



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.

Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**Σχεδιασμός, κατασκευή και έλεγχος βασισμένος στην παθητική
δυναμική δίποδου υποεπενεργούμενου ρομπότ**

Σιμάτος Οδυσσέας

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2021

Περίληψη

Η μελέτη του δίποδου περπατήματος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό αντικείμενο έρευνας τόσο για τη βελτίωση των ανθρωπόμορφων ρομπότ όσο και για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για το ανθρώπινο περπάτημα. Έχει αναπτυχθεί πλήθος διαφορετικών δίποδων ρομπότ, κάθε ένα από τα οποία στοχεύει στη μοντελοποίηση και τη μελέτη κάποιου χαρακτηριστικού του ανθρώπινου περπατήματος.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας παρουσιάζεται ένα παθητικό ρομπότ που εκτελεί ευσταθή βηματισμό σε επίπεδο με κλίση υπό την επίδραση της βαρύτητας και ανακτώντας ενέργεια με ελαστικά στοιχεία που βρίσκονται τοποθετημένα στα σκέλη του. Με αφητηρία το παθητικό μοντέλο αναπτύσσεται ένα νέο ενεργητικό με την προσθήκη κινητήρων στα πόδια και ενός επιπλέον τμήματος, που παίζει το ρόλο του αντιβάρου για εξισορρόπηση της διαφοράς των ροπών των κινητήρων. Για το νέο μοντέλο αναπτύσσεται και πλήρης αναλυτική περιγραφή. Το ενεργητικό ρομπότ εκμεταλλεύεται την παθητική δυναμική και εκτελεί βηματισμό σε επίπεδα με διαφορετικές κλίσεις, με ελάχιστη κατανάλωση ισχύος.

Στη συνέχεια, δημιουργούνται προσομοιώσεις σε λογισμικά MATLAB και MSC Adams για τον έλεγχο της εγκυρότητας της μαθηματικής ανάλυσης των μοντέλων. Επιπλέον, μέσω των προσομοιώσεων επιλέγονται οι τελικές τιμές των σχεδιαστικών παραμέτρων του αντιβάρου για την επίτευξη ευσταθούς βάδισης, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας και μικρότερη κατανάλωση ισχύος.

Τις προσομοιώσεις ακολουθεί η κατασκευή του αντιβάρου, η επιλογή του κατάλληλου συστήματος επενέργειας και ο σχεδιασμός του ηλεκτρονικού συστήματος, το οποίο λαμβάνει τα δεδομένα του πειράματος και εφαρμόζει το νόμο ελέγχου. Η κατασκευή και η συναρμολόγηση πραγματοποιείται στα μηχανήματα του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ.

Τέλος, γίνονται τα πειράματα του περπατήματος σε ειδικά διαμορφωμένο δάπεδο εξαπτίας της απουσίας γονάτων στο μοντέλο. Από τα πειράματα καταγράφονται τα αποτελέσματα της βάδισης, συγκρίνονται με αυτά των προσομοιώσεων και προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα για τα δίποδα ρομπότ και τη δυναμική του βαδίσματός τους.

Abstract

The study of bipedal gait is a research field that is important for the improvement of anthropomorphic robots as well as to gain insight into human walking. Various biped robots have been developed, each of which aims to model and study different characteristics of human gait.

This study modifies a biped robot that performs stable passive walking on an inclined plane, to obtain a passivity-inspired active biped robot. For this reason, actuators are placed on the hips of the biped, and an extra counterweight link is added to counter the difference between the two motors' torques. The active exploits the passive dynamics of its design and walks on various different slopes, while minimizing the energetic cost. A mathematical model for this robot is defined analytically.

Furthermore, walking dynamics simulations are conducted in the commercial softwares MATLAB and MSC Adams in order to test the validity of the developed mathematical model. Through these simulations the final values of the robot's design parameters are selected, in order to achieve stable walking while maximizing the robot's robustness.

Following the simulations, the counterweight link is constructed and the original biped is modified. Additionally, the actuation scheme is selected and an electronics subsystem is developed to sample the experimental data and to apply the control law. The above parts' manufacture and assembly are performed in NTUA's Control Systems Lab.

Finally, the experiments are conducted in a custom ramp due to the absence of knees on the biped robot studied. Through these experiments the active robot's walking data are monitored and compared to the simulations' results, leading to useful conclusions regarding biped robots and their gait.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Περιεχόμενα	4
Κατάλογος Σχημάτων.....	7
Κατάλογος Πινάκων	11
1 Εισαγωγή.....	12
1.1 Σκοπός Εργασίας	12
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	12
1.3 Δομή εργασίας.....	14
2 Στοιχεία Θεωρίας	16
2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2 Ανθρώπινο Περπάτημα	16
2.3 Μοντέλο για το Παθητικό Περπάτημα	17
2.4 Ενεργητικό Μοντέλο	22
2.4.1 Μαθηματικό μοντέλο και σχεδιασμός για αντιστάθμιση βαρύτητας	22
2.4.2 Φαινόμενο backdrivability	26
2.5 Ευστάθεια Βηματισμού	27
2.6 Νόμος Ελέγχου.....	28
2.7 Αισθητήρες	29
2.7.1 Επιταχυνσιόμετρο	29
2.7.2 Γυροσκόπιο.....	30
2.7.3 Encoder.....	31
3 Προσομοίωση σε Προγραμματιστικό Περιβάλλον	33
3.1 Εισαγωγή.....	33
3.2 MATLAB	33
3.2.1 Το λογισμικό MATLAB.....	33
3.2.2 Προσαρμογές στο μηχανικό μοντέλο για αριθμητική επίλυση	37
3.2.3 Συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις στη MATLAB.....	37
3.3 MSC Adams	37
3.3.1 Το λογισμικό MSC Adams.....	37
3.3.2 Το φυσικό μοντέλο	40
3.4 Σύγκριση MATLAB και MSC Adams.....	42
3.4.1 Προγραμματιστικές Διαφορές	42
3.4.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων	44
3.5 Συμπεράσματα	47

4	Σχεδιασμός	48
4.1	Εισαγωγή	48
4.2	Μηχανικό Υποσύστημα	48
4.2.1	Παθητικό ρομπότ	48
4.2.2	Ενεργητικό Ρομπότ	52
4.3	Επιλογή Επενεργητών	64
4.3.1	Καθορισμός απαιτήσεων	64
4.3.2	Παρουσίαση επιλογών	67
4.4	Ηλεκτρονικό Υποσύστημα	70
4.4.1	Teensy 3.5	70
4.4.2	Motor Drive AZBDC10A4	73
4.4.3	Επιταχυνσιόμετρο και Γυροσκόπιο	73
4.4.4	Μπαταρία Lipo	74
4.4.5	DC – DC Μετατροπέας	75
4.4.6	Σύνδεση ηλεκτρονικού συστήματος	76
4.5	Τελική Διάταξη και Συμπεράσματα	79
5	Κατασκευή	81
5.1	Εισαγωγή	81
5.2	3D Printer	81
5.2.1	Τρόπος Λειτουργίας	81
5.2.2	Εκτύπωση Αντιβάρου	82
5.3	CNC κέντρο κατεργασιών	84
5.3.1	Τρόπος Λειτουργίας	84
5.3.2	Κατασκευή Βαριδίων Πελμάτων	85
5.3.3	Κοίλος άξονας Ισχύου	86
5.4	Τόρνος	88
5.4.1	Τρόπος Λειτουργίας	88
5.4.2	Άξονας ισχύου	88
5.5	Τελικό Συναρμολόγημα	89
5.6	Συμπεράσματα	90
6	Πειράματα και Αποτελέσματα	91
6.1	Εισαγωγή	91
6.2	Πειραματική Διάταξη	91
6.3	Προετοιμασία Πειράματος	92
6.3.1	Βαθμονόμηση και sensor fusion αισθητήρων	92
6.3.2	Διακριτοποίηση σήματος ροπής	94
6.3.3	Εντοπισμός στιγμής κρούσης	96
6.4	Συλλογή Ανεπεξέργαστων Δεδομένων	96
6.5	Πειραματικά Αποτελέσματα και Σύγκριση με Προσομοιώσεις	98
6.6	Συμπεράσματα	102

7	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	103
7.1	Εισαγωγή.....	103
7.2	Συμπεράσματα	103
7.3	Μελλοντική Εργασία	103
8	Βιβλιογραφία	105
	Παράρτημα Α	107

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1:	(A) Ρομπότ των Stopforth et al και (B) Ρομπότ Max των Wisse et al (δεξιά).	13
Σχήμα 1-2:	(A) Ρομπότ Lucy των Verrelst et al., (B) Ρομπότ των Van Ham et al.	14
Σχήμα 2-1:	Σχηματική αναπαράσταση των ορισμών μήκους βήματος (step length), μήκους διασκελισμού (stride length) και πλάτους βήματος (step width).	17
Σχήμα 2-2:	Αναπαράσταση παθητικού μοντέλου.	17
Σχήμα 2-3:	Απεικόνιση των γενικευμένων μεταβλητών του συστήματος.	18
Σχήμα 2-4:	Αναπαράσταση φάσης διπλής στήριξης του δίποδου μοντέλου.	21
Σχήμα 2-5:	Τελικός σχεδιασμός δίποδου ενεργητικού μοντέλου.	23
Σχήμα 2-6:	Φαινόμενο non-backdrivability σε συστήματα με μεγάλους λόγους μείωσης.	26
Σχήμα 2-7:	Απεικόνιση και τομές Poincaré.	28
Σχήμα 2-8:	Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιόμετρου.	30
Σχήμα 2-9:	Διάταξη οπτικού encoder και τρόπος λειτουργίας του.	31
Σχήμα 2-10:	Διάταξη μαγνητικού encoder.	32
Σχήμα 3-1:	Προγραμματιστικό περιβάλλον λογισμικού MATLAB.	33
Σχήμα 3-2:	Οπτική αναπαράσταση εκτέλεσης του προγράμματος στο λογισμικό MATLAB.	35
Σχήμα 3-3:	Εμφάνιση όλων των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα. .	36
Σχήμα 3-4:	Ένα τυπικό διάγραμμα που παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προγράμματος.	36
Σχήμα 3-5:	Προγραμματιστικό περιβάλλον λογισμικού MSC Adams.	38
Σχήμα 3-6:	Το περιβάλλον του λογισμικού MSC Adams κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του προγράμματος.	39
Σχήμα 3-7:	Τυπικό διάγραμμα που παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του προγράμματος σε MSC Adams για τη ροπή ενός ποδιού.	40
Σχήμα 3-8:	Τελικό μοντέλο σε λογισμικό MSC Adams.	40
Σχήμα 3-9:	Μοντελοποίηση της τριβής μεταξύ πελμάτων και εδάφους στο λογισμικό MSC Adams.	41
Σχήμα 3-10:	Τελικό μοντέλο του δίποδου ρομπότ και έδαφος με κατάλληλες παραμέτρους για την εκτέλεση του βαδίσματος σε λογισμικό MSC Adams. .	42
Σχήμα 3-11:	Διαγράμματα μεταβολής γωνίας δ συναρτήσει του χρόνου σε λογισμικό MATLAB (πορτοκαλί) και MSC Adams (μπλε).	44
Σχήμα 3-12:	Διαγράμματα μεταβολής γωνίας θ συναρτήσει του χρόνου σε λογισμικό MATLAB (πορτοκαλί) και MSC Adams (μπλε).	45
Σχήμα 3-13:	Διαγράμματα μεταβολής γωνίας ψ συναρτήσει του χρόνου σε λογισμικό MATLAB (πορτοκαλί) και MSC Adams (μπλε).	46
Σχήμα 3-14:	Διαγράμματα κατακόρυφης μετατόπισης του ισχίου συναρτήσει του χρόνου σε λογισμικό MATLAB (πορτοκαλί) και MSC Adams (μπλε).	46
Σχήμα 4-1:	Φωτορεαλιστική απεικόνιση παθητικού μοντέλου.	49

Σχήμα 4-2:	Φωτορεαλιστική απεικόνιση του εσωτερικού ποδιού και των μερών από τα οποία αποτελείται.....	50
Σχήμα 4-3:	Φωτορεαλιστική απεικόνιση του εξωτερικού ποδιού και των μερών από τα οποία αποτελείται.....	51
Σχήμα 4-4:	Φωτορεαλιστική απεικόνιση του ισχίου του δίποδου μοντέλου.....	51
Σχήμα 4-5:	Τομή του ισχίου του μοντέλου για την απεικόνιση της εσωτερικής γεωμετρίας.....	52
Σχήμα 4-6:	Τα επιμέρους εξαρτήματα του ισχίου του δίποδου μοντέλου.....	52
Σχήμα 4-7:	Προγραμματιστικό περιβάλλον λογισμικού Solidworks.....	53
Σχήμα 4-8:	Απεικονίσεις των τριών εναλλακτικών κατασκευαστικών λύσεων του αντιβάρου.....	54
Σχήμα 4-9:	Εσωτερικό αντιβάρου για εγκατάσταση του ηλεκτρονικού υποσυστήματος και της μπαταρίας.....	55
Σχήμα 4-10:	Κατασκευαστικό σχέδιο και γεωμετρικά χαρακτηριστικά εδράνου κύλισης....	55
Σχήμα 4-11:	Εναλλακτική 1: Υπάρχων άξονας μαζί με τους δύο κυλίνδρους που προτείνεται να τοποθετηθούν σύμφωνα πάνω με σφιχτή συναρμογή.....	57
Σχήμα 4-12:	Εναλλακτική 1: Συναρμολόγημα άξονα ισχίου μετά την προσθήκη επιπλέον υλικού.....	57
Σχήμα 4-13:	Εναλλακτική 1: Συναρμολόγημα άξονα ισχίου σε πλάγια όψη.....	58
Σχήμα 4-14:	Εναλλακτική 2: Κατασκευαστικό σχέδιο και γεωμετρικά χαρακτηριστικά εδράνου κύλισης.....	58
Σχήμα 4-15:	Εναλλακτική 2: Νέο συναρμολόγημα του άξονα του ισχίου.....	59
Σχήμα 4-16:	Εναλλακτική 2: Πλάγια όψη του συναρμολογήματος του άξονα του ισχίου... ..	59
Σχήμα 4-17:	Ειδικές εσοχές για την εισαγωγή stops για τη συγκράτηση των εδράνων κύλισης.....	60
Σχήμα 4-18:	Τελικός σχεδιασμός του άξονα του ισχίου.....	61
Σχήμα 4-19:	Φωτορεαλιστική απεικόνιση πελμάτων εσωτερικού και εξωτερικού ποδιού..	62
Σχήμα 4-20:	Εναλλακτική 1: Βαρύτερο πέλημα με αύξηση του συνολικού όγκου.....	62
Σχήμα 4-21:	Ένθετο βάρος πέλματος για αύξηση της μάζας των πελμάτων.....	63
Σχήμα 4-22:	Συναρμολόγημα πέλματος και βάρους.....	63
Σχήμα 4-23:	Τελικό μοντέλο με προσθήκη αντιβάρου και βαρύτερων πελμάτων.....	64
Σχήμα 4-24:	Διάγραμμα ροπής κινητήρα που είναι συνδεδεμένος με το πόδι στήριξης συναρτήσεως του χρόνου για τη περίπτωση της ανάβασης των 8°.....	65
Σχήμα 4-25:	Διάγραμμα ροπής κινητήρα που είναι συνδεδεμένος με το πόδι αιώρησης συναρτήσεως του χρόνου για τη περίπτωση της ανάβασης των 8°.....	65
Σχήμα 4-26:	Διάγραμμα στροφών των δύο ποδιών κατά τη διάρκεια του βηματισμού.....	66
Σχήμα 4-27:	Διάγραμμα ισχύος των ποδιών σε φάση στήριξης και αιώρησης κατά τη διάρκεια του βηματισμού.....	67
Σχήμα 4-28:	Περιβάλλον της ιστοσελίδας της Maxon.....	67
Σχήμα 4-29:	Επιλογή κινητήρα και εύρεση άλλων μερών συμβατών με τον κινητήρα.....	68
Σχήμα 4-30:	Κυριότερα χαρακτηριστικά του συστήματος επενέργειας που επιλέχθηκε... ..	68
Σχήμα 4-31:	Διάγραμμα Ροπής - Στροφών κινητήρα.....	70
Σχήμα 4-32:	Φωτογραφία του μικροελεγκτή Teensy 3.5.....	71

Σχήμα 4-33:	Διάγραμμα των λειτουργιών των pins του Teensy 3.5.	72
Σχήμα 4-34:	Προγραμματιστικό περιβάλλον της εφαρμογής Arduino IDE.....	72
Σχήμα 4-35:	Κουμπί για εμφάνιση σειριακής θύρας.....	73
Σχήμα 4-36:	Φωτογραφία του drive AZBDC10A4.....	73
Σχήμα 4-37:	Φωτογραφία της πλακέτας του επιταχυνσιόμετρου και γυροσκόπιου.	74
Σχήμα 4-38:	Μπαταρία Lipo Tattu R-Line 850mAh.....	75
Σχήμα 4-39:	Μετατροπέας τάσης DC - DC	75
Σχήμα 4-40:	Πίνακας των λειτουργιών των Pins του drive AZBDC10A4.	76
Σχήμα 4-41:	Drive AZBDC10A4 με τις θέσεις των P1 και P2 και την αρίθμησή τους.....	77
Σχήμα 4-42:	Διάγραμμα των Pins του επιταχυνσιόμετρου – γυροσκόπιου.....	77
Σχήμα 4-43:	Οι λειτουργίες και τα Pins των encoders ENX 10 EASY	78
Σχήμα 4-44:	Διάγραμμα τελικής σύνδεσης Teensy 3.5 με encoders και επιταχυνσιόμετρο – γυροσκόπιο.	78
Σχήμα 4-45:	Φωτογραφία του ηλεκτρονικού υποσυστήματος εντός του αντιβάρου.	79
Σχήμα 4-46:	Φωτογραφία του ηλεκτρονικού υποσυστήματος με τις κατάλληλες συνδέσεις εντός του αντιβάρου.....	79
Σχήμα 5-1:	3D Printer Stratasys uPrint SE Plus.	82
Σχήμα 5-2:	Πρώτο τμήμα αντιβάρου.....	83
Σχήμα 5-3:	Δεύτερο τμήμα αντιβάρου.....	83
Σχήμα 5-4:	Τρίτο τμήμα αντιβάρου.	84
Σχήμα 5-5:	CNC φρέζα Haas Mini Mill.....	85
Σχήμα 5-6:	Βαρίδιο πέλματος εντός της φρέζας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.....	86
Σχήμα 5-7:	Τελική μορφή των βαριδίων των πελμάτων.....	86
Σχήμα 5-8:	Κοίλος άξονας ισχίου εντός της φρέζας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. ..	87
Σχήμα 5-9:	Τελική διαμόρφωση κοίλου άξονα ισχίου.....	87
Σχήμα 5-10:	Τόρνος του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου ΕΜΠ (Proxxon).	88
Σχήμα 5-11:	Άξονας ισχίου εντός του τόρνου μετά το τέλος της κατεργασίας.	89
Σχήμα 5-12:	Τελική μορφή κύριου άξονα ισχίου.	89
Σχήμα 5-13:	Τελικό συναρμολόγημα δίποδου επενεργούμενου ρομπότ.	90
Σχήμα 6-1:	Το έδαφος με τις νησίδες (stepping stones).....	91
Σχήμα 6-2:	Χρήση ρυθμιστών θέσεως για τον καθορισμό μήκους βήματος.	92
Σχήμα 6-3:	Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής MotionCal για βαθμονόμηση αισθητήρων.	93
Σχήμα 6-4:	Διάγραμμα συνεχούς και διακριτής ροπής για το πόδι που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος. Η διακριτή ροπή δεν είναι εμφανής καθώς βρίσκεται πολύ κοντά στην συνεχή τιμή.	94
Σχήμα 6-5:	Διάγραμμα συνεχούς και διακριτής ροπής για το πόδι που βρίσκεται στο έδαφος σε μεγέθυνση.....	95
Σχήμα 6-6:	Διάγραμμα συνεχούς και διακριτής ροπής για το πόδι που αιωρείται.	95
Σχήμα 6-7:	Διάγραμμα επιταχύνσεων αντιβάρου που μετράει το επιταχυνσιόμετρο για εντοπισμό κρούσης.	96

Σχήμα 6-8:	Διάγραμμα γωνίας αντιβάρου, δ , όπως προέκυψε από πείραμα.	97
Σχήμα 6-9:	Διάγραμμα γωνίας ποδιού που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος, θ , όπως προέκυψε από πείραμα.....	97
Σχήμα 6-10:	Διάγραμμα γωνίας ποδιού, ψ , που αιωρείται όπως προέκυψε από πείραμα.	98
Σχήμα 6-11:	Σύνολο διαγραμμάτων γωνίας αντιβάρου για πολλά πειράματα.	99
Σχήμα 6-12:	Σύνολο διαγραμμάτων γωνίας του ποδιού που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος για πολλά πειράματα.	99
Σχήμα 6-13:	Σύνολο διαγραμμάτων γωνίας του ποδιού που αιωρείται για πολλά πειράματα.	100
Σχήμα 6-14:	Διάγραμμα γωνίας του ποδιού που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος όπως αυτό προέκυψε από τις προσομοιώσεις και το πείραμα.	100
Σχήμα 6-15:	Διάγραμμα γωνίας του ποδιού που αιωρείται όπως αυτό προέκυψε από τις προσομοιώσεις και το πείραμα.....	101
Σχήμα 6-16:	Διάγραμμα γωνίας του αντιβάρου όπως αυτό προέκυψε από τις προσομοιώσεις και το πείραμα.....	101

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Τιμές παραμέτρων του δίποδου ρομπότ κατά τις προσομοιώσεις.	35
Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά αλουμινίου 5083.	48
Πίνακας 4-2: Χαρακτηριστικά ABS.	49
Πίνακας 4-3: Χαρακτηριστικά ακετάλης.	49
Πίνακας 4-4: Μηχανικές ιδιότητες εδράνου κύλισης.....	56
Πίνακας 4-5: Μηχανικές ιδιότητες εδράνου κύλισης.....	59
Πίνακας 4-6: Χαρακτηριστικά κινητήρα.....	68
Πίνακας 4-7: Χαρακτηριστικά μειωτήρα.....	69
Πίνακας 4-8: Χαρακτηριστικά encoder.....	69
Πίνακας 4-9: Χαρακτηριστικά Teensy 3.5.....	71
Πίνακας 4-10: Χαρακτηριστικά του AZBDC10A4.....	73
Πίνακας 4-11: Χαρακτηριστικά επιταχυνσιόμετρου και γυροσκόπιου.	74
Πίνακας 4-12: Χαρακτηριστικά μπαταρίας Lipo.	75
Πίνακας 4-13: Χαρακτηριστικά του DC - DC μετατροπέα.	76

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό τη μελέτη του δίποδου βηματισμού και την πειραματική επαλήθευση της θεωρίας παθητικού βηματισμού μέσω του σχεδιασμού και της κατασκευής ενός ρομπότ. Συγκεκριμένα, ενδιαφερόμαστε να δούμε εάν οι μαθηματικές εξισώσεις και περιορισμοί που διέπουν το δίποδο περπάτημα επαληθεύονται από τα πειραματικά δεδομένα του ρομπότ που κατασκευάστηκε. Βασικό σημείο της εργασίας αποτελεί η δημιουργία προσομοιώσεων απλουστευμένων μοντέλων σε περιβάλλον MATLAB και MSC Adams και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη θεωρία και τις τελικές πειραματικές μετρήσεις.

Με αφετηρία το μοντέλο και το ρομπότ που αναπτύχθηκε, διερευνώνται διάφορες σχεδιαστικές παράμετροι, με σκοπό την εκτέλεση ευσταθούς βηματισμού με μικρή ενεργειακή κατανάλωση. Μια τέτοια μελέτη είναι απαραίτητη για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τη δίποδη μετακίνηση και την κατανόηση του ανθρώπινου περπατήματος. Επίσης, τα συμπεράσματα αυτά θα μπορέσουν να κατευθύνουν τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη πιο σύνθετων δίποδων μοντέλων.

Σκοπός των δίποδων ρομπότ είναι η δυνατότητα μετακίνησης και πλοήγησής τους σε μη ομαλά εδάφη, γεγονός που αποτελεί και το κυριότερο πλεονέκτημά τους σε σχέση με τα τροχοφόρα. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις διαχείρισης καταστροφών, σε μη ασφαλή περιβάλλοντα για τον άνθρωπο, στην εξερεύνηση του διαστήματος, ακόμα και σε τετριμμένες εργασίες σε καθημερινή βάση. Επιπλέον, αποτελούν οικονομικότερη από άποψη ενεργειακής κατανάλωσης λύση συγκριτικά με τα τετράποδα ρομπότ, αφού επενεργείται μικρότερος αριθμός ποδιών. Τέλος, τα δίποδα ρομπότ έχουν έναν πιο ανθρωπομορφικό σχεδιασμό, με αποτέλεσμα να είναι ευκολότερο να εργασθούν σε ανθρωπογενή περιβάλλοντα. Ωστόσο, η δυναμική ανάλυση των ρομπότ με πόδια είναι σύνθετη, η επίτευξη ευσταθούς λειτουργίας δύσκολη και για το λόγο αυτό πρέπει να έχουν μελετηθεί λεπτομερώς και σε βάθος πριν την υλοποίησή τους.

Τελικός στόχος της εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός νέου δίποδου ενεργητικού ρομπότ βασισμένου στο ήδη υπάρχον παθητικό. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη συστήματος επενέργησης σε κάθε σκέλος του ρομπότ καθώς και την κατασκευή και συναρμολόγηση ενός επιπλέον μέλους, το οποίο θα λειτουργεί ως το σώμα του ρομπότ. Επίσης ο σχεδιασμός στηρίζεται κυρίως σε σπονδυλωτή μορφή, έτσι ώστε να μπορεί να συναρμολογείται και να αποσυναρμολογείται εύκολα, να μπορούν να δοκιμάζονται διαφορετικής γεωμετρίας πέλματα εκτός των ημικυκλικών και να μπορούν να αλλάζουν σχετικά εύκολα οι συνθήκες τριβής μεταξύ του πέλματος και του εδάφους.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Το ανθρώπινο περπάτημα έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης αρκετών ερευνητικών ομάδων, πολλές από τις οποίες επικεντρώθηκαν στη μελέτη και κατασκευή δίποδων ρομπότ και την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ανθρώπινη βάρδιση μέσω αυτών. Η ερευνητική προσπάθεια ξεκίνησε από απλά παθητικά μοντέλα και στη συνέχεια αναπτύχθηκαν πολυπλοκότερα και πιο σύνθετα ρομπότ με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας και ως εκ τούτου μεγαλύτερες δυνατότητες κίνησης. Τέτοιες μελέτες συνεχίζουν να διεξάγονται μέχρι και

σήμερα, άλλες σε θεωρητικό – μαθηματικό επίπεδο, άλλες σε επίπεδο προσομοιώσεων και άλλες σε κατασκευαστικό.

Μία από τις πρώτες μελέτες σε αυτόν τον επιστημονικό τομέα ήταν αυτή των Mochon και McMahon [7], οι οποίοι έδειξαν τη δυνατότητα της παθητικής προώθησης των σκελών που δεν βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος κατά το περπάτημα. Αργότερα ο McGeer [8] μελέτησε λεπτομερώς πλήθος διαφορετικών δίποδων μοντέλων, διερευνώντας τη λειτουργικότητα των στοιχείων που τα απαρτίζουν, όπως για παράδειγμα τη γεωμετρία των πελμάτων, στοιχεία αδράνειας και απόσβεσης στα σκέλη κ.ά. Ο McGeer ξεκίνησε τη μελέτη από απλές περιπτώσεις, όπως αυτή του ποδιού χωρίς γόνατο και συγκεντρωμένες μάζες σε ισχίο και πέλματα και προχώρησε σε πολυπλοκότερους σχηματισμούς με την προσθήκη γονάτου. Τα παραπάνω μοντέλα κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν και σε πειραματικό επίπεδο.

Από κατασκευαστικής πλευράς σημαντική είναι η προσφορά των Collins και Ruina [9], οι οποίοι σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα πλήρως λειτουργικό δίποδο ρομπότ που περιλαμβάνει κορμό, ισχίο, γόνατο, αστράγαλο, ενδοτικά σκέλη και ειδικής διαμόρφωσης πέλματα που συνεισφέρουν στην ισορροπία κατά την πλευρική κατεύθυνση.

Πλέον η μελέτη των δίποδων ρομπότ έχει εξελιχθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα να έχουν αναπτυχθεί σύνθετα και ακριβή μοντέλα που επενεργούνται από πολύπλοκα συστήματα ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, οι Stopforth et al. [10] σχεδίασαν ένα δίποδο μηχανισμό με ζεύγη ποδιών και κλειδώμα γονάτου, με το οποίο επαλήθευσαν πειραματικά το μοντέλο τους, βλ. Σχήμα 1-1A. Οι Wisse et al. [11] [12] κατασκεύασαν το δίποδο ρομπότ Max το οποίο περιλαμβάνει άνω σώμα συνδεδεμένο με ένα μηχανισμό διχοτόμησης στο ισχίο, βλ. Σχήμα 1-1B.



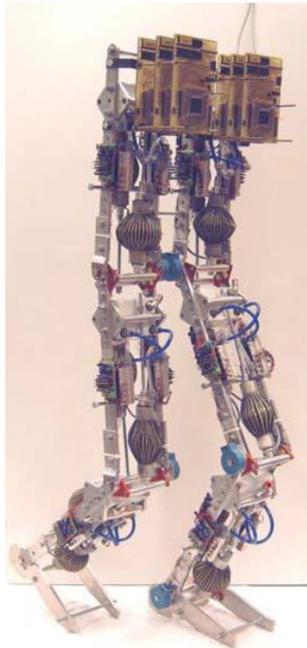
(A)



(B)

Σχήμα 1-1: (A) Ρομπότ των Stopforth et al και (B) Ρομπότ Max των Wisse et al (δεξιά).

Εκτός από το σχεδιασμό των ρομπότ πρωτοποριακές μελέτες έχουν εστιάσει το ενδιαφέρον τους στον τρόπο επενέργησης των δίποδων. Για παράδειγμα, οι Verrelst et al. [15] χρησιμοποιούν ως επενέργηση τεχνητούς μύες που αποτελούνται από πνευματικά συστήματα, βλ. Σχήμα 1-2A. Επιπλέον, οι Van Ham et al. [14] εισήγαγαν έναν περιστροφικό κινητήρα προσαρμοζόμενης ενδοτικότητας, γνωστός στη βιβλιογραφία ως MACCEPA, βλ. Σχήμα 1-2B.



(A)



(B)

Σχήμα 1-2: (A) Ρομπότ Lucy των Verrelst et al., (B) Ρομπότ των Van Ham et al.

Τέλος, πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τον έλεγχο της ευστάθειας του ρομπότ και την εύρεση κατάλληλου σχήματος ελέγχου για την επίτευξη βηματισμού. Οι Caballero et al. [16] μελέτησαν την ευστάθεια δίποδων ρομπότ με τη μέθοδο του σημείου μηδενικών ροπών (Zero – Moment Point), ενώ οι Morris et al. [2] με τη μέθοδο της απεικόνισης Poincare. Επίσης, οι Nikkhah et al. [19], πρότειναν ένα εύρωστο σχήμα ελέγχου μέσω sliding mode control. Οι Nguyen και Sreenath [18] εφάρμοσαν βέλτιστο έλεγχο σε δίποδα ρομπότ με συναρτήσεις Lyapunov και έλεγξαν τα αποτελέσματά τους στο ρομπότ RABBIT. Οι Kim et al. [17] δημιούργησαν σχήμα ελέγχου για ανθρωποειδές ρομπότ σε μη επίπεδη και ομαλή επιφάνεια βηματισμού.

Οι παραπάνω μελέτες έχουν εξερευνήσει σε μεγάλο βαθμό το επενεργούμενο δίποδο περπάτημα, αλλά δεν έχουν ασχοληθεί αρκετά με την εκμετάλλευση της παθητικής δυναμικής και την επίτευξη βηματισμών ελάχιστου κόστους.

1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα εργασία αναπτύσσεται σε έξι μέρη.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια σύντομη αναφορά στη θεωρία που απαιτείται για την κατανόηση της συγκεκριμένης μελέτης. Έτσι παρουσιάζονται στοιχεία για το ανθρώπινο περπάτημα, τη μοντελοποίηση του, αλλά και στοιχεία μηχανολογίας για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των διάφορων εξαρτημάτων.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η ανάπτυξη του μηχανικού μοντέλου σε προγραμματιστικά περιβάλλοντα MATLAB και MSC Adams, και συγκρίνονται και αναλύονται τα αριθμητικά συμπεράσματα που προέκυψαν μέσω των προσομοιώσεων.

Ο λεπτομερής σχεδιασμός του μοντέλου περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, στο οποίο εξηγούνται οι αλλαγές στο παθητικό ρομπότ, τα κριτήρια επιλογής του συστήματος επενέργειας και η προσθήκη των νέων μελών και εξαρτημάτων.

Στο Κεφάλαιο 5 φαίνεται ο τρόπος κατασκευής και η συναρμολόγηση του δίποδου ενεργητικού ρομπότ για να εκτελεστεί πείραμα βηματισμού.

Η προετοιμασία του πειράματος, η εκτέλεσή του καθώς και η παρουσίαση των τελικών αποτελεσμάτων του δίνονται στο Κεφάλαιο 6.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της μελέτης και γίνονται προτάσεις για μελλοντική εργασία.

2 Στοιχεία Θεωρίας

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνονται όλα τα στοιχεία θεωρίας που ήταν αναγκαία για την εκπόνηση αυτής της μελέτης. Παρουσιάζονται συνοπτικά διάφορα χρήσιμα χαρακτηριστικά του ανθρώπινου περπάτηματος καθώς και στοιχεία μαθηματικών, μηχανικής και αυτομάτου ελέγχου που επιτρέπουν την περιγραφή του μοντέλου και τη δημιουργία ανθρωποειδούς βηματισμού.

2.2 Ανθρώπινο Περπάτημα

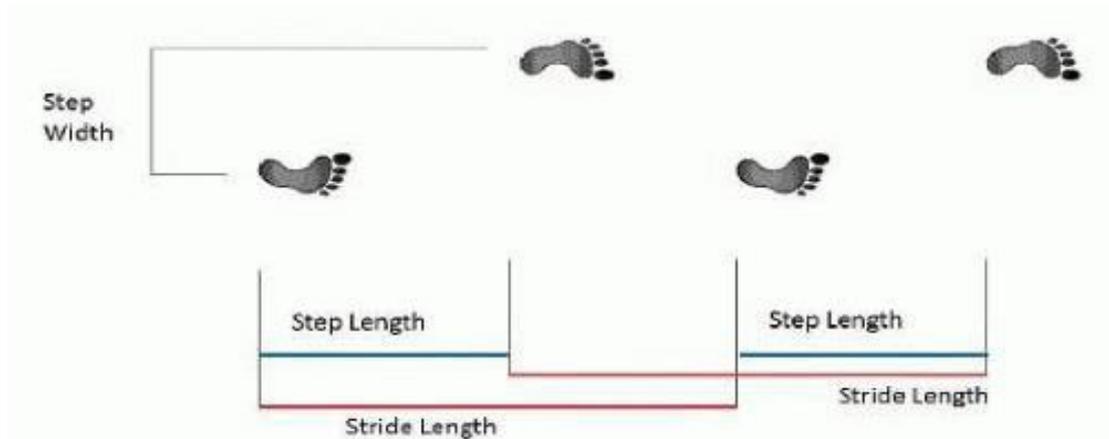
Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, το δίποδο ρομπότ που μελετάται και κατασκευάζεται έχει ως πηγή έμπνευσης τον άνθρωπο και το περπάτημα του, και ως ένα βαθμό το μιμείται για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με το ανθρώπινο περπάτημα. Η φυσιολογική βάδιση παρουσιάζει κοινά στοιχεία σε όλους τους ανθρώπους και αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία, η περίοδος της οποίας ονομάζεται κύκλος βάδισης. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η μελέτη αυτού του κύκλου και η παρουσίαση των σημαντικότερων χαρακτηριστικών του.

Ως κύκλος βάδισης ορίζεται το χρονικό διάστημα από ένα συμβάν ενός εκ των δύο πελμάτων μέχρι αυτό να επαναληφθεί για το ίδιο πέλμα. Η περίοδος αυτή του βηματισμού χωρίζεται σε επιμέρους φάσεις για κάθε πέλμα, οι οποίες εναλλάσσονται διαδοχικά μεταξύ τους, την φάση στήριξης (stance phase), η οποία αποτελείται από το χρόνο που το πέλμα βρίσκεται στο έδαφος, και τη φάση αιώρησης (swing phase), η οποία αποτελείται από το χρόνο που το πέλμα βρίσκεται στον αέρα. Επίσης, ένας άλλος διαχωρισμός του κύκλου βάδισης μπορεί να γίνει από την παρατήρηση του αριθμού των πελμάτων που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος κάθε χρονική στιγμή. Έτσι, προκύπτει η φάση διπλής στήριξης (double stance phase), κατά την οποία και τα δύο σκέλη είναι στο έδαφος, και τη φάση απλής στήριξης (single stance phase), όταν το ένα μόνο σκέλος είναι στο έδαφος.

Στη συνέχεια θεωρήθηκε απαραίτητη η παρουσίαση των ορισμών των βασικότερων χαρακτηριστικών του ανθρώπινου βαδίσματος:

- Μήκος βήματος: Ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο αντίστοιχων συνεχόμενων σημείων επαφής της πτέρνας του ανθρώπου με το έδαφος. Σε ένα κανονικό βάδισμα, το δεξί μήκος βήματος ισούται με το αριστερό.
- Μήκος διασκελισμού: Ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων σημείων επαφής της πτέρνας του ίδιου πέλματος του ανθρώπου με το έδαφος. Σε ένα φυσιολογικό βάδισμα το μήκος διασκελισμού ισούται με το διπλάσιο του μήκους βήματος.
- Πλάτος βήματος: Ορίζεται ως η πλευρική απόσταση μεταξύ των βημάτων των δύο πελμάτων.
- Ρυθμός περπατήματος: Ορίζεται ως ο αριθμός των βημάτων στη μονάδα του χρόνου.

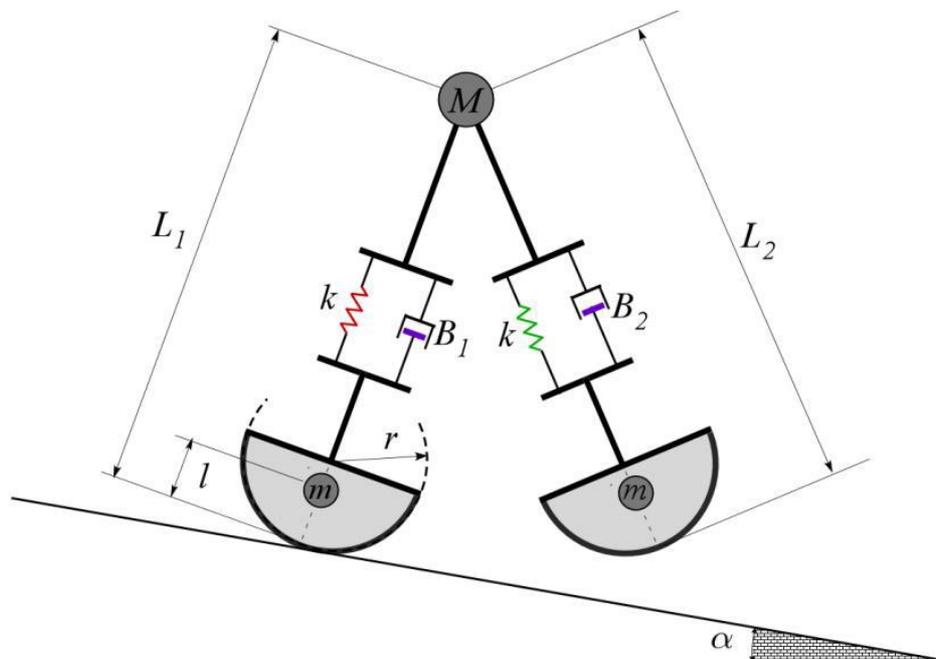
Στο Σχήμα 2-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οπτικά οι παραπάνω ορισμοί:



Σχήμα 2-1: Σχηματική αναπαράσταση των ορισμών μήκους βήματος (step length), μήκους διασκελισμού (stride length) και πλάτους βήματος (step width).

2.3 Μοντέλο για το Παθητικό Περπάτημα

Το ανθρώπινο σώμα με όλες τις λειτουργίες και τις πολυπλοκότητές του, αποτελεί μια εξαιρετικά σύνθετη διάταξη, η οποία είναι δύσκολο να μεταφραστεί σε ένα ακριβές μηχανικό μοντέλο. Για το λόγο αυτό, έχει σχεδιασθεί και κατασκευασθεί από το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ ένα απλουστευμένο μοντέλο, το οποίο αξιοποιεί την παθητική δυναμική του ανθρώπινου περπατήματος και εκτελεί παθητικό βηματισμό. Ως παθητικό περπάτημα ορίζεται το περπάτημα κατά το οποίο απαιτείται από τον άνθρωπο ελάχιστη έως και καθόλου ενεργειακή παρέμβαση. Το μηχανικό μοντέλο εκτελεί παρόμοιους βηματισμούς εκμεταλλευόμενο την παραπάνω δυνατότητα, ενώ ανακτά την ενέργεια που χάνεται στις αποσβέσεις του μέσω της κατάβασης του στο βαρυτικό πεδίο: με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η χρήση κινητήρων. Το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί φαίνεται στο Σχήμα 2-2.

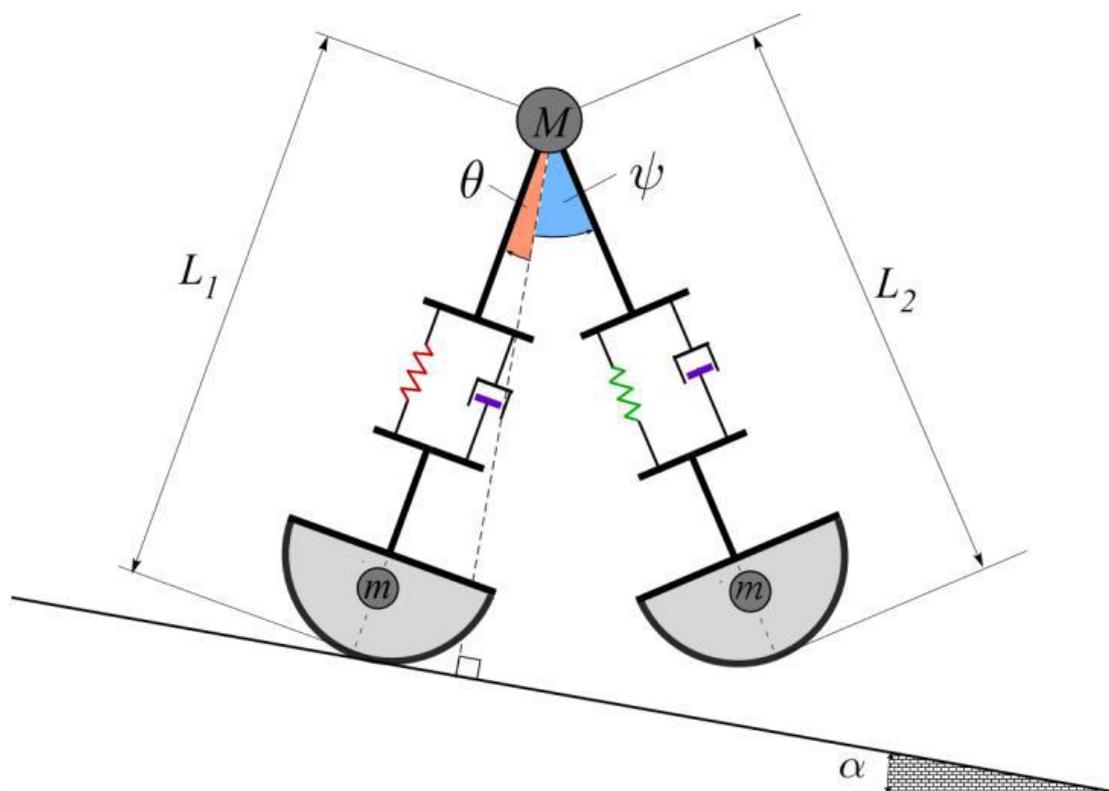


Σχήμα 2-2: Αναπαράσταση παθητικού μοντέλου.

Συνοπτικά, το μοντέλο αποτελείται από δύο σκέλη, με κάθε σκέλος να περιλαμβάνει ένα ελατήριο σταθεράς k και αρχικού μήκους L_{nat} τα οποία μπορεί να θεωρηθεί πως λειτουργούν ως εκκρεμή: το ένα σκέλος αντιστοιχεί στο πόδι που στηρίζει το σώμα κατά το περπάτημα και μοντελοποιείται ως ένα ανάστροφο εκκρεμές, ενώ το δεύτερο σκέλος αντιστοιχεί στο πόδι που προωθείται προς τα εμπρός και μοντελοποιείται με ένα κλασικό εκκρεμές. Τα πόδια εκτός από το στοιχείο ελαστικότητας περιλαμβάνουν και ένα στοιχείο απόσβεσης B το καθένα, το οποίο είναι συνδεδεμένο παράλληλα με το ελατήριο. Τα κάτω άκρα των ποδιών αποτελούν τμήματα κύκλου ακτίνας r . Ο όλος μηχανισμός ενεργεί σε επίπεδο με κλίση α .

