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

Διπλωματική Εργασία

Σχεδιασμός και ελαχιστοποίηση κατανάλωσης καυσίμου με πειραματική επιβεβαίωση για ρομπότ διαστημικού εξομοιωτή

Γελαδάρης Αριστείδης - Σταύρος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2022

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον επανασχεδιασμό διαφόρων υποσυστημάτων ενεργητικού ρομπότ διαστημικού εξομοιωτή, που βρίσκεται στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Ο διαστημικός εξομοιωτής αποτελείται από μία τράπεζα γρανίτη, δύο ενεργητικά ρομπότ, ένα παθητικό ρομπότ και ένα σύστημα καμερών. Η επιφάνεια της τράπεζας είναι ειδικά κατεργασμένη, ώστε η τραχύτητά της να είναι αμελητέα, με αποτέλεσμα τα ρομπότ να κινούνται πάνω σε αυτή χωρίς τριβές, με τη χρήση αεροεδράνων. Για την κίνηση των ρομπότ χρησιμοποιούνται τρία ζεύγη προωθητήρων και ένας σφόνδυλος αντίδρασης, ενώ με τις κάμερες του συστήματος PhaseSpace είναι γνωστή ανά πάσα στιγμή η απόλυτη θέση και η ταχύτητα των ρομπότ. Χάρη στη χρήση μπαταριών και φιαλών πεπιεσμένου διοξειδίου του άνθρακα, το σύστημα διαθέτει αυτονομία κατά την κίνηση και τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Η εργασία αυτή αφορά το αρχικό ενεργητικό ρομπότ του εξομοιωτή. Κατά την εκπόνησή της, ελέγχθηκε και αποκαταστάθηκε η λειτουργία του PC104 και των επιμέρους καρτών του, προγραμματίστηκαν βασικές λειτουργίες στο ROS του ρομπότ, προστέθηκαν μέλη και αισθητήρες στους βραχίονες και βελτιστοποιήθηκε η λειτουργία του πνευματικού συστήματος που είναι υπεύθυνο για την κίνηση του ρομπότ, με την προσθήκη στραγγαλιστών μεταβλητής αντίστασης και νέων ακροφυσίων για τους προωθητήρες. Επίσης, αναπτύχθηκε μέθοδος για τον υπολογισμό των βέλτιστων δυνάμεων και ροπών και την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου, βασισμένη στη μέθοδο SIMPLEX.

Για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας όλων των υποσυστημάτων που προστέθηκαν και για την επαλήθευση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας διάφορα πειράματα. Τα πλέον σημαντικά, ήταν αυτά που επιβεβαίωναν τη δυνατότητα του ρομπότ να κινείται σε συγκεκριμένες τροχιές με την προϋπόθεση της ελάχιστης κατανάλωσης καυσίμου, καθώς αποτελούσε ένα στοιχείο που δεν είχε ξαναχρησιμοποιηθεί σε ρομπότ του εργαστηρίου.

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας και η μελλοντική εργασία που πρέπει να γίνει και αφορά το ρομπότ, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πειράματα συνεργασίας με άλλα ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή.

Abstract

This diploma thesis addresses the redesign of various subsystems of the initial space emulator active robot, located in the Control Systems Lab of the School of Mechanical Engineers. The space emulator consists of a granite table, two active space robots, a passive space robot and a system of cameras. The surface of the table has negligible roughness. This results in the capability of the robots to move frictionless across the table, with the use of air bearings. The motion of the robots is actuated by three pairs of thrusters and a reaction wheel, while with the use of the PhaseSpace camera system, the absolute position and the speed of the robots are known constantly. Using batteries and compressed CO_2 tanks, the system is moving autonomously during the experiments.

This thesis was focused on the initial active robot of the space emulator. During the elaboration of the thesis, the operation of the PC104 and its boards was tested and restored, some basic actions were programmed in the robot's ROS, additional links and sensors were affixed to the arms and the operation of the pneumatic system was optimized, with the addition of flow control valves and new nozzles to the thrusters and the use of the SIMPLEX method in order to minimize fuel consumption during robot movement.

To confirm the proper operation of the new parts and to verify the employed methods, a number of experiments were designed and executed. The experiments verifying the ability of the robot to move in specified trajectories, under minimum fuel consumption, were of great importance since the method was never before applied to the CSL space robots.

Finally, the results of the thesis are introduced as well as future work upon the robot, in order for it to be able to conduct co-operational experiments with the rest of the space emulator robots.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας καθηγητή κ. Ε. Παπαδόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετέχω στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, σε ένα θέμα που με ενδιέφερε και μου έδωσε τη δυνατότητα να κερδίσω γνώσεις σε πολλά πεδία που σχετίζονται με το κομμάτι της ρομποτικής. Ακόμα τον ευχαριστώ για όλη την καθοδήγηση που μου έδινε στην διάρκεια της εργασίας και για την πολύτιμη και συνεχή βοήθειά του.

Ομοίως θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα του εργαστηρίου για την βοήθεια που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια της παρουσίας μου εκεί και για το υπέροχο κλίμα που είχαμε δημιουργήσει δουλεύοντας μαζί κάθε μέρα. Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τους Α. Κωνσταντινίδη, Κ. Σμυρλή και Ο. Σιμάτο για όλη τη βοήθεια στο κομμάτι της εργασίας και γιατί χωρίς αυτούς, η καθημερινότητα στο εργαστήριο δεν θα ήταν η ίδια.

Περιεχόμενα

Περίληψη **2**
Abstract **3**
Περιεχόμενα **5**
Κατάλογος Σχημάτων **7**
Κατάλογος Πινάκων **10**
1 Εισαγωγή **11**
1.1 Σκοπός Εργασίας 11
1.2 Ο Διαστημικός Εξομοιωτής του CSL 12
1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 15
1.4 Δομή Εργασίας 16
2 Μέθοδοι και Στοιχεία Δυναμικής για Διαστημικές Εφαρμογές **17**
2.1 Αντίστροφη Κινηματική και Δυναμικές Ιδιομορφίες 17
2.2 Δυναμική Σφονδύλου Αντίδρασης 22
2.3 Λογισμικό ROS και δομή 24
2.3.1 Εισαγωγή 24
2.3.2 Δομή του ROS 24
2.3.3 ROS Nodes 25
2.3.4 Topics και Messages 26
2.3.5 Rosbag 26
2.3.6 ROS Rate και ROS Timer 27
2.4 Η Μέθοδος Simplex 27
2.4.1 Εισαγωγή 27
2.4.2 Γεωμετρική Επίλυση 29
2.4.3 Πινακοποιημένη (Μηχανιστική) Επίλυση 31
3 Χώρος Εργασίας Ρομπότ **33**
3.1 Υπολογισμός Χώρου Εργασίας Βάσει της Θεωρίας 33
3.2 Εύρεση Χώρου Εργασίας με Χρήση Μηχανικών Περιορισμών 35
3.3 Συμπεράσματα 36
3.4 Επιβεβαίωση με Προσομοίωση 37
4 Σχεδιασμός Τροχιάς **39**
4.1 Συνάρτηση Κόστους και Περιορισμοί 39
4.2 Υλοποίηση σε Matlab 44
4.3 Επικοινωνία με το Ρομπότ 46
4.4 Προσομοίωση και Αποτελέσματα 47

4.5 Το νέο πνευματικό σύστημα του ρομπότ 53
4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων..... 59
4.7 Συμπεράσματα 62
5 Έλεγχος Βραχιόνων 63
5.1 Αρπάγες με έλεγχο δύναμης..... 63
5.2 Έλεγχος Αρθρώσεων Βραχίονα 67
5.3 Αισθητήρες Hall 68
5.4 Επικοινωνία Arduino με ROS..... 71
5.5 Controller Βραχιόνων 72
6 Πειραματική Επιβεβαίωση 75
6.1 Πείραμα Βέλτιστης Κίνησης Βάσης του Ρομπότ 75
6.1.1 Το σύστημα PhaseSpace..... 75
6.1.2 Πείραμα κίνησης ρομπότ παράλληλα στον άξονα x 75
6.1.3 Συμπεράσματα 79
6.1.4 Πείραμα κίνησης ρομπότ παράλληλα στον άξονα y 79
6.1.5 Συμπεράσματα 82
6.1.6 Πείραμα κίνησης ρομπότ σε τυχαία γωνία 82
6.1.7 Συμπεράσματα 86
6.2 Αποτελέσματα 86
7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία 88
7.1 Συμπεράσματα 88
7.2 Μελλοντική Εργασία..... 88
8 Βιβλιογραφία 90
Παράρτημα A - Κώδικες 92
Παράρτημα B - PC104 Specs.....98
Παράρτημα C - Εγχειρίδια Προδιαγραφών Harware 100
Παράρτημα D - Οδηγίες χρήσης Cassiopeia 112

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Το ρομπότ κατά την έναρξη της παρούσας εργασίας. 11

Σχήμα 1.2. Το πρόβλημα των διαστημικών απορριμμάτων. 12

Σχήμα 1.3. Η τράπεζα από γρανίτη και οι κάμερες PhaseSpace. 14

Σχήμα 1.4. Οι διάφοροι τύποι καρτών PC104 [13]..... 14

Σχήμα 1.5. Τα ρομπότ του προγράμματος Free Flyers. 15

Σχήμα 1.6. Το περιβάλλον του διαστημικού εξομοιωτή του TEAMS Lab στο DLR. 16

Σχήμα 2.1. Βαρυκεντρικά διανύσματα του μέλους i ρομποτικού βραχίονα. 17

Σχήμα 2.2. (α) Γεωμετρικά και δυναμικά μεγέθη βραχίονα 3ων β.ε. (β) Βαρυκεντρικά διανύσματα βραχίονα 3ων β.ε. 18

Σχήμα 2.3. Καμπύλες σχετικών γωνιών των δύο πρώτων αρθρώσεων, για τις οποίες εμφανίζονται ιδιομορφίες. 21

Σχήμα 2.4. Χώροι εργασίας ρομπότ Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε. 21

Σχήμα 2.5. Χαρακτηριστική T-ω για διαφορετικές τάσεις λειτουργίας ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος. 23

Σχήμα 2.6. Η βασική δομή του ROS σε ένα ρομποτικό σύστημα [4]..... 25

Σχήμα 2.7 Η αρχική μορφή ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού. 28

Σχήμα 2.8 Η πρότυπη μορφή προβλήματος ΓΠ για την εφαρμογή της μεθόδου Simplex. 29

Σχήμα 2.9 Η γεωμετρική λύση του αλγορίθμου Simplex για πρόβλημα 2 μεταβλητών απόφασης. 30

Σχήμα 2.10 Παράδειγμα αρχικού πίνακα Simplex για πρόβλημα δύο μεταβλητών απόφασης με δύο εξισώσεις περιορισμών. 31

Σχήμα 3.1. Σχετική γωνία δεύτερης άρθρωσης ως προς την πρώτη, για τις οποίες εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες. 33

Σχήμα 3.2. Χώρος εργασίας ρομπότ στον οποίο δεν προκύπτει PIW. 34

Σχήμα 3.3. Σχετικές γωνίες των δύο πρώτων αρθρώσεων που οδηγούν στην εμφάνιση δυναμικών ιδιομορφιών, με χρήση μηχανικών περιορισμών. 35

Σχήμα 3.4. Χώροι εργασίας ρομπότ PIW (πράσινο) και PDW (μαύρο), που προκύπτουν με τη χρήση μηχανικών περιορισμών. 36

Σχήμα 3.5. Διάφορες κινήσεις του βραχίονα, όπως προκύπτουν από την προσομοίωση. α), γ) κινήσεις σε τυχαίες θέσεις. β) κίνηση παράλληλη στον άξονα y. δ) κίνηση παράλληλη στον άξονα x. 38

Σχήμα 4.1 Η βάση του ρομπότ και οι δυνάμεις από τα thruster με μηδενική γωνία βάσης. 40

Σχήμα 4.2. Η βάση του ρομπότ στραμμένη κατά τυχαία γωνία. 41

Σχήμα 4.3. Η πειραματική διάταξη για την μέτρηση των δυνάμεων των προωθητήρων. 42

Σχήμα 4.4. Μετρήσεις ώσης για τον προωθητήρα νούμερο 3, από τον αισθητήρα δύναμης. 42

Σχήμα 4.5. Το διάγραμμα ροπής-στροφών του κινητήρα του σφονδύλου ανάδρασης. 44
Σχήμα 4.6. Η μοντελοποίηση του συστήματος στο περιβάλλον Simscape. 47
Σχήμα 4.7. Η επιλογή διαστάσεων και συστημάτων συντεταγμένων για τη βάση του ρομπότ, όπως χρησιμοποιείται στο μοντέλο του Simscape. 48
Σχήμα 4.8. Στιγμιότυπα από την προσομοίωση του πειράματος. 49
Σχήμα 4.9. Οι βαλβίδες ελέγχου ροής της εταιρείας FESTO που χρησιμοποιήθηκαν [19] 50
Σχήμα 4.10. Τα δύο εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την έξοδο των προωθητήρων[18] 51
Σχήμα 4.11. Το σχηματικό διάγραμμα της βαλβίδας ρύθμισης ροής. 51
Σχήμα 4.12. Παροχή ως συνάρτηση των στροφών της βίδας ρύθμισης της ροής (QS-3). 52
Σχήμα 4.13. Τα νέα ακροφύσια με τις βαλβίδες ελέγχου ροής τοποθετημένα στο ρομπότ. 53
Σχήμα 4.14. Η δύναμη ώσης που παράγεται από τον προωθητήρα 5 όταν λειτουργεί μόνος του για 100% duty cycle. 53
Σχήμα 4.15. Η δύναμη ώσης του thruster 5 για 100% duty cycle όταν λειτουργεί ταυτόχρονα με το thruster 1. 54
Σχήμα 4.16. Η δύναμη ώσης του thruster 5 για 100% duty cycle όταν λειτουργεί ταυτόχρονα με τα thruster 1 και 2. 54
Σχήμα 4.17. Διαγράμματα ώσης του προωθητήρα 5, όταν λειτουργεί ταυτόχρονα με άλλους έναν ή δύο προωθητήρες, με χρήση του φίλτρου Savitzky-Golay. 56
Σχήμα 4.18. Η ώση του προωθητήρα 1 για n=7 στροφές του κοχλία του στραγγαλιστή. 57
Σχήμα 4.19. Η ώση του προωθητήρα 2 για n=7 στροφές του κοχλία του στραγγαλιστή. 57
Σχήμα 4.20. Οι δυνάμεις ώσης για τον προωθητήρα 3, σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας για n=5 στροφές κοχλία και για 100% duty cycle. 58
Σχήμα 4.21. Οι δυνάμεις ώσης για τον προωθητήρα 5, σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας για n=5 στροφές κοχλία και για 100% duty cycle. 59
Σχήμα 4.22. Οι διάφορες κινήσεις της βάσης που ελέγχθηκαν ως προς την κατανάλωση καυσίμου. 60
Σχήμα 5.1. Οι grippers τοποθετημένοι στα άκρα των βραχιόνων του ρομπότ. 63
Σχήμα 5.2. Σχηματικό διάγραμμα ενός σερβοκινητήρα. 64
Σχήμα 5.3. (α) Οι στρώσεις διαφορετικών στοιχείων ενός FSR (β) Οι FSR που χρησιμοποιήθηκαν στις αρπάγες του ρομπότ. 65
Σχήμα 5.4. Τα δεδομένα για την τάση στα άκρα του FSR με την εφαρμογή πρότυπων βαρών. 66
Σχήμα 5.5. Οι αρπάγες με τους FSR, την τσόχα και το ελαστικό. 67
Σχήμα 5.6. Αισθητήρας Hall και οι ακροδέκτες του. 69
Σχήμα 5.7. Αισθητήρας Hall τοποθετημένος στην elbow άρθρωση του βραχίονα. 69
Σχήμα 5.8. Οι θετικές φορές για: (α) τις γωνίες και (β) τις ροπές. 70

Σχήμα 5.9. Η γωνία της πρώτης άρθρωσης κατά την μετάβαση σε home position. 73
Σχήμα 5.10. Η γωνία της δεύτερης άρθρωσης κατά την μετάβαση σε home position. 74
Σχήμα 6.1. Στιγμιότυπο κατά τη φάση επιτάχυνσης για κίνηση στον x-άξονα. 76
Σχήμα 6.2. Στιγμιότυπο κατά τη φάση επιβράδυνσης για κίνηση στον x-άξονα. 76
Σχήμα 6.3. Η θέση του ρομπότ στον x-άξονα ως προς τον χρόνο. 77
Σχήμα 6.4. Η θέση του ρομπότ στον y-άξονα ως προς τον χρόνο. 77
Σχήμα 6.5. Η τροχιά που ακολούθησε το ρομπότ πάνω στην τράπεζα κατά το πείραμα. 78
Σχήμα 6.6. Η x-συνιστώσα της ταχύτητας του ρομπότ ως προς τον χρόνο. 78
Σχήμα 6.7. Στιγμιότυπο πειράματος κίνησης παράλληλης στον y-άξονα. 79
Σχήμα 6.8. Στιγμιότυπο πειράματος κίνησης παράλληλης στον y-άξονα. 79
Σχήμα 6.9. Η θέση του ρομπότ στον x-άξονα ως προς τον χρόνο. 80
Σχήμα 6.10. Η θέση του ρομπότ στον y-άξονα ως προς τον χρόνο. 80
Σχήμα 6.11. Η τροχιά που ακολούθησε το ρομπότ πάνω στην τράπεζα κατά το πείραμα. 81
Σχήμα 6.12. Η y-συνιστώσα της ταχύτητας του ρομπότ ως προς τον χρόνο. 81
Σχήμα 6.13. Στιγμιότυπο κατά την πειραματική διαδικασία 82
Σχήμα 6.14. Η απόσταση που διανύει το ρομπότ κατά τη x-διεύθυνση ως προς τον χρόνο. 83
Σχήμα 6.15. Η απόσταση που διανύει το ρομπότ κατά τη y-διεύθυνση ως προς τον χρόνο. 83
Σχήμα 6.16. Η τροχιά που ακολούθησε το ρομπότ πάνω στην τράπεζα κατά το πείραμα. 84
Σχήμα 6.17. Η γωνία της βάσης ως προς τον χρόνο. 84
Σχήμα 6.18. Η x-συνιστώσα της ταχύτητας του ρομπότ ως προς τον χρόνο. 85
Σχήμα 6.19. Η y-συνιστώσα της ταχύτητας του ρομπότ ως προς τον χρόνο. 85
Σχήμα 6.20. Η γωνιακή ταχύτητα του ρομπότ ως προς τον χρόνο. 86

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη της βάσης και του βραχίονα για την εφαρμογή της μεθόδου των βαρυκεντρικών διανυσμάτων στο ρομπότ. 33

Πίνακας 4.1 Οι μέγιστες τιμές ώσης για κάθε προωθητήρα 43

Πίνακας 4.2 Οι μέγιστες τιμές ώσης για κάθε προωθητήρα όταν λειτουργεί μεμονωμένα και ταυτόχρονα με έναν ή δύο ακόμα προωθητήρες, για το νέο πνευματικό σύστημα του ρομπότ, όταν n=5 στροφές. 58

Πίνακας 4.3 Οι καταναλώσεις για τις 3 βασικές κινήσεις που εξετάζονται βάσει όλων των σεναρίων κίνησης 61

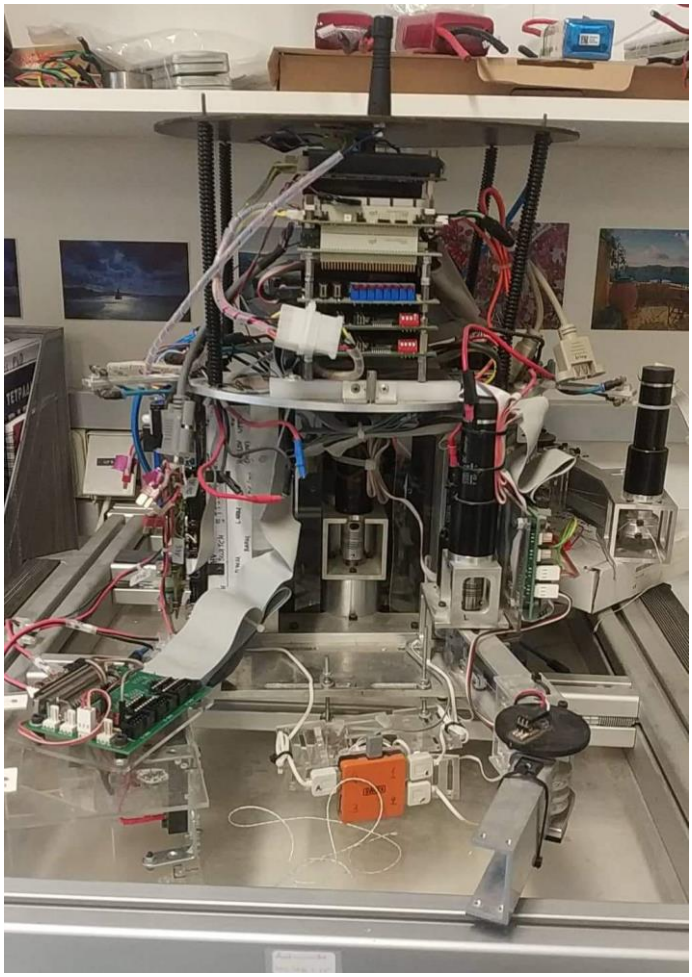
Πίνακας 5.1 Οι θέσεις στις οποίες αρχικοποιούνται οι αρθρώσεις του ρομπότ 70

Πίνακας 5.2 Τα κέρδη που επιλέχθηκαν για τους ελεγκτές των αρθρώσεων 73

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η επαναφορά σε λειτουργία του αρχικού ενεργητικού ρομπότ 'Cassiopeia' του διαστημικού εξομοιωτή με την επίτευξη του ελέγχου των υποσυστημάτων του και την αποκατάσταση των προβλημάτων που υπήρχαν σε ορισμένα από αυτά (Σχήμα 1.1). Η εργασία αυτή αφορά τον διαστημικό εξομοιωτή που έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του ερευνητικού έργου του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μετά το πέρας της εργασίας τα μηχανολογικά, ηλεκτρονικά και πνευματικά υποσυστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν τους βραχίονες, τους διάφορους αισθητήρες και τους προωθητήρες, θα μπορούν να λειτουργούν ομαλά και να ελέγχονται από το PC104 που βρίσκεται εγκατεστημένο στο σύστημα. Έτσι, το ρομπότ θα είναι σε θέση να κινείται πάνω στην τράπεζα του διαστημικού εξομοιωτή και να εκτελεί εργασίες με τους βραχίονες που θα αφορούν σε ενέργειες αρπαγής αντικειμένων.



Σχήμα 1.1. Το ρομπότ κατά την έναρξη της παρούσας εργασίας.

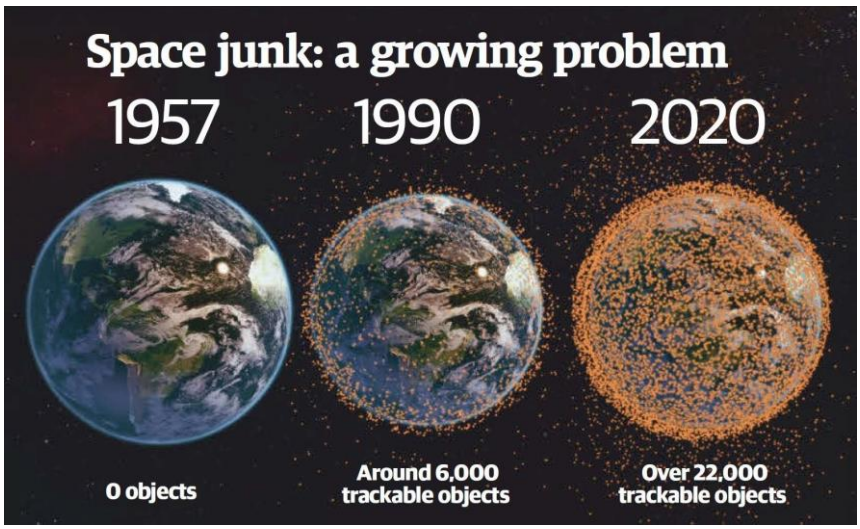
Στο δεύτερο τμήμα της εργασίας, με την λειτουργία του hardware να έχει αποκατασταθεί σε μεγάλο βαθμό, θα δοθεί βάση στην ανάγκη να μπορεί το ρομπότ να εκτελεί βασικές λειτουργίες και να μπορεί να συμμετέχει σε πειράματα πάνω στην τράπεζα του γρανίτη. Σε

αυτό το μέρος της εργασίας, θα αναπτυχθεί το λογισμικό στο ROS του ρομπότ, με σκοπό να υπάρχει επικοινωνία όλων των υποσυστημάτων του ρομπότ και η επικοινωνία του ROS με άλλα προγράμματα όπως το Arduino και η MATLAB. Ακόμα, θα μπορεί να χρησιμοποιείται στο ρομπότ το σύστημα καμερών PhaseSpace που υπάρχει στον διαστημικό εξομοιωτή.

Τέλος, για να αποδειχθεί η λειτουργικότητα των παραπάνω, σχεδιάζεται και πραγματοποιείται πείραμα, στο οποίο το ρομπότ εκτελεί κινήσεις πάνω στην τράπεζα του γρανίτη.

1.2 Ο Διαστημικός Εξομοιωτής του CSL

Τα τελευταία χρόνια το πρόβλημα των διαστημικών απορριμμάτων (space debris) έχει γίνει αρκετά εμφανές με αποτέλεσμα όλες οι μεγάλες διαστημικές υπηρεσίες ανά τον κόσμο να αναζητούν βιώσιμες λύσεις (Σχήμα 1.2). Ως διαστημικά απορρίμματα, χαρακτηρίζονται τεχνητά αντικείμενα στο διάστημα, μη λειτουργικά και κυρίως αυτά που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη. Στα απορρίμματα αυτά περιλαμβάνονται από μη λειτουργικά διαστημικά οχήματα και μέρη δορυφόρων ή πυραύλων που απομακρύνονται κατά την απογείωση, μέχρι μάζες που έχουν δημιουργηθεί από συγκρούσεις ή από τη φυσική φθορά δορυφόρων και στερεοποιημένα υγρά που αποβάλλονται από διαστημικές αποστολές [11] Σύμφωνα με στοιχεία της ESA, 2700 ενεργοί δορυφόροι βρίσκονται σε τροχιά την ίδια στιγμή με 8800 τόνους διαστημικών απορριμμάτων, τα οποία κινούνται με πολλά χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο και επομένως, ενδεχόμενη σύγκρουση μπορεί να καταστρέψει τους δορυφόρους [17] Για την αποφυγή τέτοιων συγκρούσεων απαιτούνται ώρες παρακολούθησης του διαστήματος από επιστήμονες, ώστε να υπολογιστούν οι πιθανότητες μιας τέτοιας σύγκρουσης και να προετοιμαστούν κινήσεις αποφυγής (manoeuvres), οι οποίες όμως κοστίζουν αρκετά σε καύσιμο, αλλά και σε επιστημονικά δεδομένα, τα οποία δεν συλλέγονται λόγω της κίνησης αυτής.



Σχήμα 1.2. Το πρόβλημα των διαστημικών απορριμμάτων.

Η λύση η οποία εξετάζεται εδώ και αρκετά χρόνια αφορά το On-Orbit Servicing και το Space Debris Removal. Το On-Orbit Servicing σχετίζεται με την αποστολή διαστημικών ρομπότ σε τροχιές όπου βρίσκονται δορυφόροι, με σκοπό να διενεργηθούν κάποιες εργασίες όπως επισκευές και μεταφορά καύσιμου με σκοπό οι δορυφόροι αυτοί να παραμείνουν λειτουργικοί και να μην καταλήξουν να γίνουν κι αυτοί απορρίμματα. Το Space

Debris Removal έχει να κάνει με την αποστολή ρομπότ σε τροχιές που υπάρχουν μη-λειτουργικοί δορυφόροι ή κομμάτια δορυφόρων και γενικά διαστημικά απορρίμματα, ώστε να απομακρυνθούν αυτά τα αντικείμενα από περιοχές που δημιουργούν προβλήματα, δηλαδή από σημεία που ανήκουν σε τροχιές ενεργών δορυφόρων. Για να υλοποιηθούν τέτοιες λύσεις πρέπει προφανώς πρώτα να δοκιμαστούν στη Γη. Έτσι, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, έχει δημιουργηθεί ένας διαστημικός εξομοιωτής, ώστε ακόμα και σε δύο διαστάσεις, να μπορεί να ελέγχεται η χρήση τόσο των ρομπότ, όσο και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται.

Ο διαστημικός εξομοιωτής του εργαστηρίου αποτελείται από μία τράπεζα από γρανίτη (Σχ. 1.3), δύο ενεργητικά διαστημικά ρομπότ, ένα παθητικό ρομπότ και ένα σύστημα καμερών. Η τράπεζα του γρανίτη αποτελεί τον χώρο στον οποίο γίνονται τα πειράματα. Έχει διαστάσεις 2.2m×1.8m×0.4m και ζυγίζει περίπου 4 τόνους, ενώ η επιφάνειά της είναι ειδικά κατεργασμένη, ώστε να έχει εξαιρετικά μικρή τραχύτητα της τάξης των 6 μικρομέτρων.

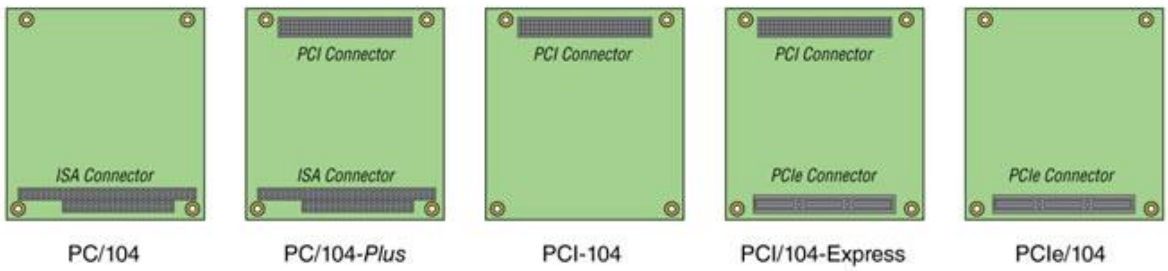
Τα ενεργητικά ρομπότ, φέρουν βραχίονες και προσομοιώνουν, στο διδιάστατο επίπεδο, την κίνηση των διαστημικών ρομπότ, που εκτελούν εργασίες σε τροχιά. Φέρουν στη βάση τους αεροέδρανα, που χάρη στην ύπαρξη πορώδους γραφίτη στην κάτω επιφάνειά τους, όταν τροφοδοτούνται με πεπιεσμένο αέρα, δημιουργούν ένα φιλμ αέρα, περίπου 10 μικρών. Έτσι, σε συνδυασμό με την μικρή τραχύτητα του γρανίτη τα ρομπότ μπορούν να κινούνται χωρίς τριβές στο τραπέζι προσομοιώνοντας κίνηση σε περιβάλλον μηδενικής βαρύτητας. Η κίνηση των ρομπότ γίνεται με προωθητήρες (thrusters), οι οποίοι λειτουργούν κι αυτοί με πεπιεσμένο διοξείδιο του άνθρακα και με την ύπαρξη ενός σφονδύλου αντίδρασης, ο οποίος μεταφέρει στροφορμή στη βάση του ρομπότ. Η επικοινωνία με το ρομπότ γίνεται μέσω ενός PC104 στο οποίο είναι εγκατεστημένο το ROS που διευκολύνει τον έλεγχο και την επικοινωνία όλων των υποσυστημάτων του ρομπότ.

Το παθητικό ρομπότ βασίζεται κι αυτό στην χρήση των αεροεδράνων για τη λειτουργία του, όμως δεν φέρει βραχίονες, προωθητήρες και reaction wheel. Κινείται σε τυχαίες τροχιές πάνω στην τράπεζα και παίζει το ρόλο διαστημικού απορρίμματος, πάνω στο οποίο θα πρέπει να εκτελέσει εργασίες το εκάστοτε ενεργητικό ρομπότ. Έχει και αυτό PC104 με το οποίο ελέγχονται διάφοροι αισθητήρες και για τη διευκόλυνση της διεξαγωγής των πειραμάτων, η γεωμετρία της βάσης του, μπορεί να υποστεί μικρές αλλαγές.

Τέλος, ένα βασικό στοιχείο του διαστημικού εξομοιωτή, είναι το σύστημα των καμερών PhaseSpace που υπάρχει στο εργαστήριο. Για την λειτουργία του, στο πάνω μέρος των ρομπότ τοποθετούνται ειδικά LED, που αναβοσβήνουν σε διαφορετικές συχνότητες. Κάθε LED έχει συγκεκριμένη σήμανση και βρίσκεται σε συγκεκριμένη θέση. Οι κάμερες, αναγνωρίζουν την συχνότητα του κάθε LED, επικοινωνούν με το ROS του ρομπότ, παράγοντας κατάλληλα μηνύματα και με αυτόν τον τρόπο είναι ανά πάσα στιγμή γνωστή η θέση, ο προσανατολισμός και η ταχύτητα των ρομπότ, με τη χρήση μετασχηματισμών tf, δηλαδή μιας βιβλιοθήκης του ROS, η οποία χρησιμοποιείται για την χρήση μετασχηματισμών σε γνωστά συστήματα συντεταγμένων.

Σχήμα 1.3. Η τράπεζα από γρανίτη και οι κάμερες PhaseSpace.

Ο έλεγχος όλων των διαστημικών ρομπότ του εργαστηρίου γίνεται με τη χρήση PC104. Το PC104 είναι ένας υπολογιστής σε μορφή πύργου ο οποίος αποτελείται από κάρτες (boards) που τοποθετούνται η μία πάνω από την άλλη και επικοινωνούν μέσω ISA, PCI ή PCIe buses (Σχ. 1.4). Προσφέρει στο σύστημα υπολογιστική αυτονομία και τα βασικά του πλεονεκτήματα αφορούν στο συνδυασμό της υψηλής υπολογιστικής απόδοσης με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, μικρό βάρος και διαστάσεις και το γεγονός ότι αποτελεί ένα ανθεκτικό και συμπαγές σύστημα.



Σχήμα 1.4. Οι διάφοροι τύποι καρτών PC104 [13]

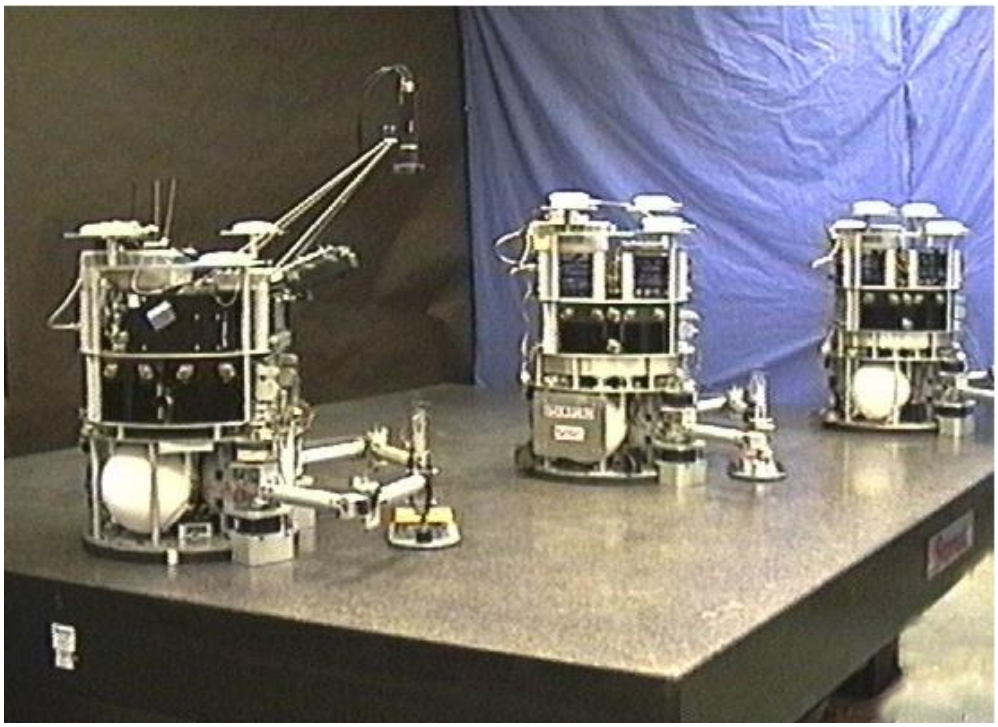
Το PC104 του ρομπότ αποτελείται από 6 κάρτες και έναν σκληρό δίσκο SSD τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β. Οι κάρτες που αποτελούν τον υπολογιστή του ρομπότ είναι τύπου PC104 και PC104+, που σημαίνει ότι επικοινωνούν μέσω ISA και PCI buses. Πρέπει να αναφερθεί πως για τις κάρτες που ελέγχουν συστήματα εισόδου και εξόδου ορίζονται συγκεκριμένες base addresses μέσω των οποίων καθορίζονται

στο λογισμικό του ρομπότ. Οι κάρτες αυτές είναι οι δύο Incremental Encoder Cards και η DAC card.

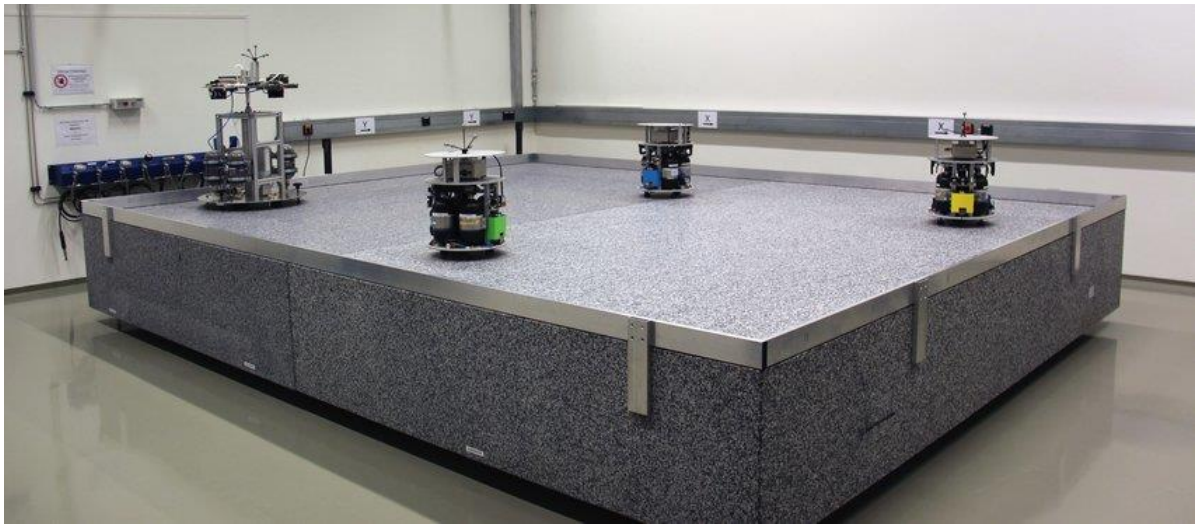
1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Υπάρχουν μερικοί τρόποι με τους οποίους προσομοιώνεται στην Γη ένα περιβάλλον μηδενικής βαρύτητας, όπως για παράδειγμα με τη χρήση ειδικών αεροσκαφών που πετάνε σε ειδικές παραβολικές τροχιές. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται ένα περιβάλλον μικροβαρύτητας όπως στο διάστημα, το οποίο όμως διαρκεί για λίγα λεπτά. Έτσι, από πολύ νωρίς χρησιμοποιήθηκαν διδιάστατοι διαστημικοί εξομοιωτές για ερευνητικούς σκοπούς σε διάφορα ερευνητικά ιδρύματα. Ένας από τους πρώτους διαστημικούς εξομοιωτές είναι τα τρία ενεργητικά ρομπότ, του προγράμματος Free Flyers του πανεπιστημίου Stanford (Σχ. 1.5) [14] Τα ρομπότ, κινούνταν με τη χρήση αεροέδρανων πάνω σε τράπεζα γρανίτη με προωθητήρες και σφόνδυλο αντίδρασης για επενεργητές, ενώ στις βάσεις τους είχαν εγκατασταθεί ζεύγη βραχιόνων τριών αρθρώσεων με πνευματικές αρπάγες. Τη θέση και τον προσανατολισμό των ρομπότ παρακολουθούσε κάμερα τοποθετημένη πάνω από την τράπεζα γρανίτη και σύστημα βασισμένο σε Pseudolite GPS.

Ένα ακόμα πρόγραμμα, το οποίο βασιζόταν στην ίδια λογική βρίσκεται στο Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής (DLR) στο εργαστήριο του Ινστιτούτου Διαστημικών συστημάτων. Τα ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή του TEAMS Laboratory, έχουν κι αυτά προωθητήρες και σφονδύλους αντίδρασης για την κίνησή τους, όμως κάποια από αυτά, είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να έχουν 2 μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας και 3 περιστροφικούς (Σχ. 1.6) [16] Η θέση των ρομπότ στο χώρο καθορίζεται από ένα σύστημα με κάμερες και αναδρομικούς ανακλαστήρες στα σώματα των ρομπότ.



Σχήμα 1.5. Τα ρομπότ του προγράμματος Free Flyers.



Σχήμα 1.6. Το περιβάλλον του διαστημικού εξομοιωτή του TEAMS Lab στο DLR.

1.4 Δομή Εργασίας

Η παρούσα εργασία χωρίζεται στα παρακάτω 7 κεφάλαια.

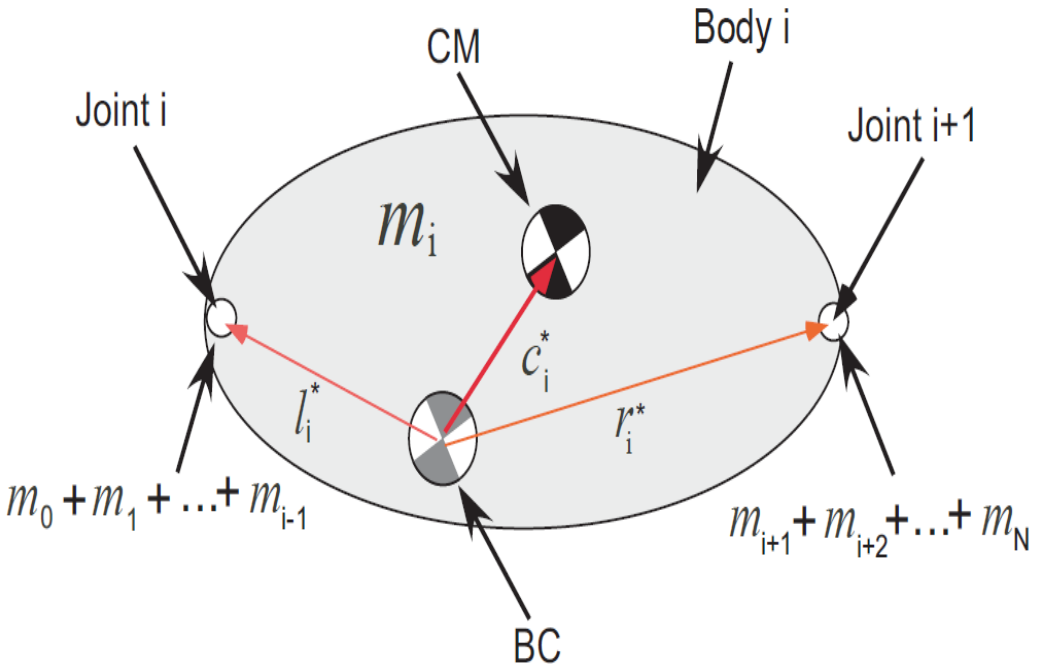
1. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στους διαστημικούς εξομοιωτές, παρουσιάζεται ο διαστημικός εξομοιωτής του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου και αναλύεται ο σκοπός της εργασίας και τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την εκπόνηση της.
2. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται σε θεωρητικό επίπεδο οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία και επεξηγούνται θέματα που αφορούν τη δυναμική των διαστημικών free floating ρομποτικών συστημάτων.
3. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υπολογισμοί που αφορούν στον χώρο εργασίας των βραχιόνων του ρομπότ και στην αποφυγή δυναμικών ιδιομορφιών κατά την κίνησή τους.
4. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της βελτιστοποίησης της κίνησης του ρομπότ όσον αφορά την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Παράλληλα, περιγράφονται και διάφορες μετατροπές στο πνευματικό σύστημα του ρομπότ.
5. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προσθήκες στο μηχανολογικό υποσύστημα των βραχιόνων του ρομπότ και αναλύονται οι τρόποι που γίνεται η αρχικοποίηση καθώς και ο έλεγχος της κίνησης.
6. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν κατά το πέρας της εργασίας.
7. Στο έβδομο κεφάλαιο, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία καθώς και οι πιθανές μελλοντικές εργασίες, που θα γίνουν πάνω στο ρομπότ διαστημικού εξομοιωτή βασιζόμενες στα αποτελέσματα αυτής, ώστε το ρομπότ να γίνει ακόμα πιο λειτουργικό, στα πλαίσια πειραμάτων.

2 Μέθοδοι και Στοιχεία Δυναμικής για Διαστημικές Εφαρμογές

2.1 Αντίστροφη Κινηματική και Δυναμικές Ιδιομορφίες

Σε αντίθεση με τα ρομπότ σταθερής βάσης, η βάση ενός ρομπότ ελεύθερα αιωρούμενης βάσης (free-floating), κινείται κατά την κίνηση των μελών του. Έτσι, το κινηματικό μοντέλο ενός τέτοιου ρομπότ, δεν εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, δηλαδή τα μήκη των μελών του βραχίονα, αλλά εξαρτάται και από τις δυναμικές του ιδιότητες. Επομένως, η μέθοδος Denavit-Hartenberg δεν είναι επαρκής και προσεγγίζουμε τα προβλήματα αντίστροφης κινηματικής τέτοιων ρομπότ με την χρήση των βαρυκεντρικών διανυσμάτων [29]

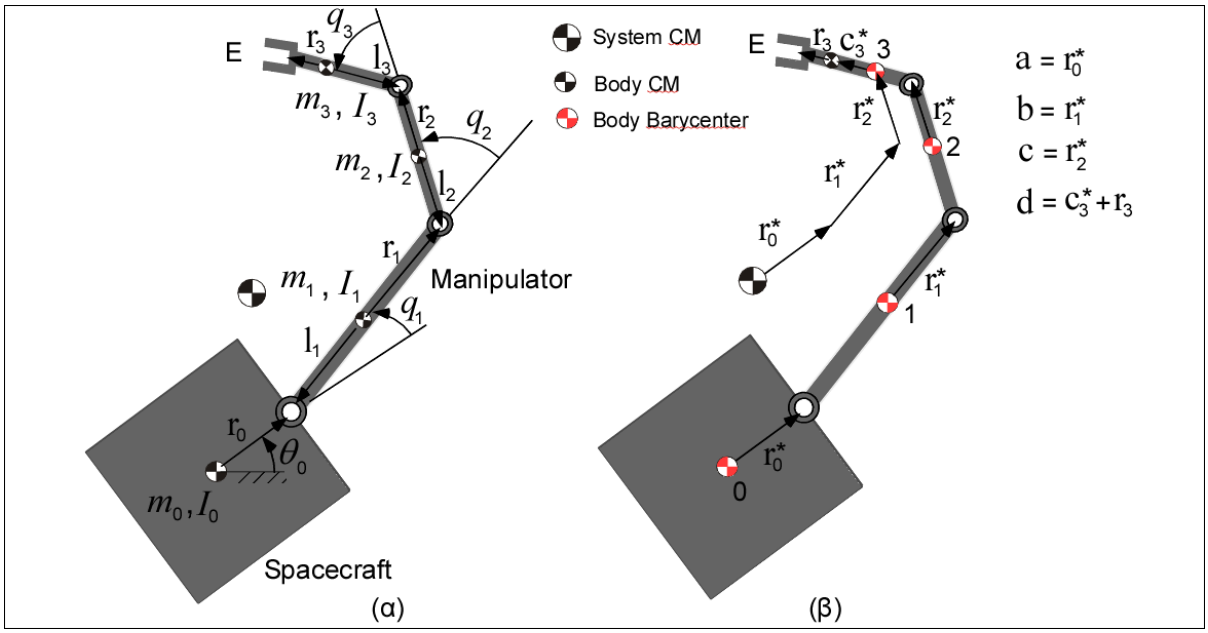
Τα βαρυκεντρικά διανύσματα ενώνουν 4 σημεία κάθε μέλους του συστήματος. Το κέντρο μάζας του, τις θέσεις των δύο αρθρώσεων στα άκρα του και το βαρύκεντρο του (BC), δηλαδή το κέντρο μάζας του επαυξημένου σώματος. Συγκεκριμένα, ως βαρύκεντρο ορίζεται το κέντρο μάζας που θα είχε το μέλος, αν στη θέση της άρθρωσης πριν το μέλος ήταν συγκεντρωμένη η μάζα όλων των μελών που προηγούνται του μέλους και αντίστοιχα στη θέση της άρθρωσης μετά το μέλος, ήταν συγκεντρωμένη η μάζα όλων όσων το ακολουθούν. Για το μέλος i του συστήματος με μάζα m_i, το διάνυσμα που ενώνει την πρώτη άρθρωση με το σημείο BC ονομάζεται l_i*, το διάνυσμα που ενώνει τη δεύτερη άρθρωση με το BC ονομάζεται r_i * και τέλος το διάνυσμα που ενώνει το κέντρο μάζας (CM) με το βαρύκεντρο ονομάζεται c_i* (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1. Βαρυκεντρικά διανύσματα του μέλους *i* ρομποτικού βραχίονα.

Ο διαστημικός εξομοιωτής του εργαστηρίου κινείται σε δύο διαστάσεις, ενώ τα απαραίτητα για τη μέθοδο των βαρυκεντρικών διανυσμάτων γεωμετρικά χαρακτηριστικά λαμβάνονται από το Solidworks όπου έχουν σχεδιαστεί οι βραχίονες. Τα διανύσματα a, b, c,

d που περιγράφουν την κινηματική του συστήματος ρομποτικού βραχίονα 3ων β.ε και χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη μέθοδο, θα εκφραστούν μέσω των διανυσμάτων l_i και r_i, δηλαδή των διανυσμάτων που ενώνουν το κέντρο μάζας του κάθε συνδέσμου με τη θέση της άρθρωσης που βρίσκεται στην αρχή και το τέλος του αντίστοιχα (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2. (α) Γεωμετρικά και δυναμικά μεγέθη βραχίονα 3ων β.ε. (β) Βαρυκεντρικά διανύσματα βραχίονα 3ων β.ε.

