



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

Διπλωματική Εργασία

**Επανασχεδιασμός και κατασκευή υποσυστημάτων ρομπότ διαστημικού
εξομοιωτή με πειραματική επιβεβαίωση**

Νικόλαος Μαυρίκης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2019

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον επανασχεδιασμό και κατασκευή μηχανολογικών, ηλεκτρονικών και πνευματικών υποσυστημάτων σε ρομπότ επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή, με σκοπό να αποκτήσει την ικανότητα να συλλαμβάνει και να μετακινεί αντικείμενα. Ο εξομοιωτής βρίσκεται στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και αποτελείται από μία τράπεζα γρανίτη αμελητέας τραχύτητας πάνω στην οποία αιωρούνται, χάρη σε αεροέδρανα, τρία ρομπότ. Ένα παθητικό ρομπότ, το οποίο ακολουθεί τυχαίες τροχιές και δύο ρομπότ των οποίων η κίνηση είναι ελεγχόμενη λόγω της χρήσης 6 προωθητήρων και ενός σφονδύλου αντίδρασης. Λόγω της χρήσης μπαταριών και φιαλών διοξειδίου του άνθρακα, η τροφοδοσία των ηλεκτρικών και πνευματικών συστημάτων των ρομπότ γίνεται αυτόνομα. Στη γενική περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος είναι σημαντικό να αναφερθεί και η εγκατάσταση καμερών που παρακολουθούν διόδους εκπομπής φωτός στις οροφές των ρομπότ και γνωστοποιούν τη θέση τους στο χώρο.

Αρχικά, η εργασία αυτή αφορά το δεύτερο κατά σειρά ενεργητικό ρομπότ. Κατά την εκπόνηση της εργασίας πραγματοποιήθηκε η κατασκευή του δεύτερου βραχίονα του ρομπότ σε μηχάνημα CNC, η προσθήκη αρπάγης στους βραχίονες και η προσθήκη των απαραίτητων αισθητήρων (Hall Sensors και Force Sensitive Resistors) για τη λειτουργία των βραχιόνων. Επίσης, μελετηθήκαν οι διάφορες αποδόσεις του πνευματικού συστήματος του ρομπότ, ώστε να αποκτηθεί μια ευρύτερη γνώση της λειτουργίας των διαφόρων εξαρτημάτων του συστήματος καθώς και να βελτιωθούν τα μειονεκτήματά του.

Εφόσον εξηγηθούν η χρήση των παραπάνω και η τοποθέτησή τους στο σύστημα, καθίσταται δεδομένη η ικανότητα του ρομπότ να συλλάβει κάτι. Οπότε, για τη δοκιμή όλων των εξαρτημάτων και για να επαληθευθεί, ότι έχει αποδοθεί στο ρομπότ η επιθυμητή ικανότητα, πραγματοποιείται πείραμα, κατά το οποίο το ρομπότ συλλαμβάνει το παθητικό ρομπότ σύμφωνα με τροχιά.

Παρόλα αυτά οι κινήσεις των αρθρώσεων των βραχιόνων λόγω της έλλειψης τριβής στην κίνηση του ρομπότ πάνω στην τράπεζα γρανίτη επηρεάζουν τη θέση και τον προσανατολισμό της βάσης του. Για να πραγματοποιηθεί το πείραμα της εργασίας, μελετήθηκε η επιρροή των κινήσεων των αρθρώσεων στη βάση του ρομπότ και αναπτύχθηκε η μέθοδος υπολογισμού του χώρου εργασίας ενός ρομπότ που η κίνηση του στο επίπεδο πραγματοποιείται υπό συνθήκες μηδενικής τριβής.

Abstract

This diploma thesis addresses the redesign and addition of mechanical, electronic and pneumatic components on a space emulator robot, which allows the active robot to catch a passive and move it as desired. The emulator is located in the Control Systems Lab of the School of Mechanical Engineering of National Technical University of Athens and it is consisted of a granite table of negligible roughness, on which, thanks to the use of air bearings, three robots float on: a passive robot, which follows random trajectories and two robots, whose movement is controlled by six thrusters and one reaction wheel. Due to the use of batteries and carbon dioxide tanks, the power supply of the electric and pneumatic systems is autonomous. For system operation, feedback regarding the position and orientation of the robots is provided by an 8-camera Motion Capture system.

Firstly, this thesis is concerned with the active robot, that was manufactured last. During the elaboration of the thesis, the manufacture of the second arm of the robot with a CNC machine, the installation of grippers on the manipulators and the installation of sensors (Hall Sensors and Force Sensitive Resistors) for the operation of the arms and grippers took place. Also, the variability of the pneumatic system was studied, so as to acquire a better knowledge of the operation of the system's components and to improve any system shortcomings.

Since the installation of the above items and their use becomes clear, the ability of the robot to grip objects becomes clear too. To test the new components and to verify the capture capability of the robot, an experiment for the manipulator was developed. For the experiment, the robot should grip the passive robot that follows a random trajectory and move it.

Nevertheless, the motion of the joints of the arms have an impact on the position and orientation of the robot's base due to the lack of friction on the granite table. In order for the experiment to take place, the impact of the motion of the joints on the robot's base motion was studied and the calculation method of the workspace of a robot, that moves under zero friction conditions, was studied.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας καθηγητή κ. Ευάγγελο Παπαδόπουλο, που μου έδωσε την ευκαρία να λάβω γνώσεις πρακτικές και θεωρητικές, οι οποίες με το πέρας της εργασίας με οπλίζουν με αυτοπεποίθηση για τους μελλοντικούς χώρους, που θα εργαστώ, καθώς και για την καθοδήγηση που μου έδωσε, της οποίας η σημασία ήταν παραπάνω από κομβική για την εκπόνηση της εργασίας.

Ομοίως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την ομάδα του διαστημικού εξομοιωτή, όλα τα παιδιά που πρόλαβα, που είτε για μεγαλύτερα είτε για μικρότερα χρονικά διαστήματα, όποτε ήταν παρόντες ή παρούσες και τους ζητούσα βοήθεια, η ανταπόκριση τους ήταν άμεση. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Παναγιώτη Μαυρίδη για την άψογη συνεργασία που είχαμε, χάριν στην οποία ο Κηφέας ή το ενεργητικό ρομπότ, όπως αναφέρεται στην εργασία, έφτασε στο σημείο να εκτελεί τα πειράματα που εκπονηθήκαν.

Τέλος, θα αναφερθώ σε άλλα δύο παιδιά από το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου. Όταν ζήτησα από τον Ιώαννη Βάλβη να μου δείξει, αν μπορεί, πως λειτουργεί η μηχανή CNC, καθώς και όταν ζήτησα από τον Γεώργιο Μπολανάκη να μου δείξει το μηχάνημα LPKF και τον 3D εκτυπωτή, δεν περίμενα να αφιερώσουν ολόκληρη μέρα και παραπάνω στο να με βοηθήσουν. Μου δείξαν μέχρι και παραδείγματα στα μηχανήματα αυτά και έπειτα επέβλεπαν πως τα χειρίζομαι έγω για τυχόν απορίες. Τους ευχαριστώ πάρα πολύ, λοιπόν, γιατί χωρίς αυτούς θα είχα καθυστερήσει πάρα πολύ, αλλά κυρίως δε θα είχα μάθει τόσο καλά πως να χειρίζομαι τέτοια μηχανήματα.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	4
Περιεχόμενα	5
Κατάλογος Σχημάτων	7
Κατάλογος Πινάκων	14
1 Εισαγωγή.....	15
1.1 Σκοπός Εργασίας	15
1.2 Ο Εξομοιωτής Διαστήματος του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου	15
1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	19
1.4 Δομή της Εργασίας	19
2 Στοιχεία Θεωρίας	21
2.1 Περίληψη του Κεφαλαίου	21
2.2 Αντίστροφη Κινηματική Βραχίονα $3^{ωv}$ Βαθμών Ελευθερίας Αιωρούμενου Ρομπότ σε Διδιάστατο Χώρο	21
2.3 Αντιστάσεις Σωληνώσεων και Δίκτυα Σωληνώσεων	28
2.4 Κινητήρες	30
2.5 Αισθητήρες.....	32
3 Σχεδιασμός, Κατασκευή Δεύτερου Ρομπωτικού Βραχίονα και Προσθήκη Αρπάγης.....	34
3.1 Περιγραφή του Πρώτου Βραχίονα του Ρομπότ	34
3.2 Επιθυμητές Αλλαγές στα Χαρακτηριστικά του Δεύτερου Βραχίονα	40
3.3 Υλοποίηση των Αλλαγών στο Σχεδιασμό του Δεύτερου Βραχίονα	43
3.4 Κατασκευή Εξαρτημάτων	51
3.5 Συναρμολόγηση Δεύτερου Βραχίονα	52
3.6 Επιθυμητά Χαρακτηριστικά Αρπάγης και Υλοποίησή της	57
3.7 Προσθήκη Αισθητήρων στα Συστήματα των Βραχιόνων και Επίτευξη Συνεργασίας.....	65
4 Χαρακτηριστικά του Πνευματικού Συστήματος του Ρομπότ και Επίτευξη Επιθυμητής Λειτουργίας.....	73
4.1 Το Πνευματικό Σύστημα του Ρομπότ.....	73
4.2 Χαρακτηριστικά του Πνευματικού Συστήματος	80
4.3 Μετρήσεις Δύναμης κάθε Ζεύγους Προωθητήρων για Διαφορετικά PWM.....	83
4.4 Τριβή Τράπεζας Γρανίτη.....	87
4.5 Συμπεράσματα και Λύσεις για την Επιθυμητή Λειτουργία του Συστήματος	92
4.6 Υλοποίηση Λύσεως και Έλεγχος Ορθότητας	94
5 Χώρος Εργασίας του Ρομπότ	100
5.1 Εύρεση Χώρου Εργασίας για Αποφυγή Ιδιομορφιών του Ρομπότ σύμφωνα με τη Θεωρία	100

5.2	Συμπεράσματα	102
5.3	Εύρεση Χώρου Εργασίας για Αποφυγή Ιδιομορφιών για Περιορισμένες Κινήσεις των Αρθρώσεων του Ρομπότ	104
6	Πείραμα.....	108
6.1	Περιγραφή Πειράματος.....	108
6.2	Περιγραφή Ελεγκτή του Ρομπότ και Σχεδιασμός της Επιθυμητής Κίνησης του Ρομπότ	108
6.3	Υλοποίηση Πειράματος.....	110
7	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	138
7.1	Συμπεράσματα	138
7.2	Μελλοντική Εργασία	139
	Βιβλιογραφία.....	140
Παράρτημα Α.	Εγχειρίδια Προδιαγραφών Hardware	142
Παράρτημα Β.	Κώδικες.....	161
Παράρτημα C.	Λήψη Μετρήσεων από τον Αισθητήρα ATI Nano 17.....	179

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1.	Η τράπεζα γρανίτη του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ.	16
Σχήμα 1.2.	Τα δύο ρομπότ του εξομοιωτή πάνω στην τράπεζα γρανίτη. Αριστερά το ενεργητικό και δεξιά το παθητικό.	17
Σχήμα 1.3.	Κάμερα της εταιρείας PhaseSpace.	18
Σχήμα 1.4.	Οι κάμερες της PhaseSpace που περιβάλλουν την τράπεζα γρανίτη.	18
Σχήμα 1.5.	Free Flyers, Stanford University [35].	19
Σχήμα 2.1.	Απεικόνιση των βαρυκεντρικών διανυσμάτων κάθε σώματος ρομποτικού βραχίονα [37].	22
Σχήμα 2.2.	(α) Απαραίτητα γνωστά γεωμετρικά και δυναμικά μεγέθη βραχίονα $3^{ωv}$ βαθμών ελευθερίας αιωρούμενου ρομπότ για την εύρεση χώρου εργασίας. (β) Απεικόνιση των βαρυκεντρικών διανυσμάτων του κινηματικού μοντέλου βραχίονα $3^{ωv}$ βαθμών ελευθερίας αιωρούμενου ρομπότ [42].	22
Σχήμα 2.3.	(α) Απεικόνιση των καμπυλών των σχετικών γωνιών των 2 πρώτων αρθρώσεων δισδιάστατου βραχίονα αιωρούμενου ρομπότ, για τις οποίες προκαλούνται δυναμικές ιδιομορφίες. (β) Οι χώροι εργασίας δισδιάστατου αιωρούμενου ρομπότ [42].	28
Σχήμα 2.4.	Παράδειγμα δικτύου σωληνώσεων [4].	30
Σχήμα 2.5.	Κινητήρας DC με μόνιμο μαγνήτη και ψήκτρες στο στάτορα [28].	31
Σχήμα 2.6.	Απεικόνιση της μετάδοσης κίνησης σε ένα RC servo motor [35].	31
Σχήμα 2.7.	Φαινόμενο κβαντικής σήραγγας [8].	32
Σχήμα 2.8.	Hall Effect Sensor και μαγνήτης [16].	33
Σχήμα 3.1.	Οι κινητήρες του βραχίονα προσδεμένοι στο σύστημα.	34
Σχήμα 3.2.	Τα μέλη του βραχίονα σε ευθεία και απεικόνιση της ικανότητας αναδίπλωσης.	35
Σχήμα 3.3.	Σύστημα μετάδοσης κίνησης για την πρώτη άρθρωση [44].	36
Σχήμα 3.4.	Σύστημα μετάδοσης κίνησης για τη δεύτερη άρθρωση [44].	37
Σχήμα 3.5.	Άξονας που μεταδίδει την κίνηση από την πρώτη τροχαλία στη δεύτερη [44].	37
Σχήμα 3.6.	Σύστημα προέντασης του πρώτου ιμάντα χρονισμού [44].	38
Σχήμα 3.7.	Σύστημα προέντασης του δεύτερου ιμάντα χρονισμού [44].	39
Σχήμα 3.8.	Απεικόνιση πρώτου ιμάντα χρονισμού των τροχαλίων του και των δρόμων του.	39
Σχήμα 3.9.	Απεικόνιση δεύτερου ιμάντα χρονισμού, πλαισίου προέντασης και δρόμων του ιμάντα.	40
Σχήμα 3.10.	Το ηλεκτρονικό παχύμετρο όπως τοποθετήθηκε στο άκρο του δεύτερου μέλους του βραχίονα για μετρήσεις μετατόπισης λόγω του καμπτικού φορτίου.	41
Σχήμα 3.11.	Τοποθέτηση πρότυπου βάρους στο δεύτερο μέλος του βραχίονα για μέτρηση της μετατόπισης του άκρου λόγω καμπτικού φορτίου.	42
Σχήμα 3.12.	Αποτελέσματα μετατόπισης λόγω κάμψης του βραχίονα για 200 γραμμάρια στην προσομοίωση στο Solidworks Simulation.	42
Σχήμα 3.13.	Αποτελέσματα μετατόπισης λόγω κάμψης του βραχίονα για 500 γραμμάρια στην προσομοίωση στο Solidworks Simulation.	43
Σχήμα 3.14.	Έδραση με τεφλόν εμπλουτισμένο με γυαλί στην πρώτη άρθρωση.	44
Σχήμα 3.15.	Έδραση με τεφλόν εμπλουτισμένο με γυαλί στη δεύτερη άρθρωση.	45
Σχήμα 3.16.	Ενίσχυση στον όγκο αναδίπλωσης του πρώτου συνδέσμου του νέου βραχίονα.	46
Σχήμα 3.17.	Ενίσχυση στον όγκο αναδίπλωσης του δεύτερου συνδέσμου του νέου βραχίονα.	46

Σχήμα 3.18.	Διαφορά σχεδιασμού στους δεύτερους συνδέσμους των δύο βραχιόνων όσον αφορά τον αριθμό εξαρτημάτων, που τα απαρτίζουν. Αριστερά εικονίζεται το νέο χέρι και δεξιά το παλιό.....	47
Σχήμα 3.19.	Αποτελέσματα μετατόπισης λόγω κάμψης του βραχίονα με προσθήκη νεύρου για 200 γραμμάρια στην προσομοίωση στο Solidworks Simulation.....	48
Σχήμα 3.20.	Αποτελέσματα μετατόπισης λόγω κάμψης του βραχίονα με προσθήκη νεύρου για 500 γραμμάρια στην προσομοίωση στο Solidworks Simulation.....	48
Σχήμα 3.21.	Ο πρώτος σύνδεσμος του νέου βραχίονα με την προσθήκη νευρών.....	49
Σχήμα 3.22.	Σύγκριση κάμψης των δύο βραχιόνων μετά την προσθήκη αρπάγης. Πίσω εικονίζεται ο νέος και μπροστά ο παλιός.	49
Σχήμα 3.23.	Είσοδος καλωδίων αρπάγης και FSR στο εσωτερικό του δεύτερου μέλους του βραχίονα.	50
Σχήμα 3.24.	Έξοδος καλωδίων αρπάγης και FSR από το εσωτερικό του δεύτερου μέλους του βραχίονα.	50
Σχήμα 3.25.	Τα δύο μέλη του νέου βραχίονα.....	53
Σχήμα 3.26.	Τροχαλία και άξονας δεύτερης άρθρωσης του νέου βραχίονα και πλαίσιο τανυσμού. .	53
Σχήμα 3.27.	Βίδα και κοχλίας τανυσμού του δεύτερου ιμάντα του συστήματος μετάδοσης κίνησης του νέου βραχίονα.....	54
Σχήμα 3.28.	Βίδες και κοχλίες σταθεροποίησης του συστήματος τανυσμού του δεύτερου ιμάντα του συστήματος μετάδοσης κίνησης του νέου βραχίονα.....	54
Σχήμα 3.29.	Πλαίσιο σύνδεσης, σύνδεσμος κινητήρα με τον πρώτο σύνδεσμο του βραχίονα τροχαλία, ιμάντας και έδραση του μέλους με ροδέλα.	55
Σχήμα 3.30.	Βίδα και κοχλίας τανυσμού του πρώτου ιμάντα του συστήματος μετάδοσης κίνησης του νέου βραχίονα και πλαίσιο τανυσμού.	55
Σχήμα 3.31.	Βίδα σταθεροποίησης του πρώτου ιμάντα του συστήματος μετάδοσης κίνησης του νέου βραχίονα και τροχαλία, που συνδεεται σε κινητήρα.	56
Σχήμα 3.32.	Τροχαλίες και πρώτος ιμάντας του συστήματος μετάδοσης κίνησης του νέου βραχίονα.	56
Σχήμα 3.33.	Κολώνα στήριξης παθητικού ρομπότ, την οποία μπορεί να συλλαμβάνει η δαγκάνα της αρπάγης.....	57
Σχήμα 3.34.	Lynxmotion Little Gripper [30].	58
Σχήμα 3.35.	Απεικόνιση αρπαγής αντικειμένου από την αρπάγη.....	58
Σχήμα 3.36.	Δυσμενή σενάρια, όσον αφορά την απόδοση της ροπής της αρπάγης. (α) Σταθερές αρθρώσεις και αρπάγη, ενώ ο σφόνδυλος ανάδρασης και οι προωθητήρες στρέφουν το σύστημα. (β) Οι ροπές των αρθρώσεων και οι δυνάμεις των προωθητήρων έχουν ως αποτέλεσμα συνισταμένη ροπή που περνά από την αρπάγη.....	59
Σχήμα 3.37.	Αποστάσεις μετατροπής της ροπής σε γραμμική δύναμη και μεταφοράς αυτής στις δαγκάνες αρπάγης [29].	61
Σχήμα 3.38.	Η τρίτη άρθρωση, η αρπάγη και η σύνδεση του συστήματος πάνω στο άκρο του δεύτερου μέλους του βραχίονα.	62
Σχήμα 3.39.	Διάταξη πειράματος για έλεγχο απόδοσης της αρπάγης.....	63
Σχήμα 3.40.	Εικόνα του αρχείου .brd της πλακέτας διανομής ρεύματος στους σερβοκινητήρες, όπως σχεδιάστηκε στο Eagle.....	64
Σχήμα 3.41.	Οι δύο πλευρές της πλακέτας διανομής ρεύματος στους σερβοκινητήρες, που κατασκευάστηκε στο LPKF.	64
Σχήμα 3.42.	Απεικόνιση του hall sensor Honeywell SS49 [17].	65
Σχήμα 3.43.	Αισθητήρας και μαγνήτης πάνω στη δεύτερη άρθρωση του βραχίονα.	66
Σχήμα 3.44.	Round Force Sensitive Resistor-Interlink 402 [15].	67

Σχήμα 3.45.	Κύκλωμα παραλαβής μετρήσεων του FSR μέσω Arduino Uno (Αντίσταση 10kΩ) [7].	67
Σχήμα 3.46.	Πειραματική διάταξη λήψης μετρήσεων αισθητήρα FSR χωρίς κάλυψη από κάποιο υλικό για 100g.	68
Σχήμα 3.47.	Ψηφιακές μετρήσεις αισθητήρα FSR, όταν αυτός δεν είναι καλυμμένος με κάποιο υλικό και έχει τοποθετηθεί πάνω στη διάταξη πρότυπο βάρος 100g. Το στιγμιότυπο λήφθηκε από το Arduino μέσω PuTTY.	68
Σχήμα 3.48.	Πειραματική διάταξη λήψης μετρήσεων αισθητήρα FSR με κάλυψη του αισθητήρα με τσόχα για 100g.	69
Σχήμα 3.49.	Ψηφιακές μετρήσεις αισθητήρα FSR, όταν αυτός είναι καλυμμένος και στις δύο πλευρές του με τσόχα και έχει τοποθετηθεί πάνω στη διάταξη πρότυπο βάρος 1kg. Το στιγμιότυπο λήφθηκε από το Arduino μέσω PuTTY.	69
Σχήμα 3.50.	Διάγραμμα δύναμης που ασκείται στον αισθητήρα FSR, συναρτήσει της διαφοράς τάσης στα άκρα του.	70
Σχήμα 3.51.	Οι δύο αισθητήρες FSR καλυμμένοι με τσόχα στο σύστημα των αρπαγών.	71
Σχήμα 3.52.	Κύκλωμα παραλαβής μετρήσεων από δύο αισθητήρες FSR μέσω πλακέτας Arduino Uno (Αντιστάσεις 10kΩ) [7].	71
Σχήμα 3.53.	Το σύστημα αρπάγης κρατώντας δοκιμαστικά ένα αντικείμενο με κάποια ευκαμψία.	72
Σχήμα 4.1.	Η φιάλη διοξειδίου του άνθρακα και ο ρυθμιστής πίεσης.	74
Σχήμα 4.2.	Έξοδος από την πηγή και διαχωρισμός της σε 2 σωληνώσεις.	75
Σχήμα 4.3.	Οι ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες τοποθετημένες σε διανομέα (manifold) που ρυθμίζουν την ποσότητα αερίου που παρέχεται στους προωθητήρες.	76
Σχήμα 4.4.	Τοποθέτηση των ζευγών προωθητήρων στο ρομποτικό σύστημα. Το σύστημα απεικονίζεται δίχως την κεφαλή του με τις διόδους φωτοεκπομπής.	77
Σχήμα 4.5.	Ρυθμιστής πίεσης από τον οποίο παρέχεται αέριο στα αεροέδρανα.	78
Σχήμα 4.6.	Τοποθέτηση των αεροεδράνων στη βάση του ρομπότ.	79
Σχήμα 4.7.	Τοποθέτηση αεροέδρανου σε σφαιρική άρθρωση με τη βοήθεια ζεύγους μαγνητών.	79
Σχήμα 4.8.	Παλμός PWM και η αντίστοιχη αναλογική τιμή του [45].	80
Σχήμα 4.9.	Διάγραμμα δύναμης που ασκείται στα αεροέδρανα συναρτήσει του διάκενου αέρος, κατά το οποίο είναι ανυψωμένα ανάλογα με την πίεση του αερίου, που τα διαπερνά, από τη New Way Air Bearings [26].	82
Σχήμα 4.10.	Έγκατασταση για τη διεξαγωγή πειραμάτων μετρήσεων των δυνάμεων ώσης των προωθητήρων.	83
Σχήμα 4.11.	Μετρήσεις δύναμης του πρώτου ζεύγους προωθητήρων για 100% duty cycle για χαμηλή και υψηλή πίεση στη φιάλη.	84
Σχήμα 4.12.	Καμπύλες ώσης συναρτήσει του duty cycle για κάθε ζεύγος προωθητήρα.	85
Σχήμα 4.13.	Διάγραμμα ώσης προωθητήρα του ζεύγους 1 για 50% duty cycle, ενώ επίσης προωθητήρας του ζεύγους 3 είναι ενεργός.	86
Σχήμα 4.14.	Διάγραμμα ώσης προωθητήρα του ζεύγους 1 για 100% duty cycle, ενώ επίσης τα αλλά δύο ζεύγη προωθητήρων είναι ενεργά.	87
Σχήμα 4.15.	Τραχύτητες της τράπεζας γρανίτη σε μικρόμετρα σύμφωνα με την εταιρεία OELZE Praezisions-Messzeugfabrik GmbH. Μέγιστη τραχύτητα 4,58μm.	88
Σχήμα 4.16.	Εύρεση συχνότητας αποκοπής του σήματος της θέσης του ρομπότ ως προς τον x-άξονα του καρτεσιανού συστήματος, που έχει ορισθεί στις κάμερες.	90
Σχήμα 4.17.	Διάγραμμα θέσης ρομπότ στο x-άξονα του καρτεσιανού συστήματος με μπλε γραμμή και φιλτραρισμένο το σήμα της θέσης του ρομπότ στο x-άξονα με διακεκομμένες.	90
Σχήμα 4.18.	Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης των προωθητήρων στο x-άξονα με κόκκινο και διάγραμμα δύναμης που υπολογίστηκε με τη διπλή παράγωγο της θέσης του ρομπότ στο x-άξονα με μπλε.	91

Σχήμα 4.19.	Διάγραμμα δύναμης τριβής που ασκείται στο ρομπότ κατά την κίνηση του στο x-άξονα.	91
Σχήμα 4.20.	Η βαλβίδα ελέγχου ροής 'One-way flow control valve GRLZ-1/8-QS-3-D' της Festo [21].	94
Σχήμα 4.21.	Οι βαλβίδες ελέγχου ροής όπως τοποθετήθηκαν στο πνευματικό σύστημα του ρομπότ.	95
Σχήμα 4.22.	Η βίδα ελέγχου ροής της βαλβίδας.	95
Σχήμα 4.23.	Παροχή ως συνάρτηση των στροφών της βίδας ρύθμισης της ροής (QS-3) [22].	96
Σχήμα 4.24.	Έγκατασταση για τη διεξαγωγή πειραμάτων μετρήσεων των δυνάμεων ώσης των προωθητήρων με την επέκταση για το νέο σύστημα προωθητήρων.	97
Σχήμα 4.25.	Διάγραμμα ώσης προωθητήρα του ζεύγους 1 για 70% duty cycle με την προσθήκη της βαλβίδας ελέγχου ροής, όταν αυτή είναι τελείως ανοιχτή.	97
Σχήμα 4.26.	Διάγραμμα δύναμης για προωθητήρα του ζεύγους 5 για διαφορετικές στροφές της βίδας στη βαλβίδα ελέγχου ροής σε σύγκριση με τις τιμές που προκύπτουν από το διάγραμμα της Festo.	98
Σχήμα 5.1.	Καμπύλες που εξισώνουν τις σχετικές γωνίες των δύο πρώτων αρθρώσεων, για τις οποίες εμφανίζονται ιδιομορφίες.	101
Σχήμα 5.2.	Καμπύλες που εξισώνουν τις σχετικές γωνίες των δύο πρώτων αρθρώσεων, για τις οποίες εμφανίζονται ιδιομορφίες, με την εφαρμογή μηχανικών περιορισμών.	102
Σχήμα 5.3.	Χώρος εργασίας του ρομπότ που προκύπτει, αν ληφθούν υπόψη οι μηχανικοί περιορισμοί των αρθρώσεων (με γαλάζιο ο χώρος εργασίας, στον οποίο δεν είναι πιθανό να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες, με μαύρο οι χώροι που είναι πιθανό ή που πιθανά να μη φτάνει το ρομπότ λόγω μηχανικών περιορισμών στην περίπτωση του εσωτερικού μαύρου δακτύλιου).	103
Σχήμα 5.4.	Χώρος εργασίας του ρομπότ που προκύπτει, αν ληφθούν υπόψη οι μηχανικοί περιορισμοί των αρθρώσεων και περιοριστούν οι κινήσεις αυτών σε δύο προς κάθε κατεύθυνση (με γαλάζιο ο χώρος εργασίας, στον οποίο δεν είναι πιθανό να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες, με μαύρο οι χώροι που είναι πιθανό ή που πιθανά να μη φτάνει το ρομπότ λόγω μηχανικών περιορισμών στην περίπτωση του αριστερού μαύρου δακτύλιου).	107
Σχήμα 6.1.	Στεφάνι χούλα χούπ της εταιρείας Amila, που χρησιμοποιήθηκε.	110
Σχήμα 6.2.	Ζεύγος σπληριγμάτων του στεφανιού στο παθητικό ρομπότ, όπως σχεδιάστηκαν στο SolidWorks και τυπώθηκαν στο 3D εκτυπωτή.	111
Σχήμα 6.3.	Πλαίσια αλουμινίου με κενά V του παθητικού ρομπότ, στα οποία τοποθετούνται τα σπληρίγματα του στεφανιού.	111
Σχήμα 6.4.	Συναρμογή σπληριγμάτων στεφανιού και πλαισίων αλουμινίου.	112
Σχήμα 6.5.	Το παθητικό ρομπότ με τα σπληρίγματα του στεφανιού και το στεφάνι.	112
Σχήμα 6.6.	Σπληρίγματα του στεφανιού και τοποθέτηση του στεφανιού σε αυτά.	113
Σχήμα 6.7.	Σύνδεσμος αρπάγης και τρίτης άρθρωσης βραχίονα, που σχεδιάστηκε στο Solidworks και τυπώθηκε σε 3D εκτυπωτή για τις ανάγκες του πειράματος της εργασίας.	113
Σχήμα 6.8	Σύνδεσμος αρπάγης και τρίτης άρθρωσης βραχίονα, που σχεδιάστηκε στο Solidworks και τυπώθηκε σε 3D εκτυπωτή, όπως προσδέθηκε στο βραχίονα του ρομπότ.	114
Σχήμα 6.9.	Απεικόνιση των γεωμετρικών μεγεθών κατά την επίλυση αντίστροφης κινηματικής μεταξύ των δύο ρομπότ.	116
Σχήμα 6.10.	Στιγμιότυπο από την κίνηση του βραχίονα σε επιτυχημένο πείραμα (1).	117
Σχήμα 6.11.	Στιγμιότυπο από την κίνηση του βραχίονα σε επιτυχημένο πείραμα (2).	117
Σχήμα 6.12.	Αρπαγή του στεφανιού κατά την υλοποίηση του πειράματος.	118

Σχήμα 6.13.	Μετρήσεις του αισθητήρα FSR σε επιτυχημένο πείραμα αρπαγής αντικειμένου εκτός γρανίτη.	118
Σχήμα 6.14.	Αρχική θέση των δύο ρομπότ στην τράπεζα γρανίτη.	120
Σχήμα 6.15.	Στιγμιότυπο από την υλοποίηση της ακολούθησης στόχου.	120
Σχήμα 6.16.	Απεικόνιση των δύο ρομπότ, κατά τη διάρκεια του πειράματος, τη στιγμή που απενεργοποιήθηκαν οι επενεργητές.	121
Σχήμα 6.17.	Στιγμιότυπο από την υλοποίηση αντίστροφης κινηματικής για αιωρούμενο ρομπότ σε πείραμα πάνω στο γρανίτη (1).	121
Σχήμα 6.18.	Στιγμιότυπο από την υλοποίηση αντίστροφης κινηματικής για αιωρούμενο ρομπότ σε πείραμα πάνω στο γρανίτη (2).	122
Σχήμα 6.19.	Σύλληψη του στεφανιού κατά την υλοποίηση του πειράματος.	122
Σχήμα 6.20.	Μετρήσεις του αισθητήρα FSR σε επιτυχημένο πείραμα αρπαγής αντικειμένου στην τράπεζα γρανίτη με ακίνητο στόχο.	123
Σχήμα 6.21.	Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	123
Σχήμα 6.22.	Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	124
Σχήμα 6.23.	Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	124
Σχήμα 6.24.	Γωνία yaw του ρομπότ ως προς το σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	125
Σχήμα 6.25.	Θέσεις των ρομπότ στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	125
Σχήμα 6.26.	Θέσεις των ρομπότ στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	126
Σχήμα 6.27.	Θέσεις των ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	126
Σχήμα 6.28.	Συνιστώσα της συνολικής δύναμης, που ασκείται στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων του ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος.	127
Σχήμα 6.29.	Συνιστώσα της συνολικής δύναμης, που ασκείται στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων του ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος.	127
Σχήμα 6.30.	Συνισταμένη ροπή, που ασκείται στο ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος. .	128
Σχήμα 6.31.	Η αρχική θέση των δύο ρομπότ στην τράπεζα γρανίτη.	129
Σχήμα 6.32.	Στιγμιότυπο από την υλοποίηση ακολούθησης στόχου (1).	130
Σχήμα 6.33.	Στιγμιότυπο από την υλοποίηση ακολούθησης στόχου (2).	130
Σχήμα 6.34.	Απεικόνιση των δύο ρομπότ, κατά τη διάρκεια του πειράματος, τη στιγμή που απενεργοποιήθηκαν οι επενεργητές.	131
Σχήμα 6.35.	Στιγμιότυπο από την υλοποίηση αντίστροφης κινηματικής για αιωρούμενο ρομπότ σε πείραμα πάνω στο γρανίτη (1).	131
Σχήμα 6.36.	Στιγμιότυπο από την υλοποίηση αντίστροφης κινηματικής για αιωρούμενο ρομπότ σε πείραμα πάνω στο γρανίτη (2).	132
Σχήμα 6.37.	Σύλληψη του στεφανιού κατά την υλοποίηση του πειράματος.	132
Σχήμα 6.38.	Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	133
Σχήμα 6.39.	Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	133
Σχήμα 6.40.	Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	134

Σχήμα 6.41.	Γωνία yaw του ρομπότ ως προς το σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	134
Σχήμα 6.42.	Θέσεις των ρομπότ στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	135
Σχήμα 6.43.	Θέσεις των ρομπότ στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	135
Σχήμα 6.44.	Θέσεις των ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.	136
Σχήμα 6.45.	Συνιστώσα της συνολικής δύναμης, που ασκείται στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων του ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος.	136
Σχήμα 6.46.	Συνιστώσα της συνολικής δύναμης, που ασκείται στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων του ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος.	137
Σχήμα 6.47.	Συνισταμένη ροπή, που ασκείται στο ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος. .	137
Σχήμα A.1.	Data Sheet ρυθμιζόμενων βαλβίδων GRLZ-1/8-QS-3-D της FESTO [20].	142
Σχήμα A.2.	Data sheet ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων MHP2-MS1H-3/2G-M5 της FESTO (1) [22]....	143
Σχήμα A.3.	Data sheet ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων MHP2-MS1H-3/2G-M5 της FESTO (2) [22].	144
Σχήμα A.4.	Data sheet για τα αεροέδρανα των ρομπότ της New Way Air Bearings [27].	145
Σχήμα A.5.	Data sheet για την τράπεζα γρανίτη της OELZE Praezisions-Messzeugfabrik GmbH (1).	146
Σχήμα A.6.	Data sheet για την τράπεζα γρανίτη της OELZE Praezisions-Messzeugfabrik GmbH (2).	147
Σχήμα A.7.	Data sheet για τον αισθητήρα hall sensor SS49E της Honeywell που χρησιμοποιείται [9].	148
Σχήμα A.8.	Data sheet για τον αισθητήρα FSR 402 της Interlink που χρησιμοποιείται (1) [34]....	149
Σχήμα A.9.	Data sheet για τον αισθητήρα FSR 402 της Interlink που χρησιμοποιείται (2) [34]....	150
Σχήμα A.10.	Data sheet για τον αισθητήρα FSR 402 της Interlink που χρησιμοποιείται (3) [34]....	151
Σχήμα A.11.	Data sheet του αισθητήρα ATI nano 17 (1) [14].	152
Σχήμα A.12.	Data sheet του αισθητήρα ATI nano 17 (2) [14].	153
Σχήμα A.13.	Χαρακτηριστικά σερβοκινητήρα Hitec HS-422 Deluxe [11].	154
Σχήμα A.14.	Χαρακτηριστικά σερβοκινητήρα FeeTech FS5106M [10].	155
Σχήμα A.15.	Χαρακτηριστικά κινητήρα της maxon που χρησιμοποιείται στις αρθρώσεις του ρομπότ [23].	156
Σχήμα A.16.	Χαρακτηριστικά μειωτήρα της maxon που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες των αρθρώσεων του ρομπότ [24].	157
Σχήμα A.17.	Χαρακτηριστικά παλμογεννητριών της maxon που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες των αρθρώσεων του ρομπότ [25].	158
Σχήμα A.18.	Πλακέτα ρύθμισης τάσης ATX3510HR-190W της rtd που είναι εγκατεστημένη στον πύργο του PC104 [31].	159
Σχήμα A.19.	Πλακέτα ψηφιακών εισόδων-εξόδων DM35820HR της rtd που είναι εγκατεστημένη στον πύργο του PC104 [32].	160
Σχήμα C.1.	Ο αισθητήρας δύναμης/ροπής ATI Nano 17.	179
Σχήμα C.2.	Συνδεσμολογία κάρτας αισθητήρα με κουτί τροφοδοσίας (1).	179
Σχήμα C.3.	Συνδεσμολογία κάρτας αισθητήρα με κουτί τροφοδοσίας (2).	180
Σχήμα C.4.	Συνδεσμολογία κουτιού τροφοδοσίας με αισθητήρα.	180

Σχήμα C.5.	Αρχική εικόνα του προγράμματος του αισθητήρα ATIDAQFT.Net με συνδεδεμένο τον αισθητήρα.....	181
Σχήμα C.6.	Οι 3 σπές του αισθητήρα.....	182
Σχήμα C.7.	Παράθυρο συλλογής δεδομένων προγράμματος του αισθητήρα.	183

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1.	Γεωμετρικά και δυναμικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων του 1ο βραχίονα χωρίς την προσθήκη αρπάγης.	35
Πίνακας 3.2.	Αποτελέσματα μετατοπίσεων λόγω κάμψης στα πειράματα και στις προσομοιώσεις. .	41
Πίνακας 3.3.	Συντελεστές τριβής και φθοράς για υλικά σε επαφή με αλουμίνιο [1] [6] [18] [33].....	44
Πίνακας 3.4.	Χαρακτηριστικά αρπάγης Lynxmotion Little Gripper [30].	57
Πίνακας 5.1.	Μάζες, αδράνεις, και απαραίτητες αποστάσεις για την εύρεση βαρυκεντρικών διανυσμάτων, της βάσης και των μελών του βραχίονα του ρομπότ.	100
Πίνακας 6.1.	Γεωμετρικές παράμετροι για την επίλυση της αντίστροφης κινηματικής	114
Πίνακας 6.2.	Αποτελέσματα, που δοθήκαν κατά την υλοποίηση του πειράματος αρπαγής στόχου εκτός τράπεζας γρανίτη.	116
Πίνακας 6.3.	Αποτελέσματα, που δοθήκαν κατά την υλοποίηση του πειράματος σύλληψης στόχου στην τράπεζας γρανίτη με ακίνητο στόχο.	119
Πίνακας 6.4.	Αποτελέσματα, που δοθήκαν κατά την υλοποίηση του πειράματος σύλληψης στόχου στην τράπεζας γρανίτη με κινούμενο στόχο.	129

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης των υποσυστημάτων ρομπότ διαστημικού εξομοιωτή, το οποίο προορίζεται για να μεταφέρει αντικείμενα, είτε με κατασκευή και προσθήκη εξαρτημάτων είτε με παρεμβολή στα ήδη υπάρχοντα εξαρτήματα. Η παραπάνω εργασία αφορά το δεύτερο ενεργητικό ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή, που έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του ερευνητικού έργου του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μετά από τη κατασκευαστική διαδικασία το ρομπότ θα καταλήξει να έχει δύο λειτουργικούς βραχίονες με αρπάγες και προωθητήρες, των οποίων μπορεί να τεθεί το εύρος τιμών, στο οποίο θα κινείται η δύναμη ώσης, για να το κινούν. Για να αποδειχθεί η λειτουργικότητα των παραπάνω, οργανώνεται και πραγματοποιείται ένα πείραμα, στο οποίο το ρομπότ με χρήση των επενεργητών του θα ακολουθήσει ένα σώμα και με χρήση των βραχιόνων του και των αρπαγών θα το συλλάβει.

1.2 Ο Εξομοιωτής Διαστήματος του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

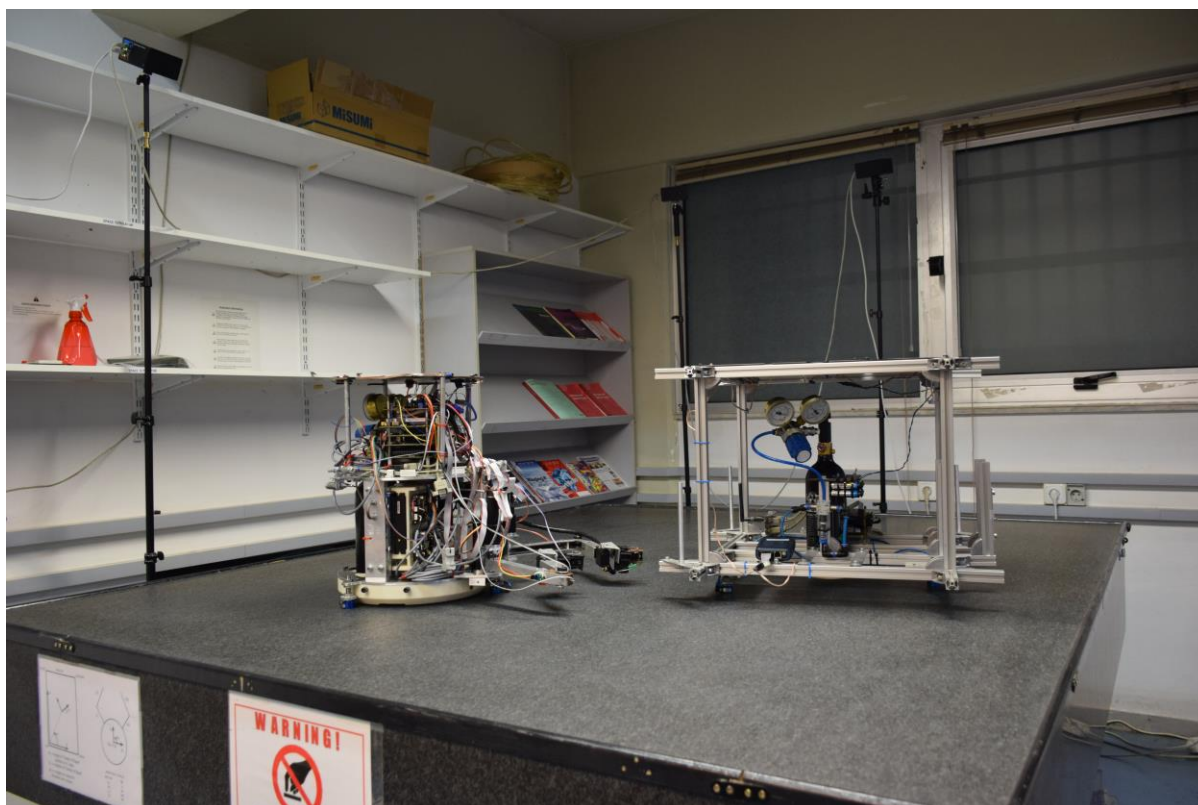
Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σχετικά με ρομπότ διαστήματος, σχεδιαστήκαν ρομπότ με σκοπό τη μελέτη ενός παρόντος προβλήματος και ενός μελλοντικού προβλήματος. Ένα πρόβλημα είναι πως πολλοί δορυφόροι, που έχουν μείνει από καύσιμα έχουν αχρηστευτεί και αποτελούν κομμάτι του όγκου των λεγόμενων διαστημικών σκουπιδιών και ένα άλλο είναι πως είναι σκόπιμο να αναπτυχθεί ένα σύστημα διαστημικών σταθμών καυσίμων και ενέργειας, για να τροφοδοτούνται διαστημόπλοια και να μπορεί να επεκταθεί η εξερεύνηση του διαστήματος. Όσον αφορά τα παραπάνω η ιδέα είναι, πως πρώτον ρομπότ με βραχίονες η με εκτοξευτές διχτυών θα μπορούν να βρίσκουν τα σκουπίδια, να τα συλλέγουν και να τα επιστρέφουν στη Γη και δεύτερον, αντίστοιχα ρομπότ με βραχίονες θα μπορούν να μεταφέρουν καύσιμα από τους σταθμούς στα μέσα που χρειάζονται καύσιμα και αυτόματα να τα τροφοδοτούν. Για να υλοποιηθεί κάποια από αυτές τις ιδέες πρέπει πρωτίστως να δοκιμαστεί στη Γη. Έτσι, στο εργαστήριο έχει αναπτυχθεί ένας εξομοιωτής διαστήματος για διαδιάστατη κίνηση, ώστε με χρήση ρομπότ σε αυτόν να μπορούν να μελετηθούν τα παραπάνω.

Για την υλοποίηση του εξομοιωτή, πρέπει πρώτα να επιλεγεί η κατάλληλη επιφάνεια, όπου κινούνται τα ρομπότ. Το σχέδιο είναι πως τα ρομπότ με χρήση αερίου αιωρούνται πάνω από μια επιφάνεια, η οποία πρέπει να είναι κατά το δυνατό λεία. Για τέτοιες χρήσεις ενδεικνύεται η εγκατάσταση τράπεζας λειασμένου γρανίτη. Στο εργαστήριο έχει αγοραστεί μία τράπεζα διαστάσεων 2mX1m (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1. Η τράπεζα γρανίτη του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ.

Στην τράπεζα τοποθετούνται ρομπότ, τα οποία αιωρούνται πάνω σε αυτήν με τη χρήση αεροεδράνων, των οποίων η λειτουργία αναλύεται στο Κεφάλαιο 4. Για να πραγματοποιηθεί η εξομοίωση των προβλημάτων που έχουν αναφερθεί, χρειάζονται τουλάχιστον δύο σώματα. Ένα σώμα, που θα είναι παθητικό, δηλαδή θα αιωρείται στο χώρο της τράπεζας με ομαλές ευθύγραμμες και στροφικές κινήσεις, όπως κινείται ένα διαστημικό απόρριμα, και ένα σώμα, το οποίο θα το κυνηγάει. Αυτό είναι ένα ρομπότ, στο οποίο δίνεται εντολή κίνησης και προσανατολισμού και το οποίο θα κατέχει εξοπλισμό που να του επιτρέπει να συλλέγει αντικείμενα. Στο εργαστήριο έχουν αναπτυχθεί τρία ρομπότ για τον εξομοιωτή, ένα παθητικό και δύο ρομπότ με βραχίονες και 3 επενεργητές γραμμικής δύναμης και έναν επενεργητή ροπής. Επειδή το ένα εκ των δύο ενεργητικών ρομπότ (το παλαιότερο), στην παρούσα φάση είναι σε μία κατάσταση επανασύνθεσης, στη διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται μόνο τα δύο άλλα ρομπότ. Στο Σχήμα 1.2 απεικονίζονται αυτά τα δύο στην τράπεζα γρανίτη. Το ενεργητικό ρομπότ απεικονίζεται με όλα τα εξαρτήματα, που προστεθήκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας και των οποίων ο σχεδιασμός θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 1.2. Τα δύο ρομπότ του εξομοιωτή πάνω στην τράπεζα γρανίτη. Αριστερά το ενεργητικό και δεξιά το παθητικό.

Και τα δύο ρομπότ έχουν ένα πνευματικό σύστημα, στο οποίο με φιάλες διοξειδίου του άνθρακα τροφοδοτούνται τα αεροέδρανα και των δύο. Στο ενεργητικό ρομπότ είναι τοποθετημένα 3 ζευγάρια προωθητήρων, στα οποία μέσω ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων ελέγχεται η παροχή, με την οποία τροφοδοτούνται από τη φιάλη και παράγεται ανάλογα γραμμική δύναμη ώσης σε τρία σημεία συμμετρικά ως προς το γεωμετρικό κέντρο του ρομπότ.

Το ενεργητικό ρομπότ αποτελείται πλέον από δύο βραχίονες τριών αρθρώσεων και αρπάγης και από σφόνδυλο ανάδρασης, που προσδίδει ροπή στο σώμα του.

Οι εντολές για τους επενεργητές των βραχιόνων και της βάσης του ρομπότ δίνονται μέσω υπολογιστή stack PC104 της RTD και ο υπολογιστής και οι κινητήρες του σφονδύλου ανάδρασης και των αρθρώσεων καθώς και οι ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες και οι αισθητήρες τροφοδοτούνται μέσω πλακετών διαμερισμού τάσης και ρεύματος από δύο μπαταρίες Li-Po τάσης 14,8V.

Στις οροφές των ρομπότ είναι τοποθετημένες σειρές από διόδους εκπομπής φωτός (LED). Γύρω από τον εξομοιωτή είναι τοποθετημένες 8 κάμερες της εταιρείας PhaseSpace (Σχήμα 1.3) (Σχήμα 1.4), στις οποίες ορίζεται στο επίπεδο της τράπεζας γρανίτη η αρχή των αξόνων του επιπέδου, στο οποίο κινούνται τα ρομπότ. Με την παρακολούθηση των διόδων εκπομπής φωτός οι κάμερες μπορούν να δίνουν ανά πάσα στιγμή τη θέση και τον προσανατολισμό των ρομπότ στο ορισμένο επίπεδο.



Σχήμα 1.3. Κάμερα της εταιρείας PhaseSpace.



Σχήμα 1.4. Οι κάμερες της PhaseSpace που περιβάλλουν την τράπεζα γρανίτη.

1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ένας από τους πρώτους διαστημικούς εξομοιωτές αναπτύχθηκε από το Aerospace Robotics Laboratory του πανεπιστημίου του Stanford [38]. Το πρόγραμμα ονομαζόταν Free Flyers. Στον εξομοιωτή αιωρούνταν τρία ενεργητικά ρομπότ με χρήση αεροέδρανων πάνω σε τράπεζα γρανίτη με προωθητήρες και σφόνδυλο αντίδρασης για επενεργητές. Στα ρομπότ είχαν εγκατασταθεί ζεύγη βραχιόνων τριών αρθρώσεων με πνευματικές αρπάγες (Σχήμα 1.5). Επίσης για τον εξομοιωτή υπήρχε και παθητικό ρομπότ χωρίς επενεργητές. Τη θέση και τον προσανατολισμό των ρομπότ παρακολουθούσε κάμερα τοποθετημένη πάνω από την τράπεζα γρανίτη και σύστημα βασισμένο σε Pseudolite GPS [39].



Σχήμα 1.5. Free Flyers, Stanford University [35].

1.4 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία χωρίζεται στα 7 παρακάτω κεφάλαια:

1. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στην εργασία. Αναλύεται ο σκοπός αυτής και γίνεται μια περιληπτική περιγραφή του εξομοιωτή διαστήματος και των ρομπότ, που χρησιμοποιούνται σε αυτόν.
2. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η απαραίτητη θεωρία, που πρέπει να γνωρίζει ο αναγνώστης, για να κατανοήσει την εργασία και περιγράφονται οι λειτουργίες των διάφορων κινητήρων και αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της

εκπόνησης της εργασίας, ώστε να είναι τεκμηριωμένη η χρήση τους στα σημεία, που θα αναφερθούν.

3. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του δεύτερου βραχίονα στο ρομπότ διαστημικού εξομοιωτή με χρήση μηχανήματος CNC, καθώς και η προσθήκη αρπάγης στους βραχίονες του ρομπότ και η χρήση αισθητήρων, που δίνουν δεδομένα για την κίνηση των βραχιόνων και των αρπαγών.
4. Στο τέταρτο κεφάλαιο μελετάται το πνευματικό σύστημα του ρομπότ και η συμβατότητα των αποδόσεων του με τις αντίστοιχες επιθυμητές και με αφορμή αυτή τη μελέτη, περιγράφεται η λειτουργία βαλβίδων ελέγχου ροής και η επιρροή τους στη δύναμη ώσης των προωθητήρων.
5. Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος υπολογισμού του χώρου εργασίας του ρομπότ για την αποφυγή δυναμικών ιδιομορφιών δεδομένου πως είναι γνωστή η αποστολή των βραχιόνων του ρομπότ σε θέμα θέσεων στο επίπεδο και σε θέμα χρονικής διάρκειας.
6. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από πείραμα που επιβεβαιώνει τον υπολογισμό του χώρου εργασίας και για το οποίο είναι απαραίτητη η χρήση των εξαρτημάτων, που προστέθηκαν στο ρομπότ σύμφωνα με τη μελέτη της παρούσας εργασίας. Το πείραμα αυτό αφορά την ακολούθηση ενός στόχου στην τράπεζα γρανίτη και την αρπαγή του. Για την επίτευξη των παραπάνω αναλύονται και το πλάνο ακολούθησης στόχου του ρομπότ καθώς και η επιλογή ελεγκτή για την κίνηση του ρομπότ πάνω στην τράπεζα γρανίτη.
7. Στο έβδομο κεφάλαιο, ως επίλογος της εργασίας, αναφέρονται τα συμπεράσματα που λήφθηκαν από την παρούσα εργασία καθώς και οι πιθανές μελλοντικές εργασίες, που θα μπορούσαν να εκπονηθούν πάνω στο ρομπότ διαστημικού εξομοιωτή βασιζόμενες στα αποτελέσματα αυτής.

2 Στοιχεία Θεωρίας

2.1 Περίληψη του Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή σε τέσσερις παραγράφους των απαραίτητων πληροφοριών που χρειάζονται για την κατανόηση της εργασίας.

Αρχικά, θα παρουσιαστούν στοιχεία κινηματικής ρομπότ σε τροχιά. Στην εργασία περιγράφεται η κατασκευή του δεύτερου βραχίονα του ενεργητικού ρομπότ και δίνονται αποτελέσματα πειραμάτων συλλογής αντικειμένου με τη χρήση αυτού. Για τη συλλογή αντικειμένων με τη χρήση ρομποτικού βραχίονα σε επίπεδα συστήματα με σταθερή θέση βάσης, χρησιμοποιείται η μέθοδος Denavit-Hartenberg για την επίλυση της αντίστροφης κινηματικής. Για το ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή, στο πλαίσιο της εργασίας, περιγράφεται το κινηματικό μοντέλο, που το περιγράφει, εφόσον αυτό κινείται σε τροχιά, καθώς και οι επιρροές που έχουν τα δυναμικά του χαρακτηριστικά στην κίνηση του.

Έπειτα, αναφέρονται στοιχεία ρευστομηχανικής που επικεντρώνονται, κατά κύριο λόγο, στις αντιστάσεις σωληνώσεων, αφού στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας βάσει των εξίσωσεων της πτώσης πίεσης και του υπολογισμού της αντίστασης μίας σωλήνωσης υλοποιούνται αλλαγές στο πνευματικό σύστημα του ρομπότ.

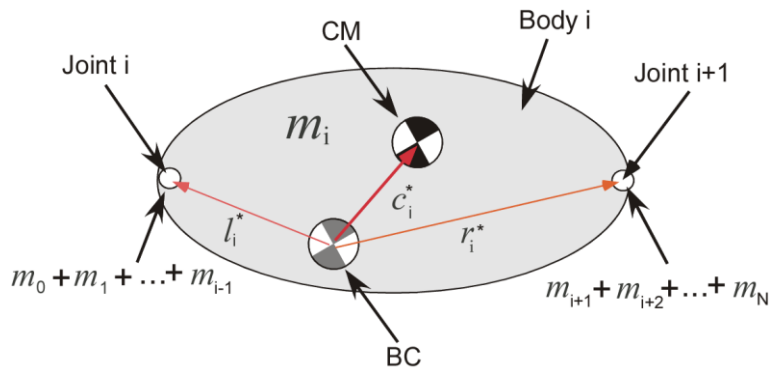
Τέλος, γίνεται μία σύντομη περιγραφή των λειτουργιών των κινητήρων και των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.

2.2 Αντίστροφη Κινηματική Βραχίονα 3^{ωv} Βαθμών Ελευθερίας Αιωρούμενου Ρομπότ σε Διδιάστατο Χώρο

2.2.1 Κινηματικό Μοντέλο Διδιάστατου Βραχίονα 3^{ωv} Βαθμών Ελευθερίας Αιωρούμενου Ρομπότ

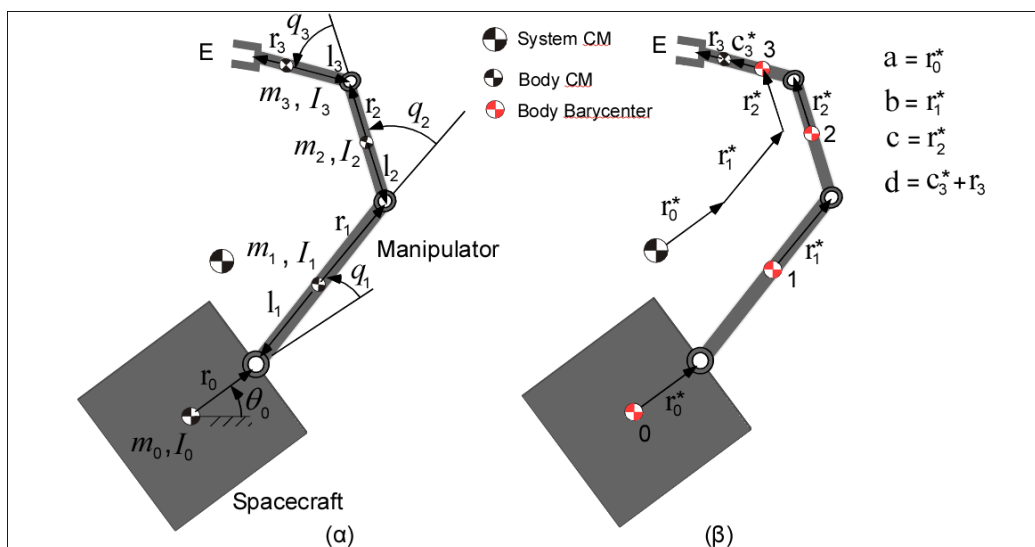
Στη Διδακτορική Διατριβή του Ε. Παπαδόπουλου [37] αναπτύσσεται η μεθοδολογία δημιουργίας κινηματικού μοντέλου για αιωρούμενα ρομπότ. Για ένα ρομπότ με σταθερή βάση τα μήκη των μελών του βραχίονα θα χαρακτήριζαν τη κινηματική του και προβλήματα αντίστροφης κινηματικής θα επιλύονταν με τη μέθοδο Denavit-Hartenberg. Στο διάστημα, επειδή η βάση δεν είναι σταθερή, αυτή αιωρείται φαινομενικά ελεύθερα κατά τη διάρκεια μίας κίνησης των βραχιόνων. Η κίνηση της, βέβαια εξαρτάται από την κίνηση των μελών της και τα δυναμικά χαρακτηριστικά αυτών και της βάσης. Οπότε το κινηματικό μοντέλο ενός αιωρούμενου ρομπότ εξαρτάται και από τις δυναμικές του ιδιότητες. Συνεπώς, για το κινηματικό-δυναμικό μοντέλο του συστήματος χρησιμοποιείται η προσέγγιση με βαρυκεντρικά διανύσματα, όπου το κέντρο μάζας του συστήματος επιλέγεται ως ένα σταθερό σημείο αναφοράς, γιατί η θέση του παραμένει σταθερή. Τα βαρυκεντρικά διανύσματα ενώνουν 4 σημεία σε κάθε μέλος του συστήματος. Τις δύο αρθρώσεις στα άκρα του μέλους, το κέντρο μάζας του, και το βαρύκεντρο που θα είχε αν στο ένα άκρο του ήταν συγκεντρωμένη η μάζα των σωμάτων του συστήματος, που συνδέονται πριν από αυτό το

μέλος, και αν στο άλλο άκρο του ήταν συγκεντρωμένη η μάζα των σωμάτων του συστήματος, που συνδέονται μετά από αυτό (BC). Για την άρθρωση i το διάνυσμα, που ενώνει την πρώτη άρθρωση με το σημείο BC, ονομάζεται l_i^* , το διάνυσμα, που ενώνει τη δεύτερη άρθρωση με το σημείο BC, ονομάζεται r_i^* και το διάνυσμα που ενώνει το κέντρο μάζας του σώματος με το σημείο BC ονομάζεται c_i^* (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1. Απεικόνιση των βαρυκεντρικών διανυσμάτων κάθε σώματος ρομποτικού βραχίονα [37].

Σε ένα αντίστοιχο ρομπότ με βραχίονα 3 βαθμών ελευθερίας τα παρακάτω διανύσματα θα απεικονίζονταν όπως στο Σχήμα 2.2(β). Δεδομένου, πως κατά την εφαρμογή της παρούσας μεθόδου, τα δεδομένα θα ληφθούν από assembly αρχεία του Solidworks, τα τέσσερα βαρυκεντρικά διανύσματα που περιγράφουν τη κινηματική του συστήματος a , b , c , d θα εκφραστούν μέσω των διανυσμάτων l_i , r_i , που είναι τα διανύσματα που ενώνουν κάθε άρθρωση με το κέντρο μάζας του μέλους.



Σχήμα 2.2. (α) Απαραίτητα γνωστά γεωμετρικά και δυναμικά μεγέθη βραχίονα 3^{uv} βαθμών ελευθερίας αιωρούμενου ρομπότ για την εύρεση χώρου εργασίας. (β) Απεικόνιση των βαρυκεντρικών διανυσμάτων του κινηματικού μοντέλου βραχίονα 3^{uv} βαθμών ελευθερίας αιωρούμενου ρομπότ [42].

$$a = \frac{r_0 m_0}{M} \quad (2.1)$$

$$b = \frac{l_1 m_0 + (m_0 + m_1) r_1}{M} \quad (2.2)$$

$$c = \frac{l_2 (m_0 + m_1) + r_2 (m_0 + m_1 + m_2)}{M} \quad (2.3)$$

$$d = r_3 + \frac{l_3 (m_0 + m_1 + m_2)}{M} \quad (2.4)$$

$$M = m_0 + m_1 + m_2 + m_3 \quad (2.5)$$

Όπου τα μεγέθη των (2.1)-(2.5) απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2.

Με χρήση των παραπάνω διανυσμάτων μπορούν να λυθούν προβλήματα αντίστροφης κινηματικής μέσω των (2.6)-(2.8), που περιγράφουν τη θέση και τον προσανατολισμό του στόχου ως προς το κέντρο μάζας του συστήματος.

$$x_E = a \cos(\theta_0) + b \cos(\theta_0 + q_1) + c \cos(\theta_0 + q_1 + q_2) + d \cos(\theta_0 + q_1 + q_2 + q_3) \quad (2.6)$$

$$y_E = a \sin(\theta_0) + b \sin(\theta_0 + q_1) + c \sin(\theta_0 + q_1 + q_2) + d \sin(\theta_0 + q_1 + q_2 + q_3) \quad (2.7)$$

$$\theta_E = \theta_0 + q_1 + q_2 + q_3 \quad (2.8)$$

Προβλήματα αντίστροφης κινηματικής επιλύονται ως προς το σημείο της τρίτης άρθρωσης:

$$x_3 = x_E - d \cos(\theta_0 + q_1 + q_2 + q_3) \quad (2.9)$$

$$y_3 = y_E - d \sin(\theta_0 + q_1 + q_2 + q_3) \quad (2.10)$$

2.2.2 Κινηματική Ανάλυση των Ταχυτήτων Δισδιάστατου Βραχίονα 3^{ωv} Βαθμών Ελευθερίας Αιωρούμενου Ρομπότ

Αν R_0 είναι ο πίνακας περιστροφής του συστήματος συντεταγμένων της βάσης του ρομπότ ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων και 0R_i ο πίνακας περιστροφής του συστήματος συντεταγμένων του σώματος i ως προς το σύστημα συντεταγμένων της βάσης του ρομπότ μπορούν να εκφραστούν οι γωνιακές και γραμμικές ταχύτητες κάθε σημείου ως προς τα αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων. Σε εφαρμογές σύλληψης αντικειμένων είναι ενδιαφέρον να γνωρίζουμε τις γραμμικές και τη στροφική ταχύτητα του άκρου του

συστήματος που θα συλλάβει το στόχο. Αν οι (2.6)-(2.8) παραγωγιστούν ως προς το χρόνο προκύπτει [37]:

$$\begin{pmatrix} {}^0\dot{x}_E \\ {}^0\dot{y}_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(bs(q_1)+cs(q_1+q_2)+ds(q_1+q_2+q_3)) \\ a+bc(q_1)+cc(q_1+q_2)+dc(q_1+q_2+q_3) \end{pmatrix} \dot{\theta}_0 + \begin{pmatrix} -(bs(q_1)+cs(q_1+q_2)+ds(q_1+q_2+q_3)) & -(cs(q_1+q_2)+ds(q_1+q_2+q_3)) & -ds(q_1+q_2+q_3) \\ bc(q_1)+cc(q_1+q_2)+dc(q_1+q_2+q_3) & cc(q_1+q_2)+dc(q_1+q_2+q_3) & dc(q_1+q_2+q_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

$$\dot{\theta}_E = \dot{\theta}_0 + \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$\begin{pmatrix} {}^0\dot{x}_E \\ {}^0\dot{y}_E \end{pmatrix} = {}^0\mathbf{J}_{11}\dot{\theta}_0 + {}^0\mathbf{J}_{12}\dot{\mathbf{q}} \quad (2.13)$$

$$\dot{\theta}_E = \dot{\theta}_0 + {}^0\mathbf{J}_{22}\dot{\mathbf{q}} \quad (2.14)$$

Όπου οι πίνακες ${}^0\mathbf{J}_{11}$, ${}^0\mathbf{J}_{12}$, ${}^0\mathbf{J}_{22}$ είναι οι πίνακες των (2.11) και (2.12) με τους οποίους πολλαπλασιάζονται η γωνιακή ταχύτητα της βάσης και οι σχετικές γωνιακές ταχύτητες των αρθρώσεων.

2.2.3 Στροφορμή Δισδιάστατου Βραχίονα 3^{ων} Βαθμών Ελευθερίας Αιωρούμενου Ρομπότ

Αν ως προς το αδρανειακό σύστημα το ρομπότ έχει κάποια στροφορμή h_{CM} , τότε αυτή διατηρείται σταθερή παρόλο που λόγω της ανάπτυξης σχετικών ταχυτήτων στα μέλη του βραχίονα και στη βάση του ρομπότ κάθε σώμα έχει τη δική του σχετική στροφορμή. Το άθροισμα των στροφορμών που αναπτύσσονται μέσα στο σύστημα από δικούς του επενεργητές θα πρέπει να είναι μηδενικό. Δηλαδή αν όλες η αρθρώσεις κινηθούν προς μία φορά των δεικτών του ρολογιού στο επίπεδο, τότε η βάση του ρομπότ θα πρέπει να κινηθεί από την αντίθετη φορά με γωνιακή ταχύτητα τέτοια, ώστε να αναιρέσει τις στροφορμές, που αναπτύσσονται στις αρθρώσεις. Η σχέση που περιγράφει την παραπάνω κατάσταση έχει τη μορφή της σχέσεως 2.15 [42]:

$${}^0D^0\dot{\theta}_0 + {}^0\mathbf{D}_q\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{R}_0^T h_{CM} \quad (2.15)$$

Όπου οι πίνακες 0D , 0D_q εκφράζουν τις αδράνειες κάθε σώματος ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων ανάλογα με τις σχετικές γωνίες μεταξύ των σωμάτων και την επιρροή των αδρανειών των υπόλοιπων σωμάτων στην αδράνεια κάθε σώματος ως προς το κέντρο μάζας του ρομπότ. Στις (2.16)-(2.22) εκφράζονται οι παράμετροι $\alpha_{00}, \alpha_{01}, \alpha_{02}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{22}$ και α_{33} , οι οποίοι υπολογίζονται μέσω των γεωμετρικών και δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος και χρησιμοποιούνται σε τύπους υπολογισμού των αδρανειών κάθε μέλους ως προς το αδρανειακό σύστημα [42].

$$a_{00} = I_0 + \frac{m_0(m_1 + m_2 + m_3)r_0^2}{M} \quad (2.16)$$

$$a_{01} = \frac{m_0 r_0 (l_1(m_1 + m_2 + m_3) + r_1(m_2 + m_3))}{M} \quad (2.17)$$

$$a_{02} = \frac{m_0 r_0 (l_2(m_2 + m_3) + r_2 m_3)}{M} \quad (2.18)$$

$$a_{11} = I_1 + \frac{m_0 m_1 l_1^2 + m_1(m_2 + m_3)r_1^2 + m_0(m_2 + m_3)(l_1 + r_1)^2}{M} \quad (2.19)$$

$$a_{12} = \frac{(l_1 m_0 + (m_0 + m_1)r_1)(l_2(m_2 + m_3) + m_3 r_2)}{M} \quad (2.20)$$

$$a_{22} = I_2 + \frac{m_2 m_3 r_2^2 + m_2(m_0 + m_1)l_2^2 + m_3(m_0 + m_1)(l_2 + r_2)^2}{M} \quad (2.21)$$

$$a_{33} = I_3 + \frac{m_3(m_0 + m_1 + m_2)l_3^2}{M} \quad (2.22)$$

Για να εκφραστεί η (2.15) σε μορφή τέτοια, ώστε με γνωστές σχετικές γωνίες να μπορεί να επιλυθεί ο τύπος της στροφορμής πρέπει να εκφραστούν τα στοιχεία 0D_0 , 0D_1 , 0D_2 και 0D_3 που εκφράζουν τη σχετική αδράνεια κάθε σώματος ανάλογα με τις σχετικές γωνίες των αρθρώσεων και την επιρροή των αδρανειών των υπολοίπων σωμάτων στην αδράνεια του σώματος ως προς το κέντρο μάζας του ρομπότ [42]:

$${}^0D_0 = a_{00} + a_{01} \cos(q_1) + a_{02} \cos(q_1 + q_2) + a_{03} l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) \quad (2.23)$$

$${}^0D_1 = a_{01} \cos(q_1) + a_{11} + a_{12} \cos(q_2) + a_{13} l_3 \cos(q_2 + q_3) \quad (2.24)$$

$${}^0D_2 = a_{02} \cos(q_1 + q_2) + a_{12} \cos(q_2) + a_{22} + cm_3 l_3 \cos(q_3) \quad (2.25)$$

$${}^0D_3 = a_{33} + am_3 l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) + bm_3 l_3 \cos(q_2 + q_3) + cm_3 l_3 \cos(q_3) \quad (2.26)$$

Με τις παραπάνω εξισώσεις και γνωρίζοντας πως η κάθε άρθρωση μετακινεί τις αδράνειες των σωμάτων που βρίσκονται μετά από αυτή, η (2.15) μετατρέπεται στη (2.27) [42]:

$$\left({}^0D_0 + {}^0D_1 + {}^0D_2 + {}^0D_3 \right) \dot{\theta}_0 + \left({}^0D_1 + {}^0D_2 + {}^0D_3 \quad {}^0D_2 + {}^0D_3 \quad {}^0D_3 \right) \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{R}_0^T h_{CM} \quad (2.27)$$

2.2.4 Αποφυγή Δυναμικών Ιδιομορφιών

Σε εφαρμογές αρπαγής αντικειμένων στο διάστημα είναι πιθανή η εμφάνιση δυναμικών ιδιομορφιών. Σε μια δυναμική ιδιομορφία το τελικό σημείο δράσης χάνει έναν ή περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, διότι η κίνηση της βάσης σε αντίδραση της κίνησης του βραχίονα ακυρώνει της δυνατότητα της κίνησης σε κάποια(ες) διεύθυνση(εις). Για να μην εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες έχει αναπτυχθεί μία μέθοδος στη Διδακτορική Διατριβή του Ε. Παπαδόπουλου [37], για την εύρεση ενός μικρότερου χώρου εργασίας, όπου η εμφάνιση δυναμικών ιδιομορφιών είναι αδύνατη.

Όπως και οι κινήσεις των αρθρώσεων, η εμφάνιση δυναμικών ιδιομορφιών δεν επηρεάζει τη στροφορμή του συστήματος. Σε ένα σύστημα με μηδενική στροφορμή h_{CM} , η γωνιακή ταχύτητα της βάσης στη (2.15) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\dot{\theta}_0 = -{}^0\mathbf{D}^{-1} {}^0\mathbf{D}_q \dot{\mathbf{q}} \quad (2.28)$$

Αν η (2.28) αντικατασταθεί στη (2.13), προκύπτει η Γενικευμένη Ιακωβιανή που εκφράζει την γραμμική ταχύτητα του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα συναρτήσει των σχετιών ταχυτήτων των αρθρώσεων ${}^0S(q)$:

$${}^0S(q) = -{}^0\mathbf{J}_{11} {}^0\mathbf{D}^{-1} {}^0\mathbf{D}_q + {}^0\mathbf{J}_{12} \quad (2.29)$$

Οι δυναμικές ιδιομορφίες εμφανίζονται από συνδυασμούς σχετικών ταχυτήτων των αρθρώσεων που δεν μπορούν να αποδώσουν τη σχετική κίνηση. Οπότε δυναμικές ιδιομορφίες εμφανίζονται, όταν η (2.30) δεν έχει λύση. Δηλαδή όταν η ορίζουσα S της ${}^0S(q)$ είναι ίση με 0.

$$\dot{\mathbf{q}} = {}^0\mathbf{S}^{-1}(\mathbf{q}) \mathbf{R}_0^T \begin{pmatrix} \dot{x}_E \\ \dot{y}_E \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

Η ορίζουσα $S(q_1, q_2)$ σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση του συστήματος είναι η (2.31):

$$S(q_1, q_2) = k_0(q_1) + k_1(q_1)\sin(q_2) + k_2(q_1)\cos(q_2) \quad (2.31)$$

Όπου:

$$k_0(q_1) = b(aa_{22} - ca_{02})\sin(q_1) \quad (2.32)$$

$$k_1(q_1) = -\frac{aba_{02} + aca_{01} - 2bca_{00}}{2} + c(-aa_{11} + ba_{01})\cos(q_1) + \frac{a(ba_{02} - ca_{01})\cos(2q_1)}{2} \quad (2.33)$$

$$k_2(q_1) = a(ba_{21} - ca_{11})\sin(q_1) + \frac{a(ba_{02} - ca_{01})\sin(2q_1)}{2} \quad (2.34)$$

Από τα παραπάνω, όταν η (2.31) είναι ίση με 0 προκύπτουν δύο καμπύλες $q_2(q_1)$, που δίνουν τους συνδυασμούς των σχετικών γωνιών των δύο πρώτων αρθρώσεων, για τις οποίες εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες (2.35), (2.36). Αν αυτές οι καμπύλες αποτυπωθούν σε διάγραμμα θα έχουν τη μορφή του σχήματος 2.3(α).

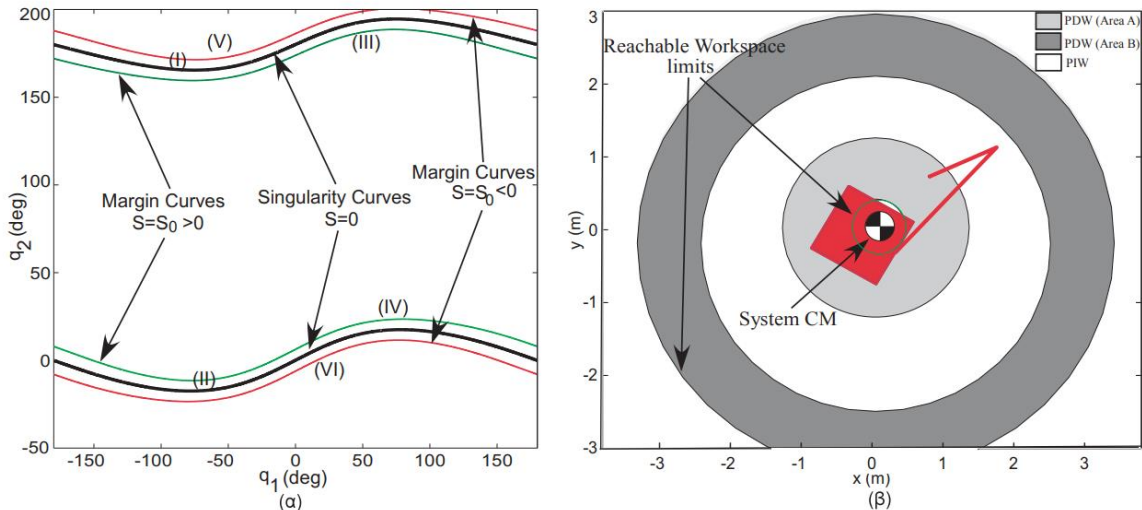
$$q_2(q_1) = \arcsin\left(-\frac{k_0(q_1)\cos\left(\arctan\left(\frac{k_2(q_1)}{k_1(q_1)}\right)\right)}{k_1(q_1)}\right) - \arctan\left(\frac{k_2(q_1)}{k_1(q_1)}\right) \quad (2.35)$$

$$q_2(q_1) = \pi - \arcsin\left(-\frac{k_0(q_1)\cos\left(\arctan\left(\frac{k_2(q_1)}{k_1(q_1)}\right)\right)}{k_1(q_1)}\right) - \arctan\left(\frac{k_2(q_1)}{k_1(q_1)}\right) \quad (2.36)$$

Αν βρεθούν οι αποστάσεις R από το κέντρο μάζας του συστήματος που μπορεί να έχει η τρίτη άρθρωση για τους παραπάνω συνδυασμούς γωνιών για τις δύο πρώτες αρθρώσεις, γίνονται γνωστές οι αποστάσεις, για τις οποίες είναι πιθανόν να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες. Η εξίσωση 2.37 δίνει τις αποστάσεις του σημείου της 3^{ης} άρθρωσης για διάφορους συνδυασμούς σχετικών γωνιών των δύο πρώτων αρθρώσεων. Για κάθε μία από τις εξισώσεις 2.35 και 2.36, η 2.37 θα έχει μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή. Ενδιάμεσα σε αυτά τα ζεύγη τιμών είναι οι αποστάσεις, για τις οποίες είναι πιθανόν να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες. Άρα βρίσκονται δύο χώροι εργασίας στους οποίους είναι πιθανόν να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες (Path Dependent Workspace, PDW). Αν αυτοί οι χώροι

δεν επικαλύπτουν ο ένας τον άλλον, ο ενδιάμεσος χώρος που προκύπτει είναι ο χώρος εργασίας, μέσα στον οποίο είναι αδύνατο να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες (Path Independent Workspace, PIW). Η απεικόνιση των χώρων εργασίας για ένα τυχαίο παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 2.3(β).

$$R = \sqrt{x_3^2 + y_3^2} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + 2ab \cos(q_1) + 2ac \cos(q_1 + q_2) + 2bc \cos(q_2)} \quad (2.37)$$



Σχήμα 2.3. (α) Απεικόνιση των καμπυλών των σχετικών γωνιών των 2 πρώτων αρθρώσεων δισδιάστατου βραχίονα αιωρούμενου ρομπότ, για τις οποίες προκαλούνται δυναμικές ιδιομορφίες. (β) Οι χώροι εργασίας δισδιάστατου αιωρούμενου ρομπότ [42].