Τα δύο πόδια συνδέονται με άρθρωση στο άνω μέρος τους στη θέση του ισχίου. Στη θέση αυτή έχει προσαρτηθεί η κύρια μάζα M , ενώ υπάρχουν δευτερεύουσες μάζες m στην περιοχή των πελμάτων, η θέση των οποίων ορίζεται από την παράμετρο l .

Οι γενικευμένες μεταβλητές του μοντέλου είναι το ελάχιστο σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών που περιγράφουν επαρκώς την κατάσταση του μηχανισμού. Για το παθητικό μοντέλο, αυτές είναι τέσσερις: οι δύο γωνίες φ και θ και τα δύο μήκη L_1 και L_2 των σκελών. Στο Σχήμα 2-3 παρουσιάζονται οι μεταβλητές αυτές.



Σχήμα 2-3: Απεικόνιση των γενικευμένων μεταβλητών του συστήματος.

Επόμενως υπολογίζοντας την τιμή των παραπάνω γενικευμένων μεταβλητών κάθε στιγμή αποκτάμε μια πλήρη εικόνα για το βηματισμό του δίποδου μοντέλου. Όμως αυτές οι τέσσερις μεταβλητές δεν είναι καθ' όλη τη διάρκεια του περπατήματος ανεξάρτητες μεταξύ τους: όταν και τα δύο πόδια βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, δηλαδή στη φάση διπλής στήριξης, οι δύο από αυτές μπορούν να προκύψουν ως συνάρτηση των άλλων δύο, λόγω δύο επιπλέον συνθηκών που επιβάλλουν την κινηματική τους στο μοντέλο τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, τη συνθήκη μη ολίσθησης και τη συνθήκη επαφής.

Κατά τη φάση αιώρησης υπάρχουν τέσσερις ανεξάρτητες γενικευμένες μεταβλητές, αυτές ορίσθηκαν προηγουμένως. Επομένως το σύστημα σε αυτή τη φάση περιγράφεται από ένα σύστημα τεσσάρων διαφορικών εξισώσεων. Οι διαφορικές εξισώσεις του συστήματος προέκυψαν με τη μέθοδο Lagrange. Το σύστημα που προέκυψε είναι της μορφής:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}(\mathbf{q}) + \mathbf{G}(\mathbf{a}, \mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (5-1)$$

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} & m_{34} \\ m_{14} & m_{24} & m_{34} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{L}_1 \\ \ddot{\psi} \\ \ddot{L}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{L}_1 \\ \dot{\psi} \\ \dot{L}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (5-2)$$

$$\begin{aligned} m_{11} &= M[(L_1 - r)^2 + r^2 + 2r(L_1 - r)\cos\theta] \\ &\quad + m\{(L_1 - r)^2 + (L_1 - l)^2 + 2r^2 + 2r[(L_1 - r) + (l - r)]\cos\theta\} \\ m_{12} &= (M + m)r\sin\theta \\ m_{13} &= m(L_2 - l)[(L_1 - r)\cos(\psi + \theta) + r\cos\psi] \\ m_{14} &= m[(L_1 - r)\sin(\psi + \theta) + r\sin\psi] \\ m_{22} &= M + m \\ m_{23} &= m(L_2 - l)\sin(\psi + \theta) \\ m_{24} &= -m\cos(\psi + \theta) \\ m_{33} &= m(L_2 - l)^2 \\ m_{34} &= 0 \\ m_{44} &= m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{11} &= -\{M(L_1 - r) + m[(L_1 - r) + (l - r)]r\sin\theta\}\dot{\theta} \\ c_{12} &= 2(M + m)(L_1 - r + r\cos\theta)\dot{\theta} \\ c_{13} &= -m[(L_2 - l)r\sin\psi + (L_1 - r)(L_2 - l)\sin(\psi + \theta)]\dot{\psi} \\ c_{14} &= 2m[(L_1 - r)\cos(\psi + \theta) + r\cos\psi]\dot{\psi} \\ c_{21} &= -(M + m)(L_1 - r)\dot{\theta} \\ c_{22} &= B \\ c_{23} &= m(L_2 - l)\cos(\psi + \theta)\dot{\psi} \\ c_{24} &= 2m\sin(\psi + \theta)\dot{\psi} \\ c_{31} &= -m(L_1 - r)(L_2 - l)\sin(\psi + \theta)\dot{\theta} \\ c_{32} &= 2m(L_2 - l)\cos(\psi + \theta)\dot{\theta} \\ c_{33} &= 0 \\ c_{34} &= 2m(L_2 - l)\dot{\psi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_{41} &= m(L_1 - r) \cos(\psi + \theta) \dot{\theta} \\
c_{42} &= 2m \sin(\psi + \theta) \dot{\theta} \\
c_{43} &= -m(L_2 - l) \dot{\psi} \\
c_{44} &= B
\end{aligned}$$

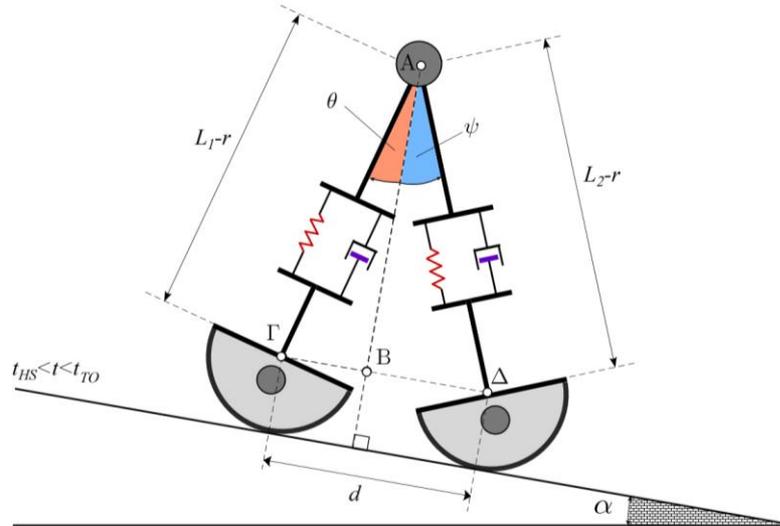
$$\begin{aligned}
k_1 &= 0 \\
k_2 &= k(L_1 - L_{nat}) \\
k_3 &= 0 \\
k_4 &= k(L_2 - L_{nat})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
g_1 &= g\{(M + m)[r \sin a + (L_1 - r) \sin(a - \theta)] + m[r \sin a + (l - r) \sin(a - \theta)]\} \\
g_2 &= g(M + m) \cos(a - \theta) \\
g_3 &= gm(L_2 - l) \sin(a + \psi) \\
g_4 &= -gm \cos(a + \psi)
\end{aligned}$$

Κατά τη φάση διπλής στήριξης το μοντέλο διατηρεί την δυναμική που παρουσιάστηκε παραπάνω, όμως προστίθενται κάποιοι όροι γενικευμένων δυνάμεων για να ικανοποιούνται σε κάθε βήμα οι περιορισμοί της επαφής των πελμάτων με το έδαφος. Οι περιορισμοί αυτοί είναι οι δύο που αναφέρθηκαν πρωτίτερα και εδώ παρουσιάζονται λεπτομερώς: η συνθήκη μη ολίσθησης και η συνθήκη επαφής με το έδαφος. Η συνθήκη μη ολίσθησης αναφέρει ότι δεν υπάρχει ολίσθηση κατά την επαφή ενός άκρου με το έδαφος και έτσι ασκείται μεταξύ τους μόνο η στατική τριβή, ενώ το σημείο επαφής των κυκλικών πελμάτων με το έδαφος προωθείται κατά το μήκος τόξου που ορίζει η αντίστοιχη γωνιακή μετατόπιση. Η συνθήκη επαφής θεωρεί μη παραμορφώσιμα τα τόξα των πελμάτων και ως εκ τούτου το κέντρο βάρους κάθε πέλματος απέχει απόσταση r από το έδαφος, όσο το αντίστοιχο σκέλος βρίσκεται σε φάση εδάφους. Για μια τυχαία χρονική στιγμή κατά τη φάση διπλής στήριξης μπορούν να γραφούν οι δύο παρακάτω εξισώσεις περιορισμών:

$$\begin{aligned}
AB &= (L_1 - r) \cos \theta = (L_2 - r) \cos \psi \\
\Rightarrow s_1(\mathbf{q}) &= (L_1 - r) \cos \theta - (L_2 - r) \cos \psi = 0
\end{aligned} \tag{5-3}$$

$$\begin{aligned}
\Gamma\Delta &= d = (L_1 - r) \sin \theta + (L_2 - r) \sin \psi \\
\Rightarrow s_2(\mathbf{q}) &= d_{HS} + r(\theta_{HS} - \theta + \psi_{HS} - \psi) - (L_1 - r) \sin \theta - (L_2 - r) \sin \psi = 0
\end{aligned} \tag{5-4}$$



Σχήμα 2-4: Αναπαράσταση φάσης διπλής στήριξης του δίποδου μοντέλου.

Σύμφωνα με τη μέθοδο Lagrange η ενσωμάτωση των δύο παραπάνω εξισώσεων για την ικανοποίηση των περιορισμών κατά τη φάση διπλής στήριξης γίνεται με τη χρήση των πολλαπλασιαστών Lagrange. Έτσι, το σύστημα περιγράφεται από τη νέα διαφορική εξίσωση:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}(\mathbf{q}) + \mathbf{G}(\mathbf{a}, \mathbf{q}) + \mathbf{\Pi}(\mathbf{q})\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad (5-5)$$

$$s_1(\mathbf{q}) = 0$$

$$s_2(\mathbf{q}) = 0$$

Το 2×1 διάνυσμα $\boldsymbol{\lambda}$ είναι το διάνυσμα των πολλαπλασιαστών Lagrange ενώ ο 4×2 πίνακας $\mathbf{\Pi}$ περιέχει τους όρους:

$$\mathbf{\Pi}[k, j] = \pi_{kj} = \frac{\partial s_j}{\partial q_k} \quad k = 1 \dots 4, \quad j = 1 \dots 2 \quad (5-6)$$

Οι γενικευμένες ροπές που ασκούνται κατά τη φάση διπλής στήριξης προκύπτουν από την εκτέλεση των πράξεων μεταξύ των δυνάμεων στην επαφή και ορισμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών και φαίνονται στη συνέχεια.

$$\mathbf{f}_{constr.} = \mathbf{\Pi}(\mathbf{q})\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} \\ \pi_{21} & \pi_{22} \\ \pi_{31} & \pi_{32} \\ \pi_{41} & \pi_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

$$\begin{aligned}\pi_{11} &= (L_1 - r) \sin \theta \\ \pi_{12} &= r + (L_1 - r) \cos \theta \\ \pi_{21} &= -\cos \theta \\ \pi_{22} &= \sin \theta \\ \pi_{31} &= -(L_2 - r) \sin \psi \\ \pi_{32} &= r + (L_2 - r) \cos \psi \\ \pi_{41} &= \cos \psi \\ \pi_{42} &= \sin \psi\end{aligned}$$

Μετά την ολοκλήρωση της παρουσίασης των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το παθητικό περπάτημα γίνεται φανερό πως η κινητήριος δύναμη του μοντέλου είναι η δύναμη της βαρύτητας, η οποία εμφανίζεται στις εξισώσεις στο μητρώο G . Από την εξίσωση (2-2) βλέπουμε πως οι όροι του πίνακα G εξαρτώνται από την κλίση του εδάφους α , με αποτέλεσμα ο παθητικός βηματισμός να είναι εφικτός μόνο σε επίπεδα με κλίση. Έτσι, για ευσταθή βηματισμό σε οριζόντιο ή ακόμα και ανηφορικό επίπεδο είναι απαραίτητη η μετατροπή του μοντέλου από παθητικό σε ενεργητικό και η εκτέλεση πλέον ενεργητικού βηματισμού. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται τα σημαντικότερα θεωρητικά στοιχεία του ενεργητικού μοντέλου.

2.4 Ενεργητικό Μοντέλο

2.4.1 Μαθηματικό μοντέλο και σχεδιασμός για αντιστάθμιση βαρύτητας

Αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας είναι η μετατροπή του ήδη κατασκευασμένου μοντέλου σε ενεργητικό με την προσθήκη επενεργητών, με σκοπό την επίτευξη βηματισμών σε επίπεδα με διαφορετικές κλίσεις. Κατά το περπάτημα του ενεργητικού ρομπότ σε οριζόντιο ή ανηφορικό επίπεδο δεν είναι δυνατή η αξιοποίηση της βαρυτικής δύναμης ως κινητήριας πηγής, άρα κρίνεται αναγκαία η χρήση κινητήρων.

Το ζήτημα της επενέργησης στα δίποδα ρομπότ έχει αναλυθεί σε πολλές εργασίες και έχουν προταθεί αρκετές λύσεις. Ένας πρώτος στόχος στην έρευνα αυτή είναι η υλοποίηση σχήματος επενέργησης το οποίο θα είναι ενεργειακά αποδοτικό με μικρές καταναλώσεις. Ένα δεύτερο κριτήριο στην αξιολόγηση κάθε σχήματος επενέργησης είναι το είδος του βηματισμού στο οποίο οδηγεί: είναι επιθυμητό οι παραγόμενοι βηματισμοί να είναι κατά το δυνατό «φυσικοί» και να πλησιάζουν το ανθρώπινο περπάτημα, δηλαδή να εκμεταλλεύονται την παθητική δυναμική του μοντέλου και να μην την παραγράφουν με κάποιο πολύ επεμβατικό σχήμα ελέγχου.

Το μοντέλο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχει τέσσερις βαθμούς ελευθερίας, τις δύο γωνίες των σκελών και τα μήκη τους. Η επενέργηση στις γωνιακούς βαθμούς ελευθερίας υλοποιείται πολύ εύκολα μέσω περιστροφικών κινητήρων και δεν παρουσιάζει τεχνολογικά προβλήματα. Αντιθέτως, είναι δύσκολη και αρκετά σύνθετη η υλοποίηση της επενέργησης στους άλλους δύο γραμμικούς βαθμούς ελευθερίας. Έτσι, στην παρούσα εργασία οι δύο αυτοί βαθμοί ελευθερίας θα αφεθούν ελεύθεροι, ώστε να βρεθεί μια πρακτικά απλή, οικονομικά συμφέρουσα και ελάχιστα επεμβατική, από άποψη ελέγχου, λύση. Κατά συνέπεια το τελικό σύστημα χαρακτηρίζεται ως υπό-επενεργούμενο, αφού επιλέγεται να μην υπάρχει επενέργηση στους γραμμικούς βαθμούς ελευθερίας. Αυτό σημαίνει ότι δεν θα είναι πάντα εφικτό να επιτευχθεί οποιαδήποτε επιθυμητή συμπεριφορά, καθώς ο μόνος έλεγχος που

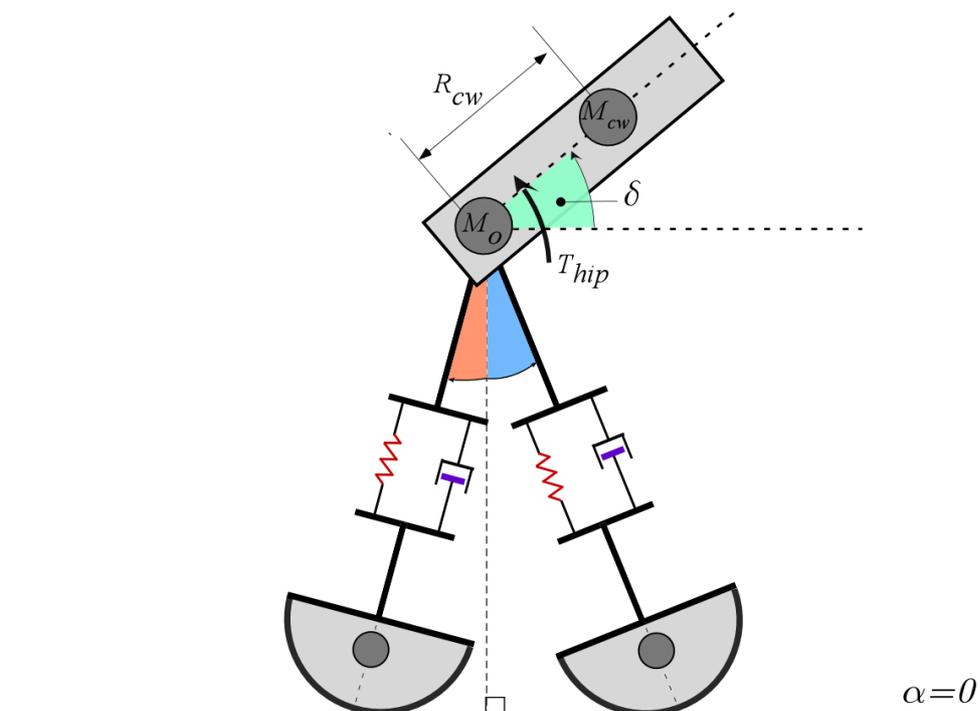
μπορεί να εφαρμοσθεί αφορά τους στροφικούς βαθμούς ελευθερίας, χωρίς να έχουμε τη δυνατότητα να επεμβούμε στη δυναμική που αφορά το μήκος των σκελών.

Προτάθηκαν και μελετήθηκαν αρκετές κατασκευαστικές λύσεις για την μετατροπή του παθητικού ρομπότ σε ενεργητικό, με κυριότερες τις:

- Επενέργηση με έναν κινητήρα, συνδεδεμένο στα δύο σκέλη.
- Επενέργηση με δύο κινητήρες, έναν στον αστράγαλο του ενός ποδιού και έναν στο ισχίο.
- Επενέργηση με δύο κινητήρες, ανάμεσα σε κάθε σκέλος και σε ενδιάμεσο σύνδεσμο.

Από τις τρεις παραπάνω λύσεις επιλέχθηκε ως καλύτερη η τελευταία, δηλαδή η χρήση δύο κινητήρων, τοποθετημένων στο ισχίο του ρομπότ και συνδεδεμένων σε κάθε σκέλος και σε ενδιάμεσο σύνδεσμο, το αντίβαρο. Η επιλογή αυτή έγινε, διότι η επενέργηση με έναν μόνο κινητήρα επιβάλλει την εφαρμογή της ίδιας ροπής στα δύο σκέλη, γεγονός που οδηγεί σε ασταθή βηματισμό. Από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν πάνω στο δίποδο βηματισμό έγινε γνωστό πως κάθε χρονική στιγμή τα δύο σκέλη απαιτούν διαφορετική ροπή για την επίτευξη της επιθυμητής κίνησης. Επιπλέον, η επενέργηση στον αστράγαλο του μοντέλου προϋποθέτει βαθμό ελευθερίας σε εκείνο το σημείο. Όμως, το μοντέλο που έχει ήδη αναπτυχθεί δεν ικανοποιεί αυτήν την προδιαγραφή και ως εκ τούτου η λύση αυτή απορρίπτεται. Τελικά, ο τρίτος σχεδιασμός αποτελεί τη βέλτιστη λύση και στην πραγματικότητα, μια τέτοια υλοποίηση απαντάται και στον άνθρωπο, όπου ο κορμός προβάλλει την απαραίτητη κάθε φορά αντίσταση για να αναπτυχθεί ροπή σε κάθε πόδι, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την ανεξάρτητη κίνηση των ποδιών. Η πιο εύκολα υλοποιήσιμη λύση για την εισαγωγή μίας επιπλέον ροπής, σχεδόν σταθερή σε μέτρο, είναι η κατασκευή του κεντρικού συνδέσμου ώστε να είναι έκκεντρος ως προς την κατανομή μάζας του.

Στο Σχήμα 2-5 φαίνεται ο τελικός σχεδιασμός του ενεργητικού μοντέλου.



Σχήμα 2-5: Τελικός σχεδιασμός δίποδου ενεργητικού μοντέλου.

Το αντίβαρο μοντελοποιείται ως μια έκκεντρη σημειακή μάζα M_{cw} σε απόσταση R_{cw} από το ισχίο. Από τον σχεδιασμό που επιλέχθηκε και την προσθήκη του επιπλέον συνδέσμου είναι φανερό πως προστίθεται ακόμα ένας στροφικός βαθμός ελευθερίας, η γωνία δ , δηλαδή η γωνία που σχηματίζει το αντίβαρο με το επίπεδο που εκτελείται ο βηματισμός. Άρα το αντίβαρο θα δημιουργεί κάθε στιγμή ροπή:

$$T_{cw} = gM_{cw}R_{cw} \cos(\delta) \quad (5-8)$$

Εάν επιτευχθεί περιορισμός της μεταβολής της γωνίας δ σε επαρκώς μικρό διάστημα τιμών, τότε η ροπή που δημιουργεί το αντίβαρο θα είναι σχεδόν σταθερή σε μέτρο και φορά. Επομένως είναι δυνατό να βρεθούν συνδυασμοί M_{cw} και R_{cw} ώστε οι γωνιακές ταλαντώσεις της δ να φράσσονται και η συνολική ροπή στον άξονα να αντισταθμίζει την αντίδραση των κινητήρων.

Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το νέο ενεργητικό μοντέλο έχουν προκύψει και αυτές, όπως και για το παθητικό μοντέλο, από την εφαρμογή της μεθόδου Lagrange. Οι όροι που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα δεν έχουν μεταβληθεί και δεν είναι απαραίτητο να επαναδιατυπωθούν. Οι νέοι που θα προστεθούν και αποτελούν επαύξηση του συστήματος, περιγράφουν τη δυναμική του νέου συνδέσμου και της δυναμικής σύζευξης των δύο μοντέλων, του παθητικού και του ενεργητικού. Οι επί πλέον όροι είναι οι εξής:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}(\mathbf{q}) + \mathbf{G}(\mathbf{a}, \mathbf{q}) = \mathbf{u}_g \quad (5-9)$$

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} & m_{34} & m_{35} \\ m_{14} & m_{24} & m_{34} & m_{44} & m_{45} \\ m_{15} & m_{25} & m_{35} & m_{45} & m_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{L}_1 \\ \ddot{\psi} \\ \ddot{L}_2 \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{L}_1 \\ \dot{\psi} \\ \dot{L}_2 \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{g1} \\ 0 \\ u_{g3} \\ 0 \\ u_{g1} - u_{g3} \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

$$\begin{aligned} m_{15} &= -M_{cw}R_{cw} [(L_1 - r)\sin(\delta + \theta) + r\sin(\delta)] \\ m_{25} &= M_{cw}R_{cw} \cos(\delta + \theta) \\ m_{35} &= 0 \\ m_{45} &= 0 \\ m_{55} &= M_{cw}R_{cw}^2 \end{aligned}$$

$$c_{15} = -M_{cw}R_{cw}[(L_1 - r)\cos(\delta + \theta) + r\cos\delta]\dot{\delta}$$

$$c_{25} = -M_{cw}R_{cw}\sin(\delta + \theta)\dot{\delta}$$

$$c_{35} = 0$$

$$c_{45} = 0$$

$$c_{55} = 0$$

$$c_{51} = -M_{cw}R_{cw}(L_1 - r)\cos(\delta + \theta)\dot{\theta}$$

$$c_{52} = -2M_{cw}R_{cw}\sin(\delta + \theta)\dot{\theta}$$

$$c_{53} = 0$$

$$c_{54} = 0$$

$$k_5 = 0$$

$$g_5 = gM_{cw}R_{cw}\cos(\alpha + \delta)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις θα πρέπει να επιλεγεί κατάλληλη συνάρτηση επενέργειας (ελέγχου) για τους όρους u_{g1} και u_{g3} , ώστε το μοντέλο να εκτελεί ευσταθείς βηματισμούς όμοιους με αυτούς του παθητικού. Το παθητικό περπάτημα έχει μελετηθεί σε έδαφος με κλίση $\alpha = -2^\circ$, άρα η επενέργεια που θα χρειαστεί το ρομπότ για περπάτημα σε έδαφος με διαφορετική κλίση θα ισούται με τη διαφορά των βαρυτικών όρων στα δύο επίπεδα. Έτσι, για να αξιοποιηθεί η παθητική δυναμική οι όροι u_{g1} και u_{g3} που προκύπτουν είναι:

$$\mathbf{u}_g = \mathbf{G}(a = -2^\circ, \mathbf{q}) - \mathbf{G}(a = 0, \mathbf{q}) = \begin{bmatrix} u_{g1} \\ 0 \\ u_{g3} \\ 0 \\ u_{g1} - u_{g3} \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

$$\begin{aligned} u_{g1} = & g(Mr\sin(-2 - \theta) - L_1M_{cw}\sin(-2 - \theta) - 2mr\sin(-2) - L_1m\sin(-2 - \theta) - \\ & L_1M\sin(-2 - \theta) + M_{cw}r\sin(-2 - \theta) - lm\sin(-2 - \theta) + 2mr\sin(-2 - \theta) - Mr\sin(-2) - \\ & M_{cw}r\sin(-2) - Mr\sin(a - \theta) + L_1M_{cw}\sin(a - \theta) + 2mr\sin(a) + L_1m\sin(a - \theta) + \\ & L_1M\sin(a - \theta) - M_{cw}r\sin(a - \theta) + lm\sin(a - \theta) + Mr\sin(a) + M_{cw}r\sin(a)) \end{aligned} \quad (5-12)$$

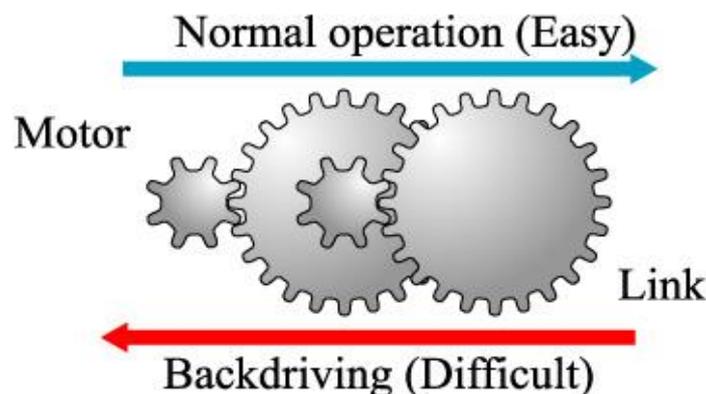
$$u_{g3} = gm(L_2 - l)(\sin(a + \psi) - \sin(-2 - \psi)) \quad (5-13)$$

Είναι φανερό πως οι όροι u_{g1} και u_{g3} εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την κλίση α του εδάφους στο οποίο θα εκτελεστεί ο βηματισμός. Προκύπτει εύκολα πως όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του α , δηλαδή όσο πιο απότομο είναι το κεκλιμένο επίπεδο, τόσο πιο μεγάλα γίνονται τα u_{g1} και u_{g3} . Αυτό σημαίνει πως αύξηση της κλίσης του εδάφους συνεπάγεται και αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας από το δίποδο μοντέλο, άρα δυσχερέστερη περίπτωση αποτελεί η ανάβαση επιπέδου μεγάλης κλίσης.

Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε παραπάνω και φαίνεται και από την εξίσωση (2-11), το ενεργητικό μοντέλο είναι υπό-επενεργούμενο, αφού στους δύο γραμμικούς βαθμούς ελευθερίας απουσιάζει η εξωτερική επενέργηση. Ωστόσο, στους υπόλοιπους τρεις στροφικούς βαθμούς ελευθερίας η επενέργηση εφαρμόζεται ανεξάρτητα μόνο στους δύο, ενώ ο τελευταίος προκύπτει ως η διαφορά των δύο επενεργήσεων. Πρακτικά, οι γωνίες θ και ψ , δηλαδή οι γωνίες των σκελών, είναι ανεξάρτητες και μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή, αλλά αντίθετα η γωνία του αντιβάρου δ εξαρτάται από τις ροπές u_{g1} και u_{g3} και κατά συνέπεια δεν μπορεί να πάρει όποια τιμή θέλουμε. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια το σύστημα να μην είναι πλήρως ελέγξιμο και να απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό του σχήματος ελέγχου.

2.4.2 Φαινόμενο backdrivability

Ένα σημαντικό ζήτημα που προκύπτει στο ενεργητικό ρομπότ με τη προσθήκη συστήματος επενέργειας αλλά απουσιάζει από το παθητικό, είναι το backdrivability του κινητήρα. Για έναν μηχανισμό, ως backdrivability ορίζεται η ικανότητα του να μεταφέρει αυτούσια στον κινητήρα, με την ίδια κατεύθυνση και μέτρο που εξαρτάται από το λόγο μετάδοσης τυχόν μειωτήρα, τη δύναμη ή την ροπή που ασκείται στο τελικό σημείο δράσης (end effector) και να τον περιστρέψει αντίστοιχα. Η ιδιότητα αυτή συνδέεται άμεσα με το μέγεθος του λόγου μετάδοσης του μειωτήρα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος μετάδοσης τόσο πιο δύσκολη είναι η περιστροφή του κινητήρα, δηλαδή τόσο μεγαλύτερη δύναμη είναι αναγκαία να εφαρμοσθεί στο τελικό σημείο δράσης για να περιστραφεί ο κινητήρας: τότε λέμε πως το σύστημα δεν είναι backdrivable. Αυτό έχει ως συνέπεια για πολύ μεγάλους λόγους μείωσης το σύστημα να έχει πρακτικά μόνο μια φορά μεταφοράς ισχύος, από τον κινητήρα προς το end effector, αφού οι δυνάμεις που απαιτούνται για την αντίθετη περίπτωση είναι ανέφικτες. Στο Σχήμα 2-6 φαίνεται αυτό το φαινόμενο.



Σχήμα 2-6: Φαινόμενο non-backdrivability σε συστήματα με μεγάλους λόγους μείωσης.

Το παραπάνω φαινόμενο οφείλεται στις μεγάλες ροπές αδράνειας που έχουν τα διάφορα κινούμενα μέρη που αποτελούν έναν μειωτήρα, αλλά και στην στατική τριβή που εμφανίζεται μεταξύ των οδόντων των γραναζιών. Στην πράξη, συστήματα με λόγο μείωσης μικρότερο του 100 (ή καλύτερα μικρότερο του 50 για μεγαλύτερη ασφάλεια) θεωρούνται ως backdrivable και οι σχεδιαστές τους δεν χρειάζεται να ασχοληθούν με αυτό το φαινόμενο. Αντίθετα, σε συστήματα με μεγάλο λόγο μετάδοσης η απουσία του backdrivability μπορεί να επιφέρει

ολέθρια αποτελέσματα (π.χ. αστάθεια κ.ά.) και πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπ' όψη και να μοντελοποιηθεί.

Στα ρομπότ με πόδια οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στα πέλματα τους ή σε διάφορα άλλα σημεία της κατασκευής είναι πολύ σημαντικές για τη λειτουργία τους και είναι απαραίτητο να μεταφερθούν και να επιδράσουν στους κινητήρες. Αυτό σημαίνει πως σε αυτήν την κατηγορία ρομπότ, στην οποία ανήκει και αυτό που μελετάται σε αυτήν την εργασία, είναι αναγκαία η χρήση συστήματος επενέργειας με μικρό λόγο μείωσης για την επίτευξη του backdrivability. Εάν αποφασισθεί να χρησιμοποιηθεί μειωτήρας με λόγο μείωσης μεγαλύτερο του 100 θα πρέπει να έχει ελεγχθεί πλήρως αν το μοντέλο λειτουργεί χωρίς backdrivability.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας για το δίποδο ρομπότ επιλέχθηκε σύστημα επενέργειας με μεγάλο λόγο μείωσης και ως εκ τούτου ο συνολικός μηχανισμός δεν χαρακτηρίζεται από backdrivability. Επειδή δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία ένας απλός μαθηματικός τύπος που να ποσοτικοποιεί αυτήν την ιδιότητα, να συσχετίζει δηλαδή τον λόγο μείωσης με τη δύναμη που πρέπει ασκηθεί στο τελικό σημείο δράσης για να κινηθεί ο κινητήρας, δεν προτιμήθηκε να μελετηθεί μαθηματικά και να βγει ένα συμπέρασμα για το μέγεθος της επιρροής του. Για το λόγο αυτό, το φαινόμενο αυτό θα μοντελοποιηθεί και θα επιλυθεί με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού, το οποίο θα παρουσιασθεί σε επόμενο κεφάλαιο, και μέσα από τις προσομοιώσεις που θα γίνουν θα εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα.

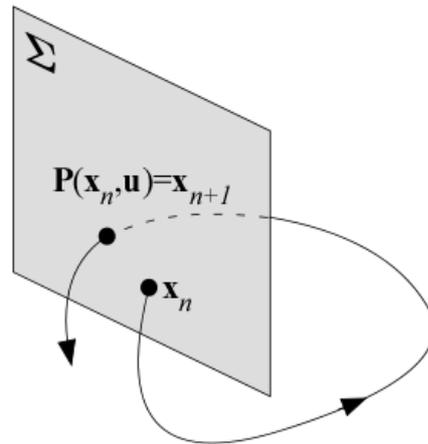
2.5 Ευστάθεια Βηματισμού

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για το δίποδο βηματισμό και κατ' επέκταση για το ανθρώπινο περπάτημα. Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία από το οποίο θα πρέπει να χαρακτηρίζεται ο βηματισμός του δίποδου μοντέλου είναι η ευστάθεια, δηλαδή η ικανότητα του συστήματος να εκτελεί ομαλό βηματισμό για μεγάλο χρονικό διάστημα, και ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητη η λεπτομερής μελέτη της. Ο βηματισμός του δίποδου αποτελεί περιοδικό φαινόμενο και επομένως θα χρησιμοποιηθούν μέθοδοι ελέγχου της ευστάθειας που χρησιμοποιούνται σε περιοδικά συστήματα.

Για τις περιοδικές συμπεριφορές, μπορούν να προσδιοριστούν ορισμένες χαρακτηριστικές θέσεις τις οποίες λαμβάνει το σύστημα σε κάθε επανάληψη. Για ένα γνωστό περιοδικό σύστημα με επίσης γνωστή είσοδο u , η κατάσταση του συστήματος κατά τη διέλευσή του από κάποια προσδιορισμένη θέση αρκεί για να ορίσει την κατάσταση που θα έχει το σύστημα την επόμενη φορά που θα διέλθει από τη θέση αυτή. Η συσχέτιση αυτή των καταστάσεων κατά τις δύο διαδοχικές διελεύσεις είναι πρακτικά μια «απεικόνιση», όπως υποδεικνύει η σχέση:

$$\mathbf{x}_{n+1} = P(\mathbf{x}_n, \mathbf{u}) \quad (5-14)$$

Η εξίσωση (5-14) είναι ο συμβολισμός μιας απεικόνισης, η οποία ονομάζεται απεικόνιση Poincaré. Οι προσδιορισμένες θέσεις στις οποίες σημειώνεται και συγκρίνεται η κατάσταση ονομάζονται τομές Poincaré και συμβολίζονται με Σ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-7:



Σχήμα 2-7: Απεικόνιση και τομές Poincaré.

Στα μη γραμμικά συστήματα, η περιοδική μεταβολή της κατάστασης δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί. Η επαναληψιμότητα στις καταστάσεις μπορεί να γραφεί ως:

$$\mathbf{x}_n^* = \mathbf{x}_{n+1}^* \Rightarrow \mathbf{x}_n^* - P(\mathbf{x}_n^*, \mathbf{u}) = 0 \quad (5-15)$$

Οι καταστάσεις \mathbf{x}^* που επαληθεύουν την τελευταία εξίσωση ονομάζονται *σταθερά σημεία* του συστήματος (fixed points) και εάν δοθούν ως αρχικές συνθήκες κατά την επίλυσή του, οι λύσεις θα είναι περιοδικές.

Για τη μελέτη της ευστάθειας ενός σταθερού σημείου \mathbf{x}^* , η κατάσταση στην αρχή κάθε βήματος μεταβάλλεται από την ονομαστική τιμή της κατά μία πολύ μικρή τιμή $\Delta \mathbf{x}$ με στοιχεία της τάξης του 10^{-6} , ώστε η απόκριση τελικά να μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$\Delta \mathbf{x}_{n+1}^* = \left. \frac{\partial P(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} \Delta \mathbf{x}_n^* \triangleq \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}_n^* \quad (5-16)$$

Την παρούσα εργασία ενδιαφέρει η ευστάθεια των σταθερών σημείων \mathbf{x}^* . Για τον δίποδο ενεργητικό μηχανισμό ο πίνακας \mathbf{A} που μελετάται είναι 10×10 , λόγω των 5 βαθμών ελευθερίας του συστήματος. Η περιοδική λύση \mathbf{x}^* είναι ευσταθής όταν όλες οι ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{A} του διακριτού συστήματος βρίσκονται εντός του μοναδιαίου κύκλου του μιγαδικού επιπέδου. Επομένως για κάθε σταθερό σημείο \mathbf{x}^* και για συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων υπολογίζεται ο πίνακας \mathbf{A} , στη συνέχεια οι ιδιοτιμές του και τέλος ελέγχεται αν αυτές βρίσκονται εντός του μοναδιαίου κύκλου, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την ευστάθεια του βηματισμού.

2.6 Νόμος Ελέγχου

Σχετικά με την αρχιτεκτονική του νόμου ελέγχου έχουν προταθεί πολλές επιλογές στη διεθνή βιβλιογραφία, με τις πιο απλές να είναι γραμμικοί PD ελεγκτές. Σε συστήματα που δεν έχει γίνει επαρκής μοντελοποίηση οι ελεγκτές αυτοί προσφέρουν ικανοποιητική απόκριση όταν

έχουν αρκετά μεγάλα κέρδη. Τα κέρδη αυτά όμως οδηγούν σε υψηλές ροπές από τους κινητήρες, αλλά και επιβάλλουν τη δυναμική του ελεγκτή στο σύστημα, με αποτέλεσμα να χάνεται η δυναμική του παθητικού περπατήματος.

Για τους παραπάνω λόγους και δεδομένων των στόχων του σχεδιασμού δίποδων ρομπότ, έχει επικρατήσει ο έλεγχος βασισμένος στο μοντέλο (Model Based Control), ο οποίος και έχει επιλεγεί και στο πλαίσιο αυτής της μελέτης. Ο βασισμένος σε μοντέλο έλεγχος γενικά εκμεταλλεύεται τη γνώση των δυναμικών εξισώσεων ενός μοντέλου, συμπληρώνοντας ή αφαιρώντας, μέσω της επενέργειας, όρους που τελικά διαμορφώνουν την δυναμική του συστήματος κατά τον επιθυμητό τρόπο.

Όμως, το δίποδο ενεργητικό ρομπότ είναι υπό-επενεργούμενο, αφού δεν έχει καθόλου επενέργεια στους γραμμικούς βαθμούς ελευθερίας. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια να μην είναι εφικτό να επιτευχθεί οποιαδήποτε επιθυμητή συμπεριφορά και έτσι ένας απλός έλεγχος βασισμένος στο μοντέλο να οδηγήσει σε ασταθή βηματισμό. Για το λόγο αυτό, τελικά επιλέγεται μια παραλλαγή Model Based Controller υποβοηθούμενου από όρους PD: το Model Based τμήμα θα επιβάλλει τη δυναμική στο μοντέλο, καθώς θα αξιοποιεί την παθητική δυναμική, και ο PD θα λειτουργεί ως διορθωτικός παράγοντας, εξαιτίας της ελλιπούς επενέργειας. Έτσι, τα κέρδη P και D θα είναι αρκετά μικρά, για να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερη επιρροή στη δυναμική του συστήματος, ενώ οι όροι u_{g1} και u_{g3} που θα χρησιμοποιηθούν θα έχουν την παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned}
 u_{g1} = & g(Mr \sin(-2 - \theta) - L_1 M_{cw} \sin(-2 - \theta) - 2mr \sin(-2) - L_1 m \sin(-2 - \theta) - \\
 & L_1 M \sin(-2 - \theta) + M_{cw} r \sin(-2 - \theta) - l m \sin(-2 - \theta) + 2mr \sin(-2 - \theta) - Mr \sin(-2) - \\
 & M_{cw} r \sin(-2) - Mr \sin(a - \theta) + L_1 M_{cw} \sin(a - \theta) + 2mr \sin(a) + L_1 m \sin(a - \theta) + \\
 & L_1 M \sin(a - \theta) - M_{cw} r \sin(a - \theta) + l m \sin(a - \theta) + Mr \sin(a) + M_{cw} r \sin(a) + \\
 & K_p (\delta - \delta_{target}) + K_D (\dot{\delta} - \dot{\delta}_{target})
 \end{aligned} \tag{5-17}$$

$$u_{g3} = gm(L_2 - l)(\sin(a + \psi) - \sin(-2 - \psi)) \tag{5-18}$$

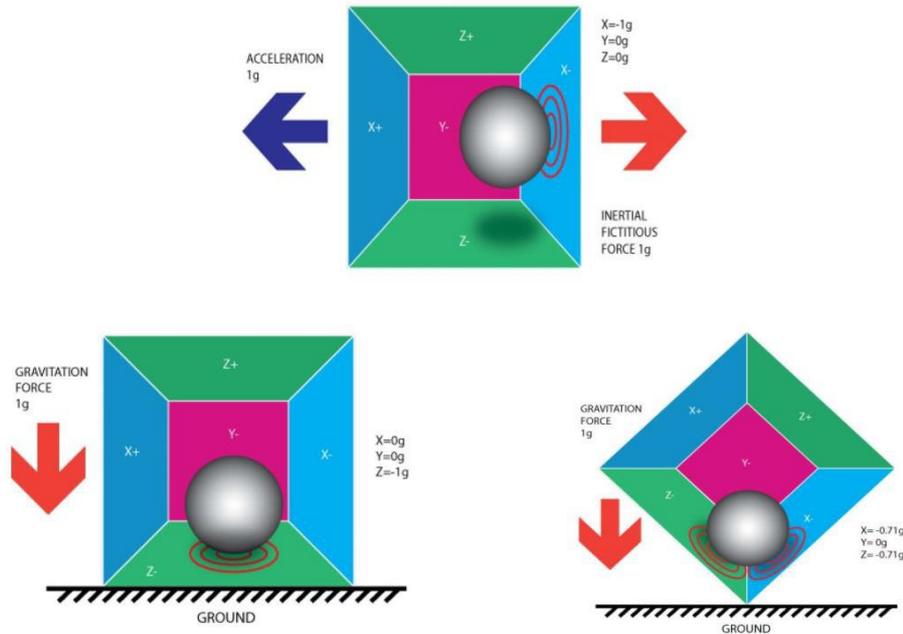
2.7 Αισθητήρες

Για την μετατροπή του παθητικού μοντέλου σε ενεργητικό, εκτός από την προσθήκη συστήματος επενέργειας, είναι απαραίτητη η χρήση αισθητήρων για την συλλογή πληροφοριών σχετικών με το βηματισμό. Στην ενότητα αυτή γίνεται μια αναφορά στους αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν και στον τρόπο λειτουργίας του καθενός.

2.7.1 Επιταχυνσιόμετρο

Το επιταχυνσιόμετρο είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που έχει την ικανότητα να μετρά επιταχύνσεις. Αυτές οι επιταχύνσεις μπορεί να είναι στατικές, όπως είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, ή δυναμικές όταν προκαλούνται – προέρχονται από αλλαγές στην ταχύτητα ή στην διεύθυνση της κίνησης (επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις, στροφές).

Ένα επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στο δίπλοδο, ανιχνεύει γραμμικές επιταχύνσεις σε τρεις κάθετες διευθύνσεις. Μια απλή προσέγγιση του τρόπου λειτουργίας του είναι η απεικόνιση μιας σφαίρας μέσα σε ένα κουτί με τοίχους ευαίσθητους στην πίεση. Καθώς το κουτί κινείται σε διάφορες κατευθύνσεις, η σφαίρα πιέζει διαφορετικά τοιχώματα, με αποτέλεσμα να γίνεται γνωστή η κατεύθυνση και το μέτρο της επιτάχυνσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-8.



Σχήμα 2-8: Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιόμετρου.

Όταν το επιταχυνσιόμετρο είναι ακίνητο η σφαίρα ασκεί πίεση στα τοιχώματα μόνο λόγω της βαρύτητας με συνισταμένη $1g$ ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$). Αντίθετα, ένα επιταχυνσιόμετρο σε ελεύθερη πτώση θα δίνει μέτρηση ίση με το μηδέν.

Το επιταχυνσιόμετρο που θα χρησιμοποιηθεί εδώ είναι το FXOS8700. Το FXOS8700 είναι ένα μικρό, χαμηλής ενέργειας επιταχυνσιόμετρο 3 αξόνων με ανάλυση 14 bit. Το εύρος μέτρησης ορίζεται από τον χρήστη και παίρνει τις τιμές $\pm 2g$ / $\pm 4g$ / $\pm 8g$, ενώ η συχνότητα αποστολής δεδομένων φτάνει μέχρι τα 400 Hz.