Υπολογίζονται τελικά τα μεγέθη (2-1)-(2-5) ως:

$$a = \frac{r_0 m_0}{M} \tag{2-1}$$

$$b = \frac{l_1 m_0 + (m_0 + m_1) r_1}{M} \tag{2-2}$$

$$c = \frac{l_2 (m_0 + m_1) + r_2 (m_0 + m_1 + m_2)}{M} \tag{2-3}$$

$$d = r_3 + \frac{l_3 (m_0 + m_1 + m_2)}{M} \tag{2-4}$$

$$M = m_0 + m_1 + m_2 \tag{2-5}$$

Με τη χρήση των παραπάνω σχέσεων επιλύονται προβλήματα αντίστροφης κινηματικής που περιγράφουν τη θέση και τον προσανατολισμό του στόχου ως προς το κέντρο μάζας του συστήματος (Εξ. (2-6) – (2-8)).

$$x_E = a\cos(\theta_0) + b\cos(\theta_0 + q_1) + c\cos(\theta_0 + q_1 + q_2) + d\cos(\theta_0 + q_1 + q_2 + q_3) \tag{2-6}$$

$$y_E = a\sin(\theta_0) + b\sin(\theta_0 + q_1) + c\sin(\theta_0 + q_1 + q_2) + d\sin(\theta_0 + q_1 + q_2 + q_3) \tag{2-7}$$

$$\theta_E = \theta_0 + q_1 + q_2 + q_3 \tag{2-8}$$

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 σταθερό ή μηδενικό. Δηλαδή αν όλες η αρθρώσεις κινηθούν προς μία φορά 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.

$$ {}^{\mathbf{0}}\mathbf{D}\,{}^{0}\dot{\theta}_0 + {}^{\mathbf{0}}\mathbf{D}_{\mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{R}_{\mathbf{0}}^{\mathbf{T}} h_{CM} \tag{2-9} $$

Η Εξίσωση (2-9) δίνει τον υπολογισμό της στροφορμής λαμβάνοντας υπόψιν τις γωνιακές ταχύτητες των αρθρώσεων και της βάσης. Οι πίνακες ${}^{\mathbf{0}}\mathbf{D}$ και ${}^{\mathbf{0}}\mathbf{D}_{\mathbf{q}}$, εκφράζουν τις αδράνειες κάθε σώματος ως προς το σύστημα συντεταγμένων της βάσης ανάλογα με τις σχετικές γωνίες μεταξύ των σωμάτων του συστήματος και την επιρροή της αδράνειας των υπολοίπων σωμάτων σε αυτή του κάθε σώματος ως προς το κέντρο μάζας του ρομπότ. Οι πίνακες ${}^{\mathbf{0}}\mathbf{D}_{\mathbf{q}}$ υπολογίζονται από τους τύπους (2-10) – (2-13) με σκοπό όταν χρησιμοποιηθούν γνωστές γωνίες, η Εξίσωση (2-9) να επιλύεται ως προς τη στροφορμή [29]

$$ {}^{0}D_0 = a_{00} + a_{01}\cos(q_1) + a_{02}\cos(q_1+q_2) + am_3 l_3 \cos(q_1+q_2+q_3) \tag{2-10} $$

$$ {}^{0}D_1 = a_{01}\cos(q_1) + a_{11} + a_{12}\cos(q_2) + bm_3 l_3 \cos(q_2+q_3) \tag{2-11} $$

$$ {}^{0}D_2 = a_{02}\cos(q_1+q_2) + a_{12}\cos(q_2) + a_{22} + cm_3 l_3 \cos(q_3) \tag{2-12} $$

$$ {}^{0}D_3 = a_{33} + am_3 l_3 \cos(q_1+q_2+q_3) + bm_3 l_3 \cos(q_2+q_3) + cm_3 l_3 \cos(q_3) \tag{2-13} $$

Οι παράμετροι $a_{00}, a_{01}, a_{02}, a_{11}, a_{12}, a_{22}, a_{33}$, υπολογίζονται μέσω των γεωμετρικών και δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος όπως φαίνεται στις σχέσεις (2-14) – (2-20).

$$ a_{00} = I_0 + \frac{m_0(m_1+m_2+m_3)r_0^2}{M} \tag{2-14} $$

$$ a_{01} = \frac{m_0 r_0 (l_1(m_1+m_2+m_3) + r_1(m_2+m_3)}{M} \tag{2-15} $$

$$ a_{02} = \frac{m_0 r_0 (l_2(m_2+m_3) + r_2 m_3)}{M} \tag{2-16} $$

$$ a_{11} = I_1 + \frac{m_0 m_1 l_1^2 + m_1(m_2+m_3)r_1^2 + m_0(m_2+m_3)(l_1+r_1)^2}{M} \tag{2-17} $$

$$ a_{12} = \frac{(l_1 m_0 + (m_0+m_1)r_1)(l_2(m_2+m_3) + r_2 m_3)}{M} \tag{2-18} $$

$$ a_{22} = I_2 + \frac{m_2 m_3 r_2^2 + m_2(m_0+m_1)l_2^2 + m_3(m_0+m_1)(l_2+r_2)^2}{M} \tag{2-19} $$

$$ a_{33} = I_3 + \frac{m_3(m_0+m_1+m_2)l_3^2}{M} \tag{2-20} $$

Λόγω της ελεύθερα αιωρούμενης βάσης του ρομποτικού συστήματος, σε εφαρμογές αρπαγής αντικειμένων, είναι πιθανή η εμφάνιση δυναμικών ιδιομορφιών, το οποίο σημαίνει ότι ο βραχίονας χάνει ένα βαθμό ελευθερίας, για ορισμένους συνδυασμούς σχετικών γωνιών των μελών του. Αυτό συμβαίνει γιατί η κίνηση της βάσης, που εμφανίζεται σαν αντίδραση στις κινήσεις των μελών του βραχίονα ακυρώνει μερικές κινήσεις σε κάποιες διευθύνσεις. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται παρακάτω, οδηγεί στην εύρεση ενός μικρότερου χώρου εργασίας για το ρομπότ, στον οποίο δεν εμφανίζονται οι δυναμικές ιδιομορφίες [36]

Σε ένα σύστημα με μηδενική στροφορμή, η γωνιακή ταχύτητα της βάσης με επίλυση της Εξίσωσης (2-9) υπολογίζεται ως:

$$\dot{\theta}_0 = -{}^{\mathbf{0}}\mathbf{D}^{-1}\,{}^{\mathbf{0}}\mathbf{D}_{\mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}} \tag{2-21}$$

Αν η (2-21) αντικατασταθεί στην εξίσωση ταχύτητας της αντίστροφης κινηματικής (Εξίσωση 2-22), τότε προκύπτει η Γενικευμένη Ιακωβιανή ${}^{\mathbf{0}}\boldsymbol{S}(\boldsymbol{q})$ (Εξίσωση 2-23) που εκφράζει την ταχύτητα του ΤΣΔ του βραχίονα, συναρτήσει των σχετικών ταχυτήτων των αρθρώσεων.

$$\begin{pmatrix} {}^{0}\dot{x}_E \\ {}^{0}\dot{y}_E \end{pmatrix} = {}^{\mathbf{0}}\mathbf{J}_{\mathbf{11}}\dot{\theta}_0 + {}^{\mathbf{0}}\mathbf{J}_{\mathbf{12}}\dot{\mathbf{q}} \tag{2-22}$$

$${}^{\mathbf{0}}\mathbf{S}(\mathbf{0}) = -{}^{\mathbf{0}}\mathbf{J}_{\mathbf{11}}\,{}^{\mathbf{0}}\mathbf{D}^{-1}\,{}^{\mathbf{0}}\mathbf{D}_{\mathbf{q}} + {}^{\mathbf{0}}\mathbf{J}_{\mathbf{12}} \tag{2-23}$$

Επομένως, οι δυναμικές ιδιομορφίες εμφανίζονται όταν η Εξ. (2-24) δεν έχει λύση, δηλαδή όταν η ορίζουσα S της ${}^{\mathbf{0}}\boldsymbol{S}(\boldsymbol{q})$, είναι ίση με 0.

$$\dot{\mathbf{q}} = {}^{\mathbf{0}}\mathbf{S}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{R}_{\mathbf{0}}^{\mathbf{T}}\begin{pmatrix} {}^{0}\dot{x}_E \\ {}^{0}\dot{y}_E \end{pmatrix} \tag{2-24}$$

$$S(q_1, q_2) = k_0(q_1) + k_1(q_1)\sin(q_2) + k_2(q_1)\cos(q_2) \tag{2-25}$$

όπου,

$$k_0(q_1) = b(aa_{22} - ca_{02})\sin(q_1) \tag{2-26}$$

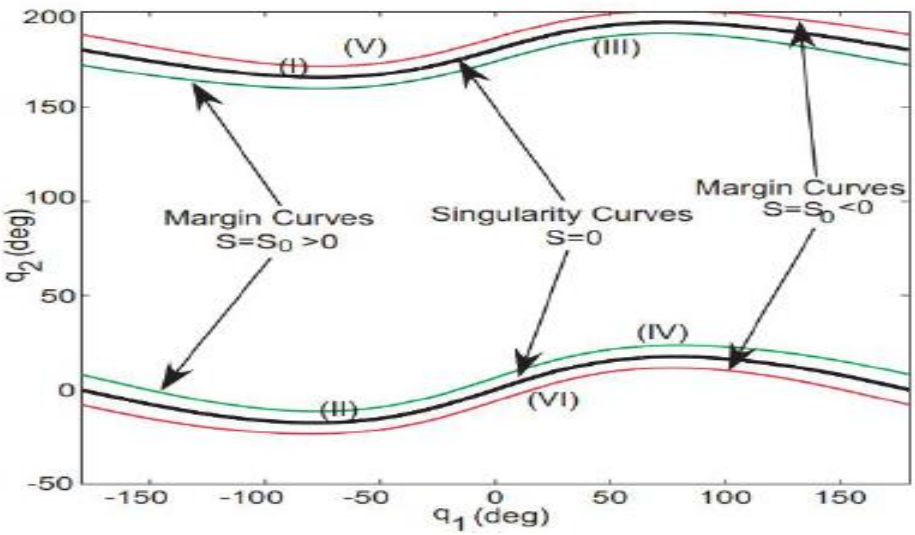
$$k_1(q_1) = -\frac{aba_{02} + aca_{01} - 2bca_{00}}{2} + c(-aa_{11} + ba_{01})\cos(q_1) + \frac{a(ba_{02} - ca_{01})\cos(2q_1)}{2} \tag{2-27}$$

$$k_2(q_1) = a(ba_{21} - ca_{11})\sin(q_1) + \frac{a(ba_{02} - ca_{01})\cos(2q_1)}{2} \tag{2-28}$$

Όταν η $S(q_1, q_2)$ είναι ίση με 0, προκύπτουν δύο καμπύλες $q_2(q_1)$, που δίνουν τους συνδυασμούς των σχετικών γωνιών των δύο πρώτων αρθρώσεων, για τους οποίους εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες. Οι δύο καμπύλες είναι αυτές που φαίνονται στις εξισώσεις (2-29), (2-30) και παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3.

$$q_2(q_1) = \arcsin\left(-\frac{k_0(q_1)\cos\left(\arctan\left(\frac{k_2(q_1)}{k_1(q_1)}\right)\right)}{k_1(q_1)}\right) - \arctan\left(\frac{k_2(q_1)}{k_1(q_1)}\right) \tag{2-29}$$

$$q_2(q_1) = \pi - \arcsin\left(-\frac{k_0(q_1)\cos\left(\arctan\left(\frac{k_2(q_1)}{k_1(q_1)}\right)\right)}{k_1(q_1)}\right) + \arctan\left(\frac{k_2(q_1)}{k_1(q_1)}\right) \tag{2-30}$$

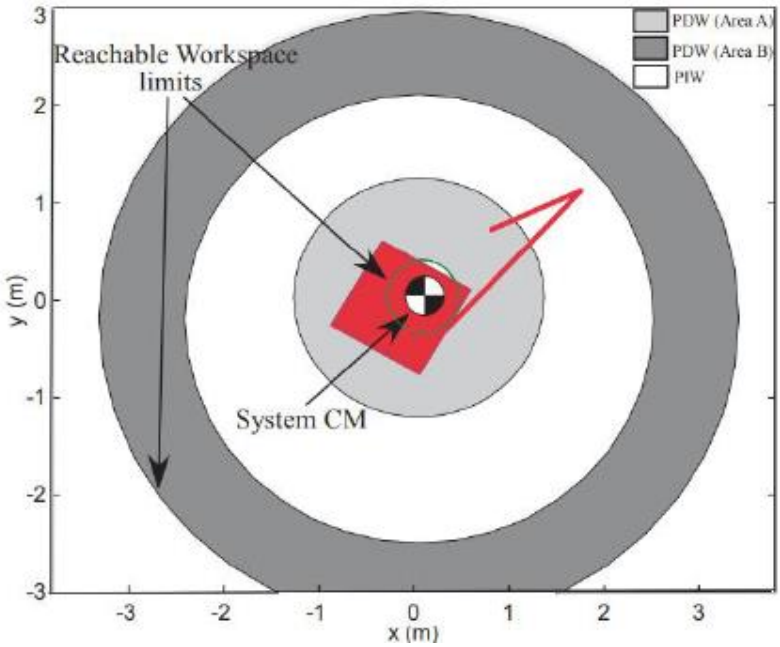


Σχήμα 2.3. Καμπύλες σχετικών γωνιών των δύο πρώτων αρθρώσεων, για τις οποίες εμφανίζονται ιδιομορφίες.

Τελικά, αν υπολογιστούν οι αποστάσεις R (Εξ. 2-31) από το κέντρο μάζας του συστήματος που μπορεί να έχει η τρίτη άρθρωση για τους παραπάνω συνδυασμούς γωνιών, υπολογίζεται ο χώρος στον οποίο είναι πιθανό να εμφανιστούν δυναμικές ιδιομορφίες. Για κάθε μία από τις καμπύλες, η απόσταση R, θα έχει μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή. Μεταξύ αυτών των τιμών εντοπίζονται οι χώροι στους οποίους υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης δυναμικών ιδιομορφιών (Path Dependent Workspace, PDW). Αν αυτοί οι χώροι δεν επικαλύπτονται, ο ενδιάμεσος χώρος αποτελεί τον χώρο εργασίας στον οποίο είναι αδύνατο να υπάρξουν δυναμικές ιδιομορφίες (Path Independent Workspace, PIW).

$$R=\sqrt{x_3^2+y_3^2}=\sqrt{a^2+b^2+c^2+2ab\cos(q_1)+2ac\cos(q_1+q_2)+2bc\cos(q_2)} \qquad (2\text{-}31)$$

Στο Σχήμα 2.4 βλέπουμε τους χώρους εργασίας PDW, PIW για ένα τυχαίο παράδειγμα διδιάστατου ρομπότ με βραχίονα 3^{ων} β.ε.



Σχήμα 2.4. Χώροι εργασίας ρομπότ Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.

2.2 Δυναμική Σφονδύλου Αντίδρασης

Ένα βασικό πρόβλημα στις διαστημικές εφαρμογές, είναι η κατανάλωση καυσίμου του ρομπότ, λόγω της αδυναμίας ανεφοδιασμού. Στον διαστημικό εξομοιωτή του εργαστηρίου, όπως έχει αναφερθεί, τη θέση του καυσίμου έχει λάβει το διοξείδιο του άνθρακα σε υψηλή πίεση, με το οποίο τροφοδοτούνται τα αεροέδρανα που χρησιμοποιούνται για να εκμηδενίσουν τις τριβές με την τράπεζα του γρανίτη και οι προωθητήρες (thrusters) που συμβάλουν στην μεταφορική (translational) και περιστροφική (rotational) κίνηση της βάσης του ρομπότ. Καθώς τα αεροέδρανα, για την ομαλή λειτουργία τους, απαιτούν συγκεκριμένη πίεση και ποσότητα αερίου, απαιτείται η ελαχιστοποίηση του αερίου που χρησιμοποιείται από τους προωθητήρες κατά την μετακίνηση της βάσης πάνω στην τράπεζα.

Όπως και σε πραγματικές διαστημικές εφαρμογές, ένας τρόπος για να συμβεί αυτό είναι η χρήση ενός σφονδύλου αντίδρασης (reaction wheel), ο οποίος αν και δεν μπορεί να συμβάλει στην μεταφορική κίνηση του ρομπότ, μπορεί να αποδώσει στη βάση ροπή, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της στροφορμής. Αν οριστεί σαν σύστημα η βάση του ρομπότ μαζί με το reaction wheel, σαν κατάσταση 1 κάποια χρονική στιγμή πριν την ενεργοποίηση του reaction wheel και σαν κατάσταση 2 μια χρονική στιγμή μετά την ενεργοποίηση του σφονδύλου, τότε, λόγω της μη ύπαρξης τριβών στην επαφή της βάσης με την τράπεζα, για τη στροφορμή του συστήματος ισχύουν [37]

$$H_{sys}^{(1)} = H_{sys}^{(2)} \tag{2-32}$$

$$H_{sys}^{(1)} = H_{b}^{(1)} \tag{2-33}$$

$$H_{sys}^{(2)} = H_{b}^{(2)} + H_{RW} \tag{2-34}$$

$$H_{b}^{(2)} = H_{b}^{(1)} + \Delta H_{b} \tag{2-35}$$

Από τις Εξ. (2-34) και (2-35) προκύπτει:

$$H_{sys}^{(2)} = H_{b}^{(1)} + \Delta H_{b} + H_{RW} \Rightarrow H_{sys}^{(2)} = H_{sys}^{(1)} + \Delta H_{b} + H_{RW} \tag{2-36}$$

Και από την (2-36) η αρχή διατήρησης της στροφορμής καταλήγει στην:

$$\Delta H_{b} = -H_{RW} \tag{2-37}$$

Τελικά, για τις ροπές:

$$\Delta H_{b} = -H_{RW} \Rightarrow \frac{d\Delta H_{b}}{dt} = -\frac{dH_{RW}}{dt} \Rightarrow T_{b} = -T_{RW} \tag{2-38}$$

Δηλαδή η ροπή που μεταφέρεται στη βάση του ρομπότ, είναι ίση και αντίθετη με τη ροπή που δίνει ο κινητήρας στο reaction wheel.

Για τις ροπές της βάσης και του σφονδύλου αντίδρασης έχουμε ακόμα ότι:

$$T_{b} = J_{b} \cdot \ddot{\theta}_{b} \tag{2-39}$$

$$T_{RW} = J_{RW} \cdot \ddot{\theta}_{RW} \tag{2-40}$$

Έτσι, από την Εξ. (2-35) για τη γωνιακή επιτάχυνση της βάσης σε σχέση με τη ροπή που δίνει το reaction wheel προκύπτει η σχέση:

$$\begin{gathered} H_{b}^{(2)} = H_{b}^{(1)} + \Delta H_{b} \Rightarrow J_{b} \cdot \dot{\theta}_{b}^{(2)} = J_{b} \cdot \dot{\theta}_{b}^{(1)} - J_{RW} \cdot \dot{\theta}_{RW} \Rightarrow \\ \ddot{\theta}_{b}^{(2)} = \ddot{\theta}_{b}^{(1)} - \frac{J_{RW}}{J_{b}} \ddot{\theta}_{RW} \Rightarrow \ddot{\theta}_{b}^{(2)} = \ddot{\theta}_{b}^{(1)} - \frac{T_{RW}}{J_{b}} \end{gathered} \tag{2-41}$$

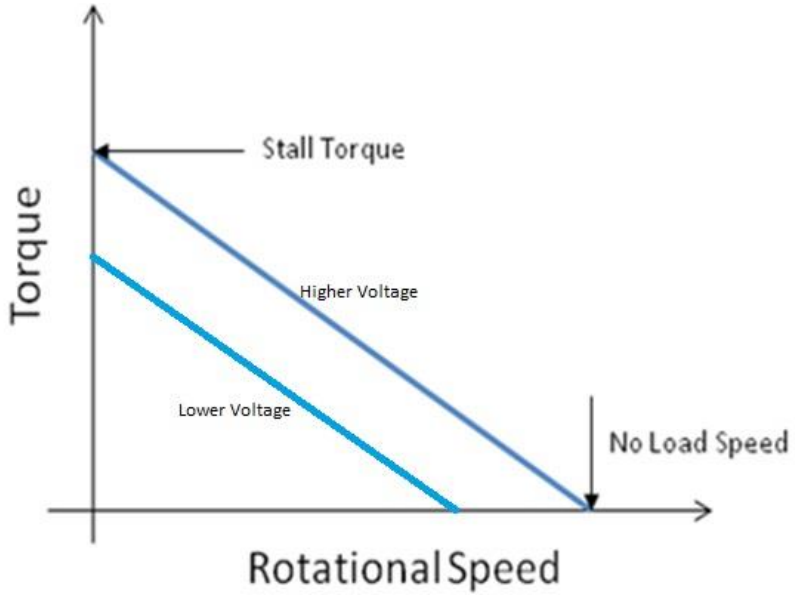
Για τη λειτουργία του σφονδύλου, πρέπει να είναι γνωστό αν μπορεί να βρεθεί μια αναλυτική έκφραση που να συνδέει τη γωνία του reaction wheel με τη γωνία της βάσης. Γενικά, οι περιορισμοί που εκφράζονται από το διαφορικό της διαμόρφωσης στο χώρο και το χρόνο, είναι μη ολόνομοι περιορισμοί. Αν αυτά τα διαφορικά μπορούν να ολοκληρωθούν αναλυτικά, τότε ο περιορισμός γίνεται ολόνομος. Η διατήρηση της γωνιακής ταχύτητας είναι

ένας δυναμικός περιορισμός, αναλυτικά ολοκληρώσιμος στο επίπεδο, ενώ γενικά, για την κίνηση του συστήματος, στην περίπτωση ολόνομων συστημάτων, μόνο οι περιορισμοί που είναι γεωμετρικής φύσης, είναι αναλυτικά ολοκληρώσιμοι περιορισμοί.

Το κέντρο μάζας του σφονδύλου αντίδρασης, ταυτίζεται με το κέντρο της βάσης. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, που είναι γνωστό ως Elroy's Beanie, οι γεωμετρικοί περιορισμοί των εξισώσεων κίνησης είναι ολοκληρώσιμοι και επομένως ολόνομοι, με ή χωρίς την ύπαρξη αρχικής στροφορμής και εν γένει ισχύει όταν οι άξονες περιστροφής είναι παράλληλοι. Άρα, η εξίσωση της γωνιακής ταχύτητας μπορεί να ολοκληρωθεί και να προκύψει μια αναλυτική σχέση ανάμεσα στη γωνία του σώματος και τη γωνία του σφονδύλου **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**

$$\left(J_b + J_{RW}\right)\left(\theta_b - \theta_{b,0}\right) + J_{RW}\left(\theta_{RW} - \theta_{RW,0}\right) = h_0 \left(t - t_0\right) \qquad (2\text{-}42)$$

Όμως, ο σφόνδυλος αντίδρασης σε οποιαδήποτε εφαρμογή δεν μπορεί να δίνει ροπή στο σύστημα μόνιμα. Αυτό συμβαίνει λόγω της φύσης του ηλεκτρικού κινητήρα και της περιοχής λειτουργίας του, η οποία καθορίζεται από την τάση με την οποία τροφοδοτείται, από τη ροπή που αναπτύσσεται και την ταχύτητά του. Ένας κινητήρας, μπορεί να δώσει ροπή μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τάση λειτουργίας. Για να εξηγηθεί το φαινόμενο αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η χαρακτηριστική ροπής-στροφών ενός ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Αυτή είναι μια ευθεία με αρνητική κλίση η οποία ξεκινάει από τη μέγιστη ροπή (stall torque) του κινητήρα, δηλαδή τη ροπή που μπορεί δώσει όταν είναι ακινητοποιημένος, άρα όταν εκκινεί και καταλήγει στη μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να έχει ένας κινητήρας χωρίς φορτίο και στην οποία δεν μπορεί να αποδώσει ροπή. Η περιοχή ανάμεσα στους άξονες και τη χαρακτηριστική Τ-ω αποτελεί την περιοχή λειτουργίας του κινητήρα. Όσο αυξάνεται η τάση λειτουργίας, τόσο μεγαλώνει και η απόσταση της χαρακτηριστικής από την αρχή των αξόνων, μεγαλώνει δηλαδή η περιοχή λειτουργίας. Πρέπει να αναφερθεί ότι η περιοχή μόνιμης λειτουργίας του κινητήρα είναι αρκετά μικρότερη από την περιοχή λειτουργίας, καθώς ο κινητήρας δεν μπορεί να λειτουργεί με μεγάλη ροπή και άρα μεγάλα ρεύματα για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 2.5. Χαρακτηριστική Τ-ω για διαφορετικές τάσεις λειτουργίας ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Αυτό, πρακτικά, σημαίνει ότι ζητώντας μια σταθερή ροπή από το reaction wheel, ο κινητήρας μπορεί να την αποδίδει όσο η ταχύτητα που αναπτύσσεται, διατηρεί το σημείο λειτουργίας εντός της περιοχής λειτουργίας. Μόλις το σημείο γίνει οριακό, σημαίνει ότι η αποδιδόμενη ροπή μειώνεται και η αναπτυσσόμενη ταχύτητα αυξάνεται, έως ότου η ροπή γίνει μηδέν και η ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου φτάσει σε μια μέγιστη τιμή, βάσει των χαρακτηριστικών του κινητήρα. Σε αυτό το φαινόμενο έγκειται ένας βασικός περιορισμός της χρήσης του σφονδύλου αντίδρασης σε οποιαδήποτε εφαρμογή. Όταν ο κινητήρας του σφονδύλου φτάσει σε αυτή την κατάσταση, πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι προωθητήρες για την διαδικασία που ονομάζεται de-spinning και αφορά την ακινητοποίηση του σφονδύλου.

2.3 Λογισμικό ROS και δομή

2.3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 1.2 ο έλεγχος του ρομπότ και η επικοινωνία του με τους διάφορους αισθητήρες και υποσυστήματα γίνεται μέσω του PC104 που βρίσκεται στη βάση του διαστημικού εξομοιωτή. Στο συγκεκριμένο PC το λειτουργικό σύστημα είναι Linux, έτσι ώστε να είναι δυνατή η χρήση του ROS (Robot Operating System).[34]

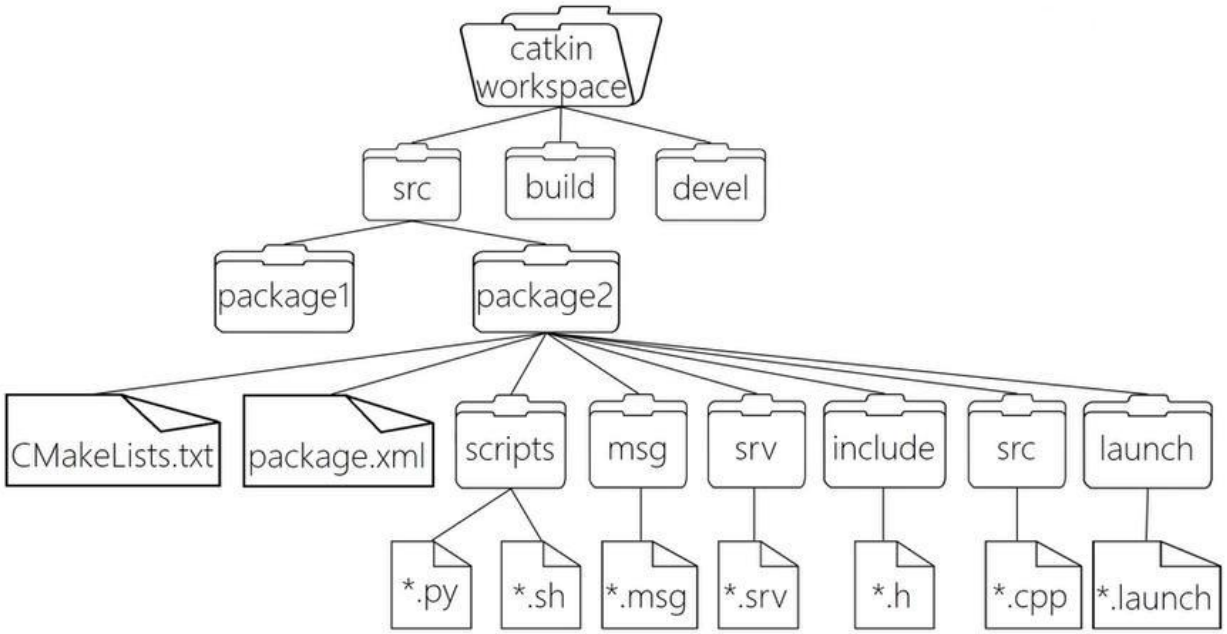
Το ROS δεν αποτελεί στην πραγματικότητα λειτουργικό σύστημα, αλλά μια συλλογή βιβλιοθηκών, εργαλείων και δομών software, σχεδιασμένων για χρήση και μετάφραση κώδικα σε ρομποτικές εφαρμογές, λειτουργώντας παράλληλα με τα Linux. Πιο συγκεκριμένα, το ROS είναι ένα open-source, meta-operating system με τη δυνατότητα διαχείρισης κώδικα, την επικοινωνία με το hardware και τον low-level έλεγχο συσκευών του ρομποτικού συστήματος, ενώ παρέχει και την δυνατότητα χρήση κώδικα σε πολλαπλούς υπολογιστές [8]

2.3.2 Δομή του ROS

Όλο το λογισμικό ενός συστήματος που λειτουργεί σε ROS είναι οργανωμένο σε πακέτα (packages). Κάθε ROS package αποτελεί ουσιαστικά μια συλλογή αρχείων, εκτελέσιμων ή βοηθητικών που έχουν δημιουργηθεί με σκοπό να επιτελούν συγκεκριμένες κοινές λειτουργίες σε ένα ρομποτικό σύστημα. Το ROS εμπεριέχει πολλές εντολές και εργαλεία που διευκολύνουν την επικοινωνία και τη διαχείριση των εγκατεστημένων packages από τον χρήστη [26] Κάθε package αποτελεί ουσιαστικά για το σύστημα στο οποίο βρίσκεται ένα directory στο οποίο βρίσκονται οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιούνται στους κώδικες του πακέτου, οι κώδικες και τα εκτελέσιμα αρχεία τους, καθώς και τα αρχεία package.xml και CMakeLists.txt, τα οποία διευκρινίζουν τις λεπτομέρειες του πακέτου και περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα διαχειριστεί τα εκτελέσιμα αρχεία και τα ROS Nodes. Η βασική δομή του ROS παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6.

Αρχικά, για ένα περιβάλλον ROS πρέπει να οριστεί το working directory (catkin_workspace) στο οποίο δημιουργούνται οι φάκελοι src, build και devel. Οι δύο τελευταίοι δεν είναι επεξεργάσιμοι από τον χρήστη και δημιουργούνται αυτόματα από το σύστημα κάθε φορά που ζητείται να γίνει build ο κώδικας που έχει γραφτεί στον φάκελο src. Σε αυτόν αρχικά δημιουργούνται οι φάκελοι που αποτελούν τα directories των packages του συστήματός, και στα οποία όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν τα βασικά manifests του package, οι βιβλιοθήκες και τα dependences αλλά και ο κώδικας που αφορά στα nodes στον φάκελο src του πακέτου. Η λίστα των εγκατεστημένων στο σύστημα packages, δίνεται με την εντολή

```
rospack list
```



Σχήμα 2.6. Η βασική δομή του ROS σε ένα ρομποτικό σύστημα [4]

2.3.3 ROS Nodes

Όπως έχει αναφερθεί, μια πολύ βασική λειτουργία του ROS είναι η επικοινωνία των διάφορων υποσυστημάτων του ρομπότ, χάρη στη δυνατότητα που δίνει το ROS στην επικοινωνία μεταξύ μικρών, ανεξάρτητων εκτελέσιμων που ονομάζονται nodes. Ως node λοιπόν, ορίζεται οποιοδήποτε πρόγραμμα «τρέχει» στο σύστημα και εκτελεί κάποια λειτουργία, όπως είναι για παράδειγμα η κίνηση ενός μέλους του βραχίονα ή ο έλεγχος της θέσης του ρομπότ μέσω του συστήματος PhaseSpace.

Επειδή σε ένα ρομποτικό σύστημα, εκτελούνται ταυτόχρονα διάφορες λειτουργίες οι οποίες είναι απαραίτητο να επικοινωνούν μεταξύ τους σε ένα περιβάλλον ROS, αυτό επιτυγχάνεται με την ύπαρξη ενός ROS Master. Ο ROS Master είναι το πρώτο ROS node που πρέπει να ενεργοποιηθεί στο σύστημα και είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία των διάφορων προγραμμάτων και nodes ακόμα και αν αυτά τρέχουν σε διαφορετικός υπολογιστές, ελέγχει ότι κάθε στοιχείο του συστήματος εντοπίζει τα υπόλοιπα και συνεχίζει να τρέχει καθ' όλη τη διάρκεια που χρησιμοποιούμε το ROS.

Για να ενεργοποιηθεί ο ROS Master χρησιμοποιείται η εντολή `roscore` σε ένα terminal το οποίο παραμένει ανοιχτό όσο χρησιμοποιούμε το ROS του ρομπότ. Για να ενεργοποιηθεί οποιοδήποτε άλλο node σε ξεχωριστό terminal από αυτό στο οποίο τρέχει το roscore, χρησιμοποιούμε την εντολή

```
rosrun <package_name> <node_name>
```

ενώ για τον τερματισμό του, σε terminal δίνεται η εντολή

```
rosnode kill <node_name>
```

Έτσι, δηλώνεται στο σύστημα σε ποιο package να αναζητήσει τα εκτελέσιμα αρχεία και ποιο node πρέπει να ενεργοποιηθεί.

Τα ενεργά nodes σε ένα σύστημα, γίνονται γνωστά με την εντολή rosnode list, ενώ πληροφορίες για αυτά λαμβάνονται χρησιμοποιώντας την εντολή

```
rosnode info <node_name>
```

Οι πληροφορίες αυτές αφορούν στην επικοινωνία του node με άλλα nodes, αν κάνει publish ή subscribe σε κάποιο topic, τα services που εκτελεί και πληροφορίες σχετικά με το σύστημα του υπολογιστή. Ένα βασικό node είναι το /rosout και είναι το node που σχετίζεται με την ύπαρξη του Master και με αυτό επικοινωνούν όλα τα nodes που ενεργοποιούνται στην πορεία.

Επειδή δεν είναι δυνατό σε κάθε χρήση του συστήματος να ενεργοποιούνται όλα τα nodes ένα προς ένα, το ROS δίνει την δυνατότητα χρήσης αρχείων launch. Σε ένα launch file, ορίζονται πληροφορίες για τα διάφορα nodes όπως το όνομά τους, ο τύπος τους και παράμετροι που απαιτούνται για την λειτουργία τους. Στη συνέχεια με την χρήση της εντολής

```
roslaunch <package_name> <launch_file_name>
```

ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει όλα τα nodes που αναγράφονται στο αρχείο, ταυτόχρονα με την ενεργοποίηση του ROS Master.

2.3.4 Topics και Messages

Η επικοινωνία των διάφορων nodes που τρέχουν σε ένα ρομποτικό σύστημα επιτυγχάνεται με την ύπαρξη των ROS topics και με τη δημιουργία κατάλληλων μηνυμάτων (ROS messages). Τα topics πρακτικά αποτελούν «πίνακες ανακοινώσεων» οι οποίοι δρουν σαν δίαυλοι για την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των nodes. Ειδικότερα, κάθε node που θέλει να μεταφέρει κάποια πληροφορία δημιουργεί έναν τύπο ROS message και μέσω μιας δομής που ονομάζεται publisher, κάνει publish το μήνυμα στο κατάλληλο topic που έχει δημιουργηθεί για συγκεκριμένη διαδικασία.

Εν συνεχεία, κάθε node που θέλει να έχει πρόσβαση στο ROS message, μέσω της δομής που καλείται subscriber, πρέπει να εγγραφεί στο topic, στο οποίο αυτό δημοσιεύεται και να το διαβάζει μέχρι τη στιγμή που θα υπάρξει νέο μήνυμα. Όταν συμβεί αυτό, καλείται μια ειδική συνάρτηση του subscriber, η callback function. Η callback function βρίσκεται στον κώδικα του node, δέχεται σαν όρισμα τον τύπο του ROS message και ουσιαστικά καθορίζει το πώς θα διαχειριστεί ο subscriber την πληροφορία που μόλις έγινε published στο topic.

Για να εμφανιστεί μια λίστα με τα διαθέσιμα topics κάθε στιγμή στο σύστημα, χρησιμοποιείται η εντολή rostopic list. Αντίστοιχα, όπως και με τα nodes με την εντολή

```
rostopic info <topic_name>
```

δίνονται πληροφορίες για το κάθε topic, όπως είναι ο τύπος μηνυμάτων που διαχειρίζεται και τα nodes τα οποία κάνουν publish και subscribe σε αυτό.

Τέλος, με την εντολή

```
rostopic echo <topic_name>
```

αναπαράγονται στην οθόνη τα μηνύματα που γίνονται published στο topic κάθε στιγμή.

2.3.5 Rosbag

Ένα ακόμα βασικό εργαλείο του ROS είναι τα rosbags. Τα rosbags ουσιαστικά αποτελούν ειδικά διαμορφωμένα αρχεία στα οποία μπορούν να αποθηκεύονται με χρονική σήμανση (timestamped) ROS messages. Τα αρχεία αυτά αποθηκεύονται και μπορούν να αναπαραχθούν όποτε χρειάζεται στο σύστημα, συνήθως για λόγους προσομοιώσεων ή ελέγχου αποτελεσμάτων.

Η εντολή που χρησιμοποιείται για την εγγραφή μηνυμάτων σε bag files είναι η

```
rosbag record -o <filename.bag> <topic_names>
```

ενώ για την αναπαραγωγή του η εντολή που υπάρχει είναι η

```
rosbag play <filename.bag>
```

Τέλος, όπως και στα προηγούμενα, πληροφορίες για το κάθε rosbag, που αφορούν την χρονική διάρκεια που κατέγραφε, το μέγεθος του, τον τύπο και το πλήθος των μηνυμάτων καθώς και τα topics από τα οποία διάβαζε μηνύματα, λαμβάνονται με την εντολή

```
rosbag info <filename.bag>
```

2.3.6 ROS Rate και ROS Timer

Σε ένα ρομποτικό σύστημα, πρέπει να εκτελούνται διάφορες εργασίες όπως ο έλεγχος κινητήρων, η ενεργοποίηση σερβοβαλβίδων ή η δειγματοληψία τιμών από αισθητήρες, οι οποίες είναι αλληλοεξαρτώμενες. Όμως, τις περισσότερες φορές είτε για λόγους περιορισμών του hardware είτε για λόγους που αφορούν στη δομή του software, οι εργασίες αυτές πρέπει να εκτελούνται με διαφορετική συχνότητα στη διάρκεια λειτουργίας του ρομπότ. Τα δύο βασικά εργαλεία του ROS τα οποία διευκολύνουν τον έλεγχο της συχνότητας με την οποία τρέχει ένα loop του κώδικα είναι το Rate και οι Timers.

Το ROS Rate είναι το εργαλείο το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέγει, κάθε πότε το σύστημα θα ξεκινάει να τρέχει το control loop, ενώ για το υπόλοιπο διάστημα, από το πέρας της εκτέλεσης του κώδικα μέχρι το τέλος της διάρκειας που έχει οριστεί, το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση sleep. Το βασικό πλεονέκτημα του ROS Rate, είναι ότι δίνοντας την επιθυμητή συχνότητα για την εκτέλεση της διαδικασίας και την εντολή rate.sleep(); στο τέλος του loop το ROS υπολογίζει χωρίς την παρέμβαση του χρήστη, πόση ώρα πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής μέχρι την επόμενη εκτέλεση των εντολών που βρίσκονται στο βρόχο ελέγχου.

Στην περίπτωση ρομποτικών συστημάτων, πολλές φορές είναι ανάγκη να εκτελούνται διαφορετικές εργασίες σε διαφορετικές συχνότητες. Για παράδειγμα, μπορεί από το ίδιο node να πρέπει να γίνεται publish μηνυμάτων, σε δύο διαφορετικά topics με δύο διαφορετικές συχνότητες, γιατί οι αισθητήρες που παράγουν τα συγκεκριμένα μηνύματα, έχουν διαφορετικές συχνότητες δειγματοληψίας. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται callback functions, οι οποίες διαχειρίζονται τα messages, βάσει της περιόδου που ορίζεται στη δομή που ονομάζεται ROS Timer. Ένας ROS Timer επιτρέπει τη δημιουργία ενός callback το οποίο καλείται με συγκεκριμένο ρυθμό, όμως σε αντίθεση με το ROS Rate, ο ρυθμός αυτός μπορεί να διαφοροποιείται για κάθε callback. Κατά τη δημιουργία ενός ROS Timer ορίζονται η περίοδος (ros::Duration) στην οποία θα καλείται κάθε φορά η συνάρτηση callback και το topic στο οποίο θα ελέγχει για την ύπαρξη ή τη δημοσίευση μηνυμάτων. Στο τέλος του κώδικα, πρέπει να καλείται η συνάρτηση ros::spin(); η οποία δεν επιτρέπει στο node να τερματίσει και περιμένει μέχρι την έναρξη της επόμενης περιόδου για το κάθε callback.

2.4 Η Μέθοδος Simplex

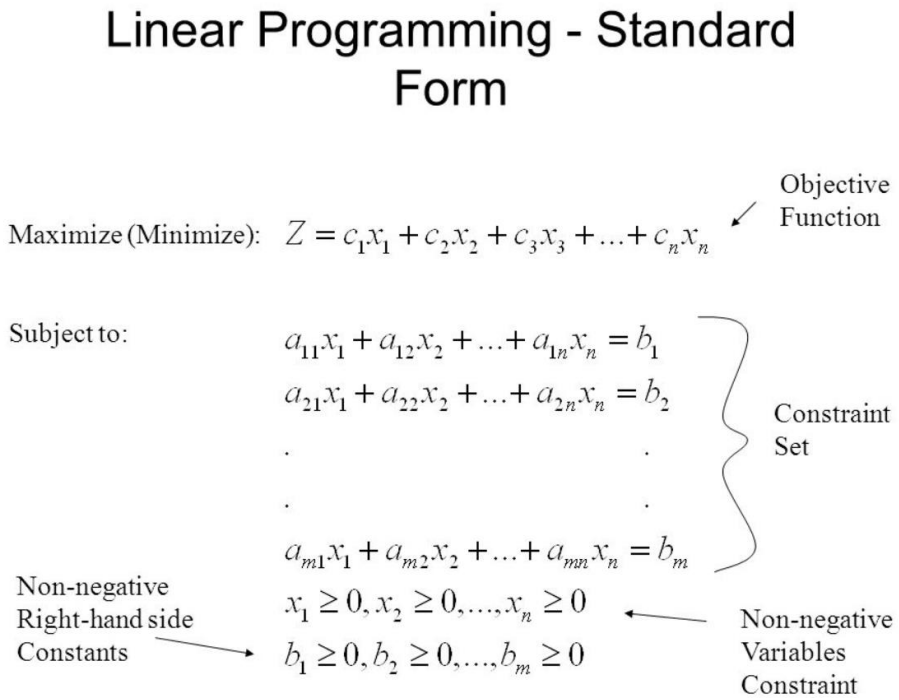
2.4.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος Simplex αποτελεί έναν δημοφιλή αλγόριθμο γραμμικού προγραμματισμού (ΓΠ), ο οποίος χρησιμοποιείται σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Το όνομα της μεθόδου, προκύπτει

από τη γεωμετρική έννοια του Simplex το οποίο αναπαριστά το απλούστερο δυνατό πολύτοπο σε κάποιον δεδομένο γεωμετρικό χώρο καθώς αν και αποτελεί αλγεβρική μέθοδο η σύλληψή της είναι γεωμετρική. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τον G. Dantzig το 1947, είναι ιδανική για επίλυση προβλημάτων με ηλεκτρονικό υπολογιστή και μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και σε προβλήματα με πολύ μεγάλο πλήθος μεταβλητών [10]

Οι μεταβλητές των οποίων η τιμή πρέπει να καθοριστεί, σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, ονομάζονται μεταβλητές απόφασης, ενώ η αρχική μορφή ενός τέτοιου προβλήματος έχει τα εξής χαρακτηριστικά (Σχήμα 2.7):

- Μια αντικειμενική συνάρτηση Z, των μεταβλητών με τους κατάλληλους συντελεστές της οποίας η ελαχιστοποίηση ή η μεγιστοποίηση είναι το ζητούμενο, ανάλογα τη φύση του προβλήματος.
- Τους περιορισμούς στους οποίους υπόκεινται οι μεταβλητές και μπορεί να είναι ισοτικοί ή ανισοτικοί.
- Τους περιορισμούς μη αρνητικότητας των μεταβλητών.



Σχήμα 2.7 Η αρχική μορφή ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού.

Η επίλυση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού με τη χρήση της μεθόδου Simplex μπορεί να γίνει είτε γραφικά (graphic solution) είτε πινακοποιημένα (tabular solution). Για την εφαρμογή του αλγορίθμου Simplex, με την πινακοποιημένη του μορφή, το πρόβλημα πρέπει να εκφραστεί σε πρότυπη μορφή. Στην πρότυπη μορφή το πρόβλημα μετασχηματίζεται ώστε να ικανοποιεί ορισμένες προϋποθέσεις. Αρχικά, πρέπει να ισχύουν οι περιορισμοί μη αρνητικότητας των μεταβλητών, γεγονός που επιτυγχάνεται συνήθως με την εισαγωγή νέων μεταβλητών. Ακόμα, οι υπόλοιποι περιορισμοί του προβλήματος πρέπει με κατάλληλες προσθέσεις ή αφαιρέσεις θετικών μεταβλητών απόκλισης (Slack Variables), να μετατραπούν σε ισοτικούς περιορισμούς. Τέλος, εξετάζεται αν οι σταθεροί όροι των περιορισμών είναι θετικοί αριθμοί και αν αυτό δεν ισχύει, μετασχηματίζονται κατάλληλα (Σχήμα 2.8).

$$
\begin{array}{ll}
\text{maximize} & z = f(\mathbf{x}) = \mathbf{c}^T\mathbf{x} = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \\
\text{subject to:} & \left\{ \begin{array}{llllll}
\sum_{i=1}^{n} a_{1i}x_i & +s_1 & & & & = b_1 \geq 0 \\
\sum_{i=1}^{n} a_{2i}x_i & & +s_2 & & & = b_2 \geq 0 \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\sum_{i=1}^{n} a_{mi}x_i & & & & +s_m & = b_m \geq 0 \\
x_1 \geq 0, & \cdots, & \cdots, & \cdots, & \cdots, & x_n \geq 0
\end{array} \right.
\end{array}
$$

Σχήμα 2.8 Η πρότυπη μορφή προβλήματος ΓΠ για την εφαρμογή της μεθόδου Simplex.

Σαν λύση ενός προβλήματος ΓΠ, ορίζεται οποιοδήποτε διάνυσμα $x = [x_1, x_2, \ldots, x_n]$, το οποίο ικανοποιεί τις εξισώσεις που ορίζουν τους βασικούς περιορισμούς του προβλήματος. Για όσες από τις λύσεις αυτές, ικανοποιούνται και οι περιορισμοί μη αρνητικότητας των μεταβλητών, τότε αυτές οι λύσεις ανήκουν στο σύνολο των δυνατών ή εφικτών (feasible) λύσεων. Τέλος, κάθε εφικτή λύση που βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση, βάσει του κριτηρίου που έχουμε θέσει, είναι βέλτιστη ή βασική εφικτή λύση.

2.4.2 Γεωμετρική Επίλυση

Η βασική λογική πίσω από την επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού με τη μέθοδο Simplex, βασίζεται στην κατανόηση των γεωμετρικών μηχανισμών που αφορούν στους περιορισμούς του προβλήματος. Η πινακοποιημένη επίλυση προβλημάτων ΓΠ διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό από την κατανόηση της γεωμετρικής μεθόδου.

Για την γεωμετρική επίλυση με Simplex, σε ένα σύστημα συντεταγμένων, κάθε μεταβλητή αναπαρίσταται σε έναν άξονα. Στη συνέχεια, κάθε περιορισμός απεικονίζεται με μία ευθεία η οποία θέτει το όριο των επιτρεπτών τιμών για τις μεταβλητές και έτσι οριοθετείται η περιοχή δυνατών λύσεων (ΠΔΛ) ή feasible region. Οι τομές των ευθειών των περιορισμών, μεταξύ τους ή με τους άξονες αποτελούν τα corner points (CP) δηλαδή τις ακραίες λύσεις του προβλήματος. Οι λύσεις που βρίσκονται στα άκρα της ΠΔΛ αποτελούν τις Corner Point Feasible (CPF) λύσεις, ενώ οι υπόλοιπες αποτελούν τις μη δυνατές ακραίες λύσεις ή Corner Point Infeasible λύσεις.

Ορίζονται ως γειτονικές λύσεις για ένα πρόβλημα ΓΠ με n μεταβλητές απόφασης, δύο δυνατές ακραίες λύσεις που βρίσκονται σε n-1 όρια περιορισμών, δηλαδή στη γραμμή που αναφέρεται σαν άκρο της ΠΔΛ. Προκύπτει ότι, σε ένα πρόβλημα με n μεταβλητές απόφασης, κάθε CPF έχει n γειτονικές CPF λύσεις. Το ενδιαφέρον για τις γειτονικές λύσεις, έγκειται στην παραδοχή κατά την οποία, εξετάζεται ένα πρόβλημα ΓΠ το οποίο έχει μια βέλτιστη δυνατή λύση. Αν μια CPF λύση δεν έχει γειτονικές λύσεις που να είναι καλύτερες από αυτή, δηλαδή να δίνουν καλύτερο Z στην αντικειμενική συνάρτηση, βάσει του κριτηρίου βελτιστοποίησης που έχει τεθεί, τότε αυτή η CPF λύση, πρέπει να είναι η βέλτιστη.

Με αυτή την παραδοχή η μέθοδος Simplex μετατρέπεται σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, ο οποίος ακολουθεί μια σειρά από βήματα, μέχρι την εύρεση της βέλτιστης λύσης, οπότε και τερματίζει. Τα βήματα του αλγορίθμου είναι τέσσερα:

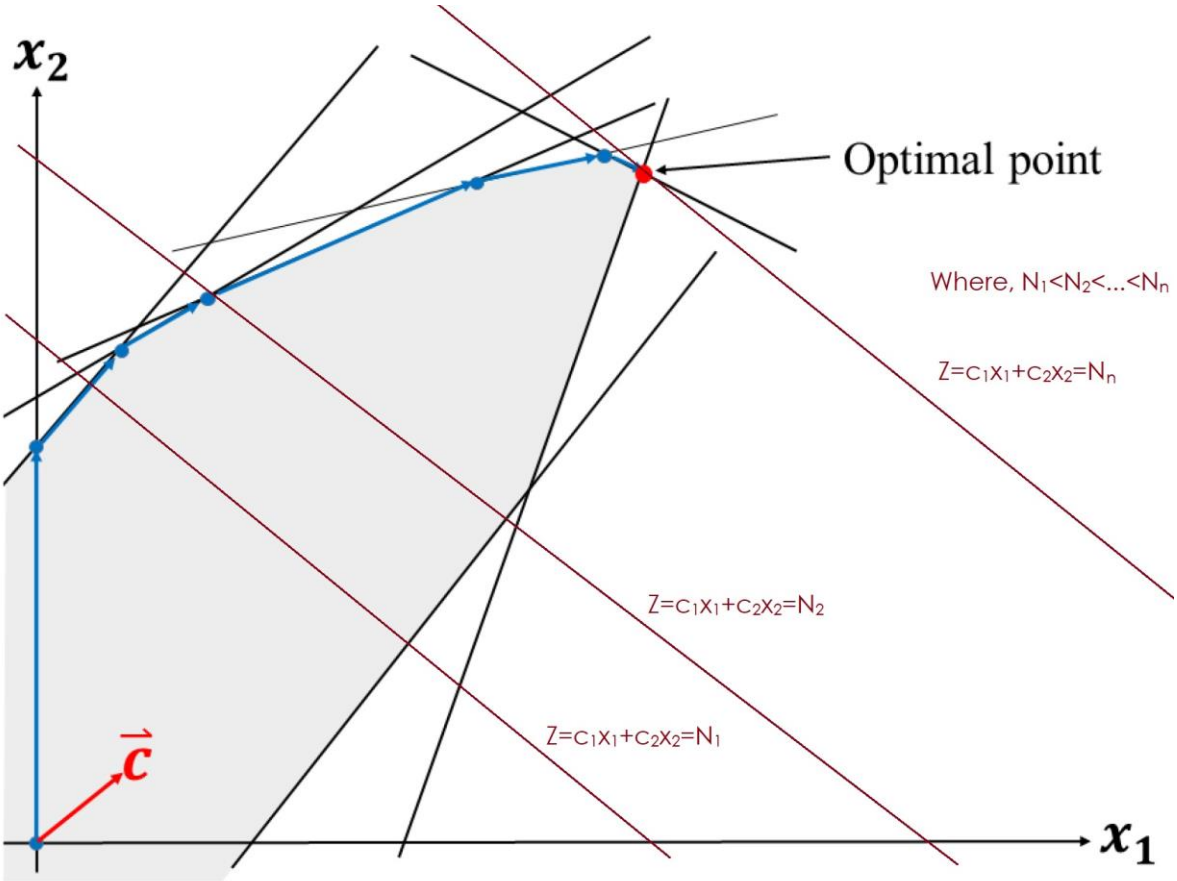
1. Αρχικοποίηση (Initialization). Επιλέγεται αυθαίρετα, μια βασική CPF λύση.

2. Έλεγχος βελτίστου (Optimality test). Ελέγχεται αν κάποια από τις γειτονικές CPF λύσεις είναι καλύτερη από την βασική. Αν όχι, τότε η βασική λύση είναι και η βέλτιστη και ο αλγόριθμος σταματάει, αλλιώς συνεχίζει στο βήμα 3.
3. Επανάληψη 1 (Iteration 1). Επιλέγεται μια καλύτερη γειτονική λύση της βασικής, προχωρώντας προς την κατεύθυνση με τον μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης της αντικειμενικής συνάρτησης.
4. Τα βήματα 2 και 3 συνεχίζουν να εκτελούνται μέχρι την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Η βέλτιστη λύση καθορίζεται ως η CFP, στην οποία θα εφάπτεται η ευθεία της αντικειμενικής συνάρτησης, αν αυτή εξισώνεται με τυχαίες τιμές. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε αυτή την περίπτωση είναι και η μέγιστη.

Ο αριθμός των γωνιακών σημείων αυξάνεται δραματικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών και των περιορισμών. Μετά την αρχικοποίηση ο αλγόριθμος της Simplex αναζητά τη βέλτιστη λύση μόνο στις γειτονικές CPF λύσης, γεγονός που μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο, ενώ με τον τρόπο αυτό η λύση ακολουθεί μια διαδρομή από γειτονική σε γειτονική λύση μέχρι τη βέλτιστη στα όρια της περιοχής των δυνατών λύσεων [32]

Η πιο συνηθισμένη αρχικοποίηση γίνεται στην αρχή των αξόνων, καθώς λόγω του περιορισμού μη αρνητικότητας των μεταβλητών αποτελεί πάντα ακραία λύση, μπορεί όμως να μην είναι και δυνατή, πράγμα που εξαρτάται από τους υπόλοιπους περιορισμούς. Τα βήματα του αλγορίθμου της μεθόδου Simplex για ένα πρόβλημα 2 μεταβλητών απόφασης φαίνονται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9 Η γεωμετρική λύση του αλγορίθμου Simplex για πρόβλημα 2 μεταβλητών απόφασης.