2.3 Αντιστάσεις Σωληνώσεων και Δίκτυα Σωληνώσεων

2.3.1 Αντιστάσεις Σωληνώσεων

Συνήθως, σε σωληνώσεις κυκλικής διατομής η ροή είναι τυρβώδης, δηλαδή ο αριθμός Reynolds (Re) να είναι μεγαλύτερος από 4000. Στην τυρβώδη ροή οι ενεργειακές απώλειες είναι σημαντικές, συνεπώς οι απώλειες πίεσης υπολογίζονται συναρτήσει του τετραγώνου της μέσης ταχύτητας, η οποία με χρήση της (2.38) εκφράζεται συναρτήσει της παροχής όγκου αερίου, που περνά από τη σωλήνωση. Οι συνολικές απώλειες πίεσης λόγω συνεκτικότητας και τύρβης υπολογίζονται συναρτήσει της γεωμετρίας του αγωγού μήκους L και διαμέτρου D , που διαπερνά αέριο πυκνότητας ρ , και της κινητικής ενέργειας του ρευστού με τη σχέση των Darcy-Weisback (2.39) [36]:

$$\bar{u} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (2.38)$$

$$\delta p_f = \lambda \frac{8L\rho Q^2}{\pi^2 D^5} \quad (2.39)$$

Στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής τριβής λειών αγωγών λ προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη σχέση του Jain (2.40) συναρτήσει του αριθμού Reynolds της διαμέτρου της σωλήνωσης και της απόλυτης τραχύτητας της επιφάνειας της σωλήνωσης ε [36].

$$\lambda = \left(1,14 - 2 \log \left(\frac{21,25}{\text{Re}^{0,9}} + \frac{\varepsilon}{D} \right) \right)^{-2} \quad (2.40)$$

Η εξίσωση των ενεργειακών απωλειών (Εξίσωση 2.41) από ένα σημείο σε ένα άλλο εκφράζεται συναρτήσει της συνισταμένης των αντιστάσεων μεταξύ των σημείων (K_{total}), οπότε σε συνδυασμό με την (2.39), μπορεί να βρεθεί ο τύπος υπολογισμού της αντίστασης μίας σωλήνωσης (K_{pipe}) (2.42) [36]:

$$\delta p_{f,\text{total}} = K_{\text{total}} Q^2 \quad (2.41)$$

$$K_{\text{pipe}} = \frac{8\lambda L\rho}{\pi^2 D^5} \quad (2.42)$$

2.3.2 Δίκτυα Σωληνώσεων

Ένα δίκτυο σωληνώσεων αποτελείται από κόμβους κλάδους και βρόχους. Αν ένα δίκτυο έχει N κόμβους, S κλάδους και M βρόχους ισχύουν η (2.43) και η (2.44) [36]:

$$S = M + N - 1 \quad (2.43)$$

$$S > N > M \quad (2.44)$$

Για την επίλυση ενός δικτύου σωληνώσεων, όπως και σε ένα δίκτυο ηλεκτρικών κυκλωμάτων, ισχύουν 3 εξισώσεις [36]:

1. Σε κάθε κόμβο το άθροισμα των παροχών από και προς αυτών είναι ίσο με 0. Σε δίκτυο N κόμβων, αν δεν έχουν προστεθεί μηχανές, χρησιμοποιούνται N-1 εξισώσεις τέτοιου τύπου για την επίλυση του και ονομάζονται εξισώσεις συνέχειας (2.45):

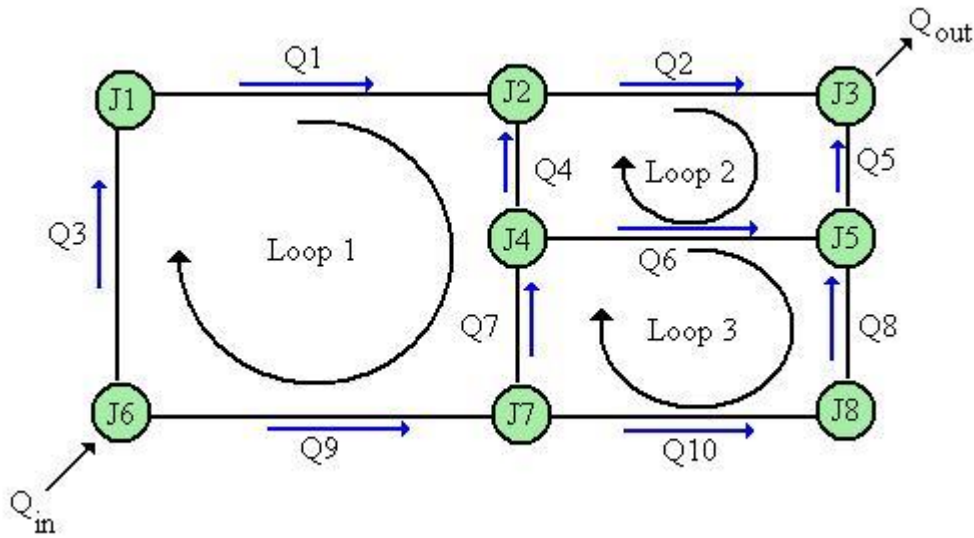
$$\sum_j Q_j + C_i = 0 \quad (2.45)$$

Όπου j οι κλάδοι που συνδέονται με τον κόμβο i και C οι εξωτερικές πηγές και καταναλώσεις του κόμβου.

2. Σε ένα βρόχο f η ολική πτώση πίεσης είναι ίση με 0. Για την επίλυση του συστήματος χρησιμοποιούνται M εξισώσεις για M βρόχους H (2.46) ονομάζεται εξίσωση διατήρησης ενέργειας:

$$\sum_j \delta p_{f,j} = 0 \quad (2.46)$$

3. Και για κάθε κλάδο ισχύει η (2.41), ή αλλιώς η εξίσωση ενεργειακών απωλειών.



Σχήμα 2.4. Παράδειγμα δικτύου σωληνώσεων [4].

2.4 Κινητήρες

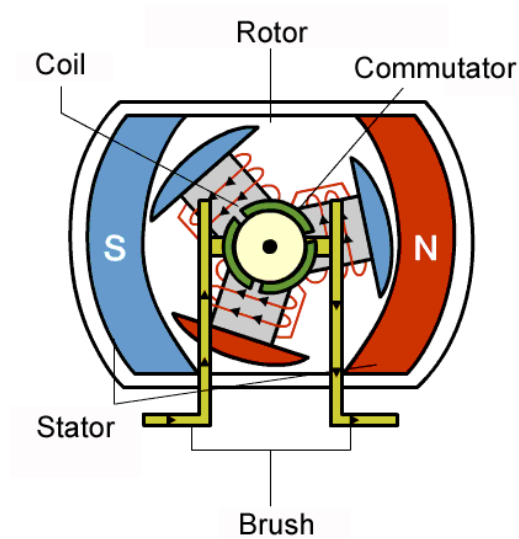
2.4.1 Κινητήρες DC Μόνιμου Μαγνήτη με Ψήκτρες

Κινητήρας DC ονομάζεται οποιαδήποτε στροφική ηλεκτρική συσκευή, η οποία μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος σε μηχανική ενέργεια. Όλοι οι τύποι κινητήρων DC έχουν έναν εσωτερικό μηχανισμό, που τους προσδίδει την ικανότητα να αλλάζουν περιοδικά τη ροή του ρεύματος στο κύκλωμα τους [43].

Στους κινητήρες DC μόνιμου μαγνήτη με ψήκτρες ο στάτορας είναι μόνιμος μαγνήτης με δύο πόλους και στο ρότορα είναι τοποθετημένα πηνία. Η περιστροφική κίνηση επιτυγχάνεται με μεταβολή του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τα πηνία στο ρότορα. Ο ρότορας τροφοδοτείται με ρεύμα από τις ψήκτρες, το οποίο ρεύμα περνά στα πηνία [43].

Είναι σύνηθης στη λειτουργία κινητήρων συνεχούς ρεύματος η προσθήκη μειωτήρων στροφών για την απόδοση υψηλότερων τιμών ροπής. Η σχέση μετάδοσης ανάμεσα σε δύο γρανάζια αν z οι οδοντώσεις του και n οι στροφές τους είναι η (2.47):

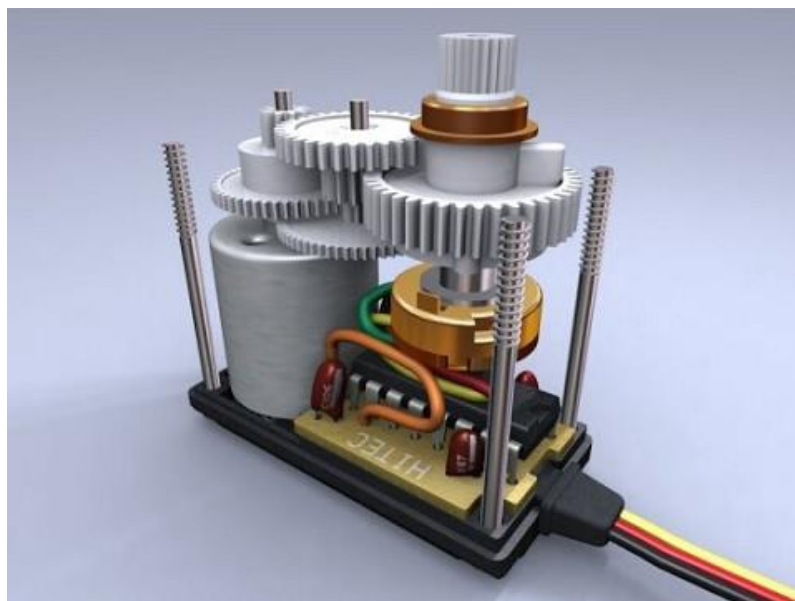
$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.47)$$



Σχήμα 2.5. Κινητήρας DC με μόνιμο μαγνήτη και ψήκτρες στο στάτορα [28].

2.4.2 RC Servo Motors

Οι σερβοκίνητες περιλαμβάνουν σύστημα ελέγχου θέσης και είναι σύνηθως επενεργητές στροφικής κίνησης. Τρία καλώδια συμβάλουν στη λειτουργία ενός τυπικού RC servo, δύο καλώδια τροφοδοσίας (η τροφοδοσία μεταξύ 5-6V) και ένα καλώδιο εντολής θέσης. Ένας τυπικός RC servo παίρνει εντολή θέσης με συχνότητα 50Hz. Για να δοθεί εντολή θέσης στον κινητήρα, δίνονται εντολές παλμών διαφορετικού πλάτους (Pulse-Width Modulation), το οποίο πλάτος αντιστοιχεί σε μία γωνιακή θέση για τον κινητήρα. Συνήθως σε RC servos παλμοί μεταξύ 1-2ms αντιστοιχούν σε γωνίες μεταξύ 0-180 μοίρες [12].



Σχήμα 2.6. Απεικόνιση της μετάδοσης κίνησης σε ένα RC servo motor [35].

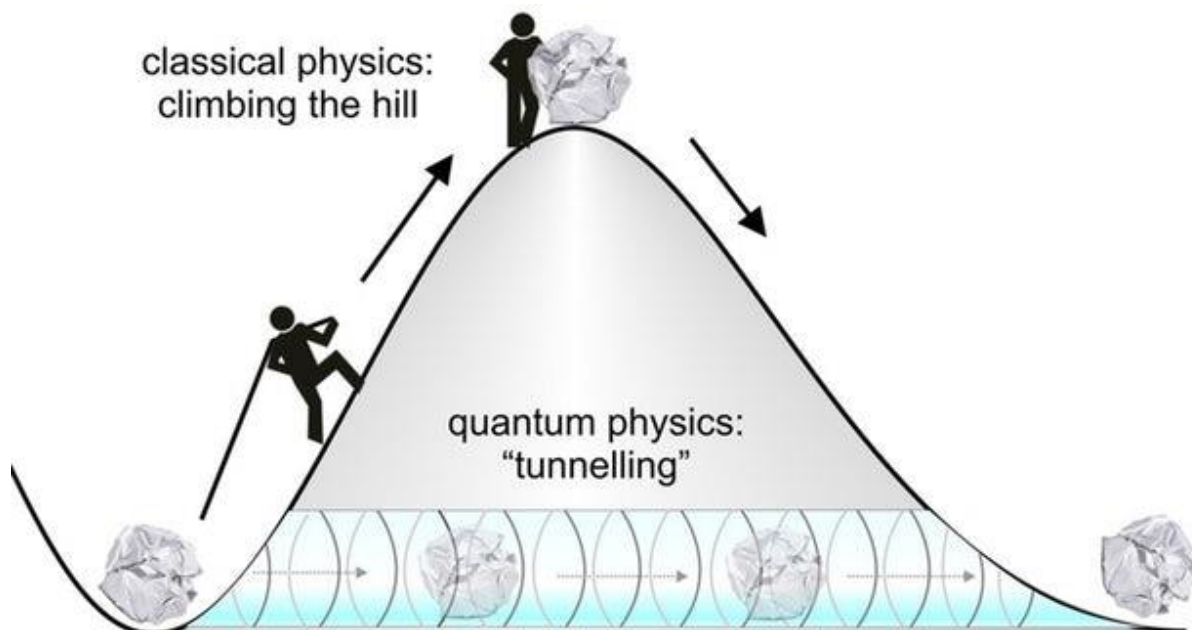
2.5 Αισθητήρες

2.5.1 Force Sensitive Resistors

Υλικά, των οποίων η αντίσταση μεταβάλλεται όταν σε αυτά ασκείται πίεση ή δύναμη, ονομάζονται Force Sensitive Resistors. Δύο φαινόμενα επηρεάζουν την αντίσταση ενός αισθητήρα τέτοιου υλικού, το φαινόμενο της διήθησης και το φαινόμενο της κβαντικής σήραγγας. Οι περισσότεροι αισθητήρες Force Sensitive Resistors, λειτουργούν υπό την επιρροή του φαινομένου κβαντικής σήραγγας.

Το φαινόμενο κβαντικής σήραγγας (Σχήμα 2.7) υποδηλώνει πως η μέση τιμή του διαχωρισμού των σωματιδίων μέσα στο υλικό του αισθητήρα, μειώνεται όταν ασκείται μηχανική τάση στο αγώγιμο πολυμερές του αισθητήρα και αυτή η μείωση προκαλεί αύξηση στη μεταφορά σωματιδίων μέσα από το υλικό σύμφωνα με εξισώσεις της κβαντικής μηχανικής για Rectangular Potential Barrier. Έτσι, ομοίως η αντίσταση του αισθητήρα μειώνεται με την αύξηση της δύναμης [2].

Από τα παραπάνω μπορεί κανείς λαμβάνοντας μετρήσεις για την αντίσταση του αισθητήρα με ένα πολύμετρο, όταν σε αυτόν ασκείται γνωστή δύναμη κατανεμημένη ομοιόμορφα να βρει κάποια αντίστροφη αναλογία ανάμεσα σε αυτές τις δύο τιμές. Όμως για να γίνει η επεξεργασία των μετρήσεων του αισθητήρα μέσω κάποιου υπολογιστή, είναι προτιμότερο να υπολογίζεται η δύναμη συναρτήσει της τάσης που μπορεί να διαβάσει ένας υπολογιστής από τον αισθητήρα. Συνηθίζεται, οι Force Sensitive Resistor να λειτουργούν με μία pull-down αντίσταση, ανάλογα με την τάξη μεγέθους των δυνάμεων που είναι επιθυμητό να μετρηθούν.

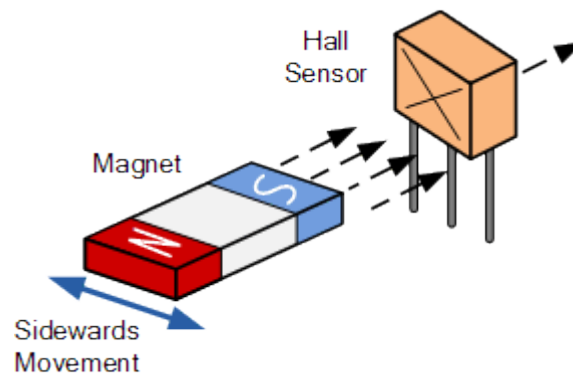


Σχήμα 2.7. Φαινόμενο κβαντικής σήραγγας [8].

2.5.2 Hall Effect Sensors

Οι αισθητήρες Hall Effect χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του μεγέθους ενός μαγνητικού πεδίου. Η έξοδος που διαβάζεται από έναν τέτοιο αισθητήρα είναι τάση, που αντιστοιχεί σε δύναμη μαγνητικού πεδίου που περνά από τον αισθητήρα.

Σε έναν τέτοιο αισθητήρα, ρεύμα διαπερνά μια λεπτή λωρίδα μετάλλου. Όταν εμφανίζεται κάποιο μαγνητικό πεδίο κοντά σε έναν τέτοιο αισθητήρα, αυτό απωθεί τα ηλεκτρόνια της λωρίδας μετάλλου στη μία άκρη της, με αποτέλεσμα να παράγεται μία τάση κατά μήκος της μικρότερης πλευράς της λωρίδας. Αν το μαγνητικό πεδίο παραμένει σταθερό παραμένει και η τιμή της τάσης αυτής σταθερή. Αν αλλάξει η τάση, θα αλλάξει με κάποια αναλογία ως προς αυτό. Έτσι, λαμβάνοντας ως μέτρηση την τιμή της τάσης αυτής, είναι δυνατό να θεωρηθεί δεδομένη και η τιμή της δύναμης του μαγνητικού πεδίου [3].



Σχήμα 2.8. Hall Effect Sensor και μαγνήτης [16].

2.5.3 Παλμογεννήτριες

Συνηθίζεται σε κινητήρες που κινούν στροφικά κάποιο αντικείμενο να χρησιμοποιούνται παλμογεννήτριες. Οι παλμογεννήτριες είναι οπτικές ή μαγνητικές συσκευές που μετατρέπουν τη γωνία θέσης ενός άξονα σε σχέση με κάποια ορισμένη μηδενική θέση σε ψηφιακό σήμα που μπορεί να επεξεργαστεί υπολογιστής. Τα παραπάνω εξαρτήματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: απόλυτοι και αυξητικοί. Η πρώτη κατηγορία μπορεί να δίνει τη θέση του άξονα ανά στιγμή, ενώ η δεύτερη δίνει πληροφορία για τη γενική κίνηση του άξονα και τις αλλαγές σε αυτήν, την οποία πληροφορία αν επεξεργαστεί κανείς, μπορεί να λάβει δεδομένα και για τη θέση και για την ταχύτητα του άξονα. Υπάρχουν πάρα πολλά ήδη rotary encoders, τα οποία δε θα αναλυθούν στην εργασία, αφού σημασία έχει για τη συνέχεια ποια είναι η ικανότητα ενός τέτοιου εξαρτήματος [5].

3 Σχεδιασμός, Κατασκευή Δεύτερου Ρομποτικού Βραχίονα και Προσθήκη Αρπάγης

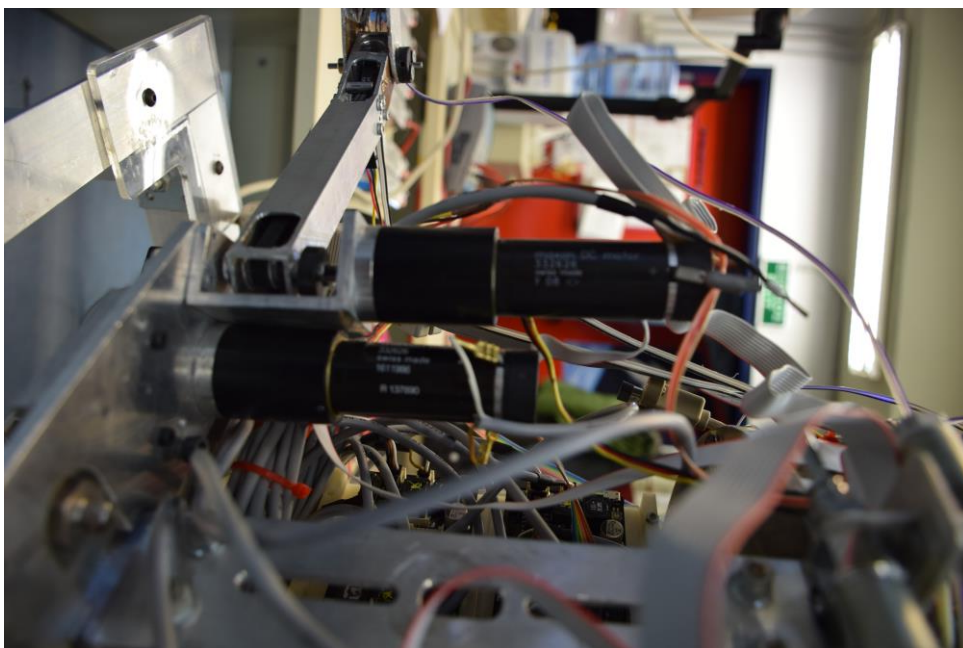
3.1 Περιγραφή του Πρώτου Βραχίονα του Ρομπότ

3.1.1 Οι Κινητήρες του Συστήματος

Ο βραχίονας του ρομπότ χωρίς την προσθήκη αρπάγης αποτελείται από δύο αρθρώσεις και δύο συνδέσμους. Τις αρθρώσεις κίνουν δύο κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (Σχήμα 3.1). Στο συγκεκριμένο σύστημα καθώς και στο σύστημα του δεύτερου βραχίονα έχει επιλεχθεί το ίδιο σετ κινητήρων. Οι κινητήρες χρησιμοποιούνται μαζί με πλανητικό μειωτήρα και rotary encoder. Συγκεκριμένα το σύνολο της εταιρείας Maxon Motor, που χρησιμοποιείται αποτελείται από:

- Κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη με συλλέκτη, ισχύος 10W και μέγιστης ροπής $\tau_{\text{κινητήρα}}^{\text{max}} = 0,136Nm$.
- Πλανητικό μειωτήρα λόγου μείωσης $n=190:1$, τριών σταδίων μέγιστης ροπής εξόδου $\tau_{\text{μειωτήρα}}^{\text{max}} = 6,5Nm$ και μέγιστης απόδοσης $\eta=70\%$.
- Αυξητική μαγνητική παλμογεννήτρια τριών καναλιών (A, B, Index).

Από τα παραπάνω φαίνεται πως η μέγιστη ροπή του συστήματος περιορίζεται από τη μέγιστη ροπή εξόδου του μειωτήρα στα 6,5Nm, αφού η ροπή, που προκύπτει από τη μέγιστη ροπή του κινητήρα το λόγο μείωσης και το συντελεστή μέγιστης απόδοσης, είναι σχεδόν τριπλάσια από αυτή την τιμή [44].



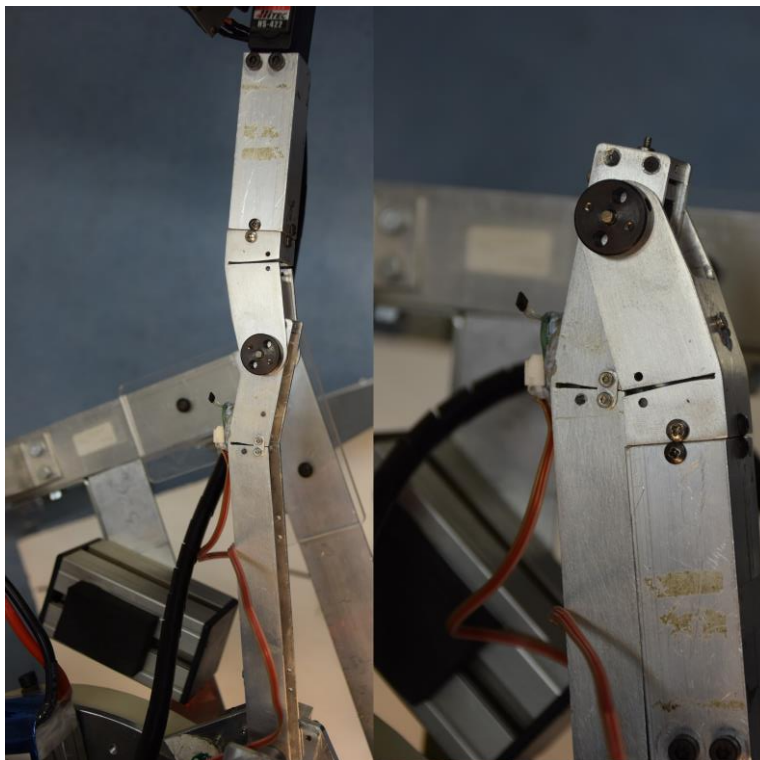
Σχήμα 3.1. Οι κινητήρες του βραχίονα προσδεμένοι στο σύστημα.

3.1.2 Οι Σύνδεσμοι του Βραχίονα

Όπως αναφέρθηκε το σύστημα αποτελείται από δύο συνδέσμους. Οι σύνδεσμοι αυτοί κατασκευαστήκαν από τετράγωνα προφίλ αλουμινίου. Το προφίλ του πρώτου συνδέσμου είναι 2cmX2cm, ενώ του δεύτερου 2,5cmX2,5cm, ώστε να μπορεί να πειροστρέφεται γύρω από το πρώτο. Χαρακτηριστικό των δύο αυτών μελών είναι πως στην ευθεία των μηκών των προφίλ τους έχει αφαιρεθεί υλικό και έχουν λυγιστεί έτσι ώστε ο βραχίονας να έχει τη δυνατότητα πλήρους αναδίπλωσης, αλλά και ο άξονας συμμετρίας των μελών να ταυτίζεται με τον άξονα που διέρχεται από τις δύο αρθρώσεις και το άκρο του βραχίονα (Σχήμα 3.2). Στα σημεία, που έχει αφαιρεθεί υλικό, έχουν τοποθετηθεί ενισχύσεις, για να διατηρούν το σημείο δύσκαμπτο. Τα μέλη έχουν κατασκευαστεί από κράμα αλουμινίου T6-7075. Τα χαρακτηριστικά των μελών αυτών, όπως ληφθήκαν από αρχεία SolidWorks παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1:

Πίνακας 3.1. Γεωμετρικά και δυναμικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων του 1ο βραχίονα χωρίς την προσθήκη αρπάγης.

Μέλος του βραχίονα	1° (i=1)	2° (i=2)
Αδράνεια I_i (kgm ²)	0,0002	0,0002
Μάζα m_i (kg)	0,086	0,079
Μήκος συνδέσμου α_i (m)	0,182	0,13



Σχήμα 3.2. Τα μέλη του βραχίονα σε ευθεία και απεικόνιση της ικανότητας αναδίπλωσης.

Τα εύρη των σχετικών γωνιών των δύο αρθρώσεων περιγράφονται από τις ανισότητες 3.1, 3.2 [44]:

$$-53^\circ \leq q_1 \leq 150^\circ \quad (3.1)$$

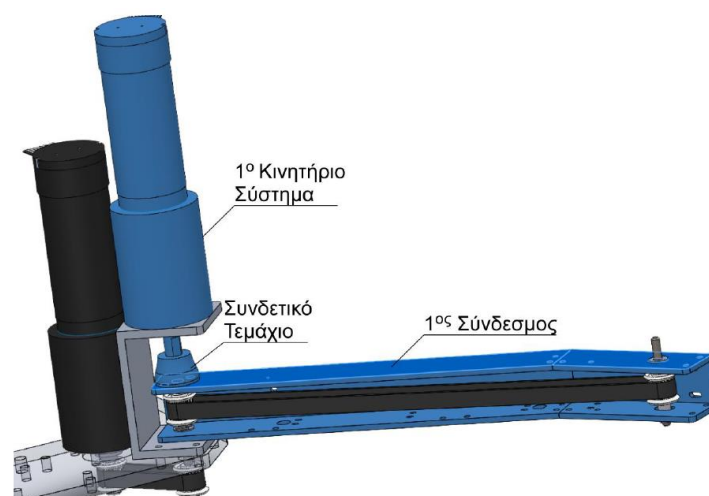
$$-172^\circ \leq q_2 \leq 95^\circ \quad (3.2)$$

όπου $q_1 = 0$, όταν ο πρώτος σύνδεσμος είναι κάθετος στην επιμηκέστερη διάσταση της βάσης των βραχιόνων και $q_2 = 0$, όταν τα μήκη των δύο συνδέσμων δημιουργούν ευθεία.

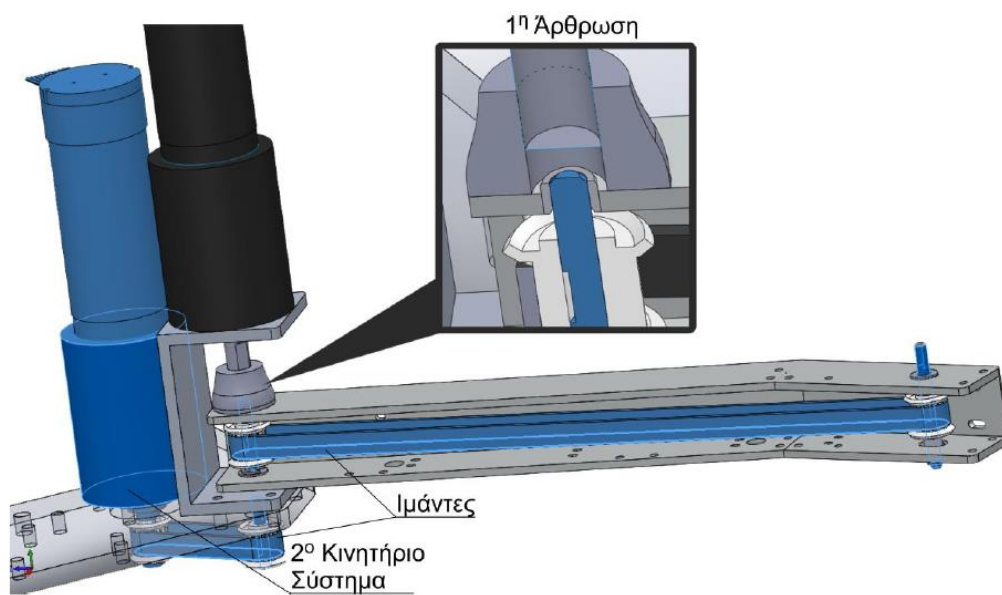
3.1.3 Το Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης

Για να μην προσδίδεται καμπτικό φορτίο στο βραχίονα με την πρόσδεση ενός κινητήρα στη δεύτερη άρθρωση, ο κινητήρας της άρθρωσης αυτής έχει τοποθετηθεί κοντά στη βάση του ρομπότ και κινεί την άρθρωση με τη βοήθεια συστήματος μετάδοσης κίνησης, για την τοποθέτηση του οποίου το πρώτο μέλος του βραχίονα στην μία του πλευρά δεν έχει υλικό. Το σύστημα μετάδοσης έχει επιλεγθεί να είναι ένα σύστημα ιμάντων χρονισμού και τροχαλίων S2M, μικρού ύψους, ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν μέσα στο πρώτο μέλος του βραχίονα. Η μελέτη για τον αριθμό οδοντώσεων και τις διαστάσεις έχει γίνει στη Διπλωματική Εργασία του Γ. Παπαστεργίου [44]. Οι τροχαλίες τοποθετούνται σε άξονα M3.

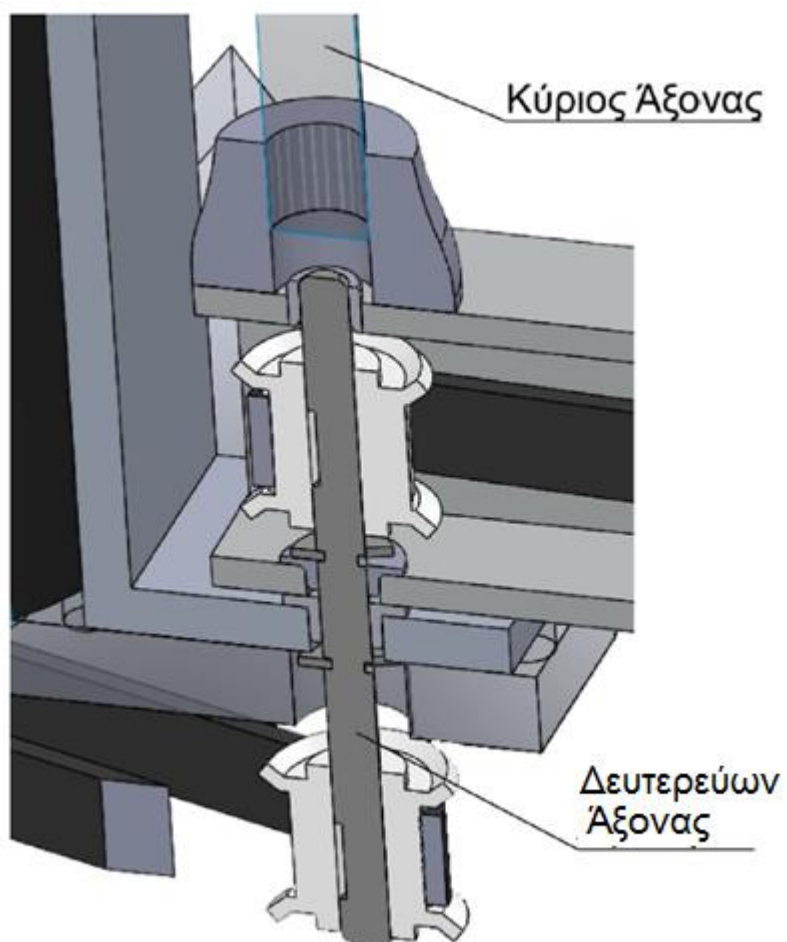
Το σύστημα μετάδοσης αποτελείται από δύο ιμάντες χρονισμού και τέσσερις τροχαλίες, δύο από τις οποίες βρίσκονται στον ίδιο άξονα. Ο κινητήρας της δεύτερης άρθρωσης κινεί κάτω από τη βάση του βραχίονα με τροχαλία άξονα ο οποίος είναι τοποθετείται σε συνέχεια με τον άξονα του κινητήρα της πρώτης άρθρωσης και ο οποίος στο ύψος των συνδέσμων έχει μία δεύτερη τροχαλία που κινεί τον άξονα της δεύτερης άρθρωσης (Σχήμα 3.2) (Σχήμα 3.3) (Σχήμα 3.4). Στην επαφή των αξόνων με τα μέλη και με τη βάση χρησιμοποιούνται εδράσεις κεραμικού υλικού.



Σχήμα 3.3. Σύστημα μετάδοσης κίνησης για την πρώτη άρθρωση [44].



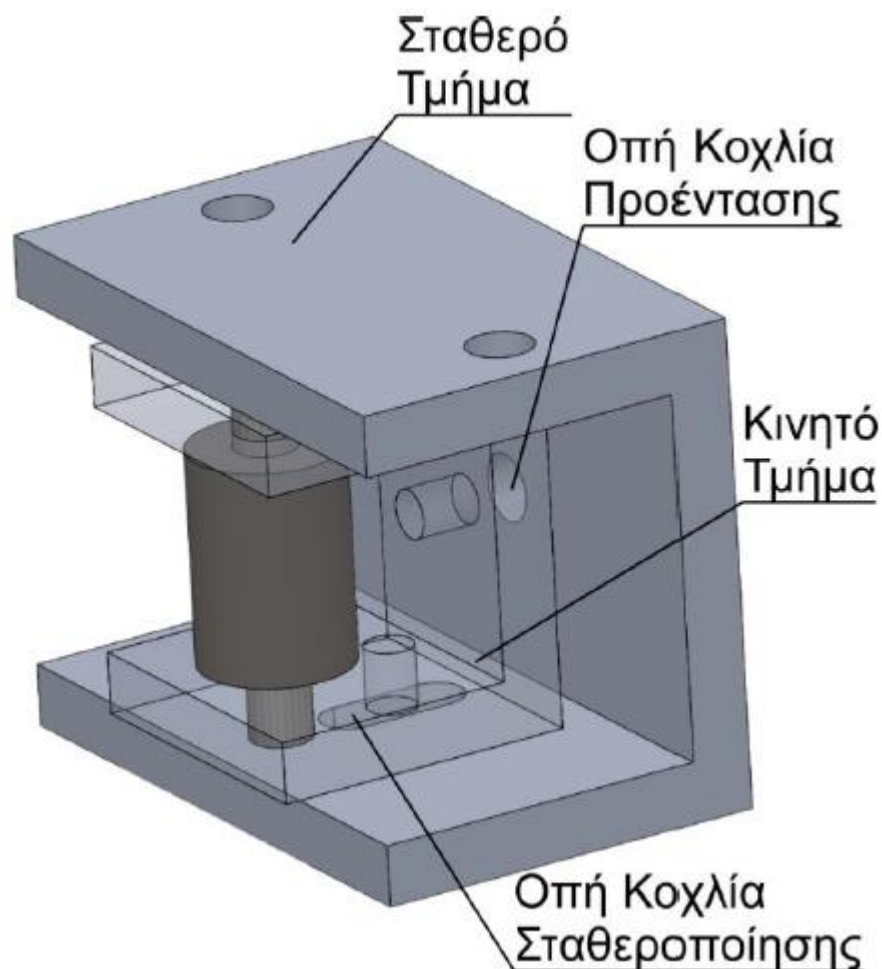
Σχήμα 3.4. Σύστημα μετάδοσης κίνησης για τη δεύτερη άρθρωση [44].



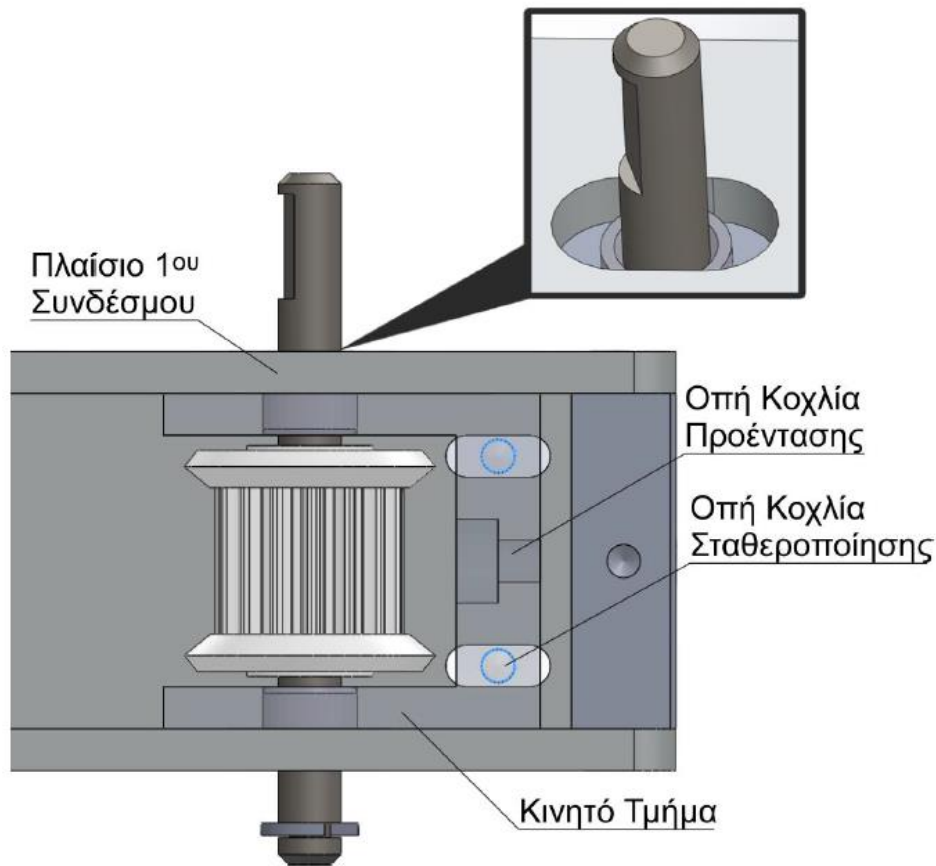
Σχήμα 3.5. Άξονας που μεταδίδει την κίνηση από την πρώτη τροχαλία στη δεύτερη [44].

Για την τοποθέτηση των τροχαλιών στους άξονες έχουν ανοιχθεί κάποιες οπές M2, ώστε να τοποθετηθεί ακέφαλη βίδα Άλλεν σε αυτές, και κάποιες έχουν κολληθεί με κόλλα, επομένως για να αποσυναρμολογηθεί το σύστημα πρέπει να προθερμανθεί στα σημεία που έχει τοποθετηθεί κόλλα.

Για τους ιμάντες (Σχήμα 3.8, Σχήμα 3.9) έχουν τοποθετηθεί στις αρθρώσεις κατάλληλα συστήματα προέντασης, έτσι ώστε να μπορεί να μεταβληθεί ο τανυσμός του ιμάντα ανάλογα με την επιθυμητή λειτουργία, αλλά και να μπορεί να συναρμολογηθεί εύκολα το σύστημα. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από πλαίσια που ολισθαίνουν το ένα στο άλλο και με τη χρήση οπών και βιδών προέντασης και σταθεροποίησης τανύζεται το σύστημα (Σχήμα 3.5), (Σχήμα 3.6). Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται πως ο οδηγός του άξονα έχει χώρο για χαλαρή συναρμογή με τα έδρανα ως προς το πλαίσιο του πρώτου μέλους, ενώ σφιχτή συναρμογή ως προς το πλαίσιο που τανύει τον ιμάντα.

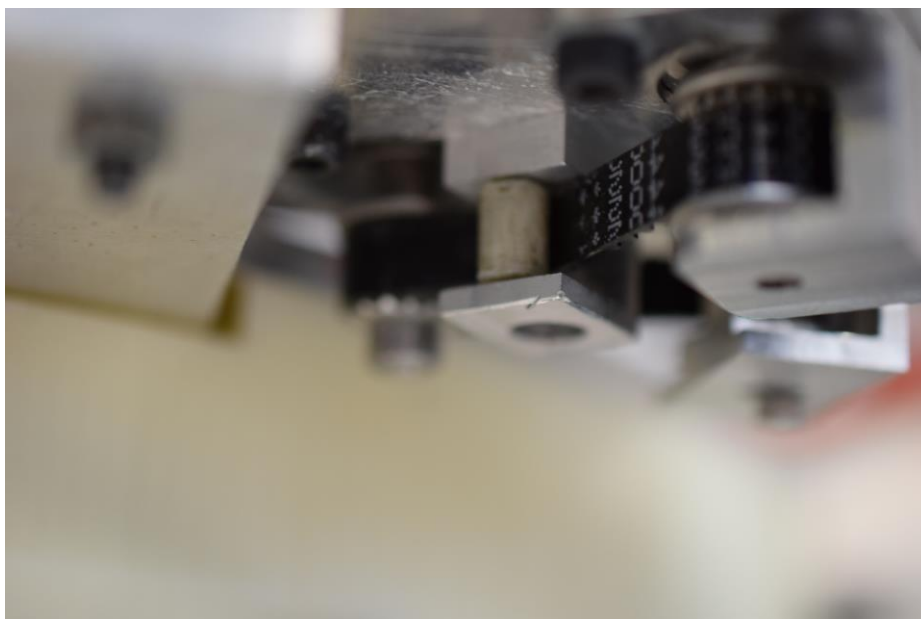


Σχήμα 3.6. Σύστημα προέντασης του πρώτου ιμάντα χρονισμού [44].

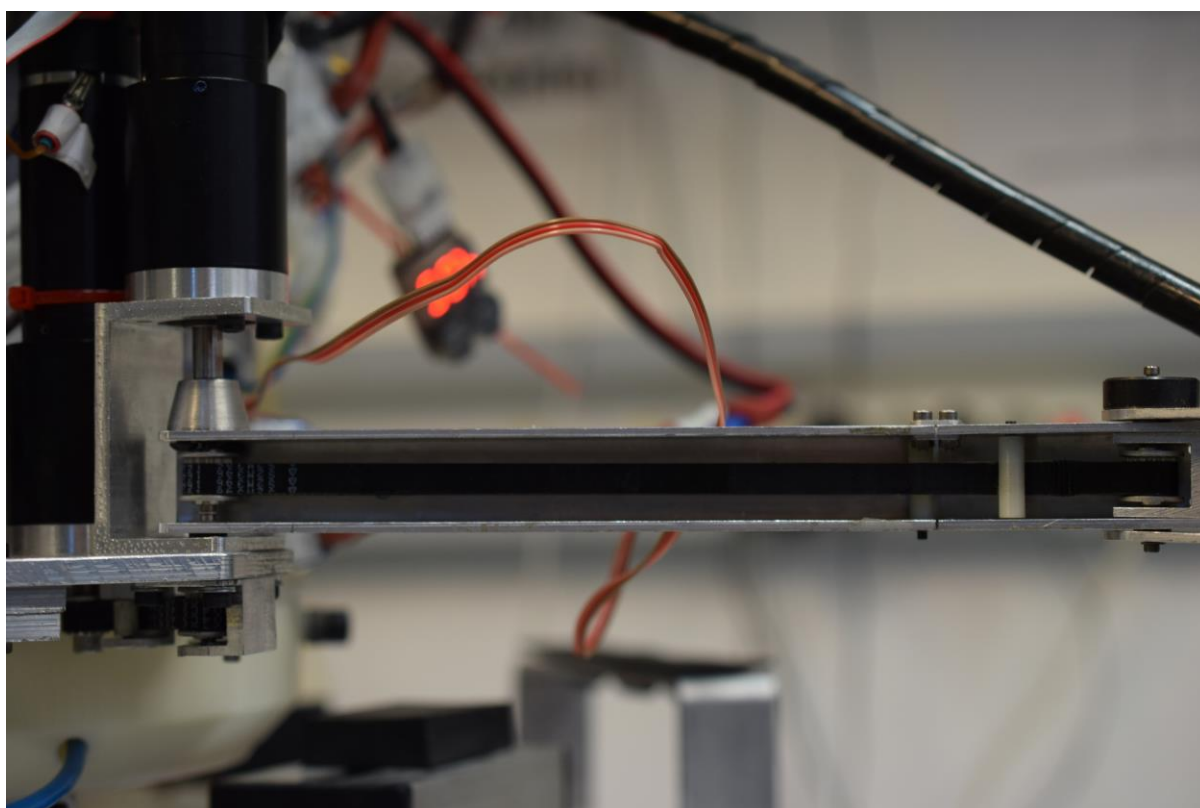


Σχήμα 3.7. Σύστημα προέντασης του δεύτερου ιμάντα χρονισμού [44].

Για να παραμείνει ο ιμάντας εντός της γεωμετρίας του πρώτου μέλους του βραχίονα έχουν τοποθετηθεί δύο δρόμοι για να ακολουθεί τη γεωμετρία του μέλους (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.8. Απεικόνιση πρώτου ιμάντα χρονισμού των τροχαλίων του και των δρόμων του.



Σχήμα 3.9. Απεικόνιση δεύτερου μάντα χρονισμού, πλαισίου προέκτασης και δρόμων του μάντα.

3.2 Επιθυμητές Αλλαγές στα Χαρακτηριστικά του Δεύτερου Βραχίονα

3.2.1 Τριβή στις Αρθρώσεις

Από την απόδοση του πρώτου βραχίονα, γίνεται αντιληπτή η επιρροή τριβής κατά την κίνηση στις αρθρώσεις, η οποία δεν έχει κάποια σταθερή τιμή. Χαρακτηριστικά υπάρχουν σημεία στην τροχιά των μελών του βραχίονα, στα οποία για να αποδοθεί η απαραίτητη ροπή, ώστε να προσπεραστούν αυτά τα σημεία, πρέπει ο αντίστοιχος κινητήρας να αποδώσει ροπή εκτός της ροπής που αποδίδει σε ομαλή λειτουργία. Σε διάφορα σημεία λόγω καμπτικού φορτίου εφάπτεται αλουμίνιο με αλουμίνιο, υλικά τα οποία όπως θα αναλυθεί αργότερα έχουν μεγάλο συντελεστή τριβής μεταξύ τους.

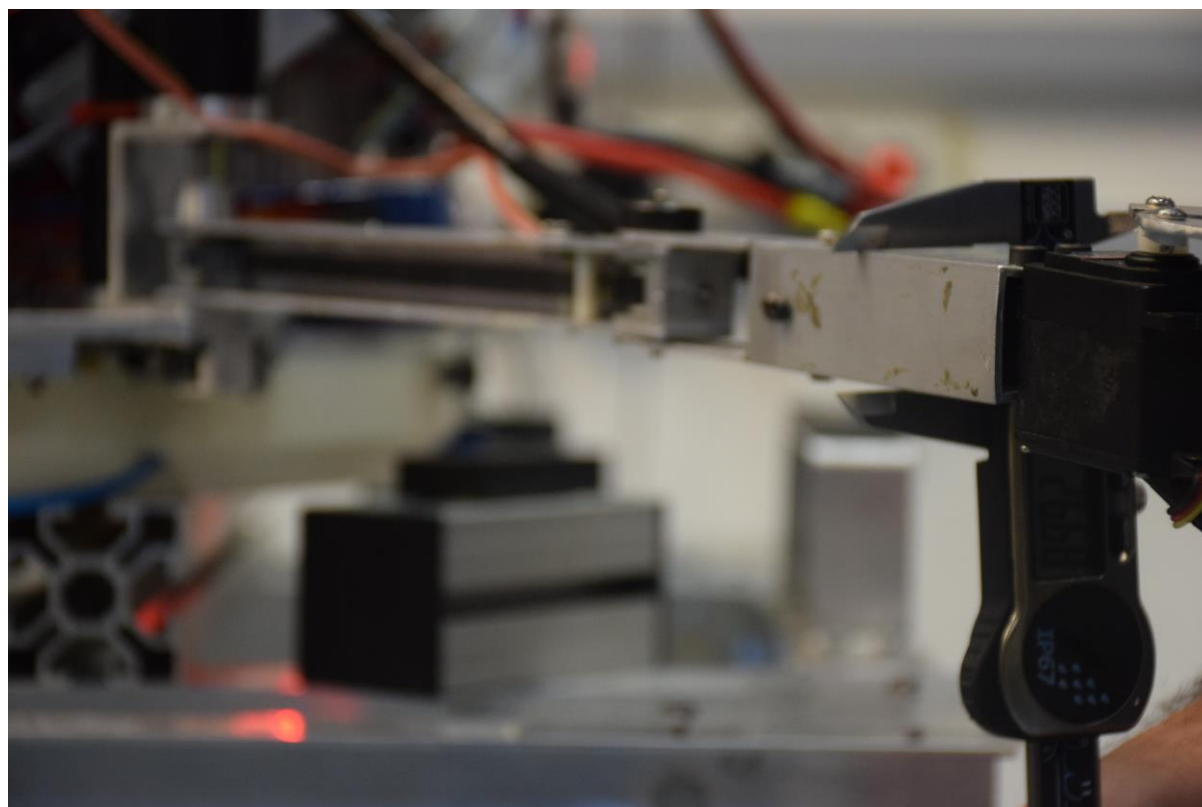
3.2.2 Καμπτικό Φορτίο

Με την προσθήκη της αρπάγης (αρπάγη, δύο σερβοκινητήρες, εξάρτημα σύνδεσης) φάνηκε ο βραχίονας να κάμπτεται ελάχιστα με το συνολικό βάρος 150 γραμμαρίων. Τοποθετήθηκε ένα ηλεκτρονικό παχύμετρο στη διατομή της άκρης του δεύτερου μέλους του βραχίονα και τοποθετήθηκαν στην άκρη αυτή πρότυπα βάρη, ώστε να ληφθούν μετρήσεις για τη μετατόπιση του άκρου (Σχήμα 3.10), (Σχήμα 3.11). Τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν με

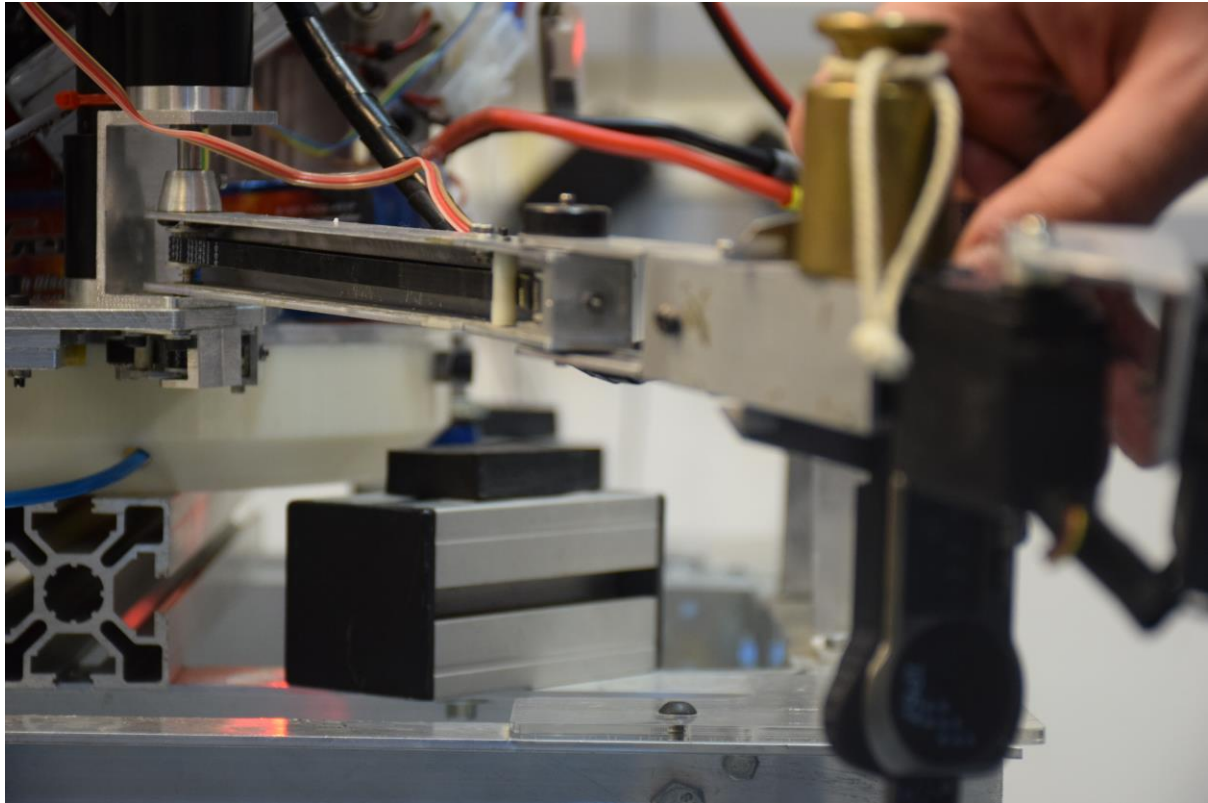
μηδενική σχετική γωνία για τη δεύτερη άρθρωση του βραχίονα. Έπειτα στο σχέδιο του βραχίονα στο Solidworks Simulation τοποθετήθηκε πάκτωση στο σημείο που συνδέεται με τη βάση του ρομπότ η πρώτη άρθρωση, η σχετική γωνία του δεύτερου μέλους τοποθετήθηκε σε αντίστοιχη θέση με αυτή των πειραμάτων και εφαρμόστηκε κάθετη δύναμη στο άκρο του δεύτερου μέλους του βραχίονα αντίστοιχη με αυτή των πρότυπων βαρών (Σχήμα 3.12) (Σχήμα 3.32). Από τα παραπάνω ληφθήκαν μετρήσεις της μετατόπισης λόγω κάμψης. Τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν για βάρη 200 και 500 γραμμαριών. Οι μέσες τιμές των μετρήσεων για τα πειράματα και οι τιμές που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις έχουν ως εξής:

Πίνακας 3.2. Αποτελέσματα μετατοπίσεων λόγω κάμψης στα πειράματα και στις προσομοιώσεις.

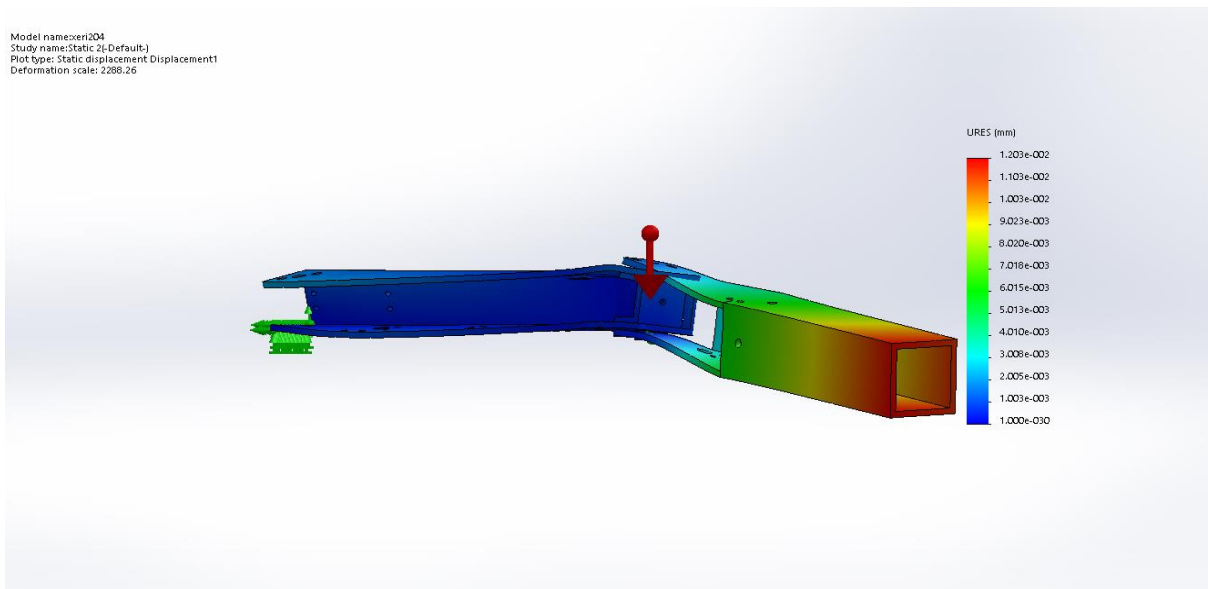
Μάζα που προκαλεί κάμψη (g)	Μετατόπισεις λόγω κάμψης στα πειράματα (mm)	Μετατόπισεις λόγω κάμψης στις προσομοιώσεις (mm)
200	1	0,012
500	2,5	0,027



Σχήμα 3.10. Το ηλεκτρονικό παχύμετρο όπως τοποθετήθηκε στο άκρο του δεύτερου μέλους του βραχίονα για μετρήσεις μετατόπισης λόγω του καμπτικού φορτίου.

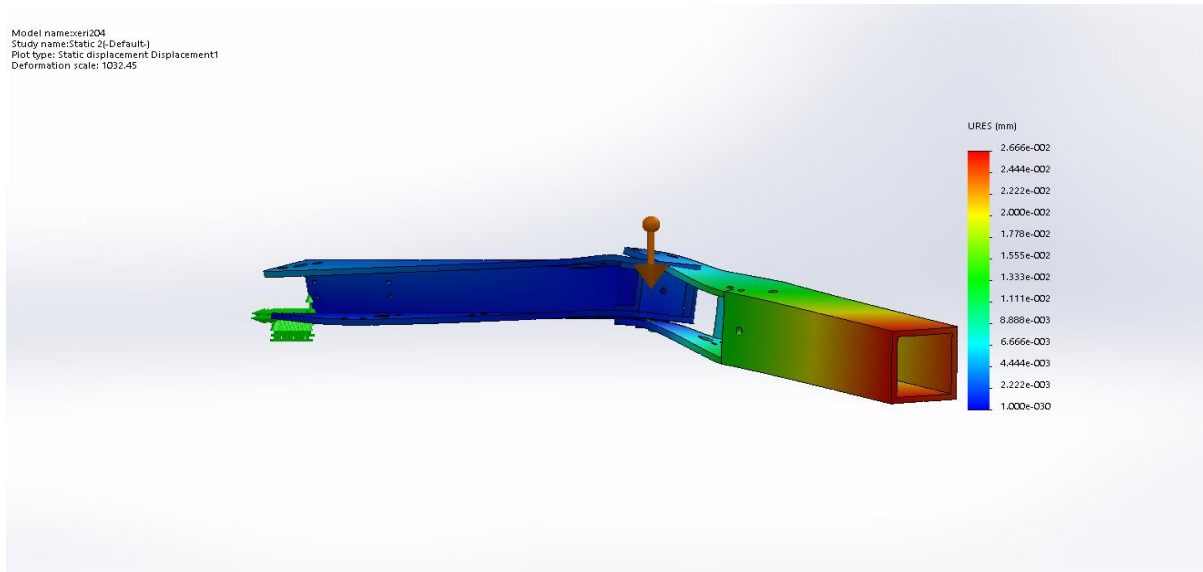


Σχήμα 3.11. Τοποθέτηση πρότυπου βάρους στο δεύτερο μέλος του βραχίονα για μέτρηση της μετατόπισης του άκρου λόγω καμπτικού φορτίου.



Σχήμα 3.12. Αποτελέσματα μετατόπισης λόγω κάμψης του βραχίονα για 200 γραμμάρια στην προσομοίωση στο Solidworks Simulation.

Model name: xeri204
Study name: Static 2(-Default-)
Plot type: Static displacement/Displacement1
Deformation scale: 1032.45



Σχήμα 3.13. Αποτελέσματα μετατόπισης λόγω κάμψης του βραχίονα για 500 γραμμάρια στην προσομοίωση στο Solidworks Simulation.

Σίγουρα υπάρχουν αποκλίσεις στις δύο μεθόδους, αφού στα πειράματα τοποθετηθήκαν μετρητικά όργανα με την ακρίβεια, που μπορεί να τα τοποθετήσει ένας άνθρωπος, καθώς επίσης στις προσομοιώσεις δε ληφθήκαν υπόψη οι μετατοπίσεις λόγω κάμψης της βάσης των βραχιόνων που είναι σημαντικές. Παρόλα αυτά παρατηρείται μία γραμμική αναλογία ανάμεσα στις μετρήσεις. Έτσι λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω αναλογία, θεωρείται πως οποιαδήποτε βελτίωση στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης ανταποκρίνεται με την ίδια αναλογία στην πραγματικότητα.

3.2.3 Εμφάνιση του Βραχίονα

Με την προσθήκη αισθητήρων και αρπάγης προστίθενται στα συστήματα βραχιόνων πολλά εξαρτήματα, τα οποία χρειάζονται τροφοδοσία από τον πύργο PC104 που βρίσκεται στη βάση του ρομπότ, οπότε ακολουθούν τα μήκη των μελών του βραχίονα καλώδια που έχουν μεγάλο μήκος, με αποτέλεσμα ο βραχίονας να περιτριγυρίζεται από έναν όγκο καλωδίων.

3.3 Υλοποίηση των Αλλαγών στο Σχεδιασμό του Δεύτερου Βραχίονα

3.3.1 Τριβή στις Αρθρώσεις

Φανερός παράγοντας στο πρόβλημα εμφάνισης της τριβής στις αρθρώσεις είναι η επαφή μεταξύ αλουμινίων. Για τη βελτίωση της απόδοσης των αρθρώσεων στόχος είναι να μειωθεί ο συντελεστής τριβής μεταξύ των σωμάτων που ακουμπάνε. Ο συντελεστής τριβής μεταξύ αλουμινίων είναι κοντά στο 1,1, που είναι σίγουρα πολύ μεγάλη τιμή για συντελεστή τριβής. Υλικό γνωστό για χαμηλό συντελεστή τριβής είναι το τεφλόν. Οπότε έγινε έρευνα για χρήση υλικού που να περιέχει τεφλόν, για να γίνει σύγκριση των συντελεστών τριβής, όπου τα αποτελέσματα τοποθετούνται στον Πίνακα 3.3. Η λύση να χρησιμοποιείται λιπαντικό στα

αλουμίνια απορρίφθηκε, γιατί δε ρίχνει αρκετά το συντελεστή τριβής και θα πρέπει ανά διαστήματα να εφαρμόζεται λιπαντικό στις αρθρώσεις. Προτού να γίνει σύγκριση ανάμεσα στα πιθανά υλικά να σημειωθεί, πως αν πραγματοποιηθεί ανοδίσωση στα αλουμίνια ο συντελεστής τριβής πέφτει κατά πολύ στη μεταξύ τους επαφή, αλλά είναι διαδικασία ακριβή, χρονοβόρα και επικίνδυνη λόγω των χημικών που χρησιμοποιούνται και της τροφοδοσίας από πρίζες των δωματίων.

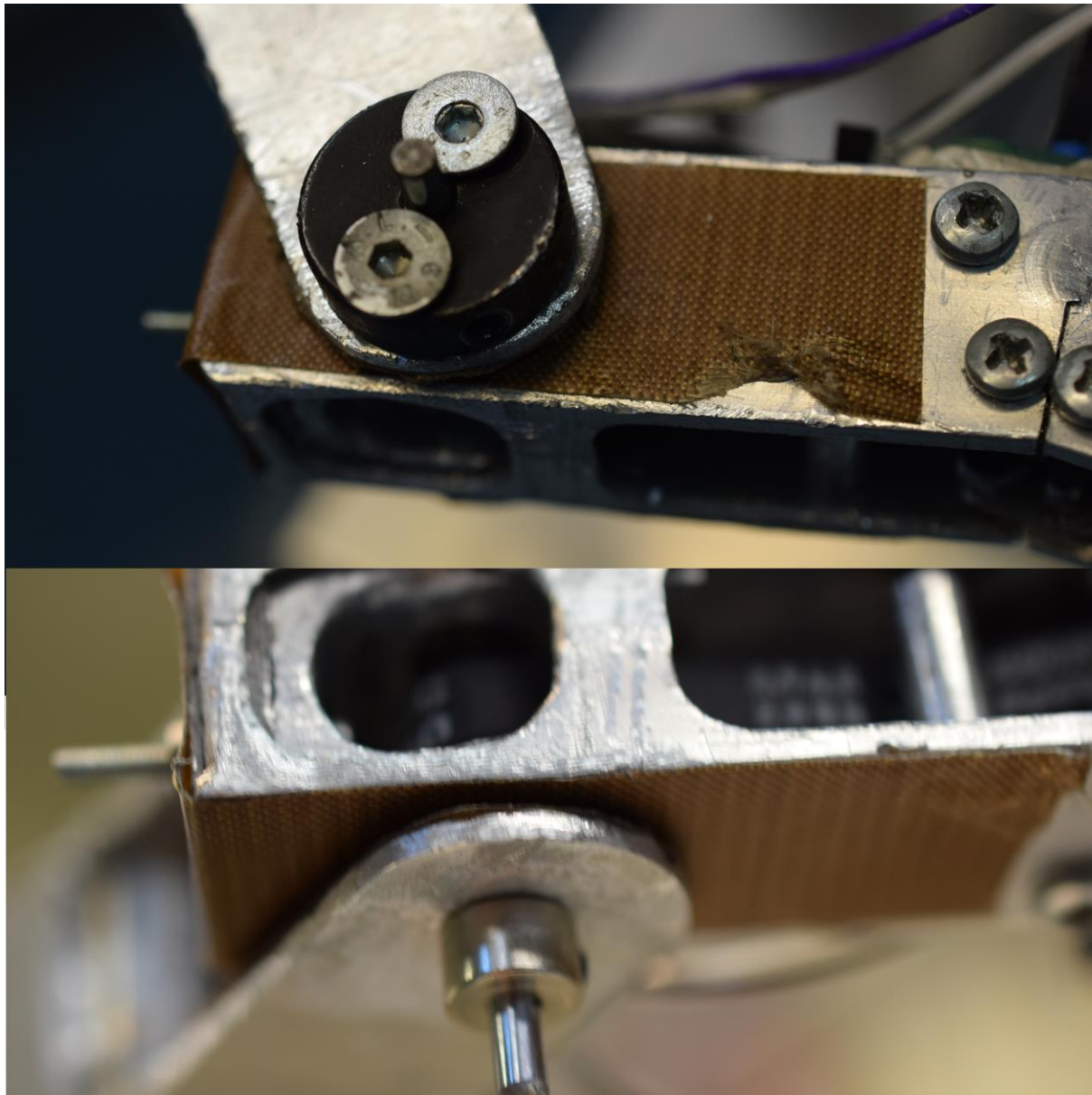
Πίνακας 3.3. Συντελεστές τριβής και φθοράς για υλικά σε επαφή με αλουμίνιο [1] [6] [18] [33].

Υλικό	Αλουμίνιο	Τεφλόν	Τεφλόν με γυαλί	Ανοδωμένο Αλουμίνιο (με ανοδωμένο αλουμίνιο)
Συντελεστής τριβής σε επαφή με αλουμίνιο	1,05-1,35	0,05	0,07	0,17
Παράγοντας Φθοράς (mm ³ sec/Nmh)	0,007	1	0,00071	0,007

Στον Πίνακα 3.3 το τεφλόν έχει τον χαμηλότερο συντελεστή τριβής. Όμως, το τεφλόν δεν ενδεικνύεται καθόλου για μηχανικές λειτουργίες λόγω του υψηλού συντελεστή φθοράς του. Αντί αυτού επιλέχθηκε τεφλόν εμπλουτισμένο με γυαλί, όπου ο συντελεστής φθοράς είναι πολύ χαμηλός. Έτσι το υλικό αυτό έχει πολύ χαμηλό συντελεστή τριβής, ενώ δε φθείρεται τόσο εύκολα με τη χρήση, οπότε χρειάζεται πολύ πιο σπάνια αλλαγή. Όσον αφορά την εφαρμογή αγοράστηκε αυτοκόλλητο τεφλόν εμπλουτισμένο με γυαλί πάχους ενός δέκατου του χιλιοστού για να τοποθετηθεί στα σημεία που ακουμπάνε μεταξύ τους στις αρθρώσεις ως έδραση (Σχήμα 3.14) (Σχήμα 3.15). Επίσης αντί να χρησιμοποιηθούν ρουλεμάν κεραμικού υλικού χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά ρουλεμάν με σφαίρες στις εδράσεις των αξόνων, που είναι πιο αποδοτικά.



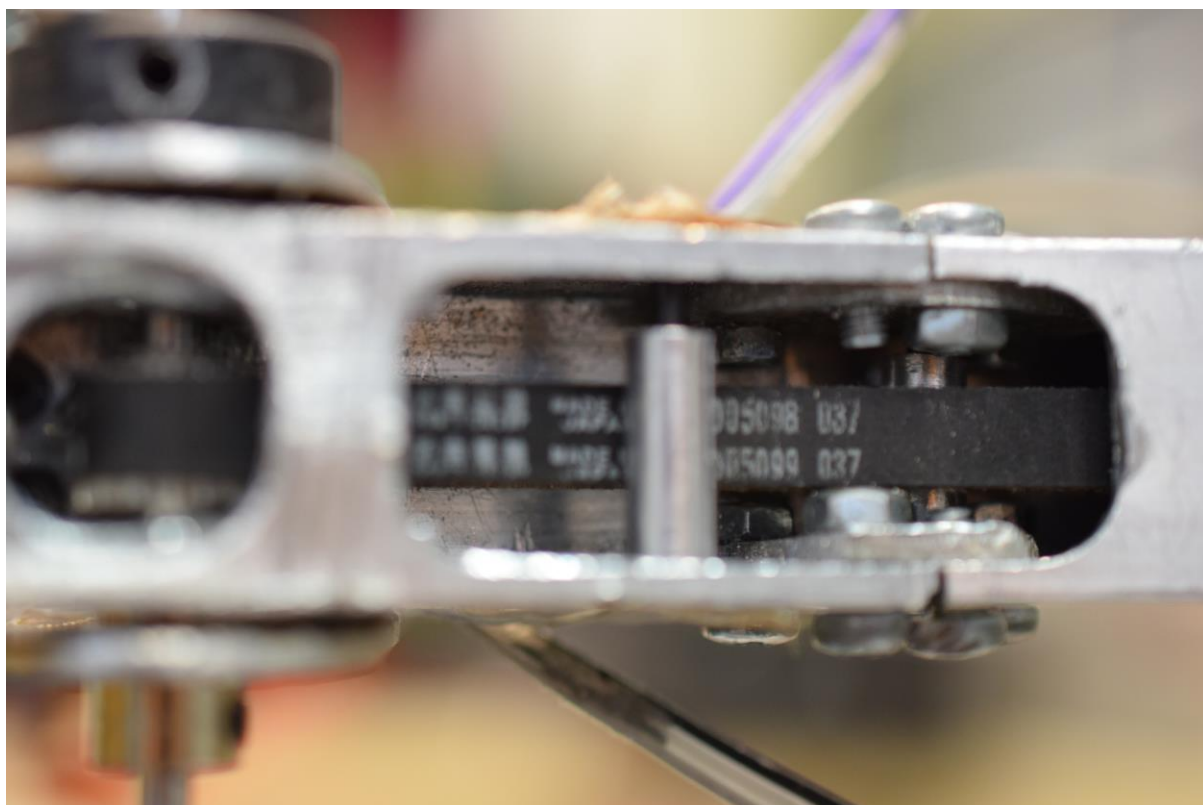
Σχήμα 3.14. Έδραση με τεφλόν εμπλουτισμένο με γυαλί στην πρώτη άρθρωση.



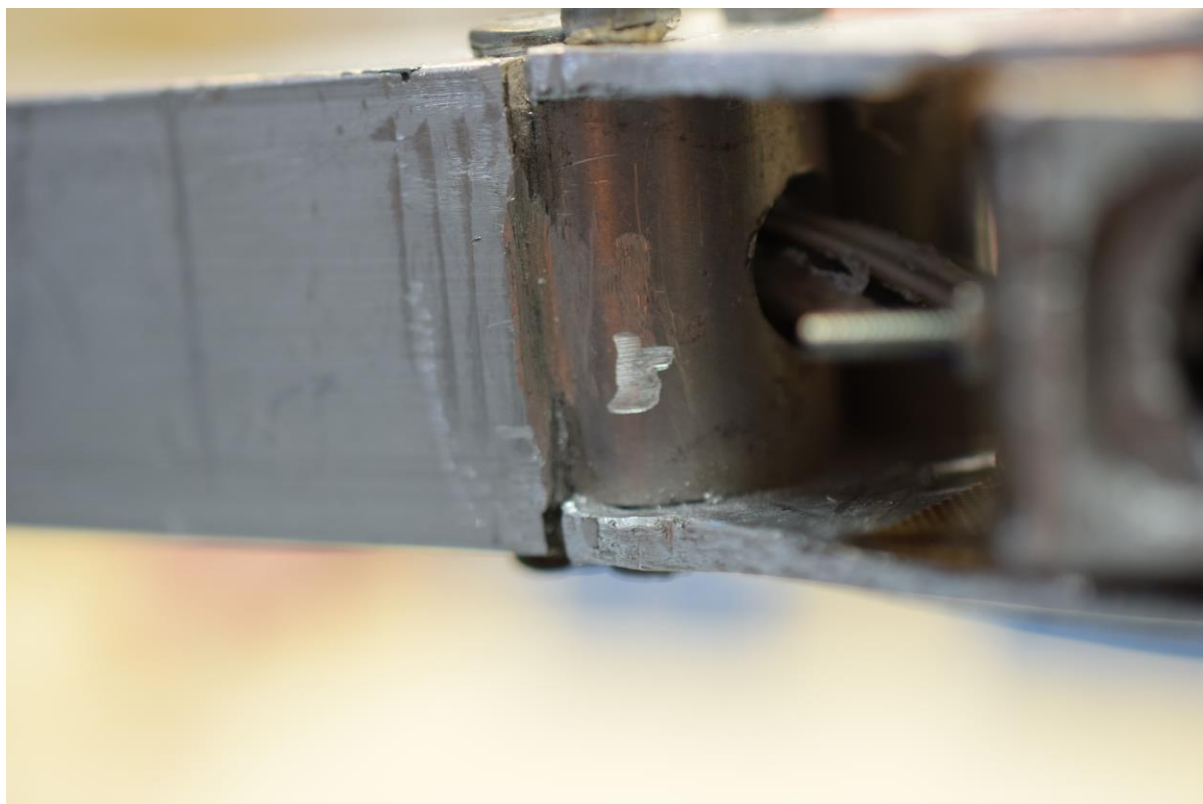
Σχήμα 3.15. Έδραση με τεφλόν εμπλουτισμένο με γυαλί στη δεύτερη άρθρωση.

