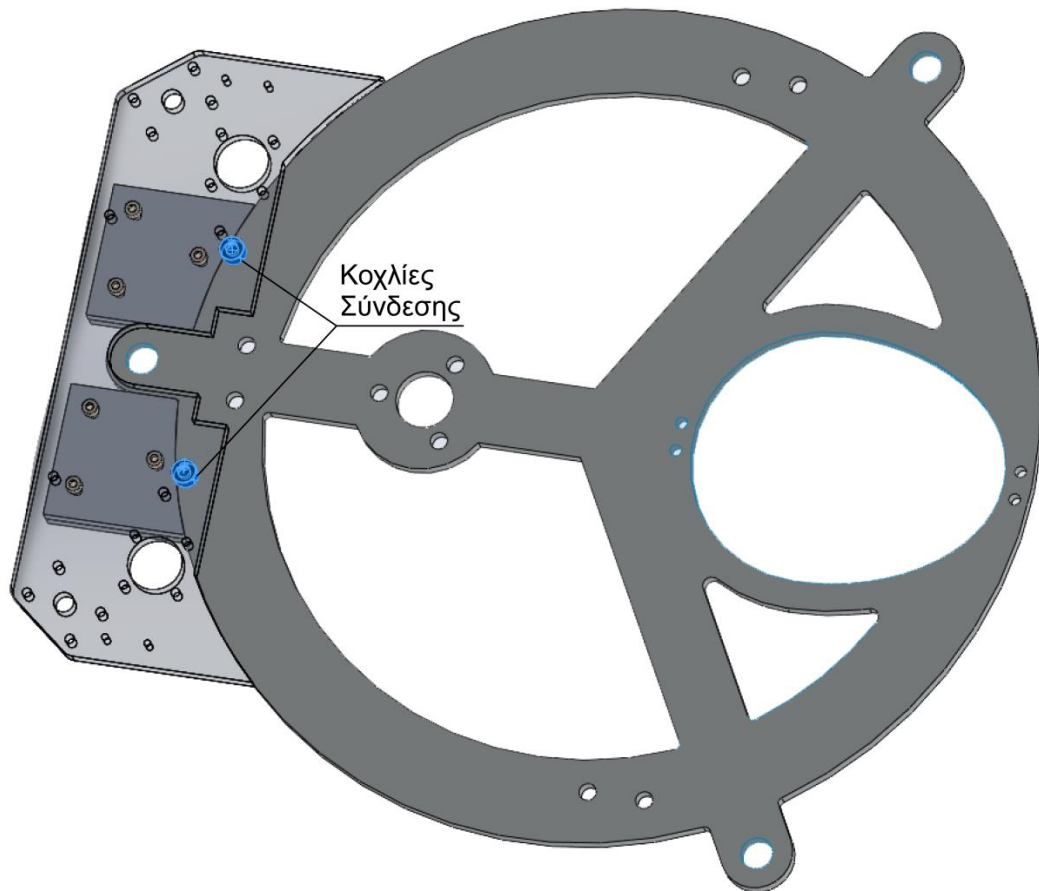
Λόγω της απαίτησης για δυνατότητα εσωτερικής οδήγησης των καλωδίων, ο σκελετός κάθε βραχίονα θα διαθέτει στην κάτω πλευρά του οπές εισόδου και εξόδου καλωδίων, καθώς και άλλες για χρήση με πλαστικά δετικά που θα επιτρέπουν τη στερέωση των καλωδίων. Οι θέσεις και οι διαστάσεις αυτών των οπών φαίνονται στα αρχεία SolidWorks που συμπεριλαμβάνονται στο CD της παρούσης εργασίας.

2.3.2 Σύστημα πρόσδεσης βραχιόνων στο κυρίως σώμα του ρομπότ

Λόγω της απαίτησης για εύκολη σύνδεση και αποσύνδεση του συστήματος των βραχιόνων από το κυρίως σώμα του ρομπότ και του ελάχιστου διαθέσιμου χώρου για πρόσδεση των βραχιόνων επί του κυρίως σώματος, επιλέχθηκε η λύση της σταθερής πρόσδεσης του συστήματος των βραχιόνων σε βάση, ως η μοναδική πληρούσα τις προδιαγραφές υπό τους φυσικούς περιορισμούς. Η βάση θα δένει σε προβλεπόμενη θέση στο σώμα του ρομπότ και η σύνδεση θα γίνεται με κοχλίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-11. Η λειτουργία της βάσης προϋποθέτει μεγάλη στιβαρότητα, η δε σύνδεση μέσω κοχλιών είναι τριβής/πίεσης. Γι' αυτούς τους λόγους, η βάση θα κατασκευαστεί από αλουμίνιο πάχους 5mm και οι κοχλίες θα είναι διαστάσεων M5 (Σχήμα 2-12).



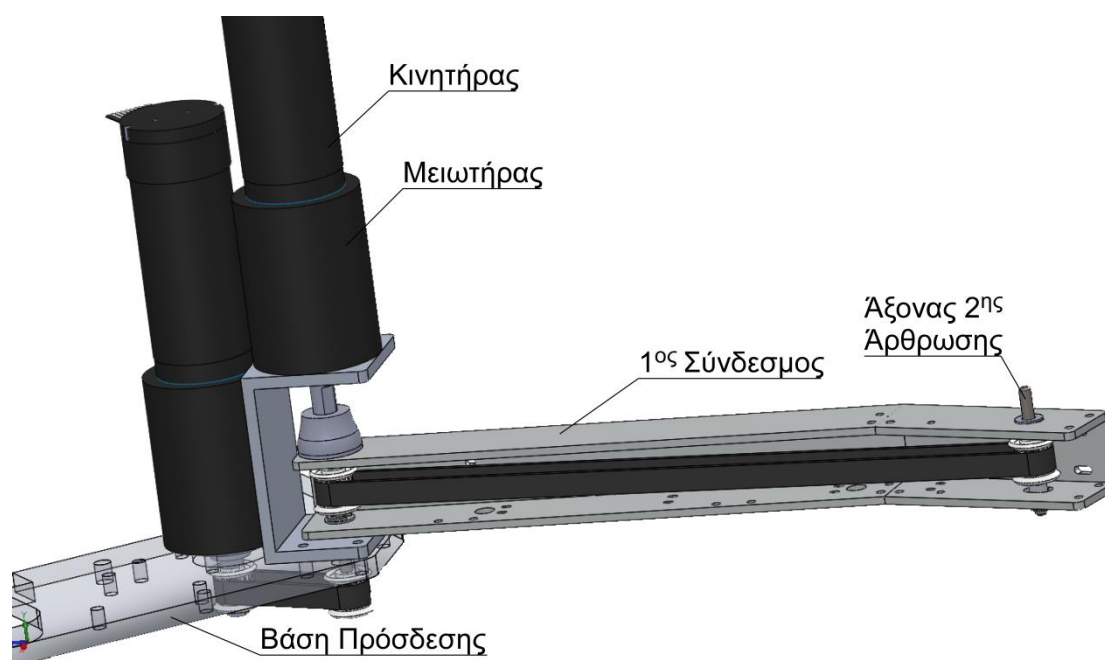
Σχήμα 2-11. Σύστημα πρόσδεσης βραχιόνων στο κυρίως σώμα του ρομπότ.



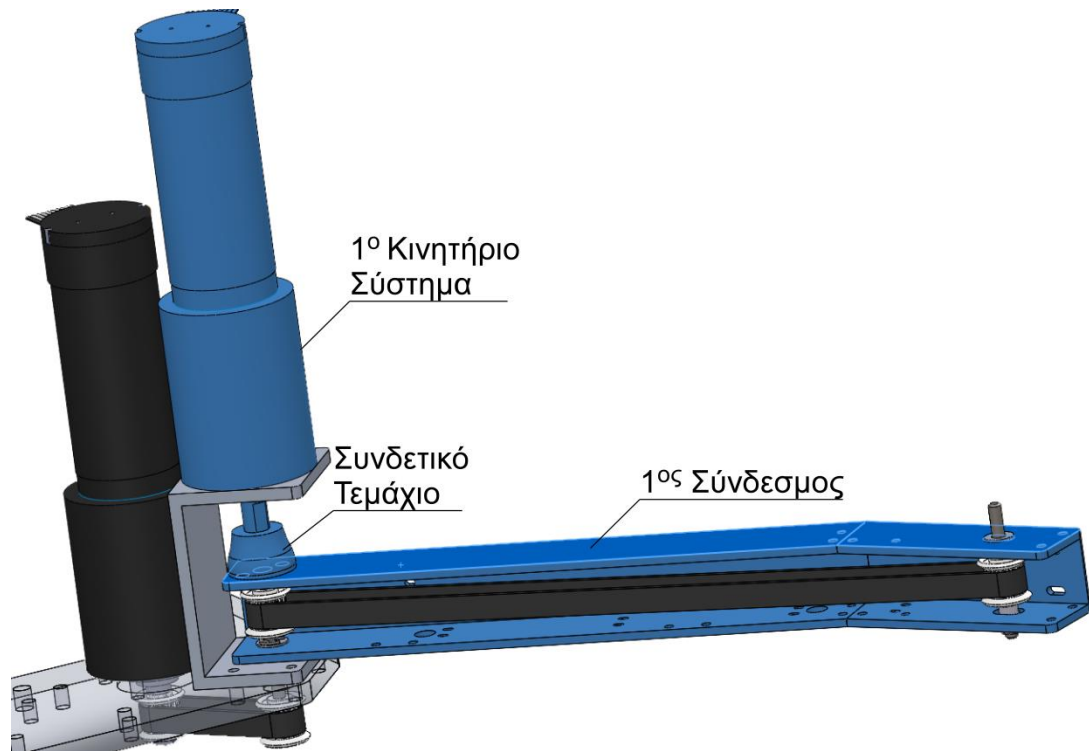
Σχήμα 2-12. Η βάση πρόσδεσης των βραχιόνων σε σύνδεση με το σασί του ρομπότ.

2.3.3 Σύστημα μετάδοσης

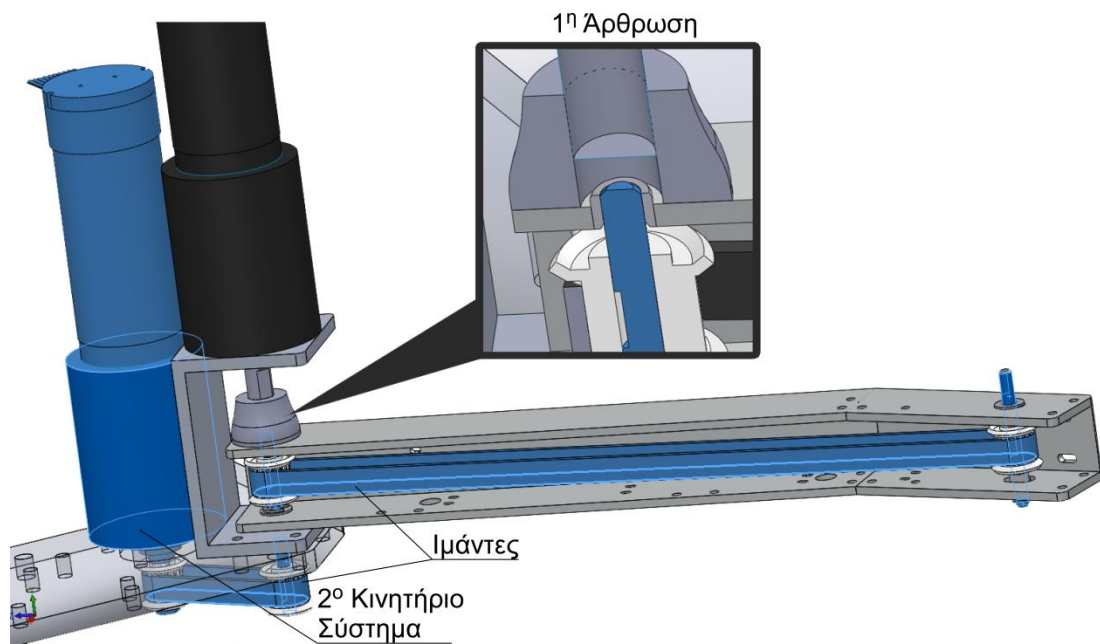
Σύμφωνα με τα προηγούμενα, τα κινητήρια συστήματα και των δύο αρθρώσεων κάθε ρομποτικού βραχίονα πρέπει να τοποθετηθούν επί της βάσης πρόσδεσης των βραχιόνων. Συγκεκριμένα, το κινητήριο σύστημα του πρώτου συνδέσμου πρέπει να είναι σε άμεση σύνδεση με την πρώτη άρθρωση και το κινητήριο σύστημα του δεύτερου συνδέσμου να συνδέεται με τη δεύτερη άρθρωση μέσω ιμάντων. Η ανωτέρω διατύπωση υπονοεί μία "ένα-προς-ένα" σχέση μεταξύ αρθρώσεων ή συνδέσμων και κινητήριων συστημάτων. Ακολούθως παρουσιάζεται μία υλοποίηση που επιτυγχάνει δύο ανεξάρτητους βαθμούς ελευθερίας για κάθε βραχίονα, που όμως απαιτεί τη λειτουργία και των δύο κινητήριων συστημάτων του για τη κίνηση του κάθε συνδέσμου – περαιτέρω επ' αυτού στο Κεφάλαιο 3. Η εν λόγω υλοποίηση φαίνεται σε διάφορες όψεις στα ακόλουθα σχήματα, όπως σχεδιάστηκε σε περιβάλλον SolidWorks:



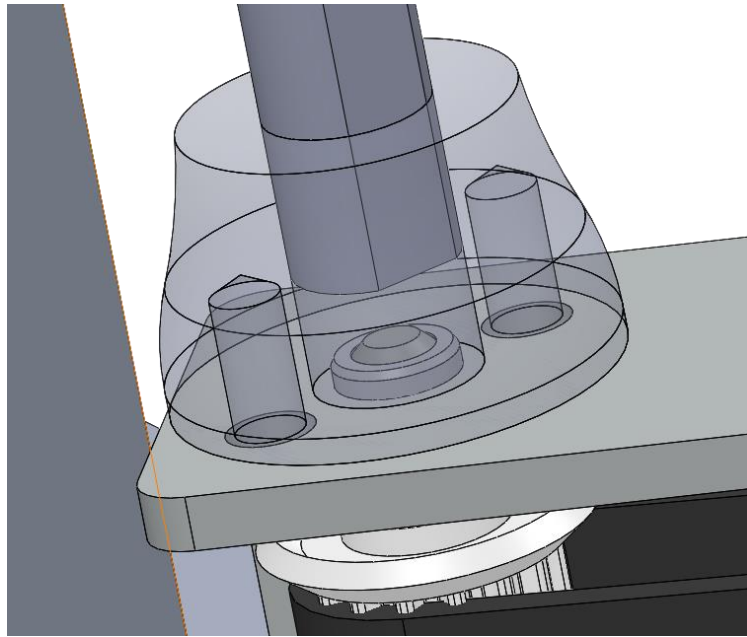
Σχήμα 2-13. Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται κατά σειρά: μέρος της βάσης πρόσδεσης των βραχιόνων, το κινητήριο σύστημα που συνδέεται μέσω ιμάντων με τη δεύτερη άρθρωση ενός βραχίονα (βλέπε και Σχήμα 2-15), το κινητήριο σύστημα που συνδέεται άμεσα με τον πρώτο σύνδεσμο του βραχίονα, ο πρώτος σύνδεσμος του βραχίονα και ο άξονας σύνδεσης του δεύτερου συνδέσμου.



Σχήμα 2-14. Φαίνεται ο πρώτος σύνδεσμος ενός βραχίονα, το κινητήριο σύστημα σε άμεση σύνδεση με αυτόν – από τούδε και εις το εξής θα αναφέρεται ως το «πρώτο κινητήριο σύστημα» – και το μεταξύ τους συνδετικό τεμάχιο (βλέπε και Σχήμα 2-16).

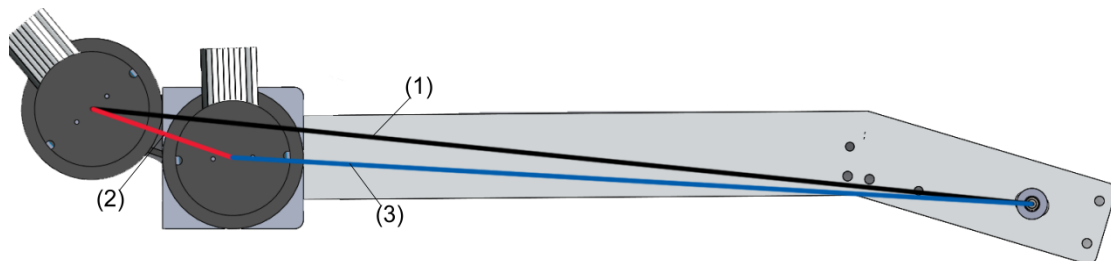


Σχήμα 2-15. Φαίνεται το κινητήριο σύστημα που συνδέεται μέσω ιμάντων με τη δεύτερη άρθρωση του βραχίονα – από τούδε και εις το εξής θα αναφέρεται ως το «δεύτερο κινητήριο σύστημα», ένας εκ των δύο ομόκεντρων αξόνων της πρώτης άρθρωσης – ο «δευτερεύον άξονας» της πρώτης άρθρωσης – και ο άξονας της δεύτερης άρθρωσης του βραχίονα. Στη μεγέθυνση φαίνεται ότι δεν υπάρχει άμεση μηχανική σύνδεση μεταξύ των δύο ομόκεντρων αξόνων της πρώτης άρθρωσης.



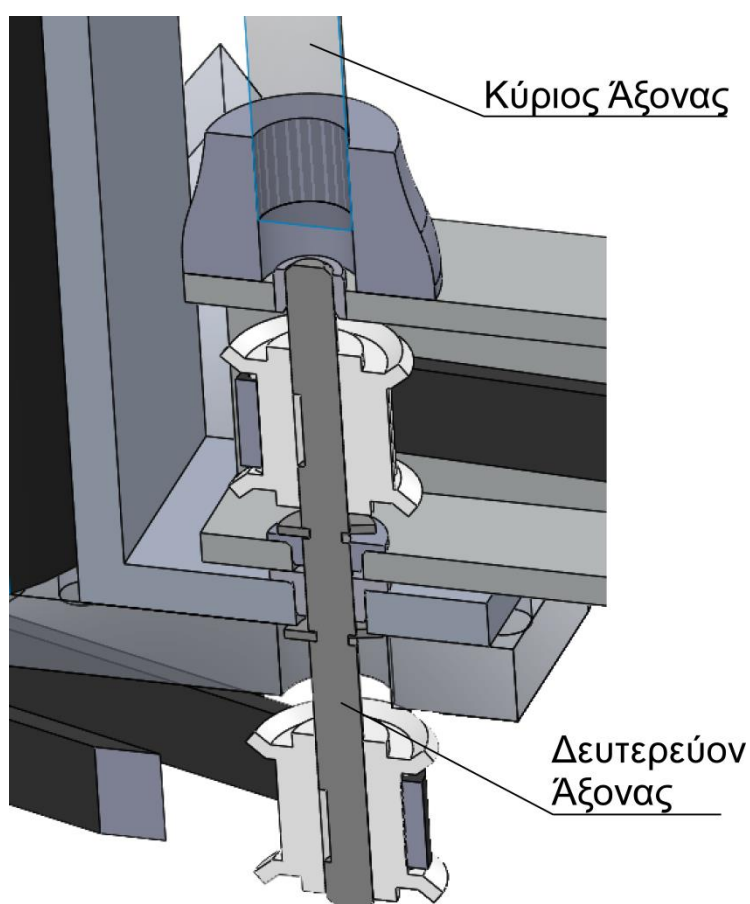
Σχήμα 2-16. Το τεμάχιο που παρουσιάζεται ημιδιαφανές συνδέει τον άξονα του πρώτου κινητήριου συστήματος με τον πρώτο σύνδεσμο του ρομποτικού βραχίονα.

Η λειτουργία των ιμάντων προϋποθέτει να βρίσκονται συνεχώς σε έκταση, πράγμα εφικτό μόνο σε συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ των περιστρεφόμενων αξόνων που συνδέουν. Στην περίπτωση του ρομποτικού βραχίονα που εξετάζεται, καθώς κινείται ο πρώτος σύνδεσμος, η απόσταση της δεύτερης άρθρωσης – και κατ' επέκταση και του άξονά της – από τον άξονα του δεύτερου κινητήριου συστήματος μεταβάλλεται συνεχώς. Συνεπώς είναι αδύνατη η άμεση μηχανική σύνδεση των δύο αυτών αξόνων με έναν ιμάντα. Επισημαίνεται ότι η εναλλακτική λύση της χρήσης ενός μόνο ιμάντα για την εν λόγω σύνδεση περιλαμβάνει ομοαξονική τοποθέτηση των δύο κινητήριων συστημάτων, πράγμα αδύνατο στη συγκεκριμένη εφαρμογή εξαιτίας του περιορισμένου χώρου καθ' ύψος κάτω από τη βάση, όπου και θα έπρεπε να τοποθετηθεί το δεύτερο κινητήριο σύστημα. Στο Σχήμα 2-17 που ακολουθεί, η προαναφερθείσα μεταβαλλόμενη απόσταση εμφανίζεται ως το ευθύγραμμο τμήμα (1).



Σχήμα 2-17. Τα άκρα των ευθύγραμμων τμημάτων (2) και (3) ταυτίζονται με τους άξονες τοποθέτησης των δύο ιμάντων.

Η μηχανική σύνδεση του δεύτερου κινητήριου συστήματος και της δεύτερης άρθρωσης του ρομποτικού βραχίονα είναι εφικτή με χρήση δύο οδοντωτών ιμάντων και ενός «δευτερεύοντος» άξονα τοποθετημένου ομοαξονικά της πρώτης άρθρωσης (Σχήμα 2-18). Ο ένας ιμάντας συνδέει την άτρακτο του δεύτερου κινητήριου συστήματος με τον δευτερεύοντα άξονα – Σχήμα 2-17, ευθύγραμμο τμήμα (2) – και ο άλλος ιμάντας συνδέει τον δευτερεύοντα άξονα με τη δεύτερη άρθρωση του βραχίονα – Σχήμα 2-17, ευθύγραμμο τμήμα (3). Ο δευτερεύον άξονας καθιστά εφικτή τη μηχανική σύζευξη των δύο ιμάντων, καθώς φέρει δύο οδοντωτά τύμπανα, το καθένα συνεργαζόμενο με διαφορετικό ιμάντα και αμφότερα στέρεα συναρμολοσμένα επ' αυτού μέσω ακτινικών κοχλιών.



Σχήμα 2-18. Ο κύριος και ο δευτερεύον άξονας της πρώτης άρθρωσης σε τομή.

2.4 Τελικό σχέδιο και προσδιορισμός προδιαγραφών εξαρτημάτων

Σκοπός είναι η τελειοποίηση του συνολικού σχεδίου της κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον περιορισμούς που σχετίζονται με τις διαστάσεις και τη λειτουργικότητα των απαραίτητων προτυποποιημένων εξαρτημάτων που θα προμηθευτούν από την αγορά. Συγκεκριμένα, οι επιπλέον περιορισμοί σχετίζονται με

τα οδοντωτά τύμπανα που θα χρησιμοποιηθούν, η κατασκευή των οποίων στο εργαστήριο, ιδιαίτερα σε μη πρότυπες διαστάσεις, κρίνεται εντελώς ασύμφορη. Αυτό, διότι αφενός απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για την κατασκευή τους, η απόκτηση του όποιου θα δικαιολογείτο εάν υπήρχε σκοπός μαζικής παραγωγής, αφετέρου διότι η κατασκευή και χρήση μη προτυποποιημένων οδοντωτών τυμπάνων θα οδηγούσε πιθανά σε υπερδιαστασιολόγηση ή σε ανάγκη διεξαγωγής επίπονης έρευνας προς διαπίστωση των κατάλληλων υλικών και διαστάσεων ως προς την αντοχή. Τα υπόλοιπα εξαρτήματα που θα προμηθευτούν και θα χρησιμοποιηθούν ως έχουν (π.χ. άξονες, ρουλεμάν) διατίθενται σε τόσο μεγάλη ποικιλία προδιαγραφών που δε δημιουργούν επιπλέον περιορισμούς ως προς το σχεδιασμό· τα δε τεμάχια αλουμινίου θα κατεργασθούν καταλλήλως με τον εξοπλισμό που διαθέτει το εργαστήριο³². Επισημαίνεται ότι οι τελικές διαστάσεις κάθε τεμαχίου φαίνονται στα σχετικά αρχεία SolidWorks που συμπεριλαμβάνονται στο CD της παρούσης εργασίας.

2.4.1 Επιλογή ιμάντων και συνεργαζόμενων οδοντωτών τυμπάνων

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή ιμάντων και οδοντωτών τυμπάνων αφορούν στη ζητούμενη ακρίβεια και αντοχή υπό τα αναπτυσσόμενα φορτία. Ως προς την ακρίβεια, οι καθοριστικοί παράγοντες είναι το βήμα οδόντωσης και το είδος του προφίλ οδόντωσης. Συγκεκριμένα, όσο μικρότερο είναι το βήμα τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια και μικρότερη η χάρη οδόντωσης. Παράλληλα, όμως, μειώνεται και η δυνατότητα μετάδοσης ροπής καθώς και η αντοχή του ιμάντα, ενώ αυξάνεται η πιθανότητα γλιστρήματος των τυμπάνων.

Το είδος του προφίλ οδόντωσης επηρεάζει την καταλληλότητα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Γενικά, οι ιμάντες με οδόντες κυκλικού προφίλ³³ παρουσιάζουν ελάχιστη χάρη οδόντωσης και προσφέρονται για εφαρμογές ακριβείας με μετάδοση ροπής μέσου μεγέθους. Οι ιμάντες με οδόντες τραπεζοειδούς προφίλ³⁴ ενδείκνυνται για εφαρμογές γενικού είδους, μετάδοσης μικρών έως πολύ μεγάλων ροπών και μεταφοράς φορτίων.

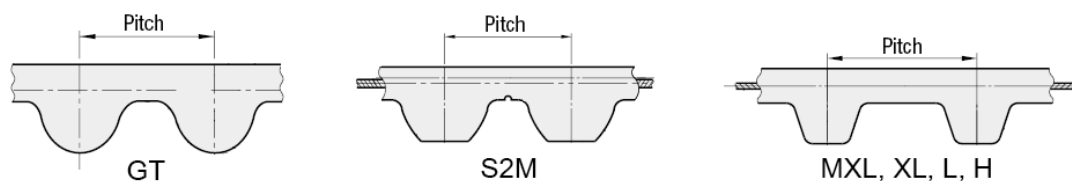
Στην υπό μελέτη εφαρμογή υπάρχουν απαιτήσεις μεγάλης ακρίβειας, ροπής και αντοχής σε διακοπτόμενη λειτουργία μικρής διάρκειας. Γι' αυτό το λόγο, το είδος ιμάντα που προκρίνεται ως καταλληλότερο είναι το S2M. Πρόκειται για ιμάντα

³² CNC φρέζα, συμβατικός τόννος και φρέζα, και ηλεκτρικό πριόνι σταθερής βάσης.

³³ Είδη: GT

³⁴ Είδη: MXL, XL, L, H, T5, T10

βήματος 2mm και οδόντωσης τραπεζοειδούς με στοιχεία κυκλικού προφίλ (Σχήμα 2-19), που προσφέρει τον ζητούμενο συνδυασμό χαρακτηριστικών.



Σχήμα 2-19. Είδη οδοντωτών ιμάντων.

Η επαλήθευση της καταλληλότητας της επιλογής του ιμάντα γίνεται με χρήση του σχετικού προγράμματος³⁵ επιλογής ιμάντων και συνεργαζόμενων τυμπάνων που παρέχει ο κατασκευαστής [4]. Τα αποτελέσματα προκύπτουν σύμφωνα με το σενάριο λειτουργίας που εισάγει ο χρήστης. Για να είναι ασφαλής η επιλογή πρέπει να εισαχθεί το δυσμενέστερο σενάριο:

Η μέγιστη ροπή στην έξοδο ενός μειωτήρα, τ_g^{\max} , περιορίζεται στα $6.5Nm$, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2.2.2. Τότε ο κινητήρας αποδίδει ροπή τ_{ma} :

$$\tau_{ma} = \frac{\tau_g^{\max}}{n \cdot \eta} \approx 49mNm \quad (2-6)$$

όπου n , ο λόγος μείωσης και η , ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του μειωτήρα. Σύμφωνα με την χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του κινητήρα (Σχήμα 2-20), η μέγιστη δυνατή ταχύτητα περιστροφής του με αυτό το φορτίο είναι $\omega_{ma} = 1950RPM$. Συνεπώς προκύπτει η αντίστοιχη ταχύτητα περιστροφής στην έξοδο του μειωτήρα, ω_g :

$$\omega_g = \frac{\omega_{ma}}{n} \approx 10RPM \quad (2-7)$$

Με δεδομένο ότι το σύστημα των μειωτήρων δε θα προσθέτει επιπλέον μείωση στο σύστημα³⁶, η ταχύτητα που προέκυψε αξιολογείται ως αρκούντως μεγάλη για την υπό εξέταση εφαρμογή και χρησιμοποιείται στο δυσμενέστερο σενάριο για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του ιμάντων.

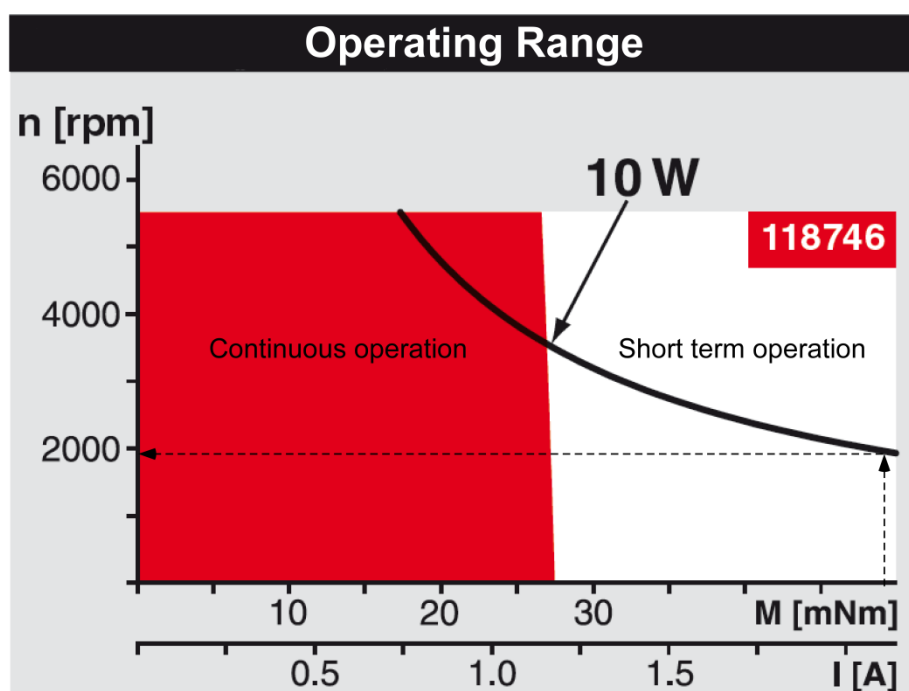
Τα δεδομένα του σεναρίου συμπληρώνουν οι εκτιμήσεις για τους συντελεστές φορτίου, ασφαλείας και προέντασης, που γίνονται σύμφωνα με τις οδηγίες του

³⁵ Timing Pulley Belt Selection Software

³⁶ Όλα τα οδοντωτά τύμπανα θα είναι ίδιας διαμέτρου και αριθμού οδόντων.

προγράμματος, καθώς και οι εκτιμήσεις για την απόσταση μεταξύ των αξόνων που συνδέουν οι ιμάντες.

Τα αποτελέσματα του προγράμματος για το δυσμενέστερο σενάριο προκρίνουν τη χρήση ιμάντων τύπου S2M ή S3M, με την πρώτη επιλογή ως οριακά αποδεκτή και τη δεύτερη ως ασφαλέστερη.³⁷ Εφόσον πρόκειται για το δυσμενέστερο σενάριο, η επιλογή των ιμάντων τύπου S2M κρίνεται ασφαλής. Εξάλλου, οι ιμάντες τύπου S3M παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη χάρη οδόντωσης από τους S2M, και η χρήση τους θα οδηγούσε σε κατασκευή μεγαλύτερων διαστάσεων.



Σχήμα 2-20. Η χαρακτηριστική λειτουργίας των χρησιμοποιούμενων κινητήρων.

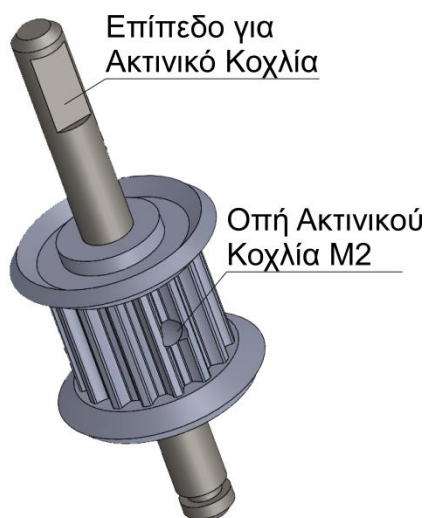
Με βάση τα ανωτέρω και ανατρέχοντας στους σχετικούς καταλόγους του προμηθευτή³⁸ προκρίνεται η χρήση τυμπάνων τύπου S2M, 15 οδόντων, για συνεργασία με ιμάντες S2M πλάτους 6mm³⁹. Ως προς την επιλογή του αριθμού οδόντων για τα τύμπανα ισχύει η γενική οδηγία να είναι ανά πάσα στιγμή τουλάχιστον έξι οδόντες κάθε τυμπάνου σε επαφή με τον ιμάντα. Τα συγκεκριμένα οδοντωτά τύμπανα διαθέτουν αξονική οπή 3mm, αλλά δεν προσφέρουν τρόπο σταθερής συναρμογής με άξονα. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να δημιουργηθεί ακτινική οπή με σπείρωμα σε κάθε τύμπανο, ώστε να είναι εφικτή η σταθερή συναρμογή επί

³⁷ Παρατηρήθηκε εξάρτηση του αποτελέσματος από τις επιλογές των συντελεστών.

³⁸ Misumi

³⁹ Η ακριβής επιλογή μήκους για τους ιμάντες προϋποθέτει καθορισμό άλλων στοιχείων (μήκος πρώτου συνδέσμου, προένταση, κ.α.) και γι' αυτό θα γίνει αργότερα.

του άξονα μέσω κοχλία M2, χωρίς κεφάλι (Σχήμα 2-21). Είναι ουσιώδες η κάθε οπή να γίνει σε κοιλάδα της οδόντωσης, ώστε ο ακτινικός κοχλίας να μην καταστρέψει πλήρως κάποιον οδόντα του τυμπάνου.



Σχήμα 2-21. Οδοντωτό τύμπανο σε συναρμογή ακτινικού κοχλία με άξονα.

Η ανωτέρω τεχνική συναρμογής δεν είναι εφικτή για την περίπτωση του τυμπάνου που πρέπει να προσαρμοστεί στον άξονα του δεύτερου κινητήριου συστήματος, καθώς ο άξονας του μειωτήρα είναι διαμέτρου 6mm, ενώ η αξονική οπή του τυμπάνου είναι 3mm. Σε αυτή την περίπτωση προκρίθηκε η λύση της διάνοιξης της αξονικής οπής του τυμπάνου μέχρι τη διάμετρο των 6mm και η σταθερή συναρμογή του επί του άξονα με χρήση κόλλας. Η αποσυναρμολόγηση μπορεί να γίνει με θέρμανση προς διάλυση της κόλλας, ωστόσο αυτό δε χρειάζεται για καμία εργασία συντήρησης ή αντικατάστασης εξαρτήματος της κατασκευής, πλην του ίδιου του οδοντωτού τυμπάνου. Επισημαίνεται ότι η χρήση ακτινικών κοχλιών μετά τη διάνοιξη της αξονικής οπής κατέστη αδύνατη εξαιτίας του μικρού παραμένοντος πάχους του τοιχώματος του τυμπάνου. Εξάλλου τα τύμπανα με αξονική οπή διαμέτρου 6mm και αυτά με αξονική οπή 3mm δεν διατίθενται με ίσο αριθμό οδόντων, συνεπώς η χρήση των πρώτων θα άλλαζε το συνολικό λόγο μείωσης του μηχανισμού, πράγμα ανεπιθύμητο.

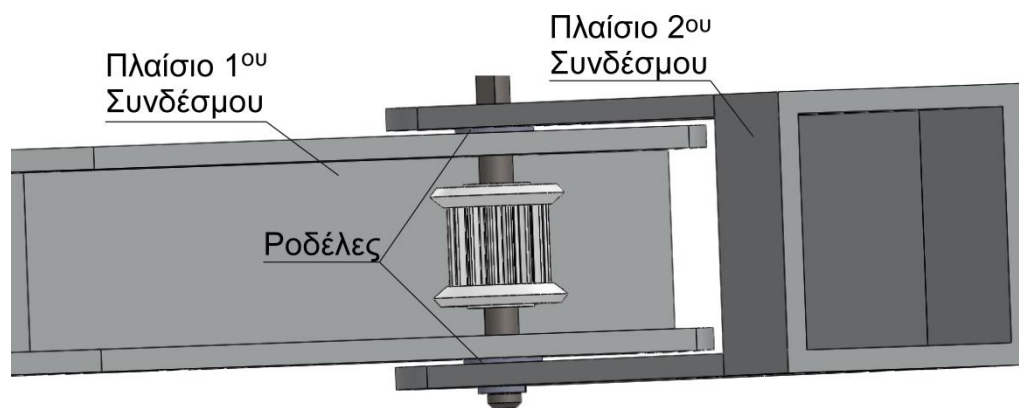
2.4.2 Προσδιορισμός διαστάσεων των συνδέσμων

Με δεδομένες τις εξωτερικές διαστάσεις των οδοντωτών τυμπάνων⁴⁰ και τις επιλογές ως προς τη μορφή του πλαισίου των συνδέσμων από το αρχικό σχέδιο λύσης,

⁴⁰ Διάμετρος 12mm, ύψος 11mm.

ακολουθεί ο ακριβής προσδιορισμός των διαστάσεων των συνδέσμων. Για τον προσδιορισμό του ύψους και του πάχους των συνδέσμων λαμβάνονται υπόψη και οι διαστάσεις των διαθέσιμων προτυποποιημένων πλαισίων αλουμινίου, εκ των οποίων θα κατασκευαστούν οι σύνδεσμοι με κατάλληλες κατεργασίες. Τελικά, προκρίνεται η χρήση πλαισίων αλουμινίου τετράγωνης διατομής με πάχος τοιχωμάτων 2mm, τα οποία θα κοπούν κατάλληλα από τη μία πλευρά τους, ώστε να αποκτήσουν τη ζητούμενη διατομή τύπου Π. Το πλαίσιο άνοιγμα των πλαισίων διευκολύνει την τοποθέτηση των απαραίτητων εξαρτημάτων στο εσωτερικό τους – καλύπτεται από καπάκι αλουμινίου πάχους 1mm (δε φαίνεται στα σχήματα), ώστε ο μηχανισμός του ιμάντα να είναι προστατευμένος.

Για τον πρώτο σύνδεσμο οι εξωτερικές διαστάσεις του πλαισίου καθ' ύψος είναι 20mm και για τον δεύτερο 25mm. Συνεπώς, το πλαίσιο του δεύτερου συνδέσμου έχει εσωτερικό ύψος 21mm, επιτρέποντας έτσι την κατάλληλη συνεργασία για δημιουργία άρθρωσης με το πλαίσιο του πρώτου συνδέσμου (Σχήμα 2-22). Στην ελεύθερη απόσταση 1mm εσωτερικά του πλαισίου των 25mm διακρίνονται δύο ροδέλες ένθεν κακείθεν του πλαισίου των 20mm, πάχους 0.5mm έκαστη, οι οποίες λειτουργούν ως εδράσεις και αποστάτες μεταξύ των επιφανειών των δύο συνδέσμων και επιτρέπουν την απρόσκοπτη περιστροφή τους.



Σχήμα 2-22. Συνεργασία των δύο συνδέσμων ενός βραχίονα – δεύτερη άρθρωση. Στα αριστερά ο πρώτος και στα δεξιά ο δεύτερος σύνδεσμος.

Το πλάτος του πρώτου συνδέσμου είναι 19mm και σχεδιάστηκε ώστε να προσφέρει επαρκή χώρο για την κατάλληλη τοποθέτηση του ιμάντα – περισσότερα επ' αυτού στη συνέχεια. Επίσης επιτρέπει την τοποθέτηση μεγαλύτερων τυμπάνων, διαμέτρου μέχρι και 14mm και 18 οδόντων για τύπο S2M. Το πλάτος του δεύτερου συνδέσμου είναι 25mm για λόγους ομοιομορφίας με τον αισθητήρα δυνάμεων και ροπών που θα χρησιμοποιηθεί, ο οποίος είναι τετραγωνικής διατομής με πλευρά μήκους 25mm.

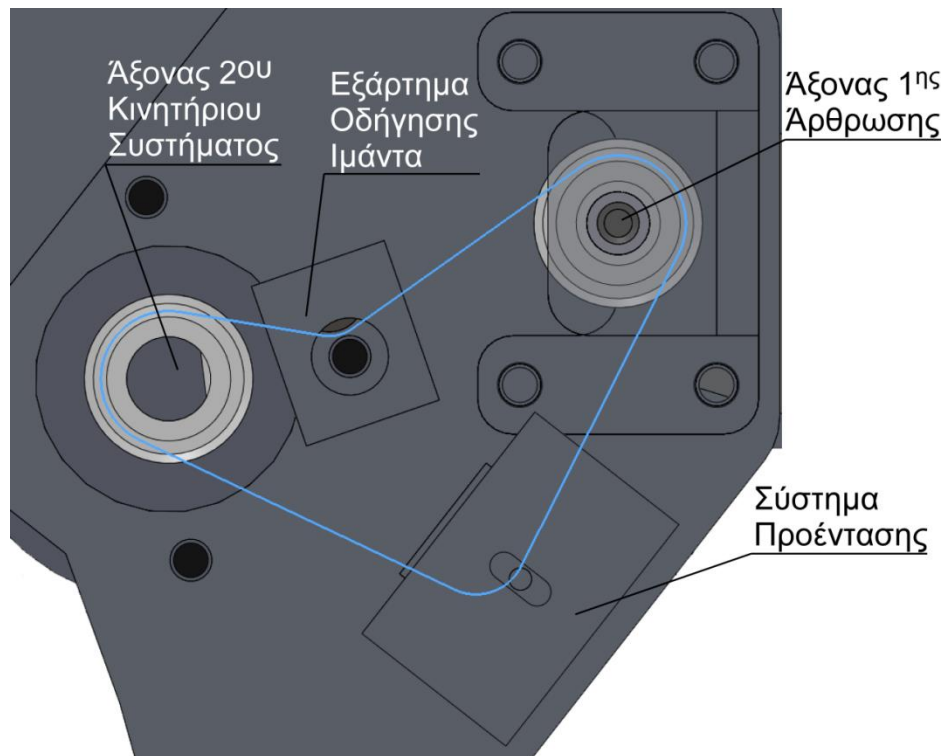
Τα μήκη των δύο συνδέσμων κάθε βραχίονα ορίζονται ως εξής: Για τον πρώτο σύνδεσμο είναι η απόσταση μεταξύ των αξόνων της πρώτης και της δεύτερης άρθρωσης και για τον δεύτερο σύνδεσμο, η απόσταση μεταξύ του άξονα της δεύτερης άρθρωσης και του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα. Το μήκος του πρώτου συνδέσμου μεταβάλλεται από 180mm έως 183mm, λόγω του τρόπου λειτουργίας του συστήματος προέντασης του ιμάντα που διατρέχει τον σύνδεσμο (παρουσιάζεται στη συνέχεια). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (Κεφάλαιο 2.3.1), το μήκος του δεύτερου συνδέσμου προσαρμόζεται στις εκάστοτε ανάγκες με αλλαγή ενός εξαρτήματος. Χάριν αυτής της υλοποίησης, θεωρητικά δεν υπάρχει άνω όριο μήκους για τον δεύτερο σύνδεσμο, το δε ελάχιστο μήκος του προκύπτει όταν ο αισθητήρας δυνάμεων και ροπών προσδεθεί απευθείας στο κυρίως τεμάχιο του συνδέσμου, παραλείποντας το εξάρτημα προσαρμογής μήκους, και είναι 115mm⁴¹. Η μικρή τιμή του ελάχιστου μήκους του δεύτερου συνδέσμου που επετεύχθη προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τις διαστάσεις των εργαλείων που θα μπορούν να προσδεθούν στο άκρο κάθε βραχίονα και ως προς τη δυνατότητα μεταβολής του προσπελάσιμου χώρου εργασίας του συστήματος – περισσότερα επ’ αυτού στο Κεφάλαιο 4.3.4).

2.4.3 Συστήματα προέντασης ιμάντων

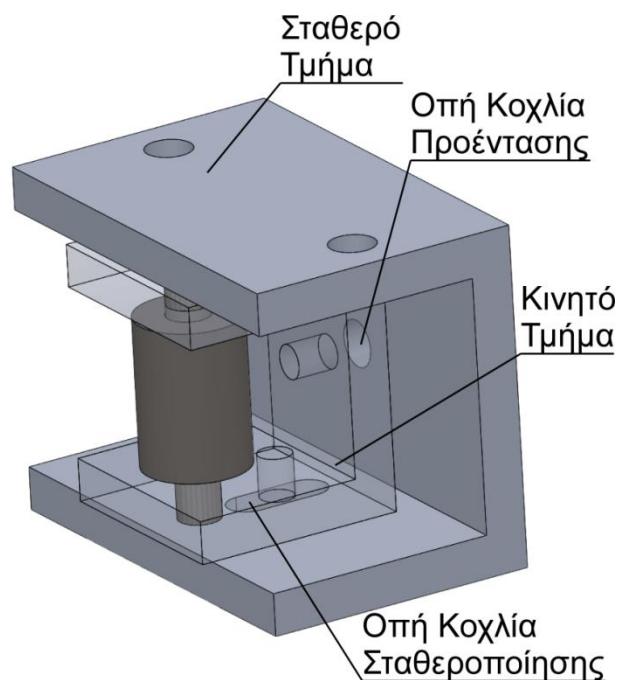
Η ορθή λειτουργία των ιμάντων χρονισμού και η συνεργασία τους με τα οδοντωτά τύμπανα προϋποθέτει την κατάλληλη τάνυση των πρώτων, πράγμα που επιτυγχάνεται με χρήση συστημάτων προέντασης ιμάντων. Στην περίπτωση του ιμάντα που βρίσκεται στο κάτω μέρος της βάσης πρόσδεσης των βραχιόνων (Σχήμα 2-23) χρησιμοποιείται το σύστημα προέντασης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-24. Οι δύο οπές στο κινητό τμήμα φέρουν σπείρωμα για κοχλίες M2 που συνδέουν αυτό με το σταθερό τμήμα, το οποίο είναι συνδεδεμένο σε σταθερή θέση στη κάτω μεριά της βάσης. Ο αξονίσκος που διακρίνεται συνδέεται μόνο με το κινητό τμήμα – γύρω του περιστρέφεται ελεύθερα λείο τύμπανο διαμέτρου 5mm. Βιδώνοντας τον κοχλία προέντασης, επιτυγχάνεται η μετακίνηση του κινητού τμήματος μετά του τυμπάνου ως προς το σταθερό τμήμα. Κατ’ αυτό τον τρόπο, ρυθμίζεται η τάνυση του ιμάντα. Μόλις επιτευχθεί η επιθυμητή τάνυση βιδώνεται ο κοχλίας σταθεροποίησης, ώστε να σταθεροποιηθεί πλήρως το σύστημα προέντασης στη συγκεκριμένη θέση. Το εύρος κίνησης του τυμπάνου προέντασης που επιτρέπει το σύστημα είναι 3mm. Με το

⁴¹ 53mm, εάν παραλειφθεί και ο αισθητήρας.

τύμπανο να μετακινείται μεταξύ των ακραίων θέσεων του, η μέση γραμμή του ιμάντα λαμβάνει τιμές μήκους μεταξύ 110mm και 114mm. Συνεπώς, επιλέγεται ιμάντας μήκους 112mm. Το εξάρτημα οδήγησης ιμάντα χρησιμοποιείται προς αύξηση του αριθμού των οδόντων των οδοντωτών τροχών σε επαφή με τον ιμάντα.

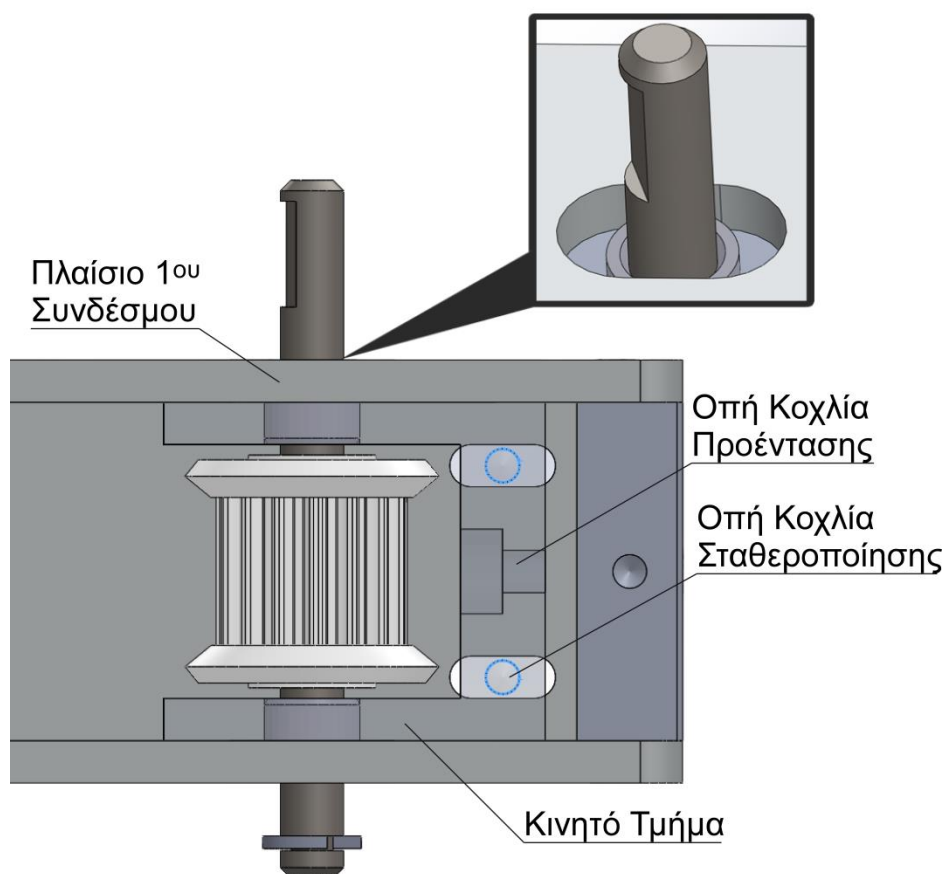


Σχήμα 2-23. Άνοψη της βάσης πρόσδεσης των βραχιόνων. Ο ιμάντας φαίνεται ως μπλε γραμμή.



Σχήμα 2-24. Σύστημα προέντασης στο κάτω μέρος της βάσης πρόσδεσης. Το Κινητό Τμήμα του συστήματος εμφανίζεται ημιδιαφανές.

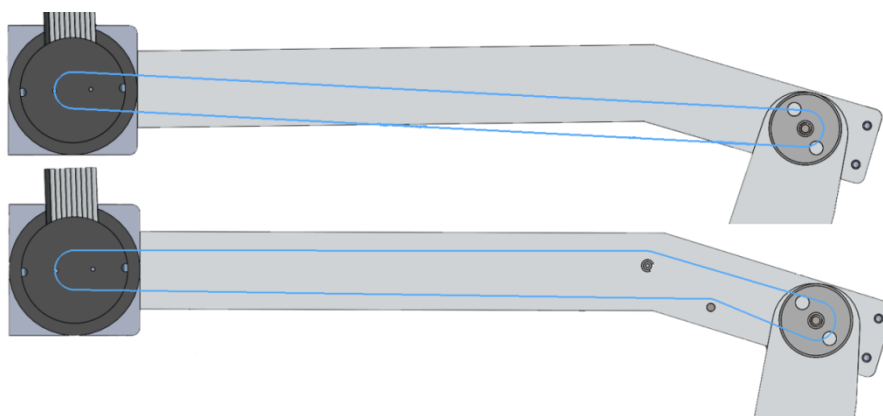
Στην περίπτωση του ιμάντα που βρίσκεται εντός του πρώτου συνδέσμου του βραχίονα χρησιμοποιείται το σύστημα προέντασης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-25. Η γενική αρχή λειτουργίας είναι παρόμοια αυτής που περιγράφηκε προηγουμένως. Η διαφορά είναι ότι σε αυτή την περίπτωση μετακινείται ο άξονας της δεύτερης άρθρωσης προς επίτευξη της ζητούμενης προέντασης – κατά συνέπεια, αλλάζει και το μήκος του πρώτου συνδέσμου ως η απόσταση μεταξύ των δύο αρθρώσεων. Με τον άξονα της άρθρωσης να μετακινείται μεταξύ των ακραίων θέσεων του⁴², η μέση γραμμή του ιμάντα λαμβάνει τιμές μήκους μεταξύ 393mm και 399mm. Συνεπώς, επιλέγεται ιμάντας μήκους 396mm. Μόλις επιτευχθεί η επιθυμητή προένταση, το σύστημα σταθεροποιείται μέσω κοχλιών M2 οπές που φαίνονται στο Σχήμα 2-25. Επισημαίνεται ότι η εν λόγω λύση προέντασης επιλέχθηκε ως η μοναδική συμβατή με τον περιορισμένο διαθέσιμο χώρο στο εσωτερικό του συνδέσμου.



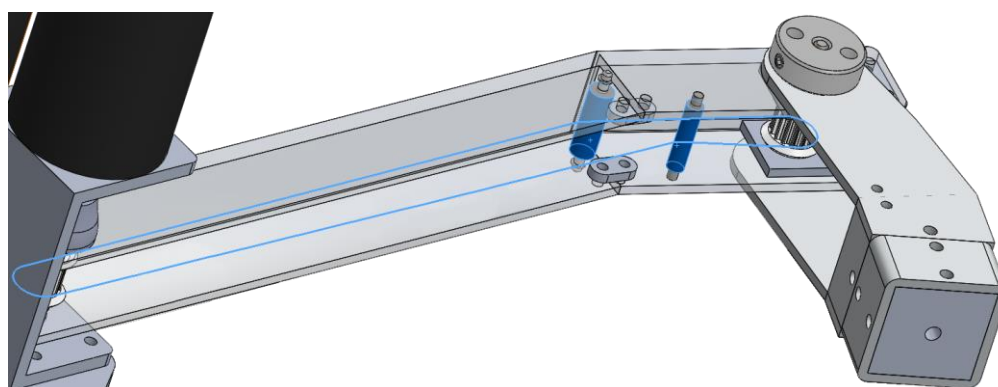
Σχήμα 2-25. Σύστημα προέντασης στη δεύτερη άρθρωση. Στη λεπτομέρεια εντός πλαισίου διακρίνεται μια οβάλ σχήματος οπή που φέρει ο πρώτος σύνδεσμος, η οποία επιτρέπει τη μετακίνηση του άξονα της δεύτερης άρθρωσης.

⁴² Το εύρος μετατόπισης είναι 3mm.

Επιπλέον, ο περιορισμένος χώρος δημιουργεί ανάγκη για κατάλληλη «οδήγηση» του ιμάντα ώστε να παραμένει στο εσωτερικό του πλαισίου του πρώτου συνδέσμου (Σχήμα 2-26), χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να ακουμπάει στα τοιχώματά του και να φθείρεται κατά τη λειτουργία του μηχανισμού. Η οδήγηση επιτυγχάνεται με χρήση δύο λείων τυμπάνων όπως φαίνεται Σχήμα 2-27. Τα τύμπανα είναι πλαστικά για μείωση της πιθανότητας πρόκλησης φθοράς στον ιμάντα. Για το τύμπανο που τοποθετείται εσωτερικά του ιμάντα χρησιμοποιείται άξονας με δακτυλίδια συγκράτησης, ώστε να είναι εύκολη η αποσυναρμολόγησή του προς αντικατάσταση του ιμάντα σε περίπτωση που χρειαστεί. Για το τύμπανο που τοποθετείται εξωτερικά του ιμάντα ο άξονας είναι πακτωμένος επί του πλαισίου του πρώτου συνδέσμου, αφενός επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής της προηγούμενης λύσης⁴³, αφετέρου επειδή δεν προβλέπεται να υπάρξει ανάγκη αποσυναρμολόγησής του.



Σχήμα 2-26. Οδήγηση του ιμάντα εντός του πλαισίου του πρώτου συνδέσμου. Ο ιμάντας φαίνεται ως μπλε γραμμή, πάνω χωρίς οδήγηση και κάτω με.

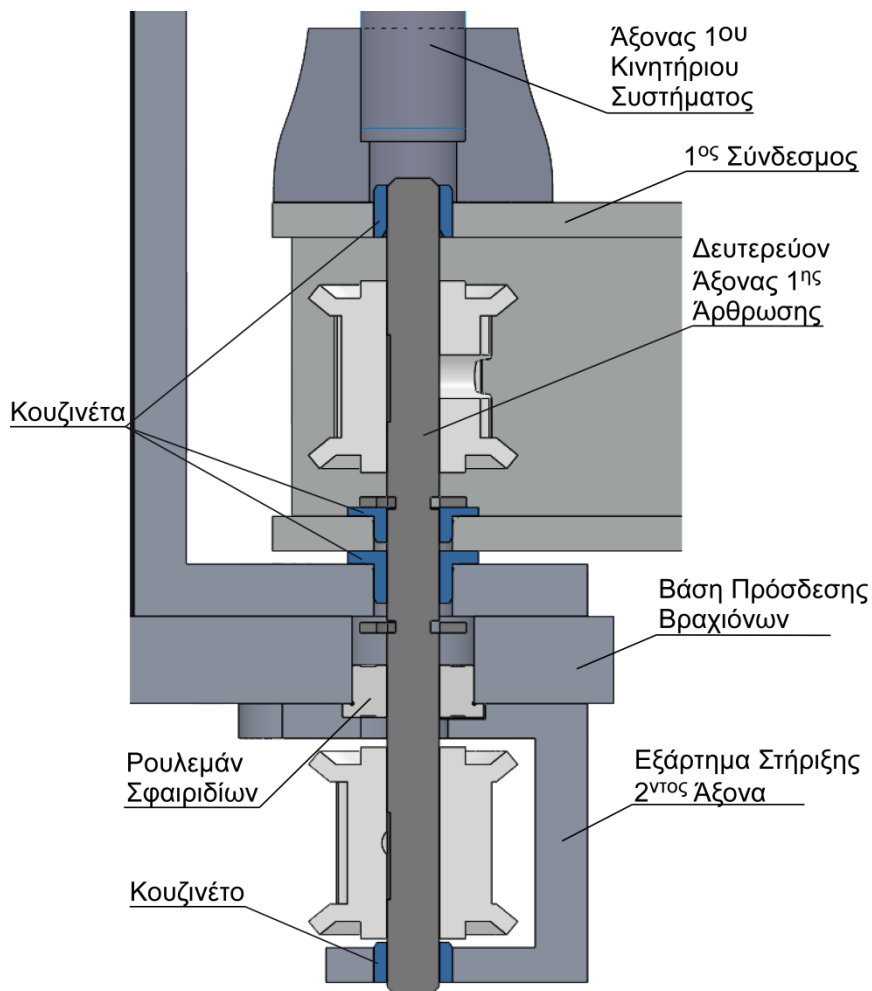


Σχήμα 2-27. Τα δύο τύμπανα οδήγησης του ιμάντα τονισμένα με μπλε χρώμα εντός του πλαισίου του πρώτου συνδέσμου. Ο ιμάντας φαίνεται ως μπλε γραμμή.

⁴³ Ο άξονας με δακτυλίδια συγκράτησης θα προεξείχε από την πάνω και κάτω μεριά του πλαισίου του πρώτου συνδέσμου και θα εμπόδιζε την πλήρη αναδίπλωση του δεύτερου συνδέσμου.

2.4.4 Εδράσεις αξόνων των αρθρώσεων

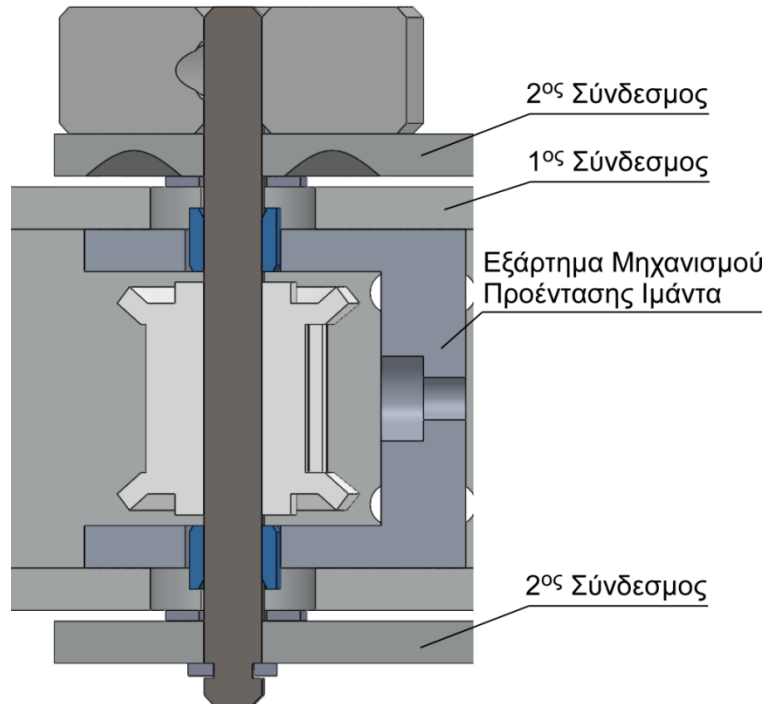
Σκοπός είναι η επίτευξη κατά το δυνατόν μικρότερων τριβών στις αρθρώσεις, πράγμα που επιτυγχάνεται μέσω ελαχιστοποίησης του εμβαδού των επιφανειών που βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους και χρήσης κατάλληλων ρουλεμάν. Ως επί το πλείστον, προκρίθηκε η χρήση πλαστικών κουζινέτων υψηλών επιδόσεων και αντοχής⁴⁴, επειδή είναι διαθέσιμα σε πολύ μικρότερες διαστάσεις από τα ρουλεμάν με σφαιρίδια και εγκαθίστανται εύκολα⁴⁵. Εξάλλου, οι μικρές ταχύτητες περιστροφής που θα αναπτύσσονται καθιστούν την εν λόγω επιλογή ασφαλή. Επιπλέον, για τη στήριξη του δευτερεύοντος άξονα της πρώτης άρθρωσης επί της βάσης, χρησιμοποιείται ένα ρουλεμάν σφαιριδίων. Ακολουθούν τα σχετικά σχήματα (Σχήμα 2-28, Σχήμα 2-29).



Σχήμα 2-28. Πρώτη άρθρωση σε τομή. Τονισμένα με μπλε χρώμα τα κουζινέτα.

⁴⁴ Iglidur G: The all-rounder, Iglus.

⁴⁵ Με σφιχτή συναρμογή μεταξύ της εξωτερικής τους επιφάνειας και του εσωτερικού της οπής όπου τοποθετούνται.