2.4.3 Πινακοποιημένη (Μηχανιστική) Επίλυση

Για την επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού με την πινακοποιημένη μορφή της μεθόδου Simplex ακολουθείται πάλι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος, ο οποίος υπολογίζει τιμές σε πίνακες (tableau) οι οποίοι προκύπτουν από την μετατροπή του προβλήματος στην πρότυπη μορφή για Simplex και βασίζονται στην γεωμετρική προσέγγιση που αναλύθηκε προηγουμένως.

Μεταφέροντας, όμως το πρόβλημα στην πρότυπη μορφή, είναι αδύνατο να λυθεί, καθώς προκύπτει μεγαλύτερο πλήθος αγνώστων απ' ότι εξισώσεων, λόγω της εισαγωγής των slack variables. Το πρόβλημα αυτό, η μέθοδος το παρακάμπτει, δίνοντας σε κάποιες μεταβλητές την τιμή μηδέν στην αρχή της εφαρμογής του αλγορίθμου. Οι μεταβλητές αυτές ονομάζονται μη βασικές (Non Basic Variables) και το πλήθος τους είναι n-m, όπου n είναι ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης και m το πλήθος των περιορισμών, ενώ οι υπόλοιπες λέγονται βασικές (Basic Variables).

Ξεκινώντας, πρέπει να προσδιοριστεί το μέγεθος του πίνακα Simplex. Οι δυο πρώτες και οι δυο τελευταίες γραμμές είναι πάντα σταθερές και οι ενδιάμεσες είναι ίσες με τον αριθμό των περιορισμών, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι περιορισμοί μη αρνητικότητας των μεταβλητών απόφασης. Έτσι, ο αριθμός των γραμμών είναι 4+m. Για τις στήλες ισχύει ότι οι πρώτες τρεις είναι πάντα σταθερές, ενώ οι υπόλοιπες είναι σε πλήθος ίσες με τις μεταβλητές του προβλήματος, συμπεριλαμβανομένων και των μεταβλητών απόκλισης. Τελικά ο αριθμός των στηλών είναι 3+n. Οπότε, το μέγεθος του tableau είναι (4+m)x(3+n).

Για την αρχική συμπλήρωση του πίνακα Simplex, τοποθετούνται στη δεύτερη γραμμή, ξεκινώντας από την τέταρτη στήλη και προς τα δεξιά οι μεταβλητές με τη σειρά και συμπληρώνονται οι κεφαλίδες του πίνακα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Στη συνέχεια επιλέγεται μια βασική δυνατή λύση και τοποθετούνται στον πίνακα οι βασικές μεταβλητές και οι τιμές τους στα κατάλληλα σημεία και εισάγονται οι τιμές των συντελεστών c_j της Z στην πρώτη γραμμή του πίνακα, πάνω από την αντίστοιχη μεταβλητή και οι συντελεστές μόνο των βασικών μεταβλητών στην πρώτη στήλη. Οι γραμμές των περιορισμών συμπληρώνονται με τους κατάλληλους συντελεστές a_{ij} και υπολογίζονται οι διαφορές $c_j - Z_j$. Αν προκύψουν μόνο αρνητικές τιμές, τότε η λύση είναι η βέλτιστη, αλλιώς συνεχίζεται η επαναληπτική διαδικασία του αλγορίθμου, η οποία κινείται προς μια καλύτερη λύση μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη.

			40	50	0	0
C_j	Βασική Μεταβλητή	Ποσότητα	x_1	x_2	s_1	s_2
0	s_1	40	1	2	1	0
0	s_2	120	4	3	0	1
	Z_j	0	0	0	0	0
	Cj-Zj		40	50	0	0

Σχήμα 2.10 Παράδειγμα αρχικού πίνακα Simplex για πρόβλημα δύο μεταβλητών απόφασης με δύο εξισώσεις περιορισμών.

Αν η λύση που έχει βρεθεί δεν είναι η βέλτιστη, τότε επιλέγεται σαν στήλη Pivot (εισερχόμενη μη βασική μεταβλητή) η στήλη με τη μεγαλύτερη θετική τιμή $c_j - Z_j$ και σαν γραμμή Pivot (εξερχόμενη βασική μεταβλητή) η γραμμή με τον μικρότερο μη αρνητικό συντελεστή, αν διαιρεθούν τα στοιχεία της στήλης Ποσότητα με τα στοιχεία της στήλης Pivot. Το στοιχείο του tableau που βρίσκεται στη γραμμή και στη στήλη Pivot, είναι ο αριθμός Pivot. Η νέα βασική μεταβλητή μεταφέρεται στον πίνακα στην θέση της προηγούμενης και οι τιμές στη νέα γραμμή δίνονται από τον τύπο:

$$\text{Τιμές Γραμμής στο νέο tableau} = \frac{\text{Τιμές Γραμμής Pivot στο παλιό tableau}}{\text{Αριθμός Pivot}}$$

Για τις υπόλοιπες γραμμές των περιορισμών στις βασικές μεταβλητές στον νέο πίνακα, ισχύει ο τύπος:

$$\begin{matrix}\text{Τιμές γραμμών}\\ \text{στο νέο tableau}\end{matrix} = \begin{matrix}\text{Τιμές γραμμών}\\ \text{στο παλιό tableau}\end{matrix} - \left[\begin{matrix}\text{Ο αντίστοιχος συντελεστής}\\ \text{στη στήλη Pivot}\end{matrix} \times \begin{matrix}\text{Η αντίστοιχη τιμή}\\ \text{της γραμμής Pivot}\\ \text{στο νέο tableau}\end{matrix}\right]$$

Τέλος, υπολογίζονται εκ νέου τα Z_j και $c_j - Z_j$ και αν δεν είναι όλα αρνητικά, η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την εύρεση νέων Pivot στοιχείων και τον υπολογισμό καλύτερης λύσης, έως την εύρεση της βέλτιστης.

3 Χώρος Εργασίας Ρομπότ

3.1 Υπολογισμός Χώρου Εργασίας Βάσει της Θεωρίας

Βάσει των όσων παρουσιάστηκαν στη θεωρία για τη μέθοδο των βαρυκεντρικών διανυσμάτων, για τον υπολογισμό του χώρου εργασίας στον οποίο δεν εμφανίζονται ιδιομορφίες, απαιτούνται ορισμένα γεωμετρικά και δυναμικά μεγέθη. Τα μεγέθη αυτά, που λαμβάνονται από το Solidworks και αφορούν τους συνδέσμους του βραχίονα του διαστημικού εξομοιωτή του εργαστηρίου, φαίνονται στον Πίνακα 3.1:

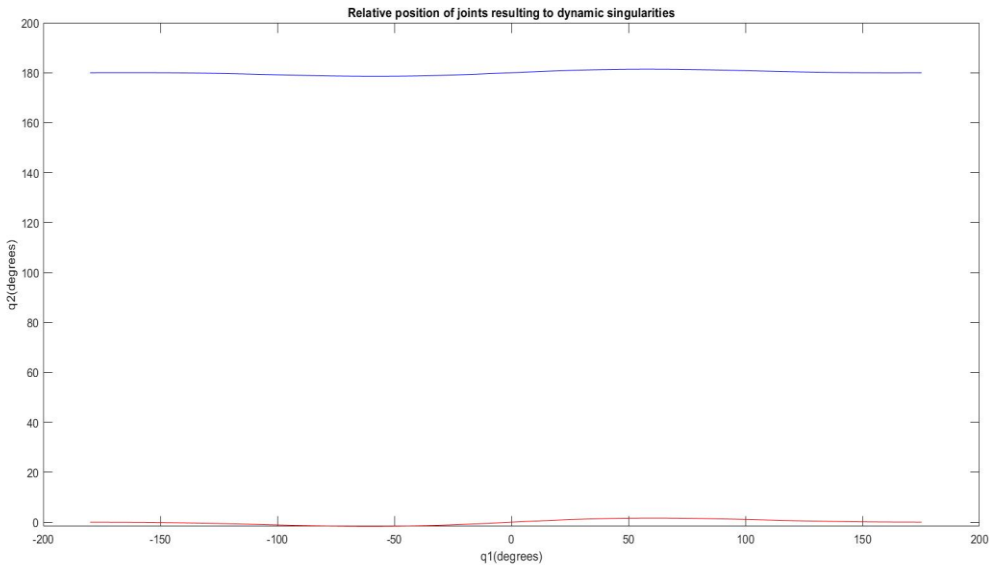
Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά μεγέθη της βάσης και του βραχίονα για την εφαρμογή της μεθόδου των βαρυκεντρικών διανυσμάτων στο ρομπότ.

	Βάση (i=0)	1ος σύνδεσμος βραχίονα (i=1)	2ος σύνδεσμος βραχίονα (i=2)	3ος σύνδεσμος βραχίονα (i=3)
Μάζα m_i [kg]	11.8	0.1288	0.101	0.0455
Αδράνεια I_i [kgm^2]	0.11991	0.00035	0.00018	0.000005
r_i [m]	0.1507	0.0722	0.055	0.01
l_i [m]	-	0.1055	0.0815	0.036

Με βάση τις σχέσεις υπολογισμού βαρυκεντρικών διανυσμάτων (2-1)–(2-5) προκύπτουν τα μέτρα των διανυσμάτων:

$$a = 0.1473m$$
$$b = 0.1744m$$
$$c = 0.1353m$$
$$d = 0.0459m$$

Οι σχετικές γωνίες των δύο πρώτων αρθρώσεων του βραχίονα για τις οποίες εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες, όπως προκύπτουν από τις Εξισώσεις (2-29), (2-30) είναι αυτές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.

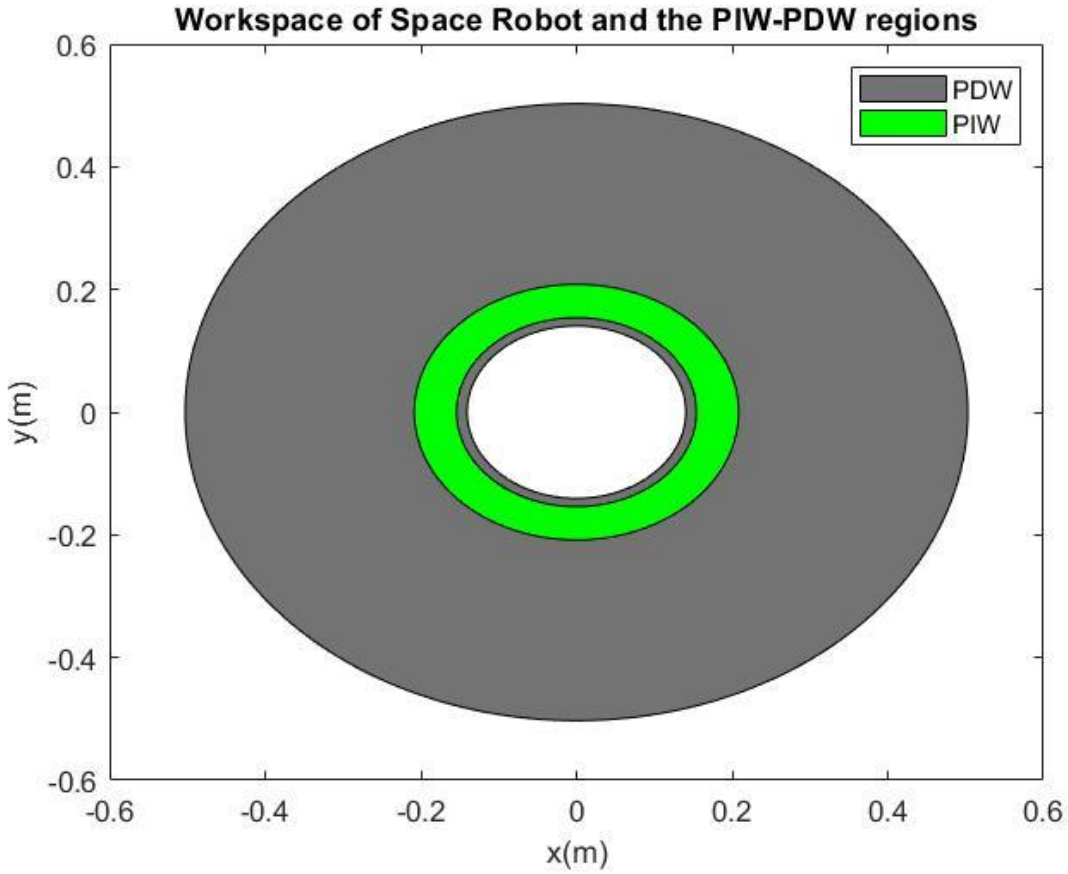


Σχήμα 3.1. Σχετική γωνία δεύτερης άρθρωσης ως προς την πρώτη, για τις οποίες εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες.

Έτσι, τα όρια του χώρου εργασίας μέσα στον οποίο είναι σίγουρο ότι δεν εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες, προκύπτουν από τις ακτίνες – αποστάσεις του end-effector από το κέντρο μάζας (Εξ. 2-31) και είναι τα παρακάτω:

$$R_{1,min} = 0.1405\text{m}$$
$$R_{1,max} = 0.1540\text{m}$$
$$R_{2,min} = 0.2083\text{m}$$
$$R_{2,max} = 0.5029\text{m}$$

Είναι φανερό, από τις προκύπτουσες ακτίνες, ότι αν και οι δύο χώροι PWD, δεν επικαλύπτονται, ο χώρος εργασίας, χωρίς την πιθανότητα εμφάνισης ιδιομορφιών όπως προκύπτει από αυτή την προσέγγιση, είναι αρκετά μικρός (Σχ. 3.2).



Σχήμα 3.2. Χώρος εργασίας ρομπότ στον οποίο δεν προκύπτει PIW.

Όπως είναι λογικό, το αποτέλεσμα αυτό δεν μας ικανοποιεί, καθώς αντιτίθεται στον σκοπό του ρομπότ, που είναι η σύλληψη αντικειμένων και η εκτέλεση διάφορων εργασιών πάνω στην τράπεζα του διαστημικού εξομοιωτή του εργαστηρίου.

Στην μέχρι στιγμής ανάλυση της μεθόδου, δεν έχουν ληφθεί καθόλου υπόψη οι περιορισμοί που έχουν οι βραχίονες του ρομπότ σαν μηχανικό σύστημα. Αυτοί οι περιορισμοί, αφορούν τις σχετικές γωνίες που μπορούν να έχουν μεταξύ τους τα μέλη του κάθε βραχίονα, χωρίς να προσκρούουν ο ένας στον άλλο ή στη βάση του ρομπότ. Με την χρήση των περιορισμών αυτών, στις καμπύλες που δίνουν τα ζεύγη σχετικών γωνιών, για τις οποίες είναι πιθανόν να προκληθούν ιδιομορφίες, αποκλείονται οι τιμές, που βγαίνουν εκτός αυτών, οπότε τα αποτελέσματα μεταβάλλονται.

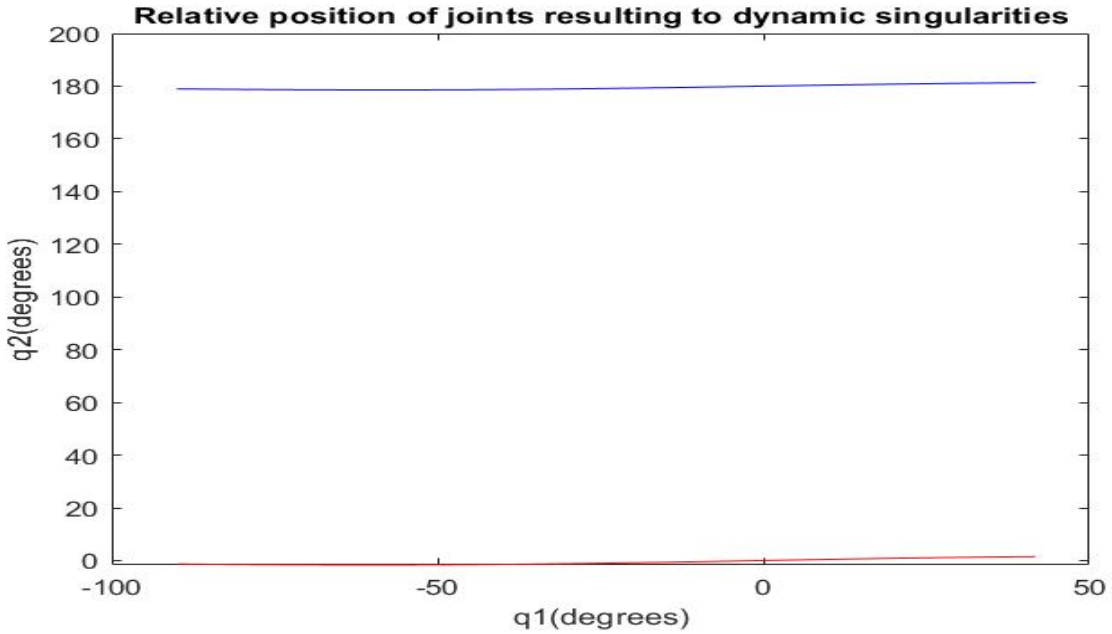
Όσον αφορά τις γωνίες αυτές, προκύπτουν μετά από μετρήσεις που έγιναν στο ρομπότ, τα παρακάτω εύρη, όπου για την γωνία q_1 η θέση 0 είναι αυτή στην οποία ο πρώτος σύνδεσμος είναι κάθετος στην επιμηκέστερη διάσταση της βάσης των βραχιόνων, ενώ για τις γωνίες q_2 και q_3 η θέση 0 είναι όταν οι σύνδεσμοι 2 και 3 αντίστοιχα, δημιουργούν ευθεία με τον προηγούμενο τους.

$$-90° \leq q_1 \leq 42°$$
$$-110° \leq q_2 \leq 124°$$
$$-60° \leq q_3 \leq 60°$$

Πρέπει να αναφερθεί ότι η γωνία q_3 δεν παίζει ρόλο στην εμφάνιση δυναμικών ιδιομορφιών, όμως αναφέρεται εδώ για λόγους πληρότητας.

3.2 Εύρεση Χώρου Εργασίας με Χρήση Μηχανικών Περιορισμών

Υπολογίζονται, λοιπόν, οι σχετικές γωνίες των δύο πρώτων αρθρώσεων με χρήση των μηχανικών περιορισμών, για τις οποίες εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.



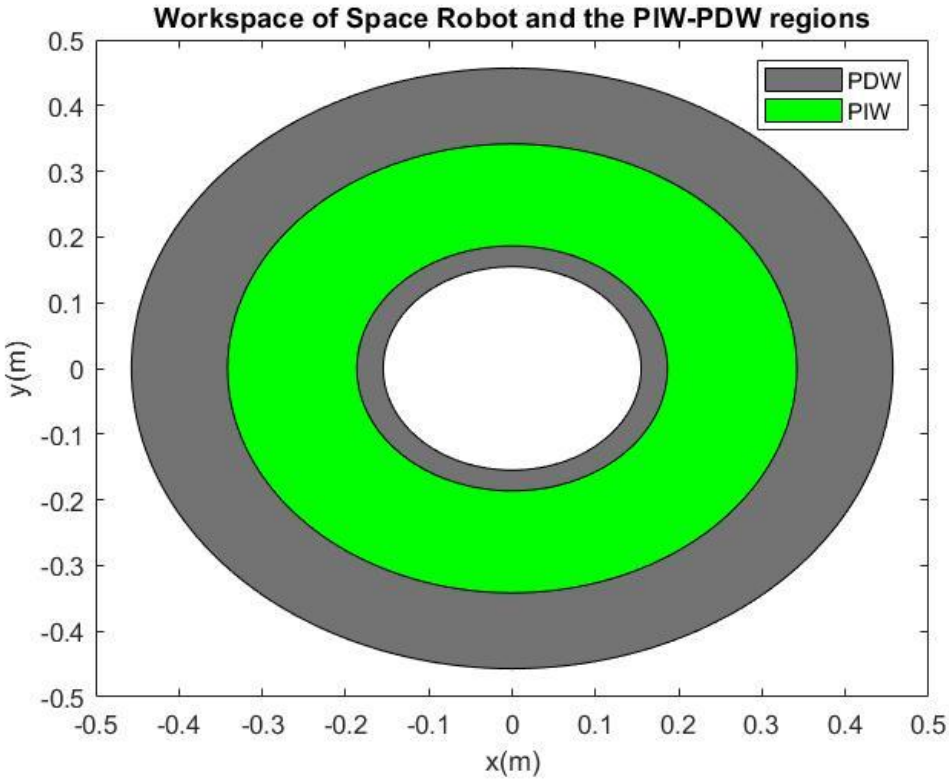
Σχήμα 3.3. Σχετικές γωνίες των δύο πρώτων αρθρώσεων που οδηγούν στην εμφάνιση δυναμικών ιδιομορφιών, με χρήση μηχανικών περιορισμών.

Υπολογίζονται με βάση τις παραπάνω γωνίες, από την Εξίσωση (2-31) οι ακτίνες – αποστάσεις από το κέντρο μάζας του ρομπότ, που τελικά δημιουργούν το χώρο εργασίας στον οποίο υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης δυναμικών ιδιομορφιών. Προφανώς, εφόσον οι χώροι αυτοί δεν επικαλύπτονται, ο χώρος που βρίσκεται ενδιάμεσα στις ακτίνες αυτές, αποτελεί τον PIW, στον οποίο δεν υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν ιδιομορφίες και αποτελεί τον χώρο εργασίας στον οποίο θέλουμε να κινείται το τελικό σημείο δράσης του βραχίονα.

Το Σχήμα 3.4 παρουσιάζει τον χώρο εργασίας του ρομπότ, όπως προκύπτει από τις υπολογισμένες ακτίνες – αποστάσεις, για διάφορες τιμές της γωνίας βάσης:

$$R_{1,min} = 0.15477m$$
$$R_{1,max} = 0.18637m$$

$$R_{2,min} = 0.34159m$$
$$R_{2,max} = 0.45694m$$



Σχήμα 3.4. Χώροι εργασίας ρομπότ PIW (πράσινο) και PDW (μαύρο), που προκύπτουν με τη χρήση μηχανικών περιορισμών.

Το αποτέλεσμα σε αυτή την περίπτωση, είναι σαφώς καλύτερο, καθώς υπάρχει ένας αρκετά μεγάλος χώρος ελεύθερος δυναμικών ιδιομορφιών. Αυτό, δεν σημαίνει πως στον υπόλοιπο χώρο εργασίας είναι αδύνατη η κίνηση των βραχιόνων, απλά υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν ΔΙ ανάλογα με την διαδρομή που ακολουθούν οι αρθρώσεις. Φυσικά, λόγω της μεγάλης διαφοράς στη μάζα ανάμεσα στη βάση του ρομπότ και τους βραχίονες, οι πιθανότητες να εμφανιστούν ΔΙ σε κάποιο σημείο του reachable workspace του ρομπότ, είναι ελάχιστες.

Τέλος, μπορούμε να εισάγουμε την έννοια του χρόνου στον υπολογισμό του χώρου εργασίας, περιορίζοντας το πλήθος των κινήσεων του βραχίονα σε έναν λογικό αριθμό. Με τη μέθοδο αυτή, προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα ως προς τον χώρο εργασίας στον οποίο δεν εμφανίζονται ιδιομορφίες, όμως απαιτείται κάθε φορά να είναι γνωστή η ακριβής θέση του στόχου, ώστε να υπολογιστούν με ακρίβεια οι κινήσεις των αρθρώσεων. Καθώς ο PIW που έχει προκύψει με τη χρήση μηχανικών περιορισμών είναι ικανοποιητικός για τη λειτουργία του ρομπότ στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η μέθοδος αυτή δεν εξετάζεται.

3.3 Συμπεράσματα

Η θέση και ο προσανατολισμός του end-effector (r_e, θ_e) δεν είναι συναρτήσεις μόνο του configuration του συστήματος, δηλαδή των γωνιών των αρθρώσεων, αλλά εξαρτάται και από τον προσανατολισμό της βάσης (θ_b), η οποία είναι path-dependent (εξαρτάται από τη διαδρομή που ακολουθεί το end-effector). Μια θέση στο reachable workspace του ρομπότ,

μπορεί να οδηγήσει σε δυναμική ιδιομορφία, αναλόγως της διαδρομής με την οποία το end-effector φτάνει σε αυτή.

Η απόσταση, R, ενός σημείου του workspace, από το κέντρο μάζας του συστήματος, δεν εξαρτάται από τον προσανατολισμό της βάσης, αλλά μόνο από τη διαμόρφωση του βραχίονα, **q**, δηλαδή R=R(**q**). Η σχέση αυτή μεταφέρει τον reachable workspace σε ένα σφαιρικό κέλυφος, όταν μιλάμε για τρισδιάστατο σύστημα και σε έναν κυκλικό δίσκο, στην περίπτωση που έχουμε κίνηση στο επίπεδο. Για κάθε διαμόρφωση βραχίονα που οδηγεί σε δυναμική ιδιομορφία, $\mathbf{q_s}$, λαμβάνεται ένας κυκλικός δίσκος και η ένωση όλων των δίσκων αυτών, οδηγεί στη δημιουργία του PDW. Αφαιρώντας από τον reachable workspace τον PDW, προκύπτει ο PIW.

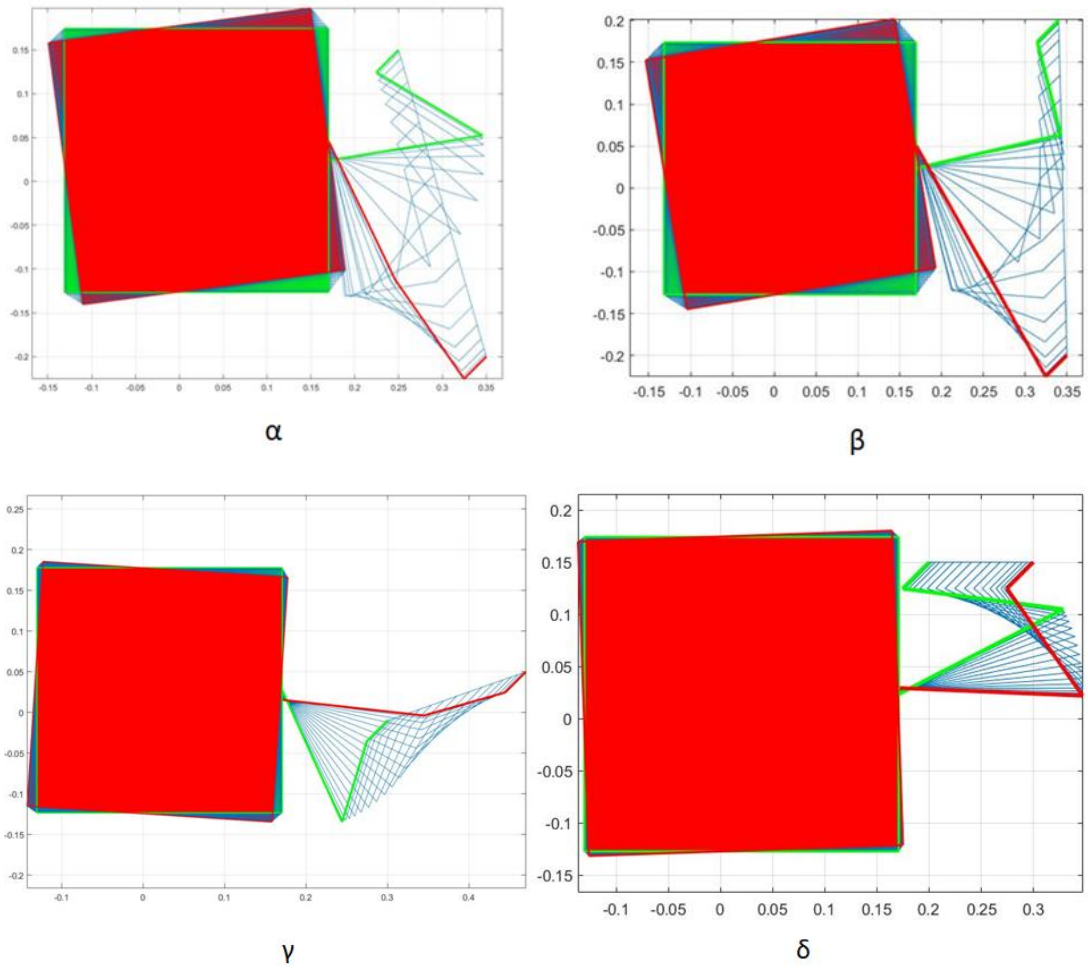
Με την εφαρμογή των μηχανικών περιορισμών, ο reachable workspace, δεν μειώνεται, καθώς δεν εξαρτάται από τις διαδρομές των αρθρώσεων του βραχίονα και προκύπτει για δεδομένες αποστάσεις από το κέντρο μάζας. Οι δίσκοι που αποτελούν τον PDW, όμως, αλλάζουν. Αυτό συμβαίνει γιατί περιορίζοντας τις τιμές των γωνιών αρθρώσεων περιορίζονται οι πιθανές επιλογές για το path που μπορεί να ακολουθήσει τελικά ο end-effector. Ταυτόχρονα, μειώνοντας το εύρος των γωνιών που μπορεί να πάρει η πρώτη άρθρωση, περιορίζεται και το εύρος της γωνίας που μπορεί να πάρει η βάση.

Έτσι, προκύπτει διαφορετικός χώρος εργασίας ελεύθερος ιδιομορφιών, με την επιβολή στο σύστημα περιορισμών στις γωνίες των αρθρώσεων [31]

3.4 Επιβεβαίωση με Προσομοίωση

Για να επιβεβαιώσουμε το γεγονός ότι το ρομπότ, πράγματι, μπορεί να εκτελεί κινήσεις χωρίς να βρίσκεται σε θέσεις στις οποίες εμφανίζονται δυναμικές ιδιομορφίες, χρησιμοποιούμε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης στη MATLAB, το οποίο υπολογίζει τη ορίζουσα S της ${}^{0}\boldsymbol{S}(\boldsymbol{q})$ (Εξίσωση 2-25) και στην περίπτωση που δεν είναι μηδέν επιστρέφει σαν αποτέλεσμα την κίνηση του βραχίονα και της βάσης. Όπως είναι λογικό, δεν μπορούν να εξεταστούν όλες οι πιθανές κινήσεις του βραχίονα, αλλά ελέγχονται μερικές κινήσεις στα όρια του PIW και φυσικά οι κινήσεις που γίνονται από τους βραχίονες στην διάρκεια της εργασίας.

Για κινήσεις του end-effector των οποίων η διαδρομή βρίσκεται εξ' ολοκλήρου εντός του PIW επιβεβαιώνεται ότι κατά την κίνηση ο βραχίονας δεν βρίσκεται σε θέσεις δυναμικής ιδιομορφίας ενώ ακόμα και σε κινήσεις κατά τις οποίες το end-effector βρίσκεται εκτός του PIW, συχνά δεν εμφανίζονται ιδιόμορφες διαμορφώσεις. Αυτό είναι λογικό, όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 3.3, αφού στους χώρους PDW δεν είναι βέβαιη η εμφάνιση ιδιομορφιών, αλλά, απλώς, δεν εξασφαλίζεται η μη ύπαρξή τους. Επίσης, η μάζα της βάσης είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μάζα των βραχιόνων και επομένως οι θέσεις δυναμικών ιδιομορφιών για το free floating σύστημα θα είναι πολύ κοντά σε αυτές ενός συστήματος σταθερής βάσης.



Σχήμα 3.5. Διάφορες κινήσεις του βραχίονα, όπως προκύπτουν από την προσομοίωση. α), γ) κινήσεις σε τυχαίες θέσεις. β) κίνηση παράλληλη στον άξονα y. δ) κίνηση παράλληλη στον άξονα x.

4 Σχεδιασμός Τροχιάς

4.1 Συνάρτηση Κόστους και Περιορισμοί

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κίνηση της βάσης του ρομπότ, γίνεται με τη χρήση των προωθητήρων (thrusters) και του σφονδύλου αντίδρασης (reaction wheel). Ένα σημαντικό πρόβλημα στον σχεδιασμό τροχιάς ενός διαστημικού συστήματος, είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου, λόγω της αδυναμίας ανεφοδιασμού. Έτσι, κρίνεται απαραίτητο να εξεταστεί ποια είναι η βέλτιστη επενέργηση της βάσης, ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη κατανάλωση. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, επιλέχθηκε η χρήση της μεθόδου SIMPLEX, η οποία βασίζεται στη μοντελοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συστήματος και δίνει λύση σε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού. Η βασική ιδέα είναι να εκφραστεί μια συνάρτηση κόστους, της οποίας η τιμή πρέπει να ελαχιστοποιείται, με την ταυτόχρονη ικανοποίηση των περιορισμών που τίθενται έτσι ώστε η βάση να ακολουθεί τη ζητούμενη τροχιά στον απαιτούμενο χρόνο.

Καταρχάς, ο έλεγχος των thruster γίνεται με τη χρήση σερβοβαλβίδων, οι οποίες μπορούν να ρυθμίζουν την ποσότητα του αερίου που παρέχεται στους προωθητήρες ανά περίοδο λειτουργίας τους, βάσει ενός on-off μοτίβου. Συγκεκριμένα, κάθε βαλβίδα στην περίοδο λειτουργίας της, μπορεί να τροφοδοτείται με τάση για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ώστε να παραμένει ανοιχτή και να μην τροφοδοτείται για το υπόλοιπο, οπότε και είναι κλειστή. Το χρονικό διάστημα αυτό, μπορεί να μεταβάλλεται για κάθε περίοδο λειτουργίας, ενώ ο χρόνος που η βαλβίδα είναι ανοιχτή ως προς την περίοδο λειτουργίας της, ονομάζεται duty cycle (τ). Η παραπάνω τεχνική ονομάζεται Pulse Width Modulation (PWM) και έχει τη δυνατότητα να προσεγγίζει αναλογικά σήματα για την ώση, με τη χρήση πρόωσης δύο επιπέδων (on-off).

$$\tau = \frac{t_{open}}{T} \tag{4-1}$$

Όπως αναμένεται, κάθε thruster, έχει μια μέγιστη τιμή για την ώση και μια ελάχιστη, οι οποίες καθορίζονται από τους χρόνους απόκρισης της βαλβίδας για το άνοιγμα και το κλείσιμο. Οι χρόνοι αυτοί είναι πολύ μικροί και επηρεάζουν τιμές κοντά στο 0% και 100% του duty cycle. Συγκεκριμένα, το t_{open} για μικρό duty cycle είναι μικρότερο από τους χρόνους απόκρισης της βαλβίδας, οπότε δεν προλαβαίνει να αναπτυχθεί η απαιτούμενη παροχή και άρα η δύναμη, ενώ για μεγάλες τιμές duty cycle, η βαλβίδα δεν προλαβαίνει να κλείσει τελείως και να διατηρήσει μηδενική τιμή ώσης μέχρι να ξανανοίξει.

Όπως έχει ήδη αποδειχθεί στη διπλωματική εργασία του Ν. Μαυρίκη [35] οι τιμές στις οποίες η ώση εξαρτάται γραμμικά από το duty cycle της βαλβίδας είναι από 8% έως 95% duty cycle. Έτσι, για το συγκεκριμένο εύρος τιμών η ώση που δίνει κάθε προωθητήρας θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{thruster} = F_{thruster,\max} \cdot \tau \Rightarrow F_{thruster} = \frac{F_{thruster,\max} \cdot t_{open}}{T} \tag{4-2}$$

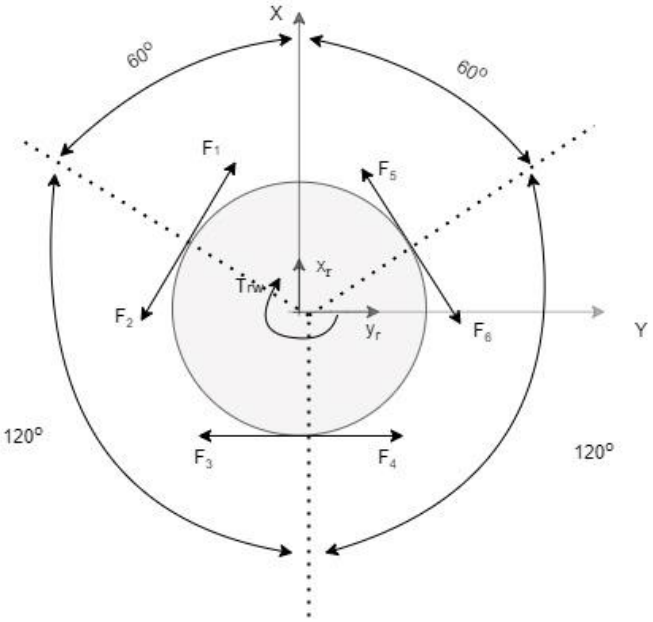
Είναι, επομένως, φανερό ότι η ελαχιστοποίηση καυσίμου επιτυγχάνεται όταν κάθε thruster του ρομπότ, λειτουργεί με το ελάχιστο δυνατό duty cycle, ώστε να πραγματοποιείται η κίνηση της βάσης που απαιτείται. Στο Κεφάλαιο 2.4 που αναλύθηκε η μέθοδος SIMPLEX

εξηγούνται τα χαρακτηριστικά στοιχεία ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού και βάσει της παραπάνω ανάλυσης, φαίνεται ότι ως συνάρτηση κόστους, μπορεί να οριστεί η ποσότητα που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, δηλαδή η

$$Z = 1\cdot\tau_1 + 1\cdot\tau_2 + 1\cdot\tau_3 + 1\cdot\tau_4 + 1\cdot\tau_5 + 1\cdot\tau_6 + 0\cdot T_{RW}^{CW} + 0\cdot T_{RW}^{CCW} \quad (4\text{-}3)$$

όπου, T_{RW}^{CW} και T_{RW}^{CCW} είναι οι ροπές που πρέπει να αποδοθούν από τον κινητήρα στον σφόνδυλο αντίδρασης, για να κινηθεί η βάση του ρομπότ κατά την ωρολογιακή και την ανθωρολογιακή φορά αντίστοιχα.

Η συγκεκριμένη συνάρτηση δίνει βαρύτητα στο duty cycle των προωθητήρων, καθώς είναι αυτοί που απαιτούν ποσότητα αερίου για τη λειτουργία τους και μηδενική βαρύτητα στη ροπή του reaction wheel, αφού δεν επηρεάζει την κατανάλωση. Αξίζει να σημειωθεί, ότι και για τα έξι thruster, ορίζεται η ίδια βαρύτητα, καθώς είναι όμοια και η παροχή όπως ρυθμίζεται από τις βαλβίδες είναι ίση για όλα, ενώ η ροπή του σφονδύλου αντίδρασης, χωρίζεται σε ωρολογιακή και ανθωρολογιακή, καθώς υπάρχουν οι περιορισμοί μη-αρνητικότητας των μεταβλητών, για την επίλυση με τη μέθοδο SIMPLEX. Στη συνέχεια, θα πρέπει να καθοριστούν οι συναρτήσεις των περιορισμών, οι οποίοι καθορίζονται από την κίνηση της βάσης.



Σχήμα 4.1 Η βάση του ρομπότ και οι δυνάμεις από τα thruster με μηδενική γωνία βάσης.

Οι δυνάμεις ώσης που ασκούνται στη βάση από τους προωθητήρες εξαρτώνται καθαρά από τη γεωμετρία του συστήματος. Για τυχαία γωνία βάσης θ_b (Σχ. 4.2), η δυναμική του συστήματος ορίζεται από τις εξισώσεις (4-4)-(4-18).

$$F_{1x} = F_1 \cdot \sin(60 - \theta_b) \quad (4\text{-}4)$$

$$F_{1y} = F_1 \cdot \cos(60 - \theta_b) \quad (4\text{-}5)$$

$$F_{2x} = F_2 \cdot \sin(60 - \theta_b) \quad (4\text{-}6)$$

$$F_{2y} = F_2 \cdot \cos(60 - \theta_b) \quad (4\text{-}7)$$

$$F_{3x} = F_3 \cdot \sin(\theta_b) \quad (4\text{-}8)$$

$$F_{3y} = F_3 \cdot \cos(\theta_b) \quad (4\text{-}9)$$

$$F_{4x} = F_4 \cdot \sin(\theta_b) \quad (4\text{-}10)$$

$$F_{4y} = F_4 \cdot \cos(\theta_b) \tag{4-11}$$

$$F_{5x} = F_5 \cdot \sin(60 + \theta_b) \tag{4-12}$$

$$F_{5y} = F_5 \cdot \cos(60 + \theta_b) \tag{4-13}$$

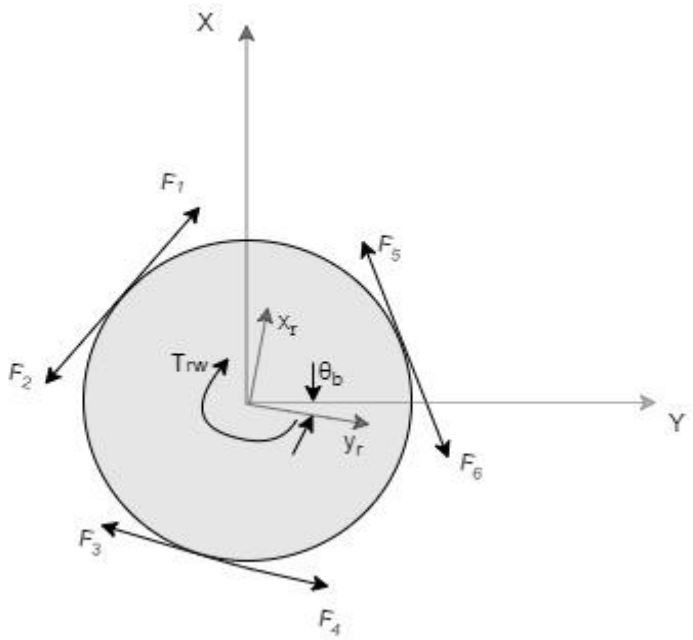
$$F_{6x} = F_6 \cdot \sin(60 + \theta_b) \tag{4-14}$$

$$F_{6y} = F_6 \cdot \cos(60 + \theta_b) \tag{4-15}$$

$$\Sigma F_x = m_r \cdot \ddot{x} \Rightarrow \ddot{x} = \frac{F_{1x} - F_{2x} + F_{3x} - F_{4x} + F_{5x} - F_{6x}}{m_r} \tag{4-16}$$

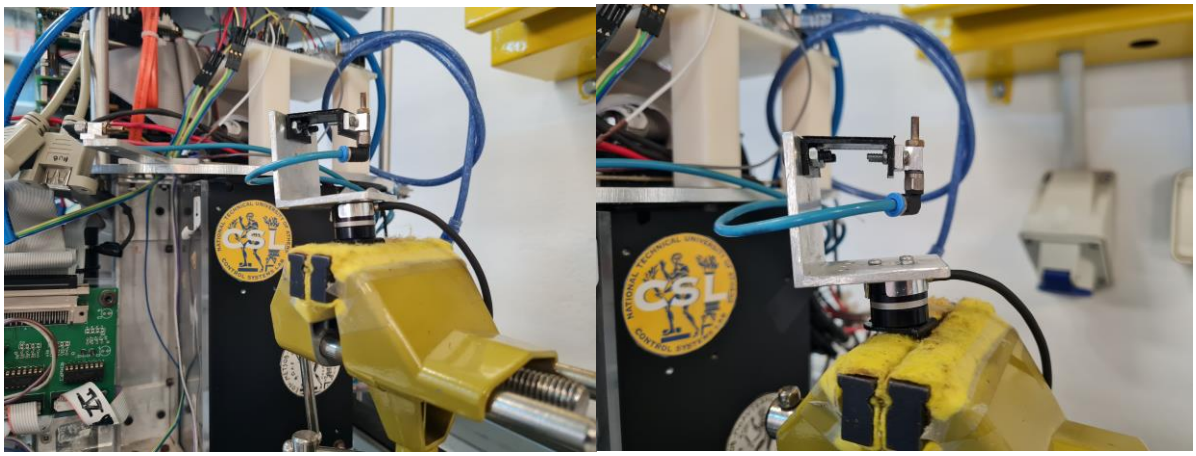
$$\Sigma F_y = m_r \cdot \ddot{y} \Rightarrow \ddot{y} = \frac{F_{1y} - F_{2y} - F_{3y} + F_{4y} - F_{5y} + F_{6y}}{m_r} \tag{4-17}$$

$$\Sigma M_{CM} = I_r \cdot \ddot{\theta} \Rightarrow \ddot{\theta} = \frac{F_1 \cdot R - F_2 \cdot R + F_3 \cdot R - F_4 \cdot R - F_5 \cdot R + F_6 \cdot R + \mathrm{T}_{RW}}{I_r} \tag{4-18}$$



Σχήμα 4.2. Η βάση του ρομπότ στραμμένη κατά τυχαία γωνία.

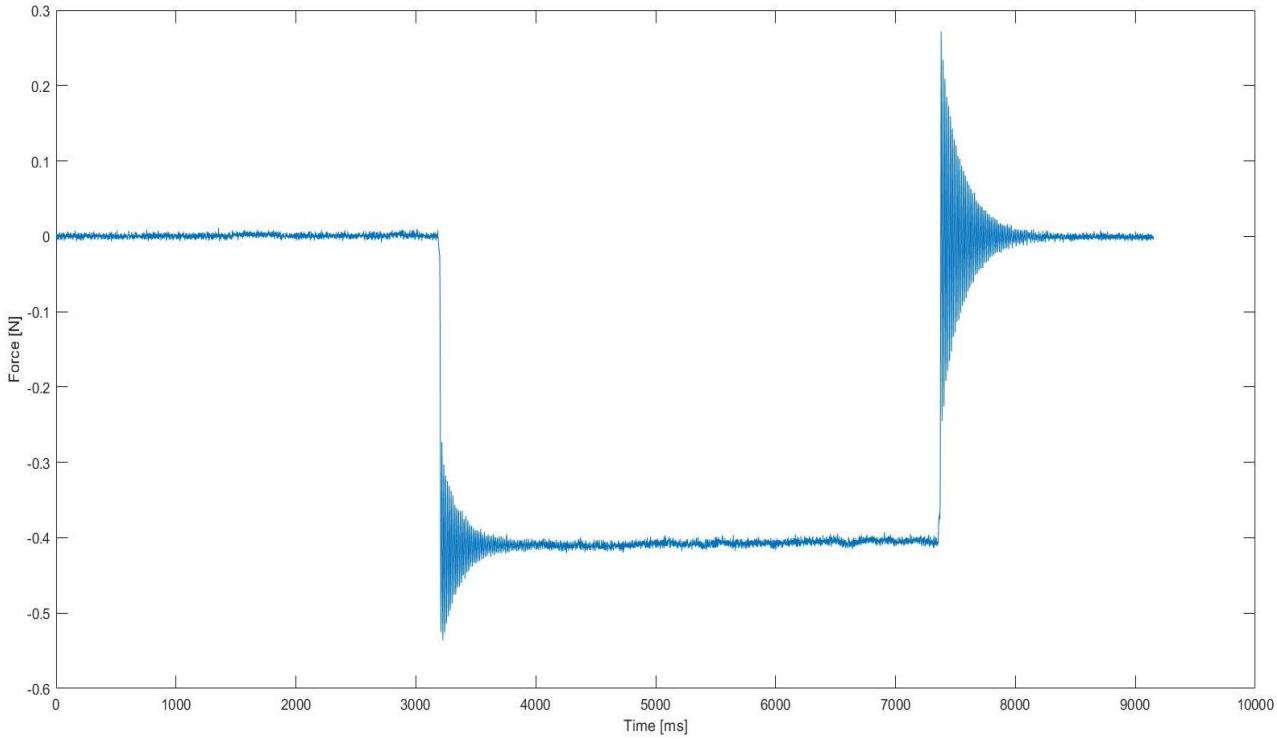
Τα F_i που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εκφράσεις είναι η ώση που παράγει το κάθε thruster, όπως αυτή ορίζεται στην Εξ. (4-2). Επομένως, πρέπει να καθοριστεί η μέγιστη ώση που μπορεί να αποδώσει στο σύστημα το κάθε thruster. Τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν με τη χρήση αισθητήρα δύναμης ATI Nano 17 [15] Συγκεκριμένα, οι προωθητήρες απομακρύνονταν από το σώμα το ρομπότ και με ένα έλασμα και 3D printed εξάρτημα προσδένονταν στον ATI, ο οποίος ήταν σταθεροποιημένος σε μέγγενη, με χρήση άλλου ελάσματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Για τη σύνδεση με τα ελάσματα χρησιμοποιήθηκαν οι οπές στο σώμα του αισθητήρα, ενώ με τον τρόπο αυτό όλη η δύναμη των προωθητήρων βρισκόταν στον z άξονα του αισθητήρα και διευκόλυνε τις μετρήσεις. Στη συνέχεια, ο αισθητήρας δύναμης μέσω προγράμματος ρυθμίστηκε να παίρνει μετρήσεις με συχνότητα 10kHz και έγινε calibration, ώστε να μην επηρεάζεται από άλλες συνθήκες.



Σχήμα 4.3. Η πειραματική διάταξη για την μέτρηση των δυνάμεων των προωθητήρων.

Για τον υπολογισμό της μέγιστης δύναμης κάθε thruster, το duty cycle ήταν 100% για 4s και οι μετρήσεις εξάγονταν σε αρχεία MATLAB από τα οποία υπολογιζόταν η τιμή της ώσης.

Στο διάγραμμα των μετρήσεων για τον προωθητήρα 3 (Σχ. 4.4), διακρίνεται καθαρά η στιγμή κατά την οποία αυτός ενεργοποιείται και η στιγμή που η βαλβίδα του κλείνει. Οι μετρήσεις προκύπτουν αρνητικές, καθώς λόγω της διάταξης, ήταν στο αρνητικό τμήμα του άξονα y όπως ορίζεται από τον αισθητήρα. Έτσι, από τις πειραματικές τιμές ώσης αφαιρείται ο θόρυβος και παίρνουμε για κάθε προωθητήρα ένα μέγιστο thrust. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.



Σχήμα 4.4. Μετρήσεις ώσης για τον προωθητήρα νούμερο 3, από τον αισθητήρα δύναμης.

Πίνακας 4.1. Οι μέγιστες τιμές ώσης για κάθε προωθητήρα.

Thruster	1	2	3	4	5	6
F_{max} (N)	0.44	0.40	0.41	0.38	0.32	0.29

Παρατηρείται, ότι η μέγιστη ώση για κάθε προωθητήρα, είναι αρκετά διαφορετική και αυτό οφείλεται σε δύο παράγοντες. Αρχικά στα διαφορετικά μήκη σωληνώσεων με τα οποία συνδέεται κάθε thruster στο manifold με τις σερβοβαλβίδες και δεύτερον στο γεγονός ότι η μπουκάλα με το αέριο που τα τροφοδοτεί, άδειαζε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Έτσι, και αφού οι μετρήσεις έγιναν με τη σειρά, είναι λογικό ότι η πίεση κατά τη μέτρηση του προωθητήρα 6 θα ήταν εμφανώς πεσμένη σε σχέση με τη μέτρηση του προωθητήρα 1, πράγμα που μπορεί να επέφερε μικρές διαφορές σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Όμως, θεωρήθηκε ότι αυτές οι διαφορές δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον σχεδιασμό τροχιάς σε πρώτη φάση και θα εξεταστούν αργότερα.

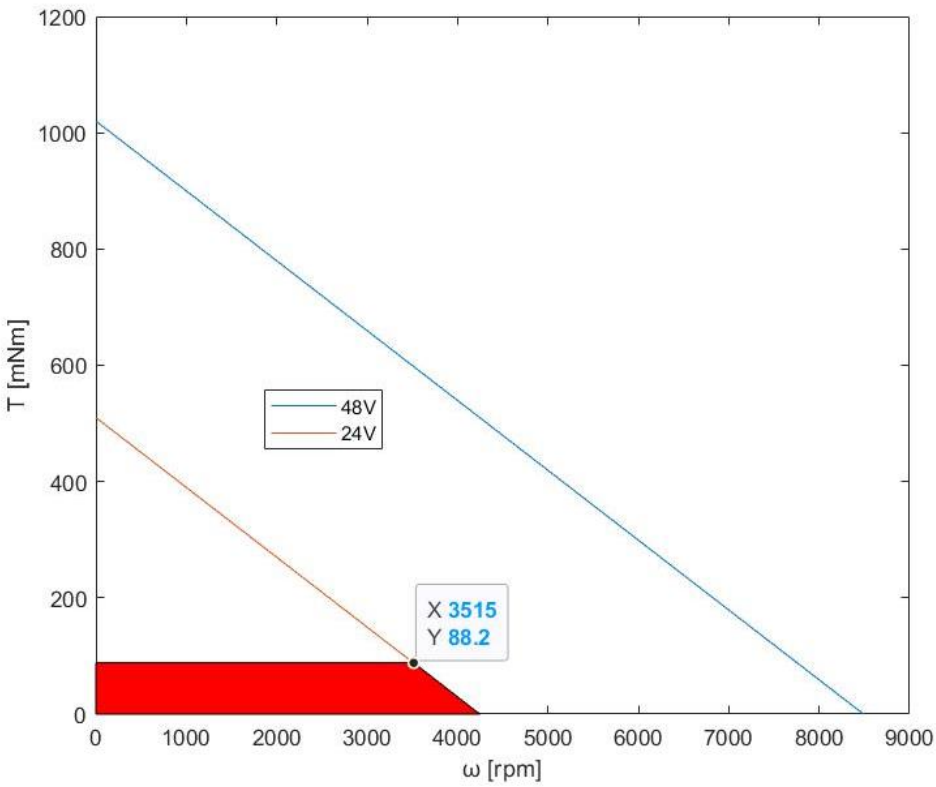
Εφόσον έχουν υπολογιστεί οι μέγιστες τιμές της ώσης του κάθε προωθητήρα, θα πρέπει να γίνει κάποια αναφορά στη συμπεριφορά του σφονδύλου αντίδρασης και να υπολογιστεί η μέγιστη ροπή που μπορεί να δώσει, χωρίς να φτάσει σε κατάσταση κορεσμού, όπως εξηγήθηκε στην Παράγραφο 2.2. Για να οριστούν οι κρίσιμες τιμές που απαιτούνται για τη λειτουργία του χρησιμοποιούνται τα χαρακτηριστικά του κινητήρα, όπως δίνονται από τα datasheet του κατασκευαστή. Δίνεται από τη Maxon, ότι η ονομαστική τάση λειτουργίας για τον συγκεκριμένο κινητήρα είναι 48V. Για την τάση αυτή, η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι T_s=1020mNm, η no load speed ω_{max}=8490rpm και η κλίση της ευθείας για τη χαρακτηριστική ροπής-στροφών είναι 0.12mNm/rpm. Ακόμα δίνεται κι η σταθερά ταχύτητας του κινητήρα, η οποία δίνει τη σχέση της μέγιστης ταχύτητας του κινητήρα ως προς την εφαρμοζόμενη τάση και που για τους συγκεκριμένους κινητήρες είναι 177rpm/V.