3.3.2 Καμπτικό Φορτίο

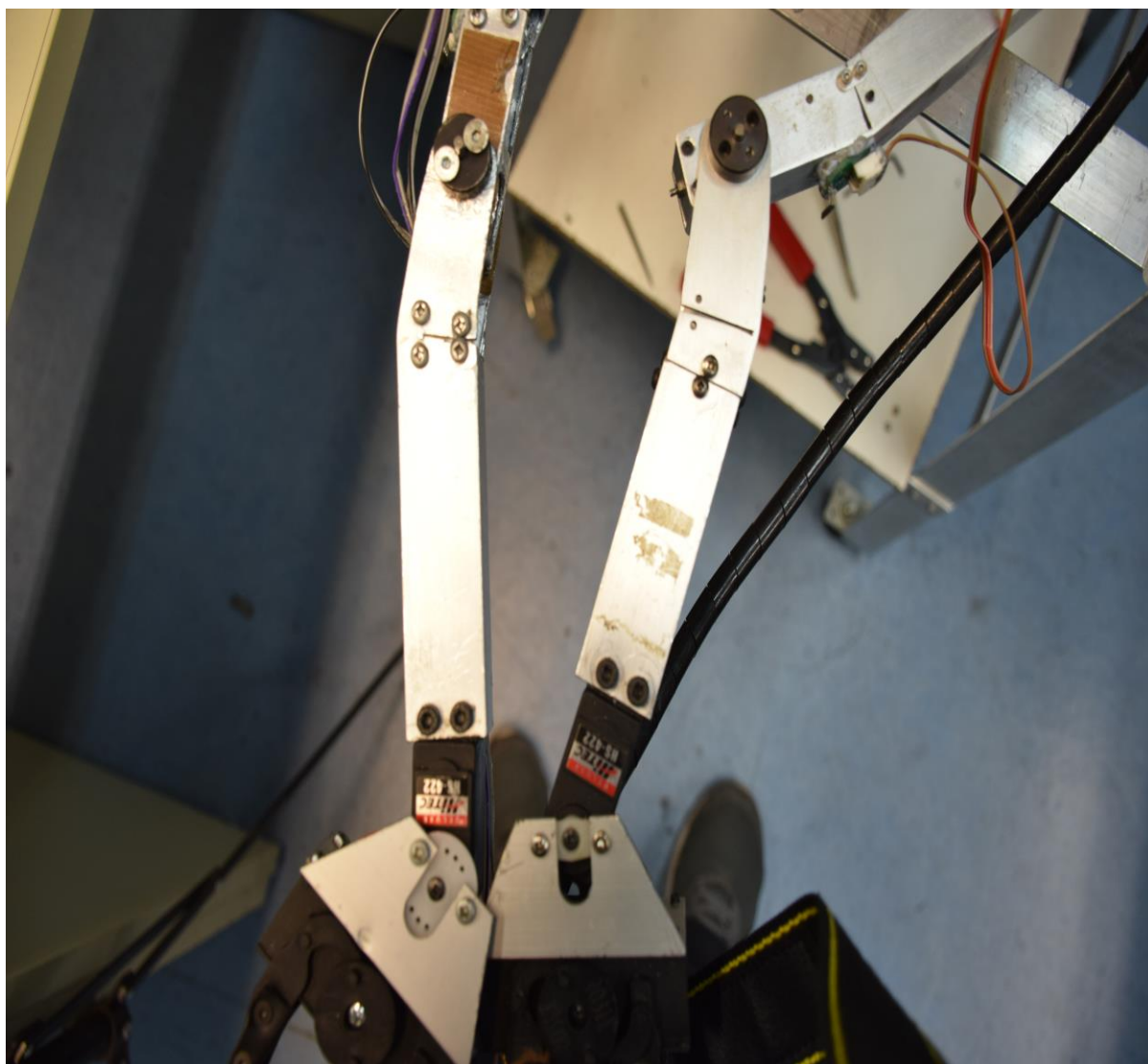
Πριν να βρεθεί κάποια βέλτιστη λύση στις προσομοιώσεις του SolidWorks Simulation, φανερές ήταν τρεις δυνατές λύσεις για την αντοχή μεγαλύτερων καμπτικών φορτίων. Πρώτον οι προσθήκη πλατύτερων και παχύτερων ενισχύσεων στους όγκους αναδίπλωσης των συνδέσμων (Σχήμα 3.16) (Σχήμα 3.17), δεύτερον η κατασκευή του δεύτερου συνδέσμου του βραχίονα ως ενός μόνο εξαρτήματος και όχι ως συνδυασμός δύο με σύνδεση με βίδες (Σχήμα 3.18) και τρίτον η χρήση άξονα M4 αντί για M3, γύρω από τον οποίο περιστρέφεται η πρώτη άρθρωση.



Σχήμα 3.16. Ενίσχυση στον όγκο αναδίπλωσης του πρώτου συνδέσμου του νέου βραχίονα.



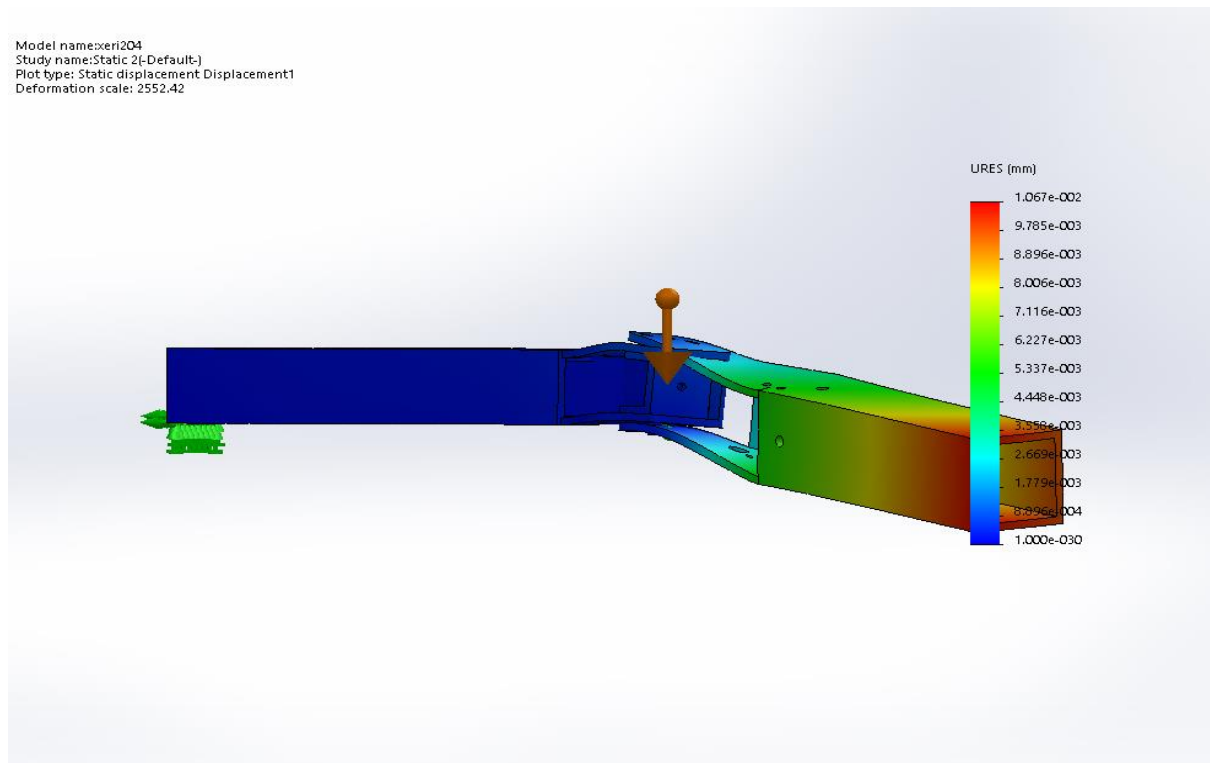
Σχήμα 3.17. Ενίσχυση στον όγκο αναδίπλωσης του δεύτερου συνδέσμου του νέου βραχίονα.



Σχήμα 3.18. Διαφορά σχεδιασμού στους δεύτερους συνδέσμους των δύο βραχιόνων όσον αφορά τον αριθμό εξαρτημάτων, που τα απαρτίζουν. Αριστερά εικονίζεται το νέο χέρι και δεξιά το παλιό.

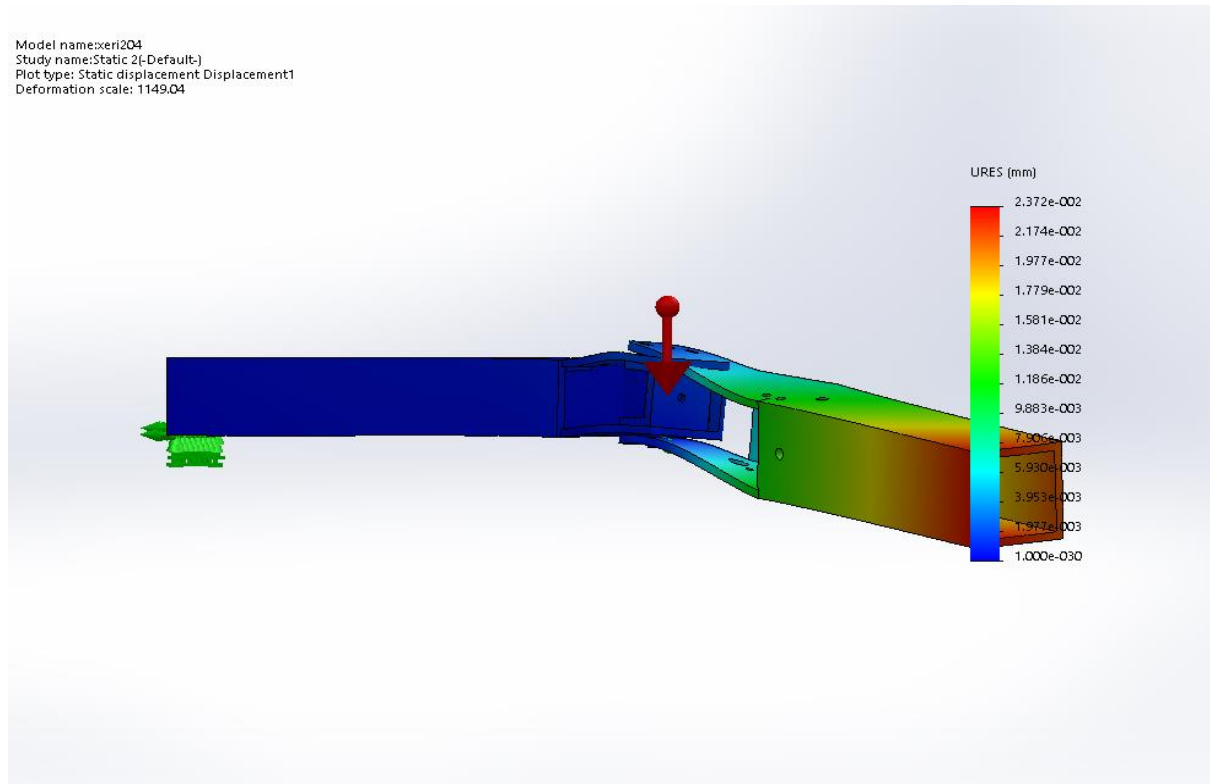
Στις προσομοιώσεις η καλύτερη λύση ήταν η επικάλυψη της πλευράς που είναι κενή στο πρώτο μέλος του βραχίονα με υλικό. Βέβαια, κάποια σημεία πρέπει να παραμείνουν χωρίς υλικό για να επεξεργάζεται κανείς το σύστημα μετάδοσης κίνησης, όποτε αυτό κρίνεται απαραίτητο. Οπότε με τα παραπάνω χαρακτηριστικά υπολογίσθηκαν στις προσομοιώσεις για φόρτιση $200^{\omega v}$ και $500^{\omega v}$ γραμμαρίων μετατοπίσεις λόγω κάμψης 1^{os} και 2,3 χιλιοστών αντίστοιχα (Σχήμα 3.19) (Σχήμα 3.20), μετρήσεις καλύτερες από τις προσομοιώσεις χωρίς την προσθήκη νεύρων, αφού βελτιώνεται η μετατόπιση λόγω καμπτικού φορτίου και στις δύο περιπτώσεις κατά 15%. Στο Σχήμα 3.21 φαίνεται η αλλαγή της αντίστοιχης επιφάνειας στο νέο χέρι και στο Σχήμα 3.22 συγκρίνονται “με το μάτι” οι μετατοπίσεις των δύο βραχιόνων.

Model name: xeri204
Study name: Static 2(-Default-)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 2552.42

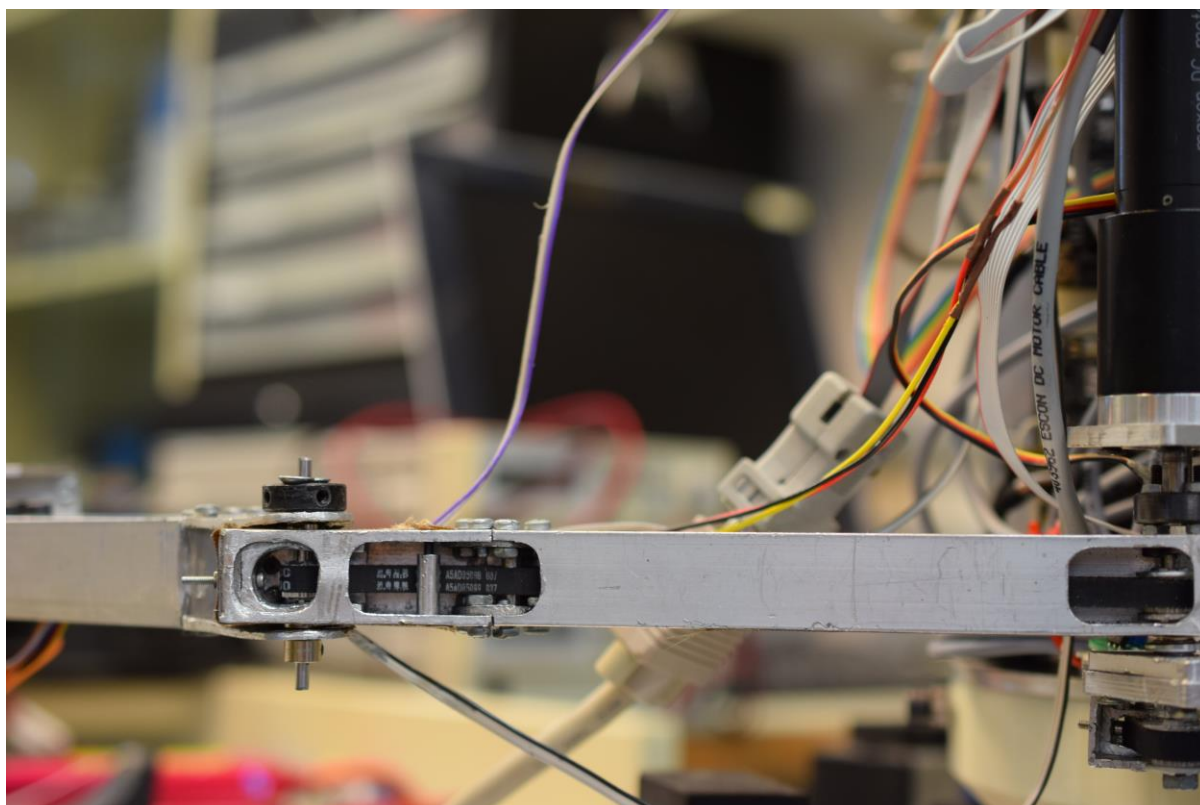


Σχήμα 3.19. Αποτελέσματα μετατόπισης λόγω κάμψης του βραχίονα με προσθήκη νεύρου για 200 γραμμάρια στην προσομοίωση στο Solidworks Simulation.

Model name: xeri204
Study name: Static 2(-Default-)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1149.04



Σχήμα 3.20. Αποτελέσματα μετατόπισης λόγω κάμψης του βραχίονα με προσθήκη νεύρου για 500 γραμμάρια στην προσομοίωση στο Solidworks Simulation.



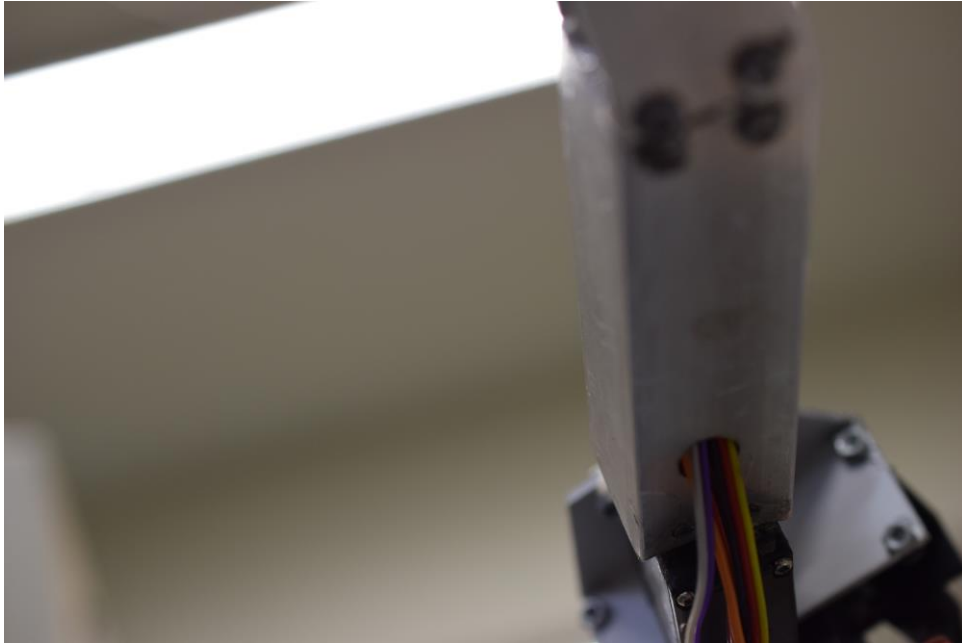
Σχήμα 3.21. Ο πρώτος σύνδεσμος του νέου βραχίονα με την προσθήκη νευρών.



Σχήμα 3.22. Σύγκριση κάμψης των δύο βραχιόνων μετά την προσθήκη αρπάγης. Πίσω εικονίζεται ο νέος και μπροστά ο παλιός.

3.3.3 Εμφάνιση του Βραχίονα

Για το πρόβλημα του πλήθους των καλωδίων ανοίχθηκαν οπές M10 για να διαπερνούν τα καλώδια το εσωτερικό του δεύτερου μέλους του βραχίονα, μία στο κάτω μέρος του (Σχήμα 3.23) και μία στο σύνδεσμο που έχει τοποθετηθεί για τη δυσκαμψία του όγκου αναδίπλωσης του μέλους (Σχήμα 3.24).



Σχήμα 3.23. Είσοδος καλωδίων αρπάγης και FSR στο εσωτερικό του δεύτερου μέλους του βραχίονα.



Σχήμα 3.24. Έξοδος καλωδίων αρπάγης και FSR από το εσωτερικό του δεύτερου μέλους του βραχίονα.

3.4 Κατασκευή Εξαρτημάτων

Τα εξαρτήματα δημιουργηθήκαν από προφίλ αλουμινίου (σύνδεσμοι του βραχίονα, πλαίσια τανυσμού, συνδετικό εξάρτημα αρπάγης και σερβοκινητήρα) κατασκευαστήκαν εξ ολοκλήρου στο μηχάνημα CNC Haas mini-mill του εργαστηρίου, ενώ οι ενισχύσεις των όγκων αναδίπλωσης των μελών του βραχίονα κατασκευάστηκαν με τη χρήση πριονιού, τροχού, και της φρέζας. Παρακάτω περιγράφεται συνοπτικά η χρήσης του μηχανήματος CNC.

Αρχικός σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένας G-code μέσω SolidCAM. Για να γίνει αυτό προέχει να δημιουργηθούν δύο αρχεία part Solidworks το τρισδιάστατο σχέδιο του προφίλ πάνω στο οποίο θα γίνουν οι κατεργασίες (stock), και του τρισδιάστατου προφίλ του αντικειμένου, που θα προκύψει από τις κατεργασίες (target). Στο SolidCAM τα δύο εξαρτήματα τοποθετούνται έτσι ώστε το target να περιέχεται στο box εξ ολοκλήρου και να έχουν κάποια κοινή ακμή σε κάθε επίπεδο.

Για την παραγωγή του κώδικα πρέπει μετά, γνωρίζοντας περίπου τι οπές είναι επιθυμητό να ανοιχτούν και τις διαστάσεις των σημείων, τα οποία θα αφαιρέσει το κονδύλι, να επιλεγθούν από τα διαθέσιμα τα απαραίτητα τρυπάνια και κονδύλια. Είναι σημαντική η προσθήκη του εργαλείου spot drill, για τη δημιουργία οπών που λειτουργεί ως οδηγός μίας τρύπας. Έπειτα οι διαστάσεις και τα ήδη των εργαλείων συμπληρώνονται στην επιλογή tools στο SolidCAM, για να γίνει προσομοίωση των κατεργασιών με αυτά. Για τα κονδύλια είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι για την αφαίρεση υλικού από το εσωτερικό μιας επιφάνειας επιλέχθηκαν δίπτερα κονδύλια, ενώ για την αφαίρεση υλικού από το εξωτερικό μιας επιφάνειας επιλέχθηκαν τετράπτερα.

Τα προφίλ, στα οποία πραγματοποιηθήκαν κατεργασίες ήταν τετράπλευρα και συνεπώς χρειάστηκε ο ορισμός τεσσάρων συστημάτων συντεταγμένων το πολύ. Επιλέγεται μία πλευρά, στην οποία θα γίνει κατεργασία και χάρην ευκολίας για τον ορισμό της στο μηχάνημα CNC, ορίζεται το σύστημα συντεταγμένων σε κάποια ακμή του stock, στην οποία δεν έχει προηγηθεί κάποια κατεργασία με τους άξονες x και y να ταυτίζονται με κάποια από τις πλευρές της επιφάνειας και τον άξονα z να έχει τη μηδενική τιμή πάνω στην επιφάνεια και τις θετικές του πάνω από το αντικείμενο. Τα συστήματα αυτά στον G-κώδικα παίρνουν ονόματα από G55 έως G58.

Πριν την εκκίνηση της χρήσης των εικονικών εργαλίων στο πρόγραμμα, συμπληρώνονται τα χαρακτηριστικά της μηχανής και του υλικού των αντικειμένων.

Επιλέγοντας να ορισθούν οι κατεργασίες σε μια επιφάνεια, πρώτα επιλέγεται να γίνουν οι οπές. Δίνουμε εντολή στο spot drill να πάει να σημαδέψει κατά ένα δέκατο του χιλιοστού τα σημεία, όπου θα ανοιχθούν οπές και μετά ανάλογα με τα τρυπάνια, που έχουν επιλεγθεί, δίνονται εντολές για τη διάνοιξη των ανάλογων οπών. Τα παραπάνω γίνονται με την επιλογή drilling. Θέλει πολύ προσοχή η επιλογή ταχύτητας περιστροφής των τρυπανιών και η δύναμη πρόωσης. Για τη χρήση κονδυλιών επιλέγεται contouring με 2D i-machining. Με την παραπάνω επιλογή ορίζοντας μόνο τη γεωμετρία και το υλικό του κονδυλιού, βάση των χαρακτηριστικών της μηχανής και του υλικού, που θα κατεργαστεί υπολογίζονται από μόνες τους η ταχύτητα περιστροφής και η δύναμη πρόωσης. Επιλέγεται πάνω στην επιφάνεια η

γεωμετρία του υλικού, που θα αφαιρέσει το κονδύλι, και επιλέγεται ένα offset για την κατεργασία, τέτοιο ώστε στην αρχή αυτής να μην ακουμπήσει το κονδύλι καθόλου το προφίλ.

Αφού ορισθούν όλες οι κατεργασίες σε κάθε σύστημα συντεταγμένων και με επιβεβαίωση από τις διαθέσιμες προσομοιώσεις του SolidCAM, εξάγεται ο G-κώδικας. Πέρα από τα ονόματα των συστημάτων συντεταγμένων πρέπει να κρατηθούν και οι εντολές T κάθε εργαλείου, ώστε να ξέρουμε σε ποια θήκη από τις αριθμημένες της μηχανής να τοποθετηθεί το καθένα.

Στη συνέχεια ενεργοποιώντας το μηχάνημα CNC τοποθετείται η μέγγενη και ακολουθεί βεβαίωση, πως είναι παράλληλη με τους άξονες εργασίας της μηχανής με το κατάλληλο εξάρτημα. Αφού τοποθετηθούν τα εργαλεία στις ανάλογες θήκες σύμφωνα με τις εντολές T, διανύουν ένα ένα μία απόσταση στον z-άξονα της μηχανής μέχρι να ακουμπήσουν με ακρίβεια δέκατου του χιλιοστού το εξάρτημα Electronic Zero Setter, με το οποίο αποθηκεύονται στα offset της μηχανής οι αποστάσεις από την ακμή κάθε εργαλείου ως κάποιο σημείο στην πρόσδεση τους στο μηχάνημα, ώστε να διαβάζονται τιμές για τις εντολές H κάθε εργαλείου. Έπειτα φορτώνεται στο μηχάνημα ο παραγόμενος G-κώδικας και τοποθετείται το προφίλ αλουμινίου στη μέγγενη με την πλευρά, που θα επεξεργαστεί πρώτη το μηχάνημα, προς τα πάνω. Με χρήση ενός εργαλείου αντίστοιχου με το Electronic Zero Setter ορίζονται οι 3 άξονες τις πρώτης επιφάνειας κατεργασίας στα offset της μηχανής και έτσι ξεκινά η επεξεργασία της πρώτης επιφάνειας. Όταν είναι ώρα να επεξεργαστεί το μηχάνημα άλλη επιφάνεια, τοποθετείται το προφίλ με τη νέα επιφάνεια προς τα πάνω και ορίζεται το νέο σύστημα συντεταγμένων του datum.

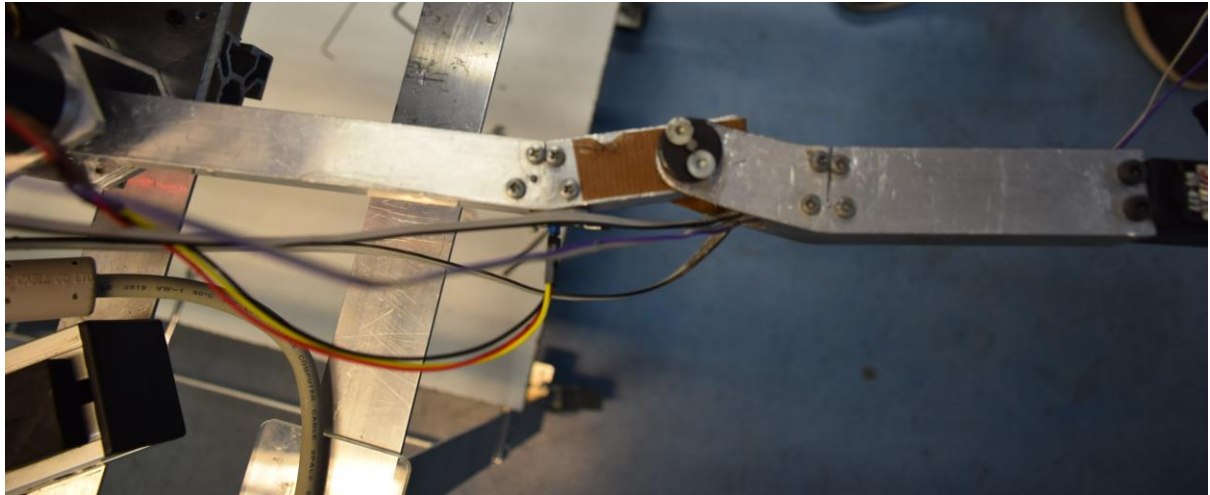
Επειδή η αναφορά όλων των G-κώδικων είναι ανούσια, αφού δεν είναι κατανοητοί και αφορούν συγκεκριμένο συνδυασμό εργαλίων, συστημάτων συντεταγμένων και προφίλ αλουμινίων, θα προστεθεί στο Παράρτημα Β ένας κώδικας για παράδειγμα, ο κώδικας κατεργασίας μίας επιφάνειας του πρώτου μέλους του βραχίονα και θα προστεθούν στο CD της διπλωματικής εργασίας τα αρχεία, που προέκυψαν από το SolidCAM.

3.5 Συναρμολόγηση Δεύτερου Βραχίονα

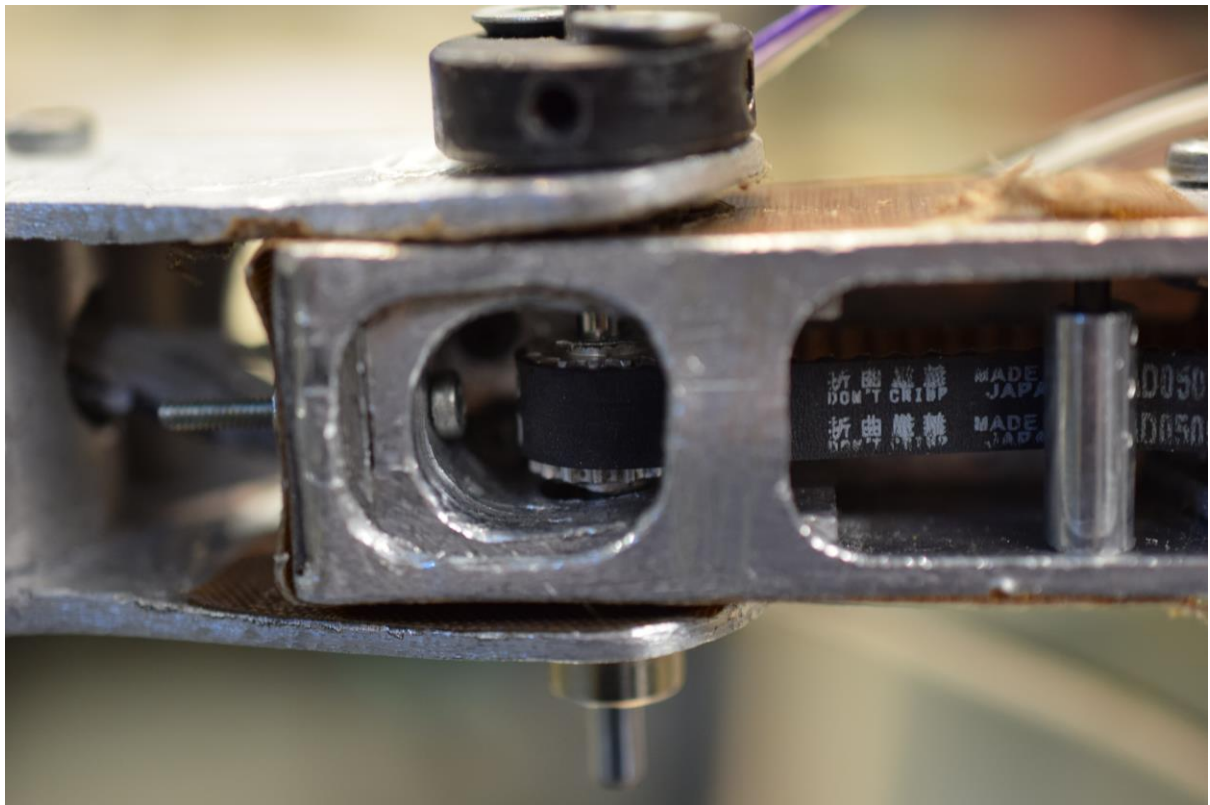
Βάσει των παραπάνω κατασκευάστηκαν και συναρμολογήθηκαν τα κομμάτια του 2^{ου} βραχίονα και επαληθεύτηκε η επιθυμητή λειτουργία του. Επειδή η γεωμετρία του νέου βραχίονα είναι ίδια με του πρώτου, αλλά ανεστρεμμένη ισχύουν οι εξισώσεις 3.3 και 3.4 για τις σχετικές γωνίες των αρθρώσεων του:

$$-150^{\circ} \leq q_1 \leq 53^{\circ} \quad (3.3)$$

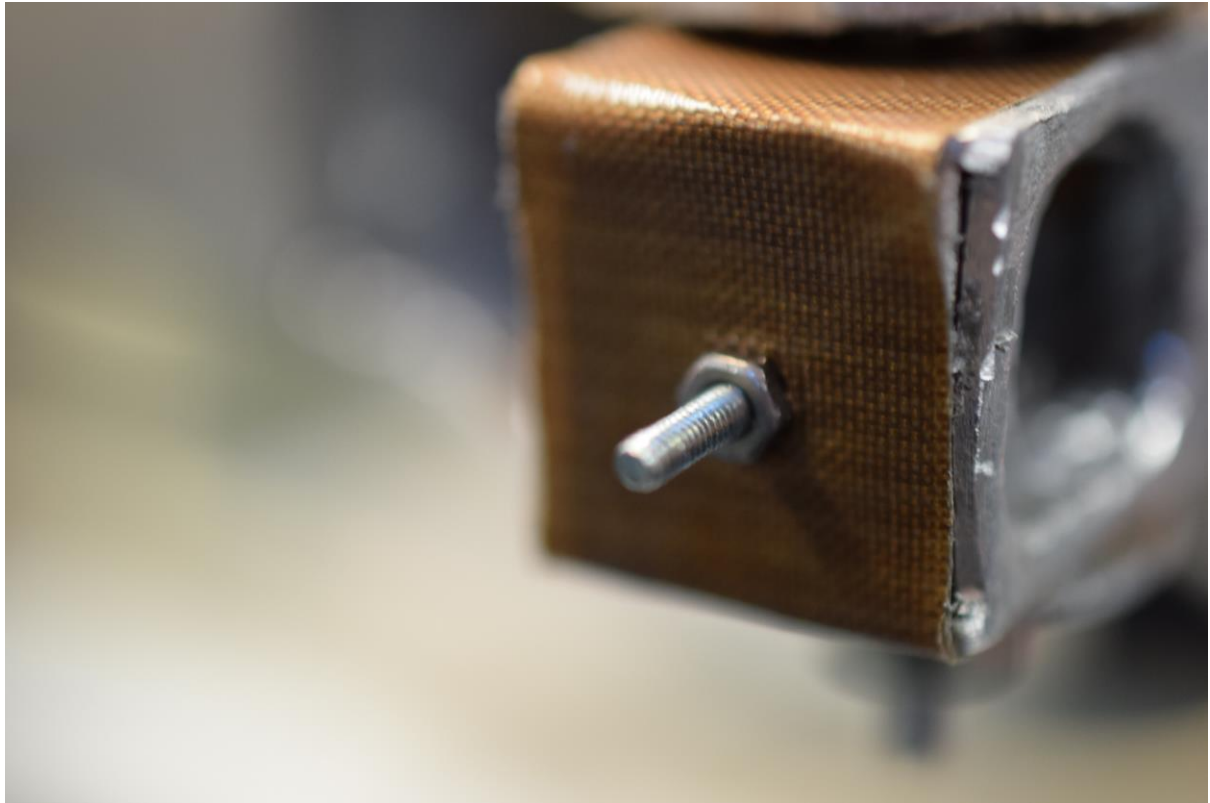
$$-95^{\circ} \leq q_2 \leq 172^{\circ} \quad (3.4)$$



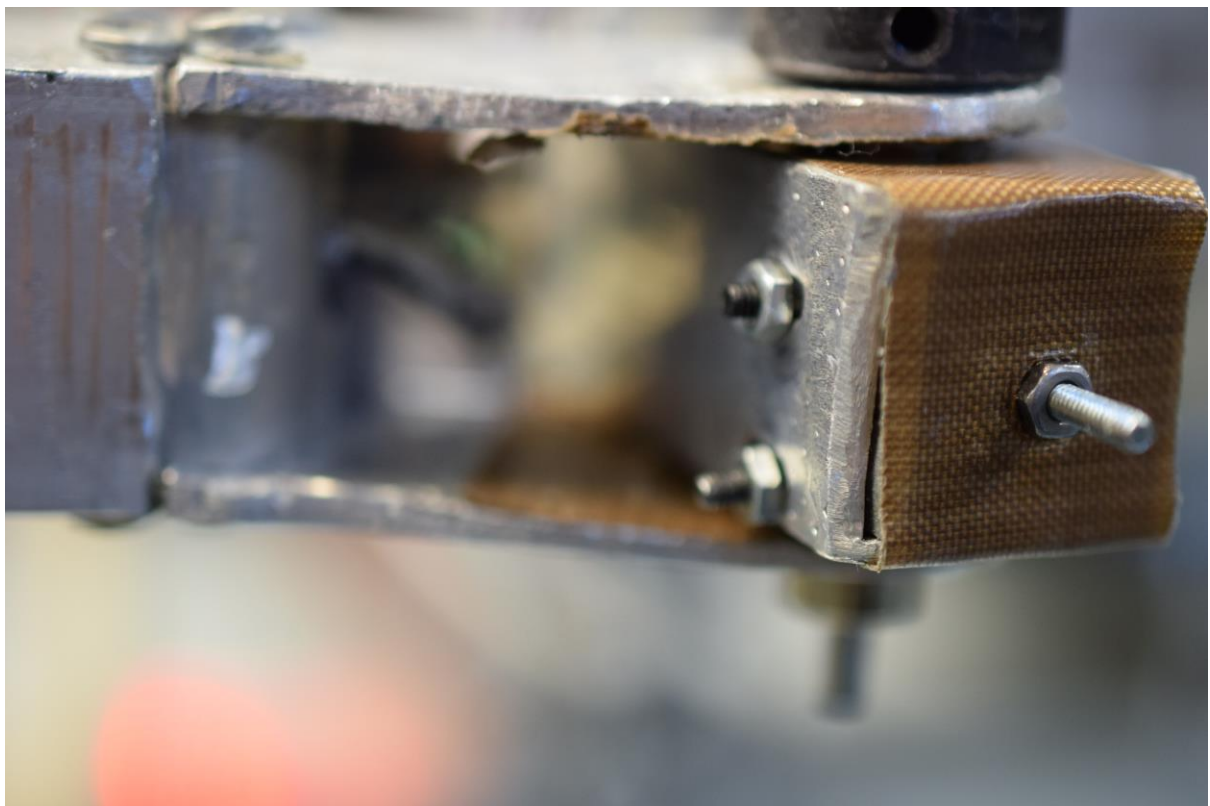
Σχήμα 3.25. Τα δύο μέλη του νέου βραχίονα.



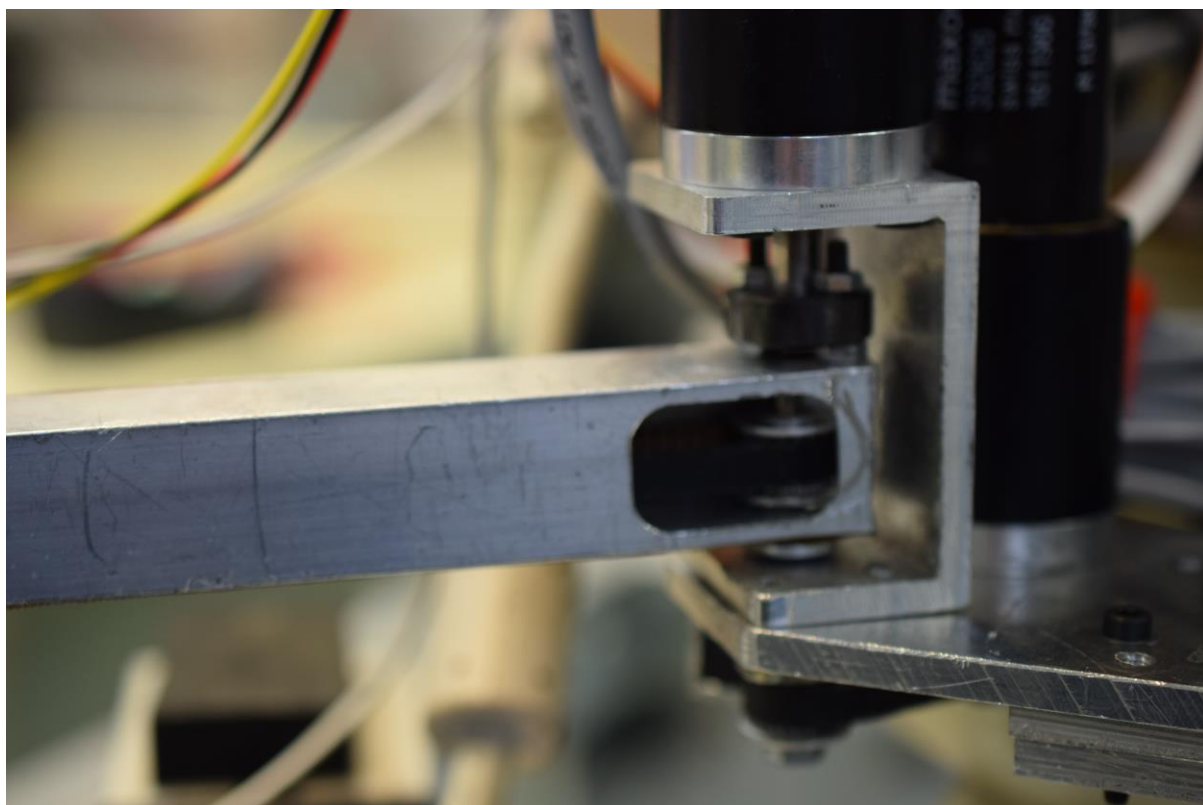
Σχήμα 3.26. Τροχαλία και άξονας δεύτερης άρθρωσης του νέου βραχίονα και πλαίσιο τανυσμού.



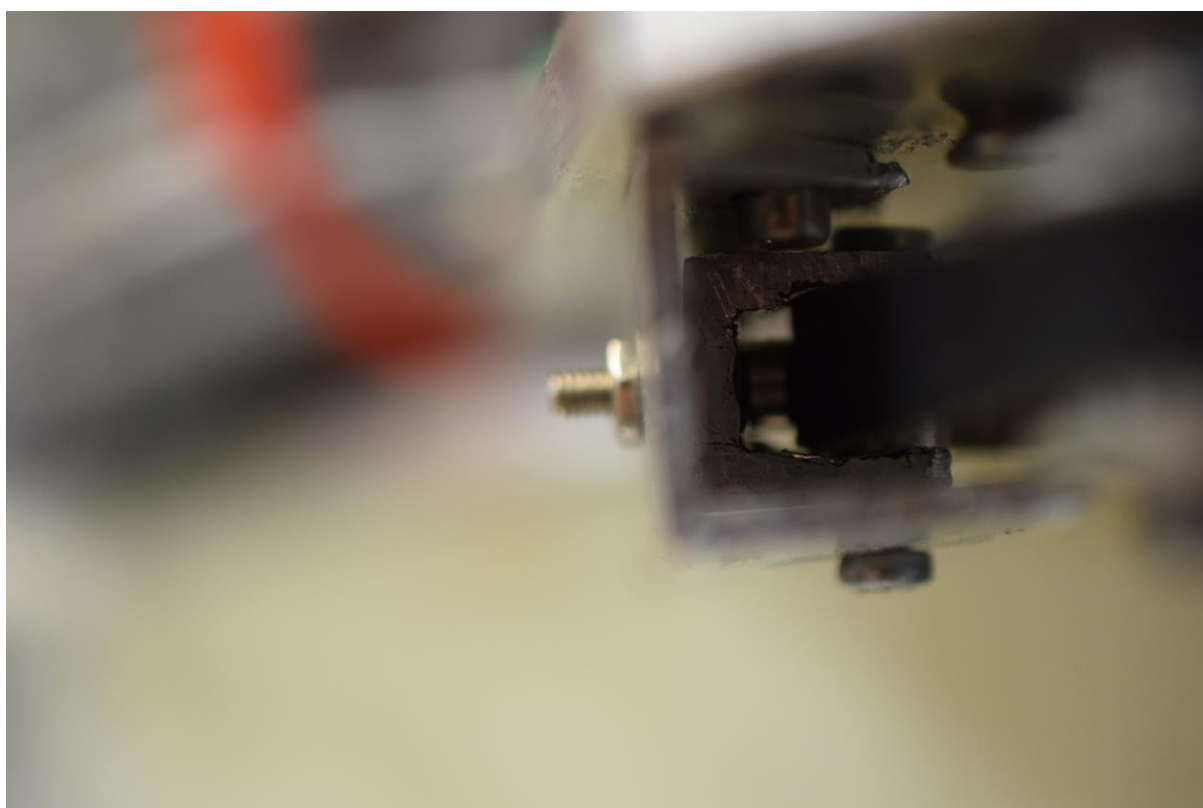
Σχήμα 3.27. Βίδα και κοχλίας τανυσμού του δεύτερου ιμάντα του συστήματος μετάδοσης κίνησης του νέου βραχίονα.



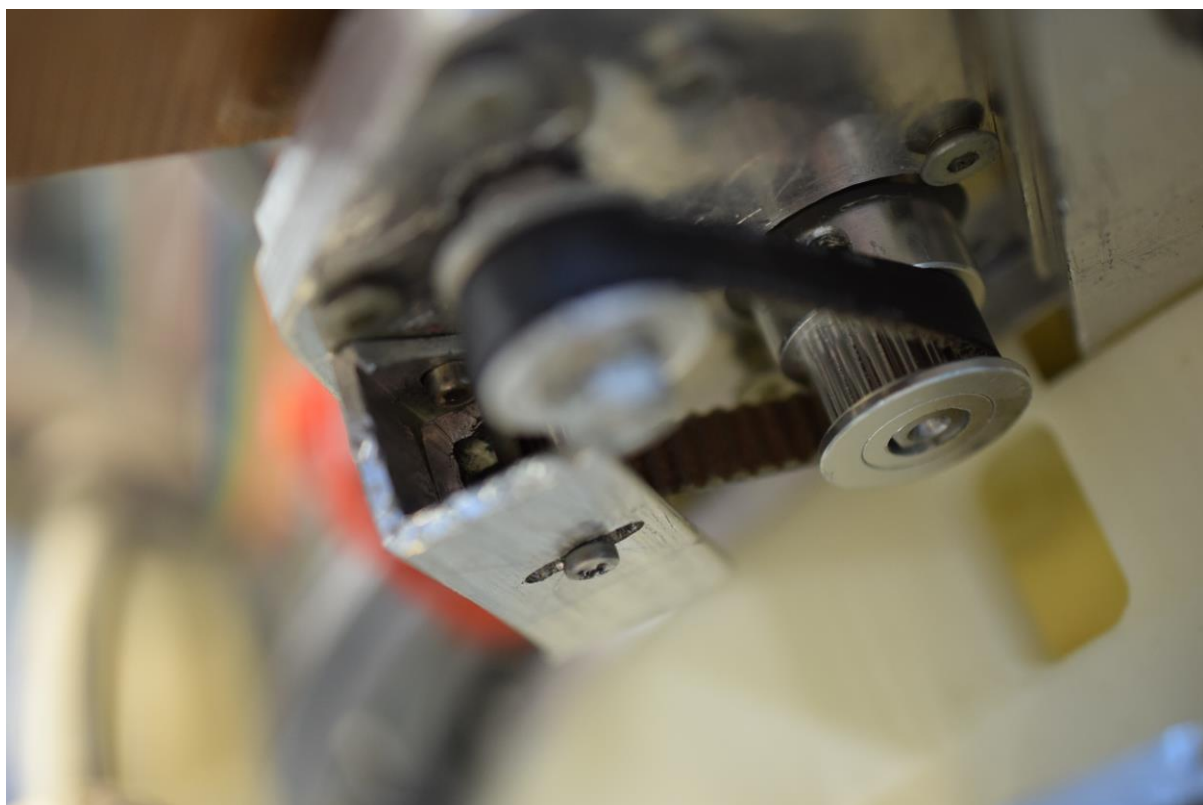
Σχήμα 3.28. Βίδες και κοχλίες σταθεροποίησης του συστήματος τανυσμού του δεύτερου ιμάντα του συστήματος μετάδοσης κίνησης του νέου βραχίονα.



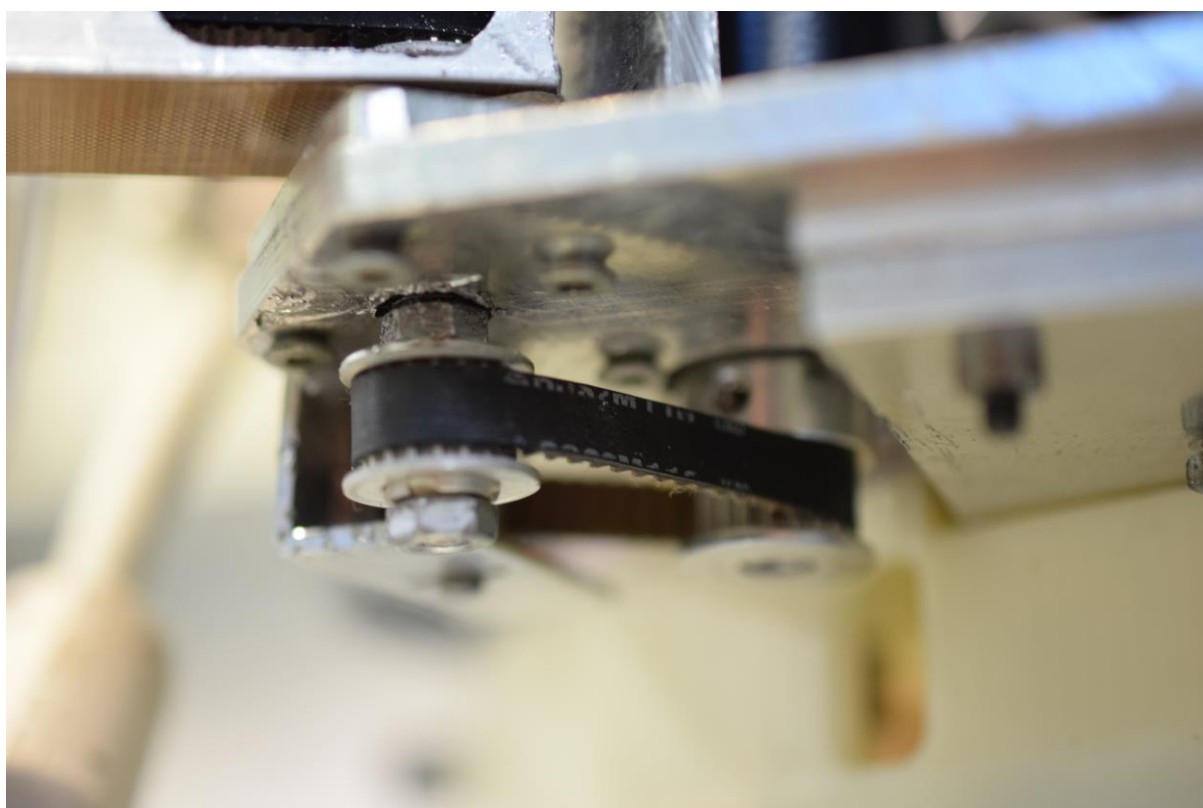
Σχήμα 3.29. Πλαίσιο σύνδεσης, σύνδεσμος κινητήρα με τον πρώτο σύνδεσμο του βραχίονα τροχαλία, ιμάντας και έδραση του μέλους με ροδέλα.



Σχήμα 3.30. Βίδα και κοχλίας τανυσμού του πρώτου ιμάντα του συστήματος μετάδοσης κίνησης του νέου βραχίονα και πλαίσιο τανυσμού.



Σχήμα 3.31. Βίδα σταθεροποίησης του πρώτου ιμάντα του συστήματος μετάδοσης κίνησης του νέου βραχίονα και τροχαλία, που συνδεείται σε κινητήρα.



Σχήμα 3.32. Τροχαλίες και πρώτος ιμάντας του συστήματος μετάδοσης κίνησης του νέου βραχίονα.

3.6 Επιθυμητά Χαρακτηριστικά Αρπάγης και Υλοποίησή της

Βασικά χαρακτηριστικά μίας αρπάγης είναι τα μέγιστα και ελάχιστα διάκενα ανάμεσα στις δαγκάνες της και το μήκος των δαγκανών. Κρίνοντας από τις διαστάσεις του παθητικού ρομπότ, πάνω στο οποίο αναμένεται να πραγματοποιηθούν τα περισσότερα πειράματα με χρήση αρπάγης, έχουν επιλεγθεί 4 στηρίγματα ως πιθανά σημεία πρόσδεσης της δαγκάνας (Σχήμα 3.32). Τα σημεία αυτά έχουν πλάτος και μήκος 2cm, οπότε επιθυμητά χαρακτηριστικά είναι το μέγιστο διάκενο να είναι μεγαλύτερο από τα 2cm και αντίστοιχα το μήκος των δαγκανών, ενώ το ελάχιστο διάκενο να είναι μικρότερο από τα 2cm. Το μέγιστο διάκενο είναι επιθυμητό να είναι αρκετά μεγαλύτερο από τα 2cm, ώστε κατά τα πειράματα να υπάρχει χώρος για σφάλματα τη στιγμή της αρπαγής της κολώνας του Σχήματος 3.33. Επίσης, είναι θεμιτό η δαγκάνες να μην έχουν αμελητέο ύψος, ώστε να μπρούν να προσδεθούν αισθητήρες σε αυτές για λόγους που θα αναφερθούν παρακάτω, καθώς και η αρπάγη να είναι ελαφριά για να μην προσδίδει μεγάλο πρόσθετο καμππικό φορτίο στους βραχίονες. Στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου υπάρχει ήδη ένα ζεύγος αρπαγών που πληρεί τις παραπάνω προδιαγραφές (Lynxmotion Little Gripper) (Σχήμα 3.34). Η συγκεκριμένη αρπάγη υπερτερεί σε σχέση με άλλες αρπάγες της αγοράς, όσον αφορά τη χρήση αρπάγης στο δικό μας σύστημα, λόγω της μάζας της. Έχει τη μισή μάζα από την πλειονότητα αρπαγών που συγκρίθηκαν. Τα χαρακτηριστικά της αρπάγης είναι τα παρακάτω:

Πίνακας 3.4. Χαρακτηριστικά αρπάγης Lynxmotion Little Gripper [30].

Μάζα (g)	25
Διαστάσεις (mm)	57X65X30
Μέγιστο Διάκενο (mm)	33
Ελάχιστο Διάκενο (mm)	0

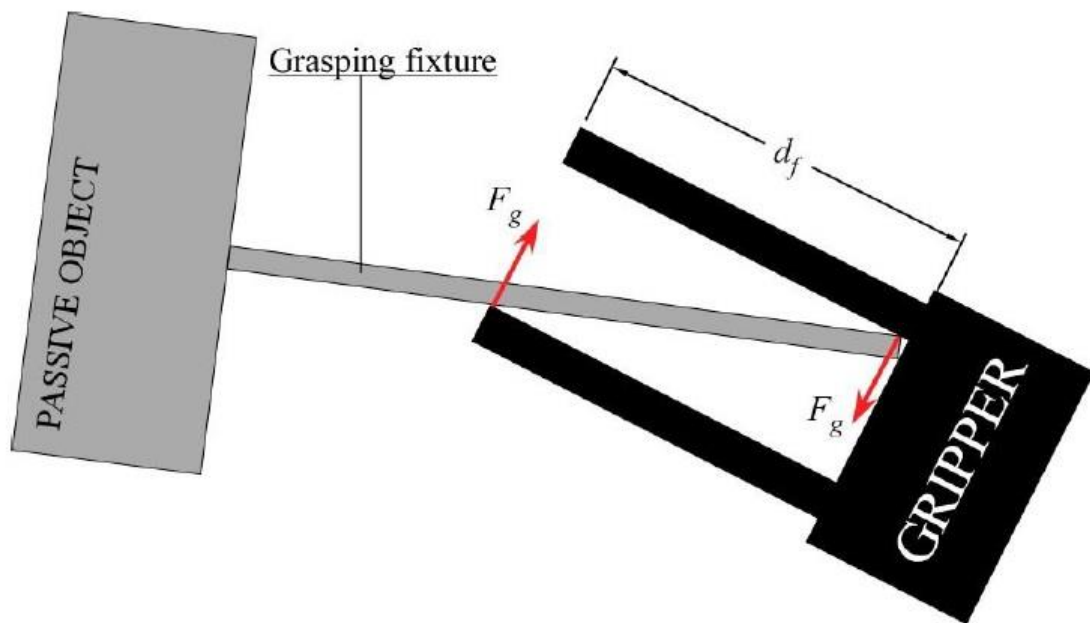


Σχήμα 3.33. Κολώνα στήριξης παθητικού ρομπότ, την οποία μπορεί να συλλαμβάνει η δαγκάνα της αρπάγης.



Σχήμα 3.34. Lynxmotion Little Gripper [30].

Όσον αφορά την επίδοση της αρπάγης, θα πρέπει να μπορεί να συγκρατήσει το στόχο και να περάσει από αυτή η εφαρμοζόμενη ροπή από το σύστημα. Η μέγιστη ροπή τ_g υπολογίζεται από το γινόμενο του μήκους των δαγκανών d_f και της γραμμικής δύναμης που εφαρμόζει η αρπάγη F_g (Σχήμα 3.35) (Εξίσωση 3.5).

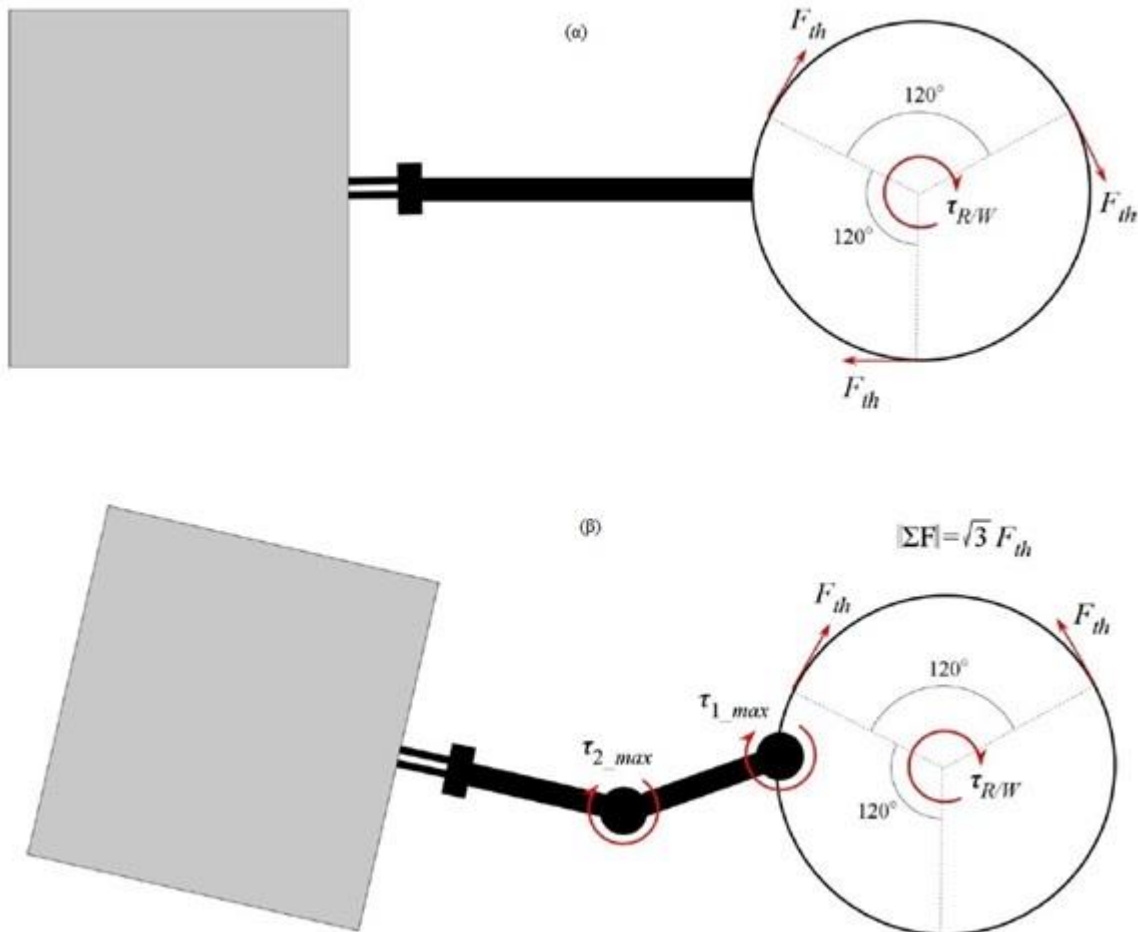


Σχήμα 3.35. Απεικόνιση αρπάγης αντικειμένου από την αρπάγη.

$$\tau_g = F_g d_f \quad (3.5)$$

Για να υπολογιστεί η τιμή από την οποία είναι επιθυμητό να είναι μεγαλύτερη η ροπή αρπάγης δημιουργούνται κριτήρια από τα παρακάτω δύο δυσμενή σενάρια:

1. Σταθερές αρθρώσεις και αρπάγη, ενώ ο σφόνδυλος ανάδρασης και οι προωθητήρες στρέφουν το σύστημα (Σχήμα 3.36(α)).
2. Οι ροπές των αρθρώσεων και οι δυνάμεις των προωθητήρων έχουν ως αποτέλεσμα συνισταμένη ροπή που περνά από την αρπάγη (Σχήμα 3.36(β)).



Σχήμα 3.36. Δυσμενή σενάρια, όσον αφορά την απόδοση της ροπής της αρπάγης. (α) Σταθερές αρθρώσεις και αρπάγη, ενώ ο σφόνδυλος ανάδρασης και οι προωθητήρες στρέφουν το σύστημα. (β) Οι ροπές των αρθρώσεων και οι δυνάμεις των προωθητήρων έχουν ως αποτέλεσμα συνισταμένη ροπή που περνά από την αρπάγη.

Στα δύο παραπάνω απεικονιζόμενα σενάρια είναι επιθυμητό η ροπή της αρπάγης να είναι μεγαλύτερη από τη συνισταμένη ροπή των δυνάμεων και ροπών, έτσι ώστε να καλύπτονται και τα μη πιθανά δυσμενή σενάρια από την απόδοση της αρπάγης. Το Σχήμα 3.4 καταλήγει στις ανισότητες (3.6), (3.7):

$$\tau_g \geq \tau_{RW_max} + 3F_{th_max} d_{th} \quad (3.6)$$

$$\tau_g \geq \tau_{1_max} + \tau_{2_max} + \sqrt{3}L_{tot}F_{th_max} \quad (3.7)$$

όπου L_{tot} η απόσταση του σημείου αρπαγής από το διάνυσμα της συνισταμένης δύναμης των προωθητήρων, F_{th_max} η μέγιστη δύναμη ώσης των προωθητήρων και d_{th} η απόσταση του διανύσματος της δύναμης που ασκείται στο ρομπότ από τους προωθητήρες από το γεωμετρικό κέντρο της βάσης του ρομπότ.

Στις παραπάνω σχέσεις ισχύουν από τις προδιαγραφές των κινητήρων:

$$\tau_{1_max} = \tau_{2_max} = 6,5Nm \quad (3.8)$$

$$\tau_{RW_max} = 1Nm \quad [41] \quad (3.9)$$

Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται η εύρεση και αλλαγή της τιμής της μέγιστης δύναμης των προωθητήρων. Η απόσταση των προωθητήρων από το γεωμετρικό κέντρο της βάσης του ρομπότ λαμβάνεται ως δεδομένο από τα σχέδια κατασκευής του σώματος του ρομπότ, ενώ για την τιμή L_{tot} επιλέγεται μία δυσμενής τιμή που είναι η ακτίνα της βάσης του ρομπότ συν το μήκος των μελών του βραχίονα συν 10 χιλιοστά από την άκρη του βραχίονα χωρίς την αρπάγη ως το σημείο που πραγματοποιείται η αρπάγη. Οπότε

$$F_{th_max} = 0,6N \quad (3.10)$$

$$d_{th} = 0,15m \quad (3.11)$$

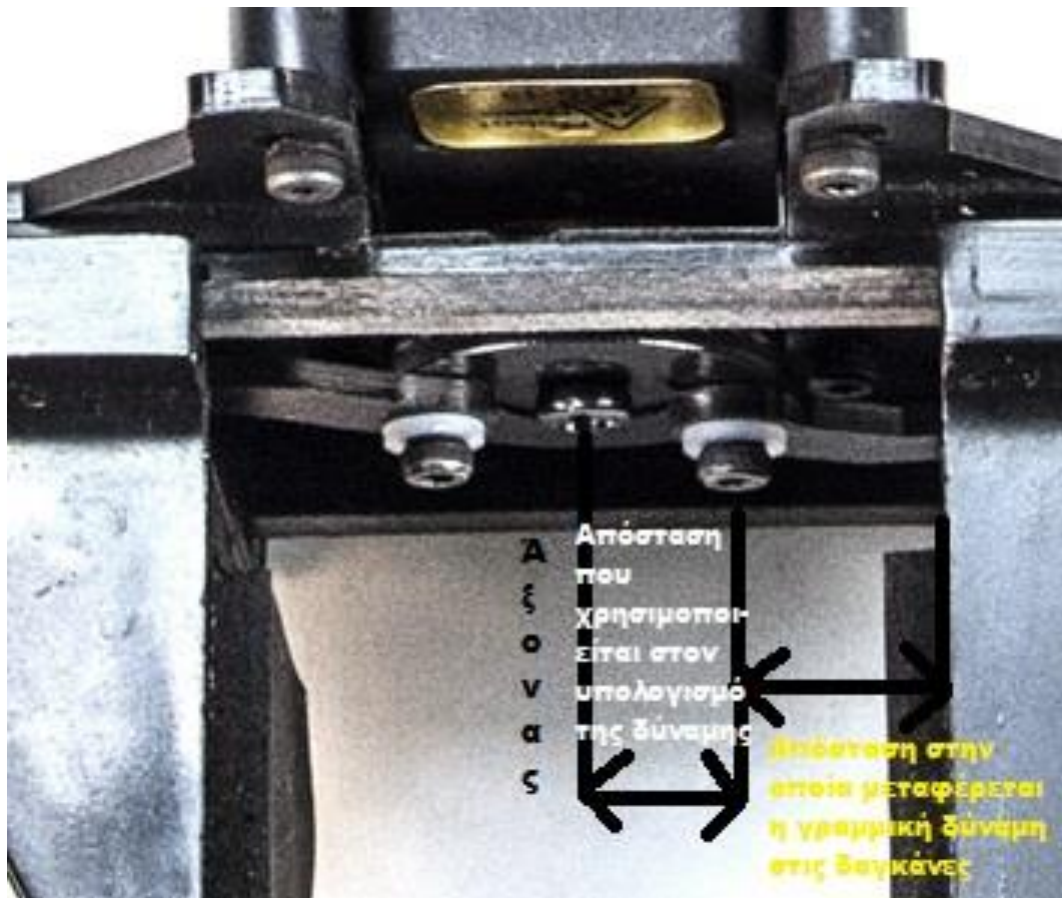
$$L_{tot} = 0,4415m \quad (3.12)$$

Οι ροπές των κινητήριων συστημάτων των αρθρώσεων του βραχίονα είναι πάρα πολύ μεγάλες για να τις υπερνικήσει ένας κινητήρας που θα τοποθετηθεί στο άκρο του βραχίονα, πράγμα που σημαίνει πως θα πρέπει να είναι ελφάρυς. Θεωρώντας πως οι αρθρώσεις του βραχίονα λειτουργούν συνεργατικά, το δεύτερο σενάριο απορρίπτεται και μελετάται μόνο το πρώτο σενάριο για την επιλογή κινητήρα της τρίτης άρθρωσης. Από τα παραπάνω προκύπτει η ανισότητα (3.13) για τη ροπή της αρπάγης:

$$\tau_g \geq 1,27Nm \quad (3.13)$$

Η αρπάγη λειτουργεί με τη χρήση ενός σερβοκινητήρα. Για την επιλογή του κατάλληλου σερβοκινητήρα πρέπει να γίνει η επιλογή της ροπής που ασκεί. Αρχικά από τις σχέσεις (3.5) και (3.13) υπολογίζεται για την ελάχιστη επιθυμητή ροπή η ελάχιστη γραμμική δύναμη που ασκεί η αρπάγη F_g , εφόσον γνωρίζουμε πως το μήκος των δαγκανών είναι 0,03m. Η τιμή της δύναμης είναι ίση με 42,3N. Έπειτα αυτή η δύναμη μετατρέπεται σε ροπή που ασκεί ο σερβοκινητήρας αν πολλαπλασιαστεί η τιμή της γραμμικής δύναμης με την απόσταση που

έχει ο άξονας περιστροφής του κινητήρα με το σημείο, στο οποίο η ροπή γίνεται γραμμική δύναμη (Σχήμα 3.37). Εδώ αυτή η απόσταση είναι ίση με 0,01m.



Σχήμα 3.37. Αποστάσεις μετατροπής της ροπής σερβοκινητήρα σε γραμμική δύναμη και μεταφοράς αυτής στις δαγκάνες αρπάγης [29].

Από τα παραπάνω προκύπτει η ανισότητα για τη ροπή του σερβοκινητήρα:

$$\tau_{servo} \geq 0,423Nm \quad (3.14)$$

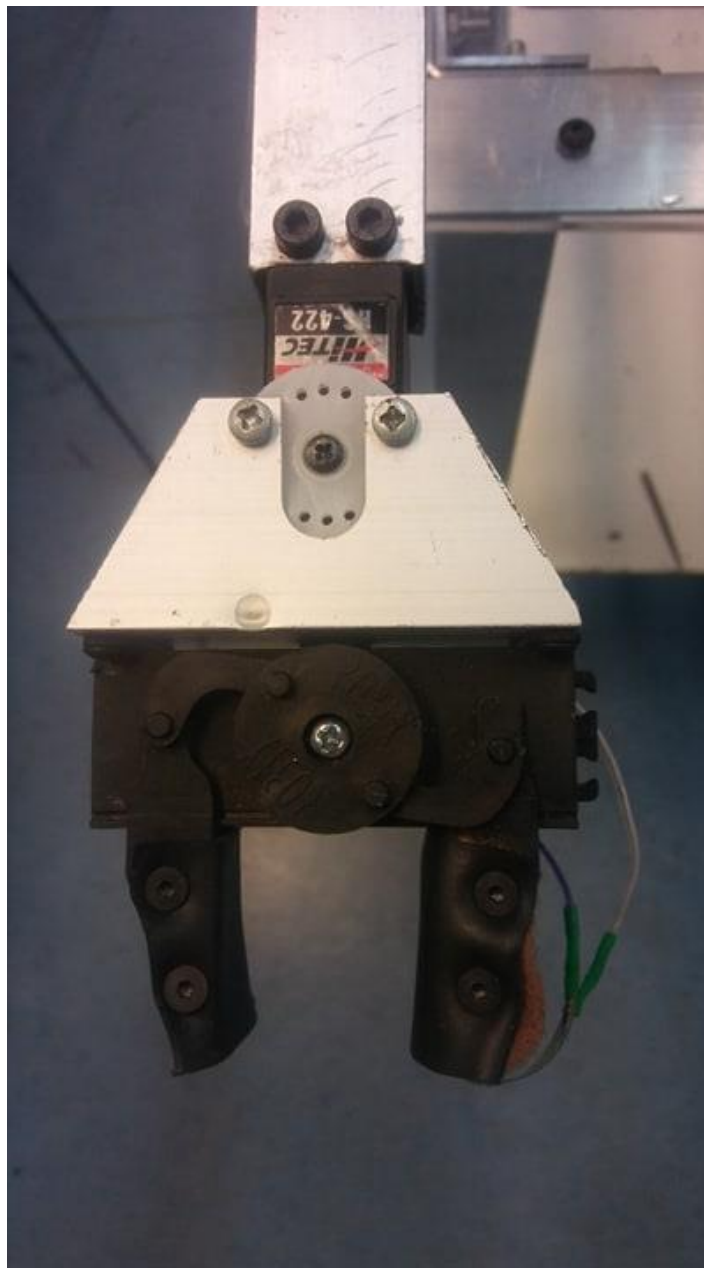
Έτσι επιλέχθηκε ο σερβοκινητήρας FeeTech FS5106M [10] με μέγιστη ροπή 0,59Nm στα 5V, ώστε στην ομαλή του λειτουργία να υπερνικά τα παραπάνω σενάρια. Με τη χρήση του παραπάνω σερβοκινητήρα το ελάχιστο βήμα της αρπάγης είναι 0,27mm, δηλαδή για κάθε μία μοίρα μεταβολής της κίνησης του σερβοκινητήρα το διάκενο της αρπάγης μεγαλώνει ή μικραίνει κατά 0,27mm.

Για να επιλύεται η αντίστροφη κινηματική κάθε βραχίονα με ευκολία και όχι με 2 λύσεις καθώς επίσης για να είναι πιο ευπροσάρμοστο το σύστημα αρπάγης προστίθεται ένας τρίτος βαθμός ελευθερίας, δηλαδή μια τρίτη άρθρωση περιστροφής ως προς τον κάθετο άξονα στο επίπεδο που κινείται το ρομπότ. Την παραπάνω άρθρωση κινεί ένας ακόμα σερβοκινητήρας, ο οποίος προσδένεται στο άκρο του δεύτερου μέλους κάθε βραχίονα και με

ένα εξάρτημα που κατασκευάστηκε σε CNC κινεί την αρπάγη ως προς τον επιθυμητό άξονα (Σχήμα 3.38). Για την παραπάνω χρήση επιλεχθήκαν σερβοκινητήρες HiTec HS422 Deluxe [11] με μέγιστη ροπή 0,325Nm. Επειδή και τα δύο μοντέλα σερβοκινητήρων έχουν προγραμματιστεί να κινούνται από 0 έως 120 μοίρες, για τη σχετική γωνία της τρίτης άρθρωσης και των δύο βραχιόνων ισχύει η ανίσωση (3.15):

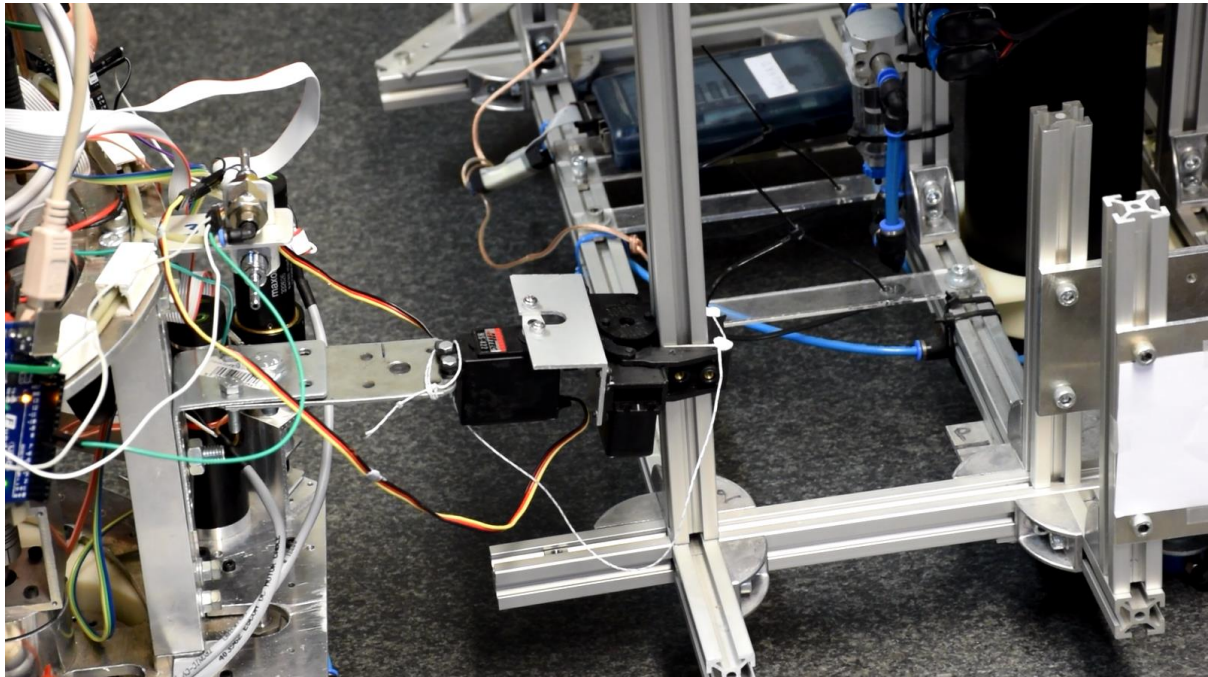
$$-60^{\circ} \leq q_3 \leq 60^{\circ} \quad (3.15)$$

όπου $q_3 = 0$, όταν τα μήκη του δεύτερου και του τρίτου συνδέσμου δημιουργούν ευθεία.



Σχήμα 3.38. Η τρίτη άρθρωση, η αρπάγη και η σύνδεση του συστήματος πάνω στο άκρο του δεύτερου μέλους του βραχίονα.

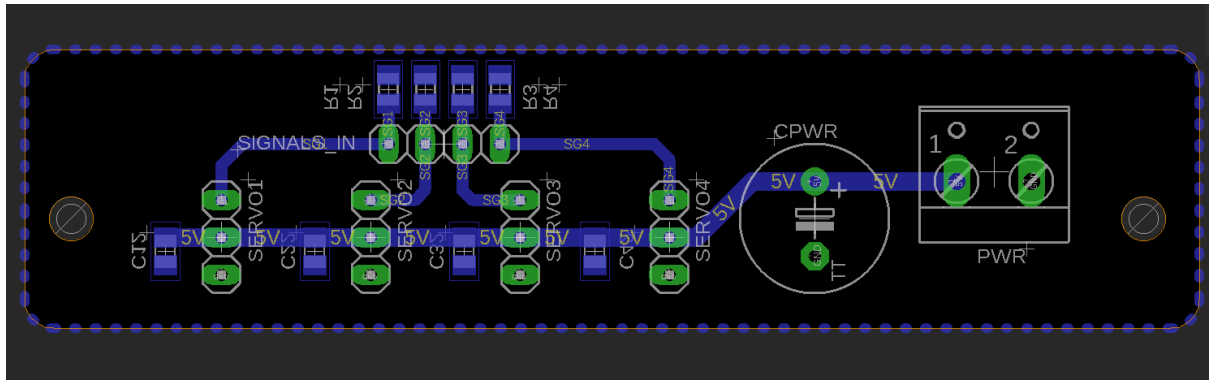
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.38, στις δαγκάνες της αρπάγης έχουν εφαρμοστεί λεπτά κομμάτια ελαστικού. Το ελαστικά έχουν έναν από τους μεγαλύτερους συντελεστές τριβής, ώστε να μην γλιστρήσει κάποιο αντικείμενο από την αρπάγη και να είναι ικανή με μικρή τιμή ροπής να διατηρεί σταθερό το στόχο. Το παραπάνω επιβεβαιώθηκε και από ένα πείραμα, όπου η αρπάγη προσδέθηκε σε πρόβολο του ενεργητικού ρομπότ και μετακίνησε πάνω στο γρανίτη το παθητικό ρομπότ (Σχήμα 3.39).