2.7.2 Γυροσκόπιο

Το γυροσκόπιο είναι μια συσκευή η οποία μπορεί να διατηρεί σταθερό τον προσανατολισμό της μέσω της περιστροφής των μερών της και της αρχής της διατήρησης της στροφορμής. Αρχικά, τα γυροσκόπια χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για πλοήγηση, όμως σήμερα η χρήση τους έχει γίνει πολύ ευρύτερη όπως σε συσκευές σταθεροποίησης, στη ρομποτική, στην εξόρυξη μετάλλων και σε πολλά άλλα συστήματα όπου απαιτείται μια σταθερή κατευθυντήρια αναφορά.

Το γυροσκόπιο τύπου δονούμενης μάζας είναι ο τύπος που χαρακτηρίζει τα περισσότερα μικρο-γυροσκόπια και συγκεκριμένα και αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στο δίπλοδο. Αποτελείται από ένα δονούμενο στοιχείο, το οποίο όταν περιστραφεί υπόκειται σε μια δευτερεύουσα κίνηση κάθετη στην κίνηση δόνησης λόγω του φαινομένου Coriolis. Το φαινόμενο Coriolis

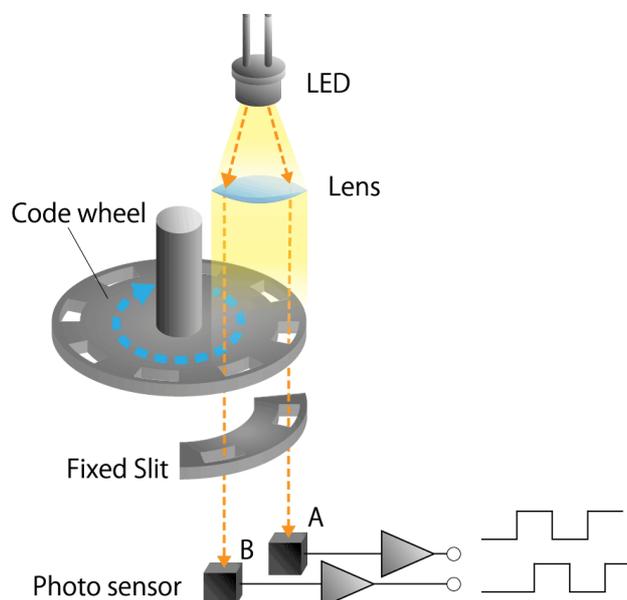
περιλαμβάνει την επαγωγή μιας δευτερεύουσας αδρανειακής επιτάχυνσης με διεύθυνση κάθετη στον άξονα κίνησης, όταν περιστραφεί ένα δονούμενο αντικείμενο. Μετρώντας τη δευτέρουσα κίνηση που προκύπτει υπολογίζεται η γωνιακή περιστροφή της συσκευής.

Το γυροσκόπιο που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι το FXAS21002. Το FXAS21002 είναι ένα μικρό, χαμηλής ενέργειας, γυροσκόπιο με ανάλυση 16 bit. Το εύρος μέτρησης κυμαίνεται από 250°/s έως 2000°/s και ορίζεται από τον χρήστη ανάλογα με το είδος της εφαρμογής που θα το χρησιμοποιήσει. Η συχνότητα αποστολής δεδομένων φτάνει μέχρι και τα 800 Hz.

2.7.3 Encoder

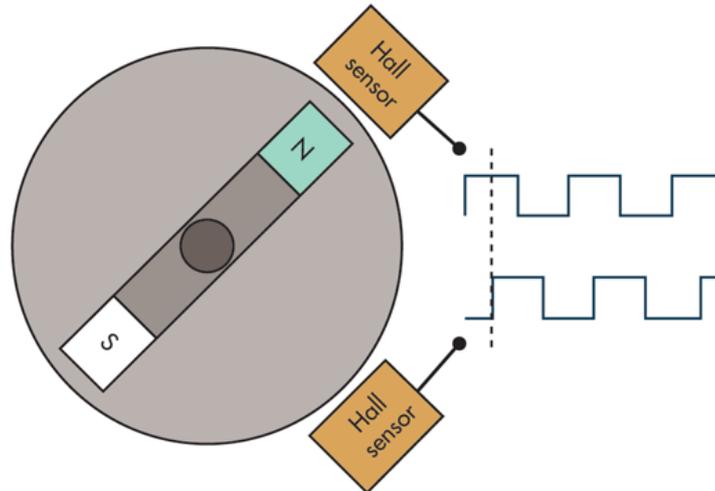
Ο encoder είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που μετατρέπει τη γωνιακή θέση ή κίνηση ενός άξονα σε αναλογικά ή ψηφιακά σήματα εξόδου. Υπάρχουν δύο κύρια είδη encoder: ο absolute (απόλυτος) και ο incremental (επαυξητικός). Ο absolute encoder δείχνει τη θέση του άξονα περιστροφής, πάνω στο οποίο είναι συνδεδεμένος, δηλαδή την απόλυτη θέση, ενώ ο incremental encoder παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κίνηση του άξονα, δηλαδή μετράει την σχετική του θέση (σχετική ως προς την αρχική θέση του άξονα).

Επιπλέον, ανάλογα με τον τρόπο που παίρνουν τις μετρήσεις οι encoders χωρίζονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες: τους οπτικούς και τους μαγνητικούς. Οι οπτικοί encoders χρησιμοποιούν μια πηγή φωτός, έναν φωτοευαίσθητο ανιχνευτή και έναν δίσκο με ειδικές οπές για την μέτρηση της γωνίας. Το φως που εκπέμπεται από την πηγή διέρχεται μέσω των οπών του δίσκου και μετατρέπεται από τον ανιχνευτή και ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε ηλεκτρικό σήμα (Σχήμα 2-9).



Σχήμα 2-9: Διάταξη οπτικού encoder και τρόπος λειτουργίας του.

Οι μαγνητικοί encoders παίρνουν τις μετρήσεις τους μέσω της αλλαγής του μαγνητικού πεδίου. Αποτελούνται από έναν μόνιμο μαγνήτη που βρίσκεται συνήθως συνδεδεμένος τον άξονα του encoder και έναν αισθητήρα Hall. Ο αισθητήρας με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού κυκλώματος μετατρέπει τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου σε ηλεκτρικό σήμα.



Σχήμα 2-10: Διάταξη μαγνητικού encoder.

Οι encoders που θα χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση των γωνιών των κινητήρων του δίποδου ρομπότ είναι μαγνητικοί incremental encoders με ανάλυση 1024 CPT (counts per turn), παρέχουν δηλαδή γωνιακές μετρήσεις με ανάλυση υψηλότερη των 0.3° .

3 Προσομοίωση σε Προγραμματιστικό Περιβάλλον

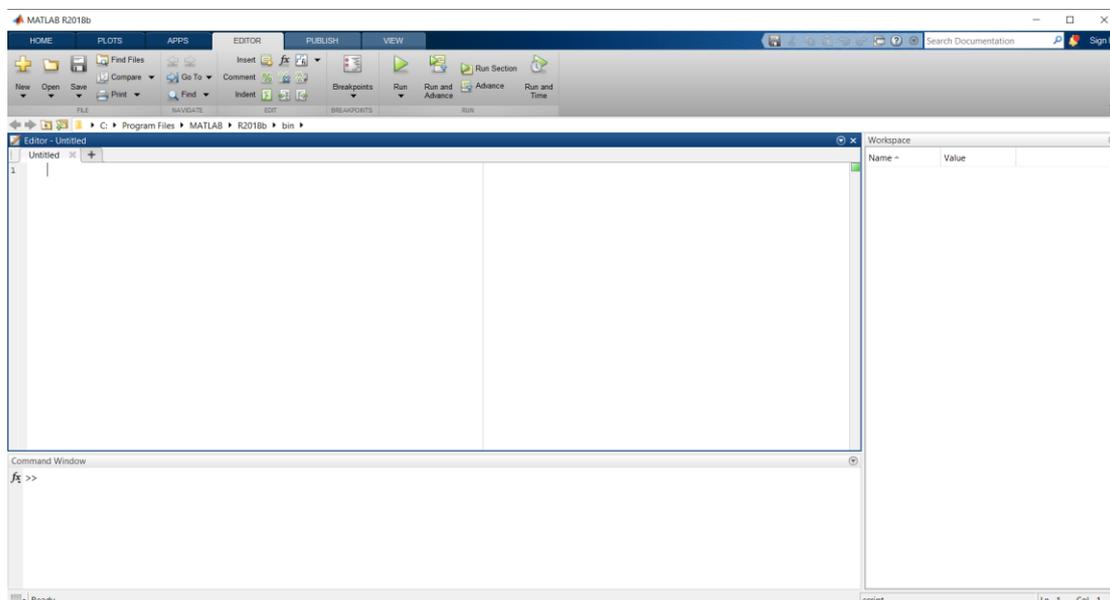
3.1 Εισαγωγή

Κομβικό σημείο για το σχεδιασμό του δίποδου ρομπότ είναι η μοντελοποίησή του σε προγραμματιστικά περιβάλλοντα, με σκοπό την επαλήθευση του ευσταθούς βηματισμού σε επίπεδα με διαφορετικές κλίσεις και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά MATLAB και MSC Adams. Με αφετηρία το απλουστευμένο μηχανικό μοντέλο και τις προσομοιώσεις βαδίσματος σε περιβάλλον MATLAB, εκτελείται στη συνέχεια προσομοίωση βαδίσματος σε περιβάλλον MSC Adams, με στόχο την εξαγωγή επιπλέον στοιχείων για την ανάλυση, όπως ταχύτητες και καταπονήσεις, βασικότερες των οποίων είναι οι δυνάμεις κατά την επαφή των πελμάτων με το έδαφος, οι δυνάμεις των ελατηρίων και οι αδρανειακές δυνάμεις των ίδιων των εξαρτημάτων.

3.2 MATLAB

3.2.1 Το λογισμικό MATLAB

Το λογισμικό MATLAB εμπεριέχει μια γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς και ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής. Αποτελεί ένα σπουδαίο εργαλείο για τη μοντελοποίηση, την προσομοίωση, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μηχανολογικών συστημάτων. Το περιβάλλον του έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1: Προγραμματιστικό περιβάλλον λογισμικού MATLAB.

Στο πλαίσιο με τίτλο “Editor” ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να γράψει εντολές για τη δημιουργία προγράμματος, το οποίο μπορεί να εκτελεστεί πατώντας το κουμπί “Run” στο πάνω μέρος της οθόνης. Στο πλαίσιο “Workspace” εμφανίζονται μετά την εκτέλεση του

προγράμματος οι μεταβλητές του μαζί με τις αντίστοιχες τιμές τους, ενώ στο πλαίσιο “Command Window” μπορεί ο χρήστης να γράψει μεμονωμένες εντολές για άμεση εκτέλεση.

Η βασική μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί στο λογισμικό MATLAB είναι:

- Η δημιουργία κατάλληλου προγράμματος.
- Η εκτέλεση του προγράμματος και ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων.
- Η εξαγωγή συμπερασμάτων με αξιολόγηση των αριθμητικών τιμών που προέκυψαν από το πρόγραμμα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται με περισσότερες λεπτομέρειες τα τρία παραπάνω στάδια.

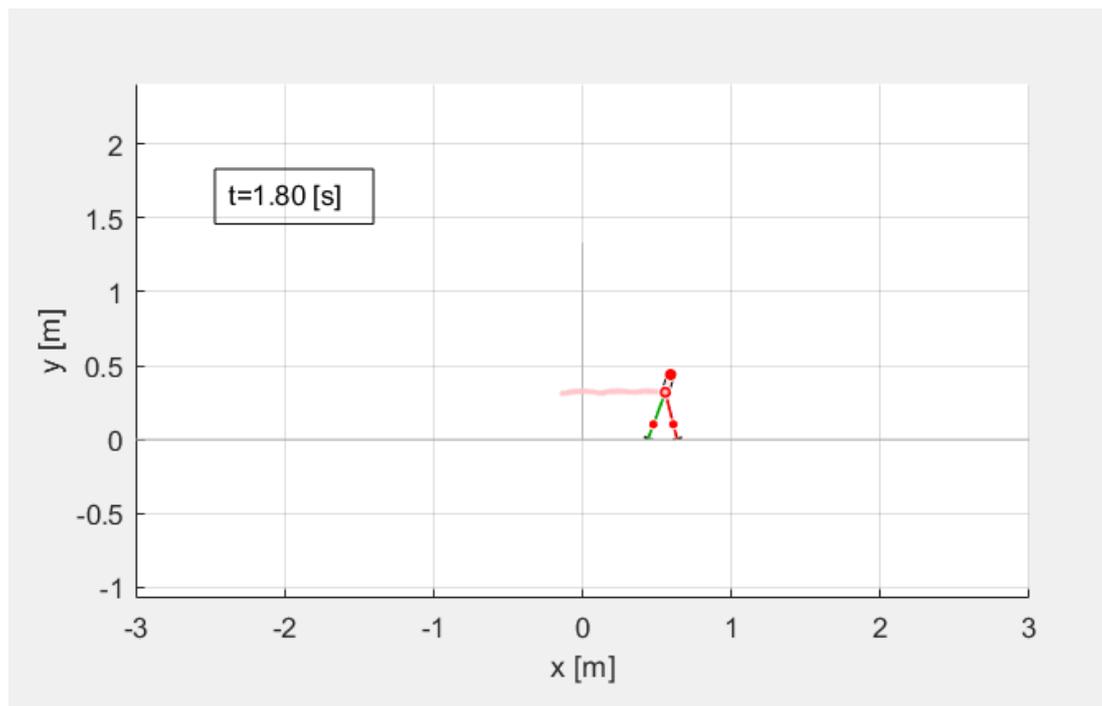
Δημιουργία προγράμματος:

Η δημιουργία του προγράμματος γίνεται στο πλαίσιο “Editor”, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, και αξιοποιεί τη θεωρία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το κυρίως πρόγραμμα χωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα. Στο πρώτο μέρος γίνεται η αρχικοποίηση των μεταβλητών του συστήματος και θέτονται αριθμητικές τιμές στους σταθερούς όρους, όπως για παράδειγμα στη μάζα των πελμάτων, τη σταθερά του ελατηρίου κ.ά. Στο δεύτερο μέρος, επιλύονται οι διαφορικές εξισώσεις που προέκυψαν από τη θεωρία με τη χρήση της μεθόδου Lagrange με τους επιλύτες ode15s και ode23t, και υπολογίζονται οι χρονικές μεταβολές των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι δύο αυτοί επιλύτες (solvers) της MATLAB διότι το μητρώο αδράνειας του συστήματος περιέχει ιδιομορφίες, καθώς το σύστημα περιέχει τις διαφορικές εξισώσεις της δυναμικής, αλλά και τις αλγεβρικές εξισώσεις των περιορισμών: είναι δηλαδή ένα σύστημα Διαφορικών και Αλγεβρικών εξισώσεων, το οποίο μόνο οι συγκεκριμένοι επιλύτες μπορούν να διαχειριστούν στη MATLAB. Τέλος, στο τρίτο μέρος πραγματοποιείται μια οπτική αναπαράσταση του βηματισμού μέσω της διαδοχικής προβολής των στιγμιοτύπων κάθε χρονικής στιγμής.

Εκτέλεση προγράμματος:

Όταν το πρόγραμμα γραφτεί είναι έτοιμο να εκτελεστεί. Στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, η μετάφραση των εντολών του προγράμματος γίνεται πριν την εκτέλεση του, σε ολόκληρο το πρόγραμμα και όχι σε κάθε εντολή τη στιγμή που γράφεται. Αφού ελεγχθεί για τυχόν συντακτικά λάθη το πρόγραμμα εκτελείται, η δυναμική επιλύεται και τελικά εμφανίζεται στην οθόνη το δίποδο ρομπότ να περπατάει σε επίπεδο με κλίση που έχει οριστεί κατά τη δημιουργία του προγράμματος. Η οπτική αναπαράσταση έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 3-2.

Η κόκκινη συνεχής γραμμή δείχνει την τροχιά του ισχίου του ρομπότ κατά τη διάρκεια της κίνησης. Επιπλέον, κάθε πόδι χρωματίζεται ανάλογα με την φόρτιση του ελατηρίου του: πράσινο για εφελκυστικές δυνάμεις και κόκκινο για θλιπτικές. Κατά την παραπάνω προσομοίωση φαίνεται ο βηματισμός που θα εκτελέσει και στην πραγματικότητα το δίποδο, αν είναι ευσταθής η ασταθής, και στη δεύτερη περίπτωση πόσα βήματα θα κάνει μέχρι να ανατραπεί.



Σχήμα 3-2: Οπτική αναπαράσταση εκτέλεσης του προγράμματος στο λογισμικό MATLAB.

Παράμετροι μοντέλου:

Οι παράμετροι του μοντέλου στις προσομοιώσεις έχουν επιλεγθεί ώστε να αντιστοιχούν στις πραγματικές τιμές του ρομπότ που κατασκευάστηκε, και φαίνονται στον Πίνακα:

Πίνακας 3-1. Τιμές παραμέτρων του δίποδου ρομπότ κατά τις προσομοιώσεις.

Ονομασία παραμέτρου	Σύμβολο	Τιμή
Μάζα ισχύου	M	0.657 kg
Μάζα πέλματος	m	0.380 kg
Μήκος ποδιού	Lnat	0.333 m
Σταθερά ελατηρίου	k	2800 N/m
Σταθερά απόσβεσης	B	58.35 Ns/m
Ακτίνα κυκλικού πέλματος	r	0.083 m
Θέση μάζας πέλματος	l	0.103 m

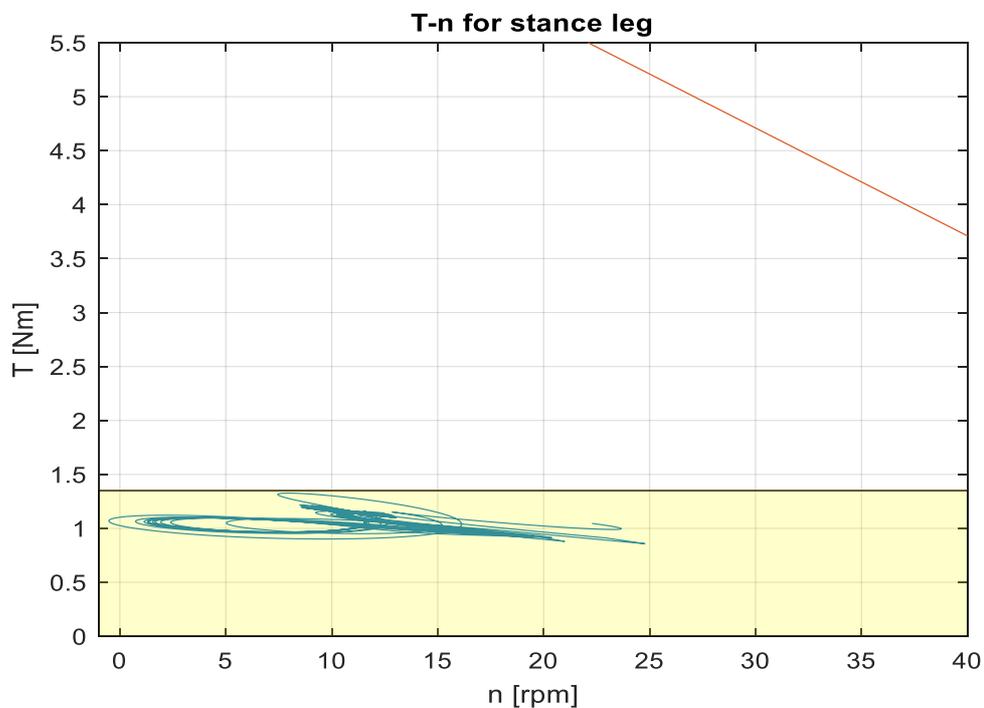
Εξαγωγή συμπερασμάτων:

Μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, ο χρήστης μπορεί να λάβει και να επεξεργασθεί τα αποτελέσματα και μέσω αυτών να καταλήξει σε χρήσιμα συμπεράσματα. Στο πλαίσιο “Workspace” εμφανίζονται όλες οι μεταβλητές του προγράμματος (Σχήμα 3-3), ενώ ο χρήστης μπορεί να διαλέξει όποια θέλει και να εμφανιστεί στην οθόνη η τιμή της ή το διάγραμμα της συναρτήσεως του χρόνου.

Name	Value
massM_obj	1x1 Group
massmd_obj	1x1 Group
max_margin	1.7812
MaxStep	2.9761e-04
Mcw	0.7250
Mcw_d	0.6576
min_margin	1.4114
minim	6.9499e-06
motor	21967x1 double
mov	1x118 struct
n_angle1	21967x1 double
n_stance	21967x1 double
n_swing	21967x1 double
nFrames	21967
options1i	1x1 struct
options1ii	1x1 struct
options1iii	1x1 struct
options2	1x1 struct
P_psi	21967x1 double
P_term	21967x1 double
P_theta	21967x1 double
param	1x14 double
phase	21967x1 double
psi	21967x1 double
psi_0	-0.2900
psi_dot	21967x1 double
psi_dot_0	-2.3577
psi_dotAi	809x1 double
psi_dotAii	849x1 double
psi_dotAiii	363x1 double
psi_dotB	231x1 double
psi_j	0.2652
psiAi	809x1 double
psiAii	849x1 double
psiAiii	363x1 double

Σχήμα 3-3: Εμφάνιση όλων των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα.

Επίσης, δίνεται η δυνατότητα παρουσίασης και άλλων συνδυαστικών μετρήσεων σε μορφή διαγράμματος, όπως για παράδειγμα το διάγραμμα Ροπής - Στροφών του κινητήρα που φαίνεται στο Σχήμα 3-4.



Σχήμα 3-4: Ένα τυπικό διάγραμμα που παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προγράμματος.

3.2.2 Προσαρμογές στο μηχανικό μοντέλο για αριθμητική επίλυση

Το μοντέλο που επιλύεται στο λογισμικό MATLAB είναι το μηχανικό μοντέλο που έχει παρουσιασθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο και γι' αυτό το λόγο περιγράφεται αναλυτικά από το ίδιο σύστημα διαφορικών εξισώσεων (βλ. εξίσωση (2-10)). Φυσικά όμως, για την μοντελοποίηση του βηματισμού είναι αναγκαία και η μοντελοποίηση του εδάφους. Η κρούση του πέλματος με το έδαφος υλοποιείται αριθμητικά μέσω της εφαρμογής των αλγεβρικών περιορισμών μη ολίσθησης και επαφής του πέλματος με το έδαφος. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν αριθμητικά οι δυνάμεις της επαφής του δίποδου με το έδαφος.

Οι περιορισμοί αυτοί τίθενται σε ισχύ κάθε φορά που το πόδι αιώρησης φτάνει στο ύψος του εδάφους έπειτα από πλήρη έκτασή του, ενώ καταργούνται όταν οι κατακόρυφες δυνάμεις της επαφής μηδενίζονται, ώστε να αποφευχθεί κάποια τεχνητή κατάσταση στην οποία το έδαφος θα ασκούσε ελκτικές δυνάμεις στο πέλμα.

Ακόμα, αγνοούνται οι επαφές με το έδαφος που θα είχε το πόδι αιώρησης κατά την προώθησή του προς τα εμπρός και πριν την πλήρη έκτασή του, φαινόμενο που εμφανίζεται λόγω της απουσίας γονάτων στο δίποδο. Οι επαφές αυτές θα αποφευχθούν τεχνητά και κατά την πειραματική διαδικασία, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

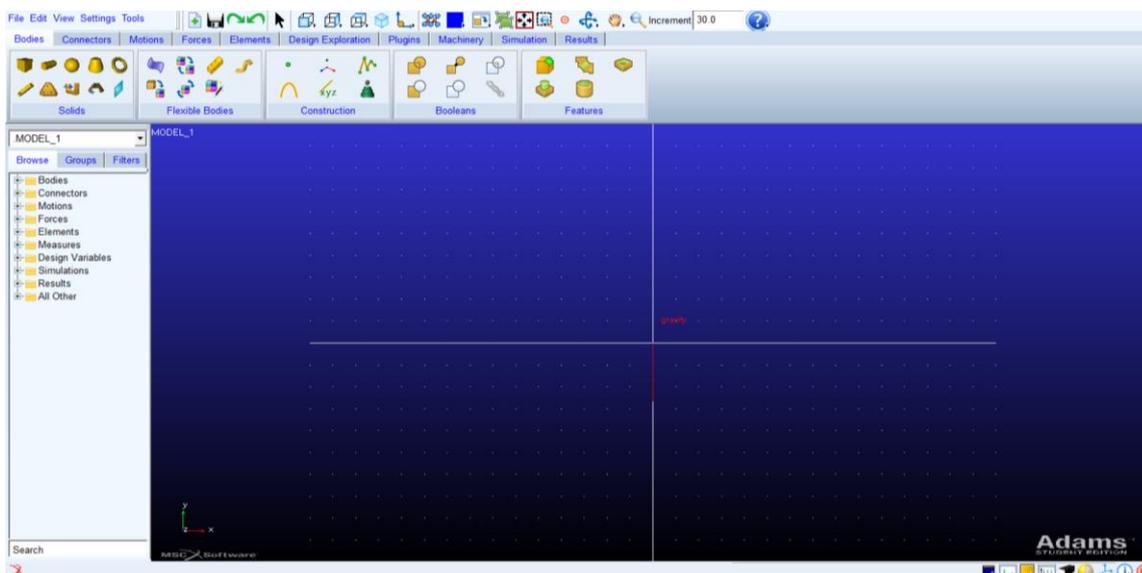
3.2.3 Συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις στη MATLAB

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό MATLAB προέκυψαν κάποια σημαντικά στοιχεία που συντέλεσαν στην επικύρωση της θεωρίας, την αξιολόγηση του βηματισμού και την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκαν τα σταθερά σημεία του συστήματος που οδήγησαν σε ευσταθή βηματισμό και ως εκ τούτου οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου και καταλήξαμε στις τελικές διαστάσεις του αντιβάρου κυρίως αλλά και των πελμάτων για επίτευξη ευσταθούς βηματισμού, μικρής ενεργειακής κατανάλωσης και με μεγάλη ευρωστία (robustness). Όμως, αυτή η γνώση δεν είναι αρκετή για να προχωρήσουμε στην κατασκευή του ρομπότ και την εκτέλεση των πειραμάτων, αφού μπορεί κάποιο φυσικό στοιχείο που αμελήθηκε κατά τη μαθηματική ανάλυση ή κατά τη δημιουργία του προγράμματος να έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις στον βηματισμό από αυτές που έχουν υποθεθεί, με συνέπεια την απώλεια της ευστάθειας του βηματισμού. Για αυτόν τον λόγο, κρίνεται αναγκαία η επιπλέον επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων με ένα ακόμα λογισμικό, το MSC Adams, που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

3.3 MSC Adams

3.3.1 Το λογισμικό MSC Adams

Το λογισμικό MSC Adams (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) ανήκει στην κατηγορία των προγραμμάτων που προσφέρουν τη δυνατότητα αριθμητικής επίλυσης σύνθετων μη γραμμικών συστημάτων χωρίς τη διατύπωση των αναλυτικών μαθηματικών εξισώσεων. Και αυτό όπως και το λογισμικό MATLAB αποτελεί ένα προϊόν με δυνατότητα να εκτελέσει τη μοντελοποίηση, την προσομοίωση και τον έλεγχο μηχανικών συστημάτων. Το περιβάλλον του έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 3-5.



Σχήμα 3-5: Προγραμματιστικό περιβάλλον λογισμικού MSC Adams.

Το μπλε πλαίσιο αποτελεί την επιφάνεια εργασίας του προγράμματος. Εκεί ο χρήστης σχεδιάζει το μοντέλο του και εκεί εκτελούνται και οι προσομοιώσεις. Στο πάνω μέρος του παραθύρου εμφανίζονται τα διάφορα εργαλεία που έχει ο χρήστης στη διάθεση του, ενώ στην αριστερό μέρος υπάρχει μια λίστα με όλα τα μέρη που αποτελούν το μοντέλο, όπως τα σώματα που το απαρτίζουν, οι δυνάμεις που ασκούνται, οι σύνδεσμοι κ.ά.

Η βασική μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί σε αυτό το λογισμικό είναι:

- Η δημιουργία του μοντέλου.
- Η εκτέλεση των προσομοιώσεων.
- Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται με περισσότερες λεπτομέρειες τα τρία παραπάνω στάδια.

Δημιουργία του μοντέλου:

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το ADAMS/View, το οποίο επιτρέπει στο χρήστη να διαμορφώσει το μοντέλο που επιθυμεί χρησιμοποιώντας τα εργαλεία που του παρέχονται. Πολύ εύκολα και γρήγορα μπορεί να προσθέσει απαραμόρφωτα σώματα σε συγκεκριμένες γεωμετρίες, να αποδώσει διάφορες παραμέτρους σε αυτά, όπως για παράδειγμα τις μάζες και τις πυκνότητες τους, τις ροπές αδράνειας τους κ.ά. και να επιβάλλει κινηματικούς περιορισμούς μεταξύ των σωμάτων με τη χρήση διαφορετικών τύπων αρθρώσεων (πρισματική, κυλινδρική, σφαιρική, επίπεδη κ.λπ.). Τέλος, έχει τη δυνατότητα να εφαρμόσει εξωτερικά φορτία (εξωτερικές δυνάμεις και ροπές, δύναμη βαρύτητας κ.ά.) στο σύστημα του.

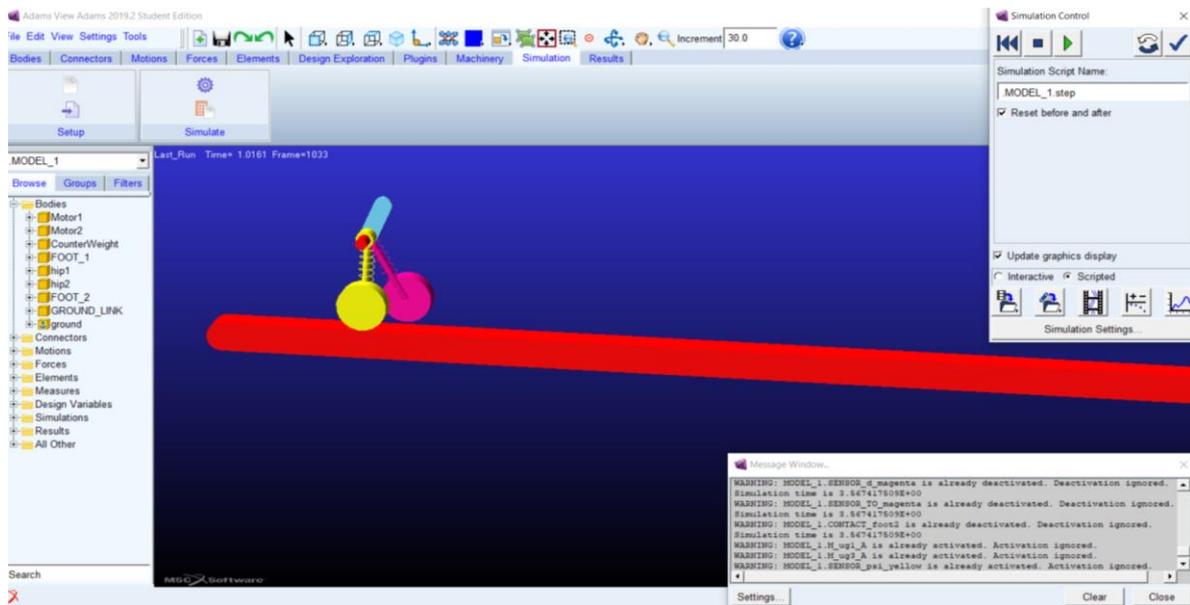
Εκτέλεση προσομοιώσεων:

Η εκτέλεση των προσομοιώσεων του μοντέλου που πρόκυψε πραγματοποιείται στο περιβάλλον του ADAMS/Solver, όπου ο χρήστης καλείται να επιλέξει τον τύπο της προσομοίωσης που επιθυμεί να εκτελεσθεί (π.χ. κινηματική, δυναμική, αρχικών συνθηκών, βελτιστοποίησης κ.ά.), καθώς και του επιλύτη (solver) των διαφορικών εξισώσεων (GSTIFF,

WSTIFF, HHTM Newmark, HASTIFF), σύμφωνα με τον οποίο θα γίνει η λυση του συστήματος. Επίσης ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει και άλλες παραμέτρους (χρονικό βήμα, συνολικός χρόνος προσομοίωσης, μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα) οι οποίες επηρεάζουν την ακρίβεια των λύσεων και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η επιλογή που κάνει ο καθένας εξαρτάται από τον τύπο του προβλήματος.

Μια πολύ σημαντική δυνατότητα του λογισμικού MSC Adams και ένας ακόμα λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε είναι η εκτέλεση προσομοιώσεων με οδηγίες (scripted simulation). Ο τύπος αυτός των προσομοιώσεων χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις που απαιτείται από το μοντέλο η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση διάφορων συνθηκών με τη χρήση αισθητήρων.

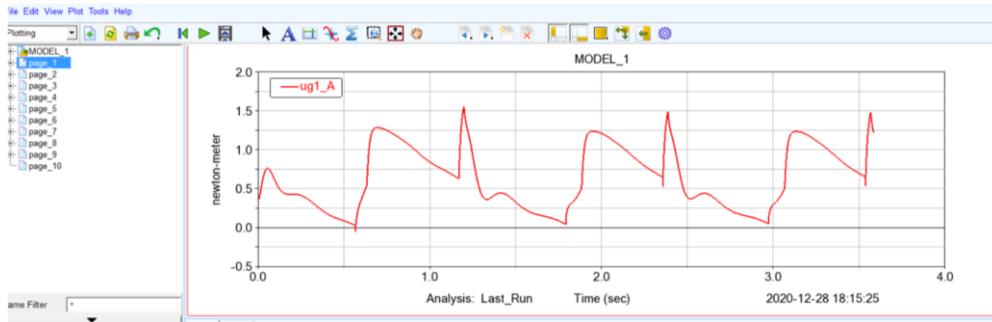
Τέλος, το MSC Adams κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης των προσομοιώσεων επιτρέπει την αναπαράσταση της κίνησης του μοντέλου. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε πολύπλοκα συστήματα με μεγάλη διάρκεια επίλυσης, αφού επιτρέπουν στον χρήστη να παρέμβει σε περίπτωση που δεν είναι ικανοποιημένος με την κίνηση του συστήματός του κατά την επίλυση και με αυτόν τον τρόπο να γλιτώσει πολύτιμο χρόνο. Στο Σχήμα 3-6 φαίνεται η μορφή του λογισμικού MSC Adams κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης.



Σχήμα 3-6: Το περιβάλλον του λογισμικού MSC Adams κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του προγράμματος.

Αξιολόγηση αποτελεσμάτων:

Μετά την λήξη των προσομοιώσεων παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να λάβει, να επεξεργασθεί και να οπτικοποιήσει τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω της λειτουργίας του ADAMS/Postprocessor. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να εξάγει κατάλληλα διαγράμματα όλων των μεγεθών που εμφανίζονται στο σύστημα του, όπως π.χ. μετατοπίσεις, ταχύτητες, επιταχύνσεις, δυνάμεις κ.ά. συναρτήσει του χρόνου, αλλά και άλλων μεγεθών, δηλαδή να προκύψει μέσω διαφόρων εργαλείων ένα συνδυαστικό διάγραμμα. Ένα παράδειγμα τέτοιου διαγράμματος φαίνεται στο Σχήμα 3-7.



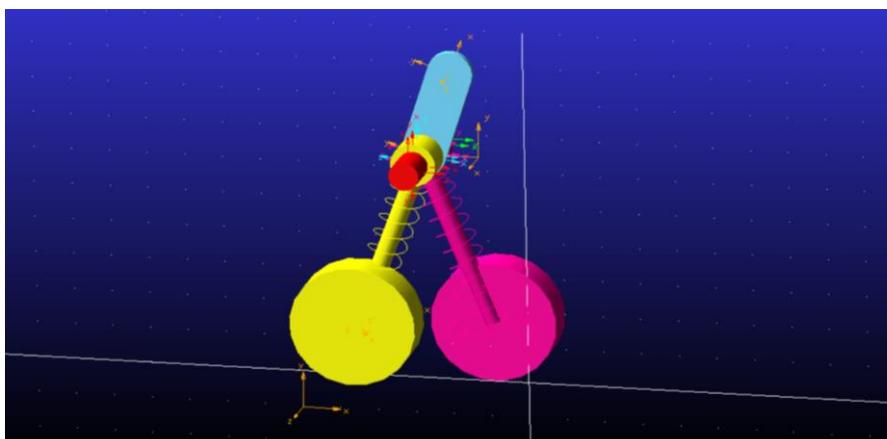
Σχήμα 3-7: Τυπικό διάγραμμα που παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του προγράμματος σε MSC Adams για τη ροπή ενός ποδιού.

Τέλος ο χρήστης μπορεί να αναπαράγει ξανά μέσω διαδικασίας απεικόνισης την ήδη εκτελεσμένη προσομοίωση.

3.3.2 Το φυσικό μοντέλο

Το μοντέλο που κατασκευάστηκε και επιλύθηκε στο λογισμικό MSC Adams αποτελεί μια φυσική αναπαράσταση του μηχανικού και αναλυτικού μοντέλου που παρουσιάστηκε στη θεωρία. Αποτελείται από δύο κύλινδρους για πέλματα, οι οποίοι συνδέονται με ένα ελατήριο ο καθένας. Το άλλο άκρο κάθε ελατηρίου καταλήγει σε έναν άλλον κύλινδρο που αναπαριστά το ισχίο του ρομπότ. Οι δύο κύλινδροι που αναφέρθηκαν πριν και αποτελούν το ισχίο είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με μια στροφική άρθρωση, ώστε να επιτρέπεται η περιστροφή και ως εκ τούτου να κινούνται τα πέλματα ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Επιπλέον, συνδεδεμένο με στροφική άρθρωση με το ισχίο είναι και ένα πρόσθετο σώμα, το αντίβαρο. Τέλος, στην εξωτερική πλευρά κάθε κύλινδρου του ισχίου υπάρχει (συνδεδεμένος με έναν κινηματικό περιορισμό που εφαρμόζει το λόγο μείωσης του μειωτήρα και αποτελεί την μοντελοποίηση του περιορισμού στο backdrivability) ένας κύλινδρος που αναπαριστά τον κινητήρα και στρέφεται σε υψηλές στροφές. Συγκεκριμένα, με την προσθήκη αυτής της συνθήκης, που επιβάλλει στο ισχίο να στρέφεται με τις στροφές του κινητήρα δια του λόγου μείωσης του μειωτήρα, το MSC Adams λαμβάνει υπ' όψιν τις ροπές αδράνειας και τις δυνάμεις τριβής του μειωτήρα στη δυναμική του μοντέλου. Έτσι, το μοντέλο που δημιουργήθηκε φαίνεται τελικά στο Σχήμα 3-8.

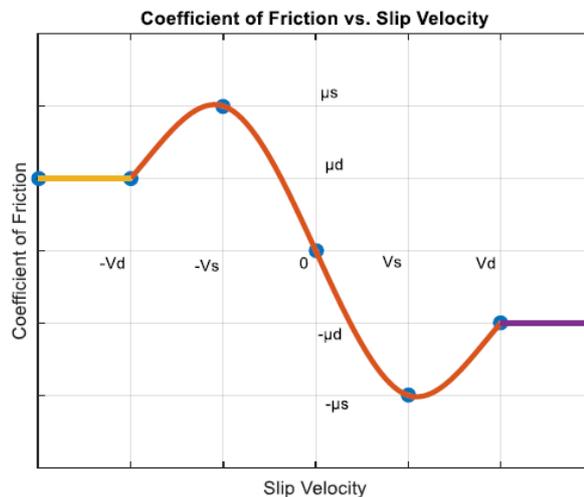


Σχήμα 3-8: Τελικό μοντέλο σε λογισμικό MSC Adams.

Για τη μοντελοποίηση του παθητικού βαδίσματος, εκτός από το δίποδο ρομπότ, είναι αναγκαία και η ορθή μοντελοποίηση του εδάφους. Ο ρόλος του είναι διττός, χρησιμοποιείται τόσο για την επίτευξη του βηματισμού, όσο και ως ένα μέσο για τη μέτρηση και καταγραφή μεγεθών με βάση το ίδιο σημείο αναφοράς.

Καθώς οι δυνάμεις εδάφους μοντελοποιήθηκαν στη MATLAB με την χρήση αριθμητικών περιορισμών, στις προσομοιώσεις μέσω Adams επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί πιο λεπτομερές μοντέλο επαφής με το έδαφος ώστε να συγκριθεί η αποτελεσματικότητα των δύο μεθόδων. Το λογισμικό Adams παρέχει στο χρήστη κάποιες έτοιμες επιλογές για τα μοντέλα επαφής και τριβής. Στην παρούσα εργασία έχει επιλεγεί βισκοελαστικό μοντέλο επαφής με το έδαφος και οι τριβές έχουν μοντελοποιηθεί ως τριβές Coulomb.

Το MSC Adams χρησιμοποιεί συνεχή συνάρτηση για τον ορισμό της τριβής Coulomb. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται επιπλέον παράμετροι, εκτός του στατικού και δυναμικού συντελεστή τριβής για τον ορισμό της συνεχούς συνάρτησης του συντελεστή τριβής μ_f κατά Coulomb. Αυτές είναι η σχετική ταχύτητα στατικής τριβής (stiction transition velocity - V_s) και η σχετική ταχύτητα τριβής ολίσθησης (friction transition velocity - V_d), όπως φαίνονται στο Σχήμα 3-9.



Σχήμα 3-9: Μοντελοποίηση της τριβής μεταξύ πελμάτων και εδάφους στο λογισμικό MSC Adams.

Όσο η τιμή της V_s πλησιάζει το μηδέν, τόσο το μοντέλο προσεγγίζει τη στατική τριβή. Ωστόσο το Adams δεν επιτρέπει στη V_s να πάρει ακριβώς την τιμή μηδέν, οπότε είναι αδύνατο να μοντελοποιηθεί τέλεια το φαινόμενο.

Οι δυνάμεις τριβής δίνονται εδώ από τον παρακάτω τύπο, όπου F_C είναι η δύναμη τριβής και F_N η κατακόρυφη δύναμη του εδάφους:

$$F_C = \mu_f F_N \quad (3-1)$$

Η δύναμη F_N μοντελοποιείται ως κρουστική δύναμη, στην οποία πρέπει να οριστούν κάποιες παράμετροι όπως η δυσκαμψία (stiffness), ο εκθέτης δύναμης (force exponent), η απόσβεση (damping) και το βάθος διείσδυσης (penetration depth). Σύμφωνα με αυτές τις παραμέτρους η κρουστική δύναμη περιγράφεται μαθηματικά με την εξίσωση:

$$F_N = \begin{cases} 0 & q > q_0 \\ k(q_0 - q)^e - B\dot{q}STEP(q, q_0 - d, 1, q_0, 0) & q \leq q_0 \end{cases} \quad (3-2)$$

με q : μια έκφραση που καθορίζει μια μεταβλητή απόστασης.

\dot{q} : μια έκφραση που καθορίζει τη χρονική παράγωγο του q .

q_0 : μια θετική πραγματική μεταβλητή που καθορίζει το ελεύθερο μήκος του q . Αν τότε το Adams υπολογίζει μια θετική τιμή για τη δύναμη. Σε αντίθετη περίπτωση η δύναμη παίρνει τη μηδενική τιμή.

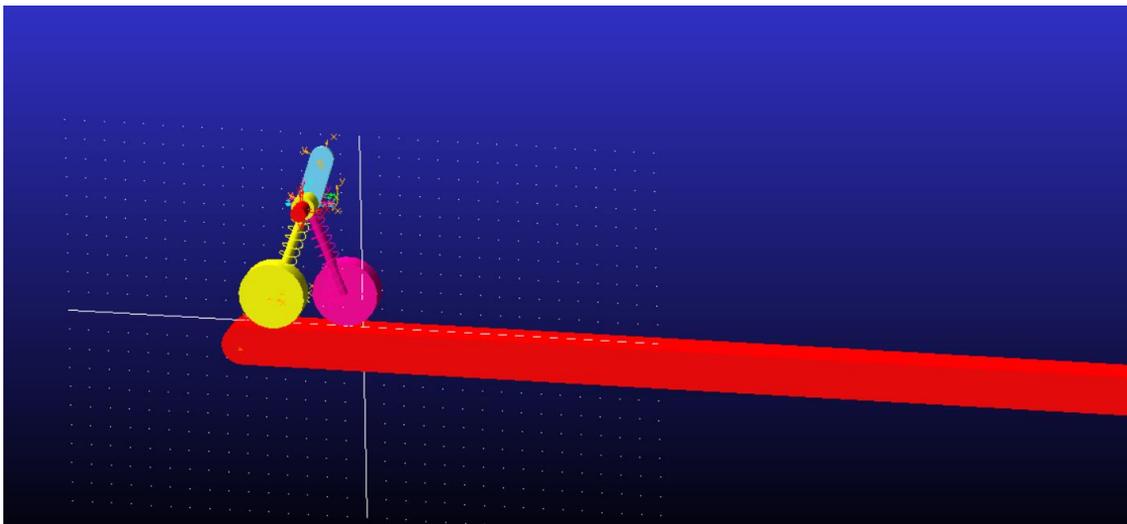
k : μια μη αρνητική πραγματική μεταβλητή που καθορίζει τη στιβαρότητα μεταξύ των δύο επιφανειών που αλληλεπιδρούν.

e : μια θετική πραγματική μεταβλητή που προσδίδει μια μη γραμμικότητα στον όρο της δύναμης που αντιπροσωπεύει τη στιβαρότητα.