Η τάση στην οποία λειτουργεί όλο το κύκλωμα υψηλής τάσης του ρομπότ και κατ΄ επέκταση και ο κινητήρας του σφονδύλου αντίδρασης είναι αυτή που δίνει ο DC/DC converter υψηλής τάσης και είναι 24V. Επομένως, η no load speed από όσα δίνονται παραπάνω θα είναι 4245rpm και από την speed-torque gradient, η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι 510mNm. Το αποτέλεσμα είναι το αναμενόμενο, αφού όπως έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 2.2, για μικρότερη τάση λειτουργίας, η χαρακτηριστική μεταφέρεται παράλληλα, προς την αρχή των αξόνων.

Από το datasheet της Maxon [Παράρτημα C], δίνεται ότι η μέγιστη συνεχής ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας, για 24V ή 48V είναι 88,2mNm. Με αυτό το δεδομένο, υπολογίζεται η περιοχή λειτουργίας του κινητήρα και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή αποτελεί την περιοχή συνεχούς λειτουργίας, ενώ για ταχύτητες μεγαλύτερες της ω_1 ο κινητήρας δεν μπορεί να αποδίδει πλέον ροπή ίση με την μέγιστη ροπή συνεχούς λειτουργίας, αλλά μειώνεται αυξανόμενης της ταχύτητας. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας ω_1 χρησιμοποιείται η εξίσωση της ευθείας και προκύπτει:

$$T = -0{,}12 \cdot \omega + 510 \xrightarrow{T_1 = 88.2\,mNm} \omega_1 = 3515\,rpm \qquad (4\text{-}19)$$

Γνωρίζοντας κάθε φορά την ανάγκη του συστήματος σε ροπή του reaction wheel, μπορεί να υπολογίζεται και το χρονικό διάστημα για το οποίο η ροπή αυτή μπορεί να αποδίδεται και έτσι έχουμε έναν ακόμα περιορισμό, χρονικό αυτή τη φορά για το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.



Σχήμα 4.5. Το διάγραμμα ροπής-στροφών του κινητήρα του σφονδύλου ανάδρασης.

4.2 Υλοποίηση σε Matlab

Για την υλοποίηση της λύσης του προβλήματος, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η MATLAB, η οποία δίνει την δυνατότητα να επιλυθούν προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού με τη χρήση απλών εντολών, αρκεί προηγουμένως τα προβλήματα αυτά να έχουν εκφραστεί σωστά με τη χρήση πινάκων και διανυσμάτων. Η βασική εντολή της MATLAB που διαχειρίζεται προβλήματα ΓΠ είναι η εντολή linprog, η οποία αποτελεί έναν επιλύτη γραμμικού προγραμματισμού, ο οποίος υπολογίζει το ελάχιστο ενός προβλήματος, εκφρασμένο στην παρακάτω μορφή:

$$\min_{x} f^{T}(\mathbf{x})$$
$$s.t.\begin{cases} \mathbf{A}\cdot\mathbf{x} \le \mathbf{b}, & (1) \\ \mathbf{A}_{eq}\cdot\mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq}, & (2) \\ \mathbf{lb} \le \mathbf{x} \le \mathbf{ub} & (3) \end{cases} \tag{4-20}$$

Όπου τα **A**, $\mathbf{A_{eq}}$ αποτελούν τους πίνακες που εκφράζουν τους συντελεστές των παραμέτρων του συστήματος και τα **b**, $\mathbf{b_{eq}}$, **lb** και **ub** είναι διανύσματα που εκφράζουν τις τιμές των περιορισμών [21] Η συνάρτηση f(**x**) είναι ουσιαστικά η συνάρτηση κόστους, όπως εμφανίζεται στην προηγούμενη παράγραφο και το μέγεθος x είναι το duty cycle του κάθε προωθητήρα.

Για αρχή χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν μόνο οι περιορισμοί (2) και (3) με τη λογική ότι έχουν προσδιοριστεί οι κινήσεις που πρέπει να εκτελέσει το ρομπότ πάνω στην τράπεζα και επομένως είναι γνωστές εκ των προτέρων οι επιθυμητές επιταχύνσεις και οι χρόνοι για τους

οποίους θα πρέπει να επιτυγχάνονται. Έτσι, αρκεί να εκφραστούν οι εξισώσεις κίνησης του ρομπότ ως συναρτήσεις των duty cycle και εν συνεχεία να προσδιοριστούν οι πίνακες $\mathbf{A_{eq}}$, $\mathbf{b_{eq}}$ και τα όρια που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές απόφασης **ub** και **lb**. Φέρνοντας τις εξισώσεις κίνησης στη μορφή που αναφέρθηκε παραπάνω και με γνωστές τις επιθυμητές επιταχύνσεις για κάθε κίνηση του ρομπότ, για τους πίνακες $\mathbf{A_{eq}}$ και $\mathbf{b_{eq}}$ προκύπτουν τα εξής:

$$\begin{aligned}
\ddot{x} &= \frac{F_{1,\max}\cdot\tau_1\cdot\sin(60-\theta_b)-F_{2,\max}\cdot\tau_2\cdot\sin(60-\theta_b)+F_{3,\max}\cdot\tau_3\cdot\sin(\theta_b)}{m_r}+\\
&+\frac{-F_{4,\max}\cdot\tau_4\cdot\sin(\theta_b)+F_{5,\max}\cdot\tau_5\cdot\sin(60+\theta_b)-F_{6,\max}\cdot\tau_6\cdot\sin(60+\theta_b)}{m_r}\\
\ddot{y} &= \frac{F_{1,\max}\cdot\tau_1\cdot\cos(60-\theta_b)-F_{2,\max}\cdot\tau_2\cdot\cos(60-\theta_b)-F_{3,\max}\cdot\tau_3\cdot\cos(\theta_b)}{m_r}+\\
&+\frac{F_{4,\max}\cdot\tau_4\cdot\cos(\theta_b)-F_{5,\max}\cdot\tau_5\cdot\cos(60+\theta_b)+F_{6,\max}\cdot\tau_6\cdot\cos(60+\theta_b)}{m_r}\\
\ddot{\theta} &= \frac{F_{1,\max}\cdot\tau_1\cdot R-F_{2,\max}\cdot\tau_2\cdot R+F_{3,\max}\cdot\tau_3\cdot R-F_{4,\max}\cdot\tau_4\cdot R-F_{5,\max}\cdot\tau_5\cdot R+F_{6,\max}\cdot\tau_6\cdot R+T_{RW}}{\mathrm{I}_r}
\end{aligned} \tag{4-21}$$

Άρα,

$$\mathbf{A}_{eq}=\begin{bmatrix}
\frac{F_{1,\max}\,\mathrm{s}(60-\theta_b)}{m_r} & -\frac{F_{2,\max}\,\mathrm{s}(60-\theta_b)}{m_r} & \frac{F_{3,\max}\,\mathrm{s}(\theta_b)}{m_r} & -\frac{F_{4,\max}\,\mathrm{s}(\theta_b)}{m_r} & \frac{F_{5,\max}\,\mathrm{s}(60+\theta_b)}{m_r} & -\frac{F_{6,\max}\,\mathrm{s}(60+\theta_b)}{m_r} & 0\\
\frac{F_{1,\max}\,\mathrm{c}(60-\theta_b)}{m_r} & -\frac{F_{2,\max}\,\mathrm{c}(60-\theta_b)}{m_r} & -\frac{F_{3,\max}\,\mathrm{c}(\theta_b)}{m_r} & \frac{F_{4,\max}\,\mathrm{c}(\theta_b)}{m_r} & -\frac{F_{5,\max}c(60+\theta_b)}{m_r} & \frac{F_{6,\max}\,\mathrm{c}(60+\theta_b)}{m_r} & 0\\
\frac{F_{1,\max}R}{I_r} & -\frac{F_{2,\max}R}{I_r} & \frac{F_{3,\max}R}{I_r} & -\frac{F_{4,\max}R}{I_r} & -\frac{F_{5,\max}R}{I_r} & \frac{F_{6,\max}R}{I_r} & \frac{1}{I_r}
\end{bmatrix} \tag{4-22}$$

$$\mathbf{b}_{eq}=\begin{bmatrix}\ddot{x}_d\\ \ddot{y}_d\\ \ddot{\theta}_d\end{bmatrix} \tag{4-23}$$

Το πρόβλημα με την μέθοδο αυτή, παρουσιάζεται στα όρια των μεταβλητών απόφασης. Τα άνω όριο του reaction wheel, είναι προφανώς η μέγιστη συνεχόμενη ροπή που μπορεί να αποδώσει, άρα 88,2mNm, ενώ το κάτω όριο είναι η ίδια τιμή για την αντίστροφη κατεύθυνση, δηλαδή -88,2mNm. Πρέπει, εδώ να τονιστεί ότι, παρότι η πρότυπη μορφή SIMPLEX, απαιτεί περιορισμούς μη-αρνητικότητας των μεταβλητών, για την εντολή linprog της MATLAB κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο και επομένως τα όρια του σφονδύλου είναι επαρκώς καθορισμένα. Το ίδιο ισχύει και για τα άνω όρια των duty cycle των προωθητήρων. Όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 4.1, τα thruster παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά για duty cycle από 8% έως 95%. Επομένως, το άνω όριο για τις τιμές των τ είναι 0.95. Όμως, ορίζοντας το κάτω όριο 0, δεν αποκλείονται οι τιμές από 0 ως 0.08, ενώ ορίζοντας το κάτω όριο 0.08, είναι σαν να απαιτείται από τους προωθητήρες να μην μένουν κλειστοί ποτέ.

Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, πρέπει για τα duty cycle των πρωθητήρων να οριστεί μια μεταβλητή απόφασης, η οποία θα έχει μια δυαδικότητα. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να οριστεί σαν όριο είτε το 0, αν ο συγκεκριμένος προωθητήρας δεν χρειάζεται να λειτουργεί, είτε 0.08 αν ο προωθητήρας πρέπει να αποδώσει ώση. Η διαδικασία αυτή, οδηγεί στη χρήση της εντολής intlinprog αντί της linprog, η οποία ορίζει κάποιες από τις μεταβλητές να

παίρνουν μόνο ακέραιες τιμές [20] Με τον τρόπο αυτό και με τη χρήση ενός τεχνάσματος που αναλύεται παρακάτω, μπορεί να επιτευχθεί αυτή η δυαδικότητα που αναφέρθηκε.

Το κάθε duty cycle ορίζεται να είναι ένας γραμμικός συνδυασμός δύο μεταβλητών. Συγκεκριμένα γίνεται:

$$\tau(i) = 0.08 \cdot b(i) + y(i) \tag{4-24}$$

Το b(i) είναι μια integer μεταβλητή απόφασης, της οποίας τα όρια είναι $0 \le b(i) \le 1$. Έτσι, οι μόνες τιμές που μπορεί να πάρει η μεταβλητή απόφασης b είναι 0 ή 1 εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό την δυαδικότητα. Το y(i) χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί το υπόλοιπο εύρος τιμών των duty cycle, με την διαφορά ότι για τα όρια του έχουμε $0 \le y(i) \le 0.87 \cdot b(i)$.

Είναι φανερό, ότι όταν το b(i) είναι 0, τότε και το y(i) και κατά συνέπεια και το $\tau(i)$ μπορεί να πάρει μόνο την τιμή 0 και άρα το i-οστό thruster είναι κλειστό. Αν το b(i) έχει την τιμή 1, τότε τα όρια του duty cycle γίνονται $0.08 \le \tau(i) \le 0.95$ όπως δηλαδή θα έπρεπε για ένα thruster σε λειτουργία.

Για λόγους ευκολίας στον κώδικα, η ίδια λογική ακολουθείται και για τον υπολογισμό της ροπής του reaction wheel, με τη διαφορά ότι το b μπορεί να πάρει μόνο την τιμή 0 και τα όρια του y είναι τα όρια της ροπής όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι μετατροπές στον κώδικα, για τη χρήση της intlinprog αφορούν εκτός από την εισαγωγή των integer μεταβλητών και τον καθορισμό των ορίων τους, την χρήση ενός πίνακα $\mathbf{M}_{7\times14}$ που μετασχηματίζει με κατάλληλο τρόπο τις εξισώσεις των περιορισμών όπως φαίνεται στο Παράρτημα Α. Το τελικό αποτέλεσμα, είναι ένα διάνυσμα 14 στοιχείων το οποίο με τον μετασχηματισμό της Εξ. 4-24 δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα για τα duty cycle των προωθητήρων και τη ροπή του σφονδύλου αντίδρασης.

4.3 Επικοινωνία με το Ρομπότ

Το παραπάνω αποτέλεσμα, θα πρέπει να μεταφερθεί στο PC104 του ρομπότ με κατάλληλη μορφή, ώστε να μπορεί να εκτελέσει την συγκεκριμένη κίνηση πάνω στην τράπεζα του γρανίτη. Για να γίνει αυτό, θα χρησιμοποιηθεί το ROS toolbox της MATLAB που της επιτρέπει να ανταλλάζει δεδομένα με nodes του ROS μέσω publishers, subscribers και services. Για να συμβεί αυτό, πρέπει να υπάρχει ανοιχτός ένας ROS master, στον οποίο μπορεί να συνδεθεί ο υπολογιστής που τρέχει τον κώδικα της MATLAB ή να ανοίξει ο ίδιος ένα ROS master. Και τα δύο γίνονται με την χρήση της εντολής `rosinit`, απλά στην πρώτη περίπτωση, η εντολή παίρνει σαν όρισμα την διεύθυνση IP του υπολογιστή στον οποίο τρέχει ο master ή το URI του master [24]

Με το ROS Toolbox, η MATLAB έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει subscribers και publishers, ώστε να γίνεται η ανταλλαγή μηνυμάτων με το ROS του ρομπότ, μέσω topics τα οποία είτε υπάρχουν ήδη, είτε τα δημιουργεί. Για τη δημιουργία ενός subscriber, χρησιμοποιείται η εντολή:

```
<subscriber_name> = rossubscriber('<topic_name>')
```

η οποία δέχεται σαν όρισμα το όνομα του topic από το οποίο περιμένει το μήνυμα. Για να αποθηκευτεί το μήνυμα σε κάποια μεταβλητή, χρησιμοποιείται η εντολή *receive* η οποία ελέγχει για συγκεκριμένο χρονικό διάβασμα το topic και αποθηκεύει κάθε μήνυμα που γίνεται published σε αυτό, στην μεταβλητή που ζητείται. Φυσικά, η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει με τη χρήση κάποιας callback function, όπως γίνεται έτσι κι αλλιώς σε περιβάλλον ROS.

Για να κάνει publish η MATLAB σε κάποιο topic, πρέπει να δημιουργηθεί ένας publisher και κάποιο message. Για τη δημιουργία τους υπάρχουν οι εντολές:

```
<publisher_name> = rospublisher('<topic_name>', message_type)
<message_name> = rosmessage(<topic_name>)
<message_name>.data = …data…
```

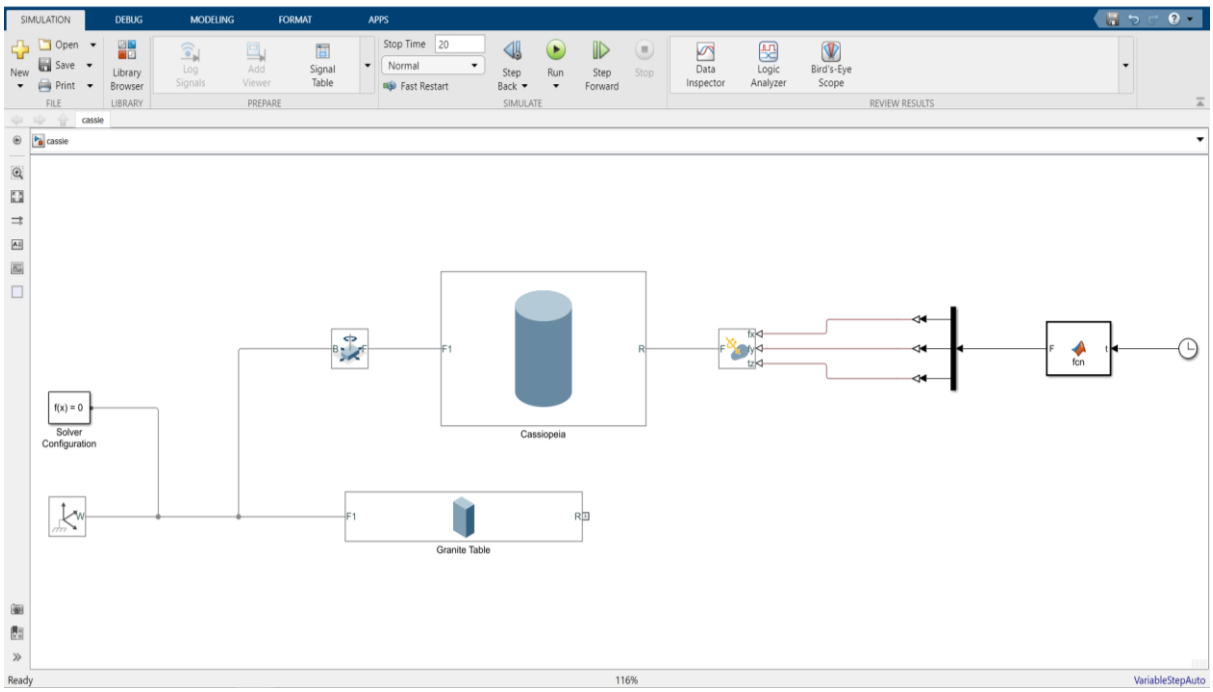
Στη συνέχεια, για να γίνει το μήνυμα published στο topic χρησιμοποιείται η εντολή:

```
send(<publisher_name>, <message_name>)
```

Τέλος, με την εντολή `rosshutdown`, τερματίζεται η σύνδεση της MATLAB με τον ROS Master και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι publishers και οι subscribers που δημιουργήθηκαν.

4.4 Προσομοίωση και Αποτελέσματα

Πρωτού ο κώδικας που γράφτηκε για την βελτιστοποίηση της κίνησης χρησιμοποιηθεί για πειράματα, με το ρομπότ να εκτελεί κινήσεις πάνω στην τράπεζα του γρανίτη, πρέπει να ελεγχθεί η ορθότητα των υπολογισμών και της μοντελοποίησης των δυνάμεων και ροπών που χρησιμοποιούνται. Για το λόγο αυτό, το σύστημα μοντελοποιείται στο Simscape/Simulink, ώστε να ελεγχθεί ότι όταν παίρνει τα αποτελέσματα για duty cycle και ροπή, η κίνηση της βάσης, σε θεωρητικό επίπεδο, θα είναι σωστή [25] Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι απλοποιημένο, από την άποψη ότι δεν λαμβάνονται υπόψιν οι βραχίονες του ρομπότ, καθώς η μάζα και η αδράνεια τους, μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες σε σχέση με την βάση. Η προσομοίωση του συστήματος στο περιβάλλον του Simulink, φαίνεται στο Σχήμα 4.6.

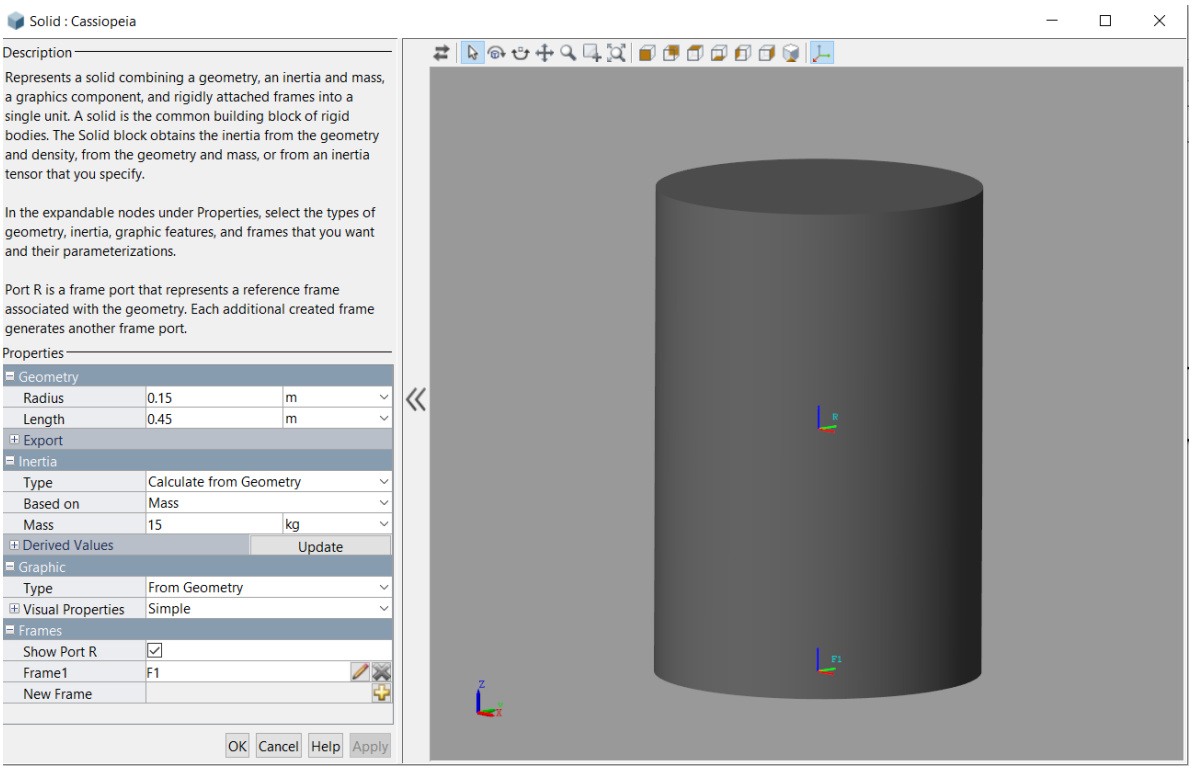


Σχήμα 4.6. Η μοντελοποίηση του συστήματος στο περιβάλλον Simscape.

Αρχικά, προσδιορίζονται το σχήμα και οι διαστάσεις της τράπεζας και της βάσης του ρομπότ και στη συνέχεια, τα συστήματα αξόνων που θα χρησιμοποιηθούν για το κάθε σώμα. Με την σήμανση R είναι το κεντροβαρικό σύστημα αξόνων του σώματος, το οποίο βρίσκεται στο κέντρο μάζας του και υπολογίζεται από το Simulink, ενώ με τη σήμανση F_i είναι τα συστήματα αξόνων που καθορίζει ο χρήστης και χρησιμοποιούνται για τους

υπολογισμούς και για τον προσδιορισμό των σχετικών θέσεων και των δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα.

Όσον αφορά την τράπεζα, για τη μοντελοποίηση, επιλέγεται ένα ορθογώνιο με διαστάσεις όμοιες με αυτές της τράπεζας, δηλαδή [2.2 1.8 0.5]m ενώ για τη βάση του ρομπότ, κύλινδρος με ύψος 0.45m και ακτίνα 0.15m (Σχ. 4.7). Για την τράπεζα το frame που δημιουργείται, τοποθετείται στην πάνω αριστερά γωνία του ορθωγωνίου και ταυτίζεται με το world frame, δηλαδή το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων για το μοντέλο, ενώ για το ρομπότ το F1 τοποθετείται στο κέντρο της βάσης του κυλίνδρου.

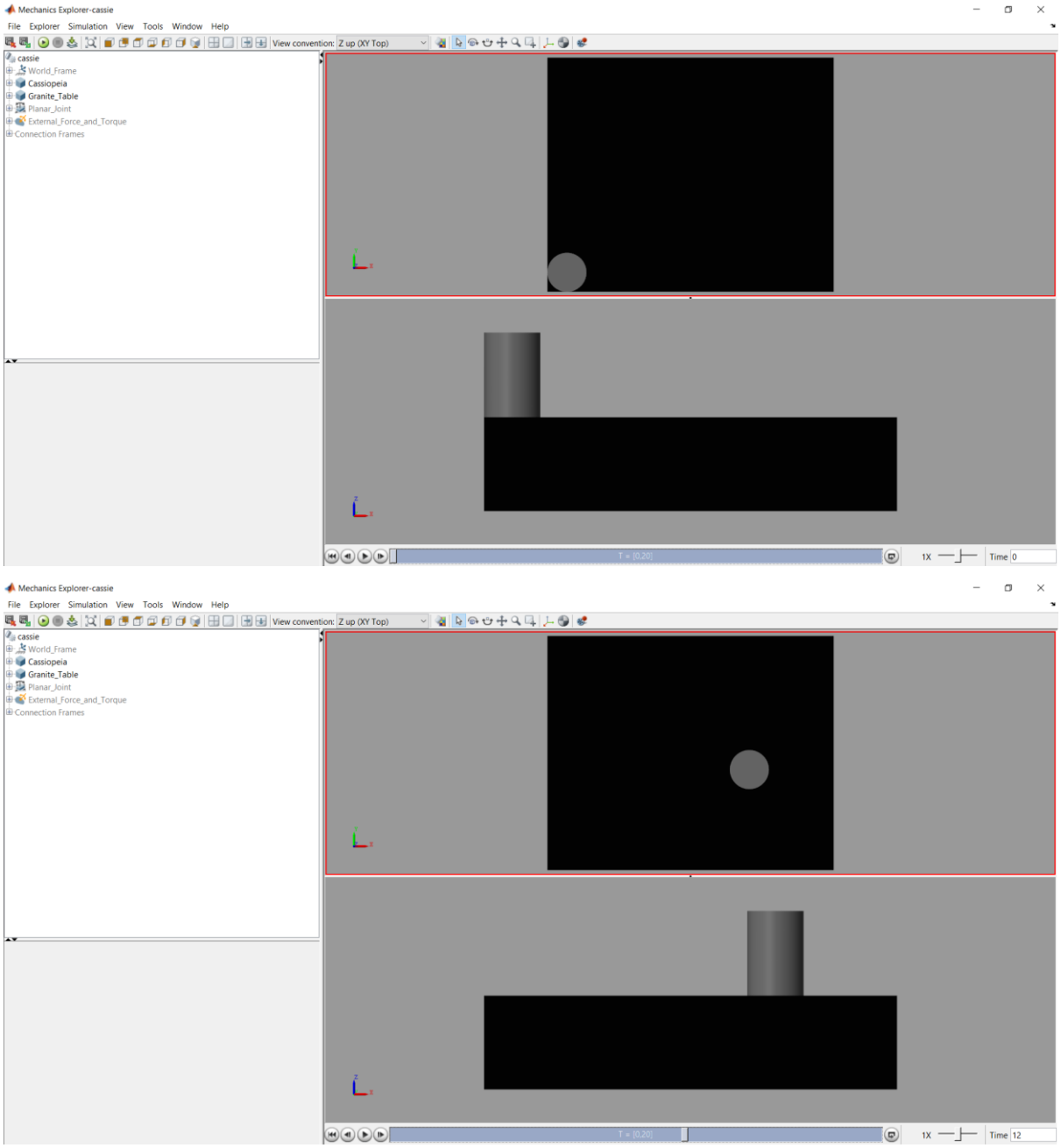


Σχήμα 4.7. Η επιλογή διαστάσεων και συστημάτων συντεταγμένων για τη βάση του ρομπότ, όπως χρησιμοποιείται στο μοντέλο του Simscape.

Εν συνεχεία, η σχετική θέση του ρομπότ ως προς την τράπεζα, καθορίζεται με τη χρήση ενός planar joint block, το οποίο δέχεται μια αρχική θέση του ενός στοιχείου (follower), σε αυτή την περίπτωση του ρομπότ, ως προς το άλλο (base), δηλαδή την τράπεζα και επιτρέπει μεταξύ τους την κίνηση μόνο στο επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό, τα σωματόδετα συστήματα συντεταγμένων ορίζονται πλήρως κατά τη διάρκεια της σχετικής τους κίνησης και άρα ως προς το world frame. Για να δοθεί στο σύστημα η επενέργηση, χρησιμοποιείται ένα function block στο οποίο ορίζονται βάσει της λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης, τα duty cycles και η ροπή του κινητήρα του reaction wheel. Παράλληλα με το function block χρησιμοποιούνται δύο ακόμα στοιχεία. Το clock, το οποίο ελέγχει ότι οι δυνάμεις δίνονται στα σωστά χρονικά διαστήματα, δεδομένης της επιθυμητής κίνησης και το physical signal converter το οποίο μετατρέπει την έξοδο του function block σε δύο σήματα δύναμης και ένα ροπής, ώστε με τη χρήση του external force and torque block να οδηγήσουν στην κίνηση του ρομπότ.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχ. 4.8), για αρχή επιλέχθηκε το ρομπότ να πραγματοποιήσει απλές κινήσεις, με σκοπό να ελεγχθεί η ορθότητα του

μοντέλου. Πρώτα επιλέχθηκε μια κίνηση κατά μήκος της μίας πλευράς της τράπεζας με ένα τριγωνικό προφίλ ταχύτητας, το οποίο σημαίνει ότι θα χρησιμοποιηθούν μόνο τα δύο ζευγάρια προωθητήρων (για αρχική γωνία βάσης ίση με 0 μοίρες) και ακόμα μια κίνηση, διαγώνια στο τραπέζι, ώστε να χρησιμοποιούνται όλοι ή σχεδόν όλοι οι προωθητήρες, ανάλογα την αρχική γωνία βάσης, αλλά και ο σφόνδυλος αντίδρασης. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού λοιπόν, ως εισόδους στο function block, παρατηρήθηκε ότι οι κινήσεις της βάσης πάνω στην τράπεζα, σύμφωνα με το μοντέλο του Simulink ήταν οι αναμενόμενες και άρα τα αποτελέσματα της διαδικασίας του optimization επιβεβαιώνονται. Επομένως, ο κώδικας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο πραγματικό σύστημα, ώστε να υπάρξει και πειραματική επιβεβαίωση.



Σχήμα 4.8. Στιγμιότυπα από την προσομοίωση του πειράματος.

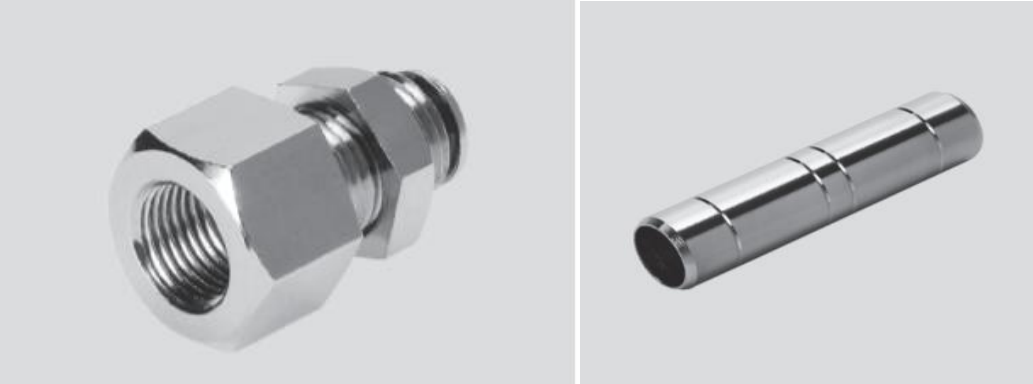
Έτσι, με τη διαδικασία που έχει περιγραφεί στην Ενότητα 4.2 οι υπολογισμένες, βέλτιστες τιμές για τα duty cycle και τη ροπή του reaction wheel γράφονται στα κατάλληλα topic του ROS του ρομπότ και εκτελείται το πείραμα πάνω στην τράπεζα. Όμως, διαπιστώνεται ότι τελικά η κίνηση της βάσης δεν είναι αυτή που θα αναμενόταν και που είχε προκύψει από την προσομοίωση. Εφόσον η θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος και η λύση που προκύπτει με τη χρήση της μεθόδου SIMPLEX έχει δοκιμαστεί σε προσομοίωση, η οποία υπήρξε επιτυχής, οι λόγοι που η πειραματική διαδικασία δεν είχε τα αναμενόμενα αποτελέσματα, αφορούν στο hardware, και στη συγκεκριμένη περίπτωση στο πνευματικό σύστημα του ρομπότ. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πεπιεσμένο διοξείδιο του άνθρακα, τροφοδοτεί με τη χρήση ρυθμιστών πίεσης τα thrusters και τα αεροέδρανα του ρομπότ. Αυτό σημαίνει, ότι θεωρώντας το σύστημα σαν ένα δίκτυο σωληνώσεων με πηγή σταθερής πίεσης, έχουμε εννιά εξόδους με γνωστή διαφορά πίεσης. Το πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι μια πηγή σταθερής πίεσης, δεν μπορεί να δίνει συνεχόμενα μεγάλες τιμές παροχής, καθώς αφενός το αέριο εξαντλείται και αφετέρου, υπάρχουν περιορισμοί που αφορούν τις διαφορετικές αντιστάσεις του κάθε αγωγού μέχρι την έξοδο στην ατμόσφαιρα.

Είναι φανερό ότι όσο συμβαίνει αυτό, οι μέγιστες τιμές ώσης των προωθητήρων, δεν είναι σταθερές και ίσες με τις τιμές που έχουν υπολογιστεί κατά την πειραματική διαδικασία με τον ATI. Ακόμα, αυτή η συμπεριφορά της μεγάλης ανάγκης σε παροχή στους προωθητήρες, θα μπορούσε να προκαλέσει πτώση της παροχής στα αεροέδρανα με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί πρόβλημα κατά την εκτέλεση του πειράματος και πιθανές βλάβες στα έδρανα και το τραπέζι. Η λύση που θα χρησιμοποιηθεί για να αποκατασταθεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος, περιλαμβάνει την προσθήκη ρυθμιζόμενων ακροφυσίων στα άκρα των προωθητήρων. Με τη λύση αυτή, όλοι οι προωθητήρες θα έχουν την ίδια συμπεριφορά όσον αφορά την ώση, ενώ η παροχή που ζητά πλέον κάθε thruster δεν είναι απρόβλεπτη, αλλά καθορισμένη από τις βαλβίδες ελέγχου ροής.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, οι βαλβίδες αυτές έχουν μια πνευματική είσοδο push-in στην οποία τοποθετείται το σωληνάκι με το οποίο μεταφέρεται το αέριο στο thruster και στην έξοδο αρσενικό σπείρωμα στο οποίο προσαρμόζεται το ακροφύσιο του προωθητήρα. Μια επιπλέον δυσκολία που παρουσιάζεται, αφορά στο ότι τα ακροφύσια που βρίσκονται τοποθετημένα στο ρομπότ αυτή τη στιγμή δεν μπορούν να προσδεθούν στη βαλβίδα, οπότε πρέπει να αλλάξουν. Καθώς δεν είναι εύκολο να βρεθούν έτοιμα ακροφύσια για έξοδο πεπιεσμένου αέρα σε τέτοιο μέγεθος, επιλέγονται δύο επιπλέον εξαρτήματα της εταιρείας FESTO, τα οποία συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελέσουν τελικά τα άκρα των προωθητήρων.

Σχήμα 4.9. Οι βαλβίδες ελέγχου ροής της εταιρείας FESTO που χρησιμοποιήθηκαν [19]

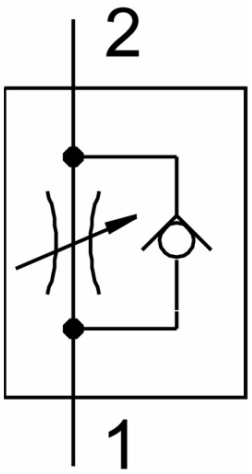
Το θηλυκό σπείρωμα του πρώτου connector (Σχ. 4.10) συνδέεται στο αρσενικό σπείρωμα της βαλβίδας ρύθμισης ροής και στο άλλο άκρο τοποθετείται το sleeve που αποτελεί την έξοδο του ακροφυσίου.



Σχήμα 4.10. Τα δύο εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την έξοδο των προωθητήρων[18]

Η αρχή λειτουργίας της βαλβίδας είναι πολύ απλή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11, η βίδα στο πάνω μέρος της, καθορίζει την τιμή μιας μεταβλητής αντίστασης, ενώ με τη χρήση αντεπίστροφης βαλβίδας, γίνεται σίγουρο ότι η παροχή μπορεί να περάσει μόνο μέσα από τον στραγγαλιστή. Η πνευματική αντίσταση είναι μηδενική, όταν ο κοχλίας είναι πλήρως ανοιχτός (n=10 στροφές), ενώ η αντίσταση είναι άπειρη, δηλαδή δεν περνάει παροχή από τον στραγγαλιστή, όταν ο κοχλίας είναι πλήρως κλειστός (n=0 στροφές).

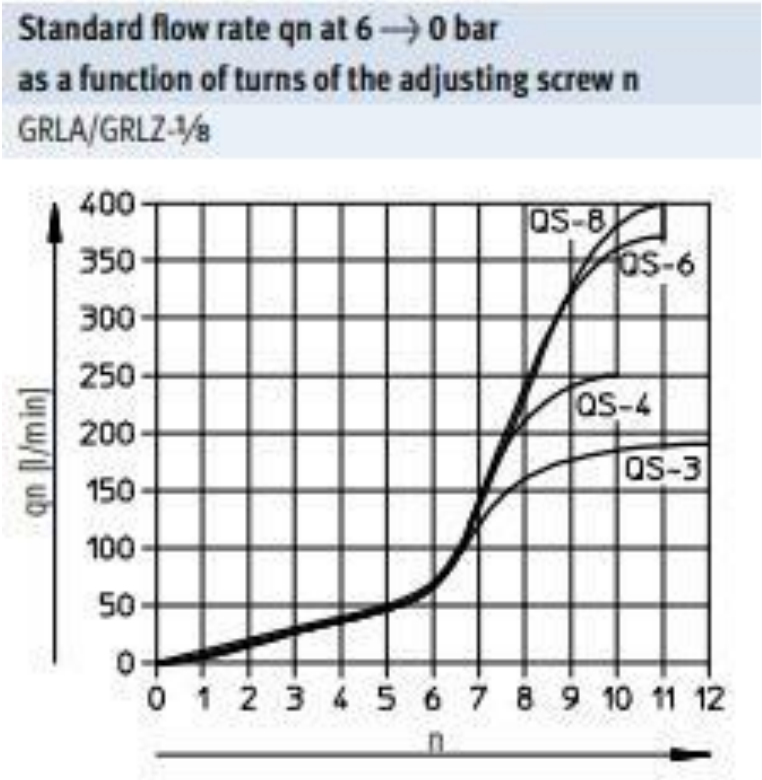
Έτσι, η επιθυμητή τιμή της ώσης κάθε προωθητήρα, η οποία εξαρτάται από την παροχή αερίου, μπορεί να καθοριστεί.



Σχήμα 4.11. Το σχηματικό διάγραμμα της βαλβίδας ρύθμισης ροής.

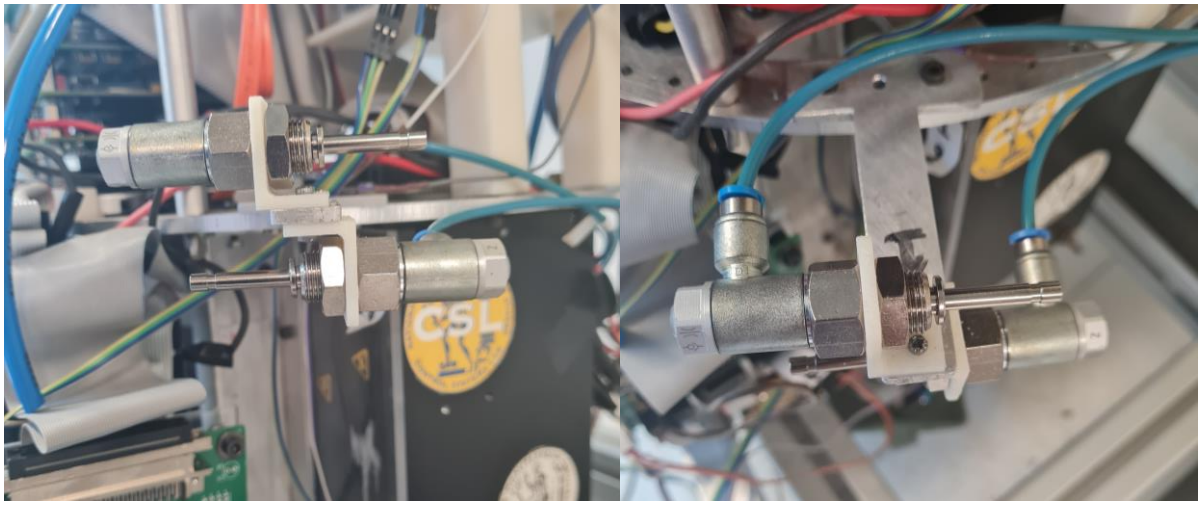
Για το προϊόν που επιλέχθηκε, η Festo παρέχει διάγραμμα της παροχής ανάλογα με τις στροφές που έχει η βίδα ρύθμισης της ροής για διαφορά πίεσης 6bar, όπως και στη δική μας εφαρμογή (Σχ. 4.12). Γνωρίζοντας πως η παροχή έχει γραμμική αναλογία με την ώση, αρκεί να γνωρίζουμε αν η μέγιστη δύναμη ώσης παραμένει 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. Από προηγούμενα πειράματα με τις ίδιες βαλβίδες, γνωρίζουμε πως τόσο η απόδοση του προωθητήρα, όσο και οι αποκρίσεις του συστήματος, δεν επηρεάζονται από την προσθήκη του νέου εξαρτήματος, όταν η βίδα βρίσκεται στην θέση που είναι τελείως ανοιχτή.



Σχήμα 4.12. Παροχή ως συνάρτηση των στροφών της βίδας ρύθμισης της ροής (QS-3).

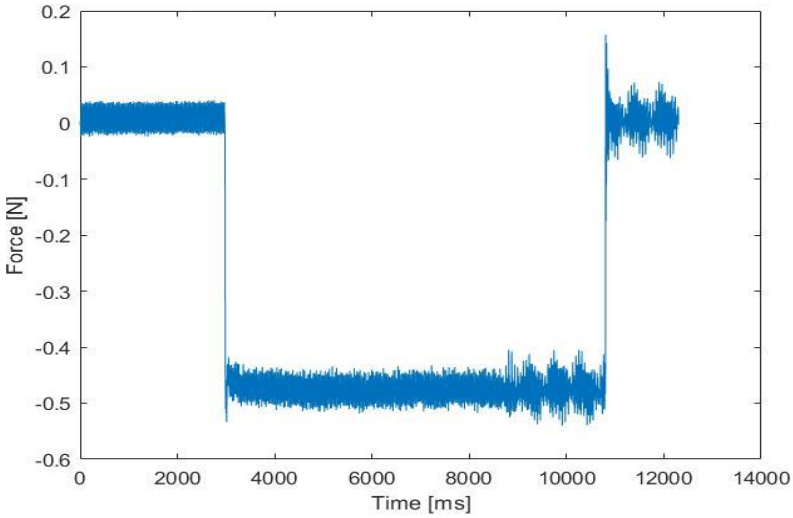
Στο Σχήμα 4.13 φαίνονται τα νέα ακροφύσια των thruster τοποθετημένα πάνω στο ρομπότ. Για την τοποθέτησή τους χρησιμοποιήθηκαν 3D printed κομμάτια πολύ απλής γεωμετρίας και αρκετά μεγάλου πάχους ώστε να μην παραμορφώνονται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων λόγω των δυνάμεων από τους προωθητήρες και από το όλο βάρος των καινούριων ακροφυσίων. Ο πρώτος έλεγχος που έγινε όταν τοποθετήθηκαν στο ρομπότ, αφορούσε τη διαδικασία μέτρησης της ώσης τους με τον ATI, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.1. Για λόγους ευκολίας και εξοικονόμησης αερίου, αντί για τις μπουκάλες διοξειδίου του άνθρακα, χρησιμοποιήθηκε συμπιεστής, ο οποίος παρείχε ατμοσφαιρικό αέρα στο σύστημα σε πιέσεις από 6 bar μέχρι 8 bar. Με τον τρόπο αυτό μπόρεσαν να ελεγχθούν οι συμπεριφορές των προωθητήρων και οι μεταβολές στις τιμές της ώσης για όλα τα ακροφύσια και σε καταστάσεις που λειτουργούσαν ταυτόχρονα περισσότερα από ένα thruster. Βέβαια, η χρήση του συμπιεστή, σημαίνει ότι οι δυνάμεις που προέκυψαν, είναι μικρότερες από τις κανονικές, δηλαδή αυτές που προκύπτουν με τη χρήση CO_2, οπότε για τον καθορισμό των πραγματικών δυνάμεων, θα ήταν απαραίτητο τα πειράματα να ξαναγίνουν με τη χρήση των φιαλών.



Σχήμα 4.13. Τα νέα ακροφύσια με τις βαλβίδες ελέγχου ροής τοποθετημένα στο ρομπότ.

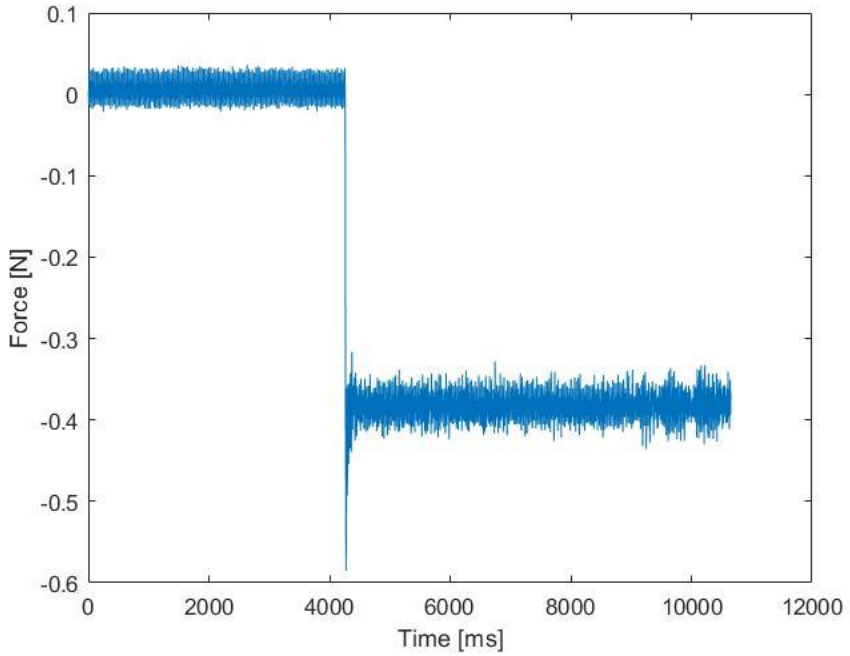
4.5 Το νέο πνευματικό σύστημα του ρομπότ

Βάσει των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του συμπιεστή, παρατηρήθηκε ότι οι δυνάμεις ώσης του ρομπότ με την τοποθέτηση των νέων ακροφυσίων, διαφέρουν αρκετά από αυτές που υπολογίστηκαν με τη χρήση των παλιών. Συγκεκριμένα, οι τιμές των δυνάμεων ήταν αρκετά αυξημένες με τη χρήση των νέων ακροφυσίων και συνυπολογίζοντας το γεγονός ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας έχει μικρότερη πυκνότητα από το διοξείδιο του άνθρακα, περιμένουμε αρκετά μεγαλύτερες τιμές σε κανονικές συνθήκες γεγονός που επιτρέπει την εκτέλεση κινήσεων σε αρκετά μικρότερους χρόνους. Η διαφορά αυτή κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στη μικρή διατομή εξόδου των παλιών ακροφυσίων που μπορεί να εισήγαγε μεγαλύτερη αεροδυναμική αντίσταση. Στα Σχήματα 4.14 – 4.16 φαίνονται οι δυνάμεις του thruster 5 όπως υπολογίστηκαν με τη χρήση του συμπιεστή από τον αισθητήρα δύναμης ATI κατά τη λειτουργία του μεμονωμένα (Σχ. 4.14), ταυτόχρονα με άλλο ένα thruster ανοιχτό (Σχ. 4.15) και ταυτόχρονα με δύο ακόμα thruster σε λειτουργία (Σχ. 4.16). Οι τιμές των δυνάμεων, με μικρές διαφορές, είναι αρκετά παρεμφερείς για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς προωθητήρων του συστήματος.

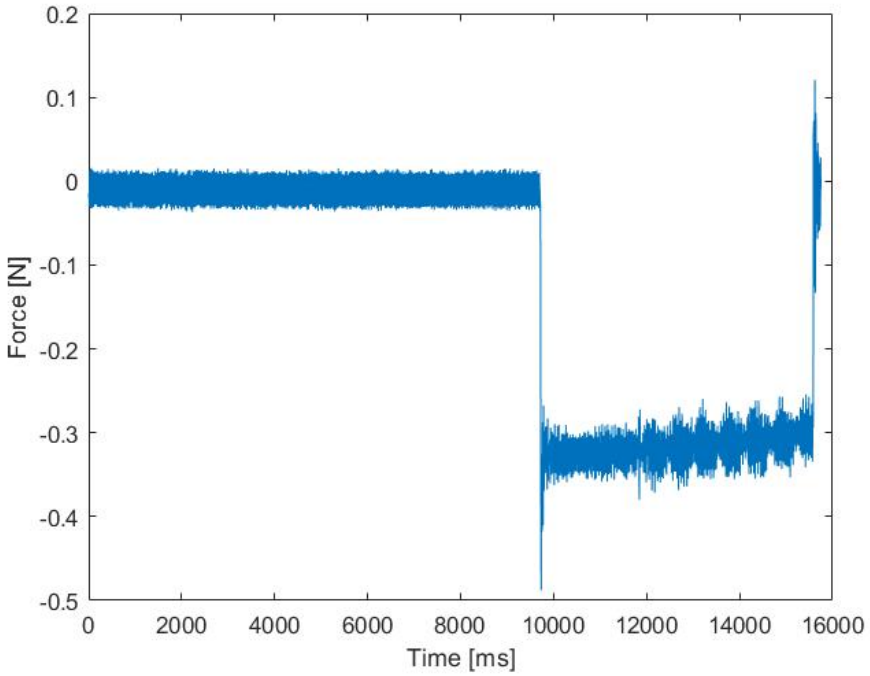


Σχήμα 4.14. Η δύναμη ώσης που παράγεται από τον προωθητήρα 5 όταν λειτουργεί μόνος του για 100% duty cycle.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μικρές ταλαντώσεις που εμφανίζονται στο τέλος του πειράματος οφείλονται στη λειτουργία του συμπιεστή, καθώς η πίεση του έπεφτε και χρειάστηκε να ξανατεθεί σε λειτουργία και δεν έχει σχέση με τα ακροφύσια του ρομπότ ή γενικά με τη λειτουργία του πνευματικού συστήματος. Οι ίδιες ταλαντώσεις παρουσιάζονται για τον ίδιο λόγο στα περισσότερα διαγράμματα που προκύπτουν από πειράματα που έγιναν με τη χρήση του προωθητήρα.



Σχήμα 4.15. Η δύναμη ώσης του thruster 5 για 100% duty cycle όταν λειτουργεί ταυτόχρονα με το thruster 1.



Σχήμα 4.16. Η δύναμη ώσης του thruster 5 για 100% duty cycle όταν λειτουργεί ταυτόχρονα με τα thruster 1 και 2.