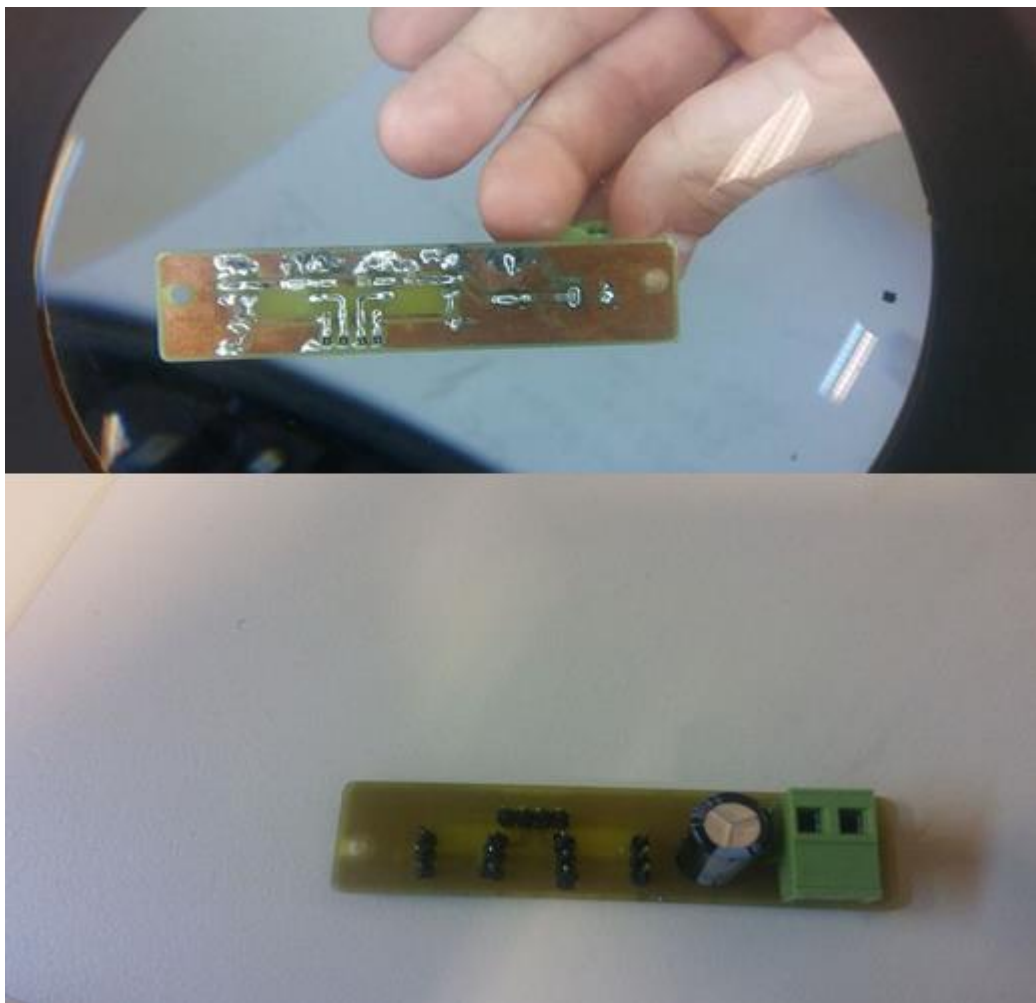
Σχήμα 3.39. Διάταξη πειράματος για έλεγχο απόδοσης της αρπάγης.

Στις αρχικές δοκιμές της αρπάγης, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν μέσω μίας πλακέτας Arduino Uno. Όμως οι αρπάγες είναι επιθυμητό να λαμβάνουν εντολές σε πραγματικό χρόνο μέσω του ROS, καθώς επίσης μία πλακέτα Arduino δεν ενδεικνύεται για να τροφοδοτήσει 4 RC σερβοκινητήρες, οι οποίοι στην ομαλή λειτουργία χρειάζονται 300mA έκαστος. Έτσι, η τροφοδοσία των κινητήρων θέλουμε να παρέχεται από την πλακέτα ρύθμισης τάσης του πύργου PC104, και οι εντολές να δίνονται μέσω των pins της πλακέτας ψηφιακών εισόδων/εξόδων. Μία από τις εξόδους της πλακέτας ρύθμισης τάσης πtd ATX3510-HR [31], τροφοδοτεί με τάση 5V και δυνατότητα παροχής 16,8A. Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο LPKF μία πλακέτα διαμερισμού του ρεύματος, στην οποία συνδέονται οι 4 σερβοκινητήρες και τους τροφοδοτεί από την αναφερόμενη έξοδο της κάρτας ρύθμισης τάσης, καθώς επίσης μεταφέρει τα σήματα τους στην πλακέτα ψηφιακών εισόδων/εξόδων (Σχήμα (3.40), Σχήμα (3.41)). Στην πλακέτα έχουν προστεθεί πυκνωτές παράλληλα στις τροφοδοσίες κάθε σερβοκινητήρα καθώς και ένας πυκνωτής μεγαλύτερης χωρητικότητας μετά την τροφοδοσία όλων σερβοκινητήρων για αποφυγή προβλημάτων παροχής ρεύματος,

καθώς και pull down αντιστάσεις ανάμεσα στις γειώσεις και τα σήματα, για την ομαλότητα του σήματος.



Σχήμα 3.40. Εικόνα του αρχείου .brd της πλακέτας διανομής ρεύματος στους σερβοκινητήρες, όπως σχεδιάστηκε στο Eagle.

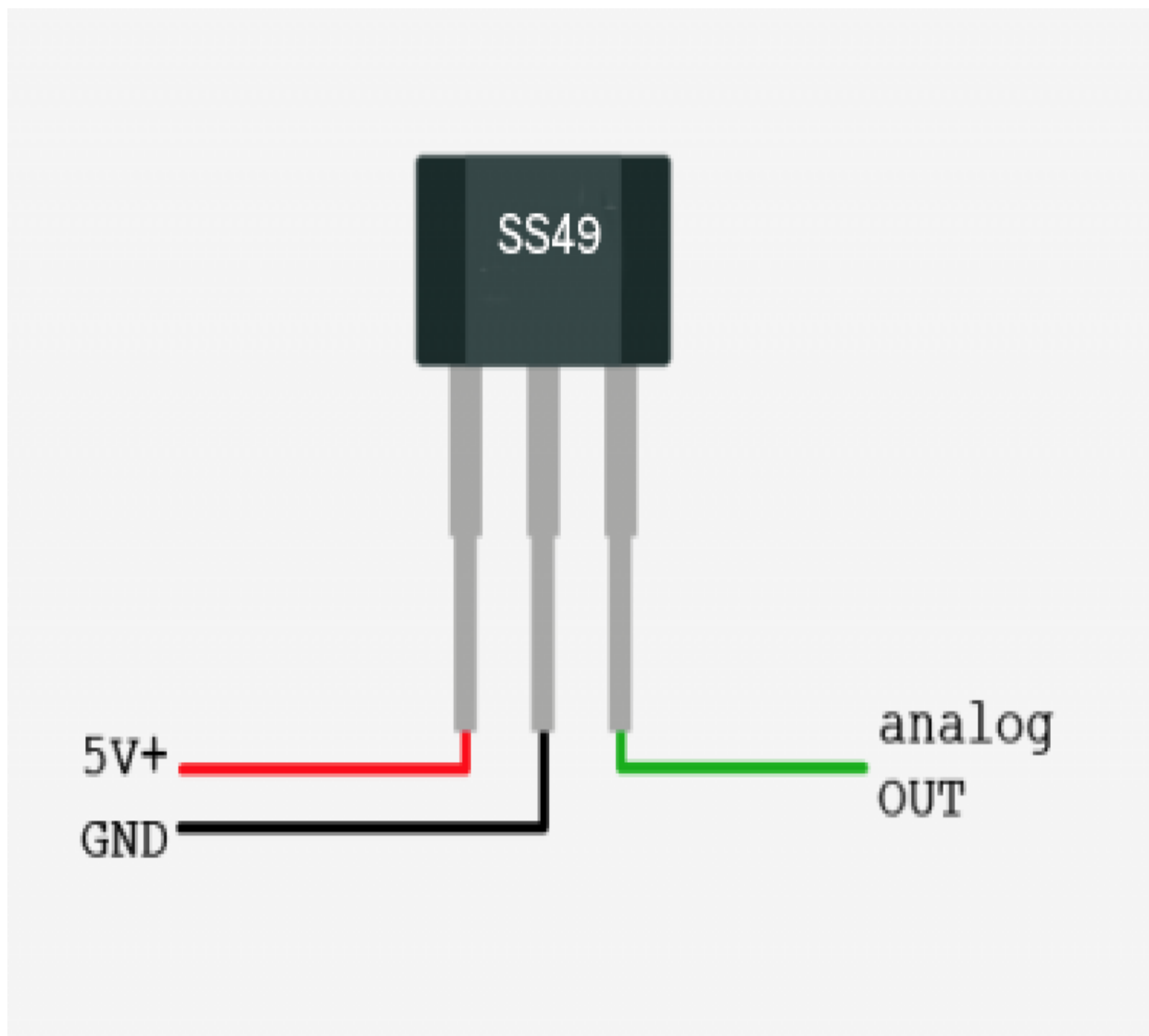


Σχήμα 3.41. Οι δύο πλευρές της πλακέτας διανομής ρεύματος στους σερβοκινητήρες, που κατασκευάστηκε στο LPKF.

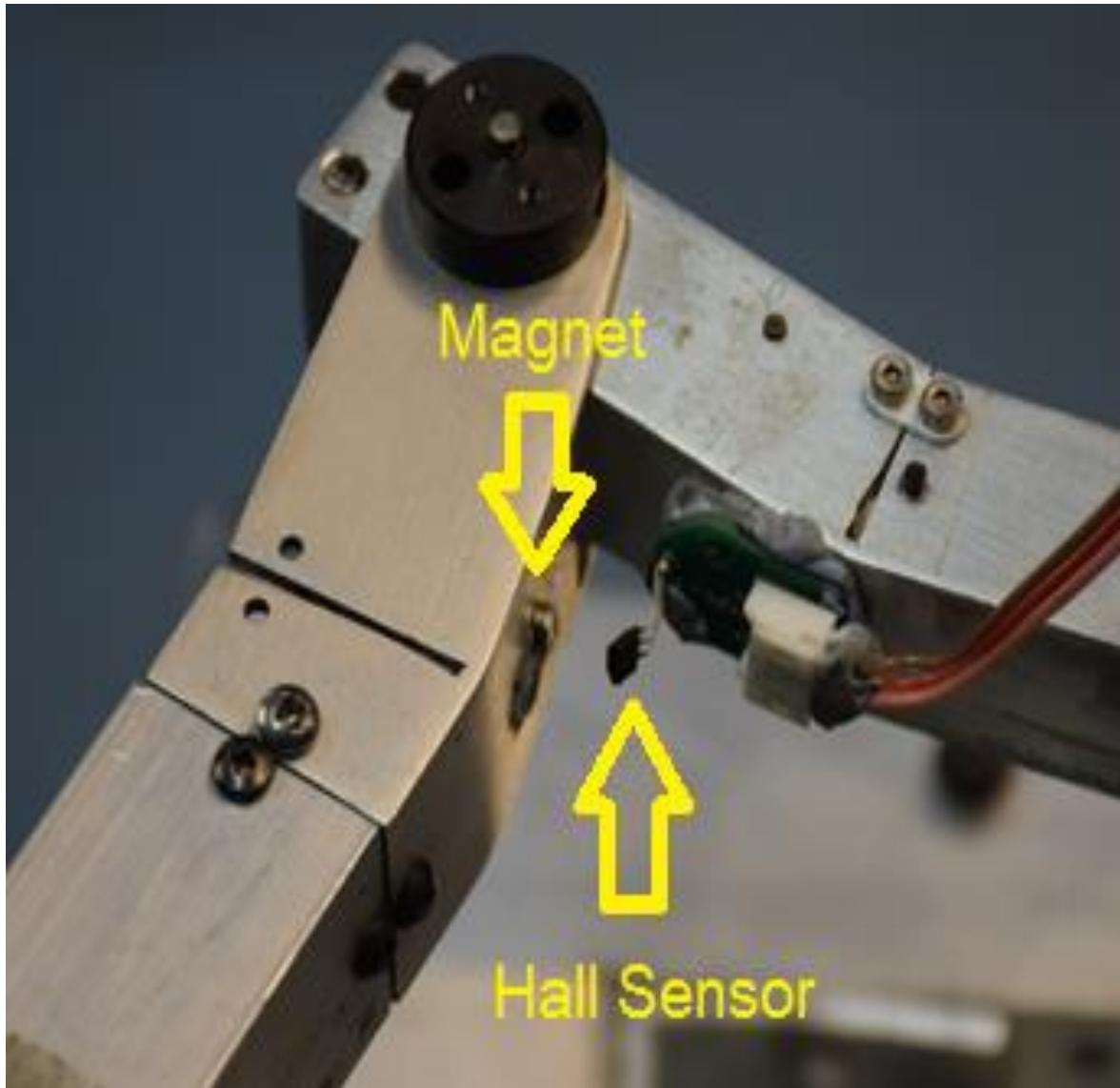
3.7 Προσθήκη Αισθητήρων στα Συστήματα των Βραχιόνων και Επίτευξη Συνεργασίας

3.7.1 Hall Sensors

Σε κάθε σύστημα βραχιόνων έχουν τοποθετηθεί από δύο Hall Sensor Honeywell SS49 [9] σε σημείο, όπου τα άκρα της αφετηρίας κάθε μέλους να ακουμπάνε σε αυτούς και στα σημεία, που ακουμπάνε τα μέλη τους αισθητήρες, έχουν τοποθετηθεί μαγνήτες. Έτσι, κατά την εκκίνηση του ρομπότ οι κινητήρες δίνουν θετική ροπή στα μέλη του αριστερού βραχίονα και αρνητική στα μέλη του δεξιού έτσι ώστε οι μαγνήτες να πλησιάσουν τους αισθητήρες. Δηλαδή για τον αριστερό βραχίονα η πρώτη άρθρωση πάει σε σχετική γωνία 150° και η δεύτερη σε σχετική γωνία 95° , ενώ στον δεξιό η πρώτη πάει σε -150° και η δεύτερη σε -95° . Εκεί το σήμα το αισθητήρα από HIGH γίνεται LOW και έτσι πραγματοποιείται η αρχικοποίηση της γωνιακής θέσης των συνδέσμων στις παλμογεννήτριες (Σχήμα 3.43).



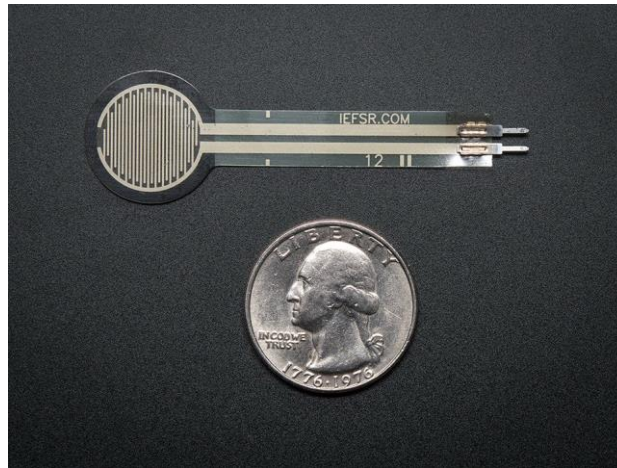
Σχήμα 3.42. Απεικόνιση του hall sensor Honeywell SS49 [17].



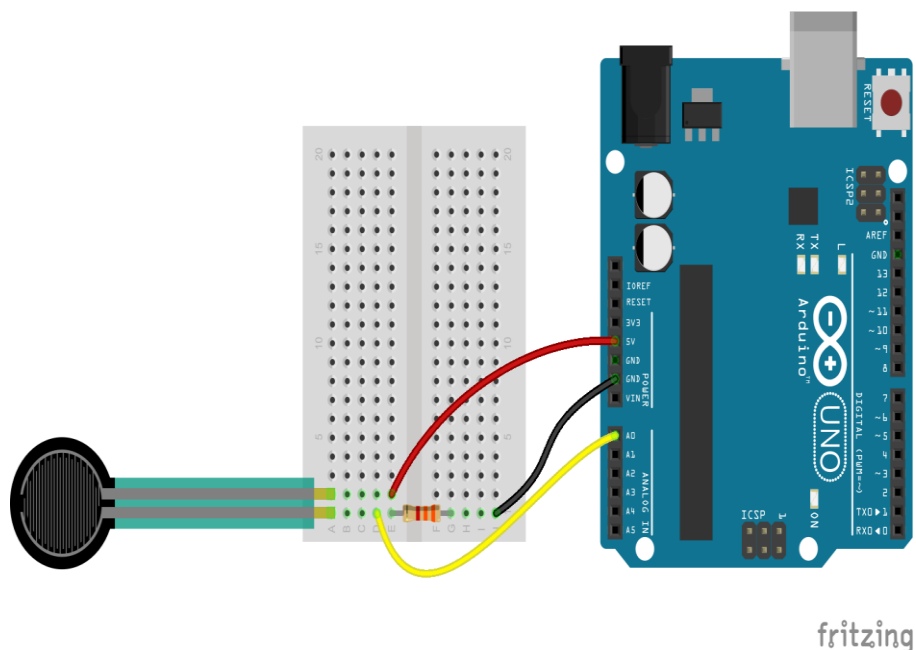
Σχήμα 3.43. Αισθητήρας και μαγνήτης πάνω στη δεύτερη άρθρωση του βραχίονα.

3.7.2 Force Sensitive Resistors

Όσον αφορά τους αισθητήρες FSR (FSR-Interlink 402 [34]) δε μας ενδιέφερε μία λειτουργία τύπου HIGH ή LOW, αλλά ένας τρόπος να διαβάσουμε την ασκούμενη δύναμη σε αυτούς. Πρώτο στάδιο σε αυτό είναι να αντιμετωπιστεί ο θόρυβος ενός αισθητήρα τόσο χαμηλού κόστους. Οι μετρήσεις για τον αισθητήρα ληφθήκαν μέσω Arduino σε ψηφιακή μορφή. Δηλαδή μετρήσεις από 0 έως 1023 αντιστοιχούν στη δύναμη που δέχεται ο αισθητήρας. Η συνδεσμολογία που ακολουθήθηκε για την παραλαβή μετρήσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 3.45.

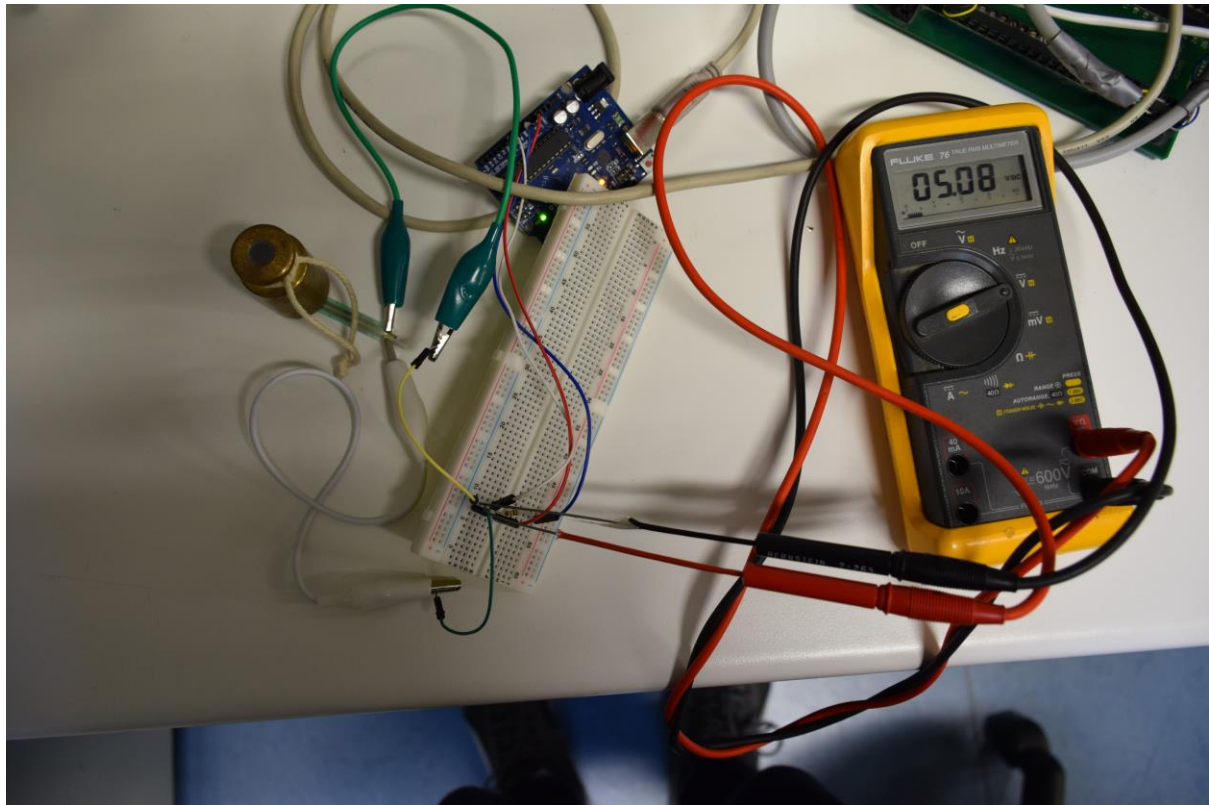


Σχήμα 3.44. Round Force Sensitive Resistor-Interlink 402 [15].



Σχήμα 3.45. Κύκλωμα παραλαβής μετρήσεων του FSR μέσω Arduino Uno (Αντίσταση 10kΩ) [7].

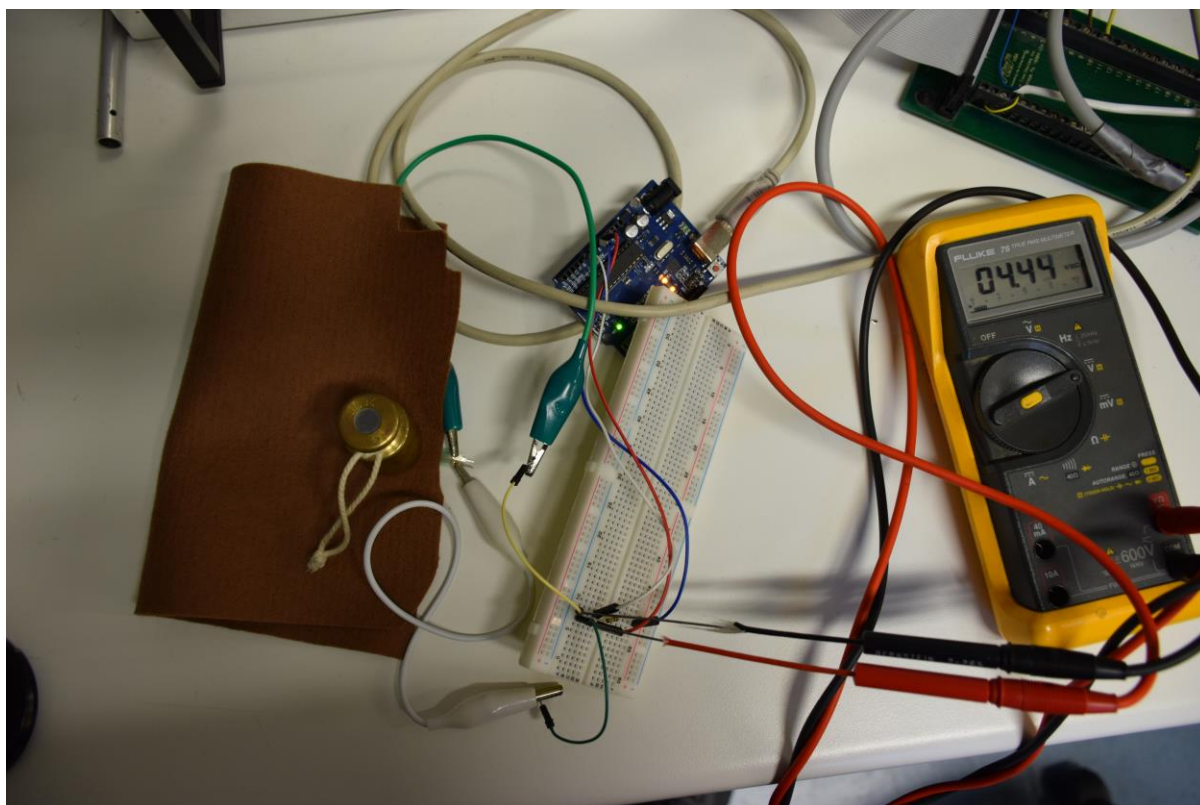
Αρχικά, έγιναν δοκιμές παραλαβής μετρήσεων με τον αισθητήρα πάνω σε τραπέζι και τοποθετώντας πρότυπα βάρη πάνω του (Σχήμα 3.46). Στην προκειμένη περίπτωση υπήρχε θόρυβος και με μεγάλο πλάτος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.47, όπου οι ψηφιακές τιμές δεν κυμαίνονται σε κάποιο μικρό εύρος γύρω από κάποια τιμή. Αυτό βέβαια ήταν αποτέλεσμα του γεγονότος πως το τραπέζι έχει κάποια τραχύτητα με αποτέλεσμα να μην κατανέμεται ομοιόμορφα η δύναμη στον αισθητήρα. Έγιναν δοκιμές έπειτα με υλικά να καλύπτουν τον αισθητήρα και πάνω και κάτω, τα οποία θα κατανέμουν τη δύναμη ομοιόμορφα. Αυτά τα υλικά ήταν σφουγγάρι, πανί καθαρισμού Vetex και τσόχα. Από τα παραπάνω η τσόχα είχε την καλύτερη απόδοση (Σχήμα 3.48) (Σχήμα 3.49), καθιστώντας το θόρυβο σχεδόν μηδαμινό, αφού κινείται γύρω από 6 ψηφιακές τιμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε δεκαδικά ψηφία της δύναμης, ακρίβεια που δε μας ενδιαφέρει.



Σχήμα 3.46. Πειραματική διάταξη λήψης μετρήσεων αισθητήρα FSR χωρίς κάλυψη από κάποιο υλικό για 100g.

```
0  
123  
162  
14  
0  
142  
6  
27  
0  
201  
0  
216  
0  
104
```

Σχήμα 3.47. Ψηφιακές μετρήσεις αισθητήρα FSR, όταν αυτός δεν είναι καλυμμένος με κάποιο υλικό και έχει τοποθετηθεί πάνω στη διάταξη πρότυπο βάρος 100g. Το στιγμιότυπο λήφθηκε από το Arduino μέσω PuTTY.

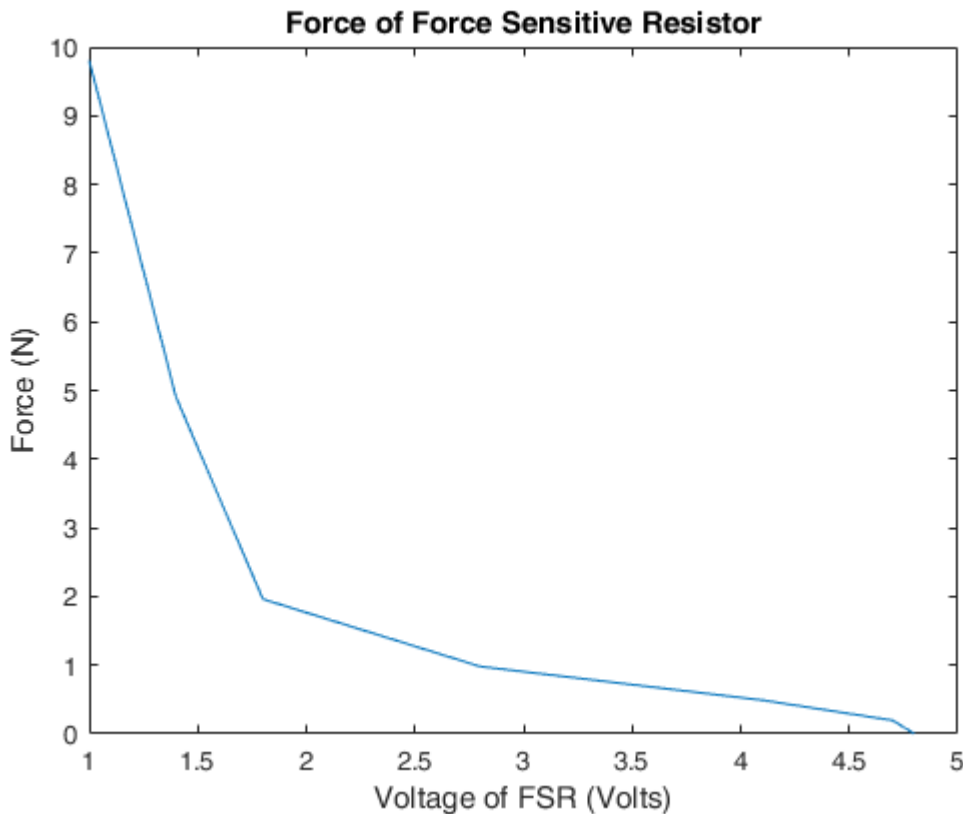


Σχήμα 3.48. Πειραματική διάταξη λήψης μετρήσεων αισθητήρα FSR με κάλυψη του αισθητήρα με τσόχα για 100g.

```
Analog reading = 836
Analog reading = 835
Analog reading = 834
Analog reading = 833
Analog reading = 834
Analog reading = 834
Analog reading = 834
Analog reading = 835
Analog reading = 836
```

Σχήμα 3.49. Ψηφιακές μετρήσεις αισθητήρα FSR, όταν αυτός είναι καλυμμένος και στις δύο πλευρές του με τσόχα και έχει τοποθετηθεί πάνω στη διάταξη πρότυπο βάρους 1kg. Το στιγμιότυπο λήφθηκε από το Arduino μέσω PuTTY.

Για να βρεθεί μία σχέση υπολογισμού της δύναμης του αισθητήρα, ληφθήκαν οι ψηφιακές μετρήσεις για τον αισθητήρα με την τσόχα χρησιμοποιώντας τα πρότυπα βάρη. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων λήφθηκε και η τιμή της τάσης στα άκρα του αισθητήρα με τη χρήση ενός βολτόμετρου. Από τα παραπάνω προέκυψε το Σχήμα 3.50 και από αυτό η σχέση (3.16):



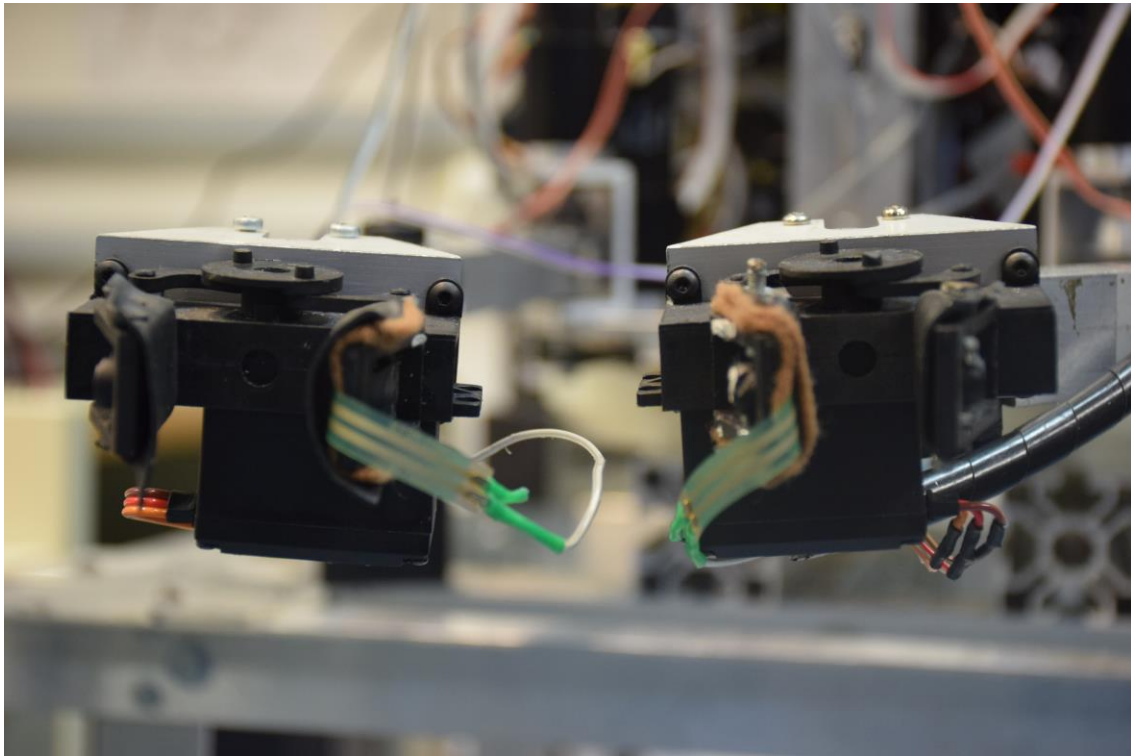
Σχήμα 3.50. Διάγραμμα δύναμης που ασκείται στον αισθητήρα FSR, συναρτήσει της διαφοράς τάσης στα άκρα του.

$$F_{FSR} = 0,1006V_{FSR}^6 - 2,0067V_{FSR}^5 + 16,16V_{FSR}^4 - 66,486V_{FSR}^3 + 148,08V_{FSR}^2 - 169,43V_{FSR} + 80,142 \quad (3.16)$$

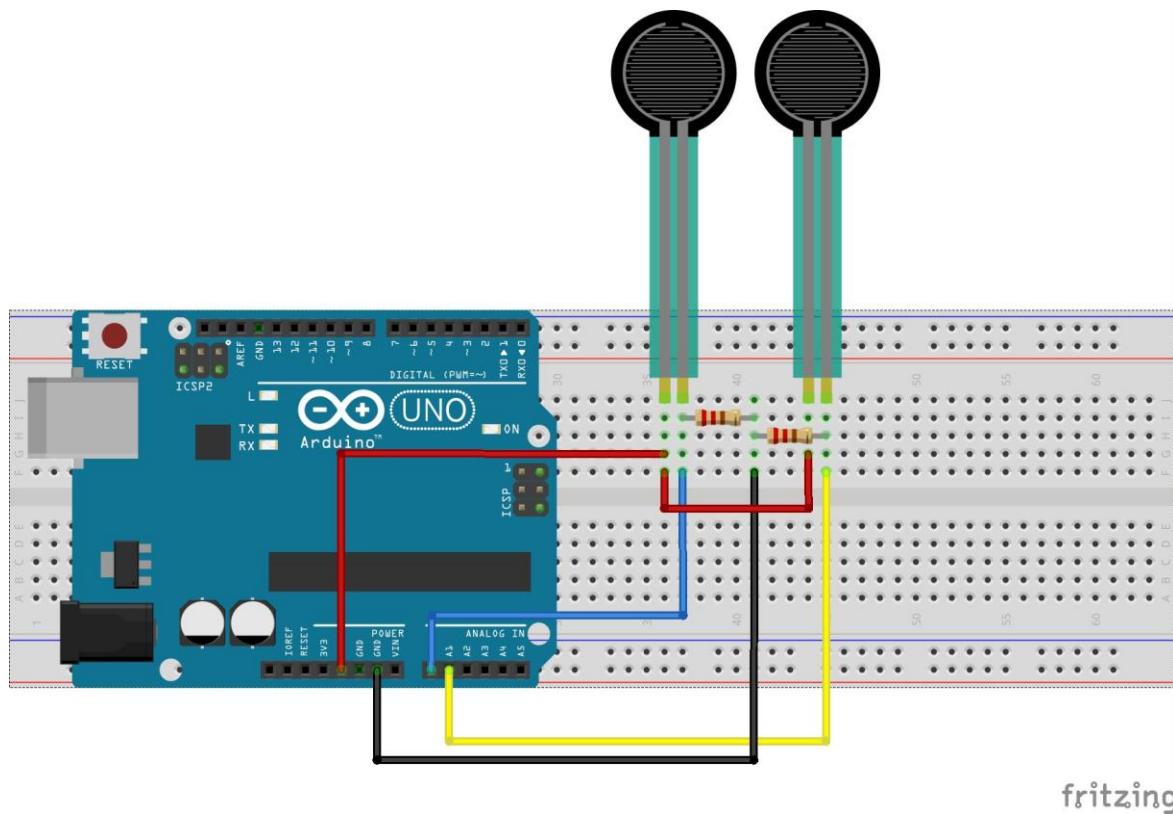
Όπου για να μπορεί να γίνει η μετατροπή επί τόπου με τη χρήση Arduino.

$$V_{FSR} = 4,8 \left(1 - \frac{AnalogtoDigitalread}{1023} \right) \quad (3.17)$$

Βάσει των παραπάνω προσδέθηκε ένας αισθητήρας καλυμμένος με τσόχα σε κάθε αρπάγη ανάμεσα σε μία από τις δαγκάνες και το λάστιχο, που χρησιμοποιείται για τριβή, έτσι ώστε να γίνεται γνωστό το πότε αρπάζει η αρπάγη κάποιο αντικείμενο και με τι δύναμη το κάνει αυτό (Σχημα 3.51). Επειδή η πλακέτα εισόδων/εξόδων του PC104 δεν έχει αναλογικές εισόδους τοποθετήθηκε μία πλακέτα Arduino πάνω στον πύργο του ρομπότ, η οποία συνδέεται μέσω USB με το PC104, ώστε να διαβάζει συνεχώς τους δύο αισθητήρες. Έπειτα μέσω της πλακέτας Arduino τυπώνονται σε ένα node στο ROS οι τιμές δύναμης, που δίνουν οι αισθητήρες. Οι δύο αισθητήρες πλέον συνδέονται με το Arduino με το κύκλωμα του Σχήματος 3.52.



Σχήμα 3.51. Οι δύο αισθητήρες FSR καλυμμένοι με τσόχα στο σύστημα των αρπαγών.



Σχήμα 3.52. Κύκλωμα παραλαβής μετρήσεων από δύο αισθητήρες FSR μέσω πλακέτας Arduino Uno (Αντιστάσεις 10kΩ) [7].

Έπειτα ληφθήκαν μετρήσεις της δύναμης που διαβάζει ο αισθητήρας ανάλογα με τη θέση της αρπάγης ως προς κάποιο αντικείμενο. Δηλαδή γνωρίζοντας το πλάτος ενός αντικειμένου, δόθηκε εντολή στην αρπάγη απλά να το ακουμπήσει (Σχήμα 3.53) και μετά διαβαζόταν η δύναμη για κάθε βήμα των δαγκανών της αρπάγης, ώστε να βρεθεί μία εξίσωση μετατροπής της θέσης της αρπάγης ως προς γνωστών διαστάσεων αντικείμενο και της γραμμικής δύναμης που ασκεί σε αυτό (3.18).

$$\Delta\theta(\text{degrees}) = 0,25\Delta F_{FSR}^3 - 4\Delta F_{FSR}^2 + 20,4\Delta F_{FSR} + 0,04 \quad (3.18)$$

Όπου $\Delta\theta$ η εντολή μεταβολής της γωνίας του σερβοκινητήρα από τη γωνία που βρισκόταν προτού δοθεί η εντολή (μεταβολή μίας μοίρας, όπως αναφέρθηκε αντιστοιχεί στη μεταβολή του ελαχίστου βήματος της αρπάγης, δηλαδή 0,27mm) και ΔF η διαφορά στις μετρήσεις δυνάμεων του αισθητήρα.



Σχήμα 3.53. Το σύστημα αρπάγης κρατώντας δοκιμαστικά ένα αντικείμενο με κάποια ευκαμψία.

Με την εύρεση της παραπάνω εξίσωσης εφαρμοστήκε ένας P-ελεγκτής στο σύστημα αρπάγης και αισθητήρα FSR κέρδους 0,01 και επιθυμητής τιμής δύναμης 3N, έτσι ώστε να διατηρείται η δύναμη της αρπάγης σε μία επιθυμητή τιμή και να λειτουργεί ο σερβοκινητήρας στην ομαλή του λειτουργία, ώστε να μην προκληθεί κάποια βλάβη σε περίπτωση άσκησης της stall torque για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η εξίσωση ελέγχου όσον αφορά τα παραπάνω είναι η (3.19) και συναρτήσει του σφάλματος ΔF προκύπτει στην (3.18) εντολή μεταβολής γωνίας.

$$\Delta F_{FSR} = 0,01(F_{FSR} - 3) \quad (3.19)$$

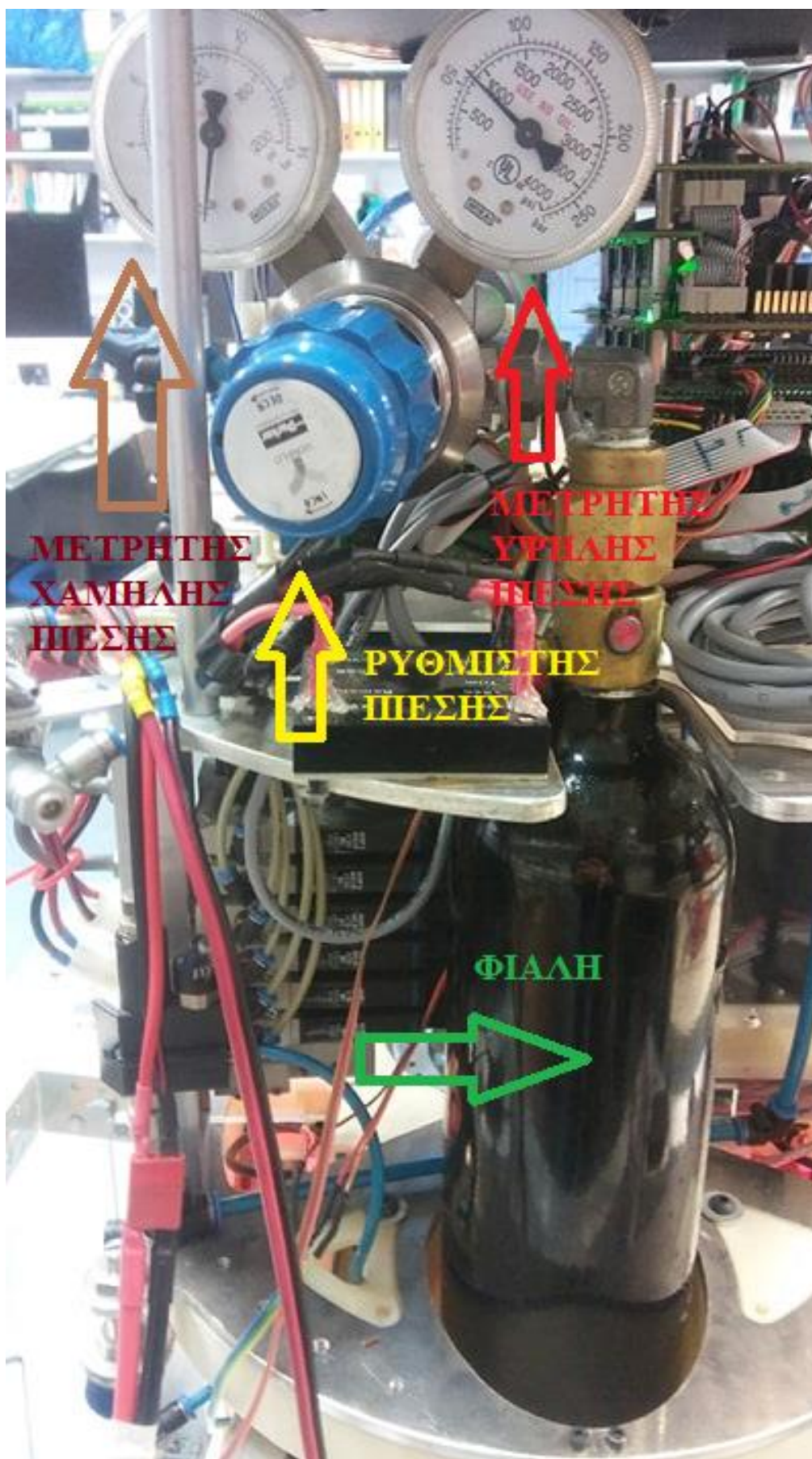
4 Χαρακτηριστικά του Πνευματικού Συστήματος του Ρομπότ και Επίτευξη Επιθυμητής Λειτουργίας

4.1 Το Πνευματικό Σύστημα του Ρομπότ

Το πνευματικό σύστημα του ρομπότ είναι υπεύθυνο για την αιώρηση του ρομπότ πάνω από την τράπεζα γρανίτη και για την επενέργεια των προωθητήρων, με σκοπό τη γραμμική και στρωφική μετατόπιση του ρομπότ.

Το σύστημα τροφοδοτείται από μία πηγή σταθερής πίεσης. Αυτή η πηγή είναι μία φιάλη που περιέχει CO_2 σε υγρή-αέρια μορφή κατά κύριο λόγο (οι διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και όγκου, μπορούν να προκαλέσουν την παρουσία και άλλης μορφής της ένωσης), στην έξοδο της οποίας είναι τοποθετημένος ένα ρυθμιστής πίεσης. Ο ρυθμιστής έχει ως είσοδο οποιαδήποτε τιμή πίεσης έχει η φιάλη (αρκεί να είναι μεγαλύτερη από την πίεση στην έξοδο του ρυθμιστή) και στην έξοδο του παρέχει στο σύστημα αέριο σε πίεση, της οποίας την τιμή ρυθμίζουμε εμείς. Στο ρυθμιστή επίσης έχουν τοποθετηθεί δύο μετρητές πίεσης, ο μετρητής της εισόδου ή μετρητής υψηλής πίεσης, ο οποίος δείχνει την πίεση στη φιάλη, και ο μετρητής της εξόδου ή μετρητής χαμηλής πίεσης, μέσω του οποίου μπορούμε να βλέπουμε την πίεση της πηγής και να τη ρυθμίζουμε στην επιθυμητή τιμή. Εδώ έχει επιλεγεί η τιμή των 7bar, η οποία θα αιτιολογηθεί στην επόμενη ενότητα του κεφαλαίου. Τα παραπάνω αποτελούν πηγή πίεσης 7bar (Σχήμα 4.1). Η πηγή αυτή συνδέεται με δύο σωληνώσεις σε δύο κόμβους (Σχήμα 4.2). Ένας κόμβος είναι η είσοδος στις έξι ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες (Σχήμα 4.3), όπου κάθε βαλβίδα παρέχει και ρυθμίζει την ποσότητα αερίου που θα μεταφέρεται στους έξι προωθητήρες ανά περίοδο λειτουργίας της. Οι έξι προωθητήρες στους οποίους καταλήγει το κύκλωμα από τις ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, είναι τοποθετημένοι συμμετρικά ως προς το γεωμετρικό κέντρο της βάσης του ρομπότ ανά ζεύγη, τα οποία ονομάζονται ζεύγος 1, ζεύγος 3 και ζεύγος 5. Η βάση του ρομπότ είναι κυλινδρική και στην κάτω της σχηματίζεται ένας κύκλος, όπου ανά τόξο 120 μοιρών τοποθετείται από ένα ζεύγος (Σχήμα 4.4). Ο άλλος κόμβος είναι ένας ρυθμιστής πίεσης (Σχήμα 4.5), από τον οποίο μεταφέρεται αέριο στα τρία αεροέδρανα του ρομπότ, που είναι επίσης τοποθετημένα με τον ίδιο τρόπο με τους προωθητήρες, στο κάτω μέρος του ρομπότ (Σχήμα 4.6).

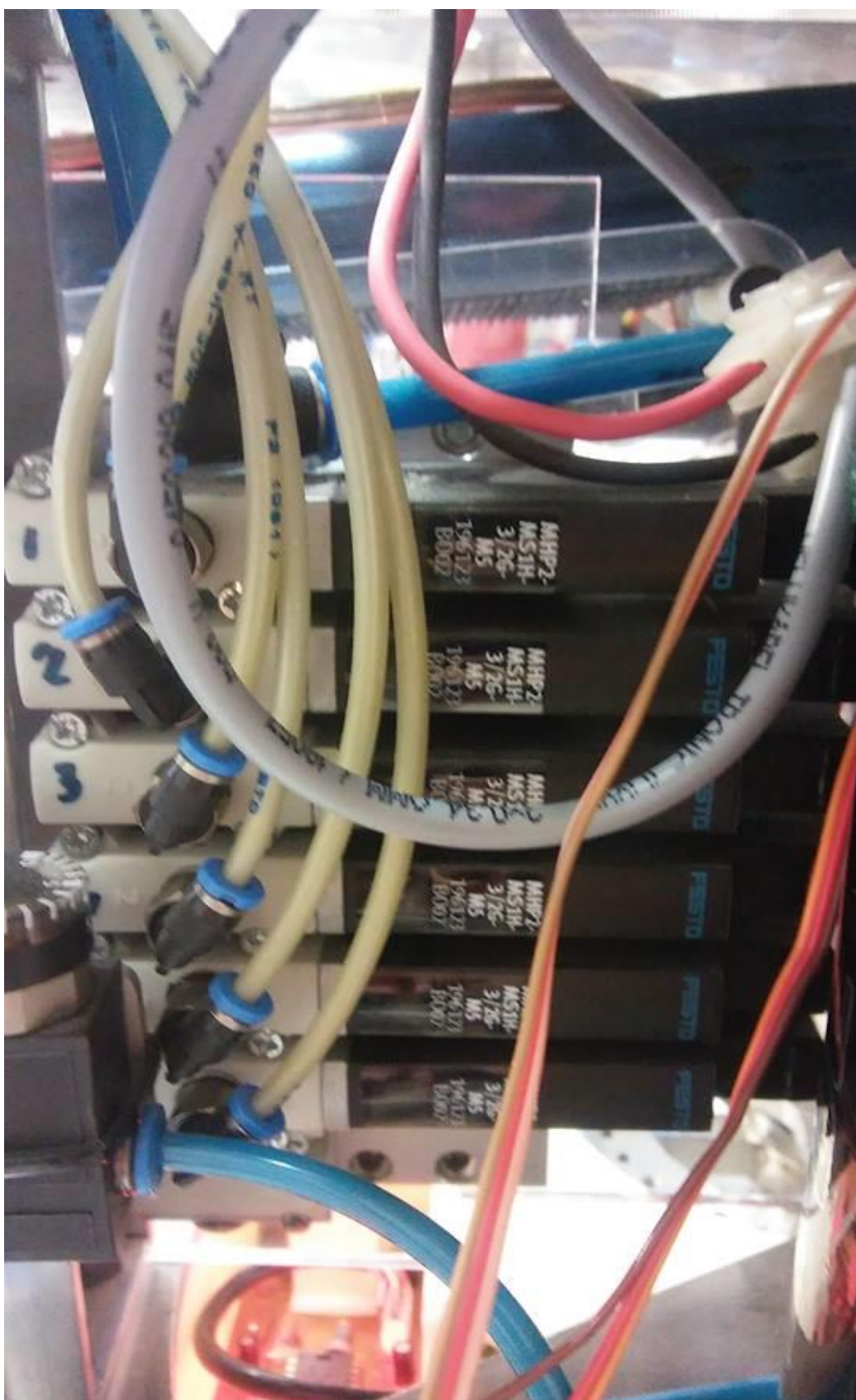
Τα αεροέδρανα συνδέονται με το ρομπότ με τη βοήθεια σφαιρικών αρθρώσεων που έχουν τοποθετηθεί στα ανάλογα σημεία. Τα αεροέδρανα στην κεφαλή τους έχουν ένα σφαιρικό κενό. Στην κεφαλή αυτή έχουν τοποθετηθεί συμμετρικά και δύο μαγνήτες. Έτσι το κενό των αεροδράνων τοποθετείται στη σφαιρική διατομή και οι μαγνήτες τα συγκρατούν εκεί, καθώς επίσης, όταν τοποθετείται το ρομπότ σε επίπεδη επιφάνεια, η επιφάνεια των αεροδράνων τοποθετείται από μόνη της παράλληλα στην επίπεδη επιφάνεια (Σχήμα 4.7).



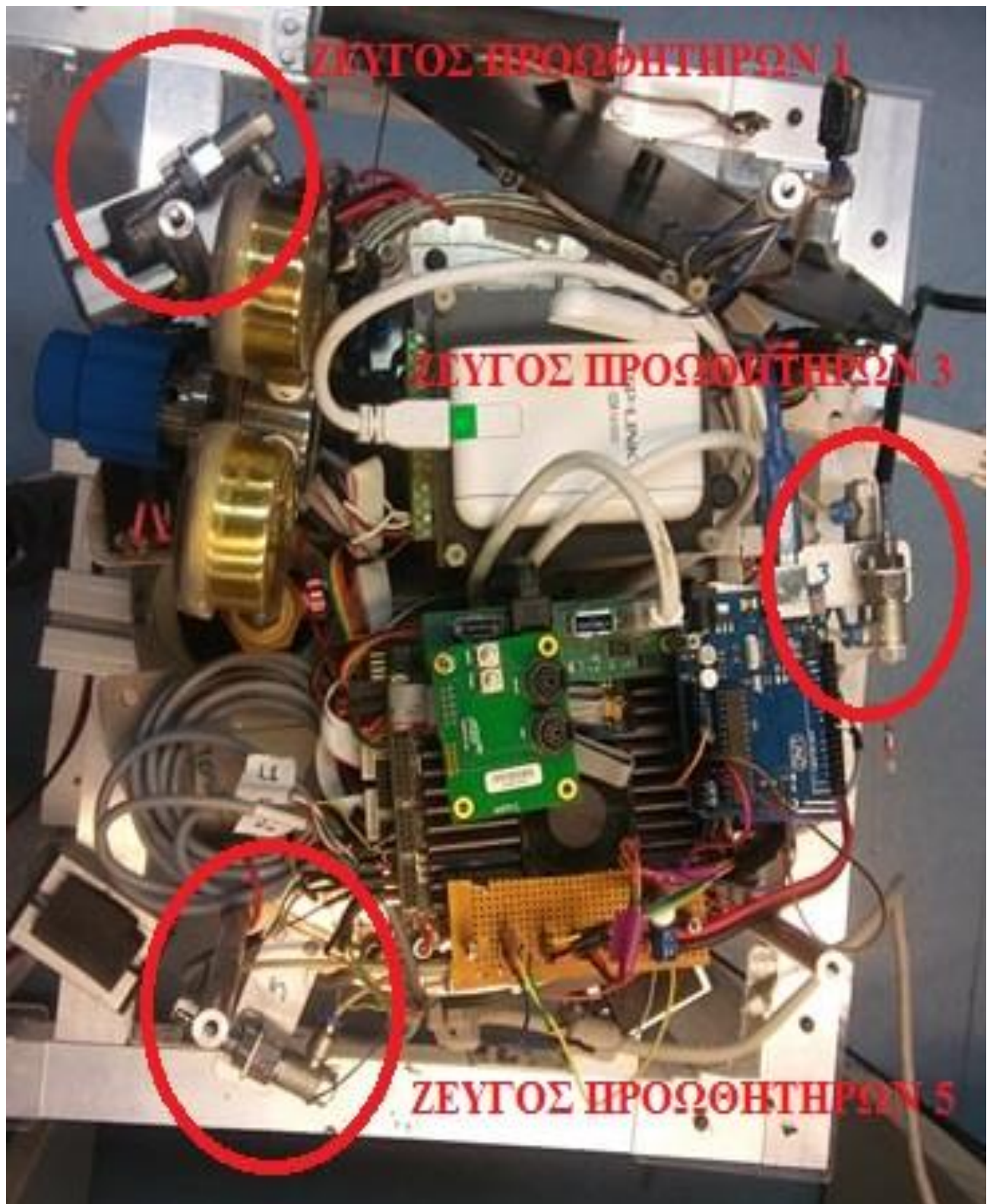
Σχήμα 4.1. Η φιάλη διοξειδίου του άνθρακα και ο ρυθμιστής πίεσης.



Σχήμα 4.2. Έξοδος από την πηγή και διαχωρισμός της σε 2 σωληνώσεις.



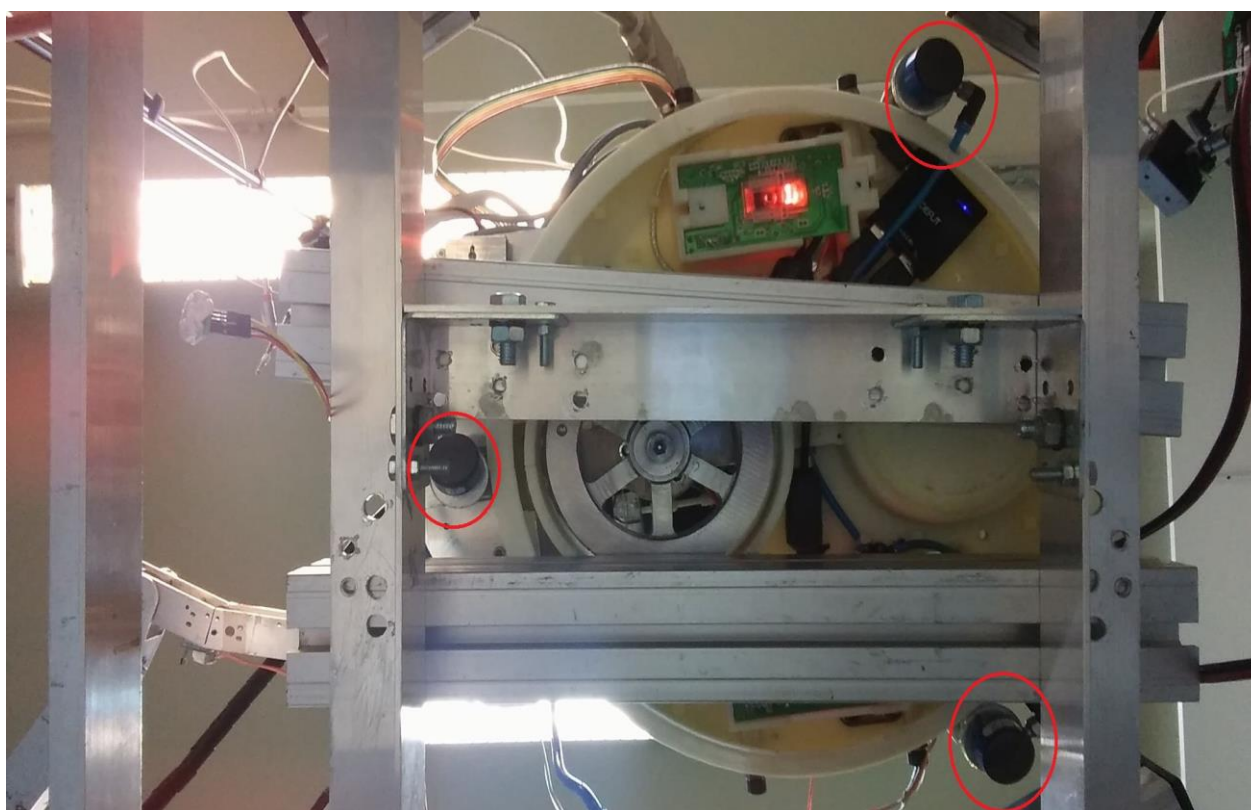
Σχήμα 4.3. Οι ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες τοποθετημένες σε διανομέα (manifold) που ρυθμίζουν την ποσότητα αερίου που παρέχεται στους προωθητήρες.



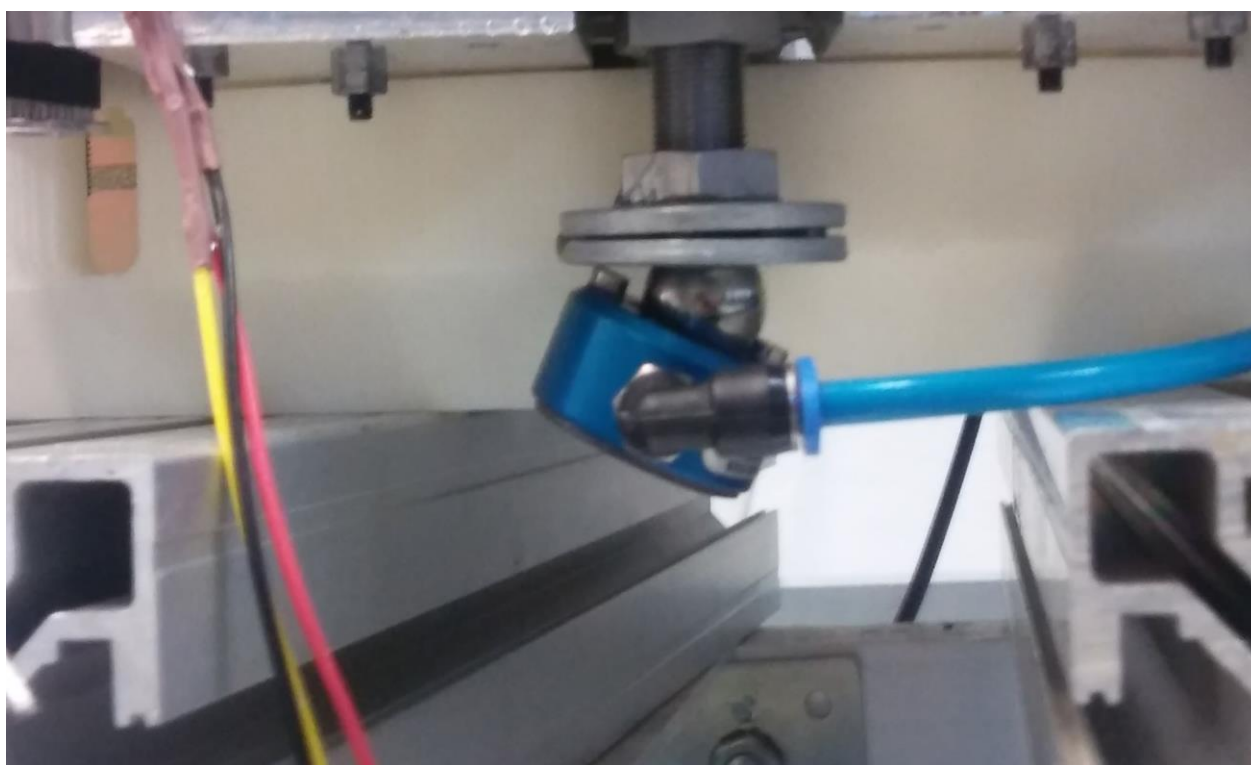
Σχήμα 4.4. Τοποθέτηση των ζευγών προωθητήρων στο ρομποτικό σύστημα. Το σύστημα απεικονίζεται δίχως την κεφαλή του με τις διόδους φωτοεκπομπής.



Σχήμα 4.5. Ρυθμιστής πίεσης από τον οποίο παρέχεται αέριο στα αερόδρανα.



Σχήμα 4.6. Τοποθέτηση των αεροεδράνων στη βάση του ρομπότ.



Σχήμα 4.7. Τοποθέτηση αεροεδρανου σε σφαιρική άρθρωση με τη βοήθεια ζεύγους μαγνητών.

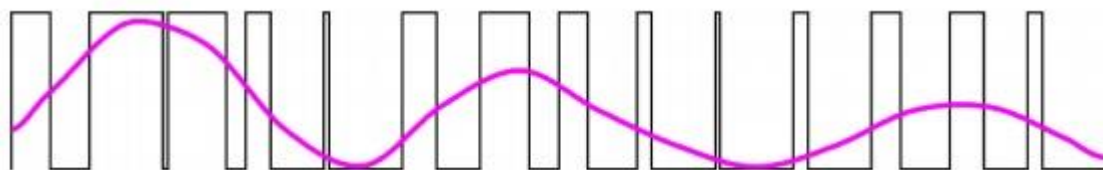
4.2 Χαρακτηριστικά του Πνευματικού Συστήματος

4.2.1 Οι Ηλεκτρομαγνητικές Βαλβίδες

Οι ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες [22] που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3, όπως αναφέρθηκε, ρυθμίζουν την ποσότητα του αερίου που παρέχεται στους προωθητήρες ανά περίοδο λειτουργίας τους. Οι βαλβίδες αυτές έχουν τη δυνατότητα πολύ γρήγορης λειτουργίας ενώ το χρονικό διάστημα που παραμένουν ανοιχτές μπορεί να μεταβληθεί ανά περίοδο λειτουργίας τους. Όταν αυτή η λειτουργία επαναλαμβάνεται με συχνότητα πολύ μεγαλύτερη από την ιδιοσυχνότητα του συστήματος, μπορεί να ληφθεί ένα αναλογικό σήμα της τιμής της ώσης των προωθητήρων, χρησιμοποιώντας ψηφιακά μέσα. Δηλαδή ελέγχεται η λειτουργία της κάθε βαλβίδας επιλέγοντας μέσα σε μια περίοδο λειτουργίας της τα χρονικά διαστήματα, στα οποία θα τροφοδοτείται με τάση (περίπου 22V για τις συγκεκριμένες βαλβίδες) και τα χρονικά διαστήματα που δε θα τροφοδοτείται (0V). Δηλαδή η λειτουργία της βαλβίδας ελέγχεται με ένα on-off μοτίβο. Η παραπάνω τεχνική ονομάζεται Pulse Width Modulation ή PWM. Ο συνολικός χρόνος, που είναι ανοιχτή η βαλβίδα για μία περίοδο λειτουργίας της προς τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας της ονομάζεται duty cycle και συμβολίζεται με τ [45]:

$$\tau = \frac{t_{open}}{T} \quad (4.1)$$

Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται ένας παλμός PWM και η αντίστοιχη αναλογική τιμή του με ροζ χρώμα.



Σχήμα 4.8. Παλμός PWM και η αντίστοιχη αναλογική τιμή του [45].

Η βαλβίδα έχει οριστεί να έχει περίοδο:

$$T = 0,1s \quad (4.2)$$

Επειδή η διαφορά πίεσης από την πηγή στους προωθητήρες (ατμοσφαιρική πίεση) είναι σταθερή, η παροχή, που παρέχεται σε αυτούς είναι σταθερή (2.41) και έτσι με την παραπάνω μέθοδο παρέχεται σε αυτούς η παροχή, που είναι ανάλογη της δύναμης ώσης,

για χρόνο t_{open} ανά περίοδο λειτουργίας της βαλβίδας. Κατά τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας δίνεται ένας παλμός κάποιου πλάτους, όπως έχει αναφερθεί. Η τιμή της δύναμης ώσης για αυτήν την περίοδο θα είναι ίση με τον μέσο όρο των τιμών της. Δηλαδή θα είναι ίση με:

$$F_{thruster} = \frac{F_{maxthruster} t_{open} + 0(t_{close})}{T} = \frac{F_{maxthruster} t_{open}}{T} \quad (4.3)$$

Στην παραπάνω σχέση, βέβαια, δε λαμβάνονται υπόψη οι χρόνοι απόκρισης των βαλβιδών κατά το άνοιγμα και το κλείσιμο τους. Βέβαια αυτοί οι χρόνοι σε σχέση με την περίοδο είναι αρκετά μικροί (της τάξεως 10^{-3}) και επηρεάζουν για μία περίοδο λειτουργίας των βαλβιδών τιμές duty cycle (%) κοντά στο 0% και στο 100%, φέρνοντας τη μέση τιμή της δύναμης κοντά στο 0% για μικρές τιμές duty cycle, γιατί η βαλβίδα δεν προλαβαίνει να παραμείνει ανοικτή για ένα χρονικό διάστημα, κατά το οποίο θα διατηρηθεί η μέγιστη τιμή της ώσης, και αντίστοιχα κοντά στο 100% για μεγάλες τιμές duty cycle, γιατί η βαλβίδα δεν προλαβαίνει να κλείσει και να διατηρηθεί μηδενική τιμή ώσης, μέχρι να ξαναοίξει.

4.2.2 Τα Αεροέδρανα

Όπως και με τους προωθητήρες, αν ο ρυθμιστής πίεσης που παρέχει αέριο στα αεροέδρανα συμπεριληφθεί ως αντίσταση στη συνισταμένη των αντιστάσεων σωλήνωσης των αεροεδράνων, έχουμε τρεις κλάδους που συνδέονται με την πηγή πίεσης και είναι γνωστή η σταθερή διαφορά πίεσης, λόγω της ατμοσφαιρικής πίεσης στην έξοδο των αεροεδράνων. Έτσι στα αεροέδρανα παρέχεται σταθερή παροχή (2.41) χωρίς να παρεμβάλλεται κάποιος μηχανισμός ελέγχου της ροής.

Στο ρομπότ έχουν τοποθετηθεί συμμετρικά 3 αεροέδρανα [27], οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι κάθε αεροέδρανο φορτίζεται με το 1/3 της δύναμης βάρους του ρομπότ. Το ρομπότ με τη φυάλη αερίου γεμάτη ζυγίζει περίπου 13kg. Άρα σε κάθε έδρανο ασκείται κάθετη δύναμη περίπου 42,5N.

Από τον κατασκευαστή των αεροεδράνων, που είναι η εταιρεία New Way Air Bearings, είναι διαθέσιμο ένα τυπικό διάγραμμα για τη λειτουργία αεροεδράνων αντίστοιχου όγκου αλλά όχι του ίδιου προϊόντος με αυτό που χρησιμοποιείται (Σχήμα 4.9). Τα χαρακτηριστικά των αεροεδράνων που χρησιμοποιούνται έχουν τοποθετηθεί στο Παράρτημα Α. Χρησιμοποιήθηκε αυτό το διάγραμμα λόγω της προσθήκης των εξισώσεων των καμπυλών που απεικονίζονται.

Στο Σχήμα 4.9 φαίνονται και οι συναρτήσεις φορτίου συναρτήσει ύψους του κενού ανάμεσα σε επιφάνεια και αεροέδρανα για 60PSI και για 80PSI, δηλαδή για 4,14bar και για 5,52bar. Επίσης για την τράπεζα γρανίτη, η εταιρεία που την κατασκεύασε (OELZE Praezisions-Messzeugfabrik GmbH), ορίζει τη μέγιστη τραχύτητα αυτής στα 4,58μm (Παράρτημα Α). Για να είναι το ρομπότ ανυψωμένο από την υψηλότερη τραχύτητα της

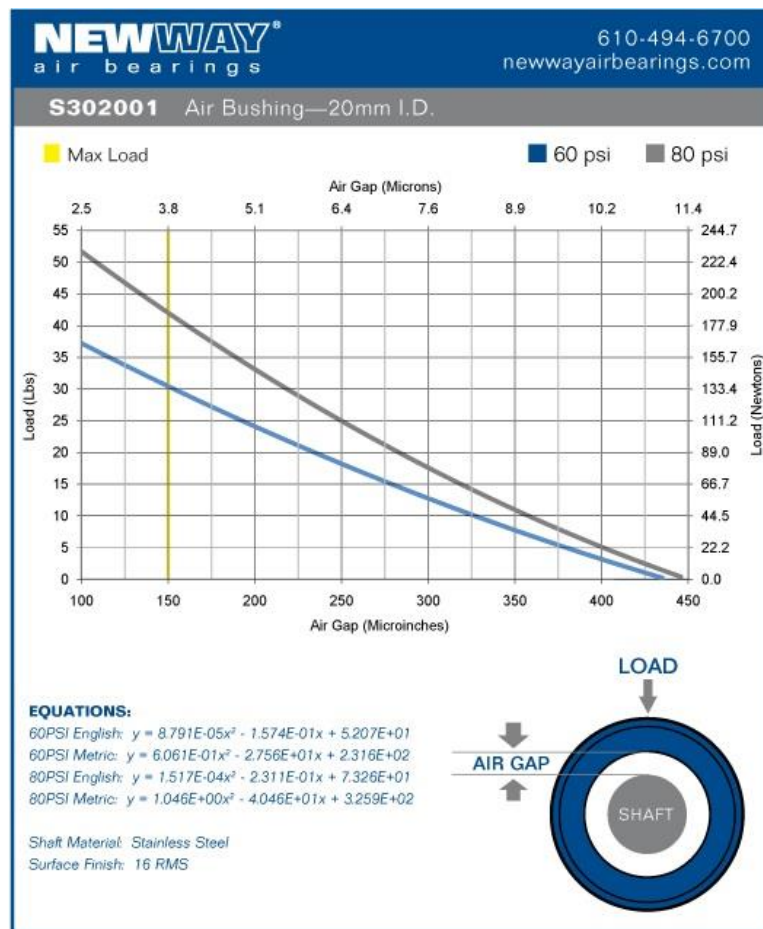
τράπεζας κατά 5μm, εμείς ζητάμε να ανυψώνει το ρομπότ κατά 10μm. Από τις συναρτήσεις του Σχήματος 4.9, για ανύψωση 10μm, προκύπτει:

$$Load_{60PSI} = 16,6N \quad (4.4)$$

$$Load_{80PSI} = 25,9N \quad (4.5)$$

Άρα με γραμμική παρεμβολή μπορεί να βρεθεί η πίεση για την οποία για φορτίο 42,5N τα αεροέδρανα ανυψώνονται κατά 10μm και αυτή είναι:

$$p_{airbearings} = \frac{80PSI - 60PSI}{Load_{80PSI} - Load_{60PSI}} (Load_{airbearings} - Load_{60PSI}) + 60PSI = 115,6999PSI = 8bar \quad (4.6)$$



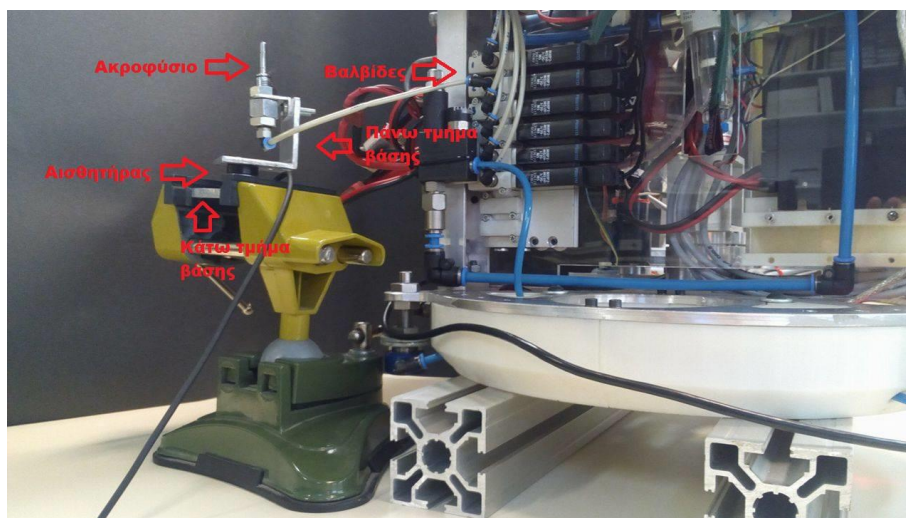
Σχήμα 4.9. Διάγραμμα δύναμης που ασκείται στα αεροέδρανα συναρτήσεως του διάκενου αέρα, κατά το οποίο είναι ανυψωμένα ανάλογα με την πίεση του αερίου, που τα διαπερνά, από τη New Way Air Bearings [26].

Επειδή όμως η εταιρεία που κατασκεύασε τα αεροέδρανα ορίζει την ονομαστική πίεση λειτουργίας του προϊόντος στα 7bar, τα αεροέδρανα τροφοδοτούνται με 7bar, με αποτέλεσμα κάθε αεροέδρανο να ανυψώνεται κατά 9,7μm αντί για 10μm, απόδοση που παραμένει ικανοποιητική κρίνοντας από τη μέγιστη τραχύτητα της τράπεζας γρανίτη. Έτσι, ο ρυθμιστής πίεσης στη φιάλη ρυθμίζεται, έτσι ώστε να παρέχεται από την πηγή σταθερής πίεσης αέριο πίεσης 7bar στο πνευματικό σύστημα του ρομπότ.

4.3 Μετρήσεις Δύναμης κάθε Ζεύγους Προωθητήρων για Διαφορετικά PWM

Έχοντας πηγή σταθερής πίεσης στο πνευματικό σύστημα και γνωρίζοντας πως στην έξοδο των προωθητήρων η τιμή της πίεσης είναι η ατμοσφαιρική, θεωρείται πως με το άνοιγμα των βαλβίδων η ώση έχει σταθερή τιμή για κάθε προωθητήρα, επειδή και η παροχή αερίου έχει σταθερή τιμή λόγω της εξίσωσης (2.41). Η δύναμη της ώσης έχει γραμμική αναλογία με την τιμή της παροχής, για αυτό θεωρείται πως και η ώση έχει σταθερή τιμή. Βέβαια, η διαφορετική θερμοκρασία και ο όγκος του αερίου στη φιάλη μπορεί να προκαλέσουν μεταβολές στην τιμή αυτή, οπότε η ώση κινείται σε ένα εύρος τιμών, και ως ονομαστική τιμή ώσης επιλέγεται η μέση τιμή αυτών.

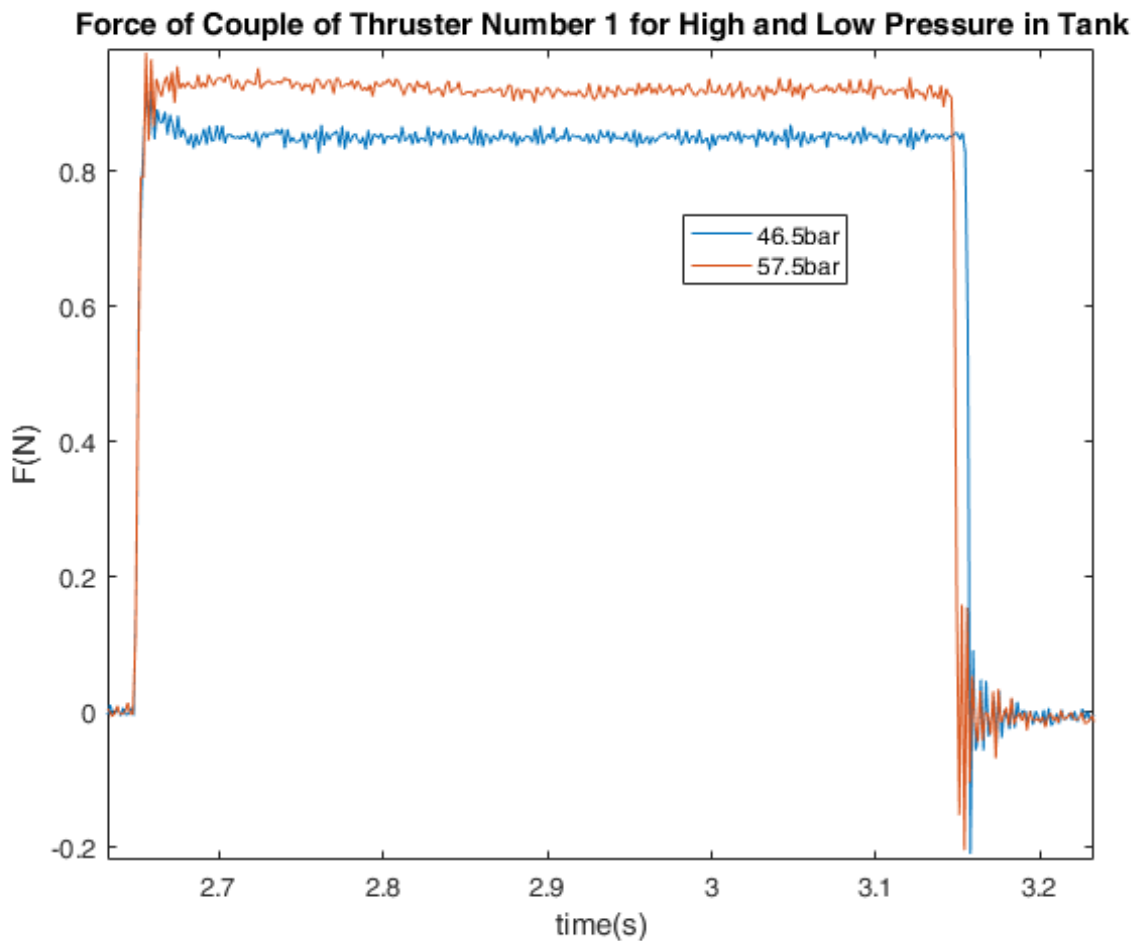
Για να μετρηθούν οι τιμές της ώσης για κάθε ζεύγος προωθητήρων, χρησιμοποιήθηκε η εξής εγκατάσταση. Δημιουργήθηκε μια βάση για να προσδεθεί ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας ATI nano 17 [14] και τοποθετήθηκε σε μία μέγγενη. Πάνω στον αισθητήρα προσδέθηκε ένα ακόμη εξάρτημα που κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο του εργαστηρίου, πάνω στο οποίο δημιουργήθηκαν οπές, ώστε να προσδεθούν με ευκολία οι προωθητήρες, με τρόπο τέτοιο, ώστε η ώση να είναι παράλληλη στο z-άξονα του αισθητήρα (Σχήμα 4.10). Έτσι, ληφθήκαν για κάθε προωθητήρα μετρήσεις σε διαφορετικές συνθήκες. Ο αισθητήρας ρυθμίστηκε να λαμβάνει μετρήσεις με συχνότητα 10kHz, ώστε να μεταδοθεί όλη η πληροφορία.