Σχήμα 2-29. Δεύτερη άρθρωση σε τομή. Τονισμένα με μπλε χρώμα τα κουζινέτα.

2.5 Κατασκευή εξαρτημάτων

Όσα εξαρτήματα δεν είναι δυνατό να προμηθευτούν από την αγορά κατασκευάστηκαν εξολοκλήρου με χρήση των μηχανών και του εξοπλισμού του εργαστηρίου. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιήθηκε το σύστημα κατεργασίας CNC⁴⁶ ώστε να επιτευχθεί η ζητούμενη κατασκευαστική ακρίβεια – επικουρικά για κάποιες εργασίες χρησιμοποιήθηκε ο συμβατικός τόρνος. Ακολουθεί η συνοπτική παράθεση της γενικής διαδικασίας για κατεργασίες σε CNC φρέζα, καθώς η εκτενέστερη αναφορά στην κατασκευή κάθε τεμαχίου είναι εκτός του σκοπού της παρούσης εργασίας.

Καταρχάς δημιουργείται ο κώδικας προγραμματισμού της μηχανής σε γλώσσα G-code [31] για τη ζητούμενη σειρά κατεργασιών. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα επέκτασης του SolidWorks, το SolidCAM. Το περιβάλλον του SolidCAM εμφανίζεται και χρησιμοποιείται εντός του SolidWorks, αναγνωρίζοντας πλήρως τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμένου τεμαχίου. Επιγραμματικά, αναφέρονται τα βήματα για την εξαγωγή προγράμματος G-code μέσω του SolidCAM για τη CNC εργαλειομηχανή Haas mini-mill:

⁴⁶ Haas mini-mill

- Άνοιγμα νέας σειράς εργασιών milling.
- Επιλογή μηχανής. Για χρήση μέγγενης επί της τραπέζης της μηχανής επιλέγεται "gmilling Haas 3x". Για χρήση του πλαϊνού τσοκ επιλέγεται "gmill Haas 4x eval"
- Προσδιορισμός συστήματος συντεταγμένων επί του σχεδιασμένου τεμαχίου, λαμβάνοντας υπόψη τη μελλοντική τοποθέτησή του στη μηχανή. Εάν χρειάζεται είναι δυνατό να ορισθούν άνω του ενός συστήματα συντεταγμένων.
- Προσδιορισμός της γεωμετρίας του τεμαχίου προς κατεργασία (stock).
- Επιλογή του σχεδιασμένου τεμαχίου, δηλαδή της γεωμετρίας που είναι επιθυμητό να προκύψει ως αποτέλεσμα των κατεργασιών (target).
- Προσδιορισμός εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν. Συγκεκριμένα ορίζεται το είδος κάθε εργαλείου (π.χ. drill, center drill, end mill, ball nose mill ...) και η διάμετρος της κοπτικής μεριάς του.
- Εισαγωγή των απαιτούμενων κατεργασιών με τη σειρά που πρόκειται να εκτελεστούν.
 - Επιλογή είδους κατεργασίας (π.χ. drilling, face, profile, pocket ...).
 - Επιλογή γεωμετρίας κατεργασίας (π.χ., για drilling μία σειρά οπών).
 - Επιλογή εργαλείου και συνθηκών κοπής.
 - Ρύθμιση παραμέτρων συγκεκριμένων προς το είδος της κατεργασίας.
 - Αποθήκευση και προσομοίωση της κοπής προς επιβεβαίωση του επιθυμητού του αποτελέσματος.
- Υπολογισμός και εξαγωγή προγράμματος G-code για τη σειρά κατεργασιών επί του συγκεκριμένου τεμαχίου.

Στη συνέχεια, το πρόγραμμα φορτώνεται στη μηχανή CNC με χρήση κατάλληλου προγράμματος (π.χ. του NC link) και σύνδεση σειριακού καλωδίου. Τα γενικά βήματα που ακολουθούν ως προς τη χρήση της μηχανής είναι συνοπτικά τα εξής:

- Φόρτωση των εργαλείων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο μύλο της μηχανής, με τη σειρά που έχει ορισθεί στο πρόγραμμα. Ο μύλος είναι 10 θέσεων, συνεπώς μπορούν να εκτελεσθούν σειρές κατεργασιών με το πολύ 10 διαφορετικά εργαλεία χωρίς διακοπή.
- Πρόσδεση του προς κατεργασία τεμαχίου στη μηχανή.
- Λήψη μηδενικού σημείου ως προς τους 3 άξονες της μηχανής, ούτως ώστε να συμπίπτει με το μηδενικό σημείο που ετέθη στο περιβάλλον σχεδιασμού των κατεργασιών του SolidCAM.

- Ρύθμιση του offset όλων των εργαλείων κατά τον κατακόρυφο άξονα, ως προς το μηδενικό σημείο του κατακόρυφου άξονα που ορίστηκε προηγουμένως.
- Έλεγχος μέσω δοκιμαστικής εντολής κίνησης προς επιβεβαίωση της σωστής ρύθμισης όλων των ανωτέρω.
- Επιλογή του προς εκτέλεση προγράμματος και φόρτωσή του στη μνήμη εντολών προς άμεση εκτέλεση.
- Εκτέλεση του προγράμματος. Κατά την εκτέλεση γίνονται συχνές διακοπές, ιδίως στις αλλαγές εργαλείου, προς διαπίστωση της καλής πορείας της κατεργασίας και ρύθμιση του ψυκτικού υγρού ώστε να προσπίπτει συνεχώς στο σημείο κοπής.
- Το ολοκληρωμένο τεμάχιο απομακρύνεται από τη μηχανή.
- Η μηχανή καθαρίζεται επιμελώς από γρέζια και λιμνάζον ψυκτικό υγρό.

2.6 Συναρμολόγηση

Με διαθέσιμα τα κατάλληλα εργαλεία⁴⁷ η συναρμολόγηση ενός βραχίονα επί της βάσης πρόσδεσης είναι διαδικασία που απαιτεί από δύο έως τέσσερις ώρες, ανάλογα με την επιδεξιότητα του ενδιαφερόμενου. Καθότι πρόκειται για σχετικά πολύπλοκη εργασία, δημιουργήθηκε προσομοίωση της συναρμολόγησης με χρήση του SolidWorks. Στο σχετικό βίντεο που είναι διαθέσιμο στο συνοδευτικό CD της εργασίας παρουσιάζεται με σαφήνεια η θέση και η σωστή σειρά συναρμολόγησης κάθε εξαρτήματος.

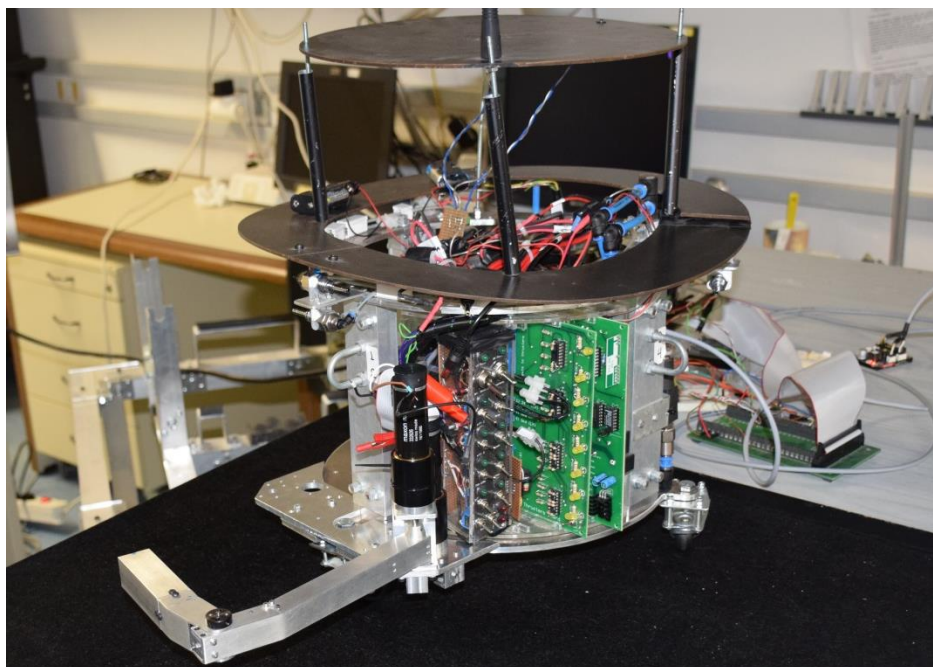
Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στα εξής δύο σημεία. Πρώτον, οι κοχλίες που βιδώνουν σε οπές με σπείρωμα επί των τεμαχίων αλουμινίου που κατασκευάστηκαν πρέπει να συσφίγγονται με προσοχή, διότι το αλουμίνιο που χρησιμοποιήθηκε είναι σχετικά μαλακό και υπάρχει κίνδυνος καταστροφής των σπειρωμάτων από υπερβολική προσπάθεια σύσφιξης.

Δεύτερον, κάθε οδοντωτό τύμπανο πρέπει να προσδένεται με προσοχή επί του άξονά του, ώστε ο υπεύθυνος για την πρόσδεση ακτινικός κοχλίας χωρίς κεφάλι να ακουμπάει στο προβλεπόμενο επίπεδο τμήμα του άξονα και μόνον. Αυτό, διότι σε διαφορετική περίπτωση υπάρχει κίνδυνος τοπικής καταστροφής της επιφάνειας του άξονα, καθιστώντας προβληματική την αποσυναρμολόγησή του από το τύμπανο,

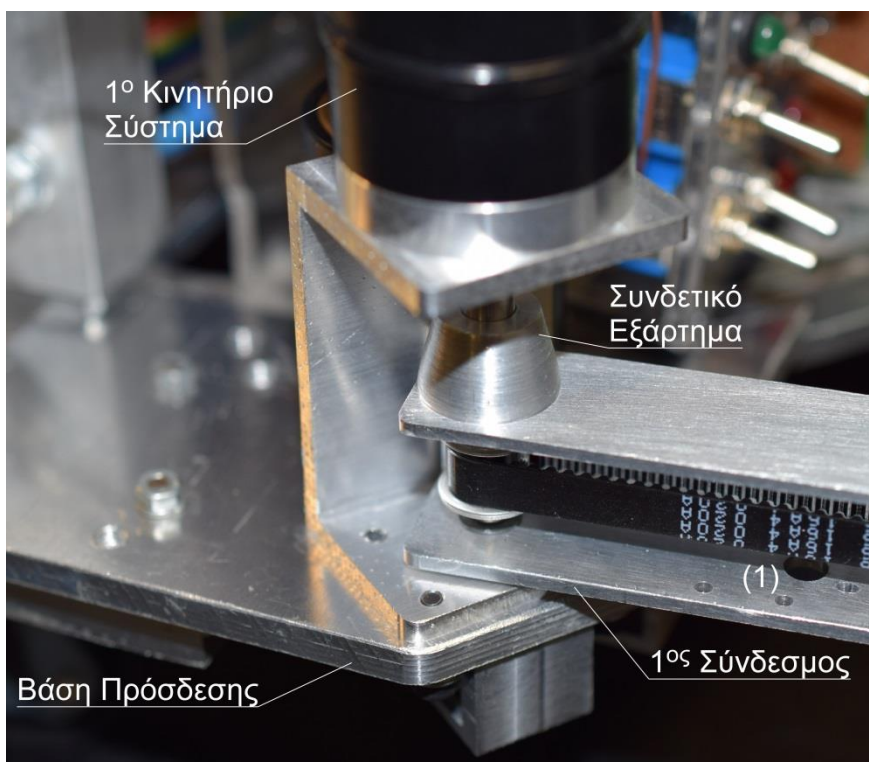
⁴⁷ Άλεν, κλειδιά, πένσα,τσιμπίδα μικρή και τσιμπίδια ηλεκτρολογικής χρήσης.

λόγω της καλής μεταξύ τους συναρμογής. Επιπλέον, εάν ο κοχλίας εμποδίζεται από το κυλινδρικό τμήμα του άξονα, η άλλη μεριά του θα προεξέχει μεταξύ των οδόντων του τυμπάνου, καθιστώντας τη συνεργασία με τον ιμάντα προβληματική.

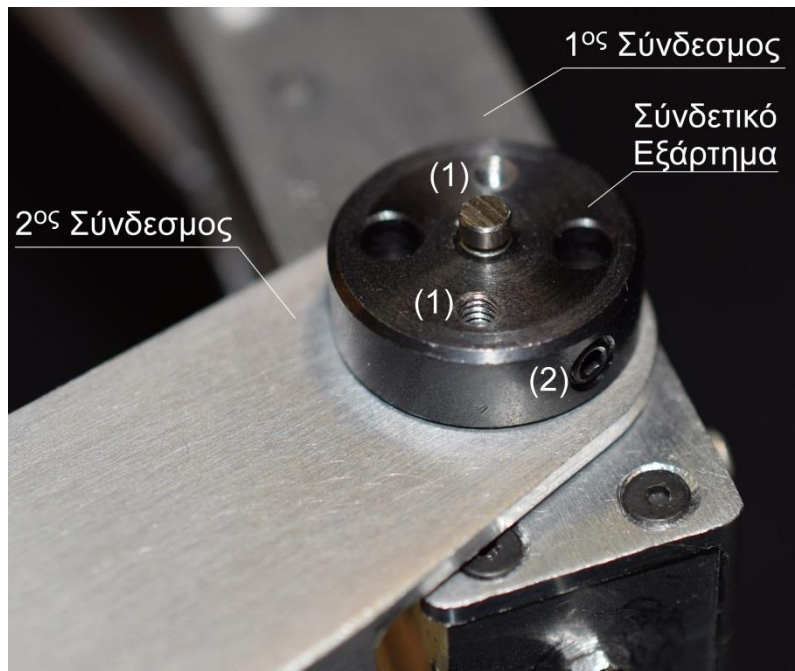
Ακολουθούν φωτογραφίες του συναρμολογημένου συνόλου.



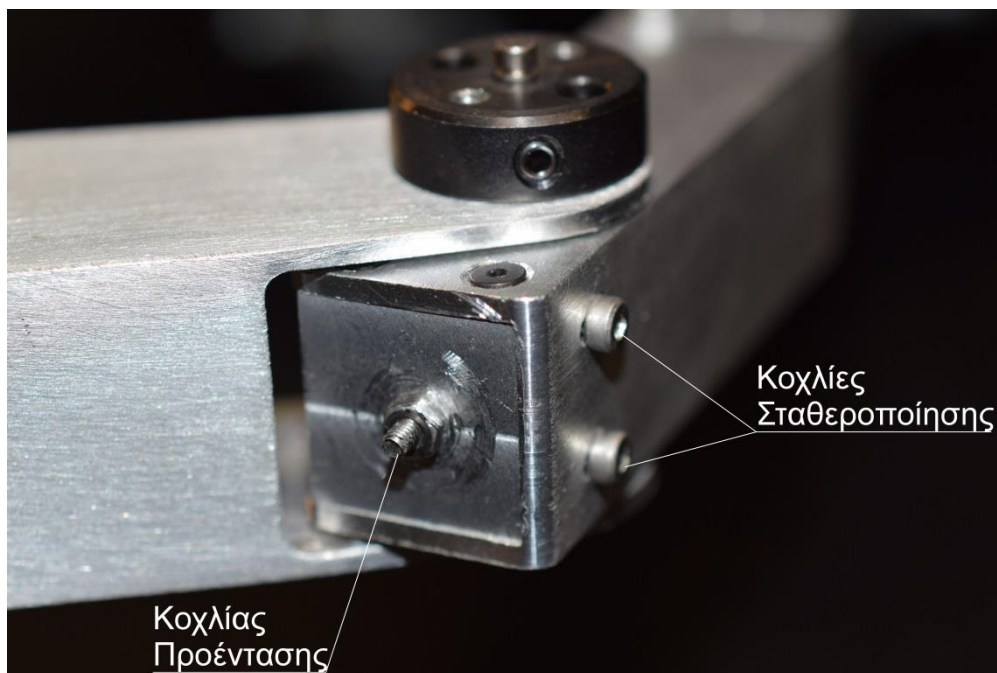
Σχήμα 2-30. Άποψη του ρομπότ με έναν βραχίονα.



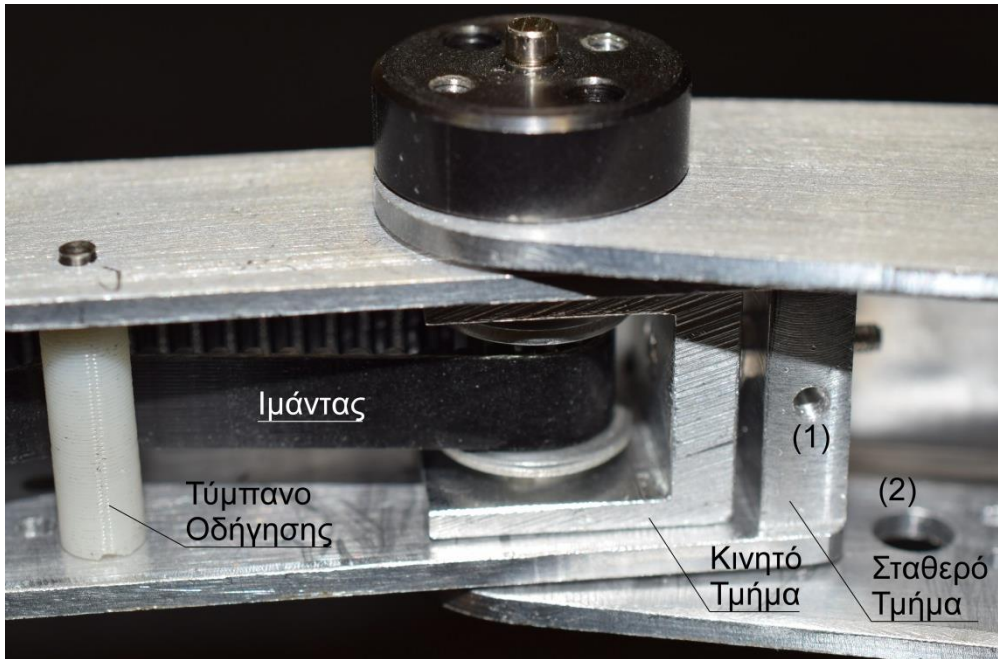
Σχήμα 2-31. Η πρώτη άρθρωση ενός βραχίονα. Το συνδετικό εξάρτημα συνδέει τον πρώτο σύνδεσμο με τον άξονα του πρώτου κινητήριου συστήματος – βλέπε και Σχήμα 2-16. Η οπή (1) είναι διαμπερής και χρησιμοποιείται για οδήγηση καλωδίων.



Σχήμα 2-32. Η δεύτερη άρθρωση ενός βραχίονα. Το συνδετικό εξάρτημα συνδέεται σταθερά με το πλαίσιο του δεύτερου συνδέσμου μέσω κοχλιών M3 στις οπές (1), και με τον άξονα της άρθρωσης μέσω του επίσης M3 ακτινικού κοχλία (2).



Σχήμα 2-33. Εξωτερική άποψη της δεύτερης άρθρωσης ενός βραχίονα και σύστημα προέντασης.



Σχήμα 2-34. Εσωτερική άποψη της δεύτερης άρθρωσης ενός βραχίονα και σύστημα προέντασης – βλέπε και Σχήμα 2-25. Η οπή (1) φέρει σπειρώμα M2 και χρησιμοποιείται στη στερέωση ενός «καπακιού» που κλείνει την πλευρά που εικονίζεται του πλαισίου του πρώτου συνδέσμου. Η οπή (2) είναι διαμπερής και χρησιμοποιείται για οδήγηση καλωδίων.



Σχήμα 2-35. Άποψη της βάσης πρόσδεσης των βραχιόνων – βλέπε και Σχήμα 2-23.

3 Δυναμική μοντελοποίηση του ρομπότ

Η ανάπτυξη του δυναμικού μοντέλου κάθε συστήματος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, διότι προσφέρει τη δυνατότητα προσομοίωσής του, η οποία είναι κομβικής σημασίας ως προς την κατανόηση, την ανάλυση και τον έλεγχο του συστήματος. Η ακρίβεια του αποτελέσματος, δηλαδή ο βαθμός ταύτισης των αποτελεσμάτων της προκύπτουσας προσομοίωσης με αυτά ιδανικού πειράματος, εξαρτάται από την ακρίβεια γνώσης των παραμέτρων του συστήματος και τις παραδοχές που έγιναν κατά τη μοντελοποίηση. Εν συνεχεία, παρουσιάζεται συνοπτικά η μέθοδος δυναμικής μοντελοποίησης συστημάτων κατά Euler – Lagrange και εφαρμόζεται προς εύρεση του δυναμικού μοντέλου του υπό εξέταση ρομπότ.

3.1 Μέθοδος Euler – Lagrange

Σύμφωνα με τη μέθοδο Euler – Lagrange [46], [53], οι δυναμικές εξισώσεις του υπό μελέτη συστήματος δίνονται από της εξίσωση Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j \quad (3-1)$$

Ορίζονται:

- $L = T - V$, ο όρος Lagrange.
- T , η κινητική ενέργεια του συστήματος.
- V , η δυναμική ενέργεια του συστήματος, δηλαδή το έργο που οφείλεται σε συντηρητικές δυνάμεις (π.χ. βάρος, δυνάμεις ελατηρίων).
- Q_j , οι γενικευμένες δυνάμεις και ροπές, δηλαδή οι δυνάμεις και ροπές των επενεργητών και οι εξωτερικές μη συντηρητικές που επιδρούν στο σύστημα.
- q_j , οι γενικευμένες συντεταγμένες, δηλαδή ένα ελάχιστο σύνολο μεταβλητών του συστήματος (μεταβλητές κατάστασης) που αρκεί για να περιγράψει την κατάσταση του με μοναδικό τρόπο, ανά πάσα στιγμή.

Ο ορισμός που δίνεται για τις γενικευμένες συντεταγμένες υπονοεί ότι πρέπει να επιλέγονται ώστε να πληρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Ο αριθμός τους πρέπει να ισούται με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας του συστήματος.
- Πρέπει να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.
- Πρέπει να είναι πλήρεις, δηλαδή να αρκούν για τον προσδιορισμό της θέσης κάθε μέρους του συστήματος ανά πάσα στιγμή.
- Πρέπει να είναι ολόνομες (holonomic), δηλαδή τέτοιες ώστε η περιγραφή του συστήματος να μην απαιτεί γνώση προγενέστερων καταστάσεών του.

Μη εύρεση μεταβλητών του συστήματος που να πληρούν όλα τα ανωτέρω συνεπάγεται ότι το σύστημα δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη μέθοδο Euler – Lagrange. Αν οι προϋποθέσεις πληρούνται από περισσότερα του ενός σύνολα μεταβλητών, επιλέγεται αυτό που εξυπηρετεί καλύτερα τους σκοπούς του μελετητή.

Οι γενικευμένες δυνάμεις και ροπές, Q_j , προσδιορίζονται μέσω των δυνατών έργων των μη συντηρητικών δυνάμεων και ροπών, δW_j , που συσχετίζονται με τις δυνατές μετατοπίσεις, δq_j , δηλαδή με οριακές μετατοπίσεις κατά την έννοια των επιλεχθέντων γενικευμένων συντεταγμένων, q_j . Η σχετική διανυσματική εξίσωση είναι:

$$\delta W_j = Q_j \cdot \delta q_j \quad (3-2)$$

Ανακεφαλαιώνοντας, προκύπτει μία συστηματική προσέγγιση που εφαρμόζεται κατά βήματα:

1. Προσδιορισμός των βαθμών ελευθερίας του συστήματος [48].
2. Επιλογή των κατάλληλων γενικευμένων συντεταγμένων.
3. Υπολογισμός των όρων T και V .
4. Υπολογισμός του αριστερού μέλους της εξίσωσης Lagrange για κάθε q_j και πινακοποίηση του αποτελέσματος.
5. Εύρεση των γενικευμένων δυνάμεων και ροπών.

Η ανωτέρω προσέγγιση θα εφαρμοστεί στη συνέχεια προς εύρεση του δυναμικού μοντέλου του υπό εξέταση ρομπότ.

3.2 Δυναμικό μοντέλο του ρομπότ

Προτού παρουσιαστεί το δυναμικό μοντέλο του επίπεδου εξομοιωτή διαστημικού ρομπότ, παραθέτονται οι παραδοχές που έγιναν κατά τη μοντελοποίηση και ορίζονται τα απαραίτητα μεγέθη.

3.2.1 Παραδοχές

Δε μοντελοποιούνται οι τριβές που αναπτύσσονται κατά την κίνηση των μερών των βραχιόνων. Η προσέγγιση που δοκιμάστηκε και μπορεί να εφαρμοστεί, περιλαμβάνει ανάπτυξη μοντέλου τριβής και εισαγωγή των όρων τριβής στις γενικευμένες δυνάμεις της εξίσωσης Lagrange. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι για να υπάρξει ουσιαστική βελτίωση της απόκρισης του ρομπότ, πρέπει οι παράμετροι του μοντέλου τριβής που θα χρησιμοποιηθεί να έχουν σφάλμα τουλάχιστον μίας τάξης μεγέθους μικρότερο αυτού που προκύπτει από τη μη μοντελοποίηση της τριβής – δηλαδή, το σφάλμα της απόκρισης όταν οι τριβές θεωρούνται μηδέν.

Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου τριβής που δοκιμάστηκε έγιναν πειράματα προς διαπίστωση της απαιτούμενης ροπής για εκκίνηση περιστροφής του άξονα του κινητήριου συστήματος και διατήρησης συγκεκριμένων ταχυτήτων, χωρίς άλλο εξωτερικό φορτίο συνδεδεμένο. Αυτό, διότι λόγω το μεγάλου λόγου μείωσης του μειωτήρα που χρησιμοποιείται, μεγάλο μέρος του φορτίου τριβών που πρέπει να υπερνικήσει ο κινητήρας αντιστοιχεί σε τριβές μεταξύ αυτού και του μειωτήρα. Διαπιστώθηκε μεγάλη διακύμανση στην απαιτούμενη ροπή εκκίνησης και εξάρτηση από τη θέση εκκίνησης του άξονα.

Επιπλέον δοκιμάστηκε έλεγχος των βραχιόνων (Κεφάλαιο 4.1) με βάση μοντέλο που περιελάμβανε μία απλή μοντελοποίηση της τριβής και δεν διαπιστώθηκε βελτίωση στην απόκριση του συστήματος. Γι' αυτούς τους λόγους, το

μοντέλο τριβής καταρχήν δε συμπεριλαμβάνεται στη μοντελοποίηση του συστήματος – τα αποτελέσματα αυτής της επιλογής σχολιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

Άμεση απόρροια αυτού είναι η εξής ασυμφωνία μεταξύ προσομοίωσης και πραγματικότητας: Στην προσομοίωση κάθε μετακίνηση του κυρίως σώματος του ρομπότ προκαλεί μικρές διαταραχές στη θέση των ελεύθερων βραχιόνων. Στην πραγματικότητα όμως οι αναπτυσσόμενες στατικές τριβές διατηρούν ακίνητους τους βραχίονες ως προς το σώμα του ρομπότ, ακόμα και χωρίς έλεγχο, αρκεί οι κινήσεις του σώματος του ρομπότ να είναι σχετικά αργές. Με δεδομένο ότι η εν λόγω μοντελοποίηση γίνεται με βασικό σκοπό τον έλεγχο των βραχιόνων του ρομποτικού συστήματος, αυτή η ασυμφωνία δεν αναμένεται να αποτελέσει πρόβλημα.

Δε μοντελοποιείται η ελαστικότητα των ιμάντων: Στην πραγματικότητα, όσο καλή και να είναι η προένταση που εφαρμόζεται στους ιμάντες, παραμένει κάποια ελαστικότητα. Όσο δε οι ασκούμενες δυνάμεις και ροπές στο τελικό σημείο δράσης ή στις αρθρώσεις του βραχίονα μεγαλώνουν, τόσο η ύπαρξη της ελαστικότητας θα επηρεάζει εντονότερα την απόκρισή του. Συγκεκριμένα, αναμένεται να εμφανίζεται μικρού πλάτους ταλάντωση η οποία θα αυξάνει ανάλογα με το φορτίο του βραχίονα, και μικρή αύξηση της χάρης της δεύτερης άρθρωσης. Αν στα αποτελέσματα πειραμάτων παρουσιάζονται εντόνως τα ανωτέρω, αποδοθούν στην ελαστικότητα των ιμάντων⁴⁸ και η αύξηση της προέντασης δεν τα επαναφέρει σε αποδεκτά πλαίσια, τότε θα πρέπει να εξεταστεί η χρήση μοντέλου και ελέγχου που να λαμβάνει υπόψη την ελαστικότητα των ιμάντων.

Καταρχήν δε μοντελοποιούνται άλλες εξωτερικές δυνάμεις που μπορεί να ασκηθούν στο σύστημα, λόγω επαφής του με άλλο ρομπότ ή το περιβάλλον. Μελλοντικά σχεδιάζεται η βελτίωση του μοντέλου, ώστε να συμπεριλαμβάνει τις δυνάμεις και ροπές που ασκούνται στο τελικό σημείο δράσης κάθε βραχίονα. Στο φυσικό σύστημα θα μετρούνται από τους αισθητήρες δυνάμεων και ροπών που θα προσαρμοστούν στα άκρα των βραχιόνων.

Δε γίνεται μοντελοποίηση της χρονικής υστέρησης λήψης των σημάτων των αισθητήρων. Η χρονική υστέρηση του συστήματος της κάμερας είναι σχετικά μεγάλη,⁴⁹ ωστόσο δεν αναμένεται να δημιουργήσει πρόβλημα σε αυτή τη φάση καθώς οι κινήσεις που εκτελεί το ρομπότ είναι αρκούντως αργές. Η χρονική

⁴⁸ Ταλαντώσεις μικρού πλάτους στην απόκριση μπορεί να οφείλονται και σε άλλους παράγοντες, όπως στην πιθανά μη τέλεια ευθυγράμμιση μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος άξονα της πρώτης άρθρωσης – βλέπε Σχήμα 2-18.

⁴⁹ Για ενσύρματη σύνδεση είναι 58ms και για ασύρματη μικρότερη των 250ms.

υστέρηση των Incremental Encoder και των οπτικών αισθητήρων τύπου PC ποντικίου είναι πολύ μικρή και αμελείται σε κάθε περίπτωση.

3.2.2 Ορισμός βασικών μεγεθών

Στη συνέχεια ορίζονται τα απαραίτητα μεγέθη⁵⁰. Η ονοματολογία των μεγεθών είναι σε συμφωνία με το Σχήμα 3-1. Εφόσον η ανάλυση γίνεται για σώματα επί του επιπέδου X-Y, όλα τα μεγέθη που αναφέρονται σε αποστάσεις αφορούν στις προβολές των αποστάσεων επί του επιπέδου. Επίσης οι δύο ρομποτικοί βραχίονες είναι όμοιοι μεταξύ τους, συνεπώς τα μεγέθη που αφορούν σε μήκη, μάζες και αδράνεις των βραχιόνων είναι ίδια και για τους δύο και ορίζονται μία φορά.

- $m_B = 10.213Kg$, η συνολική μάζα του κυρίως σώματος του ρομπότ. Περιλαμβάνει και κάθε εξάρτημα των δύο βραχιόνων που βρίσκεται στέρεα προσδεμένο στο ρομπότ (π.χ. κινητήρια συστήματα).
- $I_B = 0.1312kgm^2$, η συνολική, κεντροβαρική, πολική ροπή αδράνειας του κυρίως σώματος του ρομπότ.
- $a_B = 1.6mm$, η απόσταση μεταξύ του κέντρου μάζας και του κέντρου συμμετρίας του κυρίως σώματος του ρομπότ.
- $d_B = 122.2^\circ$, η γωνία μεταξύ του σωματόδετου άξονα των X και του ευθύγραμμου τμήματος που συνδέει το κέντρο μάζας με το κέντρο συμμετρίας του κυρίως σώματος του ρομπότ. Χρησιμοποιείται ώστε να είναι εφικτό να ορισθεί ο αρχικός προσανατολισμός του ρομπότ, δηλαδή όταν η περιστροφή του είναι μηδέν.
- $d_{Ba} = 27.9^\circ$, το ήμισυ της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του πρώτου βραχίονα στο σώμα του ρομπότ, του κέντρου συμμετρίας του σώματος και του σημείου πρόσδεσης του δεύτερου βραχίονα στο σώμα.
- $r_1 = 195.4mm$, η απόσταση μεταξύ του κέντρου συμμετρίας του σώματος του ρομπότ και του σημείου πρόσδεσης ενός βραχίονα επί του σώματος (δηλαδή του άξονα της πρώτης άρθρωσης του βραχίονα).
- $r_2 = 185.9mm$, η ακτίνα του νοητού κύκλου επί του οποίου είναι συμμετρικά τοποθετημένα τα ζεύγη των προωθητήρων.

⁵⁰ Οι τιμές που δίνονται για κάθε μέγεθος αποτελούν εκτιμήσεις με βάση τη μοντελοποίηση του ρομπότ και των βραχιόνων στο SolidWorks. Καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών τιμών θα γίνει μελλοντικά μέσω πειραματικών μετρήσεων, όταν θα έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή όλων των υποσυστημάτων του ρομπότ.

- $m_1 = 0.086kg$, η συνολική μάζα του πρώτου συνδέσμου ενός βραχίονα.
- $m_2 = 0.079kg$ ^{51*} , η συνολική μάζα του δεύτερου συνδέσμου ενός βραχίονα.
- $I_1 = 2e - 4kgm^2$, η συνολική, κεντροβαρική, πολική ροπή αδράνειας του πρώτου συνδέσμου ενός βραχίονα.
- $I_2 = 2e - 4kgm^2$ ^{*} , η συνολική, κεντροβαρική, πολική ροπή αδράνειας του δεύτερου συνδέσμου ενός βραχίονα.
- $a_1 = 182.0mm$ ⁵² , το μήκος του πρώτου συνδέσμου, οριζόμενο ως η απόσταση μεταξύ των 2 αρθρώσεων (οι αρθρώσεις λογίζονται ως σημειακές).
- $a_2 = 130.0mm$ ^{*} , το μήκος του δεύτερου συνδέσμου, οριζόμενο ως η απόσταση μεταξύ δεύτερης άρθρωσης και σημειακού άκρου του βραχίονα.
- $a_{c1} = 100.0mm$, η απόσταση μεταξύ κέντρου μάζας του πρώτου συνδέσμου και του σημείου πρόσδεσης του εν λόγω συνδέσμου στη βάση του ρομπότ (πρώτη άρθρωση).
- $a_{c2} = 65.0mm$ ^{*} , η απόσταση μεταξύ κέντρου μάζας του δεύτερου συνδέσμου και του σημείου σύνδεσης του εν λόγω συνδέσμου με τον πρώτο σύνδεσμο του ίδιου βραχίονα (δεύτερη άρθρωση).
- $d_{a1} = 1.4^\circ$, η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του νοητού άξονα που συνδέει τις 2 αρθρώσεις ενός βραχίονα και της γραμμής που ορίζεται όπως η απόσταση a_{c1} .
- $d_{a2} = 2^\circ$ ^{*} , η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του νοητού άξονα που συνδέει τη δεύτερη άρθρωση ενός βραχίονα με το τελικό σημείο δράσης της⁵³ και της γραμμής που ορίζεται όπως η απόσταση a_{c2} .
- $I_{ma} = 11.2e - 7kgm^2$, η ροπή αδράνειας του δρομέα κάθε ηλεκτροκινητήρα που χρησιμοποιείται.
- $I_t = 1e - 5kgm^2$, η συνολική, κεντροβαρική, πολική ροπή αδράνειας του δευτερεύοντος άξονα της πρώτης άρθρωσης ενός βραχίονα, συμπεριλαμβανομένων των δύο οδοντωτών τυμπάνων που φέρει.
- $n = 12167 / 64 \approx 190$, ο λόγος μείωσης των πλανητικών μειωτήρων του κινητήριου συστήματος που χρησιμοποιείται.

^{51*} Οι τιμές των μεγεθών του δεύτερου συνδέσμου εξαρτώνται από την εκάστοτε διαμόρφωσή του (με ή χωρίς αισθητήρα δύναμης/ροπή, εργαλείο).

⁵² Εξαρτάται από τη ρύθμιση της προέντασης του δεύτερου ιμάντα. Βλέπε Κεφάλαια 2.4.2 και 2.4.3.

⁵³ End effector

τον σφόνδυλο αντίδρασης στα πέντε προαναφερθέντα. Κατά συνέπεια, η γωνία στροφής του σφονδύλου θα ήταν ένας επιπλέον βαθμός ελευθερίας. Προτιμάται η ανάλυση με επτά βαθμούς ελευθερίας, αφενός επειδή είναι απλούστερη, αφετέρου επειδή ο σκοπός του σφονδύλου αντίδρασης είναι να λειτουργεί ως πηγή ροπής για το σώμα του ρομπότ και ως τέτοια θα αντιμετωπιστεί.

3.2.4 Επιλογή κατάλληλων γενικευμένων συντεταγμένων

Οι γενικευμένες συντεταγμένες [46] θα αποτελούν τις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος και επιλέγονται ώστε να πληρούν τις προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου και να διευκολύνουν την ανάλυση. Το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης είναι:

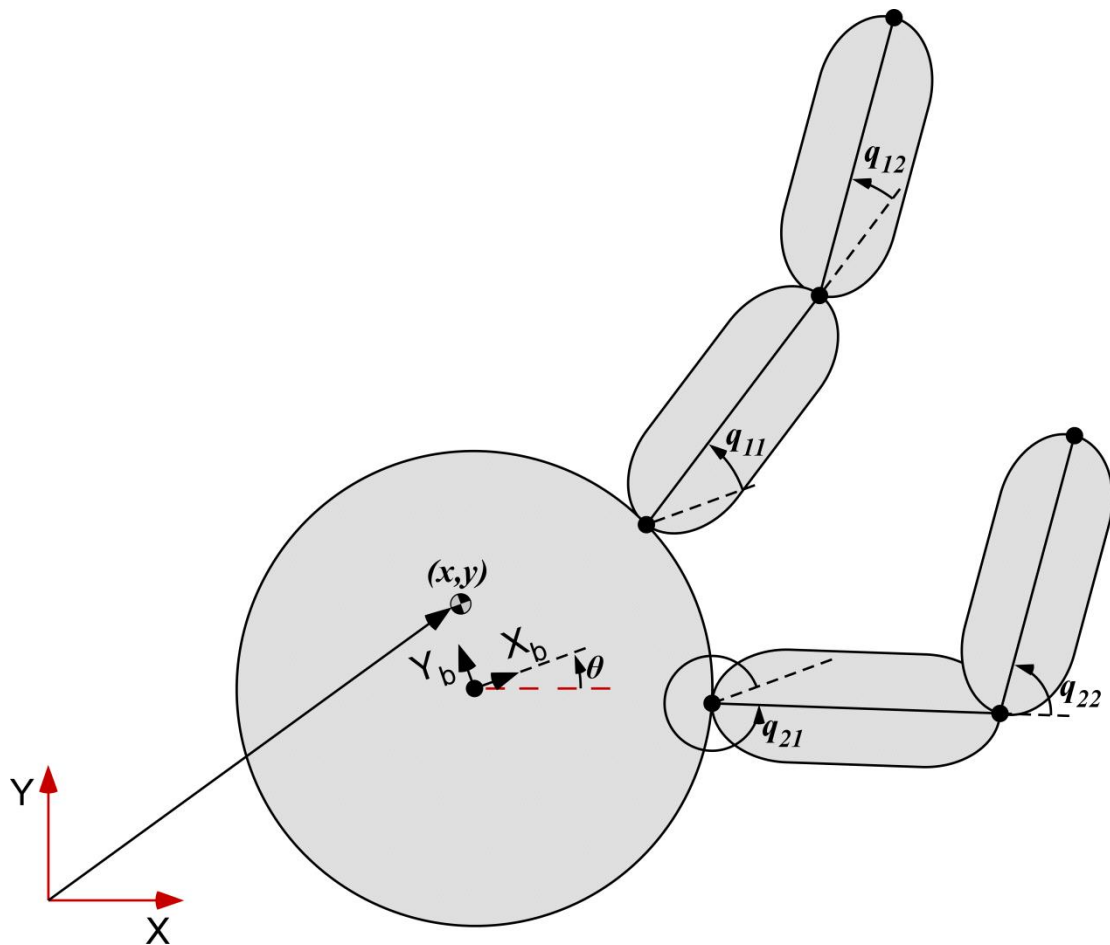
$$\underline{q} = [x, y, \theta, q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}]^T \quad (3-3)$$

Η μεταβλητή x αντιστοιχεί στη μεταφορική κίνηση του κέντρου μάζας του κυρίως σώματος του ρομπότ κατά τον άξονα των X , στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων. Η μεταβλητή y αντιστοιχεί στη μεταφορική κίνηση του κέντρου μάζας του κυρίως σώματος του ρομπότ κατά τον άξονα των Y , στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων. Η μεταβλητή θ αντιστοιχεί στην περιστροφή του συστήματος γύρω από τον κεντροβαρικό άξονα Z . Η μεταβλητή q_{11} αντιστοιχεί στη σχετική γωνία στροφής του πρώτου συνδέσμου του πρώτου βραχίονα ως προς το σώμα του ρομπότ – ομοίως η q_{21} για τον δεύτερο βραχίονα. Η μεταβλητή q_{12} αντιστοιχεί στη σχετική γωνία στροφής του δεύτερου συνδέσμου του πρώτου βραχίονα ως προς τον πρώτο σύνδεσμο του – ομοίως η q_{22} για τον δεύτερο βραχίονα.

Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, διότι ακινητοποίηση του συστήματος ανά έξι μεταβλητές κάθε φορά πάντα επιτρέπει πλήρες εύρος κίνησης στην εναπομένουσα ελεύθερη.

Το σύνολο των μεταβλητών κατάστασης είναι πλήρες, διότι εάν ορισθεί μια οποιαδήποτε κατάσταση του συστήματος υπάρχει συγκεκριμένη τιμή για κάθε μία εκ των μεταβλητών.

Το σύνολο των μεταβλητών κατάστασης είναι ολόνομο, διότι κάθε διαμόρφωση του συστήματος μπορεί να περιγραφεί πλήρως από τις τιμές των μεταβλητών εκείνη τη στιγμή, χωρίς να χρειάζεται γνώση προγενέστερης κατάστασης.



Σχήμα 3-2. Επιλογή γενικευμένων συντεταγμένων. Τα βέλη στα άκρα των τόξων επισημαίνουν τη θετική φορά των σχετικών γωνιών. Το ρομπότ φαίνεται σε στροφή θ ως προς το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων.

3.2.5 Υπολογισμός των όρων T και V

Υπολογίζεται η συνολική κινητική, T , και δυναμική, V , ενέργεια του συστήματος, εκφρασμένες ως προς τις μεταβλητές κατάστασης. Η συνολική κινητική ενέργεια του ρομπότ συνίσταται από την κινητική ενέργεια του κυρίου σώματος του ρομπότ, του πρώτου συνδέσμου κάθε βραχίονα, του δεύτερου συνδέσμου κάθε βραχίονα, του δρομέα κάθε ηλεκτροκινητήρα των βραχιόνων και του δευτερεύοντος άξονα της πρώτης άρθρωσης κάθε βραχίονα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα επιπλέον σώματα που αναφέρονται εδώ – σε αντιδιαστολή με τη παράγραφο που προηγήθηκε περί βαθμών ελευθερίας του συστήματος – δεν προσθέτουν επιπλέον βαθμούς ελευθερίας στο σύστημα – γι' αυτό και δεν αναφέρθηκαν σε εκείνη την παράγραφο. Συνεπώς είναι εφικτός ο υπολογισμός της ενέργειάς τους μέσω των μεταβλητών κατάστασης. Επιπλέον, σημειώνεται ότι για λόγους αποφυγής περιττής πολυπλοκότητας θα αμεληθεί η κινητική ενέργεια που αποκτούν οι οδοντωτοί ιμάντες λόγω περιστροφής των συνεργαζόμενων τυμπάνων, καθώς η μάζα των ιμάντων είναι πολύ μικρή, το ίδιο και οι ταχύτητες που αναπτύσσουν.

Για κάθε σώμα, η κινητική ενέργεια υπολογίζεται ως το άθροισμα της κινητικής ενέργειας λόγω μεταφοράς και λόγω περιστροφής του κέντρου μάζας του σώματος. Η θέση του κέντρου μάζας κάθε σώματος εισέρχεται στους υπολογισμούς μέσω των μεγεθών που ορίστηκαν προηγουμένως. Οι τιμές τους λαμβάνονται καταρχήν από το μοντέλο της κατασκευής στο περιβάλλον του SolidWorks. Ακολουθεί αναλυτικός υπολογισμός των κινητικών ενεργειών.

Η θέση του κέντρου μάζας και ο προσανατολισμός του κυρίως σώματος του ρομπότ είναι γνωστά μέσω των γενικευμένων μεταβλητών. Συνεπώς με παραγωγή βρίσκονται οι ταχύτητες και η σχετική κινητική ενέργεια, K_B :

$$K_B = \frac{1}{2} m_B (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I_B \dot{\theta}^2 \quad (3-4)$$

Οι θέσεις των κέντρων μάζας των συνδέσμων κάθε βραχίονα δεν είναι γνωστές και πρέπει να υπολογισθούν. Εύκολα φαίνεται (βλέπε Σχήμα 3-1 και Σχήμα 3-2) ότι η θέση στο απόλυτο σύστημα του κέντρου μάζας του πρώτου συνδέσμου, $P_{i1}(p_{i1x}, p_{i1y})$, δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} p_{i1x} &= (x - a_B \cos(\theta + d_B)) + r_1 \cos(\theta \pm d_{Ba}) + a_{c1} \cos(\theta + q_{i1} \pm d_{a1}) \\ p_{i1y} &= (y - a_B \sin(\theta + d_B)) + r_1 \sin(\theta \pm d_{Ba}) + a_{c1} \sin(\theta + q_{i1} \pm d_{a1}) \end{aligned}, \quad i = \{1, 2\} \quad (3-5)$$

Ο πρώτος όρος κάθε εξίσωσης αντιστοιχεί στη θέση του κέντρου του κυκλικού σχήματος σώματος του ρομπότ· προστιθέμενου του δεύτερου όρου προκύπτει η θέση της πρώτης άρθρωσης κάθε βραχίονα. Λόγω συμμετρίας μεταξύ των δύο βραχιόνων, οι εξισώσεις με "+" αφορούν στον πρώτο ($i = 1$) και με "-" στον δεύτερο ($i = 2$) βραχίονα.

Ομοίως, η θέση στο απόλυτο σύστημα του κέντρου μάζας του δεύτερου συνδέσμου, $P_{i2}(p_{i2x}, p_{i2y})$, δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} p_{i2x} &= x - a_B \cos(\theta + d_B) + r_1 \cos(\theta \pm d_{Ba}) + a_1 \cos(\theta + q_{i1}) + a_{c2} \cos(\theta + q_{i1} + q_{i2} \pm d_{a2}) \\ p_{i2y} &= y - a_B \sin(\theta + d_B) + r_1 \sin(\theta \pm d_{Ba}) + a_1 \sin(\theta + q_{i1}) + a_{c2} \sin(\theta + q_{i1} + q_{i2} \pm d_{a2}) \end{aligned} \quad (3-6)$$

Ακολούθως, προκύπτουν οι κινητικές ενέργειες:

$$\begin{aligned} K_{ai1} &= \frac{1}{2} m_1 (\dot{p}_{i1x}^2 + \dot{p}_{i1y}^2) + \frac{1}{2} I_1 (\dot{\theta} + \dot{q}_{i1})^2 \\ K_{ai2} &= \frac{1}{2} m_2 (\dot{p}_{i2x}^2 + \dot{p}_{i2y}^2) + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta} + \dot{q}_{i1} + \dot{q}_{i2})^2 \end{aligned} \quad (3-7)$$

όπου, K_{ai1} , η κινητική ενέργεια του πρώτου συνδέσμου και K_{ai2} , η κινητική ενέργεια του δεύτερου συνδέσμου κάθε βραχίονα. Ο υπολογισμός των παραγώγων που περιλαμβάνουν οι ανωτέρω εξισώσεις όπως και η επίλυση αυτών που ακολουθούν γίνεται με χρήση του λογισμικού της Wolfram, Mathematica. Το σχετικό notebook υπολογισμών συμπεριλαμβάνεται στο CD της εργασίας. Επίσης, συμπεριλαμβάνεται και το notebook μοντελοποίησης του συστήματος με έναν βραχίονα και πέντε βαθμούς ελευθερίας⁵⁶.

Η κινητική ενέργεια του δευτερεύοντος άξονα της πρώτης άρθρωσης και των ροτόρων των κινητήρων κάθε βραχίονα λόγω μεταφοράς και περιστροφής τους μετά του σώματος του ρομπότ συμπεριλαμβάνεται στην K_B . Μένει να υπολογισθεί η κινητική ενέργειά τους λόγω της σχετικής προς το σώμα του ρομπότ περιστροφικής κίνησης που εκτελούν κατά τη κίνηση κάθε βραχίονα. Για να γίνει αυτό, πρέπει πρώτα να βρεθεί η συσχέτιση μεταξύ της γωνίας στροφής των αξόνων των κινητήριων συστημάτων και των μεταβλητών κατάστασης q_{i1} και q_{i2} , καθώς η έκφραση της ενέργειας πρέπει να γίνει ως προς τις μεταβλητές κατάστασης.

Για να γίνει αντιληπτή η εν λόγω συσχέτιση, αρκεί να παρατηρηθεί ότι χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός μετάδοσης κίνησης από τους κινητήρες προς τις αρθρώσεις κάθε βραχίονα που δημιουργεί "ένα-προς-ένα" αντιστοιχία μεταξύ κινητήρα-άρθρωσης στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων, σε αντίθεση με την direct drive υλοποίηση για περιστροφικούς βραχίονες που δημιουργεί την "ένα-προς-ένα" αντιστοιχία στο σχετικό σύστημα συντεταγμένων κάθε συνδέσμου. Συγκεκριμένα, στην "ένα-προς-ένα" αντιστοιχία στο **απόλυτο** σύστημα συντεταγμένων για τον μηχανισμό που εξετάζεται, η περιστροφή του πρώτου συνδέσμου εξαρτάται αποκλειστικά από την περιστροφή του πρώτου κινητήρα και η περιστροφή του δεύτερου συνδέσμου εξαρτάται αποκλειστικά από την περιστροφή του δεύτερου κινητήρα.

Έστω λοιπόν θ_{i1} , η γωνία στροφής του πρώτου και θ_{i2} , η γωνία στροφής του δεύτερου κινητήρα ως προς το σώμα του ρομπότ, για κάθε βραχίονα. Οι σχέσεις που συνδέουν τα θ_{i1} και θ_{i2} με τις μεταβλητές κατάστασης q_{i1} και q_{i2} είναι:

$$\begin{aligned}\theta_{i1} &= n q_{i1} \\ \theta_{i2} &= n(q_{i1} + q_{i2})\end{aligned}\tag{3-8}$$

⁵⁶ Το μοντέλο 5 βαθμών ελευθερίας χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα που διεξήχθησαν, καθώς κατά τη συγγραφή της παρούσης εργασίας δεν ήταν διαθέσιμα τα απαραίτητα εξαρτήματα για την κατασκευή του δεύτερου βραχίονα.

όπου n ο λόγος μετάδοσης των μειωτήρων και i , όπως ορίστηκε προηγουμένως. Συνεπώς, προκύπτει η κινητική ενέργεια των δρομέων των κινητήρων, K_{mai} , και του δευτερεύοντος άξονα της πρώτης άρθρωσης, K_{ii} , λόγω της σχετικής περιστροφής τους ως προς το σώμα του ρομπότ:

$$K_{mai} = \frac{1}{2} I_{ma} (\theta_{i1}^2 + \theta_{i2}^2) = \frac{1}{2} I_{ma} n^2 (q_{i1}^2 + (q_{i1} + q_{i2})^2) \quad (3-9)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{2} I_t \left(\frac{\theta_{i2}}{n} \right)^2 = \frac{1}{2} I_t (q_{i1} + q_{i2})^2$$

Η συνολική κινητική ενέργεια του συστήματος, T , είναι το άθροισμα των (3-4), (3-7) και (3-9):

$$T = K_B + K_{a11} + K_{a21} + K_{a12} + K_{a22} + K_{ma1} + K_{ma2} + K_{t1} + K_{t2} \quad (3-10)$$

Η δυναμική ενέργεια θεωρείται μηδενική, διότι όλες οι κινήσεις εκτελούνται στο επίπεδο X-Y και δεν υπάρχουν στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας.

3.2.6 Υπολογισμός του αριστερού μέλους της εξίσωσης Lagrange και πινακοποίηση

Το αριστερό μέλος της εξίσωσης Lagrange αναλύεται ως εξής:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial V}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial V}{\partial q} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} \quad (3-11)$$

Οι όροι που εξαρτώνται από τη δυναμική ενέργεια του συστήματος απαλείφονται ως μηδενικοί – μάλιστα ο πρώτος εξ αυτών είναι μηδέν για κάθε μηχανικό σύστημα, διότι στα μηχανικά συστήματα η δυναμική ενέργεια δεν εξαρτάται από όρους ταχύτητας. Οι εναπομείναντες όροι υπολογίζονται για κάθε μία εκ των επτά γενικευμένων συντεταγμένων, δηλαδή για κάθε μία εκ των $[x, y, \theta, q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}]$, συνεπώς προκύπτουν επτά εξισώσεις. Οι όροι των εξισώσεων χωρίζονται σε εξαρτώμενους από την επιτάχυνση, \ddot{q} , και σε εξαρτώμενους από την ταχύτητα, \dot{q} , και τη θέση, q . Οι υπολογισμοί και η πινακοποίηση γίνονται με χρήση του λογισμικού της Wolfram, Mathematica, και περιέχονται στο notebook που αναφέρθηκε προηγουμένως, στο CD της εργασίας. Το αριστερό μέλος της εξίσωσης Lagrange τελικά γίνεται:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = \mathbf{M}(q) \ddot{q} + \mathbf{C}(q, \dot{q}) \quad (3-12)$$

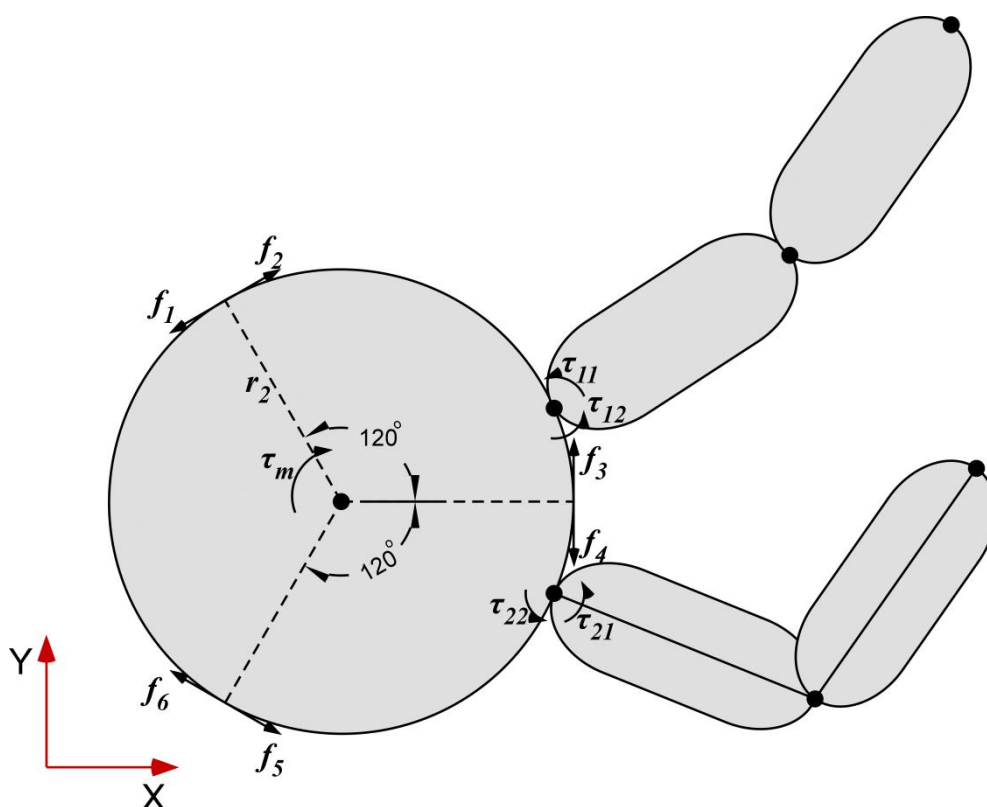
όπου τ_m , ο 7x7 πίνακας μάζας-αδράνειας και τ_{ij} , ο 7x1 πίνακας μη γραμμικών όρων (βλέπε Παράρτημα Γ).

3.2.7 Εύρεση των γενικευμένων δυνάμεων και ροπών

Στις γενικευμένες δυνάμεις και ροπές συμβάλουν οι δυνάμεις που ασκούνται από τους προωθητήρες, $f_{i=1 \rightarrow 6}$, η ροπή που αποδίδεται από τον κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης, τ_m , και οι ροπές που ασκούνται από τους κινητήρες κάθε βραχίονα, τ_{i1} και τ_{i2} (Σχήμα 3-3). Όλα τα ανωτέρω απαρτίζουν το διάνυσμα των δυνάμεων και ροπών των επενεργητών του συστήματος:

$$Q_{act} = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, \tau_m, \tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{21}, \tau_{22}]^T \quad (3-13)$$

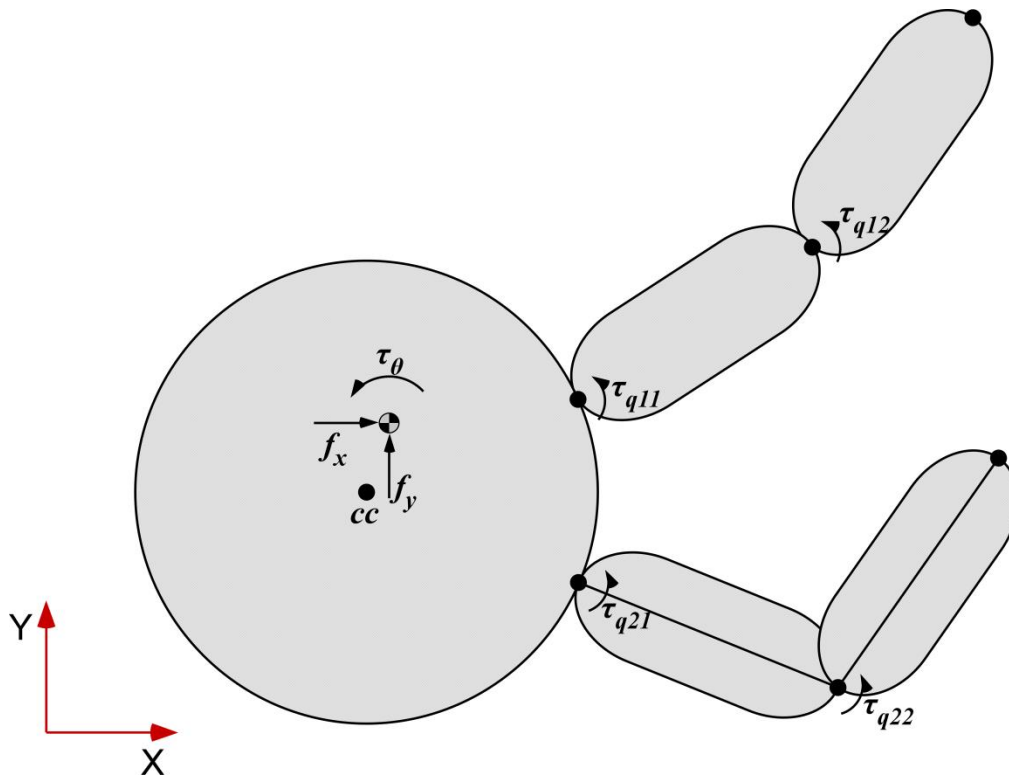
Κάθε άλλη εξωτερική δύναμη ή ροπή καθώς και οι τριβές που αναπτύσσονται αμελούνται στη συγκεκριμένη μελέτη.



Σχήμα 3-3. Δυνάμεις και ροπές επενεργητών.

Το διάνυσμα των γενικευμένων δυνάμεων και ροπών, Q , ορίζεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-4 και στην εξίσωση (3-14), ώστε να είναι σε αντιστοιχία με το διάνυσμα των γενικευμένων συντεταγμένων που επιλέχθηκαν – βλέπε Σχήμα 3-2 και εξίσωση (3-3).

$$Q = [f_x, f_y, \tau_\theta, \tau_{q11}, \tau_{q12}, \tau_{q21}, \tau_{q22}]^T \quad (3-14)$$



Σχήμα 3-4. Ορισμός γενικευμένων δυνάμεων και ροπών.

Προτού εφαρμοστεί η εξίσωση των δυνατών έργων προς εύρεση του διανύσματος Q θα βρεθεί το διάνυσμα Q^* , το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$Q^* = [f_x^{cm}, f_y^{cm}, \tau_\theta^{cm}, \tau_{11}^s, \tau_{12}^s, \tau_{21}^s, \tau_{22}^s]^T \quad (3-15)$$

- f_x^{cm} , η συνισταμένη των εξωτερικών, μη συντηρητικών δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα του ρομπότ κατά τη διεύθυνση του άξονα των X του απόλυτου συστήματος συντεταγμένων. Υπολογίζεται στο κέντρο μάζας του σώματος του ρομπότ.
- f_y^{cm} , η συνισταμένη των εξωτερικών, μη συντηρητικών δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα του ρομπότ κατά τη διεύθυνση του άξονα των Y του απόλυτου συστήματος συντεταγμένων. Υπολογίζεται στο κέντρο μάζας του σώματος του ρομπότ.
- τ_θ^{cm} , η συνισταμένη των ροπών που ασκούνται στο κυρίως σώμα του ρομπότ ως προς τον κεντροβαρικό του άξονα, που οφείλεται στις δυνάμεις λόγω των προωθητήρων και στη ροπή που αποδίδεται προς το σύστημα από τον σφόνδυλο αντίδρασης.
- τ_{ij}^s , η ροπή στην έξοδο κάθε κινητήριου συστήματος, $i, j = \{1, 2\}$.

Εφόσον οι μόνες εξωτερικές, μη συντηρητικές δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα του ρομπότ είναι αυτές των προωθητήρων, το διάνυσμα Q^{B^*} της εξίσωσης

(3-16) συσχετίζεται με τις δυνάμεις των προωθητήρων και τη ροπή του σφονδύλου αντίδρασης.

$$Q^{B*} = [f_x^{cm}, f_y^{cm}, \tau_\theta^{cm}]^T \quad (3-16)$$

Σύμφωνα με το Σχήμα 3-3 και την ανάλυση που παρουσιάζεται εκτενώς στα [63] και [64], ορίζονται τα εξής:

$$A = \begin{bmatrix} -\sin(\theta+120^\circ) & -\sin(\theta) & -\sin(\theta-120^\circ) & 0 \\ \cos(\theta+120^\circ) & \cos(\theta) & \cos(\theta-120^\circ) & 0 \\ r_2 & r_2 & r_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

$$Q_{act}^B = \begin{bmatrix} f_{12} \\ f_{34} \\ f_{56} \\ \tau_{RW} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 - f_2 \\ f_3 - f_4 \\ f_5 - f_6 \\ \tau_{RW} \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

όπου κάθε ένα εκ των τριών πρώτων στοιχείων του διανύσματος Q_{act}^B ⁵⁷ της εξίσωσης (3-18) αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος δύο προωθητήρων και ισούται με τη συνισταμένη των δύο αντίρροπων δυνάμεων του ζεύγους. Το μέγεθος τ_{RW} ισούται με την αποδιδόμενη ροπή από το σύστημα του σφονδύλου αντίδρασης προς το σώμα του ρομπότ και ισχύει:

$$\tau_{RW} = -\tau_m \cdot n_m \quad (3-19)$$

όπου n_m , ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του συστήματος του σφονδύλου αντίδρασης και του κινητήρα του.

$$A \cdot Q_{act}^B = \begin{bmatrix} f_x^{cc} \\ f_y^{cc} \\ \tau_\theta^{cc} \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

Το γινόμενο $A \cdot Q_{act}^B$ της εξίσωσης (3-20) εκφράζει τις δυνάμεις των προωθητήρων στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων σε αθροίσματα των κατά X και Y συνιστωσών τους, f_x^{cc} και f_y^{cc} αντίστοιχα, και τη συνολική ροπή, δηλαδή τη ροπή λόγω των

⁵⁷ “act”, εκ του “actuator” και “B”, εκ του “Body” – αναφέρεται στους προωθητήρες και στον σφόνδυλο αντίδρασης, δηλαδή στους επενεργητές του σώματος του ρομπότ.