B : μια θετική πραγματική μεταβλητή που καθορίζει το μέγιστο συντελεστή απόσβεσης.

d : μια θετική πραγματική μεταβλητή που καθορίζει την οριακή διείδυση στην οποία το Adams εφαρμόζει την πλήρη απόσβεση.

Τελικά, το συνολικό μοντέλο έχει τη μορφή του Σχήματος 3-10.



Σχήμα 3-10: Τελικό μοντέλο του δίποδου ρομπότ και έδαφος με κατάλληλες παραμέτρους για την εκτέλεση του βαδίσματος σε λογισμικό MSC Adams.

3.4 Σύγκριση MATLAB και MSC Adams

3.4.1 Προγραμματιστικές Διαφορές

Μετά το πέρας της μοντελοποίησης και της εκτέλεσης των προσομοιώσεων και στα δύο λογισμικά, MATLAB και MSC Adams, προέκυψαν κάποια αποτελέσματα που οδήγησαν στον κατάλληλο σχεδιασμό του αντιβάρου. Η ροπή που μπορεί να παραλάβει το αντίβαρο δίνεται, όπως έχει ήδη ειπωθεί, από τον τύπο:

$$T_{cw} = M_{cw}R_{cw}g \cos(\delta) \quad (3-3)$$

Σε ένα κατασκευασμένο αντίβαρο τα M_{cw} και R_{cw} είναι σταθερά. Είναι λοιπόν φανερό πως για ένα κατασκευασμένο αντίβαρο, το μόνο μεταβλητό μέρος της ροπής για την εξισορρόπηση της διαφοράς ροπής των δύο κινητήρων σε επίπεδα με διαφορετική κλίση είναι το $\cos(\delta)$. Επομένως, για διαφορετικές τιμές της γωνίας δ η ροπή T_{cw} μπορεί να λάβει τιμές από 0 έως $T_{cw,max}=M_{cw}R_{cw}g$. Μέσω προσομοιώσεων έγινε καταγραφή των όρων της ροπής u_g που θα πρέπει να ασκηθεί από τους κινητήρες, και έπειτα επιλέχθηκε ένας σταθερός σχεδιασμός για το αντίβαρο ώστε κατά μέσο όρο $T_{cw}=u_{g1}-u_{g3}$. Η επιλογή αυτή φαίνεται στη συνέχεια:

$$M_{cw} = 0.725kg, R_{cw} = 0.125m \quad (3-4)$$

Η επιλογή αυτή των χαρακτηριστικών τιμών του αντιβάρου επιτρέπει στο δίποδο ενεργητικό ρομπότ να ικανοποιεί την απαίτηση για ευσταθή βηματισμό με μικρή κατανάλωση ισχύος αλλά και να έχει το μεγαλύτερο δυνατό εύρος λειτουργίας ως προς τις κλίσεις του εδάφους. Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός αυτός υπολογίστηκε ότι παρέχει τη δυνατότητα από κατάβαση σε επίπεδο με κλίση -8° μέχρι και ανάβαση σε ανηφόρα $+8^\circ$, δηλαδή έχει ένα εύρος λειτουργίας 16° .

Για ανάβαση στις $+8^\circ$ το αντίβαρο πρέπει να παραλάβει τη μέγιστη ροπή, γιατί σε αυτήν την περίπτωση το περπάτημα είναι το πιο απαιτητικό από άποψη ισχύος και ροπής. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται $\cos(\delta)=1$ άρα $\delta = 0^\circ$. Για οριζόντιο, επίπεδο μέσω του υπολογισμού της απαιτούμενης ροπής, υπολογίστηκε $\delta = 74^\circ$, ενώ για κατάβαση -8° βρέθηκε $\delta = 120^\circ$, δηλαδή το αντίβαρο έχει κατεύθυνση αντίθετη της φοράς του περπατήματος του ρομπότ.

Με τον παραπάνω σχεδιασμό κρίνεται αναγκαία η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα δύο λογισμικά για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων. Παρ' όλο που τα δύο μοντέλα περιγράφουν την ίδια δυναμική, παρουσιάζουν κάποιες μικρές διαφορές, οι οποίες πρέπει να διατυπωθούν γιατί μπορεί να παίζουν σημαντικό ρόλο σε όποια διαφοροποίηση εμφανιστεί στα αποτελέσματα.

Αρχικά, ο τρόπος που έχουν δημιουργηθεί τα μοντέλα σε κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις είναι διαφορετικός. Αφενός, το μοντέλο του MATLAB αναπτύχθηκε με τη διατύπωση και επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Αφετέρου, το μοντέλο του MSC Adams προέκυψε από τον σχεδιασμό των μερών του δίποδου και την κατάλληλη σύνδεση τους. Έτσι, επειδή το λογισμικό δημιουργεί μόνο του τις εξισώσεις, είναι πιθανό να περιγράφεται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων ελαφρώς αλλαγμένο. Ωστόσο, οι διαφορές αυτές είναι πολύ μικρές και μπορεί να γίνει με ασφάλεια η υπόθεση πως δεν θα επηρεάσουν την τελική απόκριση.

Μια άλλη διαφορά που υφίσταται μεταξύ των δύο μοντέλων αφορά την τριβή μεταξύ των πελμάτων και του εδάφους. Στη MATLAB η επαφή αυτή εφαρμόζεται μέσω των αριθμητικών περιορισμών που έχουν αναπτυχθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, ενώ στο Adams η επαφή μοντελοποιείται με χρήση των διαθέσιμων μοντέλων επαφής και τριβής.

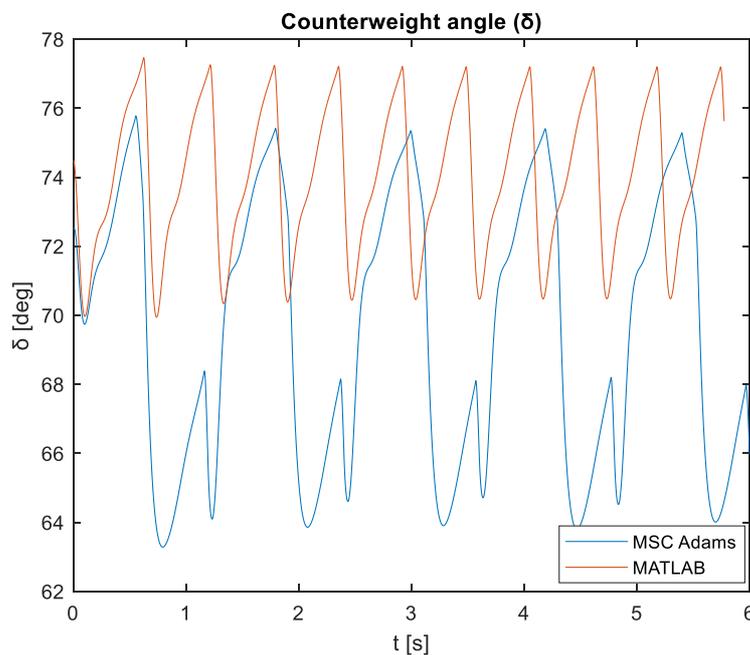
Τέλος, η μεγαλύτερη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μοντελοποιήσεων έγκειται στην προσθήκη μιας επιπλέον κινηματικής συνθήκης στο λογισμικό MSC Adams, η οποία αφορά το λόγο μετάδοσης του μειωτήρα και συγκεκριμένα τον περιορισμό του backdrivability λόγω του συστήματος μετάδοσης, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτός ο περιορισμός απουσιάζει από τις προσομοιώσεις στη MATLAB, όπου θεωρείται ότι το σύστημα είναι πλήρως backdrivable. Αυτή η διαφορά υποθέτουμε πως θα επιφέρει τις

μεγαλύτερες αλλαγές μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών, διότι αλλάζει τη δυναμική του μοντέλου.

3.4.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν σε μορφή διαγραμμάτων, για καλύτερη και ευκολότερη σύγκριση, τα αποτελέσματα συγκεκριμένων μεταβλητών που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις στα δύο λογισμικά. Οι μεταβλητές αυτές αποτελούν χαρακτηριστικά μεγέθη του δίποδου ρομπότ και μέσω αυτών είναι δυνατόν να ληφθεί μια σαφής εικόνα για τον βηματισμό του.

Γωνία δ :



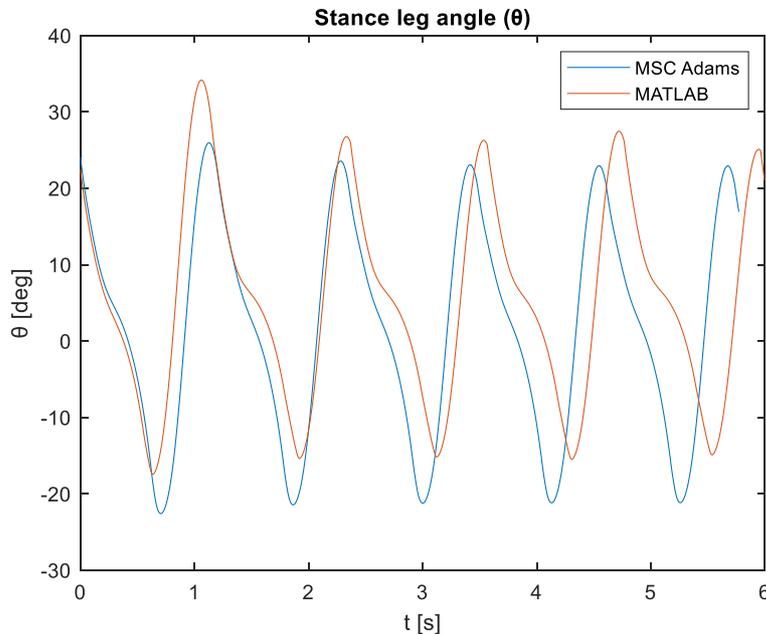
Σχήμα 3-11: Διαγράμματα μεταβολής γωνίας δ συναρτήσει του χρόνου σε λογισμικό MATLAB (πορτοκαλί) και MSC Adams (μπλε).

Στο Σχήμα 3-11 φαίνεται η μεταβολή της γωνίας δ συναρτήσει του χρόνου για 10 συνεχόμενα βήματα. Σε αυτήν την γωνία αναμένονται οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα δύο λογισμικά, καθώς το αντίβαρο είναι το εξάρτημα του ρομπότ που επηρεάζεται περισσότερο από τον περιορισμό του *backdrivability* του συστήματος μείωσης στις προσομοιώσεις του Adams. Όπως έχει ήδη ειπωθεί το αντίβαρο εξισορροπεί τη διαφορά των ροπών των δύο κινητήρων με τη ροπή αδράνειάς του. Έτσι, η δύναμη του βάρους του αντιβάρου, που αποτελεί εξωτερική δύναμη, παίζει σε αυτήν την περίπτωση πρωταρχικό ρόλο, άρα είναι εξίσου σημαντικός ο βαθμός στον οποίο υπάρχει *backdrivability*.

Η ταλάντωση της γωνίας και στις δύο περιπτώσεις είναι μικρή ($8 - 10^\circ$) και γίνεται γύρω από την ίδια τιμή. Ωστόσο, η μεγαλύτερη διαφορά που παρατηρείται είναι στη μορφή του διαγράμματος της γωνίας στα δύο προγράμματα. Στο MSC Adams η γωνία δ επαναλαμβάνεται πλήρως ανά δύο βήματα του δίποδου, ενώ στο MATLAB μόνο ανά ένα. Αυτό συμβαίνει κυρίως εξαιτίας του γεγονότος πως στο MATLAB το σύστημα έχει υποτεθεί ως πλήρως *backdriveable*, αλλά και οι υπόλοιπες διαφορές τους που αναφέρθηκαν σε

προηγούμενη ενότητα συνεισφέρουν και αυτές στην πρόκληση της συγκεκριμένης διαφοροποίησης. Έτσι, τα σταθερά σημεία που έχουν βρεθεί στο MSC Adams έχουν περίοδο 2 βημάτων και στο MATLAB ενός.

Γωνία θ :



Σχήμα 3-12: Διαγράμματα μεταβολής γωνίας θ συναρτήσει του χρόνου σε λογισμικό MATLAB (πορτοκαλί) και MSC Adams (μπλε).

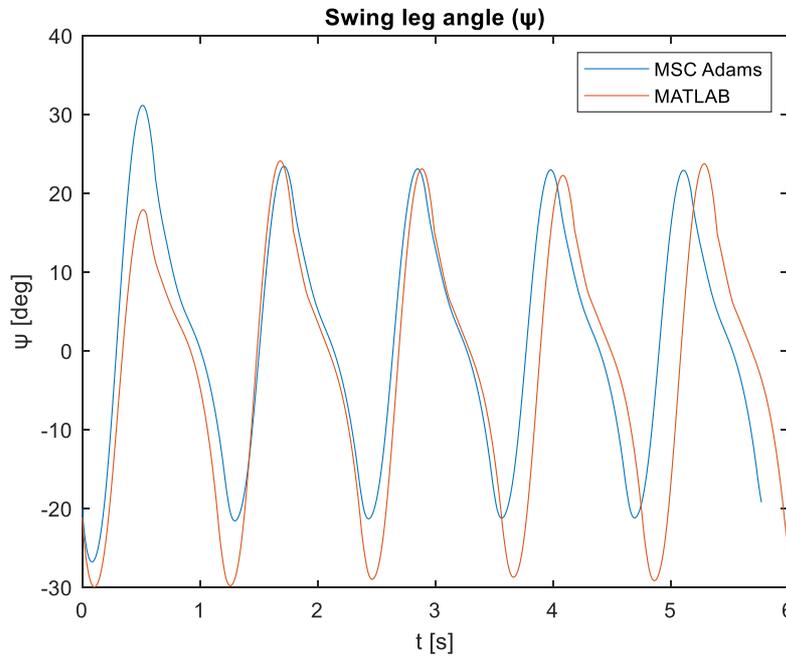
Στο Σχήμα 3-12 φαίνεται η μεταβολή της γωνίας θ συναρτήσει του χρόνου για 10 βήματα. Και τα δύο διαγράμματα που έχουν προκύψει σε διαφορετικά λογισμικά έχουν την ίδια μορφή για κάθε βήμα, μία απότομη πλευρά και μία πιο ήπια, ενώ και τα όρια της γωνίας είναι τα ίδια. Στα πρώτα βήματα οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ομοιότητα, όμως παρουσιάζουν ελάχιστα διαφορετική συχνότητα, κάτι το οποίο οδηγεί σε αποκλίσεις στις τιμές των δύο διαγραμμάτων καθώς αυξάνεται ο χρόνος.

Στο Σχήμα 3-13 φαίνεται η μεταβολή της γωνίας ψ συναρτήσει του χρόνου για 10 βήματα. Είναι φανερό πως και στις δύο περιπτώσεις τα διαγράμματα έχουν την ίδια μορφή, με μόνη διαφορά μια μεταβατική περίοδο δύο βημάτων που εμφανίζεται στο λογισμικό MSC Adams, ενώ στο MATLAB το μέτρο του βήματος παραμένει σταθερό. Στα επόμενα τέσσερα βήματα οι δύο καμπύλες συμπίπτουν και στη συνέχεια για τα τελευταία τέσσερα αποκλίνουν λίγο. Τέλος, η γωνία ψ για το λογισμικό MATLAB έχει σταθερά μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης.

Στο Σχήμα 3-14 βλέπουμε πώς μετακινείται στον κατακόρυφο άξονα το κέντρο μάζας του ισχίου του ρομπότ συναρτήσει του χρόνου. Και στα δύο λογισμικά, το μεγαλύτερο διάστημα κάθε βήματος το ισχίο βρίσκεται στο ίδιο ύψος, κάνοντας μια μικρή ταλάντωση λόγω των ελατηρίων στα σκέλη του ρομπότ, ενώ κάθε φορά που ένα πέλμα έρχεται σε επαφή με το έδαφος στο ισχίο παρατηρείται μία στιγμιαία έντονη μεταβολή. Στο MSC Adams η μεταβολή αυτή που οφείλεται στην κρούση του πέλματος με το έδαφος είναι εντονότερη από το MATLAB κάθε δύο βήματα, ενώ είναι φανερό και σε αυτό το διάγραμμα, όπως σε αυτό της γωνίας δ , ότι το σύστημα του MSC Adams έχει περίοδο ευστάθειας δύο βήματα και το MATLAB μία.

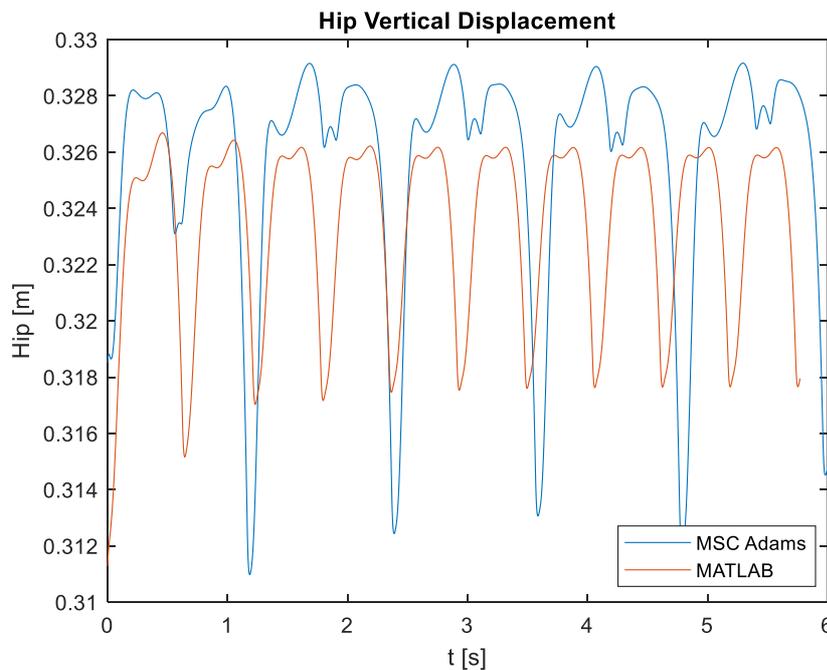
Τελικά, τα δύο λογισμικά δίνουν ευσταθείς βηματισμούς της ίδιας μορφής με πολύ μικρές διαφορές σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συστήματος, που ήταν αναμενόμενες και οφείλονται στις διαφορές που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Γωνία ψ :



Σχήμα 3-13: Διαγράμματα μεταβολής γωνίας ψ συναρτήσει του χρόνου σε λογισμικό MATLAB (πορτοκαλί) και MSC Adams (μπλε).

Κατακόρυφη μετατόπιση ισχίου:



Σχήμα 3-14: Διαγράμματα κατακόρυφης μετατόπισης του ισχίου συναρτήσει του χρόνου σε λογισμικό MATLAB (πορτοκαλί) και MSC Adams (μπλε).

3.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό διερευνήθηκε το είδος και η ευστάθεια του βηματισμού του δίποδου ρομπότ που προκύπτει μέσα από τις προσομοιώσεις στα λογισμικά MATLAB και MSC Adams. Η εκτέλεση αυτών των προσομοιώσεων μας δίνει πολύτιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του μοντέλου και την προετοιμασία των πειραμάτων. Έτσι, προκύπτει ο τελικός σχεδιασμός του αντιβάρου, η απόσταση δηλαδή του κέντρου μάζας του από το ισχίο και το βάρος του, και το εύρος λειτουργίας του δίποδου μηχανισμού. Το ρομπότ μπορεί να εκτελέσει ευσταθείς βηματισμούς σε κεκλιμένο επίπεδο με κλίση που φράσσεται στα όρια $[-8,8^\circ]$, δηλαδή περπατάει σε κατηφόρα 8° μέχρι και σε ανηφόρα 8° . Επιπλέον, μέσω των προσομοιώσεων είναι δυνατόν να προβλεφθούν οι απαιτήσεις των κινητήρων, σε ροπή και στροφές, και με αυτόν τον τρόπο να επιλεγεί το καταλληλότερο σύστημα επενέργειας (κινητήρας και μειωτήρας).

4 Σχεδιασμός

4.1 Εισαγωγή

Εφόσον έχουν ολοκληρωθεί οι προσομοιώσεις του βαδίσματος και έχουν μέσω αυτών εξαχθεί όλα τα απαραίτητα αριθμητικά αποτελέσματα, είναι δυνατόν να ξεκινήσει η κατασκευή του ρομπότ. Έτσι, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διάφορες κατασκευαστικές λύσεις που προτάθηκαν και μελετήθηκαν καθώς και ο τελικός σχεδιασμός. Επειδή υπήρχε ένα ήδη κατασκευασμένο παθητικό ρομπότ πάνω στο οποίο έπρεπε να γίνουν οι αλλαγές, προτιμήθηκε να μην γίνει νέος σχεδιασμός των ποδιών και του ισχίου του ρομπότ. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός εδώ περιορίζεται στην κατασκευή του αντιβάρου, τη λειτουργική σύνδεση του με το υπόλοιπο σώμα και σε όποιες μικρές παρεμβάσεις μπορούν να γίνουν στο προϋπάρχον ρομπότ. Επιπλέον, θα παρουσιασθεί το ηλεκτρονικό σύστημα που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του δίποδου καθώς και το σύστημα επενέργειας που επιλέχθηκε.

4.2 Μηχανικό Υποσύστημα

Το μηχανικό μέρος του δίποδου ρομπότ αποτελείται από δύο κυρίως μέρη: το κατασκευασμένο παθητικό ρομπότ και το νέο αντίβαρο με το ηλεκτρονικό υποσύστημα επενέργειας. Στη συνέχεια θα αναλυθούν με λεπτομέρειες τα δύο αυτά συστήματα και θα παρουσιασθούν και όποιες αλλαγές χρειάζεται να πραγματοποιηθούν.

4.2.1 Παθητικό ρομπότ

Το παθητικό ρομπότ είναι κατασκευασμένο σύμφωνα με το μοντέλο που έχει παρουσιασθεί στο Κεφάλαιο 2 και το Σχήμα 2-1. Ο σχεδιασμός έχει γίνει έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλες οι αρχικές απαιτούμενες προδιαγραφές, όπως ο συντελεστής κύλισης, ο συντελεστής κατανομής μάζας πελμάτων, η σταθερά ελατηρίου, η σταθερά απόσβεσης κ.ά. Συνολικά αποτελείται από τριών διαφορετικών ειδών υλικά, αλουμίνιο, ABS και ακετάλη, και περιλαμβάνει κάποια τυποποιημένα εξαρτήματα, όπως κοχλίες, περικόχλια, ασφάλειες αξόνων, σφιγκτήρες προσαρμογής θέσης, ελατήρια και έδρανα κύλισης (ρουλεμάν). Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται ο σχεδιασμός, καθώς δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιείται το ABS εκεί όπου τα εξαρτήματα πρέπει να είναι ελαφρύτερα και δεν δέχονται κρίσιμα φορτία, το αλουμίνιο όπου τα εξαρτήματα πρέπει να έχουν αυξημένη αντοχή και σωλήνες ακετάλης στα σημεία απαίτησης χαμηλής τριβής. Οι πίνακες που ακολουθούν παρέχουν αναλυτικές πληροφορίες για τα παραπάνω υλικά.

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά αλουμινίου 5083.

Αλουμίνιο 5083		
Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδες
Πυκνότητα	2660	kg/mm ³
Όριο θραύσης	320	MPa
Όριο διαρροής	250	MPa
Μέτρο ελαστικότητας	71	GPa

Πίνακας 4-2: Χαρακτηριστικά ABS.

ABS		
Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδες
Πυκνότητα	1020	kg/mm ³
Όριο θραύσης	44.3	MPa
Όριο διαρροής	41.4	MPa
Μέτρο ελαστικότητας	2	GPa

Πίνακας 4-3: Χαρακτηριστικά ακετάλης.

Ακετάλη		
Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδες
Πυκνότητα	1390	kg/mm ³
Όριο θραύσης	71.5	MPa
Όριο διαρροής	65	MPa
Μέτρο ελαστικότητας	2.6	GPa

Το τελικό παθητικό ρομπότ που έχει ήδη κατασκευασθεί παρουσιάζεται σε μια φωτορεαλιστική απεικόνιση στο Σχήμα 4-1.

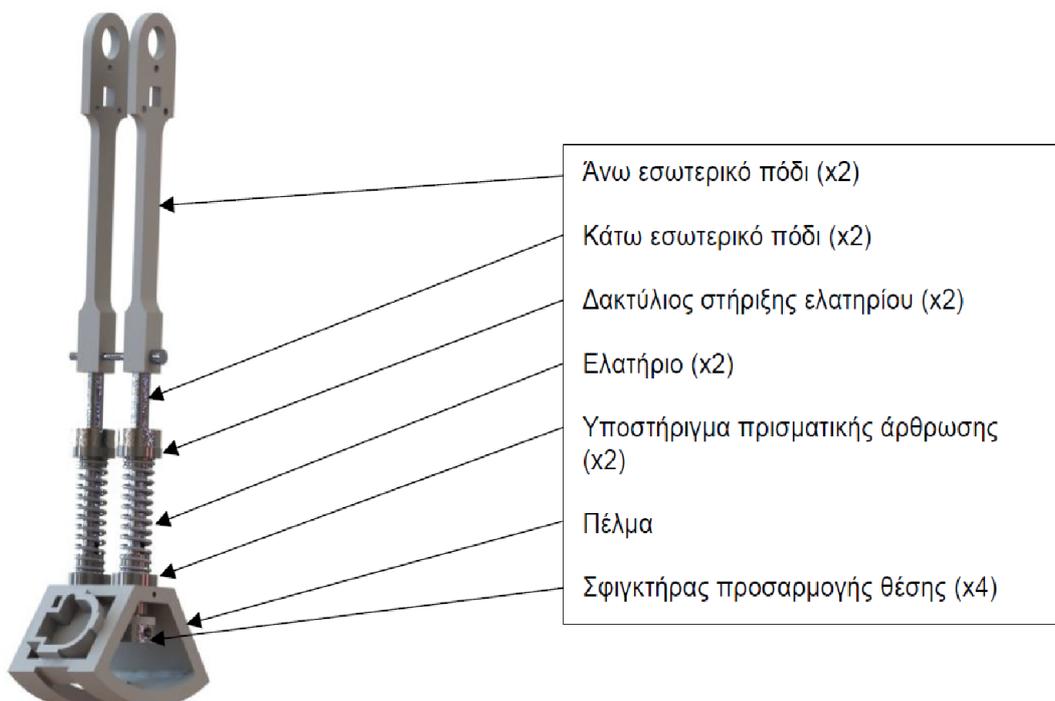


Σχήμα 4-1: Φωτορεαλιστική απεικόνιση παθητικού μοντέλου.

Συνολικά, το παθητικό δίποδο ρομπότ μπορεί να χωρισθεί σε τρία επιμέρους υποσυναρμολογήματα: το εσωτερικό πόδι, τα εξωτερικά πόδια και τον άξονα του ισχίου. Συγκεκριμένα το ρομπότ αποτελείται από δύο εξωτερικά πόδια, τα οποία είναι κινηματικά συζευγμένα, και ένα εσωτερικό: αυτή η συμμετρία περιορίζει την κίνηση στο επίπεδο, με αποφυγή κατασκευής υποστηρικτικού μηχανισμού. Αυτό φυσικά αποτελεί δίποδο μηχανισμό, όπως επισημαίνεται και στη βιβλιογραφία, διότι τα εξωτερικά πόδια κινούνται μαζί. Στη περίπτωση που το δίποδο είχε τον κλασικό σχεδιασμό (χωρίς το ζεύγος εξωτερικών ποδιών) όταν το ένα πέλμα θα ακουμπούσε με το έδαφος, τότε το συνολικό κέντρο μάζας του δίποδου δεν θα βρισκόταν εντός της επιφάνειας επαφής του ρομπότ με το έδαφος, με αποτέλεσμα την ανατροπή του δίποδου.

Εσωτερικό πόδι

Έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 4-2 και αποτελείται από το άνω εσωτερικό πόδι, το κάτω εσωτερικό πόδι, το πέλμα, δύο ελατήρια με τους δακτυλίους στήριξης τους, δύο υποστηρίγματα πρισματικής άρθρωσης και τέσσερις σφιγκτήρες για προσαρμογή θέσης. Το άνω εσωτερικό πόδι και το πέλμα είναι κατασκευασμένα από ABS, ενώ το κάτω εσωτερικό πόδι από αλουμίνιο. Τα υπόλοιπα εξαρτήματα είναι τυποποιημένα και αγορασμένα. Στη συνέχεια φαίνεται η τελική κατασκευή με όλα τα παραπάνω εξαρτήματα.

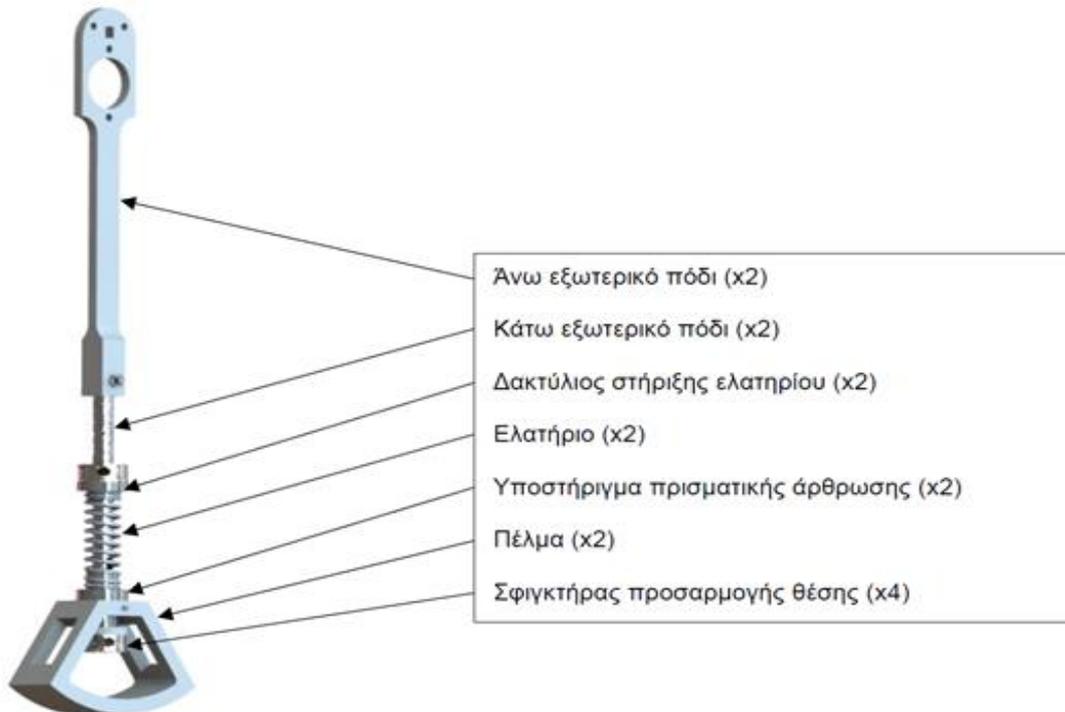


Σχήμα 4-2: Φωτορεαλιστική απεικόνιση του εσωτερικού ποδιού και των μερών από τα οποία αποτελείται.

Εξωτερικά πόδια

Τα εξωτερικά πόδια μοιάζουν αρκετά με το εσωτερικό, αλλά παρουσιάζουν κάποιες μικροδιαφορές, αφού τα πρώτα χωρίζονται σε δύο πανομοιότυπα συναρμολογήματα, ενώ το δεύτερο αποτελεί ένα ενιαίο συναρμολόγημα. Σχεδόν όλα τα εξαρτήματα είναι ίδια με αυτά των εσωτερικών ποδιών εκτός από τα πλαστικά άνω εξωτερικά πόδια και τα αντίστοιχα

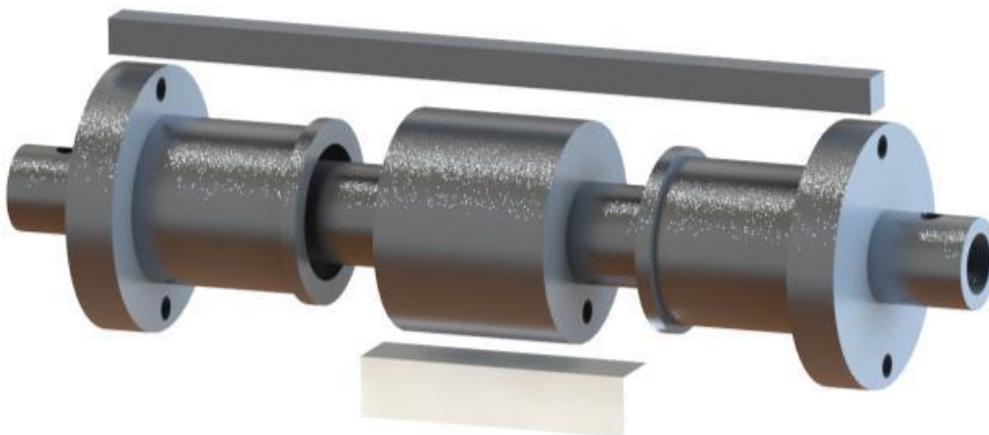
πέλματα. Στο Σχήμα 4-3 φαίνονται τα εξωτερικά πόδια και τα μέρη από τα οποία αυτά αποτελούνται.



Σχήμα 4-3: Φωτορεαλιστική απεικόνιση του εξωτερικού ποδιού και των μερών από τα οποία αποτελείται.

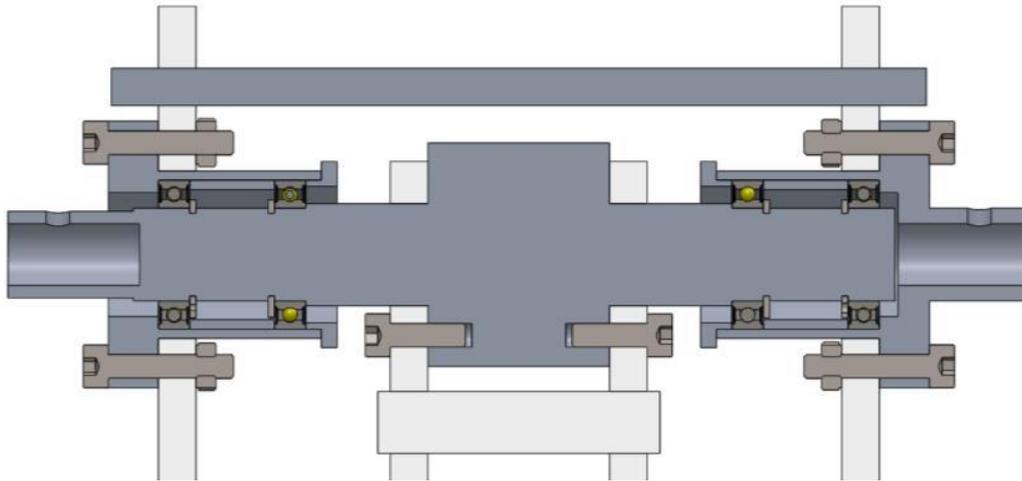
Ισχίο

Το ισχίο αποτελείται από έναν άξονα περιστροφής και επιτρέπει στα πόδια να στρέφονται ανεξάρτητα γύρω από αυτόν. Αποτελείται από τον άξονα περιστροφής, δύο έδρανα έδρασης για τα εξωτερικά πόδια, τέσσερα έδρανα κύλισης, δύο καλύμματα εδράνων, δύο αποστάτες (spacers) και δύο συνδέσεις των ποδιών. Τα περισσότερα εξαρτήματα του ισχίου είναι τυποποιημένα, με εξαίρεση τον άξονα και τη σύνδεση των εξωτερικών ποδιών που είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο, και τη σύνδεση του εσωτερικού ποδιού που είναι κατασκευασμένη από ABS. Στο Σχήμα 4-4 φαίνεται το τελικό συναρμολόγημα.

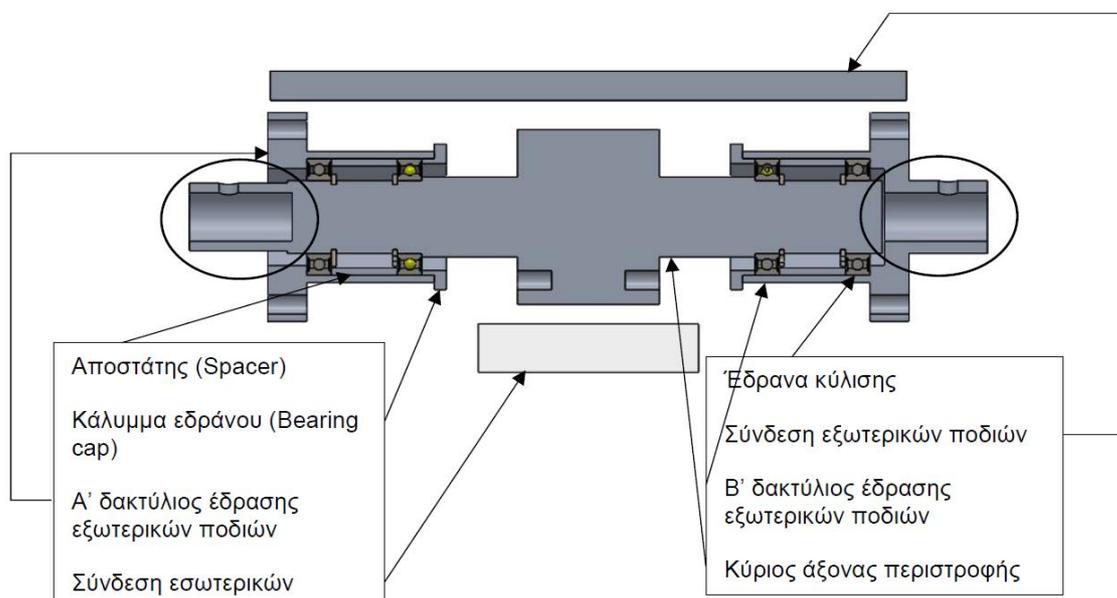


Σχήμα 4-4: Φωτορεαλιστική απεικόνιση του ισχίου του δίποδου μοντέλου.

Για μεγαλύτερη κατανόηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-5 σε τομή ο άξονας ισχίου συνδεδεμένος με τα πόδια μέσω κοχλιών, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων ασφαλιστικών δακτυλίων και διαμορφώσεων για τη σταθεροποίηση των διαφόρων εξαρτημάτων στη σωστή θέση. Επιπλέον στο Σχήμα 4-6 παρουσιάζεται ο ίδιος άξονας σε τομή με εμφανή μόνο τα βασικά εξαρτήματά του, ώστε να είναι πιο σαφείς οι εσωτερικές του διαμορφώσεις.



Σχήμα 4-5: Τομή του ισχίου του μοντέλου για την απεικόνιση της εσωτερικής γεωμετρίας.



Σχήμα 4-6: Τα επιμέρους εξαρτήματα του ισχίου του δίποδου μοντέλου.

4.2.2 Ενεργητικό Ρομπότ

Το ενεργητικό ρομπότ αποτελείται από το παθητικό υποσύστημα που παρουσιάστηκε παραπάνω, το αντίβαρο, πάνω στο οποίο εδράζεται όλο το ηλεκτρονικό σύστημα και το σύστημα επενέργησης. Στην ενότητα αυτή αναλύεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή του αντιβάρου καθώς και αλλαγές που έγιναν στον παθητικό σχεδιασμό. Το νέο μοντέλο

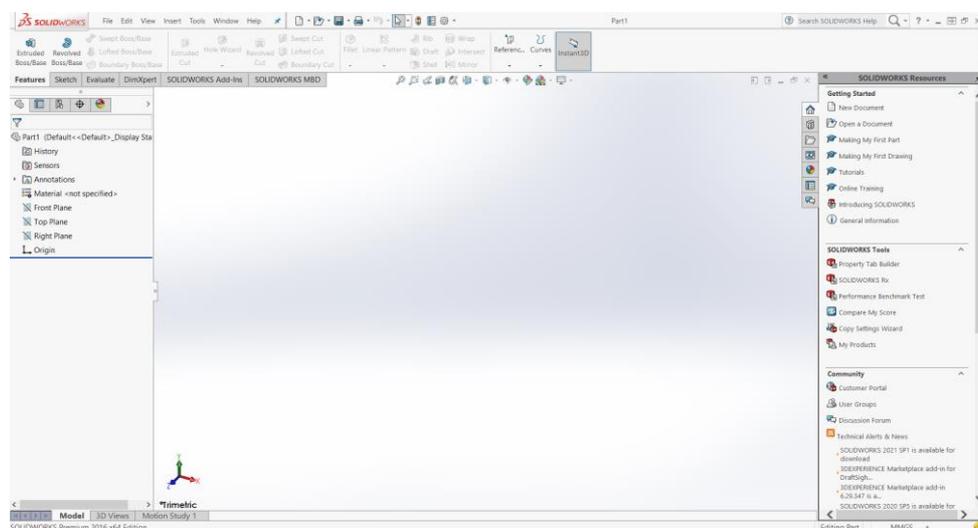
σχεδιάστηκε εξ' ολοκλήρου στο λογισμικό SolidWorks, το οποίο παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω.

SolidWorks

Το λογισμικό SolidWorks είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα σχεδιασμού στερεών αντικειμένων και χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής. Παρέχει μια πληθώρα δυνατοτήτων, οι βασικότερες εκ των οποίων είναι η λεπτομερής σχεδίαση τρισδιάστατου μοντέλου, η χρήση τυποποιημένων εξαρτημάτων, όπως κοχλίες, έδρανα κύλισης, ασφάλειες αξόνων κ.λπ. (SolidWorks Toolbox), η εκτέλεση κινηματικών και δυναμικών προσομοιώσεων (SolidWorks Motion), ο έλεγχος αντοχής των εξαρτημάτων (SolidWorks Simulation) και η προσομοίωση κατεργασιών κοπής (SolidCAM).

Αναλυτικότερα, σχετικά με τη σχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου, αρχικά ο χρήστης προσδιορίζει την απαιτούμενη γεωμετρία σε δύο διαστάσεις. Στη συνέχεια, με διάφορες λειτουργίες μπορεί να αποδώσει την επιθυμητή τρισδιάστατη μορφή. Έτσι δίνεται η δυνατότητα για τη δημιουργία πολύπλοκων μοντέλων, εξαιτίας των πολλών λειτουργιών (features) που διαθέτει το λογισμικό, όπως εξώθηση βάσης (extruded boss/base), εξώθηση κοπής (extruded cut), περιστροφή βάσης (revolved boss/base), λοξότμηση (chamfer) κ.ά. Αφού δημιουργηθούν τα διάφορα εξαρτήματα, μέσω του SolidWorks μπορεί να προκύψει το τελικό συναρμολόγημα (assembly), καθώς παρέχονται πολλών κατηγοριών συναρμογές (mates), όπως είναι οι βασικές (παραλληλότητα, καθετότητα, ομοκεντρότητα κ.λπ.), οι προχωρημένες, στις οποίες ορίζονται διάφορες συμμετρίες, εύρη αποστάσεων κ.λπ. και οι μηχανολογικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για λειτουργία οδοντωτών τροχών, για τη σωστή μοντελοποίηση αρθρώσεων κ.λπ. Σε αυτό το στάδιο συνίσταται και η χρήση της βιβλιοθήκης των τυποποιημένων εξαρτημάτων του SolidWorks Toolbox, τα οποία εισάγονται κατευθείαν και προσαρμόζονται σύμφωνα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά τους. Επίσης μέσω διαφόρων βιβλιοθηκών αποδίδεται στο κάθε εξάρτημα κάποιο υλικό, το οποίο συνοδεύεται από διάφορες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Τέλος, υπάρχει ακόμα και η δυνατότητα εξαγωγής κατασκευαστικών σχεδίων, σύμφωνα με κάποιο διεθνές πρότυπο (ISO, DIN κ.ο.κ).

Το περιβάλλον του προγράμματος έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 4-7 και όλες οι δυνατότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ευδιάκριτες στο πάνω μέρος της οθόνης.



Σχήμα 4-7: Προγραμματιστικό περιβάλλον λογισμικού Solidworks.