Σχήμα 4.10. Έγκαταση για τη διεξαγωγή πειραμάτων μετρήσεων των δυνάμεων ώσης των προωθητήρων.

Σε πρώτη φάση μελετήθηκε η διαφορά των τιμών μέγιστης δύναμης για τον ίδιο προωθητήρα σε διαφορετικές συνθήκες (διαφορετική φιάλη, διαφορετική θερμοκρασία του αερίου στη φιάλη, διαφορετικός όγκος αερίου στη φιάλη).

Για το ζεύγος προωθητήρων 1 λήφθηκαν οι εξής μετρήσεις για 100% duty cycle για πολύ υψηλή πίεση του αερίου μέσα στη φιάλη (μεγάλος όγκος, κανονική θερμοκρασία) και για πολύ χαμηλή (μικρότερος όγκος, χαμηλή θερμοκρασία λόγω εκτόνωσης):



Σχήμα 4.11. Μετρήσεις δύναμης του πρώτου ζεύγους προωθητήρων για 100% duty cycle για χαμηλή και υψηλή πίεση στη φιάλη.

Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται η διαφορά στην τιμή της δύναμης για τις δύο καταστάσεις και η μεσή τιμή προκύπτει 0,92N για την υψηλή πίεση και 0,84N για τη χαμηλή. Όντως με παραπάνω δοκιμές, που έγιναν, η μέση τιμή της δύναμης για το πρώτο ζεύγος προωθητήρων (ζεύγος 1), όταν οι βαλβίδες είναι ανοιχτές προκύπτει να είναι ίση με:

$$F_1 = 0,88N \quad (4.7)$$

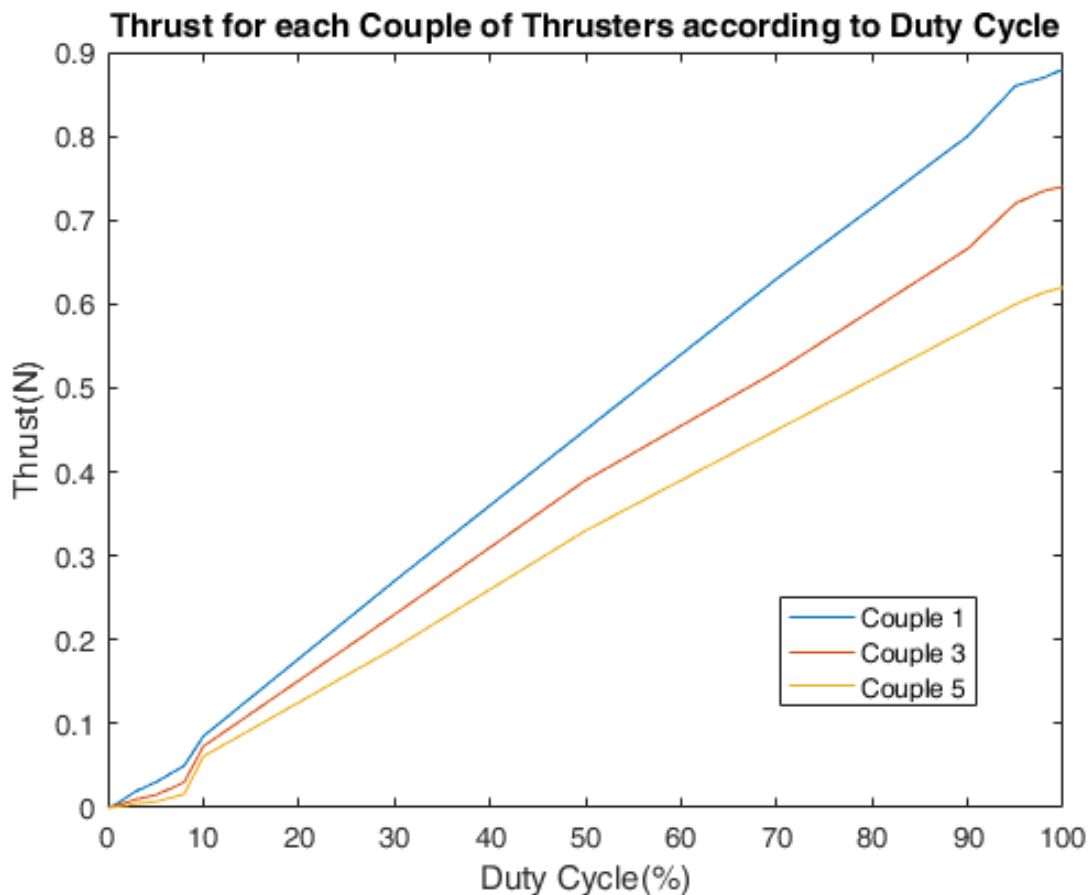
Οπότε η δύναμη ώσης έχει ένα σφάλμα $\pm 0,04N$ γύρω από την ονομαστική τιμή. Σταθερή βρέθηκε να είναι η απόκλιση και στα άλλα ζεύγη (ζεύγη 3 και 5) προωθητήρων με την ίδια διαδικασία για τα οποία θα αναφερθεί η ονομαστική τιμή της δύναμης ώσης.

$$F_3 = 0,75N \quad (4.8)$$

$$F_5 = 0,62N \quad (4.9)$$

Από τα δεδομένα του Σχήματος 4.11 μπορούν να υπολογιστούν οι χρόνοι απόκρισης των βαλβίδων, οι οποίοι είναι ίσοι με 7ms στο άνοιγμα και 4ms στο κλείσιμο κάθε βαλβίδας.

Έπειτα ληφθήκαν μετρήσεις σε κάθε προωθητήρα για διαφορετικά duty cycle, ώστε να απεικονιστούν τα διαγράμματα δύναμης για κάθε προωθητήρα ανάλογα με το duty cycle (Σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12. Καμπύλες ώσης συναρτήσει του duty cycle για κάθε ζεύγος προωθητήρα.

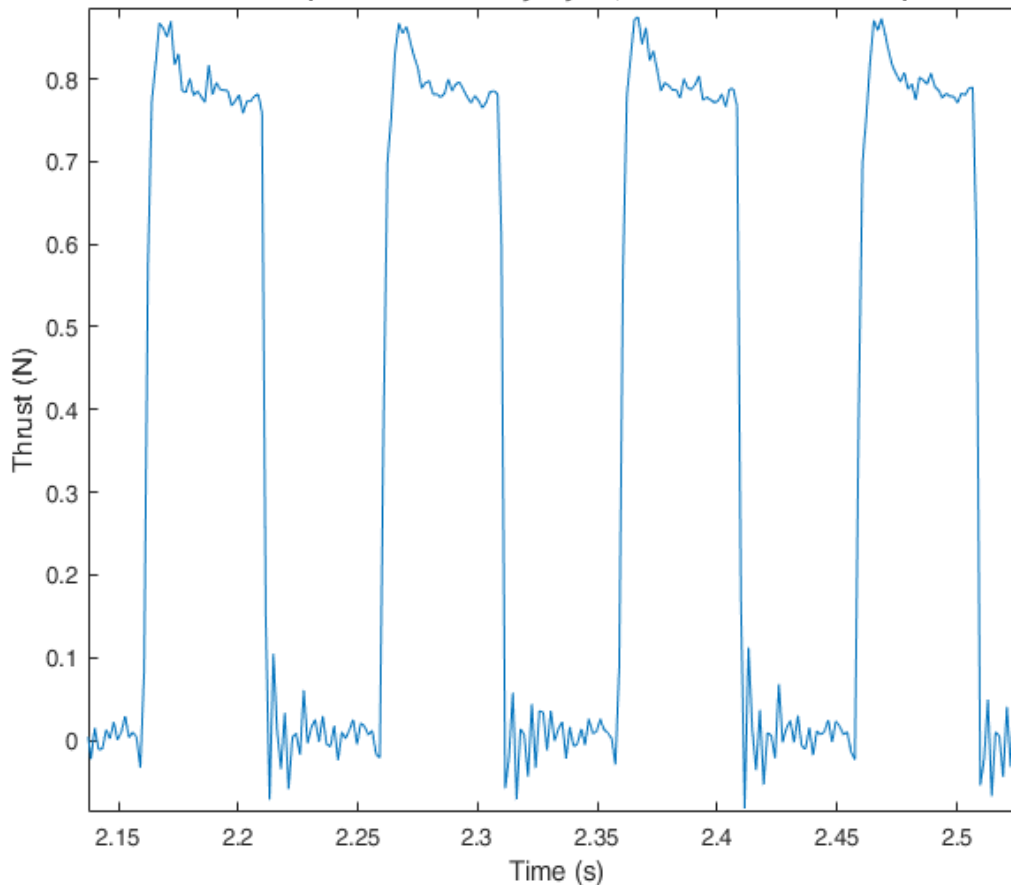
Στο Σχήμα 4.12 είναι εμφανές και το φαινόμενο, κατά το οποίο για μικρές τιμές και μεγάλες τιμές duty cycle, η μέση τιμή της ώσης είναι περίπου ίδια. Το φαινόμενο

παρατηρείται από τιμές duty cycle μικρότερες του 8% και από τιμές duty cycle μεγαλύτερες του 95%.

Επίσης έγιναν δοκιμές μετρήσεων για έναν προωθητήρα, όταν είναι και άλλοι προωθητήρες ενεργοί.

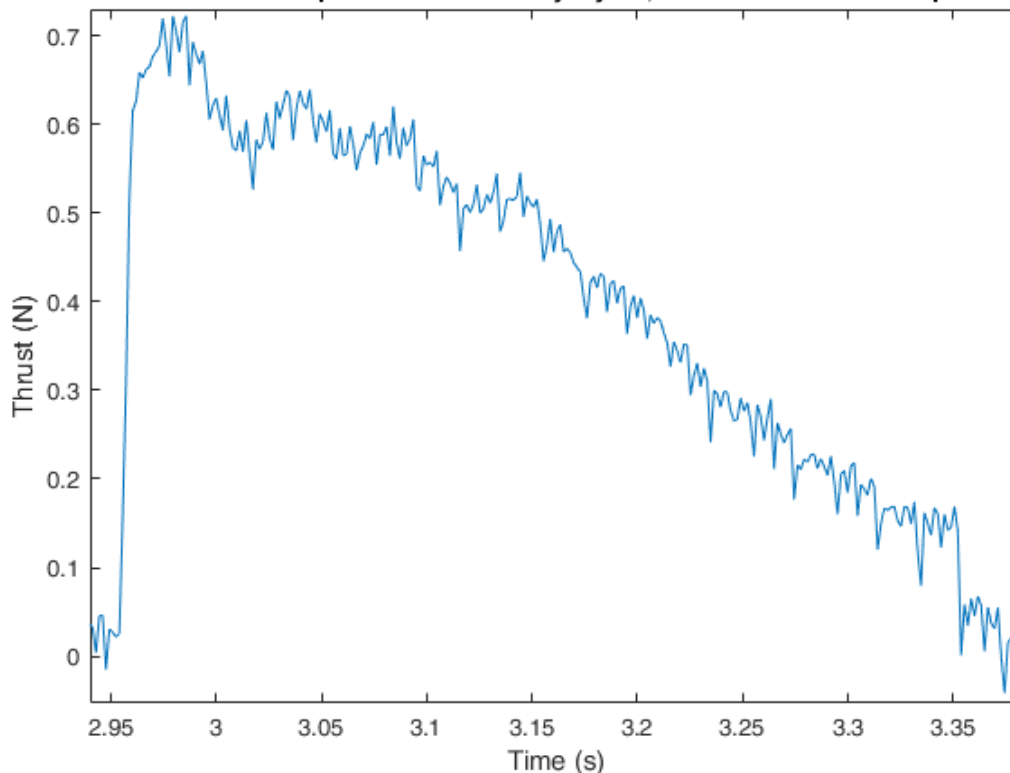
Στα Σχήματα 4.13 και 4.14 φαίνεται πως η συμπεριφορά των προωθητήρων, όταν λειτουργούν ταυτόχρονα, δεν είναι προβλέψιμη. Στην περίπτωση που δύο προωθητήρες είναι αναμμένοι μαζί, παρατηρείται πτώση της μέσης τιμής της δύναμης. Συγκεκριμένη στην περίπτωση, που απεικονίζεται, ο προωθητήρας του ζεύγους 1 αποδίδει ώση 0,79N. Όταν δε είναι και τα 3 ζεύγη προωθητήρων ενεργά παρατηρείται μια μόνιμη πτώση του μεγέθους της ώσης μέχρι μηδενική τιμή.

Thrust of Thruster of Couple 1 for 50% Duty Cycle, while Thruster of Couple 3 is Active too



Σχήμα 4.13. Διάγραμμα ώσης προωθητήρα του ζεύγους 1 για 50% duty cycle, ενώ επίσης προωθητήρας του ζεύγους 3 είναι ενεργός.

Thrust of Thruster of Couple 1 for 100% Duty Cycle, while all of the 3 Couples are Active



Σχήμα 4.14. Διάγραμμα ώσης προωθητήρα του ζεύγους 1 για 100% duty cycle, ενώ επίσης τα αλλά δύο ζεύγη προωθητήρων είναι ενεργά.

4.4 Τριβή Τράπεζας Γρανίτη

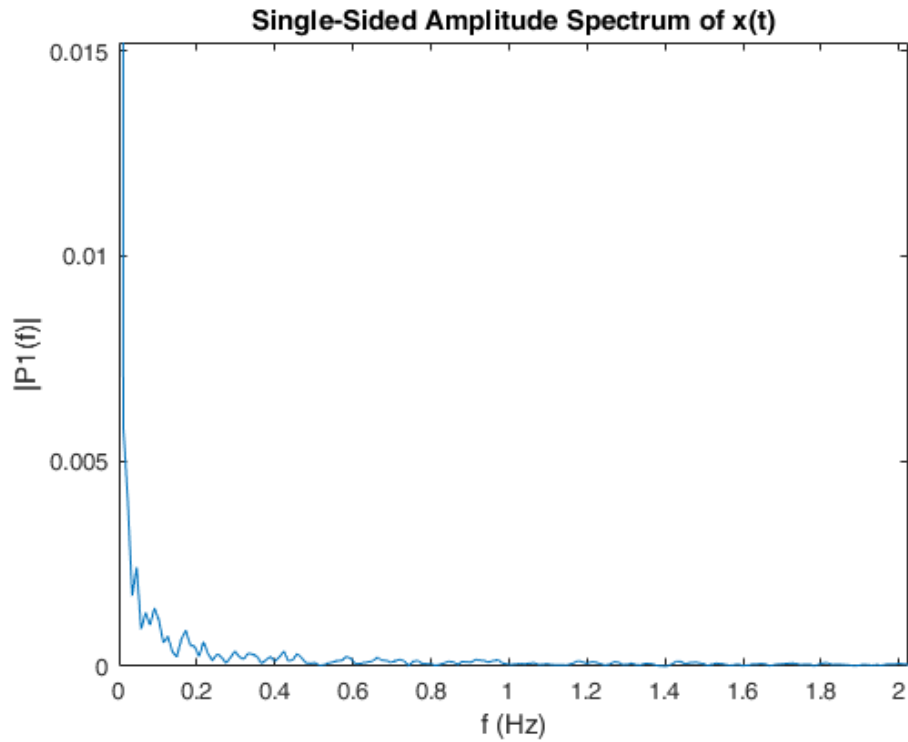
Στο διάστημα η κίνηση ενός σώματος δεν επηρεάζεται από τριβές. Η λογική του εξομοιωτή διαστήματος είναι να προσεγγίζει αυτό το φαινόμενο. Μηδενική τριβή, βέβαια, είναι αδύνατον να επιτευχθεί με τη σημερινή τεχνολογία, όμως στον εξομοιωτή η τριβή τείνει να γίνει μηδενική. Στην παρούσα παράγραφο θα εξεταστεί, ποια περίπου είναι η τιμή του συντελεστή τριβής στην τράπεζα γρανίτη.

Την κίνηση του συστήματος επηρεάζει η τριβή του ιξώδους του αέριου διοξειδίου του άθρακα που εξέρχεται από τα αεροέδρανα. Το αέριο εισέρχεται στο σύστημα από πηγή σταθερής πίεσης και εξέρχεται από τα έδρανα στην πίεση της ατμοσφαιράς. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν παράγοντες που προκαλούν μεταβολές στο συντελεστή τριβής ιξώδους και βασικότεροι είναι πως το αέριο κατά την εκτόνωση του δεν έχει σταθερή θερμοκρασία και πως ενώ με τη σταθερή διαφορά πίεσης η παροχή αερίου στα έδρανα θα μπορούσε να θεωρηθεί σταθερή, ανάλογα με τον αριθμό των προωθητήρων που καταναλώνουν αέριο ανά στιγμή, η πηγή σταθερής πίεσης πιθανά να μην είναι ικανή να τροφοδοτήσει όλες τις εξόδους με την ανάλογη παροχή και συνεπώς, αυτή να έχει μεταβαλλόμενη τιμή στην έξοδο από τα αεροέδρανα. Οι μεταβολές που δέχεται από τη θερμοκρασία ο συντελεστής τριβής ιξώδους δεν είναι υπερβολικές και σε μία λειτουργία του ρομπότ οι προωθητήρες μπορεί

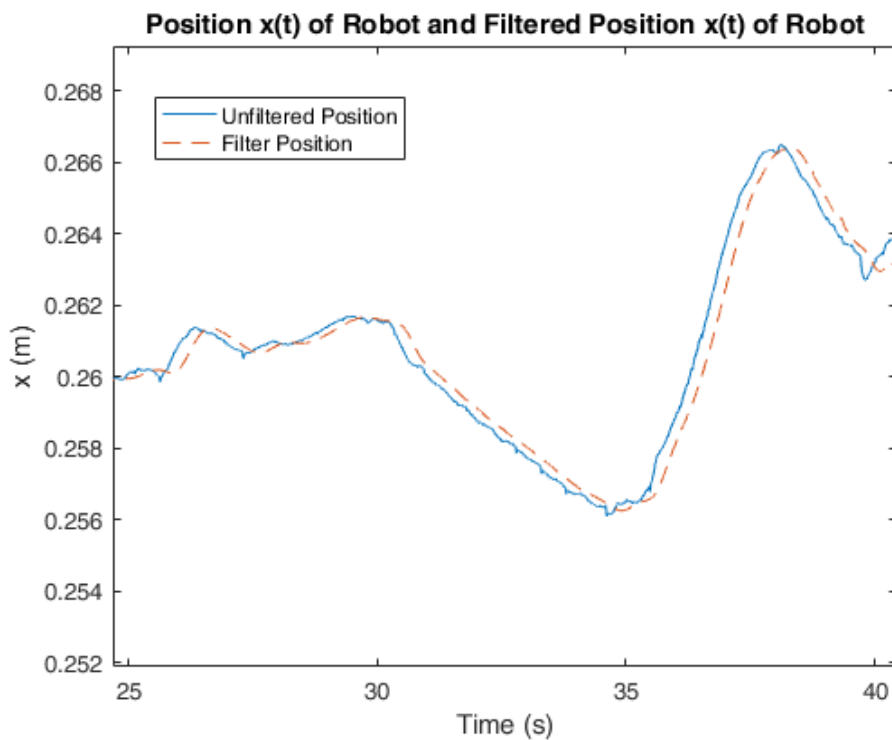
2. Κρατηθήκαν ως δεδομένα η θέση και ο προσανατολισμός του ρομπότ από το σύστημα καμερών και οι δυνάμεις που άσκησαν οι προωθητήρες μέσω των εντολών που δοθήκαν.
3. Υπολογίσθηκε η συνισταμένη των δυνάμεων στον x-άξονα του καρτεσιανού συστήματος, που έχει ορισθεί στις κάμερες, γνωρίζοντας τον προσανατολισμό του ρομπότ καθώς και τη σχετική γωνία που έχουν οι δυνάμεις των προωθητήρων ως προς το ρομπότ, με τη χρήση απλής τριγωνομετρίας.
4. Φιλτραρίστηκε το σήμα της θέσης του ρομπότ ως προς τον άξονα x, επειδή οι κάμερες έχουν κάποιο σφάλμα της τάξης 100μm. Πρώτα, επειδή οι χρόνοι δειγματοληψίας του σήματος δεν ήταν σταθεροί, θεωρήθηκε πως ο χρόνος δειγματοληψίας ήταν 3ms, που ήταν ο μέσος όρος χρόνου δειγματοληψίας ανάμεσα στις μετρήσεις. Αφού χωρίστηκε ο χρόνος, ώστε να έχει σταθερό χρόνο δειγματοληψίας, πάρθηκε ένας μέσος όρος των τιμών της θέσης στην περίπτωση που σε ένα από τα νέα χρονικά διαστήματα, ανήκαν παραπάνω από μία μέτρηση προηγούμενης. Έπειτα με χρήση της εντολής FFT της Matlab απεικονίστηκε το σήμα στο πεδίο της συχνότητας. Έκει φάνηκε η συχνότητα αποκοπής (Σχήμα 4.16), με την εντολή butter ορίσθηκαν οι συντελεστές του φίλτρου και με την εντολή filter το σήμα φιλτραρίστηκε με το βαθυπερατό φίλτρο που ορίστηκε από την εντολή (Σχήμα 4.17).
5. Υπολογίσθηκε η δεύτερη παράγωγος του φιλτραρισμένου σήματος και πολλαπλασιάστηκε με τη μάζα του ρομπότ. Έπειτα αυτές οι μετρήσεις αφαιρέθηκαν από τις μετρήσεις της συνισταμένης δύναμης των προωθητήρων στον x-άξονα και υπολογίσθηκαν οι τιμές της τριβής στην κίνηση αυτή κατά αυτόν τον άξονα (Σχήμα 4.18) (Σχήμα 4.19).
6. Κρατήθηκε μία μέση τιμή για τη δύναμη της τριβής και διαιρέθηκε με τη μάζα του ρομπότ και την επιτάχυνση της βαρύτητας για να βρεθεί ο συντελεστής τριβής της τράπεζας, που είναι ίσος με:

$$\mu_{granite} = 0,0007 \quad (4.10)$$

Στο Σχήμα 4.16 φαίνεται το σήμα της θέσης με μετατροπή Fourier στο πεδίο της συχνότητας. Σε αντίστοιχα διαγράμματα μπορεί να κρίνει κανείς μέχρι ποια συχνότητα υπάρχει πληροφορία. Η συχνότητα αποκοπής πρέπει να επιλεγεί με φειδώ, αφού είναι προτιμότερο να μην έχει αφαιρεθεί όλος ο θόρυβος, από το να αφαιρεθεί πληροφορία. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέγεται συχνότητα αποκοπής 1Hz, αφού μετά το διάγραμμα αρχίζει να ομαλοποιείται αρκετά.

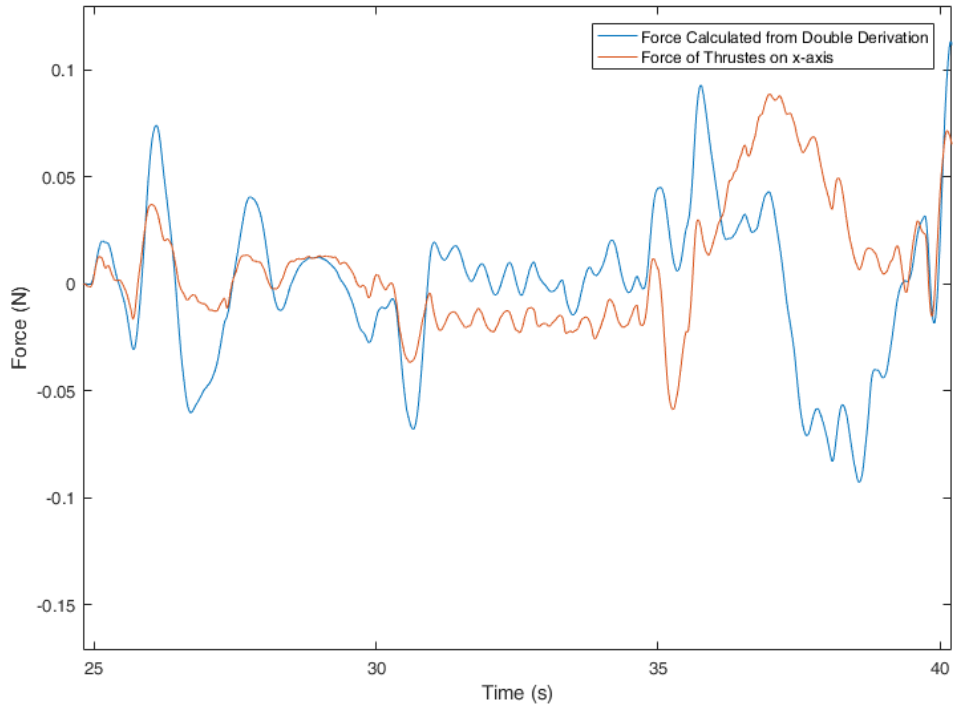


Σχήμα 4.16. Εύρεση συχνότητας αποκοπής του σήματος της θέσης του ρομπότ ως προς τον x -άξονα του καρτεσιανού συστήματος, που έχει ορισθεί στις κάμερες.

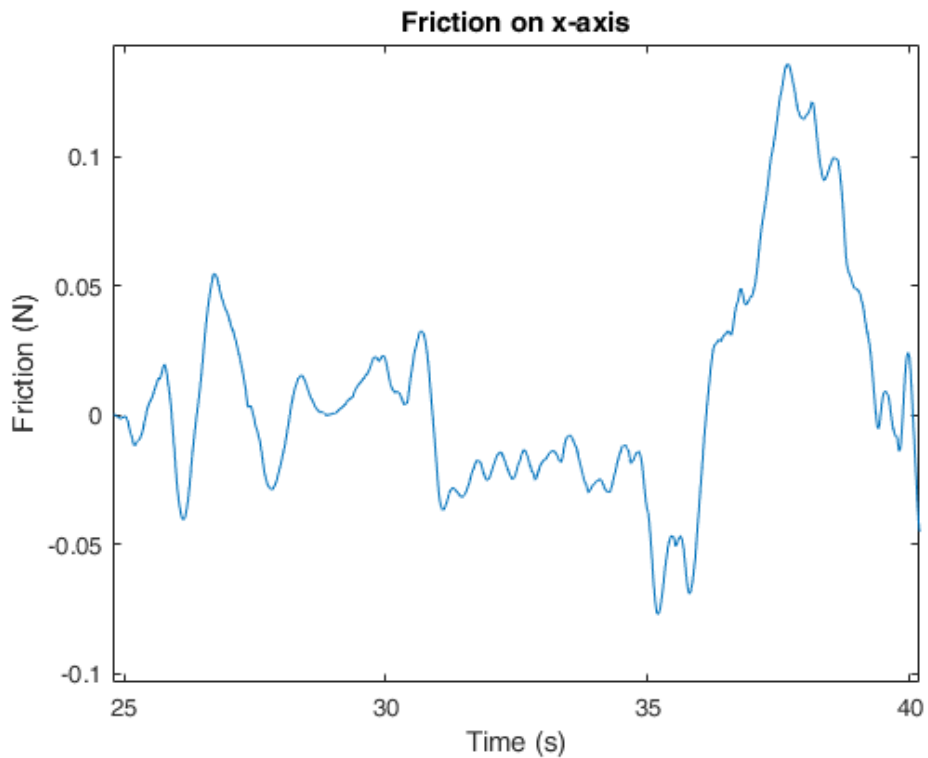


Σχήμα 4.17. Διάγραμμα θέσης ρομπότ στο x -άξονα του καρτεσιανού συστήματος με μπλε γραμμή και φιλτραρισμένο το σήμα της θέσης του ρομπότ στο x -άξονα με διακεκομμένες.

Force of Thrusters on x-axis and Force Calculated from Double Derivation of the Position of the Robot on x-axis



Σχήμα 4.18. Διάγραμμα συνισταμένης δύναμης των προωθητήρων στο x-άξονα με κόκκινο και διάγραμμα δύναμης που υπολογίσθηκε με τη διπλή παράγωγο της θέσης του ρομπότ στο x-άξονα με μπλε.



Σχήμα 4.19. Διάγραμμα δύναμης τριβής που ασκείται στο ρομπότ κατά την κίνηση του στο x-άξονα.

Να σημειωθεί, πως τα παραπάνω υπολογιστήκαν χωρίς τις γνώσεις, που αποκτήθηκαν από την παρούσα εργασία για τις δυνάμεις των προωθητήρων και το πνευματικό σύστημα, και επομένως, μπορεί να ληφθεί ακόμα πιο ακριβής εκτίμηση του μ .

4.5 Συμπεράσματα και Λύσεις για την Επιθυμητή Λειτουργία του Συστήματος

Από τα διαγράμματα των δυνάμεων ώσης των προωθητήρων γίνονται αντιληπτά μερικά μειονεκτήματα στην απόδοση του συστήματος. Πρώτον, οι δυνάμεις στις εξόδους των προωθητήρων έχουν διαφορετικές τιμές, ενώ οι προωθητήρες έχουν τοποθετηθεί συμμετρικά ως προς το γεωμετρικό κέντρο της βάσης του ρομπότ, έτσι ώστε να εφαρμόζεται η ίδια δύναμη από κάθε προωθητήρα και να έχει ίδια επιρροή στο ρομπότ όσον αφορά τη γραμμική του και τη στροφική του κίνηση. Οπώς αναφέρθηκε στις εξίσωσεις (2.40) και (2.42), η αντίσταση της σωλήνωσης επηρεάζεται από την τραχύτητα της σωλήνωσης, τον αριθμό Reynolds του ρευστού ή αερίου που τη διαπερνά, την πυκνότητα του ρευστού ή αερίου, τη διάμετρο της σωλήνωσης και το μήκος αυτής. Στο πνευματικό σύστημα του ρομπότ έχουμε σωληνώσεις που τις διαπερνά αέριο με τα ίδια χαρακτηριστικά, έχουν ίδια τραχύτητα, αφού είναι από το ίδιο υλικό, έχουν ίδια διάμετρο, αλλά έχουν διαφορετικά μήκη. Το ζεύγος προωθητήρων 1 συνδέεται με τις βαλβίδες με σωληνώσεις μήκους 10cm, το ζεύγος 3 με σωληνώσεις μήκους 30cm και το ζεύγος 5 με σωληνώσεις μήκους 50cm. Σύμφωνα με τον τύπο του συντελεστή αντίστασης σωλήνωσης, όσο μεγαλύτερο το μήκος της σωλήνωσης τόσο μεγαλύτερη και η τιμή του συντελεστή. Άρα για ίδιες απώλειες πίεσης σύμφωνα με την εξίσωση 2.41, όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής αντίστασης της σωλήνωσης, τόσο μικρότερη η παροχή αερίου, άρα και η δύναμη ώσης στον προωθητήρα. Οπότε είναι λογική η κατάταξη μεγέθους των δυνάμεων ώσης για κάθε ζεύγος προωθητήρα, σύμφωνα με την αντίστοιχη κατάταξη των μήκων των σωληνώσεων του κάθε προωθητήρα.

Δεύτερο μειονέκτημα είναι πως όταν είναι ενεργοί παραπάνω από ένας προωθητήρες, οι τιμές των ώσεων είναι χαμηλότερες από το αναμενόμενο και, μπορεί μάλιστα να μην έχουν σταθερή τιμή (Σχήμα 4.14). Αν φανταστούμε το πνευματικό σύστημα ως ένα δίκτυο σωληνώσεων, υπάρχει μία πηγή σταθερής πίεσης που τροφοδοτεί 6 εξόδους (3 προωθητήρες, 3 αεροέδρανα) στην πίεση της ατμόσφαιρας. Όλοι οι κλάδοι του συστήματος συνδέονται μόνο με την πηγή τροφοδοσίας, δε χρειάζεται να επιλυθεί κάποιο κύκλωμα αφού για κάθε έξοδο ισχύει η εξίσωση (2.41), όπου η διαφορά πίεσης είναι γνωστή. Το πρόβλημα εντοπίζεται στο ότι μία πηγή σταθερής πίεσης δεν μπορεί να αποδώσει άπειρη παροχή αερίου, οπότε όταν τροφοδοτούνται παραπάνω από 4 έξοδοι η φιάλη φτάνει στα όρια της. Αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να είναι υψίστης σημασίας, αφού δεν επηρεάζεται μόνο η απόδοση των προωθητήρων, αλλά και η απόδοση των αεροεδράνων, τα οποία αν τροφοδοτηθούν με μικρότερη παροχή από την αναμενόμενη, η δύναμη του αερίου που εξέρχεται από αυτά θα είναι μικρότερη και πιθανά να έρθουν σε επαφή με την τράπεζα γρανίτη και να δημιουργήσουν τραχύτητες και στην επιφάνειά τους και στην τράπεζα. Στην

πράξη, όμως, μετά από δοκιμές πειραμάτων, όπου το ρομπότ ακολουθεί μία συγκεκριμένη πορεία πάνω στην τράπεζα, οι προωθητήρες υπάρχει περίπτωση να είναι αναμένοι μαζί στιγμιαία και αυτό να γίνει αντιληπτό αν παρακολουθεί κανείς το ρολόι που μετρά τη χαμηλή πίεση στο ρυθμιστή πίεσης στη φιάλη, το οποίο μπορεί από τα 7bar να μετακινηθεί στιγμιαία στα 6,5bar και μετά ξανά στα 7bar. Στα 6,5bar η λειτουργία των αεροδράνων παραμένει ομαλή, σύμφωνα με το πόσο ανυψωμένο είναι επιθυμητό να είναι το ρομπότ. Παραμένει, όμως, αρνητικό το γεγονός πως οι προωθητήρες μπορεί να έχουν απρόβλεπτη λειτουργία.

Το πρώτο πρόβλημα, που αναφέρθηκε, θα εξουδετερωνόταν, αν οι συντελεστές αντιστάσεων των σωληνώσεων των προωθητήρων είχαν την ίδια τιμή. Το δεύτερο πρόβλημα, που αναφέρθηκε, θα είχε μικρότερη επιρροή στη λειτουργία του ρομπότ, αν οι τιμές των συντελεστών αντιστάσεων των προωθητήρων είχαν μεγαλύτερη τιμή, ώστε η παροχή, με την οποία θα τροφοδοτούσε η πηγή σταθερής πίεσης του προωθητήρες, να είχε μικρότερη τιμή. Αυτό θα καθιστούσε το φαινόμενο να μην μπορεί να αποδώσει η πηγή την απαραίτητη παροχή σε όλες τις εξόδους πιο σπάνιο.

Όσον αφορά τα παραπάνω υπάρχουν τρεις λύσεις, με τις οποίες θα μπορούσε το σύστημα να πετυχαίνει την επιθυμητή λειτουργία, κάνοντας μικρές και εύκολες προσθήκες:

1. Χρήση ίδιου μήκους σωληνώσης για κάθε προωθητήρα.
2. Σμίκρυνση της διαμέτρου των σωληνώσεων που τροφοδοτούν τους προωθητήρες, με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν τον ίδιο συντελεστή αντίστασης.
3. Χρήση βαλβιδών ελέγχου ροής (ρυθμιζόμενων ακροφυσίων) σε κάθε προωθητήρα, ώστε να αποδίδεται η ίδια παροχή σε όλους.

Από τις παραπάνω λύσεις, η πρώτη είναι καλή, αν και θα προστεθούν σωληνώσεις μεγάλου μήκους (το ζεύγος προωθητήρων 5 είναι τοποθετημένο μακριά από τις βαλβίδες), που θα πρέπει να τοποθετηθούν διακριτικά στη βάση του ρομπότ. Η δεύτερη είναι η πιο δύσκολη, γιατί οι σωληνώσεις από την εταιρεία Festo παράγονται σε συγκεκριμένα μεγέθη, καθώς επίσης ήδη οι σωληνώσεις που χρησιμοποιούνται έχουν εσωτερική διάμετρο δύο χιλιοστά, οπότε οι αντίστοιχες πράξεις οδηγούν στην αναζήτηση σωληνώσεων συγκεκριμένης και πολύ μικρής διαμέτρου και αντίστοιχων αντάπτορων για τις βαλβίδες και τους προωθητήρες. Επίσης σε σωληνώσεις μικρής διατομής παρατηρούνται φαινόμενα αδράνειας ρευστού, τα οποία είναι ανεπιθύμητα. Η τρίτη λύση είναι επίσης πολύ καλή, αφού με την προσθήκη ενός ρυθμιζόμενου ακροφυσίου θα μπορούν οι προωθητήρες να έχουν την ίδια απόδοση όσον αφορά την ώση τους, καθώς επίσης θα μπορούν να δοκιμαστούν διάφοροι συνδυασμοί ώσεων ή και διάφορες τιμές για την τιμή της ώσης που θα έχουν και τα τρία ζεύγη προωθητήρων. Μειονέκτημα της σε σχέση με την πρώτη λύση είναι πως είναι ελάχιστα πιο ακριβή.

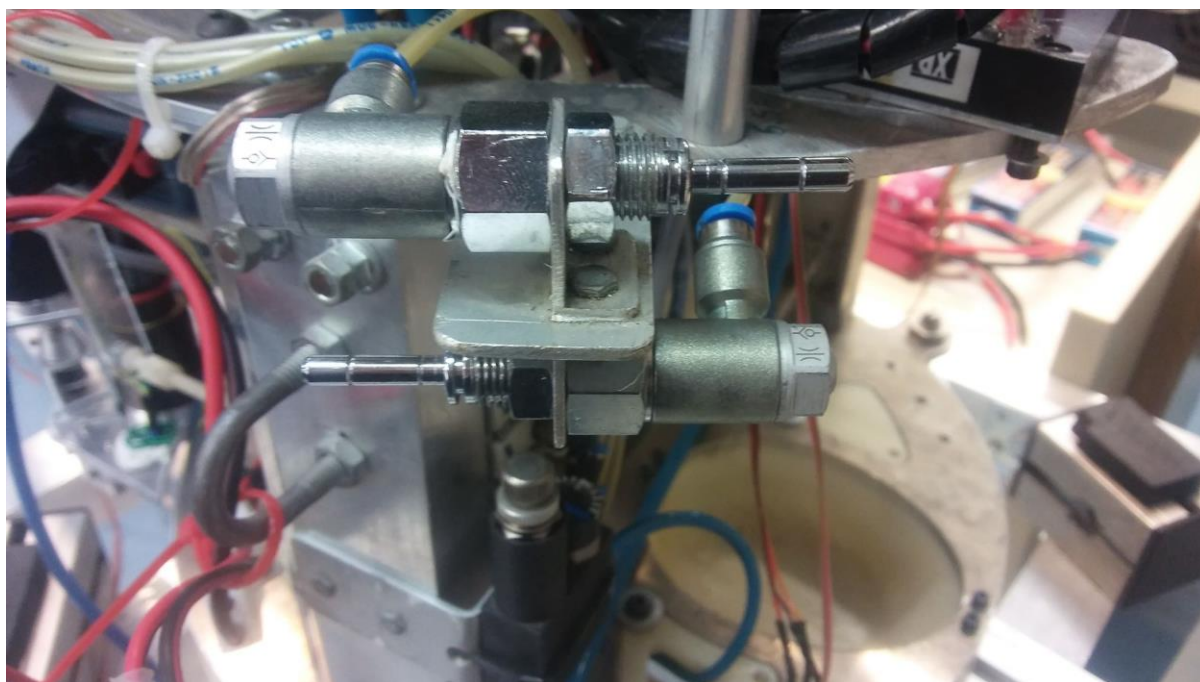
Από τα παραπάνω καταλήγουμε στην τρίτη λύση, διότι προσδίδει στο ρομπότ και μία ευχέρεια να πραγματοποιεί κινήσεις με διαφορετικές ονομαστικές δυνάμεις για κάθε προωθητήρα, καθώς και να μειωθεί παραπάνω, αν παρατηρείται ακόμα το πρόβλημα με την παροχή, που μπορεί να αποδώσει η πηγή σταθερής πίεσης, η ζητούμενη παροχή από κάθε προωθητήρα.

4.6 Υλοποίηση Λύσεως και Έλεγχος Ορθότητας

Από τη στιγμή που επιλέχθηκε ο τρόπος με τον οποίο θα τροποποιηθεί το πνευματικό σύστημα, επόμενο βήμα είναι η επιλογή των εξαρτημάτων. Επειδή οι προωθητήρες, οι βαλβίδες, οι σωληνώσεις και τα βύσματα που συνδέουν αυτά τα εξαρτήματα είναι όλα προϊόντα της εταιρείας Festo, πραγματοποιήθηκε μία έρευνα για το αν υπάρχει κάποιο προϊόν της εταιρείας που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τον επιθυμητό τρόπο, καθώς κατά πάσα πιθανότητα θα μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα στο σύστημα. Από την αναζήτηση βρέθηκε βαλβίδα ελέγχου ροής η οποία μπορεί να ενσωματωθεί άμεσα χωρίς υποστηρικτικά εξαρτήματα ανάμεσα στη σωλήνωση και των προωθητήρα, αν αφαιρεθεί από τον προωθητήρα η γωνία που τον συνδέει με τη σωλήνωση. Δηλαδή η βαλβίδα έχει υποδοχή για σωλήνωση εξωτερικής διαμέτρου 3mm και στην έξοδο της αρσενικό σπείρωμα διαμέτρου (1/8)'. Η βαλβίδα αυτή είναι το προϊόν 'One-way flow control valve GRLZ-1/8-QS-3-D' της Festo (Σχήματα 4.20-4.22) [20].



Σχήμα 4.20. Η βαλβίδα ελέγχου ροής 'One-way flow control valve GRLZ-1/8-QS-3-D' της Festo [21].



Σχήμα 4.21. Οι βαλβίδες ελέγχου ροής όπως τοποθετήθηκαν στο πνευματικό σύστημα του ρομπότ.

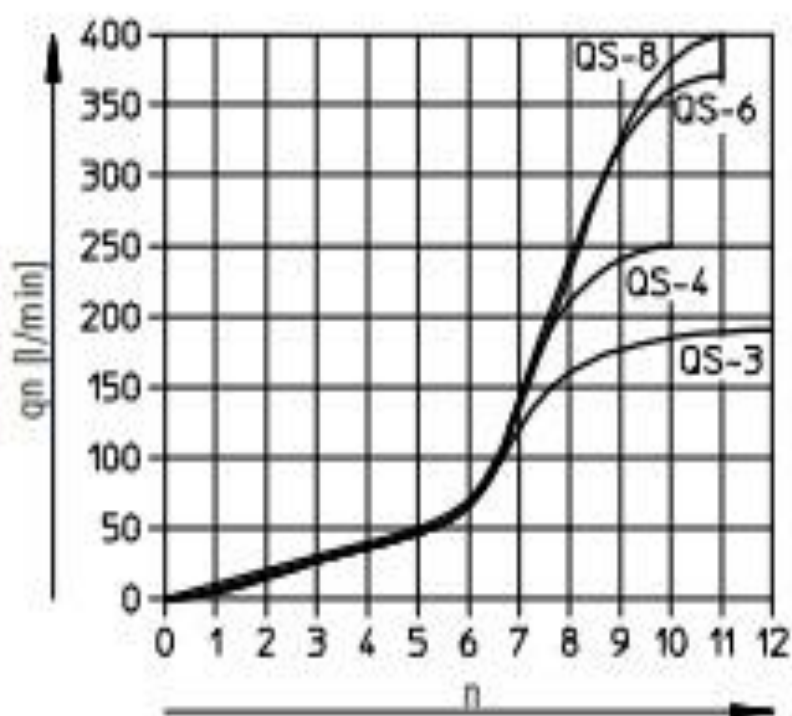


Σχήμα 4.22. Η βίδα ελέγχου ροής της βαλβίδας.

Για το προϊόν που επιλέχθηκε η Festo παρέχει στο Documentation διάγραμμα της παροχής ανάλογα με τις στροφές που έχει η βίδα ρύθμισης της ροής για διαφορά πίεσης 6bar, όπως και στη δική μας εφαρμογή (Σχήμα 4.23).

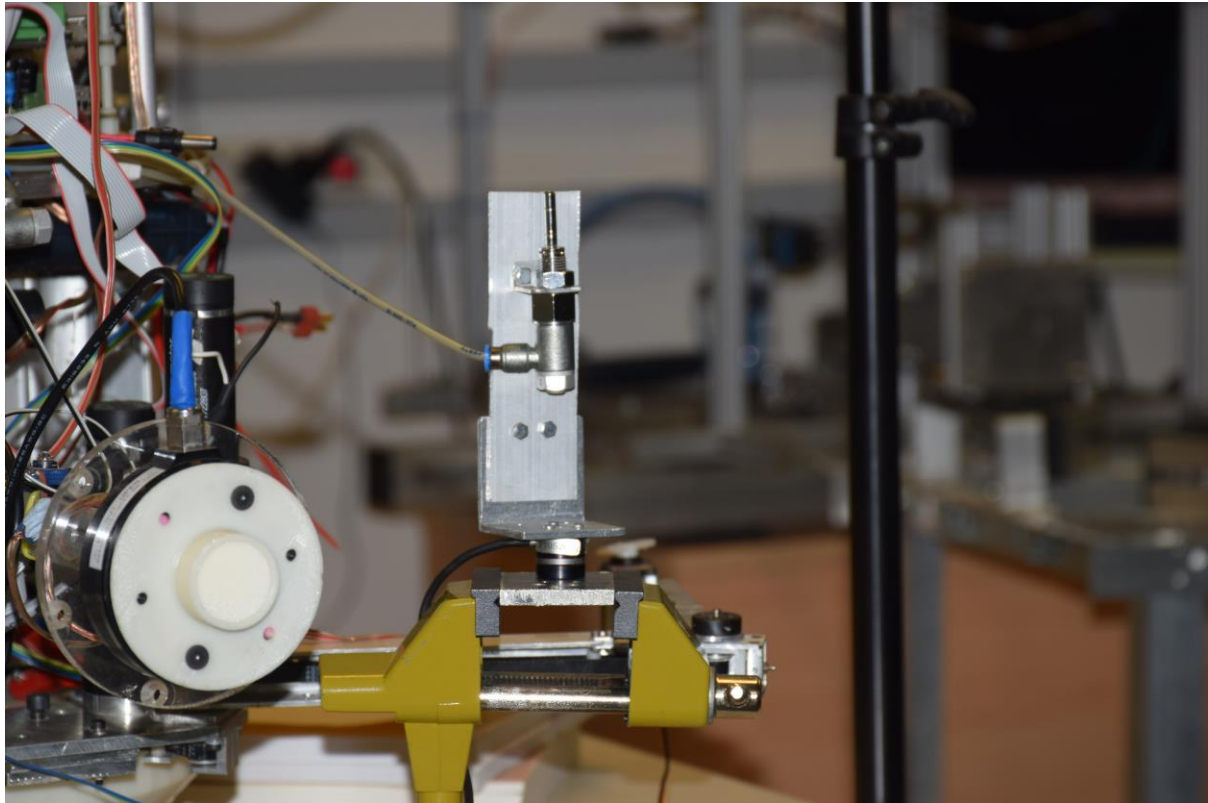
**Standard flow rate q_n at 6 → 0 bar
as a function of turns of the adjusting screw n**

GRLA/GRLZ-1/8

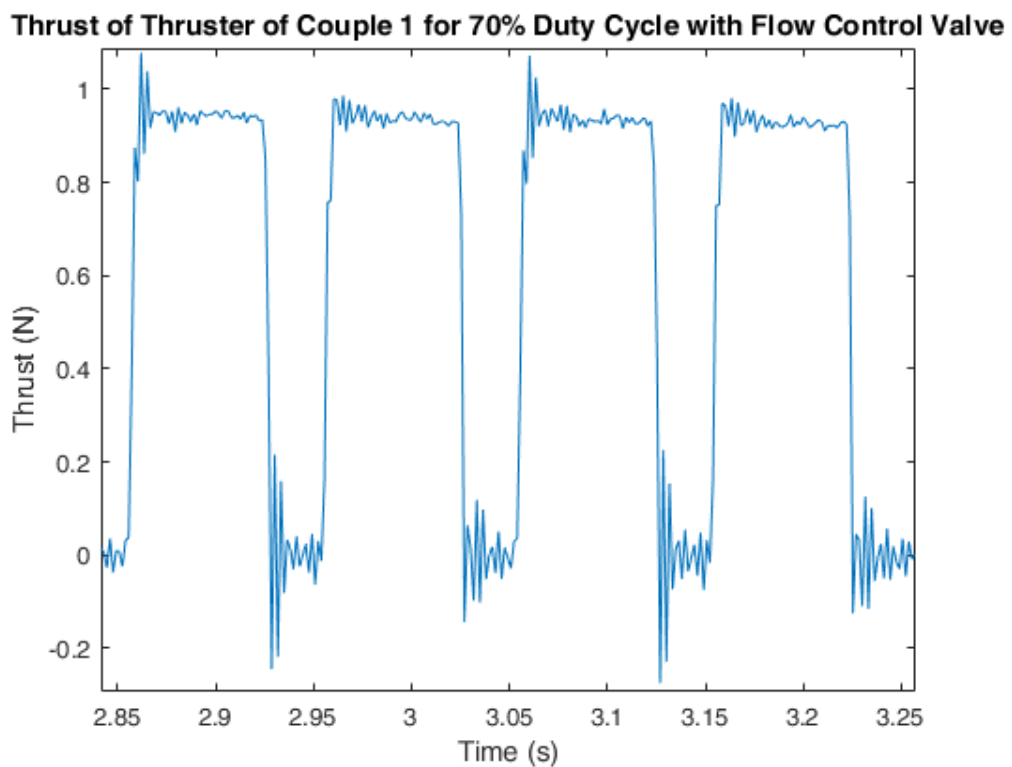


Σχήμα 4.23. Παροχή ως συνάρτηση των στροφών της βίδας ρύθμισης της ροής (QS-3) [22].

Γνωρίζοντας πως η παροχή έχει γραμμική αναλογία με την ώση, αρκεί να γνωρίζουμε αν η μέγιστη δύναμη ώσης παραμένει ίδια με πριν ανεξάρτητα από την προσθήκη του εξαρτήματος, όταν οι στροφές των βιδών έχουν τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή ώστε να υπολογισθούν οι τιμές της δύναμης ώσης ανάλογα με τις στροφές της βίδας ρύθμισης ροής. Με τον ίδιο τρόπο που ληφθήκαν μετρήσεις δύναμης ώσης για τους προωθητήρες πριν την προσθήκη του εξαρτήματος, θα ληφθούν και σε αυτήν την παράγραφο, με τη χρήση όμως μιας επέκτασης, για να προσδένεται ο προωθητήρας πιο ψηλά ώστε να χωράει (Σχήμα 4.24).



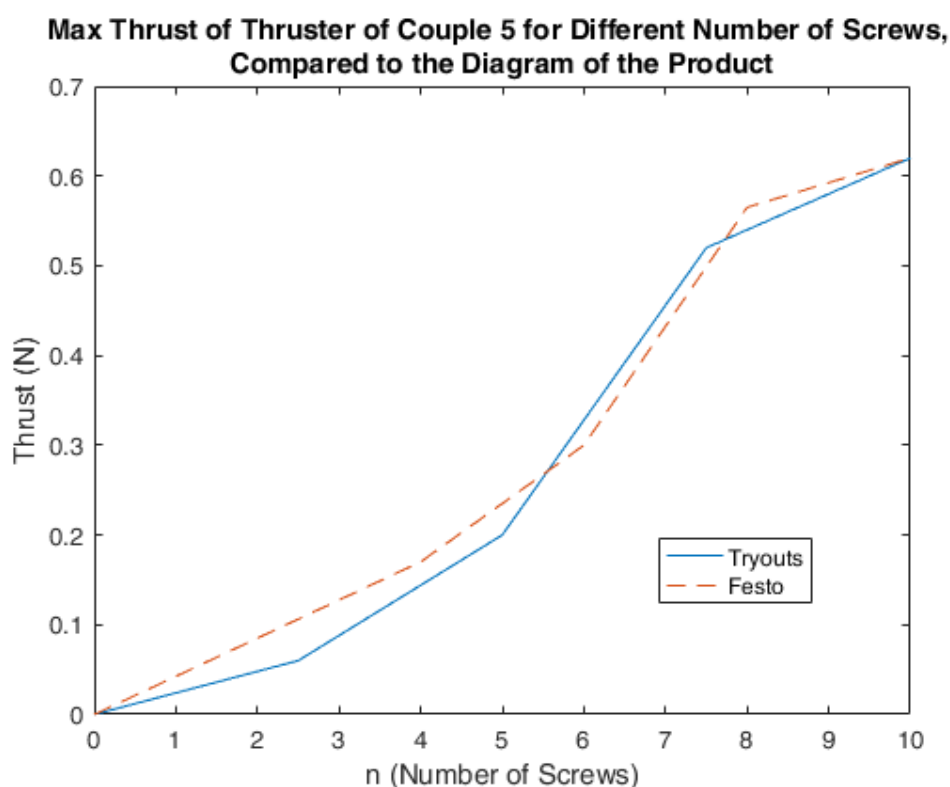
Σχήμα 4.24. Έγκατασταση για τη διεξαγωγή πειραμάτων μετρήσεων των δυνάμεων ώσης των προωθητήρων με την επέκταση για το νέο σύστημα προωθητήρων.



Σχήμα 4.25. Διάγραμμα ώσης προωθητήρα του ζεύγους 1 για 70% duty cycle με την προσθήκη της βαλβίδας ελέγχου ροής, όταν αυτή είναι τελείως ανοιχτή.

Στο Σχήμα 4.25 φαίνεται πως η απόδοση του προωθητήρα δεν έχει δεχθεί αλλαγές με την προσθήκη της βαλβίδας, ούτε έχουν επηρεαστεί οι αποκρίσεις του συστήματος. Αυτό επαληθεύθηκε και από άλλες μετρήσεις που ληφθήκαν για τη δημιουργία επόμενου διαγράμματος.

Γνωρίζοντας τη μέγιστη δυνατή ώση για κάθε προωθητήρα μπορούμε αντικαταστήσουμε την τιμή της μέγιστης δυνατής παροχής που περνά από τη βαλβίδα στο Σχήμα 4.23 με την τιμή της μέγιστης ώσης για κάποιον προωθητήρα, λόγω αναλογίας και οι υπόλοιπες τιμές της καμπύλης του Σχήματος 4.23 να αντικατασταθούν από τις ανάλογες τιμές ώσης που προκύπτουν από την ισότητα των κλασμάτων της παροχής σε κάποιο σημείο στο διάγραμμα προς τη μέγιστη δυνατή παροχή και της τιμής ώσης που ψάχνουμε προς τη μέγιστη δυνατή τιμή ώσης του προωθητήρα. Έπειτα η καμπύλη που προκύπτει συγκρίνεται με πειραματικά αποτελέσματα, δηλαδή με δοκιμές μέτρησις της ώσης για 100% duty cycle για διαφορετικές στροφές της βίδας ελέγχου ροής, ώστε να επαληθευθεί η καμπύλη που θεωρείται δεδομένη από τον κατασκευαστή.



Σχήμα 4.26. Διάγραμμα δύναμης για προωθητήρα του ζεύγους 5 για διαφορετικές στροφές της βίδας στη βαλβίδα ελέγχου ροής σε σύγκριση με τις τιμές που προκύπτουν από το διάγραμμα της Festo.

Στο Σχήμα 4.26 φαίνεται πως προσεγγίζεται η καμπύλη, που παρέχει η Festo, από τις μετρήσεις δυνάμεων. Το πείραμα επαναλήφθηκε και για προωθητήρα του ζεύγους 3 και το αποτέλεσμα ήταν παρόμοιο. Οπότε αρκεί να προσεγγιστεί η καμπύλη στο διάγραμμα της Festo με κάποιο πολυώνυμο, ώστε να προκύπτουν οι στροφές τις βίδας για κάθε

προωθητήρα. Από την καμπύλη αυτή θα προκύπτει η παροχή, η οποία μπορεί να μετατρέπεται σε δύναμη προωθητήρα με τον τρόπο, που έχει περιγραφεί. Η εξίσωση υπολογισμού της παροχής με μέγιστη τιμή $190m^3/s$, συναρτήσει του αριθμού στροφών n των βιδών των βαλβίδων είναι:

$$Q_n(n) = -0,1549n^4 + 2,8223n^3 - 14,106n^2 + 32,888n - 0,5754 \quad (4.11)$$

Έχοντας τις απαραίτητες πληροφορίες, μπορεί πλέον να επιλεγεί η τιμή της δύναμης ώσης, που θα έχουν όλοι οι προωθητήρες. Η μικρότερη τιμή δύναμης ώσης, που είχε κάποιος προωθητήρας πριν την προσθήκη των βαλβίδων, ήταν αυτή του ζεύγους 5, που είναι ίση με $0,62N$. Επίσης γνωρίζοντας την τιμή του συντελεστή τριβής της τράπεζας γρανίτη και της μάζας του ρομπότ, γνωρίζουμε κάτω από ποια τιμή δεν είναι επιθυμητό να πέσουν οι μέγιστες δυνάμεις ώσης των προωθητήρων. Οπότε προκύπτει η εξής ανισότητα:

$$0,091N < F_{thrusters} \leq 0,62N \quad (4.12)$$

Από την παραπάνω ανισότητα επιλέγεται μια σχετικά υψηλή τιμή, έτσι ώστε να παραμένει ως χαρακτηριστικό του συστήματος να αποδίδει μεταβαλλόμενη δύναμη ώσης σε ένα ικανοποιητικό εύρος τιμών χάρη στην λειτουργία των ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων με PWM. Έτσι επιλέγεται η τιμή $0,6N$. Με όσα περιγραφθήκαν προκύπτει:

$$Q_{n1} = 190(0,6/0,88) = 130l/min \quad (4.13)$$

$$Q_{n3} = 190(0,6/0,75) = 152l/min \quad (4.14)$$

$$Q_{n5} = 190(0,6/0,62) = 184l/min \quad (4.15)$$

Και συνεπώς προκύπτουν, αν βάλουμε τις παροχές των σχέσεων (4.13)-(4.15) στη (4.11) και επιλύσουμε με επαναληπτική διαδικασία, οι επιθυμητές στροφές των βιδών:

$$n_1 = 6,9 \text{ στροφές} \quad (4.16)$$

$$n_3 = 7,5 \text{ στροφές} \quad (4.17)$$

$$n_5 = 8,5 \text{ στροφές} \quad (4.18)$$

Όπου $n=0$, όταν η βίδα είναι τελείως βιδωμένη.

5 Χώρος Εργασίας του Ρομπότ

5.1 Εύρεση Χώρου Εργασίας για Αποφυγή Ιδιομορφιών του Ρομπότ σύμφωνα με τη Θεωρία

Σύμφωνα με την Παράγραφο 2.1, χρειαζόμαστε κάποια γεωμετρικά και δυναμικά χαρακτηριστικά της βάσης του ρομπότ και κάθε μέλους του βραχίονα, για να εφαρμοστεί η μέθοδος αντίστροφης κινηματικής αιρωόμενου ρομπότ σε διδιάστατο χώρο στο ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή. Η παρακάτω μέθοδος εφαρμόζεται για το αριστερό χέρι του ρομπότ. Τα απαραίτητα δεδομένα ληφθήκαν από αρχείο assembly του ρομπότ στο SolidWorks και είναι τα παρακάτω:

Πίνακας 5.1. Μάζες, αδράνεις, και απαραίτητες αποστάσεις για την εύρεση βαρυκεντρικών διανυσμάτων, της βάσης και των μελών του βραχίονα του ρομπότ.

	Βάση (i=0)	1 ^ο μέλος βραχίονα (i=1)	2 ^ο μέλος βραχίονα (i=2)	3 ^ο μέλος βραχίονα (i=3)
Μάζα m_i (kg)	9,8	0,06	0,106	0,08
Αδράνεια I_i (kgm ²)	0,1196	0,0002	0,00027	0,000037
r_i (m)	0,1746	0,0817	0,04386	0,014
l_i (m)	-	0,0948	0,1054	0,0439

Οπότε σύμφωνα με τις σχέσεις υπολογισμού βαρυκεντρικών διανυσμάτων 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 και 2.5 προκύπτουν τα εξής μέτρα βαρυκεντρικών διανυσμάτων:

$$a = 0,1704m \quad (5.1)$$

$$b = 0,1727m \quad (5.2)$$

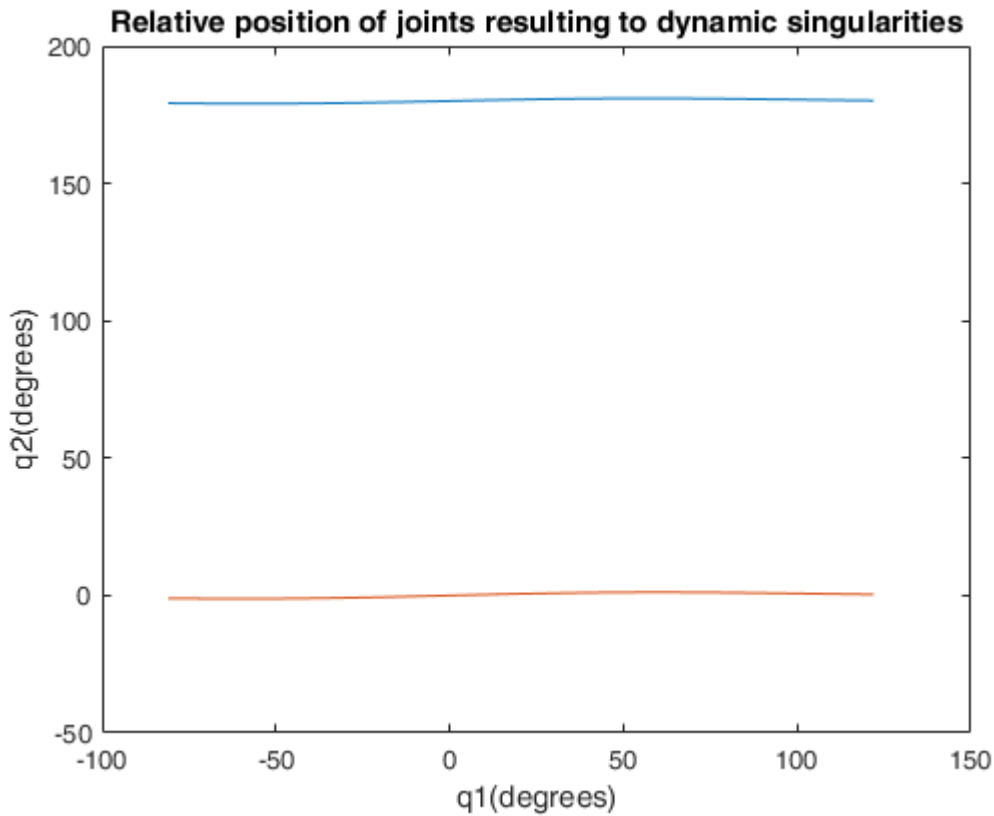
$$c = 0,1469m \quad (5.3)$$

$$d = 0,0575m \quad (5.4)$$

Γνωρίζουμε τους περιορισμούς σχετικών γωνιών για κάθε άρθρωση ως προς την προηγούμενη (εξισώσεις 3.2, 3.15), και της σχετική γωνία του πρώτου μέλους ως προς την ευθεία που ενώνει την πρώτη άρθρωση με το κέντρο μάζας της βάσης:

$$-102^\circ \leq q_1 \leq 100^\circ \quad (5.5)$$

Από τους τύπους υπολογισμού των σχετικών γωνιών της δεύτερης άρθρωσης συναρτήσει της σχετικής γωνίας της πρώτης άρθρωσης, για τις οποίες εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες (2.35), (2.36), προκύπτουν οι παρακάτω δύο καμπύλες:



Σχήμα 5.1. Καμπύλες που εξισώνουν τις σχετικές γωνίες των δύο πρώτων αρθρώσεων, για τις οποίες εμφανίζονται ιδιομορφίες.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα με χρήση της εξίσωσης (2.37) προκύπτουν τα παρακάτω ζεύγη ακτίνων-αποστάσεων από το κέντρο μάζας της βάσης που ορίζουν τους δύο χώρους του σχήματος 2.3(β) όπου είναι πιθανό να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες:

$$R_{1\min} = 0,1446m \quad (5.6)$$

$$R_{1\max} = 0,49m \quad (5.7)$$

$$R_{2\min} = 0,1492m \quad (5.8)$$

$$R_{2\max} = 0,1962m \quad (5.9)$$

Από την παραπάνω διαδικασία, λοιπόν, προέκυψε πως ο ένας χώρος, που μπορεί να προκληθούν ιδιομορφίες, υπερκαλύπτει τον άλλον με αποτέλεσμα να μην προκύπτει κάποιος χώρος στον οποίο θα ήταν αδύνατη η εμφάνιση δυναμικών ιδιομορφιών.

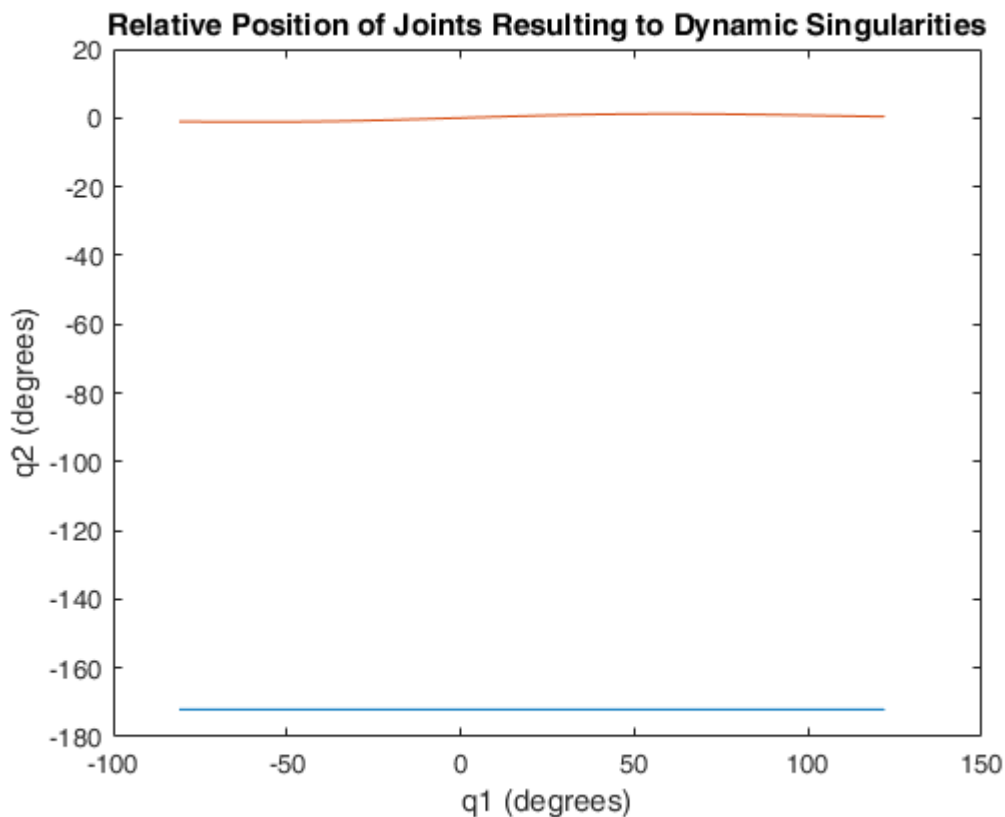
5.2 Συμπεράσματα

Τα παραπάνω αποτελέσματα, προφανώς δεν είναι ικανοποιητικά, αφού αναιρούν την ιδιότητα του ρομπότ να εκτελεί κινήσεις με το χέρι πάνω στην τράπεζα γρανίτη για να αρπάξει κάποιο σώμα. Βέβαια, υπάρχουν δύο λόγοι, ώστε να μη σταματήσει η διαδικασία εδώ και να μη θεωρηθούν οι παραπάνω μετρήσεις δεδομένες.

Πρώτον, στην όλη διαδικασία δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι περιορισμοί των σχετικών γωνιών των δύο πρώτων αρθρώσεων. Αν στις καμπύλες που δίνουν τα ζεύγη σχετικών γωνιών, για τις οποίες είναι πιθανόν να προκληθούν ιδιομορφίες, αποκλειστούν οι τιμές, που βγαίνουν εκτός περιορισμών τα αποτελέσματα σίγουρα θα αλλάξουν. Ο περιορισμός για τη σχετική γωνία της δεύτερης άρθρωσης δίνεται από τη σχέση 3.2, ενώ για την πρώτη άρθρωση πρέπει να ορισθούν οι περιορισμοί για τη σχετική γωνία μεταξύ του μέλους και της ευθείας που ενώνει το κέντρο μάζας της βάσης με την πρώτη άρθρωση:

$$-81^\circ \leq q_1 \leq 78^\circ \quad (5.10)$$

Από τα παραπάνω προκύπτουν οι εξής καμπύλες για τις οποίες εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες:



Σχήμα 5.2. Καμπύλες που εξισώνουν τις σχετικές γωνίες των δύο πρώτων αρθρώσεων, για τις οποίες εμφανίζονται ιδιομορφίες, με την εφαρμογή μηχανικών περιορισμών.

Και από τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτουν οι εξής ακτίνες-αποστάσεις, που ορίζουν τους χώρους, στους οποίους είναι πιθανόν να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες:

$$R_{1\min} = 0,1584m \quad (5.11)$$

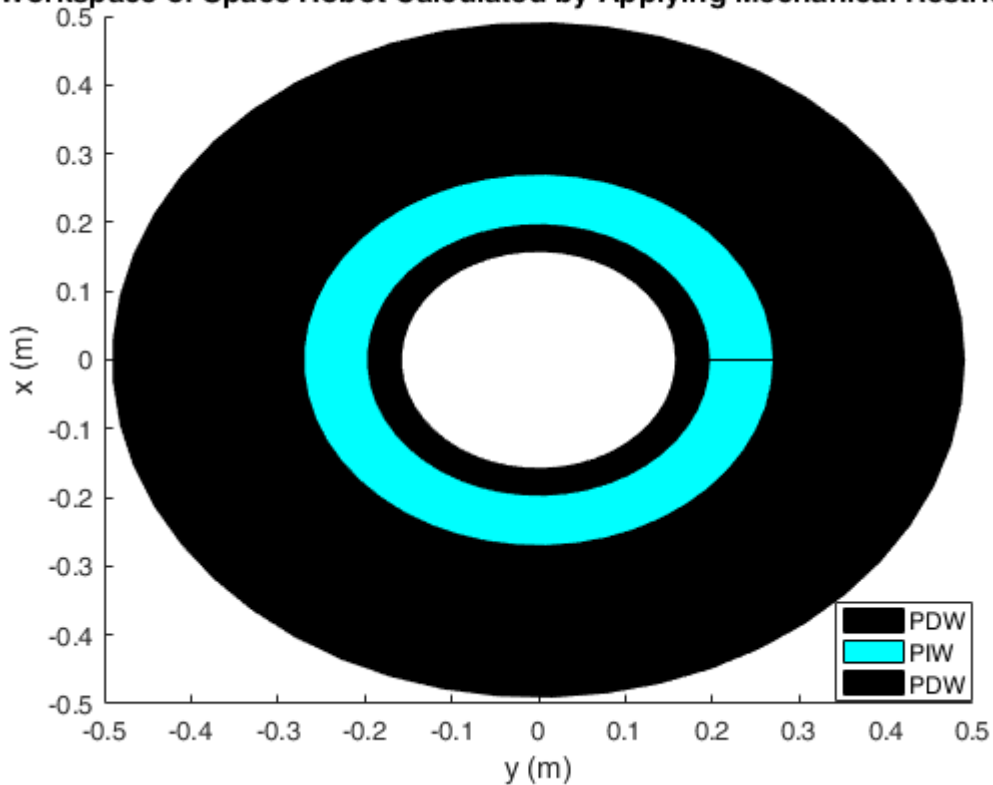
$$R_{1\max} = 0,1962m \quad (5.12)$$

$$R_{2\min} = 0,2708m \quad (5.13)$$

$$R_{2\max} = 0,4899m \quad (5.14)$$

Και από τα παραπάνω μπορεί να απεικονιστεί ο χώρος εργασίας βάσει των μηχανικών περιορισμών των αρθρώσεων:

Workspace of Space Robot Calculated by Applying Mechanical Restrictions



Σχήμα 5.3. Χώρος εργασίας του ρομπότ που προκύπτει, αν ληφθούν υπόψη οι μηχανικοί περιορισμοί των αρθρώσεων (με γαλάζιο ο χώρος εργασίας, στον οποίο δεν είναι πιθανό να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες, με μαύρο οι χώροι που είναι πιθανό ή που πιθανά να μη φτάνει το ρομπότ λόγω μηχανικών περιορισμών στην περίπτωση του εσωτερικού μαύρου δακτύλιου).

Με την παραπάνω προσθήκη σίγουρα βελτιώνεται η κατάσταση, αλλά ο χώρος εργασίας στον οποίο δεν εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες είναι πολύ μικρός, ώστε να

θεωρηθεί πως υπάρχει ελευθερία κίνησης. Αν κρίνουμε από τα Σχήματα 5.1 και 5.2, οι τιμές της σχετικής γωνίας της δεύτερης άρθρωσης, για τις οποίες εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες, έχουν μικρό εύρος. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται σε ένα εύρος $\pm 1,2^\circ$ γύρω από τις 0° και τις 180° . Πρακτικά, αν εφαρμοζόταν ένας παραπάνω περιορισμός πέρα από τους μηχανικούς για τη σχετική γωνία της δεύτερης άρθρωσης, ώστε να αποφευχθούν οι δυναμικές ιδιομορφίες γύρω από τη μηδενική σχετική γωνία (η άλλη περιοχή γωνιών αποκλείεται λόγω μηχανικών περιορισμών), θα δινόταν στο βραχίονα μία γκάμα κινήσεων, η οποία δεν απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, τα αποτελέσματα των Σχημάτων 5.1 και 5.2 είναι αναμενόμενα. Η βάση του ρομπότ είναι πολύ πιο βαρειά και έχει πολύ μεγαλύτερη αδράνεια από τα μέλη του βραχίονα. Όσο πιο βαρειά είναι η βάση σε σχέση με τα μέλη του βραχίονα τόσο το κέντρο μάζας του συστήματος τείνει να ταυτίζεται με αυτό της βάσης και ουσιαστικά η κινηματική τείνει να προσεγγίζει την αντίστοιχη κινηματική ενός βραχίονα με σταθερή βάση. Για παράδειγμα, ένας πλανήτης στον οποίο θα προσδένονταν ρομποτικοί βραχίονες, με δυναμικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά ανθρώπινων μελών, δε θα επηρεαζόταν σχεδόν καθόλου από την κίνηση των βραχιόνων του (ίσως μετά από κάποιο τεράστιο χρονικό διάστημα να μπορούσε να παρατηρηθεί κάποια μικρή απόκλιση στην κίνηση του γιγαντιαίου σώματος).

Τα Σχήματα 5.1 και 5.2, όπως ξανααναφέρθηκε, επιβεβαιώνουν ότι το ρομπότ μπορεί σίγουρα να λειτουργήσει με τον επιθυμητό τρόπο υπό τις συνθήκες, που είναι κατασκευασμένο να λειτουργεί. Το παραπάνω συμπέρασμα δεν αντικατοπτρίζεται όμως στους απεικονισμένους χώρους εργασίας. Η μέθοδος, που έχει αναλυθεί εγγυάται την απουσία δυναμικών ιδιομορφιών για πάντα. Το ρομπότ, όμως, προορίζεται για να κάνει εργασίες ορισμένου χρόνου (αλλαγή μπαταρίας, τροφοδοσία καυσίμου, αρπαγή αντικειμένου) και όχι άπειρου. Η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογίζει, ακόμα και αν ο στόχος είναι σε ιδανική θέση απέναντι από το ρομπότ (manipulability σχετική γωνία δεύτερης άρθρωσης 45°), αν ο βραχίονας κινείται συνεχώς, μετά από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα το ρομπότ πιθανά να έχει γυρίσει κατά 180° για παράδειγμα και θα βρίσκεται σε τέτοιο σημείο που θα μπορεί να αρπάξει το στόχο μόνο με συνδυασμό σχετικών γωνιών, για τις οποίες είναι πιθανόν να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες. Οπότε η θέση του αντικειμένου, που κρίνεται ιδανική στην αρχή της διαδικασίας της αρπαγής, με αυτή τη μεθοδολογία κρίνεται μη θεμιτή και αποκλείεται.

5.3 Εύρεση Χώρου Εργασίας για Αποφυγή Ιδιομορφιών για Περιορισμένες Κινήσεις των Αρθρώσεων του Ρομπότ

Για να ενταχθεί η έννοια του χρόνου στη μεθοδολογία που έχει αναλυθεί, πρέπει να εφαρμοστεί κάποιος περιορισμός, στον οποίο να εμπεριέχεται η έννοια του χρόνου. Όπως αναφέρθηκε, η παραπάνω μεθοδολογία υπολογίζει πιθανές θέσεις και προσανατολισμούς για το ρομπότ και το στόχο για άπειρες κινήσεις των αρθρώσεων. Αν οι κινήσεις αυτές περιοριστούν σε έναν λογικό αριθμό, είναι δυνατόν να βρεθεί η μέγιστη και ελάχιστη δυνατή

γωνία μετατόπισης της βάσης του ρομπότ μέσω αυτών και να απεικονιστεί πλέον ο χώρος εργασίας ως ένα τόξο γωνίας ίσης με τη διαφορά της μέγιστης και της ελάχιστης πιθανής μετατόπισης της γωνίας της βάσης του ρομπότ. Έτσι, το φαινόμενο απόρριψης θέσεων στόχου, ο οποίος άμεσα μπορεί να αρπαχθεί χωρίς η σχετική γωνία της δεύτερης άρθρωσης του ρομπότ να είναι κόντα στις 180° , εξαλείφεται. Βέβαια, όπως θα αναλυθεί, μειονέκτημα της μεθόδου, που θα περιγραφεί, είναι ότι για την εφαρμογή της χρειάζεται να είναι γνωστές ως δεδομένα η θέση του στόχου ως προς το σύστημα συντεταγμένων και η αρχική γωνία της βάσης του ρομπότ. Σε εφαρμογές αυτής της μεθόδου στα ρομπότ του εργαστηρίου τα παραπάνω δε θεωρούνται πρόβλημα, αφού οι κάμερες διαβάζουν συνεχώς της θέση και τον προσανατολισμό των ρομπότ ως προς το σύστημα συντεταγμένων, που έχει οριστεί σε αυτές.