προωθητήρων και του σφονδύλου αντίδρασης, τ_{θ}^{cc} , ως προς άξονα κάθετο στο κέντρο συμμετρίας του σώματος του ρομπότ, cc (Σχήμα 3-4).

$$\begin{bmatrix} f_x^{cc} \\ f_y^{cc} \\ \tau_{\theta}^{cc} - a_B (f_y^{cc} \cos d_B - f_x^{cc} \sin d_B) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x^{cm} \\ f_y^{cm} \\ \tau_{\theta}^{cm} \end{bmatrix} = Q^{B*} \quad (3-21)$$

Τέλος, με την εξίσωση (3-21) οι δυνάμεις f_x^{cc} και f_y^{cc} μεταφέρονται στο κέντρο μάζας του σώματος του ρομπότ και προκύπτει η έκφραση της συνολικής ροπής τ_{θ} ως προς τον κεντροβαρικό άξονα του σώματος του ρομπότ.

Οι ροπές στην έξοδο των κινητήρων κάθε βραχίονα, τ_{ij} , μετατρέπονται στις ροπές στην έξοδο των αντίστοιχων μειωτήρων, τ_{ij}^g , ως εξής:

$$\tau_{ij}^g = \eta \cdot n \cdot \tau_{ij} \quad | \quad i, j = \{1, 2\} \quad (3-22)$$

όπου n , ο λόγος μετάδοσης των μειωτήρων και η , ο βαθμός απόδοσης των μειωτήρων.

Πλέον το διάνυσμα των δυνάμεων και ροπών των επενεργητών, Q_{act} , έχει μετασχηματιστεί στο ισοδύναμο Q^* – βλέπε εξίσωση (3-15). Στη συνέχεια εφαρμόζεται η εξίσωση (3-2) των δυνατών έργων για να βρεθεί το διάνυσμα των γενικευμένων δυνάμεων και ροπών, Q :

$$\delta W = Q^* \cdot \delta \rho = Q^T \cdot \delta q \Rightarrow \begin{bmatrix} f_x^{cm} \\ f_y^{cm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} + \tau_{\theta}^{cm} \cdot \delta \theta + \tau_{11}^g \cdot \delta q_{11}^g + \tau_{12}^g \cdot \delta q_{12}^g + \tau_{21}^g \cdot \delta q_{21}^g + \tau_{22}^g \cdot \delta q_{22}^g = Q^T \cdot \delta q \quad (3-23)$$

όπου $\delta \rho$, το διάνυσμα δυνατών μετατοπίσεων που συσχετίζεται με τις δυνάμεις και ροπές τους διανύσματος Q^* . Οι γενικευμένες μεταβλητές που εκφράζουν τις γωνίες στροφής των αρθρώσεων των βραχιόνων, q_{ij} – ορίστηκαν στην εξίσωση (3-3) και στο Σχήμα 3-2 – σχετίζονται με τις γωνίες στροφής στην έξοδο των αντίστοιχων μειωτήρων, q_{ij}^g , ως εξής:

$$\begin{aligned} q_{i1}^g &= q_{i1} \\ q_{i2}^g &= q_{i1} + q_{i2} \end{aligned} \quad (3-24)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3-23) τις εξισώσεις (3-24) προκύπτει:

$$\delta W = \begin{bmatrix} f_x^{cm} \\ f_y^{cm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} + \tau_\theta^{cm} \cdot \delta\theta + (\tau_{11}^g + \tau_{12}^g) \cdot \delta q_{11} + \tau_{12}^g \cdot \delta q_{12} + (\tau_{21}^g + \tau_{22}^g) \cdot \delta q_{21} + \tau_{22}^g \cdot \delta q_{22}$$

$$\Rightarrow \delta W = \begin{bmatrix} f_x^{cm} \\ f_y^{cm} \\ \tau_\theta^{cm} \\ \tau_{11}^g + \tau_{12}^g \\ \tau_{12}^g \\ \tau_{21}^g + \tau_{22}^g \\ \tau_{22}^g \end{bmatrix}^T \cdot \delta \underline{q} \Rightarrow \underline{Q} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ \tau_\theta \\ \tau_{q11} \\ \tau_{q12} \\ \tau_{q21} \\ \tau_{q22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x^{cm} \\ f_y^{cm} \\ \tau_\theta^{cm} \\ \tau_{11}^g + \tau_{12}^g \\ \tau_{12}^g \\ \tau_{21}^g + \tau_{22}^g \\ \tau_{22}^g \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

Πινακοποιώντας τις εξισώσεις που προηγήθηκαν προκύπτει ο πίνακας , που μετασχηματίζει το διάνυσμα των δυνάμεων και ροπών των επενεργητών, \underline{Q}_{act} , στο διάνυσμα των γενικευμένων δυνάμεων και ροπών \underline{Q} , και η εξίσωση Euler – Lagrange⁵⁸ λαμβάνει τη μορφή:

$$\underline{M}(\underline{q})\ddot{\underline{q}} + \underline{C}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) = \underline{J}_{act}(\underline{q}) \cdot \underline{Q}_{act} = \underline{Q} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ \tau_\theta \\ \tau_{q11} \\ \tau_{q12} \\ \tau_{q21} \\ \tau_{q22} \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

Αξίζει να επισημανθεί ότι η γωνία στροφής του σώματος του ρομπότ στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων του επιπέδου, θ , δε συμμετέχει στις εξισώσεις δυνατών έργων των μεταβλητών των αρθρώσεων των βραχιόνων, παρά το γεγονός ότι η περιστροφή των βραχιόνων προκαλεί περιστροφή στο σώμα του ρομπότ. Αυτό διότι οι μεταβλητές των αρθρώσεων ορίστηκαν ως σχετικές γωνίες στροφής ως προς το σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων του σώματος του ρομπότ. Ομοίως, οι ροπές των κινητήρων των βραχιόνων δεν εμφανίζονται στις γενικευμένες δυνάμεις και ροπές που αντιστοιχούν στις γενικευμένες συντεταγμένες x , y και θ του σώματος του ρομπότ.

⁵⁸ Οι πίνακες , και φαίνονται στο Παράρτημα Γ.

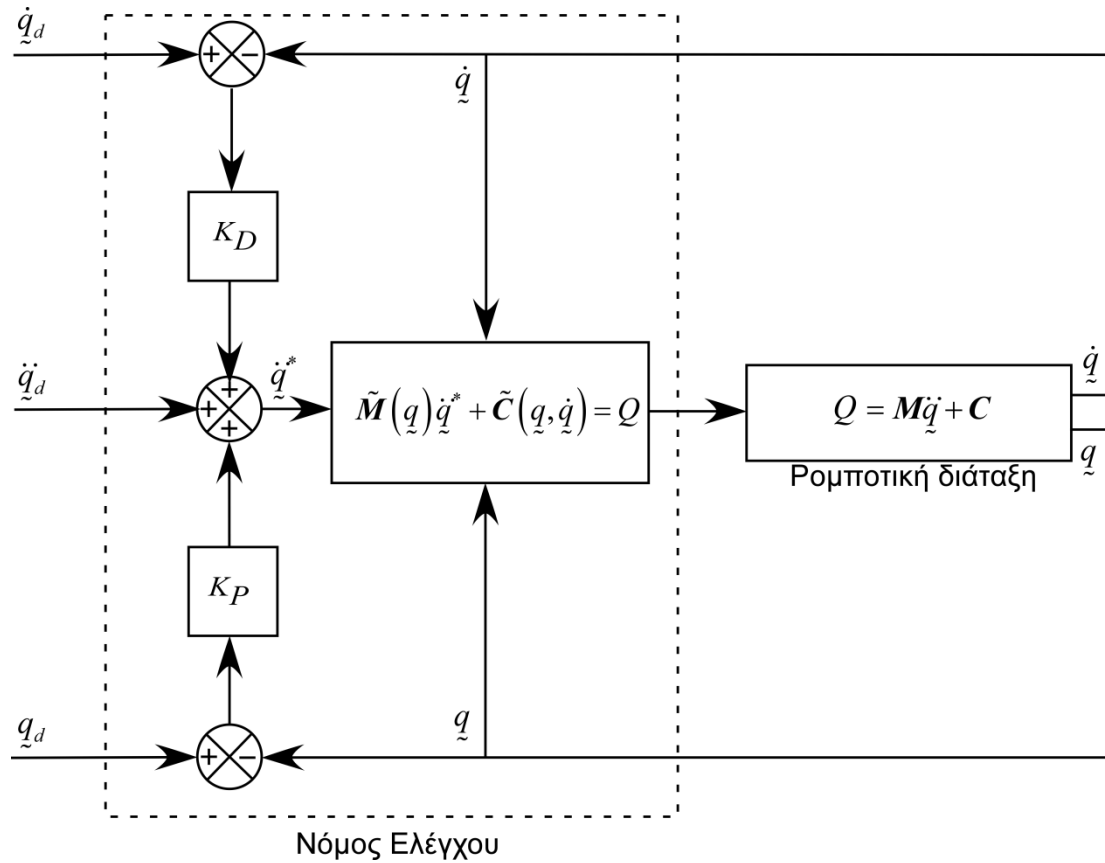
4 Αυτόματος έλεγχος και σχεδιασμός τροχιάς

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μία μέθοδος μη γραμμικού ελέγχου του ρομποτικού συστήματος με βάση το μοντέλο. Αναλύεται η μέθοδος μετατροπής των υπολογιζόμενων γενικευμένων δυνάμεων και ροπών σε δυνάμεις ή ροπές που πρέπει να παράγουν οι επενεργητές του συστήματος. Επίσης παρουσιάζεται ο τρόπος ορισμού και δημιουργίας τροχιών στο πεδίο των αρθρώσεων και στο Καρτεσιανό επίπεδο, για κινήσεις των αρθρώσεων και του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα αντιστοίχως.

4.1 Νόμος Ελέγχου

Με διαθέσιμο το δυναμικό μοντέλο του ρομπότ είναι εύκολο να εφαρμοστεί μη γραμμικός έλεγχος δυνάμεων και ροπών με βάση το μοντέλο [52], [50]. Σε αυτόν το νόμο ελέγχου οι απαιτούμενες από τους επενεργητές του ρομποτικού συστήματος δυνάμεις και ροπές υπολογίζονται συνεχώς με χρήση του δυναμικού μοντέλου, τα δε

παραμένοντα σφάλματα παραλαμβάνονται και εξουδετερώνονται από κάποιον απλό νόμο ελέγχου, εν προκειμένω τύπου PD. Στο Σχήμα 4-1 παρουσιάζεται το σχετικό δομικό διάγραμμα.



Σχήμα 4-1. Δομικό διάγραμμα PD ελέγχου δυνάμεων και ροπών με βάση το μοντέλο (Model Based PD Force/Torque Controller).

Στον ελεγκτή εισάγεται η εντολή ελέγχου που περιλαμβάνει στοιχεία επιθυμητής θέσης, q_d , ταχύτητας, \dot{q}_d , και επιτάχυνσης, \ddot{q}_d , καθώς και η ανάδραση στοιχείων θέσης, q , και ταχύτητας, \dot{q} , του ρομπότ. Ο νόμος ελέγχου αρχικά υπολογίζει μία βοηθητική επιτάχυνση, \ddot{q}^* , χρησιμοποιώντας το σφάλμα επιθυμητής θέσης και ταχύτητας και τους αντίστοιχους όρους του PD ελέγχου, K_D και K_P , ως εξής:

$$\ddot{q}^* = \ddot{q}_d + K_D (\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P (q_d - q) \quad (4-1)$$

Στη συνέχεια, η βοηθητική επιτάχυνση που υπολογίστηκε και η ανάδραση θέσης και ταχύτητας εισάγονται στο μοντέλο του συστήματος, δηλαδή στην εξίσωση Euler – Lagrange:

$$\tilde{M}(q)\ddot{q}^* + \tilde{C}(q, \dot{q}) = Q \quad (4-2)$$

Οι πίνακες \tilde{M} και \tilde{C} που περιγράφουν τη δυναμική του συστήματος πρέπει να υπολογίζονται συνεχώς, τροφοδοτούμενοι με το διάνυσμα θέσης και ταχύτητας του ρομπότ. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό υπολογιστικό κόστος για συστήματα πολλών μεταβλητών. Το υπό μελέτη σύστημα όμως, διαθέτει μόνο επτά μεταβλητές, συνεπώς το υπολογιστικό κόστος είναι ελάχιστο για κάθε σύγχρονο υπολογιστή. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στον υπολογιστή του ρομπότ⁵⁹ ο χρόνος υπολογισμού του νόμου ελέγχου είναι της τάξεως των ολίγων ms ανά κύκλο.

Με γνωστή τη δυναμική του ρομπότ ανά πάσα στιγμή, υπολογίζεται το διάνυσμα Q που περιλαμβάνει τις γενικευμένες δυνάμεις και ροπές που πρέπει να ασκηθούν στο ρομποτικό σύστημα, ώστε να κινηθεί σύμφωνα με την εντολή ελέγχου που δέχθηκε. Η εξίσωση κλειστού βρόχου γράφεται ως εξής:

$$\tilde{M}\ddot{q}^* + \tilde{C} = M\ddot{q} + C \Rightarrow \tilde{M}(\ddot{q}_d + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q)) + \tilde{C} = M\ddot{q} + C \quad (4-3)$$

Υπό την υπόθεση ότι $M \simeq \tilde{M}$ και $C \simeq \tilde{C}$, δηλαδή την υπόθεση ακριβούς γνώσης των παραμέτρων του συστήματος που υπεισέρχονται στους πίνακες M και C , ισχύει:

$$\begin{aligned} M(\ddot{q}_d + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q)) + C = M\ddot{q} + C \Rightarrow \\ M((\ddot{q}_d - \ddot{q}) + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q)) = 0 \end{aligned} \quad (4-4)$$

Ο πίνακας M είναι θετικά ορισμένος, επομένως προκύπτουν επτά γραμμικές και αποζευγμένες⁶⁰ εξισώσεις σφάλματος [2]:

$$\ddot{e}_j + K_{Dj}\dot{e}_j + K_{Pj}e_j = 0, \quad j = 1, \dots, 7 \quad (4-5)$$

Προς εύρεση των κερδών ελέγχου, K_P και K_D , επιλύεται η εξίσωση σφάλματος ως απλή, γραμμική, ομογενής διαφορική δεύτερης τάξης:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{e}_j + K_{Dj}\dot{e}_j + K_{Pj}e_j = 0 \\ s^2 + 2\zeta\omega_j s + \omega_j^2 = 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} K_{Pj} = \omega_j^2 \\ K_{Dj} = 2\zeta\omega_j \end{aligned} \quad (4-6)$$

Προς αποφυγή ταλαντώσεων και υπερακοντίσεων επιλέγεται η κρίσιμη απόσβεση, $\zeta = 1$, για όλα τα κέρδη. Συνεπώς, ο χρόνος αποκατάστασης είναι:

⁵⁹ Advantech PCM-4153

⁶⁰ Μία εξίσωση ανά μεταβλητή κατάσταση.

$$t_s = \frac{6}{\omega} \Rightarrow \omega = \frac{6}{t_s} \quad (4-7)$$

όπου ω , η φυσική συχνότητα. Οι τιμές των κερδών ελέγχου εκφράζονται ως προς τον χρόνο αποκατάστασης:

$$K_{Pj} = \left(\frac{6}{t_{sj}} \right)^2, K_{Dj} = \frac{12}{t_{sj}} \quad (4-8)$$

Για λόγους ελαχιστοποίησης τυχόν ταλαντώσεων είναι γενικά προτιμότερο να επιλέγεται ο ίδιος χρόνος αποκατάστασης για όλες τις μεταβλητές κατάστασης ενός συστήματος. Εντούτοις, στη συγκεκριμένη περίπτωση κρίνεται σκόπιμο να ορισθούν δύο τιμές – μία για το κυρίως σώμα του ρομπότ, δηλαδή τις μεταβλητές κατάστασης x , y και θ , και μία για τις αρθρώσεις των βραχιόνων, δηλαδή τις μεταβλητές κατάστασης q_{i1} και q_{i2} . Αυτό, διότι οι κινητήρες που οδηγούν τις αρθρώσεις του βραχίονα δεν υπόκεινται στους περιορισμούς χαμηλής συχνότητας και ασυνεχούς λειτουργίας των προωθητήρων του ρομπότ, συνεπώς με επιλογή χαμηλότερου χρόνου αποκατάστασης δύνανται να αποκρίνονται ταχύτερα και ακριβέστερα.

Ανακεφαλαιώνοντας, ο μη γραμμικός PD έλεγχος δυνάμεων και ροπών με βάση το μοντέλο οδηγεί σε γραμμικές και αποζευγμένες εξισώσεις σφάλματος, επιτρέποντας εύκολη επιλογή κερδών ελέγχου K_D και K_P διά της επιλογής χρόνου αποκατάστασης, αρκεί να είναι γνωστές με ακρίβεια οι παράμετροι του συστήματος. Στην παρούσα ανάλυση θεωρούνται γνωστές, τα δε σφάλματα της απόκρισης παραλαμβάνονται από τον PD έλεγχο. Η έξοδος του ελέγχου είναι το διάνυσμα γενικευμένων δυνάμεων και ροπών, Q . Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος μετατροπής του διανύσματος Q σε κατάλληλες εντολές ελέγχου για τους επενεργητές του ρομποτικού συστήματος, δηλαδή τους προωθητήρες, το σφόνδυλο αντίδρασης και τους κινητήρες των βραχιόνων.

4.2 Εντολές ελέγχου επενεργητών

Το διάνυσμα γενικευμένων δυνάμεων και ροπών, Q , αποτελείται από τις συνισταμένες των δυνάμεων και ροπών που ασκούνται στο κέντρο μάζας του σώματος του ρομπότ και από τις γενικευμένες ροπές που ασκούνται στις αρθρώσεις κάθε βραχίονα – βλέπε εξίσωση (3-26).

Οι δυνάμεις και ροπές που ασκούνται στο κέντρο μάζας του σώματος του ρομπότ, δηλαδή τα τρία πρώτα στοιχεία του διανύσματος Q , σχετίζονται με τις δυνάμεις λόγω των προωθητήρων και τη ροπή λόγω του σφονδύλου αντίδρασης

όπως ορίζουν οι εξισώσεις (3-17) έως (3-21). Για να βρεθούν οι δυνάμεις των προωθητήρων και η ροπή λόγω του σφονδύλου αντίδρασης ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων αυτών.

Αρχικά οι δυνάμεις μεταφέρονται από το κέντρο μάζας στο κέντρο συμμετρίας του σώματος του ρομπότ, δηλαδή στο κέντρο της κυκλικού σχήματος περιμέτρου του – βλέπε εξίσωση (3-21):

$$b = \begin{bmatrix} f_x^{cc} \\ f_y^{cc} \\ \tau_\theta^{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x^{cm} \\ f_y^{cm} \\ \tau_\theta^{cm} + a_B (f_y^{cm} \cos d_B - f_x^{cm} \sin d_B) \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

Έπειτα υπολογίζεται το διάνυσμα Q_{act}^B των απαιτούμενων δυνάμεων και της απαιτούμενης ροπής από τα ζεύγη των προωθητήρων και από τον σφόνδυλο αντίδρασης αντίστοιχα, ως εξής – βλέπε εξισώσεις (3-17) και (3-20):

$$A \cdot Q_{act}^B = b \Rightarrow Q_{act}^B = A^+ \cdot b \quad (4-10)$$

Με A^+ συμβολίζεται ο ψευδοαντίστροφος πίνακας του A [40]. Εφόσον ο πίνακας A είναι διαστάσεων 3×4 και τρίτης τάξης, δηλαδή είναι “full row rank”, για τον ψευδοαντίστροφο ισχύει:

$$A^+ = A^T (AA^T)^{-1} \quad (4-11)$$

Εάν ζητείται κατά προτεραιότητα ενεργοποίηση του σφονδύλου αντίδρασης για λόγους εξοικονόμησης προωθητικού αερίου, η λύση τροποποιείται με χρήση κατάλληλου πίνακα συντελεστών βαρύτητας [63], W , ως εξής:

$$\tilde{Q}_{act}^B = W \cdot Q_{act}^B \Rightarrow Q_{act}^B = W^{-1} \cdot \tilde{Q}_{act}^B \quad (4-12)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται εκ νέου η εξίσωση (4-10), λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (4-12).

$$\begin{aligned} A \cdot Q_{act}^B = b &\Rightarrow A \cdot W^{-1} \cdot \tilde{Q}_{act}^B = b \Rightarrow \tilde{Q}_{act}^B = (A \cdot W^{-1})^+ \cdot b \Rightarrow \\ \tilde{Q}_{act}^B &= (A \cdot W^{-1})^T \cdot (A \cdot W^{-1} \cdot (A \cdot W^{-1})^T)^{-1} \cdot b \Rightarrow \\ \tilde{Q}_{act}^B &= W^{-T} \cdot A^T \cdot (A \cdot W^{-1} \cdot W^{-T} \cdot A^T)^{-1} \cdot b \Rightarrow \\ Q_{act}^B &= W^{-1} \cdot W^{-T} \cdot A^T \cdot (A \cdot W^{-1} \cdot W^{-T} \cdot A^T)^{-1} \cdot b \end{aligned} \quad (4-13)$$

Σημειώνεται ότι ο όρος $W^{-1} \cdot W^{-T}$ είναι στατικός, συνεπώς υπολογίζεται μία φορά και εισάγεται ως παράμετρος στο σύστημα. Αντίθετα, ο πίνακας A πρέπει να υπολογίζεται συνεχώς, διότι εξαρτάται από τη γωνία στροφής του σώματος του ρομπότ.

Έχοντας υπολογίσει το διάνυσμα Q_{act}^B , εξετάζεται εάν τα αποτελέσματα είναι εντός των ορίων ελάχιστης και μέγιστης δυνατότητας των αντίστοιχων συστημάτων. Συγκεκριμένα, για τους προωθητήρες υπάρχει άνω και κάτω όριο αποδιδόμενης δύναμης – σε περίπτωση που η ζητούμενη δύναμη είναι εκτός αυτών των ορίων, λαμβάνει την τιμή του ορίου που παραβίασε. Η αποδιδόμενη ροπή λόγω του σφονδύλου αντίδρασης συνδέεται με τις δυνατότητες του DC ηλεκτροκινητήρα του. Σε περίπτωση που ο κινητήρας βρεθεί σε κορεσμό, δηλαδή φτάσει τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα περιστροφής του υπό το εκάστοτε φορτίο, χάνει προσωρινά τη δυνατότητα απόδοσης μέρους της ζητούμενης από αυτόν ροπής. Τότε θα πρέπει να μεταβάλλεται κατάλληλα η ενεργοποίηση των προωθητήρων προς αντιστάθμιση της απώλειας ροπής. Ακολουθούν οι σχετικές εξισώσεις.

Σύμφωνα με την εξίσωση (3-19), όταν η ζητούμενη απόδοση ροπής από τον σφόνδυλο αντίδρασης προς το ρομποτικό σύστημα είναι τ_{RW} , τότε από τον κινητήρα του σφονδύλου ζητείται ροπή:

$$\tau_m = \frac{-\tau_{RW}}{n_m} \quad (4-14)$$

όπου n_m , ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του συστήματος του σφονδύλου αντίδρασης και του κινητήρα του. Για την απαιτούμενη ροπή, τ_m , υπολογίζεται το όριο ταχύτητας περιστροφής κορεσμού, ω_{ms} , σύμφωνα με την εξίσωση που δίδει το ηλεκτρικό κύκλωμα DC ηλεκτροκινητήρων, μόνιμου μαγνήτη [49]:

$$\omega_{ms} = \frac{V_k}{k_t} - \frac{R_a}{k_t^2} |\tau_m| \quad (4-15)$$

όπου,

- V_k , η ονομαστική τάση του κινητήρα.
- R_a , η αντίσταση του τυλίγματος του τυμπάνου του κινητήρα.
- k_t , η σταθερά ροπής του κινητήρα.

Εάν η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, ω_m , είναι μικρότερη ή οριακά ίση με την ω_{ms} , τότε η ζητούμενη ροπή, τ_m , μπορεί να αποδοθεί. Ειδάλλως αποδίδεται η μέγιστη δυνατή ροπή υπό την ταχύτητα ω_m , η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$\tau_{m,a} = -\text{sign}(\tau_{RW}) \cdot \left[\frac{k_t V_k - k_t^2 |\omega_m|}{R_a} \right] \quad (4-16)$$

Σε κάθε περίπτωση, έχει βρεθεί η τελικώς αποδιδόμενη από τον κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης ροπή και για τη δεύτερη περίπτωση ορίζεται η πραγματικά αποδιδόμενη ροπή από το σύστημα του σφονδύλου αντίδρασης προς το ρομποτικό σύστημα, $\tau_{RW,a}$:

$$\tau_{RW,a} = -\tau_{m,a} n_m \quad (4-17)$$

Ισχύει $\tau_{RW,a} < \tau_{RW}$. Το έλλειμμα ροπής καλύπτεται μέσω της δύναμης f_a , που ισόποσα προστίθεται σε ή αφαιρείται από όλες τις προηγούμενως υπολογισθείσες συνισταμένες δυνάμεις έκαστου ζεύγους προωθητήρων. Συγκεκριμένα:

$$f_a = \frac{|\tau_{RW} - \tau_{RW,a}|}{3r_2}, \quad (4-18)$$

$$\tau_{RW} > 0 \Rightarrow f_{i,a} = f_i + f_a \Big| i = \{12, 34, 56\}$$

$$\tau_{RW} < 0 \Rightarrow f_{i,a} = f_i - f_a \Big| i = \{12, 34, 56\}$$

όπου με $f_{i,a}$ συμβολίζονται οι διορθωμένες κατά f_a δυνάμεις των ζευγών των προωθητήρων και με r_2 συμβολίζεται η ακτίνα του νοητού κύκλου επί του οποίου είναι συμμετρικά τοποθετημένα τα ζεύγη των προωθητήρων.

Σε κάθε περίπτωση, οι συνισταμένες των δύο αντίροπων δυνάμεων κάθε ζεύγους προωθητήρων αναλύονται ως εξής:

$$f_{ij} > 0 \Rightarrow \begin{cases} f_i = f_{ij} \\ f_j = 0 \end{cases}$$

$$f_{ij} < 0 \Rightarrow \begin{cases} f_i = 0 & i = \{1, 3, 5\} \\ f_j = -f_{ij} & j = \{2, 4, 6\} \end{cases} \quad (4-19)$$

$$f_{ij} = 0 \Rightarrow \begin{cases} f_i = 0 \\ f_j = 0 \end{cases}$$

Έπειτα, οι προκύπτουσες συνιστώσες οριοθετούνται ως εξής:

$$\begin{aligned} f_i > f_{\max} &\Rightarrow f_i = f_{\max} \\ f_i < f_{\min} &\Rightarrow f_i = 0 \end{aligned} \Big| i = \{1, \dots, 6\} \quad (4-20)$$

Πλέον είναι γνωστός ο τρόπος μετατροπής των γενικευμένων δυνάμεων και ροπών, που ο έλεγχος απαιτεί να ασκηθούν στο κέντρο μάζας του ρομπότ, σε

δυνάμεις που πρέπει να παράγουν οι προωθητήρες και ροπή που πρέπει να παράγει ο σφόνδυλος αντίδρασης του ρομπότ, στα πλαίσια των δυνατοτήτων τους.

Ομοίως ευρίσκονται οι ζητούμενες από τους κινητήρες των βραχιόνων ροπές, μέσω αντίστροφης επίλυσης των εξισώσεων (3-22) και (3-25):

$$\begin{bmatrix} \tau_{q11} \\ \tau_{q12} \\ \tau_{q21} \\ \tau_{q22} \end{bmatrix} = \eta \cdot n \begin{bmatrix} \tau_{11} + \tau_{12} \\ \tau_{12} \\ \tau_{21} + \tau_{22} \\ \tau_{22} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \tau_{11} \\ \tau_{12} \\ \tau_{21} \\ \tau_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{q11} - \tau_{q12} \\ \tau_{q12} \\ \tau_{q21} - \tau_{q22} \\ \tau_{q22} \end{bmatrix} / (\eta \cdot n) \quad (4-21)$$

Το αποτέλεσμα οριοθετείται απολύτως από τη μέγιστη επιτρεπτή ροπή εξόδου των μειωτήρων, τ_{lim} . Πρέπει:

$$|\tau_{ij}| \leq \tau_{lim}, \quad i, j = \{1, 2\} \quad (4-22)$$

Τελικά, από το διάνυσμα γενικευμένων δυνάμεων και ροπών, Q , πρόεκυψε το διάνυσμα Q_{act} , που περιλαμβάνει τις δυνάμεις και ροπές των επενεργητών του συστήματος:

$$Q_{act} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \\ \tau_m \\ \tau_{11} \\ \tau_{12} \\ \tau_{21} \\ \tau_{22} \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

4.3 Σχεδιασμός τροχιών για ρομποτικό βραχίονα

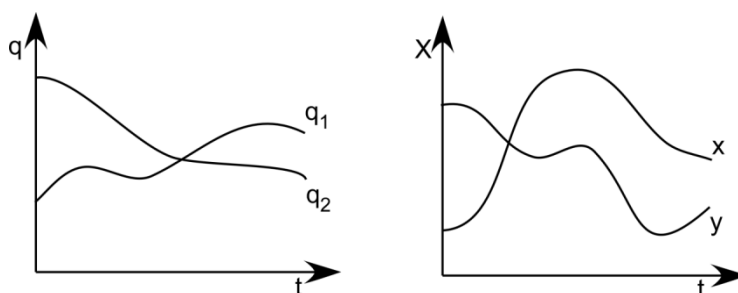
Ο ελεγκτής που παρουσιάστηκε δέχεται ως εντολές διανύσματα επιθυμητής θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης για κάθε μεταβλητή κατάσταση, τα οποία μπορεί να είναι στατικά ή μεταβαλλόμενα με το χρόνο (κυματομορφές). Στην πρώτη περίπτωση τα διανύσματα ορίζουν μία επιθυμητή τελική κατάσταση για το ρομποτικό σύστημα, προφανώς μηδενικής ταχύτητας και επιτάχυνσης, και ο ελεγκτής προσπαθεί να την επιτύχει. Στη δεύτερη περίπτωση τα διανύσματα ορίζουν μία μεταβαλλόμενη

ακολουθία θέσεων, ταχυτήτων και επιταχύνσεων, δηλαδή μία τροχιά που ζητείται να ακολουθήσει η απόκριση του συστήματος.

Θα παρουσιαστεί ο τρόπος δημιουργίας των εν λόγω διανυσμάτων ώστε οι προκύπτουσες τροχιές να είναι οι επιθυμητές. Η μελέτη αφορά σε τροχιές για κινήσεις των αρθρώσεων ενός ρομποτικού βραχίονα και για κινήσεις του τελικού σημείου δράσης του με το σώμα του ρομπότ να βρίσκεται σε κίνηση [1], [50]. Ο σχεδιασμός τροχιών για κινήσεις του κυρίως σώματος του ρομπότ είναι εκτός του πλαισίου της συγκεκριμένης εργασίας.

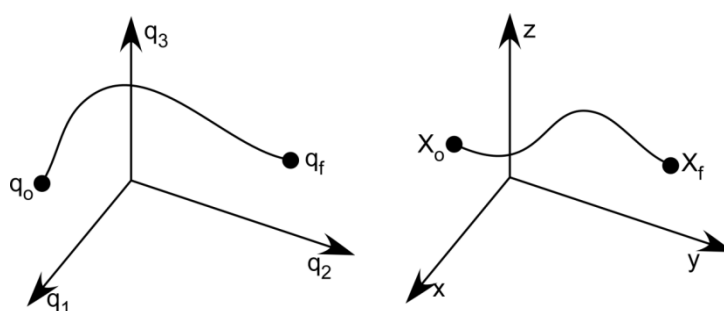
4.3.1 Γενικά

Με τον όρο τροχιά⁶¹ νοείται η ιστορία των γωνιών των αρθρώσεων ενός βραχίονα ή των θέσεων στον Καρτεσιανό χώρο κάποιου σημείου ενδιαφέροντος⁶². Δηλαδή, οι τροχιές είναι συναρτήσεις του χρόνου που περιγράφουν την εξέλιξη των μεταβλητών αρθρώσεων ή των θέσεων στο χώρο.



Σχήμα 4-2. Παράδειγμα τροχιάς μεταβλητών αρθρώσεων και Καρτεσιανών θέσεων.

Σε αντιδιαστολή, ο όρος πορεία αναφέρεται σε μία συνεχή μετάβαση ή γραμμή σε έναν πολυδιάστατο χώρο μεταξύ δύο σημείων του και δεν περιλαμβάνει στοιχεία για τη χρονική εξέλιξη των μεταβλητών.

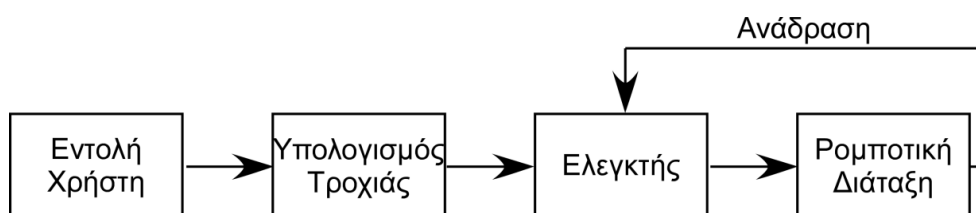


Σχήμα 4-3. Παράδειγμα πορείας στον χώρο των αρθρώσεων και στον Καρτεσιανό χώρο.

⁶¹ trajectory

⁶² Συνήθως, του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα.

Με τον καθορισμό τροχιών προσφέρεται η δυνατότητα ακριβούς καθορισμού του τρόπου μετακίνησης ενός βραχίονα, χωρίς να απαιτείται η συνεχής εισαγωγή εντολών ελέγχου από τον χρήστη. Ο χρήστης ορίζει την επιθυμητή τροχιά μέσω εντολών υψηλότερου επιπέδου προς το σύστημα, π.χ.: "Μεταφορά του τελικού σημείου δράσης στο σημείο (x_f, y_f) , εντός χρόνου t_f , ακολουθώντας το προφίλ $f(x(t), y(t))$ ". Στη συνέχεια, το σύστημα δημιουργεί κατάλληλα διανύσματα επιθυμητής θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης υπολογίζοντας τις σχετικές συναρτήσεις, δηλαδή τις $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$ και $y(t)$, $\dot{y}(t)$, $\ddot{y}(t)$ του παραδείγματος, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, σύμφωνα με τον ρυθμό υπολογισμού τροχιάς που έχει ορισθεί. Για εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων η παραπάνω διαδικασία μπορεί να εκτελείται offline και να φορτώνονται τα αποτελέσματα στη μνήμη του υπολογιστή του ρομπότ. Τελικά, ο ελεγκτής του συστήματος τροφοδοτείται με τα προαναφερθέντα διανύσματα και επιχειρεί να οδηγήσει το σύστημα όπως αυτά ορίζουν.



Σχήμα 4-4. Δομικό διάγραμμα – Σύνδεση τροχιάς σε έλεγχο.

4.3.2 Τροχιά στο χώρο των αρθρώσεων με πολυώνυμα τρίτου βαθμού

Μελετάται η περίπτωση δημιουργίας πολυωνυμικής τροχιάς τρίτου βαθμού για κάθε μία εκ των δύο αρθρώσεων ενός βραχίονα, με σκοπό την ομαλή εκκίνηση από συνθήκες ακινησίας, q_o , και τη μετάβαση σε νέα θέση, q_f , όπου θα υπάρξει ομαλή ακινητοποίηση των αρθρώσεων, εντός χρόνου t_f . Οι ζητούμενες γωνίες των αρθρώσεων, $q_d = [q_{d1}, q_{d2}]^T$, ορίζονται σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3.2, είναι δηλαδή q_{d1} , η σχετική γωνία στροφής του πρώτου συνδέσμου του βραχίονα ως προς το σώμα του ρομπότ και q_{d2} , η σχετική γωνία μεταξύ των δύο συνδέσμων του βραχίονα, με τον δείκτη να υποδηλώνει ότι οι γωνίες αναφέρονται σε επιθυμητή τροχιά⁶³. Εφόσον οι γωνίες είναι σχετικές, οι προκύπτουσες τροχιές θα είναι επίσης σχετικές ως προς τα αντίστοιχα συστήματα αναφοράς. Πρακτικά, είναι χρήσιμες κυρίως για τοποθέτηση των βραχιόνων σε συγκεκριμένες στάσεις ως προς το σώμα

⁶³ "d", εκ του desired.

του ρομπότ ή για εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών επί του σώματός του. Στη συνέχεια υπολογίζεται το πολυώνυμο τρίτου βαθμού, $q_d(t)$. Έστω:

$$\begin{aligned} q_d(t) &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \Rightarrow \\ \dot{q}_d(t) &= a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \Rightarrow \\ \ddot{q}_d(t) &= 2a_2 + 6a_3 t \end{aligned} \quad (4-24)$$

όπου a_i , οι συντελεστές του πολυωνύμου και t , ο χρόνος.

Οι αρχικές και τελικές συνθήκες, για $t = 0$ και $t = t_f$ αντίστοιχα, ορίστηκαν:

$$\begin{aligned} q_d(0) &= q_o, \quad q_d(t_f) = q_f \\ \dot{q}_d(0) &= 0, \quad \dot{q}_d(t_f) = 0 \end{aligned} \quad (4-25)$$

Εισάγοντάς τις στις εξισώσεις (4-25) βρίσκονται οι συντελεστές του πολυωνύμου:

$$\begin{aligned} a_0 &= q_o \\ a_1 &= 0 \\ a_2 &= \frac{3}{t_f^2} (q_f - a_0) \\ a_3 &= -\frac{2}{t_f^3} (q_f - a_0) \end{aligned} \quad (4-26)$$

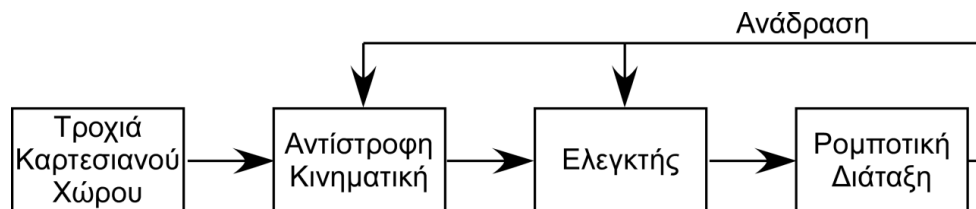
Συνεπώς, ο χρήστης του συστήματος μπορεί να εισάγει εντολή για πολυωνυμική τροχιά στο χώρο των αρθρώσεων, επιλέγοντας μόνο τις τελικές γωνίες των αρθρώσεων και τη χρονική διάρκεια της κίνησης. Οι αρχικές γωνίες είναι πάντα γνωστές μέσω των αισθητήρων του συστήματος.

4.3.3 Τροχιά ευθύγραμμης κίνησης του τελικού σημείου δράσης στον Καρτεσιανό χώρο

Ο σχεδιασμός τροχιάς στον Καρτεσιανό χώρο χρησιμοποιείται, όταν ζητείται από το τελικό σημείο δράσης ενός βραχίονα να μετακινηθεί σε συγκεκριμένο σημείο του επιπέδου, ακολουθώντας συγκεκριμένη τροχιά ορισμένη στον Καρτεσιανό χώρο. Αφού σχεδιαστεί η επιθυμητή τροχιά, πρέπει να μετατραπεί σε κατάλληλες γωνίες αρθρώσεων με εφαρμογή αντίστροφης κινηματικής, καθώς ο ελεγκτής που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί ως μεταβλητές κατάστασης τις γωνίες των αρθρώσεων των βραχίωνων (Σχήμα 4-5). Η τροχιά στον Καρτεσιανό χώρο υπολογίζεται μία φορά ή φορτώνεται στη μνήμη του ρομπότ, αλλά η αντίστροφη κινηματική πρέπει να υπολογίζεται συνεχώς, διότι οι προκύπτουσες γωνίες των αρθρώσεων κάθε

βραχίονα εξαρτώνται και από την εν γένει μεταβαλλόμενη θέση και στροφή του σώματος του ρομπότ.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας τροχιάς για ευθύγραμμη κίνηση του τελικού σημείου δράσης ενός βραχίονα στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων του επιπέδου, καθώς και η αντίστροφη κινηματική.



Σχήμα 4-5. Δομικό διάγραμμα – Σύνδεση τροχιάς Καρτεσιανού χώρου σε έλεγχο, με υπολογισμό της αντίστροφης κινηματικής.

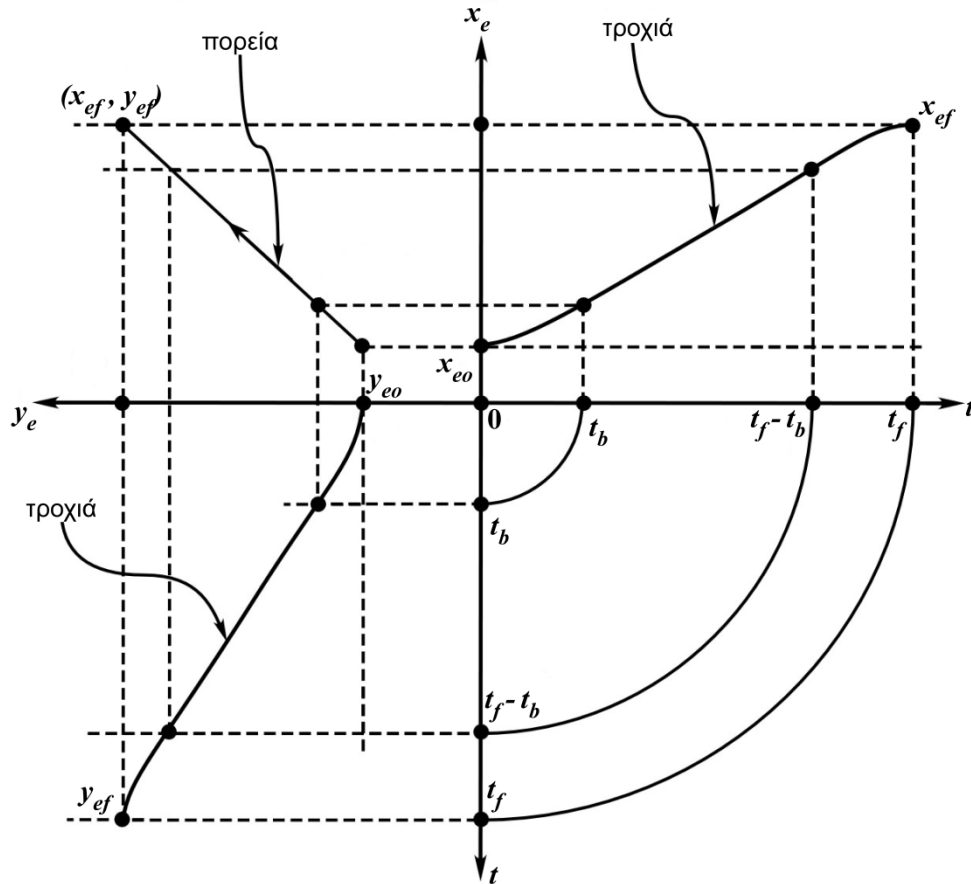
Έστω $X_e = (x_e, y_e)$, η απόλυτη θέση του τελικού σημείου δράσης στο επίπεδο και $X_{eo} = (x_{eo}, y_{eo})$, το σημείο εκκίνησης και $X_{ef} = (x_{ef}, y_{ef})$, το σημείο παύσης της κίνησής του. Αρχικά το τελικό σημείο δράσης θα επιταχύνεται ευθύγραμμα και ομαλά για χρόνο t_b ακολουθώντας παραβολική τροχιά κατά x_e και y_e ως προς το χρόνο. Στη συνέχεια θα κινείται ευθύγραμμα με σταθερή ταχύτητα, συνεπώς οι τροχιές των x_e και y_e θα είναι ευθείες ως προς τον χρόνο. Στο τέλος το τελικό σημείο δράσης θα επιβραδύνεται ευθύγραμμα και ομαλά για χρόνο t_b , οπότε οι τροχιές των x_e και y_e θα είναι πάλι παραβολικά τμήματα ως προς το χρόνο. Η συνολική διάρκεια της κίνησης είναι t_f . Τα ανωτέρω σε μορφή εξισώσεων τροχιών των x_e και y_e :

$$\begin{cases}
 x_e(t) = \begin{cases} x_{eo} + \frac{1}{2}\gamma_x t^2 & 0 \leq t \leq t_b \\
 x_{eo} + \frac{1}{2}\gamma_x t_b^2 + \gamma_x t_b (t - t_b) & t_b \leq t \leq t_f - t_b \\
 x_f - \frac{1}{2}\gamma_x (t_f - t)^2 & t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases} \\
 y_e(t) = \begin{cases} y_{eo} + \frac{1}{2}\gamma_y t^2 & 0 \leq t \leq t_b \\
 y_{eo} + \frac{1}{2}\gamma_y t_b^2 + \gamma_y t_b (t - t_b) & t_b \leq t \leq t_f - t_b \\
 y_f - \frac{1}{2}\gamma_y (t_f - t)^2 & t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases}
 \end{cases} \quad (4-27)$$

όπου γ_x και γ_y , οι σταθερές των παραβολικών τμημάτων κατά x και y , δηλαδή οι σταθερές επιτάχυνσης/επιβράδυνσης που υπολογίζονται ως εξής:

$$x_e\left(\frac{t_f}{2}\right) = \frac{x_{eo} + x_{ef}}{2} = x_{eo} + \frac{1}{2}\gamma_x t_b^2 + \gamma_x t_b\left(\frac{t_f}{2} - t_b\right) \Rightarrow \gamma_x = \frac{x_{ef} - x_{eo}}{t_b t_f - t_b^2}$$

$$y_e\left(\frac{t_f}{2}\right) = \frac{y_{eo} + y_{ef}}{2} = y_{eo} + \frac{1}{2}\gamma_y t_b^2 + \gamma_y t_b\left(\frac{t_f}{2} - t_b\right) \Rightarrow \gamma_y = \frac{y_{ef} - y_{eo}}{t_b t_f - t_b^2}$$
(4-28)



Σχήμα 4-6. Οι τροχιές x_e , y_e και η πορεία στον Καρτεσιανό χώρο.

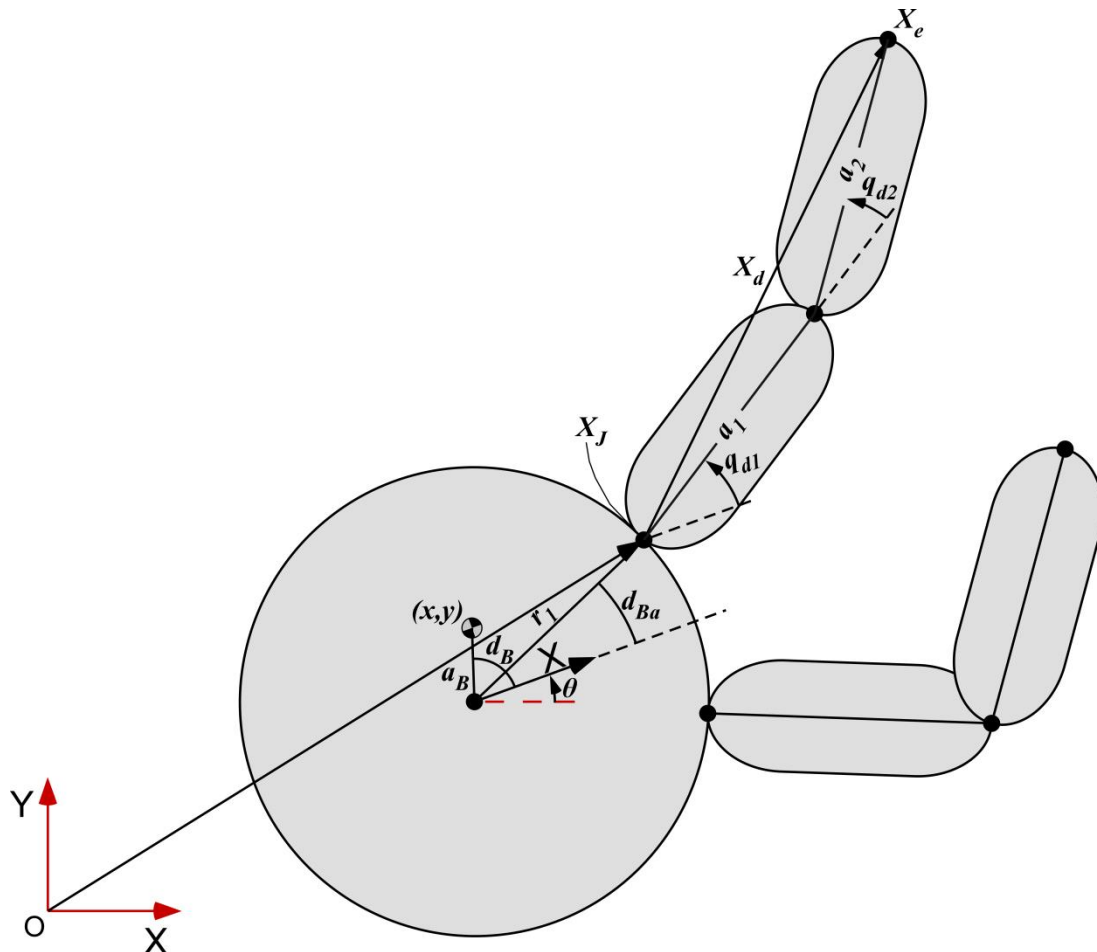
Συνεπώς, ο χρήστης του συστήματος μπορεί να εισάγει εντολή για ευθύγραμμη κίνηση του τελικού σημείου δράσης ενός βραχίονα επιλέγοντας μόνο την τελική του θέση, τη συνολική χρονική διάρκεια της κίνησης, t_f και τον χρόνο παρεμβολής, t_b . Η αρχική θέση του άκρου μπορεί να υπολογίζεται ανά πάσα στιγμή από το σύστημα με υπολογισμό της ευθείας κινηματικής και να χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό της τροχιάς.

Αντίστροφη Κινηματική

Με δεδομένη τη θέση $X_e = (x_e, y_e)$ του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα, τη θέση $X = (x, y)$ του ρομπότ στο επίπεδο και τη γωνία στροφής του σώματος του ρομπότ, θ , μπορούν να υπολογισθούν οι γωνίες των αρθρώσεων με αντίστροφη

κινηματική. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4-7 και την εξίσωση (3-5), η θέση της πρώτης άρθρωσης ενός βραχίονα (εδώ του πρώτου) στο επίπεδο είναι:

$$X_J = \begin{bmatrix} x_J \\ y_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - a_B \cos(\theta + d_B) + R_1 \cos(\theta + d_{Ba}) \\ y - a_B \sin(\theta + d_B) + R_1 \sin(\theta + d_{Ba}) \end{bmatrix} \quad (4-29)$$



Σχήμα 4-7. Αντίστροφη κινηματική σε βραχίονα δύο περιστροφικών αρθρώσεων με κινούμενο το σώμα του ρομπότ.

Για την αντίστροφη κινηματική χρησιμοποιείται το διάνυσμα X_d που εκφράζει τη σχετική θέση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα ως προς τη θέση της πρώτης άρθρωσης και ορίζεται:

$$X_d = X_e - X_J = \begin{bmatrix} x_e - x_J \\ y_e - y_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \quad (4-30)$$

Σκοπός είναι η εύρεση του διανύσματος γωνιών των αρθρώσεων, $q_d = (q_{d1}, q_{d2})$, που αντιστοιχεί στο διάνυσμα X_d . Σύμφωνα με το νόμο του συνημίτονου, για τη γωνία q_{d2} ισχύει:

$$x_d^2 + y_d^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(q_{d2}) \Rightarrow$$

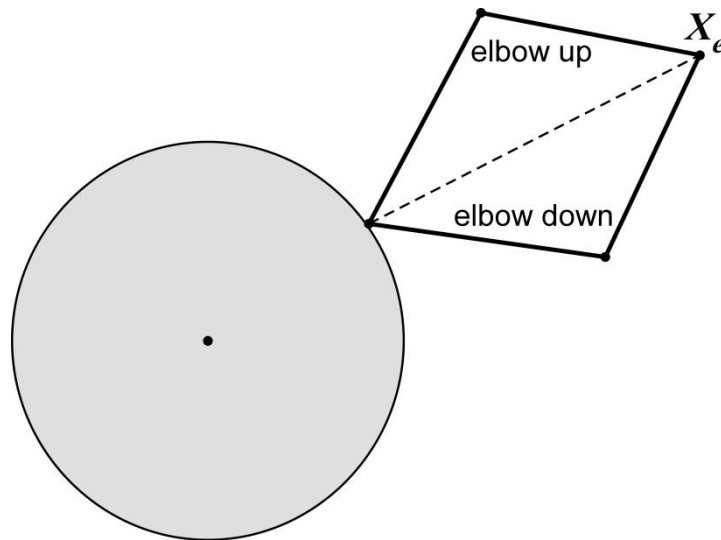
$$q_{d2} = \pm \cos^{-1} \left(\frac{x_d^2 + y_d^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \right) \quad (4-31)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η γωνία q_{d1} :

$$q_{d1} = \text{atan2}(y_d, x_d) - \text{atan2}(a_2 \sin(q_{d2}), a_1 + a_2 \cos(q_{d2})) - \theta \quad (4-32)$$

Ο τελευταίος όρος, $-\theta$, εμφανίζεται διότι η μεταβλητή γωνία στροφής q_1 , έχει ορισθεί ως σχετική γωνία μεταξύ του πρώτου συνδέσμου του βραχίονα και του σώματος του ρομπότ.

Ως ήτο αναμενόμενο εμφανίζονται δύο ζεύγη λύσεων, διότι για κάθε σημείο X_e του τελικού σημείου δράσης υπάρχουν οι δύο διαφορετικές διαμορφώσεις που φαίνονται στο Σχήμα 4-8. Ο χρήστης θα πρέπει να ορίζει την επιθυμητή διαμόρφωση.



Σχήμα 4-8. Elbow up/down configurations.

Με γνωστό το διάνυσμα των γωνιών των αρθρώσεων υπολογίζονται τα αντίστοιχα διανύσματα της γωνιακής ταχύτητας και επιτάχυνσης:

$$\dot{q}_d = \frac{q_d(t) - q_d(t-dt)}{dt}$$

$$\ddot{q}_d = \frac{\dot{q}_d(t) - \dot{q}_d(t-dt)}{dt} \quad (4-33)$$

Πλέον, είναι γνωστά όλα τα ζητούμενα διανύσματα $(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)$ και μπορεί να τροφοδοτηθεί ο ελεγκτής του συστήματος, ώστε το τελικό σημείο δράσης κάθε βραχίονα να εκτελέσει ευθύγραμμη κίνηση στον Καρτεσιανό χώρο.

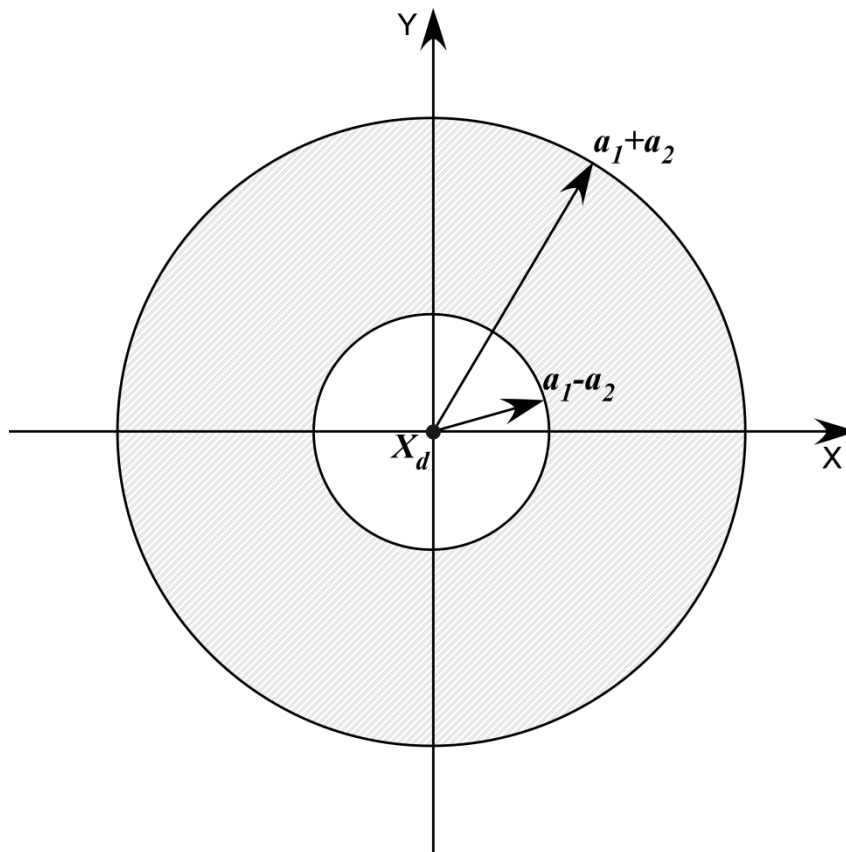
4.3.4 Προσπελάσιμος χώρος εργασίας

Για να ισχύουν τα ανωτέρω πρέπει το σημείο X_e του επιπέδου να είναι προσπελάσιμο από το τελικό σημείο δράσης του βραχίονα, δεδομένης της στάσης του ρομπότ στο επίπεδο. Ισοδύναμα, πρέπει να ορίζεται το αντίστροφο συννημίτονο της εξίσωσης (4-31), δηλαδή να ισχύει:

$$-1 \leq \frac{x_d^2 + y_d^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \leq 1 \Rightarrow \quad (4-34)$$

$$(a_1 - a_2)^2 \leq x_d^2 + y_d^2 \leq (a_1 + a_2)^2$$

Ο γεωμετρικός τόπος της εξίσωσης (4-34) αποτελεί τον προσπελάσιμο χώρο εργασίας ενός βραχίονα και φαίνεται γραμμοσκιασμένος στο Σχήμα 4-9.

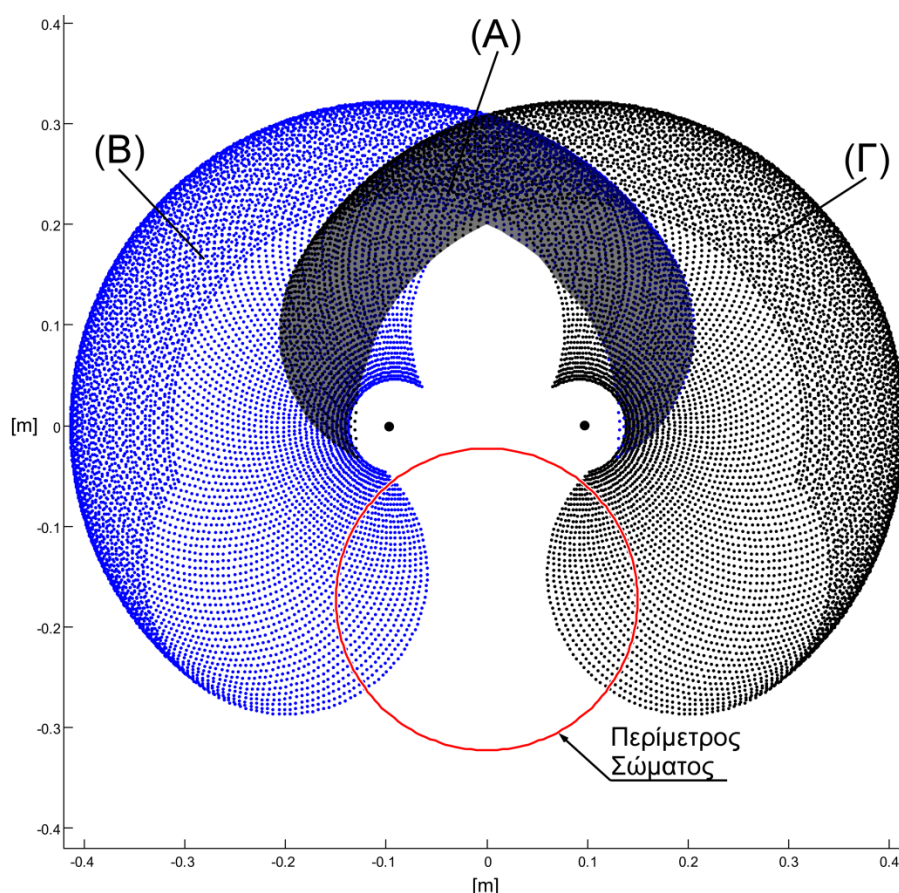


Σχήμα 4-9. Προσπελάσιμος χώρος εργασίας για βραχίονα δύο περιστροφικών αρθρώσεων (RR).

Επιπλέον τα φυσικά όρια στροφής των αρθρώσεων περιορίζουν περαιτέρω τον προσπελάσιμο χώρο. Για την υπό μελέτη κατασκευή, τα όρια των αρθρώσεων είναι:

$$\begin{aligned} -53^\circ &\leq q_{i1} \leq 150^\circ \\ -172^\circ &\leq q_{i2} \leq 95^\circ \end{aligned}, \quad i = \{1, 2\} \quad (4-35)$$

Στο Σχήμα 4-10 φαίνεται ο προσπελάσιμος χώρος εργασίας των δύο βραχιόνων του ρομπότ με εφαρμογή των φυσικών περιορισμών των αρθρώσεων. Επισημαίνεται ότι ο εν λόγω χώρος αφορά στην περίπτωση σταθερού σώματος του ρομπότ. Στο πάνω μέρος του σχήματος παρατηρείται η περιοχή (A), όπου υπάρχει επικάλυψη μεταξύ του προσπελάσιμου χώρου εργασίας του αριστερού και του δεξιού βραχίονα – περιοχές B και Γ αντίστοιχα, πράγμα ζητούμενο για να είναι εφικτές οι συνεργατικές εργασίες. Επίσης μέρος του χώρου εργασίας συμπίπτει με την επιφάνεια που περιέχεται στον κόκκινο κύκλο που δηλώνει την περίμετρο του σώματος του ρομπότ. Συνεπώς, στις εν λόγω περιοχές είναι εφικτές εργασίες από τους βραχίονες επί του σώματος του ίδιου του ρομπότ. Επισημαίνεται ότι σε περίπτωση αλλαγής μήκους των συνδέσμων θα αλλάξει και ο προσπελάσιμος χώρος εργασίας, ο οποίος θα πρέπει να επαναυπολογισθεί. Η σχετική ρουτίνα υπολογισμού του συμπεριλαμβάνεται στο CD της εργασίας.