Για να διαπιστωθούν οι πραγματικές τιμές της δύναμης ώσης που θα έχουν οι κινητήρες κατά τα πειράματα στην τράπεζα του γρανίτη, έπρεπε να χρησιμοποιηθούν οι μπουκάλες διοξειδίου του άνθρακα και να ρυθμιστούν οι στροφές στις βίδες των στραγγαλιστών ώστε τα thruster να παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά και να αποδίδουν το ίδιο ανεξάρτητα από το πλήθος των εν λειτουργία προωθητήρων. Η διαδικασία αυτή ήταν χρονοβόρα και χωρίστηκε σε δύο στάδια. Αρχικά, οι τιμές ώσης των προωθητήρων μετρήθηκαν με πλήρως ανοιχτές τις βαλβίδες ρύθμισης ροής. Έτσι υπολογίστηκε η μέγιστη δύναμη κάθε προωθητήρα, η οποία όμως λόγω της συμπεριφοράς του πνευματικού κυκλώματος δεν θα παρέμενε σταθερή κατά τη διενέργεια πειραμάτων. Αυτό οφείλεται στη φύση του συστήματος, το οποίο πρακτικά αποτελείται από πηγή σταθερής πίεσης και μια σειρά πνευματικών αντιστάσεων συνδεδεμένων παράλληλα. Θεωρώντας ότι όλες οι αντιστάσεις είναι ίσες και ίσες με μια τιμή R_f, τότε όταν θα βρίσκεται σε λειτουργία μόνο μία σερβοβαλβίδα, το κύκλωμα θα απαιτεί συνολική παροχή q_1. Όταν μπει σε λειτουργία άλλη μια σερβοβαλβίδα, ο αριθμός των παράλληλων αντιστάσεων είναι 2, και η συνολική αντίσταση γίνεται $R_{f,o\lambda} = R_f/2$, άρα η συνολική παροχή που απαιτείται είναι $q_2 = 2q_1$. Αντίστοιχα, για 3 ενεργές σερβοβαλβίδες, έχουμε $R_{f,o\lambda} = R_f/3$ και $q_3 = 3q_1$. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μέγεθος της αντίστασης που αφορά την αντίσταση του στραγγαλιστή, πρέπει να αυξηθεί αρκετά για δύο λόγους. Πρώτον, ώστε η μπουκάλα να μπορεί να τροφοδοτήσει το κύκλωμα με αέριο ακόμα και για 3 βαλβίδες ανοικτές και δεύτερον, επειδή με αυτόν τον τρόπο οι μικρές διαφορές που υπάρχουν στα μήκη των καλωδίων και εισάγουν ανισότητες στις αντιστάσεις γίνονται αμελητέες. Στο δεύτερο στάδιο των μετρήσεων, υπολογίστηκε με διαδοχικές μετρήσεις το μέγεθος αυτής της αντίστασης και τελικά η δύναμη της ώσης που μπορεί να αποδίδεται από κάθε προωθητήρα.

Τέλος, όπως παρατηρήθηκε, οι μετρήσεις από τον αισθητήρα δύναμης παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα θορύβου, που δυσκολεύει τον ακριβή προσδιορισμό της δύναμης του κάθε προωθητήρα. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε κάποιο χαμηλοπερατό φίλτρο, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η καθαρή δύναμη από τα thrusters [23] Ένα τέτοιο φίλτρο, είναι το Savitzky-Golay Filter (SGF), που αποτελεί ένα φίλτρο Moving Average [7] Το SGF χρησιμοποιείται ώστε να «λειάνει» ένα σήμα με θόρυβο σε υψηλές συχνότητες, ενώ χρησιμοποιεί μια διαδικασία βελτιστοποίησης, περνώντας βάσει της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, ένα πολυώνυμο συγκεκριμένου βαθμού, από κάθε κομμάτι του συνολικού dataset. Στην MATLAB, ένα διάνυσμα **x**, μπορεί να φιλτραριστεί με τη χρήση του SGF, με την εντολή

```
sgolayfilt(x, order, datalen),
```

όπου, order είναι ο βαθμός του πολυωνύμου που επιλέγεται και datalen, το πλήθος των τιμών που περιέχεται σε κάθε ένα από τα κομμάτια, στα οποία χωρίζεται το dataset [22]

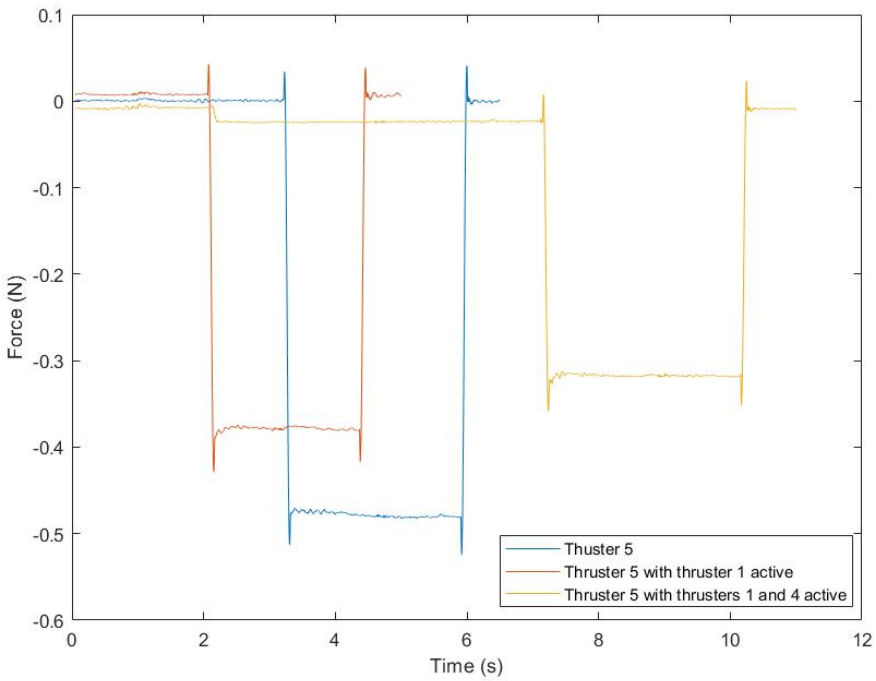
Για καλύτερα αποτελέσματα, προτείνεται ο βαθμός του πολυωνύμου, να είναι σχετικά μικρός, ώστε να απορρίπτεται η μεγάλη διακύμανση των τιμών και έτσι επιλέγεται για την συγκεκριμένη εφαρμογή order = 3. Για το frame length, χρησιμοποιείται το πλήθος των μετρήσεων που παίρνουμε, για κάθε κύκλο του φαινομένου που μετράται. Συγκεκριμένα, ο ATI έχει συχνότητα δειγματοληψίας $f_s = 1.5kHz$, ενώ για τις σερβοβαλβίδες ξέρουμε ότι η περίοδος λειτουργίας τους είναι $T_v = 0.1s$ που σημαίνει $f_v = 1/\mathrm{T} = 10Hz$. Άρα, στη διάρκεια μιας περιόδου των thruster, παίρνουμε:

$$\mathrm{N} = \frac{f_s}{f_v} = \frac{1500Hz}{10Hz} = 150 \text{ μετρήσεις}$$

Επειδή, όμως πρέπει το frame length να είναι περιττός αριθμός, επιλέγεται framelen = 149.

Οι μέγιστες τιμές της δύναμης ώσης, με τα νέα ακροφύσια, όπως αναμενόταν, ήταν αρκετά αυξημένες με τη χρήση των φιαλών διοξειδίου του άνθρακα. Με την ελάχιστη αντίσταση στον στραγγαλιστή, δηλαδή με τον κοχλία πλήρως ανοιχτό, οι δυνάμεις ώσης ήταν μεγαλύτερες από 0.5N για τους προωθητήρες, όταν δούλευαν μεμονωμένα. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα του Σχήματος 4.17, το πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι αυτές οι τιμές μειώνονται αισθητά, όταν τίθενται σε λειτουργία, πάνω από ένας προωθητήρες ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα, για τον προωθητήρα 5, η τιμή της ώσης που βρίσκεται στα 0.5N όταν δεν είναι ενεργοποιημένη καμία άλλη σερβοβαλβίδα, φτάνει σχεδόν τα 0.3N όταν ταυτόχρονα λειτουργούν ο προωθητήρας 1 από το πρώτο ζευγάρι προωθητήρων και ο προωθητήρας 4 από το δεύτερο. Πρέπει να αναφερθεί ότι όλες οι μετρήσεις που παρουσιάζονται από δω και στο εξής για τους προωθητήρες και έχουν προκύψει από τη χρήση του ATI, είναι επεξεργασμένες με χρήση του φίλτρου Savitzky-Golay.

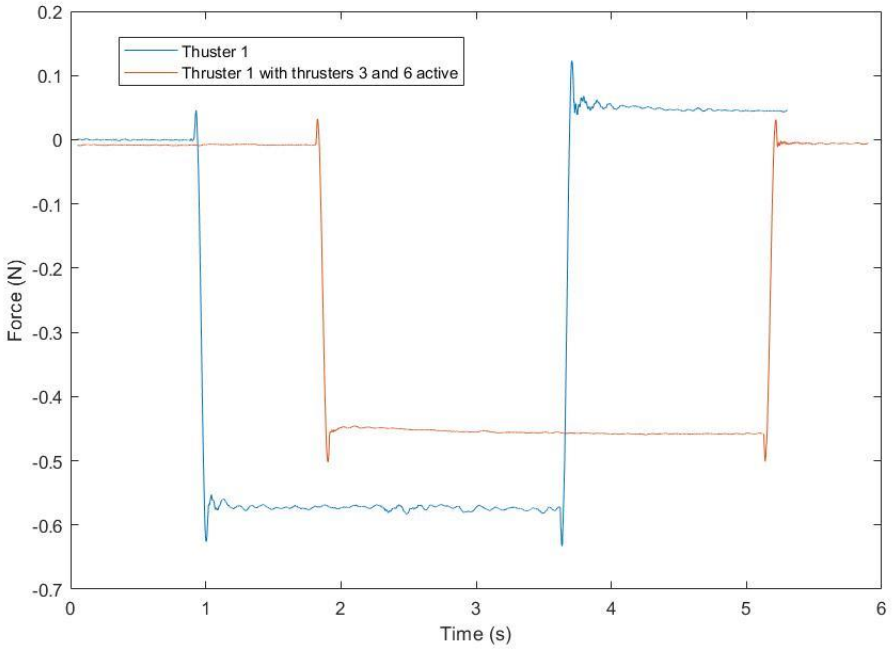
Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, έπρεπε στο δεύτερο στάδιο των μετρήσεων, να βρεθεί η βέλτιστη αντίσταση των στραγγαλιστών ώστε οι τιμές των δυνάμεων ώσης από τους προωθητήρες να παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Ακολουθήθηκε μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί μια τιμή, που δεν θα οδηγούσε τελικά σε πολύ μικρές τιμές ώσης, κάτι το οποίο θα περιόριζε αρκετά το εύρος των δυνατών επιταχύνσεων του ρομπότ στην τράπεζα του γρανίτη. Ουσιαστικά κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ο κοχλίας έσφιγγε σταδιακά και μείωνε την παροχή που μπορούσε να περάσει από κάθε ακροφύσιο. Στην πρώτη δοκιμή που παρουσιάζεται εδώ, οι στροφές του κοχλία είναι n=7, που σημαίνει, σύμφωνα με το διάγραμμα της FESTO (Σχ. 4.12), ότι η παροχή που περνάει από κάθε προωθητήρα είναι περίπου Q=120L/min.



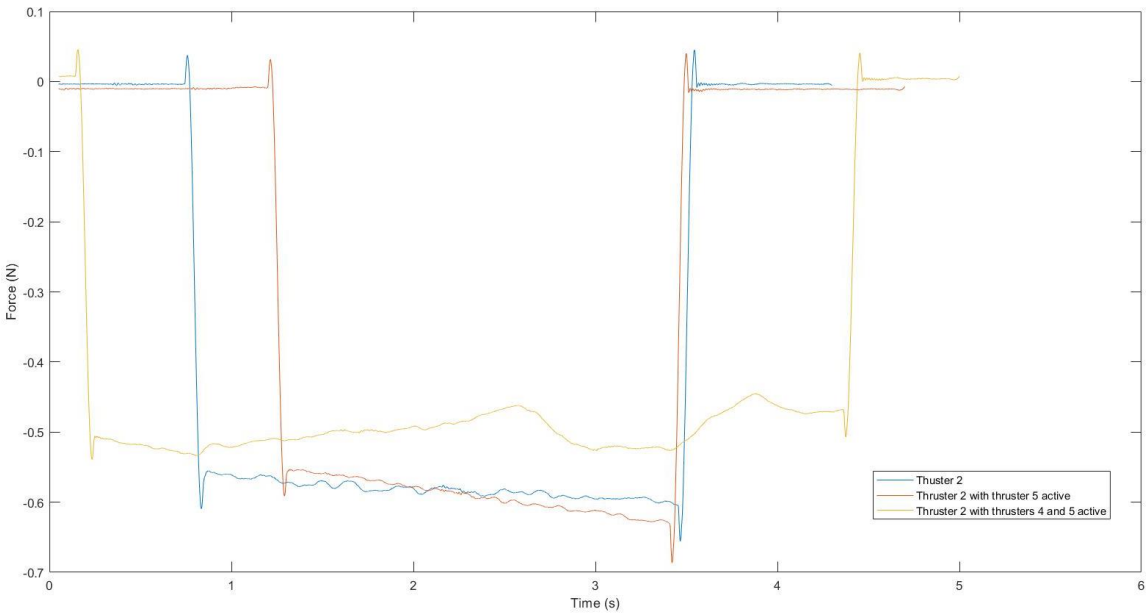
Σχήμα 4.17. Διαγράμματα ώσης του προωθητήρα 5, όταν λειτουργεί ταυτόχρονα με άλλους έναν ή δύο προωθητήρες, με χρήση του φίλτρου Savitzky-Golay.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για n=7 στροφές του κοχλία, παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.18 και 4.19. Παρατηρείται, ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι αρκετά

καλύτερα, δηλαδή ακόμα και για δύο ενεργούς προωθητήρες οι τιμές της ώσης μεταβάλλονται ελάχιστα. Όμως, ακόμα φαίνεται ότι όταν ενεργοποιείται και τρίτος προωθητήρας, η τιμή της ώσης μειώνεται κατά 0.1N που είναι μια αρκετά μεγάλη μεταβολή δεδομένης της επιθυμητής εφαρμογής.



Σχήμα 4.18. Η ώση του προωθητήρα 1 για n=7 στροφές του κοχλία του στραγγαλιστή.



Σχήμα 4.19. Η ώση του προωθητήρα 2 για n=7 στροφές του κοχλία του στραγγαλιστή.

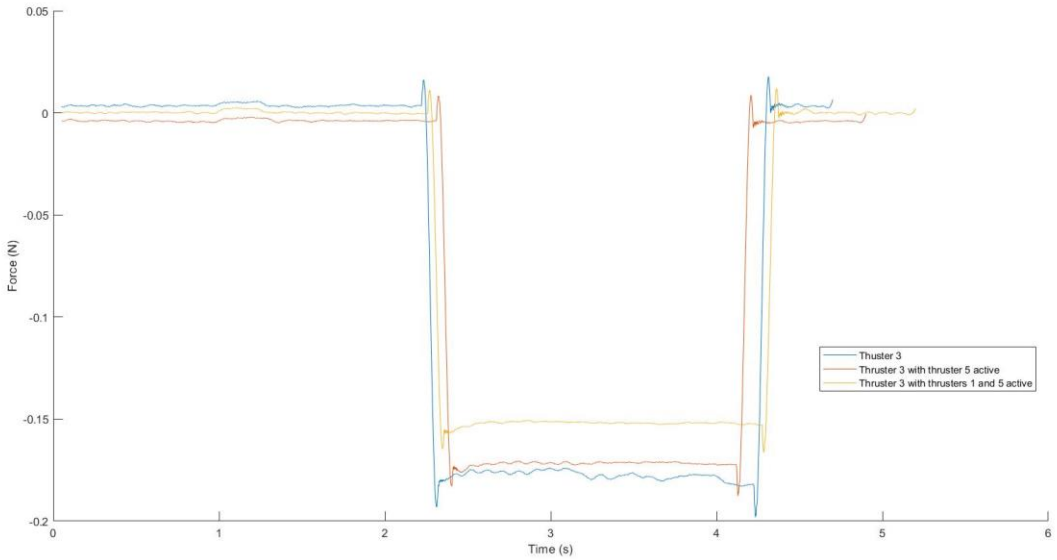
Η επόμενη δοκιμή η οποία παρουσιάζεται, ήταν αυτή για n=5 στροφές του κοχλία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ATI παρουσιάζονται παρακάτω και φαίνεται ότι παρά την

ταυτόχρονη χρήση περισσότερων του ενός προωθητήρων, οι δυνάμεις παραμένουν σχετικά σταθερές. Συγκεκριμένα, με την μείωση των στροφών του κοχλία και την αύξηση της αντίστασης στους στραγγαλιστές, αν και μειώνεται αισθητά πλέον η μέγιστη δύναμη στους προωθητήρες, οι διαφορές στις τιμές όταν λειτουργούν δύο προωθητήρες ταυτόχρονα είναι σχεδόν μηδενικές, ενώ με την ταυτόχρονη λειτουργία τριών προωθητήρων, οι διαφορές είναι της τάξης των 0.02N. Αυτή η διαφορά μπορεί σε έναν βαθμό να θεωρηθεί ικανοποιητική για να χρησιμοποιηθούν αυτές οι τιμές στην διαδικασία για τον σχεδιασμό τροχιάς του ρομπότ. Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται οι τιμές της ώσης για κάθε προωθητήρα σε συνθήκες που λειτουργεί μεμονωμένα, ή σε συνεργασία με άλλον έναν ή άλλους δύο.

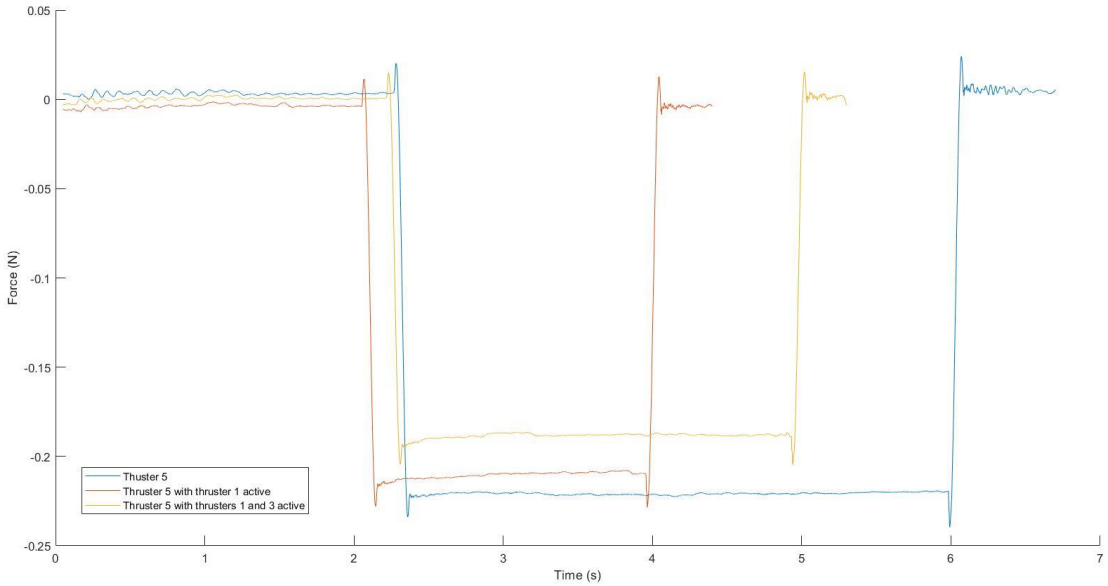
Πίνακας 4.2. Οι μέγιστες τιμές ώσης για κάθε προωθητήρα όταν λειτουργεί μεμονωμένα και ταυτόχρονα με έναν ή δύο ακόμα προωθητήρες, για το νέο πνευματικό σύστημα του ρομπότ, όταν n=5 στροφές.

Number of active thrusters	Thruster 1	Thruster 2	Thruster 3	Thruster 4	Thruster 5	Thruster 6
1	0,205N	0,218N	0,177N	0,190N	0,211N	0,202N
2	0,191N	0,196N	0,171N	0,182N	0,203N	0,175N
3	0,178N	0,186N	0,152N	0,164N	0,188N	0,165N

Πρέπει να αναφερθεί, ότι η δυνάμεις αυτές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό κι από παράγοντες που είναι δύσκολο να ελεγχθούν, όπως είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και της μπουκάλας, η πίεση στις φιάλες του αερίου και η ποσότητα διοξειδίου που έχει κάθε στιγμή η μπουκάλα. Έτσι, είναι φανερό ότι θα υπάρχουν μικρές μεταβολές κάθε φορά που χρησιμοποιούνται οι προωθητήρες και δεν είναι δυνατό να επιτυγχάνονται με ακρίβεια οι τιμές της ώσης. Για τα πειράματα αποφασίζεται να χρησιμοποιηθεί η τιμή της ώσης για δύο ενεργούς προωθητήρες, καθώς αποτελεί κατά κάποιον τρόπο μια μέση τιμή και αποτελεί την πιο συνήθη κατάσταση κατά την κίνηση του ρομπότ. Στα Σχήματα 4.20 και 4.21 φαίνονται τα διαγράμματα από τον ATI για τους προωθητήρες 3 και 5, για n=5 στροφές κοχλία.



Σχήμα 4.20. Οι δυνάμεις ώσης για τον προωθητήρα 3, σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας για n=5 στροφές κοχλία και για 100% duty cycle.



Σχήμα 4.21. Οι δυνάμεις ώσης για τον προωθητήρα 5, σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας για n=5 στροφές κοχλία και για 100% duty cycle.

Από το διάγραμμα της FESTO, για n=5 στροφές κοχλία, δίνεται ότι η παροχή που περνάει από κάθε προωθητήρα είναι περίπου Q=50L/min.

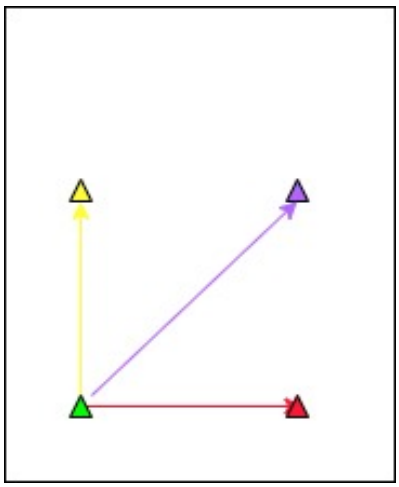
4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Έχοντας τελειώσει όλη τη διαδικασία που αφορά στη ρύθμιση των προωθητήρων αλλά και στην βελτιστοποίηση της κίνησης της βάσης του ρομπότ, πρέπει να ελεγχθεί κατά πόσο αυτή η διαδικασία τελικά μείωσε την κατανάλωση του καυσίμου, σε σημείο που η όλη διαδικασία να έχει νόημα. Για να ελεγχθεί αυτό, γνωρίζοντας πλέον τις δυνάμεις που δίνει κάθε προωθητήρας και την παροχή που περνάει από αυτούς, λόγω του διαγράμματος της FESTO, υπολογίζεται η συνολική παροχή αερίου που χρειάζεται για την εκτέλεση διάφορων κινήσεων.

Παρακάτω, θα παρουσιαστεί η κατανάλωση καυσίμου για 3 διαφορετικές, απλές κινήσεις και για 3 σενάρια κίνησης. Η πρώτη κίνηση που ελέγχεται, είναι μια ευθύγραμμη κίνηση κατά την οποία η σχετική γωνία του ρομπότ είναι 0 μοίρες, δηλαδή μια κίνηση κατά μήκος του άξονα x της τράπεζας. Η δεύτερη κίνηση είναι ευθύγραμμη με το ρομπότ να έχει γωνία στις 90 μοίρες κι επομένως ορίζεται μια κίνηση παράλληλη στον άξονα y της τράπεζας. Τέλος, για πληρότητα, εξετάζεται μια κίνηση 45 μοιρών δηλαδή επιλέγεται το τελικό σημείο του ρομπότ να είναι 1 μέτρο στο x και 1 μέτρο στο y. Στο Σχήμα 4.22 φαίνεται με πράσινο η αρχική θέση και προσανατολισμός του ρομπότ, ενώ με κίτρινο η τελική θέση και προσανατολισμός για την πρώτη κίνηση, με κόκκινο για τη δεύτερη και με μωβ για την τρίτη. Η κίνηση κάθε φορά ακολουθούσε ένα τριγωνικό προφίλ ταχύτητας, ενώ η συνολική διάρκεια της κίνησης επιλέχθηκε να είναι 20s.

Το πρώτο σενάριο κίνησης, επιλέχθηκε να είναι η κίνηση του ρομπότ με τη χρήση της μεθόδου SIMPLEX και με την ταυτόχρονη λειτουργία των thrusters και του reaction wheel. Το δεύτερο σενάριο αφορούσε την κίνηση του ρομπότ με τη χρήση της μεθόδου SIMPLEX, αλλά χωρίς την ύπαρξη σφονδύλου αντίδρασης. Το τρίτο σενάριο, ουσιαστικά ήταν αυτό που χρησιμοποιούσε το ρομπότ μέχρι τώρα, δηλαδή στροφή του ρομπότ με χρήση του

reaction wheel σε τέτοια γωνία ώστε ο προσανατολισμός του ρομπότ να είναι στις 0 μοίρες ως προς την επιθυμητή θέση, κίνηση μόνο με χρήση των δύο μπροστινών thrusters μέχρι την επιθυμητή θέση και ξανά στροφή του ρομπότ με χρήση του reaction wheel στην επιθυμητή τελική πόζα. Πρέπει να αναφερθεί, ότι στον συνολικό χρόνο κίνησης για το τρίτο σενάριο, συνυπολογίζεται ο χρόνος που χρειάζεται το ρομπότ για να πάρει τον επιθυμητό προσανατολισμό.



Σχήμα 4.22. Οι διάφορες κινήσεις της βάσης που ελέγχθηκαν ως προς την κατανάλωση καυσίμου.

Αρχικά, για να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης, πρέπει να υπολογιστούν οι καταναλώσεις των προωθητήρων και η χωρητικότητα της μπουκάλας. Για να γίνει αυτό, πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι το αέριο CO_2, αποθηκεύεται σε πίεση 50bar. Ο όγκος κάθε μπουκάλας είναι ίσος με 20oz, δηλαδή περίπου 600mL, ενώ από τις μετρήσεις που γίνονται κάθε φορά πριν και μετά το γέμισμα, γνωρίζουμε ότι η μάζα του αερίου με την οποία τροφοδοτείται είναι 800g. Η πυκνότητα του CO_2 σε συνθήκες 1bar και 20°C, είναι ρ=1.977g/L, ενώ βάσει των παραπάνω μεγεθών, στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στις οποίες αποθηκεύεται, είναι περίπου ρ_{50bar}=1333g/L. Γνωρίζουμε από το διάγραμμα της FESTO, όπως αναλύεται στην Ενότητα 4.4, ότι η παροχή που περνάει από τους στραγγαλιστές, είναι 50L/min, σε κανονικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι η παροχή μάζας είναι:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q = 98.85 g / \min = 1.6475 g / s \qquad (4\text{-}25)$$

Η παροχή μάζας από τους στραγγαλιστές, θα διατηρείται σταθερή και για τις συνθήκες στις οποίες αποθηκεύεται το αέριο στις μπουκάλες, και η παροχή όγκου στις συνθήκες αυτές, υπολογίζεται ως:

$$\rho \cdot Q = \rho_{50bar} \cdot Q_{50bar} \Rightarrow Q_{50bar} = 0.074 L / \min \qquad (4\text{-}26)$$

Έτσι, μπορούμε να υπολογίζουμε κάθε φορά την κατανάλωση αερίου σε g ή σε mL και να έχουμε έναν δείκτη για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Όσον αφορά την πρώτη κίνηση, δηλαδή την ευθύγραμμη κίνηση στις 0°, το αποτέλεσμα της SIMPLEX είναι η χρήση μόνο δύο προωθητήρων για τη φάση την επιτάχυνσης και των αντίθετών τους για την επιβράδυνση. Προφανώς, αυτό το αποτέλεσμα είναι λογικό, ενώ ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει και για τα άλλα δύο σενάρια. Έτσι, όπως είναι αναμενόμενο, για απλές ευθύγραμμες κινήσεις κατά τον προσανατολισμό του ρομπότ, η χρήση της μεθόδου SIMPLEX δεν οδηγεί σε μειωμένη κατανάλωση σε σχέση με άλλες

μεθόδους path planning. Η κατανάλωση καυσίμου για αυτήν την κίνηση είναι V_{fuel}=29.9mL ή m_{fuel}=39.9g.

Για τη δεύτερη κίνηση, το αποτέλεσμα της μεθόδου SIMPLEX είναι η χρήση μόνο ενός προωθητήρα και του σφονδύλου αντίδρασης, ώστε να μηδενιστούν οι ροπές και να διατηρείται ο προσανατολισμός του ρομπότ σταθερός, τόσο για το κομμάτι της κίνησης στο οποίο η βάση του ρομπότ επιταχύνεται, όσο και στο κομμάτι που επιβραδύνεται. Η κατανάλωση για την συγκεκριμένη κίνηση με τη χρήση της μεθόδου SIMPLEX είναι V_{fuel}=21.0mL ή m_{fuel}=28.0g. Περνώντας στο δεύτερο σενάριο, εξετάζεται το αποτέλεσμα της μεθόδου SIMPLEX, αν σε αυτή δεν χρησιμοποιηθεί ο σφόνδυλος αντίδρασης. Σε αυτή την περίπτωση, η κίνηση πραγματοποιείται με τη χρήση ενός προωθητήρα από κάθε ζευγάρι για να πραγματοποιηθεί η κίνηση του ρομπότ. Η συνολική κατανάλωση που προκύπτει είναι V_{fuel}=26.9mL ή m_{fuel}=36.0g. Είναι, επομένως, εμφανής η ανάγκη της χρήσης του reaction wheel σε εφαρμογές που είναι σημαντική η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου. Όσον αφορά το τρίτο σενάριο, υπολογίζεται ότι η περιστροφή του ρομπότ από τις 0 στις 90 μοίρες θα διαρκέσει 2.5s (και αντίστοιχα 2.5s για να ξαναγυρίσει στις 0 μοίρες κατά το πέρας της μεταφορικής κίνησης). Έτσι, απομένουν 15s για να μεταφερθεί το ρομπότ στην τελική του θέση. Συνυπολογίζοντας τις καταναλώσεις για τις τρείς φάσης της κίνησης, αφού τα thruster χρησιμοποιούνται και για την περιστροφή, προκύπτει ότι η τελική κατανάλωση είναι V_{fuel}=37.1mL ή m_{fuel}=49.5g.

Για την τρίτη κίνηση που εξετάζεται, η οποία αποτελεί πιο σύνθετη κίνηση από τις δύο προηγούμενες, το αποτέλεσμα της SIMPLEX, απαιτεί χρήση ταυτόχρονα τριών προωθητήρων, αλλά και του σφονδύλου. Η κατανάλωση αερίου που προκύπτει από αυτό το αποτέλεσμα είναι V_{fuel}=30.9mL ή m_{fuel}=41.3g. Αντίστοιχα, για το δεύτερο σενάριο κίνησης, χρησιμοποιούνται μόνο οι προωθητήρες, οι οποίοι καλούνται να αντισταθμίσουν και την έλλειψη του σφονδύλου αντίδρασης. Η κατανάλωση στην περίπτωση αυτή είναι V_{fuel}=36.2mL ή m_{fuel}=48.4g. Φτάνοντας στο τρίτο σενάριο, με την περιστροφή του ρομπότ (αυτή τη φορά θέλουμε να έχει γωνία 45 μοιρών με την αρχική) να διαρκεί για 1.5s και την μεταφορική για 17s, η ολική κατανάλωση της κίνησης είναι τελικά V_{fuel}=47.6mL ή m_{fuel}=63.7g.

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα για κάθε κίνηση που εξετάζεται, ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη μέθοδο.

Πίνακας 4.3. Οι καταναλώσεις για τις 3 βασικές κινήσεις που εξετάζονται βάσει όλων των σεναρίων κίνησης

	Movement #1	Movement #2	Movement #3
SIMPLEX	V=22.4mL m=29.9g	V=21.0mL m=28.0g	V=30.9mL m=41,3g
SIMPLEX no RW	V=22.4mL m=29.9g	V=26.9mL m=36.0g	V=36.2mL m=48.4g
Path Planning	V=22.4mL m=29.9g	Rotation(2.5s): V=3.6mL Translation (15s): V=29.9mL Total: V=37.1mL Rotation(2.5s): m=4.8g Translation (15s): m=39.9g Total: m=49.5g	Rotation(1.5s): V=4.7mL Translation (17s): V=38.2mL Total: V=47.6mL Rotation(1.5s): m=6.3g Translation (17s): m=51.1g Total: m=63.7g

4.7 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, εξάγονται διάφορα συμπεράσματα για την κίνηση του ρομπότ πάνω στην τράπεζα του διαστημικού εξομοιωτή. Η σύγκριση έγινε για κινήσεις στις οποίες το ρομπότ έπρεπε να κάνει καθορισμένες κινήσεις, με διαφορετικές μεθόδους σχεδιασμού τροχιάς. Για κάθε μέθοδο απαιτούνταν η ίδια μετατόπιση και ο ίδιος χρόνος περάτωσης της κίνησης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, φαίνεται ότι ακόμα και για τις απλές κινήσεις που εξετάστηκαν η μείωση της κατανάλωσης αερίου είναι αισθητά μικρότερη όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος SIMPLEX, σε σχέση με την απλή μέθοδο για τον σχεδιασμό τροχιάς που χρησιμοποιούνταν στο ρομπότ. Ειδικότερα, για ευθύγραμμες κινήσεις μικρής διάρκειας οι αύξηση της ποσότητας αερίου είναι της τάξης του 50%, γεγονός που σημαίνει ότι σε μεγαλύτερες διαδρομές ή σε πιο πολύπλοκες τροχιές, η χρήση της μεθόδου SIMPLEX θα μείωνε κατά πολύ τις ανάγκες σε καύσιμο.

Ακόμα, με τα παραπάνω παραδείγματα, φαίνεται η ανάγκη της χρήσης του σφονδύλου αντίδρασης. Στις εξεταζόμενες κινήσεις, παρότι οι απαιτούμενες ροπές δεν είναι τόσο μεγάλες, αφού δεν υπάρχουν αλλαγές στον προσανατολισμό του ρομπότ, βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα που αφορούν την κατανάλωση καυσίμου διαφέρουν αρκετά όταν χρησιμοποιείται ο σφόνδυλος για να αντισταθμίσει τις ροπές που προκύπτουν από τη χρήση των προωθητήρων.

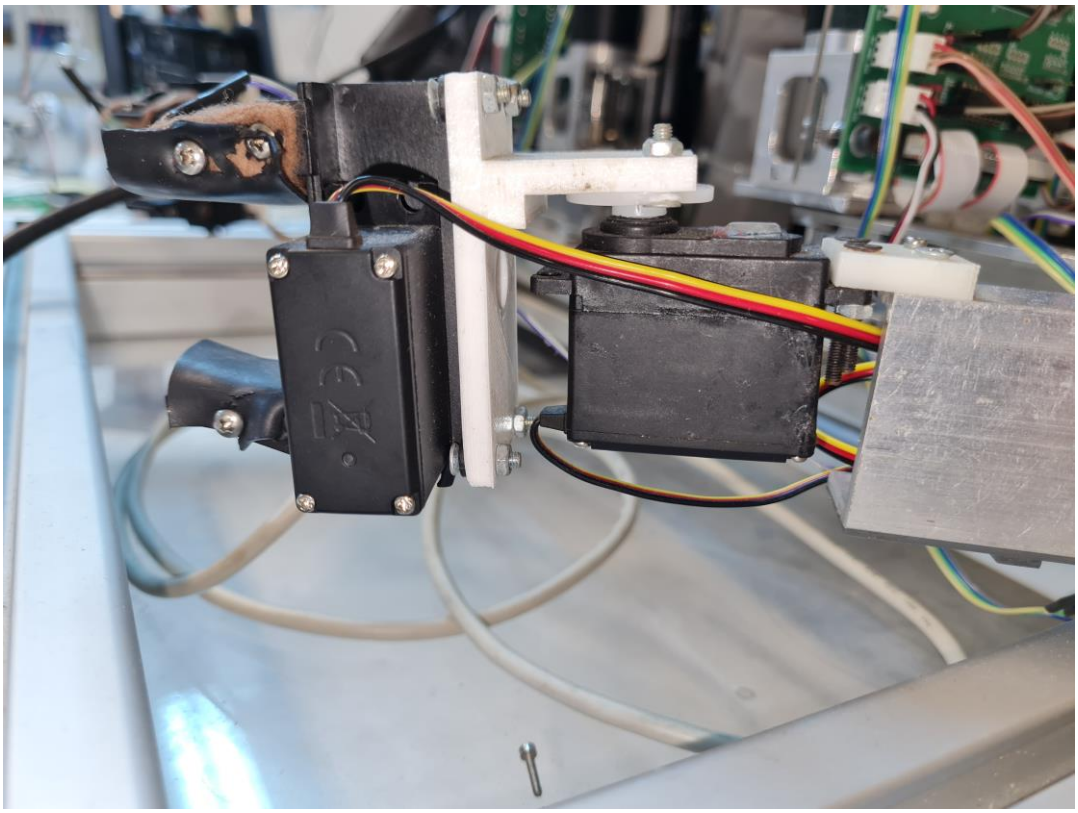
Τέλος, οι κινήσεις αυτές θα πρέπει να εφαρμοστούν σε πειράματα στο ρομπότ, ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία ενός απλού συστήματος ελέγχου ανοιχτού βρόχου, σε ένα πολύπλοκο σύστημα, όπως είναι το ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή. Με τη διαδικασία αυτή, θα εξακριβωθούν τυχόν προβλήματα, ενώ θα ελεγχθούν τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και αφορούν τις δυνάμεις ώσης, την γεωμετρία και τη δυναμική του ρομπότ.

5 Έλεγχος Βραχιόνων

5.1 Αρπάγες με έλεγχο δύναμης

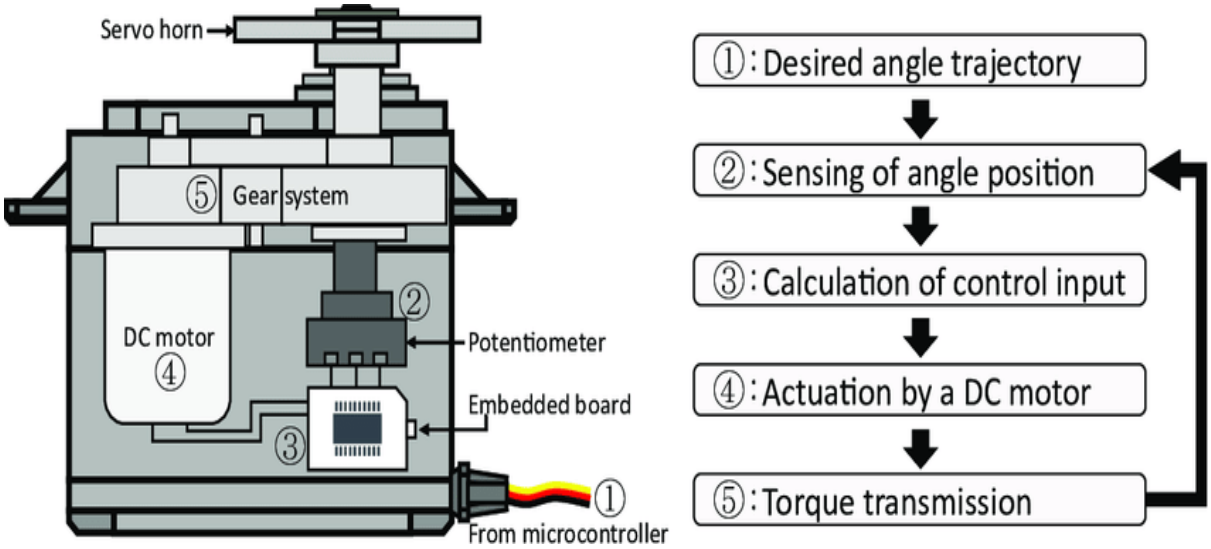
Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθούν τα ηλεκτρομηχανικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στους βραχίονες του ρομπότ και προστέθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή θα γίνει μια αναφορά στους κινητήρες servo, που αποτελούν τον μηχανισμό κίνησης των gripper, τους αισθητήρες δύναμης, που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των δακτύλων στις αρπάγες και στους αισθητήρες Hall, που χρησιμοποιήθηκαν για την αρχικοποίηση των μελών του βραχίονα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ρομπότ φέρει στη βάση του δύο βραχίονες οι οποίοι του επιτρέπουν να εκτελεί εργασίες πάνω στην τράπεζα του γρανίτη, όπως είναι η αρπαγή αντικειμένων ή η συνεργασία του με άλλα ενεργητικά ρομπότ. Ο κάθε βραχίονας στην μορφή που βρισκόταν το ρομπότ κατά την αρχή της παρούσας εργασίας, αποτελούνταν από δύο απλά μέλη, χωρίς την ύπαρξη αρπάγης, γεγονός που προφανώς έδινε στους βραχίονες πολύ περιορισμένες δυνατότητες. Έπρεπε, λοιπόν, να προστεθούν και οι grippers στα άκρα τους, ούτως ώστε το ρομπότ να μπορεί πλέον να εκτελεί πιο σύνθετες κινήσεις που σχετίζονται με την αλληλεπίδρασή του με άλλα ρομπότ στον διαστημικό εξομοιωτή. Οι grippers (Σχ. 5.1) αποτελούνται από 2 σερβοκινητήρες, από έναν ο οποίος αποτελεί την άρθρωση του καρπού και από έναν ο οποίος χρησιμοποιείται για την κίνηση των δακτύλων, μέσω κατάλληλης διάταξης που μετατρέπει την περιστροφή του κινητήρα σε άνοιγμα και κλείσιμο των δακτύλων. Γενικά, πρόκειται για μια αρκετά απλή εφαρμογή και λόγω της χρήσης των servo δεν απαιτείται μεγάλη δυσκολία για τον έλεγχό τους.



Σχήμα 5.1. Οι grippers τοποθετημένοι στα άκρα των βραχιόνων του ρομπότ.

Αυτός ο τύπος κινητήρων έχει πολλές εφαρμογές στην ρομποτική, καθώς έχει μικρό μέγεθος όμως αρκετά μεγάλη ισχύ συγκριτικά με το μέγεθος τους. Οι σερβοκινητήρες αποτελούνται από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος, συνδεδεμένο σε κάποια μορφή encoder για τον έλεγχο της θέσης και της ταχύτητάς του και ένα πολύ ακριβές, μικρό σε διαστάσεις μειωτήρα. Η διάταξη ελέγχεται από ένα controller chip το οποίο παίρνει την ανάδραση για τη θέση και δίνει εντολή για την κίνηση του κινητήρα. Απαιτείται ένα σήμα PWM σαν είσοδος, δηλαδή ένας παλμός διαφορετικού πλάτους, το οποίο είναι εντολή θέσης και οδηγεί στον ακριβή έλεγχο της γωνίας του άξονα εξόδου του κινητήρα. Σε απλές εφαρμογές, όπως αυτή των grippers, όλα τα στοιχεία των σερβοκινητήρων, είναι κλεισμένα σε κάποιο κέλυφος και έτσι συνιστούν μια πολύ compact δομή, ενώ σαν αισθητήρας θέσης χρησιμοποιείται ένα ποτενσιόμετρο και ο κινητήρας είτε κινείται με μέγιστη ταχύτητα, είτε μένει σταθερός στη θέση που του έχει δοθεί σαν εντολή [9]



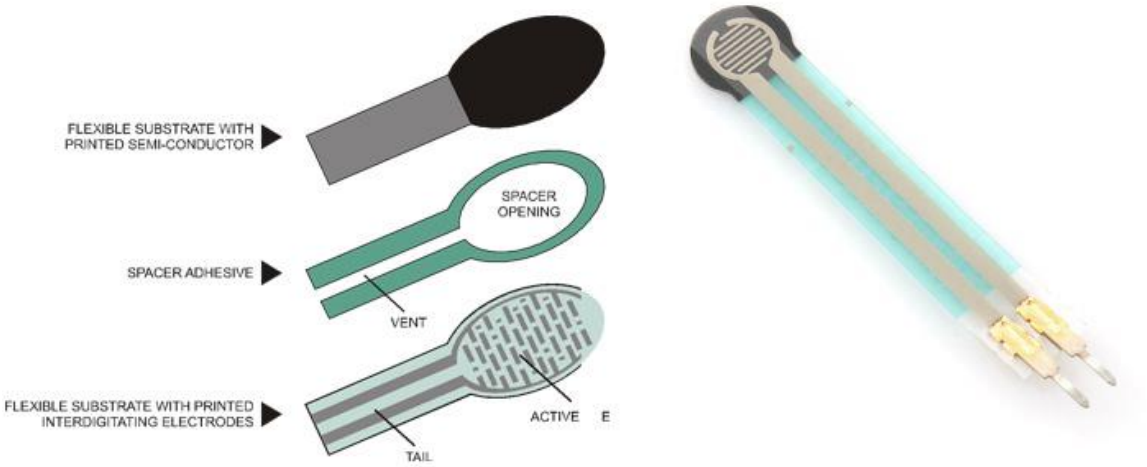
Σχήμα 5.2. Σχηματικό διάγραμμα ενός σερβοκινητήρα.

Για τη σύνδεση των σερβοκινητήρων χρησιμοποιούνται τρία καλώδια. Τα δύο είναι για να τροφοδοτήσουν τον κινητήρα και το λογικό κύκλωμα με 5V και το τρίτο είναι το καλώδιο που μεταφέρει την εντολή του σήματος από τον υπολογιστή. Οι σερβοκινητήρες που είναι τοποθετημένοι στους grippers είναι της εταιρείας HITEC μοντέλο HS422, που έχουν τη δυνατότητα περιστροφής 180°.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τους κινητήρες servo μπορούμε με έναν παλμό να καθορίσουμε με μεγάλη ακρίβεια τη θέση τους. Όμως, για την εφαρμογή τους στα δάχτυλα των grippers πρέπει να είναι σίγουρο, ότι ο gripper αφενός έχει πιάσει καλά το αντικείμενο που πρέπει και αφετέρου ότι δεν συνεχίζει να προσπαθεί να κλείσει, καθώς κάτι τέτοιο θα σήμαινε την ανάπτυξη μεγάλων ροπών που θα κατέστρεφαν τον κινητήρα. Για τον λόγο αυτό στα άκρα των δαχτύλων των αρπαγών τοποθετούνται αισθητήρες δύναμης FSR (Force Sensitive Resistor).

Ένας τέτοιος αισθητήρας αποτελείται από υλικά των οποίων η ηλεκτρική αντίσταση αλλάζει με γνωστό τρόπο, όταν ασκείται σε αυτά δύναμη ή πίεση. Είναι εν γένει απλοί αισθητήρες, χαμηλού κόστους και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές στις οποίες δεν απαιτείται υψηλή ακρίβεια. Αποτελούνται από δύο στρώσεις ανάμεσα στις οποίες βρίσκεται ένας διαχωριστής (spacer). Η πρώτη στρώση είναι ένας ημιαγωγός, ενώ η δεύτερη είναι ουσιαστικά η ενεργή περιοχή, δηλαδή ηλεκτρόδια σε συγκεκριμένη διάταξη. Η όλη διάταξη

είναι εύκαμπτη και όταν ασκηθεί πίεση στα ενεργά στοιχεία, αυτά ακουμπάνε στον ημιαγωγό με αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης. Η διάταξη καταλήγει σε δύο ακροδέκτες. Ο ένας μεταφέρει στον αισθητήρα την τάση αναφοράς (V_{REF}), που για τους αισθητήρες που χρησιμοποιούμε είναι 5V και ο άλλος μεταφέρει από τον αισθητήρα την τάση εξόδου, ως αναλογικό σήμα που προκύπτει από την άσκηση της δύναμης και άρα από την μεταβολή της εσωτερικής αντίστασης του αισθητήρα. Ο δεύτερος ακροδέκτης πρέπει να συνδεθεί και με τη γείωση μέσω μιας pull-down αντίστασης, που στην περίπτωση που εξετάζεται τώρα, επιλέχθηκε να είναι 1kΩ. Αυτό γίνεται ώστε το σήμα να διατηρείται σε κατάσταση LOW, όταν δεν ασκείται πίεση στην ενεργή περιοχή του αισθητήρα [12]



Σχήμα 5.3. (α) Οι στρώσεις διαφορετικών στοιχείων ενός FSR (β) Οι FSR που χρησιμοποιήθηκαν στις αρπάγες του ρομπότ.

Κατά τη χρήση των αισθητήρων FSR παρατηρήθηκε αρκετά μεγάλος θόρυβος στις μετρήσεις που δεν ευνοούσε την καλή λειτουργία των gripper. Για να μειωθεί αυτός ο θόρυβος πάνω και κάτω από τους αισθητήρες όπως τοποθετήθηκαν στα δάχτυλα, τοποθετήθηκαν δύο λεπτά φύλλα από ύφασμα και συγκεκριμένα τσόχα. Με μετρήσεις που πάρθηκαν πριν και μετά την προσθήκη αυτή, φαίνεται η μείωση του θορύβου να είναι μεγάλη και η ακρίβεια των μετρήσεων αρκούντως ικανοποιητική.

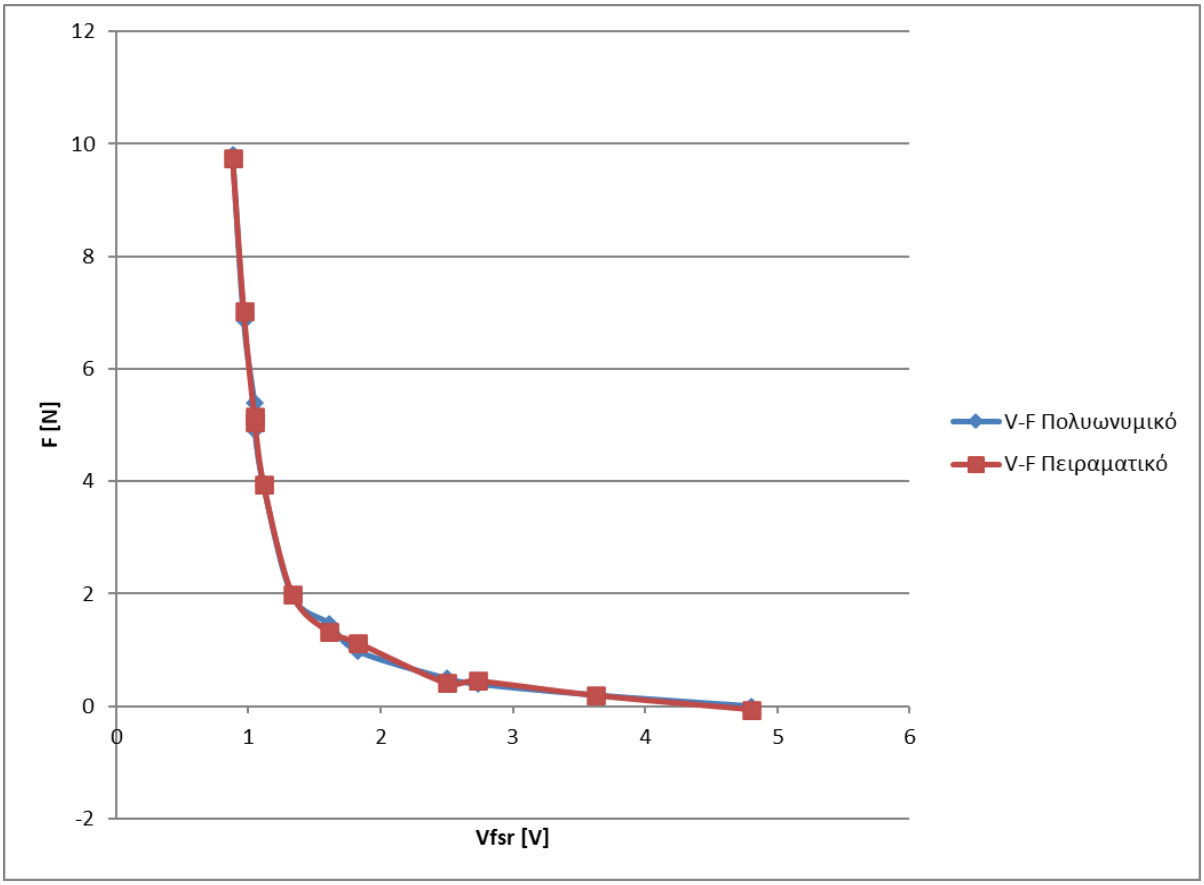
Η τάση εξόδου για τους FSR, διαβάζεται ως ένα αναλογικό σήμα που σημαίνει ότι όταν ο FSR συνδεθεί σε Arduino, που έχει έναν 10-bit ADC, επιστρέφει μια τιμή από 0 μέχρι 1023. Αυτό, πρακτικά ποσοτικοποιεί την δύναμη που ασκείται στον αισθητήρα, αλλά θα πρέπει να αντιστοιχηθεί σε κάποιο φυσικό μέγεθος με σωστό scaling, ώστε να έχει νόημα η χρήση του στην εφαρμογή που θέλουμε. Αρχικά, γνωρίζοντας ότι ο αισθητήρας λειτουργεί με μείωση της εσωτερικής του αντίστασης όταν ασκείται σε αυτόν δύναμη, με μια γραμμική σχέση, μπορούμε εύκολα να μετατρέψουμε την ψηφιακή τιμή του pin σε τάση στα άκρα του FSR. Γνωρίζουμε ότι όταν στον αισθητήρα δεν ασκείται δύναμη, η μέτρηση που παίρνουμε από το Arduino είναι 0 και η τάση στα άκρα του είναι 4.8V, ενώ όταν του ασκείται η μέγιστη δύναμη που αντέχει ο αισθητήρας, η μέτρηση είναι 1023 και η τάση στα άκρα του 0V. Έτσι, προκύπτει ότι βάσει της της ψηφιακής τιμής FSR_reading του Arduino, η τάση στα άκρα του αισθητήρα είναι:

$$V_{FSR} = 4.8\left(1 - \frac{FSR_reading}{1023}\right) \tag{5-1}$$

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν στην ενεργό περιοχή του αισθητήρα πρότυπα βάρη, ούτως ώστε, αφού μετρηθεί η τάση στα άκρα του, να μπορεί να εκφραστεί η δύναμη σαν συνάρτηση της τάσης. Τελικά, με παρεμβολή, προκύπτει η συνάρτηση:

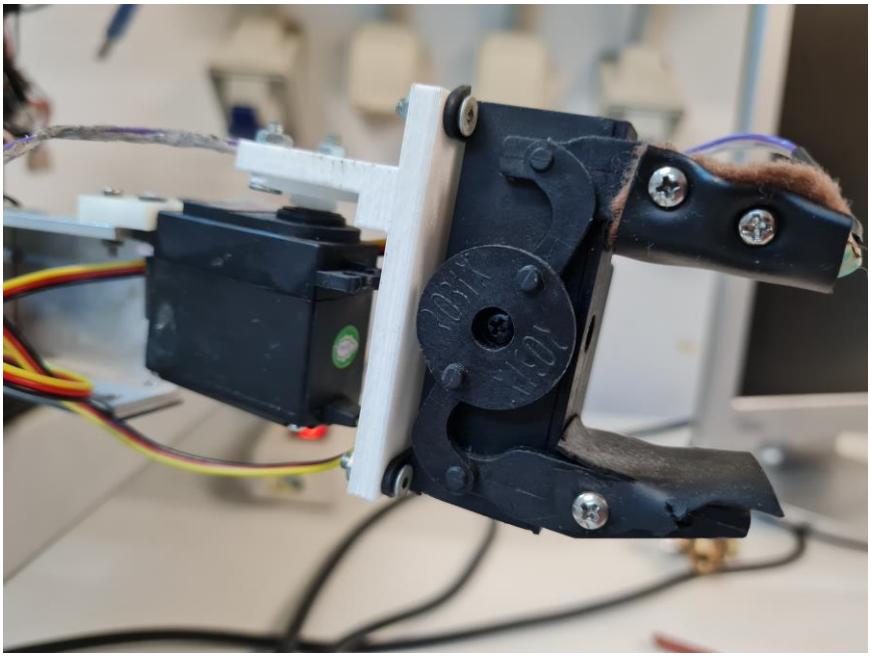
$$F_{FSR} = 0.6546 \cdot V_{FSR}^{6} - 10.7085 \cdot V_{FSR}^{5} + 70.2992 \cdot V_{FSR}^{4} - 237.4216 \cdot V_{FSR}^{3} + \\ + 436.2844 \cdot V_{FSR}^{2} - 415.8874 \cdot V_{FSR} + 162.9366 \quad (5\text{-}2)$$

Στο Σχήμα 5.4, φαίνεται η γραφική παράσταση του πολυωνύμου που προέκυψε από την παρεμβολή των σημείων και η καμπύλη των πειραματικών δεδομένων όπως προέκυψε με τη χρήση βαρών από 0.01kg έως 1kg. Παρατηρούμε ότι οι δύο καμπύλες ουσιαστικά ταυτίζονται οπότε η χρήση του πολυωνύμου για τον προσδιορισμό της δύναμης, δεδομένης της τάσης στα άκρα του αισθητήρα είναι αρκετά ακριβής.