Αρχικά από τις σχέσεις 5.10, 3.2, 3.15, γίνονται γνωστές η μέγιστες και η ελάχιστες δυνατές σχετικές γωνίες των βαρυκεντρικών διανυσμάτων ως προς το προηγούμενο βαρυκεντρικό διάνυσμα από αυτά. Επίσης γίνονται γνωστές οι μέγιστες μετατοπίσεις για κάθε άρθρωση αν αφαιρεθεί από τη μέγιστη δυνατή σχετική γωνία για κάθε άρθρωση η ελάχιστη σχετική γωνία.

$$\Delta q_{1\max} = 203^\circ \quad (5.15)$$

$$\Delta q_{2\max} = 267^\circ \quad (5.16)$$

$$\Delta q_{3\max} = 120^\circ \quad (5.17)$$

Αν το σύστημα έχει μηδενική στροφορμή πριν την κίνηση των αρθρώσεων στη σχέση 2.27, ο όρος h_{CM} μηδενίζεται. Αυτή η εξίσωση αφορά τις γωνιακές ταχύτητες των αρθρώσεων, οπότε εμπεριέχεται η έννοια του χρόνου σε αυτή. Αν σε αυτήν την περίπτωση, οι δύο όροι της εξίσωσης πολλαπλασιασθούν με τον όρο dt , η εξίσωση παίρνει αυτή τη μορφή:

$$({}^0D_0 + {}^0D_1 + {}^0D_2 + {}^0D_3)d\theta_0 = -({}^0D_1 + {}^0D_2 + {}^0D_3)dq_1 - ({}^0D_2 + {}^0D_3)dq_2 - ({}^0D_3)dq_3 \quad (5.18)$$

Από την παραπάνω σχέση υπολογίζονται δύο τιμές για την μεταβολή της γωνίας της βάσης του ρομπότ. Μία αν στους τύπους υπολογισμούς των ${}^0D_0, {}^0D_1, {}^0D_2, {}^0D_3$ ((2.23)-(2.26)), χρησιμοποιηθούν για τις σχετικές γωνίες των αρθρώσεων οι ελάχιστες δυνατές σχετικές γωνίες των σχέσεων (5.10), (3.2), (3.15) και στις μεταβλητές dq_1, dq_2, dq_3 χρησιμοποιηθούν οι αρνητικές τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων για κάθε σχετική γωνία ((5.15), (5.16), (5.17)). Η άλλη τιμή που υπολογίζεται αντίστοιχα, είναι αυτή που προκύπτει αν στην παραπάνω αλληλουχία πράξεων χρησιμοποιηθούν οι μέγιστες σχετικές γωνίες αρθρώσεων στις σχέσεις (2.23)-(2.26) και οι θετικές τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων κάθε σχετικής γωνίας στη σχέση (5.18). Η πρώτη τιμή που υπολογίζεται υπολογίζει την μέγιστη μεταβολή γωνίας κατά την ανθρωπολογική φορά της βάσης για μία κίνηση σε κάθε

άρθρωση, αφού χρησιμοποιούνται οι μέγιστες μεταβολές κατά την ωρολογιακή φορά των σχετικών γωνιών των αρθρώσεων και αντίστοιχα η δεύτερη τιμή υπολογίζει τη μέγιστη μεταβολή κατά την ωρολογιακή φορά της βάσης για μία κίνηση σε κάθε άρθρωση. Επειδή η μία τιμή μεταβολής της γωνίας της βάσης προκύπτει αρνητική και η άλλη θετική, θεωρείται ελάχιστη δυνατή γωνιακή μετατόπιση της βάσης η αρνητική τιμή και μέγιστη δυνατή η θετική τιμή. Όπως αναφέρθηκε για τα παραπάνω η μεταβολή της γωνίας της βάσης υπολογίζεται υπό τον περιορισμό πώς κάθε άρθρωση θα κινηθεί από μία φορά σε κάθε κατεύθυνση. Βέβαια, τα παραπάνω αφορούν την εφαρμογή στο ρομπότ διαστημικού εξομοιωτή, του οποίου οι αρθρώσεις κινούνται ταυτόχρονα για να φτάσουν στις επιθυμητές γωνίες. Στα πλαίσια της εργασίας δε μελετήθηκε αν προκύπτουν μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση που δύο από τις αρθρώσεις παραμένουν ακίνητες για τη μεταβολή της γωνίας της βάσης.

$$\Delta\theta_{0\min} = -2,98^\circ \quad (5.19)$$

$$\Delta\theta_{0\max} = 0,96^\circ \quad (5.20)$$

Οπότε για να ευρεθεί ο χώρος εργασίας με την επιρροή του παραπάνω περιορισμού θεωρείται πως η γωνία της βάσης κινείται σε ένα εύρος $3,94^\circ$ για μία κίνηση σε κάθε άρθρωση σε κάθε κατεύθυνση.

Για την εύρεση του χώρου εργασίας, ο περιορισμός που τέθηκε θα αλλάξει, για να είναι πιο διακριτά τα αποτελέσματα στην εύρεση του χώρου εργασίας. Θα επιτραπούν σε κάθε άρθρωση από δύο κινήσεις σε κάθε κατεύθυνση, άρα οι μέγιστες και ελάχιστες μετατοπίσεις της γωνίας της βάσης θα διπλασιαστούν καθώς θα διπλασιαστεί και το εύρος μετατόπισης της γωνίας της. Από τη σχέση (2.8) μπορεί να ορισθεί με βάση τα παραπάνω η παρακάτω ανίσωση:

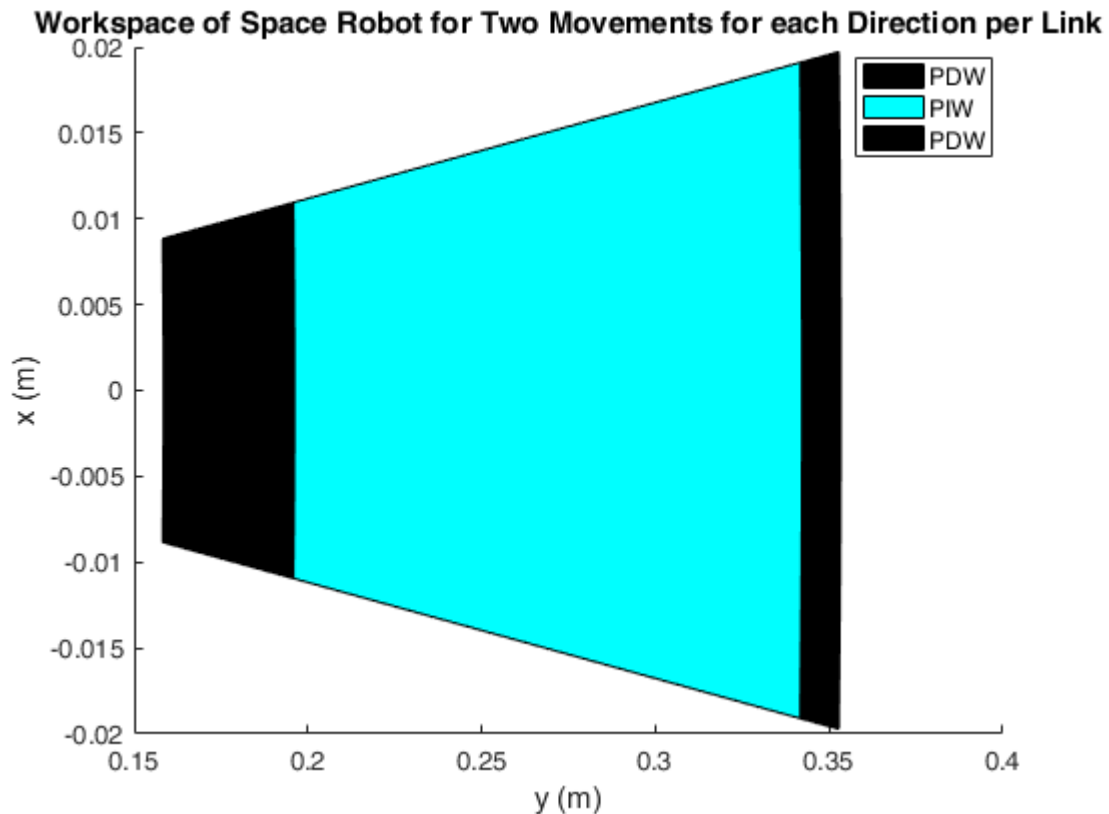
$$\begin{aligned} 2\Delta\theta_{0\min} + \theta_{0\text{initial}} &\leq \theta_0 \leq 2\Delta\theta_{0\max} + \theta_{0\text{initial}} \Leftrightarrow \\ 2\Delta\theta_{0\min} + \theta_{0\text{initial}} &\leq \theta_E - q_3 - q_2 - q_1 \leq 2\Delta\theta_{0\max} + \theta_{0\text{initial}} \Leftrightarrow \\ -2\Delta\theta_{0\min} - \theta_{0\text{initial}} + \theta_E - q_3 &\geq q_2 + q_1 \geq -2\Delta\theta_{0\max} - \theta_{0\text{initial}} + \theta_E - q_3 \end{aligned} \quad (5.21)$$

Στην οποία ανίσωση, αν οι γωνίες $\theta_{0\text{initial}}$ και θ_E είναι γνωστές, μπορεί να ελεγχθεί, για ποιους συνδυασμούς των σχετικών γωνιών των δύο πρώτων αρθρώσεων, για τους οποίους είναι πιθανόν να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες, ισχύει η παραπάνω ανίσωση, αν δοκιμαστούν για κάθε ζεύγος όλες οι πιθανές σχετικές γωνίες της τρίτης άρθρωσης.

Από την παραπάνω ανίσωση αποκλείονται όλα τα ζεύγη σχετικών γωνιών, που υπολογίστηκαν στις παραπάνω παραγράφους, για τις οποίες δεν ισχύει η παραπάνω ανίσωση. Έπειτα για όσα ζεύγη ισχύει η παραπάνω ανίσωση υπολογίζονται η ακτίνες-αποστάσεις του στόχου από το κέντρο μάζας του ρομπότ (2.37) και υπολογίζονται οι χώροι εργασίας εκ νέου με το γνωστό τρόπο. Όπως αναφέρθηκε, όμως οι χώροι εργασίας που

υπολογίζονται δεν είναι κυκλικοί δακτύλιοι, αλλά κυκλικά τόξα γωνίας όσο το δυνατό εύρος μετατόπισης της γωνίας της βάσης.

Τα παραπάνω εφαρμόζονται για ένα παράδειγμα, όπου το κέντρο μάζας του ρομπότ βρίσκεται στο σημείο $O(0,0)$, ο στόχος στο σημείο $E(0,4)$ και συνεπώς η γωνία $\theta_E = 90^\circ$. Επίσης ορίζεται η τιμή της αρχικής γωνίας της βάσης του ρομπότ σε μηδενικές μοίρες. Έτσι προκύπτει η παρακάτω απεικόνιση των χώρων εργασίας:



Σχήμα 5.4. Χώρος εργασίας του ρομπότ που προκύπτει, αν ληφθούν υπόψη οι μηχανικοί περιορισμοί των αρθρώσεων και περιοριστούν οι κινήσεις αυτών σε δύο προς κάθε κατεύθυνση (με γαλάζιο ο χώρος εργασίας, στον οποίο δεν είναι πιθανό να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες, με μαύρο οι χώροι που είναι πιθανό ή που πιθανά να μη φτάνει το ρομπότ λόγω μηχανικών περιορισμών στην περίπτωση του αριστερού μαύρου δακτύλιου).

6 Πείραμα

6.1 Περιγραφή Πειράματος

Όπως αναφέρθηκε, σκοπός της εργασίας είναι με το πέρας αυτής το ρομπότ να είναι ικανό να αρπάξει και να μεταφέρει αντικείμενα. Για την επαλήθευση της λειτουργίας των εξαρτημάτων, που προστεθήκαν, είναι επιθυμητή η πραγματοποίηση του παρακάτω πειράματος. Ο στόχος (παθητικό ρομπότ) να εκτελεί ομαλή γραμμική κίνηση πάνω στην τράπεζα γρανίτη και το ενεργητικό ρομπότ να το πλησιάσει να κρατήσει σταθερή απόσταση ως προς αυτό και να το αρπάξει. Για να πραγματοποιηθεί το πείραμα πραγματοποιούνται δύο πειράματα πρωτίστως. Πρώτον, με χρήση αντίστροφης κινηματικής να συλληφθεί ο στόχος εκτός γρανίτη και δεύτερον να πραγματοποιηθεί το πείραμα σύλληψης του στόχου πάνω στο γρανίτη, όταν αυτός έχει μηδενική ταχύτητα. Όταν το ρομπότ με τους βραχιόνες είναι πάνω στο γρανίτη, για την επίλυση της αντίστροφης κινηματικής των βραχιόνων χρησιμοποιούνται τα βαρυκεντρικά διανύσματα, ο υπολογισμός των οποίων αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5 για το ρομπότ του εργαστηρίου.

6.2 Περιγραφή Ελεγκτή του Ρομπότ και Σχεδιασμός της Επιθυμητής Κίνησης του Ρομπότ

6.2.1 Ο Ελεγκτής της Κίνησης του Ρομπότ

Για την κίνηση της βάσης του ενεργητικού ρομπότ πάνω στην τράπεζα γρανίτη χρησιμοποιείται ένας γραμμικός ελεγκτής-PD, στην εξίσωση, του οποίου περιλαμβάνονται και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ρομπότ, δηλαδή η μάζα του και η αδράνειά του (6.1) [45].

$$\begin{bmatrix} \frac{F_x}{M_c} \\ \frac{F_y}{M_c} \\ \frac{T}{I_c} \end{bmatrix} = \frac{d^2}{dt^2} \begin{bmatrix} x_{cdes} \\ y_{cdes} \\ \theta_{cdes} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{K_{dlinear}}{M_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{dlinear}}{M_c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{dangular}}{I_c} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_c - x_{cdes} \\ y_c - y_{cdes} \\ \theta_c - \theta_{cdes} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{K_{plinear}}{M_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{plinear}}{M_c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{pangular}}{I_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c - x_{cdes} \\ y_c - y_{cdes} \\ \theta_c - \theta_{cdes} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Όπου τα κέρδη, που χρησιμοποιηθήκαν στα πειράματα:

$$K_{dlinear} = 3,47 \quad (6.2)$$

$$K_{plinear} = 0,23 \quad (6.3)$$

$$K_{dangular} = 0,07 \quad (6.4)$$

$$K_{pangular} = 0,01 \quad (6.5)$$

Τα οποία για μάζα και αδράνεια του ενεργητικού ρομπότ M_c και I_c επιλέχθηκαν για διάφορες συχνότητες ω και απόσβεση $\zeta=1$ από τις (6.6), (6.7):

$$\begin{bmatrix} K_{plinear} \\ K_{pangular} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{linear}^2 M_c \\ \omega_{angular}^2 I_c \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

$$\begin{bmatrix} K_{dlinear} \\ K_{dangular} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\zeta\omega_{linear} M_c \\ 2\zeta\omega_{angular} I_c \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Η (6.1) περιέχει τις επιθυμητές γραμμικές και στροφικές επιταχύνσεις. Έτσι, είναι πολύ απλό να δοθούν εντολές επιθυμητών δυνάμεων. Στις εντολές αυτές ανταποκρίνονται οι επενεργητές της βάσης, δηλαδή τα τρία ζεύγη προωθητήρων και ο σφόνδυλος αντίδρασης [45].

6.2.2 Η Επιθυμητή Κίνηση του Ρομπότ για την υλοποίηση του Πειράματος

Για την εκπόνηση πειραμάτων πάνω στο γρανίτη εφαρμόστηκε μία στρατηγική παραγωγής τροχιάς στο επίπεδο, που θα ακολουθεί το ενεργητικό ρομπότ, ώστε να προσεγγίσει το παθητικό. Η λογική είναι πως διαβάζοντας την ταχύτητα και τη θέση του παθητικού ρομπότ ανά στιγμή από τις κάμερες, το ενεργητικό θα επιταχύνει και θα επιβραδύνει με σταθερό μέτρο επιτάχυνσης-επιβράδυνσης, έτσι ώστε να φτάσει κοντά στο παθητικό με ίδιες γραμμικές ταχύτητες με αυτό. Επίσης, η γωνία yaw του ρομπότ ορίζεται, έτσι ώστε ο x άξονας του συστήματος συντεταγμένων του ρομπότ να είναι πάντα παράλληλος με την πορεία του.

Επειδή το παθητικό ρομπότ θεωρητικά προσομοιώνει αντικείμενα, στα οποία δεν ασκείται κάποια δύναμη, θεμιτό είναι να κινείται με χαμηλές ταχύτητες. Έτσι για να το προσεγγίσει το ενεργητικό ρομπότ επιλέγονται χαμηλές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις.

6.3 Υλοποίηση Πειράματος

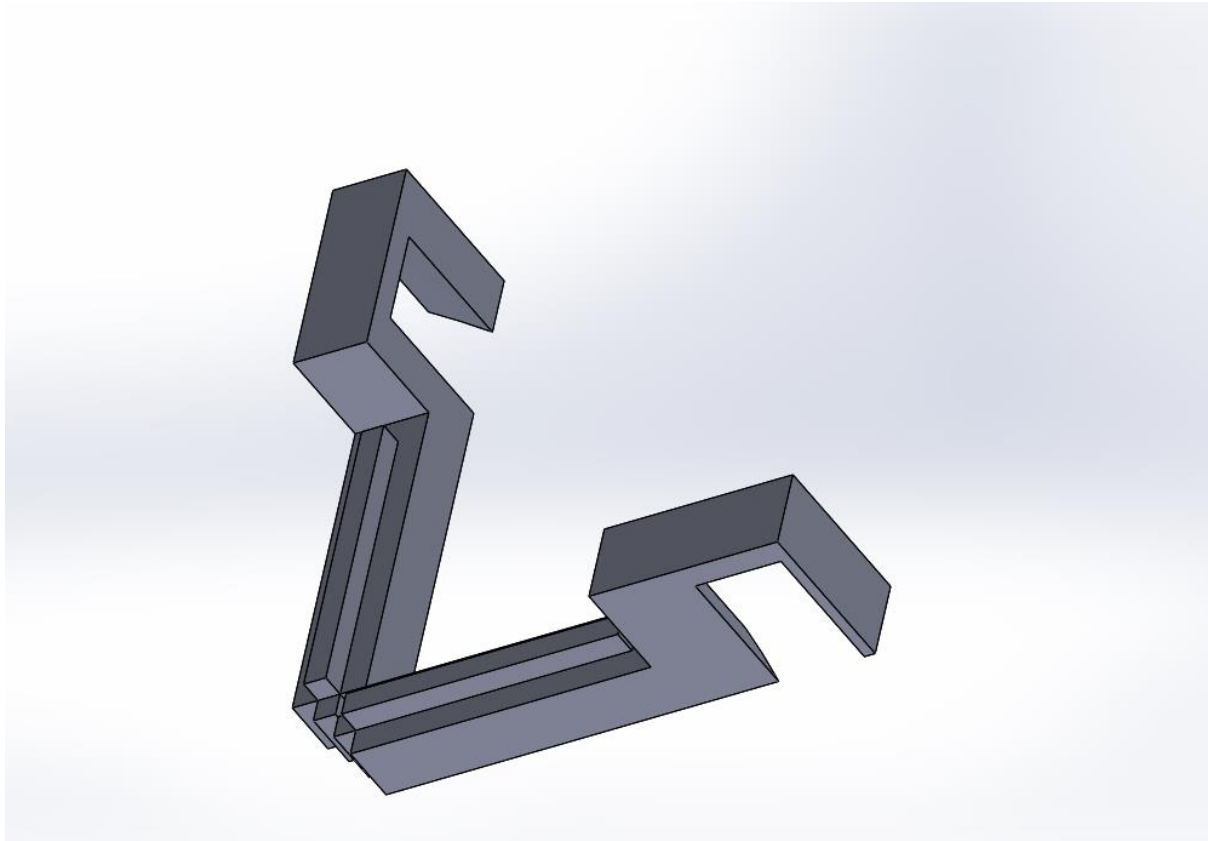
6.3.1 Πρόσθετα Εξαρτήματα

Σκοπός του τελικού πειράματος είναι να επαληθευθεί η λειτουργία των διατάξεων, που προστεθήκαν στο ενεργητικό ρομπότ. Επειδή ο παραπάνω σκοπός δεν απαιτεί ακρίβεια, η υλοποίηση του πειράματος πραγματοποιήθηκε με την προσθήκη εξαρτημάτων που επιτρέπουν στο ενεργητικό ρομπότ να πιάσει το παθητικό από ένα εύρος σημείων. Το αρχικό σχέδιο για την πραγματοποίηση του πειράματος είναι, οι αρπάγες να ανοιγοκλείνουν με τις δαγκάνες να κινούνται γραμμικά σε άξονα κάθετο στην τράπεζα του γρανίτη και στο παθητικό ρομπότ να προστεθεί κάποιος κυκλικός δακτύλιος με κέντρο το γεωμετρικό κέντρο του ρομπότ, τον οποίο οι αρπάγες θα μπορούν να αρπάξουν από οποιοδήποτε σημείο του.

Για την εξοικονόμηση χώρου, είναι επιθυμητό ο δακτύλιος να έχει μικρό πάχος και η εσωτερική του διάμετρος να είναι κατά το δυνατόν όσο πιο κοντά στο παθητικό ρομπότ, αλλά μεγαλύτερη από τη διάμετρο του νοητού κύκλου στον οποίο εγγράφεται η ορθογωνική επιφάνειά του. Επειδή αυτή η διάμετρος είναι 75 εκατοστά, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ένα στεφάνι χούλα χούπ της εταιρείας Amila εσωτερικής διαμέτρου 78 εκατοστά και εξωτερικής 82 εκατοστά (Σχήμα 6.1). Για να τοποθετηθεί το στεφάνι στο παθητικό ρομπότ, στο σημείο που φτάνουν οι βραχίονες, σχεδιάστηκε ένα ζευγάρι από στηρίγματα (Σχήμα 6.2), τα οποία συγκρατούν το στεφάνι, ενώ έχουν προσδεθεί στο παθητικό ρομπότ. Το ζευγάρι στηριγμάτων τυπώθηκε 4 φορές στον 3D εκτυπωτή του εργαστηρίου Wanhao Duplicator D9/300 ώστε να τοποθετηθεί από ένα ζευγάρι σε 4 διαφορετικά σημεία του παθητικού ρομπότ, που είναι συμμετρικά ως προς το γεωμετρικό κέντρο του. Στα Σχήματα 6.3 και 6.4 φαίνεται πως τα στηρίγματα αυτά σχεδιάστηκαν έτσι, ώστε να εφαρμόζονται πάνω στα πλαίσια αλουμινίου του παθητικού ρομπότ. Στα Σχήματα 6.5 και 6.6 φαίνεται πώς τοποθετείται το στεφάνι πάνω σε αυτά τα στηρίγματα.



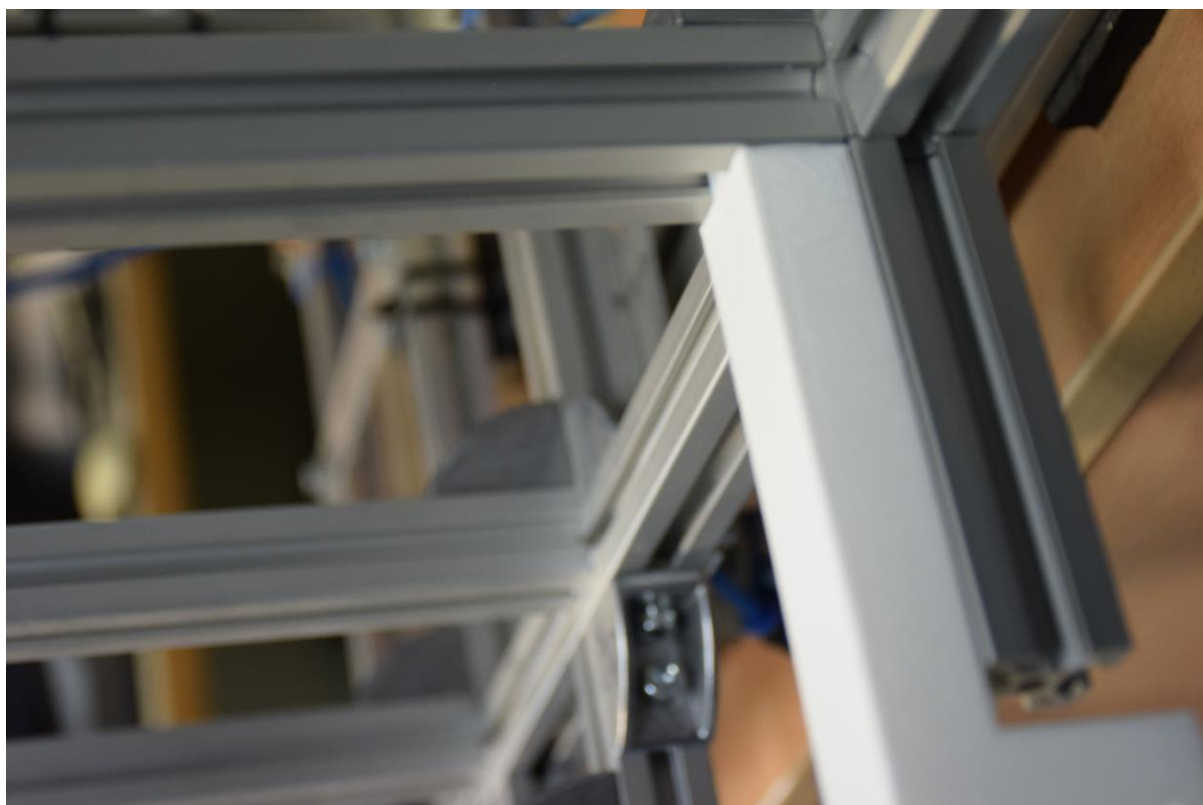
Σχήμα 6.1. Στεφάνι χούλα χούπ της εταιρείας Amila, που χρησιμοποιήθηκε.



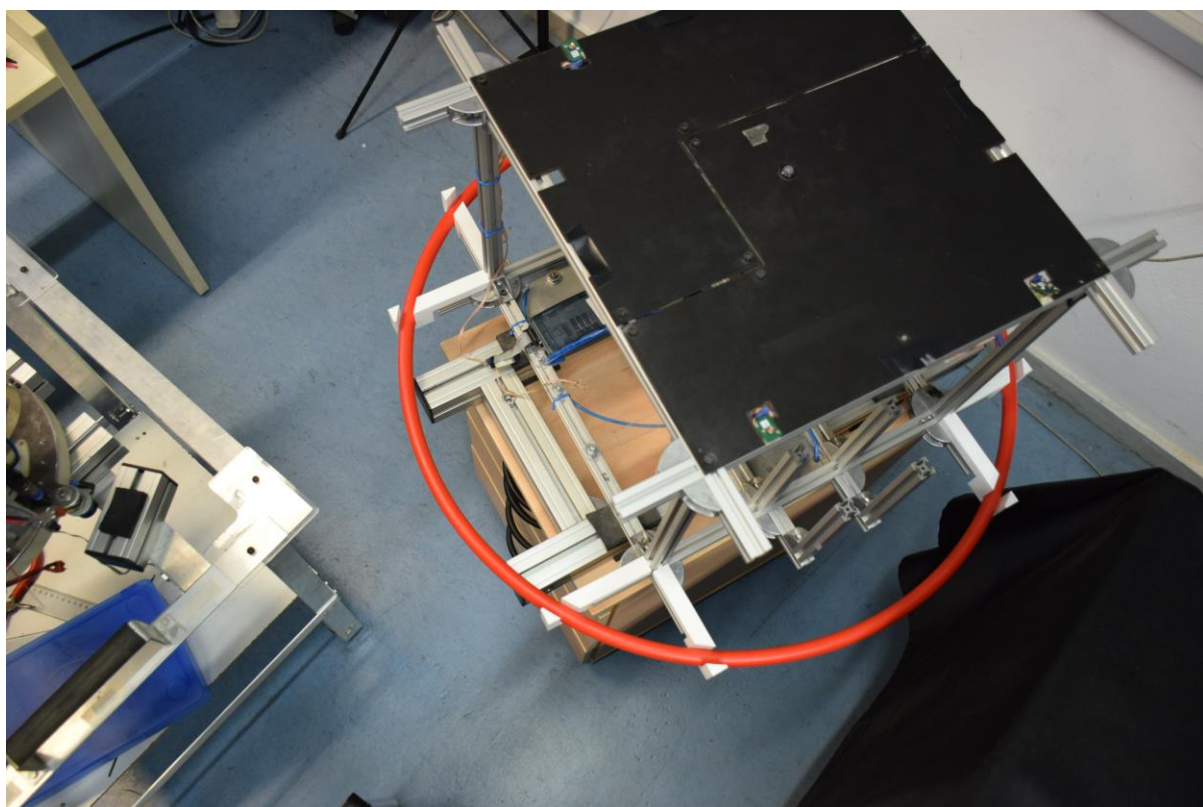
Σχήμα 6.2. Ζεύγος στηριγμάτων του στεφανιού στο παθητικό ρομπότ, όπως σχεδιάστηκαν στο SolidWorks και τυπώθηκαν στο 3D εκτυπωτή.



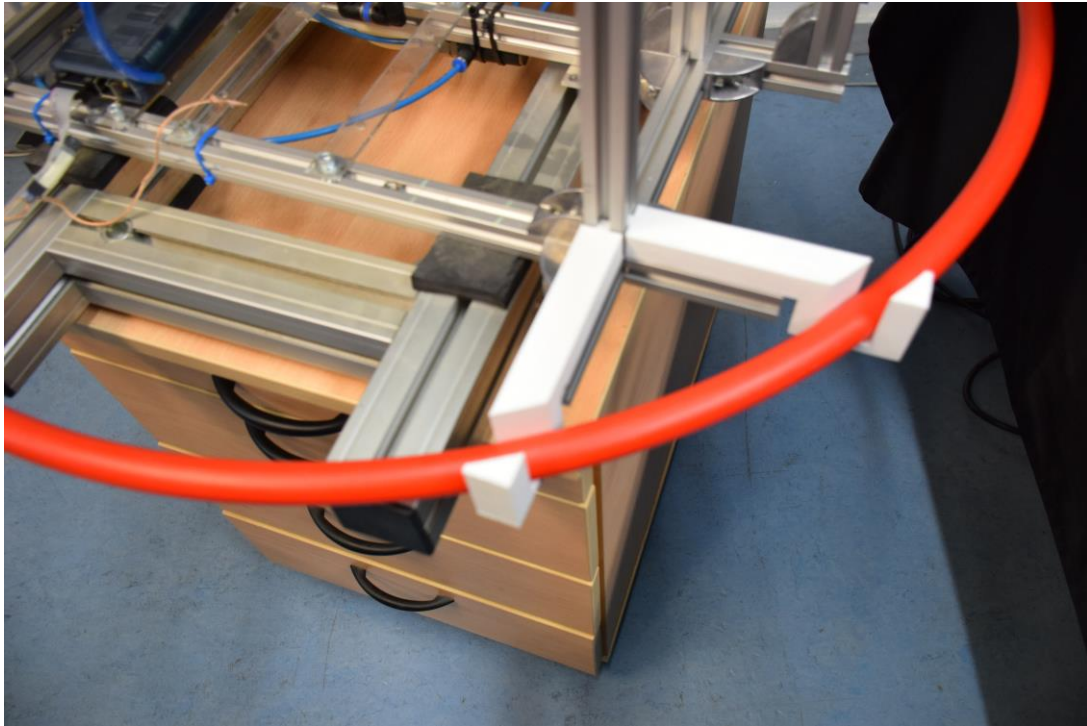
Σχήμα 6.3. Πλαίσια αλουμινίου με κενά V του παθητικού ρομπότ, στα οποία τοποθετούνται τα στηρίγματα του στεφανιού.



Σχήμα 6.4. Συναρμογή στηριγμάτων στεφανιού και πλαισίων αλουμινίου.

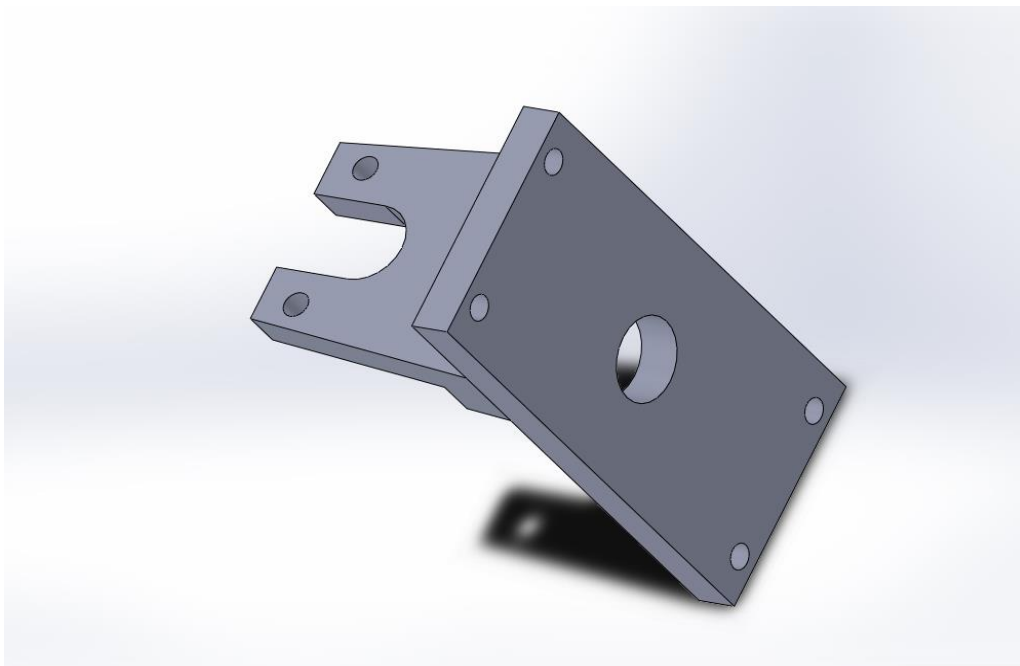


Σχήμα 6.5. Το παθητικό ρομπότ με τα στηρίγματα του στεφανιού και το στεφάνι.

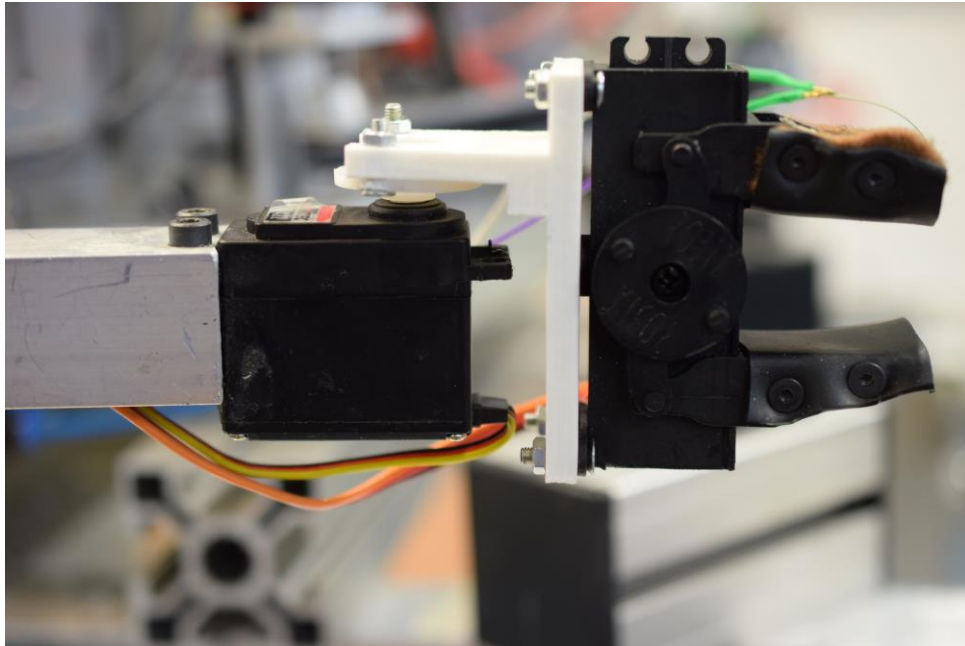


Σχήμα 6.6. Στηρίγματα του στεφανιού και τοποθέτηση του στεφανιού σε αυτά.

Όσον αφορά τις αρπάγες, επίσης σχεδιαστήκαν και τυπωθήκαν στον ίδιο 3D εκτυπωτή σύνδεσμοι αυτών, που τις ενώνουν με το σερβοκινητήρα της τρίτης άρθρωσης των βραχιόνων και τοποθετούν τις αρπάγες στον επιθυμητό προσανατολισμό και ύψος (Σχήμα 6.7, Σχήμα 6.8).



Σχήμα 6.7. Σύνδεσμος αρπάγης και τρίτης άρθρωσης βραχίονα, που σχεδιάστηκε στο Solidworks και τυπώθηκε σε 3D εκτυπωτή για τις ανάγκες του πειράματος της εργασίας.



Σχήμα 6.8 Σύνδεσμος αρπάγης και τρίτης άρθρωσης βραχίονα, που σχεδιάστηκε στο Solidworks και τυπώθηκε σε 3D εκτυπωτή, όπως προσδέθηκε στο βραχίονα του ρομπότ.

6.3.2 Πείραμα Αρπαγής Στόχου Εκτός Τράπεζας Γρανίτη

Για την υλοποίηση πειράματος αρπαγής στόχου τοποθετήθηκαν τα δύο ρομπότ σε μία κοντινή απόσταση με τις κάμερες να παρακολουθούν τα γεωμετρικά κέντρα των βάσεων τους. Σε σχέση με το γεωμετρικό κέντρο του ενεργητικού ρομπότ μπορεί να δηλωθεί οποιοδήποτε σημείο του ρομπότ έχει σταθερή απόσταση από το κέντρο. Δηλαδή, εάν είναι γνωστή η θέση του ρομπότ και ο προσανατολισμός του στο χώρο, είναι γνωστές και οι θέσεις των πρώτων αρθρώσεων των βραχιόνων. Για την επίλυση της αντίστροφης κινηματικής, γίνεται μετατροπή της θέσης του γεωμετρικού κέντρου του παθητικού ρομπότ ως προς το σύστημα συντεταγμένων των καμερών, στην αντίστοιχη θέση του ως προς σύστημα συντεταγμένων, που έχει την αρχή των αξόνων στην πρώτη άρθρωση του βραχίονα, που θα χρησιμοποιηθεί, και προσανατολισμό αντίστοιχο με αυτόν του ενεργητικού ρομπότ.

Στο πείραμα, που θα αναλυθεί χρησιμοποιήθηκε ο καινούριος ή δεξιός βραχίονας και χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω γεωμετρικές παράμετροι για την επίλυση του.

Πίνακας 6.1. Γεωμετρικές παράμετροι για την επίλυση της αντίστροφης κινηματικής

Παράμετρος	Μήκος (m)
Πρώτο μέλος δεξιού βραχίονα (l_1)	0,18
Δεύτερο μέλος δεξιού βραχίονα (l_2)	0,161
Τρίτο μέλος δεξιού βραχίονα (l_3)	0,069
Ακτίνα στεφανιού (R)	0,405

Θα αναφερθεί παρακάτω ο τρόπος, με τον οποίο επιλεχθήκαν οι σχετικές γωνίες των αρθρώσεων, ο οποίος είναι μία απλή εφαρμογή της μεθόδου Denavit-Hartenberg [40]. Αρχικά, αν x_t και y_t οι συντεταγμένες του γεωμετρικού κέντρου του παθητικού ρομπότ ως προς το σύστημα συντεταγμένων με αρχή των αξόνων την πρώτη άρθρωση του δεξιού βραχίονα, τότε για να αρπαχθεί σημείο του στεφανιού βρίσκονται η γωνία φ του σημείου αυτού και οι συντεταγμένες x_3 και y_3 του σημείου, που είναι επιθυμητό να βρίσκεται η τρίτη άρθρωση από τις (6.8)-(6.10):

$$\varphi = A \tan 2(y_t, x_t) \quad (6.8)$$

$$x_3 = x_t - (l_3 + R) \cos(\varphi) \quad (6.9)$$

$$y_3 = y_t - (l_3 + R) \sin(\varphi) \quad (6.10)$$

Όποτε για τα δύο πρώτα μέλη του βραχίονα μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος Denavit Hartenberg για την εύρεση δύο λύσεων, ώστε να βρίσκεται η τρίτη άρθρωση στο επιθυμητό σημείο. Για κάθε ζεύγος λύσεων η σχετική γωνία της τρίτης άρθρωσης υπολογίζεται γνωρίζοντας πως το αθροίσμα των τριών σχετικών γωνιών των αρθρώσεων είναι ίσο με τη γωνία του στόχου ως προς το σύστημα συντεταγμένων της πρώτης άρθρωσης. Άρα οι σχέσεις (6.11)-(6.13) εκφράζουν την πρώτη λύση και οι σχέσεις (6.14)-(6.16) τη δεύτερη:

$$q_{2,1} = \cos^{-1} \left(\frac{x_3^2 + y_3^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right) \quad (6.11)$$

$$q_{1,1} = \varphi - A \tan 2(l_2 \sin(q_{2,1}), l_1 + l_2 \cos(q_{2,1})) \quad (6.12)$$

$$q_{3,1} = \varphi - q_{2,1} - q_{1,1} \quad (6.13)$$

$$q_{2,2} = -q_{2,1} \quad (6.14)$$

$$q_{1,2} = \varphi + A \tan 2(l_2 \sin(q_{2,1}), l_1 + l_2 \cos(q_{2,1})) \quad (6.15)$$

$$q_{3,2} = \varphi - q_{2,2} - q_{1,2} \quad (6.16)$$

Από τις δύο λύσεις στο πείραμα επιλέγεται πρώτη η λύση με θετική q_2 , και αν δεν μπορεί να υλοποιηθεί λόγω μηχανικών περιορισμών, επιλέγεται η δεύτερη.

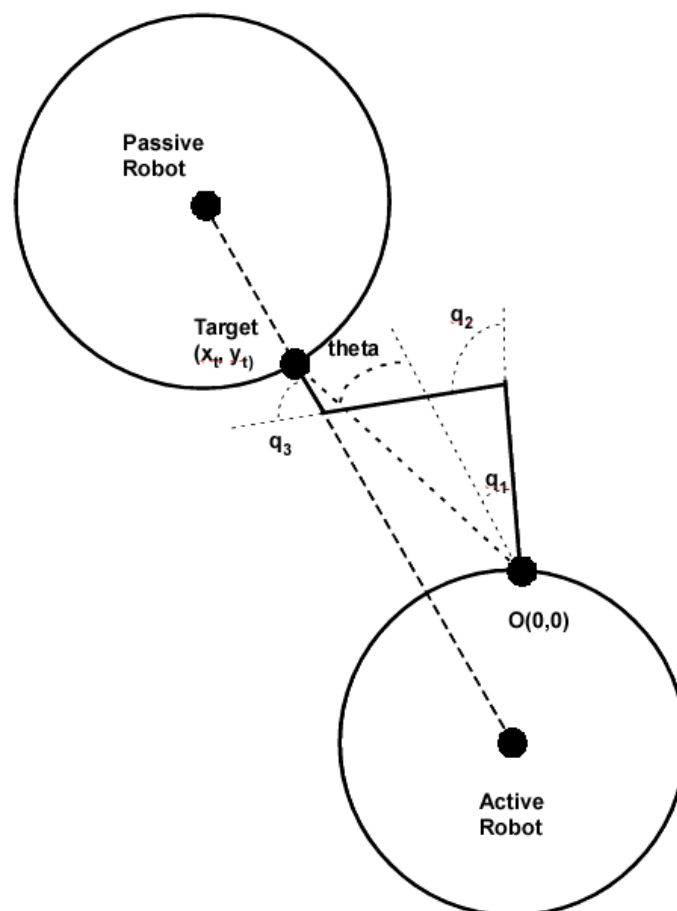
Με την ολοκλήρωση του πειράματος δόθηκε εντολή στην αρπάγη να κλείσει (Σχήμα 6.12) και κρατήθηκαν οι μετρήσεις του αισθητήρα FSR (Σχήμα 6.13).

Στην ολοκλήρωση του πειράματος (Σχήμα 6.10-6.12) δόθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα, τα οποία επαληθεύουν τις παραπάνω σχέσεις:

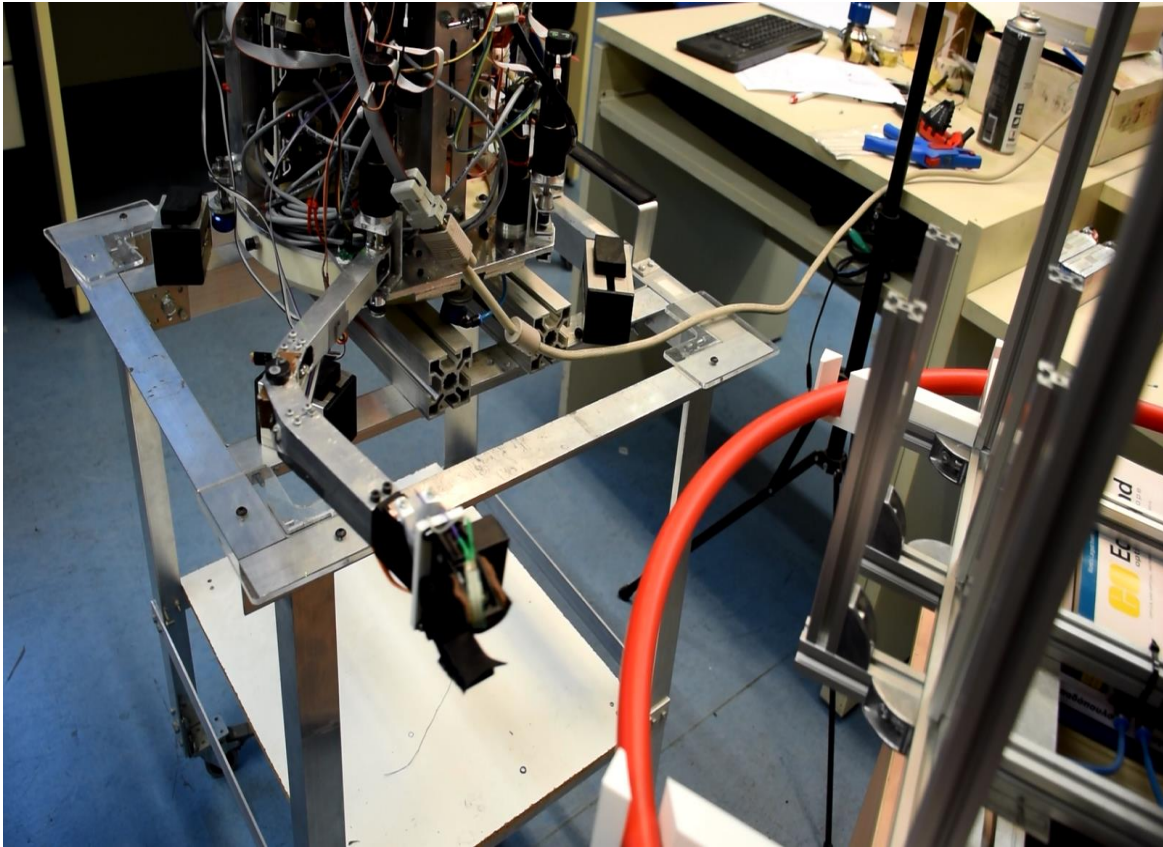
Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα, που δοθήκαν κατά την υλοποίηση του πειράματος αρπάγης στόχου εκτός τράπεζας γρανίτη.

x_t (m)	0,69315
y_t (m)	0,22698
φ (rad)	0,31646
q_1 (rad)	-0,40262
q_2 (rad)	1,12647
q_3 (rad)	-0,40739

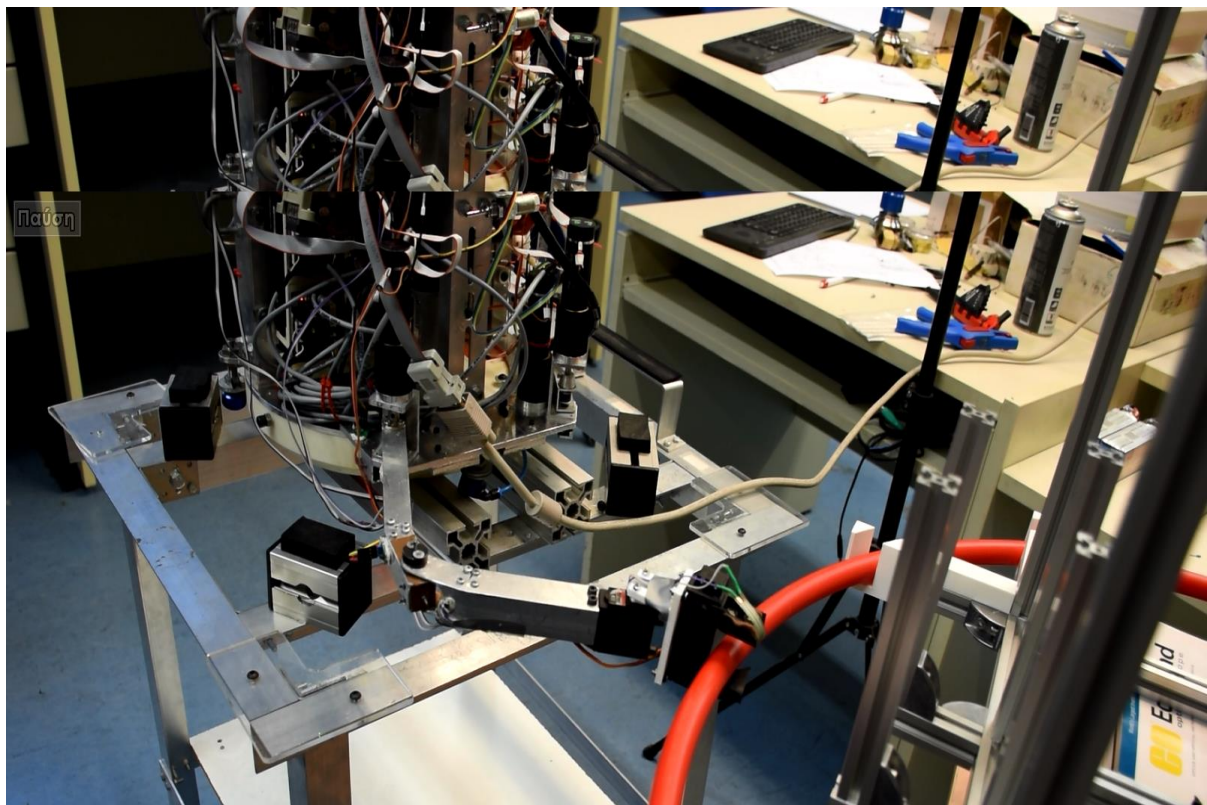
Όπου x_t, y_t και φ οι συντεταγμένες και η γωνία του γεωμετρικού κέντρου του παθητικού ρομπότ ως προς σύστημα συντεταγμένων με αρχή των αξόνων την πρώτη άρθρωση του δεξιού βραχίονα και q_1, q_2 και q_3 οι εντολές σχετικών γωνιών που υπολογίζονται και δίνονται στις αρθρώσεις για να φτάσει η αρπάγη το στόχο. Τα παραπάνω φαίνονται και στο Σχήμα 6.9, όπου η γωνία φ αναφέρεται ως γωνία theta.



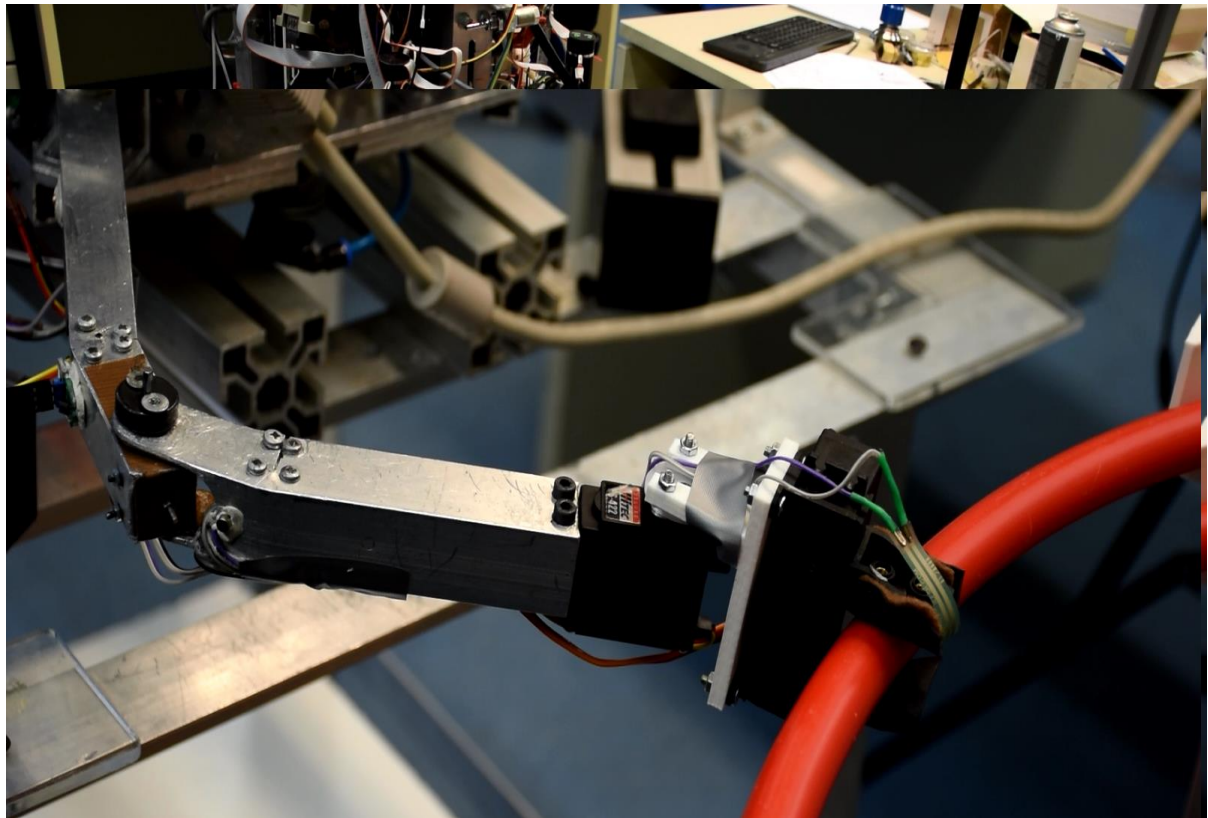
Σχήμα 6.9. Απεικόνιση των γεωμετρικών μεγεθών κατά την επίλυση αντίστροφης κινηματικής μεταξύ των δύο ρομπότ.



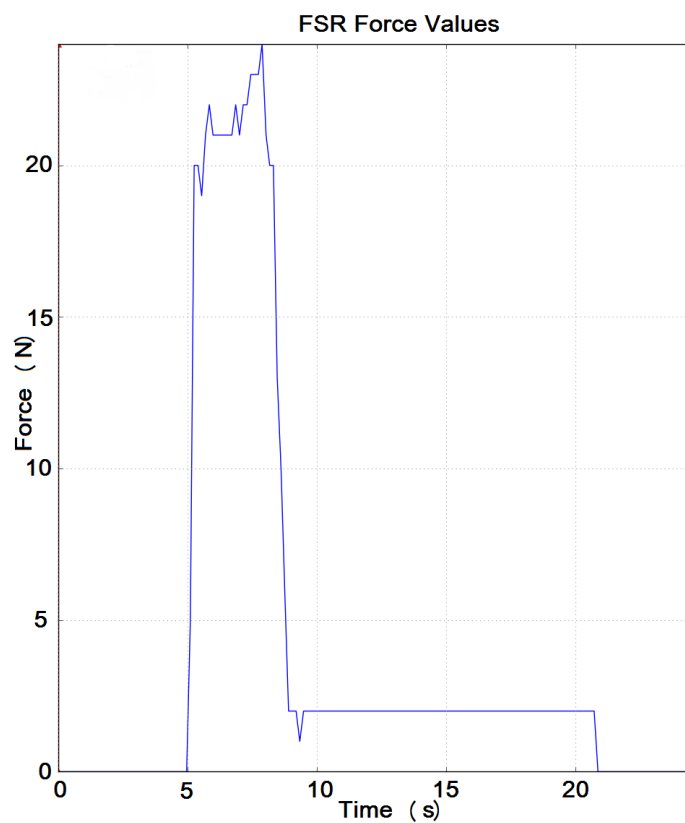
Σχήμα 6.10. Στιγμιότυπο από την κίνηση του βραχίονα σε επιτυχημένο πείραμα (1).



Σχήμα 6.11. Στιγμιότυπο από την κίνηση του βραχίονα σε επιτυχημένο πείραμα (2).



Σχήμα 6.12. Αρπαγή του στεφανιού κατά την υλοποίηση του πειράματος.



Σχήμα 6.13. Μετρήσεις του αισθητήρα FSR σε επιτυχημένο πείραμα αρπαγής αντικειμένου εκτός γρανίτη.

6.3.3 Πείραμα Σύλληψης Ακίνητου Αντικειμένου πάνω στην Τράπεζα Γρανίτη

Πειράματα πάνω στην τράπεζα γρανίτη πραγματοποιήθηκαν με την εφαρμογή των Παραγράφων 6.1 και 6.2 για την προσέγγιση του στόχου και τη μέθοδο της Παραγράφου 2.1 και του κεφαλαίου 5 για τη χρήση της αντίστροφης κινηματικής. Συγκεκριμένα τα μήκη των μελών του βραχίονα αντικαθιστούνται από τα βαρυκεντρικά διανύσματα b , c , d (Εξισώσεις (2.1), (2.2), (2.3)), καθώς και επιλέγεται να λυθεί η αντίστροφη κινηματική σε απόσταση εντός του χώρου εργασίας με τον τρόπο, που υπολογίζεται στην Παράγραφο 5.3.

Κατά την πραγματοποίηση του πρώτου πειράματος, ο στόχος τοποθετήθηκε πάνω στην τράπεζα γρανίτη και συγγρατήθηκε σε σταθερή θέση, έτσι ώστε με χρήση του ελεγκτή και της μεθόδου υλοποίησης της επιθυμητής κίνησης το ενεργητικό ρομπότ να προσεγγίσει το παθητικό και εκεί να απενεργοποιηθούν οι επενεργητές της βάσης και μόνο με τη χρήση του δεξιού βραχίονα να αρπάξει το στόχο από το στεφάνι. Οι συνισταμένες δυνάμεις των αξόνων του ρομπότ, που το επιταχύνουν γραμμικά, επιλέχθηκε να είναι ίσες με 0,06N.

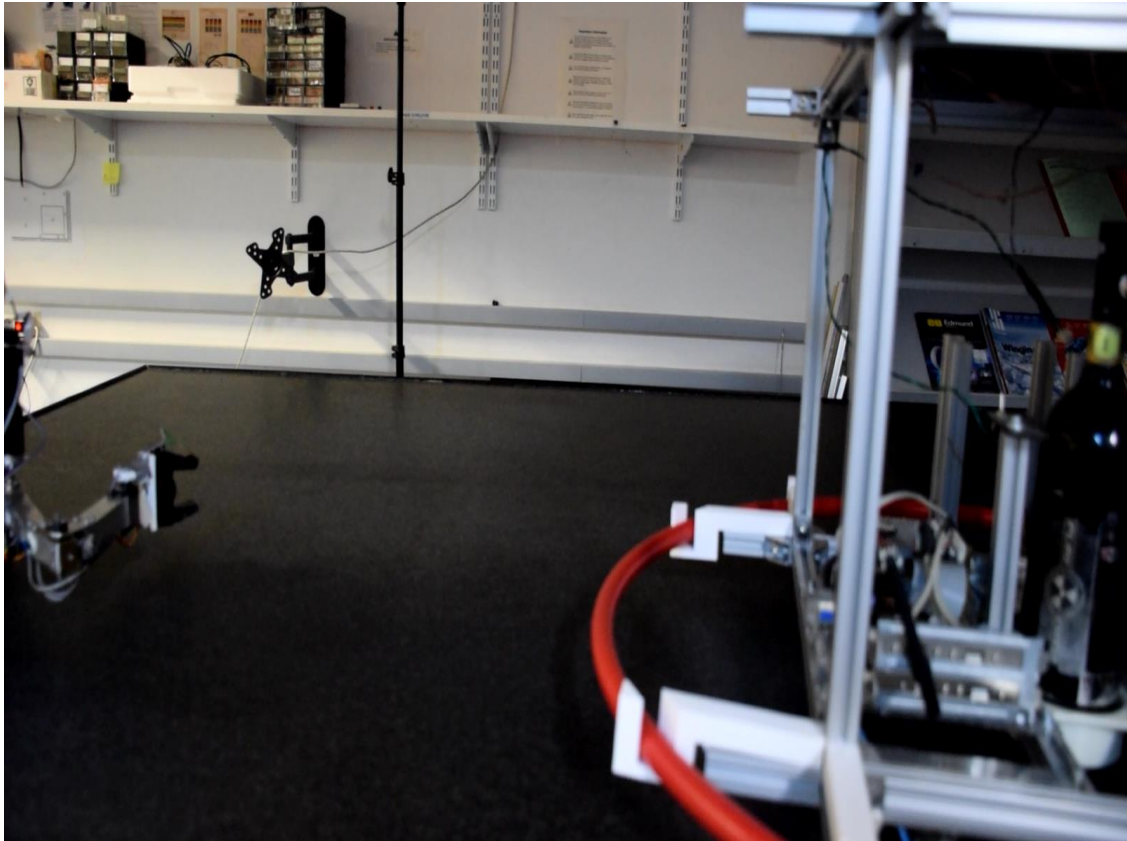
Όταν προσεγγίστηκε ο στόχος και απενεργοποιήθηκαν οι επενεργητές, η αντίστροφη κινηματική υλοποιήθηκε βάσει των παρακάτω αποτελεσμάτων:

Πίνακας 6.3. Αποτελέσματα, που δοθήκαν κατά την υλοποίηση του πειράματος σύλληψης στόχου στην τράπεζας γρανίτη με ακίνητο στόχο.

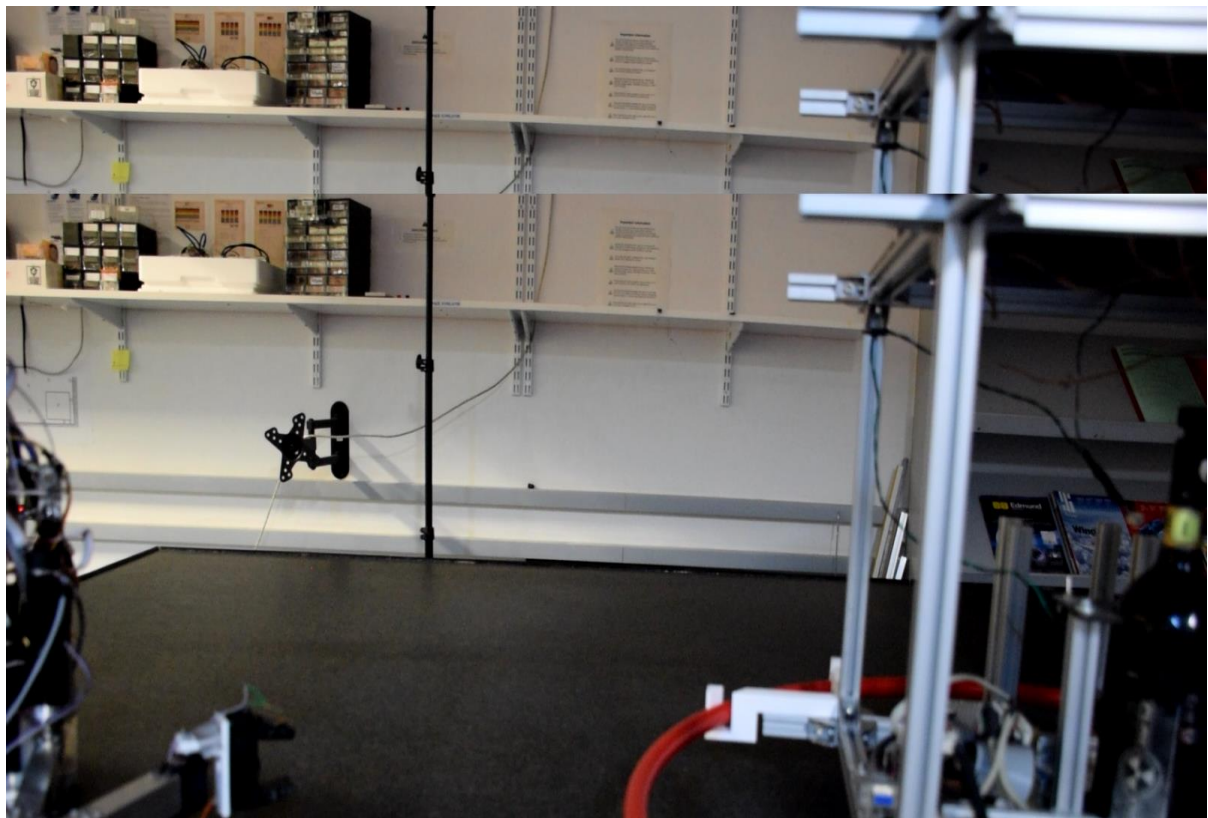
x_t (m)	0,25832
y_t (m)	-0,00649
φ (rad)	-0,02564
q_1 (rad)	-0,91992
q_2 (rad)	1,36018
q_3 (rad)	-0,4668

Όπου τα μεγέθη του Πίνακα 6.3 είναι τα αντίστοιχα με του Πίνακα 6.2 και αντιστοιχούν στην απεικόνιση του Σχήματος 6.9.

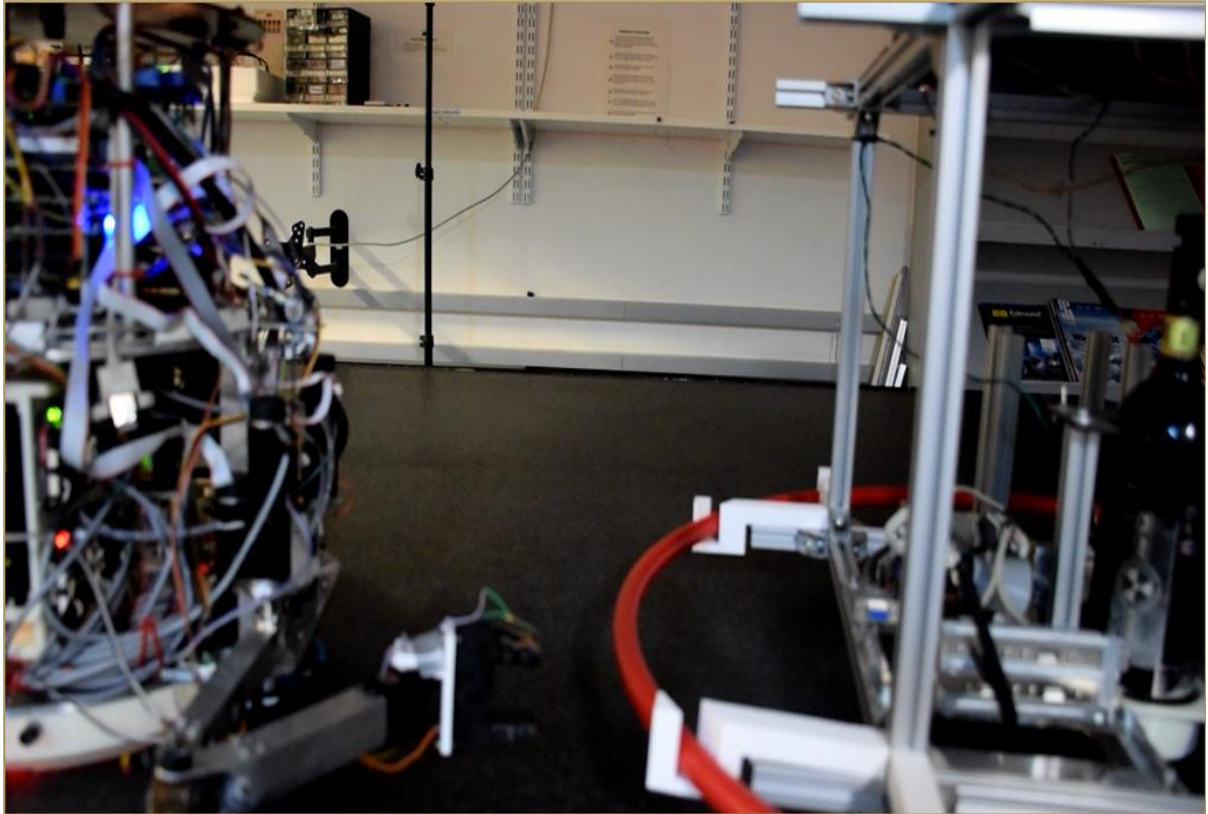
Στα Σχήματα 6.14-6.19 φαίνεται η υλοποίηση του πειράματος πάνω στην τράπεζα γρανίτη:



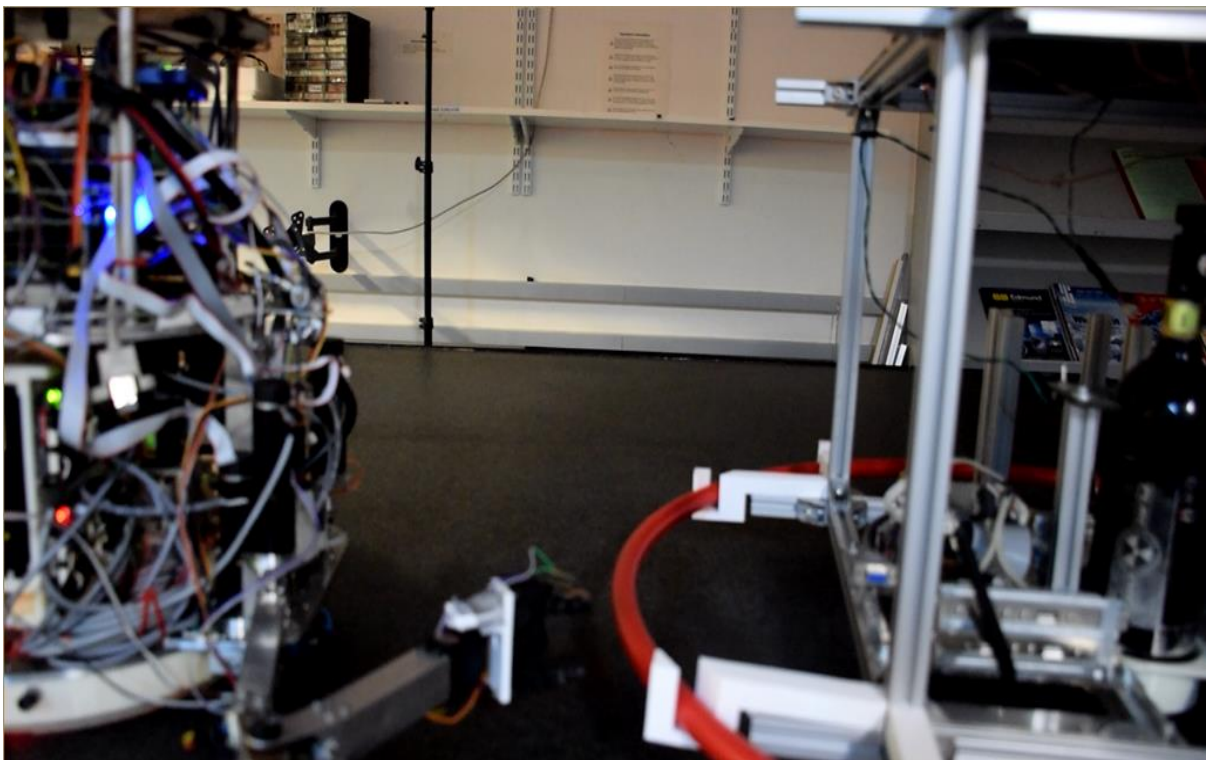
Σχήμα 6.14. Αρχική θέση των δύο ρομπότ στην τράπεζα γρανίτη.



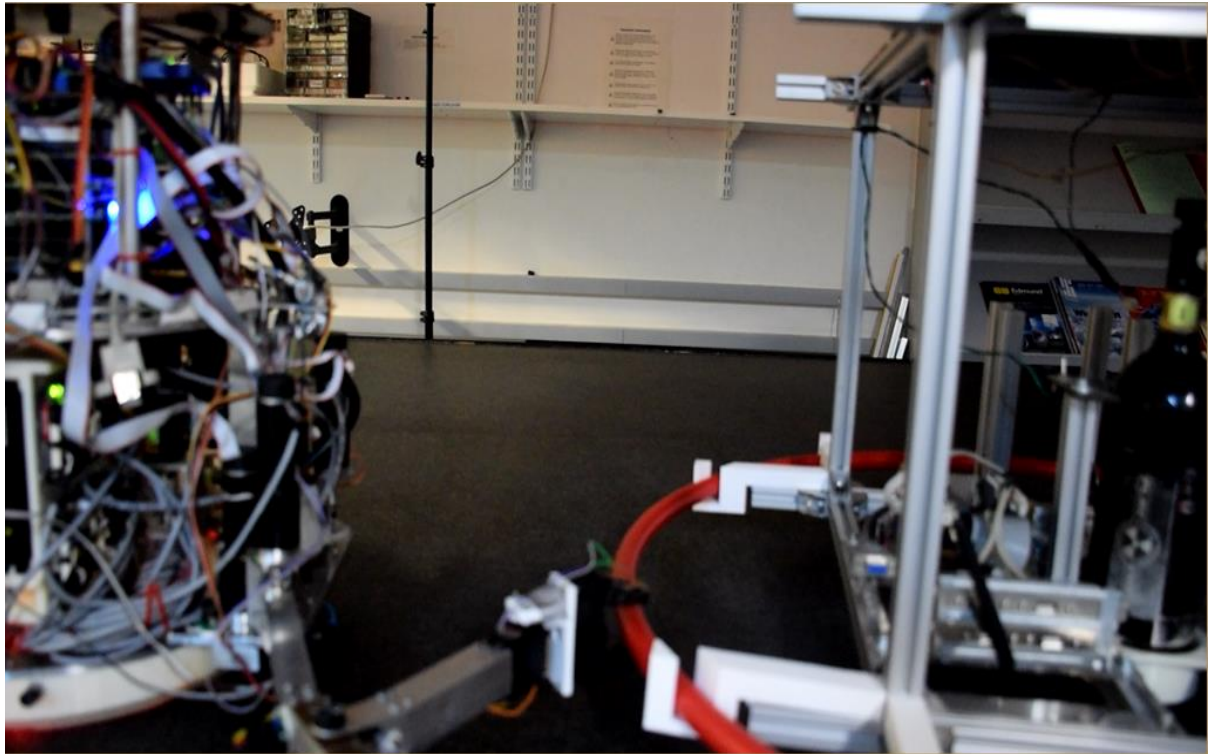
Σχήμα 6.15. Στιγμιότυπο από την υλοποίηση της ακολούθησης στόχου.



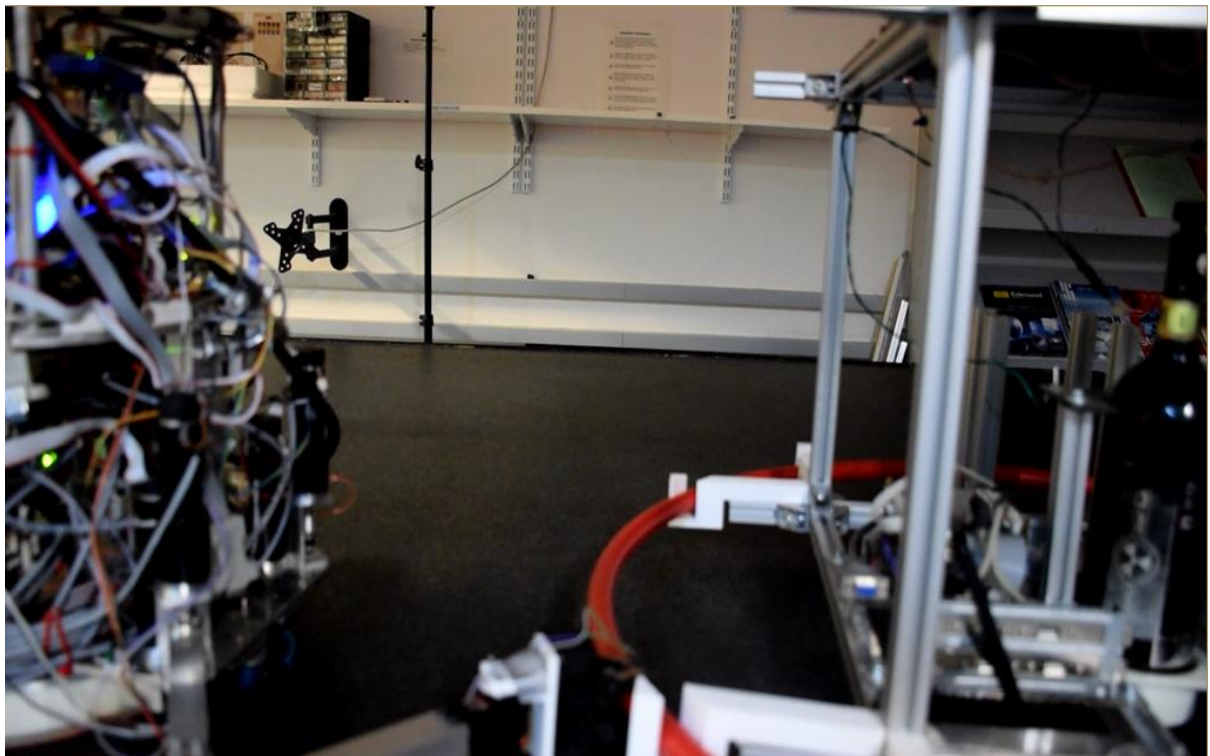
Σχήμα 6.16. Απεικόνιση των δύο ρομπότ, κατά τη διάρκεια του πειράματος, τη στιγμή που απενεργοποιήθηκαν οι επενεργητές.



Σχήμα 6.17. Στιγμιότυπο από την υλοποίηση αντίστροφης κινηματικής για αιωρούμενο ρομπότ σε πείραμα πάνω στο γρανίτη (1).