Σχήμα 4-10. Προσπελάσιμος χώρος εργασίας για τους δύο βραχίονες του ρομπότ, με μπλε σκίασμα για τον πρώτο και με μαύρο για τον δεύτερο, με μήκη συνδέσμων $a_1 = 182mm$ και $a_2 = 141mm$, τοποθετημένους στην προβλεπόμενη θέση επί του σταθερού σώματος του ρομπότ, με περιορισμούς αρθρώσεων. Ο κόκκινος κύκλος είναι ακτίνας $r = 150mm$ και δηλώνει την περίμετρο του σώματος του ρομπότ και οι δύο μαύρες τελείες τη θέση της πρώτης άρθρωσης έκαστου βραχίονα.

Όταν δίνονται εντολές για κινήσεις στον Καρτεσιανό χώρο, θα πρέπει να υπάρχει μέριμνα, ώστε οι προκύπτουσες τροχιές να μη ξεφεύγουν σε κανένα σημείο από τα όρια του προσπελάσιμου χώρου εργασίας. Σε περίπτωση σφάλματος διακόπτεται ακαριαία η εκτέλεση του προγράμματος ελέγχου του ρομπότ εξαιτίας της αδυναμίας επίλυσης της αντίστροφης κινηματικής. Επίσης, είναι καλή πρακτική να αποφεύγονται κατά το δυνατόν οι κινήσεις κοντά στα όρια του προσπελάσιμου χώρου εργασίας καθώς και στα ιδιόμορφα σημεία γενικότερα, διότι μπορεί να προκύψει αδυναμία παρακολούθησης της επιθυμητής τροχιάς και μεγάλα σφάλματα. Ως μελλοντική εργασία επέκτασης της παρούσης εξετάζεται η ανάπτυξη αλγορίθμου πραγματικού χρόνου για αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, χωρίς να χρειάζεται η προσοχή ή η παρέμβαση του χρήστη του συστήματος.

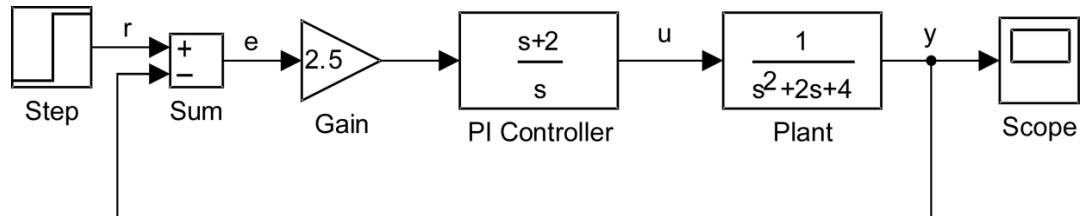
5 Λογισμικό

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται σύντομη παρουσίαση του Simulink, του Simulink Real-Time και κάποιων καλών πρακτικών προγραμματισμού σε αυτά. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης του ρομποτικού συστήματος σε Simulink και το πρόγραμμα ελέγχου που αναπτύχθηκε για Simulink Real-Time. Παράλληλα, αναλύεται η χρησιμότητα και η λειτουργία των υποσυστημάτων που περιλαμβάνουν.

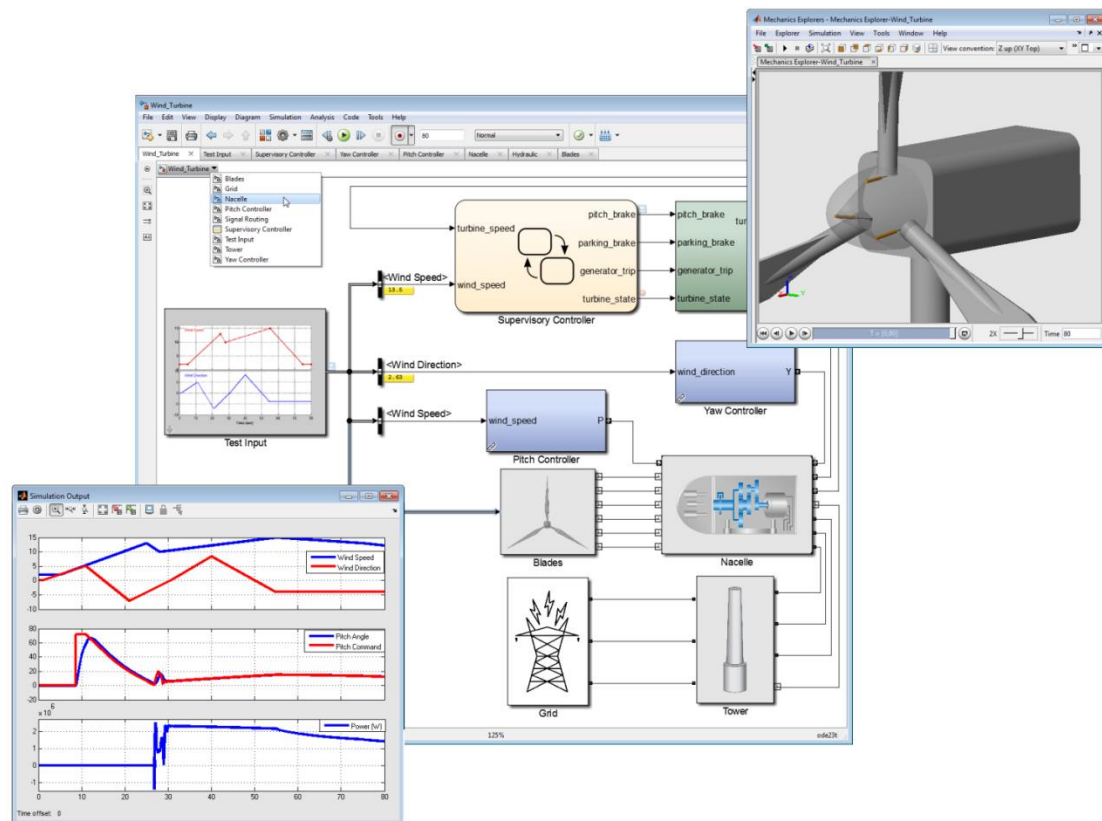
5.1 Περί Simulink και Simulink Real-Time

Το Simulink [13] έχει αναπτυχθεί από τη MathWorks και αποτελεί ένα γραφικό περιβάλλον προγραμματισμού που χρησιμοποιείται κατά κόρον για μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση πολυδιάστατων δυναμικών συστημάτων. Το περιβάλλον διεπαφής του βασίζεται στη διασύνδεση μπλοκ, στη λογική των δομικών διαγραμμάτων (Σχήμα 5-1). Πολλά παραμετροποιήσιμα μπλοκ περιλαμβάνονται στις βιβλιοθήκες του Simulink, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα δημιουργίας νέων από τον

προγραμματιστή. Το Simulink είναι στενά εννοποιημένο με τα υπόλοιπα πακέτα του «οικοσυστήματος» της Matlab⁶⁴ επιτρέποντας την απρόσκοπτη διασύνδεσή τους (Σχήμα 5-2). Χρησιμοποιείται ευρέως στον αυτόματο έλεγχο και στην ψηφιακή επεξεργασία σημάτων⁶⁵ για προσομοιώσεις και Model-Based Design.



Σχήμα 5-1. Περιβάλλον διεπαφής Simulink. Ο χρήστης επιλέγει τα κατάλληλα μπλοκ, εισάγει τις παραμέτρους που περιγράφουν το σύστημά του και συνδέει τα μπλοκ μεταξύ τους. Τα βέλη δηλώνουν τη σειρά υπολογισμού. Η μετατροπή του γραφικού διαγράμματος σε εκτελέσιμο κώδικα γίνεται αυτόματα από το Simulink.



Σχήμα 5-2. Μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας σε δίκτυο με χρήση Matlab, Simulink, Stateflow, Simscape, Simmechanics.

⁶⁴ Stateflow, Simscape, Simmechanics, SimEvents κ.α.

⁶⁵ Digital Signal Processing

Το Simulink Real-Time [15] χρησιμοποιείται για τη δημιουργία εφαρμογών πραγματικού και αυστηρώς πραγματικού χρόνου⁶⁶ απευθείας από τα μοντέλα προσομοίωσης που έχουν αναπτυχθεί στο περιβάλλον του Simulink. Επιτρέπει την άμεση εκτέλεσή τους σε υπολογιστή αποκλειστικά συνδεδεμένο⁶⁷ στο υπό έλεγχο φυσικό σύστημα (Σχήμα 5-3). Επιπλέον, υποστηρίζει προσομοιώσεις πραγματικού χρόνου⁶⁸, όπως Software-In-the-Loop [10] (Σχήμα 5-4) και Hardware-In-the-Loop [16] (Σχήμα 5-5).

Το Simulink Real-Time διαθέτει εκτενή βιβλιοθήκη με μπλοκ οδηγών για μεγάλη ποικιλία υλικού⁶⁹ και πρωτοκόλλων επικοινωνίας⁷⁰. Ο χρήστης μπορεί να μεταβεί εύκολα από το περιβάλλον προσομοίωσης που έχει αναπτύξει σε Simulink σε δοκιμές πραγματικού χρόνου πάνω στο φυσικό σύστημα με Simulink Real-Time· αρκεί να εμπλουτίσει το αρχικό μοντέλο με τα απαραίτητα μπλοκ οδηγών για το υλικό που διαθέτει από τη βιβλιοθήκη του Simulink Real-Time. Στη συνέχεια το Simulink Real-Time, χρησιμοποιώντας τον Simulink Coder [14] και τον Matlab Coder [12], παράγει αυτόματα τον αντίστοιχο κώδικα για εκτέλεση σε πραγματικό χρόνο στον υπολογιστή Target που τρέχει το kernel του Simulink Real-Time. Κατ' αυτόν τον τρόπο ο χρήστης απαλλάσσεται από την ανάγκη προγραμματισμού σε επίπεδο υλικού, πράγμα που επισπεύδει κατά πολύ τη διαδικασία ανάπτυξης και δοκιμής νέων συστημάτων.



Σχήμα 5-3. Διαμόρφωση συστήματος για δοκιμές με Simulink Real-Time. Το πρόγραμμα ελέγχου αναπτύσσεται στον Host computer ως γραφικό διάγραμμα. Έπειτα, μετατρέπεται σε εκτελέσιμο πραγματικού χρόνου και φορτώνεται στο Target computer μέσω RS232 ή Wi-Fi. Το σύστημα ελέγχου τρέχει σε αυστηρώς πραγματικό χρόνο στον Target computer, ο οποίος ελέγχει το πραγματικό σύστημα μέσω των I/O του υλικού.

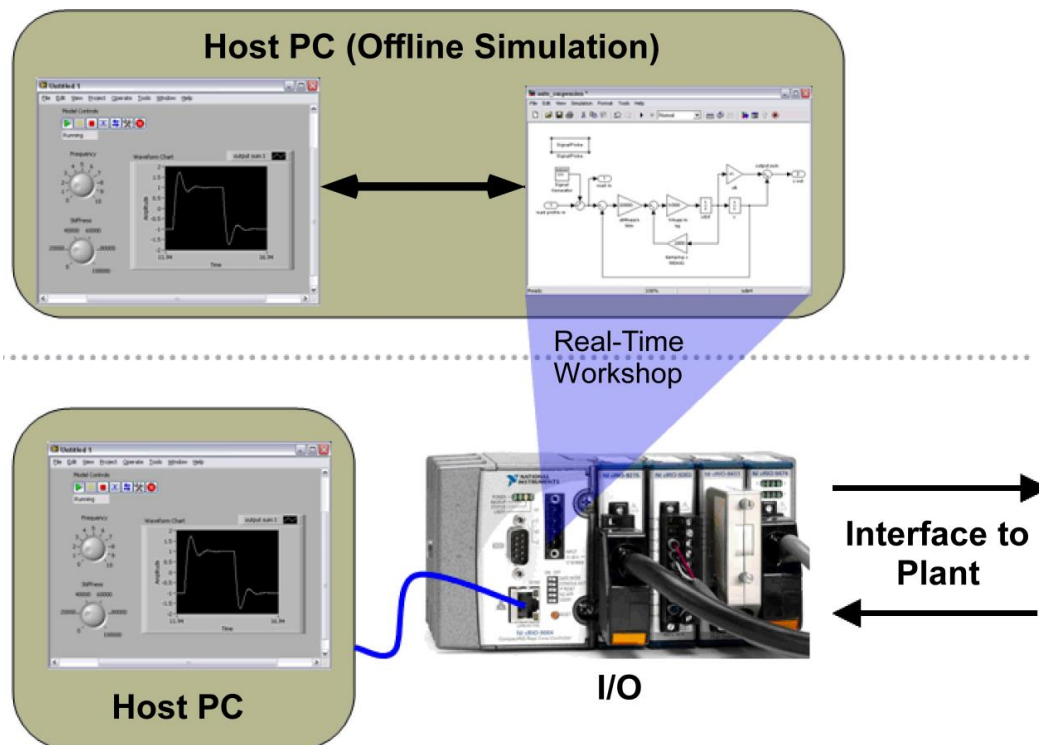
⁶⁶ Soft, hard real time [37].

⁶⁷ Dedicated Target computer

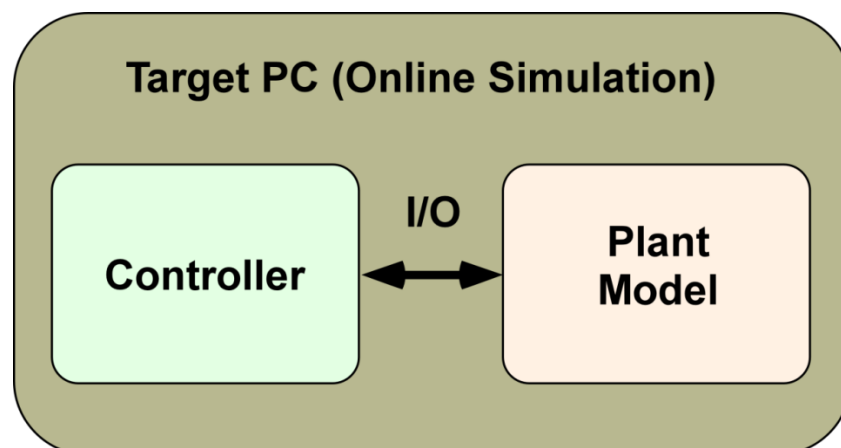
⁶⁸ Rapid Control Prototyping

⁶⁹ Ενδεικτικά: analog I/O, digital I/O, pulse train, encoders, transformers, passive components, serial, audio, shared memory, FPGAs.

⁷⁰ Raw Ethernet, real-time UDP, CAN, EtherCAT®, EtherNet/IP™, Lin, SAE J1939, FlexRay™, Camera Link®, USB video, ARINC 429 MIL-STD-1553.



Σχήμα 5-4. Software-In-the-Loop. Ο ελεγκτής του συστήματος τρέχει στο Host PC σε soft real time, υπολογίζοντας τα σήματα ελέγχου τα οποία τροφοδοτούνται στους επενεργητές και το φυσικό σύστημα (Plant) μέσω I/O. Η απόκριση του φυσικού συστήματος επιστρέφει στο Host PC μέσω των I/O των αισθητήρων, ώστε να κλείσει ο βρόχος ελέγχου. Η εν λόγω τεχνική προσφέρεται για γρήγορη δοκιμή διαφορετικών ελεγκτών κατά τη φάση ανάπτυξης νέου συστήματος, όταν δεν είναι διαθέσιμος ο υπολογιστής του ή δεν έχει ολοκληρωθεί ο προγραμματισμός του.



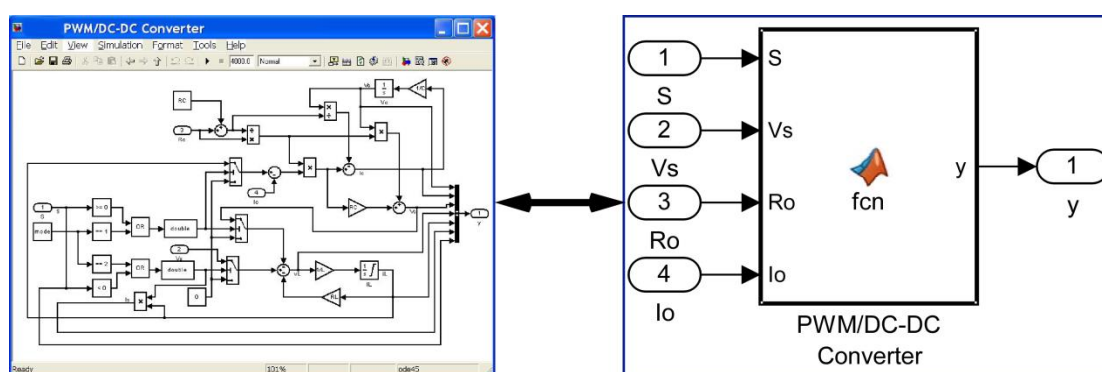
Σχήμα 5-5. Hardware-In-the-Loop. Ο ελεγκτής (Controller) και η προσομοίωση του υπό έλεγχο φυσικού συστήματος (Plant Model) τρέχουν στο Target PC σε hard real time. Επιπλέον, προσομοιώνονται τα ηλεκτρικά σήματα αισθητήρων και επενεργητών. Η εν λόγω τεχνική επιτρέπει δοκιμή του ελεγκτή σε αυστηρώς πραγματικό χρόνο, χωρίς να απαιτείται η παρουσία του φυσικού συστήματος το οποίο μπορεί να είναι εξαιρετικά ακριβό, δυσπρόσιτο ή ευαίσθητο σε λάθος (π.χ. δορυφόρος).

5.2 Καλές πρακτικές για Simulink και Simulink Real-Time

Αντί γενικής αναφοράς στα στοιχειώδη περί προγραμματισμού με χρήση Simulink και Simulink Real-Time που ο ενδιαφερόμενος μπορεί εύκολα να μελετήσει ανατρέχοντας στις σχετικές πηγές⁷¹, θα γίνει αναφορά σε καλές πρακτικές που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία και συνιστάται να εφαρμόζονται γενικότερα.

Matlab function blocks

Οτιδήποτε προγραμματίζεται στο περιβάλλον του Simulink μπορεί να προγραμματιστεί και ως συνάρτηση ή διαδικασία στη Matlab – το αντίστροφο δεν ισχύει). Κριτήρια επιλογής της μίας έναντι της άλλης προσέγγισης είναι η ταχύτητα διεκπεραίωσης των εργασιών παραγωγής του προγράμματος και το εύληπτο του αποτελέσματος. Αυτό διότι στις φάσεις της αρχικής ανάπτυξης συστημάτων δεν ενδιαφέρει τόσο η επίτευξη βέλτιστου κώδικα ως προς την αποδοτικότητα· βασικό ζητούμενο είναι να παραχθεί κάτι λειτουργικό και ευκόλως παραμετροποιήσιμο, όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Το Simulink και η λογική του προγραμματισμού με χρήση γραφικών διαγραμμάτων επιτυγχάνει ακριβώς αυτά. Συχνά όμως, τα γραφικά διαγράμματα και τα διαθέσιμα μπλοκ των βιβλιοθηκών δε διευκολύνουν συγκεκριμένες εργασίες, καθώς η χρήση τους οδηγεί σε ακατάληπτα, δαιδαλώδη διαγράμματα, στα οποία κάθε μελλοντική παρέμβαση είναι δύσκολη. Για αυτές τις περιπτώσεις προτείνεται η χρήση του “Matlab function” μπλοκ. Πρόκειται για ένα μπλοκ του Simulink που ο χρήστης έχει πλήρη ελευθερία να προγραμματίσει σε Matlab, επιλέγοντας εισόδους, εξόδους, παραμέτρους και τη συνάρτηση που θα υλοποιεί (Σχήμα 5-6).



Σχήμα 5-6. Το πολύπλοκο γραφικό διάγραμμα στα αριστερά, αντικαθίσταται με το “Matlab function” μπλοκ στα δεξιά, το οποίο περιέχει κώδικα της τάξης των δέκα γραμμών.

⁷¹ Αφθονο υλικό προσφέρεται από τη MathWorks [9] – εγχειρίδια, παραδείγματα, βίντεο.

Διαχωρισμός μεταξύ παραμέτρων, μεταβλητών και global μεταβλητών

Τα “Matlab function” μπλοκ παρέχουν τη δυνατότητα ορισμού του είδους των εισόδων τους. Αν κάποια είσοδος αφορά σε σταθερό μέγεθος που ποτέ δε μεταβάλλεται (π.χ. μάζα, αδράνεια, μήκος) είναι προτιμότερο να δηλώνεται ως σταθερά της συνάρτησης και όχι ως μεταβλητή με σταθερή τιμή. Για να γίνει αυτό, η σταθερά γράφεται εντός της παρένθεσης που περιλαμβάνει τις εισόδους της συνάρτησης και που έπεται του ονόματός της. Στη συνέχεια, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει στο περιβάλλον του editor της συνάρτησης SIMULINK→Edit Data→Scope και έπειτα να αλλάξει την επιλογή “Input” σε “Parameter” για την είσοδο που τον ενδιαφέρει. Οι τιμές των παραμέτρων λαμβάνονται απευθείας από το Workspace της Matlab κατά την εκκίνηση εκτέλεσης του προγράμματος σε Simulink. Ακριβώς τα ίδια ισχύουν και για το Simulink Real-Time, για εκτέλεση σε πραγματικό χρόνο.

Για να γίνει αντιληπτή η αξία αυτής της τακτικής, ενδεικτικά αναφέρεται ότι το πρόγραμμα ελέγχου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας αφορά σε σύστημα μόλις 7 μεταβλητών κατάστασης και περιλαμβάνει συνολικά περίπου 60 παραμέτρους. Ας αναλογισθεί ο αναγνώστης τη μορφή που θα αποκτούσε το σχετικό γραφικό διάγραμμα εάν οι 60 παράμετροι αντιμετωπιζόνταν ως σταθερές μεταβλητές, με τουλάχιστον ένα μπλοκ σταθεράς για κάθε μία και με το απαραίτητο πλέγμα γραμμών για την τροφοδότησή των μπλοκ σταθεράς σε κάθε “Matlab function” μπλοκ που τα χρειάζεται.

Οι global μεταβλητές είναι γνωστές σε όλες της συναρτήσεις του επιπέδου που έχουν ορισθεί και σε κάθε κατώτερο επίπεδο του. Διαφορετικές συναρτήσεις μπορούν να τις διαβάζουν και να τις εγγράφουν, με εν γένει ασύγχρονο τρόπο. Συνιστάται να αποφεύγεται η χρήση τους διότι καταστρατηγούν τη γραμμική εξέλιξη της εκτέλεσης του προγράμματος, στη λογική της οποίας είναι βασισμένος ο προγραμματισμός σε Simulink.

Παρ’ όλα αυτά, είναι χρήσιμες, όταν απαιτείται αποθήκευση και διατήρηση δεδομένων για ακαθόριστο αριθμό κύκλων εκτέλεσης κάποιου προγράμματος. Για να ορισθεί μια global μεταβλητή σε κάποιο επίπεδο του μοντέλου Simulink πρέπει να χρησιμοποιηθεί το μπλοκ “Data Store Memory”. Ο χρήστης πρέπει να ορίσει το όνομα της μεταβλητής από την καρτέλα “Main” του μπλοκ και είδος δεδομένων και αρχική τιμή από την καρτέλα “Signal Attributes” του μπλοκ. Για να χρησιμοποιηθεί η global μεταβλητή εντός μίας συνάρτησης, το όνομά της γράφεται εντός της παρένθεσης που περιλαμβάνει τις εισόδους της συνάρτησης και που έπεται του ονόματός της, καθώς και στην επόμενη γραμμή, προπορευόμενη από τη λέξη “global”. Στη συνέχεια, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει στο περιβάλλον του editor της

συνάρτησης SIMULINK→Edit Data→Scope και έπειτα να αλλάξει την επιλογή “Input” σε “Data Store Memory” για την εν λόγω μεταβλητή.

Script παραμέτρων του συστήματος

Τα περισσότερα μπλοκ της βιβλιοθήκης του Simulink παραμετροποιούνται μέσω σταθερών τιμών που ο χρήστης μπορεί να ορίσει στο μενού του κάθε μπλοκ. Είναι καλή πρακτική αυτές οι τιμές να εισάγονται ως παράμετροι στα μπλοκ – όχι ως αριθμητικά δεδομένα – διότι, ακόμα και σε μικρά μοντέλα, είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν πολλά μπλοκ που θα πρέπει να παραμετροποιούνται με την ίδια τιμή σε κάποιο πεδίο τους. Εάν οι τιμές εισάγονται αριθμητικά, υπάρχει μεγάλος κίνδυνος, όταν ο χρήστης θελήσει να αλλάξει κάτι, εκ παραδρομής να μην το αλλάξει ομοίως σε όλα τα μπλοκ. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μη ευκόλως ανιχνεύσιμο σφάλμα και μεγάλη σπατάλη χρόνου. Αντιθέτως, εάν οι τιμές παραμετροποίησης των μπλοκ έχουν εισαχθεί ως παράμετροι, το μόνο που χρειάζεται είναι ένα συγκεντρωτικό Script παραμέτρων της Matlab που περιέχει όλες τις παραμέτρους του συστήματος. Αυτό το script πρέπει να εκτελείται άπαξ κατά την έναρξη εργασίας του χρήστη, ώστε όλες οι τιμές των παραμέτρων να εισάγονται στο Workspace της Matlab και να γίνονται διαθέσιμες για τα μοντέλα στο Simulink και τα εκτελέσιμα πραγματικού χρόνου στο Simulink Real-Time. Για αλλαγή σε κάποια παράμετρο ο χρήστης αρκεί να ενημερώνει τη σχετική τιμή στο Script παραμέτρων και μόνο.

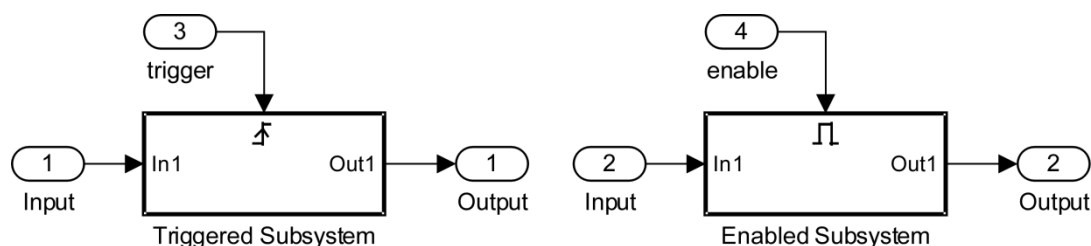
Triggered, Enabled υποσυστήματα

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, η πορεία εκτέλεσης των προγραμμάτων του Simulink είναι εν γένει γραμμική, δηλαδή για να υπολογισθεί ένα μπλοκ πρέπει να έχουν υπολογισθεί όλα τα προηγούμενά του. Η φορά των βελών διασύνδεσης των μπλοκ καθορίζει τη σειρά εκτέλεσης και ορίζει τις σχέσεις εισόδου/εξόδου μεταξύ των. Στην περίπτωση που κάποιο κομμάτι του προγράμματος δεν είναι επιθυμητό να εκτελείται σε κάθε κύκλο, αλλά είναι επιθυμητό να εκτελείται ελεγχόμενα, χρησιμοποιούνται τα υποσυστήματα τύπου “Triggered” ή “Enabled” (Σχήμα 5-7).

Τα “Triggered” υποσυστήματα έχουν μία επιπλέον είσοδο για το σήμα “trigger”, το οποίο ελέγχει το εάν θα υπολογισθεί το εκάστοτε υποσύστημα ή όχι. Η σχετική συνθήκη για το σήμα trigger ορίζεται από τον χρήστη μέσω του μενού του μπλοκ του. Κάθε “Triggered” υποσύστημα είναι κανονικά ανενεργό, και όποιο μπλοκ έπεται αυτού λαμβάνει ως είσοδο είτε τις αρχικές τιμές εξόδου του που έχει ορίσει ο χρήστης, είτε τις τιμές που υπολογίσθηκαν από το “Triggered” υποσύστημα κατά την τελευταία του ενεργοποίηση. Μόλις η συνθήκη του σήματος “trigger” γίνει αληθής, το “Triggered” υποσύστημα εκτελείται μία φορά στον συγκεκριμένο κύκλο εκτέλεσης του

προγράμματος. Τα “Triggered” υποσυστήματα χρησιμοποιούνται όταν η εκτέλεση κάποιου μέρους του προγράμματος εξαρτάται από κάποιο εξωτερικό γεγονός – π.χ., ο κώδικας που διαβάζει τις εντολές του χρήστη προς το σύστημα εκτελείται μόνο όταν υπάρχει νέα εντολή (Κεφάλαιο 5.3.2).

Ομοίως με τα “Triggered”, τα “Enabled” υποσυστήματα έχουν μία επιπλέον είσοδο για το σήμα “enable”, το οποίο ελέγχει το εάν θα ενεργοποιηθεί το εκάστοτε “Enabled” υποσύστημα ή όχι. Όσο το σήμα “enable” έχει τιμή μεγαλύτερη του μηδενός το υποσύστημα που ελέγχει είναι ενεργοποιημένο και εκτελείται σε κάθε κύκλο. Ειδάλλως το υποσύστημα παραμένει ανενεργό. Οι συμπεριφορά των αρχικών συνθηκών εξόδου του υποσυστήματος ορίζεται από τον χρήστη. Τα “Enabled” υποσυστήματα χρησιμοποιούνται όταν η εκκίνηση ή η παύση της εκτέλεσης κάποιου μέρους του προγράμματος εξαρτάται από κάποιο εξωτερικό γεγονός – π.χ. το αν είναι ανοιγμένος ένας διακόπτης.



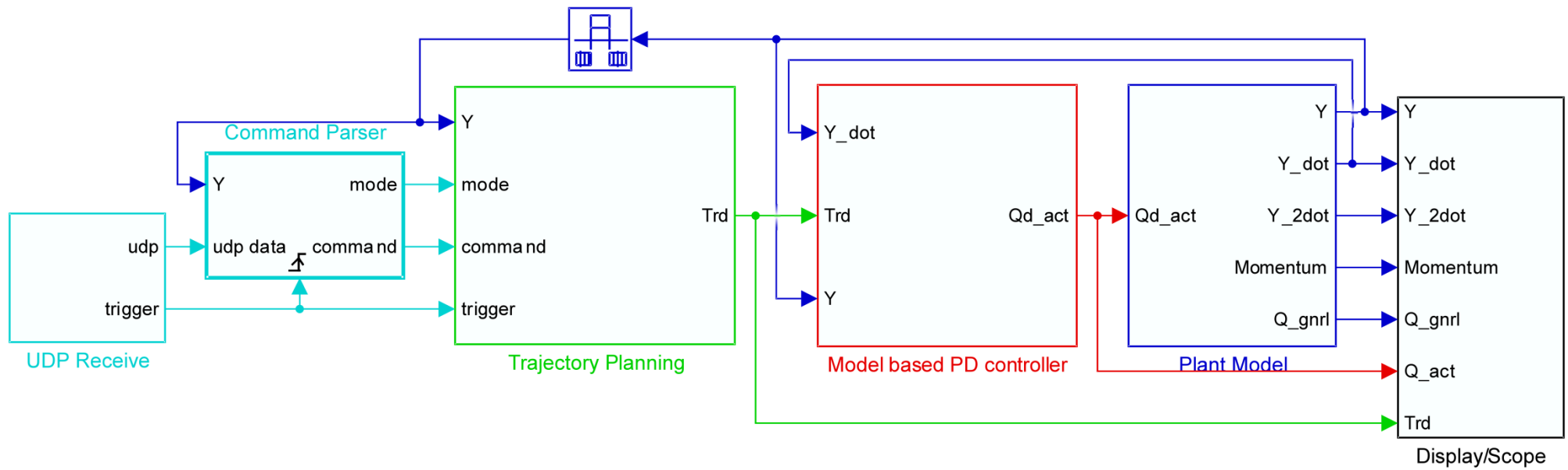
Σχήμα 5-7. Υποσυστήματα τύπου “Triggered” και “Enabled”.

5.3 Μοντέλο προσομοίωσης σε Simulink και πρόγραμμα ελέγχου RT

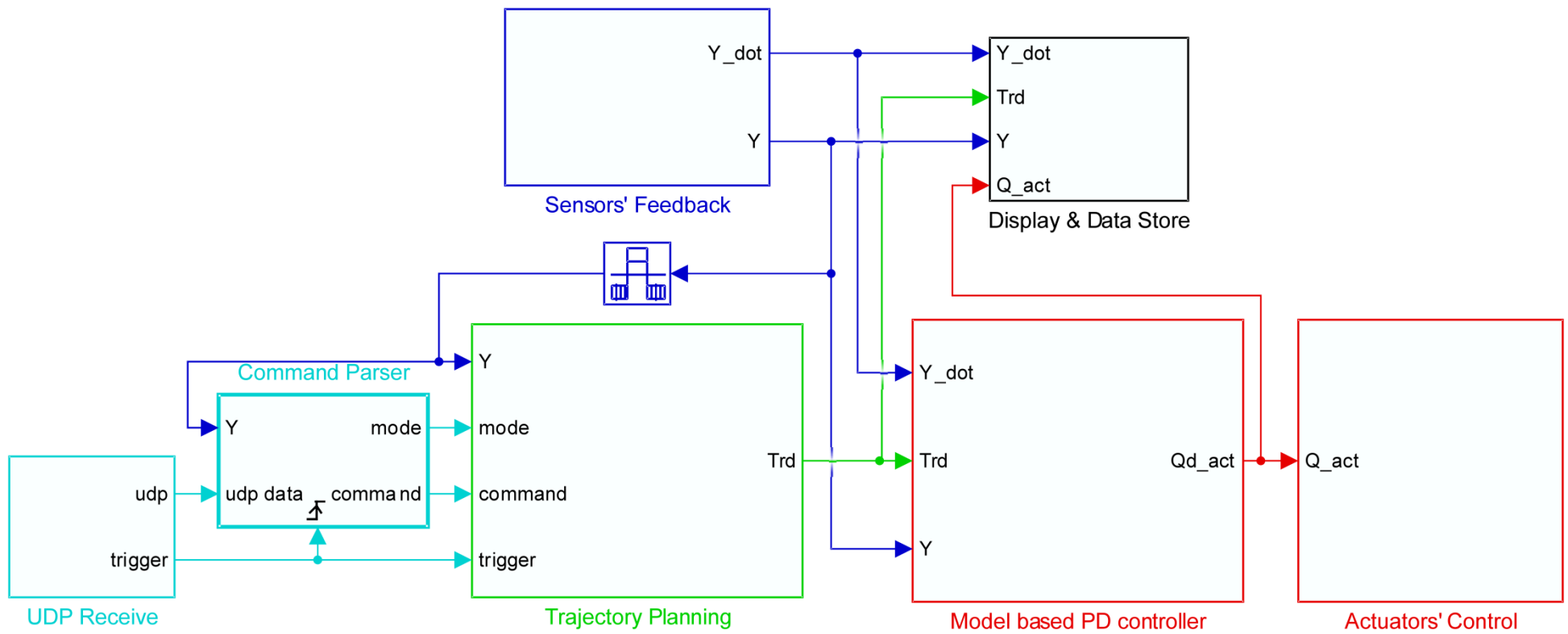
Παρουσιάζονται τα γραφικά διαγράμματα του μοντέλου προσομοίωσης (Σχήμα 5-8) και του προγράμματος ελέγχου (Σχήμα 5-9) του ρομπωτικού συστήματος. Τα δύο διαγράμματα είναι όμοια μεταξύ τους με εξαίρεση το μπλοκ μοντελοποίησης του φυσικού συστήματος στο μοντέλο προσομοίωσης, “Plant Model”, τη θέση του οποίου λαμβάνουν το μπλοκ ελέγχου των επενεργητών, “Actuators' Control”, και το μπλοκ ανάδρασης των αισθητήρων, “Sensors' Feedback”, του ρομπωτικού συστήματος στο πρόγραμμα ελέγχου για Simulink Real-Time. Αμφότερα τα γραφικά διαγράμματα αποτελούνται από τέσσερα κύρια υποσυστήματα⁷², τα μπλοκ των οποίων θα αναλυθούν στη συνέχεια⁷³.

⁷² Για λόγους ευκρίνειας εμφανίζονται με διαφορετικό χρωματισμό.

⁷³ Στα γραφικά διαγράμματα χρησιμοποιείται διαφορετικός συμβολισμός για κάποια μεγέθη, λόγω της αδυναμίας χρήσης ειδικών συμβόλων στο προγραμματιστικό περιβάλλον. Επισημαίνονται οι αντιστοιχίσεις: $q \rightarrow Y$, $\dot{q} \rightarrow Y_{dot}$, $\ddot{q} \rightarrow Y_{2dot}$



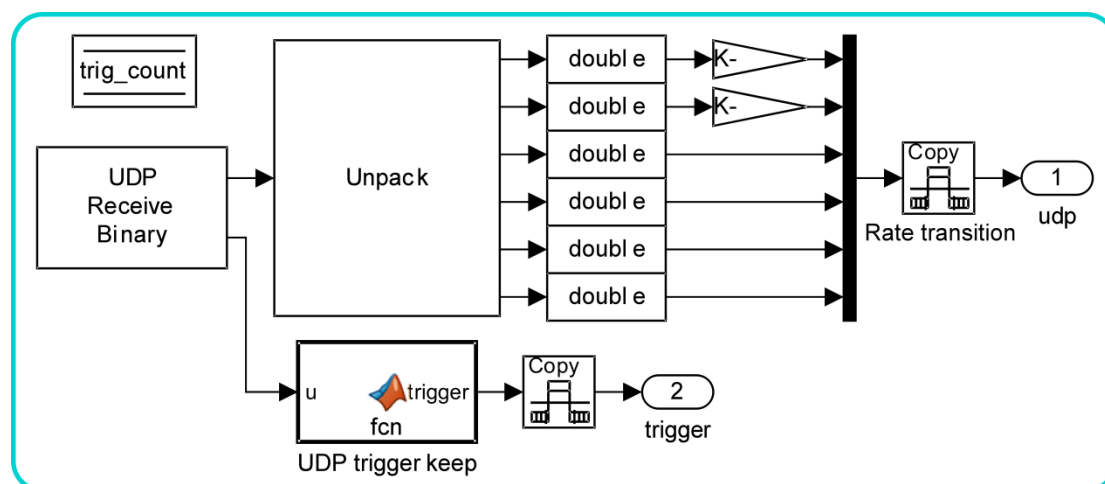
Σχήμα 5-8. Μοντέλο προσομοίωσης σε Simulink.



Σχήμα 5-9. Πρόγραμμα Ελέγχου για Simulink Real-Time

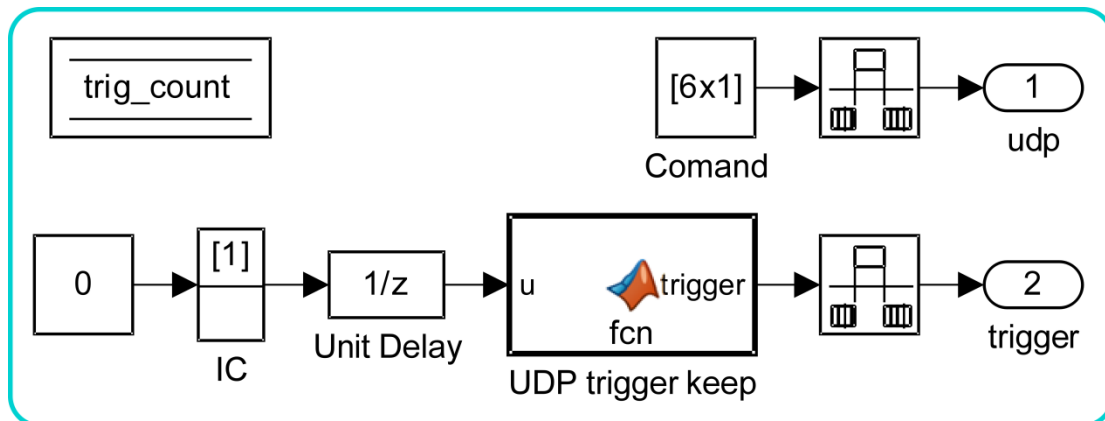
5.3.1 UDP Receive

Το υποσύστημα “UDP Receive” (Σχήμα 5-10) και συγκεκριμένα το μπλοκ “UDP Receive Binary” είναι υπεύθυνο για την ασύρματη λήψη των εντολών του χρήστη για τους ρομποτικούς βραχίονες, μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας UDP. Αν και η συγκεκριμένη επικοινωνία δεν είναι ασφαλής και επιβάλλει διάφορους περιορισμούς ως προς τη μορφοποίηση και το μέγεθος των πακέτων δεδομένων που διακινούνται, προτιμήθηκε για λόγους απλότητας στην εφαρμογή. Ο χρήστης μπορεί να αποστέλλει εντολές χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε πρόγραμμα υπολογιστή ή εφαρμογή κινητού τηλεφώνου για αποστολή UDP πακέτων σε HEX⁷⁴. Εναλλακτικά μπορεί να παρακάμπτει πλήρως την αποστολή μέσω UDP και να εισάγει την εντολή που επιθυμεί στο μπλοκ “Command” (Σχήμα 5-11), προτού ξεκινήσει η εκτέλεση του προγράμματος σε πραγματικό χρόνο στο ρομποτικό σύστημα. Η δεύτερη μέθοδος αποδείχθηκε βολικότερη για δοκιμές και πειράματα ενώ η πρώτη αναμένεται να προτιμηθεί σε πιθανές μελλοντικές επιδείξεις του συστήματος.



Σχήμα 5-10. UDP Receive. Πρέπει να εκτελείται με μεγάλη συχνότητα, ώστε να μπορεί να διαβάζει τις εισερχόμενες εντολές πρακτικά συνεχώς. Τα υπόλοιπα υποσυστήματα εκτελούνται σε χαμηλότερες συχνότητες, οπότε μεταξύ τους πρέπει να παρεμβάλλονται “Rate transition” μπλοκ [11]. Η πρώτη έξοδος του μπλοκ “UDP Receive Binary” περιέχει το πακέτο δεδομένων που παρελήφθη – 6 νούμερα σε HEX για κάθε εντολή προς έναν βραχίονα. Στη συνέχεια ξεπακετάρονται από το μπλοκ “Unpack” και μετατρέπονται σε τύπου “double”, ώστε να είναι συμβατά με τα υπόλοιπα μπλοκ του Simulink. Η δεύτερη έξοδος του “UDP Receive Binary” είναι ένα σήμα “trigger” που ενεργοποιείται μόνο όταν το μπλοκ παραλάβει πακέτο δεδομένων. Το μπλοκ “UDP trigger keep” χρησιμοποιείται για να κρατάει το “trigger” ενεργό για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να γίνεται αντιληπτό από το επόμενο υποσύστημα που εκτελείται σε χαμηλότερη συχνότητα.

⁷⁴ Προτείνεται το “UDP Test Tool” για PC και το “UDPsend” για Android.



Σχήμα 5-11. Απευθείας εισαγωγή εντολής στο μπλοκ “Command”.

Σε κάθε περίπτωση, η εντολή του χρήστη πρέπει να έχει συγκεκριμένη μορφοποίηση. Για τροχιά ευθύγραμμης μετατόπισης του τελικού σημείου δράσης ενός βραχίονα, σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 4.3.3:

- $(x_{ef}; y_{ef}; t_f; t_b; bit; 10)$, όπου (x_{ef}, y_{ef}) , η απόλυτη τελική επιθυμητή θέση στο Καρτεσιανό επίπεδο για το τελικό σημείο δράσης, t_f η συνολική χρονική διάρκεια της κίνησης, t_b η χρονική διάρκεια της φάσης επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και $bit = \{0,1\}$, αντίστοιχα για εσωτερική ή εξωτερική διαμόρφωση του αγκώνα του βραχίονα ως προς το σώμα του ρομπότ.
- $(x_{ef}; y_{ef}; t_f; t_b; bit; 11)$, όπου (x_{ef}, y_{ef}) η σχετική τελική επιθυμητή θέση στο καρτεσιανό επίπεδο για το τελικό σημείο δράσης ως προς τη θέση που έχει τη στιγμή που λαμβάνει την εντολή, t_f η συνολική χρονική διάρκεια της κίνησης, t_b η χρονική διάρκεια της φάσης επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και $bit = \{0,1\}$, αντίστοιχα για εσωτερική ή εξωτερική διαμόρφωση του αγκώνα του βραχίονα ως προς το σώμα του ρομπότ.

Για τροχιά στο χώρο των αρθρώσεων, σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 4.3.2:

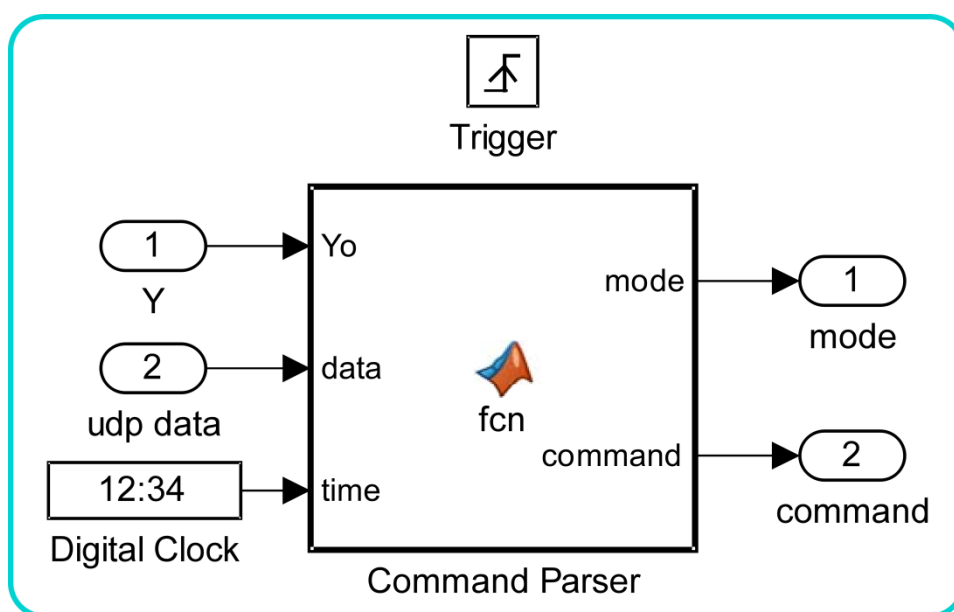
- $(q_{f1}; q_{f2}; t_f; 0; 0; 20)$, όπου q_{f1} , η απόλυτη τελική θέση της πρώτης άρθρωσης και q_{f2} , η απόλυτη τελική θέση της δεύτερης άρθρωσης στο χώρο των αρθρώσεων, και t_f η συνολική χρονική διάρκεια της κίνησης.
- $(q_{f1}; q_{f2}; t_f; 0; 0; 21)$, όπου q_{f1} , η σχετική τελική θέση της πρώτης άρθρωσης και q_{f2} η σχετική τελική θέση της δεύτερης άρθρωσης ως προς τις θέσεις που έχουν τη στιγμή που το σύστημα λαμβάνει την εντολή, και t_f η συνολική χρονική διάρκεια της κίνησης.

5.3.2 Command Parser

Το υποσύστημα “Command Parser” (Σχήμα 5-12) είναι τύπου “Triggered” και έχει ρυθμιστεί, ώστε να εκτελείται μόνο όταν υπάρχει νέα εισερχόμενη εντολή από το

υποσύστημα “UDP Receive”. Άπαξ και εκτελεστεί, οι έξοδοί του διατηρούν τις υπολογισθείσες τιμές μέχρι την επόμενη εκτέλεσή του, δηλαδή μέχρι να ληφθεί νέα εντολή από τον χρήστη. Σκοπός του είναι να λαμβάνει την εισερχόμενη εντολή και να δημιουργεί το διάνυσμα “Command” που περιλαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες για να εκτελεστεί ο ζητούμενος υπολογισμός τροχιάς στη συνέχεια. Επιπλέον, η τιμή της άλλης εξόδου του, “mode”, διαχωρίζει τις εντολές για ευθύγραμμες κινήσεις του τελικού σημείου δράσης (mode = 1) από αυτές του χώρου των αρθρώσεων (mode = 2).

Το διάνυσμα “Command” περιλαμβάνει τη στάση του ρομπότ εκείνη τη στιγμή και τη ζητούμενη από την εντολή τελική θέση του βραχίονα στο απόλυτο σύστημα για κάθε περίπτωση – δηλαδή, αν η εντολή αφορά σε σχετική μετατόπιση στο Καρτεσιανό επίπεδο ή στον χώρο των αρθρώσεων υπολογίζεται η απόλυτη τελική θέση⁷⁵, ενώ αν αφορά σε απόλυτη μετατόπιση δεν απαιτείται επιπλέον υπολογισμός. Επίσης συμπεριλαμβάνονται όλα τα υπόλοιπα δεδομένα της εντολής καθώς και η χρονική στιγμή παραλαβής της. Τέλος, στην περίπτωση εντολής για μετατόπιση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα υπολογίζεται και η αρχική θέση του τελικού σημείου δράσης με χρήση πρόσω κινηματικής και εισάγεται στο διάνυσμα.



Σχήμα 5-12. Command Parser.

⁷⁵ Η απόλυτη τελική θέση υπολογίζεται γενικά ως εξής: Έστω X_o^{abs} η απόλυτη αρχική θέση και $X_f^{rel,o}$ η τελική θέση, σχετική ως προς την X_o^{abs} . Τότε, η απόλυτη τελική θέση είναι $X_f^{abs} = X_o^{abs} + X_f^{rel,o}$.

5.3.3 Trajectory Planning

Το υποσύστημα “Trajectory Planning” (Σχήμα 5-13) έχει εισόδους το σήμα ανάδρασης της στάσης του ρομπότ, \underline{q} , το σήμα “mode” και το διάνυσμα “Command” από την έξοδο του υποσυστήματος “Command Parser”, και το σήμα trigger από την έξοδο του “UDP Receive”. Είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό των ζητούμενων τροχιών, ο οποίος γίνεται σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 4.3. Η έξοδος του υποσυστήματος είναι το διάνυσμα τροχιάς, Tr_d ⁷⁶, το οποίο υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο και περιλαμβάνει τη ζητούμενη θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση των μεταβλητών αρθρώσεων ενός ρομποτικού βραχίονα.

$$Tr_d = \begin{bmatrix} q_d \\ \dot{q}_d \\ \ddot{q}_d \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

Το υποσύστημα “Trajectory Planning” περιλαμβάνει το μπλοκ “Cartesian Space”, το οποίο υπολογίζει την τροχιά στην περίπτωση της ευθύγραμμης κίνησης του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα, και το μπλοκ “Joint Space”, το οποίο υπολογίζει την τροχιά στον χώρο των αρθρώσεων με πολυώνυμα τρίτου βαθμού. Το μπλοκ Switch Mode είναι υπεύθυνο για την ενεργοποίηση του κατάλληλου μπλοκ μεταξύ των δύο προαναφερθέντων, αναλόγως της εντολής του χρήστη.

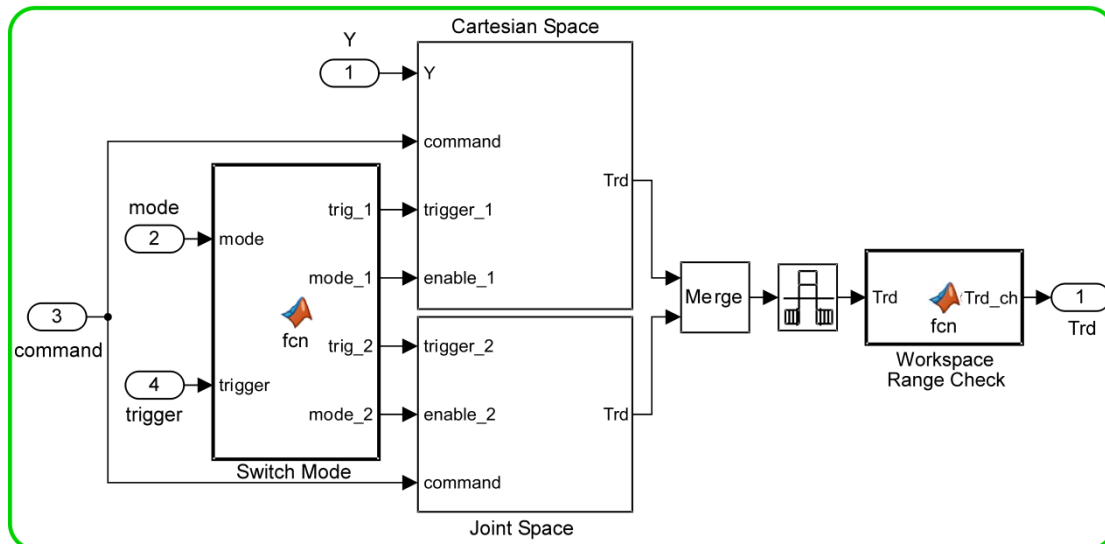
Το μπλοκ “Merge” λειτουργεί ως διακόπτης επιλογής, επιτρέποντας μόνο τη διέλευση του σήματος που υπολογίστηκε τελευταίο. Επειδή τα μπλοκ “Cartesian Space” και “Joint Space” είναι φτιαγμένα έτσι ώστε το πολύ ένα εκ των δύο να είναι ενεργοποιημένο ανά πάσα στιγμή, από το μπλοκ “Merge” διέρχεται πάντα το σήμα του ενεργοποιημένου.

Το “Rate Transition” μπλοκ που ακολουθεί χρησιμεύει σε περίπτωση που ο ρυθμός υπολογισμού της τροχιάς επιλεγεί να είναι μικρότερος του ρυθμού υπολογισμού του υποσυστήματος ελέγχου που έπεται.

Το μπλοκ “Workspace Range Adjustment” ελέγχει εάν οι εντολές ζητούμενης θέσης, q_d , που προέκυψαν είναι εκτός των ορίων των αρθρώσεων του βραχίονα. Σε τέτοια περίπτωση παρεμβαίνει, ώστε η άρθρωση που θα προσπαθούσε να βγει εκτός ορίων να ακινητοποιηθεί. Δηλαδή υλοποιεί οριοθέτηση του χώρου εργασίας επιβαλλόμενη από το λογισμικό (soft limits). Ιδανικό είναι να υπάρχει σύστημα αισθητήρων για τις οριακές θέσης με δυνατότητα παρέμβασης σε περίπτωση

⁷⁶ “Tr”, εκ του Trajectory και ο δείκτης “d”, εκ του desired.

παραβίασής τους, ανεξαρτήτως της εκτέλεσης του προγράμματος ελέγχου του ρομπότ (hard limits). Επίσης, σε μελλοντική βελτίωση του λογισμικού θα πρέπει να εξεταστεί η δυνατότητα πλήρους αξιολόγησης του προσπελάσιμου των εντολών, τόσο για τις ζητούμενες θέσεις των αρθρώσεων όσο και για τις ζητούμενες θέσεις του τελικού σημείου δράσης στο Καρτεσιανό επίπεδο.



Σχήμα 5-13. Υποσύστημα “Trajectory Planning”.

5.3.4 Model based PD controller

Το υποσύστημα “Model based PD controller” (Σχήμα 5-14), συγκεκριμένα το ομώνυμο “Matlab function” μπλοκ που περιέχει, υλοποιεί τον μη γραμμικό νόμο ελέγχου που εφαρμόζεται στο ρομποτικό σύστημα, σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 4. Είσοδοι του μπλοκ είναι το διάνυσμα της τροχιάς των βραχιόνων, Tr_d , που υπολογίζεται σε κάθε κύκλο από το υποσύστημα “Trajectory Planning”, και η ανάδραση της στάσης και της ταχύτητας του ρομπότ, q και \dot{q} αντίστοιχα. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται μόνο ο ένας βραχίονας, το διάνυσμα Tr_d περιέχει την τροχιά του ενός βραχίονα που ελέγχεται. Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται και οι δύο βραχίονες, το διάνυσμα Tr_d αυξάνεται ώστε να περιέχει τις τροχιές και των δύο βραχιόνων, το δε υποσύστημα υπολογισμού τροχιάς ενός βραχίονα που παρουσιάστηκε προηγουμένως συμμετέχει δύο φορές στο μοντέλο προσομοίωσης και το πρόγραμμα ελέγχου. Στην είσοδο Y_{Bd} του μπλοκ “Model based PD controller” συνδέεται το διάνυσμα επιθυμητής τελικής θέσης του σώματος του ρομπότ –

μελλοντικά, μπορεί να συνδεθεί διάνυσμα τροχιάς για το σώμα του ρομπότ, αντίστοιχο του Tr_d ως προς τη μορφοποίηση.

Συνεπώς ο χρήστης μπορεί μέσω των τιμών που θέτει στο Y_{Bd} και των εντολών τροχιάς να ορίζει⁷⁷:

- Μετακίνηση του ρομπότ σε νέα θέση, $Y_{Bd} = (x, y, \theta)$, με τον βραχίονα να παραμένει ακίνητος ως προς το ρομπότ (εντολή βραχίονα: $[0;0;0;0;0;21]$). Ο βραχίονας θα προσπαθήσει να διατηρήσει τη θέση του ακόμα και αν δεχθεί εξωτερικές δυνάμεις.
- Μετακίνηση του ρομπότ σε νέα θέση με το τελικό σημείο δράσης του βραχίονα να παραμένει ακίνητο στο Καρτεσιανό επίπεδο (εντολή βραχίονα: $[0;0;0;0;1;11]$ ή $[0;0;0;0;0;11]$).
- Μετακίνηση του ρομπότ σε νέα θέση με παράλληλη εκτέλεση κίνησης συγκεκριμένης τροχιάς του βραχίονα.
- Μετακίνηση του βραχίονα με το σώμα του ρομπότ να παραμένει σταθερό στο Καρτεσιανό επίπεδο.

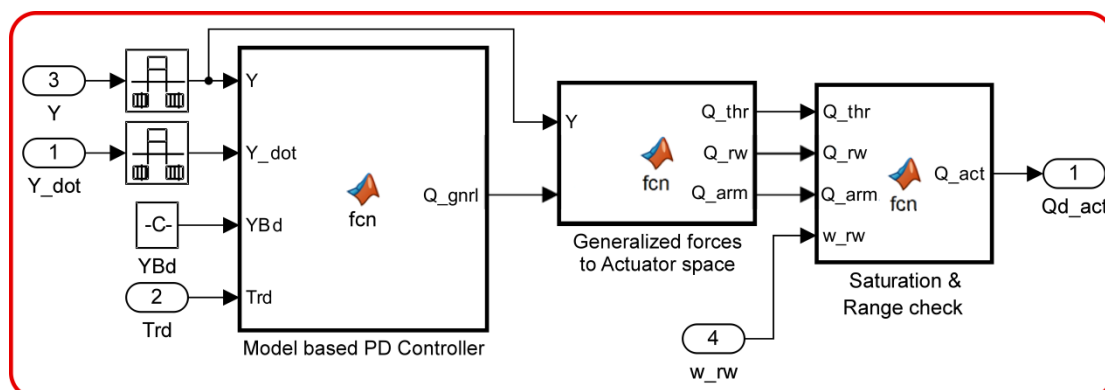
Εντούτοις, ως προς τον έλεγχο της θέσης του σώματος του ρομπότ επισημαίνεται ότι η εν λόγω προσέγγιση, αν και απολύτως ικανή να ελέγχει το σώμα του ρομπότ, δεν ενδείκνυται. Αυτό, διότι για τα ρομπότ που προορίζονται για χρήση στο διάστημα είναι ουσιώδους σημασίας η εξοικονόμηση προωθητικού αερίου, με συνέπεια να μη χρησιμοποιούνται μέθοδοι ελέγχου που συνεχώς απαιτούν ενεργοποίηση των προωθητήρων, όπως η προτεινόμενη. Ωστόσο, το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί εν μέρει να αντιμετωπιστεί με δημιουργία κατάλληλης τροχιάς για την κίνηση του σώματος του ρομπότ⁷⁸. Εξάλλου, η προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια με σκοπό την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας των υπόλοιπων εμπλεκόμενων υποσυστημάτων, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν ως έχουν σε κάθε διαφορετική υλοποίηση ελέγχου για το ρομποτικό σύστημα.

Ως προς τον έλεγχο των βραχιόνων και μόνο, λόγω του μεγάλου λόγου μείωσης των μειωτήρων των κινητήριων συστημάτων του, θα μπορούσε να εφαρμοστεί κάποιος απλούστερος, γραμμικός νόμος ελέγχου θέσης. Παρά ταύτα, προκρίθηκε η χρήση του νόμου ελέγχου που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.1 χάριν

⁷⁷ Οι εντολές που ακολουθούν αφορούν στην περίπτωση ενός βραχίονα σε χρήση.

⁷⁸ Δεν εξετάζεται στα πλαίσια της παρούσης εργασίας.

αξιοποίησης του πλήρους δυναμικού μοντέλου του ρομπότ που ήταν διαθέσιμο (Κεφάλαιο 3.2).



Σχήμα 5-14. Υποσύστημα “Model based PD controller”.

Το μπλοκ “Generalized forces to Actuator space” τροφοδοτείται με το διάνυσμα γενικευμένων δυνάμεων και ροπών, δηλαδή με την έξοδο του νόμου ελέγχου, και υπολογίζει τη συνισταμένη των δυνάμεων κάθε ζεύγους προωθητήρων, τη ροπή που αποδίδεται στο σύστημα από τον σφόνδυλο αντίδρασης και τις ροπές που πρέπει να αποδώσουν οι κινητήρες του βραχίονα. Το διάνυσμα στάσης, q , συγκεκριμένα ο προσανατολισμός του σώματος του ρομπότ, θ , χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα στροφής, A , της εξίσωσης (3-17). Η έξοδος αυτού του μπλοκ αποτελεί την είσοδο του “Saturation & Range check”, το οποίο υπολογίζει τις τελικές απαιτούμενες δυνάμεις και ροπές από τους επενεργητές του ρομποτικού συστήματος, σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 4.2.