Σχήμα 5.4. Τα δεδομένα για την τάση στα άκρα του FSR με την εφαρμογή πρότυπων βαρών.

Για την συγκράτηση αντικειμένων, δεν είναι αναγκαίο ο gripper να ασκεί πολύ μεγάλη δύναμη, αλλά πρέπει να είναι αρκετή, ώστε το αντικείμενο να μην γλιστρήσει από τα δάχτυλα. Θέλοντας να μειωθεί αρκετά η απαιτούμενη δύναμη, πάνω από την τσόχα που χρησιμοποιείται για τη μείωση του θορύβου στους FSR, τοποθετείται ένα κομμάτι ελαστικού, ώστε να αυξήσει την τριβή των δαχτύλων με το αντικείμενο (Σχ. 5.5). Βάσει προηγούμενων πειραμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί για τις ίδιες αρπάγες στο άλλο ενεργητικό ρομπότ του εργαστηρίου, επιλέγεται η μέγιστη δύναμη που θα επιτρέπουν οι αισθητήρες δύναμης κατά την σύσφιξη αντικειμένων στους grippers να είναι τα 3N. Επομένως, μόλις η μέτρηση στους FSR πιάσει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, η εντολή που δίνεται στους σερβοκινητήρες που ελέγχουν την κίνηση των δακτύλων, είναι να διατηρήσουν αυτή την εντολή γωνίας, μέχρι να τους δοθεί η εντολή για άνοιγμα.



Σχήμα 5.5. Οι αρπάγες με τους FSR, την τσόχα και το ελαστικό.

Καθώς στις κάρτες I/O του PC104 του ρομπότ δεν υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα pin για να δώσουν εντολή PWM στους κινητήρες, αφού από τα 8 κανάλια της DAC κάρτας, τα 6 χρησιμοποιούνται στις εντολές στα thrusters, αποφασίστηκε οι σερβοκινητήρες και οι αισθητήρες δύναμης να συνδεθούν σε ένα Arduino UNO και να ελέγχονται από αυτό μέσω του ROS. Οι σερβοκινητήρες συνδέονται σε PWM digital Output Pins του Arduino, ώστε να μπορούν να παίρνουν εντολή γωνίας και οι FSR στα Analog Input Pins, τα οποία μπορούν να διαβάσουν την αναλογική τιμή που δίνει ο αισθητήρας.

5.2 Έλεγχος Αρθρώσεων Βραχίονα

Η αρχική δουλειά που έγινε και αφορούσε στους βραχίονες, ήταν να μπορούν οι κινητήρες να ελεγχθούν από τον υπολογιστή του ρομπότ μέσω του ROS και κατά συνέπεια οι γωνίες των βραχιόνων.

Αρχικά η πληροφορία για την γωνία κάθε συνδέσμου δίνεται από τους encoders που βρίσκονται στους κινητήρες. Οι encoders αυτοί, διαβάζονται από τις Incremental Encoder Cards του PC104 στις οποίες το σήμα φτάνει περνώντας από πλακέτες I/O που υπάρχουν στα πλάγια του ρομπότ και σε αυτές συνδέονται οι encoders (από 2 για κάθε βραχίονα και 1 για τον κινητήρα του σφονδύλου αντίδρασης) και οι αισθητήρες τύπου Hall. Στις πλακέτες αυτές, έχουν τοποθετηθεί differential line receivers, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να μην χάνονται παλμοί λόγω του μήκους των καλωδίων και άλλων παρεμβολών.

Οι incremental encoders μετατρέπουν τη γωνιακή θέση του άξονα του κινητήρα σε σήμα το οποίο είναι ένας αριθμός παλμών ανά περιστροφή και κάθε encoder έχει συγκεκριμένη ανάλυση η οποία προκύπτει από τα χαρακτηριστικά του οπτικού δίσκου στο εσωτερικό του. Ένας Incremental Encoder, μπορεί να μετρήσει την αλλαγή στη θέση, αλλά όχι την απόλυτη θέση. Οι encoders που χρησιμοποιούνται στο ρομπότ είναι quadrature, που σημαίνει ότι έχουν δύο κανάλια A και B, τα οποία έχουν μεταξύ τους μια διαφορά φάσης και με τον τρόπο αυτό ένας Incremental Quadrature Encoder μπορεί να αναγνωρίζει εκτός από την γωνία και τη φορά της περιστροφής [6]

Οι differential line receivers που υπάρχουν στις πλακέτες του ρομπότ, χρησιμοποιούν το σήμα από τα κανάλια των encoder και το μετατρέπουν σε ένα TTL σήμα, το οποίο περνάει στη συνέχεια στις Incremental Encoder Cards του PC104.[5] Η κάθε κάρτα, έχει τρείς Incremental encoder up/down counters και τρείς timers/counters, γεγονός που σημαίνει ότι κάθε κάρτα μπορεί να διαχειριστεί έως τρεις διαφορετικούς encoders. Οι counters της κάρτας είναι 16-bit, οπότε η τιμή που μεταφράζεται το σήμα είναι raw byte data, δηλαδή μια τιμή από 0 έως 65535 (2^{16}=65536). Με κατάλληλες συναρτήσεις που έχουν γραφτεί η τιμή αυτή, βάσει της μείωσης του κινητήρα και της ανάλυσης των encoder, μετατρέπεται σε γωνία, ενώ γίνεται έλεγχος για overflow στις τιμές και κατάλληλη διαχείρισή του, όταν συμβαίνει. Το σήμα αυτό με χρήση των driver που δίνονται από την RTD αλλά και με κατάλληλες βιβλιοθήκες του ROS, περνά από την συνάρτηση *readEncoders()*, όπου ελέγχεται η λειτουργία των encoder, γίνεται publish στα κατάλληλα topic από όπου ελέγχεται κάθε στιγμή η γωνιακή θέση και υπολογίζεται με απλή αριθμητική παραγώγιση, η γωνιακή ταχύτητα του κάθε μέλους του βραχίονα.

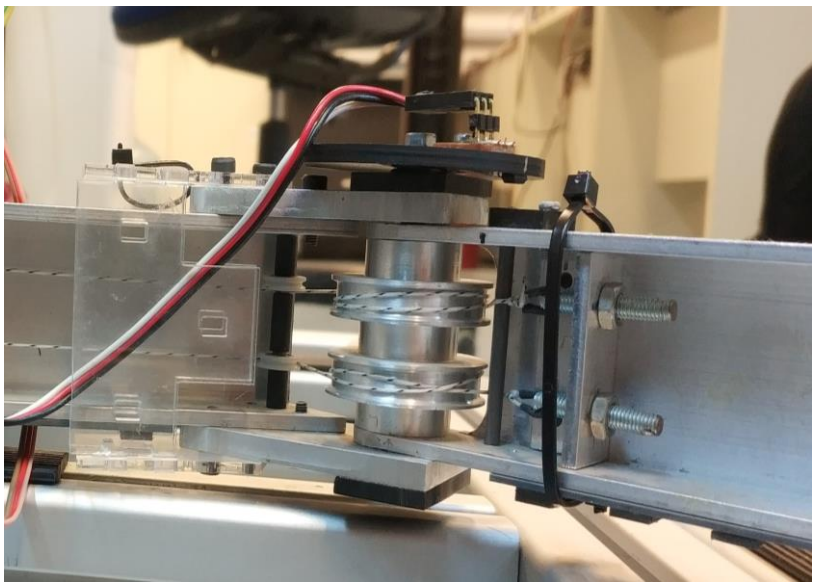
Ο έλεγχος στους βραχίονες γίνεται ουσιαστικά δίνοντας μια εντολή ροπής στον κάθε κινητήρα. Η εντολή αυτή δίνεται με την χρήση της συνάρτησης *writeMotors()*, η οποία περνάει μια τιμή, την τιμή της επιθυμητής ροπής, σε συγκεκριμένα pin στην κάρτα DAC του PC104, μέσω κατάλληλης βιβλιοθήκης της RTD, για τον αντίστοιχο κινητήρα. Η τιμή αυτή, μετατρέπεται σε εντολή ρεύματος, το οποίο δίνεται στους linear servoamplifiers του ρομπότ και η απαιτούμενη τάση εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του κινητήρα ώστε να κινηθεί. Η συνάρτηση *writeMotors()*, μπορεί να καλείται από κάποιον ros node, που ελέγχει την κίνηση των βραχιόνων και να αλλάζει είτε την ροπή ενός κινητήρα τη φορά είτε περισσότερων. Έτσι, με τη χρήση ενός απλού PD controller, γίνεται δυνατός ο καθορισμός της γωνίας του βραχίονα.

5.3 Αισθητήρες Hall

Οι αισθητήρες τύπου Hall, είναι οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ώστε το ρομπότ να μπορεί να κάνει σωστή αρχικοποίηση στους βραχίονες. Η λειτουργία των αισθητήρων τύπου Hall βασίζεται στην ικανότητα εκτίμησης του μεγέθους ενός μαγνητικού πεδίου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.6, ένας αισθητήρας Hall, αποτελείται ουσιαστικά από μια λεπτή μεταλλική επιφάνεια, η οποία έχει τρεις ακροδέκτες. Όταν εμφανίζεται κάποιο μαγνητικό πεδίο κοντά σε έναν τέτοιον αισθητήρα, αυτό απωθεί τα ηλεκτρόνια του μετάλλου στη μία άκρη του, με αποτέλεσμα να παράγεται μία τάση κατά μήκος της μικρότερης πλευράς της επιφάνειας. Ο ένας ακροδέκτης δέχεται την τάση τροφοδοσίας του αισθητήρα, ένας συνδέεται στην γείωση και ο τρίτος είναι αυτός που μας δίνει το σήμα το οποίο αφορά στην μεταβολή του μαγνητικού πεδίου. Ο ακροδέκτης του σήματος συνδέεται μέσω μιας pull-up αντίστασης μεγάλης ονομαστικής τιμής στην τάση τροφοδοσίας, ούτως ώστε η τιμή του σήματος που δίνει ο αισθητήρας, να είναι μηδενική όταν δεν υπάρχει καμία μεταβολή του μαγνητικού πεδίου [3] Οι Hall Sensors του ρομπότ, βρίσκονται τοποθετημένοι στις αρθρώσεις των βραχιόνων σε κατάλληλες θέσεις με σκοπό να είναι γνωστή η γωνία των μελών των βραχιόνων κατά την εκκίνηση του ρομπότ. Οι ακροδέκτες τους, συνδέονται στις πλακέτες που βρίσκονται δίπλα στους βραχίονες και από τις οποίες περνάνε και τα σήματα των encoders, ενώ το σήμα διαβάζεται από τις Incremental Encoder Cards του PC104 και αξιοποιείται με κατάλληλους ελέγχους, όπως παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

Σχήμα 5.6. Αισθητήρας Hall και οι ακροδέκτες του.

Εφόσον, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι encoders είναι incremental και δίνουν πληροφορία μόνο για την μεταβολή της γωνίας, πρέπει να υπάρχει ένα σημείο αναφοράς, που θα αποτελεί τη γωνία 0, ώστε να γίνεται γνωστή ανά πάσα στιγμή η γωνία των αρθρώσεων σε ένα απόλυτο σύστημα. Η αρχικοποίηση αυτή, γίνεται με την χρήση των Hall Sensors και την τοποθέτηση μαγνητών στα μέλη των βραχιόνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Το σήμα από τους αισθητήρες μεταφέρεται στις Incremental Encoder Cards του PC104 και κάθε φορά που ο μαγνήτης στο ένα άκρο της άρθρωσης, έρχεται σε επαφή με τον αισθητήρα στο άλλο άκρο, η τιμή ενός byte, που καθορίζεται από τις βιβλιοθήκες της RTD, αλλάζει.



Σχήμα 5.7. Αισθητήρας Hall τοποθετημένος στην elbow άρθρωση του βραχίονα.

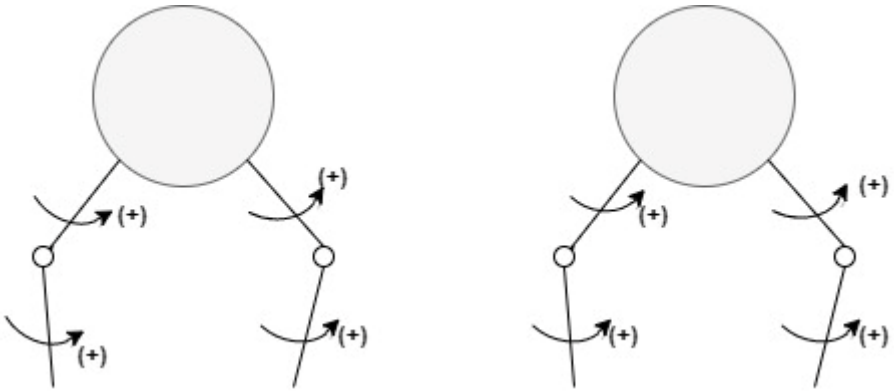
Ορίζοντας ως γωνία 0 τη γωνία κατά την οποία τα μέλη του βραχίονα είναι σε πλήρη έκταση, οι Hall sensors τοποθετούνται σε ακραίες θέσεις, δηλαδή σε σημεία στα οποία οι μηχανικοί περιορισμοί του συστήματος τερματίζουν την κίνηση της άρθρωσης και στη συνέχεια υπολογίζεται η γωνιακή διαφορά (offset) της θέσης αυτής από το 0. Η διαφορά

αυτή ορίζεται ως μια ROS parameter για κάθε άρθρωση στο launch file του ROS package *space_robot*. Οι θέσεις σε rad για κάθε hall sensor ως προς το 0, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1. Οι θέσεις στις οποίες αρχικοποιούνται οι αρθρώσεις του ρομπότ.

Άρθρωση	Offset position (rad)
left_shoulder_limit_pos	1.57079
right_shoulder_limit	-1.57079
left_elbow_limit_pos	-2.18166
right_elbow_limit_pos	2.18166

Ακόμα, υπολογίζονται με πειραματική διαδικασία οι ελάχιστες τιμές των ροπών, που υπερνικούν τη δύναμη της τριβής σε κάθε άρθρωση. Οι τιμές αυτές είναι σχετικά μικρές για τις αρθρώσεις shoulder καθώς ο κινητήρας βρίσκεται απευθείας στην άρθρωση, ενώ είναι αρκετά μεγαλύτερες για τις elbow αρθρώσεις, καθώς σε αυτές η ροπή μεταδίδεται μέσω του συστήματος μετάδοσης κίνησης. Οι τιμές αυτές μειώθηκαν εμφανώς, μετά την τοποθέτηση τεφλόν με ίνες γυαλιού, στις επιφάνειες που υπάρχει σχετική κίνηση ανάμεσα στα μεταλλικά στοιχεία των αρθρώσεων, με αποτέλεσμα τη μείωση της τριβής ολίσθησης. Τα πρόσημα που αφορούν τις γωνίες και τις ροπές για κάθε άρθρωση, εξηγούνται στο Σχήμα 5.8(α) και 5.8(β) αντίστοιχα.



Σχήμα 5.8. Οι θετικές φορές για: (α) τις γωνίες και (β) τις ροπές.

Έτσι, με τη χρήση απλών συναρτήσεων, γίνεται η αρχικοποίηση των γωνιών των βραχιόνων. Η πρώτη συνάρτηση είναι η *checkLimits*, η οποία ελέγχει τις τιμές των byte που αλλάζουν βάσει του σήματος από τον αισθητήρα Hall, στις Incremental Encoder Cards του PC104. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει μια Boolean τιμή, δηλαδή true όταν ο μαγνήτης έχει φτάσει στον hall sensor και false σε κάθε άλλη περίπτωση.

Οι άλλες συναρτήσεις, είναι οι *init_Left_Shoulder*, *init_Left_Elbow*, *init_Right_Shoulder* και *init_Right_Elbow*. Οι συναρτήσεις αυτές, όσο η *checkLimits* επιστρέφει false, δίνουν στην εκάστοτε άρθρωση μια εντολή ροπής, προς την ακραία θέση στην οποία βρίσκεται ο αισθητήρας Hall. Εφόσον ο αισθητήρας είναι σε σημείο στο οποίο η κίνηση περιορίζεται από μηχανικά στοπ, αρκεί η ροπή να δίνεται προς εκείνη την φορά (σύμφωνα με το Σχήμα 5.8). Μόλις ο μαγνήτης φτάσει στον αισθητήρα, η *checkLimits* επιστρέφει τιμή true και η ροπή που δίνεται στην άρθρωση μηδενίζεται, ενώ ως γωνία της άρθρωσης ορίζεται η γωνία που έχει υπολογιστεί.

Ο ROS node που είναι υπεύθυνος για την αρχικοποίηση των βραχιόνων και για τον υπολογισμό των γωνιών, είναι ο *hardware_interface*.

5.4 Επικοινωνία Arduino με ROS

Όπως αναφέρεται στην Ενότητα 5.2, για να καταλαβαίνουν οι σερβοκινητήρες των gripper και οι αισθητήρες FSR που τοποθετήθηκαν στις αρπάγες την δύναμη που ασκούν στα αντικείμενα, συνδέθηκαν στα κατάλληλα PWM και Analog Input pins ενός Arduino. Έτσι, αρχικά γράφτηκε ένα απλό πρόγραμμα στο Arduino με το οποίο, μπορούσε να προσδιοριστεί η γωνία του κάθε wrist joint, ενώ με την αλλαγή της τιμής μιας Boolean μεταβλητής για κάθε gripper, ξεκινούσε η διαδικασία κλεισίματος της αρπάγης. Στη διάρκεια αυτής, διαβάζονταν οι τιμές των FSR και βάσει της διαδικασίας calibration που είχε γίνει, μετατρέπονταν σε τιμές δύναμης, ενώ μόλις η τιμή αυτή έφτανε τα 3N, η αρπάγη σταματούσε την κίνησή της και παρέμενε σταθερή σε αυτή τη θέση, ασκώντας συνεχώς την ίδια δύναμη. Τέλος, ξανά με αλλαγή στην τιμή μια Boolean μεταβλητής, η αρπάγη άνοιγε πλήρως.

Καθώς αυτή η διαδικασία θα πρέπει να γίνεται όσο το ρομπότ εκτελεί πειράματα πάνω στην τράπεζα, θα πρέπει όλες οι απαραίτητες ενέργειες να ελέγχονται μέσω του ROS. Αυτό γίνεται με την χρήση του πακέτου rosserial, το οποίο πρακτικά αποτελεί έναν ROS wrapper, που ελέγχει τα μηνύματα που στέλνονται από και προς κάποια σειριακή θύρα. Ένας ROS wrapper ουσιαστικά βασίζεται πάνω σε κάποιον ήδη υπάρχοντα driver μιας συσκευής, ο οποίος δεν σχετίζεται με το ROS και δημιουργεί έναν δίαυλο επικοινωνίας χρησιμοποιώντας δομές του ROS πάνω στις βασικές λειτουργίες της. Το rosserial package χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο για να ελέγξει σειριακές θύρες ή network sockets και να στείλει ή να διαβάσει δεδομένα από topics χρησιμοποιώντας publishers και subscribers βασισμένους στη λειτουργία στη συσκευής. Η διαδικασία αυτή προφανώς εισάγει κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι σχετίζονται με τις δυνατότητες της σειριακής στο να μεταφέρει δεδομένα και με τις δυνατότητες της εκάστοτε συσκευής να επεξεργάζεται τα δεδομένα αυτά. Όσον αφορά την εφαρμογή που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, με την χρήση του rosserial ως wrapper για Arduino Uno, οι περιορισμοί που υπήρχαν ήταν ότι ο μέγιστος αριθμός των publishers ή subscribers που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ήταν 6 και ότι κάποιοι τύποι μηνυμάτων δεν υποστηρίζονται, όπως για παράδειγμα Float64. Όμως, επειδή η εφαρμογή για την οποία θα χρησιμοποιηθεί το πακέτο rosserial είναι αρκετά απλή, αυτοί οι περιορισμοί δεν μας επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό [1]

Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το rosserial, δημιουργούνται στο πρόγραμμα του Arduino οι κατάλληλοι publishers και subscribers και ορίζονται οι τύποι μηνυμάτων και οι συναρτήσεις που θα χρησιμοποιηθούν. Αρχικά, δημιουργούνται δύο publishers, οι *fsr_right_pub* και *fsr_left_pub* που χρησιμοποιούνται για τους FSR και κάνουν publish στα topics *fsr_right* και *fsr_left* αντίστοιχα, τις τιμές των δυνάμεων που μετράνε κάθε φορά οι FSR. Ακόμα, δημιουργούνται δύο subscribers, οι *sub_lw* και *sub_rw* και οι αντίστοιχες callback functions *left_wrist_cb* και *right_wrist_cb.* Οι subscribers κάνουν subscribe στα topic *left_wrist* και *right_wrist* αντίστοιχα, στα οποία δίνονται οι τιμές των γωνιών των wrist joints και μέσω των callback functions οι τιμές αυτές πηγαίνουν στο κατάλληλο pin του Arduino, ώστε να δοθούν οι επιθυμητές γωνίες στους servo των αρθρώσεων των gripper. Τέλος, δημιουργούνται με την ίδια λογική subscribers και callback functions που αλλάζουν την τιμή των μεταβλητών *grip_left* και *grip_right* από false σε true και αντίστροφα, ώστε να ξεκινήσει

στο πρόγραμμα του Arduino η διαδικασία αρπαγής αντικειμένου και ο έλεγχος της τιμής των FSR σε όποια από τις αρπάγες είναι εκείνη τη στιγμή ενεργή, ενώ με τον ίδιο τρόπο πραγματοποιείται και το άνοιγμα των δακτύλων. Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί, ότι οι παραπάνω διαδικασίες δεν απαιτούν απαραίτητα την χρήση subscriber για να πραγματοποιηθούν, αλλά θα ήταν πιο γρήγορο με την δημιουργία κατάλληλων ros services, που θα έδιναν απευθείας εντολή στους σερβοκινητήρες, χωρίς την διαμεσολάβηση των topics.

Για να μπορεί το πρόγραμμα του Arduino να χρησιμοποιηθεί από το πακέτο rosserial, πρέπει στην αρχή, να εισαχθούν οι κατάλληλες βιβλιοθήκες. Αυτές προφανώς αφορούν τις βιβλιοθήκες που θα χρησιμοποιούνταν έτσι κι αλλιώς για τους servo και το Arduino, αλλά τώρα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί παράλληλα η βιβλιοθήκη *ros.h,* και οι βιβλιοθήκες για τα ros messages όπως οι *std_msgs/UInt16.h.* Τέλος, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί η εντολή

```
initNode();
```

στην setup function του Arduino και να προσδιοριστεί το baud rate με τις εντολές

```
Serial.begin(57600);
nh.getHardware()->setBaud(57600);
```

Πρέπει οι τιμές των baud rate που ορίζονται σε αυτές τις εντολές, να είναι ίδιες, διαφορετικά δεν μπορεί να λειτουργήσει σωστά η επικοινωνία του ROS με τη σειριακή.

Τέλος, πρέπει στο launch file του ρομπότ, να καλείται το συγκεκριμένο node, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ROS wrapper. Σαν ROS parameters, πρέπει να οριστεί το baud rate, το οποίο πρέπει να είναι αυτό που έχει χρησιμοποιηθεί ήδη στο πρόγραμμα και η σειριακή θύρα στην οποία είναι συνδεδεμένο το Arduino, χρησιμοποιώντας το full path, πχ */dev/ttyACM0* [2]

5.5 Controller Βραχιόνων

Τέλος, για την ομαλή λειτουργία των βραχιόνων, χρησιμοποιήθηκε ένας απλός PD controller ώστε το τελικό σημείο δράσης να μεταφέρεται σε μια αρχική θέση (home position), η οποία θα βρίσκεται εντός του PIW του ρομπότ, χωρίς να παραμένουν τα μέλη του βραχίονα σε επαφή με τους αισθητήρες Hall. Επιλέχθηκε αυτή να είναι η θέση στην οποία η γωνία της πρώτης άρθρωσης θα είναι q_1=60˚ και η γωνία της δεύτερης άρθρωσης θα είναι q_2=30˚. Ο σχεδιασμός τροχιάς έγινε με κυβικά πολυώνυμα, για τα οποία δινόταν ο χρόνος κίνησης, ο οποίος αποφασίστηκε να είναι 12s, η αρχικές και τελικές θέσεις και μηδενική αρχική και τελική ταχύτητα [33] Έτσι είχαμε:

$$\begin{aligned} \theta(0) &= \theta_0 \\ \theta\left(t_f\right) &= \theta_f \\ \dot{\theta}(0) &= 0 \\ \dot{\theta}\left(t_f\right) &= 0 \end{aligned} \tag{5-3}$$

Εφόσον χρησιμοποιούνται κυβικά πολυώνυμα η επιθυμητή τροχιά είναι αυτή που παρουσιάζεται στις Εξισώσεις (5-4) και (5-5)

$$\theta(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 \tag{5-4}$$

$$\dot{\theta}(t) = \alpha_1 + 2\alpha_2 t + 3\alpha_3 t^2 \tag{5-5}$$

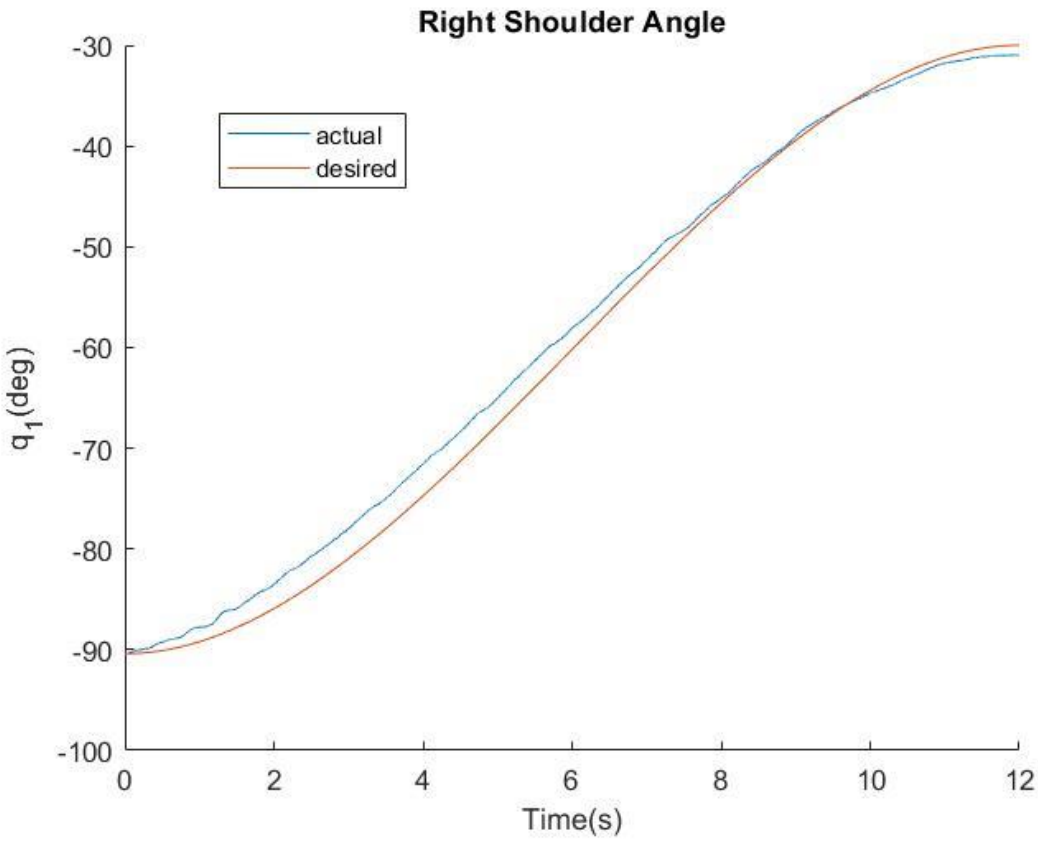
και με χρήση των οριακών συνθηκών προκύπτουν οι συντελεστές:

$$\alpha_0 = \theta_0$$
$$\alpha_1 = 0$$
$$\alpha_2 = \frac{3}{t_f^{\,2}}\left(\theta_f - \theta_0\right) \tag{5-6}$$
$$\alpha_3 = -\frac{2}{t_f^{\,3}}\left(\theta_f - \theta_0\right)$$

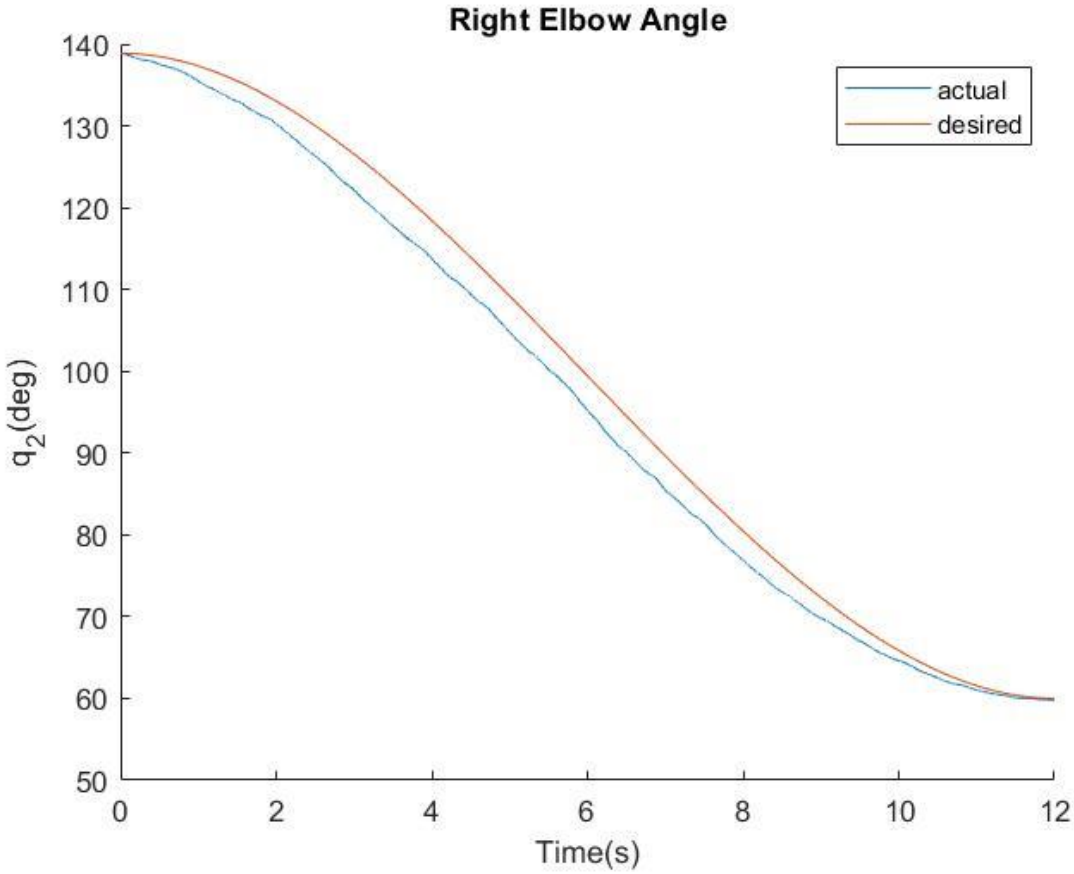
Όπως έχει αναφερθεί, η μετάδοση κίνησης στο δεύτερο μέλος του βραχίονα, γίνεται με τη χρήση μη εκτατού νήματος το οποίο είναι περασμένο σε τύμπανα και μεταφέρει τη ροπή από τον κινητήρα που είναι τοποθετημένος στο σώμα του ρομπότ στην άρθρωση. Λόγω αυτής της διαμόρφωσης και του φαινομένου της ολίσθησης που παρατηρείται, είναι αρκετά δύσκολο να χρησιμοποιηθούν κέρδη που προκύπτουν από τη θεωρία ελέγχου και το δυναμικό μοντέλο του ρομπότ. Για τον λόγο αυτό, τα κέρδη υπολογίστηκαν με μια διαδικασία trial and error. Τα K_P και K_D που επιλέχθηκαν για κάθε άρθρωση φαίνονται στον Πίνακα 5.2, ενώ στα Σχήματα 5.9-5.10 φαίνονται οι θέσεις των αρθρώσεων του ενός βραχίονα, σε σχέση με τις desired τιμές.

Πίνακας 5.2. Τα κέρδη που επιλέχθηκαν για τους ελεγκτές των αρθρώσεων.

	Shoulder	Elbow
K_P	20.0	22.0
K_D	0.8	1.4



Σχήμα 5.9. Η γωνία της πρώτης άρθρωσης κατά την μετάβαση σε home position.



Σχήμα 5.10. Η γωνία της δεύτερης άρθρωσης κατά την μετάβαση σε home position.

Παρατηρούμε ότι αν και το σφάλμα τελικής κατάστασης e_{ss}, είναι μηδενικό για την δεύτερη άρθρωση και πολύ μικρό (1˚) για την πρώτη, η τροχιά που ακολουθεί κάθε άρθρωση στην πραγματικότητα, απέχει σε ένα βαθμό από την επιθυμητή. Αυτό σημαίνει ότι τα κέρδη K_P και K_D που επιλέχθηκαν, μπορεί να οδηγούν σε πολύ μικρό σφάλμα στην τελική θέση, όμως θα έπρεπε να αυξηθεί το κέρδος K_P, ώστε ο ελεγκτής να μπορεί να παρακολουθεί καλύτερα το φαινόμενο και κατ' επέκταση θα γίνει αύξηση και στο κέρδος K_D. Με τον τρόπο αυτό, θα μπορεί να ακολουθείται χωρίς σφάλμα η επιθυμητή τροχιά.

6 Πειραματική Επιβεβαίωση

6.1 Πείραμα Βέλτιστης Κίνησης Βάσης του Ρομπότ

6.1.1 Το σύστημα PhaseSpace

Μετά τον προσδιορισμό των δυνάμεων ώσης που παράγονται από το νέο πνευματικό σύστημα του ρομπότ και τη διαδικασία ελαχιστοποίησης καυσίμου, όπως προκύπτει από τη μέθοδο SIMPLEX, έπρεπε να ελεγχθεί πειραματικά η ορθή κίνηση της βάσης στο συγκεκριμένο πλαίσιο. Η πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα στον διαστημικό εξομοιωτή του εργαστηρίου, με την χρήση των καμερών του συστήματος PhaseSpace για τον υπολογισμό της απόλυτης θέσης του ρομπότ, πάνω στην τράπεζα του γρανίτη. Συγκεκριμένα, το ρομπότ τοποθετήθηκε στην τράπεζα με σκοπό να πραγματοποιήσει τις τρεις κινήσεις, για τις οποίες υπολογίστηκε η κατανάλωση καυσίμου, εκτελώντας τις με χρήση της μεθόδου SIMPLEX. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το απόλυτο και το σχετικό σφάλμα τελικής θέσης και αξιολογήθηκε το αποτέλεσμα των πειραμάτων.

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, στην Ενότητα αυτή θα γίνει μια αναφορά στο σύστημα PhaseSpace και τη λειτουργία του. Όπως χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, το σύστημα αποτελείται από τα παρακάτω μέρη, συμπεριλαμβανομένων των καμερών στις οποίες έχει ήδη γίνει αναφορά.

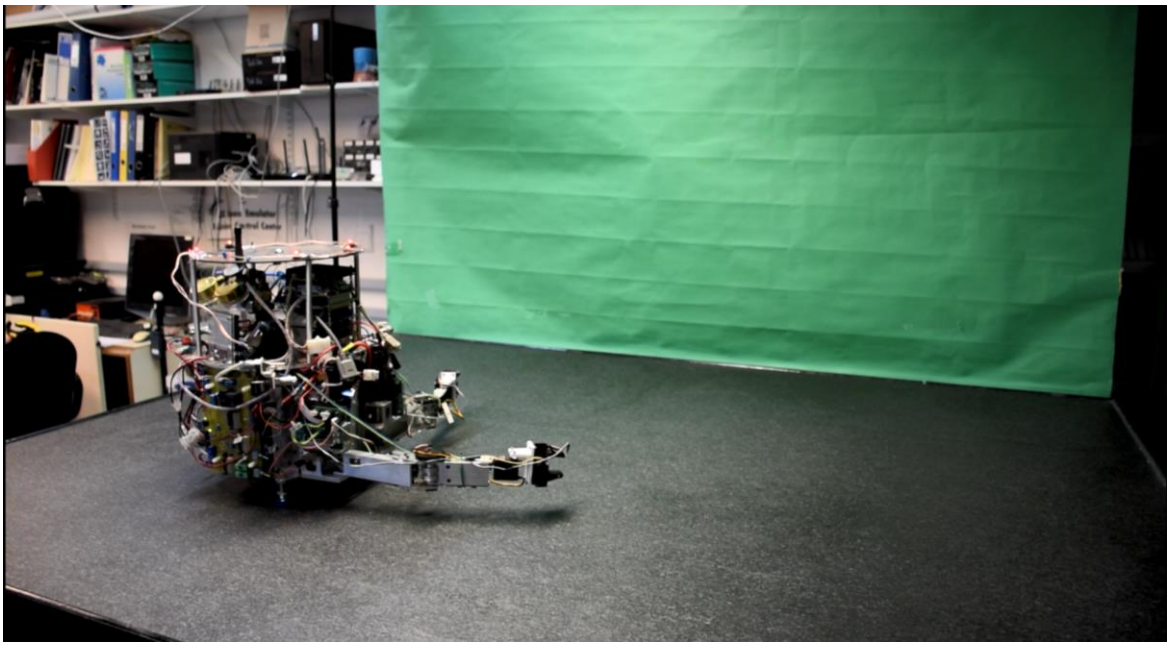
- Μια σειρά από 5 LED, σε καθορισμένες θέσεις στο πάνω μέρος του ρομπότ. Κάθε LED είναι σημασμένο με διαφορετικό γράμμα και δέχεται παλμούς διαφορετικής συχνότητας και ύψους με αποτέλεσμα να αναγνωρίζεται από τις κάμερες. Τονίζεται, ότι δεν γίνεται να υπάρχουν πάνω από ένα LED με το ίδιο γράμμα, όμως στην σειρά μπορούν να παραλείπονται γράμματα.
- Ένα base station unit, το οποίο καθορίζει τις συχνότητες με τις οποίες πάλλονται τα LED και στέλνει timing signals στη διάταξη.
- Τον LED driver που συνδέεται στη σειρά και τοποθετείται στο ρομπότ. Τροφοδοτεί τα LED με τάση και επικοινωνεί με RF με το base station.
- Το software με το οποίο το σύστημα Phase-Space επικοινωνεί με το ROS. Το software δεν τρέχει στο PC104 του ρομπότ, καθώς δεν γινόταν να εγκατασταθούν οι βιβλιοθήκες που απαιτούνται, λόγω αρχιτεκτονικής του συστήματος και έτσι βρίσκεται σε άλλον υπολογιστή του εργαστηρίου.

Για να προγραμματιστούν τα LED, ο driver συνδέεται με το base station unit που είναι στον υπολογιστή του συστήματος. Στον υπολογιστή αυτόν, έχουν δημιουργηθεί συγκεκριμένα προφίλ για κάθε ρομπότ που χρησιμοποιείται στον διαστημικό εξομοιωτή, στα οποία καθορίζεται ο αριθμός και η ταυτότητα των LED που χρησιμοποιούνται [30]

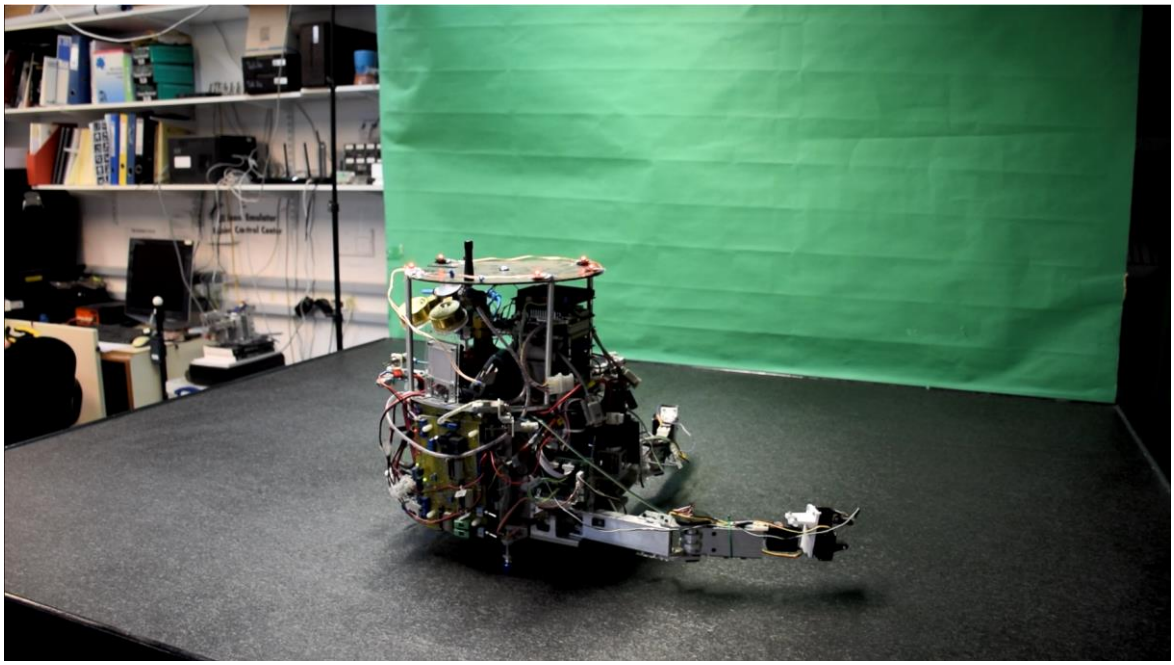
6.1.2 Πείραμα κίνησης ρομπότ παράλληλα στον άξονα x

Το πρώτο από τα πειράματα που εκτελέστηκε, ήταν αυτό κατά το οποίο το ρομπότ έπρεπε να κινηθεί σε ευθεία γραμμή κατά τον άξονα x, με σταθερό προσανατολισμό. Η επιλογή των δυνάμεων ώσης από τους προωθητήρες, έγινε με χρήση της μεθόδου SIMPLEX στα υπολογιζόμενα duty cycles, όπως έχει ήδη αναφερθεί και επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί τριγωνικό προφίλ ταχύτητας για χρονικό διάστημα κίνησης 20s. Πρόκειται, δηλαδή, για πειράματα ανοιχτού βρόχου. Στα Σχήματα 6.1 και 6.2 φαίνονται στιγμιότυπα από την

πειραματική διαδικασία, κατά την αρχή (φάση επιτάχυνσης) και το τέλος της (φάση επιβράδυνσης). Σκοπός του πειράματος ήταν το ρομπότ να διανύσει 1m πάνω στην τράπεζα και να φτάσει στον τελικό στόχο του με μηδενική ταχύτητα.

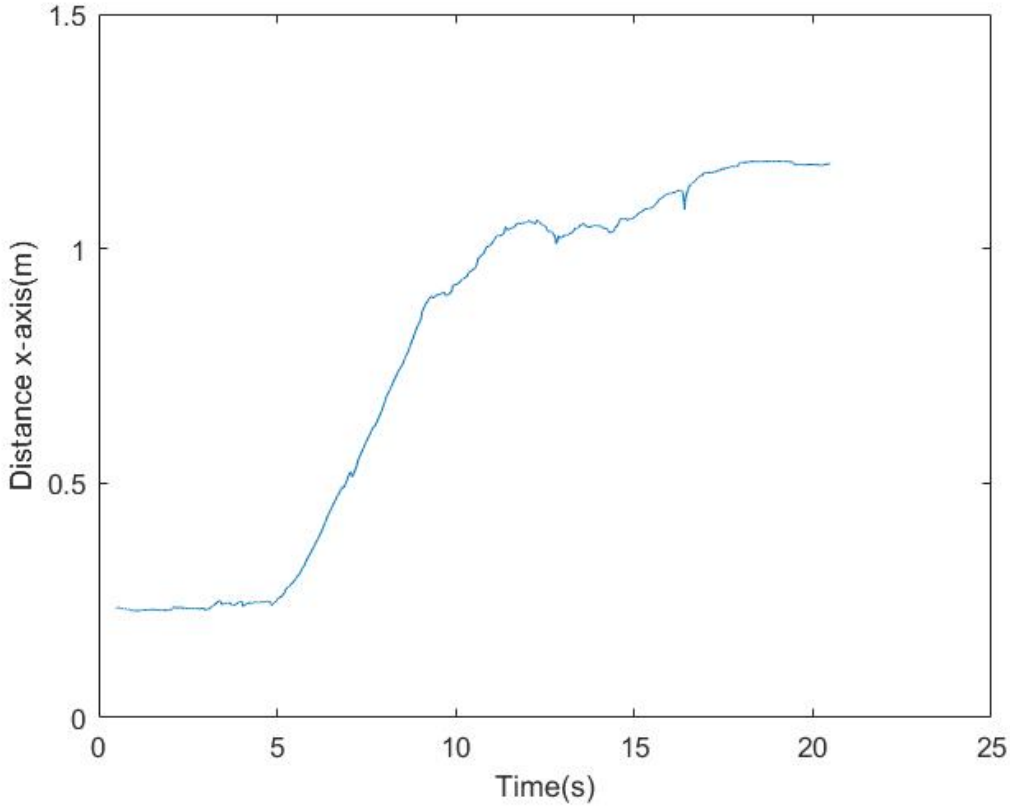


Σχήμα 6.1. Στιγμιότυπο κατά τη φάση επιτάχυνσης για κίνηση στον x-άξονα.

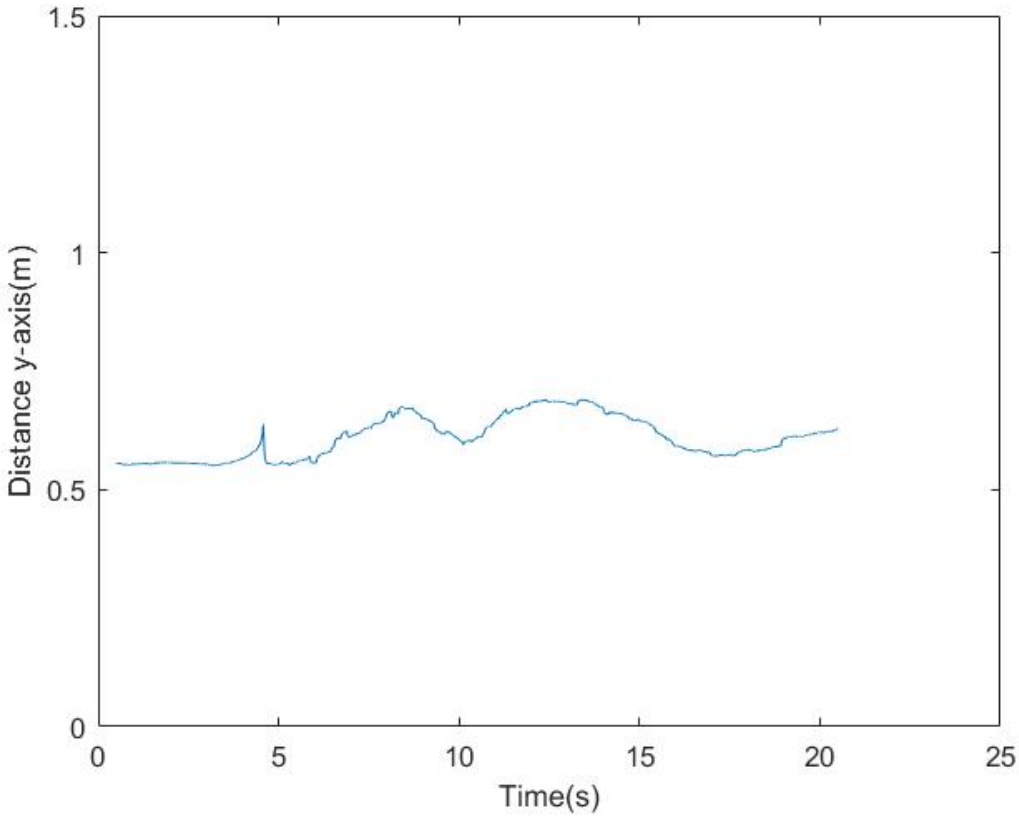


Σχήμα 6.2. Στιγμιότυπο κατά τη φάση επιβράδυνσης για κίνηση στον x-άξονα.

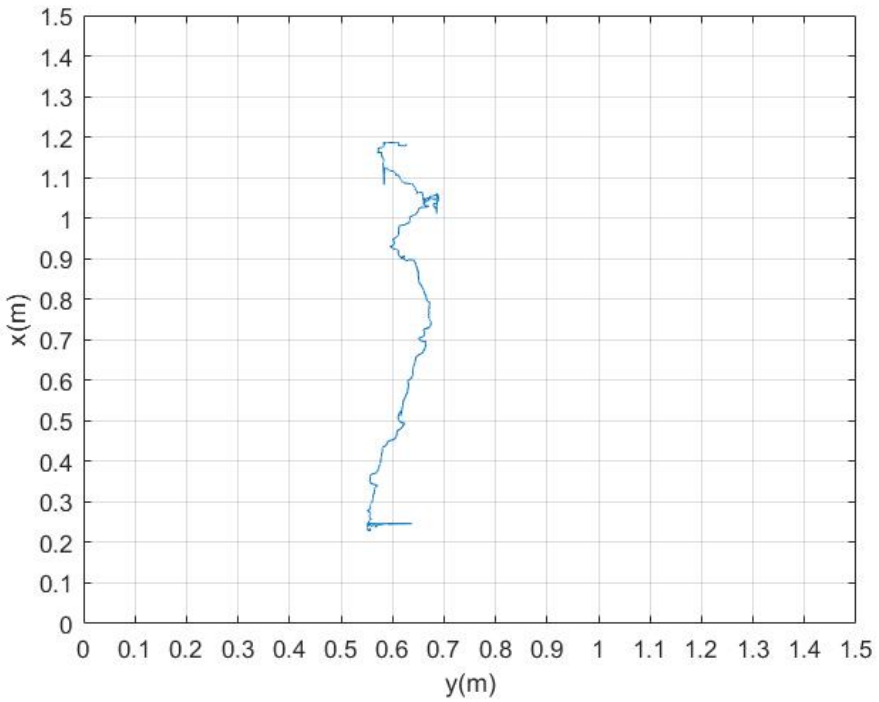
Κάθε χρονική στιγμή το σύστημα PhaseSpace υπολόγιζε τη θέση του ρομπότ και με μια απλή παραγώγιση, προέκυπτε κάθε φορά η ταχύτητά του. Στα Σχήματα 6.3-6.6, παρουσιάζονται η θέση του ρομπότ στους άξονες x και y ως προς τον χρόνο, η θέση του ρομπότ πάνω στο τραπέζι (διάγραμμα θέσης στον x ως προς τον y) και η ταχύτητά του στην κατεύθυνση του άξονα x, από την οποία εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.