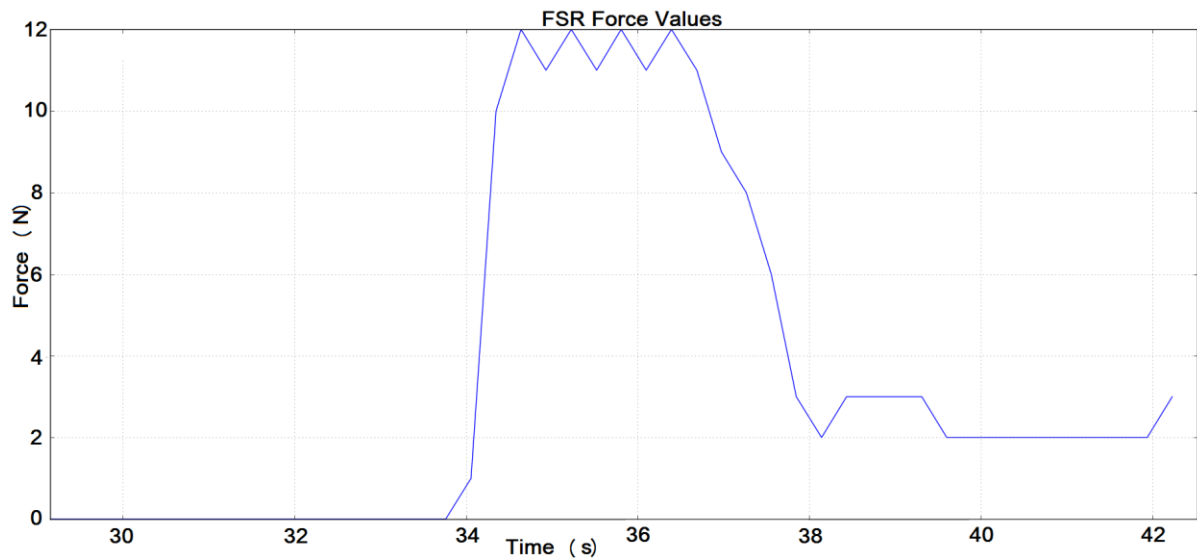


Σχήμα 6.18. Στιγμιότυπο από την υλοποίηση αντίστροφης κινηματικής για αιωρούμενο ρομπότ σε πείραμα πάνω στο γρανίτη (2).

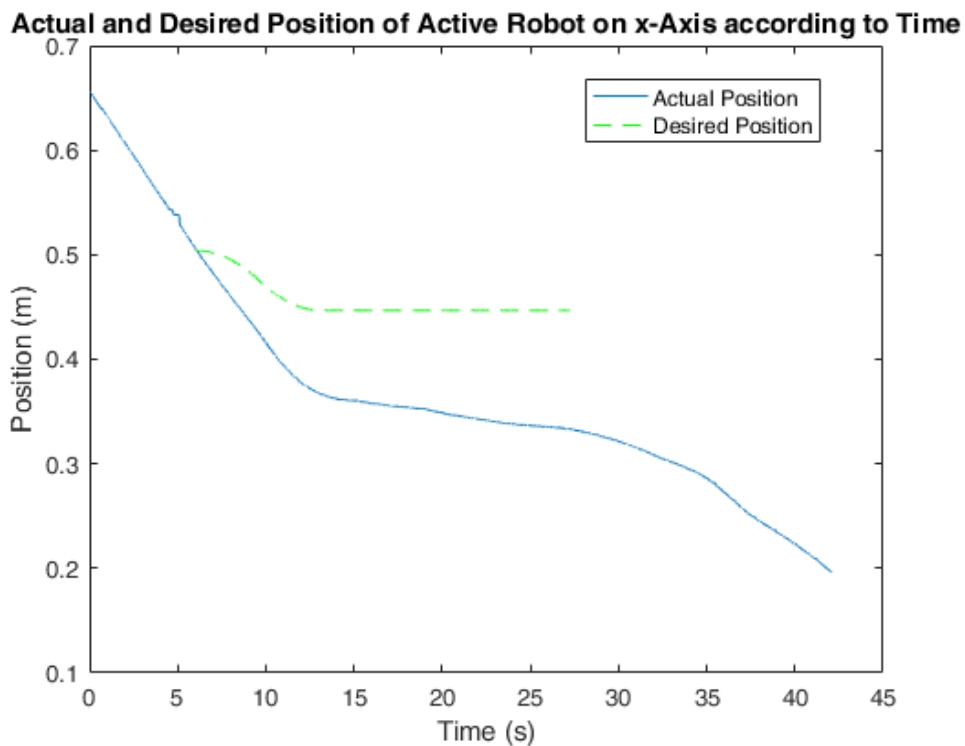


Σχήμα 6.19. Σύλληψη του στεφανιού κατά την υλοποίηση του πειράματος.

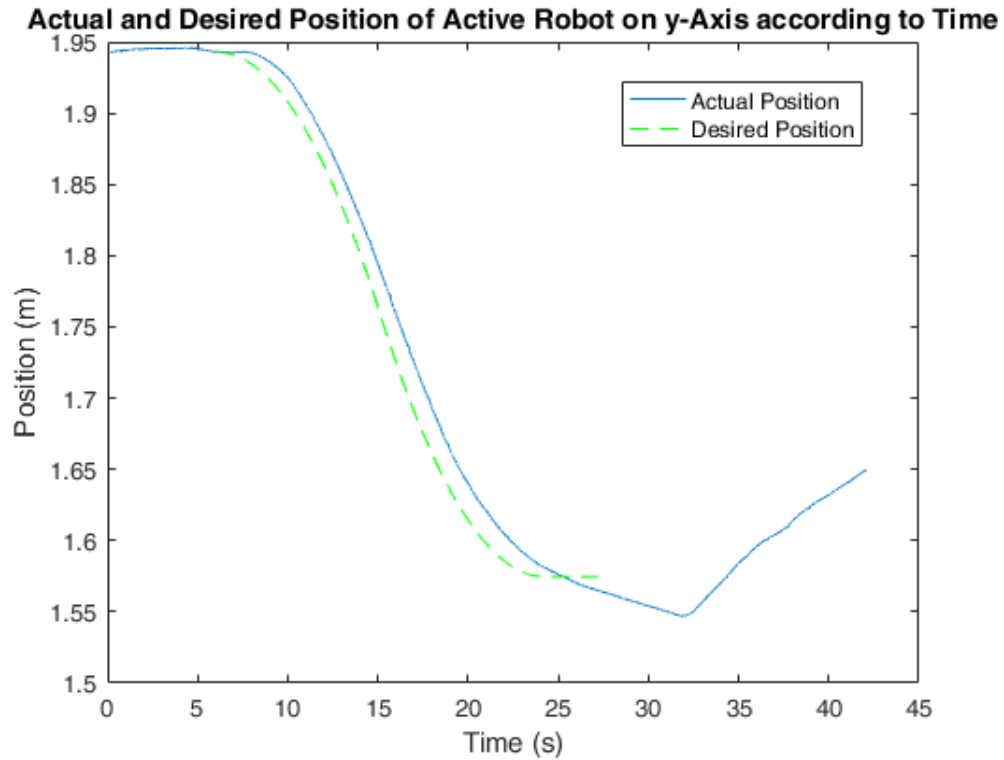
Στα Σχήματα 6.20-6.30 φαίνονται μετρήσεις από τις κάμερες και τον αισθητήρα FSR κατά την υλοποίηση αυτού του πειράματος:



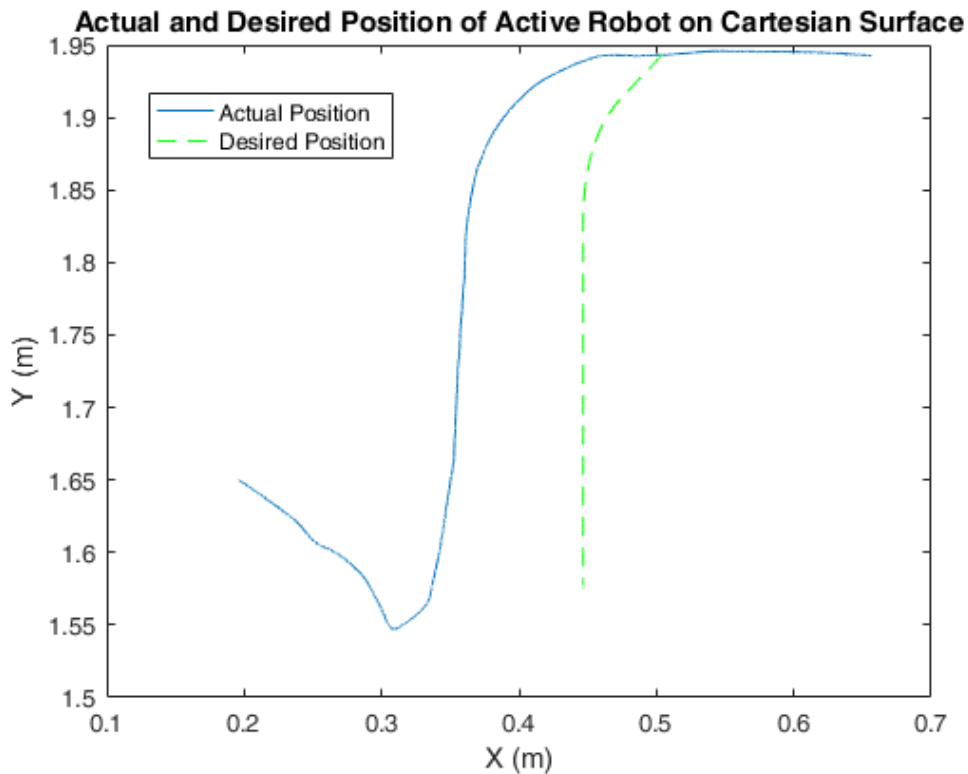
Σχήμα 6.20. Μετρήσεις του αισθητήρα FSR σε επιτυχημένο πείραμα αρπαγής αντικειμένου στην τράπεζα γρανίτη με ακίνητο στόχο.



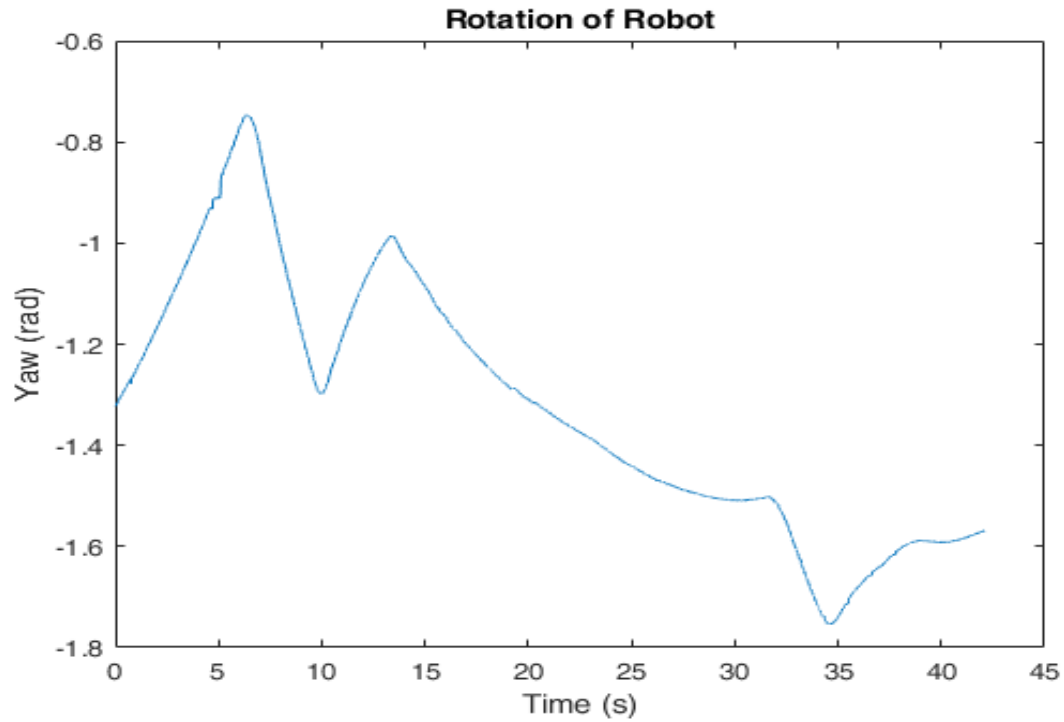
Σχήμα 6.21. Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.



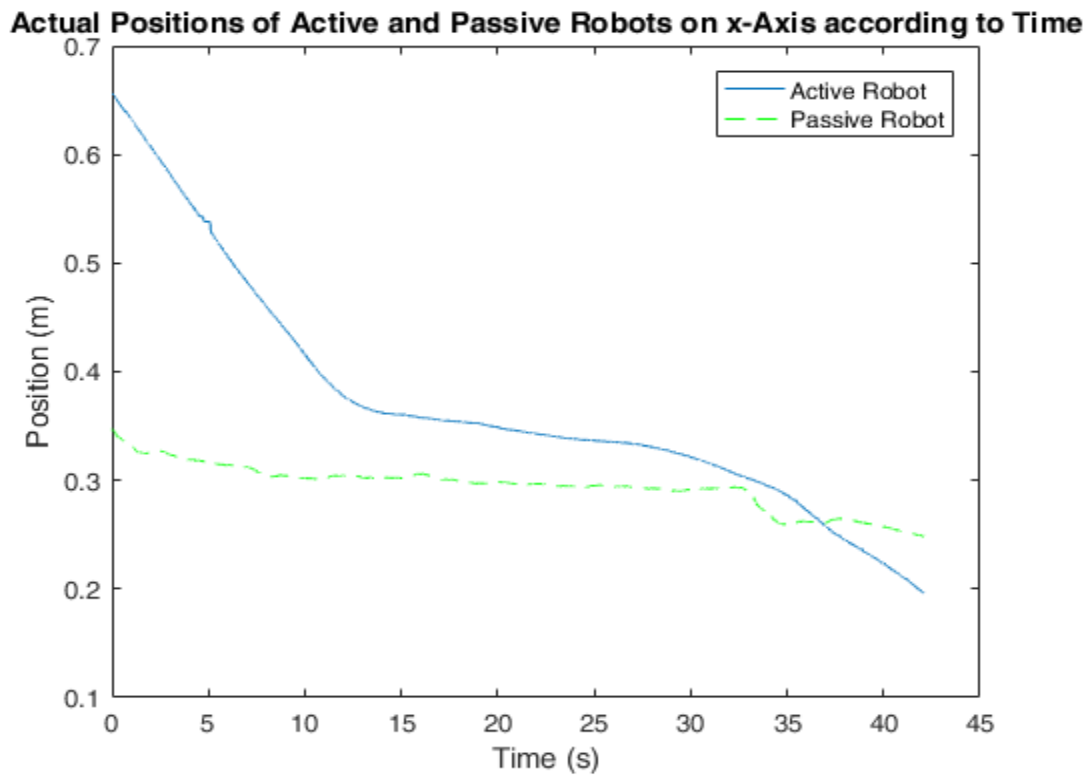
Σχήμα 6.22. Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.



Σχήμα 6.23. Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.

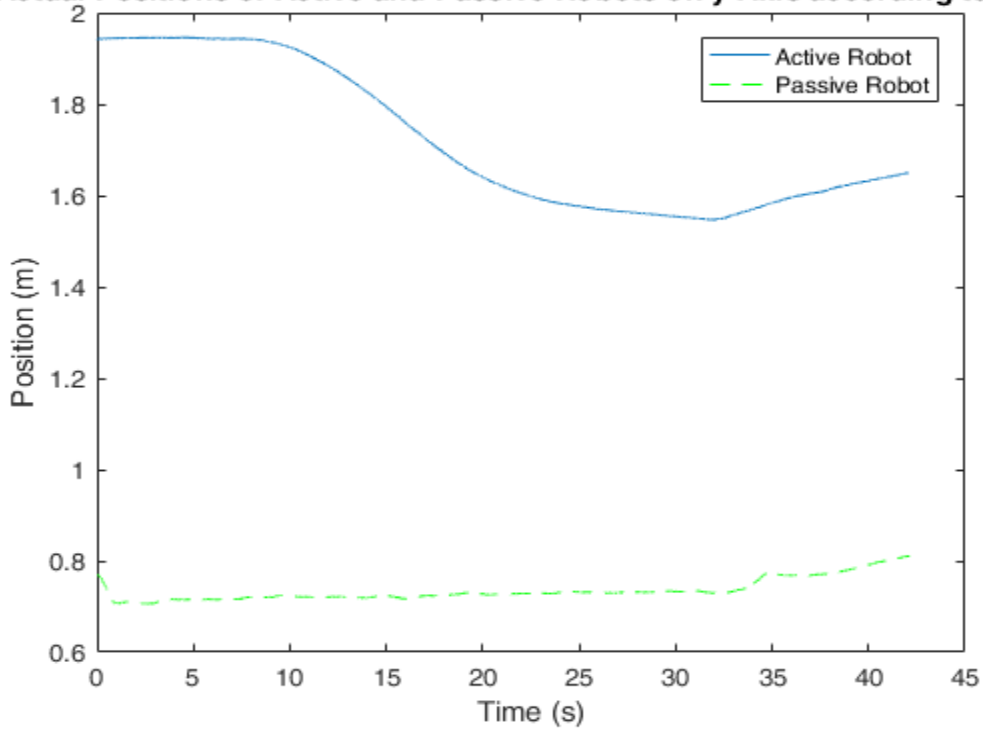


Σχήμα 6.24. Γωνία yaw του ρομπότ ως προς το σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.



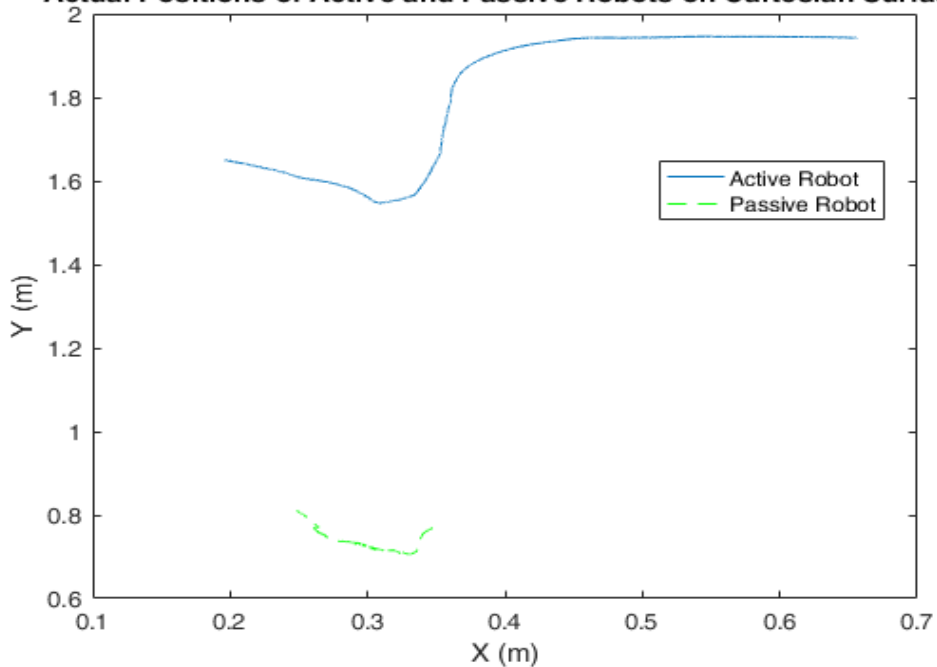
Σχήμα 6.25. Θέσεις των ρομπότ στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.

Actual Positions of Active and Passive Robots on y-Axis according to Time

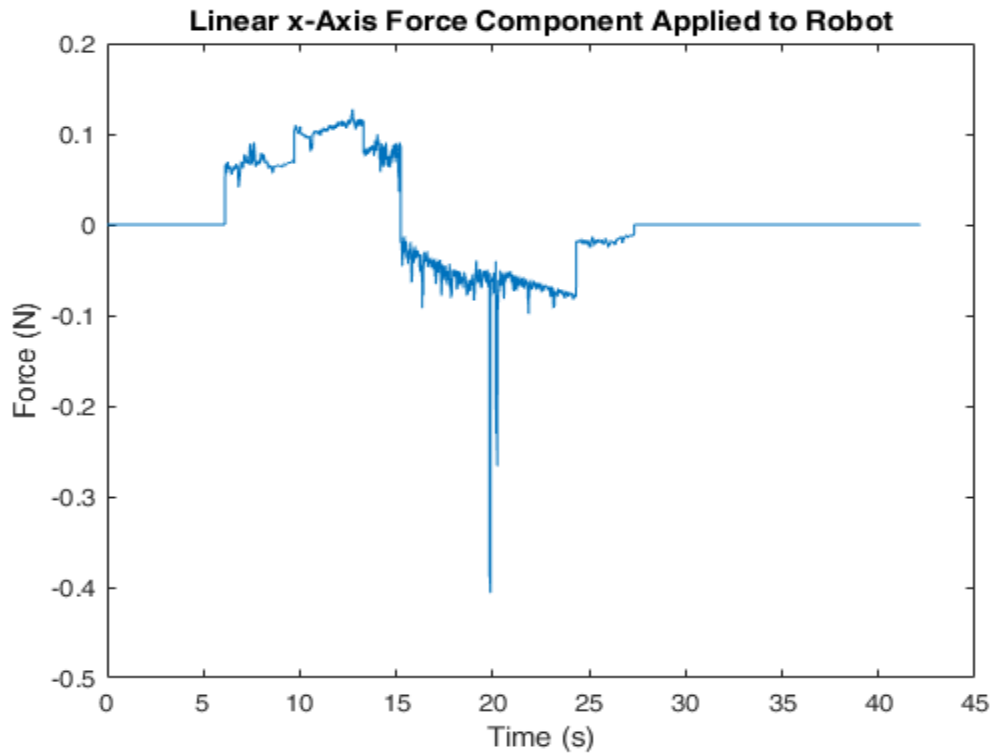


Σχήμα 6.26. Θέσεις των ρομπότ στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.

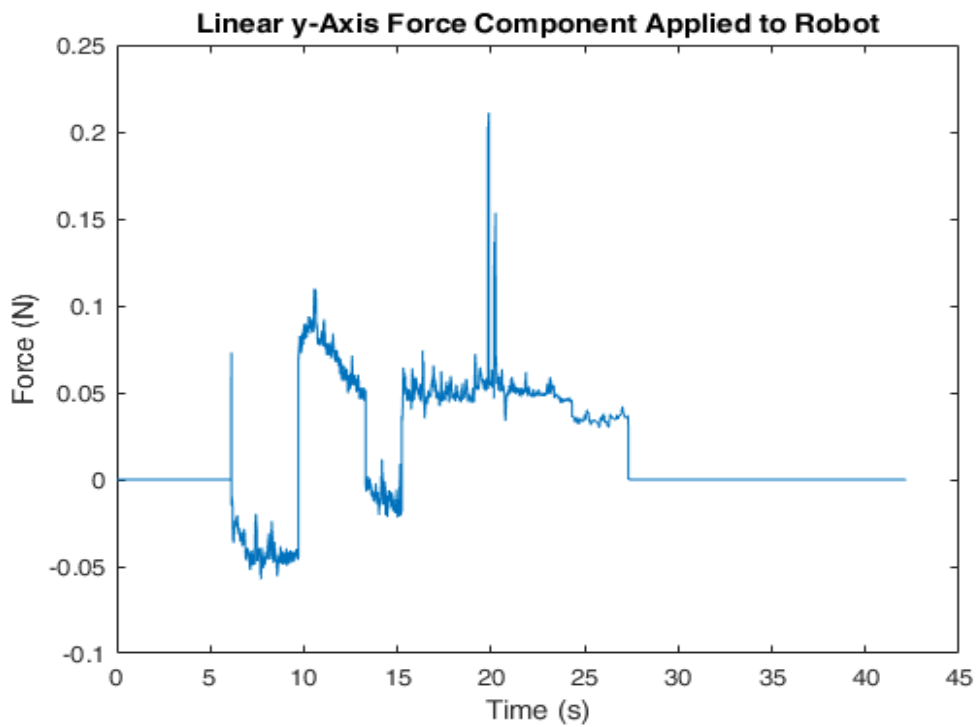
Actual Positions of Active and Passive Robots on Cartesian Surface



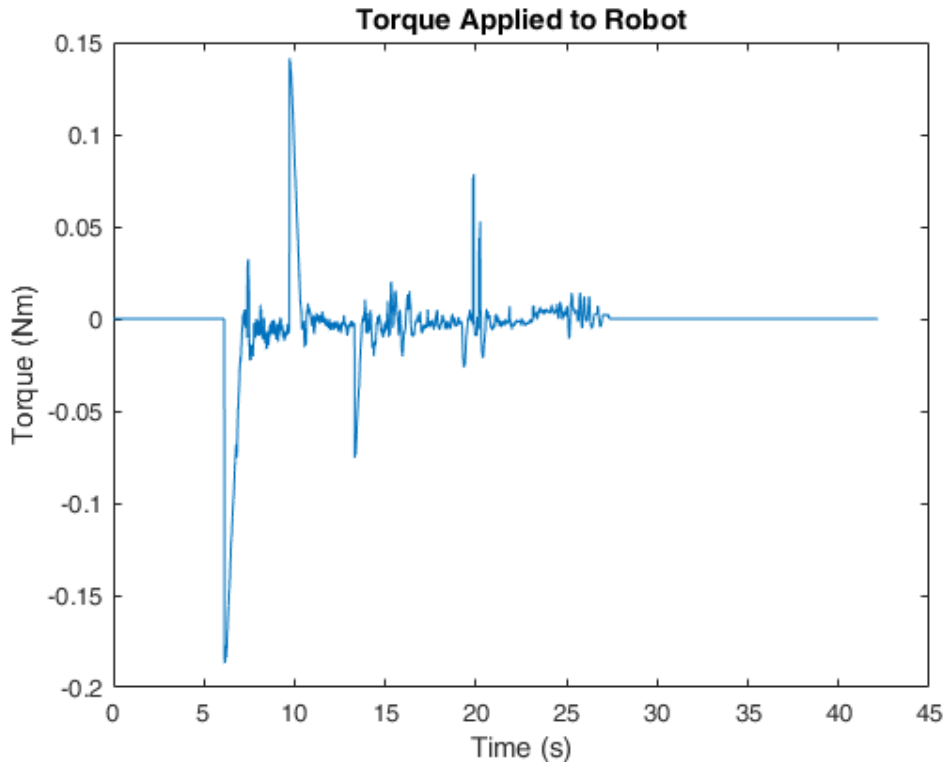
Σχήμα 6.27. Θέσεις των ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.



Σχήμα 6.28. Συνιστώσα της συνολικής δύναμης, που ασκείται στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων του ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος.



Σχήμα 6.29. Συνιστώσα της συνολικής δύναμης, που ασκείται στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων του ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος.



Σχήμα 6.30. Συνισταμένη ροπή, που ασκείται στο ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος.

Κρίνοντας από τα Σχήματα 6.20, 6.21, 6.22, γίνεται κατανοητό πως το σφάλμα μόνιμης κατάστασης του ελεγκτή δεν επηρεάζει την ικανότητα του ενεργητικού ρομπότ να αρπάξει κάτι, αφού λύνεται η αντίστροφη κινηματική για αιωρούμενο ρομπότ με βραχίονες, αφότου απενεργοποιηθεί ο ελεγκτής της βάσης του ρομπότ και οι επενεργητές της, έτσι υπολογίζονται οι σχετικές γωνίες των αρθρώσεων σε πραγματικό χρόνο στη θέση που βρίσκονται τα δύο ρομπότ μετά την κίνηση της βάσης του ενεργητικού.

6.3.4 Πείραμα Σύλληψης Κινούμενου Στόχου Πάνω στην Τράπεζα Γρανίτη

Κατά την πραγματοποίηση του δεύτερου πειράματος πάνω στην τράπεζα γρανίτη, ο στόχος κινούταν με ευθύγραμμες ομαλές κινήσεις (χωρίς την επίδραση δυνάμεων) στους δύο άξονες του επιπέδου, έτσι ώστε με χρήση του ελεγκτή και της μεθόδου υλοποίησης της επιθυμητής κίνησης το ενεργητικό ρομπότ να προσεγγίσει το παθητικό με ίσες γραμμικές ταχύτητες και έπειτα να απενεργοποιηθούν οι επενεργητές της βάσης και μόνο με τη χρήση του δεξιού βραχίονα να αρπάξει το στόχο από το στεφάνι. Οι συνισταμένες δυνάμεις των αξόνων του ρομπότ, που το επιταχύνουν γραμμικά, επιλέχθηκε να είναι ίσες με 0,17N.

Οι γραμμικές ταχύτητες των δύο ρομπότ πριν την κίνηση του βραχίονα προέκυψαν να είναι 0,023m/s στο x-άξονα και -0,012m/s στον y-άξονα.

Όταν προσεγγίστηκε ο στόχος και απενεργοποιήθηκαν οι επενεργητές, η αντίστροφη κινηματική υλοποιήθηκε βάσει των παρακάτω αποτελεσμάτων:

Πίνακας 6.4. Αποτελέσματα, που δοθήκαν κατά την υλοποίηση του πειράματος σύλληψης στόχου στην τράπεζα γρανίτη με κινούμενο στόχο.

x_t (m)	0,2632
y_t (m)	0,05168
φ (rad)	0,19389
q_1 (rad)	-0,75757
q_2 (rad)	1,49866
q_3 (rad)	-0,5472

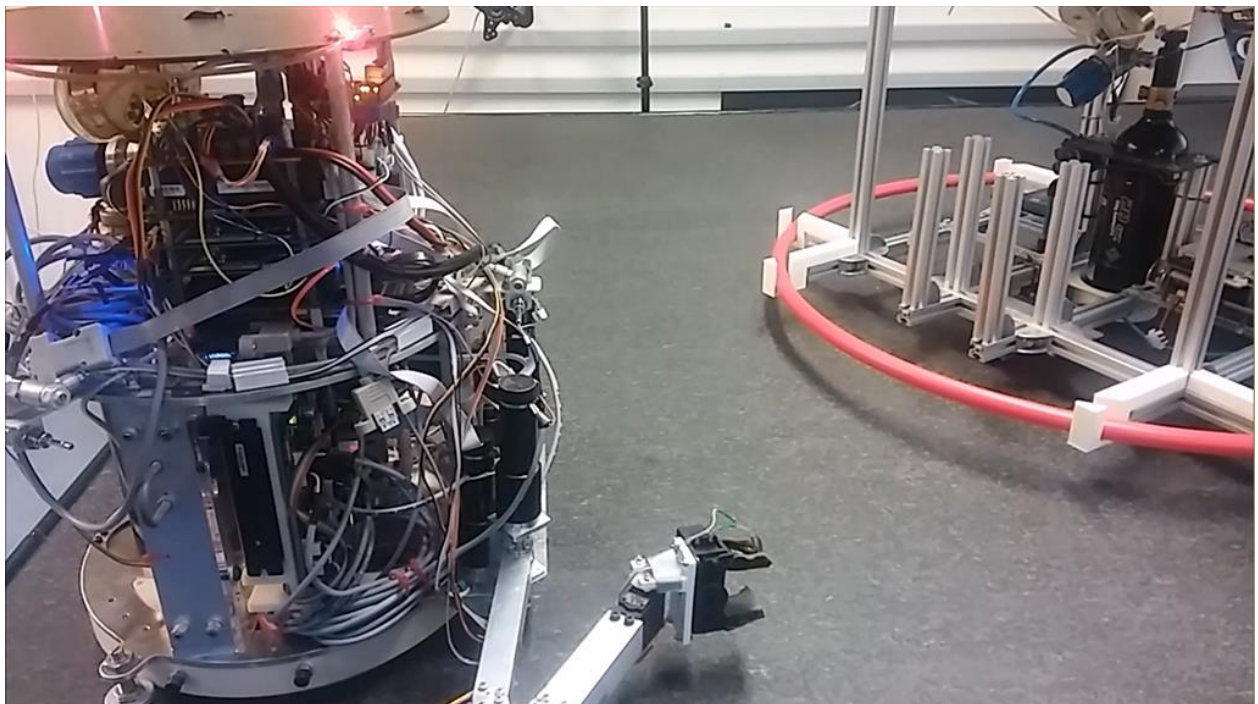
Όπου τα μεγέθη του Πίνακα 6.4 είναι τα αντίστοιχα με του Πίνακα 6.2 και αντιστοιχούν στην απεικόνιση του Σχήματος 6.9.

Για το συγκεκριμένο πείραμα μετά από τα συμπεράσματα του προηγούμενου πειράματος επιλέχθηκε τα κέρδη για τη γραμμική κίνηση του ελεγκτή σύμφωνα με τις (6.6) (6.7) να είναι:

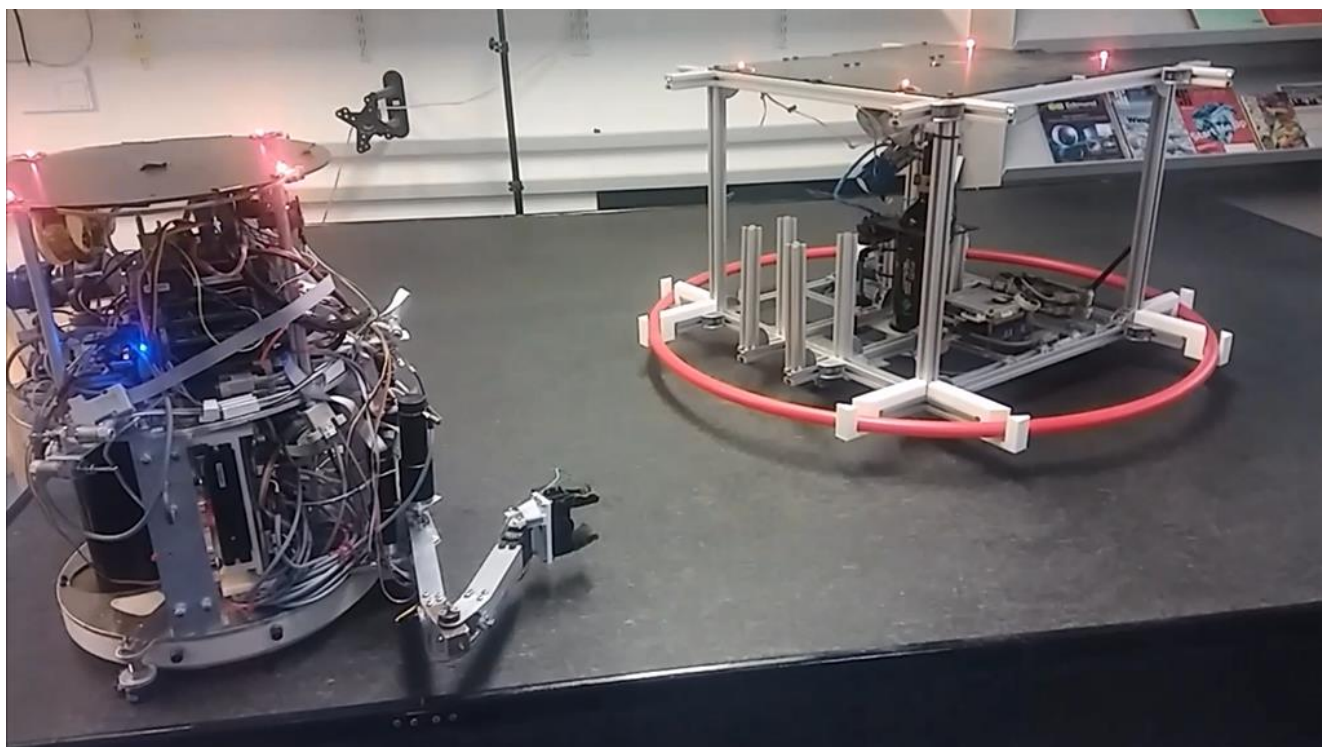
$$K_{plinear} = 1,17 \quad (6.17)$$

$$K_{dlinear} = 7,8 \quad (6.18)$$

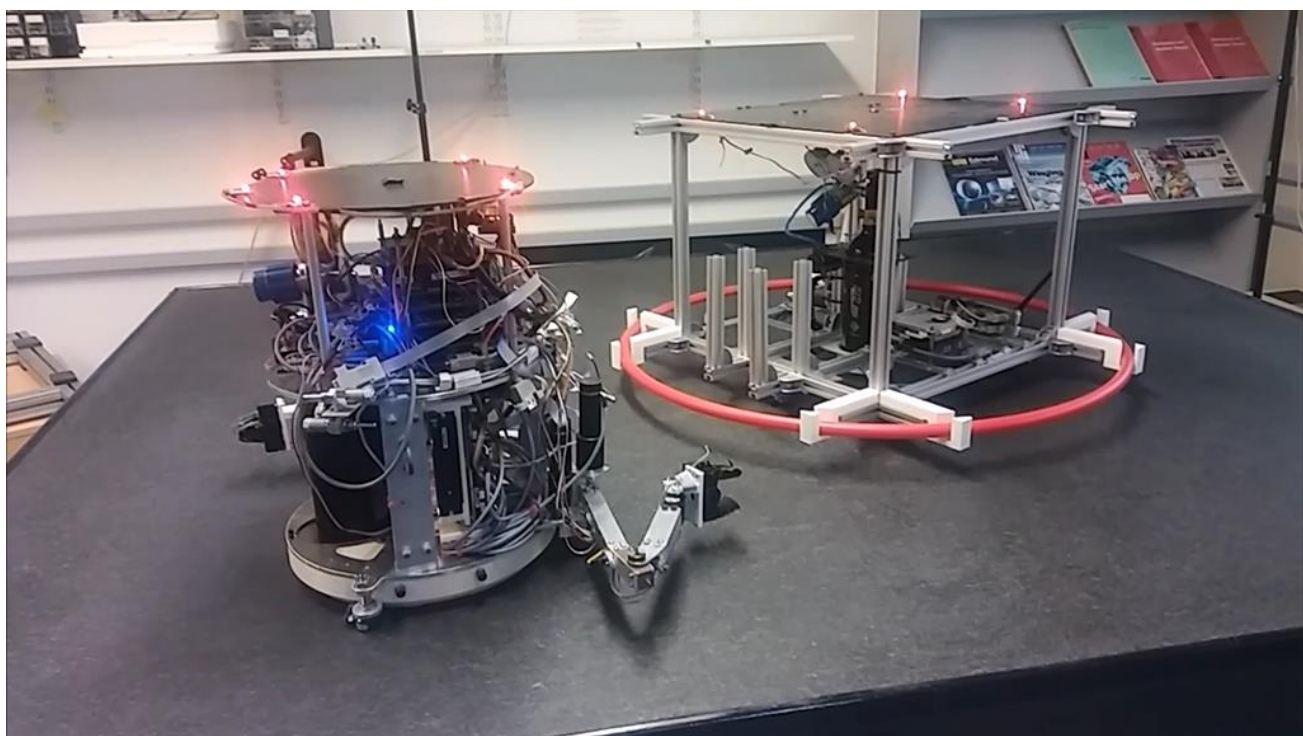
Στα Σχήματα 6.31-6.37 φαίνεται η υλοποίηση του πειράματος πάνω στην τράπεζα γρανίτη, ενώ στα Σχήματα 6.38-6.47 παρουσιάζονται μετρήσεις από τις κάμερες κατά την υλοποίηση αυτού του πειράματος καθώς και η απόδοση του ελεγκτή με τα νέα κέρδη.



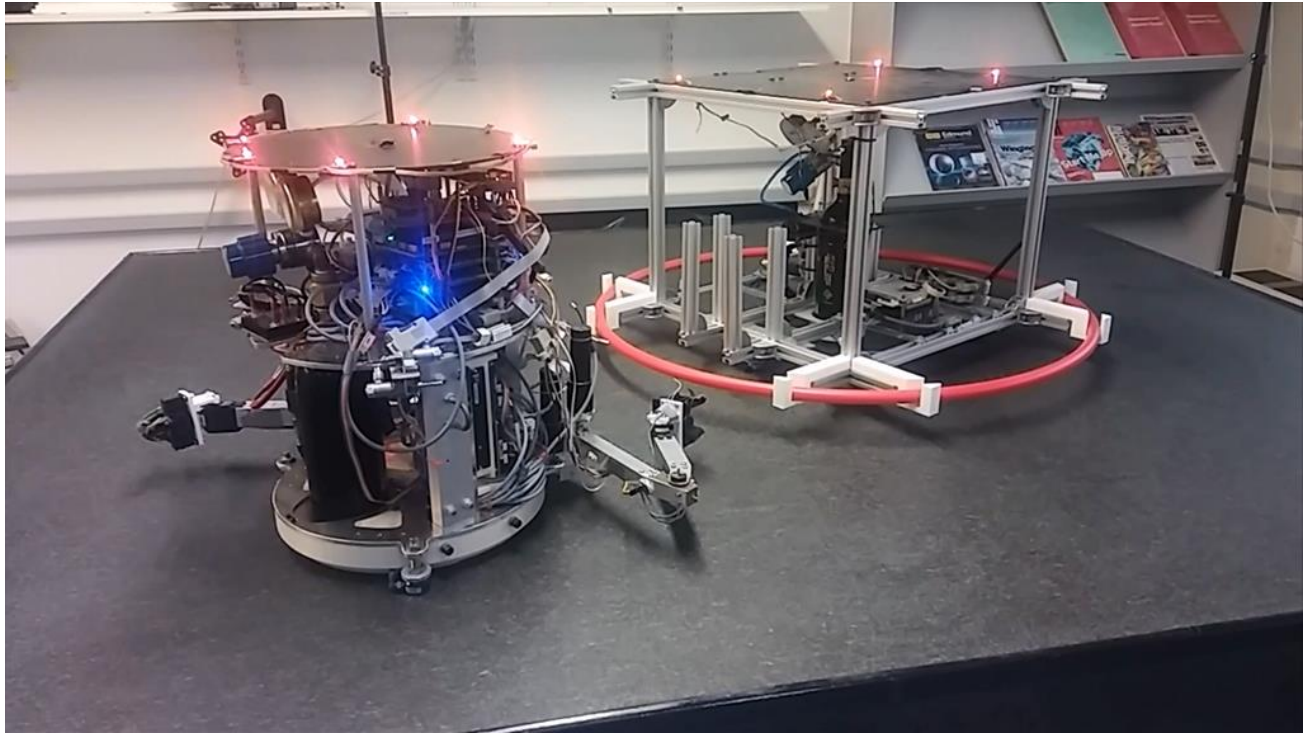
Σχήμα 6.31. Η αρχική θέση των δύο ρομπότ στην τράπεζα γρανίτη.



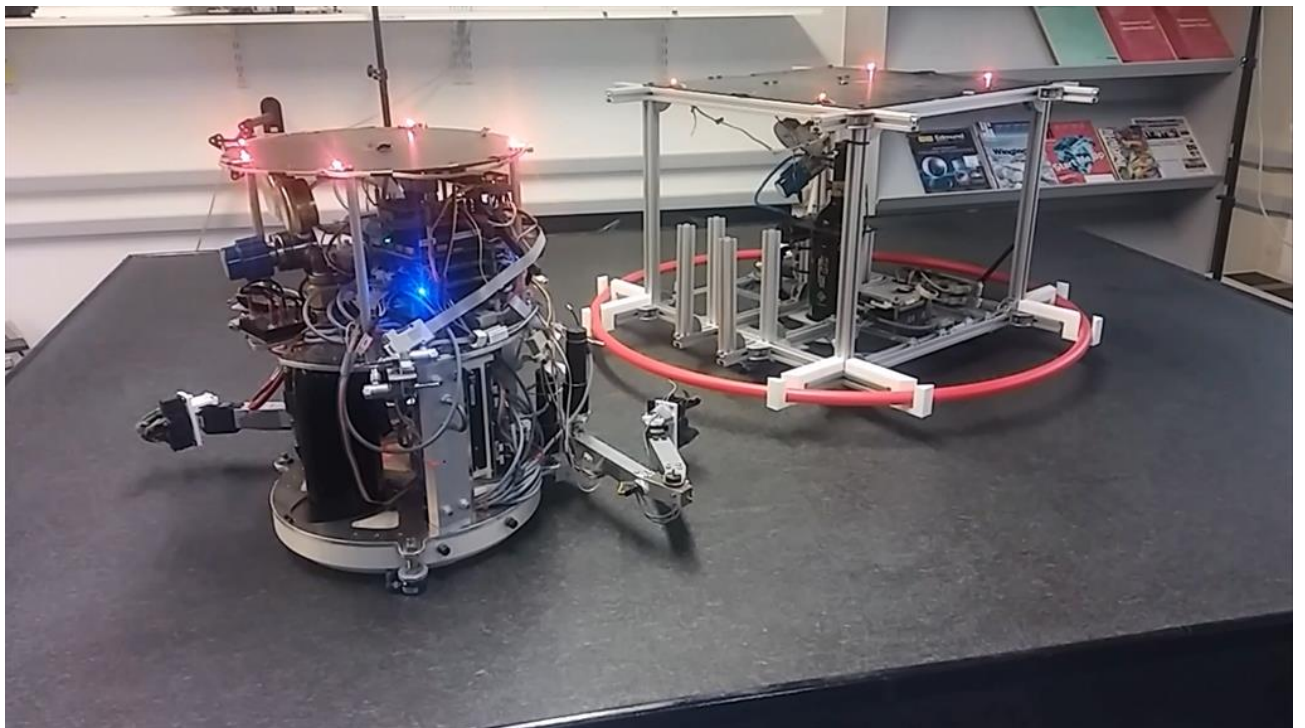
Σχήμα 6.32. Στιγμιότυπο από την υλοποίηση ακολούθησης στόχου (1).



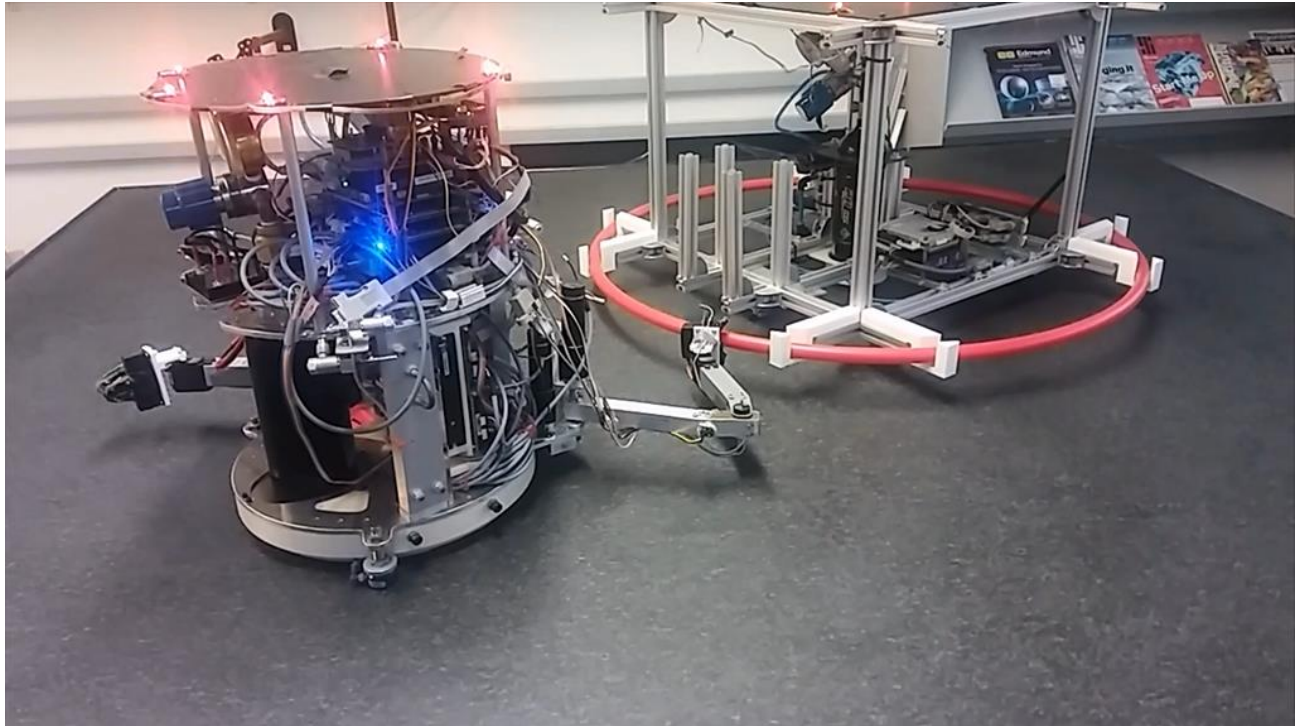
Σχήμα 6.33. Στιγμιότυπο από την υλοποίηση ακολούθησης στόχου (2).



Σχήμα 6.34. Απεικόνιση των δύο ρομπότ, κατά τη διάρκεια του πειράματος, τη στιγμή που απενεργοποιήθηκαν οι επενεργητές.



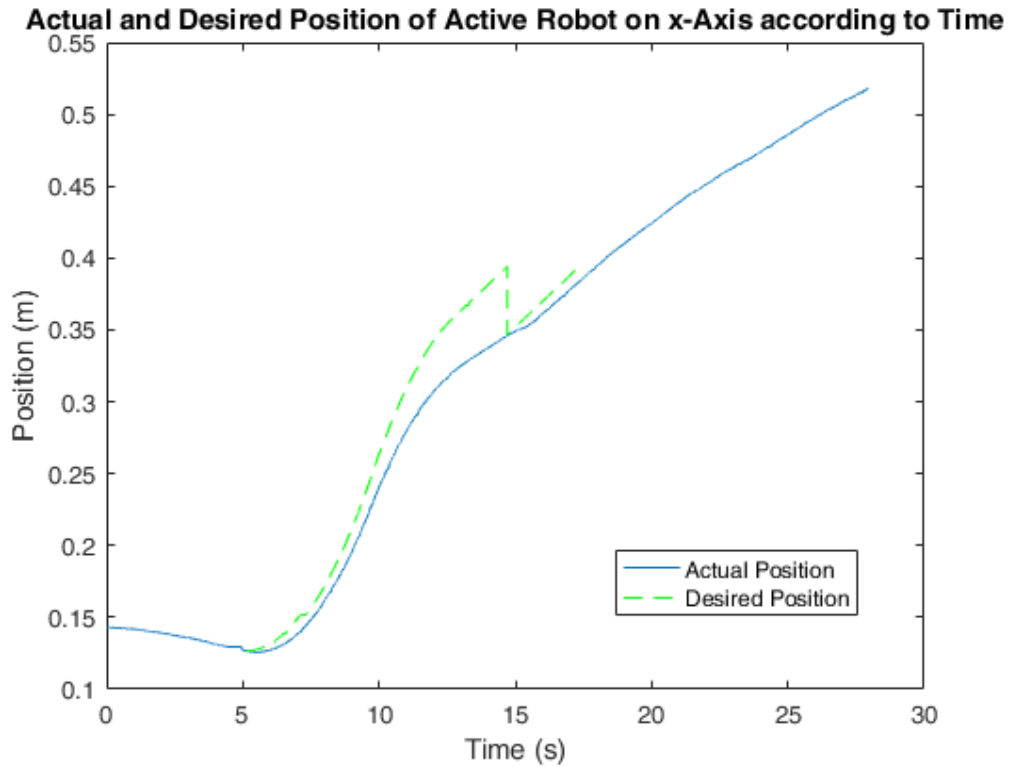
Σχήμα 6.35. Στιγμιότυπο από την υλοποίηση αντίστροφης κινηματικής για αιωρούμενο ρομπότ σε πείραμα πάνω στο γρανίτη (1).



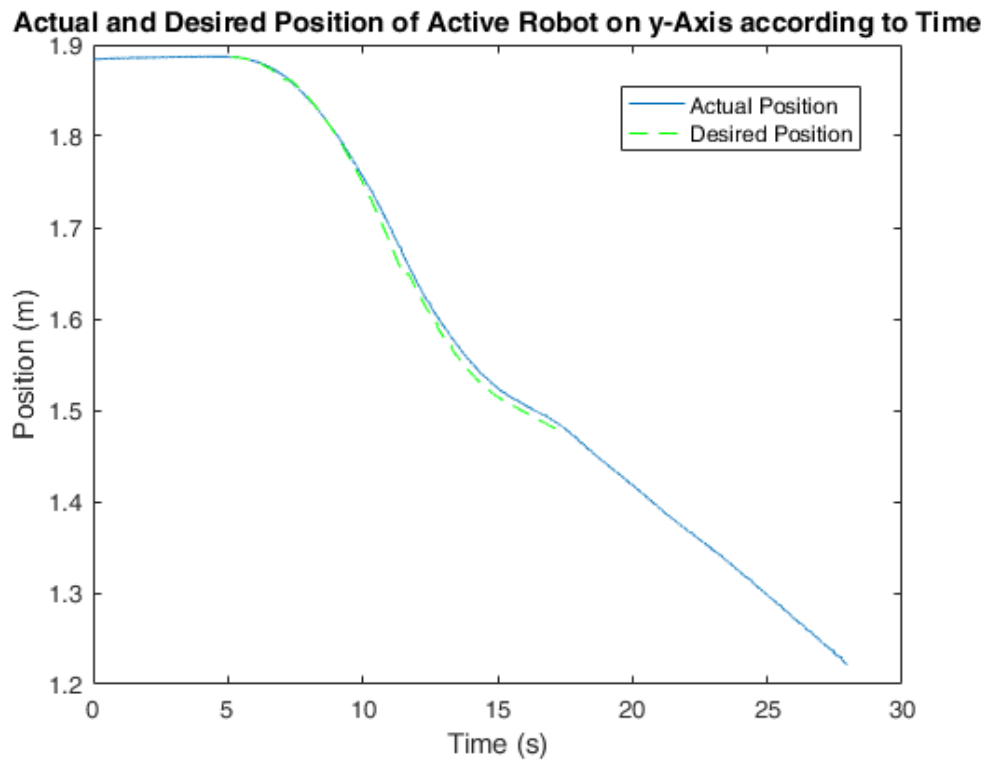
Σχήμα 6.36. Στιγμιότυπο από την υλοποίηση αντίστροφης κινηματικής για αιωρούμενο ρομπότ σε πείραμα πάνω στο γρανίτη (2).



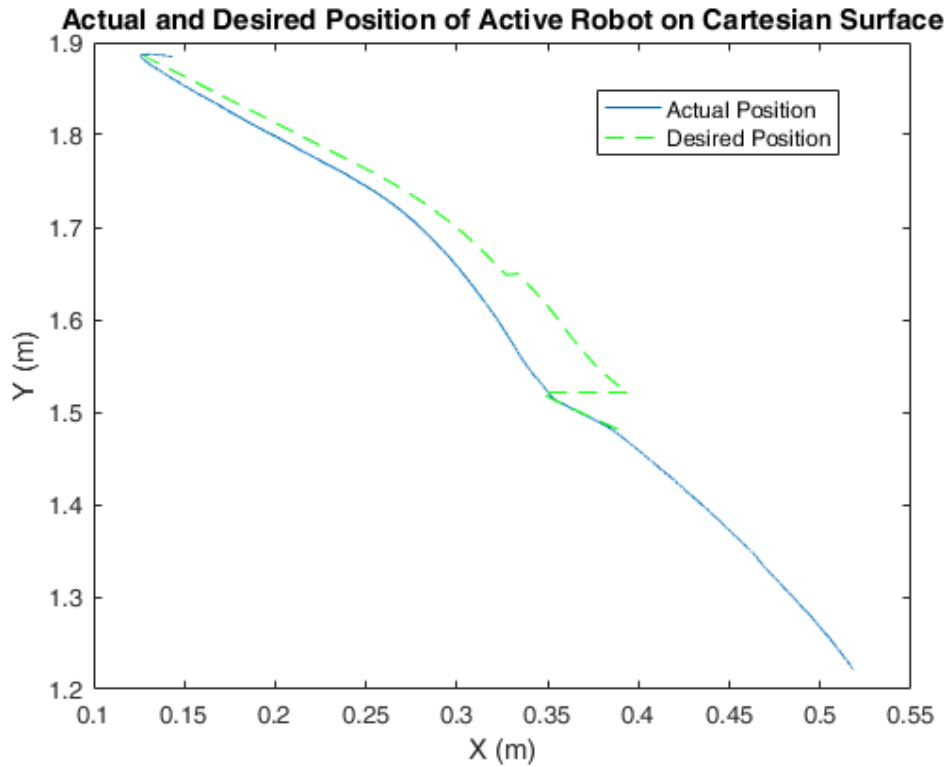
Σχήμα 6.37. Σύλληψη του στεφανιού κατά την υλοποίηση του πειράματος.



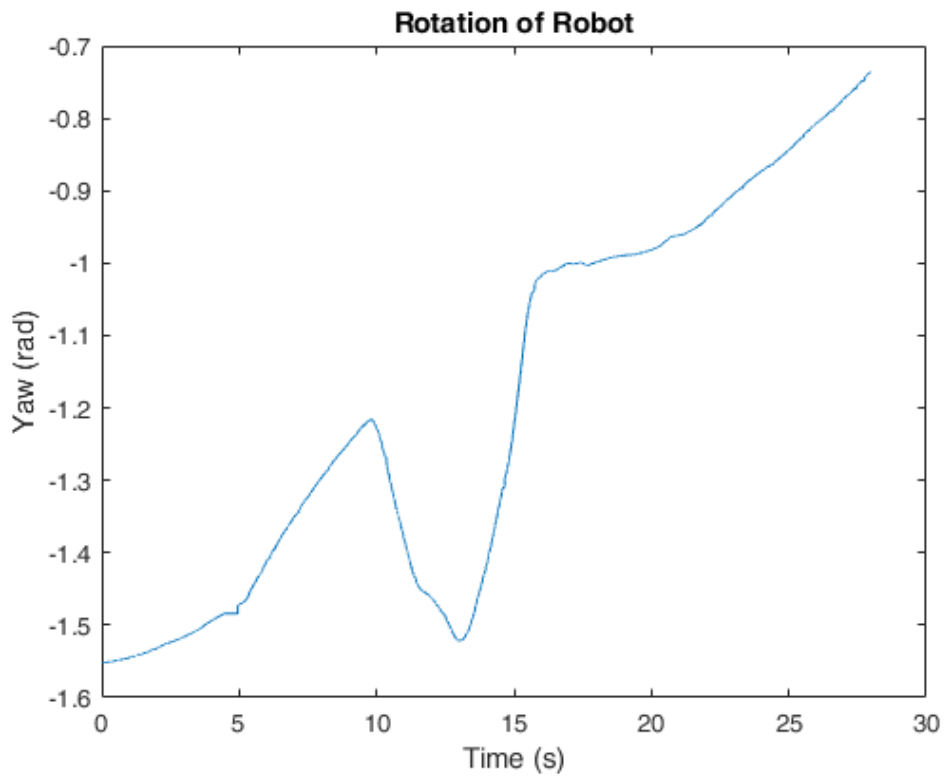
Σχήμα 6.38. Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.



Σχήμα 6.39. Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.

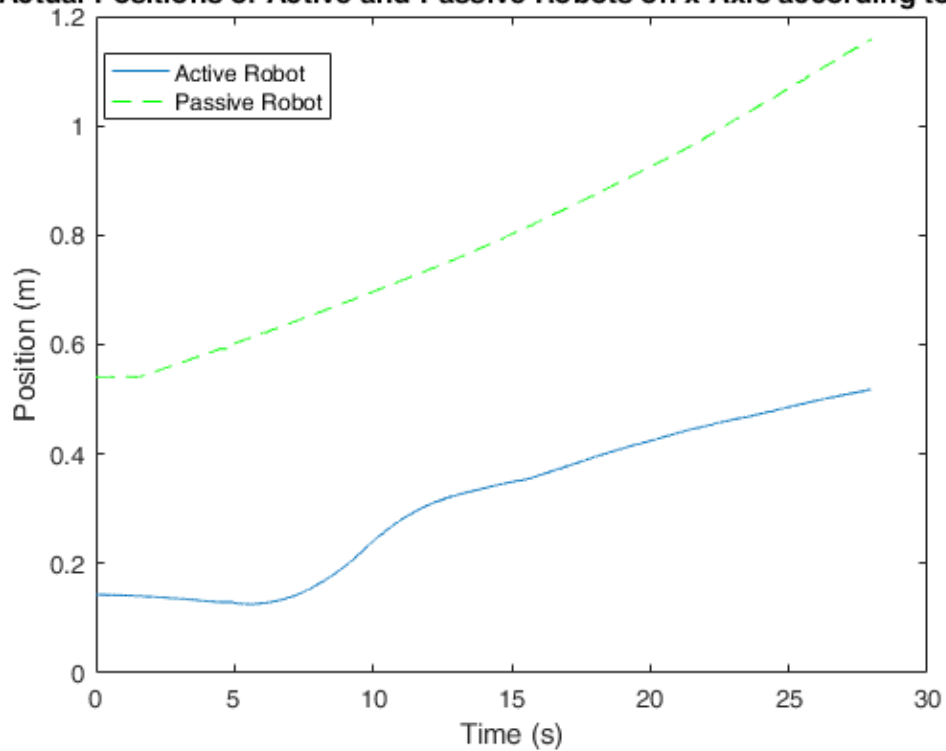


Σχήμα 6.40. Επιθυμητή και πραγματική θέση του ενεργητικού ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.



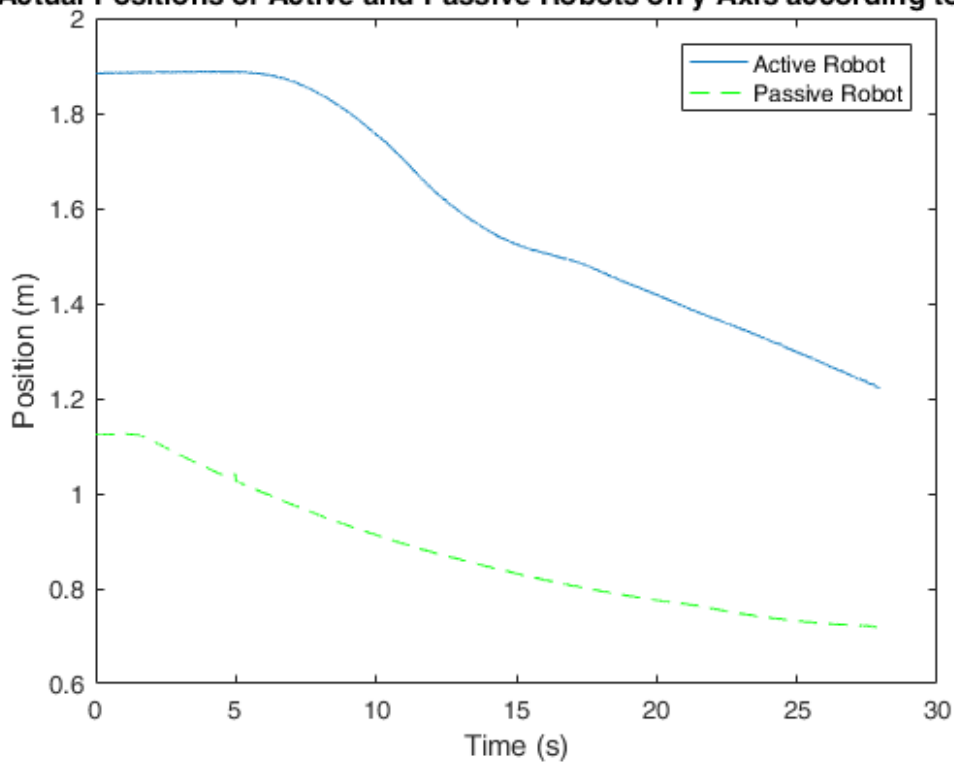
Σχήμα 6.41. Γωνία yaw του ρομπότ ως προς το σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.

Actual Positions of Active and Passive Robots on x-Axis according to Time

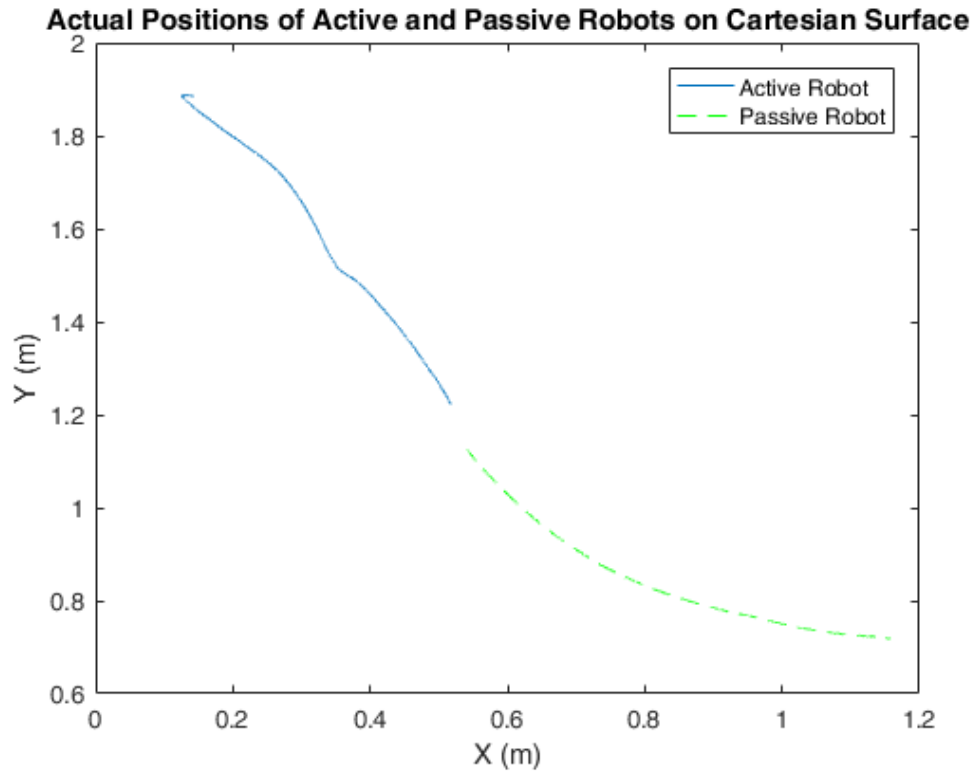


Σχήμα 6.42. Θέσεις των ρομπότ στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.

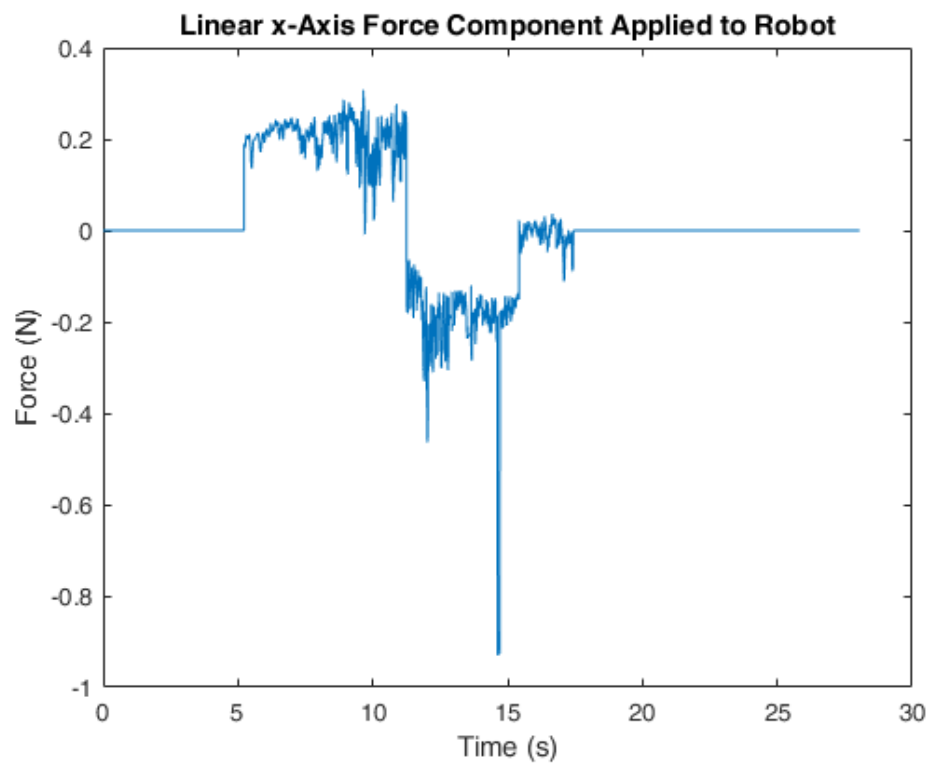
Actual Positions of Active and Passive Robots on y-Axis according to Time



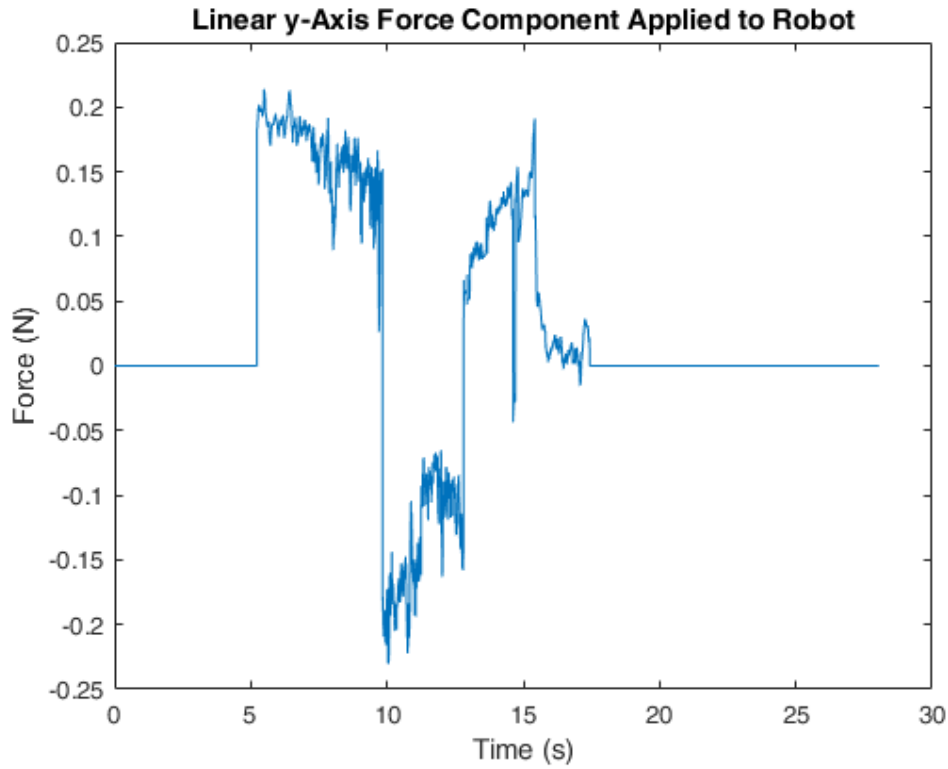
Σχήμα 6.43. Θέσεις των ρομπότ στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.



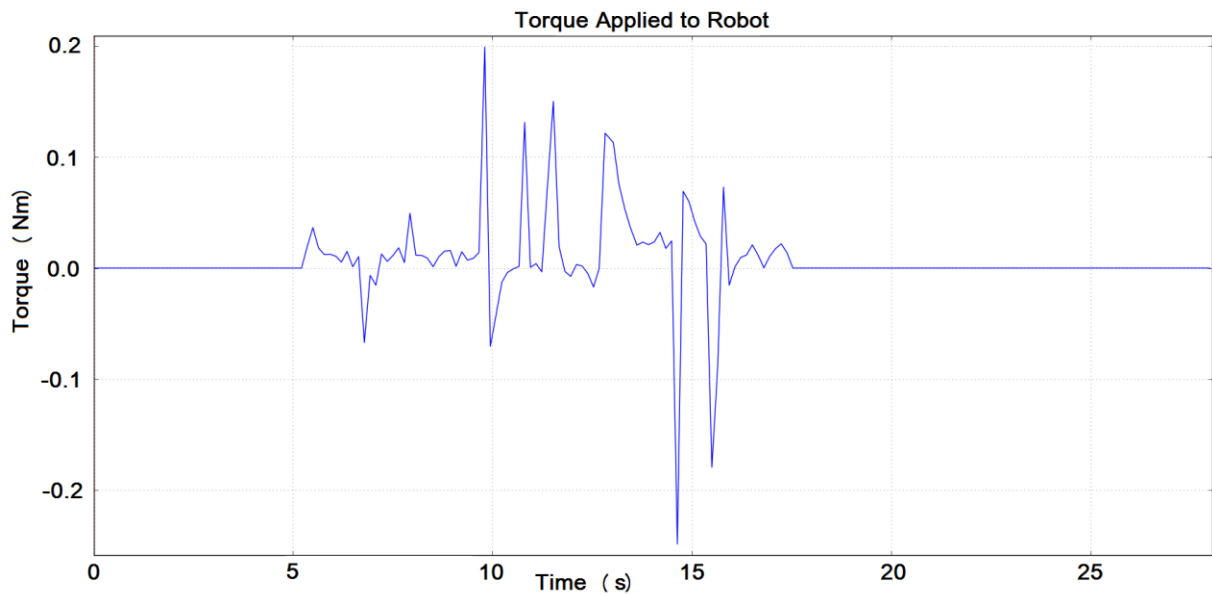
Σχήμα 6.44. Θέσεις των ρομπότ στο σύστημα συντεταγμένων των καμερών κατά την υλοποίηση του πειράματος.



Σχήμα 6.45. Συνιστώσα της συνολικής δύναμης, που ασκείται στον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων του ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος.



Σχήμα 6.46. Συνιστώσα της συνολικής δύναμης, που ασκείται στον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων του ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος.



Σχήμα 6.47. Συνισταμένη ροπή, που ασκείται στο ρομπότ κατά την υλοποίηση του πειράματος.

7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

7.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν με το πέρας αυτής να είναι το ενεργητικό ρομπότ ικανό να πραγματοποιήσει πειράματα παρόμοια με αυτά του Κεφαλαίου 6. Βέβαια, για την επίτευξη αυτού του στόχου ήταν απαραίτητη η αρμονία μεταξύ μηχανικού, πνευματικού και ηλεκτρονικού συστήματος.

Αρχικά, κατασκευάστηκε ο δεύτερος βραχίονας του ενεργητικού ρομπότ. Μελετήθηκαν τα μειονεκτήματα του πρώτου βραχίονα και αναζητηθήκαν τρόποι, με τους οποίους θα μπορούσαν να ελαττωθούν οι επιρροές αυτών. Βασικότερες αλλαγές είναι η προσθήκη νεύρων στο πρώτο μέλος του βραχίονα και η προσθήκη εδράσεων από τεφλόν εμπλουτισμένο με γυαλί, η χρήση του οποίου μετά από την εφαρμογή του στο βραχίονα του ρομπότ συνίσταται για παρόμοιες εφαρμογές στο ρομπότ ή και σε άλλα ρομπότ του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου.

Έπειτα στο ρομπότ προστεθήκαν τρίτες αρθρώσεις και αρπάγη, τις οποίες επενεργούν σερβοκινητήρες. Με τη χρήση αισθητήρων χαμηλού κόστους (FSR) καθώς και με συνηθισμένα υλικά (τσόχα, ελαστικό), είναι δυνατόν κανείς να γνωρίζει τη δύναμη, την οποία ασκεί η αρπάγη σε κάποιο αντικείμενο, καθώς και με τη χρήση ελεγκτή να ορίσει τη δύναμη, την οποία θα ασκεί. Επίσης, η σωστή τοποθέτηση αισθητήρων hall effect, μας δίνει τη δυνατότητα να γνωρίζουμε τη γωνιακή θέση των κινητήρων των μελών των βραχιόνων και να ορίζεται πάντα η αρχική θέση αυτών, για των οποίων τη λειτουργία δίνουν πληροφορίες αυξητικοί rotary encoders. Η τροφοδοσία και οι δυνατότητες ανάγνωσης δεδομένων και αποστολής εντολών από και στα παραπάνω έγινε εφικτή με προσθήκες εξοπλισμού στο ηλεκτρονικό σύστημα του ρομπότ καθώς και με την προσθήκη πλακέτας Arduino, η οποία επικοινωνεί με τον υπολογιστή του ρομπότ.

Όσον αφορά το πνευματικό σύστημα του ρομπότ, μετά από εκτενή μελέτη των δυνατοτήτων του και των χαρακτηριστικών του μεγεθών, κρίθηκε απαραίτητη η μεταβολή των δυνάμεων ώσης των προωθητήρων. Αυτό υλοποιήθηκε με την προσθήκη βαλβίδων ελέγχου ροής, με τις οποίες μπορεί κανείς πλέον χειροκίνητα να ρυθμίσει τη μέγιστη δύναμη ώσης κάθε προωθητήρα στα επιθυμητά μεγέθη. Επίσης, βρέθηκε μια τυπική τιμή για το συντελεστή τριβής της επιφάνειας του γρανίτη, έτσι ώστε να είναι γνωστή μία τιμή δύναμης ώσης, κάτω από την οποία δεν είναι θεμιτό να είναι η μέγιστη δύναμη ώσης των προωθητήρων.

Με την προσθήκη των παραπάνω, προτού να πραγματοποιηθούν πειράματα, ήταν απαραίτητο να βρεθούν οι χώροι εργασίας του ρομπότ, αφού κομβικό σημείο των πειραμάτων είναι η χρήση του νέου βραχίονα. Η εύρεση χώρου εργασίας σε διαστημικό εξομοιωτή έχει μία ιδιαιτερότητα, λόγω της εμφάνισης δυναμικών ιδιομορφιών. Έτσι, αναλύθηκε η μέθοδος, που χρησιμοποιείται και αποσκοπεί στην αποφυγή αυτών.

Η εφαρμογή των παραπάνω οδηγεί στην ομαλή εκπόνηση πειραμάτων αντίστροφης κινηματικής εκτός γρανίτη, αλλά και αντίστροφης κινηματικής πάνω στο γρανίτη με τη βάση και το στόχο να μην είναι προσδεδεμένα κάπου. Η πραγματοποίηση των πειραμάτων επαληθεύει την παραπάνω μέλετη και με το πέρας της εργασίας το ρομπότ είναι ικανό να χρησιμοποιηθεί σε πολλά παραπάνω πειράματα με τη χρήση βραχιόνων, ώστε να προσομοιώνονται οι εργασίες μεταφοράς καυσίμου ή μεταφοράς διαστημικών απορριμμάτων.

7.2 Μελλοντική Εργασία

Από την παραπάνω εργασία το ρομπότ αποκτά μία επιπλέον ικανότητα. Τώρα πλέον μπορούν να υλοποιηθούν στον εξομοιωτή διαστήματος αρκετά πειράματα αρπάγης αντικειμένου ή αντικατάστασης αντικειμένων. Εργασίες, που θα μπορούσαν να εκπονηθούν είναι οι παρακάτω.