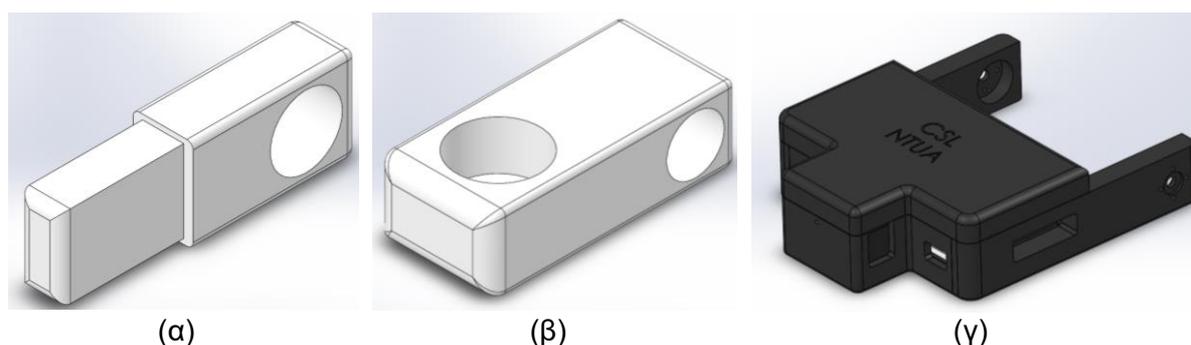
Σχεδιασμός Αντίβαρου

Η κύρια λειτουργία του αντιβάρου είναι η εξισορρόπηση της διαφοράς των ροπών που ασκούνται στα πόδια από τους κινητήρες. Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικός ο προσεκτικός σχεδιασμός του, ώστε το κέντρο βάρους του να απέχει συγκεκριμένη απόσταση από το ισχίο για την επιτυχή παραλαβή της ροπής και την επίτευξη ευσταθούς βηματισμού.

Επειδή το δίποδο ενεργητικό μοντέλο μελετήθηκε και σχεδιάστηκε για βηματισμό σε επίπεδα με διαφορετικές κλίσεις, πρέπει να ικανοποιεί διαφορετικές απαιτήσεις σε ροπή και ισχύ ανάλογα με την κλίση του εδάφους. Έτσι, είναι αναγκαίο το αντίβαρο να έχει τη δυνατότητα παραλαβής διαφορετικών ροπών, ώστε να παραμένει ευσταθής ο βηματισμός. Προτάθηκαν και αναλύθηκαν πολλές εναλλακτικές λύσεις για την κάλυψη αυτής της προδιαγραφής με κυριότερες τις παρακάτω:

- Αντίβαρο μεταβλητού μήκους
- Αντίβαρο μεταβλητής μάζας
- Αντίβαρο σταθερού σχεδιασμού και μεταβλητής μέσης γωνίας δ

Στο Σχήμα 4-8 φαίνονται οι απεικονίσεις των ιδεών σχεδιασμού και εξηγούνται οι κυριότεροι λόγοι επιλογής της τρίτης πρότασης.

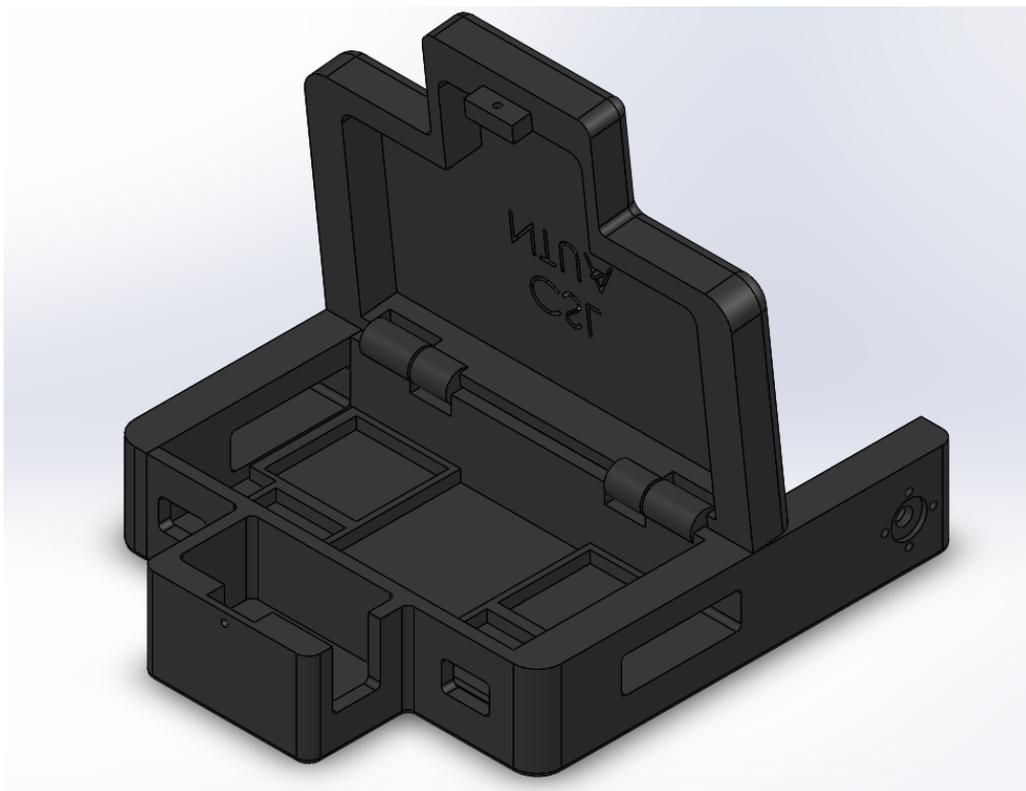


Σχήμα 4-8: Απεικονίσεις των τριών εναλλακτικών κατασκευαστικών λύσεων του αντιβάρου.

Στην περίπτωση (α) το αντίβαρο διαθέτει μια πρισματική άρθρωση, η οποία επιτρέπει τη μεταβολή του μήκους του, και ως εκ τούτου προστίθεται ένας επιπλέον βαθμός ελευθερίας στο μοντέλο, επομένως είναι φανερό πως η πολυπλοκότητα της κατασκευής είναι αρκετά μεγάλη. Επίσης, για την αυτόματη εναλλαγή του μήκους είναι αναγκαίο να προστεθεί ένας επιπλέον κινητήρας. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί και η κατανάλωση ισχύος του ρομπότ αλλά και να γίνει δυσκολότερος και πιο απαιτητικός ο έλεγχος του.

Στην περίπτωση (β) έχει αφαιρεθεί η πρισματική άρθρωση, και ο δίποδος μηχανισμός είναι αρκετά πιο απλός από την περίπτωση (α), αλλά έχει χαθεί η αυτονομία του ρομπότ. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται ο χρήστης να προσθέτει ή να αφαιρεί κατάλληλο βάρος στην ειδική θύρα του αντιβάρου ανάλογα με την κλίση του εδάφους.

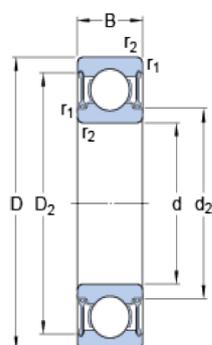
Για τους παραπάνω λόγους απορρίφθηκαν οι δύο παραπάνω εναλλακτικές, αφού η τρίτη αποτελεί την πιο απλή και αυτόνομη κατασκευή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-9 υπάρχει χώρος για το ηλεκτρονικό υποσύστημα στο κέντρο του αντιβάρου, ενώ στο μπροστινό μέρος του υπάρχει ειδική θέση για την μπαταρία. Τέλος, οι διάφορες εγκοπές που φαίνονται στην εικόνα είναι για την σύνδεση των κινητήρων με τα ηλεκτρονικά μέσω καλωδίων.



Σχήμα 4-9: Εσωτερικό αντιβάρου για εγκατάσταση του ηλεκτρονικού υποσυστήματος και της μπαταρίας.

Για να εξασφαλιστεί η ανεξάρτητη κίνηση μεταξύ του αντιβάρου και του άξονα του ισχίου είναι αναγκαία η χρήση εδράνων κύλισης. Τα έδρανα κύλισης αποτελούν τυποποιημένα εξαρτήματα τα οποία ικανοποιούν συγκεκριμένες προδιαγραφές και ανοχές.

Τα έδρανα που χρησιμοποιήθηκαν στο παθητικό μοντέλο ανάμεσα στον κύριο άξονα του ισχίου και στους κοίλους άξονες πάνω στους οποίους είναι τοποθετημένα τα πόδια (Σχήμα 4-5), επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι συμβατά με τις διαστάσεις των τεμαχίων στα οποία προσαρμόζονται. Συγκεκριμένα είναι η σειρά W61802 με τις ακόλουθες διαστάσεις και προδιαγραφές:



Διαστάσεις	
d	15 mm
D	24 mm
B	5 mm
d₂	16.8 mm
D₂	22.15 mm
r_{1,2}	min 0.3 mm

Σχήμα 4-10: Κατασκευαστικό σχέδιο και γεωμετρικά χαρακτηριστικά εδράνου κύλισης.

Πίνακας 4-4: Μηχανικές ιδιότητες εδράνου κύλισης.

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
Basic dynamic load rating	C	1.65	kN
Basic static load rating	C ₀	1.08	kN
Fatigue load limit	P _u	0.048	kN
Limiting speed	n	30000	rpm
Mass bearing	m	7.1	g

Όσον αφορά τις λειτουργικές προδιαγραφές, αυτές υπερκαλύπτουν τις απαιτήσεις φόρτισης της κατασκευής, καθώς τα ασκούμενα φορτία κατά τον παθητικό βηματισμό είναι της τάξης των λίγων Newton, ενώ οι ταχύτητες περιστροφής που αναπτύσσονται είναι πολύ χαμηλότερες του τιθέμενου ορίου.

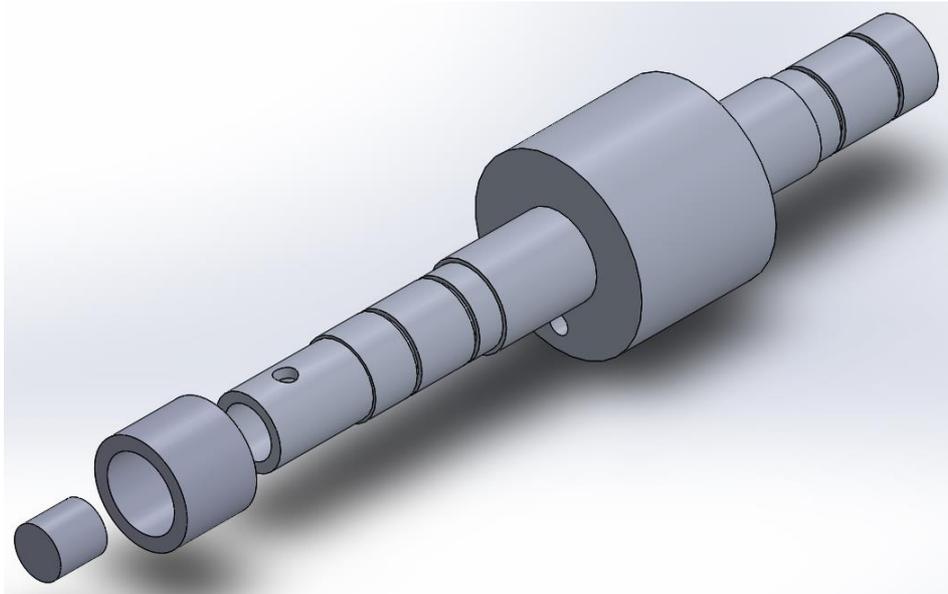
Όμως, στα άκρα του κύριου άξονα για την ευκολότερη τοποθέτηση των εδράνων κύλισης στην κατάλληλη θέση, η διάμετρος δεν είναι 15mm, όπως σε όλο το υπόλοιπο μήκος του, αλλά είναι λίγο μικρότερη, 14.5mm. Με αυτόν τον τρόπο, τα έδρανα κύλισης πέρασαν ελεύθερα από εκείνο το σημείο και τοποθετήθηκαν με μεγαλύτερη ευκολία στη σωστή τους θέση. Ωστόσο, η μείωση αυτή της διαμέτρου του άξονα δημιουργεί το ακόλουθο πρόβλημα: τα έδρανα κύλισης της σειράς W61802 δεν μπορούν να υλοποιήσουν σφιχτή συναρμογή μεταξύ του εσωτερικού δακτυλίου τους διαμέτρου 15mm και του άξονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η τοποθέτηση του αντιβάρου και απαιτείται η εύρεση κατασκευαστικών λύσεων.

Επιπλέον, στα άκρα του κύριου άξονα του παθητικού μοντέλου υπήρχαν οπές διαμέτρου 10mm για την προσαρμογή επιπλέον μαζών στο ισχίο. Όμως, οι κινητήρες που επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα έχουν άξονα διαμέτρου 6mm, δηλαδή αρκετά μικρότερο της ήδη υπάρχουσας οπής. Έτσι, είναι αδύνατο να συνδεθούν και οι κινητήρες στον υπάρχοντα άξονα του ισχίου για τη μετατροπή του συστήματος σε ενεργητικό.

Για την επιδιόρθωση των δύο προβλημάτων που προέκυψαν, προτάθηκαν τρεις κατασκευαστικές λύσεις, οι οποίες θα παρουσιασθούν και θα αξιολογηθούν παρακάτω.

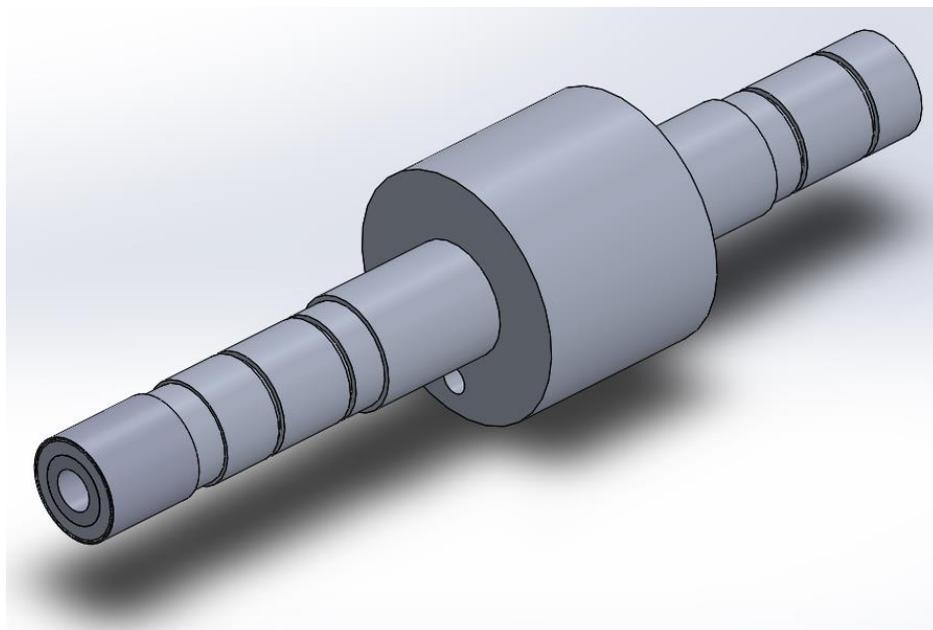
1. Τοποθέτηση επιπλέον υλικού στα άκρα του άξονα και εκτέλεση των κατεργασιών μόνο τοπικά σε αυτό το σημείο.

Η πρώτη εναλλακτική λύση που προτάθηκε ήταν η διατήρηση του ήδη κατασκευασμένου άξονα και η προσθήκη σε αυτόν επιπλέον υλικού στα άκρα του, για να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες κατεργασίες και να επιτευχθούν οι επιθυμητές διαστάσεις. Πιο συγκεκριμένα, ελέγχθηκε η τοποθέτηση με σφιχτή συναρμογή κοίλου κυλίνδρου με εσωτερική διάμετρο 14.5mm στα άκρα του άξονα και ενός συμπαγούς κυλίνδρου με εξωτερική διάμετρο 10mm στο εσωτερικό της οπής του άξονα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-11.



Σχήμα 4-11: Εναλλακτική 1: Υπάρχων άξονας μαζί με τους δύο κυλίνδρους που προτείνεται να τοποθετηθούν σύμφωνα πάνω με σφιχτή συναρμογή.

Στη συνέχεια, θα έπρεπε να μειωθεί η εξωτερική διάμετρος του κοίλου κυλίνδρου μέχρι να φτάσει τα 15mm, ώστε να είναι δυνατόν να τοποθετηθούν σφιχτά τα έδρανα κύλισης, και να δημιουργηθεί μια οπή στον συμπαγή κύλινδρο διαμέτρου 6mm για τη εισαγωγή του άξονα του κινητήρα. Έτσι, το τελικό συναρμολόγημα θα είχε τη μορφή που φαίνεται στα Σχήματα 4-12 και 4-13.



Σχήμα 4-12: Εναλλακτική 1: Συναρμολόγημα άξονα ισχύου μετά την προσθήκη επιπλέον υλικού.

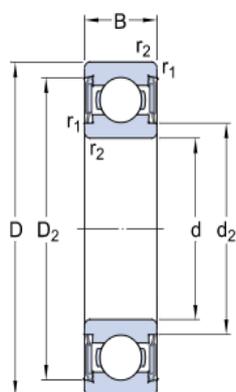


Σχήμα 4-13: Εναλλακτική 1: Συναρμολόγημα άξονα ισχίου σε πλάγια όψη .

Στο Σχήμα 4-13, τα επιπλέον υλικά που τοποθετήθηκαν έχουν απεικονιστεί με διαφορετικό χρώμα για καλύτερη οπτικοποίηση. Είναι φανερό πως ο εξωτερικός δακτύλιος είναι εξαιρετικά λεπτός και υπάρχει ο κίνδυνος καταστροφής κατά τη διάρκεια της κατεργασίας αλλά και κατά την λειτουργία του ρομπότ. Για το λόγο αυτό η εναλλακτική αυτή απορρίφθηκε.

2. Τοποθέτηση επιπλέον υλικού στα άκρα του άξονα και εκτέλεση των κατεργασιών μόνο σε εκείνο το σημείο.

Μετά την απόρριψη της παραπάνω κατασκευής μελετήθηκε η περίπτωση αγοράς νέων εδράνων κύλισης με τυποποιημένες διαστάσεις, αλλά εσωτερικής διαμέτρου μικρότερης από την εξωτερική διάμετρο του άξονα. Αυτό θα μας επέτρεπε να αποφύγουμε τον πολύ λεπτό εξωτερικό δακτύλιο του Σχήματος 4-12 και να αφαιρέσουμε υλικό από τον υπάρχων άξονα ώστε να τοποθετηθούν τα έδρανα σε αυτόν με σφιχτή συναρμογή. Η αμέσως επόμενη τυποποιημένη διάμετρος για έδρανα κύλισης είναι τα 12mm. Έτσι, επιλέχθηκαν τα παρακάτω έδρανα κύλισης της σειράς W6001 με τις διαστάσεις και προδιαγραφές που παρουσιάζονται παρακάτω. Και σε αυτή τη περίπτωση θα ήταν αναγκαία η προσθήκη κυλίνδρου εσωτερικά του άξονα, ώστε να μειωθεί η οπή στα 6mm για την πρόσδεση των κινητήρων.



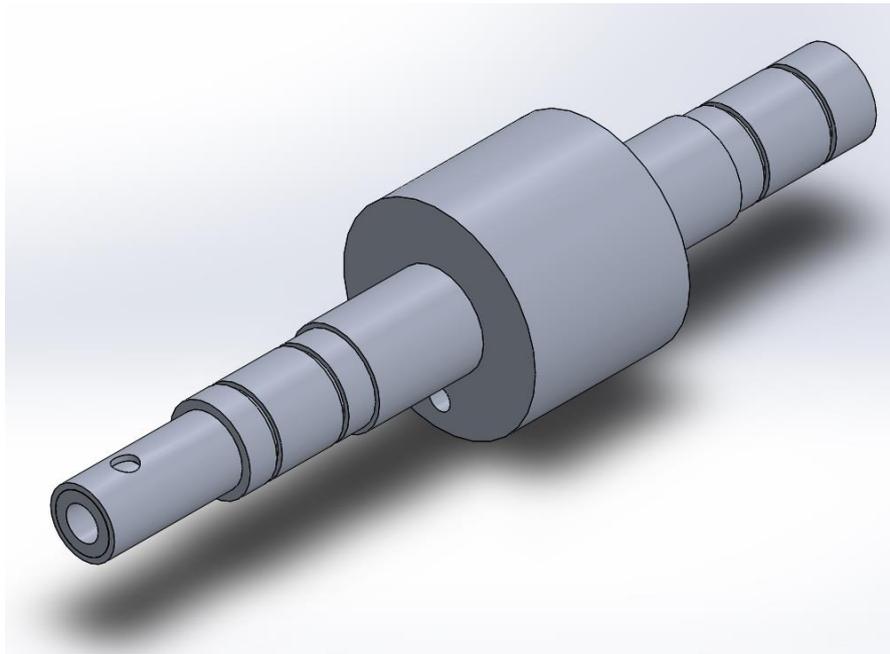
Διαστάσεις	
d	12 mm
D	28 mm
B	8 mm
d₂	16 mm
D₂	25.15 mm
r_{1,2}	min 0.3 mm

Σχήμα 4-14: Εναλλακτική 2: Κατασκευαστικό σχέδιο και γεωμετρικά χαρακτηριστικά εδράνου κύλισης.

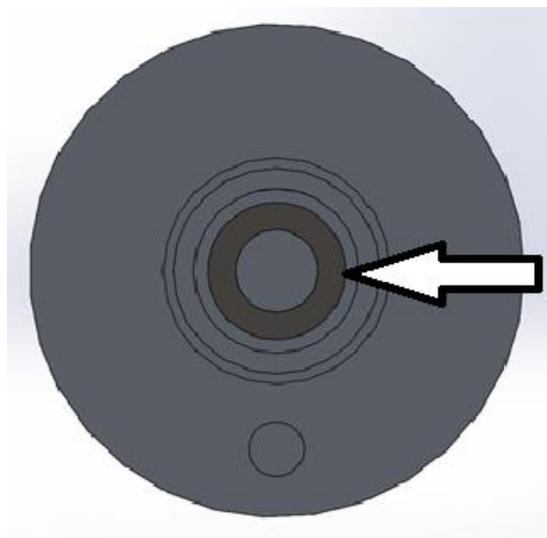
Πίνακας 4-5: Μηχανικές ιδιότητες εδράνου κύλισης.

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
Basic dynamic load rating	C	4.42	kN
Basic static load rating	C ₀	2.36	kN
Fatigue load limit	P _u	0.102	kN
Limiting speed	n	16000	rpm
Mass bearing	m	20	g

Τελικά, το νέο συναρμολόγημα που θα προέκυπτε είναι αυτό που φαίνεται στα Σχήματα 4-15 και 4-16.



Σχήμα 4-15: Εναλλακτική 2: Νέο συναρμολόγημα του άξονα του ισχίου.



Σχήμα 4-16: Εναλλακτική 2: Πλάγια όψη του συναρμολογήματος του άξονα του ισχίου.

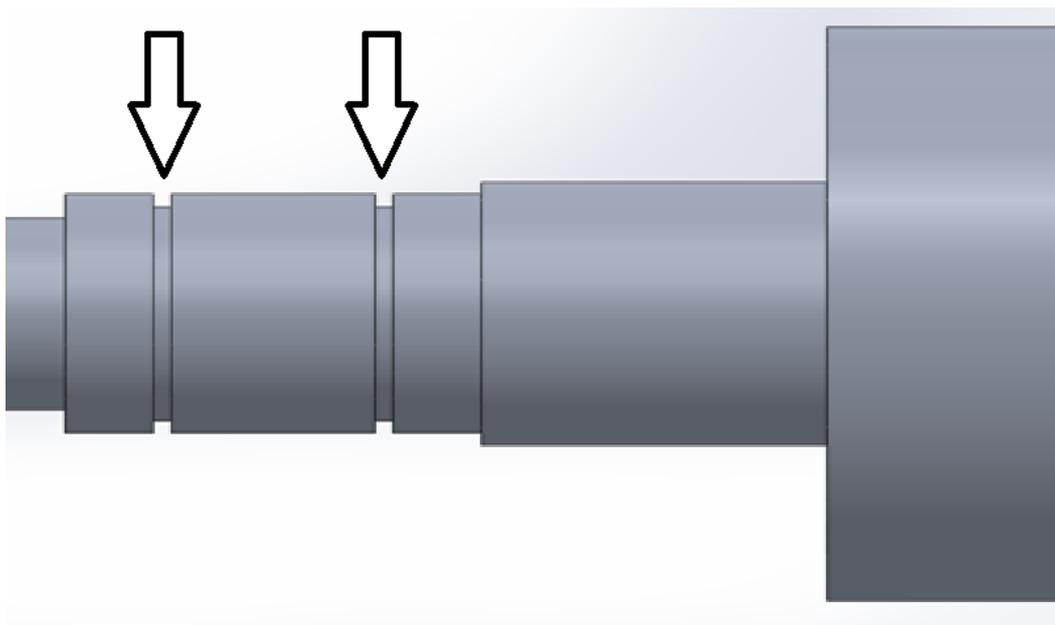
Στο Σχήμα 4-15 το επιπλέον υλικό που τοποθετήθηκε έχει απεικονιστεί και εδώ με διαφορετικό χρώμα για καλύτερη οπτικοποίηση. Σε αυτήν την περίπτωση τα τελικά στοιχεία του άξονα θα είχαν μεγαλύτερο πάχος και ως εκ τούτου θα ήταν πιο ανθεκτικά. Όμως, το άκρο του άξονα μετά τη μείωση της εξωτερικής του διαμέτρου θα είχε πάχος μόνο 2mm, δηλαδή θα ήταν αρκετά λεπτό και θα υπήρχε και εδώ ο φόβος σπασίματος κατά την σφιχτή συναρμογή του με τον ένθετο κύλινδρο μείωσης της εσωτερικής διαμέτρου. Επιπλέον, επειδή το τεμάχιο θα κατεργασθεί στον τόρνο είναι δύσκολη η απόλυτη ευθυγράμμιση του κατά την εισαγωγή του σε αυτόν, με αποτέλεσμα να υπάρχει έντονο το ενδεχόμενο εμφάνισης εκκεντροτήτων και κατά συνέπεια νέων μη επιθυμητών όρων στη δυναμική του συστήματος, που είναι δύσκολο να υπολογιστούν με ακρίβεια.

Για τους παραπάνω λόγους απορρίφθηκε και αυτή η λύση και επιλέχθηκε ως καλύτερη αυτή που αναλύεται στη συνέχεια.

3. Τελική επιλογή: Εκ νέου κατασκευή του άξονα του ρομπότ.

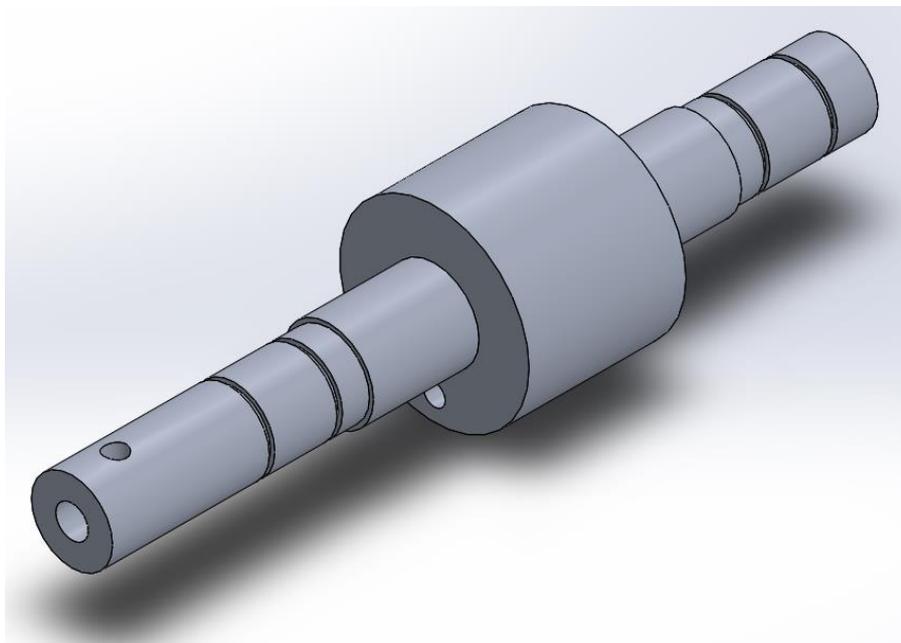
Η λύση που αποφασίστηκε να εφαρμοσθεί τελικά είναι η κατασκευή ολόκληρου του άξονα από την αρχή. Είναι κατανοητό πως αυτή η λύση είναι η πιο χρονοβόρα από όλες που προτάθηκαν, αλλά μας δίνει τη μεγαλύτερη ελευθερία στην πραγματοποίηση τυχόν αλλαγών που μπορούμε να κάνουμε και μας επιτρέπει τη μεγαλύτερη ακρίβεια κατασκευής.

Μετά την μελέτη που έγινε νωρίτερα επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν τα έδρανα κύλισης του Σχήματος 3-13 με εσωτερική διάμετρο 12mm ώστε να είναι εύκολη η τοποθέτηση των άλλων τεσσάρων εδράνων στις αντίστοιχες θέσεις τους. Έτσι, η άκρη του άξονα θα έχει διάμετρο 12 χιλιοστών και τα έδρανα θα τοποθετηθούν σφιχτά σε εκείνο το σημείο. Επιπλέον, καθώς παρατηρήθηκε δυσκολία στη συναρμολόγηση με σφιχτές συναρμογές η οποία μπορεί να καταστρέψει τα έδρανα ολίσθησης, η συναρμογή μεταξύ του άξονα και των εδράνων της σειράς W61802 από σφιχτή θα μετατραπεί σε αμφιβόλου. Για να παραμένουν συνεχώς στην επιθυμητή τους θέση τα έδρανα κύλισης, θα τοποθετηθούν ειδικά stops σε κατάλληλες εσοχές του άξονα, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 4-17.



Σχήμα 4-17: Ειδικές εσοχές για την εισαγωγή stops για τη συγκράτηση των εδράνων κύλισης.

Όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις και διαμορφώσεις που υπήρχαν στον άξονα του παθητικού μοντέλου θα παραμείνουν οι ίδιες. Ο τελικός άξονας του ενεργητικού ρομπότ παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 4-18: Τελικός σχεδιασμός του άξονα του ισχίου.

Αναβάθμιση Σχεδιασμού

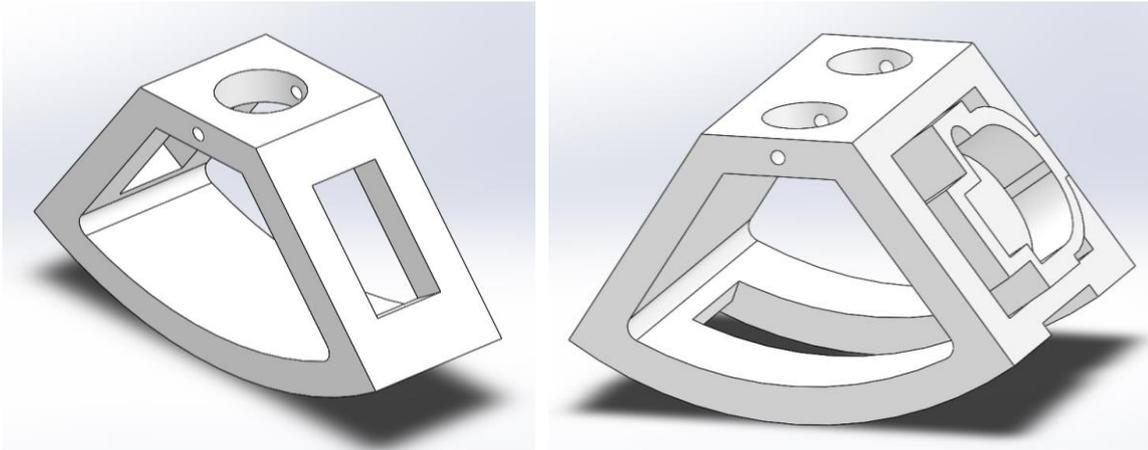
Για την επίτευξη ομαλού και ευσταθούς βηματισμού θα πρέπει να ικανοποιούνται κάποιες σχεδιαστικές προδιαγραφές, όπως π.χ. ο λόγος μαζών μ . Με την προσθήκη του συστήματος επενέργησης, το οποίο θα τοποθετηθεί στον άξονα του ισχίου του ρομπότ, αυξάνεται πολύ η μάζα του ισχίου και ως εκ τούτου μεταβάλλεται και ο λόγος μάζας μ . Ο λόγος μάζας πελμάτων-ισχίου μ δίνεται από τον τύπο:

$$\mu = m / M \quad (4-1)$$

Έτσι, με αύξηση της μάζας M λόγω της προσθήκης κινητήρων είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί και αύξηση της μάζας των πελμάτων m για την αποφυγή της αστάθειας. Για να γίνει αυτό προτάθηκαν δύο εναλλακτικές λύσεις.

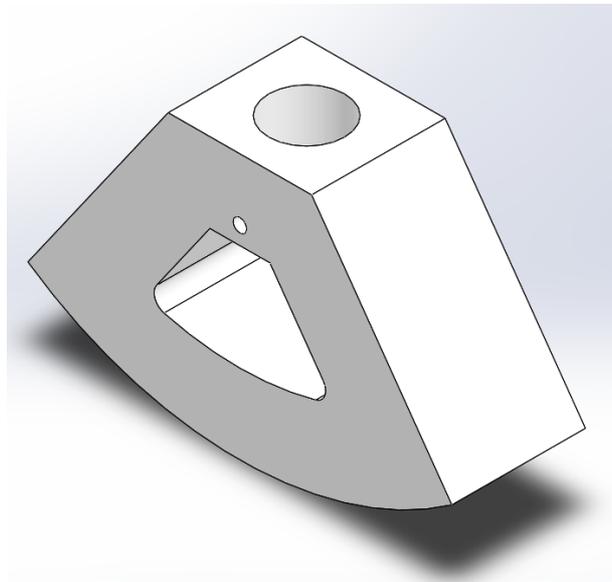
1. Αύξηση της συνολικής γεωμετρίας πέλματος

Τα πέλματα, των εξωτερικών αλλά και του εσωτερικού ποδιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-19 είναι κοίλα και υπάρχει η δυνατότητα αύξησης του πάχους του τοιχώματός τους για την επίτευξη του επιθυμητού βάρους.



Σχήμα 4-19: Φωτορεαλιστική απεικόνιση πελμάτων εσωτερικού και εξωτερικού ποδιού.

Για να αυξηθεί περίπου 50g το κάθε πέλημα των εξωτερικών ποδιών και 100g του εσωτερικού, τα πέσματα θα έπρεπε να πάρουν τη μορφή του Σχήματος 4-20.

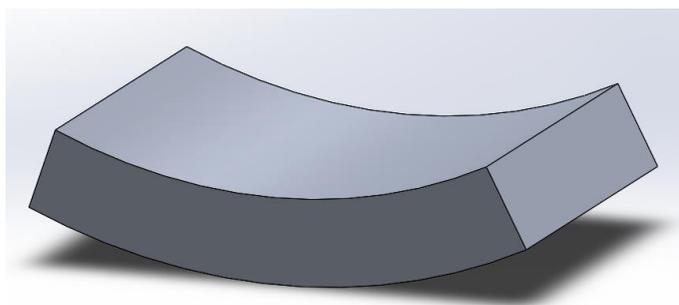


Σχήμα 4-20: Εναλλακτική 1: Βαρύτερο πέλημα με αύξηση του συνολικού όγκου.

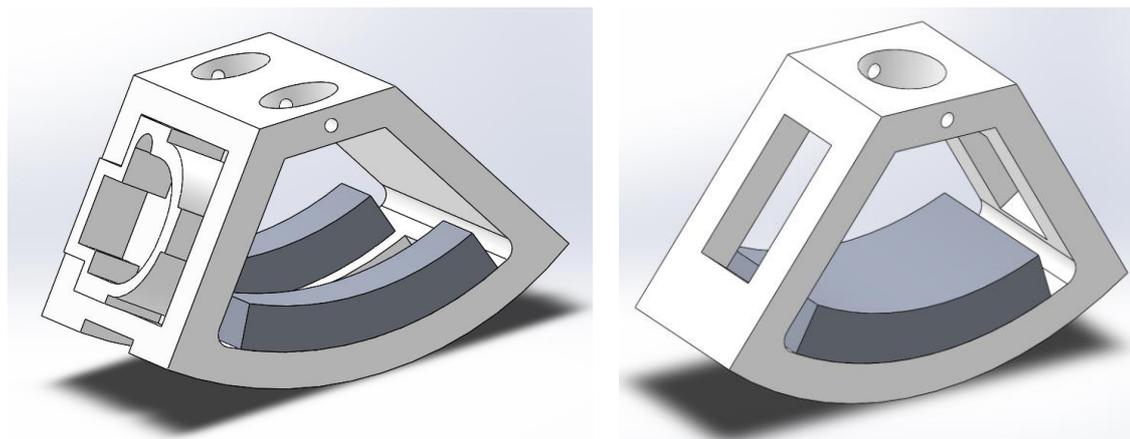
Είναι φανερό πως με το νέο σχήμα των πελμάτων δεν είναι εύκολη η σύνδεση τους με το υπόλοιπο πόδι, αφού δεν υπάρχει πλέον επαρκής χώρος για τον σφιγκτήρα. Έτσι, θα πρέπει να αλλάξει εντελώς είτε ο σχεδιασμός του πέλατος, είτε της σύνδεσης του με το πόδι, είτε το υλικό του, λύσεις που αυξάνουν κατά πολύ την πολυπλοκότητα της κατασκευής.

2. Τελική επιλογή: Προσθήκη βάρους στα πέσματα

Η δεύτερη επιλογή που μελετήθηκε ήταν η δημιουργία ενός ένθετου βαριδίου από αλουμίνιο και η τοποθέτησή του στα πέσματα. Η κόλληση μεταξύ του βαριδίου από αλουμίνιο και του πέλατος από ABS έγινε με εποξική κόλλα. Με αυτόν τον τρόπο τα νέα πέσματα θα είναι όπως φαίνονται στο Σχήμα 4-22.



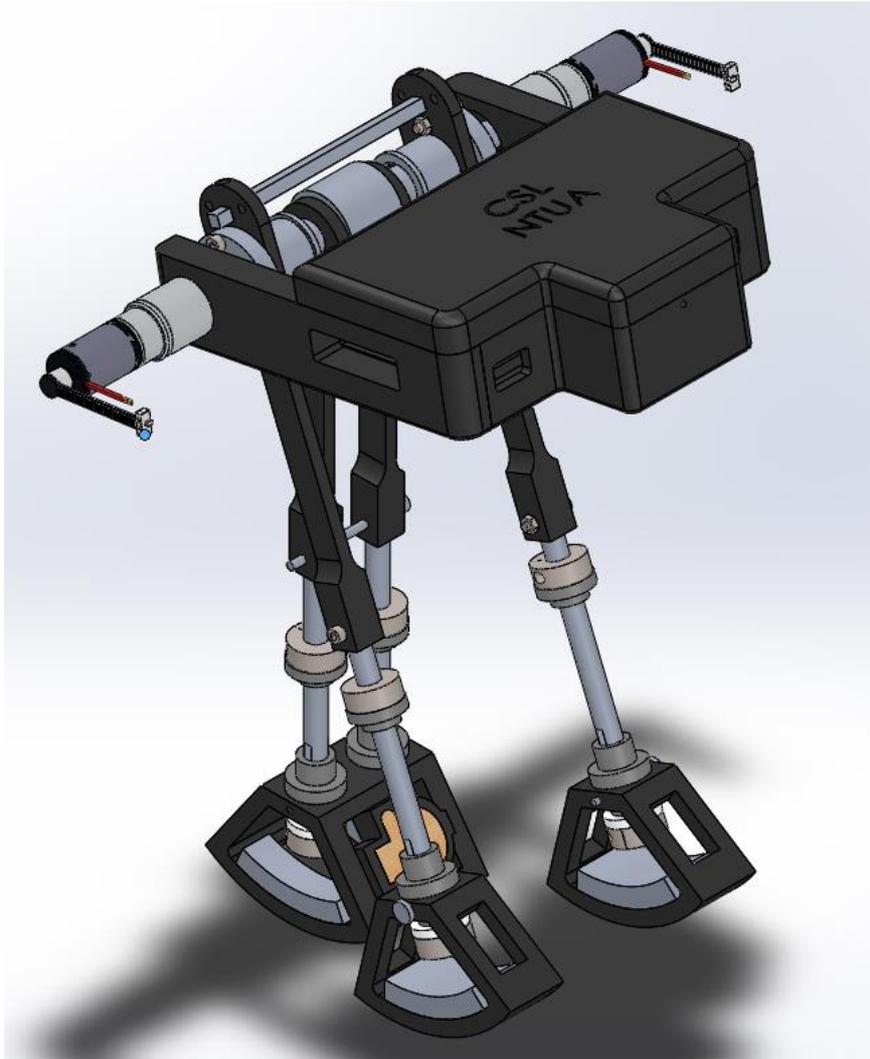
Σχήμα 4-21: Ένθετο βάρος πέλματος για αύξηση της μάζας των πελμάτων.



Σχήμα 4-22: Συναρμολόγημα πέλματος και βάρους.

Τα νέα πέλματα έχουν το κατάλληλο βάρος, αλλά έχουν διαφορετικό κέντρο βάρους εξαιτίας της προσθήκης του βαριδίου στο κάτω μέρος του πέλματος. Για το λόγο αυτό έγινε νέα προσομοίωση στο λογισμικό MSC Adams με τα καινούργια κέντρα βάρη των πελμάτων ώστε να βεβαιωθεί η ευστάθεια του βηματισμού, γεγονός που συνέβη. Έτσι, αυτή η λύση κρίθηκε ως η καλύτερη και χρησιμοποιήθηκε στην πράξη.

Μετά το σχεδιασμό και των νέων πελμάτων πρέπει να αποφασιστεί πως ακριβώς θα συνδεθεί το σύστημα κινητήρα – μειωτήρα στο δίποδο ρομπότ. Συγκεκριμένα, πρέπει να γίνει η επιλογή των μερών του ρομπότ που θα συνδεθούν με τον στάτη (κυρίως σώμα) και το ρότορα (άξονα) του κινητήρα. Για να αποφευχθεί η σχετική κίνηση μεταξύ του κινητήρα και του αντίβαρου, το οποίο περιέχει όλο το ηλεκτρονικό σύστημα, με αποτέλεσμα το μπλέξιμο των καλωδίων των encoders που καταλήγουν στο αντίβαρο οι κινητήρες συνδέθηκαν με βίδες με το αντίβαρο, ενώ οι άξονες τους με τον άξονα του ισχίου. Έτσι, το τελικό μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 4-23.



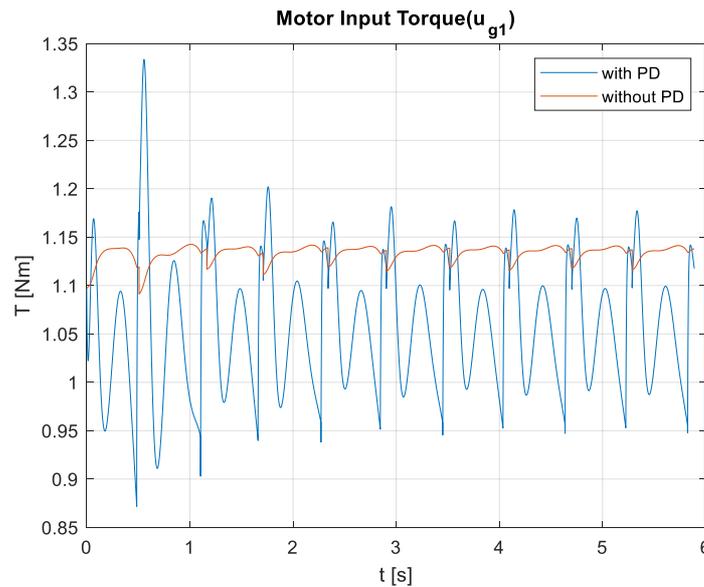
Σχήμα 4-23: Τελικό μοντέλο με προσθήκη αντιβάρου και βαρύτερων πελμάτων.

4.3 Επιλογή Επενεργητών

4.3.1 Καθορισμός απαιτήσεων

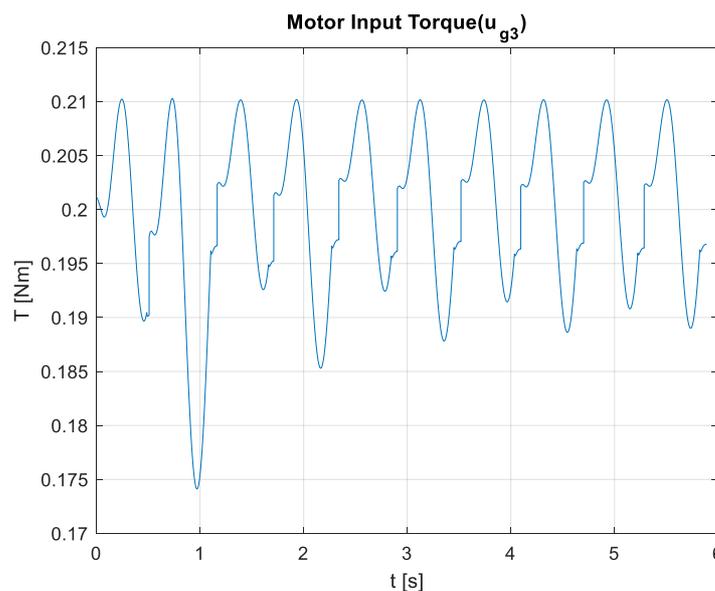
Μετά το τέλος του σχεδιασμού του μηχανικού μέρους του δίποδου ρομπότ είναι αναγκαίο να επιλεγεί κατάλληλο σύστημα επενεργητών, το οποίο θα καλύπτει τις προδιαγραφές ισχύος, ροπής και ταχύτητας περιστροφής, αλλά και άλλες δευτερεύουσες, όπως προδιαγραφές βάρους, λόγου μείωσης, οικονομικές κ.ά. Στην ενότητα αυτή αναλύεται ο τρόπος που έγινε η επιλογή κινητήρων, μειωτήρων και encoders (κωδικοποιητές) και παρουσιάζεται η τελική επιλογή που χρησιμοποιήθηκε.

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στα λογισμικά MATLAB και MSC Adams έχουν προβλεφθεί οι απαιτήσεις των κινητήρων και έτσι μπορεί να γίνει η επιλογή τους. Δυσχερέστερη περίπτωση αποτελεί αυτή της ανάβασης των 8°, γι' αυτό και οι προδιαγραφές του συστήματος επενέργησης προέκυψαν από αυτήν. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στο Σχήμα 4-24 και 4-25 σε μορφή διαγράμματος.



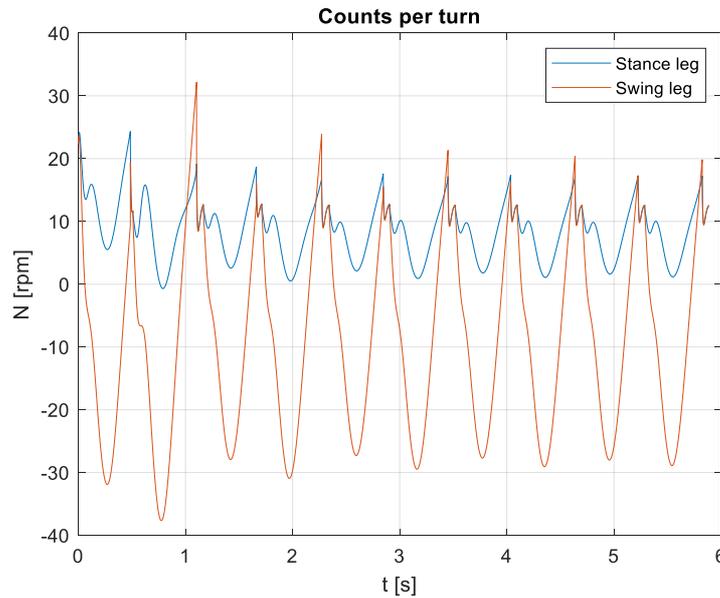
Σχήμα 4-24: Διάγραμμα ροπής κινητήρα που είναι συνδεδεμένος με το πόδι στήριξης συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση της ανάβασης των 8°.

Το Σχήμα 4-24 απεικονίζει την ροπή που χρειάζεται το πόδι στήριξης κάθε στιγμή, με και χωρίς την προσθήκη του PD ελέγχου. Αντίθετα, το Σχήμα 4-25 δείχνει την ροπή του ποδιού αιώρησης, στο οποίο δεν ασκείται κανένας έλεγχος. Από τα δύο διαγράμματα είναι φανερό πως στα δύο πόδια ασκούνται ροπές με μία τάξη μεγέθους διαφορά, πράγμα που επικυρώνει τα όσα ειπώθηκαν στην θεωρία. Για το λόγο αυτό, για να προσδιορισθούν οι απαιτήσεις σε ροπή των κινητήρων αρκεί να εξετασθεί μόνο το πόδι στήριξης. Έτσι, η ροπή συνεχούς λειτουργίας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μέση ροπή του Σχήματος 4-24, δηλαδή να ξεπερνάει τα 1.1Nm, ενώ θα πρέπει η στιγμιαία ροπή να φτάνει μέχρι την τιμή του 1.35Nm. Προφανώς οι τιμές αυτές πολλαπλασιάζονται με κάποιον συντελεστή ασφαλείας για τυχόν διαφοροποιήσεις από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που θα παρουσιασθούν στην πράξη.



Σχήμα 4-25: Διάγραμμα ροπής κινητήρα που είναι συνδεδεμένος με το πόδι αιώρησης συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση της ανάβασης των 8°.

Στο Σχήμα 4-26 που ακολουθεί φαίνονται οι στροφές των δύο ποδιών κατά τη διάρκεια του βηματισμού, ώστε να ολοκληρωθεί ο προσδιορισμός των απαιτήσεων των κινητήρων.



Σχήμα 4-26: Διάγραμμα στροφών των δύο ποδιών κατά τη διάρκεια του βηματισμού.

Η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής των ποδιών είναι τα 40 rpm περίπου, με αυτήν να παρατηρείται στο πόδι αιώρησης (swing leg), όπως είναι λογικό. Τα δύο πόδια έχουν παραπλήσιες ταχύτητες, αλλά το πόδι αιώρησης στρέφεται με λίγο μεγαλύτερη ταχύτητα. Έτσι, ο κινητήρας θα πρέπει να στρέφεται τουλάχιστον με 40 rpm, που είναι μια πολύ μικρή ταχύτητα για έναν κινητήρα, άρα κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη μονάδας μείωσης.

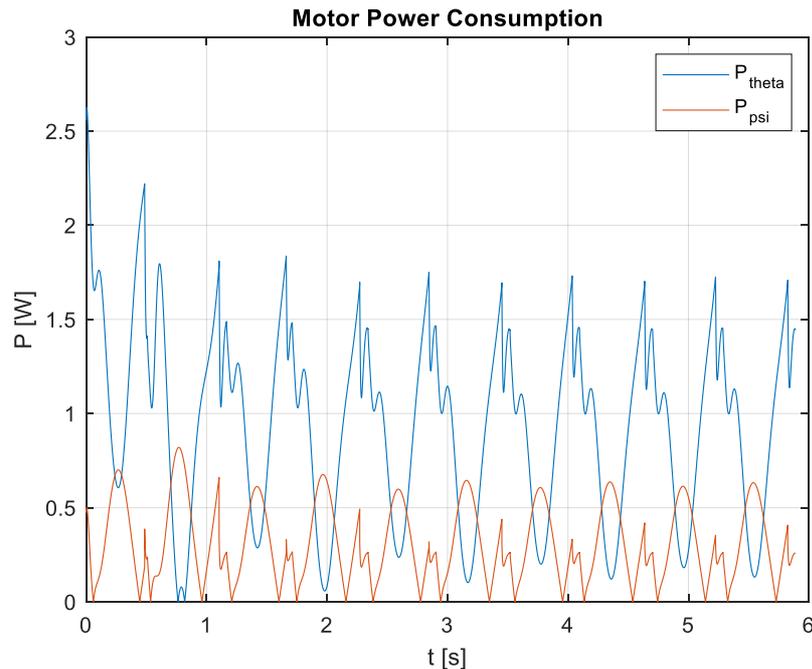
Τέλος πρέπει να υπολογισθεί και η ισχύς που απαιτείται από τους κινητήρες και προκύπτει από το γινόμενο της ροπής του κάθε ποδιού με την αντίστοιχη γωνιακή του ταχύτητα.

$$P_{stance} = u_{g1}(\dot{\theta} + \dot{\delta}) \quad (4-2)$$

$$P_{swing} = u_{g3}(\dot{\delta} - \dot{\psi}) \quad (4-3)$$

Τα δύο αυτά μεγέθη φαίνονται σε μορφή διαγραμμάτων στο Σχήμα 4-27.

Η μέγιστη ροπή που απαιτείται παρατηρείται στην αρχή του βηματισμού και ισούται με 2.6W. Η ισχύς του κινητήρα που είναι συνδεδεμένος με το πόδι στήριξης είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του ποδιού αιώρησης, άρα αν καλυφθούν οι απαιτήσεις του ποδιού στήριξης, οι απαιτήσεις του ποδιού αιώρησης θα έχουν καλυφθεί και αυτές.



Σχήμα 4-27: Διάγραμμα ισχύος των ποδιών σε φάση στήριξης και αιώρησης κατά τη διάρκεια του βηματισμού.

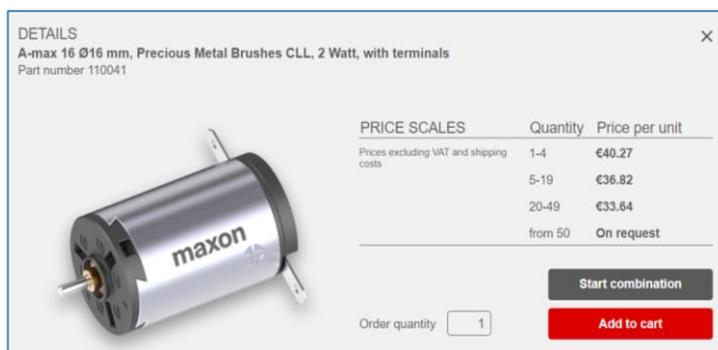
4.3.2 Παρουσίαση επιλογών

Αφού καθορισθήκαν με αριθμητικές τιμές οι απαιτήσεις που θα πρέπει να ικανοποιεί το σύστημα επενέργησης πρέπει να επιλεγεί και να αγορασθεί το καλύτερο. Αυτό έγινε μέσω του ηλεκτρονικού καταστήματος Maxon, επειδή παρέχει πληθώρα επιλογών, αλλά και κατασκευάζει κινητήρες, μειωτήρες κ.ά. με βάση τα κριτήρια που θέτει ο χρήστης. Η ιστοσελίδα της εταιρείας δίνει τη δυνατότητα επιλογής διάφορων κριτηρίων από τον χρήστη όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-28.

Σχήμα 4-28: Περιβάλλον της ιστοσελίδας της Maxon.

Μετά την προσθήκη των φίλτρων εμφανίζεται ένας κατάλογος με όλους τους κινητήρες που ικανοποιούν τα κριτήρια που έχουν τεθεί. Αφού επιλεγεί ένας κινητήρας από τον κατάλογο, πατώντας την επιλογή “Start Combination” (Σχήμα 4-28) δίνεται η δυνατότητα στον

χρήστη να επιλέξει και τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος επενέργησης, όπως π.χ. μειωτήρα και encoder, που να είναι όμως συμβατά με τον κινητήρα που βρέθηκε.



Σχήμα 4-29: Επιλογή κινητήρα και εύρεση άλλων μερών συμβατών με τον κινητήρα.

Το σύστημα επενέργησης που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελείται από τον κινητήρα, τον μειωτήρα και τον encoder που φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 4-30.

DC-max22S GB KL 12V	
Product detail	
Commutation	Graphite brushes
Nominal voltage	12 V
Motor bearings	Ball bearings
Elec. connection, motor	
Elec. connection, motor	Cable
Cable length	200 mm
GPX26 A 111:1	
Product detail	
Gearhead type	Standard version
Reduction	111:1
Number of stages	3
ENX10 EASY 1024IMP	
Product detail	
Counts per turn	1024

Σχήμα 4-30: Κυριότερα χαρακτηριστικά του συστήματος επενέργησης που επιλέχθηκε.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του κινητήρα είναι:

Πίνακας 4-6: Χαρακτηριστικά κινητήρα.

Nominal Voltage	12V
Nominal torque (max. continuous torque)	12.5 mNm
Stall torque	49.4 mNm
Max. efficiency	77%
Max transmittable power (continuous)	10.4 W
Weight	47g

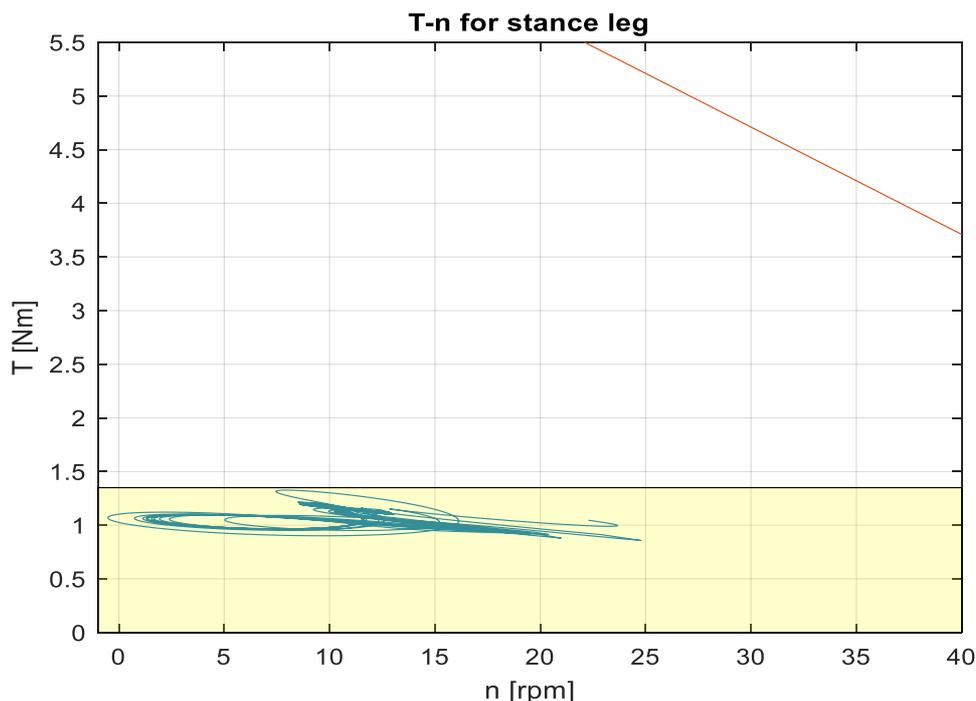
Πίνακας 4-7: Χαρακτηριστικά μειωτήρα.

Reduction	111 : 1
Max continuous torque	4.5 Nm
Max intermittent torque	6.2 Nm
Max. efficiency	75 %
Max transmittable power (continuous)	12 W
Max transmittable power (intermittent)	15 W
Max continuous input speed	10000 rpm
Weight	100 g

Πίνακας 4-8: Χαρακτηριστικά encoder.

Counts per turn	1024
Number of channels	3
Line driver	RS422
Weight	5 g

Μετά την επιλογή των τεμαχίων πρέπει να εξεταστεί αν ικανοποιούν τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB προκύπτει το διάγραμμα του Σχήματος 4-30 για το σύστημα επενέργησης. Με κίτρινο φόντο αναπαρίστανται η περιοχή συνεχούς λειτουργίας (continuous operation range) του συστήματος, ενώ με άσπρο η περιοχή σύντομης λειτουργίας (short-term operation range). Επιπλέον, εκτός της κόκκινης ευθείας στο πάνω μέρος του διαγράμματος βρίσκεται η περιοχή ασταθούς λειτουργίας και πρακτικά ο κινητήρας δεν μπορεί να λειτουργήσει σε εκείνη την περιοχή. Το διάγραμμα ροπής στρωφών του κινητήρα, όπως έχει προκύψει από τις προσομοιώσεις, φαίνεται με μπλε συνεχή γραμμή. Είναι φανερό πως βρίσκεται εντός της περιοχής συνεχούς λειτουργίας, άρα το σύστημα επενέργησης καλύπτει τις ανάγκες του βηματισμού του ρομπότ.



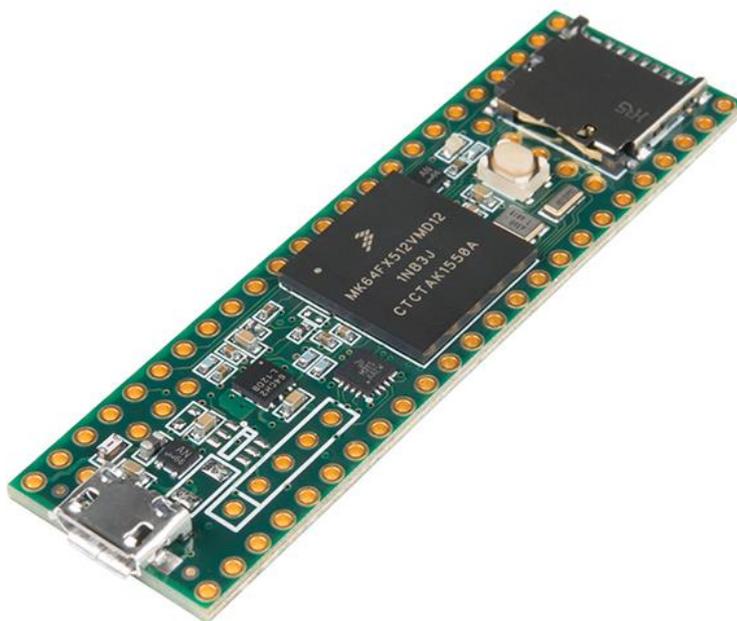
Σχήμα 4-31: Διάγραμμα Ροπής - Στροφών κινητήρα.

4.4 Ηλεκτρονικό Υποσύστημα

Το ηλεκτρονικό υποσύστημα του ρομπότ αποτελείται από όλες τις ηλεκτρονικές συσκευές που βρίσκονται πάνω στο ρομπότ, όπως αισθητήρες, μικροϋπολογιστές, drives κ.ά., και λειτουργεί ως ο “εγκέφαλος” του δίποδου. Είναι υπεύθυνο για τη διενέργεια των μετρήσεων, την εκτέλεση του ελέγχου και την αποστολή των αποφάσεων στους κινητήρες για την εφαρμογή της κατάλληλης ροπής. Το ηλεκτρονικό υποσύστημα βρίσκεται εντός του αντιβάρου, στο ειδικά διαμορφωμένο μέρος του, για την όσο το δυνατόν μικρότερη καταπόνησή του, αφού το αντίβαρο είναι σχεδόν σταθερό στην κατακόρυφη διεύθυνση και εκτελεί μικρές ταλαντώσεις, και την επίτευξη του επιθυμητού βάρους του αντιβάρου. Στην συνέχεια παρουσιάζονται λεπτομερώς τα μέρη από τα οποία αποτελείται και τις λειτουργίες τους.

4.4.1 Teensy 3.5

Το Teensy 3.5 (Σχήμα 4-32) είναι ένας μικροελεγκτής μονής πλακέτας, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροϋπολογιστή και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring (ουσιαστικά πρόκειται για τη γλώσσα προγραμματισμού C++ και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++). Αποτελεί πολύ εύχρηστο εργαλείο για τον έλεγχο μηχανολογικών συστημάτων, ενώ παράλληλα είναι μία από τις πιο οικονομικές λύσεις της αγοράς. Επιπλέον, έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πλήθος διαφορετικών εφαρμογών, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλος όγκος πληροφοριών στη διεθνή βιβλιογραφία.

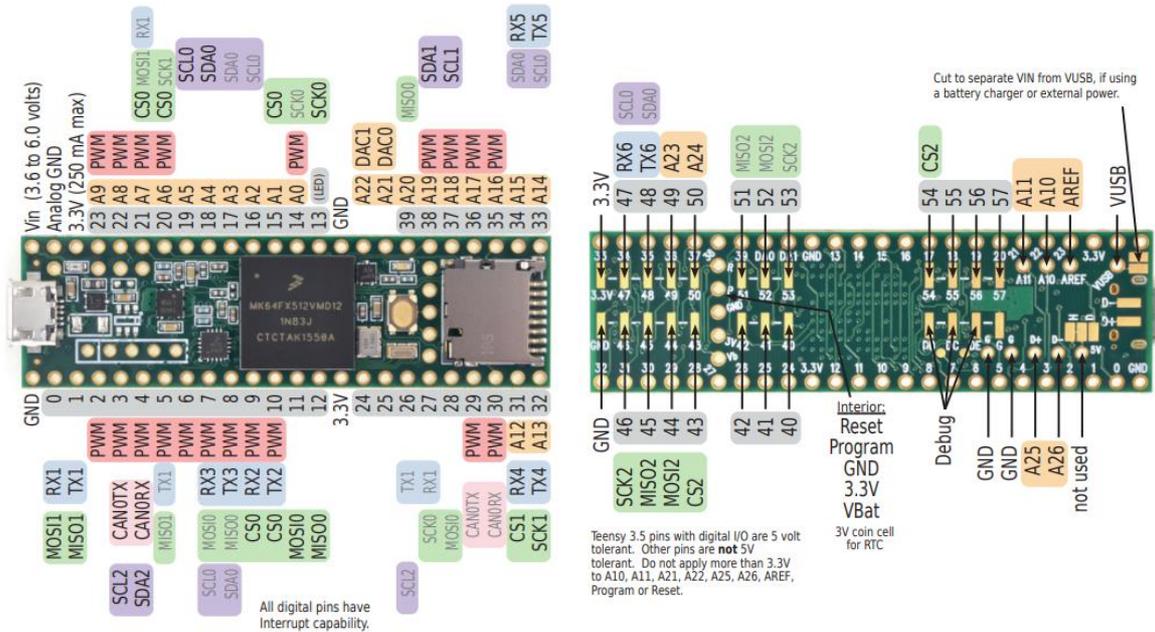


Σχήμα 4-32: Φωτογραφία του μικροελεγκτή Teensy 3.5.

Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του Teensy φαίνονται στον Πίνακα 4-5, ενώ το διάγραμμα συνδεσμολογίας του, με τις θέσεις των pins πάνω στην πλακέτα και τις λειτουργίες τους, στο Σχήμα 4-33.

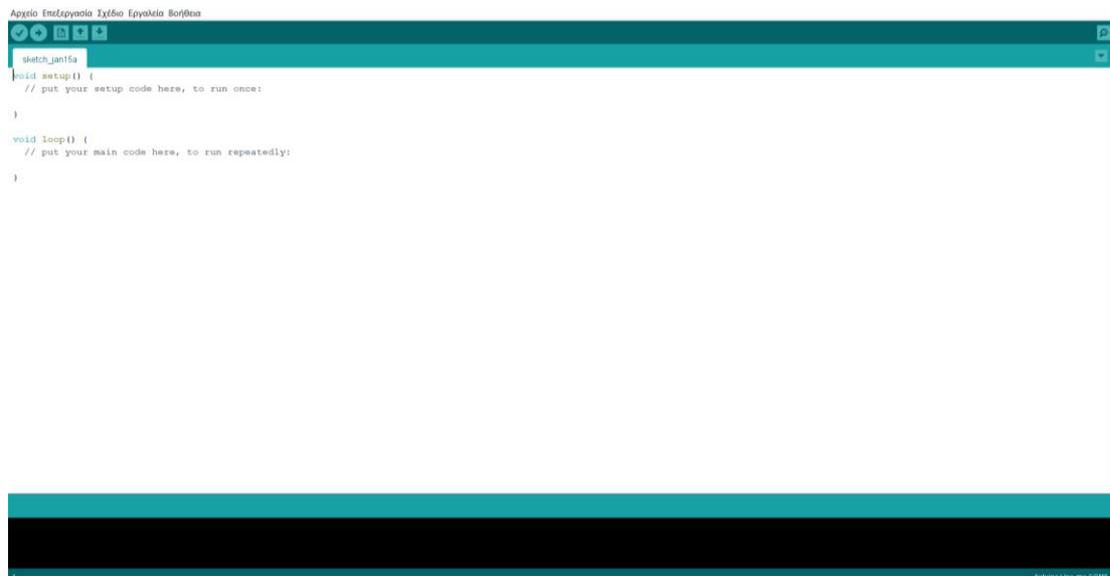
Πίνακας 4-9: Χαρακτηριστικά Teensy 3.5.

Microcontroller	ARM Cortex – M4 120MHz
Operating Voltage	5V
Digital I/O Pins	64
PWM Digital I/O Pins	20
Analog Input Pins	27
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	512 KB
RAM	256 KB
Clock Speed	120 MHz
Weight	10 g



Σχήμα 4-33: Διάγραμμα των λειτουργιών των pins του Teensy 3.5.

Για να προγραμματιστεί το Teensy πρέπει να γίνει λήψη της εφαρμογής ARDUINO IDE (δωρεάν από τη διαδικτυακή σελίδα του Arduino). Το περιβάλλον της εφαρμογής φαίνεται στο Σχήμα 4-34.



Σχήμα 4-34: Προγραμματιστικό περιβάλλον της εφαρμογής Arduino IDE.

Στο λευκό πλαίσιο ο χρήστης μπορεί να γράψει τον κώδικα του προγράμματος που επιθυμεί να εκτελεί το Teensy. Οι εντολές που βρίσκονται στο void setup εκτελούνται μόνο μία φορά, ενώ αυτές που βρίσκονται στο void loop εκτελούνται συνεχώς όσο το Teensy τροφοδοτείται από ρεύμα. Κατά την εκτέλεση του προγράμματος ο χρήστης έχει τη δυνατότητα της επικοινωνίας με το Teensy μέσω της σειριακής θύρας, η οποία εμφανίζεται πατώντας το κουμπί που βρίσκεται στο πάνω δεξί μέρος της οθόνης.



Σχήμα 4-35: Κουμπί για εμφάνιση σειριακής θύρας.

4.4.2 Motor Drive AZBDC10A4

Το drive AZBDC10A4 (Σχήμα 4-36) είναι ένας ηλεκτρονικός ενισχυτής που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και την τροφοδότηση με ενέργεια κινητήρων με ψύκτρες ή χωρίς. Προσφέρει μεγάλο εύρος λειτουργίας, είναι ιδιαίτερα γρήγορο και υποστηρίζει έλεγχο ρεύματος, ο οποίος είναι αναγκαίος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή καθώς επιθυμούμε τον έλεγχο της ροπής του κινητήρα.



Σχήμα 4-36: Φωτογραφία του drive AZBDC10A4.

Στον Πίνακα 4-10 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 4-10: Χαρακτηριστικά του AZBDC10A4.

Specifications	
Current Continuous	5 A
Current Peak	10 A
DC Supply Voltage	10-36 V
Network Communication	None
Size	38.1 x 38.1 x 7.34 mm
Weight	8.5 g

4.4.3 Επιταχυνσιόμετρο και Γυροσκόπιο

Η βασική λειτουργία των επιταχυνσιόμετρων και των γυροσκοπίων έχει αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Πλέον υπάρχουν συσκευές που συνδυάζουν τις δύο παραπάνω λειτουργίες και λειτουργούν ταυτόχρονα ως γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα, μετρούν δηλαδή κάθε στιγμή την ταχύτητα και την επιτάχυνση ενός σώματος. Μια τέτοια συσκευή

επιλέχθηκε και στη συγκεκριμένη εργασία, το «Adafruit Precision NXP 9-DOF Breakout Board - FXOS8700 + FXAS21002», που φαίνεται στο Σχήμα 4-37.



Σχήμα 4-37: Φωτογραφία της πλακέτας του επιταχυνσιόμετρου και γυροσκόπιου.

Αποτελείται από δύο υψηλών προδιαγραφών αισθητήρες, τον FXOS8700 (επιταχυνσιόμετρο 3 αξόνων) και τον FXAS21002 (γυροσκόπιο 3 αξόνων), οι οποίοι συνδυασμένοι δίνουν μια συσκευή μέτρησης των επιταχύνσεων και του προσανατολισμού με 9 βαθμούς ελευθερίας. Στον Πίνακα 4-7 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 4-11: Χαρακτηριστικά επιταχυνσιόμετρου και γυροσκόπιου.

Specifications	
Supply Voltage	2 – 3.6 V
Acceleration range	2g / 4g / 8g (adjustable)
Gyroscope range	250 / 500 / 1000 / 2000 °/s(adjustable)
Magnetic sensor range	1200μT
Resolution	16-bit ADC
Output data rates	up to 800 Hz
Size	28.3 x 20.5 x 3.0 mm
Weight	2.1g

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας απαιτείται για τον ευσταθή βηματισμό του δίποδου, καθώς μέσω αυτού μετρούνται και υπολογίζονται οι γωνίες δ , θ και ψ , οι οποίες είναι αναγκαίες στον έλεγχο που πραγματοποιείται. Με την μέτρηση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης του αντιβάρου, πάνω στο οποίο θα είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας, και με την ολοκλήρωση των τιμών τους, υπολογίζεται κάθε στιγμή η θέση του και επίσης και οι γωνίες δ , θ και ψ .

4.4.4 Μπαταρία Lipo

Οι μπαταρίες πολυμερών Λιθίου (Lipo) είναι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που αξιοποιούν την τεχνολογία των ιόντων Λιθίου χρησιμοποιώντας έναν πολυμερή ηλεκτρολύτη. Οι μπαταρίες αυτές παρέχουν πολύ μεγάλη ειδική ενέργεια, δηλαδή περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα μάζας, και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που είναι κρίσιμο το συνολικό βάρος του συστήματος.

Εδώ, επιλέχθηκε η μπαταρία «Tattu R-Line Lipo Battery Pack», με χωρητικότητα 850 mAh, τάση 14.8V, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4-38.



Σχήμα 4-38: Μπαταρία Lipo Tattu R-Line 850mAh.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά της.

Πίνακας 4-12: Χαρακτηριστικά μπαταρίας Lipo.

Specifications	
Supply Voltage	14.8 V
Number of Cells	4
Capacity	850 mAh
Discharge rate	95C
Size	58 x 30 x 33 mm
Weight	108 g

4.4.5 DC – DC Μετατροπέας

Ο μετατροπέας τάσης DC-DC ανήκει στην κατηγορία των ηλεκτρικών ισχύος, δηλαδή είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα που μετατρέπει την συνεχή τάση εισόδου του σε διαφορετική συνεχή τάση.

Στο δίποδο ρομπότ πηγή τροφοδοσίας αποτελεί η μπαταρία που δίνει συνεχή τάση 14.8V, πολύ μεγαλύτερη από την επιθυμητή τάση λειτουργίας του Teensy 3.5 στα 5 V. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός μετατροπέα τάσης DC-DC που θα ρίχνει την τάση από 14.8V σε 5V. Έτσι, επιλέχθηκε ο DC-DC Converter Step-Down 5V 5A που φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4-39: Μετατροπέας τάσης DC - DC

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του είναι:

Πίνακας 4-13: Χαρακτηριστικά του DC - DC μετατροπέα.

Specifications	
Supply Voltage	9 - 35 V
Output Voltage	5 V
Output Current	5 A
Output Power	25 W

4.4.6 Σύνδεση ηλεκτρονικού συστήματος

Σε αυτό σημείο κρίνεται αναγκαία η παρουσίαση της σύνδεσης όλων των παραπάνω εξαρτημάτων, ώστε να επιτελέσουν απρόσκοπτα τη λειτουργία τους. Για να συνδεθούν με ασφάλεια τα διάφορα μέρη του ηλεκτρονικού συστήματος είναι αναγκαίο ο χρήστης να συμβουλευτεί τα φύλλα κατασκευαστών (datasheet) του κάθε εξαρτήματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποσπάσματα εκείνα των datasheets που αφορούν τη συνδεσιμότητα των ηλεκτρονικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Αρχικά, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη σύνδεση του drive με τους κινητήρες και το Teensy, διότι το drive διαχειρίζεται ρεύματα υψηλής έντασης και μεγάλες τάσεις και ως εκ τούτου είναι επικίνδυνο να προκληθεί κάποια αστοχία. Στο Σχήμα 4-40 φαίνεται ο κατάλογος των Pins του drive με τις λειτουργίες τους και ποια θα χρησιμοποιηθούν.

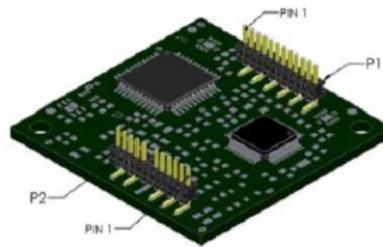
P1 - Signal Connector			
Pin	Name	Description / Notes	I/O
1	DIRECTION	Direction Input (+5V)	I
2	PWM / IN	10 – 25 kHz pulse width modulated digital input command (+5V). Input duty cycle commands the output current.	I
3	SIGNAL GND	Signal Ground (Common With Power Ground).	GND
4	FAULT OUT	TTL level (+5 V) output becomes high when power devices are disabled due to at least one of the following conditions: invalid Hall state, output short circuit, over voltage, over temperature, power-up reset.	O
5	INHIBIT IN	TTL level (+5 V) inhibit/enable input. Leave open to enable drive. Pull to ground to inhibit drive. Inhibit turns off all power devices.	I
6	CURRENT MONITOR	Current Monitor. Analog output signal proportional to the actual current output. Polarity is reversed from command voltage. Scaling is 2 A/V. Measure relative to signal ground.	O
7	HALL 3	Single-ended Hall/Commutation Sensor Inputs (+5 V logic level)	I
8	HALL 2*		I
9	HALL 1		I
10	+V HALL OUT	Low Power Supply For Hall Sensors (+5 V @ 30 mA). Referenced to signal ground. Short circuit protected.	O
11	SIGNAL GND	Signal Ground (Common With Power Ground).	GND
12	RESERVED	Reserved	-

P2 - Power Connector			
Pin	Name	Description / Notes	I/O
1	MOTOR A	Motor Phase Outputs. Current output distributed equally across 2 pins per motor phase, 3A continuous current carrying capacity per pin.	O
2	MOTOR A		O
3	MOTOR B		O
4	MOTOR B		O
5	MOTOR C		O
6	MOTOR C		O
7	NC (KEY)	No Connection. Keyed pin.	-
8	PWR GND	Power Ground (Common With Signal Ground). 3A Continuous Current Rating Per Pin	GND
9	PWR GND		GND
10	HV IN	DC Power Input. 3A Continuous Current Rating Per Pin. Requires a minimum of 47 μ F external capacitance between HV IN and PWR GND pins.	I
11	HV IN		I
12	RESERVED	Reserved	-

Σχήμα 4-40: Πίνακας των λειτουργιών των Pins του drive AZBDC10A4.

Τα δύο σύνολα των Pins P1 και P2 είναι όμοια από άποψη εμφάνισης και για να αποφευχθεί η πρόκληση ζημιάς του drive πρέπει να γίνει σαφής ο διαχωρισμός τους. Για το λόγο αυτό, στο πάνω μέρος της πλακέτας αναγράφονται τα σύμβολα P1 και P2, ενώ παράλληλα στο Pin header P2 λείπει το Pin 7 για να ξεχωρίζει από το P1. Επιπλέον, τα

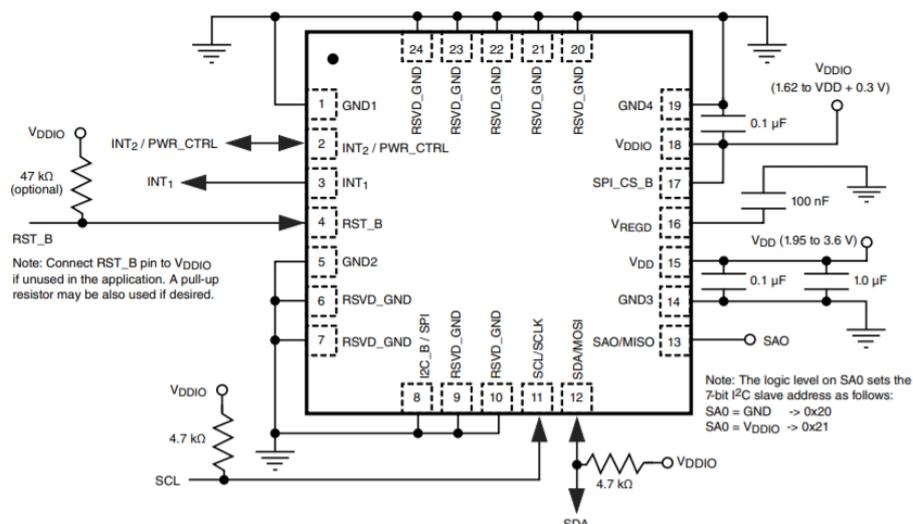
σύμβολα των Pins του P2 φαίνονται πάνω στην πλακέτα, ώστε να μην συνδέσει ο χρήστης λανθασμένα τα καλώδια στο σύστημα υψηλής τάσης. Το Pin 1 του P1 βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά από το Pin 1 του P2, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-41, δηλαδή η αρίθμηση στα P1 και P2 ξεκινάει αντίστροφα.



Σχήμα 4-41: Drive AZBDC10A4 με τις θέσεις των P1 και P2 και την αρίθμηση τους.

Το πάνω κομμάτι του Σχήματος 4-40 αφορά τα pins χαμηλής τάσης που μεταφέρουν το σήμα από και προς το drive, ενώ το κάτω κομμάτι περιέχει τα pins υψηλής τάσης που χρησιμοποιούνται για τροφοδοσία. Συγκεκριμένα, τα pins 1 και 2 του Signal Connector συνδέονται με 2 PWM pins του Teensy 3.5 (Σχήμα 4-32), το pin 3 γειώνεται και το pin 6 συνδέεται με ένα αναλογικό pin του Teensy 3.5 για να μεταφέρει την πληροφορία της έντασης του ρεύματος με το οποίο τροφοδοτούνται οι κινητήρες. Επιπλέον, τα pins 1-4 του Power Connector του drive, που αποτελούν τις δύο φάσεις του κινητήρα, συνδέονται με τους κινητήρες. Είναι αναγκαίο να συνδεθεί ο κάθε κινητήρας και με τις δύο φάσεις A και B του drive για να έχει τη δυνατότητα περιστροφής και προς τις δύο κατευθύνσεις. Τέλος, τα pins 10 και 11 του Power Connector πρέπει να συνδεθούν με την μπαταρία για την τροφοδοσία όλου του συστήματος.

Στη συνέχεια, το επιταχυνσιόμετρο συνδέεται με το Teensy 3.5 για να στέλνει δεδομένα για τη γωνία δ του αντιβάρου με το οριζόντιο επίπεδο. Τα δύο συστήματα επικοινωνούν μέσω του διαύλου επικοινωνίας I²C. Στο Σχήμα 4-42 φαίνονται οι λειτουργίες των pins του επιταχυνσιόμετρου, με το pin 8 να συνδέεται με το pin 3.3V του Teensy 3.5, το pin 10 με το GND και τα pins 11 και 12 με τα pins SDA και SCL του Teensy 3.5 αντίστοιχα.



Σχήμα 4-42: Διάγραμμα των Pins του επιταχυνσιόμετρου – γυροσκόπιου.

Τέλος, το Teensy 3.5 συνδέεται με τους δύο encoders για να υπολογίζει τις γωνίες περιστροφής των κινητήρων, και μέσω αυτών τελικά τις γωνίες θ και ψ . Το Σχήμα 4-43 απεικονίζει τα Pins των encoders.

ENX 10 EASY

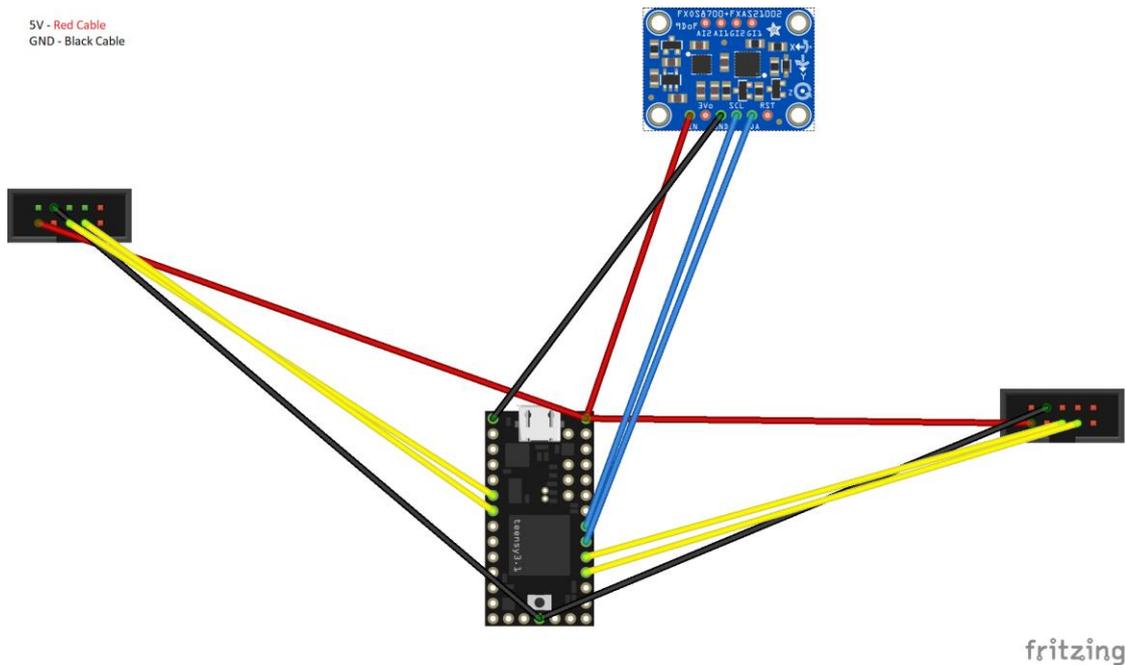


Figure 14 ENX 10 EASY – Cable Plug

Pin	Color	Signal	Description
1	rot	do not connect	—
2	gray	V _{cc}	Power supply voltage
3	gray	GND	Ground
4	gray	do not connect	—
5	gray	ChA/	Channel A complement
6	gray	ChA	Channel A
7	gray	ChB/	Channel B complement
8	gray	ChB	Channel B
9	gray	ChI/	Channel I (index) complement
10	gray	ChI	Channel I (Index)

Σχήμα 4-43: Οι λειτουργίες και τα Pins των encoders ENX 10 EASY

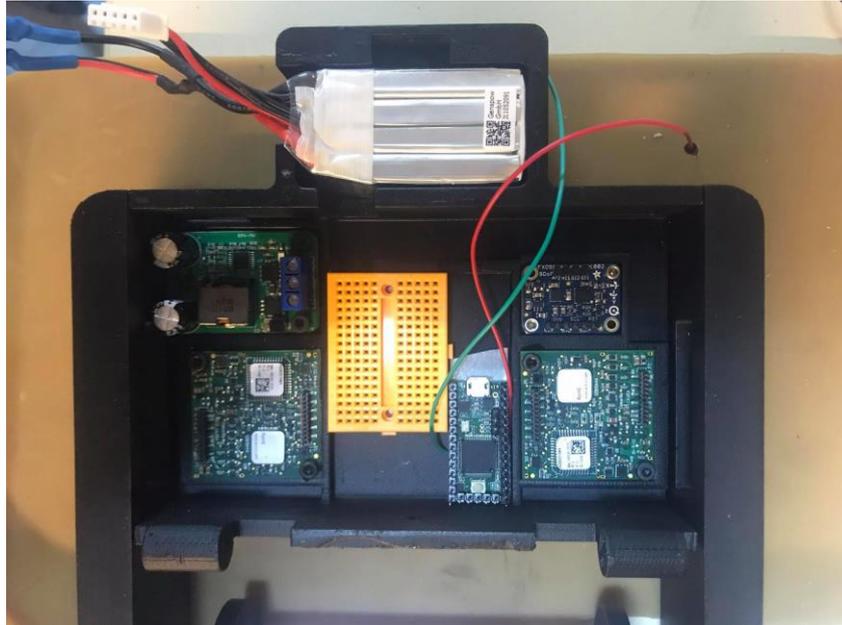
Οι τελικές συνδέσεις φαίνονται στο Σχήμα 4-44:



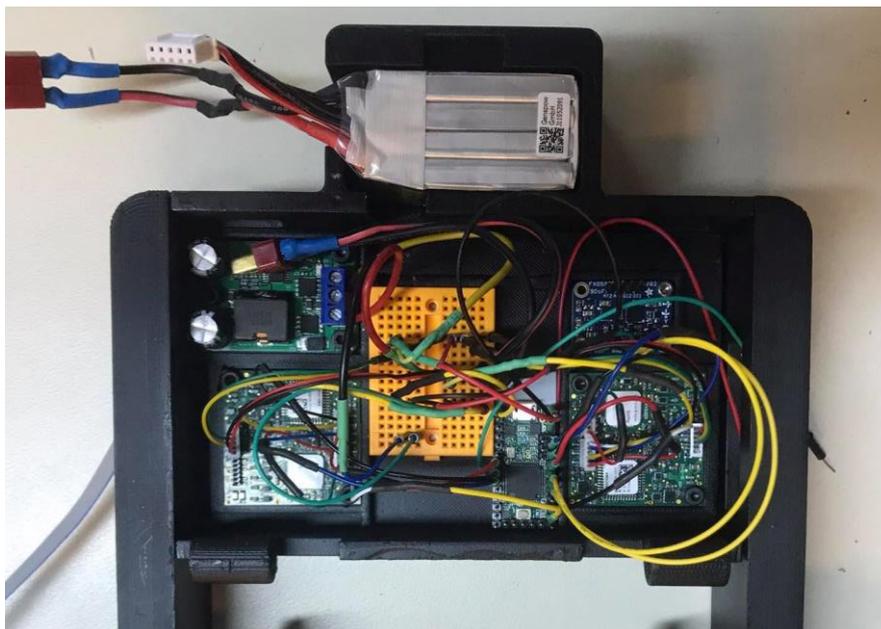
Σχήμα 4-44: Διάγραμμα τελικής σύνδεσης Teensy 3.5 με encoders και επιταχυνσιόμετρο – γυροσκόπιο.

4.5 Τελική Διάταξη και Συμπεράσματα

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω το αντιβάρο διαθέτει ειδικές διαμορφώσεις για την εγκατάσταση του ηλεκτρονικού υποσυστήματος. Τα διάφορα εξαρτήματα του υποσυστήματος συνδέονται μεταξύ τους με καλώδια εντός του αντιβάρου, ενώ η μπαταρία τα τροφοδοτεί με την απαραίτητη ισχύ. Συγκεκριμένα, η μπαταρία συνδέεται με το DC-DC Converter, το οποίο με τη σειρά του με το Teensy 3.5, και τα drives. Στη συνέχεια το Teensy προσδίδει το κατάλληλο ρεύμα στην πλακέτα του επιταχυνσιόμετρου – γυροσκοπίου και στους encoders, ενώ τα drives στους κινητήρες. Στο Σχήμα 4-45 φαίνεται ολόκληρη η εγκατάσταση εντός του αντιβάρου.



Σχήμα 4-45: Φωτογραφία του ηλεκτρονικού υποσυστήματος εντός του αντιβάρου.



Σχήμα 4-46: Φωτογραφία του ηλεκτρονικού υποσυστήματος με τις κατάλληλες συνδέσεις εντός του αντιβάρου.

Μετά το τέλος του σχεδιασμού ολόκληρου του ενεργητικού μοντέλου θεωρείται σκόπιμη η παρουσίαση ορισμένων σημαντικών συμπερασμάτων που προέκυψαν από αυτόν.

Αρχικά, για την εκτέλεση ευσταθούς βηματισμού είναι πολύ σημαντική η επίτευξη της ακριβούς τιμής της μάζας κάθε τεμαχίου που θα κατασκευασθεί, ώστε να διατηρήσει τη δυναμική που έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 2.

Ειδικότερα, για το αντίβαρο πρέπει να υπάρξει προσοχή ως προς τη θέση του κέντρου βάρους του σε σχέση με τον άξονα του ισχίου για να παραλαμβάνει κάθε στιγμή τη διαφορά ροπής των δύο κινητήρων. Αυτό επηρεάζει τη τοποθέτηση των ηλεκτρονικών στοιχείων μέσα στο αντίβαρο.

Τελικά, η κατασκευή των τεμαχίων του ρομπότ απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή εξαιτίας των πολλών συνεργαζόμενων μεταξύ τους εξαρτημάτων, αλλά και η ανάγκη ικανοποίησης των προδιαγραφών βάρους.

5 Κατασκευή

5.1 Εισαγωγή

Η εύρεση του τελικού σχεδιασμού του δίποδου ενεργητικού μοντέλου έχει ολοκληρωθεί και παρουσιασθεί λεπτομερώς σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για την κατασκευή των τεμαχίων, τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν και οι λύσεις που προτάθηκαν. Επιπλέον, για την κατασκευή των διάφορων εξαρτημάτων χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά μηχανολογικά μηχανήματα, όπως ο 3D Printer, ο τόρνος και η CNC φρέζα. Έτσι, κρίθηκε σκόπιμο και απαραίτητο να γίνει μια συνοπτική παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας τους, η οποία γίνεται στις ενότητες που ακολουθούν.

5.2 3D Printer

5.2.1 Τρόπος Λειτουργίας

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing) είναι μια μέθοδος κατασκευής τεμαχίων μέσω της τοποθέτησης επάλληλων στρώσεων υλικού διαδοχικά τη μία πάνω από την άλλη. Υπάρχουν πολλά είδη 3D Printer που χρησιμοποιούν διαφορετικά υλικά για την παραγωγή των τεμαχίων. Ο 3D Printer που διαθέτει το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ είναι ο Stratasys uPrint SE Plus (Σχήμα 5-1) και χρησιμοποιεί ABS, οι μηχανικές ιδιότητες του οποίου έχουν παρουσιασθεί στον Πίνακα 4-2.

Για τη χρήση αυτού του εκτυπωτή είναι αναγκαία η κατοχή του προγράμματος CatalystEX, ενός προγράμματος που μετατρέπει αρχεία της μορφής STL (τα οποία προκύπτουν εύκολα από τα περισσότερα σχεδιαστικά προγράμματα όπως το Solidworks που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας) σε μορφή που να είναι κατανοητή από τον εκτυπωτή. Το πρόγραμμα CatalystEX προσφέρει μεγάλη ποικιλία επιλογών εκτύπωσης (π.χ. επιλογή κατάλληλου προσανατολισμού, επιλογές διαφορετικής πυκνότητας τεμαχίου, από πολύ αραιό σε συμπαγές κ.ά.) και είναι πολύ βοηθητικό για τον χρήστη, αφού ελέγχει μόνο του τις επικίνδυνες διατομές του αντικειμένου και προσθέτει το απαιτούμενο υποστηρικτικό υλικό.

Όταν περαστεί το αρχείο στον εκτυπωτή ο χρήστης πρέπει να τοποθετήσει την κατάλληλη βάση εκτύπωσης στην ειδική θύρα που υπάρχει και να την ασφαλίσει. Οι βάσεις είναι μιας χρήσης και μετά την τοποθέτησή τους ξεκινά η εκτύπωση.

Το ελάχιστο πάχος κάθε στρώσης υλικού είναι 0.254mm, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να κατασκευάζει αντικείμενα υψηλής ακρίβειας. Τέλος, ο μέγιστος ωφέλιμος όγκος του εκτυπωτή, δηλαδή οι μέγιστες διαστάσεις που μπορεί να πάρει το τελικό προϊόν, είναι 203 x 203 x 152 mm.

Η μεγάλη ακρίβεια που προσφέρει ο 3D Printer του εργαστηρίου σε συνδυασμό με την μικρή πυκνότητα του ABS σε σχέση με το αλουμίνιο, που οδηγεί στην παραγωγή ελαφριών τεμαχίων, οδήγησε στην απόφαση να κατασκευασθεί το αντίβαρο με τρισδιάστατη εκτύπωση.



Σχήμα 5-1: 3D Printer Stratasys uPrint SE Plus.

5.2.2 Εκτύπωση Αντιβάρου

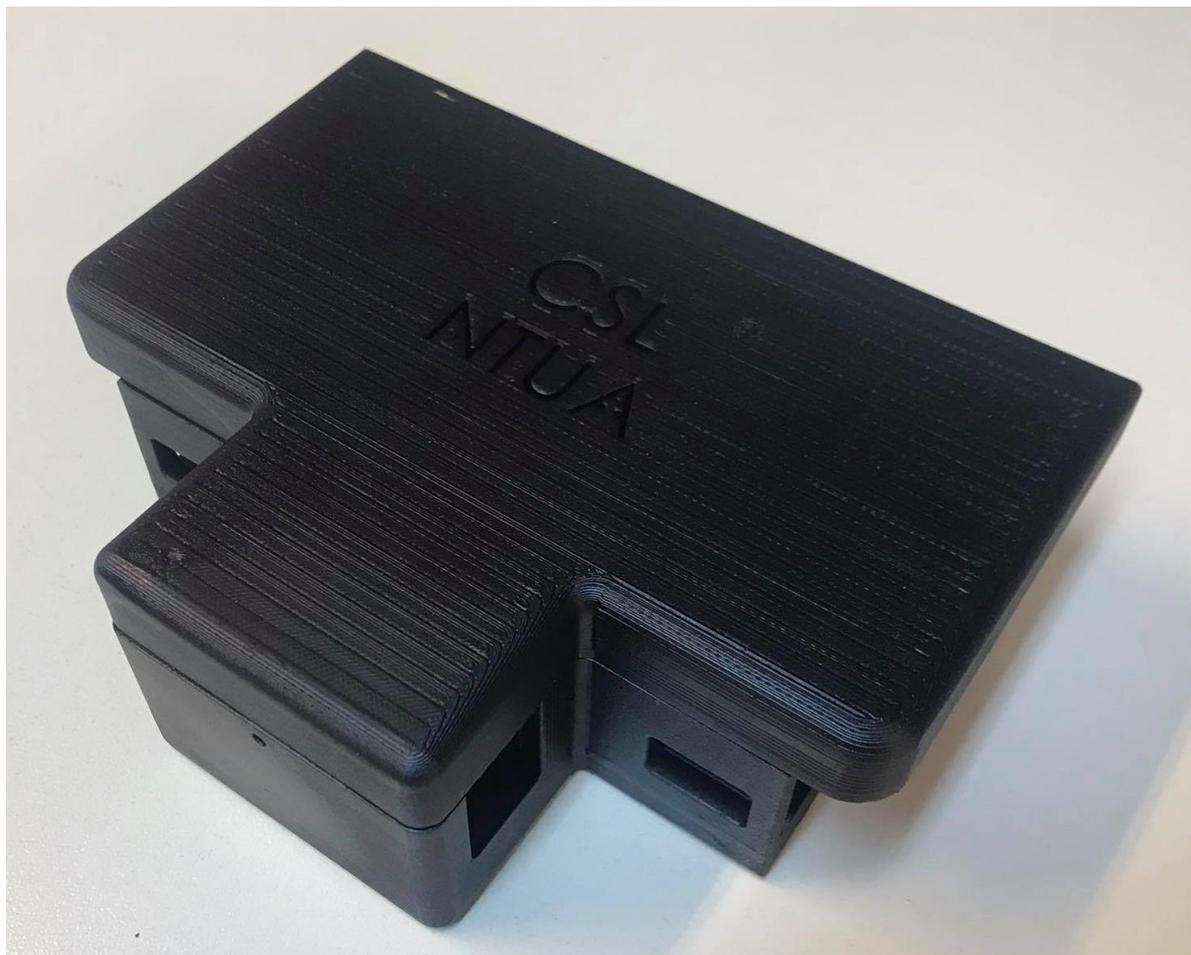
Από τη λειτουργία του αντιβάρου που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι φανερό πως το βάρος, οι διαστάσεις και η απόσταση του κέντρου βάρους του από το ισχίο είναι εξαιρετικά σημαντικά για την εκτέλεση ευσταθούς βηματισμού. Οι διαστάσεις που έχουν προκύψει από τη μελέτη που έγινε είναι μεγαλύτερες από τις αυτές του χώρου εργασίας του εκτυπωτή, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτό για το αντίβαρο να εκτυπωθεί ενιαία. Έτσι, χωρίστηκε σε τρία κομμάτια και εκτυπώθηκε κατά αυτόν τον τρόπο. Ο χωρισμός του αντιβάρου σε κομμάτια βοήθησε επιπλέον αρκετά στη συναρμολόγηση του τελικού ρομπότ. Στα Σχήματα 5-2, 5-3 και 5-4 φαίνονται τα τρία μέρη του αντιβάρου.



Σχήμα 5-2: Πρώτο τμήμα αντιβάρου.



Σχήμα 5-3: Δεύτερο τμήμα αντιβάρου.



Σχήμα 5-4: Τρίτο τμήμα αντιβάρου.

5.3 CNC κέντρο κατεργασιών

5.3.1 Τρόπος Λειτουργίας

Η φρέζα CNC (Computer Numerical Control) είναι ένα μηχάνημα που διαθέτει όλες τις δυνατότητες μιας συμβατικής φρεζομηχανής, με τη διαφορά πως δεν είναι χειροκίνητη αλλά είναι καθοδηγούμενη από μια σειρά κωδικοποιημένων εντολών που είναι γραμμένες σε G-Code. Έτσι, είναι δυνατό να επιτευχθούν τεμάχια μεγαλύτερης πολυπλοκότητας με υψηλότερη ακρίβεια σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Η CNC φρέζα που διαθέτει το Εργαστήριο Αυτόματου Ελέγχου του ΕΜΠ είναι η Haas Mini Mill, που φαίνεται στο Σχήμα 5-5. Στο συγκεκριμένο μηχάνημα κατασκευάστηκαν τα βάρη των ποδιών, εξαιτίας της ημικυκλικής γεωμετρίας τους, και ένα κομμάτι του άξονα του ισχίου.



Σχήμα 5-5: CNC φρέζα Haas Mini Mill.

Οι μηχανές CNC προγραμματίζονται είτε χειροκίνητα από το χρήστη, μια διαδικασία που απαιτεί αρκετό χρόνο και είναι δύσκολη, είτε μέσω ειδικών προγραμμάτων αυτόματης παραγωγής του G-Code. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το SolidCam του SolidWorks. Αφού σχεδιασθεί το επιθυμητό αντικείμενο στο Solidworks, ο χρήστης ορίζει τις κατεργασίες και τη σειρά με την οποία επιθυμεί να εκτελεστούν, καθώς και πληθώρα άλλων επιλογών, όπως επιλογή κατάλληλου εργαλείου, ταχύτητα κοπής, κ.ά. Στη συνέχεια, όταν ο χρήστης τελειώσει τον σχεδιασμό του τεμαχίου βλέπει στην οθόνη του μια προσομοίωση των κατεργασιών που θα πραγματοποιηθούν, τον τελικό χρόνο κατεργασίας και τέλος στέλνει τον G-Code στη μηχανή και ξεκινά η κατασκευή.

5.3.2 Κατασκευή Βαριδίων Πελμάτων

Τα πρόσθετα βαρίδια των πελμάτων των δύο σκελών του ρομπότ κατασκευάστηκαν στη CNC φρέζα από Αλουμίνιο 5083, οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του οποίου φαίνονται στον Πίνακα 4-1. Η δυσκολία κατασκευής αυτών των τεμαχίων έγκειται στην κυκλική γεωμετρία τους και για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήθηκε μια λειτουργία που προσφέρει το SolidCam και υποστηρίζεται από τη CNC φρέζα και λέγεται 3D-iMachining. Κατά τη διάρκεια του 3D-iMachining το κοπτικό εργαλείο κινείται ταυτόχρονα και στους τρεις άξονες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος κατεργασίας, οι δυνάμεις κοπής και η πολυπλοκότητα της κατεργασίας. Όμως, το SolidCam υπολογίζει ορισμένες πολύ σημαντικές παραμέτρους, όπως το βάθος κοπής και την πρόωση του εργαλείου, καθιστώντας την κατεργασία απόλυτα ασφαλή. Στο Σχήμα 5-6 φαίνεται το τεμάχιο ενσωματωμένο στη φρέζα και στο Σχήμα 5-7 η τελική διαμόρφωση των βαριδίων των πελμάτων.



Σχήμα 5-6: Βαρίδιο πέλματος εντός της φρέζας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.



Σχήμα 5-7: Τελική μορφή των βαριδίων των πελμάτων.

5.3.3 Κοίλος άξονας Ισχίου

Ο κοίλος άξονας του ισχίου κατασκευάστηκε στη CNC φρέζα παρ' όλο που έχει κυλινδρικό σχήμα και για αυτό θεωρητικά θα μπορούσε να κατασκευασθεί εύκολα σε τόννο. Είναι κατασκευασμένος και αυτός από Αλουμίνιο 5083 και η εσωτερική του κυλινδρική διαμόρφωση αποτελεί την πιο απαιτητική του γεωμετρία από άποψη κατεργασίας, αλλά και τον λόγο για τον οποίο επιλέχθηκε να αποφευχθεί η χρήση του τόννου. Χρησιμοποιήθηκαν αναγκαστικά κονδύλια μεγάλου μήκους και μικρής διαμέτρου και ως εκ τούτου οι δυνάμεις κοπής ήταν μεγάλες. Έτσι, τα βάθη κοπής και οι ταχύτητες πρόωσης που εφαρμόστηκαν ήταν μικρές για την αποφυγή αστοχιών και την δημιουργία επιφανειών εντός του πεδίων ανοχών μιας και πρέπει να είναι επιτυχημένες οι συναρμογές με τα έδρανα κύλισης. Στα Σχήματα που ακολουθούν φαίνεται ο άξονας δεμένος στη φρέζα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και στην τελική του μορφή.



Σχήμα 5-8: Κοίλος άξονας ισχίου εντός της φρέζας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.



Σχήμα 5-9: Τελική διαμόρφωση κοίλου άξονα ισχίου.

5.4 Τόρνος

5.4.1 Τρόπος Λειτουργίας

Ο τόρνος είναι ένα μηχάνημα που χρησιμοποιείται για την πρόσδοση επιθυμητής μορφής σε αντικείμενα, τα οποία έχουν συσφιχθεί σε ειδική συσκευή συγκράτησης που περιστρέφεται. Υπάρχουν πολλά είδη τόρνων που καταργάζονται διαφορετικά υλικά, όπως ξύλο, μέταλλα κ.ά., αλλά και σύμφωνα με το μέγεθός τους χωρίζονται σε ελαφρού, ημιβαρέος και βαρέος τύπου. Το τελικό προϊόν που προκύπτει από τον τόρνο είναι συμμετρικό ως προς τον άξονα περιστροφής και για αυτό ορισμένες γεωμετρίες, όπως οι κυλινδρικές, υλοποιούνται εύκολα.

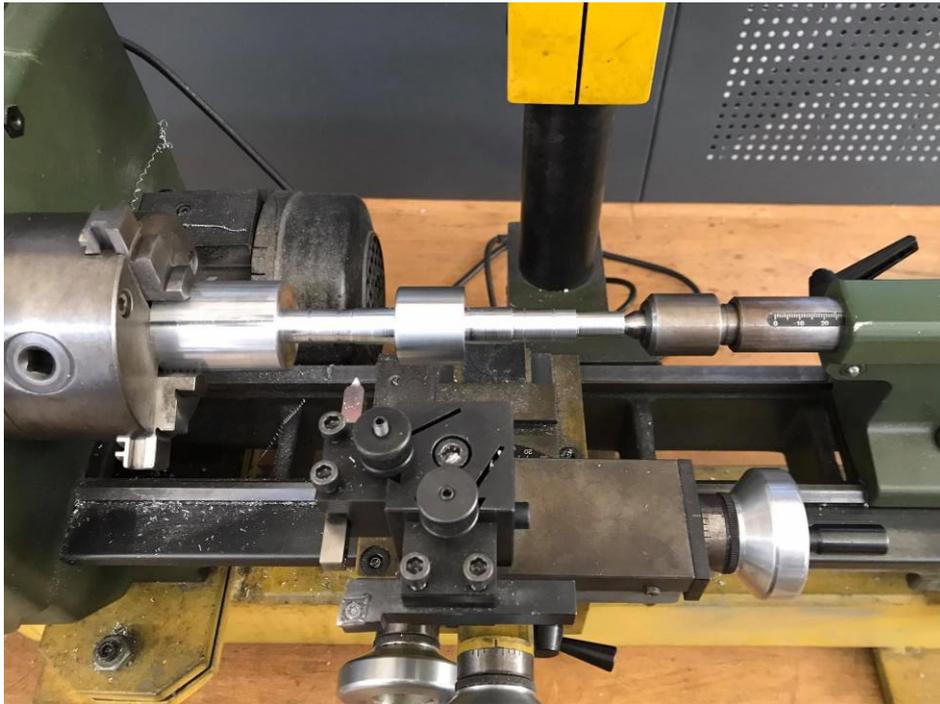
Ο τόρνος που διαθέτει το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ είναι χειροκίνητος και δεν υποστηρίζει Numerical Control όπως η φρέζα. Ωστόσο, στον τόρνο επιλέχθηκε να κατασκευασθεί ο νέος άξονας του ισχύου για την εκμετάλλευση της κυκλικής γεωμετρίας του. Στο Σχήμα 5-10 φαίνεται ο τόρνος του εργαστηρίου.



Σχήμα 5-10: Τόρνος του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου ΕΜΠ (Proxxon).

5.4.2 Άξονας ισχύου

Ο κύριος άξονας του ισχύου κατασκευάστηκε στον τόρνο από αλουμίνιο 5083 καθώς η κατεργασία στο συγκεκριμένο μηχάνημα αποτέλεσε την γρηγορότερη και πιο απλή επιλογή. Ένα κυλινδρικό κομμάτι αλουμινίου συγκρατήθηκε σφιχτά στον τόρνο, άρχισε να περιστρέφεται και με την επαφή με κατάλληλα κοπτικά εργαλεία προέκυψε το τελικό αποτέλεσμα. Παρ' όλο που όλες οι κατεργασίες έγιναν χειροκίνητα η ακρίβεια της κατασκευής είναι υψηλή και οι κρίσιμες επιφάνειες βρίσκονται εντός του πεδίου ανοχών. Στα Σχήματα 5-11 και 5-12 φαίνεται το τελικό προϊόν μετά το πέρας της κατεργασίας εντός και εκτός του τόρνου.



Σχήμα 5-11: Άξονας ισχίου εντός του τόνου μετά το τέλος της κατεργασίας.



Σχήμα 5-12: Τελική μορφή κύριου άξονα ισχίου.

5.5 Τελικό Συναρμολόγημα

Μετά το πέρας της κατασκευής όλων των παραπάνω εξαρτημάτων πραγματοποιήθηκε η συναρμολόγηση τους. Πιο συγκεκριμένα, τα βαρίδια των πελμάτων τοποθετήθηκαν με εποξική κόλλα στα πέλματα του ρομπότ, οι κινητήρες με τη χρήση κοχλιών βιδώθηκαν στο αντίβαρο και οι άξονες τους στο ισχίο του ρομπότ, ενώ τέλος το αντίβαρο συγκρατείται με το ισχίο μέσω εδράνων κύλισης.

Τελικά, το συναρμολόγημα που προέκυψε φαίνεται στο Σχήμα 5-13:



Σχήμα 5-13: Τελικό συναρμολόγημα δίποδου επενεργούμενου ρομπότ.

5.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο τρόπος κατασκευής των μελών του δίποδου ενεργητικού ρομπότ και ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η κάθε μέθοδος κατασκευής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για την κατασκευή και τη συναρμολόγηση του ρομπότ.

Το μηχανικό μοντέλο που κατασκευάστηκε είναι πλήρως λειτουργικό και παρουσιάζει την αναμενόμενη συμπεριφορά με μικρές διαφορές από το θεωρητικό μοντέλο. Αρχικά, ανάμεσα στο αντίβαρο και τον άξονα του ισχίου εμφανίζεται, όπως είναι λογικό, μια μικρή δύναμη τριβής εξαιτίας των απωλειών του εδράνου κύλισης. Η δύναμη αυτή της τριβής δεν έχει μοντελοποιηθεί στη θεωρία αλλά επειδή έχει πολύ μικρή τιμή δεν επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του ρομπότ. Επιπλέον, το ABS αποτελεί ένα υλικό μικρής μηχανικής αντοχής είναι πιθανό κατά την πειραματική διαδικασία να προκληθεί αστοχία. Όμως, η εκτύπωση αντικειμένων στο 3D Printer αποτελεί μια οικονομική διαδικασία μικρής διάρκειας μπορεί να διορθωθεί εύκολα όποια βλάβη προκληθεί.

6 Πειράματα και Αποτελέσματα

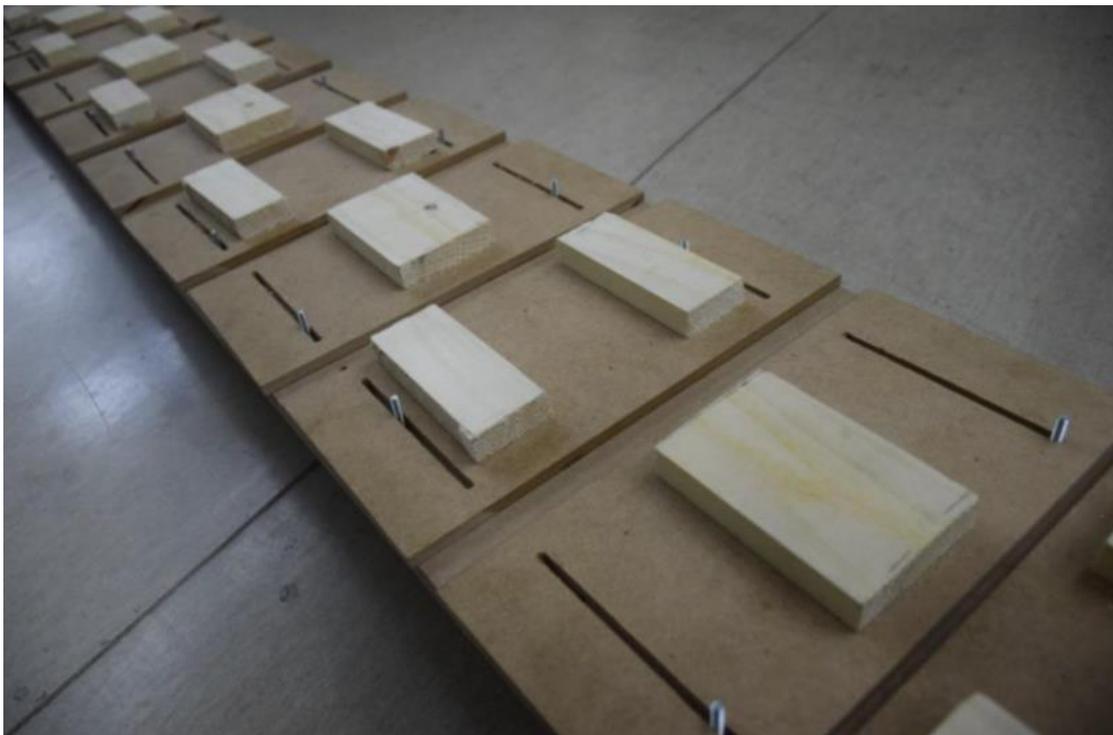
6.1 Εισαγωγή

Μετά το πέρας της συναρμολόγησης του επενεργούμενου δίποδου ρομπότ είναι αναγκαίο να ελεγχθούν ως προς την εγκυρότητά τους τα θεωρητικά στοιχεία και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μέσω πειραμάτων. Το δίποδο που κατασκευάστηκε καλείται να εκτελέσει βηματισμό χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης σε οριζόντιο επίπεδο, καταγράφονται τα πειραματικά δεδομένα και συγκρίνονται με τα αναμενόμενα που έχουν παρουσιασθεί σε προηγούμενα κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά μια λεπτομερής αναφορά στην πειραματική διάταξη, στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η συλλογή των δεδομένων και τέλος παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα τελικά πειραματικά αποτελέσματα.

6.2 Πειραματική Διάταξη

Για να εκτελέσει το δίποδο ρομπότ βηματισμό είναι αναγκαία η ύπαρξη ειδικά διαμορφωμένου εδάφους με κατάλληλες εσοχές και προεξοχές, διότι τα πόδια δεν διαθέτουν γόνατα. Έτσι εφαρμόσθηκε η ιδέα της δημιουργίας νησίδων (stepping stones), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-1, ώστε το κάθε πόδι να πατάει σε μία νησίδα και το άλλο να είναι ελεύθερο να κινηθεί μέχρι να συναντήσει την επόμενη.



Σχήμα 6-1: Το έδαφος με τις νησίδες (stepping stones).

Επομένως το έδαφος αποτελείται από τρία μέρη: έναν ενιαίο ξύλινο διάδρομο, ο οποίος κατασκευάστηκε από MDF (Medium Density Fibreboard), τις νησίδες που παρουσιάσθηκαν παραπάνω και τους ρυθμιστές θέσεις οι οποίοι είναι και αυτοί κατασκευασμένοι από MDF. Οι ρυθμιστές θέσης επιτρέπουν στον χρήστη να μεταβάλλει τη θέση των νησίδων, ώστε να

υπάρχει ευελιξία ως προς το μήκος βήματος. Φυσικά υπάρχει μια εκτίμηση του μήκους βήματος από τις προσομοιώσεις στη MATLAB και το MSC Adams, ωστόσο λόγω των διαφόρων απρόβλεπτων παραγόντων κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, μπορεί το μήκος βήματος να μεταβάλλεται. Έτσι, χρησιμοποιώντας τους ρυθμιστές θέσης που διαθέτουν κατάλληλες ράγες, ρυθμίζεται η ακριβής θέση των νησίδων. Τέλος, σταθεροποιούνται με τη χρήση κοχλίας – περικοχλίου και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6-2: Χρήση ρυθμιστών θέσεως για τον καθορισμό μήκους βήματος.

Αφού παρουσιάστηκε το δάπεδο πάνω στο οποίο θα εκτελεστούν τα πειράματα βηματισμού πρέπει να αναλυθεί η τοπολογία της διάταξης συλλογής των δεδομένων και της διάταξης εφαρμογής του σχήματος αυτομάτου ελέγχου. Για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιούνται τρία IMU τα οποία τοποθετούνται στους τρεις συνδέσμους του ρομπότ, και παρέχουν τις απόλυτες γωνίες των συνδέσμων αυτών. Το Teensy αποθηκεύει μετά το πέρας της διαδικασίας τα πειραματικά αποτελέσματα σε μια κάρτα SD, μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά τους στον υπολογιστή για επεξεργασία. Στη συνέχεια, γίνεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων μέσω του λογισμικού MATLAB, η αποθήκευση τους και η σύγκριση τους με τα θεωρητικά αποτελέσματα.

6.3 Προετοιμασία Πειράματος

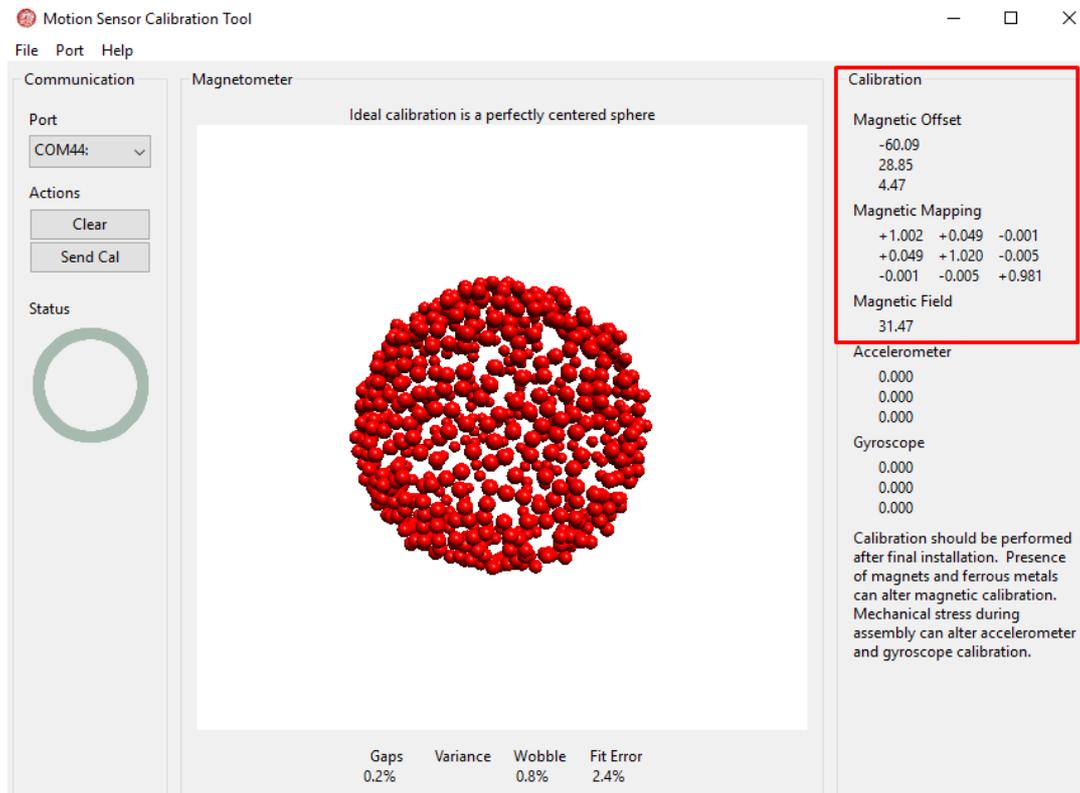
Πριν εκτελεστούν τα πειράματα είναι αναγκαίο να έχει προηγηθεί η κατάλληλη προετοιμασία των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν ώστε να λαμβάνουν όσο το δυνατόν πιο ακριβείς μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται σε αυτήν την ενότητα.

6.3.1 Βαθμονόμηση και sensor fusion αισθητήρων

Αρχικά, θα πρέπει να γίνει η βαθμονόμηση (calibration) του επιταχυνσιόμετρου – γυροσκοπίου στα IMU των συνδέσμων, και στη συνέχεια μέσω αυτής να υπολογιστούν διορθωτικοί παράγοντες, οι οποίοι θα βελτιώνουν την ακρίβεια των μετρήσεων.

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα έγινε μέσω της εφαρμογής MotionCal, το γραφικό περιβάλλον της οποίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-3, και ενός προγράμματος που

δημιουργήθηκε μέσω της εφαρμογής Arduino IDE, το οποίο επικοινωνεί με την εφαρμογή και αποθηκεύει τα αποτελέσματά της.



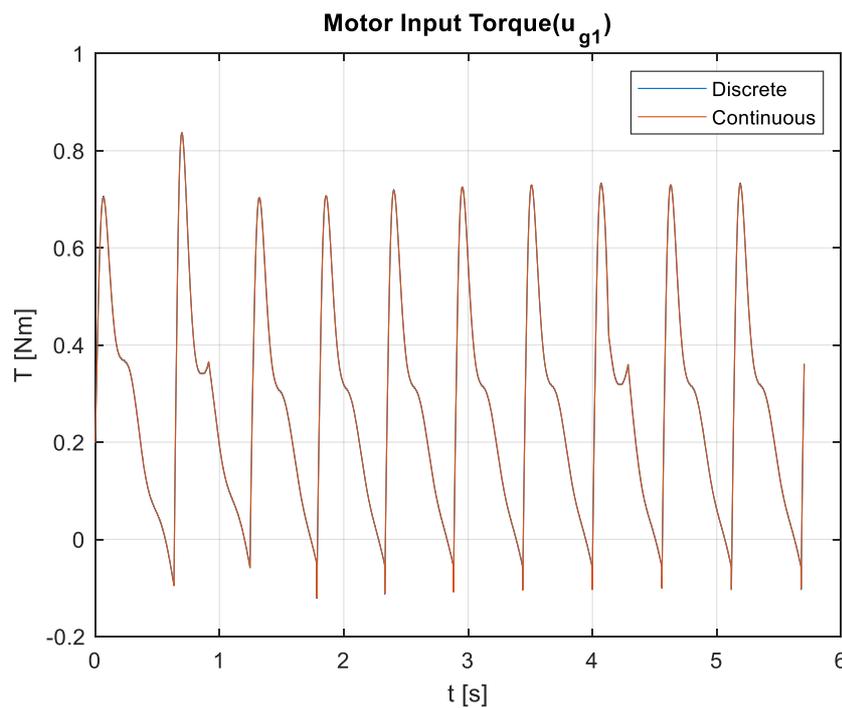
Σχήμα 6-3: Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής MotionCal για βαθμονόμηση αισθητήρων.

Μετά την τελική τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων του ηλεκτρονικού υποσυστήματος εντός του αντιβάρου είναι δυνατόν να ξεκινήσει η βαθμονόμηση. Είναι απαραίτητο να συνδεθεί το Teensy 3.5 με τον υπολογιστή με την εφαρμογή MotionCal ανοιχτή. Τότε ο χρήστης πρέπει να περιστρέφει στο χώρο το όλο σύστημα για να παίρνει το επιταχυνσιόμετρο – γυροσκόπιο πολλούς προσανατολισμούς. Όταν έχουν ληφθεί αρκετές μετρήσεις η εφαρμογή ειδοποιεί το χρήστη πως η διαδικασία βαθμονόμησης ολοκληρώθηκε και αποθηκεύει τους διορθωτικούς παράγοντες (φαίνονται πάνω δεξιά στο Σχήμα 6-3 σε κόκκινο πλαίσιο) για να χρησιμοποιηθούν αργότερα.

Στη συνέχεια, με τις τιμές που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση εφαρμόζεται η μεθοδολογία sensor fusion για να μειωθεί στο ελάχιστο το σφάλμα μέτρησης. Η διαδικασία αυτή συνδυάζει δεδομένα μετρήσεων που προέρχονται από διαφορετικούς αισθητήρες, έτσι ώστε οι προκύπτουσες πληροφορίες να έχουν μικρότερη αβεβαιότητα από ότι θα ήταν εφικτό να έχουν όταν αυτές χρησιμοποιούνται μεμονωμένα. Για τη διαδικασία αυτή επιλέχθηκε ο αλγόριθμος NXP SensorFusion της Adafruit, ο οποίος συνδυάζει τιμές που λαμβάνει από το επιταχυνσιόμετρο, από το γυροσκόπιο και από το μαγνητόμετρο. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προσφέρει υψηλή ακρίβεια και πολύ γρήγορη σύγκλιση σε σχέση με τις υπόλοιπους αλγορίθμους που είναι διαθέσιμοι για τον αισθητήρα FXOS8700 + FXAS21002, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη. Όμως, έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος, το οποίο πάντως είναι διαχειρίσιμο από το Teensy 3.5 αλλά όχι από το Arduino Uno.

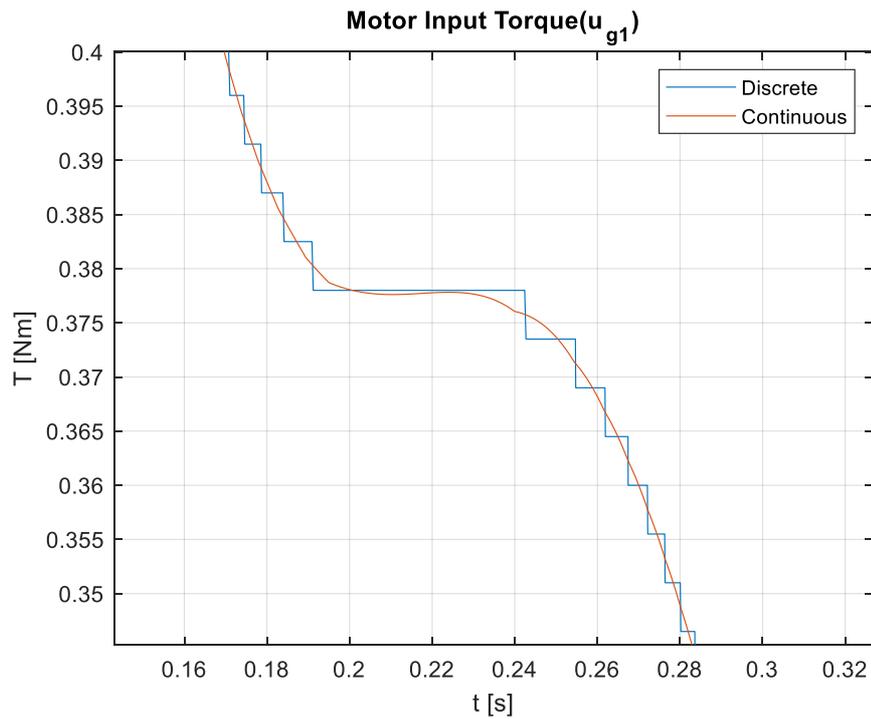
6.3.2 Διακριτοποίηση σήματος ροπής

Για τον έλεγχο των κινητήρων έχει επιλεγεί ο έλεγχος ρεύματος έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια στις παραγόμενες ροπές. Το Teensy στέλνει μέσω ενός κύματος PWM μια τιμή ρεύματος στο drive, αυτό παρέχει στον κινητήρα το ρεύμα που αντιστοιχεί σε αυτήν την τιμή και ο κινητήρας εφαρμόζει ροπή ανάλογη του ρεύματος που έχει ως είσοδο. Ωστόσο το σήμα PWM που στέλνει το Teensy έχει ανάλυση 12 – bit, με αποτέλεσμα στην άτρακτο του μειωτήρα να μπορεί να εφαρμοσθεί ροπή με ανάλυση τα 4.5 mNm. Για να ελεγχθεί αν η ανάλυση αυτής της ροπής επηρεάζει σημαντικά την έκβαση των πειραμάτων δημιουργήθηκαν εκ νέου προσομοιώσεις στο λογισμικό MATLAB, αυτή τη φορά όμως με είσοδο το διακριτό σήμα της ροπής, όπως φαίνεται στα Σχήματα 6-4 έως 6-6:

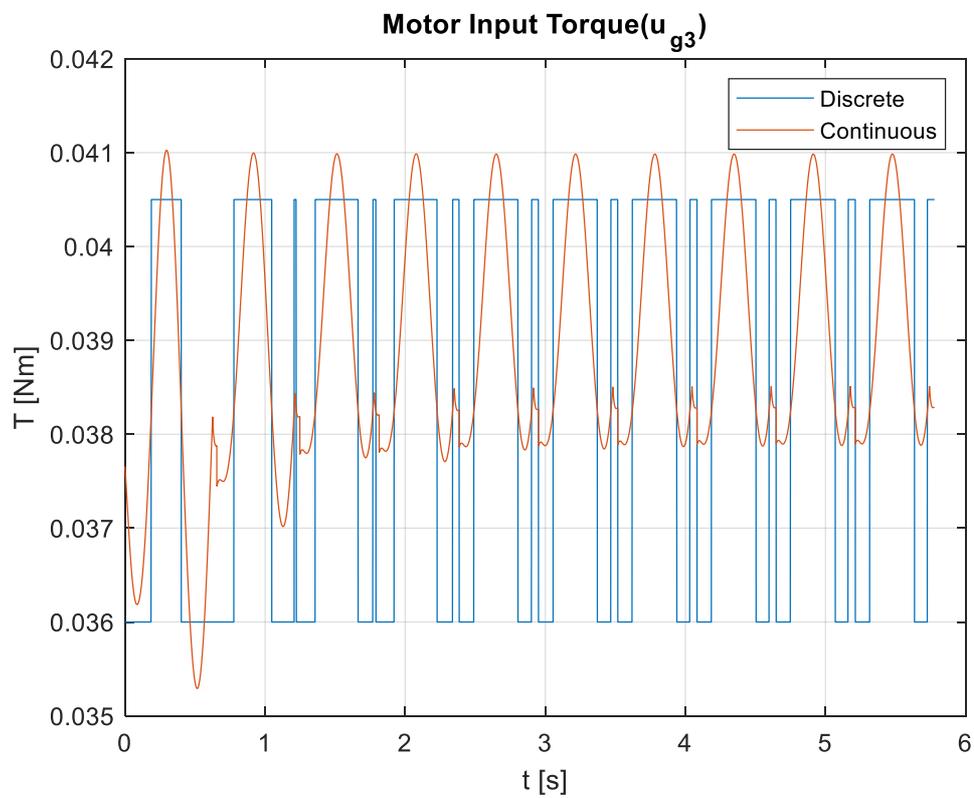


Σχήμα 6-4: Διάγραμμα συνεχούς και διακριτής ροπής για το πόδι που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος. Η διακριτή ροπή δεν είναι εμφανής καθώς βρίσκεται πολύ κοντά στην συνεχή τιμή.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-4 η διακριτοποίηση της u_{g1} δεν οδηγεί σε οπτικά διαφορετικό διάγραμμα από αυτό της συνεχούς τιμής. Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνει μεγέθυνση σε συγκεκριμένη περιοχή του διαγράμματος (Σχήμα 6-5).



Σχήμα 6-5: Διάγραμμα συνεχούς και διακριτής ροπής για το πόδι που βρίσκεται στο έδαφος σε μεγέθυνση.

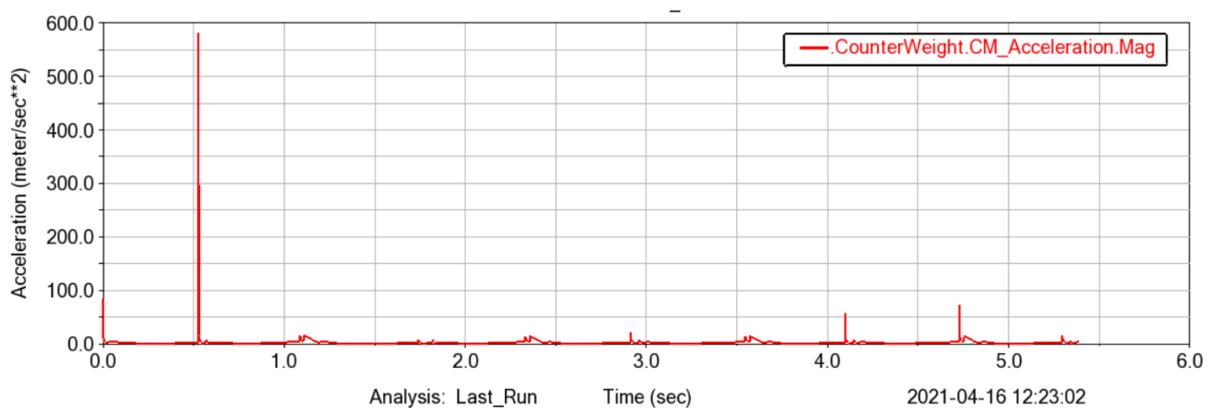


Σχήμα 6-6: Διάγραμμα συνεχούς και διακριτής ροπής για το πόδι που αιωρείται.

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό πως η ροπή του ποδιού που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος έχει ελάχιστη διαφορά ύστερα από τη διακριτοποίησή της, ενώ η ροπή του ποδιού που αιωρείται παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση. Παρ' όλη τη μεγάλη διαφορά στη ροπή u_{g3} , τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν πως το δίποδο ρομπότ εκτελεί ευσταθή βηματισμό και η ανάλυση αυτή της ροπής δεν επηρεάζει το περπάτημα.

6.3.3 Εντοπισμός στιγμής κρούσης

Κατά την ολοκλήρωση ενός βήματος αλλάζει η φάση στην οποία βρίσκεται το κάθε πόδι και από φάση αιώρησης περνάει σε φάση στήριξης και το αντίστροφο. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται και η εναλλαγή των ροπών u_{g1} και u_{g3} μεταξύ των ποδιών. Για το λόγο αυτό το Teensy θα πρέπει να αντιλαμβάνεται την ακριβή στιγμή της κρούσης του ποδιού με το δάπεδο, που σηματοδοτεί την ολοκλήρωση του βήματος και την έναρξη του επόμενου, και να μεταβάλλει τη ροπή που στέλνει σε κάθε πόδι. Η κρούση του πέλματος με το έδαφος συνοδεύεται από μεταβολή της επιτάχυνσης που μετράει το επιταχυνσιόμετρο που βρίσκεται εντός του αντιβάρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-7.



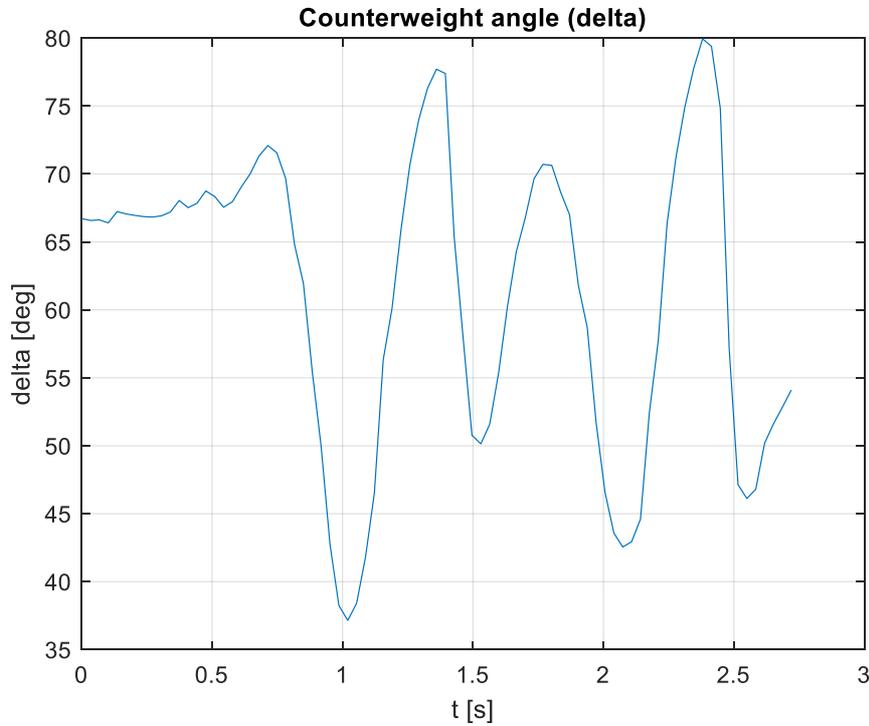
Σχήμα 6-7: Διάγραμμα επιταχύνσεων αντιβάρου που μετράει το επιταχυνσιόμετρο για εντοπισμό κρούσης.

Επομένως, όταν το Teensy εντοπίσει διαφορά επιτάχυνσης μεγαλύτερη ενός ορίου κάνει την εναλλαγή των ροπών στα δύο πόδια και ξεκινάει το επόμενο βήμα. Επειδή, όμως, η διαφορά αυτή της επιτάχυνσης είναι μικρή και για αυτό είναι πιθανό να παρατηρηθεί και εκτός της στιγμής της κρούσης, ελέγχουμε μόνο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Γνωρίζοντας από τις προσομοιώσεις που προηγήθηκαν πως το κάθε βήμα ολοκληρώνεται σε συγκεκριμένες τιμές των γωνιών θ και ψ , το Teensy ελέγχει εάν η διαφορά της επιτάχυνσης είναι μεγαλύτερη από το όριο που θέσαμε μόνο όταν οι δύο γωνίες έχουν τιμή κοντά σε αυτή των προσομοιώσεων. Με αυτόν τον τρόπο, επιλύεται το πρόβλημα εντοπισμού λανθασμένων στιγμών κρούσεων αλλά παράλληλα μας επιτρέπεται να μειώσουμε το όριο της επιτάχυνσης, και έτσι το σύστημα μας να γίνει πιο ευαίσθητο για να μην παραληφθεί καμία κρούση.

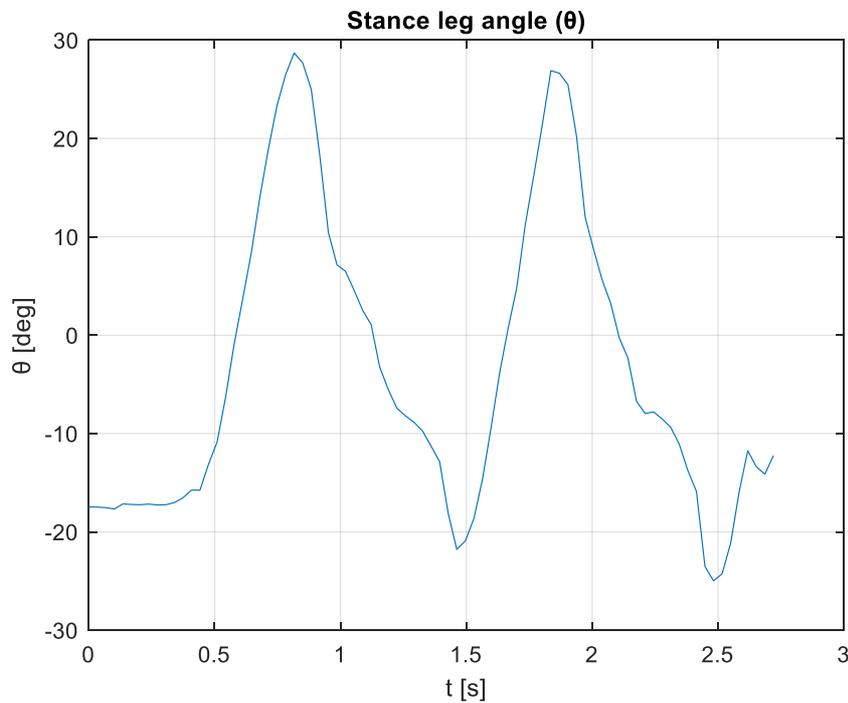
6.4 Συλλογή Ανεπεξεργαστων Δεδομένων

Η συλλογή των δεδομένων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων γίνεται μέσω της καταγραφής των μεταβλητών του προγράμματος του Teensy σε κάρτα microSD ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Αφού ολοκληρωθεί το πείραμα, τα αρχεία που δημιουργήθηκαν στην κάρτα αποθηκεύονται και επεξεργάζονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στη συνέχεια

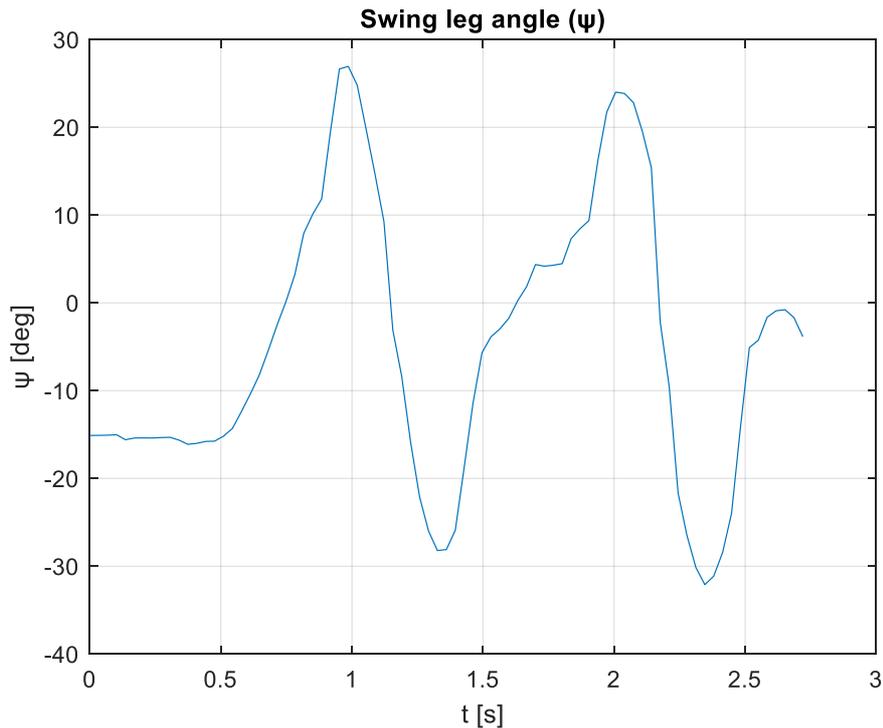
παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μεταβλητών του συστήματος όπως προέκυψαν από τα πειράματα χωρίς καμία επεξεργασία. Στο Σχήμα 6-8 φαίνεται η μεταβολή της γωνίας δ συναρτήσει του χρόνου, στο Σχήμα 6-9 η γωνία θ συναρτήσει του χρόνου και στο Σχήμα 6-10 η γωνία ψ :



Σχήμα 6-8: Διάγραμμα γωνίας αντιβάρου, δ , όπως προέκυψε από πείραμα.



Σχήμα 6-9: Διάγραμμα γωνίας ποδιού που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος, θ , όπως προέκυψε από πείραμα.

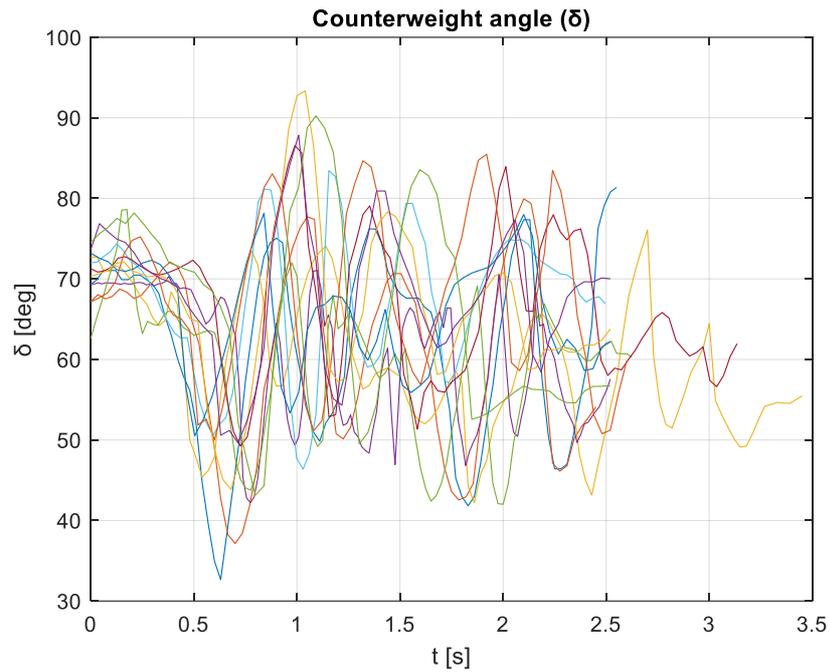


Σχήμα 6-10: Διάγραμμα γωνίας ποδιού, ψ , που αιωρείται όπως προέκυψε από πείραμα.

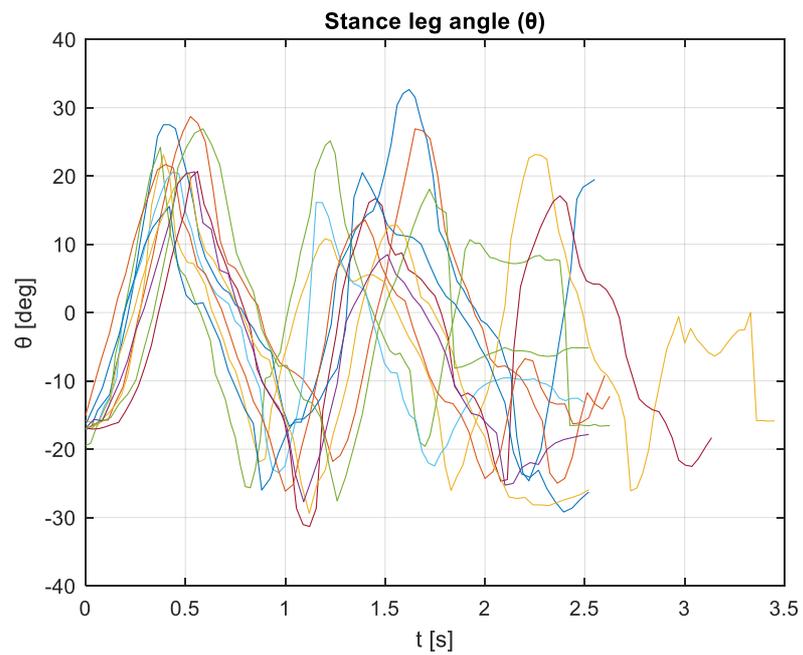
Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό πως το δίποδο ρομπότ εκτελεί περπάτημα τεσσάρων βημάτων, ενώ στο πέμπτο πέφτει. Η γωνία δ παρουσιάζει μεγαλύτερη ταλάντωση γύρω από την τιμή των 65° από την αναμενόμενη βάσει των προσομοιώσεων, ενώ η γωνίες θ και ψ των ποδιών φαίνεται πως μεταβάλλονται όπως αναμέναμε. Για να εξαχθούν έγκυρα συμπεράσματα θα πρέπει να παρουσιασθούν περισσότερα πειραματικά αποτελέσματα και να γίνει η σύγκριση τους με αυτά των προσομοιώσεων.

6.5 Πειραματικά Αποτελέσματα και Σύγκριση με Προσομοιώσεις

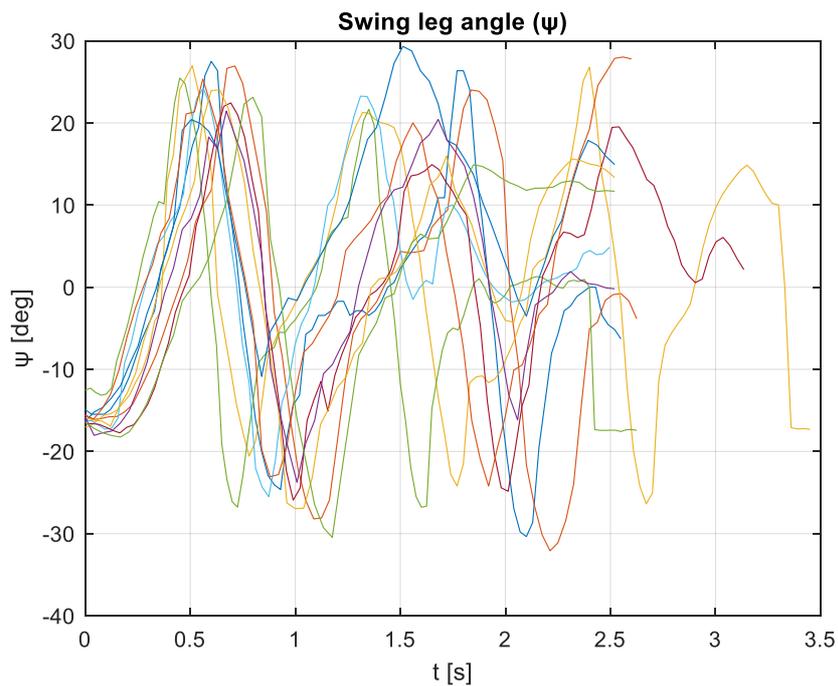
Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται το πείραμα αρκετές φορές για να ελεγχθεί η επαναληψιμότητά του. Έτσι, προέκυψε μια ευρύτερη περιοχή μέσα στην οποία κινούνται οι μεταβλητές του συστήματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-11 και 6-12. Είναι φανερό πως στα δύο πρώτα βήματα η πλειοψηφία των πειραμάτων συγκλίνει σε μια μικρή περιοχή, ενώ για τα υπόλοιπα δύο βήματα τα διαγράμματα αρχίζουν να απομακρύνονται και η περιοχή αυτή να μεγαλώνει. Ο κάθε βηματισμός είναι διαφορετικός εξαιτίας της μεγάλης εξάρτησης του από τις αρχικές συνθήκες, οι οποίες δεν είναι σταθερές σε κάθε πείραμα: για παράδειγμα λόγω του ότι σπρώχνουμε με τα χέρια το ρομπότ για να αποκτήσει τις αρχικές συνθήκες ταχύτητας στα πόδια και το αντίβαρο, βλ. Σχήματα 6-11, 6-12 και 6-13.



Σχήμα 6-11: Σύνολο διαγραμμάτων γωνίας αντιβάρου για πολλά πειράματα.



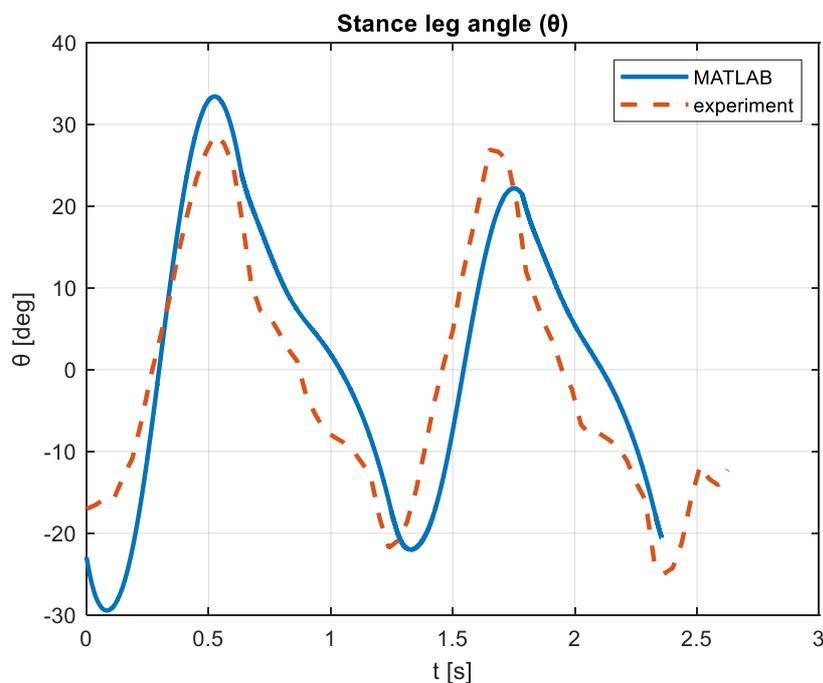
Σχήμα 6-12: Σύνολο διαγραμμάτων γωνίας του ποδιού που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος για πολλά πειράματα.



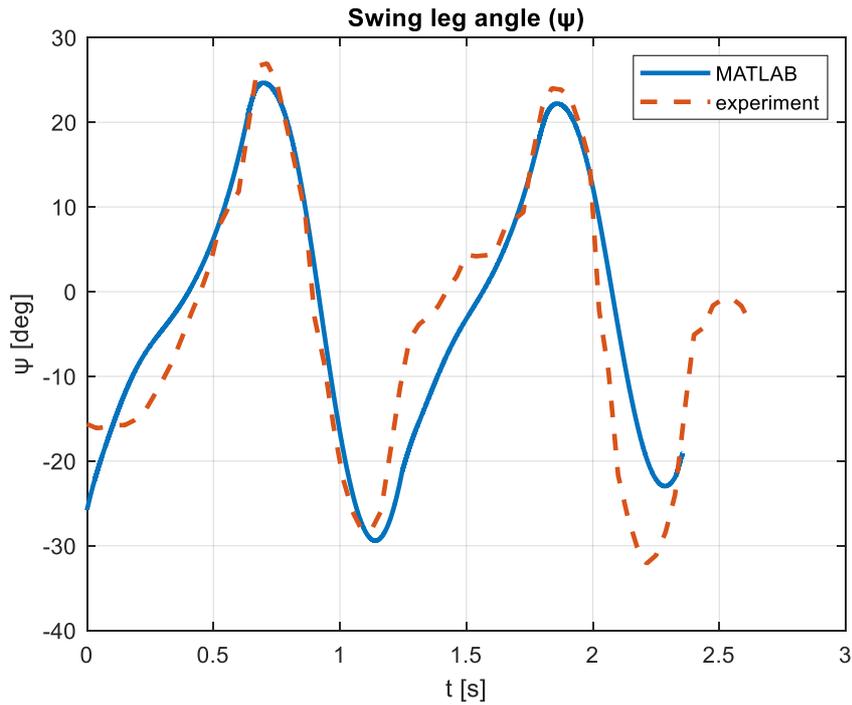
Στη συνέχεια, είναι χρήσιμο να γίνει η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με

Σχήμα 6-13: Σύνολο διαγραμμάτων γωνίας του ποδιού που αιωρείται για πολλά πειράματα.

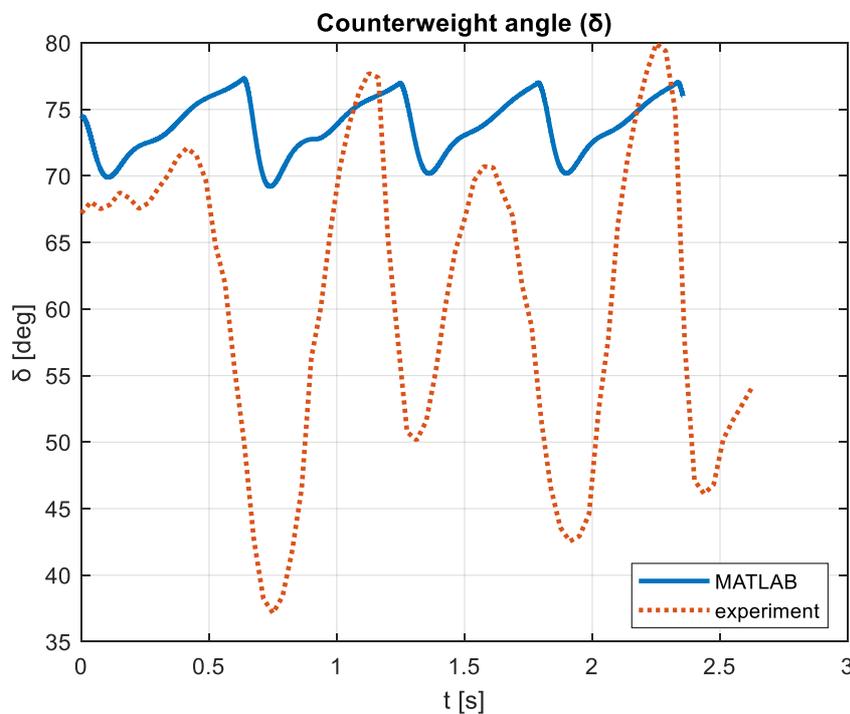
αυτά των προσομοιώσεων. Για το λόγο αυτό επιλέγεται ένα μόνο πείραμα από αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω, βλ. Σχήματα 6-14 έως 6-16.



Σχήμα 6-14: Διάγραμμα γωνίας του ποδιού που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος όπως αυτό προέκυψε από τις προσομοιώσεις και το πείραμα.



Σχήμα 6-15: Διάγραμμα γωνίας του ποδιού που αιωρείται όπως αυτό προέκυψε από τις προσομοιώσεις και το πείραμα.



Σχήμα 6-16: Διάγραμμα γωνίας του αντιβάρου όπως αυτό προέκυψε από τις προσομοιώσεις και το πείραμα.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται πως οι γωνίες θ και ψ παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, τα διαγράμματά τους έχουν την ίδια μορφή, με την ίδια περίοδο και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των γωνιών είναι σχεδόν οι ίδιες. Αντίθετα, στο Σχήμα 6-16 που απεικονίζεται η γωνία του αντιβάρου δ εμφανίζονται σημαντικές διαφορές ανάμεσα στο πείραμα και την προσομοίωση. Στις προσομοιώσεις η γωνία δ εκτελεί ταλάντωση μικρού πλάτους (περίπου 5°) γύρω από μια θέση, ενώ στο πείραμα εκτελεί ταλάντωση 30° περίπου. Αυτό οφείλεται κυρίως στη διαφορά των τιμών των κερδών του PD ελέγχου, καθώς και στα φαινόμενα που δεν έχουν πλήρως μοντελοποιηθεί, όπως το backdrivability. Συγκεκριμένα, τα κέρδη που εφαρμόστηκαν στο πείραμα είναι αισθητά μικρότερα από αυτά των προσομοιώσεων, εξαιτίας του θορύβου που υπάρχει στην πραγματικότητα και οδηγεί το σύστημα στην αστάθεια για μεγάλα κέρδη.

6.6 Συμπεράσματα

Όπως παρατηρήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι προσομοιώσεις προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα. Ωστόσο, όπως είναι αναμενόμενο παρουσιάζουν και αποκλίσεις, οι οποίες εντοπίζονται κυρίως στη γωνία του αντιβάρου. Οι διαφορές αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στις διαφορετικές τιμές των κερδών του όρου PD του σχήματος ελέγχου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αλλά και στην αδυναμία μας να εφαρμόσουμε στο ρομπότ όμοιες αρχικές συνθήκες με αυτές των προσομοιώσεων. Επιπλέον, μια ακόμα διαφορά που υπήρχε κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων ήταν το έδαφος το οποίο χρειάζεται τις νησίδες για τον βηματισμό. Ιδανικά θα έπρεπε οι νησίδες να έχουν τοποθετηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις πριν την έναρξη του πειράματος, ώστε να είναι καθορισμένο το μήκος βήματος που θα πρέπει να εκτελέσει το ρομπότ. Στην πραγματικότητα, μια μικρή μεταβολή του μήκους βήματος μπορεί να οδηγήσει σε πτώση και αποτυχία του πειράματος.

Συνολικά, οι προσομοιώσεις επαληθεύουν σε ενθαρρυντικό βαθμό τη θεωρία, απαιτούνται όμως προσαρμογές στην πειραματική διάταξη ώστε να ληφθούν συστηματικά δεδομένα και να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Σχετικές προτάσεις θα συζητηθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτήν την εργασία μελετήθηκε η κατασκευή και το βάδισμα ενεργητικού δίποδου ρομπότ, τόσο σε επίπεδο προσομοιώσεων, όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με προσομοιώσεις του απλουστευμένου μηχανικού μοντέλου και με αυτόν τον τρόπο μπορούν να εξαχθούν διάφορα συμπεράσματα, καθώς επίσης και να προταθεί μελλοντική εργασία.

7.2 Συμπεράσματα

Αρχικά, οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στα λογισμικά MATLAB και MSC Adams επιβεβαίωσαν την υπόθεση πως μπορεί να υπάρξει δίποδο υποεπενεργούμενο ρομπότ, το οποίο θα εκμεταλλεύεται την παθητική δυναμική και θα εκτελεί ευσταθείς βηματισμούς.

Στη συνέχεια, ο τρόπος με τον οποίο έγινε ο σχεδιασμός του οδήγησε στο συμπέρασμα πως είναι δυνατή η κατασκευή του με ελάχιστη παρέμβαση στο ήδη υπάρχον παθητικό ρομπότ. Η χρήση του πλαστικού ABS ήταν απόλυτα επιτυχημένη, αφού οι φορτίσεις που δέχεται κατά το περπάτημα είναι αρκετά μικρές και δεν υπάρχει φόβος αστοχίας του υλικού.

Επιπλέον, η επιλογή μικρών και φθηνών αισθητήρων και του οικονομικού μικροελεγκτή δεν δημιούργησε προβλήματα στην πειραματική διαδικασία, αλλά αποτέλεσε έναν τρόπο εύκολο και οικονομικό για την υλοποίηση πολύπλοκων εφαρμογών. Παράλληλα, η λήψη και αποθήκευση δεδομένων κατά την εκτέλεση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε απρόσκοπτα και με μεγάλη ακρίβεια.

Τέλος, η μεγαλύτερη ίσως συνεισφορά της παρούσας εργασίας είναι πως η επαλήθευση των θεωρητικών συμπερασμάτων και των μαθηματικών μοντελοποιήσεων του δίποδου βηματισμού μέσω της εκτέλεσης πειραμάτων, μπορεί να προσεγγίσει τη δυναμική του ανθρώπινου βηματισμού κατά τη διάρκεια του περπατήματος κάνοντας βέβαια διαστασιολογική αναγωγή, ώστε να υπάρχει αντιστοίχιση του μεγέθους του ανθρώπινου ποδιού με αυτό του κατασκευασμένου δίποδου ρομπότ. Έτσι, είναι δυνατόν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για το ανθρώπινο περπάτημα και το σχεδιασμό ανθρωπόμορφων ρομπότ.

7.3 Μελλοντική Εργασία

Η μελλοντική εργασία αφορά τόσο σε βελτιώσεις της υπάρχουσας έκδοσης του δίποδου μοντέλου όσο και την εξέλιξή της.

Αρχικά, σχετικά με τις κατασκευαστικές βελτιώσεις, προτείνεται η δημιουργία μιας βελτιωμένης έκδοσης πρισματικής άρθρωσης. Η υπάρχουσα πρισματική άρθρωση επιτυγχάνεται με τη χρήση υλικών χαμηλής τριβής και φθοράς. Ενώ αυτή δείχνει να λειτουργεί ικανοποιητικά για τις ανάγκες του ρομπότ, η τριβή και η φθορά θα μπορούσαν να περιορισθούν ακόμα περισσότερο με τη χρήση γραμμικών εδράνων (γραμμικά ρουλεμάν).

Επιλέον, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας δεν πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε επίπεδο με διαφορετικές κλίσεις (ανηφόρα και κατηφόρα), παρ' όλο που έχουν εκτελεστεί οι προσομοιώσεις. Μια μελλοντική εργασία που πρέπει να γίνει είναι η διεξαγωγή αυτών των πειραμάτων για να αποκτήσουμε μια γενική εικόνα για το εύρος λειτουργίας του ρομπότ.

Επίσης, είναι σημαντικό να ελεγχθεί ο βηματισμός με πέλματα διαφορετικής γεωμετρίας. Εφόσον ο τελικός στόχος είναι η προσέγγιση ενός προσθετικού κάτω άκρου, θα πρέπει σταδιακά τα ημικυκλικά πέλματα να αντικατασταθούν από πέλματα πολυπλοκότερης γεωμετρίας, όπως ημιελλειπτικά, γενικευμένης γεωμετρίας και τέλος, γεωμετρίας που προσεγγίζει τη λειτουργική μορφή του ανθρώπινου πέλματος.

Τέλος, θα πρέπει να σχεδιασθεί νέο μοντέλο με αρθρώσεις στα γόνατα και στους αστραγάλους, το οποίο θα προσεγγίζει περισσότερο το ανθρώπινο πόδι και ως εκ τούτου θα οδηγήσει σε μεγαλύτερης ομοιότητας βηματισμό. Οι αρθρώσεις αυτές θα μπορούν να είναι αρχικά παθητικές, και σταδιακά να εισαχθεί επενέργηση και σε αυτές.

8 Βιβλιογραφία

- [1] Farhan Salem, A. and Ayman Aly, A., “PD Controller Structures: Comparison and Selection for an Electromechanical System”, 2015.
- [2] Morris, B. and Grizzle, J.W., “A Restricted Poincaré Map for Determining Exponentially Stable Periodic Orbits in Systems with Impulse Effects: Application to Bipedal Robots”, *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, Seville, Spain, December 2005.
- [3] Βασιλείου, Χρ., “ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΔΙΠΟΔΟΥ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΚΡΙΒΩΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΠΟΔΟ ΠΕΡΠΑΤΗΜΑ”, Αθήνα, 2019.
- [4] Συμυρή, Α., “ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΠΟΔΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΒΗΜΑΤΙΣΜΟΥ”, Αθήνα, 2017.
- [5] Aikaterini Smyrli, Georgios A. Bertos, Member and Evangelos Papadopoulos, “Efficient stabilization of zero slope walking for bipedal robots following their passive fixed point trajectories”, *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 2018*.
- [6] McGeer, T., “Dynamics and Control of Bipedal Locomotion”, *Journal of Theoretical Biology*, vol. 163, no. 3, 1993, pp. 277-314.
- [7] Mochon, S. and McMahon, T.A., “Ballistic walking: an improved model”, *Mathematical Biosciences*, vol. 52, no.3, 1980, pp. 241-260.
- [8] McGeer, T., “Passive Dynamic Walking”, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, 1990, pp. 62-82.
- [9] Collins, S.H. and Ruina, A., “A Bipedal Walking Robot with Efficient and Human-Like Gait”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '05)*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 1983-1988.
- [10] Stopforth, R., Bright, G., Feng, C., “A Hip Actuated Passive Dynamic Walking Biped”, *Eurocon 2013, Zagreb, 2013*, pp. 1905-1910.
- [11] Wisse, M., D. G. E. Hobbelen and A. L. Schwab, "Adding an Upper Body to Passive Dynamic Walking Robots by Means of a Bisecting Hip Mechanism," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 1, Feb. 2007, pp. 112-123.
- [12] Wisse, M., A. L. Schwab, R. Q. van der Linde and F. C. T. van der Helm, "How to keep from falling forward: elementary swing leg action for passive dynamic walkers," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 3, June 2005, pp. 393-401.
- [13] Koop, D. and Wu, C.Q., “Passive Dynamic Biped Walking – Part I: Development and Validation of an Advanced Model”, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, vol. 8, 2013.
- [14] Van Ham, R., B. Vanderborght, M. Van Damme, B. Verrelst and D. Lefeber, "MACCEPA: the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator for 'controlled passive walking'", *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006. ICRA 2006., Orlando, FL, 2006, pp. 2195-2200.
- [15] Verrelst, B., Ham, R.V., Vanderborght, B., et al., “The Pneumatic Biped “Lucy” Actuated with Pleated Pneumatic Artificial Muscles”, *Auton. Robot.* (2005) 18: 201.
- [16] Caballero, R., et al., “Methodology for Zero-moment Point Experimental Modeling in the Frequency Domain”, *Journal of Vibration and Control*, 2006.
- [17] Kim, J.Y., Park, I.W., Oh, J.H., “Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems volume*, 2007.

- [18] Nguyen, Q., Sreenath, K., “Optimal Robust Control for Bipedal Robots through Control Lyapunov Function based Quadratic Programs”, in *Robotics: Science and Systems*, July 2015.
- [19] Nikkhah, M., Ashrafiuon, H., Fahimi, F., “Robust control of underactuated bipeds using sliding modes”, in *ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, January 2005.
- [20] Gritli, H., Khraief, N., Belghith, S., “Period-three route to chaos induced by a cyclic-fold bifurcation in passive dynamic walking of a compass-gait biped robot”, in *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012.
- [21] Erbaturo, K., Kurt, O., “Natural ZMP Trajectories for Biped Robot Reference Generation”, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, March 2009.
- [22] Δρογώσης, Α., “Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης ασύρματων IMUs για αναγνώριση της συνάρτησης μεταφοράς του ανθρώπινου ποδιού κατά το βάδισμα”, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΑΕ ΕΜΠ, Αθήνα, 2017.
- [23] Δάλλας, Α., “Τρόποι προσομοίωσης υβριδικών συστημάτων με κρούσεις και συγκρίσεις επιλυτών με Matlab”, Διπλωματική Εργασία, ΕΑΕ ΕΜΠ, Αθήνα, 2017.
- [24] Asano, F., Luo, Z., “Energy-Efficient and High-Speed Dynamic Biped Locomotion Based on Principle of Parametric Excitation”, in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, December 2008.
- [25] Kochuvila, S., et al., “Control of a Compass Gait Biped Robot Based on Partial Feedback Linearization”, in *Conference Towards Autonomous Robotic Systems*, August 2012.

Παράρτημα Α

maxon

DC-max22S GB KL 12V

Product specification

Values at nominal voltage	
Nominal voltage	12 V
No load speed	7140 min ⁻¹
No load current	28.3mA
Nominal speed	5260 min ⁻¹
Nominal torque (max. continuous torque)	12.5 mNm
Nominal current (max. continuous current)	0.819 A
Stall torque	49.4 mNm
Stall current	3.14 A
Max. efficiency	80.6 %

Characteristics	
Max. output power continuous	10.4 W
Terminal resistance	3.83 Ω
Terminal inductance	0.274 mH
Torque constant	15.8 mNm A ⁻¹
Speed constant	606 min ⁻¹ V ⁻¹
Speed/torque gradient	147 min ⁻¹ mNm ⁻¹
Mechanical time constant	8.57ms
Rotor inertia	5.57 gcm ²

Thermal data	
Thermal resistance housing-ambient	20 KW ⁻¹
Thermal resistance winding-housing	6 KW ⁻¹
Thermal time constant of the winding	17.2 s
Thermal time constant of the motor	538 s
Ambient temperature	-30...85 °C
Max. winding temperature	125 °C

Mechanical data	
Max. permissible speed	9000 min ⁻¹
Axial play	0.05...0.15 mm
Preload	0 N
Radial backlash	0.025 mm
Max. axial load (dynamic)	3.3 N
Max. force for press fits (static)	45 N
Static, supported shaft	420 N
Max. radial load 5 mm from flange	12.3 N
Measurement from the flange	5 mm

Further specifications	
Number of pole pairs	1
Number of commutator segments	9

GPX26 A 111:1



Product specification

Gearhead data

Reduction	111:1
Absolute reduction	357075/3211
Number of stages	3
Max. continuous torque	4.50 Nm
Max. intermittent torque	6.2 Nm
Direction of rotation, drive to output	=
Max. efficiency	75 %
Average backlash no-load	1.1 °
Mass inertia	1.282 gcm ²
Max. transmittable power (continuous)	12 W
Max. short-time transferable output	15 W

Technical data

Output shaft bearing	
Max. radial play, 5 mm from flange	max. 0.1 mm
Axial play	0...0.4 mm
Max. permissible radial load, 10 mm from flange	150 N
Max. permissible axial load	80 N
Max. permissible force for press fits	120 N
Max. continuous input speed	10000 min ⁻¹
Max. intermittent input speed	12500 min ⁻¹
Recommended temperature range	-40...100 °C

ENX10 EASY 1024IMP



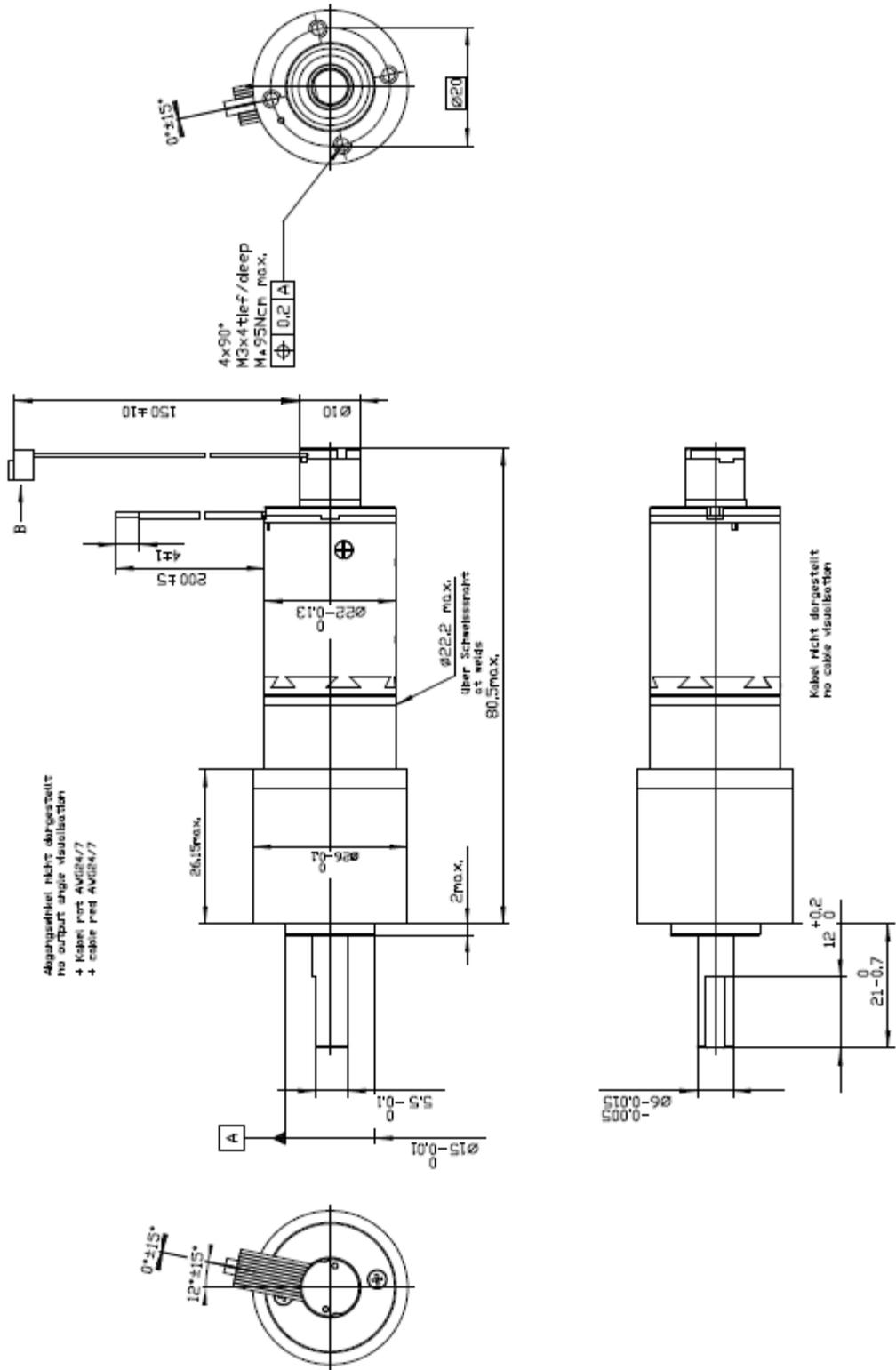
Product specification

Sensor data

Counts per turn	1024
Number of channels	3
Line Driver	RS422
Max. electrical speed	90000 min ⁻¹
Max. mechanical speed	30000 min ⁻¹

Technical data

Supply voltage Vcc	5 V ±10 %
Output signal	INC
Output signal driver	Differential / EIA RS 422
Output current per channel	-20...20 mA
State length	20...160 °el
Signal rise time/Signal fall time	20/20 ns
Min. state duration	125 ns
Direction of rotation	A before B CW
Index position	A low & B low
Index synchronously to AB	Yes
Index pulse width	90 °el
Typical current draw at standstill	22 mA
Max. moment of inertia of code wheel	0.05 gcm ²
Operating temperature range	-40...100 C°
Number of autoclave cycles	0



Abgangshülse nicht dargestellt
 no output angle visualization
 + Kabel mit AV024/7
 + cable red AV024/7

SPECIFICATIONS

Power Specifications		
Description	Units	Value
DC Supply Voltage Range	VDC	10 - 36
DC Bus Under Voltage Limit	VDC	8
DC Bus Over Voltage Limit	VDC	40
Maximum Peak Output Current ¹	A	10
Maximum Continuous Output Current	A	5
Maximum Continuous Output Power	W	171
Maximum Power Dissipation at Continuous Current	W	9
Minimum Load Inductance (Line-To-Line) ²	μH	100
Internal Bus Capacitance ³	μF	23.5
Low Voltage Supply Outputs	-	+5 VDC (30 mA)
Switching Frequency	kHz	40
Control Specifications		
Description	Units	Value
Command Sources	-	PWM
PWM Input Frequency Range	kHz	10 - 25
Feedback Supported	-	Halls
Commutation Methods	-	Trapezoidal
Modes of Operation	-	Current
Motors Supported	-	Three Phase (Brushless), Single Phase (Brushed, Voice Coil, Inductive Load)
Hardware Protection	-	Invalid Commutation Feedback, Over Current, Over Temperature, Over Voltage, Under Voltage, Short Circuit (Phase-Phase & Phase-Ground)
Mechanical Specifications		
Description	Units	Value
Agency Approvals	-	RoHS, UL/cUL Pending, CE Pending
Size (H x W x D)	mm (in)	38.1 x 38.1 x 7.34 (1.50 x 1.50 x 0.29)
Weight	g (oz)	8.5 (0.3)
Operating Temperature Range ⁴	°C (°F)	0 - 85 (32 - 185)
Storage Temperature Range	°C (°F)	-40 - 85 (-40 - 185)
Relative Humidity	-	0 - 90% Non-Condensing
Form Factor	-	PCB Mounted
P1 Connector	-	12-pin, 1.27 mm spaced header
P2 Connector	-	12-pin, 1.27 mm spaced header

Notes

1. Maximum duration of peak current is ~2 seconds. Peak RMS value must not exceed continuous current rating of the drive.
2. Lower inductance is acceptable for bus voltages well below maximum. Use external inductance to meet requirements.
3. Requires a minimum of 47 μF external bus capacitance between the DC Supply and Power Ground.
4. Additional cooling and/or heatsink may be required to achieve rated performance.

ENX 10 EASY

ENX 10 EASY

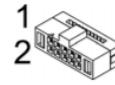


Figure 14 ENX 10 EASY – Cable Plug

Pin	Color	Signal	Description
1	rot	do not connect	—
2	gray	V _{CC}	Power supply voltage
3	gray	GND	Ground
4	gray	do not connect	—
5	gray	ChA/	Channel A complement
6	gray	ChA	Channel A
7	gray	ChB/	Channel B complement
8	gray	ChB	Channel B
9	gray	ChI/	Channel I (index) complement
10	gray	ChI	Channel I (Index)