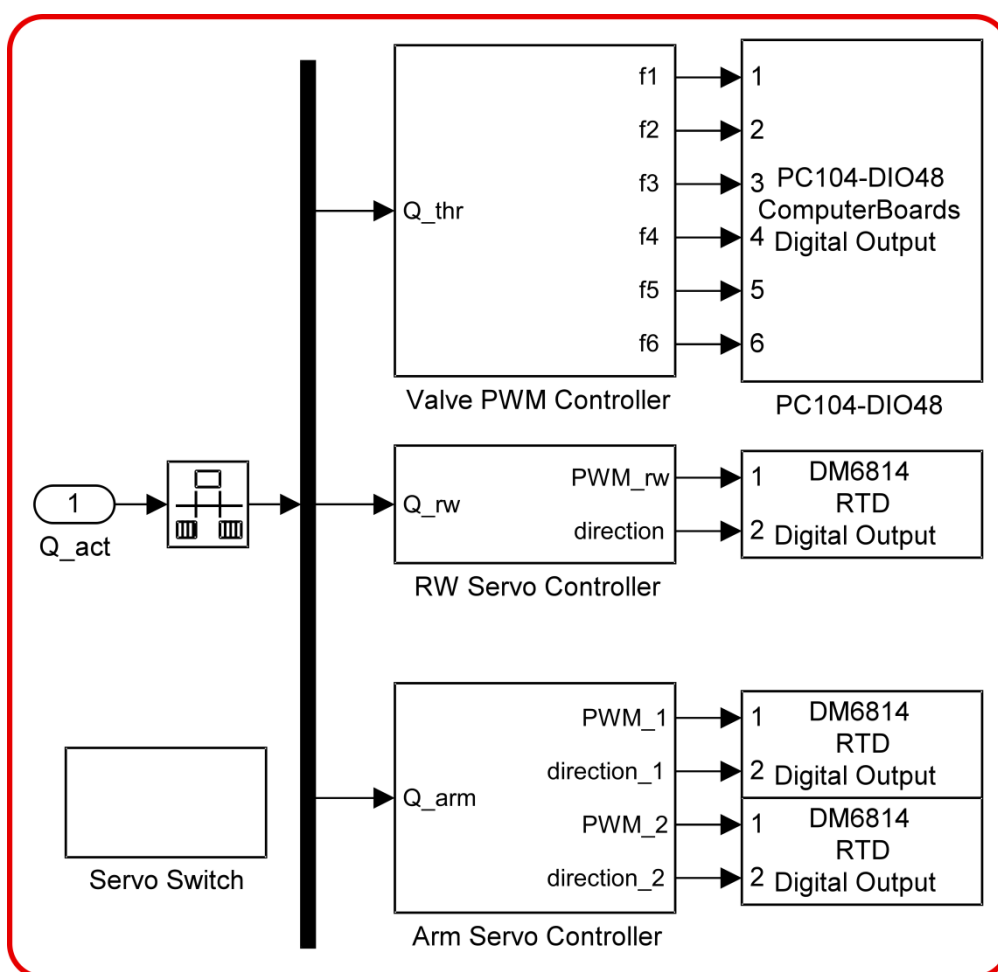
5.3.5 Actuators’ Control και σύνδεση με Servo Drive

Το υποσύστημα “Actuators’ Control” (Σχήμα 5-15) υφίσταται μόνο στο πρόγραμμα ελέγχου του συστήματος για Simulink Real-Time και είναι υπεύθυνο για την κατάλληλη ενεργοποίηση των επενεργητών του ρομπότ. Είσοδός του είναι το διάνυσμα απαιτούμενων δυνάμεων και ροπών, και έξοδός του τα σήματα ελέγχου των εξόδων διαφόρων καρτών του υπολογιστή του ρομπότ. Συγκεκριμένα, τα εν λόγω σήματα καταλήγουν στα μπλοκ ελέγχου των ψηφιακών εξόδων της κάρτας PC104-DIO48⁷⁹ και της κάρτας DM6814HR.

Όλα τα μπλοκ ελέγχου καρτών βρίσκονται στη βιβλιοθήκη του Simulink Real-Time και έχουν φτιαχτεί από τη MathWorks σε συνεργασία με τον κατασκευαστή της

⁷⁹ Measurement Computing

εκάστοτε κάρτας. Μέσω αυτών, ο χρήστης απαλλάσσεται από την ανάγκη προγραμματισμού των καρτών που διαθέτει, αρκεί βέβαια να υποστηρίζονται από το Simulink Real-Time, δηλαδή να προσφέρονται τα σχετικά μπλοκ στη βιβλιοθήκη του. Σε αυτή τη περίπτωση, αντί προγραμματισμού των καρτών σε επίπεδο υλικού, αρκεί να συμπεριληφθούν και να συνδεθούν τα σχετικά μπλοκ στο μοντέλο Simulink. Στη συνέχεια, μέσω του μενού κάθε μπλοκ γίνεται η αντιστοίχιση μεταξύ των εισόδων ή εξόδων του με τους κωδικούς των TTL ηλεκτρικών σημάτων [39] της κάρτας που ελέγχει. Η διαδικασία της αντιστοίχισης δεν αναλύεται περαιτέρω, διότι αφενός διαφέρει από κάρτα σε κάρτα, αφετέρου είναι εύκολο να υλοποιηθεί ακολουθώντας τις οδηγίες της βοήθειας του μπλοκ και του εγχειριδίου χρήσης της κάρτας.



Σχήμα 5-15. Actuators' Control. Η διαμόρφωση που παρουσιάζεται αφορά στη χρήση ενός βραχίονα. Για χρήση δύο βραχιόνων αρκεί το μπλοκ "Arm Servo Controller" και όσα έπονται αυτού να εισαχθούν άλλη μία φορά στο υποσύστημα.

Το μπλοκ "Valve PWM Controller" τροφοδοτείται με το διάνυσμα των ζητούμενων δυνάμεων από τους προωθητήρες του ρομπότ και υλοποιεί τον έλεγχό τους [61].

Το μπλοκ “RW Servo Controller”⁸⁰ τροφοδοτείται με την τιμή της ζητούμενης ροπής από τον κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης του ρομπότ και υπολογίζει τα σήματα που τροφοδοτούν το servo drive του κινητήρα. Υλοποιείται κατά τρόπο απολύτως όμοιο αυτού που περιγράφεται εκτενώς στη συνέχεια και αφορά το επόμενο μπλοκ.

Το μπλοκ “Arm Servo Controller” τροφοδοτείται με το διάνυσμα των ζητούμενων ροπών από τους δύο κινητήρες ενός βραχίονα. Για κάθε κινητήρα υπολογίζει το απαιτούμενο ρεύμα τροφοδοσίας, i_d , και τη φορά του ρεύματος, $direction$, ως εξής:

$$i_d = \frac{|Q_{arm}|}{K} \quad (5-2)$$

$$direction = sign(Q_{arm})$$

όπου Q_{arm} η ζητούμενη ροπή και K , η σταθερά ροπής του κινητήρα.

Για να μεταδοθεί η πληροφορία του ζητούμενου ρεύματος από τον υπολογιστή του ρομπότ στο servo drive (Escon 36/2 DC) που ελέγχει⁸¹ κάθε κινητήρα, απαιτείται ψηφιακό σήμα τύπου PWM [36] ή αναλογικό σήμα⁸². Στην περίπτωση του PWM το servo drive ρυθμίζεται, ώστε να αντιστοιχίζει ένα εύρος ρεύματος που ορίζει ο χρήστης⁸³ σε ένα εύρος duty cycle του εισερχόμενου PWM σήματος – για το Escon 36/2 DC το εύρος του duty cycle είναι προκαθορισμένο: 10% - 90%. Για εύρος ρεύματος από μηδέν έως i_{max} , η εξίσωση αντιστοίχισης είναι:

$$duty\ cycle = 0.1 + (0.9 - 0.1) \frac{i_d}{i_{max}} \quad (5-3)$$

Η συγκεκριμένη εξίσωση χρησιμοποιείται στο μπλοκ “Arm Servo Controller” για υπολογισμό του duty cycle του PWM σήματος. Στη συνέχεια, το υπολογισθέν duty cycle τροφοδοτείται σε ένα μπλοκ δημιουργίας PWM σήματος. Τελικά, σε κάθε servo drive συνδέονται δύο ψηφιακές έξοδοι της κάρτας DM6814HR – η μία στέλνει το

⁸⁰ Κατά την περίοδο εκπόνησης της παρούσης εργασίας το συγκεκριμένο μπλοκ δε χρησιμοποιήθηκε σε πειράματα, διότι δεν είχε ολοκληρωθεί η κατασκευή και τοποθέτηση του σφονδύλου αντίδρασης στο ρομπότ.

⁸¹ Το servo drive Escon 36/2 DC εκτελεί έλεγχο ρεύματος. Τα κέρδη του ελέγχου υπολογίζονται με αυτοματοποιημένο τρόπο, με χρήση του εργαλείου Auto Tuning του λογισμικού Escon Studio που συνοδεύει το servo drive. Η σχετική διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά στο εγχειρίδιο οδηγιών του Escon Studio [17].

⁸² Το διαθέσιμο σύστημα δεν υποστηρίζει αναλογικά σήματα.

⁸³ Προφανώς το εύρος πρέπει να είναι εντός των προδιαγραφών του servo drive.

PWM σήμα με την πληροφορία του μέτρου του ζητούμενου ρεύματος τροφοδοσίας κινητήρα και η άλλη στέλνει ένα bit για τη φορά του ρεύματος.

Επισημαίνεται ότι με τη συγκεκριμένη μέθοδο το σήμα PWM υλοποιείται σε «επίπεδο λογισμικού», ελέγχοντας συνεχώς την τιμή μίας ψηφιακής εξόδου ενός bit με τρόπο που η απόκρισή της να μιμείται τη μορφή του επιθυμητού PWM σήματος. Για να είναι λειτουργική αυτή η μέθοδος πρέπει ο ρυθμός εκτέλεσης του μπλοκ δημιουργίας του PWM σήματος, έστω f_{PWM}^{Block} , να είναι αρκετές φορές ταχύτερος του ρυθμού αλλαγής της ζητούμενης τιμής του duty cycle – ισοδύναμα, του ρυθμού εκτέλεσης του υποσυστήματος ελέγχου, έστω $f_{control}$ – ούτως ώστε να υπάρχει επαρκής χρόνος μεταξύ των αλλαγών στη τιμή του ζητούμενου duty cycle για δημιουργία αντιπροσωπευτικού τού παλμού:

$$f_{PWM}^{Block} > f_{control} \quad (5-4)$$

Επιπλέον, η συχνότητα των παλμών του PWM σήματος, έστω f_{PWM}^{Pulse} , πρέπει να είναι τέτοια ώστε η προκύπτουσα ανάλυση, δηλαδή ο αριθμός διαφορετικών παλμών που μπορούν να δημιουργηθούν προς επίτευξη διαφορετικών τιμών duty cycle, να είναι αποδεκτή. Η ανάλυση, res_{duty} , δίνεται από τη σχέση:

$$res_{duty} = \frac{f_{PWM}^{Block}}{f_{PWM}^{Pulse}} \quad (5-5)$$

Επίσης, πρέπει να ισχύει:

$$f_{PWM}^{Pulse} \geq f_{control} \quad (5-6)$$

ούτως ώστε να δημιουργείται τουλάχιστον ένας παλμός αντιπροσωπευτικός του duty cycle, προτού αυτό αλλάξει. Τέλος, το servo drive που χρησιμοποιείται δημιουργεί τους περιορισμούς [18]:

$$\begin{aligned} res_{duty} &\leq 800 \\ 10Hz &\leq f_{PWM}^{Pulse} \leq 5kHz \end{aligned} \quad (5-7)$$

Από δοκιμές προέκυψε ότι η μέγιστη συχνότητα στην οποία μπορεί ο υπολογιστής του ρομπότ να εκτελεί το πρόγραμμα ελέγχου σε πραγματικό χρόνο είναι $f_{PWM}^{Block} = 5000\text{Hz}$. Επισημαίνεται ότι το κυριότερο υπολογιστικό κόστος σχετίζεται με τη χρήση των μπλοκ ελέγχου των καρτών I/O και Incremental Encoder του υπολογιστή και όχι με κάποιο εκ των υπολοίπων υποσυστημάτων του

προγράμματος ελέγχου· συνεπώς, δεν υπάρχει τρόπος μείωσης του. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (5-5) και (5-6) προκύπτει:

$$\begin{aligned} f_{PWM}^{Block} &\geq f_{control} \cdot res_{duty} \Rightarrow \\ 5000 &\geq f_{control} \cdot res_{duty} \end{aligned} \quad (5-8)$$

Για την οριακή περίπτωση που ισχύει η ισότητα στην εξίσωση (5-8), επιλέγονται ως προτιμότερες οι εξής τιμές:

$$\begin{aligned} f_{control} &= 50 \text{ Hz} \\ res_{duty} &= 100 \\ f_{PWM}^{Pulse} &= 50 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (5-9)$$

Η συγκεκριμένες τιμές χαρακτηρίζονται ως μη αποδεκτές, διότι η προκύπτουσα συχνότητα λειτουργίας του υποσυστήματος ελέγχου, $f_{control}$, είναι μικρή και η ανάλυση των σημάτων ελέγχου ρεύματος των κινητήρων, res_{duty} , πολύ μικρή. Παρά ταύτα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σημαντικό περιορισμό του προβλεπόμενου εύρους ρεύματος, σε πειράματα που ο βραχίονας δε θα φέρει φορτίο.

Τα ανωτέρω προβλήματα μπορούν να λυθούν με τους εξής δύο τρόπους: Αγορά κάρτας που υλοποιεί τα ψηφιακά σήματα εξόδου PWM σε επίπεδο υλικού⁸⁴. Κατ' αυτό τον τρόπο, η δημιουργία σήματος PWM δε θα επιβαρύνει τον υπολογιστή του ρομπότ, αλλά θα υπάρχει η επιβάρυνση που δημιουργεί η χρήση της επιπλέον κάρτας. Προβλέπεται να μπορούν να επιτευχθούν οι εξής τιμές:

$$\begin{aligned} f_{control} &> 1000 \text{ Hz} \\ res_{duty} &= 800 \end{aligned} \quad (5-10)$$

Αγορά κάρτας αναλογικών εξόδων και χρήση με την αναλογική είσοδο του servo drive, ανάλυσης 12bit. Θα υπάρχει και σε αυτή τη περίπτωση επιβάρυνση του υπολογιστή λόγω της χρήσης επιπλέον κάρτας. Προβλέπεται να μπορούν να επιτευχθούν οι εξής τιμές:

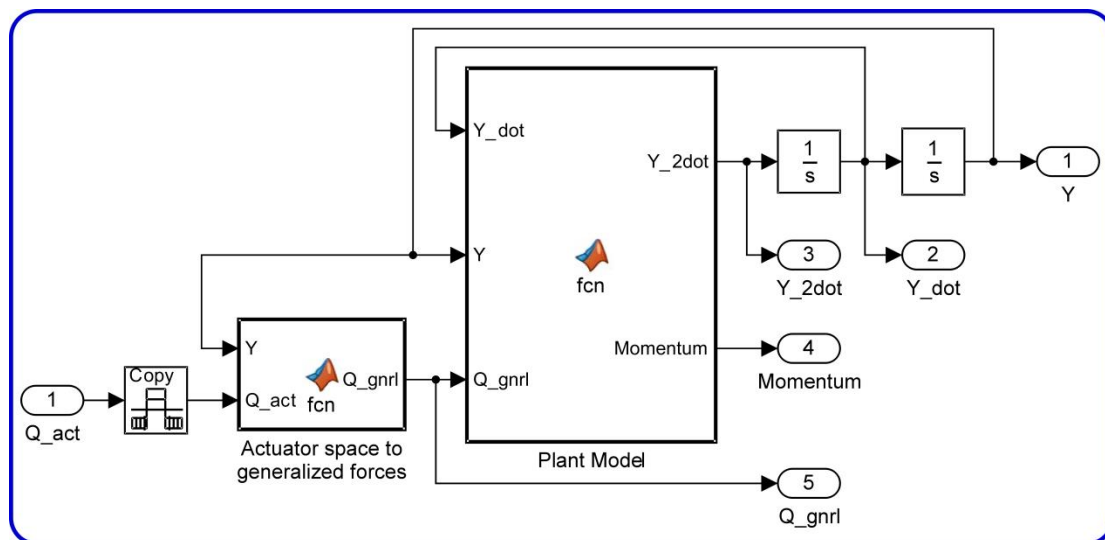
$$\begin{aligned} f_{control} &> 1000 \text{ Hz} \\ res_{duty} &= 2^{12} = 4096 \end{aligned} \quad (5-11)$$

⁸⁴ Dedicated PWM module.

Προκρίθηκε η μελλοντική αγορά της αναλογικής κάρτας DM6604HR της RTD, η χρήση της οποίας επιλύει και το εξής πρόβλημα: Η ψηφιακή είσοδος επιλογής φοράς ρεύματος του servo drive έχει μεγάλη καθυστέρηση αλλαγής κατάστασης, της τάξεως των 8ms. Η μεγαλύτερη όμως ανάλυση που θα γίνει διαθέσιμη με τη χρήση της αναλογικής κάρτας, θα επιτρέψει τη χρήση εύρους ρεύματος $\pm i_{max}$ και κατάργηση της εξόδου φοράς ρεύματος.

5.3.6 Plant Model

Το υποσύστημα “Plant Model” (Σχήμα 5-16) υφίσταται μόνο στο μοντέλο προσομοίωσης του Simulink και προέκυψε σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 3.2. Σκοπός του είναι να προσομοιώνει την απόκριση του πραγματικού συστήματος στο διάνυσμα των απαιτούμενων δυνάμεων και ροπών που υπολογίζει το υποσύστημα “Model based PD controller”. Στη συνέχεια η απόκριση χρησιμοποιείται ως σήμα ανάδρασης για να κλείσει ο βρόχος ελέγχου του συστήματος στην προσομοίωση.



Σχήμα 5-16. Υποσύστημα “Plant Model”

Το μπλοκ “Actuator space to generalized forces” μετατρέπει τις δυνάμεις και ροπές που ασκούν οι επενεργητές του συστήματος, δηλαδή το διάνυσμα εισόδου, Q_{act} , σε γενικευμένες δυνάμεις και ροπές – διάνυσμα εξόδου, Q . Το διάνυσμα στάσης, q , συγκεκριμένα ο προσανατολισμός του σώματος του ρομπότ, θ , χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα A , της εξίσωσης (3-17).

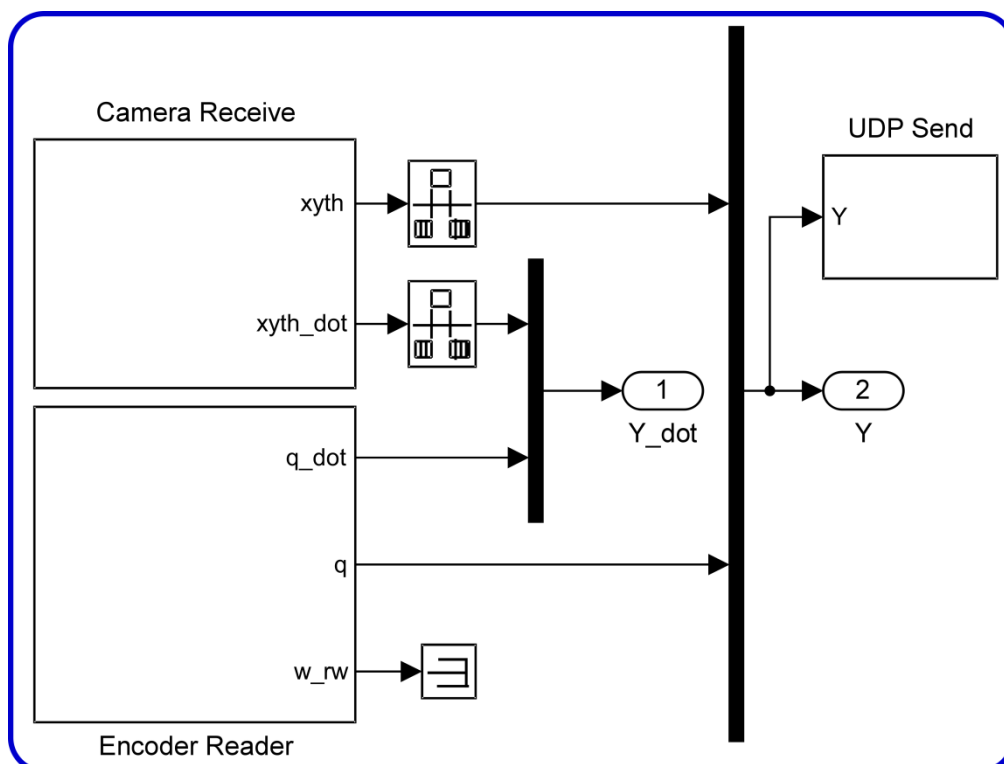
Το μπλοκ “Plant Model” επιλύει την εξίσωση Euler – Lagrange και υπολογίζει το διάνυσμα της επιτάχυνσης ως εξής:

$$\ddot{q} = \mathbf{M}^{-1}(q) \cdot (Q_{gnrl} - C(q, \dot{q})) \quad (5-12)$$

Τα δύο μπλοκ συνεχούς ολοκλήρωσης που έπονται υπολογίζουν τα διανύσματα ταχύτητας και θέσης/στάσης του ρομπότ. Επίσης, το μπλοκ “Plant Model” υπολογίζει την ορμή του ρομπότ για λόγους ανάλυσης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

5.3.7 Sensors' Feedback

Το υποσύστημα “Sensors' Feedback” (Σχήμα 5-17) υφίσταται μόνο στο πρόγραμμα ελέγχου του συστήματος για Simulink Real-Time και είναι υπεύθυνο για την ανάγνωση των αισθητήρων του ρομπότ και τη δημιουργία των διανυσμάτων ανάδρασης θέσης και ταχύτητας. Η στάση του σώματος του ρομπότ στο επίπεδο, (x, y, θ) , και η ταχύτητά του, $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$, δίνονται από το μπλοκ “Camera Receive” [61], το οποίο λαμβάνει και μορφοποιεί καταλλήλως τα δεδομένα θέσης και ταχύτητας που στέλνει η κάμερα του συστήματος.



Σχήμα 5-17. Sensors' Feedback

Το μπλοκ “Encoder Reader” (Σχήμα 5-18) χρησιμοποιείται για την ανάγνωση των incremental encoder των κινητήρων των βραχιόνων και του σφονδύλου αντίδρασης. Ο τρόπος υλοποίησης είναι ίδιος για κάθε περίπτωση: Αρχικά το σήμα του encoder διαβάζεται από το μπλοκ της σχετικής κάρτας για Simulink Real-Time, εν προκειμένω το “DM6814 RTD Incremental Encoder”. Αυτό το μπλοκ είναι προγραμματισμένο έτσι ώστε να ανιχνεύει τα άκρα των παλμών, δηλαδή τις

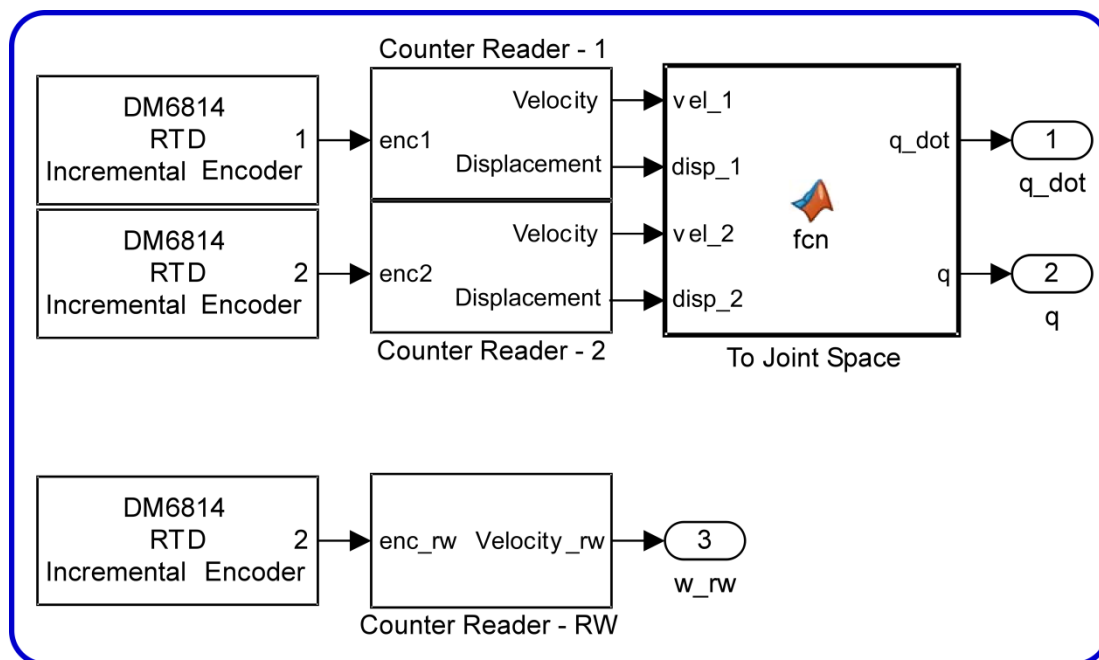
μεταβάσεις από high σε low σήμα και το αντίστροφο, που δημιουργεί ο encoder κάθε κινητήρα, και να ενημερώνει τον μετρητή του αυξάνοντας ή μειώνοντας την τιμή του κατά ένα, αναλόγως της φοράς περιστροφής [38]. Συγκεκριμένα, η ανωτέρω διαδικασία πραγματοποιείται στο επίπεδο υλικού της κάρτας DM6814, σε συχνότητα λειτουργίας κατά πολύ μεγαλύτερη και ανεξάρτητη αυτής που εκτελείται το πρόγραμμα ελέγχου του ρομπότ – το μπλοκ απλά ρυθμίζει καταλλήλως τις διευθύνσεις της κάρτας, αφενός απαλλάσσοντας τον προγραμματιστή του συστήματος από τη σχετική επίπονη διαδικασία, αφετέρου ώστε να εκτελείται η ανάγνωση του σήματος παλμών από την κάρτα και η έξοδος του μπλοκ της στο πρόγραμμα Simulink να είναι η τιμή του μετρητή της. Ο προγραμματισμός του μπλοκ περιλαμβάνει μόνο τον καθορισμό τεσσάρων παραμέτρων του:

- Channel: Επιλέγεται το κανάλι της κάρτας στο οποίο έχει συνδεθεί ο αισθητήρας που ενδιαφέρει. Η συνδεσμολογία γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης των εγχειριδίων του αισθητήρα [19] και της κάρτας [21] Incremental Encoder. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση αποδείχθηκε απαραίτητη η χρήση line receiver [28] τύπου SN 75175 [23].
- Counter initial value: Επιλέγεται η τιμή εκκίνησης του μετρητή. Διαπιστώθηκε ότι εξαιτίας σφάλματος του μπλοκ (software bug), στο συγκεκριμένο πεδίο πρέπει απαραίτητως να εισαχθεί η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο μετρητής, ήτοι $2^{16} - 1 = 65535$.
- Sample time: Επιλέγεται η περίοδος ανανέωσης της τιμής εξόδου του μπλοκ, δηλαδή της τιμής του μετρητή, προς το υπόλοιπο πρόγραμμα. Δε σχετίζεται με τη συχνότητα λειτουργίας της κάρτας, η οποία είναι επαρκώς υψηλή για παρακολούθηση της περιστροφής των κινητήρων.
- Base address: Εισάγεται η διεύθυνση της κάρτας, η οποία ορίζεται από τον φυσικό διακόπτη επιλογής (DIP switch) που διαθέτει. Για κάθε κάρτα πρέπει να επιλέγεται ελεύθερη διεύθυνση.

Η τιμή του μετρητή τροφοδοτεί το “Counter Reader” μπλοκ, το οποίο υπολογίζει τη μετατόπιση και την ταχύτητα του άξονα του σχετικού κινητήριου συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις υπερχειλίσσεις (overflows) της μνήμης του μετρητή. Το μπλοκ αντιλαμβάνεται την υπερχειλίση διότι προκαλεί πολύ μεγάλο άλμα στη τιμή του μετρητή. Το σχετικό όριο απόφασης ορίζεται συναρτήσει του χρόνου “Sample time” έτσι ώστε το άλμα να είναι αδύνατο να οφείλεται στη πιθανώς μεγάλη ταχύτητα του κινητήρα.

Στην περίπτωση κάποιου βραχίονα οι τιμές μετατόπισης και ταχύτητας των δύο κινητήριων συστημάτων του που υπολογίστηκαν, δηλαδή οι έξοδοι των “Counter

Reader - 1” και “Counter Reader - 2”, τροφοδοτούν το μπλοκ “To Joint Space”, το οποίο υπολογίζει τη μετατόπιση και ταχύτητα των δύο αρθρώσεων του βραχίονα σύμφωνα με την εξίσωση (3-8). Επίσης προσθέτει τη δεδομένη τιμή της αρχικής θέσης των αρθρώσεων στην τιμή της μετατόπισης που υπολόγισε. Προκύπτει έτσι η απόλυτη θέση των αρθρώσεων, q .



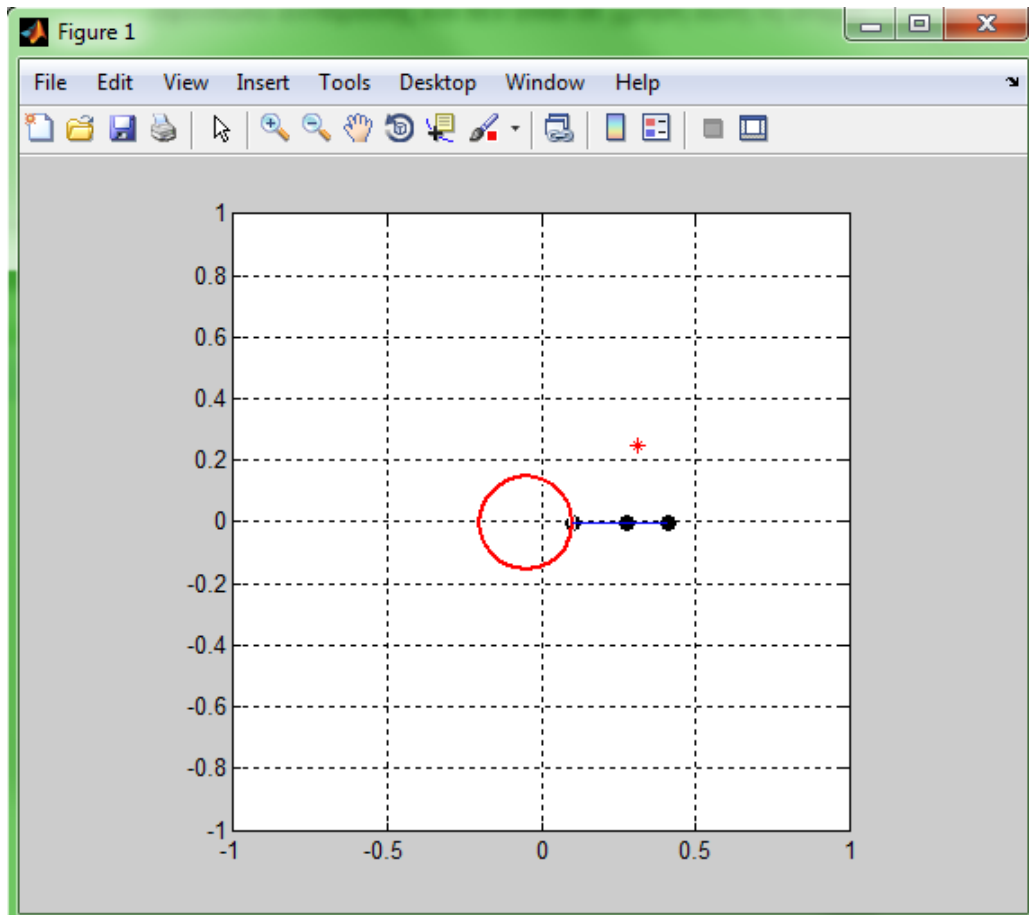
Σχήμα 5-18. Encoder Reader. Η διαμόρφωση που παρουσιάζεται αφορά στη χρήση ενός βραχίονα. Για χρήση δύο βραχιόνων αρκεί το μπλοκ “To Joint Space” και όσα προηγούνται αυτού να εισαχθούν άλλη μία φορά στο υποσύστημα. Τα μπλοκ στο κάτω μέρος του σχήματος αφορούν στον σφόνδυλο αντίδρασης (RW – Reaction Wheel) και δεν είναι σε χρήση αυτή τη στιγμή.

5.4 Γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI)

Αναπτύχθηκε το απλοϊκό GUI που εμφανίζεται στο Σχήμα 5-19, σκοπός του οποίου είναι ο ασύρματος έλεγχος ενός βραχίονα του ρομπότ με παράλληλη εποπτεία των κινήσεών του. Ο κόκκινος κύκλος αντιπροσωπεύει την περίμετρο του σώματος του ρομπότ και οι δύο μπλε γραμμές τους συνδέσμους του βραχίονα. Όταν το ρομπότ ή/και ο βραχίονας κινούνται ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τις κινήσεις τους στο εν λόγω γραφικό σε πραγματικό χρόνο⁸⁵, σε οποιονδήποτε υπολογιστή αρκεί να τρέχει Matlab και Simulink. Επίσης, ο χρήστης του GUI έχει τη δυνατότητα να επιλέξει με το ποντίκι του υπολογιστή του οποιοδήποτε σημείο του γραφικού που

⁸⁵ Πρόκειται για soft real time, καθώς η ασύρματη επικοινωνία με πρωτόκολλο UDP υπόκειται σε lag και σποραδική απώλεια πακέτων δεδομένων.

εμφανίζεται στην οθόνη του – τότε, ο κόκκινος αστερίσκος (Σχήμα 5-19) μεταφέρεται στο σημείο που επέλεξε και αποστέλλεται στο ρομπότ εντολή μετακίνησης του άκρου δράσης του βραχίονα στο αντίστοιχο σημείο του επιπέδου. Η αποστολή και λήψη δεδομένων μεταξύ του ρομπότ και του υπολογιστή όπου εκτελείται το πρόγραμμα GUI γίνεται μέσω πρωτοκόλλου επικοινωνίας UDP. Το μπλοκ “UDP send” που φαίνεται στο Σχήμα 5-17 χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό.



Σχήμα 5-19. Περιβάλλον GUI.

Η διαδραστικότητα του συστήματος το καθιστά ιδανικό για αξιοποίηση σε επιδείξεις του εργαστηρίου, αρκεί να εμπλουτιστεί με τα εξής επιπλέον χαρακτηριστικά:

- Υποστήριξη και των δύο βραχιόνων του ρομπότ.
- Δυνατότητα αποστολής εντολών ελέγχου του σώματος του ρομπότ.

6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων και πειραμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των πειραμάτων που διεξήχθησαν. Σκοπός είναι η διαπίστωση της ορθής λειτουργίας των βραχιόνων του ρομπότ και των προγραμμάτων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Επίσης εξετάζεται ο βαθμός συμφωνίας των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με αυτά των αντίστοιχων πειραμάτων. Διευκρινίζεται ότι κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των εργασιών κατασκευής των βραχιόνων δεν ήσαν διαθέσιμα τα απαραίτητα εξαρτήματα για την κατασκευή του δεύτερου βραχίονα· γι' αυτό, ολοκληρώθηκε η κατασκευή μόνο του πρώτου. Συνεπώς, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν στο ρομπότ με ένα βραχίονα σε χρήση. Καταρχάς παρουσιάζονται αποτελέσματα για τροχιές στον χώρο των αρθρώσεων και έπειτα για τροχιές του τελικού σημείου δράσης στον Καρτεσιανό χώρο.

6.1 Έλεγχος ενός βραχίονα με σταθερό το σώμα του ρομπότ

Σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων και πειραμάτων δοκιμάστηκαν διάφορες κινήσεις του βραχίονα με το σώμα του ρομπότ να παραμένει ακίνητο, ώστε να διαπιστωθούν οι επιδόσεις του ελεγκτή και της κατασκευής του βραχίονα, ανεπηρέαστες από ανακρίβειες που σχετίζονται με τα υπόλοιπα συστήματα του ρομπότ.

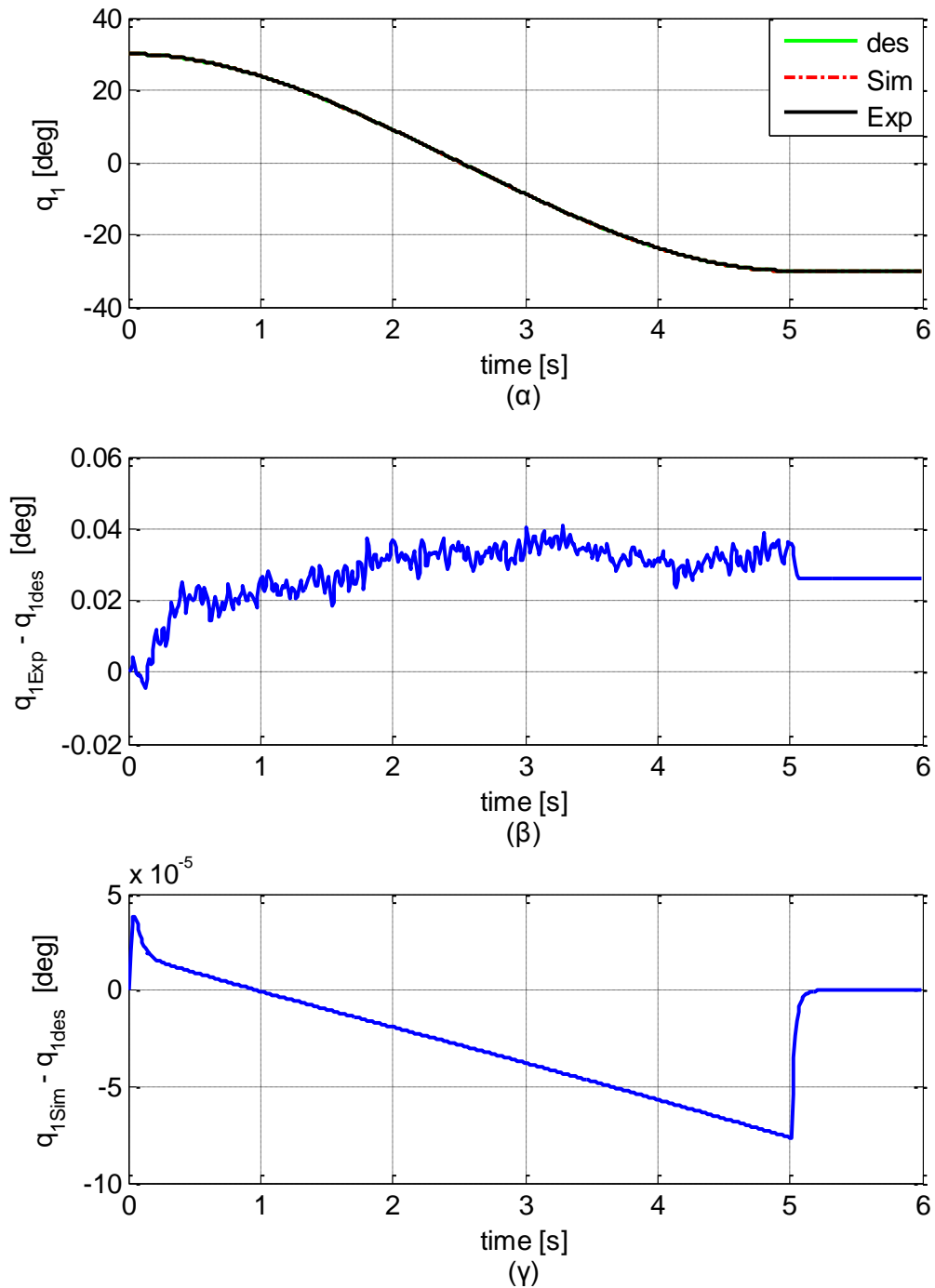
Η συχνότητα υπολογισμού της τροχιάς και του νόμου ελέγχου ορίστηκε στα 100Hz, δηλαδή τη μέγιστη εφικτή τιμή για τη διαμόρφωση του ρομπότ για αυτή τη σειρά πειραμάτων⁸⁶. Κατόπιν δοκιμών επιλέχθηκε χρόνος αποκατάστασης για τις μεταβλητές του βραχίονα 0.2s και προέκυψαν τα κέρδη ελέγχου σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 4.1. Τέλος, η μέγιστη τιμή του εύρους του ρεύματος τροφοδοσίας των κινητήρων περιορίστηκε: 0.2A, ώστε να υπάρχει βελτιωμένη διακριτική ικανότητα στη ροπή ελέγχου δεδομένης της διαθέσιμης ανάλυσης των servo drive (βλέπε Κεφάλαιο 5.3.5), χωρίς να εμφανίζεται έλλειμμα ροπής, αφού ο βραχίονας δε θα φέρει κανένα εξωτερικό φορτίο. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων του συστήματος φαίνονται στο Παράρτημα Δ.

6.1.1 Στροφή της πρώτης άρθρωσης με σταθερή τη δεύτερη

Ο βραχίονας εκκινεί από αρχική κατάσταση αρθρώσεων $q_o = (30^\circ, -45^\circ)$. Δίνεται η εντολή [degtorad(-60);degtorad(0);5;0;0;21], η οποία ζητεί στροφή της πρώτης άρθρωσης κατά -60° με τη δεύτερη να παραμένει ακίνητη⁸⁷. Η πρώτη άρθρωση θα ακολουθήσει πολυωνυμική τροχιά τρίτου βαθμού που ορίζεται στο χώρο των αρθρώσεων σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 4.3.2, η δε διάρκεια της κίνησης θα είναι 5 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος.

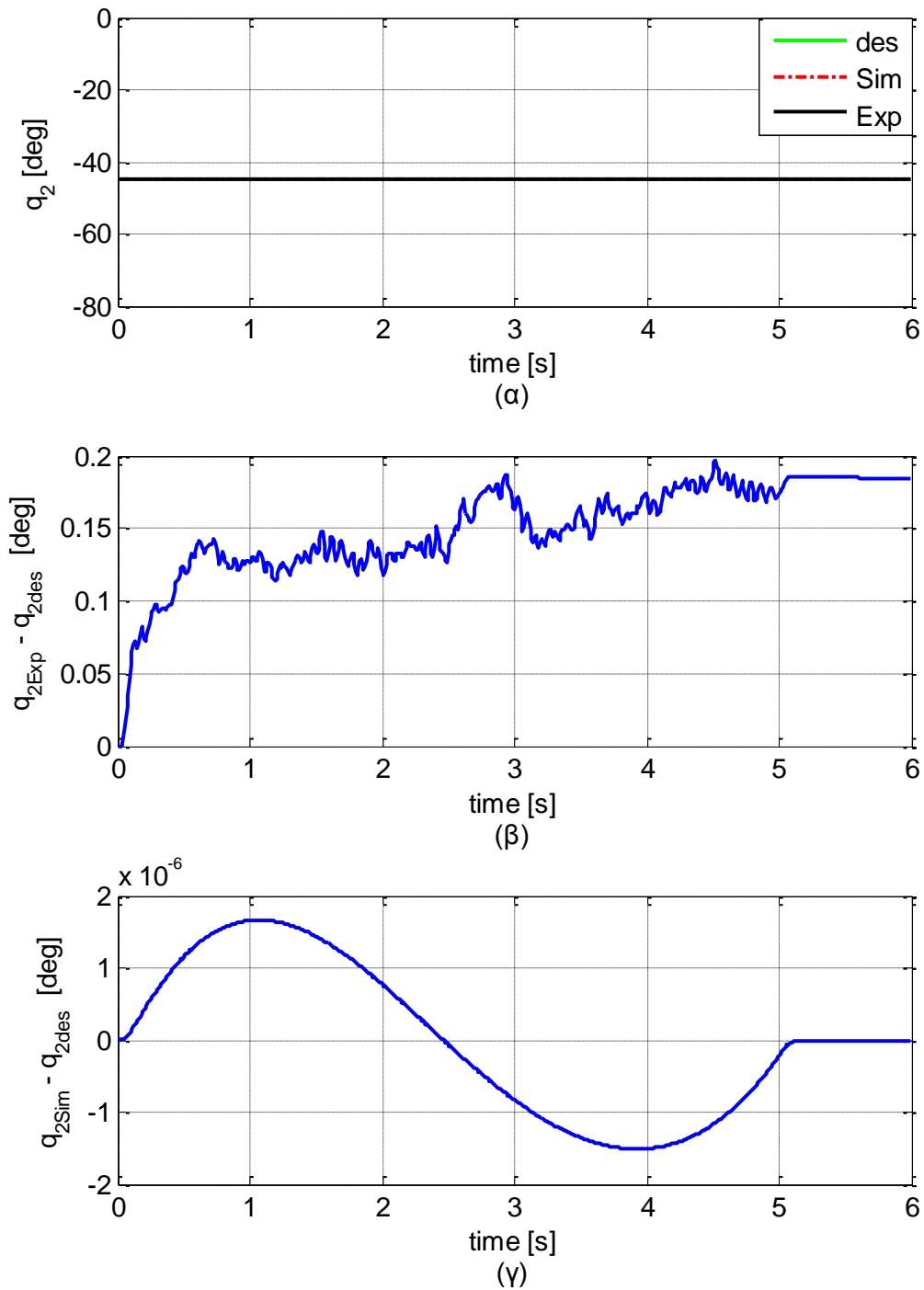
⁸⁶ Ο διπλασιασμός της μέγιστης εφικτής συχνότητας που βρέθηκε στο Κεφάλαιο 5.3.5 οφείλεται στη μη χρήση του συστήματος ανάγνωσης της θέσης του ρομπότ σε αυτά τα πειράματα, καθώς το σώμα του παραμένει συνεχώς σταθερό.

⁸⁷ Δηλαδή ο δεύτερος σύνδεσμος παραμένει ακίνητος ως προς τον πρώτο.



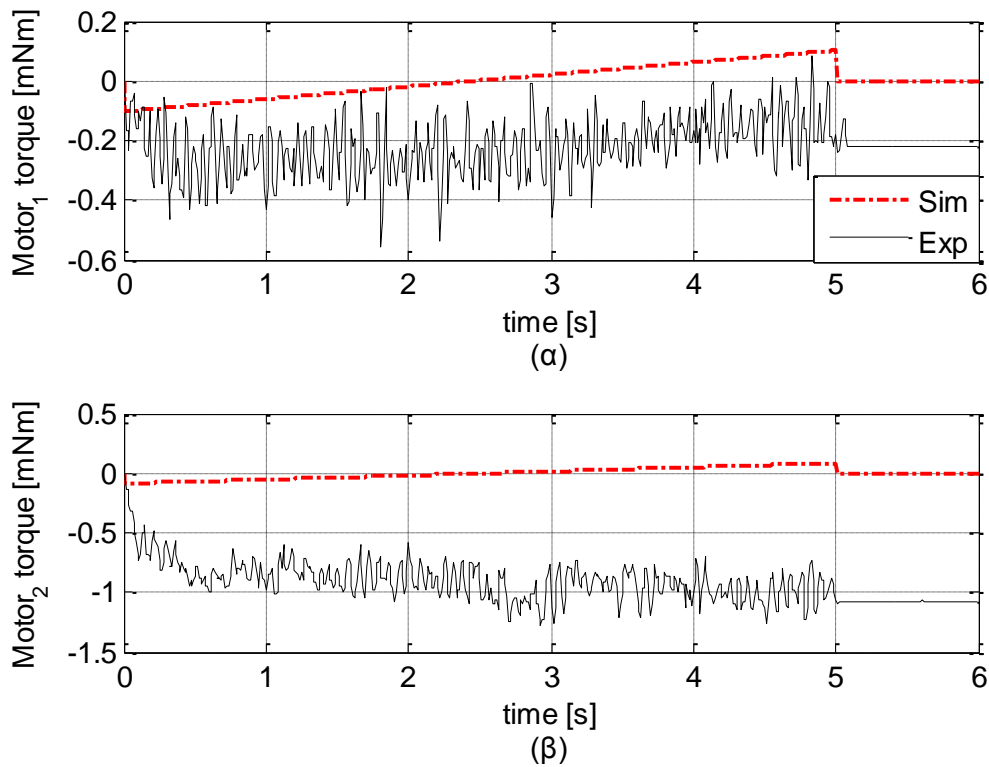
Σχήμα 6-1. Αποτελέσματα για την πρώτη άρθρωση. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (στο υπόμνημα des, εκ του desired trajectory) και η απόκριση της πρώτης άρθρωσης, q_1 , όπως προέκυψε από την προσομοίωση και το πείραμα (στο υπόμνημα Sim και Exp, αντίστοιχα⁸⁸). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $q_{1Exp} - q_{1des}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $q_{1Sim} - q_{1des}$.

⁸⁸ Οι καμπύλες της επιθυμητής τροχιάς και των δύο αποκρίσεων σχεδόν ταυτίζονται, γι' αυτό φαίνονται ως μία.



Σχήμα 6-2. Αποτελέσματα για τη δεύτερη άρθρωση. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (στο υπόμνημα des, εκ του desired trajectory) και η απόκριση της δεύτερης άρθρωσης, q_2 , όπως προέκυψε από την προσομοίωση και το πείραμα (στο υπόμνημα Sim και Exp, αντίστοιχα⁸⁹). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $q_{2Exp} - q_{2des}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $q_{2Sim} - q_{2des}$.

⁸⁹ Οι καμπύλες της επιθυμητής τροχιάς και των δύο αποκρίσεων σχεδόν ταυτίζονται, γι' αυτό φαίνονται ως μία.



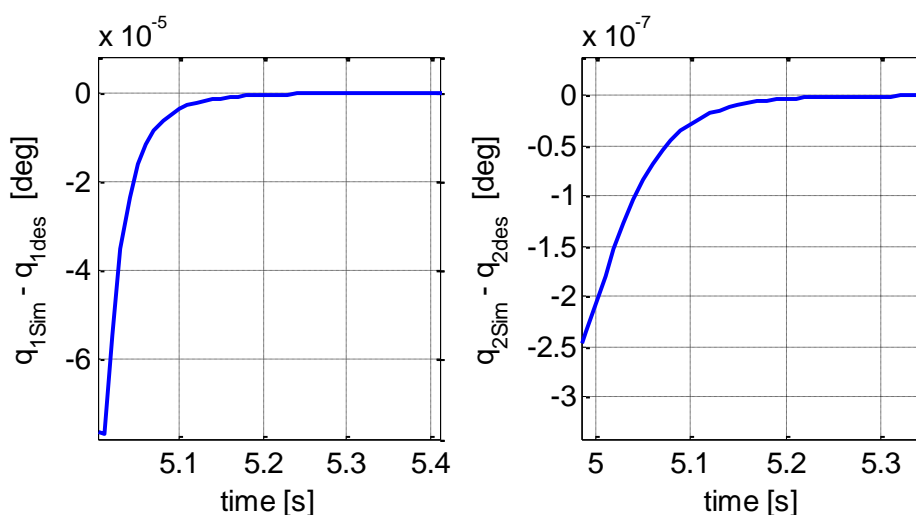
Σχήμα 6-3. Αποτελέσματα ζήτησης ροπής των κινητήρων. Στο (α) φαίνεται η ζήτηση ροπής του πρώτου κινητήρα, όπως προέκυψε στην προσομοίωση και στο πείραμα. Ομοίως στο (β), η ζήτηση ροπής του δεύτερου κινητήρα.

Από το Σχήμα 6-1-α και το Σχήμα 6-2-α φαίνεται ότι η επιθυμητή τροχιά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος παρουσιάζουν τέτοια σύγκλιση που εμφανίζονται ως μία καμπύλη. Από το διάγραμμα (β) των ίδιων σχημάτων διαπιστώνεται ότι το μέγιστο σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος είναι περίπου 0.04° για την πρώτη άρθρωση και 0.2° για τη δεύτερη. Η μεγαλύτερη απόκλιση που παρουσιάζεται στη δεύτερη άρθρωση οφείλεται στο σύστημα μετάδοσης με ιμάντες που χρησιμοποιείται, το οποίο αυξάνει τις τριβές και κατ' επέκταση τα σφάλματα, κυρίως στη δεύτερη άρθρωση.

Ωστόσο το σύστημα μετάδοσης με ιμάντες επηρεάζει και την πρώτη άρθρωση, πράγμα που φαίνεται από την ταλαντωτική συμπεριφορά ίδιας συχνότητας (περίπου 15Hz) που εμφανίζεται και στις δύο αρθρώσεις (βλέπε Σχήμα 6-1-β και Σχήμα 6-2-β) και αποδίδεται στην ελαστικότητα των ιμάντων. Η εν λόγω ταλαντωτική συμπεριφορά εμφανίζεται μόνο στο πραγματικό σύστημα, καθώς το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης ως προς τη λεία καμπύλη της επιθυμητής τροχιάς που φαίνεται στο διάγραμμα (γ) των ίδιων σχημάτων, δεν περιλαμβάνει τις προαναφερθείσες

ταλαντώσεις⁹⁰. Το πλάτος των ταλαντώσεων δεν ξεπερνάει τις 0.02° , συνεπώς είναι ανεπαίσθητες για το υπόλοιπο σύστημα και δεν αποτελούν πρόβλημα.

Από το Σχήμα 6-1-γ και το Σχήμα 6-2-γ φαίνεται ότι το σφάλμα της προσομοίωσης είναι μεγαλύτερο κατά μία τάξη μεγέθους για την πρώτη άρθρωση σε σχέση με τη δεύτερη, πράγμα αναμενόμενο αφού η πρώτη άρθρωση περιστρέφεται ενώ η δεύτερη όχι. Αμφότερα τα σφάλματα είναι πολύ μικρά κατά τη διάρκεια της κίνησης και μηδενικά στη μόνιμη κατάσταση, όπως αναμένεται για σύστημα που εφαρμόζεται PD έλεγχος βασισμένος στο μοντέλο και έχει γίνει υπόθεση ακριβούς γνώσης των παραμέτρων του. Επίσης, παρατηρείται ότι μετά το πέρας των 5s και τη λήξη της επιθυμητής κίνησης, ο χρόνος που απαιτείται για τον μηδενισμό των σφαλμάτων είναι 0.2s, δηλαδή ίσος με τον χρόνο αποκατάστασης που επιλέχθηκε (Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6-4. Μετάβαση της απόκρισης της προσομοίωσης σε μόνιμη κατάσταση μηδενικού σφάλματος.

Αντίθετα, η πραγματική απόκριση καταλήγει σε μη μηδενικά σφάλματα μόνιμης κατάστασης, περίπου 0.026° στην πρώτη άρθρωση και 0.18° στη δεύτερη, πράγμα που οφείλεται κυρίως στη στατική τριβή. Λόγω του συστήματος των ιμάντων η τριβή στη δεύτερη άρθρωση είναι σαφώς μεγαλύτερη της τριβής στην πρώτη, εξ ου και το μεγαλύτερο παραμένον σφάλμα στη δεύτερη. Ωστόσο, αμφότερα τα σφάλματα είναι αρκετά μικρότερα της μέσης χάρης των μειωτήρων⁹¹, συνεπώς κρίνονται αποδεκτά.

⁹⁰ Άλλωστε, το μοντέλο προσομοίωσης δεν περιλαμβάνει μοντελοποίηση των ιμάντων.

⁹¹ Σύμφωνα με το εγχειρίδιο προδιαγραφών οι μειωτήρες παρουσιάζουν μέση χάρη οδόντωσης 1.0° .

Στο Σχήμα 6-3 φαίνεται ότι η πραγματική ζήτηση ροπής από τους δύο κινητήρες του βραχίονα είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που προβλέπει η προσομοίωση. Επιπλέον, εμφανίζονται απότομες αυξομειώσεις με συχνότητα όμοια αυτής των μικρών ταλαντώσεων της απόκρισης των αρθρώσεων. Διαπιστώθηκε ότι οι αποκλίσεις οφείλονται κατά κύριο λόγο στη μη μοντελοποίηση της τριβής, οι δε ταλαντώσεις μεταφέρονται στη ζητούμενη ροπή από τα σφάλματα της απόκρισης των αρθρώσεων. Παρατηρείται μεγαλύτερη ζήτηση ροπής από τον δεύτερο κινητήρα διότι βρίσκεται σε άμεση σύνδεση με το σύστημα των ιμάντων του βραχίονα. Επισημαίνεται ότι για να μην περιστρέφεται η δεύτερη άρθρωση ενώ περιστρέφεται η πρώτη, απαιτείται ίση και ίδιας φοράς περιστροφή των αξόνων και των δύο κινητήρων του βραχίονα. Αυτό προκύπτει από την εξίσωση (3-8) ως εξής:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= n q_1 & \dot{q}_1 &= \dot{\theta}_1 / n \\ \theta_2 &= n(q_1 + q_2) & \Rightarrow \dot{q}_2 &= (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) / n \end{aligned} \quad (6-1)$$

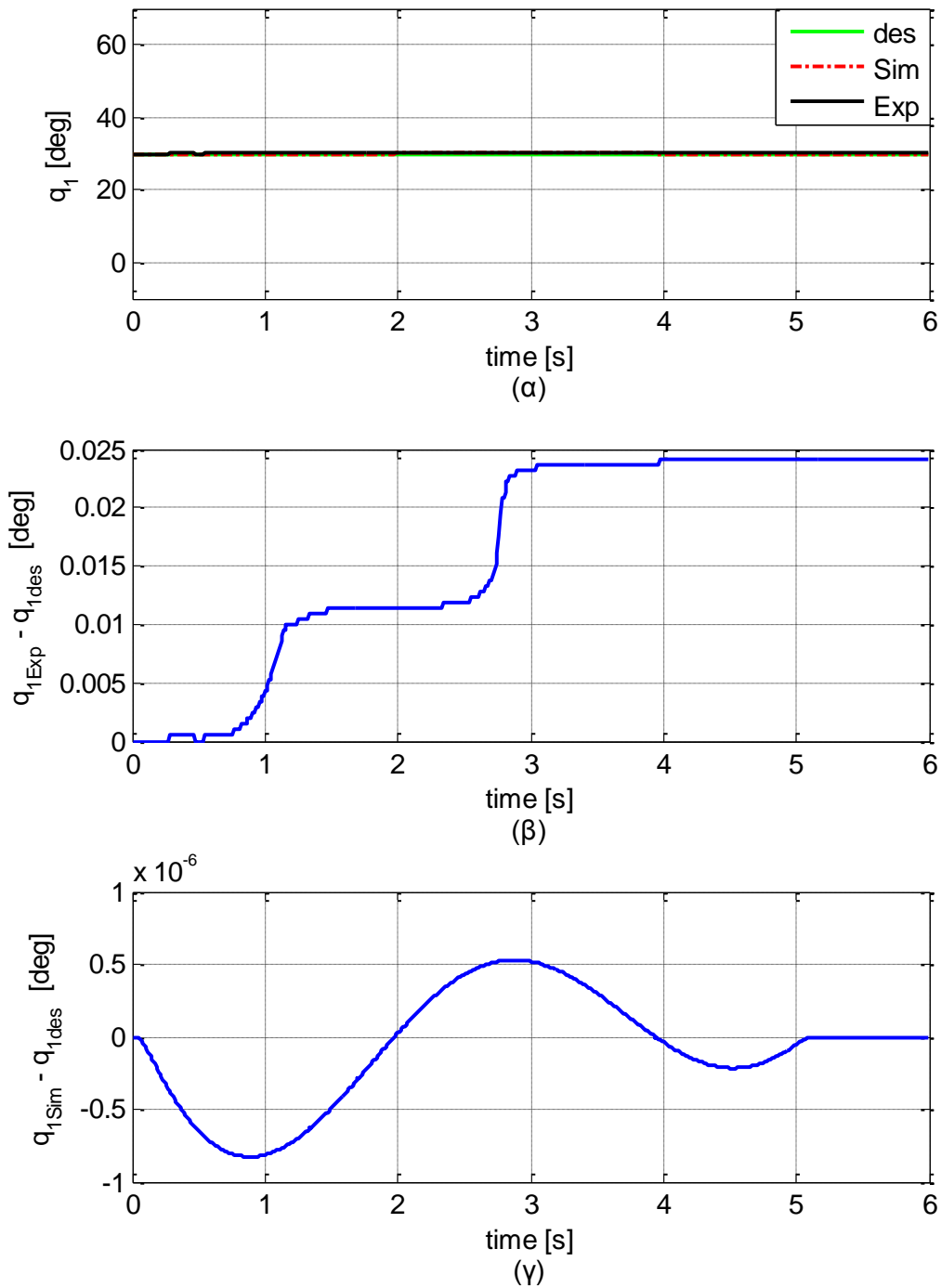
όπου θ_1 , η γωνία στροφής του πρώτου κινητήρα, θ_2 , η γωνία στροφής του δεύτερου κινητήρα και n , ο λόγος μετάδοσης των μειωτήρων. Οπότε:

$$\dot{q}_2 = 0 \Rightarrow \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_1 \quad (6-2)$$

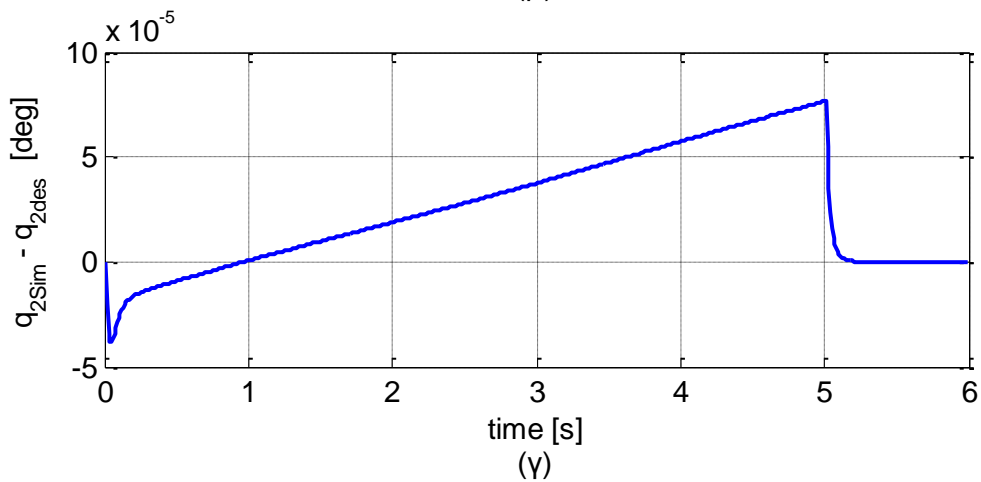
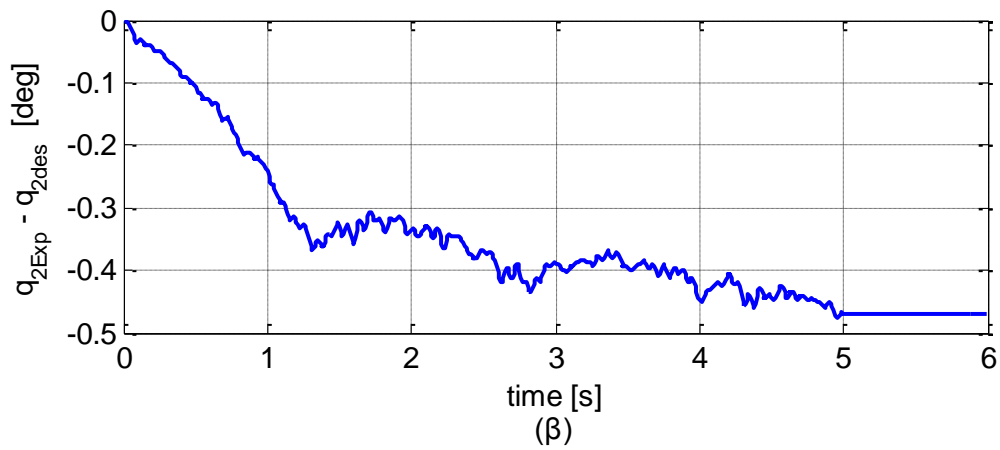
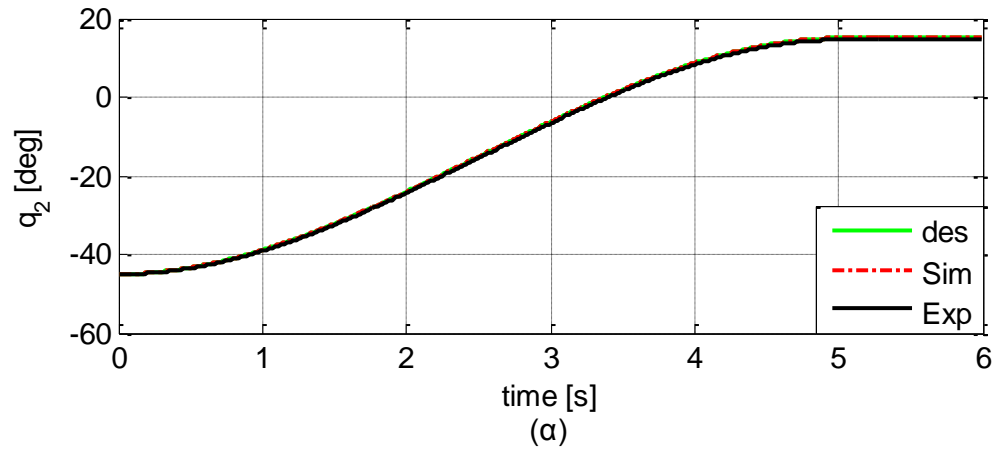
Συνεπώς, η μεγαλύτερη ζήτηση ροπής από τον δεύτερο κινητήρα σε αυτό το πείραμα είναι δικαιολογημένη, καθώς καλείται να περιστραφεί ακριβώς όπως και ο πρώτος, υπό την επιπλέον αντίσταση τριβής λόγω του συστήματος των ιμάντων. Τέλος, η παραμένουσα ζήτηση ροπής στη μόνιμη κατάσταση οφείλεται στα παραμένοντα σφάλματα μόνιμης κατάστασης που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

6.1.2 Στροφή της δεύτερης άρθρωσης με σταθερή την πρώτη

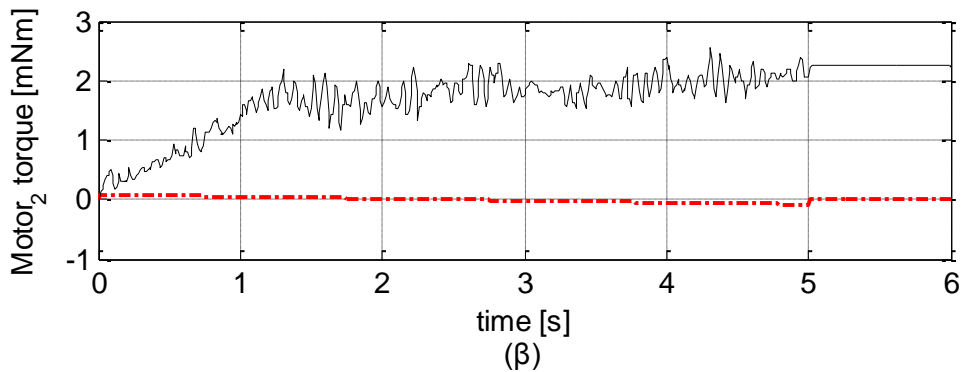
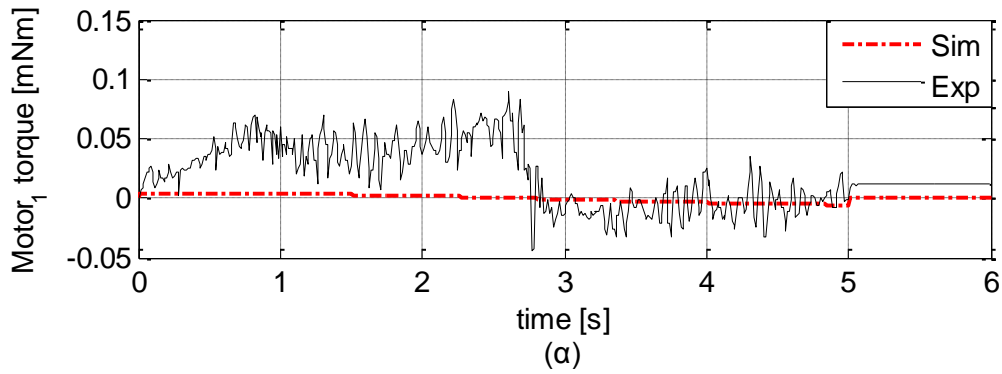
Ο βραχίονας εκκινεί από αρχική κατάσταση αρθρώσεων $q_o = (30^\circ, -45^\circ)$. Δίνεται η εντολή [degtorad(0);degtorad(60);5;0;0;21], η οποία ζητεί στροφή της δεύτερης άρθρωσης κατά 60° με την πρώτη να παραμένει ακίνητη. Η δεύτερη άρθρωση θα ακολουθήσει πολυωνυμική τροχιά τρίτου βαθμού που ορίζεται στο χώρο των αρθρώσεων, η δε διάρκεια της κίνησης θα είναι 5 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος, σε αντιδιαστολή με τα προηγούμενα.



Σχήμα 6-5. Αποτελέσματα για την πρώτη άρθρωση. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση της πρώτης άρθρωσης όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $q_{1Exp} - q_{1des}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $q_{1Sim} - q_{1des}$.



Σχήμα 6-6. Αποτελέσματα για τη δεύτερη άρθρωση. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση της πρώτης άρθρωσης όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $q_{2Exp} - q_{2des}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $q_{2Sim} - q_{2des}$.



Σχήμα 6-7. Αποτελέσματα ζήτησης ροπής των κινητήρων. Στο (α) φαίνεται η ζήτηση ροπής του πρώτου κινητήρα, όπως προέκυψε στην προσομοίωση και στο πείραμα. Ομοίως στο (β), η ζήτηση ροπής του δεύτερου κινητήρα.

Από το Σχήμα 6-5-α και το Σχήμα 6-6-α φαίνεται ότι η επιθυμητή τροχιά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος σχεδόν ταυτίζονται. Η κυριότερη διαφορά σε σχέση με τα αποτελέσματα του προηγούμενου πειράματος εντοπίζεται στο Σχήμα 6-5-β, όπου απουσιάζει η ταλαντωτική συμπεριφορά από την πραγματική απόκριση της πρώτης άρθρωσης. Αυτό συμβαίνει διότι η πρώτη άρθρωση παραμένει σταθερή χάριν μόνον του πρώτου κινητήρα, ο οποίος δεν συνδέεται με ιμάντες αλλά απευθείας στην πρώτη άρθρωση (Σχήμα 2-15, Σχήμα 2-16). Πράγματι, από την εξίσωση (6-1) προκύπτει:

$$\dot{q}_1 = 0 \Rightarrow \begin{cases} \dot{\theta}_1 = 0 \\ \dot{\theta}_2 = \dot{q}_2 \cdot n \end{cases} \quad (6-3)$$

Αντίθετα στο προηγούμενο πείραμα η δεύτερη άρθρωση παρέμενε σταθερή ως αποτέλεσμα της συνεργασίας και των δύο κινητήρων, οι οποίοι καλούνταν να περιστρέφονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Για αυτό το λόγο, η ταλαντωτική συμπεριφορά λόγω των ιμάντων που συνδέονται στον δεύτερο κινητήρα μεταφερόταν και στον πρώτο και στην απόκριση της πρώτης άρθρωσης.

Στο Σχήμα 6-6-β εμφανίζεται η ταλαντωτική συμπεριφορά στην απόκριση της δεύτερης άρθρωσης με ελαφρώς μειωμένη συχνότητα (12Hz) σε σχέση με αυτή που εμφανίστηκε στο πρώτο πείραμα (15Hz). Αυτό αποδίδεται σε κάποιο φαινόμενο

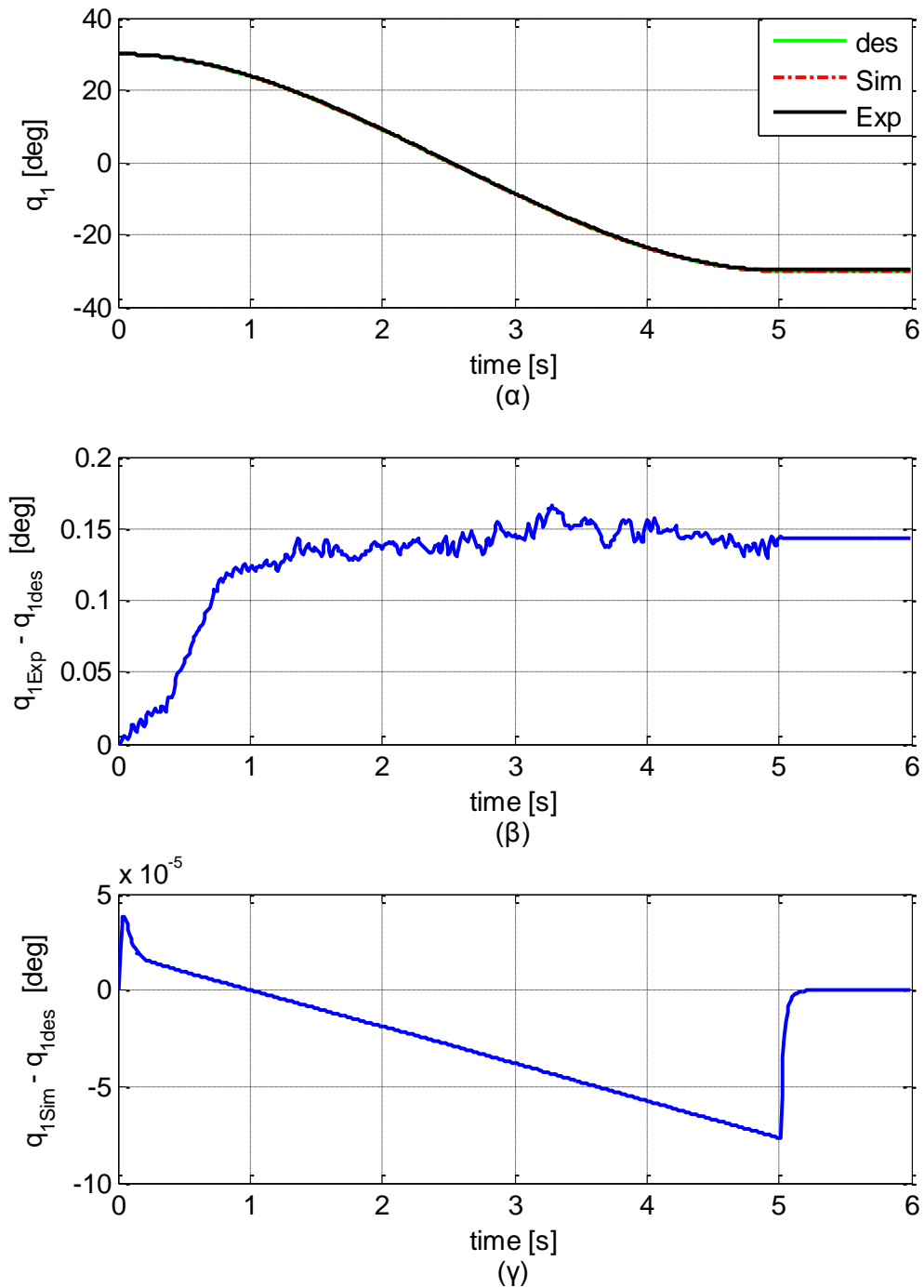
υπέρθεσης ταλαντώσεων λόγω της συνδυασμένης λειτουργίας των δύο κινητήρων κατά το πρώτο πείραμα.

Τα σφάλματα μόνιμης κατάστασης στη προσομοίωση είναι και πάλι μηδενικά για τους ίδιους λόγους. Η πραγματική απόκριση παρουσιάζει οριακά μειωμένο σφάλμα μόνιμης κατάστασης στην πρώτη άρθρωση (0.024° έναντι 0.026°), αλλά αυξημένο καθ' απόλυτη τιμή στη δεύτερη (-0.47° έναντι 0.18°). Η αύξηση οφείλεται στην τριβή της δεύτερης άρθρωσης, η οποία τριβή, ενώ στο προηγούμενο πείραμα (ως στατική) βοηθούσε στο να παραμένει σταθερή η άρθρωση ως ήτο ζητούμενο, σε αυτό το πείραμα αντιτίθεται στην περιστροφή της, προστιθέμενη στη τριβή που οφείλεται στη λειτουργία των ιμάντων. Μόλις δε η περιστροφή σταματήσει, η στατική πλέον τριβή είναι ακόμα μεγαλύτερη, εξ ου και το αυξημένο σφάλμα μόνιμης κατάστασης της δεύτερης άρθρωσης. Εντούτοις, παραμένει σημαντικά μικρότερο της μέσης χάρης των μειωτήρων, συνεπώς κρίνεται αποδεκτό.

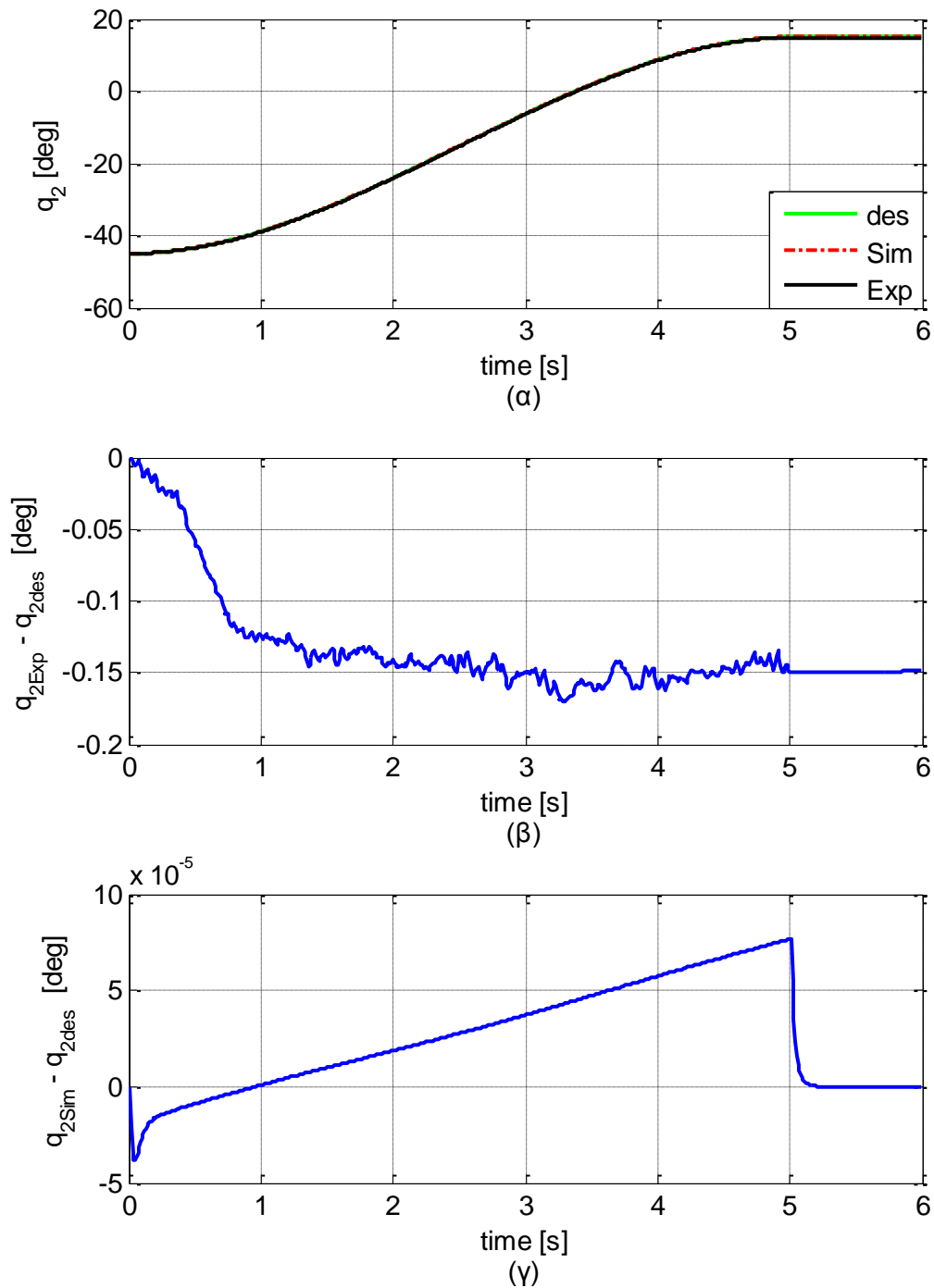
Το αυξημένο σφάλμα της δεύτερης άρθρωσης αντικατοπτρίζεται και στη ζητούμενη ροπή από τον δεύτερο κινητήρα (Σχήμα 6-7-β), η οποία είναι διπλάσια αυτής που ζητήθηκε στο προηγούμενο πείραμα. Αντίθετα, η ζητούμενη ροπή από τον πρώτο κινητήρα είναι σχεδόν μηδενική. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι σε αμφότερες τις ροπές παρουσιάζεται ταλαντωτική συμπεριφορά και μάλιστα αυτή της υψηλότερης συχνότητας (15Hz), πράγμα αναμενόμενο καθώς οι ζητούμενες ροπές των κινητήρων προκύπτουν εκ των γενικευμένων ροπών, για τον υπολογισμό των οποίων χρησιμοποιούνται οι αποκρίσεις και των δύο αρθρώσεων.

6.1.3 Ίση και αντίρροπη στροφή των δύο αρθρώσεων

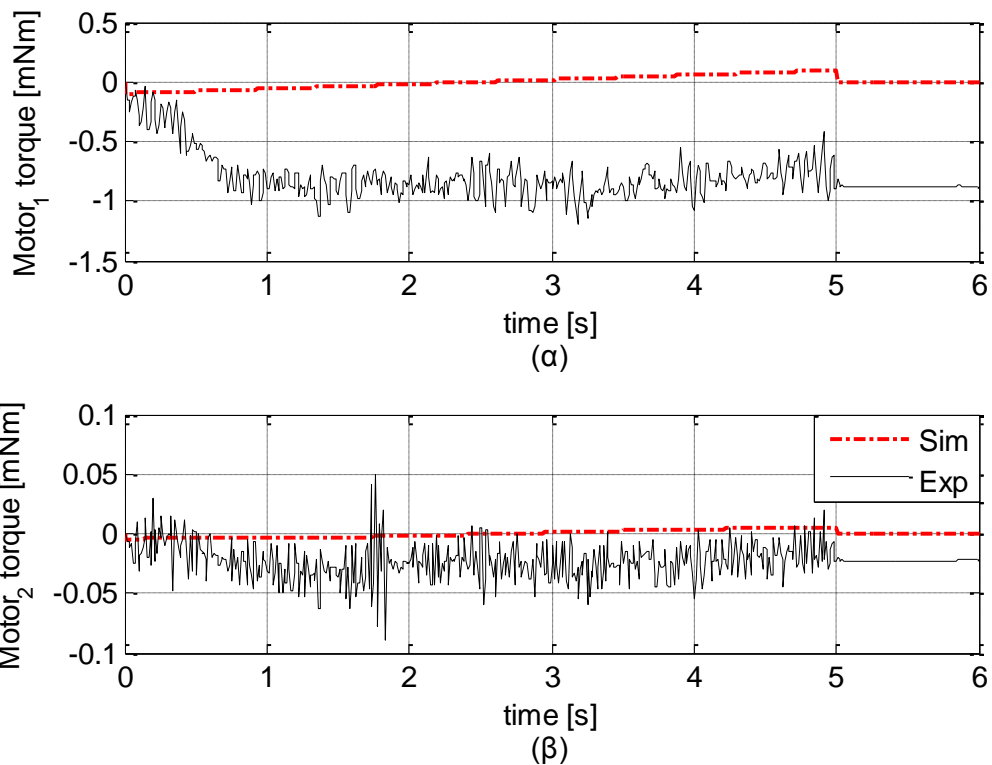
Ο βραχίονας εκκινεί από αρχική κατάσταση αρθρώσεων $q_o = (30^\circ, -45^\circ)$. Δίνεται η εντολή [degtorad(-60);degtorad(60);5;0;0;21], η οποία ζητεί στροφή της πρώτης άρθρωσης κατά -60° και της δεύτερης άρθρωσης κατά 60° . Οι δύο αρθρώσεις θα ακολουθήσουν πολυωνυμικές τροχιές τρίτου βαθμού που ορίζονται στο χώρο των αρθρώσεων, η δε διάρκεια της κίνησης θα είναι 5 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος εν συντομία, καθώς οι παρατηρήσεις που έγιναν στα προηγούμενα εν πολλοίς ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 6-8. Αποτελέσματα για την πρώτη άρθρωση. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση της πρώτης άρθρωσης όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $q_{1Exp} - q_{1des}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $q_{1Sim} - q_{1des}$.



Σχήμα 6-9. Αποτελέσματα για τη δεύτερη άρθρωση. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση της πρώτης άρθρωσης όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $q_{2Exp} - q_{2des}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $q_{2Sim} - q_{2des}$.



Σχήμα 6-10. Αποτελέσματα ζήτησης ροπής των κινητήρων. Στο (α) φαίνεται η ζήτηση ροπής του πρώτου κινητήρα, όπως προέκυψε στην προσομοίωση και στο πείραμα. Ομοίως στο (β), η ζήτηση ροπής του δεύτερου κινητήρα.

Από το Σχήμα 6-8-α και το Σχήμα 6-9-α φαίνεται ότι η επιθυμητή τροχιά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος σχεδόν ταυτίζονται. Από το διάγραμμα (β) των ίδιων σχημάτων διαπιστώνεται ότι τα σφάλματα της πραγματικής απόκρισης της πρώτης και της δεύτερης άρθρωσης είναι μεταξύ τους περίπου ίσα και αντίθετα, πράγμα που οφείλεται στην ίση και αντίρροπη περιστροφή των δύο αρθρώσεων. Πράγματι, από την εξίσωση (6-1) προκύπτει:

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 = \dot{q} &\Rightarrow \dot{\theta}_1 = n \dot{q} \\ \dot{q}_2 = -\dot{q} &\quad \dot{\theta}_2 = 0 \end{aligned} \quad (6-4)$$

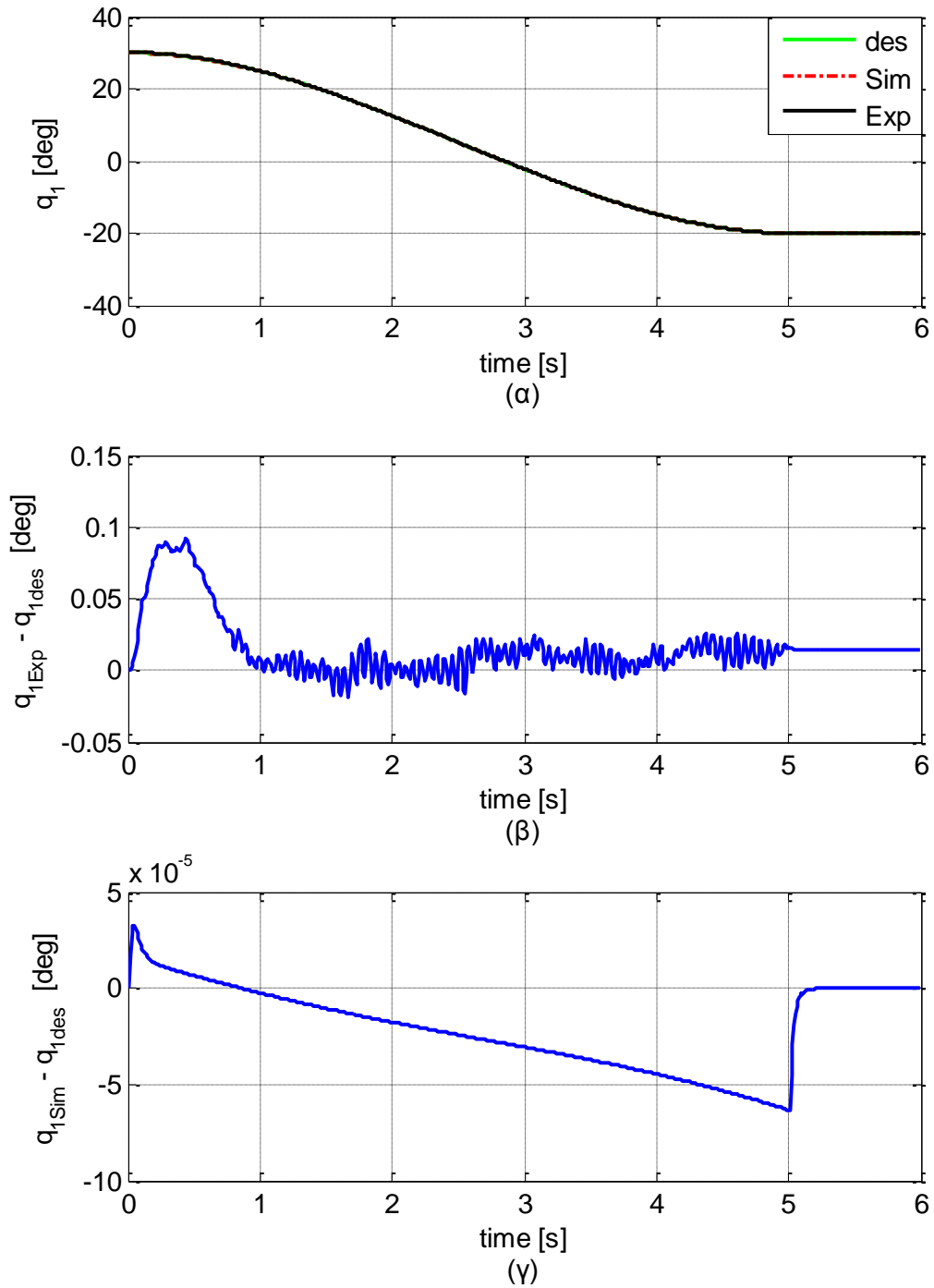
Φαίνεται, δηλαδή, ότι για ίση και αντίρροπη περιστροφή των δύο αρθρώσεων του βραχίονα περιστρέφεται μόνο ο πρώτος κινητήρας ενώ ο δεύτερος παραμένει σταθερός. Επιπλέον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-10-β, από τον δεύτερο κινητήρα απαιτείται σχεδόν μηδενική ροπή για αυτή την κίνηση, καθώς οι στατικές τριβές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του μειωτήρα του και στις εδράσεις του δευτερεύοντος άξονα της πρώτης άρθρωσης (Σχήμα 2-18) βοηθούν στο να παραμένει σταθερός ο άξονάς του. Αντίθετα, οι τριβές που οφείλονται στη κίνηση του ιμάντα που συνδέει τη δεύτερη άρθρωση με τον δευτερεύοντα άξονα και οι τριβές που οφείλονται στη δεύτερη άρθρωση προκαλούν επιπλέον επιβάρυνση στον πρώτο κινητήρα, εξ ου και

η αυξημένη ζήτηση στη ροπή του και το αυξημένο σφάλμα στην απόκριση της πρώτης άρθρωσης, σε σχέση με το πρώτο πείραμα.

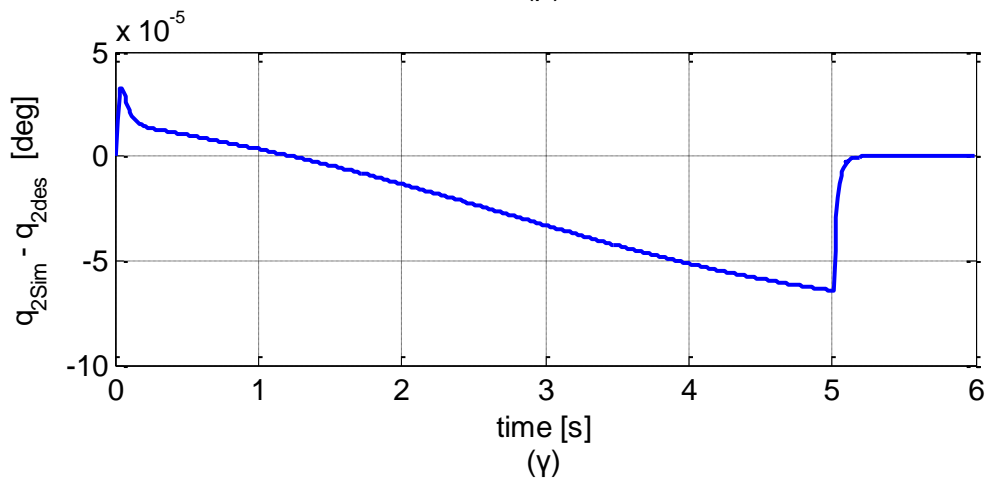
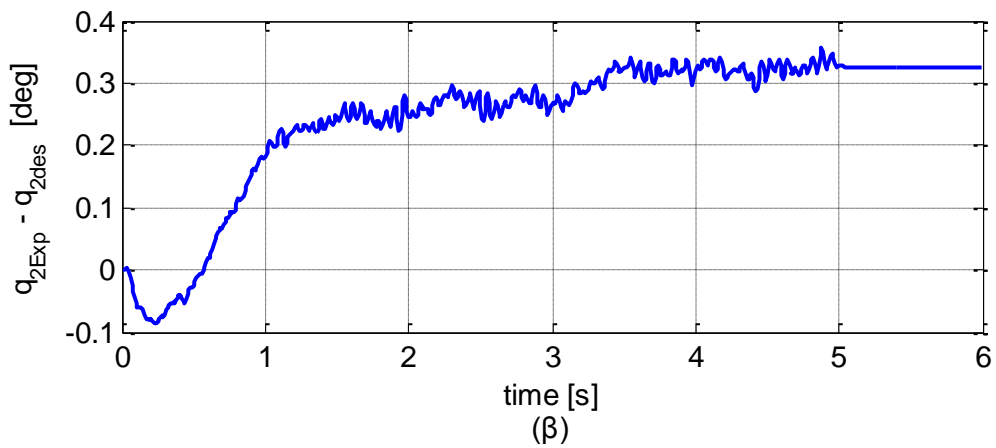
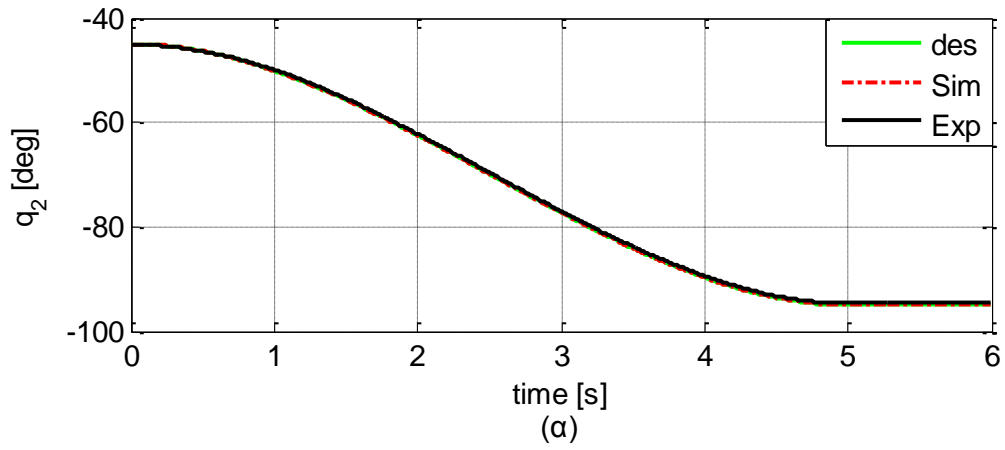
Τα σφάλματα των αποκρίσεων των δύο αρθρώσεων είναι περίπου 0.15° καθ' απόλυτη τιμή και κρίνονται αποδεκτά, καθώς είναι μικρότερα της ακρίβειας του συστήματος που οριοθετείται από τη χάρη των μειωτήρων.

6.1.4 Ίση και ομόροπη στροφή των δύο αρθρώσεων

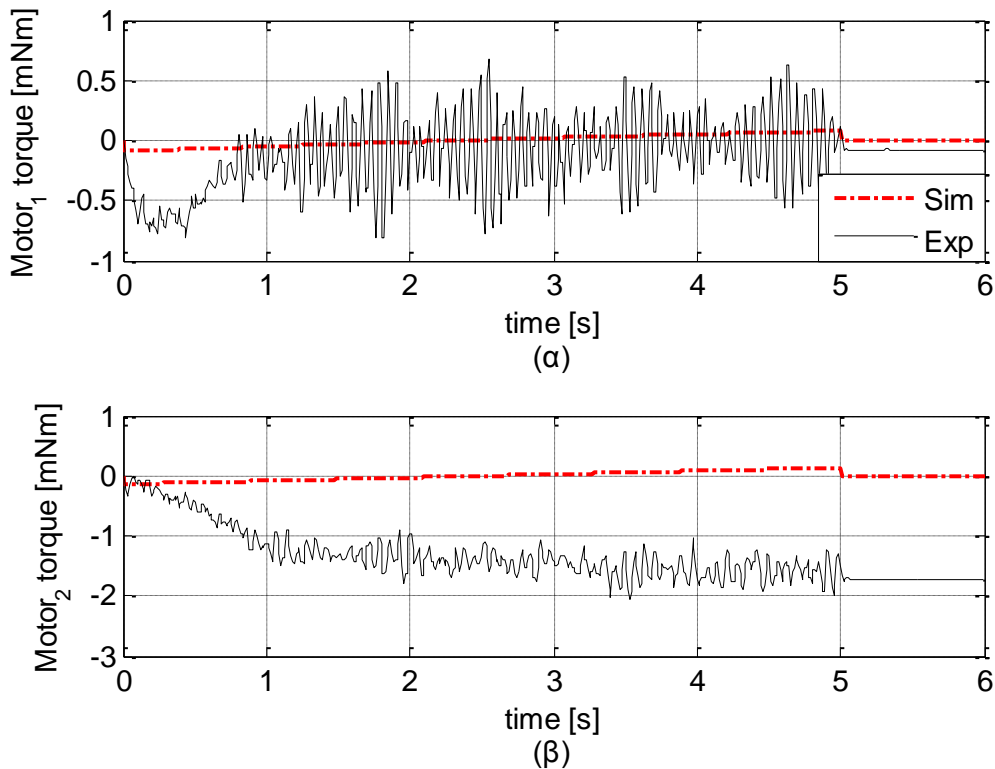
Ο βραχίονας εκκινεί από αρχική κατάσταση αρθρώσεων $q_o = (30^\circ, -45^\circ)$. Δίνεται η εντολή [degtorad(-50);degtorad(-50);5;0;0;21], η οποία ζητεί στροφή της πρώτης και δεύτερης άρθρωσης κατά -50° . Οι δύο αρθρώσεις θα ακολουθήσουν πολυωνυμικές τροχιές τρίτου βαθμού που ορίζονται στο χώρο των αρθρώσεων, η δε διάρκεια της κίνησης θα είναι 5 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος εν συντομία, καθώς οι παρατηρήσεις που έγιναν στα προηγούμενα εν πολλοίς ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 6-11. Αποτελέσματα για την πρώτη άρθρωση. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση της πρώτης άρθρωσης όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $q_{1Exp} - q_{1des}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $q_{1Sim} - q_{1des}$.



Σχήμα 6-12. Αποτελέσματα για τη δεύτερη άρθρωση. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση της πρώτης άρθρωσης όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $q_{2Exp} - q_{2des}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $q_{2Sim} - q_{2des}$.



Σχήμα 6-13. Αποτελέσματα ζήτησης ροπής των κινητήρων. Στο (α) φαίνεται η ζήτηση ροπής του πρώτου κινητήρα, όπως προέκυψε στην προσομοίωση και στο πείραμα. Ομοίως στο (β), η ζήτηση ροπής του δεύτερου κινητήρα.

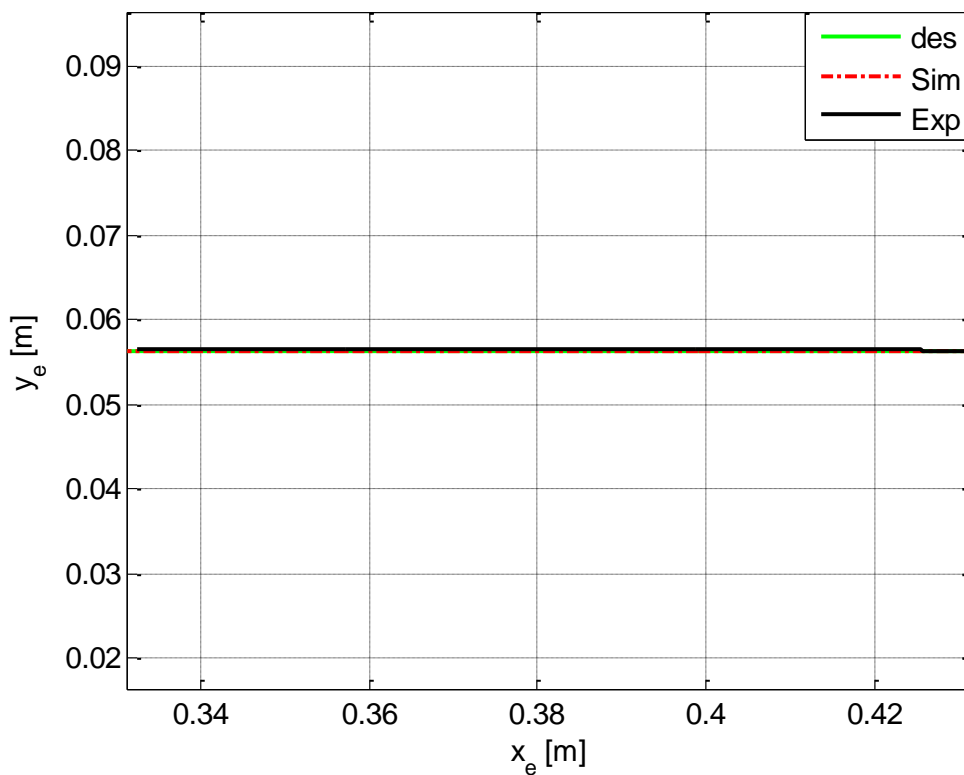
Από το Σχήμα 6-11-α και το Σχήμα 6-12-α φαίνεται ότι η επιθυμητή τροχιά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος σχεδόν ταυτίζονται. Το σφάλμα μόνιμης κατάστασης της πραγματικής απόκρισης της πρώτης άρθρωσης είναι περίπου 0.015° και της δεύτερης άρθρωσης 0.32° – βλέπε διάγραμμα (β) των ίδιων σχημάτων. Η συμπεριφορά των σφαλμάτων είναι παρόμοια αυτής του πρώτου πειράματος, με το σφάλμα της δεύτερης άρθρωσης να αυξάνει αναλόγως της αύξησης της μέσης ταχύτητας περιστροφής του δεύτερου κινητήρα. Συγκεκριμένα, για ίση και ομόρροπη περιστροφή των δύο αρθρώσεων του βραχίονα, η ταχύτητα περιστροφής του δεύτερου κινητήρα είναι διπλάσια αυτής του πρώτου, όπως προκύπτει από της εξίσωση (6-1):

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 = \dot{q} &\Rightarrow \dot{\theta}_1 = n \dot{q} \\ \dot{q}_2 = \dot{q} &\Rightarrow \dot{\theta}_2 = 2n \dot{q} \end{aligned} \quad (6-5)$$

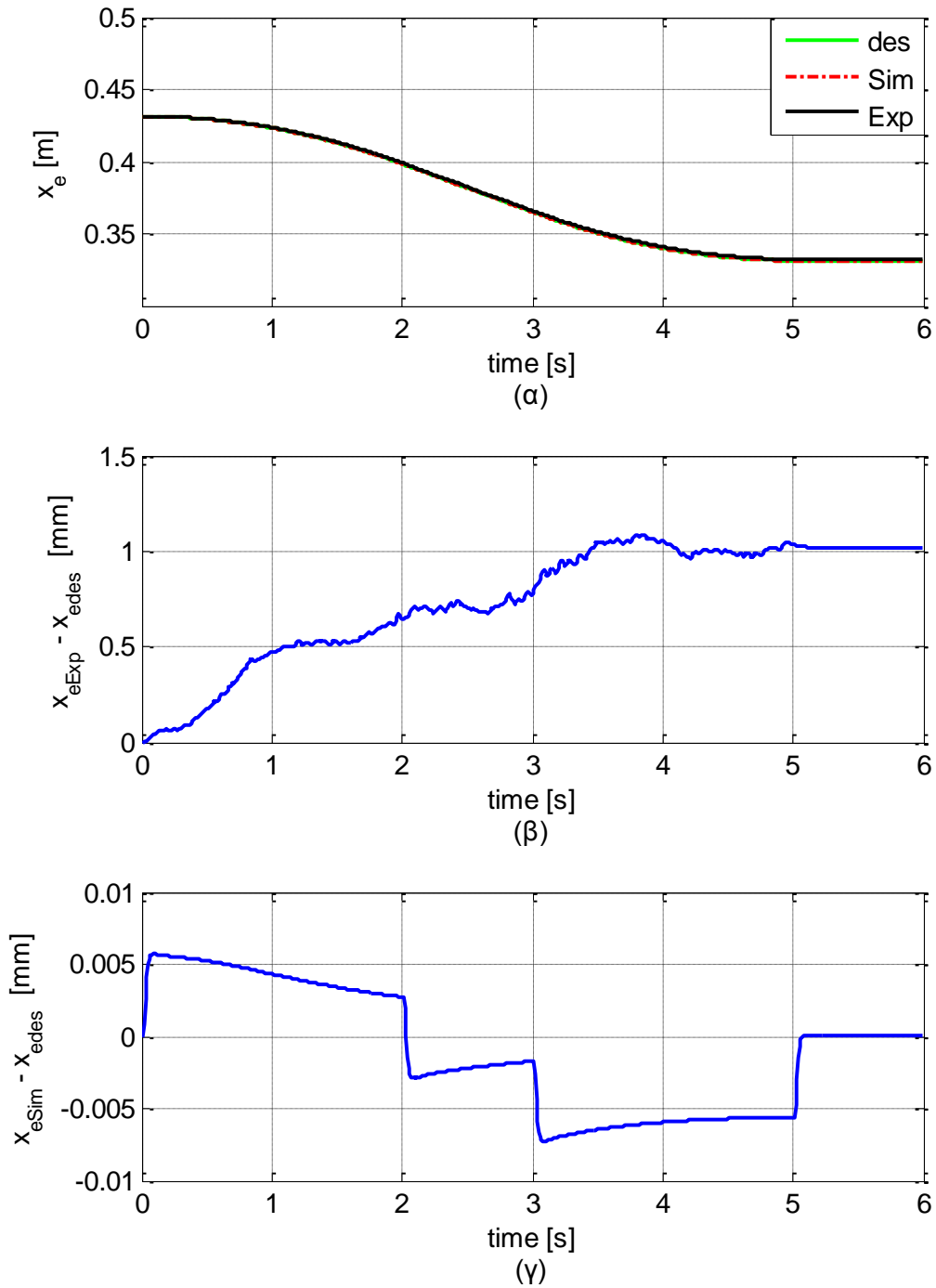
Στο Σχήμα 6-13-β φαίνεται και πάλι ότι ο δεύτερος κινητήρας υφίσταται μεγαλύτερη αντίσταση τριβών από τον πρώτο, όπως έχει εξηγηθεί στα προηγούμενα.

6.1.5 Ευθύγραμμη, οριζόντια κίνηση του τελικού σημείου δράσης

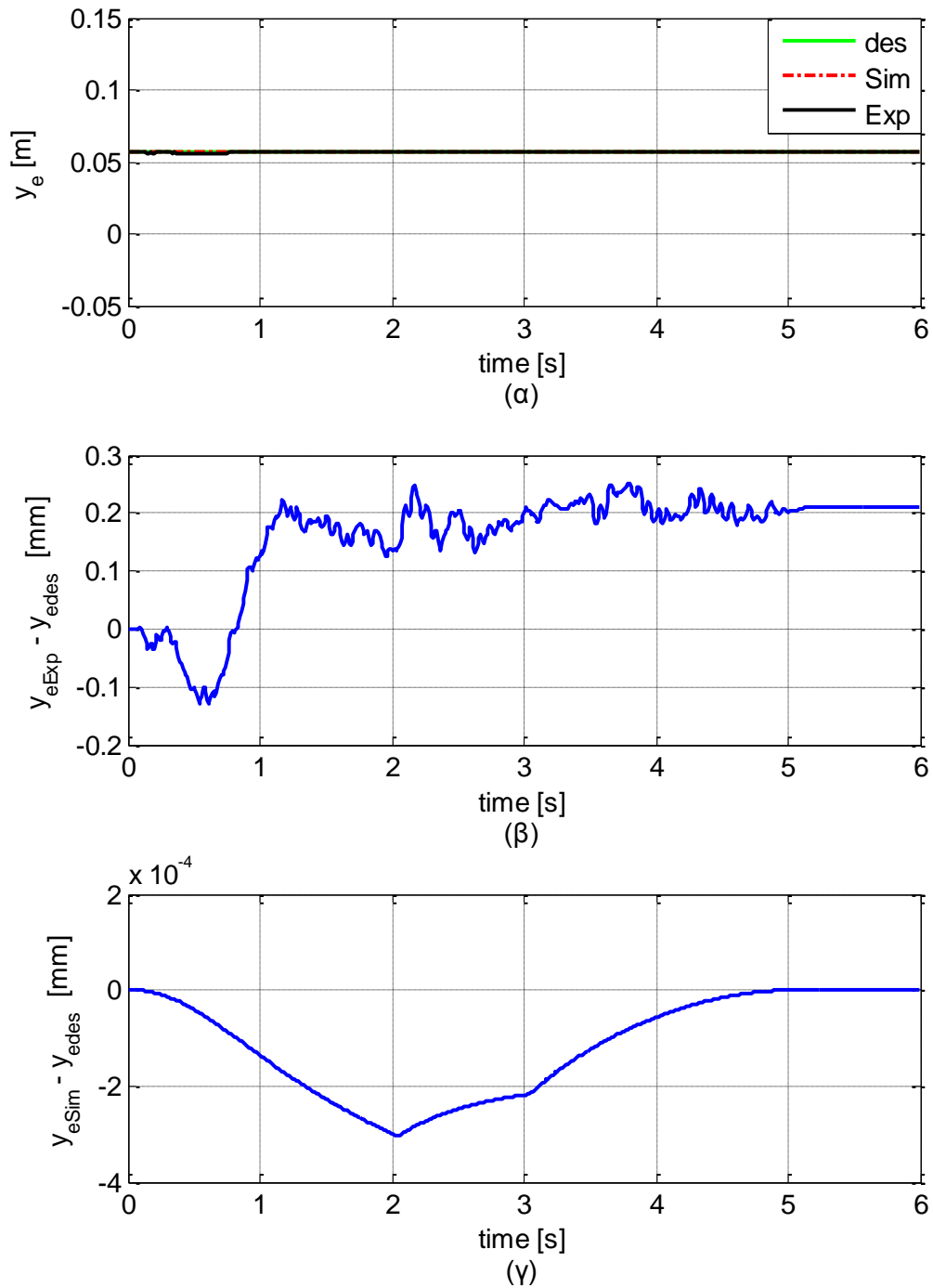
Ο βραχίονας εκκινεί από αρχική κατάσταση αρθρώσεων $q_o = (30^\circ, -45^\circ)$ και θέση του τελικού σημείου δράσης του $X_{eo} = (0.4315m, 0.0563m)$. Το σώμα του ρομπότ θεωρείται σταθερό στη στάση $(x, y, \theta) = (0, 0, 0)$. Δίνεται η εντολή $[-0.1; 0; 5; 2; 1; 11]$, η οποία ζητεί κίνηση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα κατά των άξονα των X (δηλαδή οριζόντια) σε ευθύγραμμη πορεία μήκους 10cm που ορίζεται σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 4.3.3. Η διάρκεια της κίνησης θα είναι 5 δευτερόλεπτα, με ίσα διαστήματα σταθερής επιτάχυνσης και επιβράδυνσης διάρκειας 2 δευτερολέπτων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος.



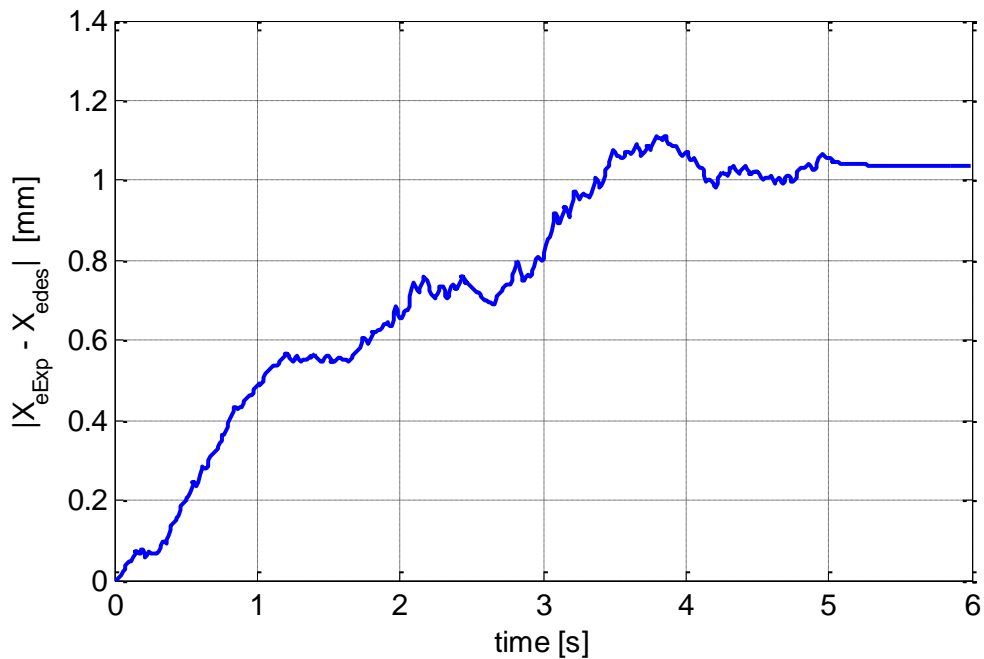
Σχήμα 6-14. Αποτελέσματα για τη θέση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα στο Καρτεσιανό επίπεδο (x_e, y_e) . Η καμπύλη της επιθυμητής πορείας (des) και οι καμπύλες των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης (Sim) και του πειράματος (Exp) σχεδόν ταυτίζονται, γι' αυτό φαίνονται ως μία.



Σχήμα 6-15. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα x_e της θέσης του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $x_{eExp} - x_{edes}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $x_{eSim} - x_{edes}$.



Σχήμα 6-16. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα y_e της θέσης του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $y_{eExp} - y_{edes}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $y_{eSim} - y_{edes}$.



Σχήμα 6-17. Το μέτρο του σφάλματος θέσης του τελικού σημείου δράσης στο Καρτεσιανό επίπεδο.

Από το Σχήμα 6-14, το Σχήμα 6-15-α και το Σχήμα 6-16-α φαίνεται ότι η κίνηση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα, τόσο στην προσομοίωση όσο και στο πείραμα, σχεδόν ταυτίζεται με την επιθυμητή. Συγκεκριμένα, από το Σχήμα 6-15-β και το Σχήμα 6-16-β διαπιστώνεται ότι η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων του πειράματος και της επιθυμητής τροχιάς είναι περίπου 1mm για τη συνιστώσα x_e και 0.2mm για την y_e . Το διάγραμμα (γ) των ίδιων σχημάτων δείχνει ότι το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους μικρότερο της προαναφερθείσης απόκλισης. Το Σχήμα 6-17 δείχνει ότι η μέγιστη τιμή του μέτρου του σφάλματος θέσης του τελικού σημείου δράσης στο Καρτεσιανό επίπεδο είναι περίπου 1.1mm.

Τα σφάλματα στα αποτελέσματα των πειραμάτων είναι σαφώς μεγαλύτερα αυτών που προβλέπει η προσομοίωση, διότι στο μοντέλο προσομοίωσης υποτίθεται άριστη γνώση των παραμέτρων του συστήματος και επίσης δεν έχουν συμπεριληφθεί οι τριβές, όπως αναλύεται εκτενώς στα προηγούμενα. Εντούτοις, η ακρίβεια παρακολούθησης τροχιάς από το τελικό σημείο δράσης του βραχίονα που επιτυγχάνεται κρίνεται ικανοποιητική, καθώς είναι καλύτερη της ακρίβειας γνώσης της θέσης του εν κινήσει ρομπότ, η οποία δίνεται από το σύστημα της κάμερας με ακρίβεια περίπου 2mm.

Ωστόσο, επισημαίνεται ότι υπάρχουν μεγάλα περιθώρια βελτίωσης της ακρίβειας τόσο του βραχίονα⁹² όσο και του συστήματος παρακολούθησης της στάσης του ρομπότ επί της τραπέζης⁹³. Επίσης, επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται προκύπτουν με αναγωγή της απόκρισης των αρθρώσεων⁹⁴ στο τελικό σημείο δράσης του βραχίονα – εξ ου και η παρατηρούμενη ταλαντωτική συμπεριφορά, σε συμφωνία με αυτή των αρθρώσεων που αναλύθηκε στα προηγούμενα. Συνεπώς, το πραγματικό σφάλμα είναι μεγαλύτερο του μετρήσιμου λόγω της χάρης των μειωτήρων, η οποία δε γίνεται να αντιμετωπιστεί με έλεγχο στο πεδίο των αρθρώσεων. Για αυτό το λόγο εξετάζεται η μελλοντική τοποθέτηση LED επί του τελικού σημείου δράσης, ώστε να γίνεται γνωστή η θέση του μέσω της κάμερας και να δοκιμαστεί έλεγχος στο Καρτεσιανό πεδίο.

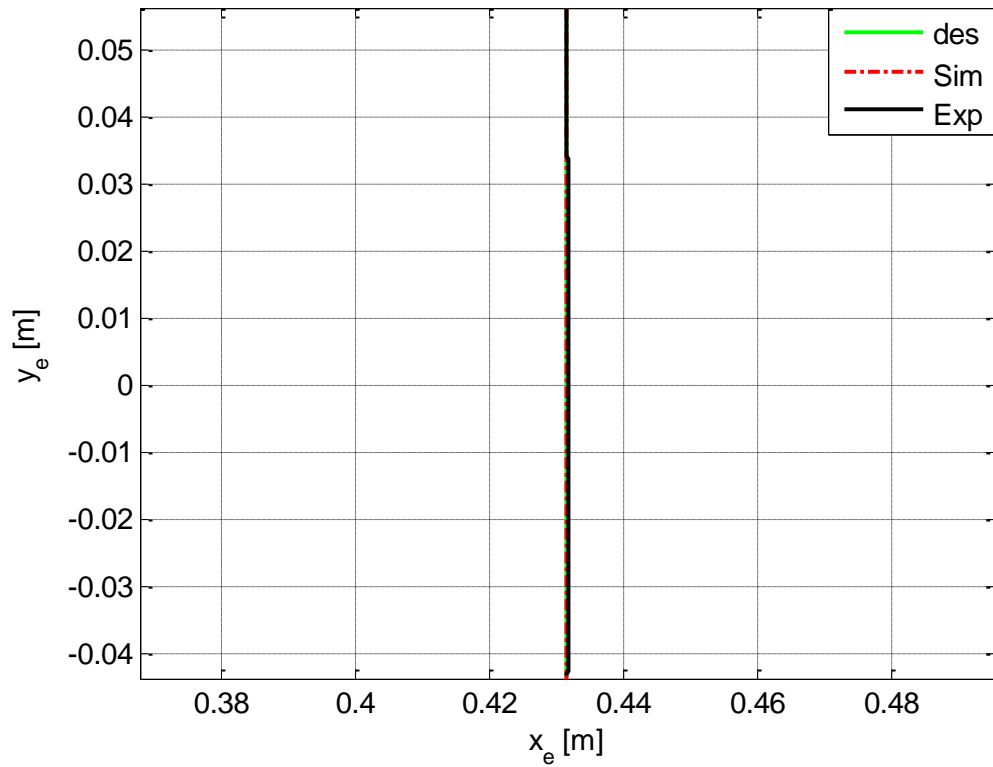
6.1.6 Ευθύγραμμη, κάθετη κίνηση του τελικού σημείου δράσης

Ο βραχίονας εκκινεί από αρχική κατάσταση αρθρώσεων $q_o = (30^\circ, -45^\circ)$ και θέση του τελικού σημείου δράσης του $X_{eo} = (0.4315m, 0.0563m)$. Το σώμα του ρομπότ θεωρείται σταθερό στη στάση $(x, y, \theta) = (0, 0, 0)$. Δίνεται η εντολή $[0; -0.1; 5; 2; 1; 11]$, η οποία ζητεί κίνηση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα κατά των άξονα των Y (δηλαδή κάθετα) σε ευθύγραμμη πορεία μήκους 10cm. Η διάρκεια της κίνησης θα είναι 5 δευτερόλεπτα, με ίσα διαστήματα σταθερής επιτάχυνσης και επιβράδυνσης διάρκειας 2 δευτερολέπτων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος.

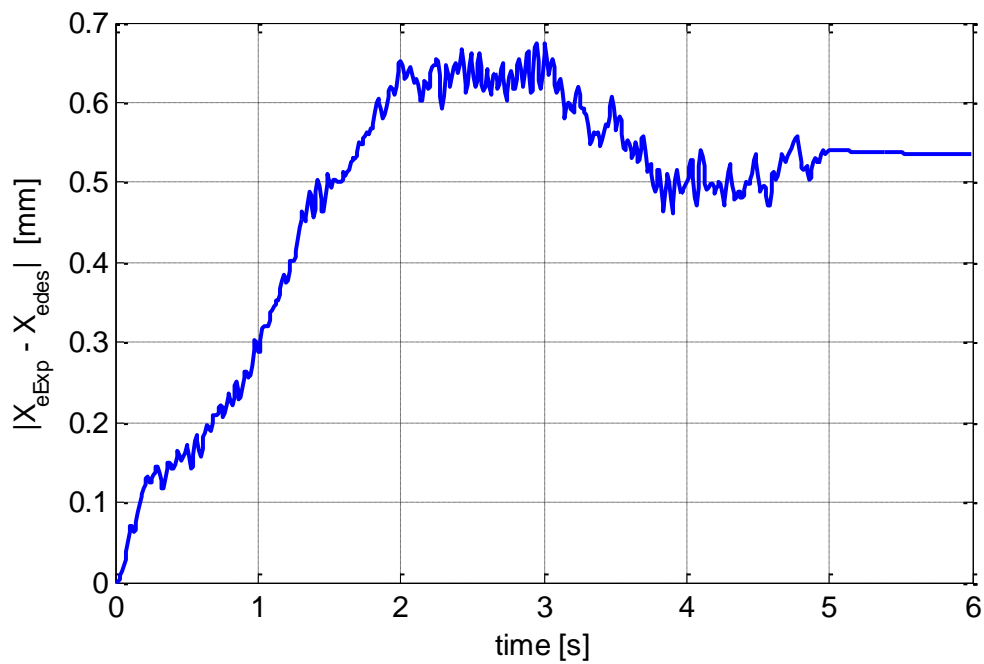
⁹² Με αύξηση της συχνότητας του ελέγχου, βλέπε Κεφάλαιο 5.3.5.

⁹³ Με παράλληλη χρήση του συστήματος της κάμερας και του συστήματος οπτικών αισθητήρων. Κατά την εκτέλεση αυτών των πειραμάτων το δεύτερο σύστημα δε χρησιμοποιήθηκε διότι εκκρεμούσε η κατασκευή της νέας βάσης στήριξης για τους οπτικούς αισθητήρες.

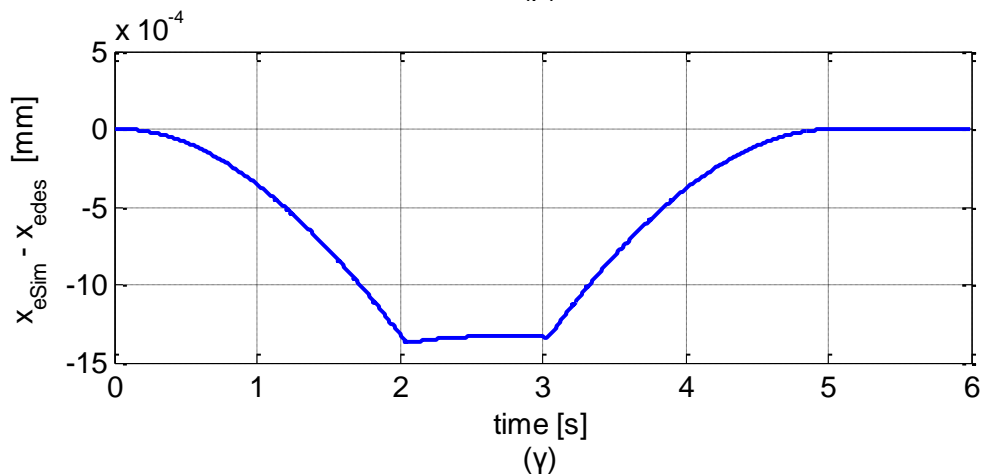
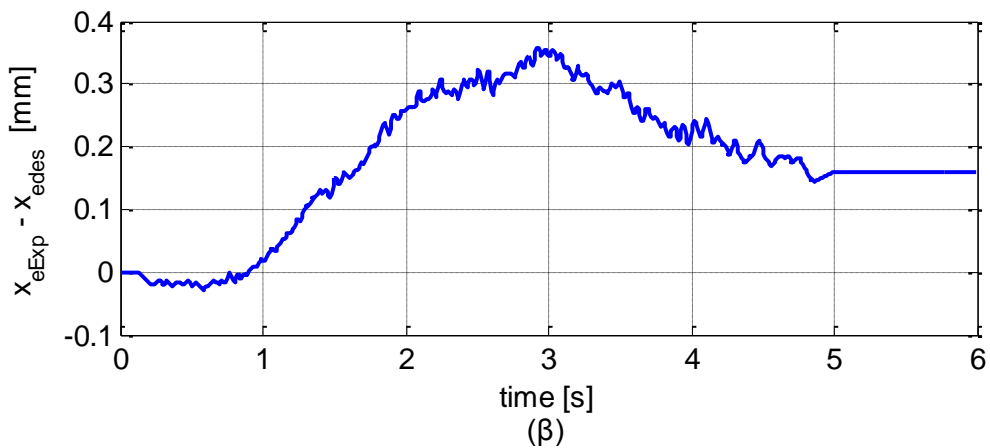
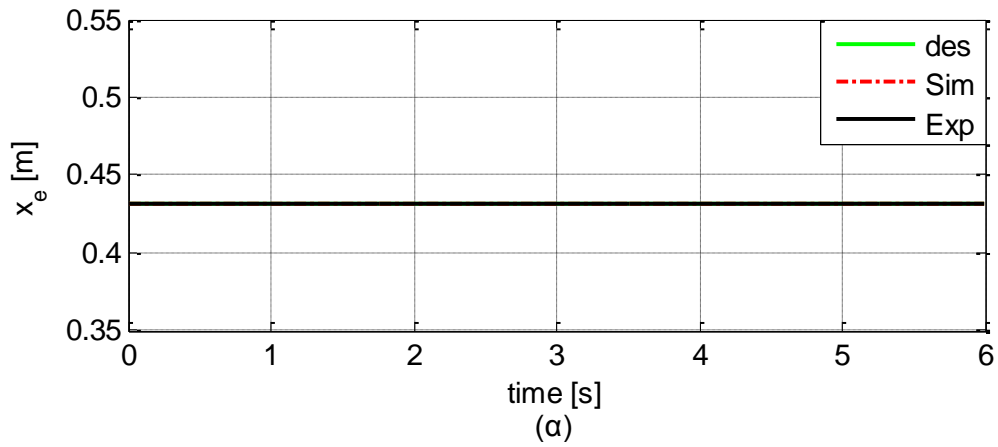
⁹⁴ Η απόκριση των αρθρώσεων γίνεται γνωστή μέσω των incremental encoder.



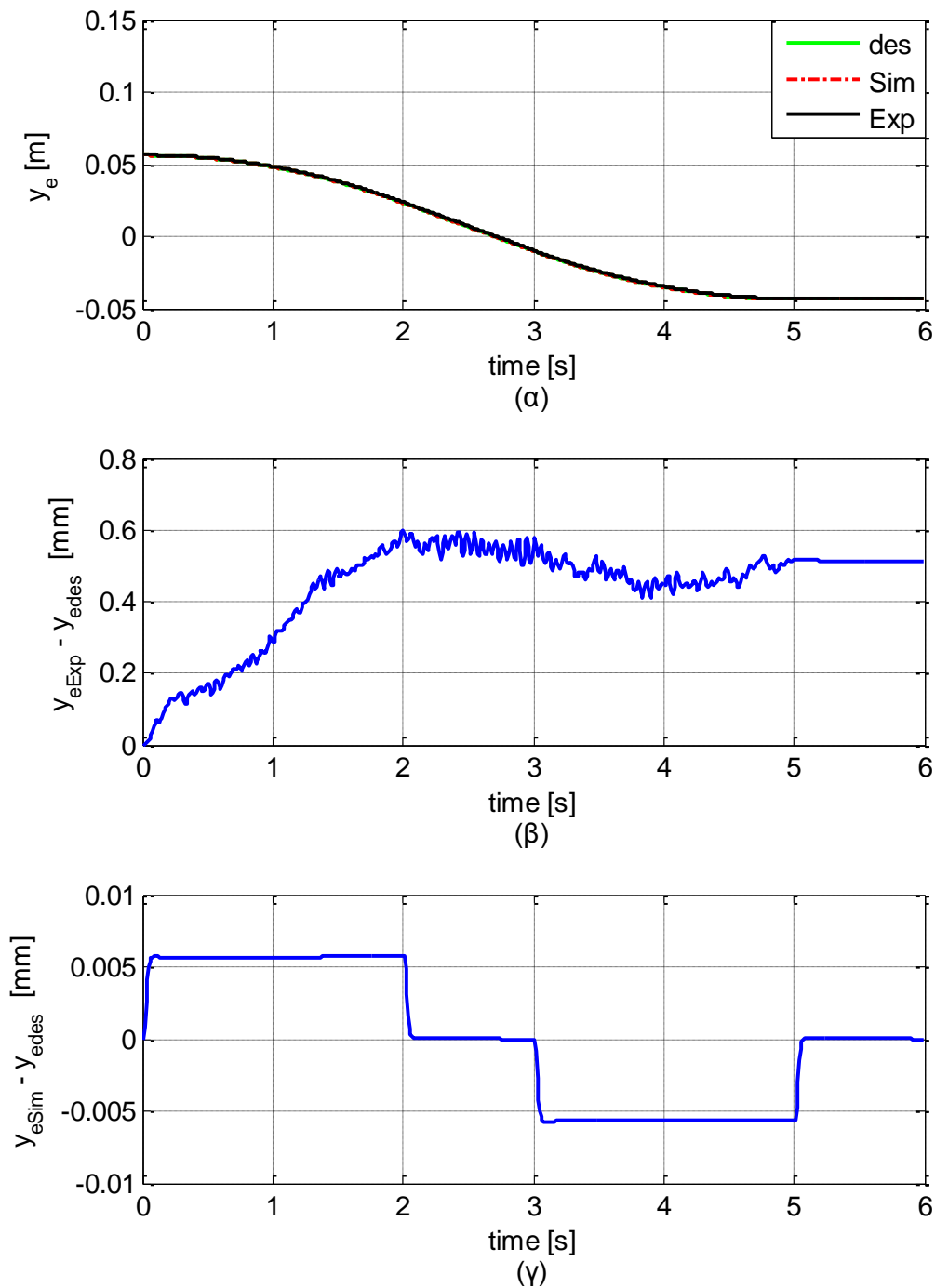
Σχήμα 6-18. Αποτελέσματα για τη θέση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα στο Καρτεσιανό επίπεδο (x_e, y_e) .



Σχήμα 6-19. Το μέτρο του σφάλματος θέσης του τελικού σημείου δράσης στο Καρτεσιανό επίπεδο.



Σχήμα 6-20. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα x_e της θέσης του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $x_{eExp} - x_{edes}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $x_{eSim} - x_{edes}$.



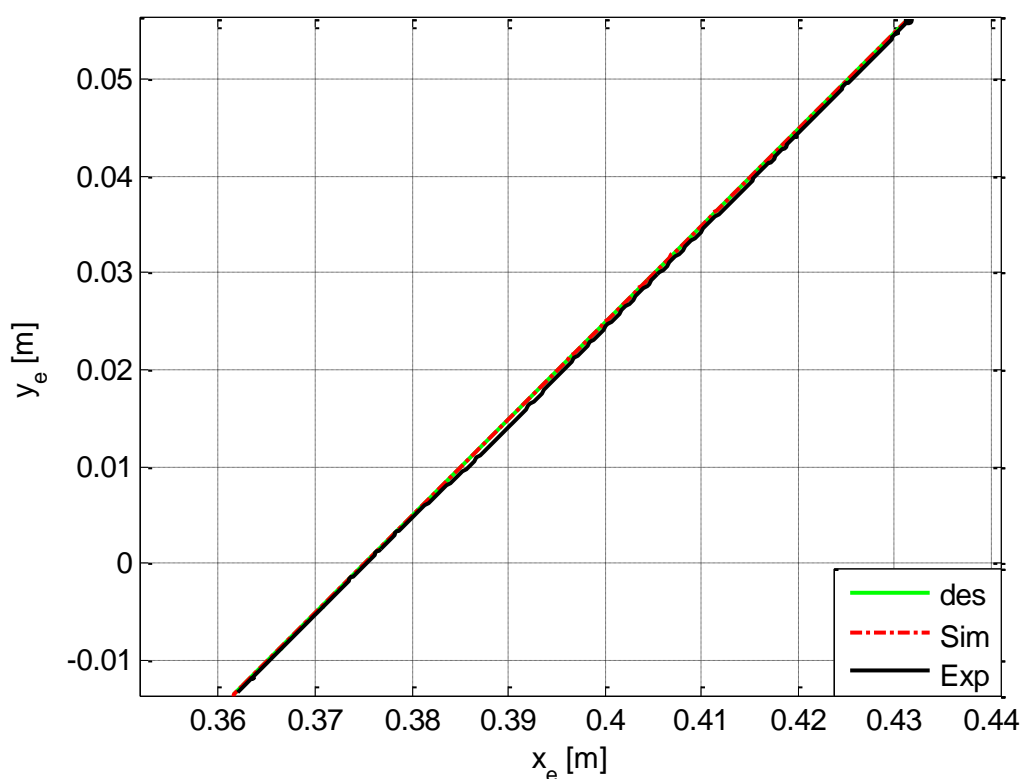
Σχήμα 6-21. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα y_e της θέσης του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $y_{eExp} - y_{edes}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $y_{eSim} - y_{edes}$.

Από το Σχήμα 6-18, το Σχήμα 6-20-α και το Σχήμα 6-21-α φαίνεται ότι η κίνηση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα, τόσο στην προσομοίωση όσο και στο πείραμα, σχεδόν ταυτίζεται με την επιθυμητή. Από το Σχήμα 6-20-β και το Σχήμα 6-21-β προκύπτει ότι το μέγιστο σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος είναι περίπου 0.36mm για τη συνιστώσα x_e και 0.60mm για την y_e . Από το Σχήμα 6-19

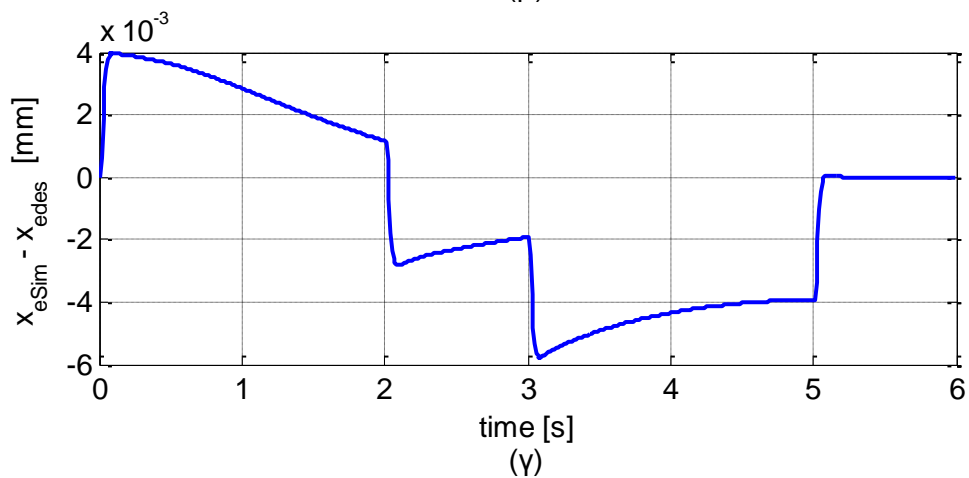
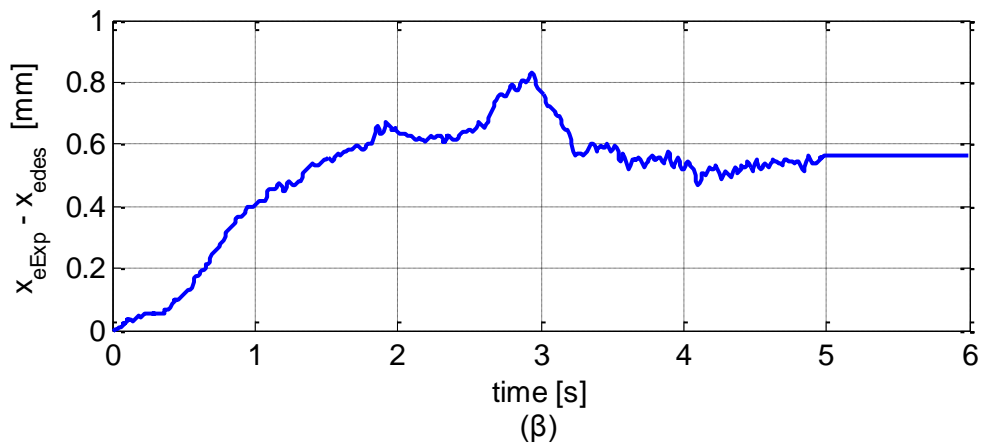
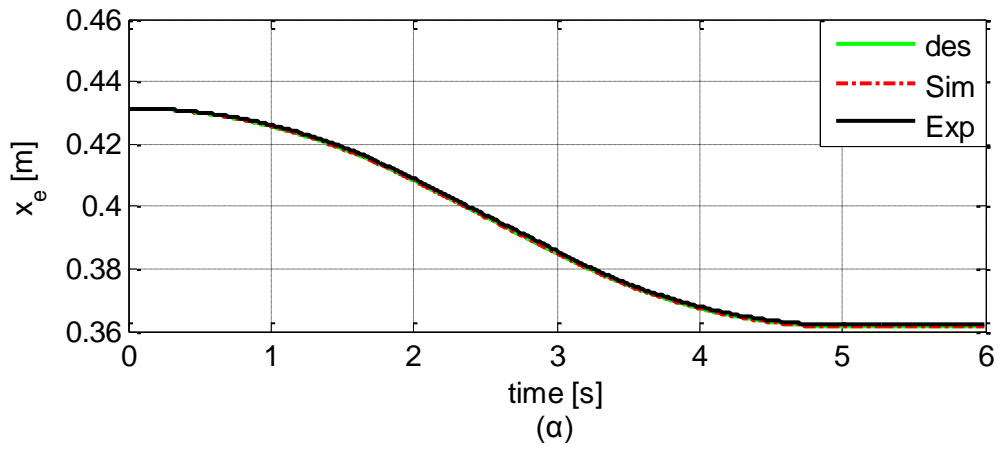
φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του μέτρου του σφάλματος θέσης του τελικού σημείου δράσης στο Καρτεσιανό επίπεδο είναι περίπου 0.65mm. Το σφάλμα της προσομοίωσης είναι αμελητέο. Η ακρίβεια παρακολούθησης της τροχιάς από το τελικό σημείο δράσης του βραχίονα κρίνεται και σε αυτή την περίπτωση ικανοποιητική, καθώς είναι καλύτερη της ακρίβειας γνώσης της θέσης του εν κινήσει ρομπότ. Γενικά ισχύουν οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν προηγουμένως.

6.1.7 Ευθύγραμμη, διαγώνια κίνηση του τελικού σημείου δράσης

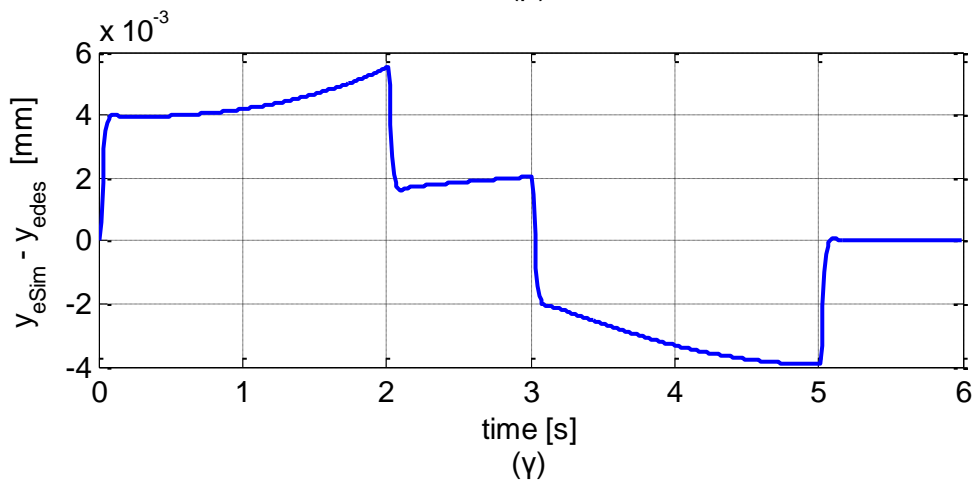
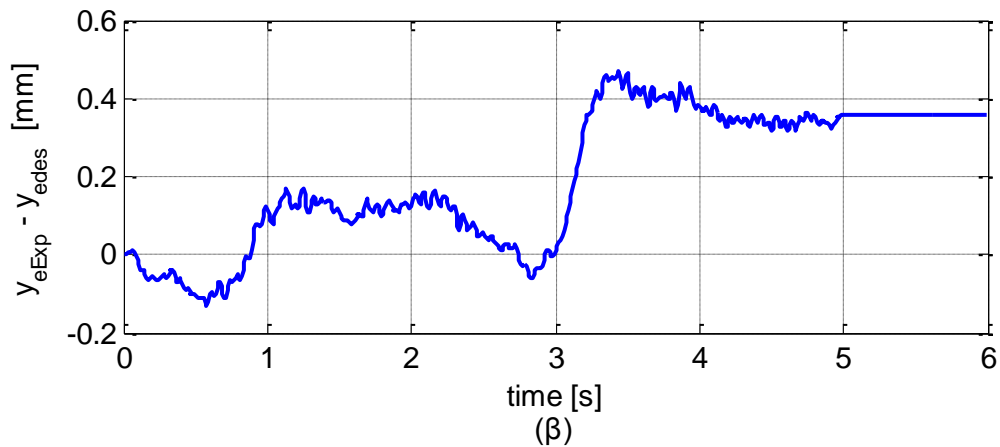
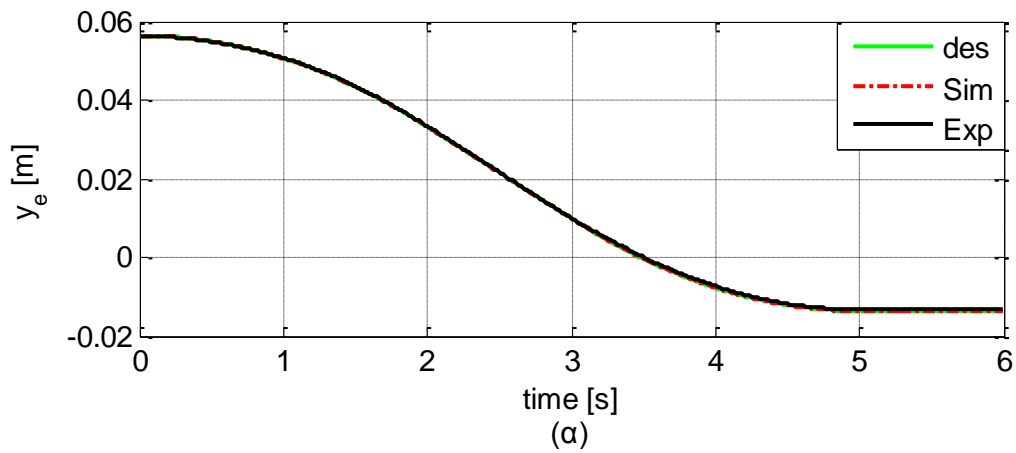
Ο βραχίονας εκκινεί από αρχική κατάσταση αρθρώσεων $q_o = (30^\circ, -45^\circ)$ και θέση του τελικού σημείου δράσης του $X_{eo} = (0.4315m, 0.0563m)$. Το σώμα του ρομπότ θεωρείται σταθερό στη στάση $(x, y, \theta) = (0, 0, 0)$. Δίνεται η εντολή [-0.07; -0.07; 5; 2; 1; 11], η οποία ζητεί διαγώνια κίνηση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα σε ευθύγραμμη πορεία μήκους 10cm. Η διάρκεια της κίνησης θα είναι 5 δευτερόλεπτα, με ίσα διαστήματα σταθερής επιτάχυνσης και επιβράδυνσης διάρκειας 2 δευτερολέπτων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του πειράματος.



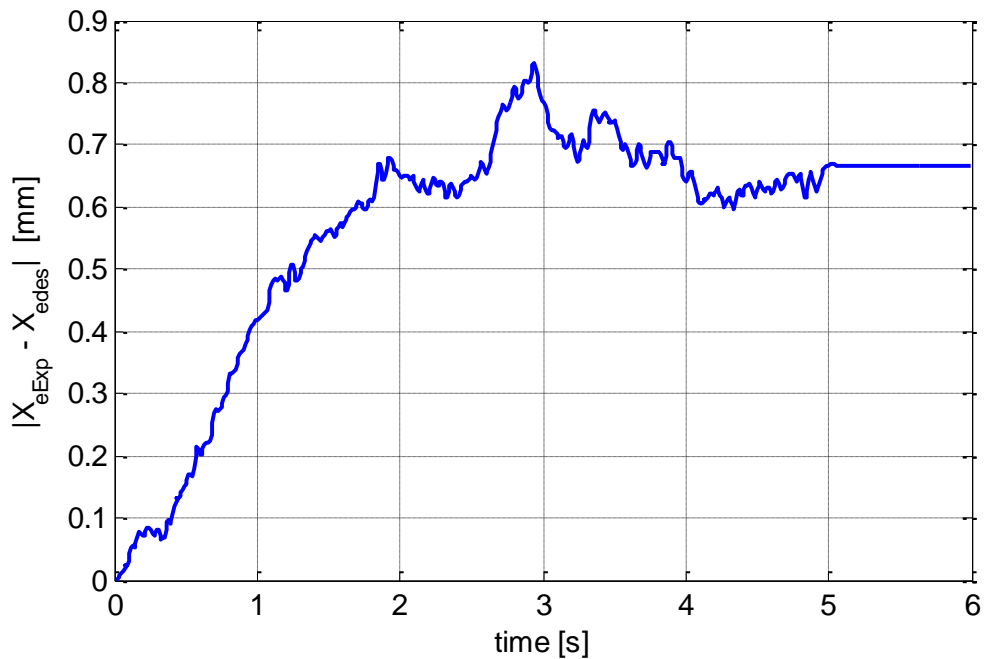
Σχήμα 6-22. Αποτελέσματα για τη θέση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα στο Καρτεσιανό επίπεδο (x_e, y_e) .



Σχήμα 6-23. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα x_e της θέσης του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $x_{eExp} - x_{edes}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $x_{eSim} - x_{edes}$.



Σχήμα 6-24. Αποτελέσματα για τη συνιστώσα y_e της θέσης του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά (des) και η απόκριση όπως προέκυψε από την προσομοίωση (Sim) και το πείραμα (Exp). Στο (β) το σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος, $y_{eExp} - y_{edes}$. Στο (γ) το σφάλμα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, $y_{eSim} - y_{edes}$.



Σχήμα 6-25. Το μέτρο του σφάλματος θέσης του τελικού σημείου δράσης στο Καρτεσιανό επίπεδο.

Από το Σχήμα 6-22 το Σχήμα 6-23-α και το Σχήμα 6-24-α φαίνεται ότι η κίνηση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα, τόσο στην προσομοίωση όσο και στο πείραμα, σχεδόν ταυτίζεται με την επιθυμητή. Από το Σχήμα 6-23-β και το Σχήμα 6-24-β προκύπτει ότι το μέγιστο σφάλμα των αποτελεσμάτων του πειράματος είναι περίπου 0.82mm για τη συνιστώσα x_e και 0.47mm για την y_e . Από το Σχήμα 6-25 φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του μέτρου του σφάλματος θέσης του τελικού σημείου δράσης στο Καρτεσιανό επίπεδο είναι περίπου 0.8mm. Το σφάλμα της προσομοίωσης είναι αμελητέο. Η ακρίβεια παρακολούθησης της τροχιάς από το τελικό σημείο δράσης του βραχίονα κρίνεται και σε αυτή την περίπτωση ικανοποιητική, καθώς είναι καλύτερη της ακρίβειας γνώσης της θέσης του εν κινήσει ρομπότ. Γενικά ισχύουν οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν προηγουμένως.

6.2 Έλεγχος ενός βραχίονα με το σώμα του ρομπότ σε κίνηση

Στο πείραμα που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο δοκιμάστηκε ο έλεγχος του βραχίονα ώστε το τελικό σημείο δράσης του να παραμένει ακλόνητο στο Καρτεσιανό επίπεδο, καθώς το σώμα του ρομπότ κινείται. Στη συνέχεια αναλύονται οι περιορισμοί που διαμόρφωσαν τη μέθοδο διεξαγωγής του πειράματος και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

6.2.1 Μέθοδος διεξαγωγής του πειράματος και περιορισμοί

Κατά τη περίοδο διεξαγωγής του πειράματος και συγγραφής του παρόντος δεν είχαν ολοκληρωθεί οι εργασίες υλοποίησης του ηλεκτρικού/ηλεκτρονικού υποσυστήματος του ρομπότ – συγκεκριμένα δεν ήταν έτοιμες οι πλακέτες διασύνδεσης των ηλεκτρονικών των βραχιόνων⁹⁵ – με συνέπεια να μην είναι εφικτή η απαλλαγμένη (ισχυρών) εξωτερικών διαταραχών⁹⁶ αυτόνομη κίνηση του ρομπότ σε διαμόρφωση με βραχίονα. Για αυτό το λόγο και χάριν απλότητας η κίνηση του σώματος του ρομπότ επιβλήθηκε από εξωτερικές δυνάμεις⁹⁷, χωρίς να χρησιμοποιηθούν οι επενεργητές του.

Επιπλέον εκκρεμούσε η κατασκευή της νέας βάσης στήριξης για τους οπτικούς αισθητήρες, επομένως η στάση του ρομπότ γινόταν γνωστή μόνο μέσω του συστήματος της κάμερας. Το εν λόγω σύστημα σε ενσύρματη⁹⁸ σύνδεση με το ρομπότ λειτουργεί περίπου στα 17.2Hz, συχνότητα που θεωρητικά αρκεί για την παρακολούθηση αργών κινήσεων. Εντούτοις, με δοκιμές διαπιστώθηκε ότι ο έλεγχος σε τόσο χαμηλή συχνότητα οδηγεί σε αρκετά μεγάλα σφάλματα⁹⁹ τόσο μεταβατικής όσο και μόνιμης κατάστασης, ακόμα και για αργές κινήσεις, γεγονός που εξηγείται ως εξής: Μειούμενης της συχνότητας του ελέγχου – ισοδύναμα, αυξανόμενης της περιόδου – αυξάνεται η τιμή του χρόνου αποκατάστασης για απόκριση επιθυμητών χαρακτηριστικών και ομαλή παρακολούθηση τροχιάς. Αυτό, σύμφωνα με την εξίσωση (4-8), συνεπάγεται τη μείωση των κερδών ελέγχου, η οποία οδηγεί στην αύξηση των σφαλμάτων για υπερνίκηση των τριβών που αναπτύσσονται και δεν έχουν μοντελοποιηθεί· εάν χρησιμοποιείτο ακριβές μοντέλο τριβής, ο βασισμένος στο μοντέλο έλεγχος που εφαρμόζεται δε θα οδηγούσε σε αυξημένα σφάλματα.

Η λύση που εφαρμόστηκε βασίζεται στην αύξηση της συχνότητας του ελέγχου στη μέγιστη δυνατή τιμή,¹⁰⁰ διά της «τεχνητής» αύξησης της συχνότητας τροφοδοσίας του με δεδομένα θέσης και προσανατολισμού του ρομπότ από την κάμερα.

⁹⁵ Οι πλακέτες υλοποιούν τη σύνδεση των servo drive και των incremental encoder των κινητήρων με το PC/104 και τη τροφοδοσία. Μεταξύ των incremental encoder και του PC/104 παρεμβάλλονται line receiver.

⁹⁶ Οι ισχυρές εξωτερικές διαταραχές οφείλονται στα καλώδια σύνδεσης της τροφοδοσίας και του breadboard με τα ηλεκτρονικά. Εξαιτίας τους δεν ήταν εφικτή η διεξαγωγή αξιόπιστων πειραμάτων επαλήθευσης του δυναμικού μοντέλου του ρομπότ.

⁹⁷ Δια χειρός μετακίνηση του ρομπότ.

⁹⁸ Χρησιμοποιήθηκε ενσύρματη σύνδεση διότι προσφέρει μεγαλύτερη συχνότητα από την ασύρματη (4-5Hz). Εξάλλου εξωτερικά καλώδια ούτως ή άλλως υφίστανται σε αυτό το πείραμα.

⁹⁹ Της τάξεως των 20mm για τη θέση του τελικού σημείου δράσης στο Καρτεσιανό επίπεδο.

¹⁰⁰ 50Hz, βλέπε Κεφάλαιο 5.3.5

Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε το μπλοκ “xyth Interpolation”, το οποίο συνδέεται στην έξοδο του μπλοκ “Camera Receive” του υποσυστήματος “Sensors' Feedback” (Κεφάλαιο 5.3.7 και Σχήμα 6-26) και δημιουργεί επιπλέον «σημεία» μεταξύ των διανυσμάτων $(x, y, \theta)_k$ και $(x, y, \theta)_{k-1}$,¹⁰¹ εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή (Σχήμα 6-27) – ομοίως και για τα αντίστοιχα διανύσματα της ταχύτητας. Η έξοδος του μπλοκ “xyth Interpolation” μεταβάλλεται με ταχύτερο ρυθμό και ομαλότερα αυτής του “Camera Receive”, όμως διπλασιάζει τη χρονική υστέρηση του συστήματος.¹⁰² Για αρκετά αργές κινήσεις αυτή η χρονική υστέρηση δε δημιουργεί αστάθεια, το δε σφάλμα θέσης λόγω χρονικής υστέρησης παραμένει μικρότερο των 2mm, δηλαδή της ακρίβειας του συστήματος της κάμερας, για ταχύτητες κίνησης μέχρι 17mm/s.

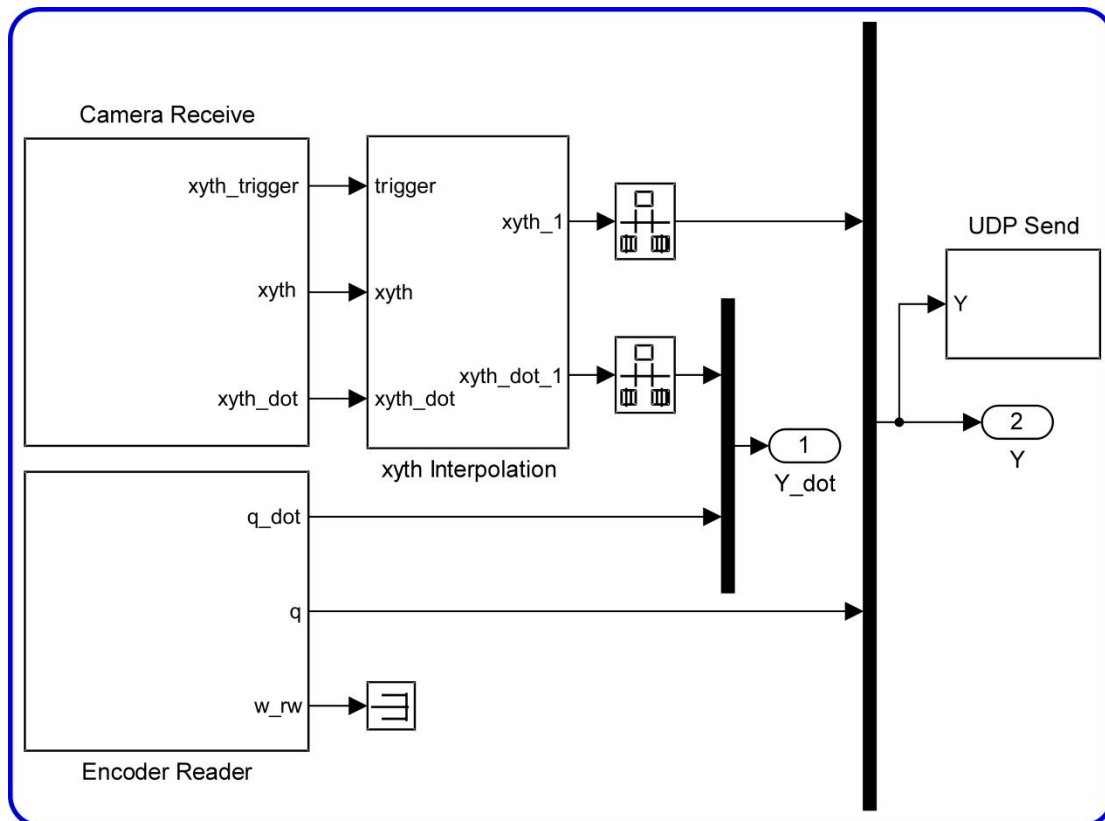
Επισημαίνεται ότι το σύστημα της κάμερας προσφέρει καλύτερη ακρίβεια όταν το σώμα του ρομπότ δε βρίσκεται σε κίνηση, ωστόσο οι μικρού εύρους διακυμάνσεις στα δεδομένα της πραγματικά σταθερής θέσης του ρομπότ μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση ταλαντωτικής συμπεριφοράς στον βραχίονα. Για την αντιμετώπιση αυτού εφαρμόστηκε φίλτρο deadband [27] στα σφάλματα των αρθρώσεων που εισάγονται στο νόμο ελέγχου, με κεντρική τιμή το μηδέν¹⁰³ και εύρος αποκοπής 0.5°.

Τελικά, για συχνότητα ελέγχου 50Hz επιλέχθηκε χρόνος αποκατάστασης 0.4s και προέκυψαν τα κέρδη ελέγχου σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 4.1. Οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος για αυτό το πείραμα φαίνονται στο Παράρτημα Δ.

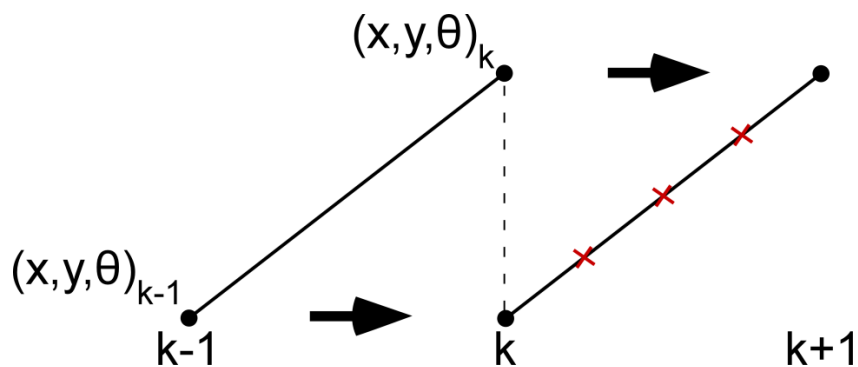
¹⁰¹ Ο δείκτης k αναφέρεται στο βήμα της κάμερας.

¹⁰² Η χρονική υστέρηση ισούται με την περίοδο λήψης νέων δεδομένων από την κάμερα. Λόγω της γραμμικής παρεμβολής, η έξοδος του μπλοκ “Camera Receive” εμφανίζεται στην έξοδο του “xyth Interpolation” με καθυστέρηση ενός επιπλέον βήματος, ήτοι συνολική υστέρηση 116ms.

¹⁰³ Εφόσον ενδιαφέρει η αποκοπή των ταλαντώσεων στη μόνιμη κατάσταση.



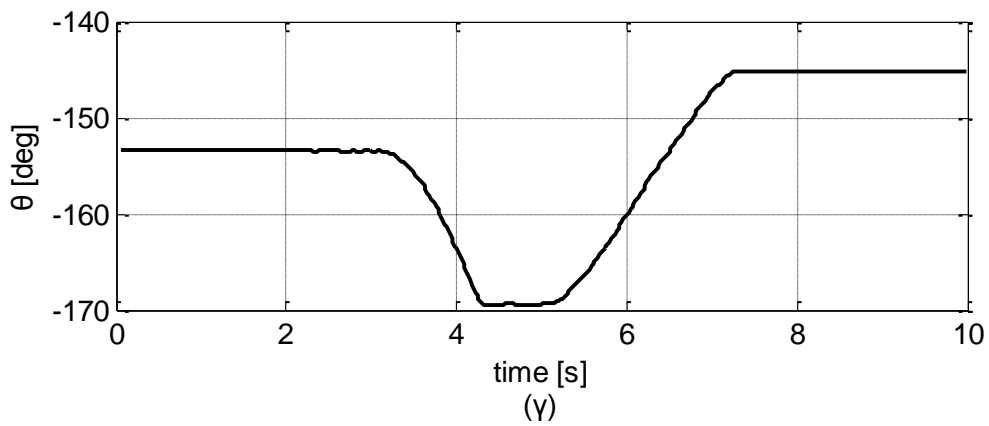
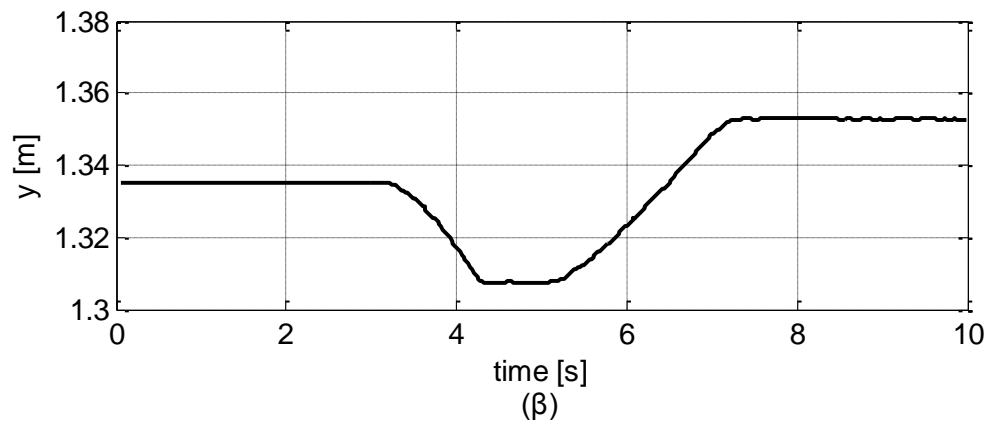
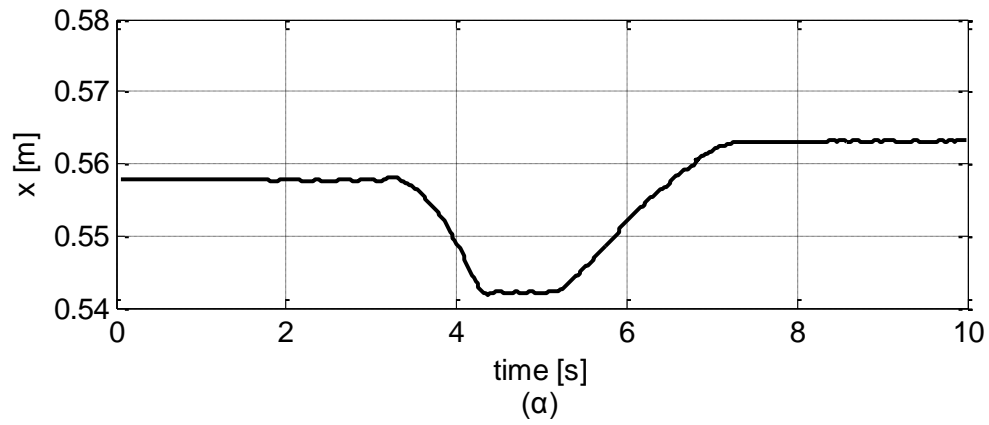
Σχήμα 6-26. Υποσύστημα “Sensors’ Feedback” και η σύνδεση του μπλοκ “xyth Interpolation”.



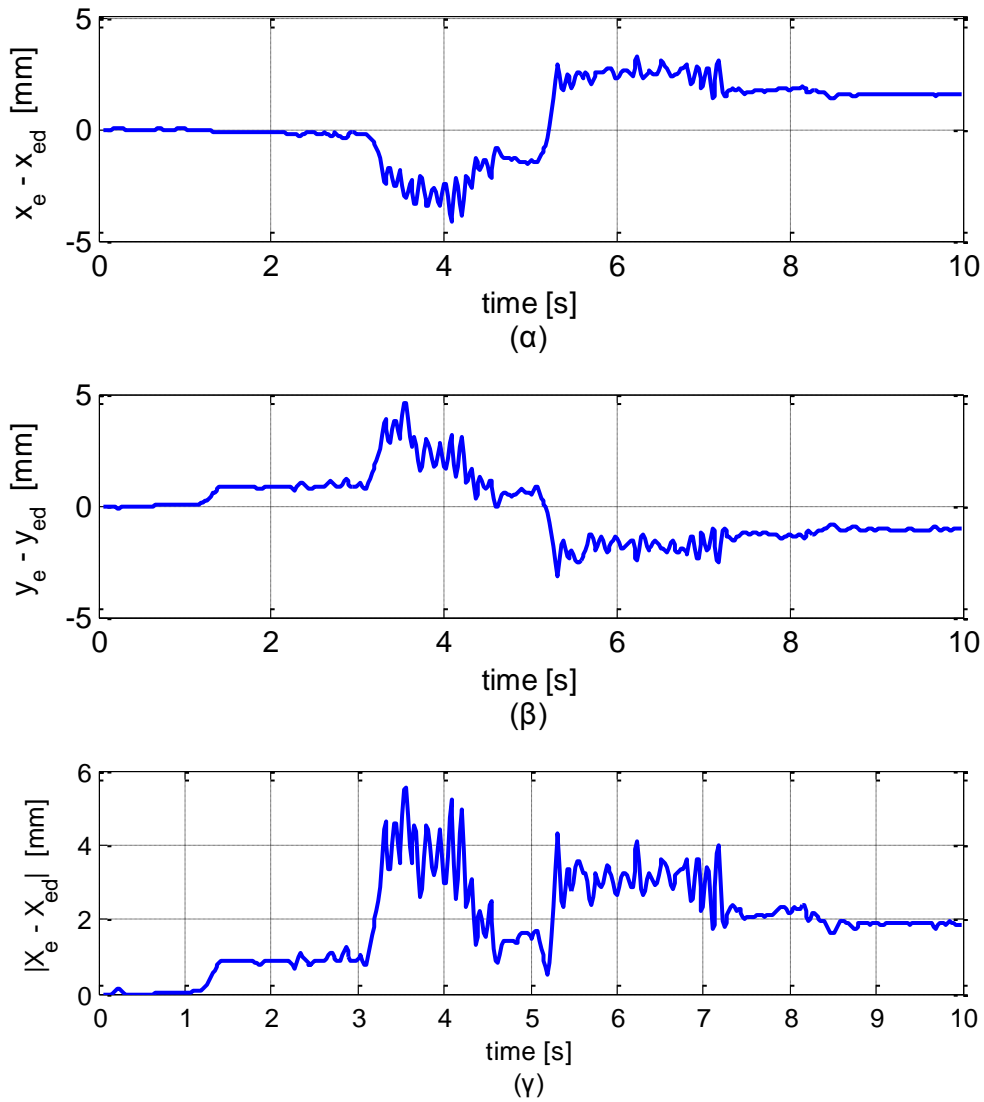
Σχήμα 6-27. Γραμμική παρεμβολή. Τα επιπλέον σημεία που δημιουργούνται παρουσιάζονται συμβολικά με “x”.

6.2.2 Αποτελέσματα του πειράματος

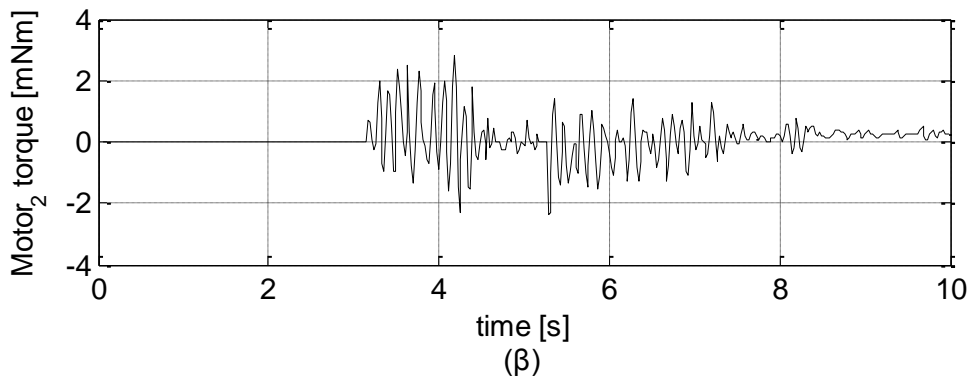
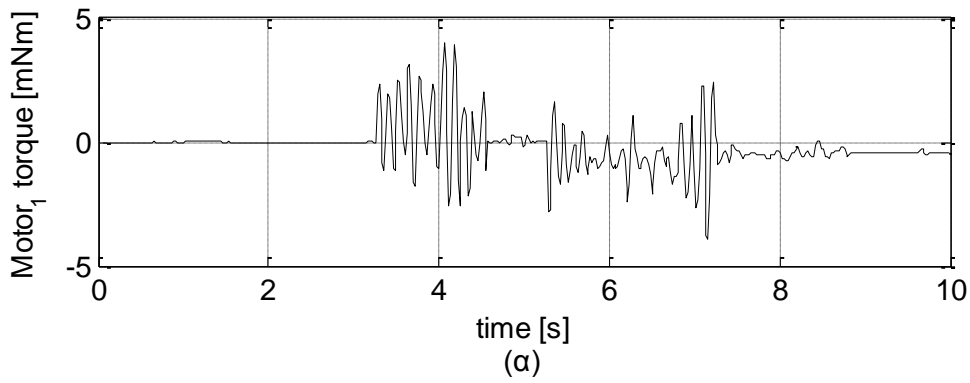
Το ρομπότ εκκινεί από στάση $(x, y, \theta, q_1, q_2)_o = (0.558m, 1.335m, -153.5^\circ, 30^\circ, -45^\circ)$, συνεπώς η αρχική θέση του τελικού σημείου δράσης στο Καρτεσιανό επίπεδο είναι $X_{eo} = (0.197m, 1.092m)$. Δίνεται η εντολή $[0;0;0;0;1;11]$, η οποία απαιτεί το τελικό σημείο δράσης να παραμείνει σταθερό στο επίπεδο, ανεξαρτήτως της κίνησης του σώματος του ρομπότ. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος.



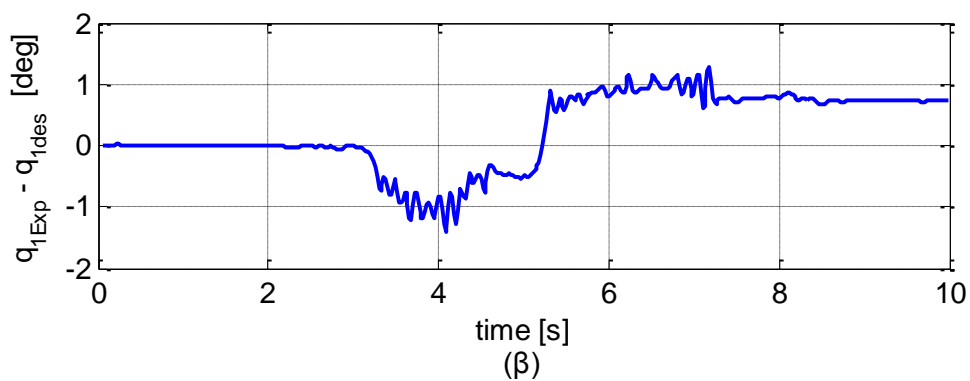
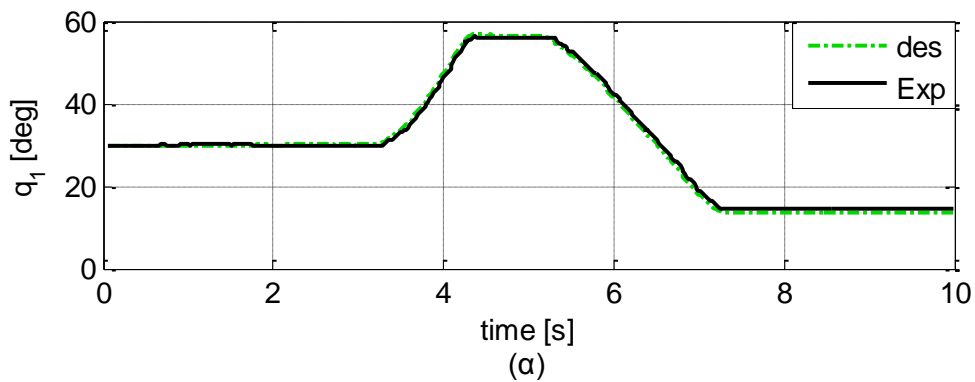
Σχήμα 6-28. Η κίνηση του σώματος του ρομπότ. Φαίνονται κατά σειρά οι τροχιές $x(t)$, $y(t)$, $\theta(t)$.



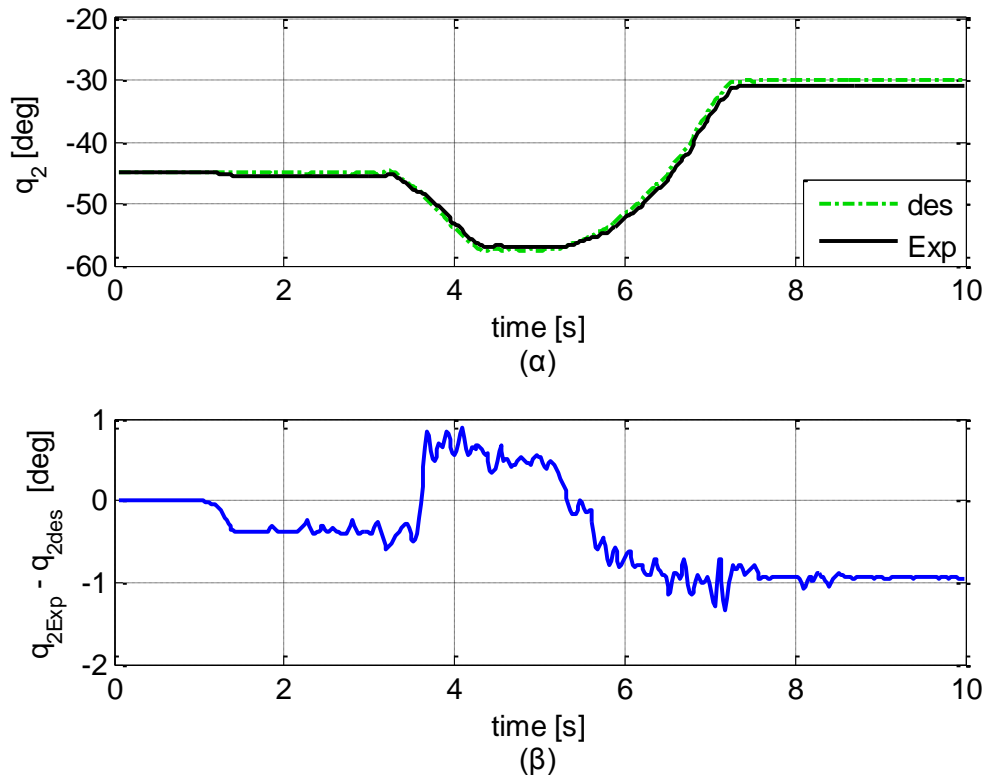
Σχήμα 6-29. Τα σφάλματα του τελικού σημείου δράσης στο Καρτεσιανό επίπεδο. Στο (α) το σφάλμα κατά τον άξονα των X , στο (β) το σφάλμα κατά τον άξονα των Y και στο (γ) το μέτρο της διαφοράς των διανυσμάτων $X_e = (x_e, y_e)$ και $X_{ed} = (x_{ed}, y_{ed})$.



Σχήμα 6-30. Η ζήτηση ροπής από τους κινητήρες.



Σχήμα 6-31. Αποτελέσματα για την πρώτη άρθρωση. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά και η πραγματική απόκριση της πρώτης άρθρωσης. Στο (β) φαίνεται η απόκλιση μεταξύ των δύο.



Σχήμα 6-32. Αποτελέσματα για τη δεύτερη άρθρωση. Στο (α) φαίνεται η επιθυμητή τροχιά και η πραγματική απόκριση της δεύτερης άρθρωσης. Στο (β) φαίνεται η απόκλιση μεταξύ των δύο.

Στο Σχήμα 6-28 φαίνονται οι τροχιές που ακολούθησαν οι μεταβλητές (x, y, θ) που περιγράφουν τη θέση και τον προσανατολισμό του σώματος του ρομπότ. Η κίνηση είναι αρκετά αργή, ώστε να περιορίζονται τα προβλήματα που αναλύθηκαν προηγουμένως.

Από το Σχήμα 6-29-α και το Σχήμα 6-29-β και σε αντιπαραβολή με το Σχήμα 6-28 φαίνεται ότι το κατά X και Y σφάλμα θέσης του τελικού σημείου δράσης εξαρτάται από την ταχύτητα της κίνησης του σώματος του ρομπότ. Συγκεκριμένα, στο διάστημα 3.1–4.2s η κίνηση είναι ταχύτερη από την κίνηση στο 5.2–7.2s· αντίστοιχα, τα σφάλματα στο πρώτο διάστημα είναι μεγαλύτερα από τα σφάλματα δεύτερο. Το μέγιστο σφάλμα σε κάθε άξονα είναι περίπου 4.5mm, το δε μόνιμης κατάστασης περίπου 1.5mm. Αντίστοιχες είναι οι παρατηρήσεις για το Σχήμα 6-29-γ και το απόλυτο σφάλμα, που λαμβάνει μέγιστη τιμή περίπου 5.5mm.

Εφόσον τα σφάλματα θέσης του τελικού σημείου δράσης στο Καρτεσιανό επίπεδο προκύπτουν από αναγωγή της απόκρισης των αρθρώσεων, δεν περιλαμβάνουν τις ανακρίβειες που οφείλονται στη χάρη των μειωτήρων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με τον βραχίονα σε πλήρη έκταση και για απόκλιση μόνο στην πρώτη άρθρωση ίση με τη μέση χάρη ενός μειωτήρα, το πραγματικό σφάλμα θέσης του τελικού σημείου δράσης γίνεται περίπου 5.5mm. Συνεπώς οι επιδώσεις του ελέγχου

ως προς τη μέγιστη τιμή των σφαλμάτων κρίνονται οριακά αποδεκτές, καθώς τα σφάλματα αγγίζουν τα φυσικά όρια ακριβείας του συστήματος. Ωστόσο πλέον εμφανίζονται αισθητές ταλαντώσεις πλάτους έως και 2mm, οι οποίες οφείλονται στις περιορισμένες δυνατότητες ακρίβειας της κάμερας όταν το σύστημα είναι σε κίνηση.

Στο Σχήμα 6-30 φαίνεται η ζήτηση ροπής από τους κινητήρες. Παρατηρείται ότι στα πρώτα 3.2s του πειράματος οι κινητήρες παραμένουν ανενεργοί, παρά τις μικρές διαταραχές που ήδη είχαν προξενήσει μικρή μετατόπιση του σώματος του ρομπότ και κατ' επέκταση του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο φίλτρο deadband που αποκόπτει τα μικρά σφάλματα των αρθρώσεων που εισάγονται στον νόμο ελέγχου. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στο τέλος του πειράματος, όταν το σώμα του ρομπότ είναι σχεδόν ακινητοποιημένο, αλλά οι μικρές διαταραχές επηρεάζουν συνεχώς τις ζητούμενες γωνίες αρθρώσεων. Αν και σε αυτό το διάστημα οι κινητήρες δεν παραμένουν απολύτως απενεργοποιημένοι¹⁰⁴, το φίλτρο deadband έχει μειώσει επαρκώς τα σφάλματα που οφείλονται στις διαταραχές, ώστε οι ροπές των κινητήρων να μην υπερνικούν τις στατικές τριβές και οι αρθρώσεις του βραχίονα να παραμένουν ακίνητες.

Από το Σχήμα 6-31-α και το Σχήμα 6-32-α φαίνεται ότι η απόκριση των αρθρώσεων είναι πολύ κοντά στη ζητούμενη. Από το διάγραμμα (β) των ίδιων σχημάτων φαίνεται ότι το μέγιστο σφάλμα των αρθρώσεων είναι περίπου 1.3° και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μικρότερο της 1° . Συγκρίνοντας αυτά τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα των πειραμάτων σταθερού σώματος που προηγήθηκαν διαπιστώνεται αύξηση των σφαλμάτων των αρθρώσεων περίπου κατά 0.5° , δηλαδή περίπου ίση με το όριο αποκοπής του φίλτρου deadband.

Τελικά φάνηκε ότι το σύστημα ελέγχου που αναπτύχθηκε δύναται να παραλάβει μεγάλες διαταραχές, διατηρώντας τον βραχίονα στη ζητούμενη τροχιά. Οι περιορισμοί που επιβλήθηκαν λόγω των δυνατοτήτων του συστήματος της κάμερας υπερκεράστηκαν επιτυχώς, με κόστος την εμφάνιση ταλαντώσεων κατά τη κίνηση και την αύξηση των σφαλμάτων μόνιμης κατάστασης, που όμως παρέμειναν οριακά εντός αποδεκτών ορίων. Εξάλλου, η αξιοποίηση του συστήματος των οπτικών αισθητήρων και της κάρτας αναλογικών εξόδων που προτάθηκε, αναμένεται να βελτιώσει την απόκριση έτι περισσότερο.

¹⁰⁴ Αυτό σημαίνει ότι τα σφάλματα μόνιμης κατάστασης των αρθρώσεων είναι μεγαλύτερα του ορίου αποκοπής του φίλτρου deadband.

7 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται σύντομη ανασκόπηση της παρούσης εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν και προτείνονται μελλοντικές εργασίες προς επέκταση και βελτίωση της παρούσης.

7.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας παρουσιάστηκε η υλοποίηση δύο όμοιων ρομποτικών βραχιόνων για το δεύτερο ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή του εργαστηρίου και ολοκληρώθηκε η κατασκευή του ενός. Επίσης αναπτύχθηκε το δυναμικό μοντέλο του ρομπότ με έναν ή δύο βραχίονες, καθώς και πρόγραμμα ελέγχου του ρομπότ βασισμένο στο μοντέλο. Έμφαση δόθηκε στον έλεγχο ενός βραχίονα για παρακολούθηση τροχιών που ορίζονται στο πεδίο των αρθρώσεων ή στο Καρτεσιανό επίπεδο για το τελικό σημείο δράσης του βραχίονα. Εν τέλει,

διεξήχθησαν πειράματα προς διαπίστωση της ορθής λειτουργίας της κατασκευής και του προγράμματος ελέγχου.

Στο στάδιο του σχεδιασμού των βραχιόνων οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί που ετέθησαν επέβαλαν την τοποθέτηση και των δύο κινητήρων κάθε βραχίονα στη βάση πρόσδεσης των βραχιόνων, με τη μετάδοση στη δεύτερη άρθρωση να επιτυγχάνεται μέσω συστήματος με ιμάντες χρονισμού. Η επιλογή των ιμάντων οδήγησε σε υλοποίηση μικρού όγκου, χαμηλού κόστους και καλής ακρίβειας, που δεν πάσχει από τα προβλήματα αντοχής που παρουσιάζουν οι παρόμοιες λειτουργικότητας βραχίονες του πρώτου ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή, οι οποίοι χρησιμοποιούν μετάδοση μέσω νημάτων.

Στο στάδιο της δυναμικής μοντελοποίησης του ρομπότ ακολουθήθηκε η μέθοδος Euler – Lagrange. Χάριν απλότητας αμελήθηκαν οι τριβές του μηχανισμού των βραχιόνων καθώς και η επίδραση της ελαστικότητας των ιμάντων στην απόκριση. Το δυναμικό μοντέλο που προέκυψε αξιοποιήθηκε στον νόμο ελέγχου του ρομπότ και στις προσομοιώσεις.

Για τον έλεγχο του ρομπότ με έναν ή δύο βραχίονες εφαρμόστηκε μη γραμμικός PD έλεγχος δυνάμεων και ροπών με βάση το μοντέλο, ο οποίος, υπό την υπόθεση άριστης γνώσης των παραμέτρων του μοντέλου, οδηγεί σε γραμμικές και αποζευγμένες εξισώσεις σφάλματος και επιτρέπει την επιλογή κερδών ελέγχου διά της επιλογής του χρόνου αποκατάστασης για κάθε μεταβλητή του συστήματος. Επίσης αναπτύχθηκε αλγόριθμος δημιουργίας τροχιών για οδήγηση των αρθρώσεων και του τελικού σημείου δράσης κάθε βραχίονα σύμφωνα με τις εντολές του χρήστη του συστήματος.

Για τον έλεγχο πραγματικού χρόνου του ρομπότ αναπτύχθηκε πρόγραμμα για Simulink Real-Time, αντίστοιχο του μοντέλου προσομοιώσεων που αναπτύχθηκε σε Simulink. Διαπιστώθηκε η ανάγκη χρήσης κάρτας αναλογικών εξόδων για τον έλεγχο των servo drive των ηλεκτροκινητήρων, καθώς και η ανάγκη υλοποίησης αλγορίθμου πραγματικού χρόνου για παράλληλη αξιοποίηση των συστημάτων της κάμερας και των οπτικών αισθητήρων του ρομπότ.

Από τα πειράματα που διεξήχθησαν διαπιστώθηκε η ορθή λειτουργία του ρομποτικού βραχίονα και του προγράμματος ελέγχου. Επιπλέον, διαπιστώθηκε η συμβατότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων των πειραμάτων και των προσομοιώσεων καθώς η μεταξύ τους απόκλιση είναι μικρή και εντός των ορίων της ακριβείας του συστήματος.

7.2 Μελλοντική εργασία

Οι μελλοντικές εργασίες που προτείνονται στη συνέχεια αφορούν στην επέκταση και βελτίωση της παρούσης εργασίας και του διαστημικού εξομοιωτή του εργαστηρίου.

- Τροποποίηση του προγράμματος ελέγχου ώστε να αξιοποιεί την αναλογική κάρτα DM6604HR για έλεγχο των servo drive των ηλεκτροκινητήρων με αναλογικά σήματα (Κεφάλαιο 5.3.5).
- Υλοποίηση αλγορίθμου πραγματικού χρόνου για παράλληλη αξιοποίηση των συστημάτων της κάμερας και των οπτικών αισθητήρων του ρομπότ.
- Πειραματική εύρεση των αδρανειακών χαρακτηριστικών του ρομπότ και επαλήθευση του πλήρους δυναμικού μοντέλου που αναπτύχθηκε – προϋποθέτει την ολοκλήρωση των εργασιών υλοποίησης ορισμένων υποσυστημάτων (σφόνδυλος αντίδρασης, ηλεκτρονικά).
- Κατασκευή του δεύτερου ρομποτικού βραχίονα και ανάπτυξη αλγορίθμων για χρήση δύο βραχιόνων σε συνεργατικές εργασίες.
- Υλοποίηση ανεξάρτητου συστήματος με αισθητήρες Hall τοποθετημένους στις ακραίες προσπελάσιμες θέσεις των αρθρώσεων των βραχιόνων.
- Συναρμολόγηση των προβλεπόμενων αισθητήρων δύναμης και ροπής στα άκρα των βραχιόνων και βελτίωση του μοντέλου και του προγράμματος ελέγχου του ρομπότ, ώστε να αξιοποιούν τη γνώση των ασκούμενων δυνάμεων και ροπών.
- Σχεδιασμός και υλοποίηση εργαλείων για τα άκρα των βραχιόνων.
- Τοποθέτηση LED επί του τελικού σημείου δράσης κάθε βραχίονα, ώστε να γίνεται γνωστή η θέση του μέσω της κάμερας.
- Βελτίωση της μοντελοποίησης του ρομπότ με εισαγωγή μοντέλου τριβής για τις αρθρώσεις και μοντέλου ελαστικότητας για τους ιμάντες των βραχιόνων. Επίσης, μοντελοποίηση της χρονικής υστέρησης που εισάγει στο σύστημα η κάμερα.
- Περαιτέρω ανάπτυξη του υποσυστήματος Trajectory Planning (Κεφάλαιο 5.3.3) ώστε να υποστηρίζει και άλλες πορείες για το τελικό σημείο δράσης κάθε βραχίονα στο Καρτεσιανό πεδίο (π.χ. κυκλική).
- Ανάπτυξη αλγορίθμου πραγματικού χρόνου για υπολογισμό του προσπελάσιμου χώρου εργασίας του ρομπότ και για αξιολόγηση των εντολών προς τους βραχίονες ως προς τη δυνατότητα προσπέλασης.
- Περαιτέρω ανάπτυξη του γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη που προτάθηκε (Κεφάλαιο 5.4) ή/και ανάπτυξη πιο ολοκληρωμένης λύσης διεπαφής.

Βιβλιογραφία

- [1] Craig, J., J., *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, Prentice Hall, 3rd edition.
- [2] Dorf, R., and Bishop, R., *Modern Control Systems*, Prentice Hall, 12th edition.
- [3] <http://archive.darpa.mil/orbitalexpress/index.html>
- [4] http://fawos.misumi.jp/FA_WEB/pulley_us/
- [5] <http://iss.jaxa.jp/en/kibo/about/kibo/rms/>
- [6] <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/dextre/>
- [7] http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/European_Robotic_Arm
- [8] http://www.ieee.ca/millennium/canadarm/canadarm_technical.html
- [9] <http://www.mathworks.com/help/>
- [10] <http://www.mathworks.com/help/ecoder/examples/software-and-processor-in-the-loop-sil-and-pil-simulation.html>
- [11] <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/ratetransition.html>
- [12] <http://www.mathworks.com/products/matlab-coder/>
- [13] <http://www.mathworks.com/products/simulink/>
- [14] <http://www.mathworks.com/products/simulink-coder/>
- [15] <http://www.mathworks.com/products/simulink-real-time/>
- [16] <http://www.mathworks.com/videos/hardware-in-the-loop-hil-testing-68840.html>
- [17] http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8815244050462/ESCON-Studio-ExercisesV6.pdf
- [18] http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8815102820382/403112-ESCON-36-2-DC-Hardware-Reference-En.pdf
- [19] http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8816813506590/15-355-EN.pdf
- [20] http://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/mss.html
- [21] http://www.rtd.com/NEW_manuals/hardware/datamodules/dm6814.pdf
- [22] <http://www.space.com/11130-orbit-satellite-servicing-work.html>

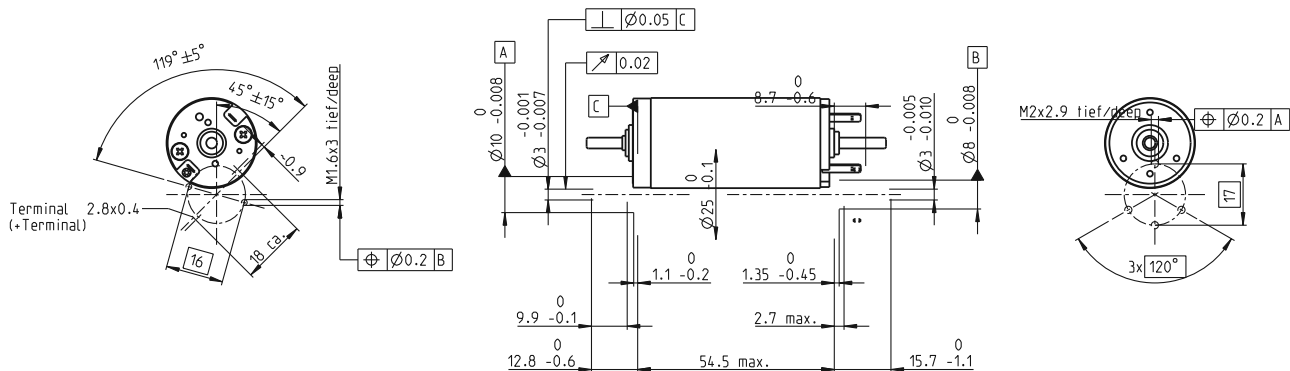
- [23] <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/sn75175.pdf>
- [24] https://en.wikipedia.org/wiki/Air_bearing
- [25] [https://en.wikipedia.org/wiki/Backlash_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Backlash_(engineering))
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor
- [27] <https://en.wikipedia.org/wiki/Deadband>
- [28] https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_signaling
- [29] https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_drive_mechanism
- [30] https://en.wikipedia.org/wiki/Docking_and_berthing_of_spacecraft
- [31] <https://en.wikipedia.org/wiki/G-code>
- [32] https://en.wikipedia.org/wiki/Harmonic_drive
- [33] [https://en.wikipedia.org/wiki/Kibo_\(ISS_module\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Kibo_(ISS_module))
- [34] https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_Servicing_System
- [35] <https://en.wikipedia.org/wiki/PC/104>
- [36] https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation
- [37] https://en.wikipedia.org/wiki/Real-time_computing
- [38] https://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder
- [39] https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor%E2%80%93transistor_logic
- [40] https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee127a/book/login/def_pseudo_inv.html
- [41] https://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/dextre.html#.VZcmp_mqpBc
- [42] <https://www.youtube.com/watch?v=CtYv8nB8WZU>
- [43] <https://www.youtube.com/watch?v=Dkt6drApYNw&index=2&list=PLCAhfclX YtbXW RvNNSyYPt4Xej8XHdmD>
- [44] <https://www.youtube.com/watch?v=U4uZvB-avL0&feature=youtu.be>
- [45] <https://www.youtube.com/watch?v=ZC37Ozflkjo>
- [46] <https://www.youtube.com/watch?v=zkh9xLjrmj4>
- [47] Miller, D., et al., "SPHERES: A Testbed for Long Duration Satellite Formation Flying in Micro-Gravity Conditions", *Proc. of the AAS/ AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, Clearwater, FL, 2000.
- [48] Norton, R., L., *Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines*, McGraw-Hill, 2011

- [49] Papadopoulos, E., *Electromechanical Systems for Power Conversion*, NTUA Press, 1999.
- [50] Papadopoulos, E., and Kyriakopoulos, K., *Introduction to Robotics*, NTUA Press, 2004.
- [51] Russakow, J., Rock, S. and Khatib, O., "An operational space formulation for a free-flying, multi-arm space robot," *Experimental Robotics VII*, LNCIS 223, 1997.
- [52] Siciliano, B., and Khatib, O., *Springer Handbook of Robotics*, Springer, 2008.
- [53] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., and Oriolo, G., *Robotics: Modelling, Planning and Control*, Springer, 2010.
- [54] Stewart C., H., "GPS Pseudolites: Theory, Design, and Applications", *Ph.D. Dissertation*, Stanford University, 1997.
- [55] Καλγρεάδης, Α., "Ανάπτυξη αλγορίθμων Επεξεργασίας Εικόνας και Επεκταμένου Φίλτρου Kalman (EKF) για εντοπισμό Θέσης Ρομπότ Διαστημικού Εξομοιωτή", *Διπλωματική Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.
- [56] Καλιακάτσος, Ι., "Σχεδιασμός Συστήματος Προώθησης Πεπιεσμένου CO² και Έλεγχος Κίνησης Εξομοιωτή Διαστημικού Ρομπότ", *Διπλωματική Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.
- [57] Κοντολάτης, Ι., "Ανάδραση θέσης για την Οπτική οδήγηση Εξομοιωτή Διαστημικού Ρομπότ", *Μεταπτυχιακή Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2008.
- [58] Λίκα, Κ., "Σχεδιασμός και Κατασκευή Αισθητήρα Δύναμης/Ροπής 5-Αξόνων", *Διπλωματική Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.
- [59] Μαχαιράς, Κ., "Σχεδιασμός και υλοποίηση Ηλεκτρικού/ Ηλεκτρονικού Υποσυστήματος και προγραμματισμός Πραγματικού Χρόνου Ρομπότ Διαστημικού Εξομοιωτή", *Διπλωματική Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.
- [60] Παρασκευάς, Ι., "Ανάπτυξη Συστήματος Οπτικών Αισθητήρων για Εντοπισμό Θέσης Ρομπότ σε Επίπεδη Κίνηση", *Μεταπτυχιακή Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2008.
- [61] Πατσιαούρας, Η., "Σχεδιασμός λογισμικού οπτικής ανάδρασης θέσης με εφαρμογή στον έλεγχο διαστημικού εξομοιωτή", *Διπλωματική Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.
- [62] Τσιφάκης Α., "Σχεδιασμός Μηχανολογικού Υποσυνόλου Επίπεδου Διαστημικού Εξομοιωτή Αεροστατικών Εδράνων", *Μεταπτυχιακή Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005.
- [63] Φλέσσα, Θ., "Μοντελοποίηση, Έλεγχος και Προγραμματισμός Ρομπότ Επίπεδου Διαστημικού Εξομοιωτή", *Διπλωματική Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009.

[64] Ψαρρός, Δ., “Ανάλυση, Σχεδίαση και Αξιολόγηση Σφονδύλου Αντίδρασης για Επίπεδο Εξομοιωτή Διαστημικού Ρομπότ”, *Μεταπτυχιακή Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.

Παράρτημα A: Εγχειρίδια Προδιαγραφών Hardware

RE 25 Ø25 mm, Precious Metal Brushes CLL, 10 Watt



M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers

118740 118741 118742 118743 118744 118745 118746 118747 118748

Motor Data

Values at nominal voltage

| | | 4.5 | 8 | 9 | 12 | 15 | 18 | 24 | 32 | 48 |
|---|-----|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1 Nominal voltage | V | 4.5 | 8 | 9 | 12 | 15 | 18 | 24 | 32 | 48 |
| 2 No load speed | rpm | 5360 | 5320 | 5230 | 4850 | 4980 | 4790 | 5190 | 5510 | 5070 |
| 3 No load current | mA | 79.7 | 44.4 | 38.7 | 26.3 | 21.8 | 9.88 | 14.4 | 11.7 | 6.96 |
| 4 Nominal speed | rpm | 4980 | 4520 | 4220 | 3800 | 3920 | 3710 | 4130 | 4450 | 4000 |
| 5 Nominal torque (max. continuous torque) | mNm | 11.4 | 20.9 | 23.9 | 28.6 | 28.2 | 28.7 | 28 | 27.9 | 27.9 |
| 6 Nominal current (max. continuous current) | A | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.24 | 1.01 | 0.811 | 0.652 | 0.516 | 0.317 |
| 7 Stall torque | mNm | 131 | 132 | 119 | 129 | 131 | 126 | 136 | 144 | 132 |
| 8 Starting current | A | 16.5 | 9.23 | 7.31 | 5.5 | 4.57 | 3.52 | 3.1 | 2.61 | 1.47 |
| 9 Max. efficiency | % | 87 | 87 | 86 | 87 | 87 | 90 | 87 | 87 | 87 |

Characteristics

| | | 0.273 | 0.867 | 1.23 | 2.18 | 3.28 | 5.11 | 7.73 | 12.3 | 32.6 |
|-----------------------------|------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 10 Terminal resistance | Ω | 0.273 | 0.867 | 1.23 | 2.18 | 3.28 | 5.11 | 7.73 | 12.3 | 32.6 |
| 11 Terminal inductance | mH | 0.0275 | 0.0882 | 0.115 | 0.238 | 0.353 | 0.551 | 0.832 | 1.31 | 3.48 |
| 12 Torque constant | mNm/A | 7.99 | 14.3 | 16.3 | 23.5 | 28.6 | 35.8 | 43.9 | 55.2 | 89.9 |
| 13 Speed constant | rpm/V | 1200 | 668 | 584 | 406 | 334 | 267 | 217 | 173 | 106 |
| 14 Speed / torque gradient | rpm/mNm | 40.9 | 40.5 | 44 | 37.7 | 38.3 | 38.2 | 38.3 | 38.5 | 38.6 |
| 15 Mechanical time constant | ms | 4.99 | 4.4 | 4.37 | 4.25 | 4.23 | 4.22 | 4.22 | 4.22 | 4.23 |
| 16 Rotor inertia | gcm ² | 11.7 | 10.4 | 9.49 | 10.8 | 10.6 | 10.6 | 10.5 | 10.5 | 10.5 |

Specifications

Thermal data

| | |
|---|-------------|
| 17 Thermal resistance housing-ambient | 14 K/W |
| 18 Thermal resistance winding-housing | 3.1 K/W |
| 19 Thermal time constant winding | 12.5 s |
| 20 Thermal time constant motor | 612 s |
| 21 Ambient temperature | -20...+85°C |
| 22 Max. permissible winding temperature | +100°C |

Mechanical data (ball bearings)

| | |
|---|----------------|
| 23 Max. permissible speed | 5500 rpm |
| 24 Axial play | 0.05 - 0.15 mm |
| 25 Radial play | 0.025 mm |
| 26 Max. axial load (dynamic) | 3.2 N |
| 27 Max. force for press fits (static) (static, shaft supported) | 64 N |
| 28 Max. radial loading, 5 mm from flange | 800 N |
| | 16 N |

Other specifications

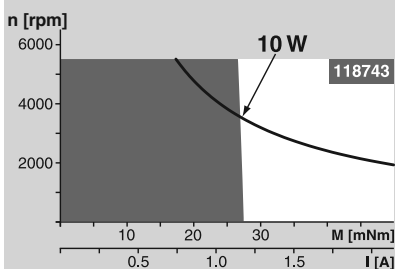
| | |
|----------------------------------|-------|
| 29 Number of pole pairs | 1 |
| 30 Number of commutator segments | 11 |
| 31 Weight of motor | 130 g |
| CLL = Capacitor Long Life | |

Values listed in the table are nominal.
Explanation of the figures on page 71.

Option

Preloaded ball bearings

Operating Range



Comments

Continuous operation

In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.

Short term operation

The motor may be briefly overloaded (recurring).

Assigned power rating

maxon Modular System

Overview on page 20 - 25

Planetary Gearhead

Ø26 mm
0.75 - 4.5 Nm
Page 257

Planetary Gearhead

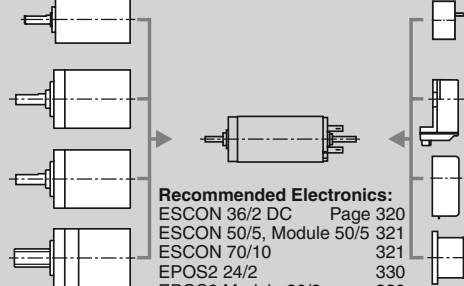
Ø32 mm
0.75 - 6.0 Nm
Page 259/260/263

Koaxdrive

Ø32 mm
1.0 - 4.5 Nm
Page 268

Spindle Drive

Ø32 mm
Page 286-288



Recommended Electronics:

| | |
|-------------------------|----------|
| ESCON 36/2 DC | Page 320 |
| ESCON 50/5, Module 50/5 | 321 |
| ESCON 70/10 | 321 |
| EPOS2 24/2 | 330 |
| EPOS2 Module 36/2 | 330 |
| EPOS2 24/5 | 331 |
| EPOS2 50/5 | 331 |
| EPOS2 P 24/5 | 334 |
| EPOS3 70/10 EtherCAT | 337 |
| Notes | 22 |

Encoder MR

128 - 1000 CPT,
3 channels
Page 302

Encoder Enc

22 mm
100 CPT, 2 channels
Page 304

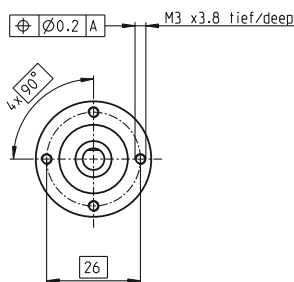
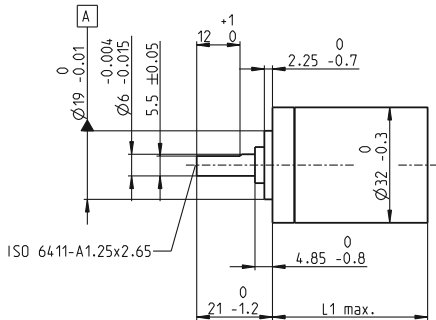
Encoder HED_ 5540

500 CPT,
3 channels
Page 305/307

DC-Tacho DCT

Ø22 mm
0.52 V
Page 315

Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75–4.5 Nm



M 1:2

Technical Data

| | |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| Planetary Gearhead | straight teeth |
| Output shaft | stainless steel |
| Shaft diameter as option | 8 mm |
| Bearing at output | ball bearing |
| Radial play, 5 mm from flange | max. 0.14 mm |
| Axial play | max. 0.4 mm |
| Max. permissible axial load | 120 N |
| Max. permissible force for press fits | 120 N |
| Sense of rotation, drive to output | = |
| Recommended input speed | < 6000 rpm |
| Recommended temperature range | -40...+100°C |
| Number of stages | 1 2 3 4 5 |
| Max. radial load, 10 mm from flange | 140 N 140 N 200 N 220 N 220 N |

Option: Low-noise version

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers

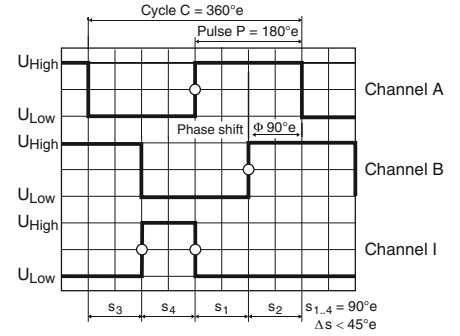
| | 166155 | 166158 | 166163 | 166164 | 166169 | 166174 | 166179 | 166184 | 166187 | 166192 | 166197 | 166202 |
|---|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Gearhead Data | | | | | | | | | | | | |
| 1 Reduction | 3.7:1 | 14:1 | 33:1 | 51:1 | 111:1 | 246:1 | 492:1 | 762:1 | 1181:1 | 1972:1 | 2829:1 | 4380:1 |
| 2 Reduction absolute | ²⁶ / ₇ | ⁶⁷⁶ / ₄₉ | ⁵²⁹ / ₁₆ | ¹⁷⁵⁷⁶ / ₃₄₃ | ¹³⁸²⁴ / ₁₂₅ | ⁴²¹⁸²⁴ / ₁₇₁₅ | ⁸⁶¹¹² / ₁₇₅ | ¹⁹⁰⁴⁴ / ₂₅ | ¹⁰¹²³⁷⁷⁶ / ₆₅₇₅ | ⁸⁶²⁶¹⁷⁶ / ₄₃₇₅ | ⁴⁹⁵¹⁴⁴ / ₁₇₅ | ¹⁰⁹⁵⁰³ / ₂₅ |
| 3 Max. motor shaft diameter mm | 6 | 6 | 3 | 6 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| Part Numbers | 166156 | 166159 | | 166165 | 166170 | 166175 | 166180 | 166185 | 166188 | 166193 | 166198 | 166203 |
| 1 Reduction | 4.8:1 | 18:1 | | 66:1 | 123:1 | 295:1 | 531:1 | 913:1 | 1414:1 | 2189:1 | 3052:1 | 5247:1 |
| 2 Reduction absolute | ²⁴ / ₅ | ⁶²⁴ / ₃₅ | | ¹⁶²²⁴ / ₂₄₅ | ⁶⁸⁷⁷ / ₅₆ | ¹⁰¹⁰⁶² / ₃₄₃ | ³³¹⁷⁷⁶ / ₆₂₅ | ³⁶⁵⁰¹ / ₄₀ | ²⁴²⁵⁴⁸⁸ / ₁₇₁₅ | ⁵³⁶⁴⁰⁶ / ₂₄₅ | ⁷¹² / ₆₂₅ | ⁵²³ / ₁₆₀ |
| 3 Max. motor shaft diameter mm | 4 | 4 | | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Part Numbers | 166157 | 166160 | | 166166 | 166171 | 166176 | 166181 | 166186 | 166189 | 166194 | 166199 | 166204 |
| 1 Reduction | 5.8:1 | 21:1 | | 79:1 | 132:1 | 318:1 | 589:1 | 1093:1 | 1526:1 | 2362:1 | 3389:1 | 6285:1 |
| 2 Reduction absolute | ²⁹ / ₄ | ²⁹⁹ / ₁₄ | | ³⁸⁸⁷ / ₄₉ | ³³¹² / ₂₅ | ³⁸³³⁷⁶ / ₁₂₂₅ | ²⁰⁶³¹ / ₃₅ | ²⁷⁹⁸⁴¹ / ₂₅₆ | ⁹³⁴⁵⁰²⁴ / ₆₁₂₅ | ²⁰⁶⁶⁶⁸⁸ / ₈₇₅ | ⁴⁷⁴⁵¹³ / ₁₄₀ | ⁶⁴³⁶³⁴³ / ₁₀₂₄ |
| 3 Max. motor shaft diameter mm | 3 | 3 | | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Part Numbers | | 166161 | | 166167 | 166172 | 166177 | 166182 | | 166190 | 166195 | 166200 | |
| 1 Reduction | | 23:1 | | 86:1 | 159:1 | 411:1 | 636:1 | | 1694:1 | 2548:1 | 3656:1 | |
| 2 Reduction absolute | | ⁵⁷⁶ / ₂₅ | | ¹⁴⁹⁷⁶ / ₁₇₅ | ¹⁵⁸⁷ / ₁₀ | ³⁵⁹⁴²⁴ / ₈₇₅ | ⁷⁹⁴⁸⁸ / ₁₂₅ | | ¹¹⁶²²¹³ / ₆₈₆ | ⁷⁹⁶²⁶²⁴ / ₃₁₂₅ | ⁴⁵⁷⁰⁵⁶ / ₁₂₅ | |
| 3 Max. motor shaft diameter mm | | 4 | | 4 | 3 | 4 | 3 | | 3 | 4 | 3 | |
| Part Numbers | | 166162 | | 166168 | 166173 | 166178 | 166183 | | 166191 | 166196 | 166201 | |
| 1 Reduction | | 28:1 | | 103:1 | 190:1 | 456:1 | 706:1 | | 1828:1 | 2623:1 | 4060:1 | |
| 2 Reduction absolute | | ¹³⁸ / ₅ | | ³⁵⁸⁸ / ₃₅ | ¹²¹⁶⁷ / ₆₄ | ⁸⁹⁴⁰¹ / ₁₉₆ | ¹⁵⁸¹⁷¹ / ₂₂₄ | | ²²³⁸⁹¹² / ₁₂₂₅ | ²⁰⁵⁶²²³ / ₇₈₄ | ³⁶³⁷⁹³³ / ₈₉₆ | |
| 3 Max. motor shaft diameter mm | | 3 | | 3 | 3 | 3 | 3 | | 3 | 3 | 3 | |
| 4 Number of stages | | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 5 Max. continuous torque Nm | | 0.75 | 2.25 | 2.25 | 4.50 | 4.50 | 4.50 | 4.50 | 4.50 | 4.50 | 4.50 | 4.50 |
| 6 Intermittently permissible torque at gear output Nm | | 1.1 | 3.4 | 3.4 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 |
| 7 Max. efficiency % | | 80 | 75 | 75 | 70 | 70 | 60 | 60 | 60 | 50 | 50 | 50 |
| 8 Weight g | | 118 | 162 | 162 | 194 | 194 | 226 | 226 | 226 | 258 | 258 | 258 |
| 9 Average backlash no load ° | | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 10 Mass inertia gcm ² | | 1.5 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| 11 Gearhead length L1 mm | | 26.5 | 36.4 | 36.4 | 43.1 | 43.1 | 49.8 | 49.8 | 49.8 | 56.5 | 56.5 | 56.5 |



maxon Modular System

| + Motor | Page | + Sensor/Brake | Page | Overall length [mm] = Motor length + gearhead length + (sensor/brake) + assembly parts | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------|------------------|---------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| RE 25 | 99/101 | | | 81.1 | 91.0 | 91.0 | 97.7 | 97.7 | 104.4 | 104.4 | 104.4 | 111.1 | 111.1 | 111.1 | 111.1 |
| RE 25 | 99/101 | MR | 302 | 92.1 | 102.0 | 102.0 | 108.7 | 108.7 | 115.4 | 115.4 | 115.4 | 122.1 | 122.1 | 122.1 | 122.1 |
| RE 25 | 99/101 | Enc 22 | 304 | 95.2 | 105.1 | 105.1 | 111.8 | 111.8 | 118.5 | 118.5 | 118.5 | 125.2 | 125.2 | 125.2 | 125.2 |
| RE 25 | 99/101 | HED_5540 | 305/307 | 101.9 | 111.8 | 111.8 | 118.5 | 118.5 | 125.2 | 125.2 | 131.9 | 131.9 | 131.9 | 131.9 | 131.9 |
| RE 25 | 99/101 | DCT 22 | 315 | 103.4 | 113.3 | 113.3 | 120.0 | 120.0 | 126.7 | 126.7 | 126.7 | 133.4 | 133.4 | 133.4 | 133.4 |
| RE 25, 20 W | 100 | | | 69.6 | 79.5 | 79.5 | 86.2 | 86.2 | 92.9 | 92.9 | 92.9 | 99.6 | 99.6 | 99.6 | 99.6 |
| RE 25, 20 W | 100 | MR | 302 | 80.6 | 90.5 | 90.5 | 97.2 | 97.2 | 103.9 | 103.9 | 103.9 | 110.6 | 110.6 | 110.6 | 110.6 |
| RE 25, 20 W | 100 | HED_5540 | 306/309 | 90.4 | 100.3 | 100.3 | 107.0 | 107.0 | 113.7 | 113.7 | 113.7 | 120.4 | 120.4 | 120.4 | 120.4 |
| RE 25, 20 W | 100 | DCT22 | 315 | 91.9 | 101.8 | 101.8 | 108.5 | 108.5 | 115.2 | 115.2 | 121.9 | 121.9 | 121.9 | 121.9 | 121.9 |
| RE 25, 20 W | 100 | AB 28 | 348 | 103.7 | 113.6 | 113.6 | 120.3 | 120.3 | 127.0 | 127.0 | 133.7 | 133.7 | 133.7 | 133.7 | 133.7 |
| RE 25, 20 W | 100 | HED_5540 / AB 28 | 306/348 | 120.9 | 130.8 | 130.8 | 137.5 | 137.5 | 144.2 | 144.2 | 144.2 | 150.9 | 150.9 | 150.9 | 150.9 |
| RE 25, 20 W | 101 | AB 28 | 348 | 115.2 | 125.1 | 125.1 | 131.8 | 131.8 | 138.5 | 138.5 | 138.5 | 145.2 | 145.2 | 145.2 | 145.2 |
| RE 25, 20 W | 101 | HED_5540/AB 28 | 305/348 | 132.4 | 142.3 | 142.3 | 149.0 | 149.0 | 155.7 | 155.7 | 155.7 | 162.4 | 162.4 | 162.4 | 162.4 |
| A-max 26 | 125-132 | | | 71.3 | 81.2 | 81.2 | 87.9 | 87.9 | 94.6 | 94.6 | 94.6 | 101.3 | 101.3 | 101.3 | 101.3 |
| A-max 26 | 126-132 | MEnc 13 | 314 | 78.4 | 88.3 | 88.3 | 95.0 | 95.0 | 101.7 | 101.7 | 101.7 | 108.4 | 108.4 | 108.4 | 108.4 |
| A-max 26 | 126-132 | MR | 302 | 80.1 | 90.0 | 90.0 | 96.7 | 96.7 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 110.1 | 110.1 | 110.1 | 110.1 |
| A-max 26 | 126-132 | Enc 22 | 304 | 85.7 | 95.6 | 95.6 | 102.3 | 102.3 | 109.0 | 109.0 | 109.0 | 115.7 | 115.7 | 115.7 | 115.7 |
| A-max 26 | 126-132 | HED_5540 | 306/307 | 89.7 | 99.6 | 99.6 | 106.3 | 106.3 | 113.0 | 113.0 | 113.0 | 119.7 | 119.7 | 119.7 | 119.7 |
| RE-max 29 | 155-158 | | | 71.3 | 81.2 | 81.2 | 87.9 | 87.9 | 94.6 | 94.6 | 94.6 | 101.3 | 101.3 | 101.3 | 101.3 |
| RE-max 29 | 156/158 | MR | 302 | 80.1 | 90.0 | 90.0 | 96.7 | 96.7 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 110.1 | 110.1 | 110.1 | 110.1 |

Encoder MR Type ML, 128–1000 CPT, 3 Channels, with Line Driver



Direction of rotation cw (definition cw p. 70)

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

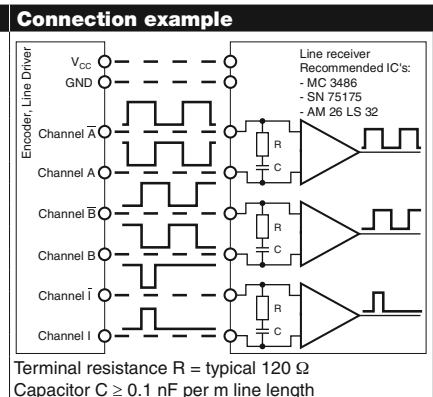
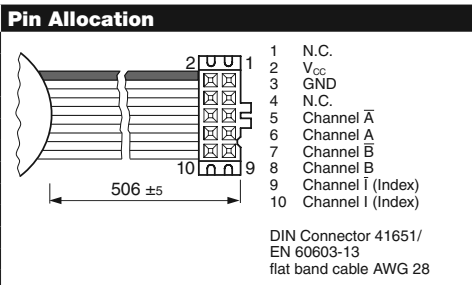
| Part Numbers | | | | |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 225771 | 225773 | 225778 | 225805 | 225780 |

| Type | 225771 | 225773 | 225778 | 225805 | 225780 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Counts per turn | 128 | 256 | 500 | 512 | 1000 |
| Number of channels | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Max. operating frequency (kHz) | 80 | 160 | 200 | 320 | 200 |
| Max. speed (rpm) | 37500 | 37500 | 24000 | 37500 | 12000 |



| maxon Modular System | | | | | | Overall length [mm] / ● see Gearhead | | | | |
|----------------------|---------|----------------------|---------|---------|------|--------------------------------------|------|------|------|------|
| + Motor | Page | + Gearhead | Page | + Brake | Page | | | | | |
| RE 25 | 99/101 | | | | | 65.5 | 65.5 | 65.5 | 65.5 | 65.5 |
| RE 25 | 99/101 | GP 26, 0.75 - 2.0 Nm | 257 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| RE 25 | 99/101 | GP 32, 0.75 - 6.0 Nm | 259-264 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| RE 25 | 99/101 | KD 32, 1.0 - 4.5 Nm | 268 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| RE 25 | 99/101 | GP 32 S | 286-288 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| RE 25, 20 W | 100 | | | | | 54.0 | 54.0 | 54.0 | 54.0 | 54.0 |
| RE 25, 20 W | 100 | GP 26, 0.75 - 2.0 Nm | 257 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| RE 25, 20 W | 100 | GP 32, 0.75 - 6.0 Nm | 259-264 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| RE 25, 20 W | 100 | KD 32, 1.0 - 4.5 Nm | 268 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| RE 25, 20 W | 100 | GP 32 S | 286-288 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| A-max 26 | 126-132 | | | | | 53.5 | 53.5 | 53.5 | 53.5 | 53.5 |
| A-max 26 | 126-132 | GP 26, 0.75 - 4.5 Nm | 257 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| A-max 26 | 126-132 | GS 30, 0.07 - 0.2 Nm | 258 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| A-max 26 | 126-132 | GP 32, 0.75 - 6.0 Nm | 259-264 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| A-max 26 | 126-132 | GS 38, 0.1 - 0.6 Nm | 269 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| A-max 26 | 126-132 | GP 32 S | 286-288 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| RE-max 29 | 155-158 | | | | | 53.5 | 53.5 | 53.5 | 53.5 | 53.5 |
| RE-max 29 | 155-158 | GP 32, 0.75 - 6.0 Nm | 260-264 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| RE-max 29 | 155-158 | GP 32 S | 286-288 | | | ● | ● | ● | ● | ● |
| EC-max 30, 40 W | 192 | | | | | | | 54.2 | | 54.2 |
| EC-max 30, 40 W | 192 | GP 32, 1 - 8.0 Nm | 264/266 | | | | | ● | | ● |
| EC-max 30, 40 W | 192 | KD 32, 1.0 - 4.5 Nm | 268 | | | | | ● | | ● |
| EC-max 30, 40 W | 192 | GP 32 S | 286-288 | | | | | ● | | ● |
| EC-max 30, 60 W | 193 | | | | | | | 76.2 | | 76.2 |
| EC-max 30, 60 W | 193 | GP 32, 8 Nm | 266 | | | | | ● | | ● |
| EC-max 30, 60 W | 193 | KD 32, 1.0 - 4.5 Nm | 268 | | | | | ● | | ● |
| EC-max 30, 60 W | 193 | GP 42, 3 - 15 Nm | 271 | | | | | ● | | ● |
| EC-4pole 30 | 201 | | | | | | | 59.2 | | 59.2 |
| EC-4pole 30 | 201 | GP 32, 4.0 - 8.0 Nm | 266 | | | | | ● | | ● |
| EC-4pole 30 | 201 | GP 42, 3 - 15 Nm | 271 | | | | | ● | | ● |
| EC-4pole 30 | 202 | | | | | | | 76.2 | | 76.2 |
| EC-4pole 30 | 202 | GP 32, 4.0 - 8.0 Nm | 266 | | | | | ● | | ● |
| EC-4pole 30 | 202 | GP 42, 3 - 15 Nm | 271 | | | | | ● | | ● |

| Technical Data | |
|---|-----------------------------|
| Supply voltage V_{CC} | 5 V \pm 5% |
| Output signal | TTL compatible |
| Phase shift ϕ | 90°e \pm 45°e |
| Index pulse width | 90°e \pm 45°e |
| Operating temperature range | -25...+85°C |
| Moment of inertia of code wheel | \leq 0.7 gcm ² |
| Output current per channel | max. 5 mA |
| The index signal I is synchronised with channel A or B. | |



2 Specifications

2.1 Technical Data

| ESCON 36/2 DC (403112) | | |
|-----------------------------|---|--|
| Electrical Rating | Nominal operating voltage $+V_{CC}$ | 10...36 VDC |
| | Absolute operating voltage $+V_{CC\ min} / +V_{CC\ max}$ | 8 VDC / 38 VDC |
| | Output voltage (max.) | $0.98 \times +V_{CC}$ |
| | Output current I_{cont} / I_{max} (<60 s) | 2 A / 4 A |
| | Pulse Width Modulation frequency | 53.6 kHz |
| | Sampling rate PI current controller | 53.6 kHz |
| | Sampling rate PI speed controller | 5.36 kHz |
| | Max. efficiency | 95% |
| | Max. speed | limited by max. permissible speed (motor) and max. output voltage (controller) |
| | Built-in motor choke | 300 μ H; 2 A |
| Inputs & Outputs | Analog Input 1 Analog Input 2 | resolution 12-bit; $-10...+10$ V; differential |
| | Analog Output 1 Analog Output 2 | resolution 12-bit; $-4...+4$ V; referenced to GND |
| | Digital Input 1 Digital Input 2 | $+2.4...+36$ VDC ($R_i = 38.5$ k Ω) |
| | Digital Input/Output 3 Digital Input/Output 4 | $+2.4...+36$ VDC ($R_i = 38.5$ k Ω) / max. 36 VDC ($I_L < 500$ mA) |
| | Encoder signals | A, A \backslash , B, B \backslash , (max. 1 MHz) |
| Voltage Outputs | Auxiliary output voltage | +5 VDC ($I_L \leq 40$ mA) |
| | Encoder supply voltage | +5 VDC ($I_L \leq 70$ mA) |
| Potentiometer | Potentiometer P1 (on board) | 210°; linear |
| Motor Connections | + Motor | |
| | - Motor | |
| Interface | USB 2.0 | full speed (12 Mbit/s) |
| Status Indicators | Operation | green LED |
| | Error | red LED |
| Physical | Weight | approx. 30 g |
| | Dimensions (L x W x H) | 55 x 40 x 16.1 mm |
| | Mounting holes | for M2.5 screws |

| ESCON 36/2 DC (403112) | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Environmental Conditions | Temperature | Operation | -30...+45°C |
| | | Extended range *1) | +45...+81°C Derating: -0.056 A/°C |
| | | Storage | -40...+85°C |
| | Humidity | 20...80% (condensation not permitted) | |

Remark: *1) Operation within the extended temperature range is permitted. However, a respective derating (declination of max. output current) as to the stated value will apply.

Table 2-4 Technical Data

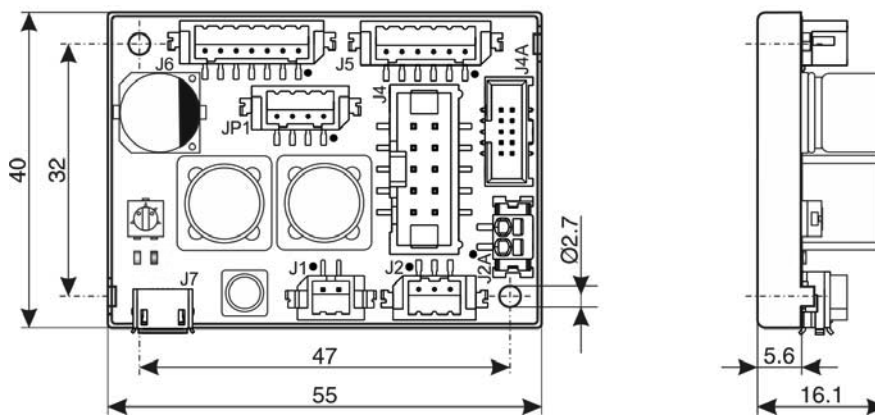


Figure 2-1 Dimensional Drawing [mm]



DM6814HR

Quadrature Encoder Input DAQ Module

Operating Temperature -40° to +85°C

Key Features

- PC/104 form factor with stackable ISA bus
- Three quadrature encoder diode protected inputs for rotary or linear position encoders
- AT-bus interface on DM6814ER
- Six bit-programmable digital I/O lines
- Jumper-selectable hardware interrupt 6814:
 - IRQ 2/9, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 14, 15
- Twelve input-only digital lines
- Three 16-bit timer/counters, on-board 8 MHz clock
- Pull-up/pull-down resistors on each bit or each port
- Mating Connectors
 - Two Standard 50-pin 0.1" DIL headers

Software

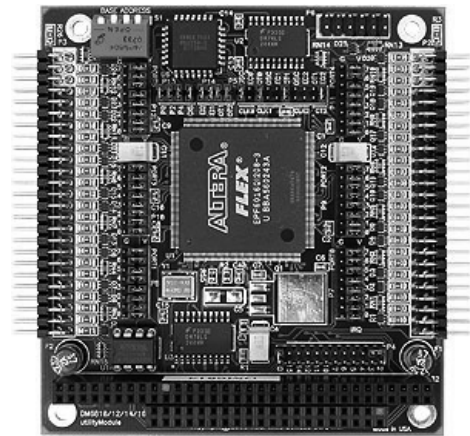
- Includes software packages for the following Operating Systems:
 - DOS
 - Windows 98, NT4.0, 2000, XP/XPe
 - Linux 2.4.x and 2.6.x
- Source code provided for easy porting to other platforms, including RTOSes
- Data acquisition toolkits such as LabVIEW and MATLAB may be used with the Windows drivers
- Example programs with source code provide a starting point for developing custom applications

Recommended Accessories

- XT50: 3 foot, 50-pin, twisted-pair cable
- TB50: 50-pin screw terminal board
- XB50: 50-pin screw terminal board with prototyping area

Physical Attributes

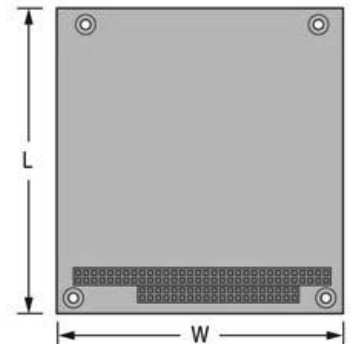
- Dimensions
 - Length (L): 3.775 inches (95.89 mm)
 - Width (W): 3.550 inches (90.17 mm)
 - Stand-off Height: 0.600 inches (15.24 mm)
- Weight: Approximately 0.22 lbs. (0.10 Kg)
- Standard Operating Temperature, 90% humidity non-condensing: -40 to +85°C
- Storage Temperature: -55 to +125°C
- MTBF: 4,957,167 hours
- Power Requirements: 1.19 W @ 5 VDC typical



DM6814 Quadrature Encoder dataModule

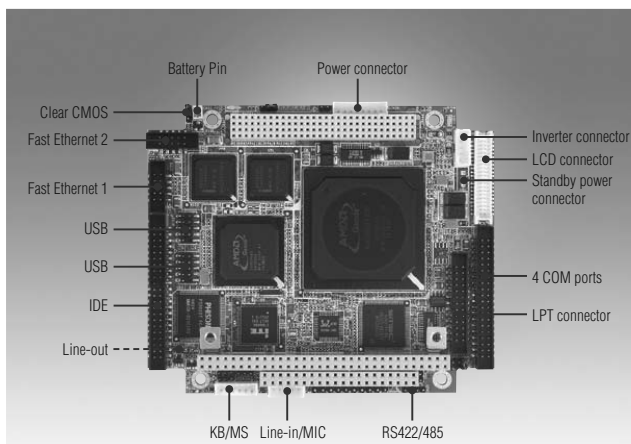


Rugged IDAN configurations available



PCM-4153

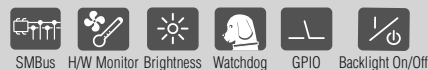
AMD LX800 PC/104-Plus SBC, Onboard Memory/Flash, VGA, TTL, Extended Temp. -40 ~ 85° C



Features

- AMD low power LX800 500 MHz processor
- Supports extended temperature range -40 ~ 85° C
- PC/104-plus expansion
- Onboard 1 GB Flash and onboard DDR 333MHz 512 MB memory
- Supports SUSIAccess and Embedded Software APIs

Software APIs:



Utilities:



Specifications

| | | |
|--------------------------|--------------------------------------|---|
| Processor System | CPU | AMD Geode™ LX800, 500 MHz |
| | Frequency | 500 MHz |
| | L2 Cache | 128 KB |
| | System Chipset | AMD Geode LX800, with AMD CS5536 |
| | BIOS | Award 4-Mbit |
| Memory | Technology | DDR 333 MHz |
| | Max. Capacity | 512 MB |
| | Onboard memory | 512 MB |
| Display | Chipset | AMD Geode LX800 |
| | VRAM | Optimized Shared Memory Architecture up to 64 MB system memory |
| | VGA | Supports up to 1920 x 1440 x 32 bpp at 85 Hz Supports up to 1600 x 1200 x 32 bpp at 100 Hz |
| | TTL LCD | Supports up to 1600 x 1200 x 32 bpp at 60 Hz for 24-bit single channel TFT |
| | Dual Display | VGA+TTL |
| Ethernet | Speed | 10/100 Mbps |
| | Controller | Fast Ethernet1: Intel 82551ER Fast Ethernet2: Intel 82551ER |
| | Connector | Box Header |
| Audio | Chipset | Realtek ALC203 |
| Watchdog Timer | | Output System Reset Programmable counter from 1 ~ 255 minutes/ seconds |
| Storage | PATA | 1 Channel |
| | Onboard Flash | 1 GB |
| | Floppy | 1, 82077AA compatible (transfer from LPT, available by custom BIOS) |
| Internal I/O | USB | 4 x USB 2.0 |
| | Serial | 3 RS-232 from COM1/3/4, 1 RS-232/422/485 from COM2 (ESD protection for RS-232: Air gap ±15kV, Contact ±8kV) |
| | Parallel (LPT) | 1, IEEE 1284, EPP, and ECP compatible (FDD mode supported) |
| | SMBus | 1 |
| | Keyboard/Mouse | 1 |
| | GPIO | 8-bit general purpose input/output |
| Expansion | PC/104-Plus Slot | 1 |
| Power | Power Type | AT |
| | Power Supply Voltage | 5V ± 5% only to boot up (12 V is optional for LCD inverter and add on card) |
| | Power Consumption (Typical) | 1.35 A @ +5 V, 0.1 A @ +12 V (7.95 Watts) |
| | Power Consumption (Max, test in HCT) | 1.51 A @ +5 V, 0.1 A @ +12 V (8.75 Watts) |
| | Power Management | ACPI/APM1.2 |
| Environment | Operational | 0 ~ 60° C (32 ~ 140° F) (Operational humidity: 40° C @ 85% RH non-condensing) |
| | Non-Operational | -40° C ~ 85° C and 60° C @ 95% RH non-condensing |
| Physical Characteristics | Dimensions (L x W) | 96 x 115 mm (3.8" x 4.5") |
| | Weight | 0.574 kg (1.26 lb) (with heat-sink) |
| | Height | Top side: 11.45 mm; Bottom side: 10.6 mm |

Παράρτημα Β: Κατάλογος αγορών

| Supplier | Part Number | Part Name | Qty | Unit Price |
|-------------|------------------------------------|---|-----|-------------------|
| Maxon Motor | 403112 | ESCON 36/2 DC, 4-Q Servocontroller, 10-36V, 2/4A | 2 | 116.32 € |
| | 118746 | RE 25 Ø25 mm, Precious Metal Brushes CLL, 10 Watt | 2 | 185.42 € |
| | 166173 | Planetary Gearhead GP 32 A Ø32 mm, 0.75 - 4.5 Nm, Metal | 2 | 143.69 € |
| | 225780 | Encoder MR, Type ML, 1000 CPT, 3 Channels, Line Driver | 2 | 75.19 € |
| Misumi | HTUN396S2M-60 | High Torque Timing Belts - S2M Type | 1 | 4.70 € |
| | HTUN112S2M-60 | High Torque Timing Belts - S2M Type | 1 | 3.70 € |
| | HTPA15S2M060-A-H3 | High Torque Timing Pulleys S2M Type | 4 | 11.37 € |
| | FL683ZZ | Small/Deep Groove/Double Shielded with Flange | 1 | 4.60 € |
| | SCTN3 | Shaft Collars - Set Screw | 1 | 2.20 € |
| | PSFRRA3-35.0-B2-S2-WFC3-J5-V5-W12 | Rotary Shafts - Retaining Ring Grooves on Both Ends | 1 | 15.20 € |
| | PSFRRA3-44.4-B19-S19-WFC9-J5-V5-W3 | Rotary Shafts - Retaining Ring Grooves on Both Ends | 1 | 15.20 € |
| | SFR2-50 | Rotary Shafts - Straight | 2 | 8.16 € |
| Iigus | GSM-0304-03 | iglidur® G: The all-rounder | 4 | 3.50 € |
| | GFM-0304-03 | iglidur® G: The all-rounder | 1 | 4.60 € |
| | GFM-0304-02 | iglidur® G: The all-rounder | 1 | 4.60 € |
| | SN75175 | Quadruple Diff Line Receiver | 2 | 2.26 € |
| | | | | 1,176.36 € |

* Για έναν βραχίονα

Παράρτημα Γ: Πίνακες M , C και J_{act} της εξίσωσης Lagrange

Για ονοματολογία μεγεθών βλέπε Κεφάλαιο 3.2.2

$$\text{Πίνακας μάζας-αδράνειας } M = \begin{bmatrix} M_{11} & \mathbf{L} & M_{17} \\ \mathbf{M} & \mathbf{O} & \\ M_{71} & & M_{77} \end{bmatrix}$$

```

M11 = 2*(m1+m2)+mB;
M12 = 0;
M13 = (m1+m2)*r1*sin(dBa-θ)+ac1*m1*sin(da1-q21-θ)+m1*(2*aB*sin(dB+θ)...
-r1*sin(dBa+θ)-ac1*sin(da1+q11+θ))-m2*(-2*aB*sin(dB+θ)...
+r1*sin(dBa+θ)+ac2*(-sin(da2-q21-q22-θ)+sin(da2+q11+q12+θ))...
+a1*(sin(q11+θ)+sin(q21+θ)));
M14 = -ac1*m1*sin(da1+q11+θ)-m2*(a1*sin(q11+θ)+ac2*sin(da2+q11+q12+θ));
M15 = -ac2*m2*sin(da2+q11+q12+θ);
M16 = ac1*m1*sin(da1-q21-θ)+ac2*m2*sin(da2-q21-q22-θ)-a1*m2*sin(q21+θ);
M17 = ac2*m2*sin(da2-q21-q22-θ);
%
M21 = 0;
M22 = 2*(m1+m2)+mB;
M23 = (m1+m2)*r1*cos(dBa-θ)+ac1*m1*cos(da1-q21-θ)+m1*(-2*aB*cos(dB+θ)...
+r1*cos(dBa+θ)+ac1*cos(da1+q11+θ))+m2*(-2*aB*cos(dB+θ)...
+r1*cos(dBa+θ)+ac2*(cos(da2-q21-q22-θ)+cos(da2+q11+q12+θ))...
+a1*(cos(q11+θ)+cos(q21+θ)));
M24 = a1*m2*cos(q11+θ)+ac1*m1*cos(da1+q11+θ)+ac2*m2*cos(da2+q11+q12+θ);
M25 = ac2*m2*cos(da2+q11+q12+θ);
M26 = ac1*m1*cos(da1-q21-θ)+ac2*m2*cos(da2-q21-q22-θ)+a1*m2*cos(q21+θ);
M27 = ac2*m2*cos(da2-q21-q22-θ);
%
M31 = (m1+m2)*r1*sin(dBa-θ)+ac1*m1*sin(da1-q21-θ)+m1*(2*aB*sin(dB+θ)...
-r1*sin(dBa+θ)-ac1*sin(da1+q11+θ))-m2*(-2*aB*sin(dB+θ)...
+r1*sin(dBa+θ)+ac2*(-sin(da2-q21-q22-θ)+sin(da2+q11+q12+θ))...
+a1*(sin(q11+θ)+sin(q21+θ)));
M32 = (m1+m2)*r1*cos(dBa-θ)+ac1*m1*cos(da1-q21-θ)+m1*(-2*aB*cos(dB+θ)...
+r1*cos(dBa+θ)+ac1*cos(da1+q11+θ))+m2*(-2*aB*cos(dB+θ)...
+r1*cos(dBa+θ)+ac2*(cos(da2-q21-q22-θ)+cos(da2+q11+q12+θ))...
+a1*(cos(q11+θ)+cos(q21+θ)));
M33 = 2*I1+2*I2+IB+2*(ac1^2*m1+(a1^2+ac2^2)*m2+aB^2*(m1+m2)+(m1+m2)...
*r1^2)-2*(aB*(m1+m2)*r1*cos(dB-dBa)+aB*(m1+m2)*r1*cos(dB+dBa)+a1*...
aB*m2*cos(dB-q11)-a1*m2*r1*cos(dBa-q11)+aB*ac1*m1*cos(da1-dB+q11)...
-ac1*m1*r1*cos(da1-dBa+q11)-a1*ac2*m2*cos(da2+q12)+aB*ac2*m2...
*cos(da2-dB+q11+q12)-ac2*m2*r1*cos(da2-dBa+q11+q12)+a1*aB*m2...
*cos(dB-q21)+aB*ac1*m1*cos(da1+dB-q21)-ac1*m1*r1*cos(da1-dBa-q21)...
-a1*m2*r1*cos(dBa+q21)-a1*ac2*m2*cos(da2-q22)+aB*ac2*m2...
*cos(da2+dB-q21-q22)-ac2*m2*r1*cos(da2-dBa-q21-q22));
M34 = I1+I2+ac1^2*m1+(a1^2+ac2^2)*m2-a1*aB*m2*cos(dB-q11)+a1*m2*r1...
*cos(dBa-q11)-aB*ac1*m1*cos(da1-dB+q11)+ac1*m1*r1*cos(da1-dBa+q11)...
+2*a1*ac2*m2*cos(da2+q12)-aB*ac2*m2*cos(da2-dB+q11+q12)...
+ac2*m2*r1*cos(da2-dBa+q11+q12);
M35 = I2+ac2^2*m2+ac2*m2*(a1*cos(da2+q12)-aB*cos(da2-dB+q11+q12)...
+r1*cos(da2-dBa+q11+q12));
M36 = I1+I2+ac1^2*m1+(a1^2+ac2^2)*m2-a1*aB*m2*cos(dB-q21)-aB*ac1*m1...
*cos(da1+dB-q21)+ac1*m1*r1*cos(da1-dBa-q21)+a1*m2*r1*cos(dBa+q21)...
+2*a1*ac2*m2*cos(da2-q22)-aB*ac2*m2*cos(da2+dB-q21-q22)...
+ac2*m2*r1*cos(da2-dBa-q21-q22);

```

```

M37 = I2+ac2^2*m2+ac2*m2*(a1*cos(da2-q22)-aB*cos(da2+dB-q21-q22)...
+r1*cos(da2-dBa-q21-q22));
%
M41 = -ac1*m1*sin(da1+q11+θ)-m2*(a1*sin(q11+θ)+ac2*sin(da2+q11+q12+θ));
M42 = a1*m2*cos(q11+θ)+ac1*m1*cos(da1+q11+θ)+ac2*m2*cos(da2+q11+q12+θ);
M43 = I1+I2+ac1^2*m1+(a1^2+ac2^2)*m2-a1*aB*m2*cos(dB-q11)+a1*m2*r1...
*cos(dBa-q11)-aB*ac1*m1*cos(da1-dB+q11)+ac1*m1*r1*cos(da1-dBa+q11)...
+2*a1*ac2*m2*cos(da2+q12)-aB*ac2*m2*cos(da2-dB+q11+q12)...
+ac2*m2*r1*cos(da2-dBa+q11+q12);
M44 = I1+I2+It+ac1^2*m1+(a1^2+ac2^2)*m2+2*Ima*n^2+2*a1*ac2*m2*cos(da2+q12);
M45 = I2+It+ac2^2*m2+Ima*n^2+a1*ac2*m2*cos(da2+q12);
M46 = 0;
M47 = 0;
%
M51 = -ac2*m2*sin(da2+q11+q12+θ);
M52 = ac2*m2*cos(da2+q11+q12+θ);
M53 = I2+ac2^2*m2+ac2*m2*(a1*cos(da2+q12)-aB*cos(da2-dB+q11+q12)...
+r1*cos(da2-dBa+q11+q12));
M54 = I2+It+ac2^2*m2+Ima*n^2+a1*ac2*m2*cos(da2+q12);
M55 = I2+It+ac2^2*m2+Ima*n^2;
M56 = 0;
M57 = 0;
%
M61 = ac1*m1*sin(da1-q21-θ)+ac2*m2*sin(da2-q21-q22-θ)-a1*m2*sin(q21+θ);
M62 = ac1*m1*cos(da1-q21-θ)+ac2*m2*cos(da2-q21-q22-θ)+a1*m2*cos(q21+θ);
M63 = I1+I2+ac1^2*m1+(a1^2+ac2^2)*m2-a1*aB*m2*cos(dB-q21)-aB*ac1*m1...
*cos(da1+dB-q21)+ac1*m1*r1*cos(da1-dBa-q21)+a1*m2*r1*cos(dBa+q21)...
+2*a1*ac2*m2*cos(da2-q22)-aB*ac2*m2*cos(da2+dB-q21-q22)...
+ac2*m2*r1*cos(da2-dBa-q21-q22);
M64 = 0;
M65 = 0;
M66 = I1+I2+It+ac1^2*m1+(a1^2+ac2^2)*m2+2*Ima*n^2+2*a1*ac2*m2*cos(da2-q22);
M67 = I2+It+ac2^2*m2+Ima*n^2+a1*ac2*m2*cos(da2-q22);
%
M71 = ac2*m2*sin(da2-q21-q22-θ);
M72 = ac2*m2*cos(da2-q21-q22-θ);
M73 = I2+ac2^2*m2+ac2*m2*(a1*cos(da2-q22)-aB*cos(da2+dB-q21-q22)...
+r1*cos(da2-dBa-q21-q22));
M74 = 0;
M75 = 0;
M76 = I2+It+ac2^2*m2+Ima*n^2+a1*ac2*m2*cos(da2-q22);
M77 = I2+It+ac2^2*m2+Ima*n^2;

```

Πίνακας μη γραμμικών όρων $C = \begin{bmatrix} C_1 \\ \mathbf{M} \\ C_7 \end{bmatrix}$

```
C1 = -(a1*m2*cos(q11+θ)+ac1*m1*cos(da1+q11+θ)+ac2*m2*cos(da2+q11+q12+θ))...
*q11_dot^2-ac1*m1*cos(da1-q21-θ)*q21_dot^2+m2*(-ac2...
*cos(da2+q11+q12+θ)*q12_dot^2-a1*cos(q21+θ)*q21_dot^2-ac2*cos(q22)...
*cos(da2-q21-θ)*(q21_dot+q22_dot)^2-ac2*sin(q22)*sin(da2-q21-θ)...
*(q21_dot+q22_dot)^2)-2*(ac2*m2*cos(da2+q11+q12+θ)*q12_dot+(ac1*m1...
*cos(da1-q21-θ)+ac2*m2*cos(da2-q21-q22-θ)+a1*m2*cos(q21+θ))*q21_dot...
+ac2*m2*cos(da2-q21-q22-θ)*q22_dot)*θ_dot-((m1+m2)*r1*cos(dBa-θ)...
+ac1*m1*cos(da1-q21-θ)+m1*(-2*aB*cos(dB+θ)+r1*cos(dBa+θ)+ac1...
*cos(da1+q11+θ))+m2*(-2*aB*cos(dB+θ)+r1*cos(dBa+θ)+ac2...
*(cos(da2-q21-q22-θ)+cos(da2+q11+q12+θ))+a1*(cos(q11+θ)...
+cos(q21+θ)))*θ_dot^2+2*q11_dot*(-ac2*m2*cos(da2+q11+q12+θ)...
*q12_dot-(a1*m2*cos(q11+θ)+ac1*m1*cos(da1+q11+θ))...
+ac2*m2*cos(da2+q11+q12+θ))*θ_dot);
```

```
%
C2 = -(a1*m2*sin(q11+θ)+ac1*m1*sin(da1+q11+θ)+ac2*m2*sin(da2+q11+q12+θ))...
*q11_dot^2+ac1*m1*sin(da1-q21-θ)*q21_dot^2+m2*(-ac2...
*sin(da2+q11+q12+θ)*q12_dot^2-a1*sin(q21+θ)*q21_dot^2-ac2...
*cos(da2-q21-θ)*sin(q22)*(q21_dot+q22_dot)^2+ac2*cos(q22)...
*sin(da2-q21-θ)*(q21_dot+q22_dot)^2)+2*(-ac2*m2*sin(da2+q11+q12+θ)...
*q12_dot+(ac1*m1*sin(da1-q21-θ)+ac2*m2*sin(da2-q21-q22-θ)-a1*m2...
*sin(q21+θ))*q21_dot+ac2*m2*sin(da2-q21-q22-θ)*q22_dot)*θ_dot...
-((-m1+m2)*r1*sin(dBa-θ)-ac1*m1*sin(da1-q21-θ)+m1*(-2*aB*sin(dB+θ)...
+r1*sin(dBa+θ)+ac1*sin(da1+q11+θ))+m2*(-2*aB*sin(dB+θ)...
+r1*sin(dBa+θ)+ac2*(-sin(da2-q21-q22-θ)+sin(da2+q11+q12+θ))...
+a1*(sin(q11+θ)+sin(q21+θ)))*θ_dot^2+2*q11_dot*(-ac2*m2...
*sin(da2+q11+q12+θ)*q12_dot-(a1*m2*sin(q11+θ)+ac1*m1*sin(da1+q11+θ))...
+ac2*m2*sin(da2+q11+q12+θ))*θ_dot);
```

```
%
C3 = (-a1*aB*m2*sin(dB-q11)+a1*m2*r1*sin(dBa-q11)+aB*ac1*m1...
*sin(da1-dB+q11)+aB*ac2*m2*sin(da2-dB+q11+q12)-r1*(ac1*m1...
*sin(da1-dBa+q11)+ac2*m2*sin(da2-dBa+q11+q12))*q11_dot^2-2*ac2*m2...
*(a1*sin(da2+q12)-aB*sin(da2-dB+q11+q12)+r1*sin(da2-dBa+q11+q12))...
*q11_dot*q12_dot-ac2*m2*(a1*sin(da2+q12)-aB*sin(da2-dB+q11+q12)+r1...
*sin(da2-dBa+q11+q12))*q12_dot^2-a1*aB*m2*sin(dB-q21)*q21_dot^2-aB...
*ac1*m1*sin(da1+dB-q21)*q21_dot^2+ac1*m1*r1*sin(da1-dBa-q21)...
*q21_dot^2-a1*m2*r1*sin(dBa+q21)*q21_dot^2-aB*ac2*m2...
*sin(da2+dB-q21-q22)*q21_dot^2+ac2*m2*r1*sin(da2-dBa-q21-q22)...
*q21_dot^2+2*a1*ac2*m2*sin(da2-q22)*q21_dot*q22_dot-2*aB*ac2*m2...
*sin(da2+dB-q21-q22)*q21_dot*q22_dot+2*ac2*m2*r1*sin(da2-dBa-q21...
-q22)*q21_dot*q22_dot+a1*ac2*m2*sin(da2-q22)*q22_dot^2-aB*ac2*m2...
*sin(da2+dB-q21-q22)*q22_dot^2+ac2*m2*r1*sin(da2-dBa-q21-q22)...
*q22_dot^2-2*((a1*aB*m2*sin(dB-q11)-a1*m2*r1*sin(dBa-q11)-aB*ac1*m1...
*sin(da1-dB+q11)+ac1*m1*r1*sin(da1-dBa+q11)-aB*ac2*m2...
*sin(da2-dB+q11+q12)+ac2*m2*r1*sin(da2-dBa+q11+q12))*q11_dot+ac2*m2...
*(a1*sin(da2+q12)-aB*sin(da2-dB+q11+q12)+r1*sin(da2-dBa+q11+q12))...
*q12_dot+(a1*aB*m2*sin(dB-q21)+aB*ac1*m1*sin(da1+dB-q21)-ac1*m1*r1...
*sin(da1-dBa-q21)+a1*m2*r1*sin(dBa+q21)+aB*ac2*m2...
*sin(da2+dB-q21-q22)-ac2*m2*r1*sin(da2-dBa-q21-q22))*q21_dot+ac2*m2...
```

```

* (-a1*sin (da2-q22) +aB*sin (da2+dB-q21-q22) ...
-r1*sin (da2-dBa-q21-q22)) *q22_dot) *theta_dot;
%
C4 = -a1*ac2*m2*sin (da2+q12) *q12_dot*(2*q11_dot+q12_dot)-2*a1*ac2*m2...
*sin (da2+q12) *q12_dot*theta_dot+(a1*aB*m2*sin (dB-q11)-a1*m2*r1...
*sin (dBa-q11)-aB*ac1*m1*r1*sin (da1-dB+q11)+ac1*m1*r1*sin (da1-dBa+q11) ...
-aB*ac2*m2*sin (da2-dB+q11+q12)+ac2*m2*r1*sin (da2-dBa+q11+q12)) *theta_dot^2
%
C5 = ac2*m2*(a1*sin (da2+q12) *q11_dot^2+2*a1*sin (da2+q12) *q11_dot*theta_dot...
+(a1*sin (da2+q12)-aB*sin (da2-dB+q11+q12) ...
+r1*sin (da2-dBa+q11+q12)) *theta_dot^2);
%
C6 = a1*ac2*m2*sin (da2-q22) *q22_dot*(2*q21_dot+q22_dot)+2*a1*ac2*m2...
*sin (da2-q22) *q22_dot*theta_dot+(a1*aB*m2*sin (dB-q21)+aB*ac1*m1...
*sin (da1+dB-q21)-ac1*m1*r1*sin (da1-dBa-q21)+a1*m2*r1*sin (dBa+q21) ...
+aB*ac2*m2*sin (da2+dB-q21-q22)-ac2*m2*r1*sin (da2-dBa-q21-q22)) *theta_dot^2
%
C7 = -ac2*m2*(a1*sin (da2-q22) *q21_dot^2+2*a1*sin (da2-q22) *q21_dot*theta_dot...
+(a1*sin (da2-q22)-aB*sin (da2+dB-q21-q22) ...
+r1*sin (da2-dBa-q21-q22)) *theta_dot^2);

```


Πίνακας $J_{act} = \begin{bmatrix} J_{1,1} & \cdots & J_{1,11} \\ \vdots & \ddots & \\ J_{7,1} & & J_{7,11} \end{bmatrix} = [J_1 \quad \cdots \quad J_{11}]$

$$J_1 = \begin{bmatrix} -\sin(\theta+120^\circ) \\ \cos(\theta+120^\circ) \\ -a_B \sin(d_B) \sin(\theta+120^\circ) - a_B \cos(d_B) \cos(\theta+120^\circ) + r_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} \sin(\theta+120^\circ) \\ -\cos(\theta+120^\circ) \\ a_B \sin(d_B) \sin(\theta+120^\circ) + a_B \cos(d_B) \cos(\theta+120^\circ) - r_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \\ -a_B \sin(d_B) \sin(\theta) - a_B \cos(d_B) \cos(\theta) + r_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \\ a_B \sin(d_B) \sin(\theta) + a_B \cos(d_B) \cos(\theta) - r_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_5 = \begin{bmatrix} \sin(120^\circ - \theta) \\ \cos(120^\circ - \theta) \\ a_B \sin(d_B) \sin(120^\circ - \theta) - a_B \cos(d_B) \cos(120^\circ - \theta) + r_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_6 = \begin{bmatrix} -\sin(120^\circ - \theta) \\ -\cos(120^\circ - \theta) \\ -a_B \sin(d_B) \sin(120^\circ - \theta) + a_B \cos(d_B) \cos(120^\circ - \theta) - r_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_7 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -n_m \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad J_8 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ n \cdot \eta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad J_9 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ n \cdot \eta \\ n \cdot \eta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad J_{10} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ n \cdot \eta \\ 0 \end{bmatrix} \quad J_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ n \cdot \eta \\ n \cdot \eta \end{bmatrix}$$

Παράρτημα Δ: Τιμές παραμέτρων στα πειράματα

Η ονοματολογία είναι σε συμφωνία με το Κεφάλαιο 3.2.2

- $m_B = 10.213Kg$
- $I_B = 0.1312kgm^2$
- $a_B = 0mm$
- $d_B = 0^\circ$
- $d_{Ba} = 0^\circ$
- $R_1 = 150mm$
- $m_1 = 0.086kg$
- $m_2 = 0.079kg$
- $I_1 = 2e - 4kgm^2$
- $I_2 = 2e - 4kgm^2$
- $a_1 = 180mm$
- $a_2 = 130mm$
- $a_{c1} = 90mm$
- $a_{c2} = 65mm$
- $d_{a1} = 3^\circ$
- $d_{a2} = 2^\circ$
- $I_{ma} = 11.2e - 7kgm^2$
- $I_t = 1e - 5kgm^2$
- $n = 12167 / 64$
- $\eta \simeq 0.7$