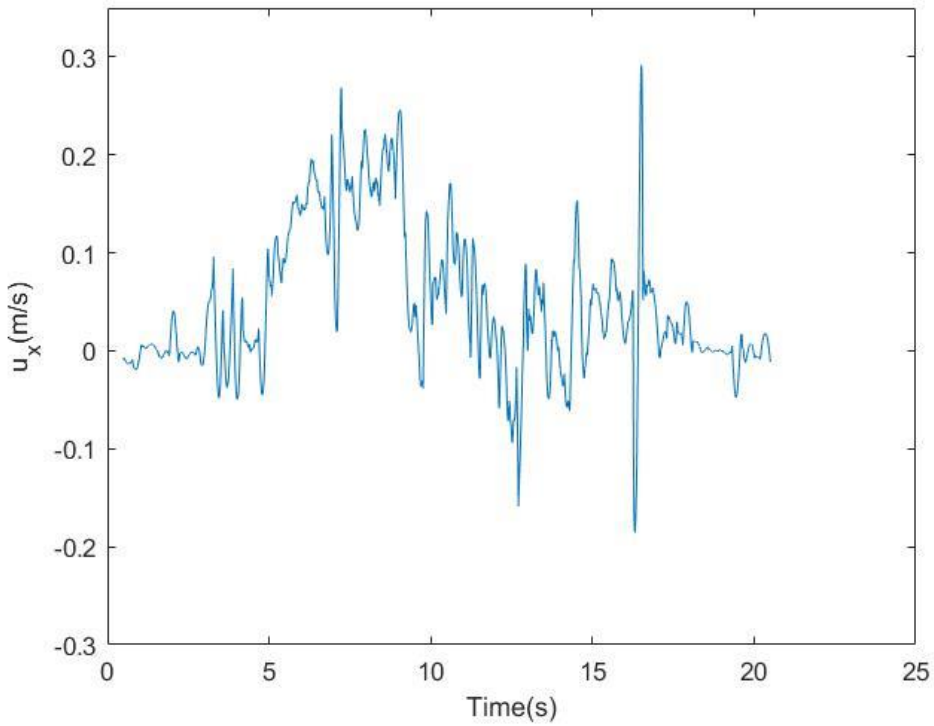
Σχήμα 6.3. Η θέση του ρομπότ στον x-άξονα ως προς τον χρόνο.



Σχήμα 6.4. Η θέση του ρομπότ στον y-άξονα ως προς τον χρόνο.



Σχήμα 6.5. Η τροχιά που ακολούθησε το ρομπότ πάνω στην τράπεζα κατά το πείραμα.



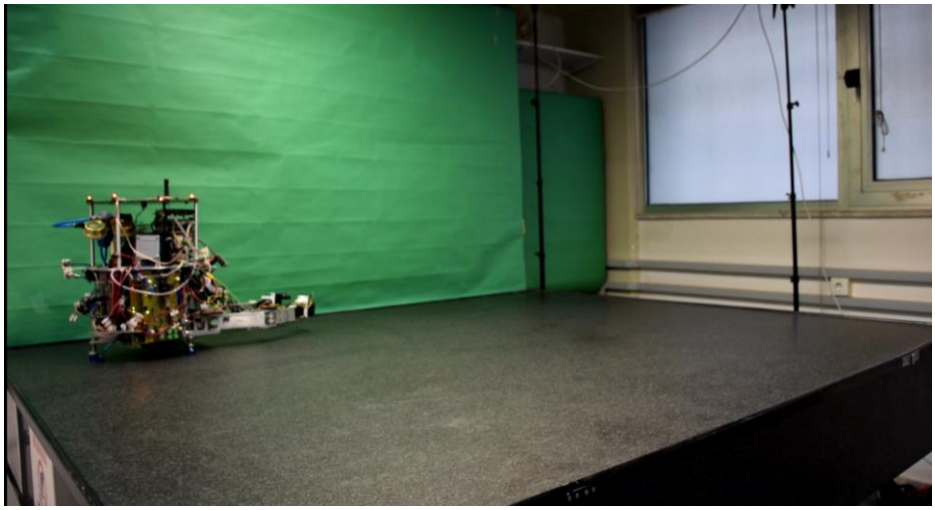
Σχήμα 6.6. Η x-συνιστώσα της ταχύτητας του ρομπότ ως προς τον χρόνο.

6.1.3 Συμπεράσματα

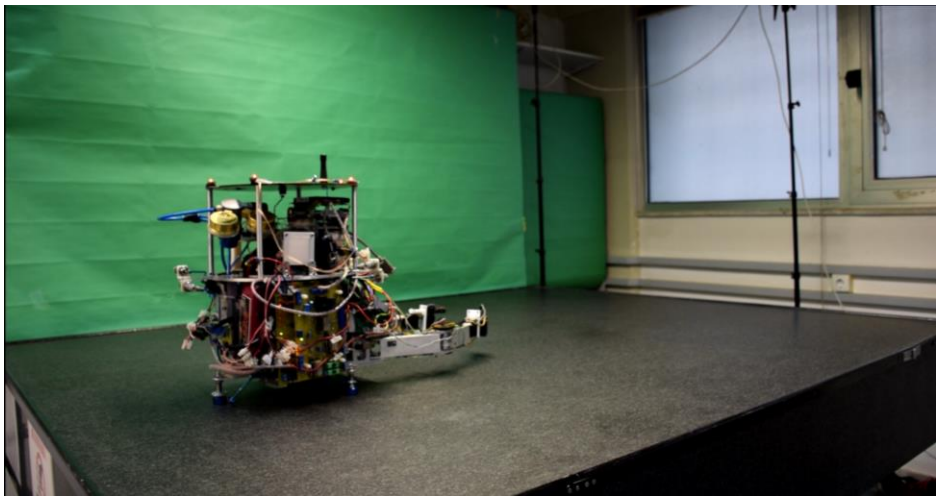
Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, το ρομπότ εκτέλεσε την κίνηση με αρκετή ακρίβεια, δεδομένου ότι πρόκειται για ένα σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου, με την υπόθεση ότι γνωρίζουμε ακριβώς τόσο την συμπεριφορά των προωθητήρων όσο και τις παραμέτρους του πνευματικού και μηχανολογικού υποσυστήματος. Συγκεκριμένα, το ρομπότ είχε ένα σφάλμα τελικής θέσης της τάξης του 5% στην κύρια διεύθυνση της κίνησης, ενώ υπήρχε και μια μικρή μετατόπιση, μικρότερη των 3cm στην διεύθυνση που ήταν κάθετη στην κίνηση. Αυτά τα σφάλματα μπορεί να προκύπτουν από μικρά misalignments στην τοποθέτηση των προωθητήρων ή από μικρομεταβολές της δύναμης ώσης που παράγουν κατά την διάρκεια της κίνησης. Όσον αφορά την ταχύτητα, παρατηρούμε ότι ακολουθεί το τριγωνικό προφίλ, ενώ στο τέλος της κίνησης έχει πρακτικά μηδενιστεί όπως ήταν το ζητούμενο.

6.1.4 Πείραμα κίνησης ρομπότ παράλληλα στον άξονα y

Στο δεύτερο πείραμα, το ρομπότ έπρεπε να ακολουθήσει μια πορεία παράλληλη στον άξονα y, διανύοντας απόσταση 1m, με τριγωνικό προφίλ ταχύτητας και σταθερό προσανατολισμό, σε χρόνο 20s. Στιγμιότυπα του πειράματος, φαίνονται στα Σχήματα 6.7 και 6.8.

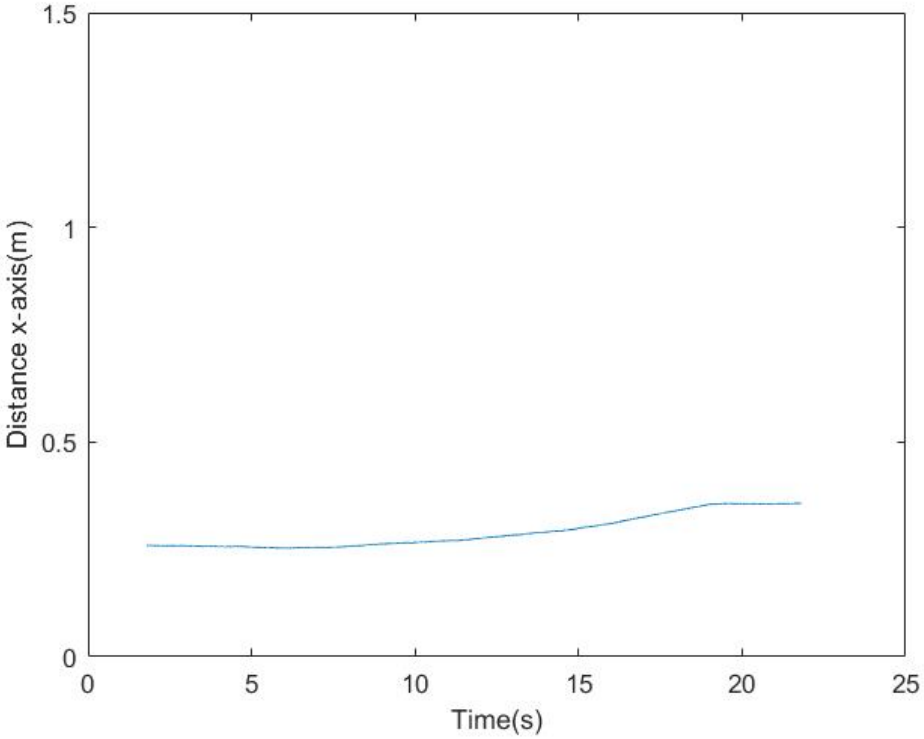


Σχήμα 6.7. Στιγμιότυπο πειράματος κίνησης παράλληλης στον y-άξονα.

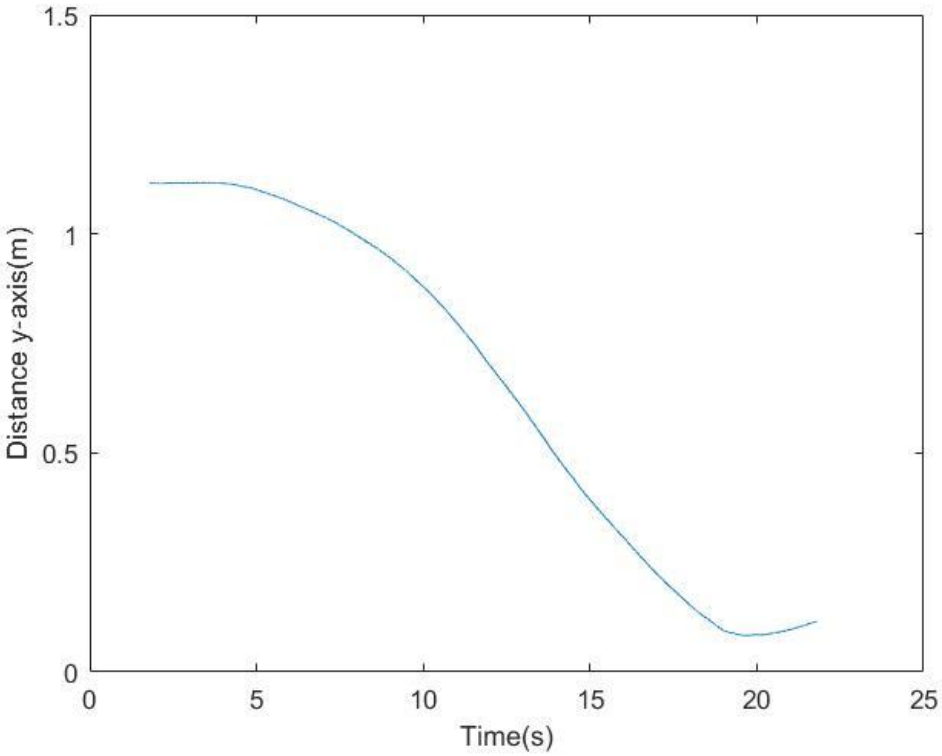


Σχήμα 6.8. Στιγμιότυπο πειράματος κίνησης παράλληλης στον y-άξονα.

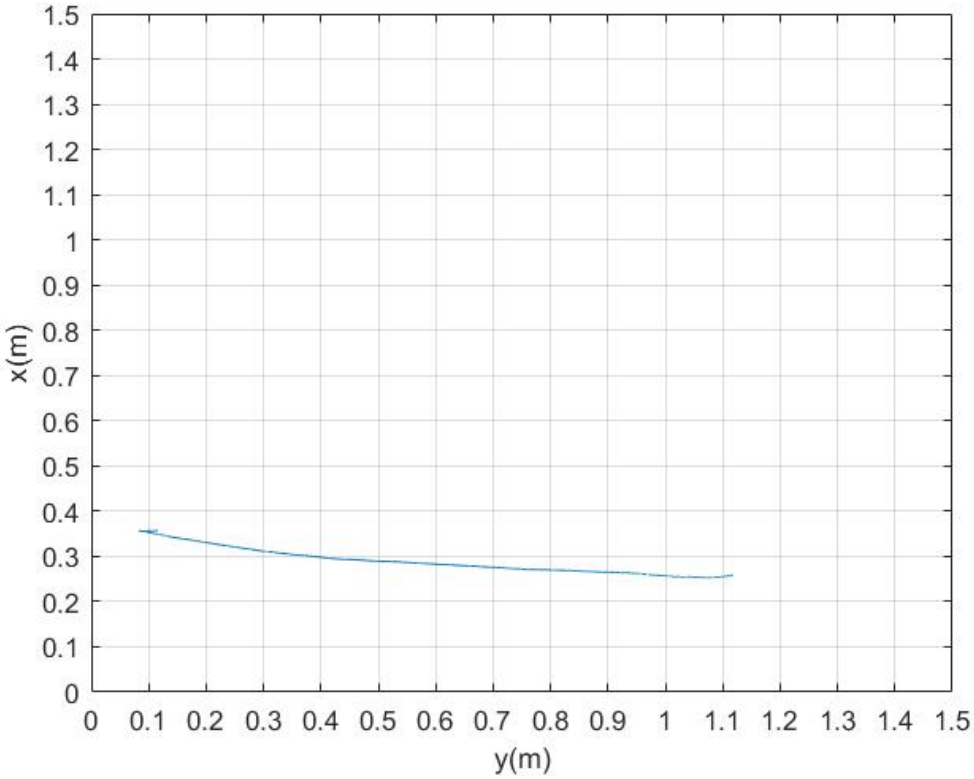
Στα διαγράμματα των Σχημάτων 6.9-6.12 φαίνονται η θέση του ρομπότ στους άξονες x και y ως προς τον χρόνο, η θέση του ρομπότ πάνω στο τραπέζι (διάγραμμα θέσης στον x ως προς τον y) και η ταχύτητά του στην κατεύθυνση του άξονα y, όπως και προηγουμένως.



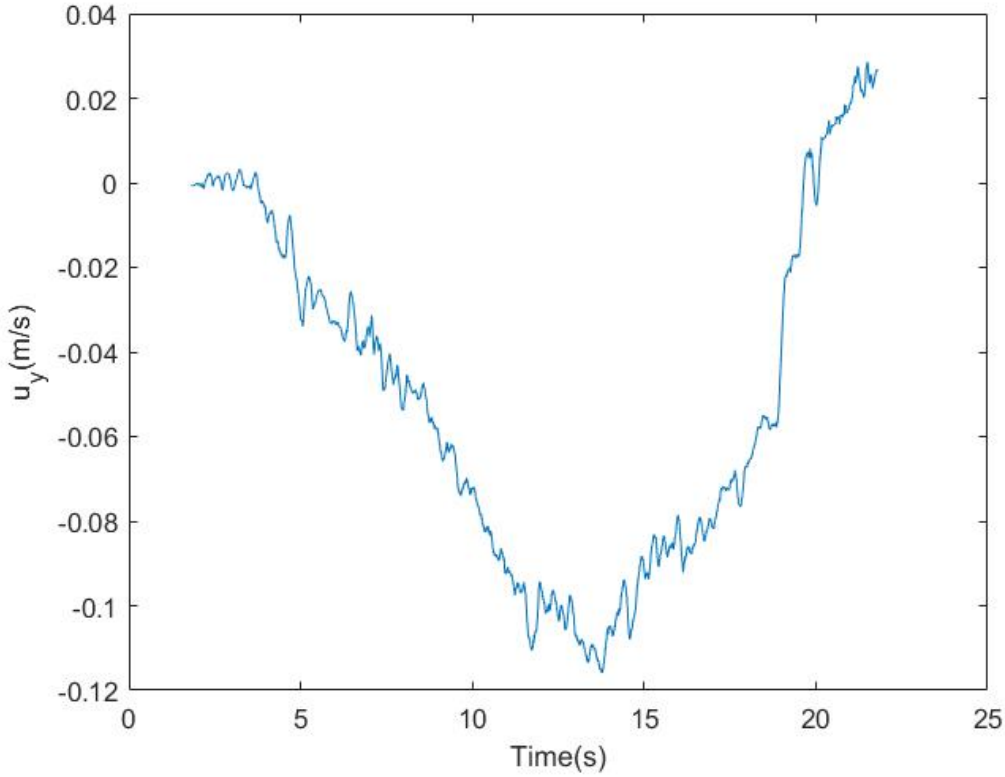
Σχήμα 6.9. Η θέση του ρομπότ στον x-άξονα ως προς τον χρόνο.



Σχήμα 6.10. Η θέση του ρομπότ στον y-άξονα ως προς τον χρόνο.



Σχήμα 6.11. Η τροχιά που ακολούθησε το ρομπότ πάνω στην τράπεζα κατά το πείραμα.



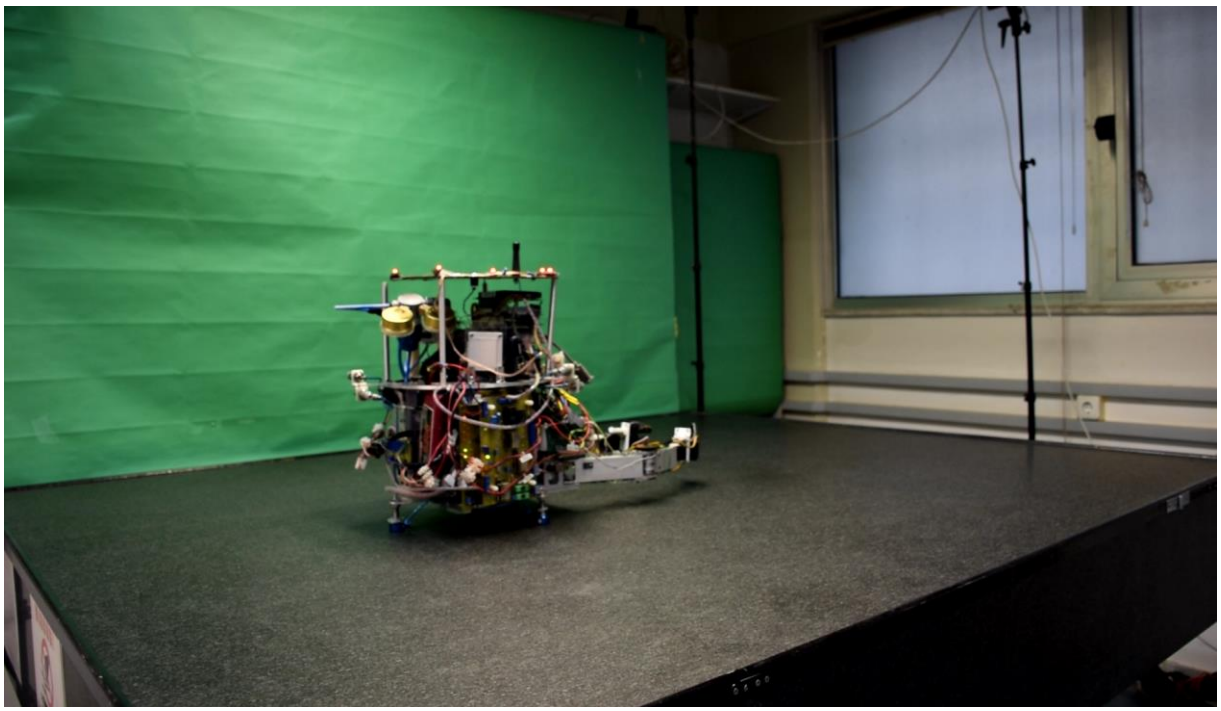
Σχήμα 6.12. Η y-συνιστώσα της ταχύτητας του ρομπότ ως προς τον χρόνο.

6.1.5 Συμπεράσματα

Και σε αυτή την περίπτωση, το ρομπότ φτάνει στον στόχο του, με ένα σφάλμα της τάξης μερικών εκατοστών (~3%). Το πρόβλημα εντοπίζεται στην εγκάρσια μετατόπισή του, η οποία πλησιάζει τα 10cm. Η μετατόπιση αυτή πιθανόν να οφείλεται στην αδυναμία του σφονδύλου αντίδρασης, να ακολουθήσει την μεγάλη μεταβολή που απαιτείται στην ροπή κατά την εναλλαγή από φάση επιτάχυνσης σε φάση επιβράδυνσης. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να επιλυθεί με επιλογή κάποιου πιο ομαλού προφίλ ταχύτητας με μικρότερες μεταβολές στις απαιτούμενες δυνάμεις και ροπές. Τέλος, σχετικά με την ταχύτητα, σε αυτή την περίπτωση είναι ξεκάθαρο ότι το ρομπότ έχει ακολουθήσει το τριγωνικό προφίλ όπως θα έπρεπε, ενώ φαίνεται στο τέλος της κίνησης το ρομπότ να μην έχει ακινητοποιηθεί πλήρως. Για το φαινόμενο αυτό, η βασική αιτία είναι μικρές διαφορές που υπάρχουν στις δυνάμεις που πραγματικά δίνουν οι προωθητήρες σε σχέση με αυτές που έχουν υπολογιστεί και χρησιμοποιούνται ως είσοδος στην μέθοδο SIMPLEX.

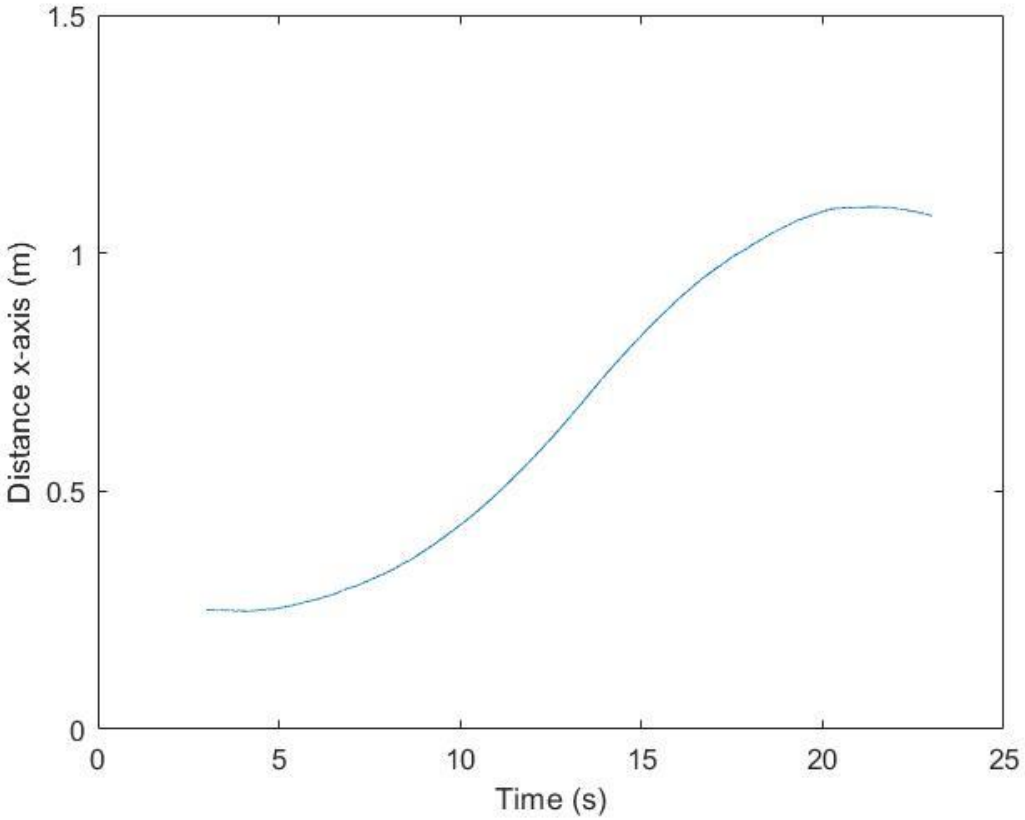
6.1.6 Πείραμα κίνησης ρομπότ σε τυχαία γωνία

Η τρίτη κίνηση που ζητήθηκε από το ρομπότ να εκτελέσει, ήταν κίνηση σε μια τυχαία διεύθυνση. Συγκεκριμένα, το ρομπότ έπρεπε να μετακινηθεί 1m κατά την x-διεύθυνση και 1m κατά την y-διεύθυνση με σταθερό προσανατολισμό και τριγωνικό προφίλ ταχύτητας. Η διάρκεια της κίνησης ήταν και σε αυτή την περίπτωση 20s. Στο Σχήμα 6.13 φαίνεται ένα στιγμιότυπο του πειράματος.

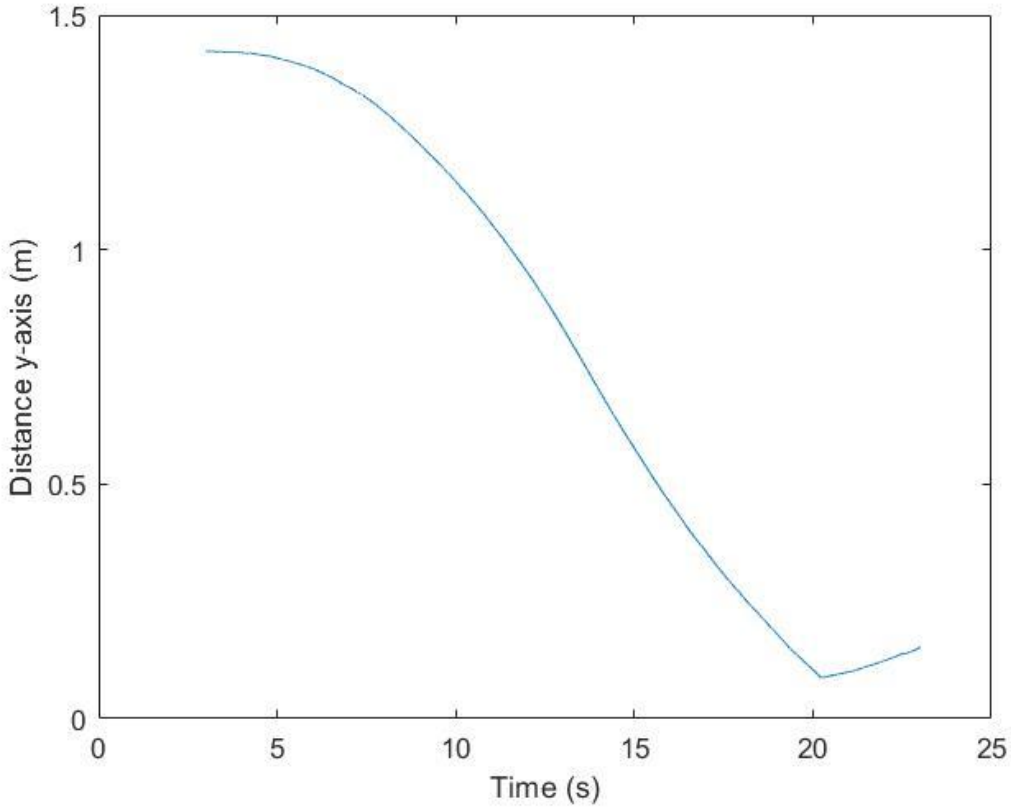


Σχήμα 6.13. Στιγμιότυπο κατά την πειραματική διαδικασία

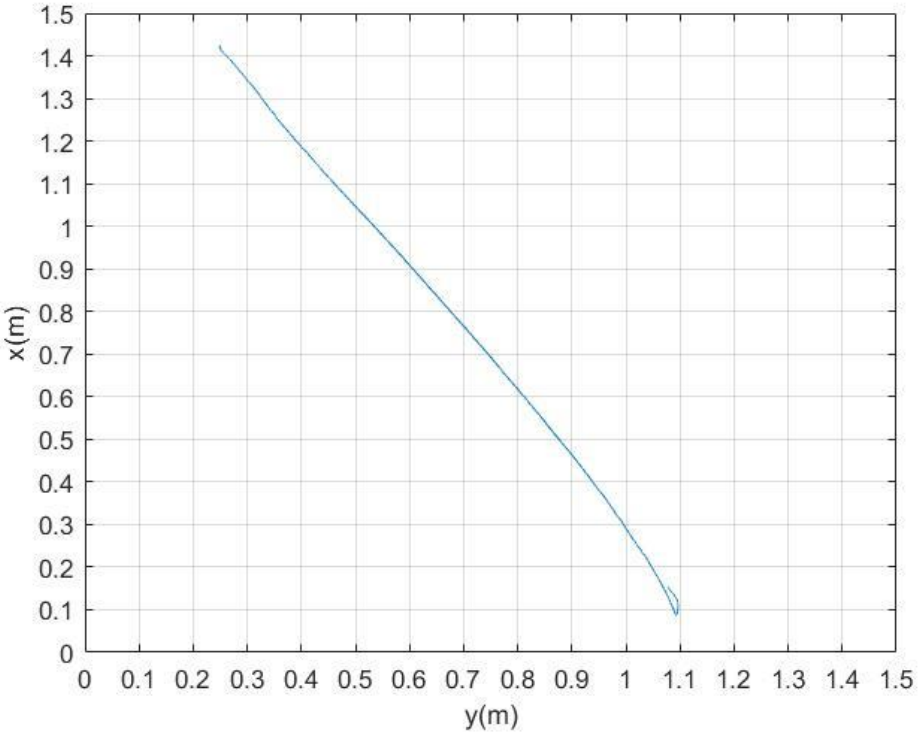
Στα Σχήματα 6.14-6.19 παρουσιάζονται οι αποστάσεις που έχει διανύσει το ρομπότ στις δύο κατευθύνσεις, η θέση του πάνω στην τράπεζα, η γωνία βάσης κατά την κίνηση και οι ταχύτητές του, κατά x, κατά y και η γωνιακή ταχύτητα ω.



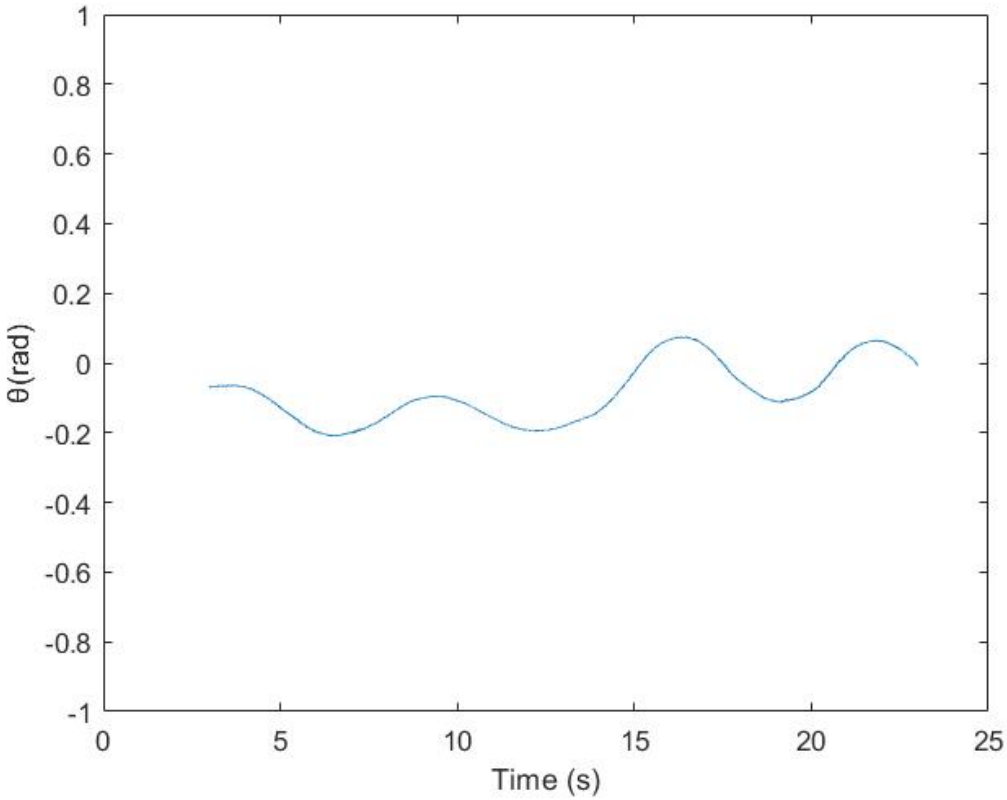
Σχήμα 6.14. Η απόσταση που διανύει το ρομπότ κατά τη x-διεύθυνση ως προς τον χρόνο.



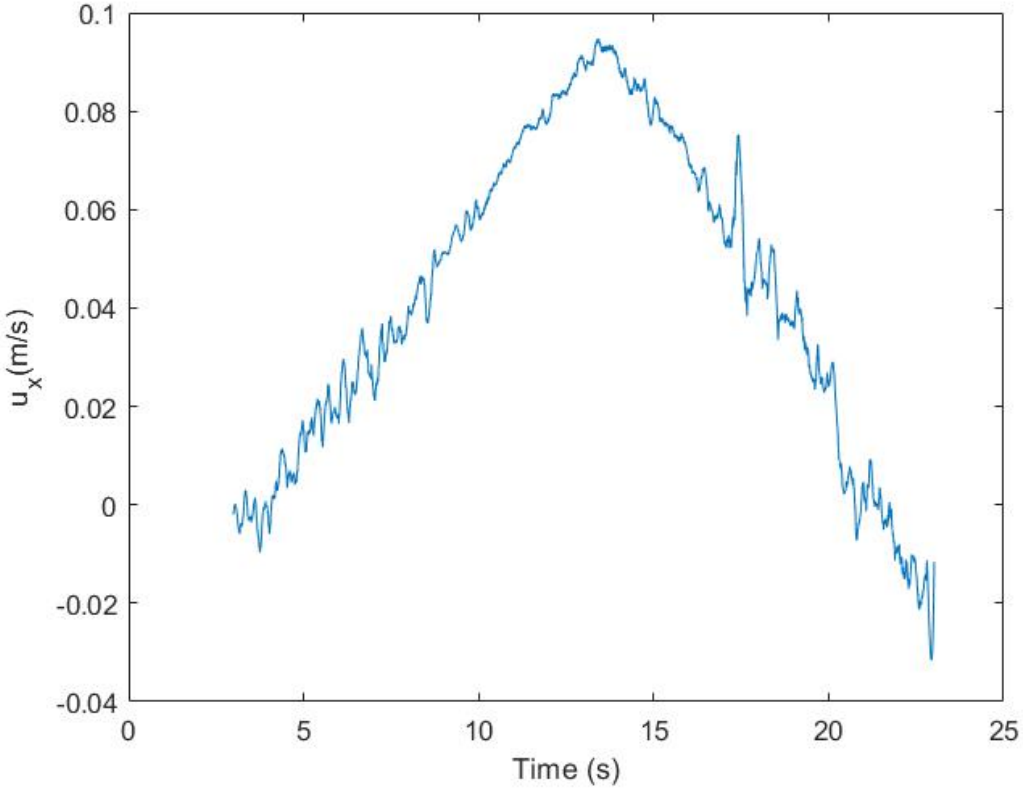
Σχήμα 6.15. Η απόσταση που διανύει το ρομπότ κατά τη y-διεύθυνση ως προς τον χρόνο.



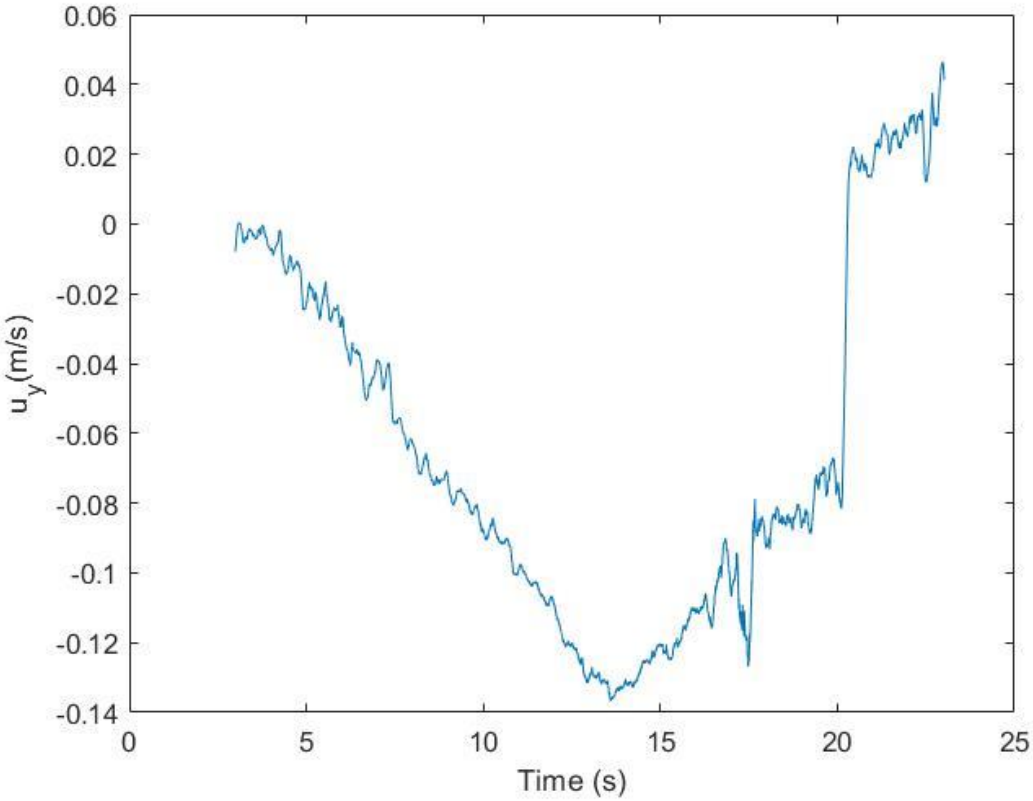
Σχήμα 6.16. Η τροχιά που ακολούθησε το ρομπότ πάνω στην τράπεζα κατά το πείραμα.



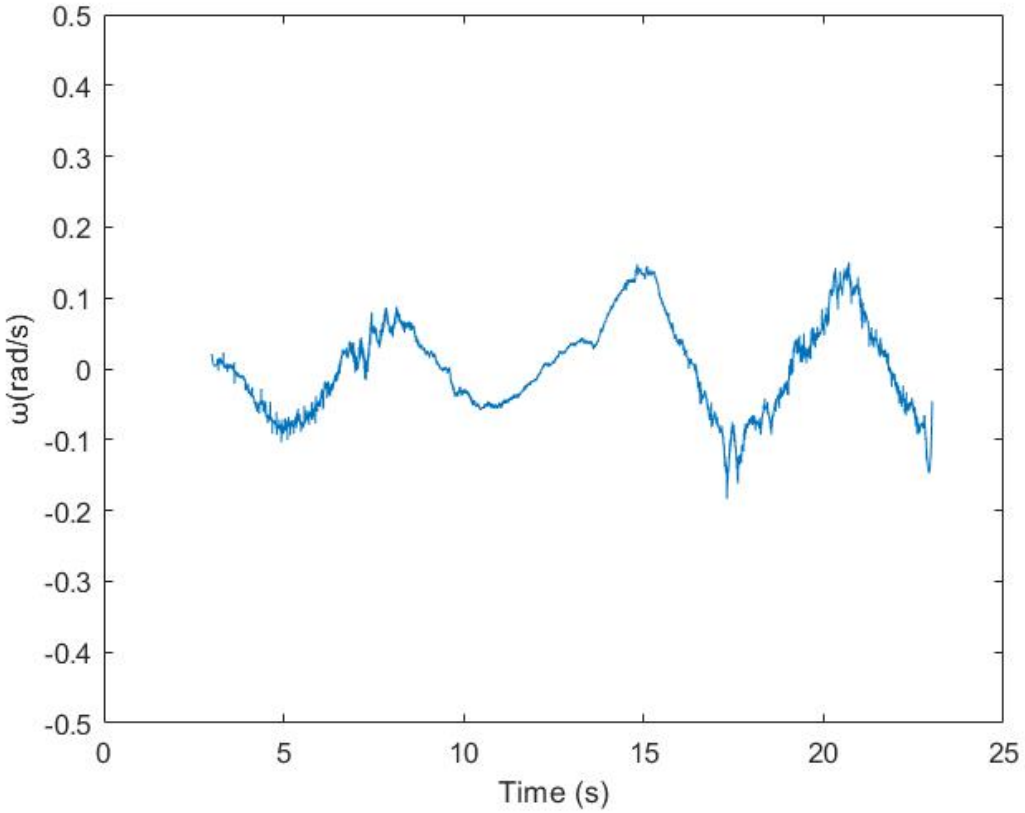
Σχήμα 6.17. Η γωνία της βάσης ως προς τον χρόνο.



Σχήμα 6.18. Η x-συνιστώσα της ταχύτητας του ρομπότ ως προς τον χρόνο.



Σχήμα 6.19. Η y-συνιστώσα της ταχύτητας του ρομπότ ως προς τον χρόνο.



Σχήμα 6.20. Η γωνιακή ταχύτητα του ρομπότ ως προς τον χρόνο.

6.1.7 Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι σε αυτή την πειραματική διαδικασία, η οποία ήταν πιο απαιτητική από τις δύο προηγούμενες, καθώς απαιτεί την λειτουργία όλων των thruster αλλά και του σφονδύλου αντίδρασης, η κίνηση παρουσιάζει τα μεγαλύτερα σφάλματα στην τελική θέση, τα οποία πλησιάζουν το 20%. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε μεγάλες διαφορές στην δύναμη ώσης που παράγουν οι προωθητήρες από αυτή που έχει υπολογιστεί, λόγω της ταυτόχρονης λειτουργίας πολλών προωθητήρων. Όσον αφορά τις ταχύτητες, το ρομπότ φαίνεται να ακολουθεί αρκετά καλά το τριγωνικό προφίλ αν και υπάρχουν μικρές ταχύτητες που παραμένουν με το τέλος του πειράματος, δηλαδή το ρομπότ δεν καταφέρνει να ακινητοποιηθεί πλήρως. Ξανά η πιθανότερη αιτία είναι οι τιμές ώσης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τροχιάς. Τέλος, το ρομπότ διατηρεί σταθερό προσανατολισμό με μικρές ταλαντώσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο τέλος της διαδικασίας η τελική του γωνία βάσης είναι μικρότερη από 5 μοίρες, δηλαδή έχει ένα μικρό σφάλμα.

6.2 Αποτελέσματα

Μετά το τέλος των πειραμάτων για τις τρεις κινήσεις που επιλέχθηκαν, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την χρήση της μεθόδου SIMPLEX στον σχεδιασμό τροχιάς του ρομπότ. Αρχικά, αν και οι κινήσεις που επιλέχθηκαν ήταν αρκετά απλές, σε όλες εμφανίζεται ένα μικρό σφάλμα τελικής θέσης, γεγονός που προκύπτει από την αδυναμία να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια οι ώσεις που παράγουν οι προωθητήρες του ρομπότ. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος αφορά τη

δημιουργία ενός απλού controller για την βάση, ο οποίος θα μηδενίζει τα σφάλματα τόσο στη θέση όσο και τον προσανατολισμό του ρομπότ με χρήση των προωθητήρων και του σφονδύλου, επηρεάζοντας όμως τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ο βέλτιστος συνδυασμός για την ελαχιστοποίηση του καυσίμου. Η δεύτερη λύση αφορά τον επανασχεδιασμό του συστήματος κίνησης και την τοποθέτηση αισθητήρων Strain Gauge στις βάσεις των thruster. Με τον τρόπο αυτό, ο σχεδιασμός της κίνησης θα μπορεί να χρησιμοποιεί τις πραγματικές δυνάμεις που ασκούνται κάθε φορά στη βάση και να προσαρμόζει τις τιμές που προκύπτουν από τη SIMPLEX κατάλληλα. Με τον τρόπο αυτό, το ρομπότ θα μπορεί να εκτελεί με βέλτιστο τρόπο, πιο σύνθετες τροχιές, που απαιτούν συνεχή προσαρμογή των απαιτούμενων δυνάμεων, για να διατηρούν το κατάλληλο προφίλ κίνησης.

7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

7.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας ήταν η επαναφορά του πρώτου ενεργητικού ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή σε μια κατάσταση που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί να πειράματα στην τράπεζα του γρανίτη και ο επανασχεδιασμός των υποσυστημάτων του ώστε πλέον να μπορεί να εκτελεί σύνθετες λειτουργίες. Ακόμα, σκοπός ήταν να ελεγχθεί η δυνατότητα χρήσης της μεθόδου SIMPLEX για τον σχεδιασμό τροχιάς, ώστε να μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί στα ρομπότ του εξομοιωτή με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου.

Σε σχέση με το πρώτο μέρος το οποίο απαιτούσε αρκετή δουλειά τόσο στο κομμάτι του hardware όσο και σε αυτό του λογισμικού, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας κρίνονται θετικά. Πλέον το ρομπότ φέρει λειτουργικούς βραχίονες, οι οποίοι μπορούν να ελεγχθούν και να χρησιμοποιηθούν σε διαδικασίες αρπαγής αντικειμένων χάρη στην τοποθέτηση των gripper, με τους αντίστοιχους FSR. Ακόμα, το πνευματικό σύστημα με τις κατάλληλες αλλαγές στα αεροέδρανα και τους προωθητήρες επιτρέπει την εκτέλεση κινήσεων της βάσης στο τραπέζι στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο σφόνδυλος αντίδρασης. Τέλος, με την χρήση και του συστήματος PhaseSpace και την ανάπτυξη μιας καλής βάσης στο codebase και στο υπάρχον ROS του ρομπότ, γίνεται δυνατή η χρησιμοποίησή του σε πειράματα συνεργασίας με τα άλλα δύο ρομπότ του εργαστηρίου.

Όσον αφορά το δεύτερο μέρος και τη χρήση της μεθόδου SIMPLEX, βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους υπολογισμούς φαίνεται ότι μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με άλλες μεθόδους σχεδιασμού τροχιάς. Όμως, βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι για να μπορεί ένα ρομπότ που φέρει προωθητήρες να ακολουθεί σωστά και με ακρίβεια τις κινήσεις, θα πρέπει να γίνουν αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο υπολογίζονται οι δυνάμεις που παράγονται από αυτούς και να μπορούν να υπολογίζονται real-time κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, λοιπόν, αποτελεί ένα αρχικό στάδιο στην επαναφορά του πρώτου ενεργητικού ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή και προτείνεται περαιτέρω έρευνα και εργασία, ώστε να γίνει το ρομπότ μια πλατφόρμα στην οποία θα μπορούν να δοκιμάζονται νέες μέθοδοι και εξελιγμένα συστήματα ελέγχου.

7.2 Μελλοντική Εργασία

Βάσει των παραπάνω, το ρομπότ πλέον μπορεί να επιτελεί όλες τις απαραίτητες εργασίες για να είναι πλήρως λειτουργικό και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πειράματα αρπαγής αντικειμένων στην τράπεζα του διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου. Σαν μελλοντικές εργασίες που θα μπορούσαν να εκπονηθούν στο ρομπότ προτείνονται οι παρακάτω:

- Κατασκευή νέων βραχιόνων, με διαφορετική μετάδοση κίνησης. Προτείνεται η χρήση ιμάντων χρονισμού, αντί σχοινιού, ή η τοποθέτηση κινητήρων κατευθείαν στις αρθρώσεις του βραχίονα.
- Υλοποίηση ελεγκτή για τους βραχίονες, με την αλλαγή της μετάδοσης κίνησης, ο οποίος θα βασίζεται στο δυναμικό μοντέλο του ρομπότ.

- Υλοποίηση ελεγκτή για την κίνηση της βάσης ώστε το ρομπότ να εκτελεί με ακρίβεια τόσο στη θέση όσο και τον προσανατολισμό σύνθετες κινήσεις.
- Τοποθέτηση αισθητήρων Strain Gauge στις βάσεις των προωθητήρων, ώστε να ελέγχεται σε πραγματικό χρόνο η δύναμη ώσης που παράγεται. Με τον τρόπο αυτό, θα υπάρχει ένα ακριβές identification για την συμπεριφορά των προωθητήρων, κατά την κίνηση της βάσης.
- Αλλαγή της κάρτας CPU του PC104 με πιο σύγχρονη, ώστε το ρομπότ να μπορεί να εκτελεί πολύ πιο σύνθετες εντολές σε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες.
- Εύρεση του χώρου εργασίας του ρομπότ και για τους δύο βραχίονες μαζί.
- Βελτιστοποίηση των πλακετών τροφοδοσίας και αντικατάσταση με μικρότερες και πιο εύκολα διαχειρίσιμες, με αφαίρεση των ηλεκτρονικών που δεν χρησιμοποιούνται πια. Παράλληλα προτείνεται η χρήση μόνο δύο Li-Po μπαταριών, αντί για τρεις που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη φάση για τη λειτουργία του ρομπότ.

8 Βιβλιογραφία

[1] http://wiki.ros.org/rosserial_arduino/Tutorials/Arduino%20IDE%20Setup
[2] http://wiki.ros.org/rosserial_arduino/Tutorials/NodeHandle%20and%20ArduinoHardware
[3] http://www.ella-dagan.com/hall-effect-sensor/
[4] https://developpaper.com/study-notes-of-autolabor-2-5-3-working-space-and-compiling-system-of-ros/
[5] https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_signalling
[6] https://en.wikipedia.org/wiki/Incremental_encoder
[7] https://en.wikipedia.org/wiki/Moving_average
[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Robot_Operating_System
[9] https://en.wikipedia.org/wiki/Servomotor
[10] https://en.wikipedia.org/wiki/Simplex_algorithm
[11] https://en.wikipedia.org/wiki/Space_debris
[12] https://learn.adafruit.com/force-sensitive-resistor-fsr
[13] https://pc104.org/hardware-specifications/pcie104/
[14] https://web.stanford.edu/group/arl/projects/free-flyers
[15] https://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Nano17
[16] https://www.dlr.de/irs/en/desktopdefault.aspx/tabid-11360
[17] https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers
[18] https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/340748/QS-F_en_12_2012.pdf
[19] https://www.festo.com/us/en/a/download-document/datasheet/193156
[20] https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html
[21] https://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html
[22] https://www.mathworks.com/help/signal/ref/sgolayfilt.html#d123e156607
[23] https://www.mathworks.com/help/signal/ug/signal-smoothing.html
[24] https://www.mathworks.com/products/ros.html
[25] https://www.mathworks.com/products/simulink.html
[26] https://www.ros.org/blog/why-ros/
[27] Machairas, K., Papadopoulos, E., "*On quadruped attitude dynamics and control using reaction wheels and tails*," *2015 European Control Conference (ECC)*, 2015, pp. 753-758, doi: 10.1109/ECC.2015.7330633.
[28] Nanos, K., Papadopoulos, E., "Avoiding dynamic singularities in Cartesian motions of free-floating manipulators," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 51, no. 3, pp. 2305-2318, July 2015, doi: 10.1109/TAES.2015.140343.
[29] Papadopoulos, E., "*On the Dynamics and Control of Space Manipulators*," *PhD Thesis*, Department of Mechanical Engineering, MIT, October 1990.
[30] PhaseSpase_Manual/PhaseSpace/overview.html
[31] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., Oriolo, G., *Robotics*, Springer London, 2009.
[32] Taha, A., H., *Operations Research – An Introduction*, 10th Edition, Pearson Education, New York, 2017.
[33] Κυριακόπουλος, Κ., Παπαδόπουλος, Ε., *Σημειώσεις Ρομποτικής*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2004.
[34] Μαυρίδης, Π., "*Ανάπτυξη λογισμικού σε περιβάλλον ROS για την κίνηση βραχιόνων ρομπότ διαστημικού εξομοιωτή και σχεδιασμός τροχιάς για την αυτόματη σύλληψη στόχων*", *Πτυχιακή Εργασία*, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, 2019.
[35] Μαυρίκης, Ν., "*Επανασχεδιασμός και κατασκευή υποσυστημάτων ρομπότ διαστημικού εξομοιωτή με πειραματική επιβεβαίωση*", *Διπλωματική Εργασία*, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2019.

[36] 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.

[37] Ψαρρός, Δ,. "*Ανάλυση, Σχεδίαση και Αξιολόγηση Σφονδύλου Αντίδρασης για Επίπεδο Εξομοιωτή Διαστημικού Ρομπότ*", *Μεταπτυχιακή Εργασία*, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2014.

Παράρτημα Α - Κώδικες

1. Ο κώδικας Arduino που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των servo στις αρπάγες και για την λήψη τιμών δύναμης από τους FSR

```
#include <Arduino.h>
#include <Servo.h>
#include <ros.h>
#include <std_msgs/UInt16.h>
#include <std_msgs/Bool.h>

ros::NodeHandle  nh;

int fsr_left_Pin = 1;     // the FSR and 10K pulldown are connected to A1
int fsr_right_Pin = 0;     // the FSR and 10K pulldown are connected to A0

//Create servo objects
Servo left_wrist;
Servo left_gripper;
Servo right_wrist;
Servo right_gripper;

//Create wrist servo callbacks and subscribers
void left_wrist_cb( const std_msgs::UInt16& cmd_msg){
  left_wrist.write(cmd_msg.data);  //set servo angle, should be from 0-180
}
void right_wrist_cb( const std_msgs::UInt16& cmd_msg){
  right_wrist.write(cmd_msg.data);  //set servo angle, should be from 0-180
}

ros::Subscriber<std_msgs::UInt16>  sub_lw("left_wrist",  left_wrist_cb);
ros::Subscriber<std_msgs::UInt16>  sub_rw("right_wrist",  right_wrist_cb);

//Create FSR publisers
std_msgs::UInt16 fsr_left_Force;
std_msgs::UInt16 fsr_right_Force;
ros::Publisher fsr_left_pub("fsr_left",  &fsr_left_Force);
ros::Publisher fsr_right_pub("fsr_right",  &fsr_right_Force);


//Callback and subscriber for grip message
bool grip_left = false;
void grip_left_cb(const std_msgs::Bool& Start_grip_left) {
  grip_left = Start_grip_left.data;
```

```
}
bool grip_right = false;
void grip_right_cb(const std_msgs::Bool& Start_grip_right) {
  grip_right = Start_grip_right.data;
}

ros::Subscriber<std_msgs::Bool>  sub_grip_left("grip_left",  &grip_left_cb);
ros::Subscriber<std_msgs::Bool>  sub_grip_right("grip_right",  &grip_right_cb);

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  nh.getHardware()->setBaud(9600);

  nh.initNode();

  nh.advertise(fsr_left_pub);
  nh.advertise(fsr_right_pub);

  nh.subscribe(sub_lw);
  nh.subscribe(sub_rw);

  nh.subscribe(sub_grip_left);
  nh.subscribe(sub_grip_right);

  left_wrist.attach(10);      //Left wrist servo at PWM pin 10
  left_gripper.attach(11);    //Left gripper servo at PWM pin 11
  right_wrist.attach(3);      //Right wrist servo at PWM pin 3
  right_gripper.attach(5);    //Right gripper servo at PWM pin 5

  //Initialize gripper servos
  left_gripper.write(90);   //for pos=90 degrees grippers are fully open
  right_gripper.write(90);
}

void loop(void) {
  if (grip_left==false && grip_right == false){
    nh.spinOnce();
  }
  else if (grip_left == true){
  double Vfsr_left = 4.8*(1-analogRead(fsr_left_Pin)/1023);   //mapping raw analog data
to voltage
  double Ffsr_left = 0.6546*pow(Vfsr_left,6)-
10.7085*pow(Vfsr_left,5)+70.2992*pow(Vfsr_left,4)-
237.4216*pow(Vfsr_left,3)+436.2844*pow(Vfsr_left,2)-415.8874*Vfsr_left+162.9366;
//mapping voltage to force
```

```
      fsr_left_Force.data = Ffsr_left;
      fsr_left_pub.publish(&fsr_left_Force);

      for (int pos = 90; pos = 180; pos++) {
        left_gripper.write(pos);
        if (Ffsr_left > 3) {
          grip_left = false;
          break;
        }
      }
      nh.spinOnce();
      }
      else if (grip_right == true) {
        double Vfsr_right = 4.8*(1-analogRead(fsr_right_Pin)/1023);
        double Ffsr_right = 0.6546*pow(Vfsr_right,6)-
10.7085*pow(Vfsr_right,5)+70.2992*pow(Vfsr_right,4)-
237.4216*pow(Vfsr_right,3)+436.2844*pow(Vfsr_right,2)-415.8874*Vfsr_right+162.9366;

        fsr_right_Force.data = Ffsr_right;
        fsr_right_pub.publish(&fsr_right_Force);

        for (int pos = 90; pos = 180; pos++) {
        right_gripper.write(pos);
        if (Ffsr_right > 3) {
          grip_right = false;
          break;
        }
      }
      nh.spinOnce();
      }
    }
```

2. Ο κώδικας MATLAB που χρησιμοποιήθηκε για τη χρήση της μεθόδου SIMPLEX στα πειράματα.

```
clear
clc

%thruster max thrust
f1 = 0.221;
f2 = 0.206;
f3 = 0.191;
f4 = 0.202;
f5 = 0.239;
f6 = 0.231;

% set movement duration and distance
```

```
duration = 20;
distance_x = 1.0;
distance_y = 1.0;
% Connect to ROS master and create publisher
rosinit("http://192.168.1.107:11311");
thrust_pub = rospublisher("/thruster_controller",
"std_msgs/Float64MultiArray");
yaw_sub = rossubscriber("/map_to_cassiopeia",
"geometry_msgs/TransformStamped");

thb_deg = 0;                            %base angle in
degrees
thb = thb_deg*pi/180;                   %base angle in
radians
th_dot_init = 0;                      %initial angular
velocity of RW

x_double_dot_desired = 2*(distance_x/2)/(duration/2)^2;
%desired acceleration at x-axes
y_double_dot_desired = 2*(distance_y/2)/(duration/2)^2;
%desired acceleration at x-axes
th_double_dot_desired = 0.0;     %desired angular
acceleration

mr = 15;                   %robot mass in kg
R = 0.15;                    %base radius in m
Ir = 0.12;                   %robot moment of inertia
Irw = 0.013;                 %RW moment of inertia
thrust_max = 0.75;            %max thrust from thrusters
in N

Tpwm = 0.1;                  %pwm period in s
Trw_max = 0.0882;            %max motor torque in Nm

%set constraints, boundaries and objective function
Aeq = [f1*sin(1.047-thb)/mr -f2*sin(1.047-thb)/mr
f3*sin(thb)/mr -f4*sin(thb)/mr f5*sin(1.047+thb)/mr -
f6*sin(1.047+thb)/mr 0;
   f1*cos(1.047-thb)/mr -f2*cos(1.047-thb)/mr -
f3*cos(thb)/mr f4*cos(thb)/mr -f5*cos(1.047+thb)/mr
f6*cos(1.047+thb)/mr 0;
   f1*R/Ir -f2*R/Ir f3*R/Ir -f4*R/Ir -f5*R/Ir f6*R/Ir
1/Ir];
beq = [x_double_dot_desired y_double_dot_desired
th_double_dot_desired];
```

```
%transform linear programming problem to add integer
constraints
M = [0.08*eye(7), eye(7)];
M(7,7)=0;

A=[eye(7)*(-0.87), eye(7)];
b= [zeros(6,1);Trw_max];
if (th_double_dot_desired~=0 && x_double_dot_desired==0
&& y_double_dot_desired==0)
    A=[];
    b=[];
end

Aeq_new = Aeq*M;
lb = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -Trw_max];
ub = [1 1 1 1 1 1 0 0.87 0.87 0.87 0.87 0.87 0.87
Trw_max];
f = [1 1 1 1 1 1 0];
f_new = f*M;
intcon = [1:7];

[x,favl] = intlinprog(f_new,intcon,A,b,Aeq_new,beq,lb,ub)
xvector = x;
for i=1:7
    z(i) = xvector(i)*0.08+xvector(7+i);
end
z
minval = sum(z(1:6))
z_new = z;
z_new(7) = z(7)*10/0.0882;
z_new

%Create and send ROS message
msg = rosmessage(thrust_pub);
msg.Data = z_new;
send(thrust_pub,msg);

q_dot_max_rpm = abs(8.33*z(7)*1000); %max motor angular
velocity for continuous torque
q_dot_max = 2*pi*q_dot_max_rpm/60;
t_max = abs(Irw*(q_dot_max-th_dot_init)/z(7)); %max time
that the motor can provide continuously

pause(duration/2); %Publish the message for half the
movement's duration
```

```
%Replace desired acceleration with opposite values
(triangular speed profile)
beq = [-x_double_dot_desired -y_double_dot_desired -
th_double_dot_desired];
[x,favl] = intlinprog(f_new,intcon,A,b,Aeq_new,beq,lb,ub)
xvector = x;
for i=1:7
    z(i) = xvector(i)*0.08+xvector(7+i);
end
z
minval = sum(z(1:6))
z_new = z;
z_new(7) = z(7)*10/0.0882;
z_new

%Send new ROS message
msg = rosmessage(thrust_pub);
msg.Data = z_new;
send(thrust_pub,msg);

pause(duration/2); %Publish the message for half the
movement's duration

%End movement with zero commands
z_new = [0 0 0 0 0 0 0];
msg = rosmessage(thrust_pub);
msg.Data = z_new;
send(thrust_pub,msg);

%Terminate communication with ROS Master
rosshutdown

q_dot_max_rpm = abs(8.33*z(7)*1000); %max motor angular
velocity for continuous torque
q_dot_max = 2*pi*q_dot_max_rpm/60;
t_max = abs(Irw*(q_dot_max-th_dot_init)/z(7)); %max time
that the motor can provide continuously the needed torque

q_dot = z(7)*duration/Irw + th_dot_init; %motor angular
velocity at the end of movement
```

Παράρτημα Β - PC104 Specs

Το PC104 του ρομπότ αποτελείται από 6 κάρτες και έναν σκληρό δίσκο SSD.

➢ CPU

Αυτή τη στιγμή στο ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή η single board του PC104 είναι τύπου PC/104-plus που σημαίνει ότι εκτός από το ISA bus, έχει και PCI bus connector, (model: PCM-3362 PC/104-plus SBC). Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) του PC104 είναι Intel Atom N450 processor (up to 1.67 GHz) (1 core) (Model: PCM-3362N-S6A1E), τα χαρακτηριστικά της οποίας είναι:

• Clock Speed: up to 1.67 GHz
• 512kB L2 Cache
• TDP: 5.5W
• Max Memory Size: 2 GB
• Memory Types: DDR2 667

➢ Power Supply Board

Μια από τις βασικότερες κάρτες της μονάδας είναι η Power Supply board, η οποία ουσιαστικά αποτελεί έναν DC/DC Converter ο οποίος παρέχει στο PC την τάση που χρειάζεται για να λειτουργήσει. Το υπάρχον board είναι της εταιρίας Tri-M, μοντέλο HE104 75W και δέχεται είσοδο 6-40VDC ενώ σαν εξόδους δίνει +5, +12 και -12VDC. Η PSU βρίσκεται πάνω σε μια PC/104 card, πράγμα που σημαίνει πως είναι συμβατή τόσο με PC/104 όσο και με PC/104-plus.

➢ Incremental Encoder cards

Το ρομπότ διαθέτει δύο κάρτες για να διαβάζει encoders. Οι κάρτες αυτές είναι της εταιρίας RTD, μοντέλο DM6914 HR και είναι και αυτές τοποθετημένες σε κάρτα PC/104. Κάθε κάρτα έχει τρεις 16-bit incremental encoder up/down counters, τρεις 16-bit timer/counters και on-board 8 MHz clock.

➢ Κάρτα Ψηφιο-αναλογικού μετατροπέα (DAC)

Η κάρτα που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των κινητήρων και των σερβοβαλβίδων. Είναι της εταιρίας RTD, μοντέλο DM6604, η οποία ομοίως με τις προηγούμενες κάρτες είναι τύπου PC/104 και άρα συμβατή με PC/104 και PC/104-plus.

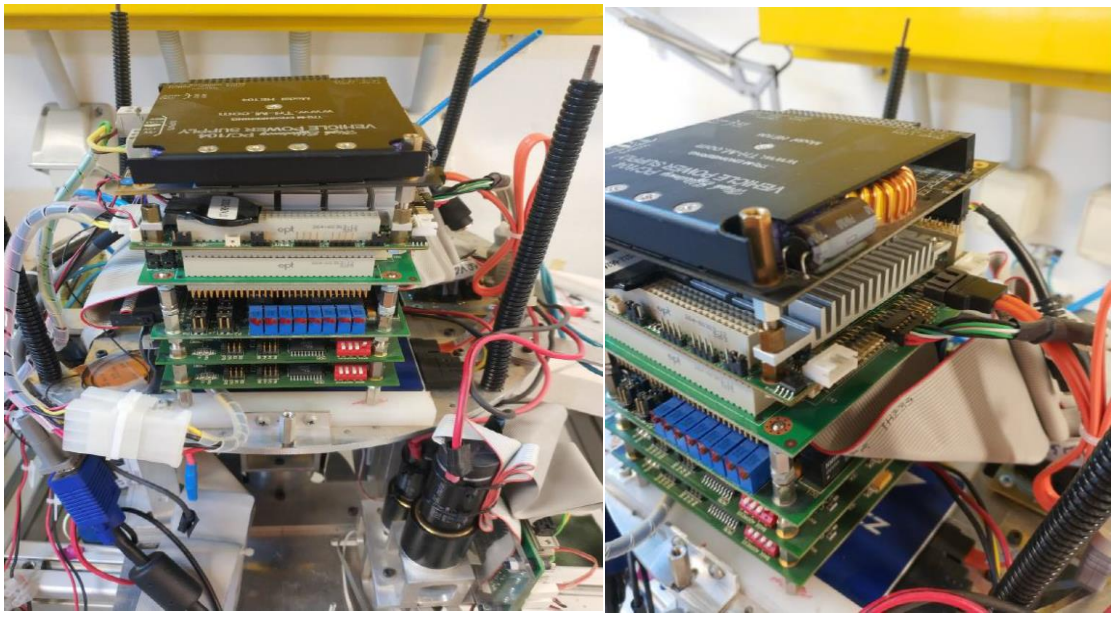
➢ Κάρτα Δικτύου

Στη μονάδα υπάρχει κάρτα τύπου PC/104-plus, μοντέλο PCM-3116 η οποία περιέχει δυο υποδοχές mini PCI. Στην κάρτα αυτή είναι τοποθετημένη η κάρτα δικτύου (WM3210 802.11 a/b/g Wireless LAN Mini PCI Card).

➢ Σκληρός Δίσκος

OCZ ARC 100 120GB SSD ο οποίος συνδέεται με τη CPU board μέσω καλωδίου SATA.

Στο Σχήμα 1 φαίνεται εγκατεστημένο στο ρομπότ το stack του PC104. Από πάνω προς τα κάτω φαίνονται, η power supply unit, η CPU, η κάρτα δικτύου, η κάρτα DAC, οι δύο Incremental encoder cards και ο σκληρός δίσκος.



Σχήμα Β 1 Το PC104 του ρομπότ.

Παράρτημα C - Εγχειρίδια Προδιαγραφών Harware

INTERLINK ELECTRONICS
Sensor Technologies

FSR 400 Data Sheet

FSR 400 Series Round Force Sensing Resistor

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; 0.35mm
- 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 400 sensor is a round sensor 7.62mm 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 - Typical Force Curve

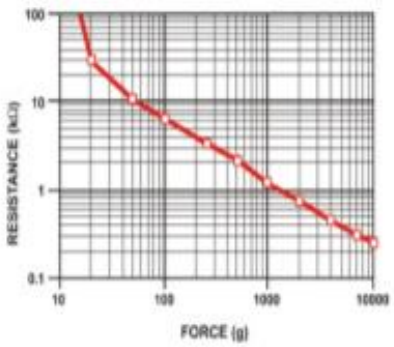
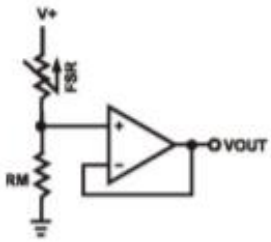


Figure 2 - Typical Schematic



Interlink Electronics - Sensor Technologies

www.interlinkelectronics.com

INTERLINK ELECTRONICS
Sensor Technologies

FSR 400
P/N: 30-49649

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		7.62mm 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%	$(R_{F+} - R_{F-})/R_{F+}$
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.

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:

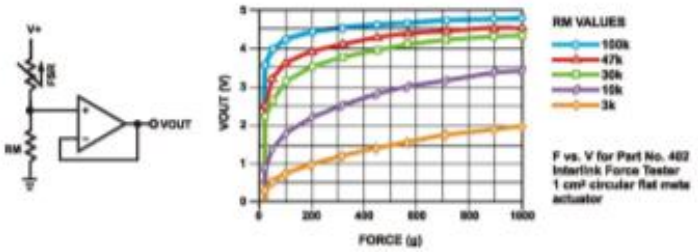
$$V_{OUT} = \frac{R_M V +}{(R_M + R_{FSR})}$$

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



Contact Us

United States
Corporate Offices
Interlink Electronics, Inc.
546 Flynn Road
Camarillo, CA 93012, USA
Phone: +1-805-484-8855
Fax: +1-805-484-9457
Web: www.interlinkelectronics.com
Sales and support:
fsr@interlinkelectronics.com

Japan
Japan Sales Office
Phone: +81-45-263-6500
Fax: +81-45-263-6501
Web: www.interlinkelec.co.jp

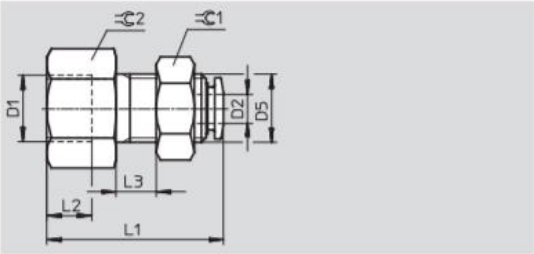
Korea
Korea Sales Office
Phone: +82 10 8776 1972

Push-in fittings QS-F, Quick Star, metal

Technical data

FESTO

Push-in bulkhead connector QSSF-F
with female thread



Dimensions and ordering data												
Connection D1	Nominal size [mm]	Tubing O.D. D2	D5 ∅	L1	L2	L3 max.	⇔1	⇔2	Weight/ piece [g]	Part No.	Type	PU*
G thread												
G⅛	3	4	M10x1	25.5	6.5	6.6	13	15	19.7	**533919**	**QSSF-F-G⅛-4**	**10**
	5	6	M14x1	26.8	6.5	6.6	17	15	27.8	**533920**	**QSSF-F-G⅛-6**	**10**
	7	8	M16x1	29	6.5	6.6	19	17	38.4	**533922**	**QSSF-F-G⅛-8**	**10**
G¼	5	6	M14x1	31.3	10	6.6	17	17	38.3	**533921**	**QSSF-F-G¼-6**	**10**
	7	8	M16x1	33.5	10	6.6	19	17	39.6	**533923**	**QSSF-F-G¼-8**	**10**

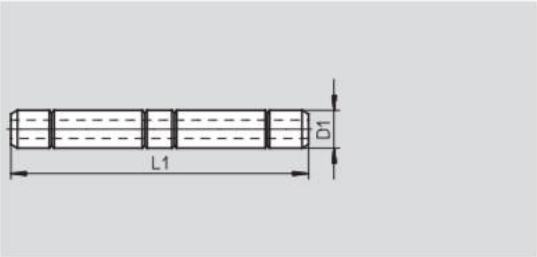
* Packaging unit quantity

Push-in fittings QS-F, Quick Star, metal

Technical data

FESTO

Push-in sleeve QSH-F

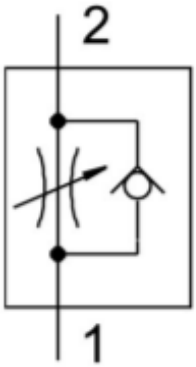


Dimensions and ordering data								
Push-in sleeve ∅ D1	Nominal size [mm]	Push-in sleeve ∅ D2	L1	L2	Weight/piece [g]	Part No.	Type	PU*
4	2	–	33.4	–	2.8	**533890**	**QSH-F-4**	**10**
6	4	–	39	–	4.8	**533891**	**QSH-F-6**	**10**
8	6	–	42	–	8.6	**533892**	**QSH-F-8**	**10**
10	8	–	48	–	10.9	**533893**	**QSH-F-10**	**10**
12	10	–	50	–	14.1	**533894**	**QSH-F-12**	**10**
14	12	–	55	–	28.0	**570439**	**QSH-F-14**	**1**

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

Part number: 193156

FESTO



Data sheet

Feature	Value
Valve function	Supply air flow control non-return function
Pneumatic connection 1	QS-3
Pneumatic connection 2	G1/8
Adjusting element	Slotted screw
Type of mounting	Screw-in
Standard nominal flow rate in flow control direction	130 l/min
Standard nominal flow rate in non-return direction	100 l/min ... 130 l/min
Ambient temperature	-10 °C ... 60 °C
Maritime classification	See certificate
Mounting position	Any
Symbol	00991453
Operating pressure for entire temperature range	0.2 bar ... 10 bar
Standard flow rate in flow control direction 6 -> 0 bar	200 l/min
Standard flow rate in non-return direction at 6 -> 0 bar	180 l/min ... 200 l/min
Operating medium	Compressed air as per ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Information on operating and pilot media	Operation with oil lubrication possible (required for further use)
Temperature of medium	-10 °C ... 60 °C
Nominal tightening torque	3 Nm
Tolerance for nominal tightening torque	± 10%
Product weight	22 g
Material of screwed trunnion	Wrought aluminum alloy
Note on materials	RoHS-compliant
Seals material	NBR
Releasing ring material	POM
Material of adjusting screw	Brass
Swivel joint material	Die-cast zinc Chromated

ServoDatabase.com

Servo Specifications and Reviews

All Servos Brands Compare (0)

Custom Search Advanced Search

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 µs
Connector Type:	(add)

,

ServoDatabase.com

Servo Specifications and Reviews

All Servos Brands Compare (0)

Custom Search Advanced Search

Servo Database / FeeTech Servos / FS5106M

FeeTech FS5106M - Metal Gear Servo

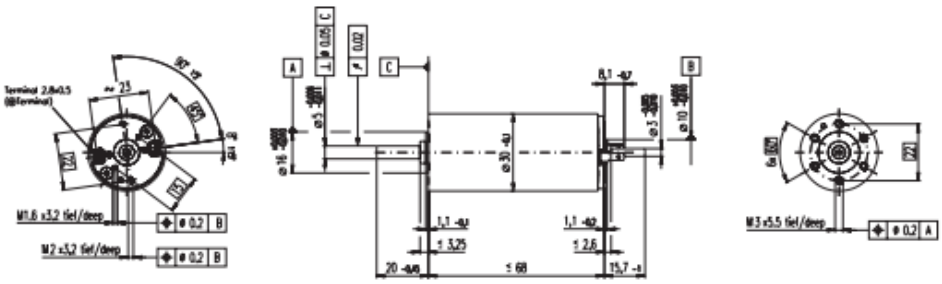
Specifications

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 µs
Connector Type:	(add)

- Σφόνδυλος Αντίδρασης

maxon DC motor

RE 30 ∅30 mm, Graphite Brushes, 60 Watt



M 1:2

Stock program
Standard program
Special program (on request)

	Order Number				
according to dimensional drawing	310005	310006	310007	310008	310009
shaft length 15.7 shortened to 8.7 mm	268193	268213	268214	268215	268216
Motor Data					
Values at nominal voltage					
1 Nominal voltage V	12.0	18.0	24.0	36.0	48.0
2 No load speed rpm	8170	8590	8810	8590	8490
3 No load current mA	300	212	164	106	78.5
4 Nominal speed rpm	7630	7900	8050	7810	7750
5 Nominal torque (max. continuous torque) mNm	51.7	75.5	85.0	83.4	88.2
6 Nominal current (max. continuous current) A	4.00	4.00	3.44	2.20	1.72
7 Stall torque mNm	844	991	1020	936	1020
8 Starting current A	60.5	49.8	39.3	23.5	19.0
9 Max. efficiency %	86	87	87	87	88
Characteristics					
10 Terminal resistance Ω	0.198	0.362	0.611	1.53	2.52
11 Terminal inductance mH	0.0345	0.0703	0.119	0.281	0.513
12 Torque constant mNm / A	13.9	19.9	25.9	39.8	53.8
13 Speed constant rpm / V	685	479	369	240	178
14 Speed / torque gradient rpm / mNm	9.74	8.71	8.69	9.22	8.33
15 Mechanical time constant ms	3.42	3.25	3.03	3.17	3.01
16 Rotor inertia gcm²	33.5	35.7	33.3	32.9	34.5

Specifications

Thermal data

17	Thermal resistance housing-ambient	6.0 K / W
18	Thermal resistance winding-housing	1.7 K / W
19	Thermal time constant winding	16.2 s
20	Thermal time constant motor	714 s
21	Ambient temperature	-20 ... +100°C
22	Max. permissible winding temperature	+125°C

Mechanical data (ball bearings)

23	Max. permissible speed	12000 rpm
24	Axial play	0.05 - 0.15 mm
25	Radial play	0.025 mm
26	Max. axial load (dynamic)	5.6 N
27	Max. force for press fits (static)	110 N
	(static, shaft supported)	1200 N
28	Max. radial loading, 5 mm from flange	28 N

Other specifications

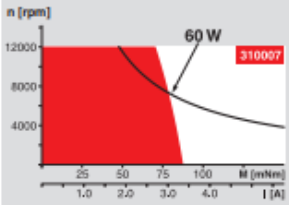
29	Number of pole pairs	1
30	Number of commutator segments	13
31	Weight of motor	238 g

Values listed in the table are nominal.
Explanation of the figures on page 47.

⚠ Tolerances may vary from the standard specification.

Option
Preloaded ball bearings

Operating Range



Comments

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

Short term operation
The motor may be briefly overloaded (recurring).

Assigned power rating

maxon Modular System

Overview on page 16 - 21

Planetary Gearhead
∅32 mm
0.75 - 4.5 Nm
Page 230

Planetary Gearhead
∅32 mm
1.0 - 6.0 Nm
Page 231

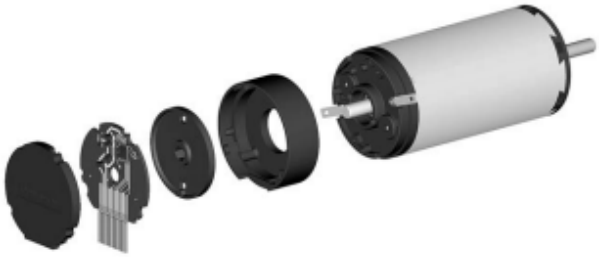
Encoder MR
256 - 1024 CPT
3 channels
Page 251

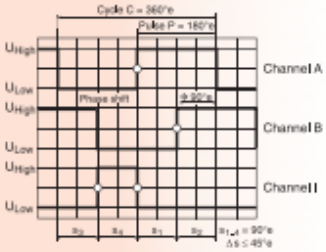
Recommended Electronics:

ADS 50/5	Page 268
ADS_E 50/5	269
EPOS 24/5	286
EPOS P 24/5	287
MIP 50	289
Notes	**18**

May 2007 edition / subject to change

Encoder MR, Type L, 256 - 1024 CPT, 3 Channels, with Line Driver





Stock program
Standard program
Special program (on request)

Order Number	225783	228452	225785	228456	225787
Type					
Counts per turn	256	500	512	1000	1024
Number of channels	3	3	3	3	3
Max. operating frequency (kHz)	80	200	160	200	320

Combination

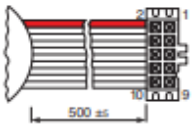
+ Motor	Page	+ Gearhead	Page	+ Brake	Page	Overall length [mm] / ●see: + Gearhead				
RE 30, 60 W	80					79.4	79.4	79.4	79.4	79.4
RE 30, 60 W	80	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	230/231			●	●	●	●	●
RE 35, 90 W	81					82.3	82.3	82.3	82.3	82.3
RE 35, 90 W	81	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	230/231			●	●	●	●	●
RE 35, 90 W	81	GP 32, 8 Nm	233			●	●	●	●	●
RE 35, 90 W	81	GP 42, 3 - 15 Nm	235			●	●	●	●	●
RE 36, 70 W	82					82.6	82.6	82.6	82.6	82.6
RE 36, 70 W	82	GP 32, 0.4 - 2.0 Nm	228			●	●	●	●	●
RE 36, 70 W	82	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	230/231			●	●	●	●	●
RE 36, 70 W	82	GP 42, 3 - 15 Nm	235			●	●	●	●	●
RE 40, 150 W	83					82.4	82.4	82.4	82.4	82.4
RE 40, 150 W	83	GP 42, 3 - 15 Nm	235			●	●	●	●	●
RE 40, 150 W	83	GP 52, 4 - 30 Nm	238			●	●	●	●	●
A-max 32	122/124					72.7	72.7	72.7	72.7	72.7
A-max 32	122/124	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	230/232			●	●	●	●	●
A-max 32	122/124	GS 38, 0.1 - 0.6 Nm	234			●	●	●	●	●
EC-max 40, 70 W	178						73.9		73.9	
EC-max 40, 70 W	178	GP 42, 3 - 15 Nm	236				●		●	
EC-max 40, 120 W	179						103.9		103.9	
EC-max 40, 120 W	179	GP 52, 4 - 30 Nm	239				●		●	

Technical Data

Supply voltage	5 V ± 5 %
Output signal	TTL compatible
Index pulse width (nominal)	90°e ± 45°e
Operating temperature range	-25 ... +85°C
Moment of inertia of code wheel	≈ 1.7 gcm²
Output current per channel	max. 5 mA

The index signal I is synchronised with channel A or B.

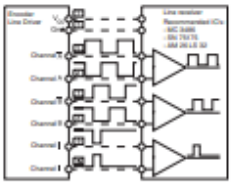
Pin Allocation



1 N.C.
2 V_{CC}
3 GND
4 N.C.
5 Channel $\overline{A}$
6 Channel A
7 Channel $\overline{B}$
8 Channel B
9 Channel $\overline{I}$ (Index)
10 Channel I (Index)

DIN Connector 41651
flat band cable AWG 28

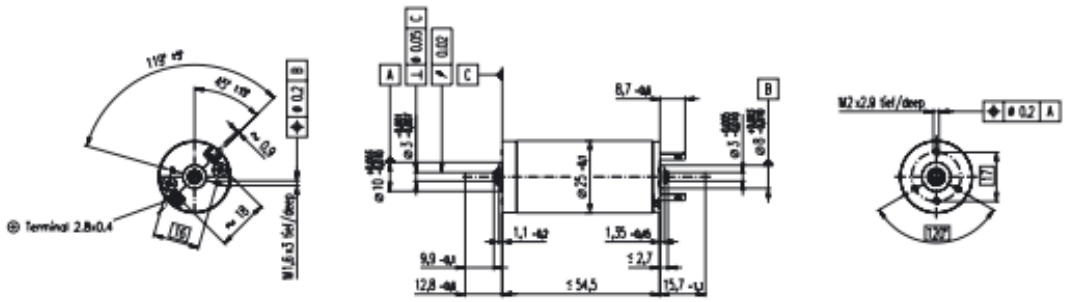
Connection example



- Βραχίονες

RE 25 ∅25 mm, Precious Metal Brushes CLL, 10 Watt, CE approved

maxon DC motor



Stock program
Standard program
Special program (on request)

Order Number

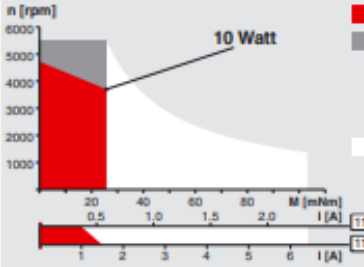
			118740	118741	118742	118743	118744	118745	118746	118747	118748
Motor Data											
1	Assigned power rating	W	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
2	Nominal voltage	Volt	4.5	8.0	9.0	12.0	15.0	18.0	24.0	32.0	48.0
3	No load speed	rpm	5370	5330	5240	4860	4990	4790	5200	5530	5090
4	Stall torque	mNm	131	132	119	129	131	126	136	144	132
5	Speed / torque gradient	rpm / mNm	41.1	40.6	44.2	37.9	38.4	38.4	38.4	38.6	38.7
6	No load current	mA	80	45	39	26	22	17	14	12	7
7	Starting current	mA	16500	9230	7310	5500	4570	3520	3100	2610	1470
8	Terminal resistance	Ohm	0.273	0.867	1.23	2.18	3.28	5.11	7.73	12.3	32.6
9	Max. permissible speed	rpm	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500
10	Max. continuous current	mA	1500	1500	1500	1250	1020	815	662	526	322
11	Max. continuous torque	mNm	12.0	21.4	24.5	29.3	29.1	29.1	29.0	28.9	28.9
12	Max. power output at nominal voltage	mW	18400	18300	16300	16400	17000	15700	18500	20700	17500
13	Max. efficiency	%	87	87	86	87	87	87	87	87	87
14	Torque constant	mNm / A	7.97	14.3	16.3	23.4	28.5	35.7	43.8	55.0	89.7
15	Speed constant	rpm / V	1200	669	585	407	335	268	218	173	106
16	Mechanical time constant	ms	5	4	4	4	4	4	4	4	4
17	Rotor inertia	gcm²	11.3	10.00	9.11	10.3	10.1	10.1	10.00	9.96	9.91
18	Terminal inductance	mH	0.03	0.09	0.12	0.24	0.35	0.55	0.83	1.31	3.48
19	Thermal resistance housing-ambient	K / W	14	14	14	14	14	14	14	14	14
20	Thermal resistance rotor-housing	K / W	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
21	Thermal time constant winding	s	13	11	10	12	12	12	12	11	11

Specifications

- Axial play 0.05 - 0.15 mm
- Max. **ball bearing** loads
  axial (dynamic)
  not preloaded 3.2 N
  preloaded 3.2 N
  radial (5 mm from flange) 16 N
  Force for press fits (static) 64 N
  (static, shaft supported) 270 N
- Radial play **ball bearing** 0.025 mm
- Ambient temperature range -20 ... +85°C
- Max. rotor temperature +100°C
- Number of commutator segments 11
- Weight of motor 130 g
- 2 pole permanent magnet
- Values listed in the table are nominal.
  For applicable tolerances see page 43.
  For additional details please use the maxon selection program on the enclosed CD-ROM.
- CLL = Capacitor Long Life

Operating Range

Comments Details on page 49



Recommended operating range

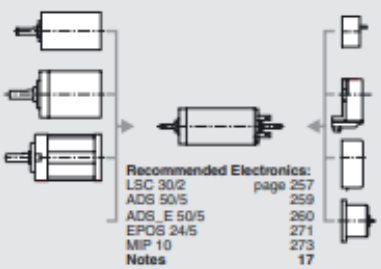
Continuous operation
In observation of above listed thermal resistances (lines 19 and 20) the maximum permissible rotor temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.

Short term operation
The motor may be briefly overloaded (recurring).

118748 Motor with high resistance winding
118740 Motor with low resistance winding

maxon Modular System

Overview on page 17 - 21



Planetary Gearhead
∅26 mm
0.5 - 2.0 Nm
Details page 216

Planetary Gearhead
∅32 mm
0.75 - 6.0 Nm
Details page 218 / 220

Planetary Gearhead
∅32 mm
0.4 - 2.0 Nm
Details page 222

Recommended Electronics:
LSC 30/2 page 257
ADS 50/5 259
ADS_E 50/5 260
EPOS 24/5 271
MIP 10 273
Notes 17

Encoder MR
128 - 1000 CPT,
3 channels
Details page 238

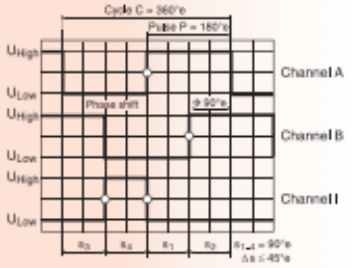
Encoder Enc
∅22 mm
100 CPT, 2 channels
Details page 240

Encoder HED_ 5540
500 CPT,
3 channels
Details page 242 / 244

DC-Tacho DCT
∅22 mm
0.52 V
Details page 252

maxon tacho

Encoder MR, Type ML, 128 - 1000 CTP, 3 Channels, with Line Driver



Stock program
Standard program
Special program (on request)

Order Number	225771	225773	225778	225805	225780
Type					
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

Combination

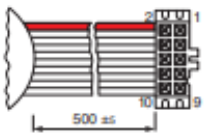
+ Motor	Page	+ Gearhead	Page	+ Brake	Page	Overall length [mm] / • see: + Gearhead				
RE 25	76 / 78					65.5	65.5	65.5	65.5	65.5
RE 25	76 / 78	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	226			•	•	•	•	•
RE 25	76 / 78	GP 32, 0.4 - 6.0 Nm	228-232			•	•	•	•	•
RE 26, 18 W	79					69.8	69.8	69.8	69.8	69.8
RE 26, 18 W	79	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	226			•	•	•	•	•
RE 26, 18 W	79	GP 32, 0.4 - 6.0Nm	228-232			•	•	•	•	•
A-max 26	114-120					53.5	53.5	53.5	53.5	53.5
A-max 26	114-120	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	226			•	•	•	•	•
A-max 26	114-120	GS 30, 0.07 - 0.2 Nm	228			•	•	•	•	•
A-max 26	114-120	GP 32, 0.4 - 6.0 Nm	228-232			•	•	•	•	•
A-max 26	114-120	GS 38, 0.1 - 0.6 Nm	234			•	•	•	•	•
RE-max 29	144/146					53.5	53.5	53.5	53.5	53.5
RE-max 29	144/146	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	226			•	•	•	•	•
RE-max 29	144/146	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	229-232			•	•	•	•	•
EC-max 30, 40 W	176							54.2		54.2
EC-max 30, 40 W	176	GP 32, 1 - 6 Nm	232					•		•
EC-max 30, 60 W	177							76.2		76.2
EC-max 30, 60 W	177	GP 32, 1 - 6 Nm	236					•		•
EC-powermax 30	185							59.2		59.2
EC-powermax 30	185	GP 32, 8 Nm	233					•		•
EC-powermax 30	185	GP 42, 3 - 15 Nm	232					•		•
EC-powermax 30	186							76.2		76.2
EC-powermax 30	186	GP 32, 8 Nm	233					•		•
EC-powermax 30	186	GP 42, 3 - 15 Nm	236					•		•

Technical Data

Supply voltage V_{CC}	5 V ± 5 %
Output signal	TTL compatible
Index pulse width (nominal)	90°e ± 45°e
Operating temperature range	-25 ... +85°C
Moment of inertia of code wheel	≈ 0.7 gcm²
Output current per channel	max. 5 mA

The index signal I is synchronised with channel A or B.

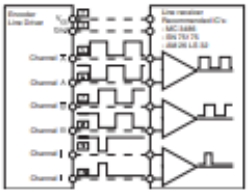
Pin Allocation



1 N.C.
2 V_{CC}
3 GND
4 N.C.
5 Channel $\overline{A}$
6 Channel A
7 Channel $\overline{B}$
8 Channel B
9 Channel $\overline{I}$ (Index)
10 Channel I (Index)

DIN Connector 41651
flat band cable AWG 28

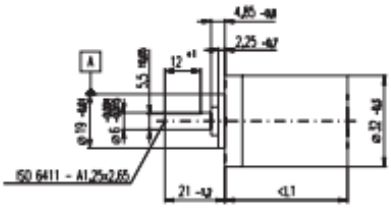
Connection example

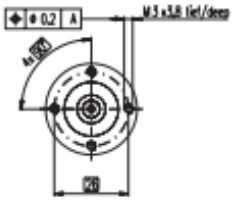


May 2007 edition / subject to change

Planetary Gearhead GP 32 A ∅32 mm, 0.75 - 4.5 Nm

Metal Version





M 1:2

Technical Data

Planetary Gearhead	straight teeth
Output shaft	stainless steel
Shaft diameter as option	8 mm
Bearing at output	ball bearing
Radial play, 5 mm from flange	max. 0.14 mm
Axial play	max. 0.4 mm
Max. radial load, 10 mm from flange	140 N
Max. permissible axial load	120 N
Max. permissible force for press fits	120 N
Sense of rotation, drive to output	=
Recommended input speed	< 6000 rpm
Recommended temperature range	-20 ... +100°C
Extended area as option	-35 ... +100°C

Option: Low-noise version

Stock program
Standard program
Special program (on request)

		Order Number											
		166155	166158	166163	166164	166169	166174	166179	166184	166187	166192	166197	166202
Gearhead Data													
1 Reduction		3.7 : 1	14 : 1	33 : 1	51 : 1	111 : 1	246 : 1	492 : 1	762 : 1	1181 : 1	1972 : 1	2829 : 1	4380 : 1
2 Reduction absolute		26/7	676/49	529/16	17576/343	13824/125	421824/1715	86112/175	19044/25	1033776/875	4826176/2401	495144/175	109503/25
3 Max. motor shaft diameter	mm	6	6	3	6	4	4	3	3	4	4	3	3
Order Number		166156	166159		166165	166170	166175	166180	166185	166188	166193	166198	166203
1 Reduction		4.8 : 1	18 : 1		66 : 1	123 : 1	295 : 1	531 : 1	913 : 1	1414 : 1	2189 : 1	3052 : 1	5247 : 1
2 Reduction absolute		24/5	624/35		16224/245	6877/56	101062/343	331776/625	36501/40	2028888/1715	5364864/2401	1907712/625	838623/160
3 Max. motor shaft diameter	mm	4	4		4	3	3	4	3	3	3	3	3
Order Number		166157	166160		166166	166171	166176	166181	166186	166189	166194	166199	166204
1 Reduction		5.8 : 1	21 : 1		79 : 1	132 : 1	318 : 1	589 : 1	1093 : 1	1526 : 1	2362 : 1	3389 : 1	6285 : 1
2 Reduction absolute		23/4	299/14		2887/49	2312/35	386374/1225	20631/35	2798841/2560	6348032/4125	2066688/875	474513/140	6336343/1024
3 Max. motor shaft diameter	mm	3	3		3	3	4	3	3	4	3	3	3
Order Number			166161		166167	166172	166177	166182		166190	166195	166200	
1 Reduction			23 : 1		86 : 1	159 : 1	411 : 1	636 : 1		1694 : 1	2548 : 1	3656 : 1	
2 Reduction absolute			576/25		14976/175	1587/10	359424/875	79488/125		1152013/686	1962624/3125	457856/125	
3 Max. motor shaft diameter	mm		4		4	3	4	3		3	4	3	
Order Number			166162		166168	166173	166178	166183		166191	166196	166201	
1 Reduction			28 : 1		103 : 1	190 : 1	456 : 1	706 : 1		1828 : 1	2623 : 1	4060 : 1	
2 Reduction absolute			1296/5		3888/35	12167/64	884031/1296	158171/224		2238912/1225	2058233/784	3437933/896	
3 Max. motor shaft diameter	mm		3		3	3	3	3		3	3	3	
4 Number of stages		1	2	2	3	3	4	4	4	5	5	5	5
5 Max. continuous torque	Nm	0.75	2.25	2.25	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
6 Intermittently permissible torque at gear output	Nm	1.1	3.4	3.4	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
7 Max. efficiency	%	80	75	75	70	70	60	60	60	50	50	50	50
8 Weight	g	118	162	162	194	194	226	226	226	258	258	258	258
9 Average backlash no load	°	0.7	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10 Mass inertia	gcm²	1.5	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
11 Gearhead length L1	mm	26.4	36.3	36.3	43.0	43.0	49.7	49.7	49.7	56.4	56.4	56.4	56.4

Combination

+ Motor	Page	+ Tacho / Brake	Page	Overall length [mm] = Motor length + gearhead length + (tacho / brake) + assembly parts											
RE 30, 60 W	80			94.5	104.4	104.4	111.1	111.1	117.8	117.8	117.8	124.5	124.5	124.5	124.5
RE 30, 60 W	80	MR	251	105.9	115.8	115.8	122.5	122.5	129.2	129.2	129.2	135.9	135.9	135.9	135.9
RE 35, 90 W	81			97.4	107.3	107.3	114.0	114.0	120.7	120.7	120.7	127.4	127.4	127.4	127.4
RE 35, 90 W	81	MR	251	108.8	118.7	118.7	125.4	125.4	132.1	132.1	132.1	138.8	138.8	138.8	138.8
RE 35, 90 W	81	HED_ 5540	254/256	118.4	128.3	128.3	135.0	135.0	141.7	141.7	141.7	148.4	148.4	148.4	148.4
RE 35, 90 W	81	DCT 22	263	115.5	125.4	125.4	132.1	132.1	138.8	138.8	138.8	145.5	145.5	145.5	145.5
RE 35, 90 W	81	AB 28	300	133.5	143.4	143.4	150.1	150.1	156.8	156.8	156.8	163.5	163.5	163.5	163.5
RE 35, 90 W	81	HEDS 5540 / AB 28	254/300	150.6	160.5	160.5	167.2	167.2	173.9	173.9	173.9	180.6	180.6	180.6	180.6
RE 36, 70 W	82			97.7	107.6	107.6	114.3	114.3	121.0	121.0	121.0	127.7	127.7	127.7	127.7
RE 36, 70 W	82	MR	251	109.1	119.0	119.0	125.7	125.7	132.4	132.4	132.4	139.1	139.1	139.1	139.1
RE 36, 70 W	82	HED_ 5540	254/256	118.7	128.6	128.6	135.3	135.3	142.0	142.0	142.0	148.7	148.7	148.7	148.7
RE 36, 70 W	82	DCT 22	263	115.8	125.7	125.7	132.4	132.4	139.1	139.1	139.1	145.8	145.8	145.8	145.8
A-max 32	121/123			89.4	99.3	99.3	106.0	106.0	112.7	112.7	112.7	119.4	119.4	119.4	119.4
A-max 32	122/124			88.0	97.9	97.9	104.6	104.6	111.3	111.3	111.3	118.0	118.0	118.0	118.0
A-max 32	122/124	MR	251	99.2	109.1	109.1	115.8	115.8	122.5	122.5	122.5	129.2	129.2	129.2	129.2
A-max 32	122/124	HED_ 5540	254/256	108.8	118.7	118.7	125.4	125.4	132.1	132.1	132.1	138.8	138.8	138.8	138.8
EC 32, 80 W	162			86.5	96.4	96.4	103.1	103.1	109.8	109.8	109.8	116.5	116.5	116.5	116.5
EC 32, 80 W	162	HED_ 5540	255/257	104.9	114.8	114.8	121.5	121.5	128.2	128.2	128.2	134.9	134.9	134.9	134.9
EC 32, 80 W	162	Res 26	264	106.6	116.5	116.5	123.2	123.2	129.9	129.9	129.9	136.6	136.6	136.6	136.6

May 2007 edition / subject to change

Παράρτημα D - Οδηγίες χρήσης Cassiopeia

Το ρομπότ χρειάζεται 3 μπαταρίες LiPo για τη λειτουργία του.

- Μία μπαταρία 7.4V (2S1P) η οποία τοποθετείται στην πλακέτα τροφοδοσίας στην υποδοχή που βρίσκεται στο πίσω μέρος του ρομπότ (PC104 και γενικά LV σύστημα).
- Δύο μπαταρίες 14.8V (4S1P) οι οποίες τοποθετούνται στις δύο υποδοχές μπροστά (για κινητήρες και thruster).

Η φιάλη CO_2 τοποθετείται στο πίσω μέρος του ρομπότ με χρήση regulator σε πίεση 6.5-7bar.

<u>Οδηγίες για χρήση μπαταριών</u>

Οι μπαταρίες φορτίζουν με τη χρήση του LiPo charger που βρίσκεται στο εργαστήριο. Για την μπαταρία των 7.4V χρησιμοποιείται το προφίλ 16 και για τις μπαταρίες 14.8V το προφίλ 20.

Οι μπαταρίες πρέπει να φορτίζονται πλήρως πριν από κάθε χρήση και να τοποθετούνται σε κατάσταση storage περίπου δηλαδή 60% της πλήρους φόρτισης, όταν θα μείνουν αχρησιμοποίητες για κάποιο διάστημα. Πρέπει να τηρείται ο κύκλος φόρτισης αλλιώς οι μπαταρίες φουσκώνουν, καταστρέφονται και μπορεί να είναι επικίνδυνο να χρησιμοποιηθούν.

Κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση στον charger πρέπει να συνδέονται οπωσδήποτε οι balancers. Για τις 4S χρησιμοποιείται ο balancer που βρίσκεται στον charger ενώ για τις 2S χρησιμοποιείται εξωτερικός.

<u>Οδηγίες για γέμισμα και αποθήκευση φιάλης CO_2</u>

Οι φιάλες αποθηκεύονται πάντα στην κατάψυξη, ώστε να μπορούν να αποθηκεύουν περισσότερο αέριο χωρίς να κινδυνεύουν από την υψηλή πίεση (50bar).

Για γέμισμα, χρησιμοποιείται το tank με το fill station στο ισόγειο του κτιρίου Μ. Η μπουκάλα βιδώνεται στο fill station, βεβαιωνόμαστε ότι η έξοδος προς το περιβάλλον είναι κλειστή, ανοίγουμε τη μπουκάλα και στη συνέχεια το tank και περιμένουμε να γεμίσει. Κλείνουμε το tank, τη μπουκάλα, ανοίγουμε με προσοχή την έξοδο για να εκτονωθεί η αποθηκευμένη πίεση και ξεβιδώνουμε.

<u>NOTE:</u> Πολλή προσοχή και χρήση γαντιών γιατί το αέριο βρίσκεται σε πίεση 50 bar και αποθηκεύεται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία.

<u>Έναρξη</u>

Στο ρομπότ υπάρχουν 3 διακόπτες:

- #1 ανοίγει το PC104 και γενικά το Low Voltage σύστημα
- #2 ανοίγει τους κινητήρες (βραχίονες και reaction wheel)
- #3 ανοίγει τα thruster

<u>NOTE:</u> για να ενεργοποιηθούν τα thruster πρέπει να έχουν ενεργοποιηθεί οι κινητήρες.

Σύνδεση του PC104 με οθόνη (θύρα VGA) και με ποντίκι πληκτρολόγιο (θύρα USB).

Username: ros

Password: free!

Μετά πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εντολή startx για ενεργοποίηση του GUI (γραφικό περιβάλλον).

Τερματισμός

Κλείνουμε πρώτα το PC104 με την εντολή sudo poweroff.

Στη συνέχεια κλείνουμε τους διακόπτες και αφαιρούμε τις μπαταρίες.

Remote Host

Για σύνδεση του ρομπότ με άλλο υπολογιστή χρησιμοποιείται στον άλλο υπολογιστή η εντολή: ssh ros@192.168.1.107

Η IP του ρομπότ έχει γίνει static και είναι πάντα η ίδια.

ROS

1. Σε terminal αρχικά χρησιμοποιείται η εντολή sudo -s (χρειάζονται δικαιώματα superuser για να τρέξουν εντολές που αφορούν κάρτες του PC104).
2. cd catkin_ws ώστε να μεταφερθούμε στο βασικό ROS workspace το οποίο έχει τα πακέτα του ρομπότ.
3. source intro.sh (Το script intro.sh είναι ένα bash script που περιέχει την εντολή source devel/setup.bash, που δηλώνει τις environmental variables και κάνει export τις IP που χρειάζονται για να στηθεί ένα ROS network)
4. Στο ROS package space_robot βρίσκονται οι κώδικες για τα ROS nodes του ρομπότ. Τα nodes ορίζονται στο CMakeLists.txt και μπορούν να εκτελεστούν ομαδικά από το .launch file στο launch directory.
5. Με την εντολή roscore ξεκινάει ένας ROS master node.

ROS Network

Η δυνατότητα του ρομπότ να χρησιμοποιεί κώδικες από διαφορετικούς υπολογιστές χάρη στη χρήση κοινού ROS master. Για να δημιουργηθεί ένα ROS network πρέπει να τρέχει σε **ένα**ν από τους υπολογιστές ένας ROS master (roscore) και να βρίσκονται συνδεδεμένοι στο ίδιο δίκτυο (πχ με ethernet ή WiFi).

Στη συνέχεια πρέπει όλοι οι υπολογιστές να «δηλώσουν» την IP του ROS master με το κατάλληλη port και την δική τους IP (βρίσκεται εύκολα με την εντολή ifconfig). Αυτό γίνεται με την εντολή export.

Πχ αν θέλουμε ο master να βρίσκεται στο ρομπότ και να χρησιμοποιηθούν nodes που τρέχουν σε άλλον υπολογιστή του εργαστηρίου με IP 192.168.1.109 πρέπει να γίνουν 2 πράγματα:

- Στο PC του ρομπότ:

export ROS_MASTER_URI=”http://192.168.1.107:11311”
export ROS_IP=”192.168.1.107”

- Στον άλλο υπολογιστή:

export ROS_MASTER_URI=”http://192.168.1.107:11311”
export ROS_IP=”192.168.1.109”