- Υλοποίηση μη γραμμικού model-based ελεγκτή στο ρομπότ, όπου θα χρησιμοποιούνται ως επενεργητές της βάσης και οι αρθρώσεις των βραχιόνων και πειραματική επιβεβαίωση αυτού.
- Μετακίνηση της βάσης του ρομπότ σε επιθυμητή θέση και προσανατολισμό (σε κοντινή απόσταση) μόνο με χρήση των αρθρώσεων των βραχιόνων, ώστε να εξομοιώνονται εργασίες για στόχους που είναι πολύ κοντά.
- Εύρεση του χώρου εργασίας του ρομπότ για τους δύο βραχίονες μαζί.
- Πείραμα προσομοίωσης αντικατάστασης μικρού αντικειμένου στο στόχο, που θα απαιτεί μεγαλύτερη ακρίβεια από το σύστημα.
- Υπολογισμός συντελεστών τριβής σε όλη την επιφάνεια της τράπεζας γρανίτη με τα νέα δεδομένα για το πνευματικό σύστημα.
- Εκτόξευση παθητικού ρομπότ από την αρπάγη του ενεργητικού με επιθυμητή γραμμική και στροφική ταχύτητα.
- Προσθήκη βαθμού ελευθερίας γραμμικής κίνησης στον κατακόρυφο άξονα του ρομπότ της βάσης των βραχιόνων, ώστε να αρπάζονται αντικείμενα σε διάφορα ύψη.
- Αποφυγή δυναμικών ιδιομορφιών για μεταβαλλόμενο βάρος του στόχου, που έχει αρπαχθεί.
- Υλοποίηση ελεγκτή δύναμης στην αρπάγη με μικρότερη υπερακόντιση και χρόνο αποκατάστασης.

Βιβλιογραφία

- [1] <http://aluminumsurface.blogspot.com/2011/02/coefficient-of-friction-between.html>.
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Force_sensing_resistor.
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect_sensor.
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Pipe_network_analysis.
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder.
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Wear_coefficient.
- [7] <http://forum.arduino.cc>
- [8] <https://newatlas.com/time-electron-quantum-tunneling/50784/>.
- [9] <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-ss39et-ss49e-ss59et-product-sheet-005850-3-en.pdf>.
- [10] <https://servodatabase.com/servo/feetech/fs5106m>.
- [11] <https://servodatabase.com/servo/hitec/hs-422>.
- [12] <https://tutorial.cytron.io/2011/09/19/how-rc-servo-works/>.
- [13] <https://web.stanford.edu/group/arl/projects/free-flyers>.
- [14] https://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Nano17.
- [15] <https://www.adafruit.com/product/166>.
- [16] <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>.
- [17] <http://www.ella-dagan.com/hall-effect-sensor/>.
- [18] https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html.
- [19] https://www.festo.com/cat/el_gr/data/doc_engb/PDF/EN/GRX-VFO_EN.PDF.
- [20] https://www.festo.com/cat/el_gr/xDKI.asp?PartNo=193156&mode=extApp&xR=DKI3WebDataSheetV1.
- [21] https://www.festo.com/eap/en-gb_gb/DKI3CAD2/start.do?language=en-gb&country=gb&PartNo=193156&mode=extApp.
- [22] https://www.festo.com/cat/en_us/xDKI.asp?PartNo=196123&writePDF=true&xR=DKI3WebDataSheetV1&xL=enus.
- [23] https://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8830469275678/2018EN-125.pdf.
- [24] https://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8831070634014/2018EN-343.pdf.
- [25] https://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8831078924318/2018EN-419.pdf.
- [26] <https://www.newwayairbearings.com/catalog/product/20mm-air-bushings/>.
- [27] <https://www.newwayairbearings.com/catalog/product/25mm-flat-round-air-bearings/>.
- [28] <https://www.renesas.com/in/en/support/technical-resources/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview.html>.
- [29] <https://www.robotgeek.com/rg-gripper-v2>.
- [30] <https://www.robotshop.com/en/lynxmotion-little-grip-kit-no-servos.html>.
- [31] <https://www.rtd.com/PC104/UM/power/atx3510.htm>.
- [32] <https://www.rtdusa.com/PC104/DM/digital%20IO/DM35820.htm>.

- [33] https://www.theplasticshop.co.uk/plastic_technical_data_sheets/glass_filled_ptfe_rod_sheet_data.pdf.
- [34] <http://www.trossenrobotics.com/productdocs/2010-10-26-datasheet-fsr402-layout2.pdf>.
- [35] <https://www.youtube.com/watch?v=ZZhuD78BLDk>.
- [36] Mott, R., L., Untener, J., A., *Applied Fluid Mechanics*, 7th Edition, Pearson Education.
- [37] Papadopoulos, E., "On the Dynamics and Control of Space Manipulators," *PhD Thesis*, Department of Mechanical Engineering, MIT, October 1990.
- [38] Russakow, J., Rock, S., Khatib, O., "An Operational Space Formulation for a Free-flying Multi-arm Space Robot," *Experimental Robotics VII*, LNCIS 223, 1997.
- [39] Stewart C., H., "GPS Pseudolites: Theory, Design and Applications," *PhD Dissertation*, Stanford University, 1997.
- [40] Κυριακόπουλος, Κ., Παπαδόπουλος, Ε., *Σημειώσεις Ρομποτικής*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2004.
- [41] Μήτρος, Ζ., "Ανάλυση, Δυναμική και Έλεγχος Ρομποτικού Συστήματος για Πρόσδεση σε Τροχιακά Διαστημικά Συστήματα," *Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016.
- [42] Νάνος, Κ., "Δυναμική, Προγραμματισμός Τροχιάς και Έλεγχος Διαστημικών Ρομποτικών Συστημάτων Υποκείμενων σε Στροφορμή και Ευκαμψίες," *Διδακτορική Διατριβή*, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.
- [43] Παπαδόπουλος, Ε., *Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας*, Εκδόσεις Φούντα.
- [44] Παπαστεργίου, Γ., "Σχεδιασμός, Υλοποίηση και Έλεγχος Ρομποτικών Βραχιόνων για Ρομπότ Διαστημικού Εξομοιωτή," *Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.
- [45] Πατσιαούρας, Η., "Σχεδιασμός λογισμικού οπτικής ανάδρασης θέσης με εφαρμογή στον έλεγχο διαστημικού εξομοιωτή," *Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.

Παράρτημα Α. Εγχειρίδια Προδιαγραφών Hardware

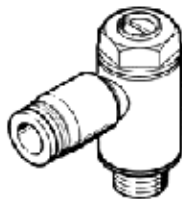
One-way flow control valve GRLZ-1/8-QS-3-D

Part number: 193156

★ Core product range

For supply air flow control, with swivel joint.

FESTO



Data sheet

Feature	Value
Valve function	one-way flow control function for supply air
Pneumatic connection, port 1	QS-3
Pneumatic connection, port 2	G1/8
Adjusting element	Slotted head screw
Mounting type	Threaded
Standard nominal flow rate in flow control direction	130 l/min
Standard nominal flow rate in non-return direction	100 ... 130 l/min
Ambient temperature	-10 ... 60 °C
Assembly position	Any
Operating pressure complete temperature range	0.2 ... 10 bar
Standard flow rate in direction of flow control: 6 -> 0 bar	200 l/min
Standard flow rate in blocked direction: 6 -> 0 bar	180 ... 200 l/min
Operating medium	Compressed air in accordance with ISO6573-1:2010 [7:4:4]
Note on operating and pilot medium	Lubricated operation possible (subsequently required for further operation)
Medium temperature	-10 ... 60 °C
Maritime classification	see certificate
Nominal tightening torque	3 Nm
Tolerance for nominal tightening torque	± 10 %
Product weight	22 g
Material of threaded plug	Wrought Aluminum alloy
Materials note	Conforms to RoHS
Material seals	NBR
Material release ring	POM
Material adjusting screw	Brass
Material swivel fitting	Zinc die-casting Chromed

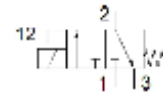
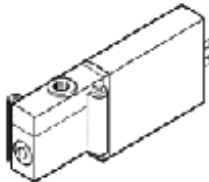
Σχήμα Α. 1. Data Sheet ρυθμιζόμενων βαλβίδων GRLZ-1/8-QS-3-D της FESTO [20].

Solenoid valve MHP2-MS1H-3/2G-M5

Part number: 198123

FESTO

Individual valve, fast switching.



Data sheet

Feature	Value
Valve function	3/2 closed, monostable
Type of actuation	electrical
Width	10 mm
Standard nominal flow rate	100 l/min
Working pressure	-0.9 ... 8 bar
Design structure	Pressure-relieved poppet valve
Type of reset	mechanical spring
Protection class	IP65
Authorization	RCM Mark c UL us - Recognized (OL)
Nominal size	2 mm
Grid dimension	14 mm
Exhaust-air function	throttlicable
Sealing principle	soft
Assembly position	Any
Manual override	Pushing
Type of piloting	direct
Flow direction	reversible with restrictions
Lap	Underlap
Polarity protected	Bipolar
Additional functions	Spark arresting Reduction of holding current Protective circuit
Working pressure, reversible	-0.9 ... 1 bar
Maximum switching frequency	330 Hz
Switching time off	2 ms
Switching time on	1.7 ms
Tolerance for Switching time ON	+10%/-30%
Tolerance for Switching time OFF	+10%/-30%
Measuring of the switching time at 1 Hz and above	0.2 ms
Duty cycle	100%
Characteristic coil data	24 V DC: low-current phase 1.25 W, high-current phase 5 W
Permissible voltage fluctuation	+/- 10 %
Operating medium	Compressed air in accordance with ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Note on operating and pilot medium	Lubricated operation possible (subsequently required for further operation)
CE symbol (see declaration of conformity)	according to EU-EMV guideline
Vibration resistance	Transport application test at severity level 2 in accordance with FN 942017-4 and EN 60068-2-6
Shock resistance	Shock test with severity level 2 in accordance with FN 942017-5 and EN 60068-2-27
Restriction ambient and medium temperature	related to switching frequency
Corrosion resistance classification CRC	2 - Moderate corrosion stress
Medium temperature	-5 ... 40 °C

Σχήμα Α. 2. Data sheet ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων MHP2-MS1H-3/2G-M5 της FESTO (1) [22].

Feature	Value
Ambient temperature	-5 ... 40 °C
Product weight	60 g
Electrical connection	Plug 2-pin
Mounting type	On PR manifold
Pneumatic connection, port 1	Subbase
Pneumatic connection, port 2	M5
Pneumatic connection, port 3	Subbase
Materials note	Free of copper and PTFE Conforms to RoHS
Material seals	HNBR NBR
Material housing	Zinc die-casting coated
Material screws	Steel Galvanized

Σχήμα Α. 3. Data sheet ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων MHP2-MS1H-3/2G-M5 της FESTO (2) [22].

SPECIFICATIONS: 25mm #S102501	
Input Pressure	.41 MPa (60psi)
Ideal Load N (lbs)	80 (18)
Stiffness N/micron (lbs/u in) ¹	18 (0.10)
Flow NLPM (SCFH) ¹	0.53 (1.2)
Fly Height ¹	5 microns
Bearing Size	25mm
Bearing Height mm (in)	13 (0.52)
Bearing Weight grams (oz.)	14 (0.5)
Housing Material/Finish	Aluminum/Anodized
Porous Media Material	Carbon
Bearing Face Surface Size - Carbon mm (in)	23mm (0.906) ϕ
Flatness mm (in)	0.0005 (0.00002)
Ball Socket Size	13mm
Pressure Port Thread	M3 X 0.5
Viable Pressure Range	.414-.552MPa (60psi - 80psi)
Maximum Allowable Pressure Supply	.689 MPa (100psi)
Resolution ³	Infinite
Maximum Speed ⁴	50m/sec
Common Guide Surfaces	Granite, hard-coated aluminum, ceramics, glass, stainless steel, plated steel
Suggested Guide Surface Finish ⁵	16 RMS

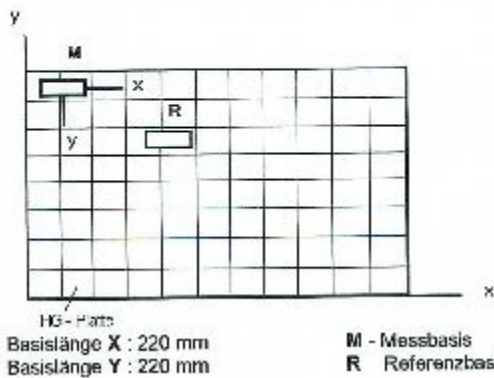
Σχήμα Α. 4. Data sheet για τα αεροέδρανα των ρομπότ της New Way Air Bearings [27].

WERKSPRÜFSCHEIN mit Bestätigung der Rückführbarkeit

NR.: 4816

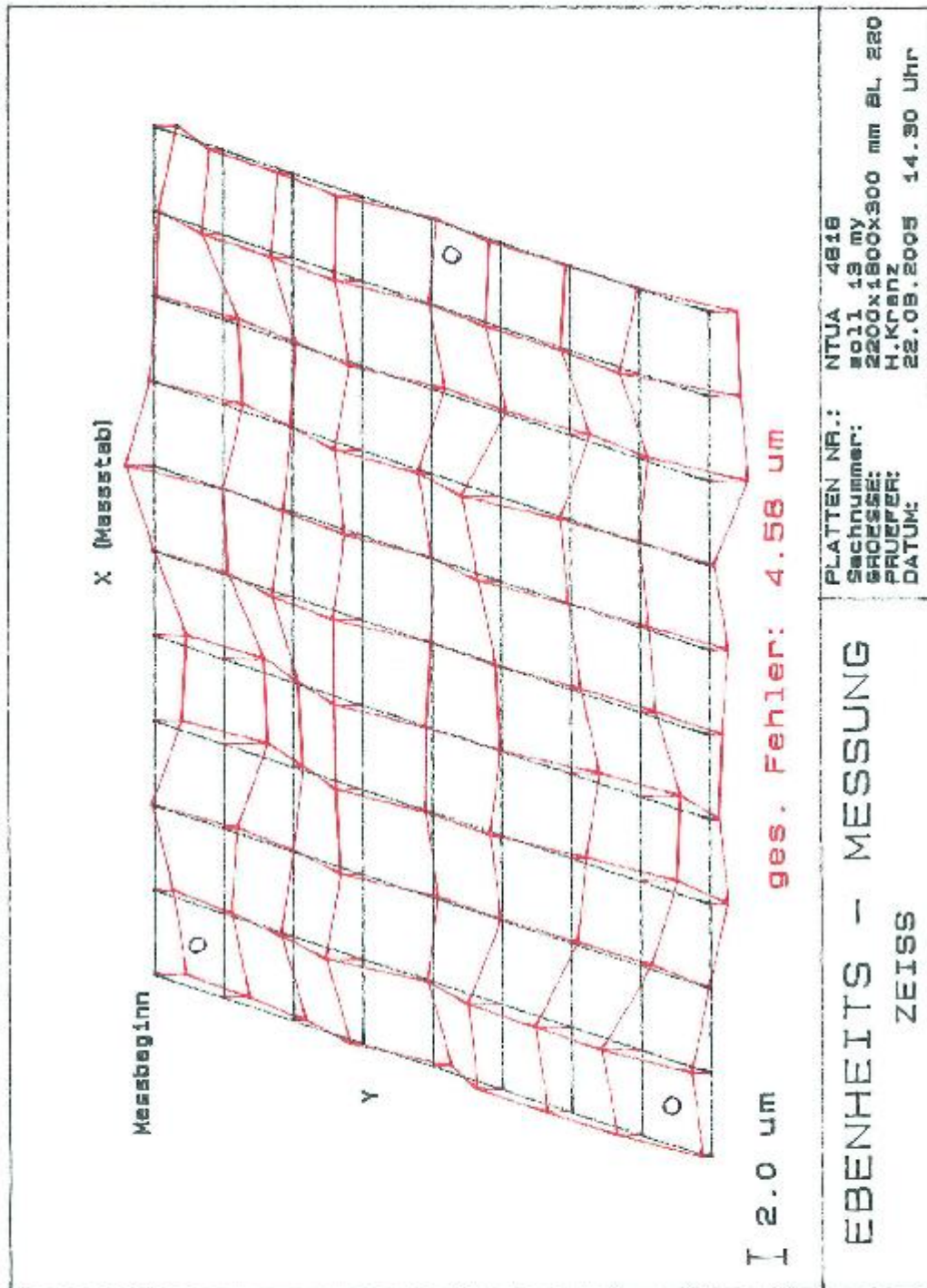
MESSEN DER EBENHEIT

Punktweise Neigungsmessung zwischen den Antaststellen der Messfläche, vorgewählt als Punkte eines quadratischen NetZRasters der Basislängen $X \times Y$ mm. Anschließende Verknüpfung der Messergebnisse in Länge- und Querrichtung zur Bestimmung der Ebenheitsabweichung.



Alle qualitätsrelevanten Mess- und Prüfmittel werden in regelmäßigen Abständen überprüft. Die Firma OELZE Präzisions-Messzeugfabrik GmbH ist Kalibrierlaboratorium des Deutschen Kalibrierdienstes für die Messgrößen Geradheit, Ebenheit und Rechtwinkligkeit, akkreditiert durch die Physikalisch Technische Bundesanstalt (Braunschweig). Die Messmittel für Geradheits- und Ebenheitsmessungen werden mit dem kalibrierten Autokollimationsfernrohr Elcomat 2000 (Hersteller: Moller Wedel), amtliches Zeichen 4691 PTB 04 überprüft.

Σχήμα Α. 5. Data sheet για την τράπεζα γρανίτη της OELZE Präzisions-Messzeugfabrik GmbH (1).



Σχήμα Α. 6. Data sheet για την τράπεζα γρανίτη της OELZE Praezisions-Messzeugfabrik GmbH (2).

SS39ET/SS49E/SS59ET Series

Table 1. Operating Characteristics ($V_s = 5.0\text{ V}$, $T_A = -40\text{ }^\circ\text{C}$ to $85\text{ }^\circ\text{C}$ [$-40\text{ }^\circ\text{F}$ to $185\text{ }^\circ\text{F}$], except where noted)

Characteristic	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Output type		linear, sourcing			—
Magnetics type		analog			—
Supply voltage	—	2.7	—	6.5	Vdc
Supply current	25 °C [77 °F]	—	8	10	mA
Output voltage	—	1.0	1.4	1.75	mV/Gauss
Output current	$V_s > 3.0\text{ V}$	1.0	1.5	1.5	mA
Null	0 Gauss, 25 °C	2.25	2.50	2.75	Vdc
Output voltage span	—	1.05 to ($V_s - 1.05$)	0.95 to ($V_s - 0.95$)	—	Vdc
Magnetic range	—	± 850	± 1000	—	Gauss
Sensitivity	25 °C	1.0	1.4	1.75	mV/Gauss
Operating temperature	—	-40 [-40]	—	100 [212]	°C [°F]
Temperature error:					
Null drift	—	-0.10	—	0.10	%/°C
Sensitivity drift	$\geq 25\text{ }^\circ\text{C}$	-0.15	—	0.05	
	$\leq 25\text{ }^\circ\text{C}$	-0.04	—	0.185	
Linearity	—	—	-0.7	—	% of span
Response time	—	—	3	—	μs

Table 2. Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Parameter
Supply voltage (V_s)	-5.0 Vdc to 8.0 Vdc
Output current	10 mA
Storage temperature	-55 °C to 165 °C [-67 °F to 329 °F]

NOTICE

Absolute maximum ratings are the extreme limits that the device will withstand without damage to the device. However, the electrical and mechanical characteristics are not guaranteed as the maximum limits (above recommended operating conditions) are approached, nor will the device necessarily operate at absolute maximum ratings.



Figure 1. Current Sourcing Output Block Diagram

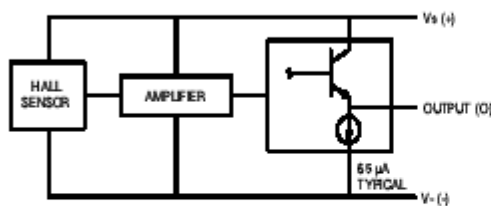
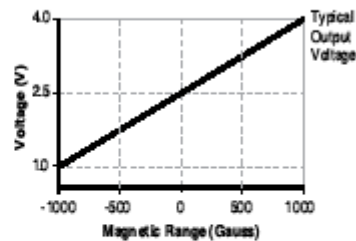


Figure 2. Transfer Characteristics ($V_s = 5.0\text{ Vdc}$)



sensing.honeywell.com 3

Σχήμα Α. 7. Data sheet για τον αισθητήρα hall sensor SS49E της Honeywell που χρησιμοποιείται [9].

Features and Benefits

- Actuation Force as low as 0.1N and sensitivity range to 10N.
- Easily customizable to a wide range of sizes
- Highly Repeatable Force Reading; As low as 2% of initial reading with repeatable actuation system
- Cost effective
- Ultra thin; 0.45mm
- Robust; up to 10M actuations
- Simple and easy to integrate

Industry Segments

- Game controllers
- Musical instruments
- Medical device controls
- Remote controls
- Navigation Electronics
- Industrial HMI
- Automotive Panels
- Consumer Electronics

Description

Interlink Electronics FSR™ 400 series is part of the single zone Force Sensing Resistor™ family. Force Sensing Resistors, or FSRs, are robust polymer thick film (PTF) devices that exhibit a decrease in resistance with increase in force applied to the surface of the sensor. This force sensitivity is optimized for use in human touch control of electronic devices such as automotive electronics, medical systems, and in industrial and robotics applications.

The standard 402 sensor is a round sensor 18.28 mm in diameter. Custom sensors can be manufactured in sizes ranging from 5mm to over 600mm. Female connector and short tail versions can also be ordered.



Figure 1 - Force Curve

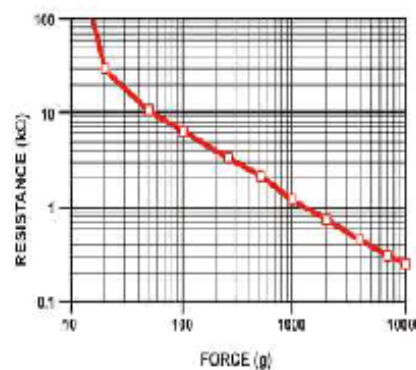
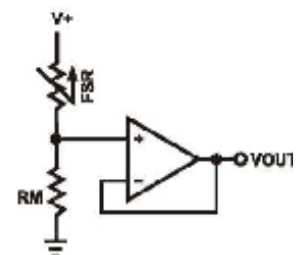


Figure 2 - Schematic



Interlink Electronics - Sensor Technologies

www.interlinkelectronics.com

Applications

Detect & qualify press

Sense whether a touch is accidental or intended by reading force

Use force for UI feedback

Detect more or less user force to make a more intuitive interface

Enhance tool safety

Differentiate a grip from a touch as a safety lock

Find centroid of force

Use multiple sensors to determine centroid of force

Detect presence, position, or motion

Of a person or patient in a bed, chair, or medical device

Detect liquid blockage

Detect tube or pump occlusion or blockage by measuring back pressure

Detect proper tube positioning

Many other force measurement applications

Device Characteristics

Feature	Condition	Value*	Notes
Actuation Force		0.1 Newtons	
Force Sensitivity Range		0.1 - 10.0 ² Newtons	
Force Repeatability ³	(Single part)	± 2%	
Force Resolution ³		continuous	
Force Repeatability ³	(Part to Part)	±6%	
Non-Actuated Resistance		10M W	
Size		18.28mm diameter	
Thickness Range		0.2 - 1.25 mm	
Stand-Off Resistance		>10M ohms	Unloaded, unbent
Switch Travel	(Typical)	0.05 mm	Depends on design
Hysteresis ³		+10%	$(R_{F_{max}} - R_{F_{min}}) / R_{F_{min}}$
Device Rise Time		<3 microseconds	measured w/steel ball
Long Term Drift		<5% per log ₁₀ (time)	35 days test, 1kg load
Temp Operating Range	(Recommended)	-30 - +70 °C	
Number of Actuations	(Life time)	10 Million tested	Without failure

* Specifications are derived from measurements taken at 1000 grams, and are given as one standard deviation / mean, unless otherwise noted.

1. Max Actuation force can be modified in custom sensors.
2. Force Range can be increased in custom sensors. Interlink Electronics have designed and manufactured sensors with operating force larger than 50Kg.
3. Force sensitivity dependent on mechanics, and resolution depends on measurement electronics.

Σχήμα Α. 9. Data sheet για τον αισθητήρα FSR 402 της Interlink που χρησιμοποιείται (2) [34].

Application Information

FSRs are two-wire devices with a resistance that depends on applied force.

For specific application needs please contact Interlink Electronics support team. An integration guide is also available.

For a simple force-to-voltage conversion, the FSR device is tied to a measuring resistor in a voltage divider configuration (see Figure 3). The output is described by the equation:

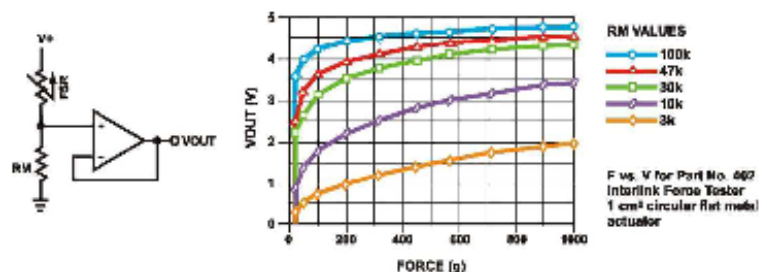
$$V_{OUT} = \frac{R_M V +}{(R_M + R_{FSR})}$$

In the shown configuration, the output voltage increases with increasing force. If R_{FSR} and R_M are swapped, the output swing will decrease with increasing force.

The measuring resistor, R_M , is chosen to maximize the desired force sensitivity range and to limit current. Depending on the impedance requirements of the measuring circuit, the voltage divider could be followed by an op-amp.

A family of force vs. V_{OUT} curves is shown on the graph below for a standard FSR in a voltage divider configuration with various R_M resistors. A $V(+)$ of +5V was used for these examples.

Figure 3





Custom Search

Search

[繁體中文](#) | [English](#) | [Español](#) | [日本語](#) | [Português](#)
[Home](#) | [Products](#) | [Library](#) | [Company](#) | [Contact Us](#) | [Site Map](#)

F/T Sensor: Nano17

[Home](#) > [Products](#) > [Force/Torque Sensors](#) > [F/T Models](#) > [Nano17](#)

Product Advantages

- The Smallest Commercially Available 6-axis Transducer in the World: The Nano17 fits into restricted spaces of research applications.
- Very-Fine Resolution: Can resolve down to 0.318 gram-force.
- Extremely-High Strength: EDM wire-cut from high yield-strength stainless steel. Maximum allowable single-axis overload values are 3.1 to 13.8 times rated capacities.
- High Signal-to-Noise Ratio: Silicon strain gages provide a signal 75 times stronger than conventional foil gages. This signal is amplified, resulting in near-zero noise distortion.
- Industrial Strain Relief Version Available: E-exit version of this transducer also available and offers resistance to a 10 lb cable pull force.
- IP65 and IP68 (30m) Versions Available: The IP65 version of the transducer is protected against water spray. The IP68 version is submersible in fresh water to a depth of 10 meters.



Nano17-E Transducer

Typical Applications

- Dental research
- Robotic surgery
- Robotic-hand research
- Finger-force research

[Ranges and Resolutions](#) | [Specifications](#) | [Drawings](#) | [Documents](#)

Select a system type. (For more information on system types, please see our [F/T Product Description](#) page.)

16-Bit DAQ, ECAT, Net, TWE or WNet F/T System
 Controller F/T System

Standard Calibrations (US)

Calibration	Fx,Fy	Fz	Tx,Ty	Tz	Fx,Fy	Fz	Tx,Ty	Tz
US-3-1	3 lbf	4.25 lbf	1 lbf-in	1 lbf-in	1/1280 lbf	1/1280 lbf	1/8000 lbf-in	1/8000 lbf-in
US-6-2	6 lbf	8.5 lbf	2 lbf-in	2 lbf-in	1/640 lbf	1/640 lbf	1/4000 lbf-in	1/4000 lbf-in
US-12-4	12 lbf	17 lbf	4 lbf-in	4 lbf-in	1/320 lbf	1/320 lbf	1/2000 lbf-in	1/2000 lbf-in
SENSING RANGES				RESOLUTION				

[View Standard \(US\) Complex Loading Graph](#)

Metric Calibrations (SI)

Calibration	Fx,Fy	Fz	Tx,Ty	Tz	Fx,Fy	Fz	Tx,Ty	Tz
SI-12-0.12	12 N	17 N	120 Nmm	120 Nmm	1/320 N	1/320 N	1/64 Nmm	1/64 Nmm
SI-25-0.25	25 N	35 N	250 Nmm	250 Nmm	1/160 N	1/160 N	1/32 Nmm	1/32 Nmm
SI-50-0.5	50 N	70 N	500 Nmm	500 Nmm	1/80 N	1/80 N	1/16 Nmm	1/16 Nmm
SENSING RANGES				RESOLUTION				

[View Metric \(SI\) Complex Loading Graph](#)

*The resolution is typical for most applications and can be improved with filtering.
 **Resolutions quoted are the effective resolution after dropping four counts of noise.
 ***Applied loads must be within range in each of the six axes for the F/T sensor to measure correctly.

ATI's F/T calibrations are traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST). ATI certifies sensors are calibrated in accordance with applicable ATI procedures. These procedures are compliant with the ISO 9001 standard to ensure that products are within ATI specifications.

Contact your sales representative for accuracy information.

Σχήμα Α. 11. Data sheet του αισθητήρα ATI nano 17 (1) [14].



Custom Search

Search

[繁體中文](#) | [English](#) | [Español](#) | [日本語](#) | [Português](#)
[Home](#) | [Products](#) | [Library](#) | [Company](#) | [Contact Us](#) | [Site Map](#)

F/T Sensor: Nano17

[Home](#) > [Products](#) > [Force/Torque Sensors](#) > [F/T Models](#) > [Nano17](#)

Product Advantages

- The Smallest Commercially Available 6-axis Transducer in the World: The Nano17 fits into restricted spaces of research applications.
- Very-Fine Resolution: Can resolve down to 0.318 gram-force.
- Extremely-High Strength: EDM wire-cut from high yield-strength stainless steel. Maximum allowable single-axis overload values are 3.1 to 13.8 times rated capacities.
- High Signal-to-Noise Ratio: Silicon strain gages provide a signal 75 times stronger than conventional foil gages. This signal is amplified, resulting in near-zero noise distortion.
- Industrial Strain Relief Version Available: E-exit version of this transducer also available and offers resistance to a 10 lb cable pull force.
- IP65 and IP68 (30m) Versions Available: The IP65 version of the transducer is protected against water spray. The IP68 version is submersible in fresh water to a depth of 10 meters.



Nano17-E Transducer

Typical Applications

- Dental research
- Robotic surgery
- Robotic-hand research
- Finger-force research

Ranges and Resolutions	Specifications	Drawings	Documents
<input checked="" type="radio"/> US (Standard) <input type="radio"/> SI (Metric)			
Single-Axis Overload			
F _{xy}	+250 N		
F _z	+480 N		
T _{xy}	+1.6 Nm		
T _z	+1.8 Nm		
Stiffness (Calculated)			
X-axis & Y-axis forces (K _x , K _y)	8.2x10 ⁹ N/m		
Z-axis force (K _z)	1.1x10 ⁹ N/m		
X-axis & Y-axis torque (K _{tx} , K _{ty})	2.4x10 ⁹ Nm/rad		
Z-axis torque (K _{tz})	3.8x10 ⁹ Nm/rad		
Resonant Frequency			
F _x , F _y , T _z	7200 Hz		
F _z , T _x , T _y	7200 Hz		
Physical Specifications			
Weight*	0.00907 kg		
Diameter*	17 mm		
Height*	14.5 mm		

* Specifications include standard interface plates.

ATI Industrial Automation
 3031 Goodworth Dr. | Apex, NC 27539 USA
 Phone: +1 919-772-0115 | Fax: +1 919-772-8259
 © 2019 ATI Industrial Automation, Inc. All rights reserved.



Home

Products

- Robotic Tool Changers
- Force/Torque Sensors
- Utility Couplers
- Manual Tool Changers
- Robotic Deburring Tools

Library

- Glossary
- Video
- 3-D CAD
- Software

Company

- News

Contact Us

- Sales and Support
- Request Info
- Register Products
- Driving Directions

Site Map

https://www.atl-ia.com/products/M/ft_models.aspx?id=Nano17

1/2

Σχήμα Α. 12. Data sheet του αισθητήρα ATI nano 17 (2) [14].

ServoDatabase.com

Servo Specifications and Reviews

[All Servos](#) [Brands](#) [Compare \(0\)](#)

[Servo Database](#) / [Hitec Servos](#) / [HS-422](#)

Hitec HS-422 - Deluxe Standard Servo

Specifications

Modulation:	Analog
Torque:	4.8V: 46.00 oz-in (3.31 kg-cm) 6.0V: 57.00 oz-in (4.10 kg-cm)
Speed:	4.8V: 0.21 sec/60° 6.0V: 0.16 sec/60°
Weight:	1.60 oz (45.4 g)
Dimensions:	Length: 1.59 in (40.4 mm) Width: 0.77 in (19.6 mm) Height: 1.44 in (36.6 mm)
Motor Type:	3-pole
Gear Type:	Plastic
Rotation/Support:	Dual Bearings
Rotational Range:	180°
Pulse Cycle:	20 ms
Pulse Width:	900-2100 μ s
Connector Type:	(add)

Σχήμα Α. 13. Χαρακτηριστικά σερβοκινητήρα Hitec HS-422 Deluxe [11].

ServoDatabase.com

Servo Specifications and Reviews

[All Servos](#) [Brands](#) [Compare \(0\)](#)[Servo Database](#) / [FeeTech Servos](#) / [FS5106M](#)

FeeTech FS5106M - Metal Gear Servo

Specifications

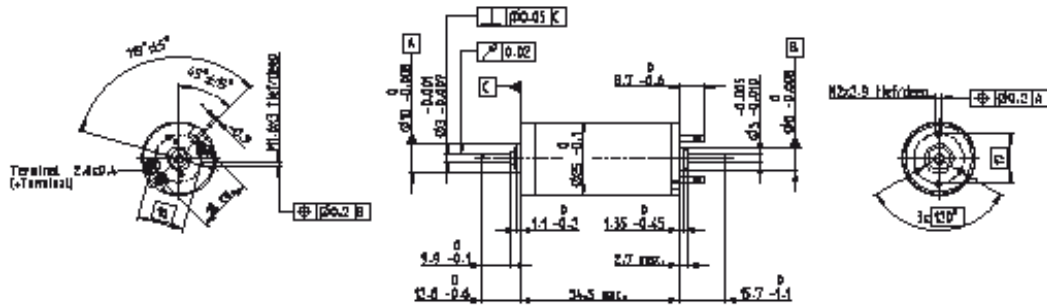
Modulation:	Analog
Torque:	4.8V: 83.50 oz-in (6.01 kg-cm) 6.0V: 104.30 oz-in (7.51 kg-cm)
Speed:	4.8V: 0.18 sec/60° 6.0V: 0.16 sec/60°
Weight:	1.83 oz (52.0 g)
Dimensions:	Length: 1.61 in (40.8 mm) Width: 0.79 in (20.1 mm) Height: 1.50 in (38.0 mm)
Motor Type:	Brushed
Gear Type:	Metal
Rotation/Support:	Dual Bearings
Rotational Range:	120°
Pulse Cycle:	(add)
Pulse Width:	900-2100 μ s
Connector Type:	(add)



Σχήμα Α. 14. Χαρακτηριστικά σερβοκινητήρα FeeTech FS5106M [10].

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

maxon DC motor



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	4080	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											
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

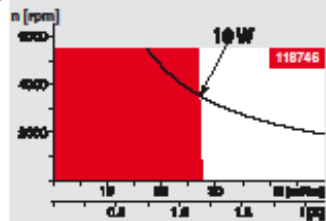
Specifications

Thermal data		
17	Thermal resistance housing-ambient	14 KW
18	Thermal resistance winding-housing	3.1 KW
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, 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

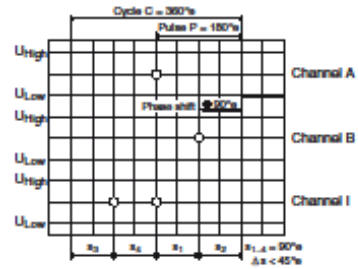
Planetary Gearhead	Spindle Drive	Overview on page 20 - 25
<ul style="list-style-type: none"> 1 Planetary Gearhead Ø28 mm Page 257 11 Planetary Gearhead Ø32 mm 0.75 - 6.0 Nm Page 259/260/263 130 g Koaxdrive Ø32 mm 1.0 - 4.5 Nm Page 268 Spindle Drive Ø32 mm Page 286-288 		<ul style="list-style-type: none"> 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
<ul style="list-style-type: none"> Recommended Electronics: ESCON 36/2 DC Page 320 ESCON 50/5, Modulo 50/5 321 ESCON 70/10 321 EPOS2 24/2 330 EPOS2 Modulo 36/2 330 EPOS2 24/5 331 EPOS2 50/5 331 EPOS2 P 24/5 334 EPOS3 70/10 EtherCAT 337 Notes 22 		

June 2013 edition / subject to change

maxon DC motor 99

Σχήμα Α. 15. Χαρακτηριστικά κινητήρα της maxon που χρησιμοποιείται στις αρθρώσεις του ρομπότ [23].

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



Direction of rotation cw (definition on 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										
+ Motor	Page	+ Gearhead	Page	+ Brake	Page	Overall length [mm] / + see Gearhead	66.5	65.5	65.5	65.5
RE 25	99/101									
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	Pin Allocation	Connection example
Supply voltage V_{CC} 5V ± 5% Output signal TTL compatible Phase shift Φ 90° ± 45° Index pulse width 90° ± 45° Operating temperature range -25...+85°C Moment of inertia of code wheel ± 0.7 gcm ² Output current per channel max. 5 mA	<p>1 N.C. 2 V_{CC} 3 GND 4 N.C. 5 Channel A 6 Channel A 7 Channel B 8 Channel B 9 Channel I (Index) 10 Channel I (Index)</p> <p>DIN Connector 4165/1 EN 60803-13 flat band cable AWG 28</p>	<p>Line receiver Recommended IC's - MC 9486 - SN 75176 - AM 26 LS 32</p> <p>Terminal resistance R = typical 120 Ω Capacitor C ≥ 0.1 nF per m line length</p>

Σχήμα Α. 17. Χαρακτηριστικά παλμογεννητριών της maxon που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες των αρθρώσεων του ρομπότ [25].



RTD Embedded Technologies, Inc.
An AS9100 and ISO 9001 Certified Company

Product Menu | CPU | Power | Analog & Digital I/O | Peripheral | Systems | Home



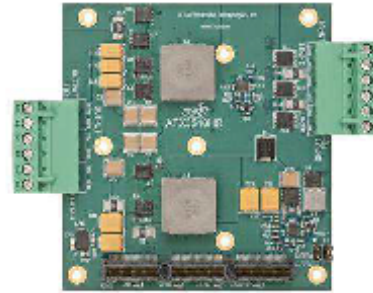
ATX3510HR-190W

PCIe/104 190 Watt Power Supply

Operating Temperature **-40° to +85°C**

Key Features

- PC/104 form factor
- PCIe/104 stackable bus structure
 - PCIe universal expansion bus (Type 1 or Type 2)
- PCIe x1 Interface
- -40 to +85°C standard operating temperature
- Input Voltage Range: 8-36V
- 194.8 Watts maximum output power
- Outputs
 - +5 Vdc at 16.8 amps
 - +12 Vdc at 8.4 amps
 - +5 Vdc Standby at 2.0 amps
 - +3.3 Vdc at 2.0 amps
- ATX signals
 - +5VSB
 - PS_ON#
 - PWRGOOD
- Efficiency as high as 90%
- Reverse voltage protection to -40V
- Input over-current protection
- Input over voltage protection clamps to 36V
- Output over-current protection
- Remote ON/OFF function
- Synchronized supplies to reduce noise
- Spread spectrum capable
- No Electrolytic caps
- Includes pin fin heat sink
- Available in *stackable, rugged enclosures*



ATX3510HR 190 Watt Embedded Power Supply



(shown with pin fin heat sink installed)



Rugged EMAN configuration available

Description

The ATX3510HR is a 190 Watt embedded power supply with a PCIe/104 stackable bus structure. With 5V standby, 5V main, and 12V, this module is also input protected against over-voltage, over-current, and reverse voltage. This rugged power supply is synchronized to reduce noise and system stress. The small footprint and high power capabilities of the ATX3510HR-190W make it suitable for many technology-rich, high-reliability military, industrial, and research applications.

Physical Attributes

- Dimensions [\(view diagram\)](#)
 - Length (L): 3.775 inches (95.89 mm)
 - Width (W): 3.550 inches (90.17 mm)
 - Stand-off Height
 - Above the module: 0.866 inches (22.00 mm)
 - Below the module: 0.600 inches (15.24 mm)
- Weight: Approximately 0.48 lbs. with heat sink
- Standard Operating Temperature: -40 to +85°C, 90% humidity non-condensing
- Storage Temperature: -25 to +85°C
- MTBF: 3,693,562 hours
- Max Power Dissipation: 21.64 Watts

Recommended Accessories

- AC/DC PS-190 External AC/DC Power Supply

Documentation and Downloads

- [Hardware Manual](#)

Σχήμα Α. 18. Πλακέτα ρύθμισης τάσης ATX3510HR-190W της rtd που είναι εγκατεστημένη στον πύργο του PC104 [31].



RTD Embedded Technologies, Inc.
An AS9100 and ISO 9001 Certified Company

Product Menu | CPU | Power | Analog & Digital I/O | Peripheral | Systems | Home



DM35820HR

PCIe/104 High-Speed Digital I/O DAQ Module
Operating Temperature -40° to +85°C

Key Features

- PC/104 form factor
- PCIe/104 stackable bus structure ([click here for PCIe/104-Express](#))
 - ◆ PCIe universal expansion bus (Type 1 or Type 2)
- PCIe x1 interface
- 48 Diode protected I/O lines
- 2 MB Input FIFO buffer onboard
- Standard outputs:
 - ◆ -24mA / +24mA (source / sink)
 - ◆ On-board 25 MHz clock
- Compatible with DMR & DOP expansion boards
- ◆ Mating Connector
 - ◆ Two Standard 0.1 inch spaced 2 x 25
- Available in stackable, rugged enclosures



DM35820 High-Speed DAQ Module

Description

The DM35820 is a high-speed digital I/O data module in a PCIe/104 format. This module includes many features such as pulse width modulators (PWM), incremental encoders, and advanced interrupts.

Technical Details

- Digital I/O
 - ◆ 48 Diode protected I/O lines
 - ◆ 24 mA source and sink current
 - ◆ Compatible with DMR and DOP expansion boards
 - ◆ Deep FIFOs with DMA
 - ◆ Two 2M-Word FIFOs
 - ◆ Each FIFO is attached to a separate DMA channel
 - ◆ 25 MHz bursted throughput
 - ◆ 12.5 MHz continuous throughput
 - ◆ FIFO can be looped
- ◆ Pulse Width Modulators
 - ◆ Eight PWM outputs
 - ◆ Single-ended or Differential Outputs
 - ◆ 16-bit resolution
 - ◆ Separate period and width clocks provide full resolution at low duty cycles
 - ◆ Optional interrupt generations
- Incremental Encoders
 - ◆ Four Incremental Encoder channels
 - ◆ Single-ended or Pseudo-differential Inputs
 - ◆ Variable frequency input filtering
 - ◆ Max input speed of 40ns per transition
 - ◆ 16-bit resolution
 - ◆ Two channels can be combined for 32-bit resolution
 - ◆ Connect to FIFO for position sampling
- Advanced Interrupts
 - ◆ Two Advanced Interrupt Modules
 - ◆ Interrupt on Match, Change, or Strobe
 - ◆ All 48 bits are captured when the interrupt is generated
 - ◆ Any combination of the 48 bits can be monitored
- Programmable Clocks
 - ◆ Four programmable clocks
 - ◆ Maximum frequency of 25 MHz
 - ◆ Can be started and stopped by an interrupt or another clock
 - ◆ Continuous or One-Shot Operation
 - ◆ Can be cascaded
- 82C54 Timer/Counters
 - ◆ Six Timer/Counter Channels
 - ◆ Fully programmable
 - ◆ Input clock and gate driven from internal or external source
 - ◆ 10 MHz maximum input



Rugged DM35820 High-Speed DAQ Module
Product modifications available upon request

Σχήμα Α. 19. Πλακέτα ψηφιακών εισόδων-εξόδων DM35820HR της rtd που είναι εγκατεστημένη στον πύργο του PC104 [32].

Παράρτημα Β. Κώδικες

- Κώδικας Εύρεσης Συχνότητας Αποκοπής χαμηλοπέρατου φίλτρου butterworth στη Matlab

```
Fs =;          % Sampling frequency
T = 1/Fs;      % Sampling period
L=length(X);
Y = fft(X);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(f,P1)
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of X(t)')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('|P1(f)|')
Fc=;          % Cutting frequency
[b, a] = butter(3,Fc/(Fs/2),'low');
new_signal = filter(b,a,X);
```

- Κώδικας Εύρεσης του Χώρου Εργασίας του Ρομπότ για Δεδομένη Θέση του Στόχου και Αρχική γωνία της Βάσης του Ρομπότ και Περιορισμό Κινήσεων στη Matlab

```

q1=zeros(1,50)
q21=zeros(1,50)
q22=zeros(1,50)
k0=zeros(1,50)
k1=zeros(1,50)
k2=zeros(1,50)
R1=zeros(1,50)
R2=zeros(1,50)

```

```

m0=9.8
m1=0.06
m2=0.106
m3=0.08
M=m1+m2+m3+m0

```

```

l0=0.1196
l1=0.0002
l2=0.00027
l3=0.000037

```

```

r0=((-0.02+0.09)^2+(-0.01+0.17)^2)^0.5
r1=0.0817
r2=0.04386
r3=0.014

```

```

l1=((-0.09+0.13)^2+(-0.17+0.256)^2)^0.5
l2=((-0.17+0.095)^2+(-0.336+0.41)^2)^0.5
l3=((-0.026+0.058)^2+(-0.47+0.44)^2)^0.5

```

```
S0=0
```

```

a=m0*r0/M
b=(l1*m0+r1*(m0+m1))/M
c=(l2*(m0+m1)+r2*(m0+m1+m2))/M
d=(l3*(m0+m1+m2)/M)+r3

```

```
a00=l0+(m0*(r0^2)*(m1+m2+m3)/M)
```

$$a01=(m0*r0/M)*(l1*(m1+m2+m3)+r1*(m2+m3))$$

$$a02=(m0*r0/M)*(l2*(m2+m3)+r2*m3)$$

$$a11=l1+(1/M)*(m0*m1*(l1^2)+m1*(m2+m3)*(r1^2)+m0*(m2+m3)*((l1+r1)^2))$$

$$a21=((l1*m0+(m0+m1)*r1)*(l2*(m2+m3)+m3*r2))/M$$

$$a22=l2+(1/M)*(m2*m3*r2*r2+m2*(m0+m1)*l2^2+m3*(m0+m1)*((l2+r2)^2))$$

$$a33=l3+(l3*l3*m3*(m0+m1+m2)/M)$$

$$\%-0.9245556 < q1 < 2.6166667$$

$$\%-3.00044444 < q2 < 1.65722222$$

$$q1max=2.6166667-0.488692191$$

$$q1min=-0.9245556-0.488692191$$

$$Dq1max=q1max-q1min$$

$$Dq1min=-Dq1max$$

$$q2max=1.65722222$$

$$q2min=-3.00044444$$

$$q3max=1.0471975512$$

$$q3min=-1.0471975512$$

$$Dq2max=q2max-q2min$$

$$Dq2min=-Dq2max$$

$$Dq3max=q3max-q3min$$

$$Dq3min=-Dq3max$$

$$D01=a00+a01*\cos(q1max)+a02*\cos(q1max+q2max)+a*m3*l3*\cos(q1max+q2max+q3max)$$

$$D11=a11+a01*\cos(q1max)+a21*\cos(q2max)+b*m3*l3*\cos(q2max+q3max)$$

$$D21=a22+a21*\cos(q2max)+a02*\cos(q1max+q2max)+c*m3*l3*\cos(q3max)$$

$$D31=a33+a*m3*l3*\cos(q1max+q2max+q3max)+b*m3*l3*\cos(q2max+q3max)+c*m3*l3*\cos(q3max)$$

$$D1=D01+D11+D21+D31$$

$$D02=a00+a01*\cos(q1min)+a02*\cos(q1min+q2min)+a*m3*l3*\cos(q1min+q2min+q3min)$$

$$D12=a11+a01*\cos(q1min)+a21*\cos(q2min)+b*m3*l3*\cos(q2min+q3min)$$

$$D22=a22+a21*\cos(q2min)+a02*\cos(q1min+q2min)+c*m3*l3*\cos(q3min)$$

$$D32=a33+a*m3*l3*\cos(q1min+q2min+q3min)+b*m3*l3*\cos(q2min+q3min)+c*m3*l3*\cos(q3min)$$

$$D2=D02+D12+D22+D32$$

$$dthmax=-((D11+D21+D31)*Dq1max/D1)-((D21+D31)*Dq2max/D1)-(D31*Dq3max/D1)$$

$$dthmin=-((D12+D22+D32)*Dq1min/D2)-((D22+D32)*Dq2min/D2)-(D32*Dq3min/D2)$$

$$dth=dthmax-dthmin$$

$$dthmax=dthmax*180/3.14$$

$$dthmin=dthmin*180/3.14$$

$$dth=dth*180/3.14$$

```

%-0.0558505361<dth<0.0558505361
th=linspace(-0.0558505361,0.0558505361,50)
q1=linspace(q1min,q1max,50)
q3=linspace(q3min,q3max,50)

for i=1:50

    k0(i)=b*(a*a22-c*a02)*sin(q1(i))
    k1(i)=-((a*b*a02+a*c*a01-2*b*c*a00)/2)+c*(b*a01-a*a11)*cos(q1(i))+a*(b*a02-
c*a01)*cos(2*q1(i))/2)
    k2(i)=a*(b*a21-c*a11)*sin(q1(i))+a*(b*a02-c*a01)*sin(2*q1(i))/2)

    q21(i)=3.14-asin((S0-k0(i))/(((k1(i)^2)+(k2(i)^2))^(1/2)))-atan(k2(i)/k1(i))
    q22(i)=asin((S0-k0(i))/(((k1(i)^2)+(k2(i)^2))^(1/2)))-atan(k2(i)/k1(i))

R1(i)=((a^2)+(b^2)+(c^2)+2*a*b*cos(q1(i))+2*a*c*cos(q1(i)+q21(i))+2*b*c*cos(q21(i)))^0.5

R2(i)=((a^2)+(b^2)+(c^2)+2*a*b*cos(q1(i))+2*a*c*cos(q1(i)+q22(i))+2*b*c*cos(q22(i)))^0.5

    if q21(i)>=3.00197
        q21(i)=-3.00197
    end

end

end

z=min(R1)
zz=max(R1)
zzz=min(R2)
zzzz=max(R2)

xe=0
ye=0.4
th0=0
THETAmin=th0+2*dthmax*3.14/180
THETAmax=th0+2*dthmin*3.14/180

```



```
yt=zeros(50,1)
xt=zeros(50,1)
R=zeros(50,1)
THETA=zeros(2,50)
```

```
for i=1:50
    xt(i)=xe-d*cos(q3(i))
    yt(i)=ye-d*sin(q3(i))
```

```
R(i)=((xt(i)^2)+(yt(i)^2))^0.5
tht(i)=atan2(yt(i),xt(i))
end
```

```
t12=zeros(50,2)
```

```
Wr=zeros(50,50)
Zr=zeros(50,50)
```

```
for k=1:50
    for i=1:50
```

```
        t12(i,2)=q1(i)+q21(i)
        t12(i,1)=q1(i)+q22(i)
```

```
        if t12(i,1)<THETAmin+tht(i)
            R2(i)=0
        elseif t12(i,1)>THETAmax+tht(i)
            R2(i)=0
        end
```

```
    end
end
```

```
W=min(R1(R1>0))
X=max(R1)
Y=min(R2(R2>0))
Z=max(R2)
```

```
q1=q1*(180/3.14)
```

```
q21=q21*(180/3.14)
q22=q22*(180/3.14)
```

```
figure (1)
plot(q1,q21)
hold on
plot(q1,q22)
xlabel('q1(degrees)')
ylabel('q2(degrees)')
title('Relative position of joints resulting to dynamic singularities')
```

```
figure (2)
xlow = W*cos(th);
ylow = W*sin(th);
plot(xlow,ylow,'m')
hold on
xlow2 = X*cos(th);
ylow2 = X*sin(th);
plot(xlow,ylow,'b')
patch([xlow fliplr(xlow2)], [ylow fliplr(ylow2)], 'k')
hold on
xlow = Y*cos(th);
ylow = Y*sin(th);
plot(xlow,ylow,'g');
patch([xlow2 fliplr(xlow)], [ylow2 fliplr(ylow)], 'c')
hold on
xlow2 = Z*cos(th);
ylow2 = Z*sin(th);
plot(xlow,ylow,'c')
patch([xlow fliplr(xlow2)], [ylow fliplr(ylow2)], 'k')
title('Workspace of Space Robot for Two Movements for each Direction per Link')
```

```
figure(4)
f=linspace(0,2*pi,50)
xlow = z*cos(f);
ylow = z*sin(f);
plot(xlow,ylow,'c')
hold on
xlow2 = zz*cos(f);
```

```
ylo2 = zz*sin(f);  
plot(xlo,ylo,'c')  
patch([xlo fliplr(xlo2)], [ylo fliplr(ylo2)], 'k')  
hold on  
xlo = zzz*cos(f);  
ylo = zzz*sin(f);  
plot(xlo,ylo,'c');  
patch([xlo2 fliplr(xlo)], [ylo2 fliplr(ylo)], 'c')  
hold on  
xlo2 = zzzz*cos(f);  
ylo2 = zzzz*sin(f);  
plot(xlo,ylo,'c')  
patch([xlo fliplr(xlo2)], [ylo fliplr(ylo2)], 'k')  
title('Workspace of Space Robot Calculated by Applying Mechanical Restriction')
```

- Κώδικας Αντίστροφης Κινηματικής για το Ρομπότ εκτός Τράπεζας Γρανίτη

```
l1=0.181004
```

```
l2=0.16005
```

```
l3=0.0499
```

```
y=-0.1;
```

```
x=0.21;
```

```
phi=(90/180)*pi;
```

```
yn=y-l3*cos(phi)
```

```
xn=x-l3*sin(phi)
```

```
q21=acos((xn^2+yn^2-l2^2-l1^2)/(2*l1*l2))
```

```
q22=-q21
```

```
%Για q11
```

```
a=-l1-l2*cos(q21)
```

```
b=-l2*sin(q21)
```

```
c=-yn
```

```
d=-l2*sin(q21)
```

```
e=l1+l2*cos(q21)
```

```
f=-xn
```

```
s11=(((c/a)-(f/d))/((e/d)-(b/a)))
```

```
c11=(b*s11/a)+(c/a)
```

```
q11=atan2(s11,c11)
```

```
%Για q12
```

```
a=-l1-l2*cos(q22)
```

```
b=-l2*sin(q22)
```

```
c=-yn
```

```
d=-l2*sin(q22)
```

```
e=l1+l2*cos(q22)
```

```
f=-xn
```

```
s12=(((c/a)-(f/d))/((e/d)-(b/a)))
```

```
c12=(b*s12/a)+(c/a)
```

```
q12=atan2(s12,c12)
```

```
q31=phi-q11-q21
```

```
q32=phi-q12-q22
```

```
%figures
```

```
M=zeros(4,1)
```

```
N=zeros(4,1)
```

```
O=zeros(4,1)
```

```
P=zeros(4,1)
```

```
M(1,1)=0
```

```
M(2,1)=l1*cos(q11)
```

```
M(3,1)=M(2,1)+l2*cos(q11+q21)
```

```
M(4,1)=M(3,1)+l3*cos(phi)
```

```
N(1,1)=0
```

```
N(2,1)=l1*sin(q11)
```

```
N(3,1)=N(2,1)+l2*sin(q11+q21)
```

```
N(4,1)=N(3,1)+l3*sin(phi)
```

```
O(1,1)=0
```

```
O(2,1)=l1*cos(q12)
```

```
O(3,1)=O(2,1)+l2*cos(q12+q22)
```

```
O(4,1)=O(3,1)+l3*cos(phi)
```

```
P(1,1)=0
```

```
P(2,1)=l1*sin(q12)
```

```
P(3,1)=P(2,1)+l2*sin(q12+q22)
```

```
P(4,1)=P(3,1)+l3*sin(phi)
```

```
figure (1)
```

```
subplot(1,2,1)
```

```
plot(M,N)
```

```
subplot(1,2,2)
```

```
plot(O,P)
```

- Κώδικας Ανάγνωσης Δύο Αισθητήρων FSR σε Arduino και Αποστολή των Δεδομένων σε Node στο ROS

```
#include <ros.h>
#include <std_msgs/UInt8.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>

ros::NodeHandle nh;
std_msgs::UInt8 left_force_msg;
std_msgs::UInt8 right_force_msg;

ros::Publisher left_force_pub("left_fsr", &left_force_msg);
ros::Publisher right_force_pub("right_fsr", &right_force_msg);

int fsrAnalogPin = 0; // FSR is connected to analog 0
int fsrReading; // the analog reading from the FSR resistor divider
int x;
int i;
double V;
double F;
double FF;
double FFF;
double Forceleft = 0;
int Y;
int Z;
int fsr2AnalogPin = 1; // FSR is connected to analog 1
int fsr2Reading; // the analog reading from the FSR resistor divider
int w;
int k;
double V2;
double F2;
double FF2;
double FFF2;
double Forceright = 0;
int A;
int B;
```



```

void setup(void) {

    nh.initNode();

    nh.advertise(left_force_pub);
    nh.advertise(right_force_pub);

    Serial.begin(9600); // We'll send debugging information via the Serial monitor
}

void loop(void) {

    x = analogRead(fsrAnalogPin);
    delay(10);
    V = 4.8 * (1 - ((double)x / (double)1023));
    F = (0.1006 * pow(V, 6)) - (2.0067 * pow(V, 5)) + (16.12 * pow(V, 4)) - (66.487 * pow(V,
3)) + (148.08 * pow(V, 2)) - (169.43 * V) + 80.142;

    FF = 0;
    Y = 0;

    for (i = 1; i <= 30; i++) {
        if (F <= 60) {
            FF = FF + F;
            Y = Y + 1;
        }
    }

    FFF = FF / Y;

    int j;
    double FFFF;
    FFFF = 0;
    Z = 0;

    for (j = 1; j <= 50; j++) {

```

```

    if (19 <= FFF <= 50 ) {
        FFFF = FFFF + FFF;
        Z = Z + 1;
    }
}
Forceleft = (FFFF / Z);
w = analogRead(fsr2AnalogPin);
delay(10);
V2 = 4.8 * (1 - ((double)w / (double)1023));
F2 = (0.1006 * pow(V2, 6)) - (2.0067 * pow(V2, 5)) + (16.12 * pow(V2, 4)) - (66.487 *
pow(V2, 3)) + (148.08 * pow(V2, 2)) - (169.43 * V2) + 80.142;

FF2 = 0;
A = 0;

for (k = 1; k <= 30; k++) {
    if (F2 <= 60) {
        FF2 = FF2 + F2;
        A = A + 1;
    }
}

FFF2 = FF2 / A;

int l;
double FFFF2;
FFFF2 = 0;
B = 0;

for (l = 1; l <= 50; l++) {
    if (19 <= FFF2 <= 50) {
        FFFF2 = FFFF2 + FFF2;
        B = B + 1;
    }
}
Forceright = (FFFF2 / B);

Serial.println(Forceleft);
Serial.println("/t");

```

```
Serial.println(Forceright);

left_force_msg.data = Forceleft;
left_force_pub.publish(&left_force_msg);

right_force_msg.data = Forceright;
right_force_pub.publish(&right_force_msg);

nh.spinOnce();

delay(100);

}
```

- Παράδειγμα G-Code που προκύπτει από το SolidCAM, για την Κατασκευή του Πρώτου Μέλους του Βραχίονα για μία Επιφάνεια Επεξεργασίας

%

O00009 (LINKKK)
(COMPENSATION-WEAR)
(REV-0.70)
(OCT-29-2018-7:33:13PM)

(TOOL 4 - DIA 16.)

G90 G17 G40 G80 G00 G21
G53 G90 G00 G43 H10 Z110.
G53 G90 G00 Y0
G53 G90 G00 X-405.
M6 T4
G43 H4 Z110.
M01
(iRough-contour10)
G00 G55 G90 X3.676 Y39.807 S3024 M03
G43 H4 Z120.
Z25.
Z0.1
G01 Z-21.62 F12700.
G03 X3.027 Y38.259 Z-21.7 I1.544 J-1.558 F1363.
G01 X3.029 Y38.258
X3.052 Y38.242 F1457.
X3.879 Y37.661 F1436.673
G02 X4.001 Y37.565 I-0.804 J-1.146 F1331.279
G01 X4.796 Y36.862
G02 X4.914 Y36.746 I-0.927 J-1.049
G01 X5.721 Y35.841
G02 X5.82 Y35.717 I-1.044 J-0.932
G01 X6.669 Y34.517
G02 X7.907 Y32.363 I-18.39 J-12.005 F1457.
X9.396 Y29.414 I-95.187 J-49.897
G01 X9.762 Y28.613
G02 X10.467 Y26.89 I-43.736 J-18.879
X10.502 Y26.79 I-1.303 J-0.513 F1372.202

G01 X11.182 Y24.586 F1331.279
G02 X11.836 Y21.933 I-32.391 J-9.395 F1457.
X12.545 Y17.226 I-48.274 J-9.671
X13.017 Y10.556 I-106.919 J-10.913 F1400.215
G01 X13.079 Y8.885
G02 X13.071 Y5.549 I-50.961 J-1.557
X12.751 Y2.211 I-30.341 J1.224 F1366.467
G01 X12.199 Y-0.982 F1331.279
G02 X12.162 Y-1.142 I-1.38 J0.239 F1377.928
G01 X12.009 Y-1.655 F1457.
G02 X11.967 Y-1.776 I-1.342 J0.398
G01 X11.762 Y-2.29
G02 X11.708 Y-2.408 I-1.3 J0.52
G01 X11.452 Y-2.909
G02 X11.396 Y-3.008 I-1.247 J0.637
X8.505 Y-6.229 I-9.502 J5.623
X6.662 Y-7.433 I-11.442 J15.501 F1298.106
G01 X6.481 Y-7.524
G03 X5.236 Y-8.387 I2.538 J-4.992 F1414.343
X4.268 Y-9.553 I3.784 J-4.128 F641.041
X3.483 Y-11.676 I4.752 J-2.963
G01 X3.027 Y-14.685 F1457.
G03 X3.194 Y-15.514 Z-21.62 I2.193 J0.01
X4.135 Y-15.639 I0.507 J0.21 F12700.
G01 X12.249 Y-5.127
G03 X14.161 Y-0.651 I-7.859 J6.004
G01 X14.779 Y3.297
X14.861 Y3.973
G03 X14.896 Y4.653 I-9.853 J0.852
G01 X14.965 Y8.601
X14.964 Y8.988
G03 X14.948 Y9.374 I-9.887 J-0.214
G01 X14.522 Y16.393
X14.49 Y16.789
G03 X14.442 Y17.183 I-9.839 J-0.996
G01 X13.819 Y21.57
X13.722 Y22.135
G03 X13.592 Y22.693 I-9.694 J-1.955
G01 X12.786 Y25.764
X12.655 Y26.218
G03 X12.502 Y26.665 I-9.434 J-2.967

G01 X11.695 Y28.858
X11.473 Y29.411
G03 X11.217 Y29.95 I-9.059 J-3.967
G01 X8.972 Y34.337
X8.73 Y34.782
G03 X8.464 Y35.215 I-8.561 J-4.951
G01 X8.296 Y35.475
X7.858 Y36.095
G03 X6.28 Y37.731 I-7.858 J-6.004
G01 X4.114 Y39.458
G03 X3.289 Y39.29 I-0.342 J-0.429
X3.027 Y38.259 Z-21.7 I1.931 J-1.04 F1363.
G01 Y38.259
X3.152 Y37.708 F1249.055
G03 X3.601 Y35.975 I22.991 J5.035
X4.624 Y32.962 I71.023 J22.444
G02 X6.053 Y28.953 I-188.606 J-69.48
X8.486 Y18.897 I-57.798 J-19.308 F1457.
X9.233 Y12.007 I-76.531 J-11.78 F1448.897
X9.303 Y8.488 I-46.201 J-2.672 F1457.
X9.211 Y6.744 I-22.21 J0.299
X8.687 Y4.348 I-13.126 J1.612
X7.754 Y2.133 I-15.292 J5.138
G01 X7.323 Y1.343
G02 X6.336 Y-0.286 I-25.636 J14.411
G01 X4.43 Y-3.213
G02 X4.34 Y-3.337 I-1.173 J0.764
G01 X4.264 Y-3.429 F1450.762
G03 X3.504 Y-4.648 I4.332 J-3.548 F1457.
X3.079 Y-6.019 I5.092 J-2.33 F1389.473
G01 X3.074 Y-6.045 F1457.
G03 X2.992 Y-7.029 I5.517 J-0.958
G01 X3.027 Y-14.685
G03 X3.034 Y-14.855 Z-21.62 I2.193 J0.01
X4.1 Y-14.986 I0.547 J0.045 F12700.
G01 X10.48 Y3.786
G03 X10.977 Y6.064 I-9.346 J3.233
G01 X11.147 Y7.819
X11.19 Y8.497
G03 X11.185 Y9.177 I-9.886 J0.277
G01 X11.007 Y13.564

X10.98 Y13.99
G03 X10.935 Y14.415 I-9.855 J-0.83
G01 X10.248 Y19.783
X10.191 Y20.173
G03 X10.117 Y20.561 I-9.752 J-1.645
G01 X9.24 Y24.738
X9.137 Y25.175
G03 X9.016 Y25.607 I-9.576 J-2.47
G01 X7.502 Y30.54
X7.425 Y30.778
G03 X7.343 Y31.013 I-9.378 J-3.14
G01 X6.547 Y33.207
X6.272 Y33.884
X4.113 Y38.81
G03 X3.075 Y38.704 I-0.502 J-0.22
X3.027 Y38.259 Z-21.7 I2.146 J-0.455 F1363.
G01 X3.014 Y35.483
X3.006 Y33.682 F1457.
G03 X3.198 Y30.745 I22.877 J0.02 F1334.902
X3.694 Y27.314 I124.402 J16.256 F1397.457
G02 X4.619 Y21.503 I-535.295 J-88.114
X5.152 Y17.375 I-137.746 J-19.886
X5.427 Y13.986 I-62.088 J-6.747
X5.165 Y9.873 I-21.115 J-0.72 F1452.205
G01 X5.095 Y9.492
G03 X4.99 Y8.176 I7.284 J-1.242 F1457.
G01 Y7.6
Y5.793
Y3.641
Y2.492
G02 X4.97 Y1.907 I-8.3 J0.
X4.55 Y-0.415 I-10.904 J0.77
X3.99 Y-1.905 I-10.36 J3.043
X3.417 Y-2.968 I-9.149 J4.244
X3.255 Y-3.221 I-8.576 J5.307
G03 X3.159 Y-3.388 I1.335 J-0.882 F298.215
X2.99 Y-4.104 I1.431 J-0.716 F265.946
G01 Y-4.494 F1457.
G03 X2.992 Y-7.011 I1111.834 J-0.523
X7.379 Y-7.008 Z-21.62 I2.193 J0.004
G01 X7.393 Y33.653 F12700.

G03 X3.006 Y33.664 Z-21.7 I-2.194 J0.001 F1363.
G01 Y33.664
X2.992 Y30.685
G03 X2.99 Y29.183 I384.372 J-1.293 F1457.
G01 Y25.678
Y24.087
G03 X3.094 Y23.52 I1.6 J0. F1389.957
X3.255 Y23.205 I1.496 J0.568 F1162.619
G02 X4.009 Y21.849 I-8.413 J-5.562
X4.864 Y18.988 I-9.956 J-4.534 F1457.
X4.96 Y18.203 I-11.094 J-1.748
X4.99 Y17.492 I-8.269 J-0.712
G01 Y13.105
Y10.184
Y8.194
G03 X5.633 Y6.643 Z-21.62 I2.193 J0.
G00 Z25.
M05
G90 G17 G40 G80 G00 G21
G53 G90 G00 G43 H4 Z110.
G53 G90 G00 Y0
G53 G90 G00 X-405.
M30
%

Παράρτημα C. Λήψη Μετρήσεων από τον Αισθητήρα ATi Nano 17

- Συνδεσμολογία του αισθητήρα με τον υπολογιστή:



Σχήμα C.1. Ο αισθητήρας δύναμης/ροπής ATi Nano 17.



Σχήμα C.2. Συνδεσμολογία κάρτας αισθητήρα με κουτί τροφοδοσίας (1).

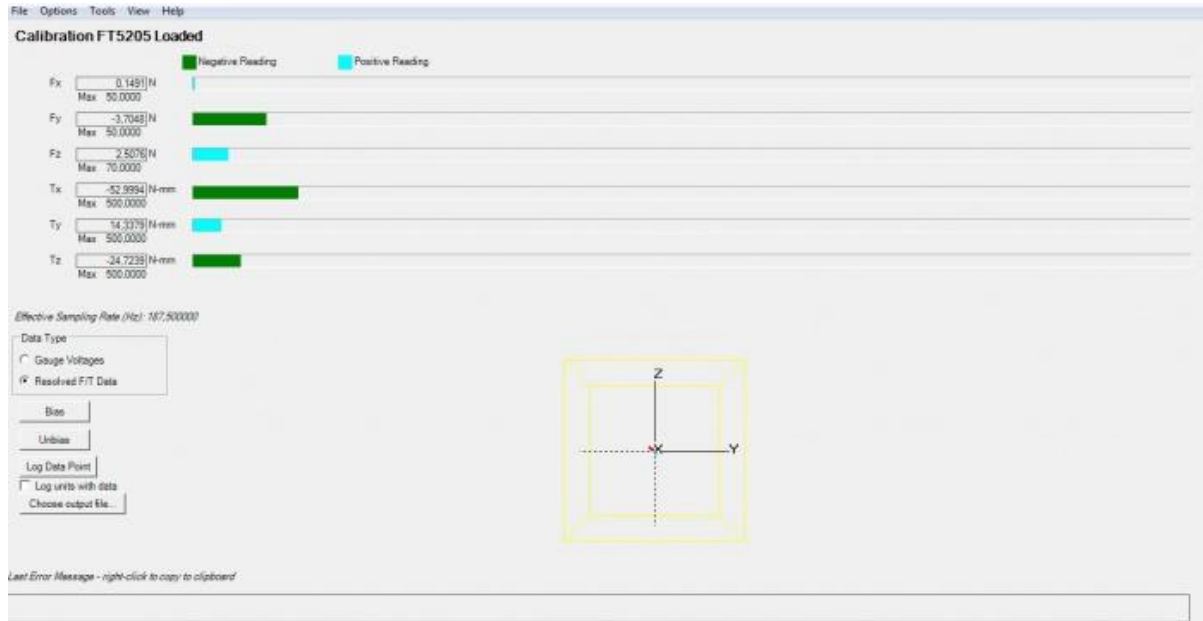


Σχήμα C.3. Συνδεσμολογία κάρτας αισθητήρα με κουτί τροφοδοσίας (2).



Σχήμα C.4. Συνδεσμολογία κουτί τροφοδοσίας με τον αισθητήρα.

- Πρόγραμμα αισθητήρα:



Σχήμα C.5. Αρχική εικόνα του προγράμματος του αισθητήρα ATIDAQFT.Net με συνδεδεμένο τον αισθητήρα.

Ξεκινώντας το πρόγραμμα πρέπει μέσω της επιλογής File>Load Calibration, να φορτωθεί το κατάλληλο αρχείο τύπου .cal, που είναι αποθηκευμένο στο CD του αισθητήρα. Έπειτα επιλέγεται η κατάλληλη συχνότητα δειγματοληψίας μέσω της επιλογής Options>DAQ Device Options. Η επιλογή συχνότητας δειγματοληψίας αφορά το πείραμα, στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας και δεν είναι κάτι που επιλέγεται εν αγνοία της εφαρμογής.

- Ενσωμάτωση του αισθητήρα στην πειραματική διάταξη:

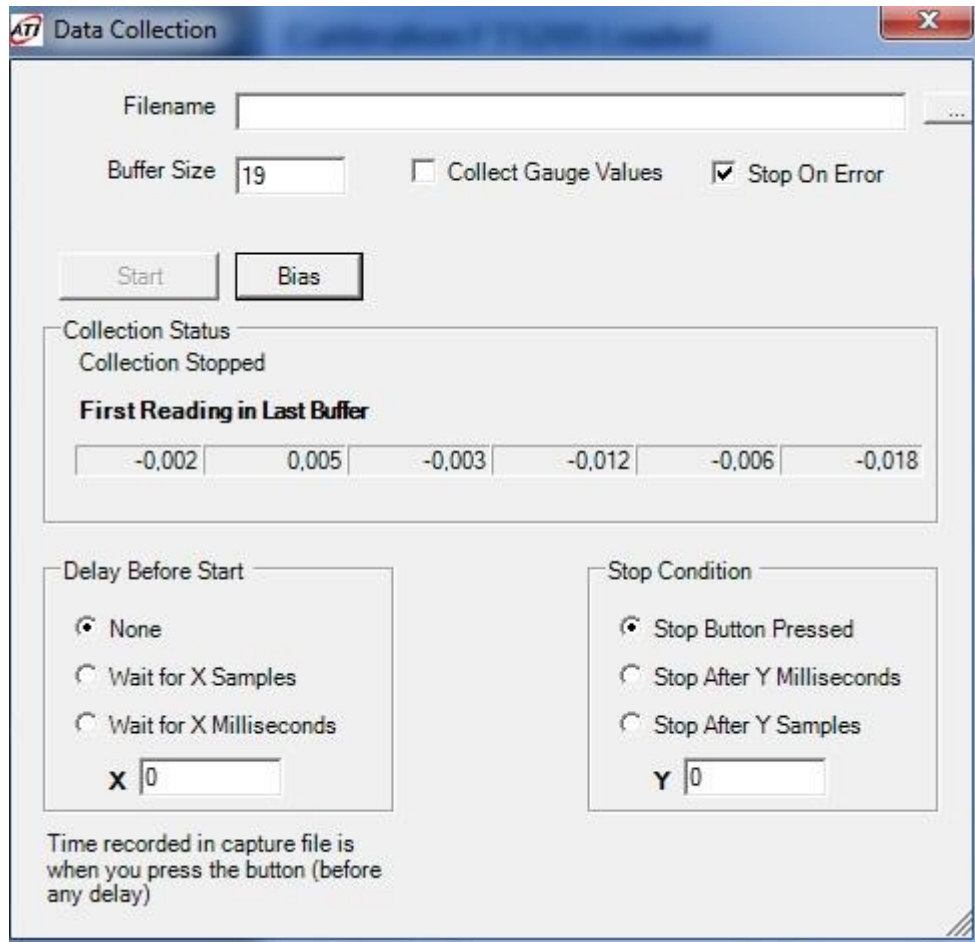
Σε κάθε μία από τις επίπεδες πλευρές του αισθητήρα υπάρχουν 3 οπές M2, των οποίων τα κέντρα δημιουργούν ισόπλευρο τρίγωνο πλευράς 1,1 εκατοστών (Σχήμα Γ.6). Το βάθος των οπών είναι 5 χιλιοστά. Οπότε ανάλογα με το πάχος του υλικού πάνω στο οποίο θα βιδωθεί ο αισθητήρας υπολογίζεται μήκος = πάχος υλικού + 5 χιλιοστά. Από αυτό το μήκος αφαιρούνται 1 ή 2 χιλιοστά, ανάλογα τις διαθέσιμες βίδες, έτσι ώστε να μην ακουμπάνε τη μεταλλική επιφάνεια του αισθητήρα, όταν βιδωθούν και να δημιουργείται πρόβλημα.



Σχήμα C.6. Οι 3 οπές του αισθητήρα.

- Συλλογή δεδομένων:

Για τη συλλογή δεδομένων αφητηρία είναι η επιλογή Tools>Data Collection. Έπειτα εμφανίζεται το παράθυρο συλλογής δεδομένων (Σχήμα Γ.7).



Σχήμα C.7. Παράθυρο συλλογής δεδομένων του προγράμματος του αισθητήρα.

Στο παραπάνω παράθυρο πριν από κάθε πείραμα επιλέγεται να γίνει Bias, εστί ώστε να σεταριστούν όλες οι δυνάμεις και ροπές, που διαβάζει ο αισθητήρας, σε μηδενικές τιμές. Επιλέγεται για Stop Condition η επιλογή Stop After Y Milliseconds, ώστε να είναι γνωστή η χρονική διάρκεια των δεδομένων που θα δώσει ο αισθητήρας. Όταν επιλεχθεί πως θα ονομαστεί το αρχείο και πατηθεί η επιλογή Start, πρέπει να ξεκινήσει και το πείραμα. Ο αισθητήρας αποθηκεύει τα δεδομένα σε αρχεία .csv, όπου δίνει αρχείο 6 στήλων με την πρώτη στήλη να είναι η δύναμη στον x-άξονα του αισθητήρα, η δεύτερη η δύναμη στον y-άξονα, η τρίτη η δύναμη στον z-άξονα, η τέταρτη η ροπή στον x-άξονα, η πέμπτη η ροπή στον y-άξονα και η έκτη η ροπή στον z-άξονα. Αυτά τα αρχεία μπορούν να ανοιχθούν επί τόπου με τη Matlab και να τα επεξεργαστούμε. Όταν κρατήθουν οι επιθυμητές δυνάμεις και ροπές από τις 6 παρατηρούμε τον αριθμό των μετρήσεων για καθεμία από αυτές και δημιουργούμε μία στήλη αντίστοιχου αριθμού δεδομένων που θα είναι ο χρόνος του

πειράματος, όπου η διαφορά μεταξύ των τιμών, που απέχουν μία θέση στη στήλη, θα είναι σταθερή. Έτσι μπορούν τα δεδομένα να απεικονιστούν σε διαγράμματα.

- Σφάλμα αισθητήρα:

Κρίθηκε από δοκιμές με τα πρότυπα βάρη πως το σφάλμα του αισθητήρα εμφανίζεται όσον αφορά τις δυνάμεις στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο.