



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

Διπλωματική Εργασία

**Κινηματικός έλεγχος εξάποδου ρομπότ για μέγιστη ευστάθεια με
χρήση του κριτηρίου FASM**

**Kinematic control of a hexapod robot for stability based on the
FASM criterion**

Χαράλαμπος Κάλφας

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2021

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται ο κινηματικός έλεγχος εξάποδου ρομπότ για μέγιστη ευστάθεια κίνησης. Η μέγιστη ευστάθεια καθορίζεται με χρήση του κριτηρίου Force Angle Stability Margin.

Αρχικά περιγράφεται αναλυτικά η μοντελοποίηση εξάποδου ρομπότ στο περιβάλλον Solidworks 2017. Αναλύονται τα διαφορετικά μέρη του εξάποδου ρομπότ, εξετάζεται ο τρόπος συναρμολόγησης τους και η τροποποίηση του τελικού μοντέλου που χρησιμοποιείται στη μελέτη της παρούσας εργασίας.

Στην συνέχεια περιγράφεται η εισαγωγή του μοντελοποιημένου εξάποδου ρομπότ στο περιβάλλον δυναμικών προσομοιώσεων Adams MSC. Ορίζονται οι σύνδεσμοι και οι αρθρώσεις του εξάποδου ρομπότ, οι αισθητήρες δύναμης στα πέλματα του καθώς και οι παράμετροι που καθορίζουν την κίνηση του. Γίνεται επίσης σύντομη μελέτη της προσομοίωσης της δύναμης επαφής του εδάφους με χρήση μοντέλου ελατηρίου-αποσβεστήρα.

Ακολουθεί η ευθεία κινηματική ανάλυση του εξάποδου ρομπότ, για την εύρεση του χώρου εργασίας των ποδιών του. Στην συνέχεια πραγματοποιείται απεικόνιση της τροχιάς των πελμάτων από τον Καρτεσιανό χώρο στον χώρο των αρθρώσεων, μέσω της αντίστροφης κινηματικής ανάλυσης, και δίνονται οι εξισώσεις τροχιάς των πελμάτων για κάθε τρόπο βηματισμού.

Επιπλέον γίνεται ανάλυση του κριτηρίου Force Angle Stability Margin, αναλύονται οι εξισώσεις που οδηγούν στον υπολογισμό του, εφαρμόζεται στα δεδομένα του εξάποδου ρομπότ, και παρουσιάζεται ο αλγόριθμος επιλογής ποδιών για τον υπολογισμό του κριτηρίου.

Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για την ευστάθεια του εξάποδου ρομπότ για τους 3 διαφορετικούς βηματισμούς καθώς και προτάσεις για μελλοντική εργασία.

Abstract

The current thesis comprises the kinematic control of a hexapod robot for maximizing movement stability. Stability is determined with the application of the Force Angle Stability Margin.

The hexapod robot is modeled in the Solidworks 2017 CAD environment. Analysis, design and construction of the different parts is presented.

The hexapod model is imported in the dynamic simulation environment Adams MSC for further study. The links and joints of each leg are determined, force sensors are attached to each leg of the robot, and the variables for communicating with Matlab/Simulink environment are extracted. A short analysis of the ελατηρίου-αποσβεστήρα contact model of Adams MSC is also provided.

Forward kinematic analysis is then executed, for finding the task space of each robot's leg. Additionally each trajectory is translated from Cartesian to joint space through the computation of Inverse Kinematics for each leg, and each gait trajectory is thoroughly analyzed.

Moreover, a theoretical analysis of the Force Angle Stability Margin is presented and the results are applied to the hexapod robot.

The results and conclusions of applying the FASM criterion to each gait are provided. Additional future work is proposed.

*Στην οικογένεια μου,
την Κωνσταντίνα,
και τον Πίκο!*

Ευχαριστίες

Να ευχαριστήσω σε αυτό το σημείο τα παιδιά του εργαστηρίου Control System Lab για τις άμεσες απαντήσεις τους σε ερωτήματα μου. Επίσης ευχαριστίες στους Γ. Μπέρτο, Κ. Νάνο και Ι. Ροδίτη για τον χρόνο που αφιέρωσαν για συζητήσεις σχετικά με το project.

Τέλος θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Παπαδόπουλο, για την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Ευχαριστίες	6
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων	15
Κατάλογος Συντμήσεων	16
1 Εισαγωγή	17
1.1 Σκοπός της παρούσας εργασίας	17
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	19
1.3 Δομή εργασίας	22
2 Μοντελοποίηση εξάποδου ρομπότ	24
2.1 Εισαγωγή	24
2.2 Το εξάποδο Phantom X Hexapod Mark 2	24
2.3 Μοντελοποίηση στο περιβάλλον Solidworks	25
2.3.1 Συναρμολόγηση Torso	27
2.3.2 Συναρμολόγηση ποδιού	27
2.3.3 Συναρμολόγηση εξαπόδου	32
2.3.4 Phantom X Hexapod	33
3 Εισαγωγή στο περιβάλλον Adams MSC	36
3.1 Εισαγωγή του μοντέλου στο Adams MSC	36
3.2 Αρίθμηση ποδιών	38
3.3 Δημιουργία αρθρώσεων	38
3.4 Δυνάμεις επαφών	41
3.5 Εφαρμογή αισθητήρων	45
3.5.1 Μέτρηση δυνάμεων επαφής	45
3.5.2 Μέτρηση αποστάσεων	48
3.6 Εισαγωγή Adams Plant στο Simulink	51
4 Κινηματική ανάλυση εξάποδου ρομπότ	53

4.1	Εισαγωγή.....	53
4.2	Παραδοχές.....	53
4.3	Το ευθύ κινηματικό πρόβλημα	54
4.4	Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα	58
4.5	Βηματισμός κίνησης εξάποδου ρομπότ	60
4.5.1	Tripod gait.....	61
4.5.2	Tetrapod gait.....	61
4.5.3	Pentapod gait.....	62
4.6	Τροχιά πέλματος	62
4.6.1	Παραμετροποίηση τροχιάς	62
4.6.2	Αλγοριθμική υλοποίηση τροχιάς	64
4.6.3	Επιλογή Mode και Leg Sequence.....	67
4.6.4	Το διάνυσμα χρόνου	67
4.6.5	Tripod Gait Trajectory	68
4.6.6	Tetrapod gait trajectory.....	75
4.6.7	Pentapod gait Trajectory.....	79
4.6.8	Διάγραμμα ροής κίνησης του εξάποδου ρομπότ.	85
4.7	Επίδραση πλάτους βηματισμού.....	90
4.8	Leg Sequences.....	92
5	Το κριτήριο Force Angle Stability Margin	93
5.1	Θεωρητική εισαγωγή	93
5.2	Εφαρμογή FASM στο εξάποδο ρομπότ.....	96
5.3	Αρίθμηση πελμάτων για εφαρμογή κριτηρίου FASM	98
5.4	Διάγραμμα ροής αλγορίθμου FASM	99
6	Αποτελέσματα	103
6.1	Stance Mode	103
6.2	Tripod Gait.....	105
6.3	Tetrapod Gait.....	107
6.4	Pentapod Gait.....	109

7 Μελλοντική εργασία	111
Βιβλιογραφία	112
Παράρτημα Α.....	113
Παράρτημα Β.....	115
Παράρτημα Γ	121
Παράρτημα Δ.....	123

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1.	Πόδι εξάποδου ρομπότ.....	18
Σχήμα 1-2.	Κατηγοριοποιήσεις των εξάποδων ρομπότ [3]	18
Σχήμα 1-3.	Phantom X Hexapod Mark 2 της Trossen Robotics.....	19
Σχήμα 1-4.	Elekit Robot.	20
Σχήμα 1-5.	Mantis Hexapod Robot.	20
Σχήμα 1-6.	HexaTerra Robot (NTUA).	20
Σχήμα 1-7.	Hexapod walking robot in CAR lab (CSIC-UPM).	21
Σχήμα 1-8.	Blade Bug.	21
Σχήμα 1-9.	Ρομπότ ATHLETE.	22
Σχήμα 2-1.	Αρχική διάταξη σερβοκινητήρα AX-12.	25
Σχήμα 2-2.	Αφαιρούμενα τμήματα σερβοκινητήρα.....	26
Σχήμα 2-3.	Τελική μορφή σερβοκινητήρα	26
Σχήμα 2-4.	Torso.....	27
Σχήμα 2-5.	Gripart. Η επιφάνεια Α φαίνεται με σκούρο μπλε χρώμα στα αριστερά.	28
Σχήμα 2-6.	Ένωση των 2 grip (1 και 2) σε ένα κομμάτι.....	29
Σχήμα 2-7.	Επιφάνεια Δ και η περίμετρος Β στο εξάρτημα grip1.....	29
Σχήμα 2-8.	Επιφάνεια Ε και η περίμετρος Γ στο εξάρτημα aksonas1.....	30
Σχήμα 2-9.	Coxa part.	30
Σχήμα 2-10.	Femur Part.....	31
Σχήμα 2-11.	Tibia part.....	31
Σχήμα 2-12.	Τελική μορφή ποδιού με χρώματα που αντιστοιχούν σε: coxa (σκούρο μπλε), femur (κόκκινο), tibia (πράσινο).....	32
Σχήμα 2-13.	Σύνδεση επιφανειών 1 και 2.	33
Σχήμα 2-14.	Σύνδεση περιμέτρων 1 και 2.....	33
Σχήμα 2-15.	Phantom X hexapod Mark 2 μοντελοποιημένο στο Solidworks 2017.....	33
Σχήμα 2-16.	Παραλληλισμός bottom body plate με rubber feet.	34
Σχήμα 2-17.	Παραλληλισμός τριάδων.	34
Σχήμα 3-1.	Εισαγωγή μοντέλου.	36

Σχήμα 3-2.	Εισαγωγή parasolid μοντέλου στο Adams.....	36
Σχήμα 3-3.	Τμήμα tibia1 σε περιβάλλον Adams.	37
Σχήμα 3-4.	Διάλογος διαμόρφωσης.	37
Σχήμα 3-5.	Αρίθμηση ποδιών.	38
Σχήμα 3-6.	Δημιουργία στροφικής άρθρωσης.....	39
Σχήμα 3-7.	Δημιουργία αρθρώσεων στο Adams.....	39
Σχήμα 3-8.	Συστήματα αναφοράς.	40
Σχήμα 3-9.	Αρίθμηση των σερβοκινητήρων.	40
Σχήμα 3-10.	Διάλογος contact.....	42
Σχήμα 3-11.	Το μοντέλο spring damper.....	43
Σχήμα 3-12.	Σύστημα Αναφοράς στο πέλμα του ποδιού.	46
Σχήμα 3-13.	x συνιστώσα της κάθετης δύναμης.	47
Σχήμα 3-14.	y συνιστώσα της κάθετης δύναμης.	47
Σχήμα 3-15.	z συνιστώσα της κάθετης δύναμης.	48
Σχήμα 3-16.	Συντεταγμένες κέντρου μάζας.....	49
Σχήμα 3-17.	Menu δημιουργίας του plant.	51
Σχήμα 3-18.	Adams Plant στο Περιβάλλον Simulink.....	52
Σχήμα 4-1.	Συστήματα παγκόσμιων συντεταγμένων και κέντρου μάζας	53
Σχήμα 4-2.	Η μεθοδολογία Denavit Hartenberg [12]	54
Σχήμα 4-3.	Συστήματα αναφοράς κατά DH.....	56
Σχήμα 4-4.	Χώρος εργασίας ποδιού σε xy επίπεδο (κάτοψη).....	57
Σχήμα 4-5.	Χώρος εργασίας ποδιού σε xyz χώρο (πλάγια όψη).	57
Σχήμα 4-6.	Κάτοψη ενός ποδιού στο επίπεδο xy.....	58
Σχήμα 4-7.	Το πόδι του εξάποδου ρομπότ στο επίπεδο yz.	59
Σχήμα 4-8.	Leg Block για παραγωγή τροχιάς	64
Σχήμα 4-9.	Ελλειπτική τροχιά στον τρισδιάστατο χώρο.	66
Σχήμα 4-10.	Ελλειπτική τροχιά στο επίπεδο xz.	66
Σχήμα 4-11.	x συντεταγμένη του πέλματος.....	69
Σχήμα 4-12.	y συντεταγμένη του πέλματος.....	69

Σχήμα 4-13.	z συντεταγμένη του πέλματος.....	69
Σχήμα 4-14.	x συντεταγμένη του πέλματος για τις δυο φάσεις της κίνησης.....	71
Σχήμα 4-15.	y συντεταγμένη του πέλματος για τις δυο φάσεις της κίνησης.....	71
Σχήμα 4-16.	z συντεταγμένη του πέλματος για τις δυο φάσεις της κίνησης.....	71
Σχήμα 4-17.	x συντεταγμένη των δυο τριάδων.....	72
Σχήμα 4-18.	y συντεταγμένη των δυο τριάδων.....	73
Σχήμα 4-19.	z συντεταγμένη των δυο τριάδων.....	73
Σχήμα 4-20.	x συντεταγμένες τρίποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).....	74
Σχήμα 4-21.	y συντεταγμένες τρίποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).....	74
Σχήμα 4-22.	z συντεταγμένες τρίποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).....	75
Σχήμα 4-23.	x συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού.....	77
Σχήμα 4-24.	z συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού.....	78
Σχήμα 4-25.	y συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού.....	78
Σχήμα 4-26.	x συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).....	78
Σχήμα 4-27.	y συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).....	79
Σχήμα 4-28.	z συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).....	79
Σχήμα 4-29.	x συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού.....	83
Σχήμα 4-30.	y συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού.....	83
Σχήμα 4-31.	z συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού.....	84
Σχήμα 4-32.	x συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).....	84
Σχήμα 4-33.	y συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).....	84
Σχήμα 4-34.	z συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).....	85
Σχήμα 4-35.	Διάγραμμα ροής παραγωγής τροχιάς ποδιού.....	85
Σχήμα 4-36.	Τιμές πρώτη στροφικής άρθρωσης για τρίποδο βηματισμό.....	86
Σχήμα 4-37.	Τιμές δεύτερης στροφικής άρθρωσης για τρίποδο βηματισμό.....	86
Σχήμα 4-38.	Τιμές τρίτης στροφικής άρθρωσης για τρίποδο βηματισμό.....	87
Σχήμα 4-39.	Τιμές πρώτης στροφικής άρθρωσης για τετράποδο βηματισμό.....	87
Σχήμα 4-40.	Τιμές δεύτερης στροφικής άρθρωσης για τετράποδο βηματισμό.....	88
Σχήμα 4-41.	Τιμές τρίτης στροφικής άρθρωσης για τετράποδο βηματισμό.....	88

Σχήμα 4-42.	Γωνίες πρώτης στροφικής άρθρωσης για πεντάποδο βηματισμό.	89
Σχήμα 4-43.	Γωνίες δεύτερης στροφικής άρθρωσης για πεντάποδο βηματισμό.	89
Σχήμα 4-44.	Γωνίες τρίτης στροφικής άρθρωσης για πεντάποδο βηματισμό.	89
Σχήμα 4-45.	Τιμές γωνιακών αρθρώσεων (femur-tibia) για πλάτος βηματισμού $a=0.006$	90
Σχήμα 4-46.	Τιμές γωνιακών αρθρώσεων (coxa-femur) για πλάτος βηματισμού $a=0.006$	91
Σχήμα 4-47.	Τιμές γωνιακών αρθρώσεων (coxa-femur) για πλάτος βηματισμού $a=0.02$. .	91
Σχήμα 4-48.	Τιμές γωνιακών αρθρώσεων (femur-tibia) για πλάτος βηματισμού $a=0.02$. .	91
Σχήμα 5-1.	Το κριτήριο FASM σε τρισδιάστατη εφαρμογή.....	94
Σχήμα 5-2.	Μεταβλητές υπολογισμού FASM για τα πόδια 1 και 2.....	97
Σχήμα 5-3.	Γωνίες διανυσμάτων ρ_i ως προς τον άξονα x	98
Σχήμα 5-4.	Διαγραμμα ροής υπολογισμού κριτηρίου FASM.....	102
Σχήμα 6-1.	Τιμή κριτηρίου για επίπεδο έδαφος χωρίς κλίση.....	104
Σχήμα 6-2.	Τιμή κριτηρίου για μεταβαλλόμενη κλίση εδάφους.	104
Σχήμα 6-3.	Τιμή κριτηρίου FASM για τρίποδο βηματισμό σε έδαφος χωρίς κλίση για διάρκεια 1 s.....	105
Σχήμα 6-4.	Τιμή κριτηρίου για τρίποδο βηματισμό σε έδαφος με κλίση.....	106
Σχήμα 6-5.	Ανατροπή τρίποδου βηματισμού στις 25°	106
Σχήμα 6-6.	Στιγμιότυπο για τρίποδο βηματισμό σε έδαφος με κλίση με ρομπότ ευσταθές.....	107
Σχήμα 6-7.	Στιγμιότυπο τρίποδου βηματισμού σε έδαφος με κλίση με ρομπότ σε κατάσταση αστάθειας.....	107
Σχήμα 6-8.	Τιμή κριτηρίου FASM για τετράποδο βηματισμό σε έδαφος χωρίς κλίση για διάρκεια 1.5 s.....	108
Σχήμα 6-9.	Τιμή κριτηρίου για τετράποδο βηματισμό σε έδαφος με κλίση.....	108
Σχήμα 6-10.	Ανατροπή τετράποδου βηματισμού στις 28°	109
Σχήμα 6-11.	Τιμή κριτηρίου FASM για πεντάποδο βηματισμό σε έδαφος χωρίς κλίση για διάρκεια 3 s.....	109
Σχήμα 6-12.	Τιμή κριτηρίου για πεντάποδο βηματισμό σε έδαφος με κλίση.....	110
Σχήμα 6-13.	Ανατροπή πεντάποδου βηματισμού στις 42°	110

Σχήμα Β-1.	Τοποθέτηση στροφικού συνδέσμου στην πλατφόρμα κίνησης	115
Σχήμα Β-2.	Αλγόριθμος μεταβολής κλίσης εδάφους	115
Σχήμα Γ-1.	Δύναμη και προκληθείσα ροπή	121
Σχήμα Γ-2.	Section ελέγχου legSequence, mode και ελλειπτικού trajectory.....	121

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Ανάλυση βάρους Phantom X Hexapod.	24
Πίνακας 2-2. Torso.....	27
Πίνακας 2-3. Coxa.	28
Πίνακας 2-4. Femur.	30
Πίνακας 2-5. Tibia.	31
Πίνακας 3-1. Αρίθμηση ποδιών.	38
Πίνακας 3-2. Αρίθμηση των σερβοκινητήρων.....	41
Πίνακας 3-3. Αποτελέσματα πειραματικών εφαρμογών για contact forces.	44
Πίνακας 3-4. Συντελεστές Coulomb friction.	44
Πίνακας 3-5. Δυνάμεις επαφής.	44
Πίνακας 3-6. Markers σε κάθε πόδι.	46
Πίνακας 3-7. Συντεταγμένες των πελμάτων ως προς το κέντρο μάζας.	49
Πίνακας 4-1. Πίνακας μεταβλητών DH.....	55
Πίνακας 4-2. Τιμές offset.....	56
Πίνακας 4-3. Χρόνοι ανύψωσης και στήριξης για τα διαφορετικά gaits.	61
Πίνακας 4-4. Φάσεις κίνησης Tripod Gait.	61
Πίνακας 4-5. Φάσεις κίνησης Tetrapod Gait.	61
Πίνακας 4-6. Φάσεις κίνησης Pentapod Gait.	62
Πίνακας 4-7. Αριθμός επαναλήψεων για κάθε gait.	67
Πίνακας 5-1. Μεταβλητές του κριτηρίου β	97
Πίνακας 5-2. Γωνίες διανυσμάτων p με άξονα x	98
Πίνακας 5-3. Γωνίες πελμάτων των ποδιών ως προς τον άξονα x	99
Πίνακας 5-4. Ανακατάταξη των ποδιών clockwise.....	99
Πίνακας 6-1. Contact force variables για την προσομοίωση.....	103
Πίνακας 6-2. Βέλτιστες κλίσεις εδάφους.	110
Πίνακας Γ-1. Συντελεστές τριβής	121
Πίνακας Δ-1. Συνδυασμοί τριάδων για τρίποδο βηματισμό.....	123
Πίνακας Δ-2. Συνδυασμοί ζευγαριών για τετράποδο βηματισμό.....	123

Κατάλογος Συντμήσεων

FASM	Force Angle Stability Margin
3R	3 revolute joints (3 στροφικοί σύνδεσμοι)
DH	Denavit Hartenberg
IK	Inverse Kinematics (αντίστροφη κινηματική)
FK	Forwards Kinematics (ευθεία κινηματική)
lt	length tibia
lf	length femur
lc	length coxa

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της παρούσας εργασίας

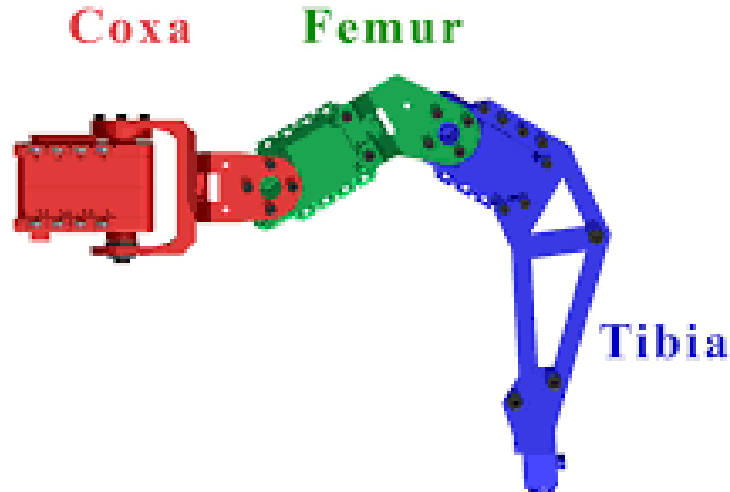
Οι αυξανόμενες ανάγκες για αυτόματη πλοήγηση σε διαφόρων ειδών εδάφη και επιφάνειες, έχουν αναδείξει τα τελευταία χρόνια την τεχνολογία των εξάποδων ρομπότ. Γενικά τα οχήματα με πόδια κερδίζουν έδαφος έναντι των ήδη καθιερωμένων οχημάτων με τροχούς.

Ο κύριος λόγος που έχει αυξηθεί η τάση για μελέτη των οχημάτων με πόδια είναι η προσαρμοστικότητα και η ευστάθεια σε ανώμαλες επιφάνειες και γενικά σε εδάφη με εμπόδια ή μεγάλες κλίσεις.

Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι ρομπότ με 4 ή και περισσότερα πόδια, μπορούν να μετακινηθούν ευκολότερα στις παραπάνω επιφάνειες. Τα ρομπότ με πόδια αποφεύγουν κινδύνους ανατροπής ή ολίσθησης σε περιπτώσεις όπου η χρήση τροχήλατων οχημάτων καθίσταται πρακτικά αδύνατη. Τα ρομπότ με πόδια μπορούν να προσαρμόσουν την εκάστοτε τροχιά των άκρων τους καθώς και το γεωμετρικό σχήμα τους έτσι ώστε να μπορούν να αποφεύγουν εμπόδια που βρίσκονται στην πορεία τους. Επιπλέον μπορούν περνώντας κοντά από τα εμπόδια είτε πάνω από αυτά, να ακολουθήσουν μια πιο ασφαλή πορεία προκειμένου να φτάσουν στον προορισμό τους. Αντιθέτως τα τροχήλατα οχήματα δεν παρουσιάζουν τις ίδιες δυνατότητες χωρίς κινδύνους.

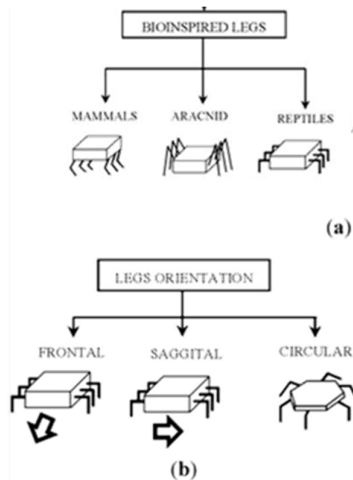
Πηγή έμπνευσης για την κατασκευή τέτοιων ρομπότ, είναι η ίδια η φύση. Κλάδοι όπως η βιομηχανική και η βιοφυσική βρίσκουν πρόσφορο έδαφος στην μελέτη και την κατασκευή τέτοιων ρομπότ. Ασπαζόμενος τους κανόνες και τα αξιώματα της φύσης, και μελετώντας τα ζώα και κυρίως τα έντομα, ο κλάδος της ρομποτικής σημείωσε αλματώδη ανάπτυξη στην κατασκευή ρομπότ με πόδια, ικανά για πλοήγηση σε δύσβατες επιφάνειες, ακόμα και αναρρίχηση σε σχεδόν κάθετες επιφάνειες.

Η μορφή των εξάποδων ρομπότ αποτελείται μακροσκοπικά από έξι πόδια συνδεδεμένα με το κύριο σώμα με στροφικούς συνδέσμους. Το κάθε πόδι ξεχωριστά αποτελείται από τρία τμήματα συνδεδεμένα με έναν στροφικό σύνδεσμο ανάμεσα τους αντίστοιχα. Τα τρία τμήματα του ποδιού έχουν τις ονομασίες coxa (coxalbone / κοχάλικο οστό), femur (μηριαίο οστό) και tibia (οστό κνήμης). Η γενική συνδεσμολογία φαίνεται στο Σχήμα 1-1 και είναι αυτή που θα ακολουθηθεί και στην έρευνα τις παρούσας εργασίας.



Σχήμα 1-1. Πόδι εξάποδου ρομπότ.

Για την κατηγορία των εξάποδων ρομπότ υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που διαμορφώνουν το τελικό σχήμα τους και την θέση των ποδιών τους και κατά συνέπεια τον τρόπο με τον οποίο θα κινούνται στα διαφορετικά εδάφη. Κατηγοριοποιήσεις των εξάποδων ρομπότ περιλαμβάνουν θηλαστικά, ερπετά και αραχνοειδή (Σχήμα 1-2) και διαχωρίζονται ανάλογα με την τοπολογία των αρθρώσεων στα μεμονωμένα πόδια και την τοπολογία των ίδιων των ποδιών σε σχέση με το κύριο σώμα [3] .



Σχήμα 1-2. Κατηγοριοποιήσεις των εξάποδων ρομπότ [3] .

Διαφορετικοί σχηματισμοί των εξάποδων ρομπότ προκύπτουν με βάση τις γωνίες των πρώτων στροφικών αρθρώσεων του κάθε ποδιού με το κύριο σώμα (coxa-torso). Η μεταβολή του σχήματος της επιφάνειας που σχηματίζουν τα άκρα του ρομπότ με το έδαφος (support polygon) έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του τρόπου πλοήγησης και της ευστάθειας του ρομπότ.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η κινηματική μελέτη εξάποδο ρομπότ και η εφαρμογή κριτηρίου ευστάθειας, προκειμένου το ρομπότ να κινείται με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ευστάθεια σε διαφορετικές κλίσεις επίπεδων επιφανειών χωρίς να ανατρέπεται. Για τον σκοπό αυτό γίνεται εφαρμογή του κριτηρίου Force Angle Stability Margin (FASM) [1]. Ο υπολογισμός εκτελείται με βάση την δύναμη αισθητήρων που φέρει το εξάποδο ρομπότ στα πόδια του. Η εφαρμογή του κριτηρίου FASM οδηγεί στον υπολογισμό της ευστάθειας του ρομπότ με χρήση των αισθητήρων δύναμης χωρίς να απαιτείται κάποιο άλλο hardware. Το εξάποδο που χρησιμοποιείται στην εργασία είναι το Phantom X Hexapod Mark 2, της Trossen Robotics (Σχήμα 1-3).



Σχήμα 1-3. Phantom X Hexapod Mark 2 της Trossen Robotics.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Εξάποδα ρομπότ χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές, στη βιομηχανία παιχνιδιών κ.α. Το μέγεθος και ο τρόπος κατασκευής τους ποικίλουν ανάλογα με την χρήση τους. Μπορούν να μετρώνται σε μερικά εκατοστά και μικρό βάρος, όπως το εξάποδο ρομπότ παιχνίδι Elekit που φαίνεται στο Σχήμα 1-4. Σε άλλες περιπτώσεις μπορούν να έχουν μεγαλύτερο μέγεθος και να ζυγίζουν μερικούς τόνους, όπως το εξάποδο ρομπότ Mantis (Σχήμα 1-5). Το Mantis έχει την δυνατότητα μεταφοράς ανθρώπων όπως και το ρομπότ Hexa Terra Robot (NTUA) (Σχήμα 1-6) το οποίο χρησιμοποιείται για υποβρύχιες αποστολές [2].



Σχήμα 1-4. Elekit Robot.



Σχήμα 1-5. Mantis Hexapod Robot.



Σχήμα 1-6. HexaTerra Robot (NTUA).

Μεγάλη ποικιλία παρουσιάζεται επίσης και στον τρόπο κατασκευής των μεμονωμένων ποδιών των εξάποδων ρομπότ. Η γενική αρχή που ακολουθείται για την κατασκευή των ποδιών χρησιμοποιεί τρεις στροφικές αρθρώσεις (revolute joints) για την ένωση των επιμέρους συνδέσμων που αποτελούν το κάθε πόδι, τόσο μεταξύ τους, όσο και με το κύριο σώμα του ρομπότ [3] .

Παρόλα αυτά όμως μελέτες έχουν γίνει και με διαφορετική λογική κατασκευής ποδιού, όπως το ρομπότ (CSIC-UPM)) το οποίο χρησιμοποιεί δύο στροφικές και μία πρισματική άρθρωση για τη σύνθεση του ποδιού (Σχήμα 1-7).



Σχήμα 1-7. Hexapod walking robot in CAR lab (CSIC-UPM).

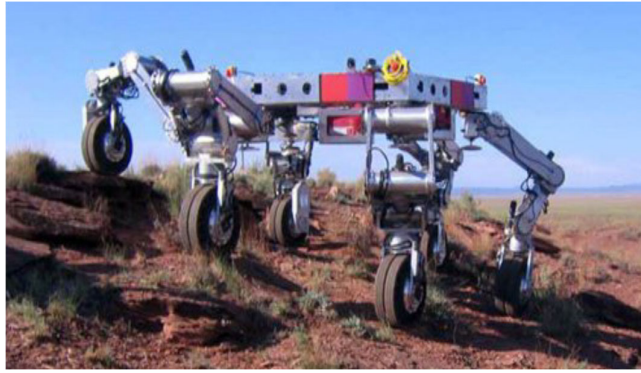
Σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφόρων εξάποδων ρομπότ που υπάρχουν στο εμπόριο, παρατηρούνται επίσης και στους αισθητήρες ή ακόμα και στην μορφή του άκρου του κάθε ποδιού. Συνήθεις αισθητήρες είναι:

- τα επιταχυνσιόμετρα που φέρουν τα εξάποδα ρομπότ στο κύριο σώμα τους, με σκοπό την προσαρμογή τους στις διάφορες κλίσεις του εδάφους,
- οι κάμερες για αναγνώριση του εδάφους και υπολογισμό της πορείας του ίδιου του ρομπότ προς αποφυγή εμποδίων και
- οι αισθητήρες δύναμης οι οποίοι μετρούν τις δυνάμεις στα πόδια του ρομπότ.

Σε αρκετές εφαρμογές τα άκρα των ρομπότ φέρουν ειδικές κατασκευές βασισμένες σε πνευματικά έμβολα που τους επιτρέπουν την αναρρίχηση σε κάθετες και πολλές φορές λείες επιφάνειες όπως τα ρομπότ Blade Bug (Σχήμα 1-8) που χρησιμοποιείται για συντήρηση και καθαρισμό ανεμογεννητριών. Ακόμα υπάρχουν ρομπότ με τροχούς εφαρμοσμένους στα άκρα των ποδιών, για ταχύτερη πλοήγηση σε επίπεδες επιφάνειες όπως το ρομπότ ATHLETE (Σχήμα 1-9).



Σχήμα 1-8. Blade Bug.



Σχήμα 1-9. Ρομπότ ATHLETE.

Παρά το γεγονός ότι τα εξάποδα ρομπότ υπερτερούν στο θέμα της ευστάθειας σε σχέση με τροχήλατα οχήματα ή ρομπότ με λιγότερα πόδια, υπάρχει κάποιο όριο αυτής της ευστάθειας. Η ικανότητα τους να προσαρμόζονται στα διαφορετικά εδάφη και ταχύτητες στις οποίες καλούνται να πλοηγηθούν, οφείλεται στον αριθμό και στον κατάλληλο συνδυασμό των ποδιών που μπορούν να χρησιμοποιήσουν [4]. Ανάλογα με το πλήθος και τον συνδυασμό αυτόν, η αντίστοιχη ευστάθεια του ρομπότ αυξάνεται ή μειώνεται προς χρέος ή όφελος αντίστοιχα της ταχύτητας με την οποία μπορεί να μετακινηθεί το εξάποδο ρομπότ.

1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση του ρομπότ Phantom X Hexapod Mark 2 στο περιβάλλον Solidworks 2017. Το μοντέλο στην συνέχεια εισάγεται στην πλατφόρμα δυναμικών προσομοιώσεων Adams MSC 2018, όπου και προγραμματίζεται σε συνεργασία με το περιβάλλον Matlab/Simulink.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία μοντελοποίησης του ρομπότ στο περιβάλλον Solidworks 2017, η ένωση των διαφορετικών τμημάτων του και η τοποθέτηση του ρομπότ στην αρχική του θέση με γεωμετρία τύπου reptile (Σχήμα 1-2).

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία εισαγωγής του μοντέλου στο περιβάλλον Adams MSC 2018, η απόδοση μαζών στα διαφορετικά τμήματα, η κατασκευή της πλατφόρμας στην οποία θα πλοηγείται το εξάποδο, καθώς και η τοποθέτηση συστημάτων αναφοράς και συνδέσμων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η κινηματική ανάλυση του εξάποδου ρομπότ και παρουσιάζεται η αλγοριθμική υλοποίησή τους. Επιλύεται το πρόβλημα της ευθείας και αντίστροφης κινηματικής για ένα από τα έξι πόδια του ρομπότ, αναλύονται τα διαφορετικά gaits τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει κάθε φορά το εξάποδο και υπολογίζονται τα τροχιακά των άκρων του ποδιού προκειμένου αυτό να κινηθεί στο επίπεδο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται το κριτήριο ευστάθειας Force Angle Stability Margin FASM στο εξάποδο ρομπότ και η αλγοριθμική υλοποίησή του.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής.

2 Μοντελοποίηση εξάποδου ρομπότ

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το εξάποδο ρομπότ το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση, καθώς και η μοντελοποίηση του στο περιβάλλον Solidworks 2017. Συγκεκριμένα αποσυναρμολογούνται τα επιμέρους τμήματα του εξάποδου ρομπότ, αφαιρούνται περιττά μέρη και επανασυναρμολογούνται στο τελικό μοντέλο προσομοίωσης.

2.2 Το εξάποδο Phantom X Hexapod Mark 2

Πρόκειται για την βελτιωμένη έκδοση του εξάποδου ρομπότ Phantom X Hexapod η οποία φέρει τους σερβοκινητήρες AX-12. Το συγκεκριμένο εξάποδο ρομπότ [5] προορίζεται τόσο για την βιομηχανία παιχνιδιών όσο και για έρευνα, καθώς ο τρόπος κατασκευής και προγραμματισμού, το καθιστούν πλήρως τροποποιήσιμο.

Το εξάποδο ρομπότ διαθέτει 18 σερβοκινητήρες τύπου AX-12, ενώ ολόκληρο το σώμα του έχει βάρος 2.095 kg. Το κάθε ένα από τα 6 πόδια αποτελείται από 3 διαφορετικά τμήματα με διαφορετικά μήκη, συνδεδεμένα τόσο μεταξύ τους, όσο και με το κύριο σώμα του ρομπότ με τρεις σερβοκινητήρες (3 στροφικές αρθρώσεις). Το κάθε τμήμα του ποδιού περιγράφεται ανάλογα με το joint το οποίο είναι συνδεδεμένο πάνω σε αυτό. Η ορολογία που χρησιμοποιείται είναι εκείνη που περιγράφεται στην εισαγωγή (Σχήμα 1-1), και δείχνει στο εξάποδο ρομπότ τις αντίστοιχες ορολογίες για της αρθρώσεις ως coxa, femur, tibia.

Για μια ακριβή μοντελοποίηση του εξάποδου ρομπότ, αποσυναρμολογήθηκε στα αρχικά του κομμάτια, ώστε αυτά να ζυγιστούν και να μετρηθεί το βάρος του κάθε τμήματος ξεχωριστά. Ο Πίνακας 2-1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων τα οποία έγιναν με ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας.

Πίνακας 2-1. Ανάλυση βάρους Phantom X Hexapod.

Τμήμα	Βάρος μονάδας	Ποσότητα	Σύνολο
AX-12A servo	55g	18	990g
Li Po Battery	188g	1	188g
Upper Plastic Torso	63g	1	63g
Lower Plastic Torso	63g	1	63g
ArbotixM + Xbee Modules	32g	1	32g
Connection Cables	2g	25	50g
Plastics and Bolts	-	-	773g
Total Mass	-	1	2095g

2.3 Μοντελοποίηση στο περιβάλλον Solidworks

Η μοντελοποίηση του ρομπότ Phantom X Hexarod, υλοποιήθηκε στο περιβάλλον Solidworks 2017. Η τελική μορφή του εξάποδου ρομπότ προέκυψε από τη συνένωση των διαφορετικών τμημάτων του, και έγινε με μεγάλη ακρίβεια για τη διατήρηση της πιστότητας του μοντέλου.

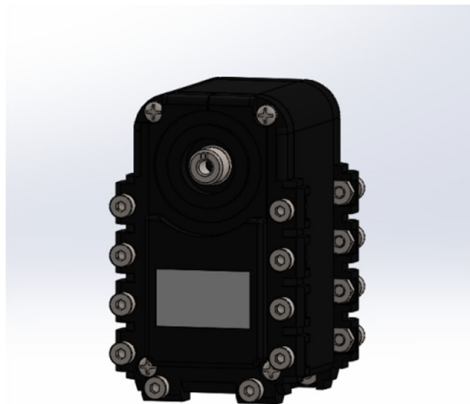
Στην παρούσα εργασία τα στοιχεία που αποτελούν το ρομπότ και περιγράφηκαν στην εισαγωγή (coxa-femur-tibia-torso) θα αναφέρονται στο εξής ως τμήματα του ρομπότ, ενώ τα αντίστοιχα υποστοιχεία που συνθέτουν τα τμήματα αυτά, θα αναφέρονται ως εξαρτήματα του ρομπότ (grips, plastic support κα). Το ρομπότ που προκύπτει από την μοντελοποίηση, το οποίο θα εξαχθεί για προσομοίωση θα αναφέρεται ως μοντέλο του ρομπότ.

Τα εξαρτήματα του μοντέλου του ρομπότ που χρησιμοποιήθηκαν βρέθηκαν από την ιστοσελίδα Grabcad [6] .

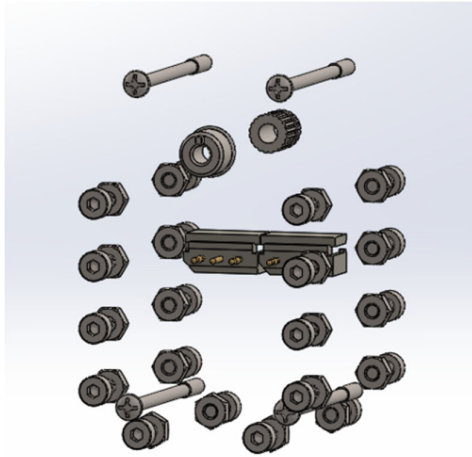
Για την ακριβή απεικόνιση χρειάστηκε η αποσυναρμολόγηση του μοντέλου και η επασυναρμολόγηση του. Λόγω σφαλμάτων διάφορων εξαρτημάτων (βίδες με λανθασμένο shell), και υπερβολικών λεπτομερειών σχεδιασμού των εξαρτημάτων (βίδες, spacers, decals, καλλωπιστικά στοιχεία, κα), η μετέπειτα επεξεργασία τους στο περιβάλλον προσομοίωσης επιβάρυνε αρκετά το υπολογιστικό σύστημα. Η αφαίρεση αυτή δεν επηρεάζει σε καμία περίπτωση τη διαδικασία προσομοίωσης.

Κατά την επασυναρμολόγηση, τα επιμέρους εξαρτήματα του ρομπότ επεξεργάστηκαν ξεχωριστά, αφαιρέθηκαν περιττά στοιχεία, ενώ οι μάζες και ιδιότητες των περιπτώσεων αυτών εξαρτημάτων, υπολογίστηκαν στο τελικό μοντέλο.

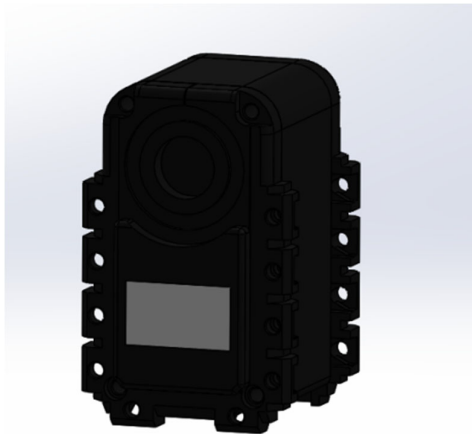
Για παράδειγμα, ένας σερβοκινητήρας, από τους δεκαοχτώ που φέρει το εξάποδο, φαίνεται στο Σχήμα 2-1 στην αρχική του μορφή, ενώ μετά από τις αφαιρέσεις περιττών εξαρτημάτων (Σχήμα 2-2), η τελική μορφή είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-1. Αρχική διάταξη σερβοκινητήρα AX-12.



Σχήμα 2-2. Αφαιρούμενα τμήματα σερβοκινητήρα



Σχήμα 2-3. Τελική μορφή σερβοκινητήρα

Με τον ίδιο τρόπο αφαιρούνται περιττά εξαρτήματα και από τα υπόλοιπα τμήματα του εξαπόδου ρομπότ. Για την δημιουργία του τελικού μοντέλου του εξαπόδου, ενώθηκαν ξεχωριστά τα εξαρτήματα των ποδιών αρχικά, προς δημιουργία των τμημάτων coxa femur tibia, και ακολούθως τα εξαρτήματα του torso. Στην τελική φάση συναρμολόγησης τα τμήματα αυτά ενώνονται μεταξύ τους, με τέτοιο τρόπο ώστε το home position του ρομπότ να είναι τύπου reptile. Η λίστα των εξαρτημάτων του ρομπότ φαίνεται στο Παράρτημα Α. Οι Πίνακας 2-2, Πίνακας 2-3, Πίνακας 2-4 και

Πίνακας 2-5 παρουσιάζουν τον αριθμό αυτών των εξαρτημάτων για το κάθε τμήμα ξεχωριστά.

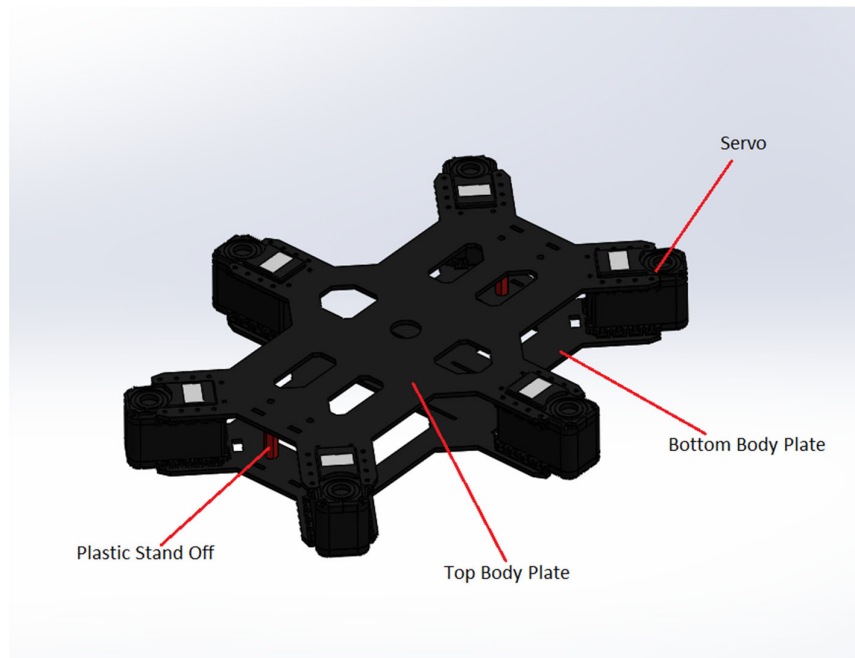
2.3.1 Συναρμολόγηση Torso

Ο Πίνακας 2-2 περιλαμβάνει τα εξαρτήματα για την κατασκευή του κύριου σώματος του εξάποδου ρομπότ (τμήμα torso).

Πίνακας 2-2. Torso.

Parts	Ποσότητα
Servo	6
Top bodyplate	1
Bottombodyplate	1
PlasticStandoff	4

Τα αντίστοιχα εξαρτήματα και η συναρμολόγησή τους φαίνεται στο Σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-4. Torso.

2.3.2 Συναρμολόγηση ποδιού

Για την συναρμολόγηση του ποδιού χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω επιμέρους τμήματα:

- Coxa
- Femur
- Tibia

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος συναρμολόγησης του πρώτου από τα τρία τμήματα του ποδιού, του coxa τμήματος. Για το κάθε τμήμα υπάρχει κατάλογος με τα επιμέρους εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν.

Coxa

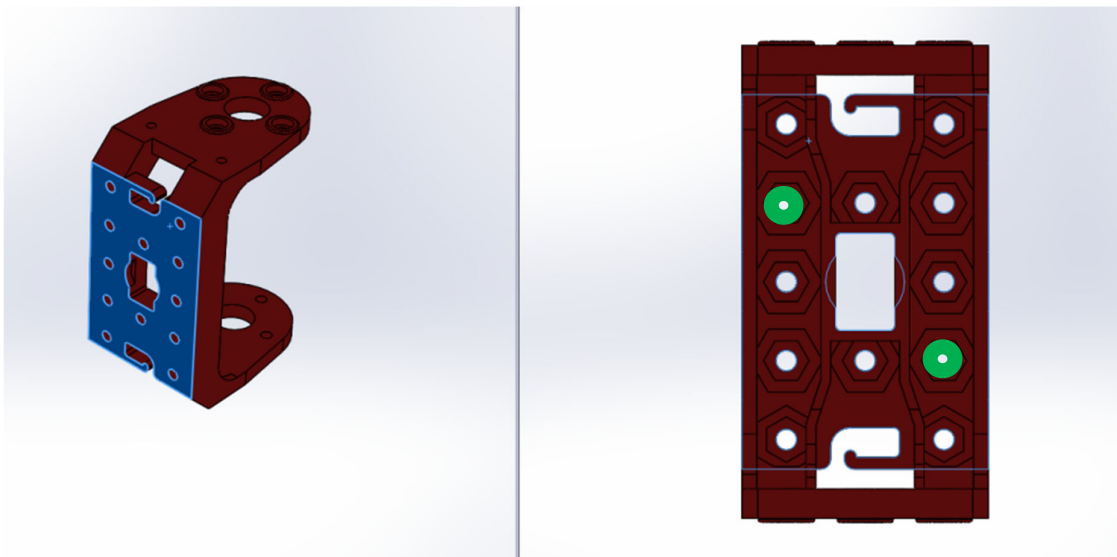
Ο Πίνακας 2-3 παρουσιάζει τα εξαρτήματα στις αντίστοιχες ποσότητες για την συναρμολόγηση των coxa τμημάτων.

Πίνακας 2-3. Coxa.

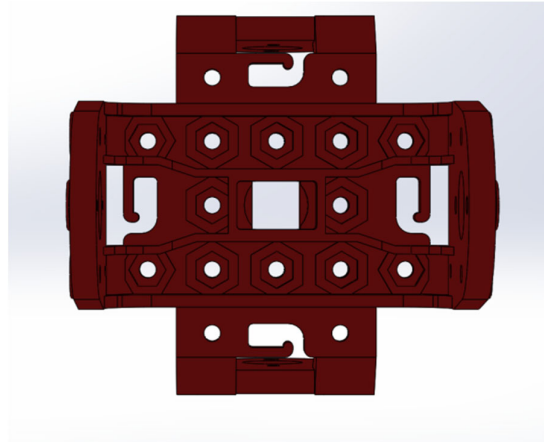
Εξαρτήματα	Ποσότητα (1 πόδι)	Ποσότητα (6 πόδια)
Grip	2	6
Aksonas1	1	3
Horns	2	6

Το τμήμα coxa, αποτελεί το σημείο πρόσδεσης του κύριου σώματος του εξαπόδου (torso) με το τμήμα femur και το τμήμα tibia, που αποτελούν το μεμονωμένο πόδι του. Για την μοντελοποίησή του χρησιμοποιήθηκαν δυο πανομοιότυπα solid (grip 1 και grip 2). Η μορφή των δυο grips φαίνεται στο Σχήμα 2-5. Τα δυο αυτά εξαρτήματα ευθυγραμμίζονται με βάση τις κυκλικές τομές που διαθέτουν λόγω κατασκευαστικού σχεδιασμού στο μέσο τους. Για την ευθυγράμμιση τους αρκεί δυο οποιοσδήποτε κυκλικές τομές από τις εννέα που υπάρχουν στο κέντρο περίπου του εξαρτήματος, να γίνουν ομόκεντρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5. Δυο υποψήφιες κυκλικές τομές είναι αυτές που φαίνονται με πράσινο χρώμα στο Σχήμα 2-5.

Στη συνέχεια δίνουμε την εντολή οι επιφάνειες A των δυο grip να είναι εφαπτόμενες. Οι περιορισμοί αυτοί καθορίζουν την ένωση των δυο grips ώστε να είναι μεταξύ τους κάθετα προσανατολισμένα και το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 2-6.

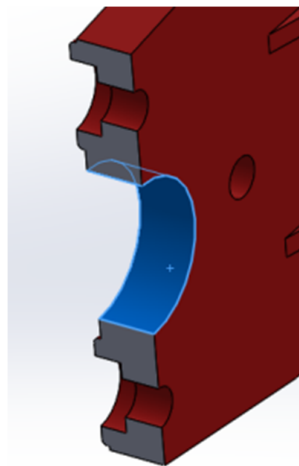


Σχήμα 2-5. Grippart. Η επιφάνεια A φαίνεται με σκούρο μπλε χρώμα στα αριστερά.

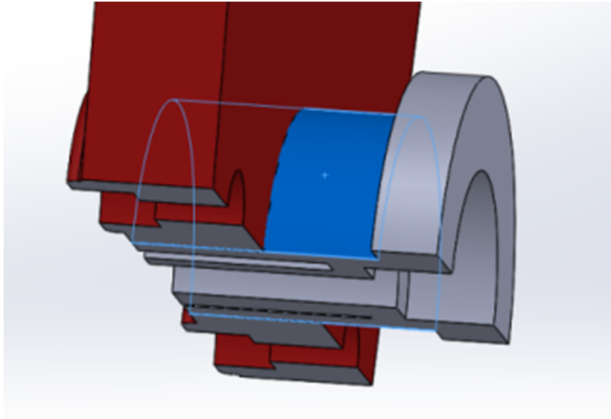


Σχήμα 2-6. Ένωση των 2 grip (1 και 2) σε ένα κομμάτι.

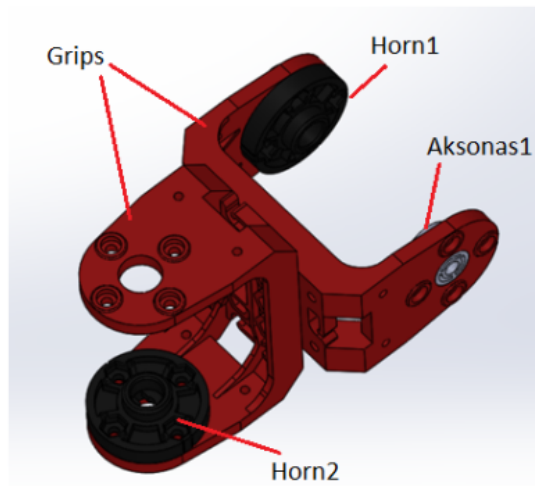
Στην συνέχεια προστίθενται κατά τον ίδιο τρόπο και τα επόμενα τέσσερα εξαρτήματα του coxa τμήματος. Τα εξαρτήματα αυτά είναι απαραίτητα ώστε όταν το μοντέλο εισαχθεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης, να μπορεί να στηρίζεται χωρίς να καταρρέει, ενώ με την βοήθεια τους, ορίζονται στο πρόγραμμα προσομοίωσης οι άξονες περιστροφής των σερβοκινητήρων. Για την προσκόλληση των εξαρτημάτων αυτών στο coxa τμήμα, και δεδομένου ότι τα εξαρτήματα αυτά είναι κυλινδρικά, γίνεται αρχικά ευθυγράμμιση των κάθετων αξόνων που διέρχονται από τα κέντρα των αντίστοιχων περιμέτρων Β και Γ που αντιστοιχούν στα επιμέρους κομμάτια grip1 και aksonas1, και στη συνέχεια δίνεται εντολή οι επιφάνειες Δ και Ε να είναι επαπτόμενες. Οι επιφάνειες δίνονται στα σχήματα :Δ (Σχήμα 2-7) και Ε (Σχήμα 2-8), καθώς και οι αντίστοιχες περιμέτροι Β (Σχήμα 2-7) και Γ (Σχήμα 2-8). Το τελικό ενωμένο coxa part φαίνεται στο Σχήμα 2-9.



Σχήμα 2-7. Επιφάνεια Δ και η περίμετρος Β στο εξάρτημα grip1.



Σχήμα 2-8. Επιφάνεια Ε και η περίμετρος Γ στο εξάρτημα aksonas1.

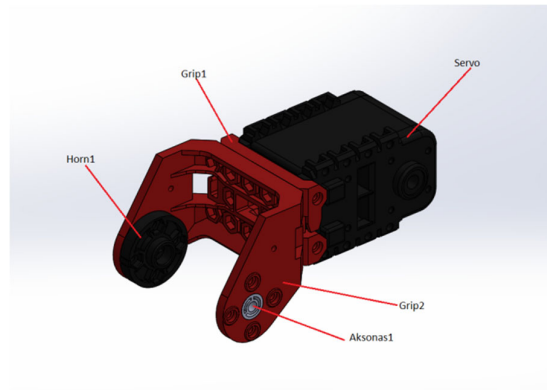


Σχήμα 2-9. Coxa part.

Οι εικόνες των τελικών ενωμένων τμημάτων femur και tibia του ποδιού φαίνονται στο Σχήμα 2-10 και στο Σχήμα 2-11 αντιστοίχως. Ο Πίνακας 2-4 παρουσιάζει τα εξαρτήματα στις αντίστοιχες ποσότητες για το femur και ο Πίνακας 2-5 παρουσιάζει τα εξαρτήματα στις αντίστοιχες ποσότητες για το tibia. Η συναρμολόγηση και των δύο τμημάτων πραγματοποιείται με την ίδια μεθοδολογία που περιγράφεται για το coxa τμήμα.

Πίνακας 2-4. Femur.

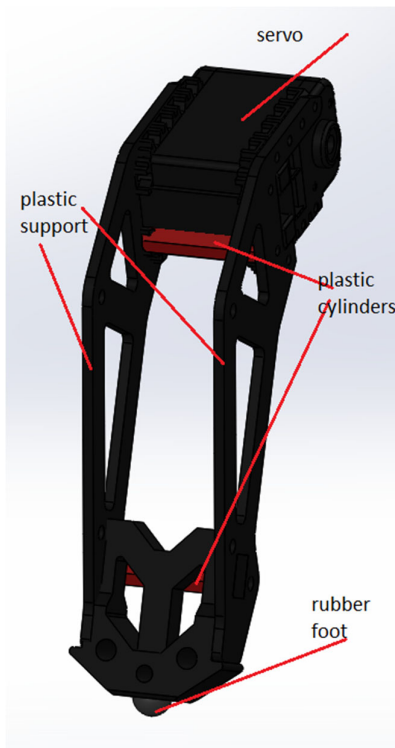
Εξαρτήματα	Ποσότητα (1 πόδι)	Ποσότητα (6 πόδια)
Servo	1	6
Grip	2	12
Horn	1	6
Aksonas1	1	6



Σχήμα 2-10. Femur Part.

Πίνακας 2-5. Tibia.

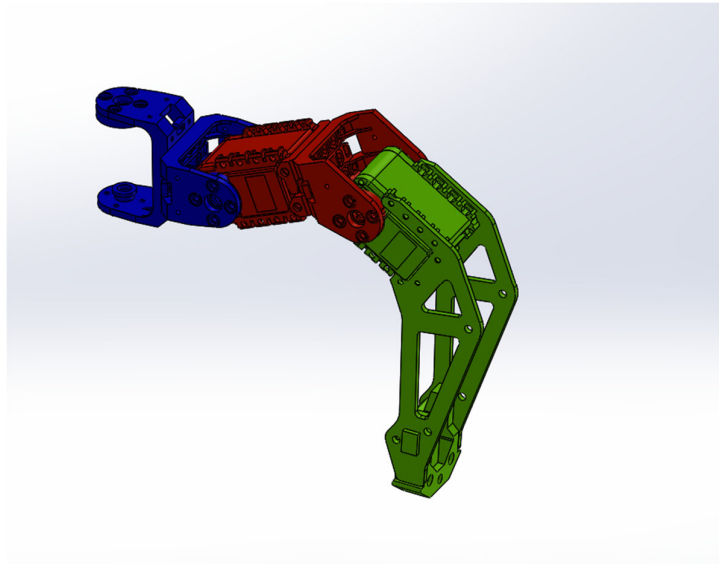
Εξαρτήματα	Ποσότητα (1 πόδι)	Ποσότητα (6 πόδια)
Servo	<u>1</u>	<u>6</u>
Plastic support	3	18
Plastic cylinders	2	12
Rubber foot	1	6



Σχήμα 2-11. Tibia part.

Η τελική φάση της συναρμολόγησης περιλαμβάνει αρχικά την συναρμολόγηση των τριών επιμέρους τμημάτων του κάθε ποδιού (coxa-femur-tibia) προς δημιουργία ενός ενιαίου ποδιού (Σχήμα 2-12). Στην συνέχεια το κάθε πόδι αποθηκεύεται σε part format προκειμένου αυτό να μπορεί να προσκολληθεί στο κύριο σώμα του ρομπότ (torso). Λόγω του ότι το κάθε πόδι του ρομπότ είναι πανομοιότυπο τόσο σε σχήμα όσο και σε μάζα, για τη δημιουργία και των έξι ποδιών έγινε αντιγραφή του πρωτότυπου ποδιού με σκοπό την προσκόλληση των νέων ποδιών στο υπόλοιπο σώμα.

Στο Σχήμα 2-12 φαίνεται το τελικό πόδι και ο τρόπος σύνδεσης των τριών κομματιών coxa, femur, tibia μεταξύ τους. Για την ευκολία της ανάγνωσης τα τρία τμήματα φαίνονται με διαφορετικό χρώμα στο Σχήμα 2-12 ώστε να φαίνεται ο τρόπος σύνδεσης τους.

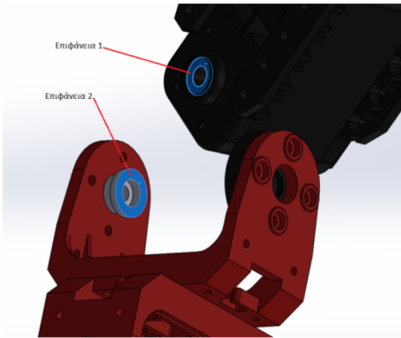


Σχήμα 2-12. Τελική μορφή ποδιού με χρώματα που αντιστοιχούν σε: coxa (σκούρο μπλε), femur (κόκκινο), tibia (πράσινο).

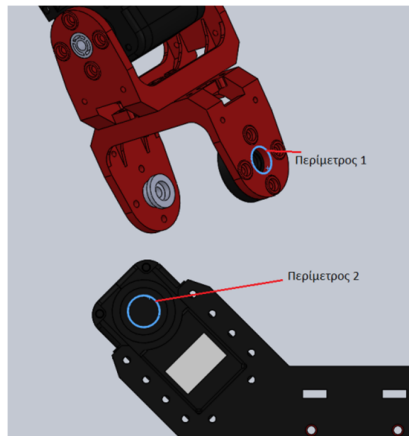
2.3.3 Συναρμολόγηση εξαπόδου

Για την δημιουργία του τελικού μοντέλου του εξαπόδου ρομπότ που θα χρησιμοποιηθεί στην διαδικασία προσομοίωσης, τα πόδια ενώνονται στο σώμα (torso) του ρομπότ, με το coxa τμήμα χρώματος μπλε όπως στο Σχήμα 2-12 να 'κλειδώνει' στο κάθε σέρβο του torso. Η προσκόλληση γίνεται κάθε φορά στο σώμα μεταξύ των τμημάτων coxa του κάθε ποδιού, και του υπάρχοντος σερβοκινητήρα στο torso τμήμα.

Με αντίστοιχη λογική με την οποία συνδέουμε τα μικρότερα εξαρτήματα, έτσι και εδώ συνδέουμε το κάθε πόδι με το κύριο σώμα. Οι επιφάνειες 1 και 2 θα πρέπει να εφάπτονται κάθε φορά μεταξύ τους όπως δείχνει το Σχήμα 2-13, ενώ οι περιμετροί των κυκλικών τομών θα πρέπει να είναι ομόκεντροι σύμφωνα με το Σχήμα 2-14.



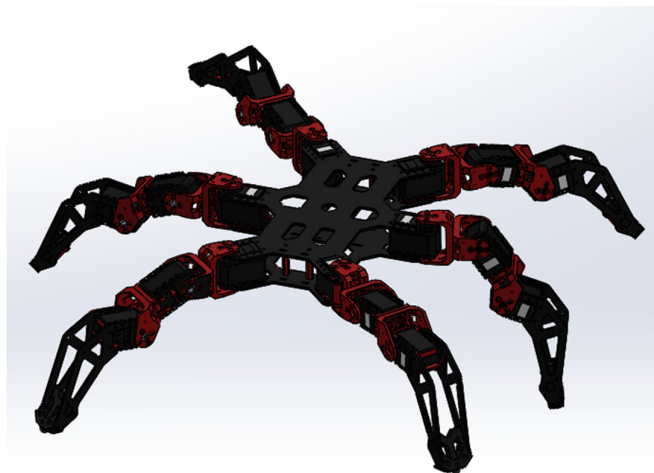
Σχήμα 2-13. Σύνδεση επιφανειών 1 και 2.



Σχήμα 2-14. Σύνδεση περιμέτρων 1 και 2.

2.3.4 Phantom X Hexapod

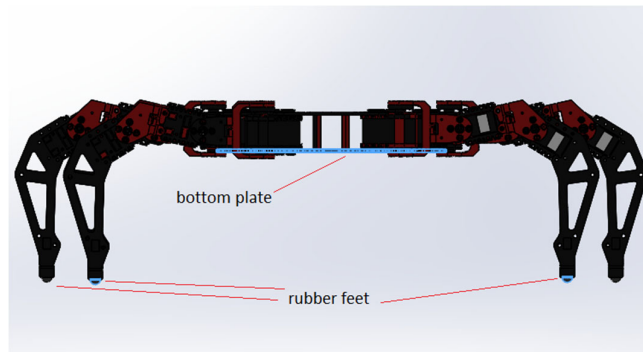
Το τελικό συναρμολογημένο μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 2-15.



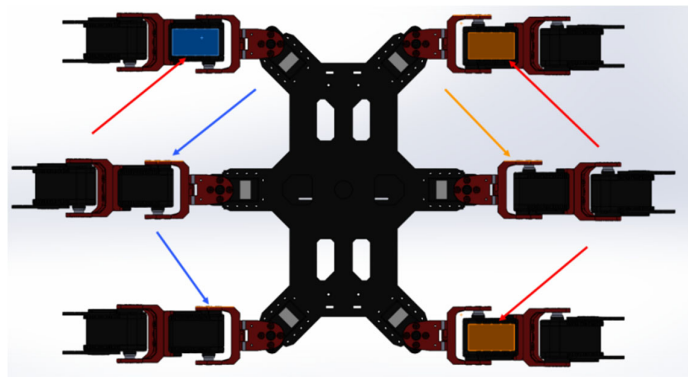
Σχήμα 2-15. Phantom X hexapod Mark 2 μοντελοποιημένο στο Solidworks 2017.

Μερικές ακόμη ενέργειες απαιτούνται προκειμένου το ρομπότ να χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση με το περιβάλλον Adams MSC. Απαιτείται να ξεπεραστούν σφάλματα αστάθειας. Επεξηγηματικά, η αρχική του θέση να ρυθμίζεται έτσι ώστε κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης το ρομπότ να πατάει και με τα έξι πόδια του στο έδαφος.

Για τον σκοπό αυτό, οι επίπεδες επιφάνειες των έξι ημισφαιρικών λαστιχένιων πελμάτων (rubber feet) τοποθετούνται παράλληλα με το bottom body plate (Σχήμα 2-16) ενώ οι επιφάνειες διαδοχικών femur servo, τοποθετούνται παράλληλες μεταξύ τους, για την αριστερή και δεξιά τριάδα ποδιών ξεχωριστά. Πρέπει οι δυο τριάδες ποδιών να είναι και μεταξύ τους παράλληλες, οπότε αρκεί μια από τις επιφάνειες του coxa part της μιας τριάδας, να γίνει παράλληλη με την αντίστοιχη επιφάνεια κάποιου coxa part της άλλης (Σχήμα 2-17).



Σχήμα 2-16. Παραλληλισμός bottom body plate με rubber feet.



Σχήμα 2-17. Παραλληλισμός τριάδων.

Ο παραλληλισμός των ποδιών πραγματοποιείται με βάση το Σχήμα 2-17 ως εξής: τα κόκκινα βέλη δείχνουν τις επιφάνειες των σερβοκινητήρων που χρησιμοποιούνται για τον παραλληλισμό των ποδιών στις αντίστοιχες τριάδες τους στο XZ επίπεδο. Τα μπλε βέλη δείχνουν τις επιφάνειες τις οποίες παραλληλίζουμε για να παραλληλιστούν και τα πόδια της κάθε τριάδας στο XY επίπεδο. Για να παραλληλιστούν οι δυο τριάδες ποδιών (αριστερή και δεξιά) τότε αρκεί οι επιφάνειες που δηλώνουν τα μπλε βέλη και οι τριάδες που δηλώνουν τα

πορτοκαλί βέλη να γίνουν παράλληλες. Να σημειωθεί ότι τα βέλη είναι ενδεικτικά, και η παραπάνω διαδικασία γίνεται για τις προαναφερθείσες επιφάνειες όλων των ποδιών.

Το ολοκληρωμένο πλέον μοντέλο για να εισαχθεί στο περιβάλλον προσομοίωσης MSC Adams, θα πρέπει να εξαχθεί σε μορφή part και όχι assembly όπως συνηθίζεται για μεγάλες κατασκευές. Ο λόγος ο οποίος εξάγεται σε αυτή τη μορφή είναι ότι πειραματικά, εισάγοντας το μοντέλο σε μορφή assembly, το περιβάλλον προσομοίωσης το αντιμετωπίζει σαν ένα ενιαίο τμήμα, και είναι πρακτικά αδύνατον να οριστούν πάνω σε αυτό οι σύνδεσμοι μεταξύ των τμημάτων του.

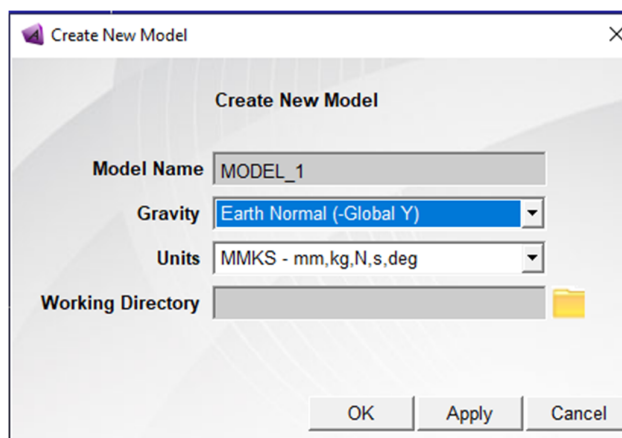
Αφού σώσουμε το μοντέλο σε part format στο περιβάλλον Solidworks, θα πρέπει να γίνει εκ νέου εξαγωγή του σε parasolid format (*.x_t), με τις εντολές **File→SaveAs→(Saveastype)→Parasolid(*.x_t)**. Το parasolid format είναι μια γεωμετρική μορφοποίηση του κατασκευασμένου μοντέλου, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια για επεξεργασία από περιβάλλοντα τρισδιάστατων γραφικών, όπως και στην παρούσα εργασία στο περιβάλλον Adams MSC.

3 Εισαγωγή στο περιβάλλον Adams MSC

Το Adams MSC είναι περιβάλλον δυναμικών προσομοιώσεων. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία για προσομοιώσεις πολύπλοκων συστημάτων. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η τοποθέτηση αρθρώσεων στα πόδια του εξάποδου ρομπότι, ο ορισμός δυνάμεων επαφής με τα πόδια και η εξαγωγή μεταβλητών για την ανταλλαγή πληροφοριών με το περιβάλλον Matlab/Simulink.

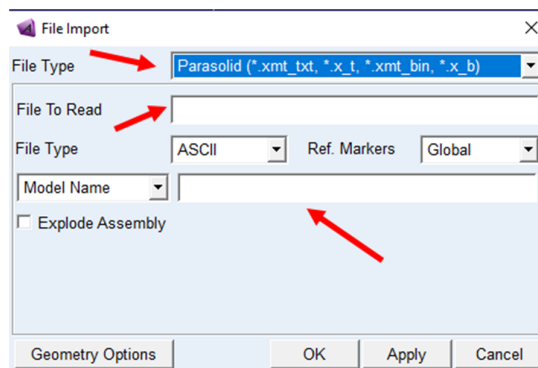
3.1 Εισαγωγή του μοντέλου στο Adams MSC

Κάθε μοντέλο που εισάγεται στο περιβάλλον Adams MSC, αντιμετωπίζεται σαν μια βάση δεδομένων. Για την εισαγωγή του μοντέλου, δημιουργούμε μια νέα βάση δεδομένων με την αντίστοιχη ονομασία, σύμφωνα με το Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1. Εισαγωγή μοντέλου.

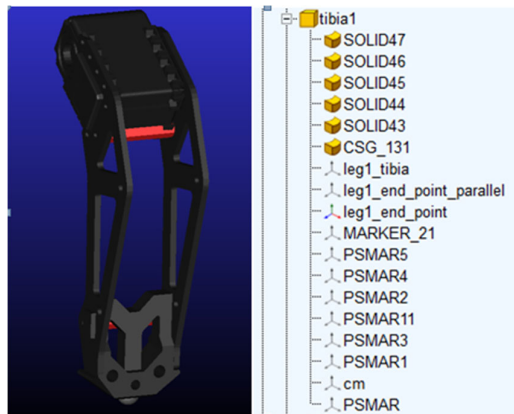
Για την εισαγωγή του μοντέλου σε μορφή parasolid, εκτελούμε τις εντολές **File→Import**, και στο μενού που ανοίγει, τροποποιούνται οι ενότητες που υποδηλώνουν τα κόκκινα βέλη (Σχήμα 3-2):



Σχήμα 3-2. Εισαγωγή parasolid μοντέλου στο Adams.

Στην επιλογή File Type επιλέγεται το parasolid format. Στην επιλογή File To Read επιλέγεται το parasolid (*.x_t) μοντέλο που δημιουργήθηκε από το περιβάλλον Solidworks 2017. Τέλος στην επιλογή model name δίνεται το όνομα της βάσης δεδομένων.

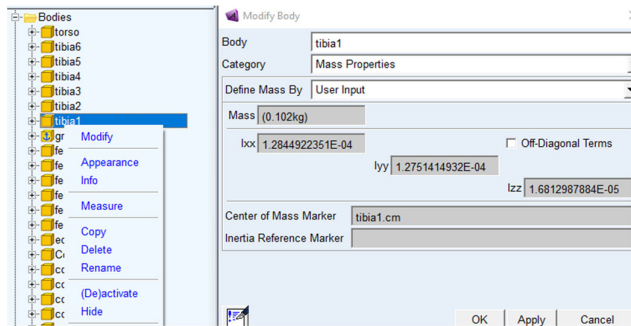
Μετά την εισαγωγή του μοντέλου στο Adams MSC, τα διαφορετικά εξαρτήματα του, εμφανίζονται σε format SOLID. Επιλέγοντας τα SOLIDS, τα οποία αντιστοιχούν σε κάθε τμήμα από τα προαναφερθέντα του εξάποδου ρομπότ, τα ομαδοποιούμε ανάλογα με το τμήμα στο οποίο ανήκουν. Για την ομαδοποίηση χρησιμοποιείται η εντολή **Boolean Merge**. Κάθε εξάρτημα του ρομπότ ομαδοποιείται με αυτόν τον τρόπο με τα υπόλοιπα εξαρτήματα του τμήματος στον οποίο ανήκουν. Στο Σχήμα 3-3 φαίνεται ένα παράδειγμα για την δημιουργία του τμήματος tibia1, του άκρου του πρώτου ποδιού.



Σχήμα 3-3. Τμήμα tibia1 σε περιβάλλον Adams.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου όλα τα επιμέρους εξαρτήματα σε μορφή solid, να ομαδοποιηθούν στο τμήμα που ανήκουν. Η ομαδοποίηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα, τα διαφορετικά εξαρτήματα να συμπεριφέρονται πλέον σαν ένα ενιαίο σώμα.

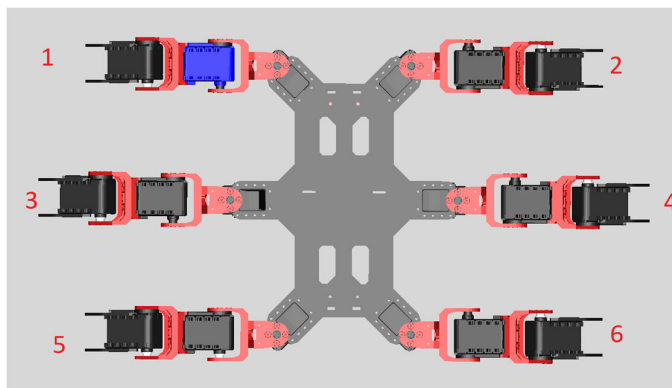
Για τον σκοπό της προσομοίωσης, αποδόθηκαν οι αντίστοιχες μάζες στα ενιαία πλέον τμήματα. Η απόδοση μαζών γίνεται σε κάθε τμήμα ξεχωριστά, από το μενού διαμόρφωσης τμημάτων που φαίνεται στο Σχήμα 3-4. Οι μάζες που δίνονται είναι ίδιες με τις μάζες που ζυγίστηκαν πειραματικά (Πίνακας 2-1).



Σχήμα 3-4. Διάλογος διαμόρφωσης.

3.2 Αρίθμηση ποδιών

Σημαντικό παράγοντα στην ανάπτυξη του αλγορίθμου, κατέχει η απόδοση αρίθμησης στα πόδια του εξάποδου ρομπότ. Η αρίθμηση των ποδιών ακολουθεί την εξής λογική : η αριστερή τριάδα κατά την φορά κίνησης του ρομπότ περιλαμβάνει τα πόδια 1,3,5 και η δεξιά τριάδα τα πόδια 2,4,6. Για ευκολία ανάγνωσης και προγραμματισμού, το femur serno του 1^{ου} ποδιού έχει χρωματιστεί με μπλε χρώμα (Σχήμα 3-5).



Σχήμα 3-5. Αρίθμηση ποδιών.

Ο Πίνακας 3-1 παρουσιάζει τα αντίστοιχα τμήματα του κάθε ποδιού που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο.

Πίνακας 3-1. Αρίθμηση ποδιών.

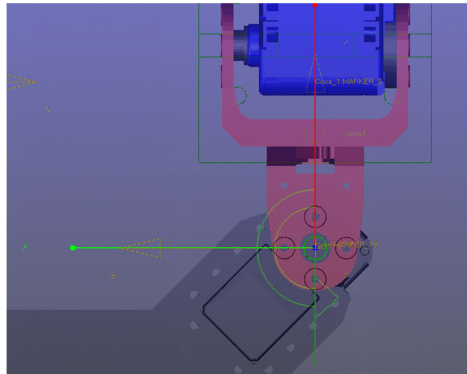
Πόδι	Τμήματα
1	Coxa1, femur1, tibia1
2	Coxa2, femur2, tibia2
3	Coxa3, femur3, tibia3
4	Coxa4, femur4, tibia4
5	Coxa5, femur5, tibia5
6	Coxa6, femur6, tibia6
-	torso

3.3 Δημιουργία αρθρώσεων

Όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, κάθε πόδι του εξάποδου ρομπότ διαθέτει τρεις στροφικές αρθρώσεις. Επομένως οι συνολικές στροφικές αρθρώσεις και οι αντίστοιχοι βαθμοί ελευθερίας του εξάποδου ρομπότ ανέρχονται σε δεκαοχτώ.

Για την δημιουργία στροφικών αρθρώσεων στο μοντέλο του Adams MSC, ακολουθείται η εξής διαδικασία: από την επιλογή connectors, εκτελείται η εντολή την επιλογή create a revolute

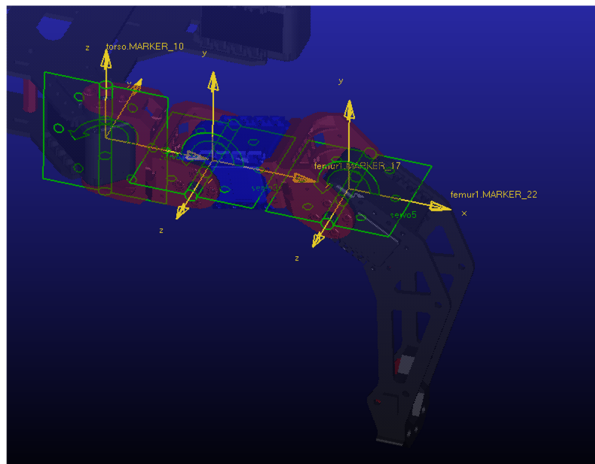
joint, από την υποενότητα joints. Στην συνέχεια επιλέγονται τα δυο τμήματα τα οποία θα συνδεθούν με τον στροφικό δεσμό. Το Σχήμα 3-6 δείχνει την δημιουργία στροφικής άρθρωσης μεταξύ του torso τμήματος και του coxa τμήματος του πρώτου ποδιού.



Σχήμα 3-6. Δημιουργία στροφικής άρθρωσης.

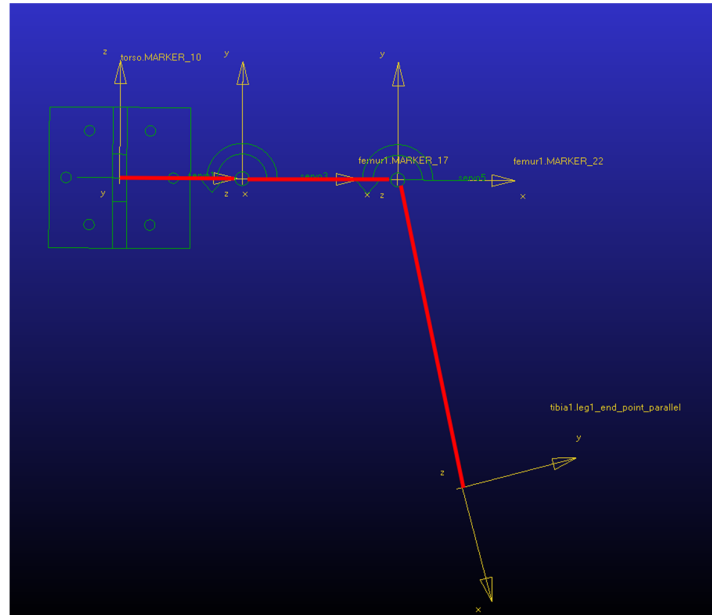
Κατά τη δημιουργία της στροφικής άρθρωσης, θα πρέπει ο άξονας z που αντιστοιχεί στον άξονα περιστροφής, να ευθυγραμμιστεί με τους κάθετους στην επιφάνεια άξονες που διέρχονται από το κέντρο των ομόκεντρων κύκλων που χρησιμοποιήθηκαν όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, για την ένωση των δυο τμημάτων. Η τοποθέτηση των αξόνων περιστροφής στον άξονα z, διευκολύνει την μετέπειτα επίλυση της κινηματικής ανάλυσης του ποδιού [7] .

Με παρόμοια λογική τοποθετούνται και οι υπόλοιπες δυο στροφικές αρθρώσεις στο κάθε πόδι του εξάποδου ρομπότ. Ιδιαίτερη σημασία έχει εδώ η τοποθέτηση του άξονα x του κάθε ποδιού, ο οποίος τοποθετείται με τέτοια φορά ώστε να είναι παράλληλος με την κοινή κάθετο μεταξύ διαδοχικών z αξόνων (μεθοδολογία Denavit Hartenberg, DH) [8] . Η τοποθέτηση των υπόλοιπων στροφικών συνδέσμων μαζί με τα αντίστοιχα συστήματα αναφοράς τα οποία ορίζουν, φαίνονται στο Σχήμα 3-7.



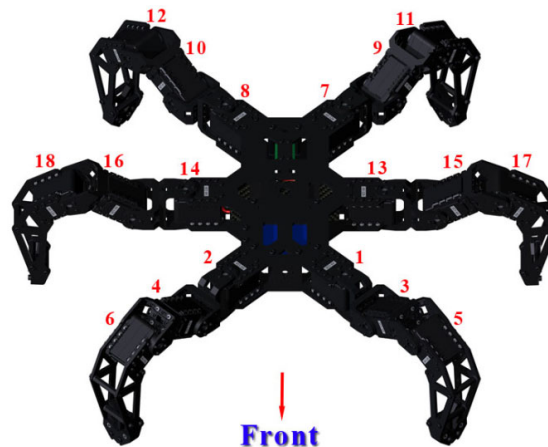
Σχήμα 3-7. Δημιουργία αρθρώσεων στο Adams.

Για την επίλυση της ευθείας κινηματικής ανάλυσης, χρειάστηκε η τοποθέτηση ενός συστήματος αναφοράς στο άκρο του κάθε ποδιού. Το εξάρτημα στο οποίο τοποθετείται στο εξής θα λέγεται πέλμα του ποδιού. Στο Σχήμα 3-8 φαίνεται η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος αναφοράς με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή εφαρμογή του θεωρήματος DH.



Σχήμα 3-8. Συστήματα αναφοράς.

Για την χρήση των σερβοκινητήρων στο μετέπειτα προγραμματισμό, απαιτείται η αρίθμηση τους. Η λογική που ακολουθήθηκε για την αρίθμηση αυτή, προκύπτει από το hardware και συγκεκριμένα από τους αριθμούς που έχει αποδώσει η εταιρεία Trossen σε κάθε σερβοκινητήρα. Στο Σχήμα 3-9 φαίνεται η αρίθμηση των σερβοκινητήρων για το κάθε πόδι.



Σχήμα 3-9. Αρίθμηση των σερβοκινητήρων.

Με τον ίδιο τρόπο αριθμούνται και τα τμήματα του εξάποδου ρομπότ, καθώς και οι μεταξύ τους σύνδεσμοι όπως περιγράφεται στην συνέχεια. Ο Πίνακας 3-2 δείχνει την αρίθμηση αυτή.

Πίνακας 3-2. Αρίθμηση των σερβοκινητήρων.

Leg	Torso-Coxa	Coxa-Femur	Femur-Tibia
1	Servo1	Servo3	Servo5
2	Servo2	Servo4	Servo6
3	Servo13	Servo15	Servo17
4	Servo14	Servo16	Servo18
5	Servo7	Servo9	Servo11
6	Servo8	Servo10	Servo12

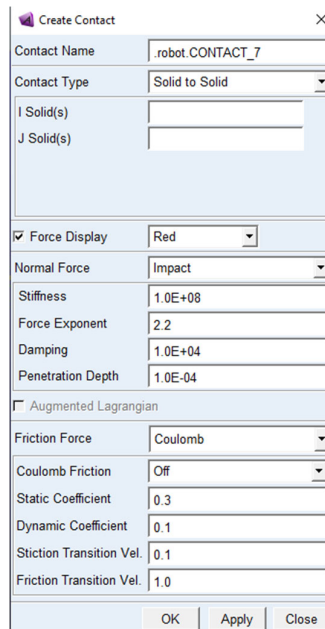
Προκειμένου οι στροφικοί σύνδεσμοι να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σερβοκινητήρες, αποδίδεται σε κάθε έναν από αυτούς μια παραμετροποιημένη κίνηση (motion). Η κίνηση αυτή ορίζεται με τις εντολές **motions→jointmotions→Rotational Joint Motion** για κάθε έναν από τους στροφικούς συνδέσμους. Η παραμετρική κίνηση θα εκτελείται βάσει εξισώσεων που θα αναπτυχθούν στην συνέχεια της ανάλυσης.

3.4 Δυνάμεις επαφών

Στο περιβάλλον Adams MSC απαιτείται για την εκτέλεση της προσομοίωσης, η δημιουργία επαφών με την πλατφόρμα πάνω στην οποία θα πλοηγηθεί το ρομπότ.

Για την πλατφόρμα, σχεδιάστηκε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο στερεό σώμα με διαστάσεις 2x2x0.2m. Το μέγεθος αυτό μπορεί να μεταβληθεί από τον χρήστη ώστε να προσαρμόζεται στις ανάγκες της προσομοίωσης. Προκειμένου να εκτελεστούν πειράματα σε διαφορετικές κλίσεις εδάφους, τοποθετήθηκε ένας στροφικός δεσμός ανάμεσα στο έδαφος και στο ground (βλ. Παράρτημα Β). Με τον τρόπο αυτό η κλίση του εδάφους μπορεί να μεταβάλλεται από τον χρήστη οποιαδήποτε στιγμή της προσομοίωσης.

Για την δημιουργία επαφών μεταξύ του ρομπότ και του εδάφους, αποδίδονται στο ρομπότ εφαρμοσμένες δυνάμεις. Για την απόδοση δυνάμεων στο ρομπότ, δίνονται οι εντολές **Forces→Special Forces→Create a Contact**. Ο διάλογος που ανοίγει από το περιβάλλον Adams MSC φαίνεται στο Σχήμα 3-10.



Σχήμα 3-10. Διάλογος contact.

Στον διάλογο αυτό παρατηρούνται οι εξής επιλογές:

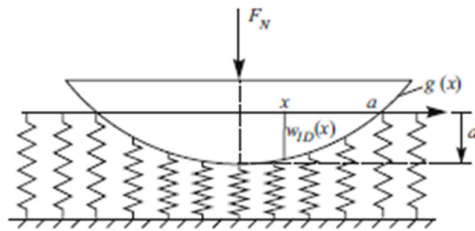
- **Contact Type:** δίνεται ο τύπος επαφής μεταξύ δυο στερεών ή εύκαμπτων σωμάτων
- **I and J solids:** Στις επιλογές αυτές τοποθετούνται τα στερεά μεταξύ των οποίων θα εφαρμοστεί η δύναμη. Ο λόγος που υπάρχουν δυο επιλογές είναι ότι ανάλογα με το ποιο στερεό σώμα θα οριστεί ως I, η φορά της δύναμης θα είναι προς αυτό.
- **Normal Force:** το είδος της κάθετης δύναμης. Δίνονται τρεις επιλογές: Impact, Restitution και User Defined. Με την τρίτη επιλογή (User Defined) η κάθετη δύναμη η καθορίζεται από τον χρήστη. Η δεύτερη επιλογή Restitution, ορίζει την κάθετη δύναμη με βάση την αλλαγή στην ταχύτητα δυο σωμάτων, μετά την σύγκρουση τους. Για την ρύθμιση της επαφής με αυτόν τον τρόπο, απαιτείται γνώση του ίδιου του υλικού από το οποίο αποτελούνται τόσο το έδαφος, όσο και το σημείο επαφής, ενώ απαιτείται και μια ποσότητα σφάλματος για τον υπολογισμό της χαμένης ενέργειας. Η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, καθώς με την χρήση της, το σφάλμα ήταν μεγάλο με αποτέλεσμα το ρομπότ να μετακινείται από την θέση του, λόγω των αντιδράσεων με το έδαφος. Η πρώτη επιλογή (Impact), προσομοιώνει την κάθετη δύναμη από το έδαφος με ένα σύστημα ελατηρίου-αποσβεστήρα [9]. Κάθε σημείο επαφής με το έδαφος και το πέλμα του ρομπότ, αποτελεί και ένα τέτοιο σύστημα. Η μαθηματική σχέση (3-1) που χρησιμοποιείται από το ίδιο το περιβάλλον Adams MSC είναι:

$$F = 0, \text{ αν } q > q_0 \quad (3-1)$$

$$F = k * (q - q_0)^e - c_{\max} * \dot{q} * \text{STEP}(q, q_0 - d, 1, q_0, 0), \text{ αν } q \leq q_0 \quad (3-2)$$

όπου k η σταθερά του ελατηρίου, q και q_0 μεταβλητές που δηλώνουν ένα περιθώριο κίνησης του πέλματος πριν αυτό θεωρηθεί ότι ακουμπάει με το έδαφος [10] (αν q_0 θεωρήσουμε ότι είναι η απόσταση από την οποία ξεκινάει η επαφή με το έδαφος, τότε η συντεταγμένη q του πέλματος θα πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή την απόσταση προκειμένου να θεωρηθεί ότι το πόδι πατάει στο έδαφος).

Στο Σχήμα 3-11 όπου $x=q$.



Σχήμα 3-11. Το μοντέλο spring damper.

Για τον προσδιορισμό του ελατηρίου-αποσβεστήρα συστήματος απαιτείται ο ορισμός του stiffness (σκληρότητας) του εδάφους. Όσο μεγαλύτερο είναι το stiffness, τόσο μεγαλύτερη δόνηση που παρατηρείται μεταξύ του ρομπότ και του εδάφους. Όσο μικρότερη είναι η σκληρότητα, οπότε και το έδαφος πιο μαλακό, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάτρηση του εδάφους από το πέλμα του ρομπότ. Γίνεται κατανοητό ότι θα πρέπει να βρεθεί τέτοια σκληρότητα ώστε τα δυο αυτά φαινόμενα να βρίσκονται σε όσο τον δυνατόν μεγαλύτερη ισορροπία. Σύμφωνα με την Hexagon, η σκληρότητα εξαρτάται και από το είδος του υλικού, αλλά και από τη γεωμετρία της επαφής ο ορισμός της τιμής έγκειται σε πειραματικές μετρήσεις από πλευράς του χρήστη [11].

Ο δεύτερος παράγοντας (Σχήμα 3-10) είναι το εκθετικό e που βρίσκεται στον παράγοντα $(q - q_0)^e$. Ο παράγοντας αυτός, εξαρτάται από το υλικό του εδάφους και ανάλογα με το είδος παίρνει τιμές πάντα μεγαλύτερες από 1. Για μαλακά υλικά όπως το πλαστικό μια υποψήφια τιμή είναι 1.1, για μαλακά μέταλλα όπως το αλουμίνιο 1.5, ενώ για σκληρά υλικά, όπως είναι το ασάλι, 2.2.

Ο τρίτος παράγοντας είναι το damping (Σχήμα 3-10). Δεν πρόκειται για φυσική έννοια, αλλά για έναν συντελεστή του περιβάλλοντος Adams MSC, προκειμένου το damping να διατηρείται σταθερό, κατά την εκκίνηση της επαφής του πέλματος με το έδαφος.

Ο τέταρτος παράγοντας είναι το βάθος διάτρησης (penetration depth) και υποδηλώνει το περιθώριο το οποίο αφήνεται στο πέλμα να διεισδύσει στο έδαφος. Όσο μικρότερη είναι η τιμή, τόσο λιγότερο θα εισέρχεται το πέλμα μέσα στο έδαφος. Πολύ μικρές τιμές διείσδυσης, έχουν ως αποτέλεσμα λιγότερα σημεία να λειτουργούν ως ελατηρίου-αποσβεστήρας, με αποτέλεσμα όλη η δύναμη της επαφής να μοιράζεται σε λιγότερα σημεία, γεγονός που οδηγεί σε μικροδομήσεις των πελμάτων σε κατάσταση ακινησίας. Και αυτός ο παράγοντας ορίζεται πειραματικά. Ο Πίνακας 3-3 παρουσιάζει τους συντελεστές που επιλέχθηκαν στην παρούσα εργασία, έπειτα από σειρά δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.

Πίνακας 3-3. Αποτελέσματα πειραματικών εφαρμογών για contact forces.

Συντελεστές	Τιμή
Stiffness	1E+08 N/m
Force Exponent	2.2
Damping	1E+04 Ns/m
Penetration Depth	1E-04 m

Στην συνέχεια του διαλόγου (Σχήμα 3-10), παρατηρείται ο παράγοντας Friction, με τον οποίο ορίζεται η τριβή του πέλματος ή του σώματος γενικότερα που έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Οι επιλογές εδώ είναι Coulomb, none, user defined. Στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί η μοντελοποίηση της τριβής με βάση την θεώρηση Coulomb.

Ο συντελεστής τριβής μ του εδάφους εξαρτάται από το υλικό του εδάφους. Στον διάλογο του Adams MSC ορίζονται οι παράμετροι static και dynamic coefficient που αντιστοιχούν στους συντελεστές μ_s και μ_d και ορίζονται για ακινησία (ή σταθερή ταχύτητα) μεταξύ του σώματος και του εδάφους που βρίσκονται σε επαφή, και για σχετική κίνηση μεταξύ των δύο σωμάτων αντιστοίχως. Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από το είδος του υλικού των δύο σωμάτων και βρίσκονται πειραματικά. Ο Πίνακας 3-4 παρουσιάζει τους συντελεστές friction και stiction velocity που επιλέχθηκαν μετά από μελέτη πινάκων (Παράρτημα Γ) [17].

Πίνακας 3-4. Συντελεστές Coulomb friction.

Συντελεστές	Τιμή
Static Coefficient	0.8
Dynamic Coefficient	0.76
Stiction Transition Velocity	0.1 m/s
Friction Transition Velocity	0.5 m/s

Ο Πίνακας 3-5 παρουσιάζει τις δυνάμεις επαφής για κάθε πέλμα.

Πίνακας 3-5. Δυνάμεις επαφής.

Contact	I solid	J solid	Contact Type	Normal Force	Friction Force
Contact1	pelma1	edafos	Solid to Solid	Impact	Coulomb
Contact2	pelma2	edafos	Solid to Solid	Impact	Coulomb
Contact3	pelma3	edafos	Solid to Solid	Impact	Coulomb
Contact4	pelma4	edafos	Solid to Solid	Impact	Coulomb
Contact5	pelma5	edafos	Solid to Solid	Impact	Coulomb
Contact6	pelma6	edafos	Solid to Solid	Impact	Coulomb

3.5 Εφαρμογή αισθητήρων

Για την μελέτη της ευστάθειας του ρομπότ με χρήση του κριτηρίου FASM, απαιτείται η χρήση αισθητήρων στα πέλματα του εξάποδου ρομπότ με σκοπό την μέτρηση των δυνάμεων αντίδρασης μεταξύ του εδάφους και των πελμάτων που έρχονται σε επαφή με αυτό (force sensors).

Ακόμη, το κριτήριο, απαιτεί την μέτρηση αποστάσεων από το κέντρο μάζας του εξάποδου ρομπότ, έως τα πέλματα. Για την εκτέλεση του αλγορίθμου κίνησης του ποδιού και την επίλυση του, απαιτείται επίσης και η μέτρηση της μεταβολής των γωνιών των σερβοκινητήρων για κάθε κίνηση τους (encoders).

Στο περιβάλλον Adams MSC δίνεται η δυνατότητα μετρήσεων των παραπάνω επιθυμητών μεταβλητών. Με την εντολή **Design Exploration→Create a New Function Measure**, δημιουργούνται για κάθε μια από τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις οι εξής μετρήσεις:

3.5.1 Μέτρηση δυνάμεων επαφής

Για κάθε ένα από τα έξι πέλματα του εξάποδου ρομπότ, τοποθετείται ένα επιπλέον σύστημα αναφοράς, το οποίο εφάπτεται στο ημισφαιρικό άκρο του πέλματος σύμφωνα με το Σχήμα 3-12. Η κατεύθυνση του συστήματος αναφοράς είναι τέτοια ώστε να συμπίπτει με το σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας.

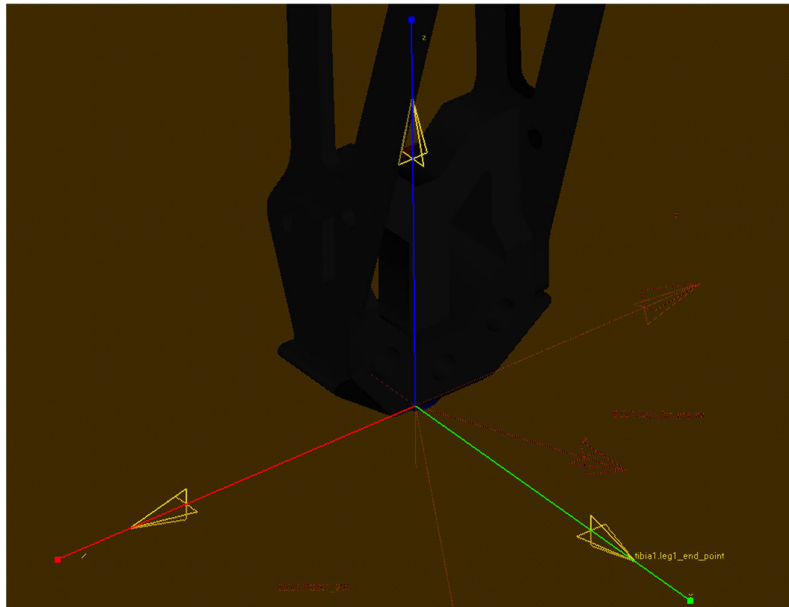
Για την μέτρηση των δυνάμεων χρησιμοποιείται η εντολή Design→Measures→Create or Modify a function measure. Από το αναδυόμενο μενού επιλέγουμε Force in object→Contact Force και εμφανίζεται ο ακόλουθος διάλογος

CONTACT (Contact Name, On Body, Component, Axes)

Με την εντολή αυτή γίνεται μέτρηση της δύναμης επαφής σε οποιοδήποτε σώμα επιθυμεί ο χρήστης. Για παράδειγμα για την μέτρηση της δύναμης στον x άξονα της δύναμης επαφής στο πέλμα του τρίτου ποδιού, η παραπάνω εντολή έχει την εξής μορφή:

CONTACT (Contact3, pelma3, x, leg3_end_point)

Κατά αντιστοιχία με την παραπάνω εντολή ορίζονται συνολικά δεκαοχτώ δυνάμεις, τρεις για κάθε πόδι, μία για κάθε άξονα του τρισδιάστατου χώρου.



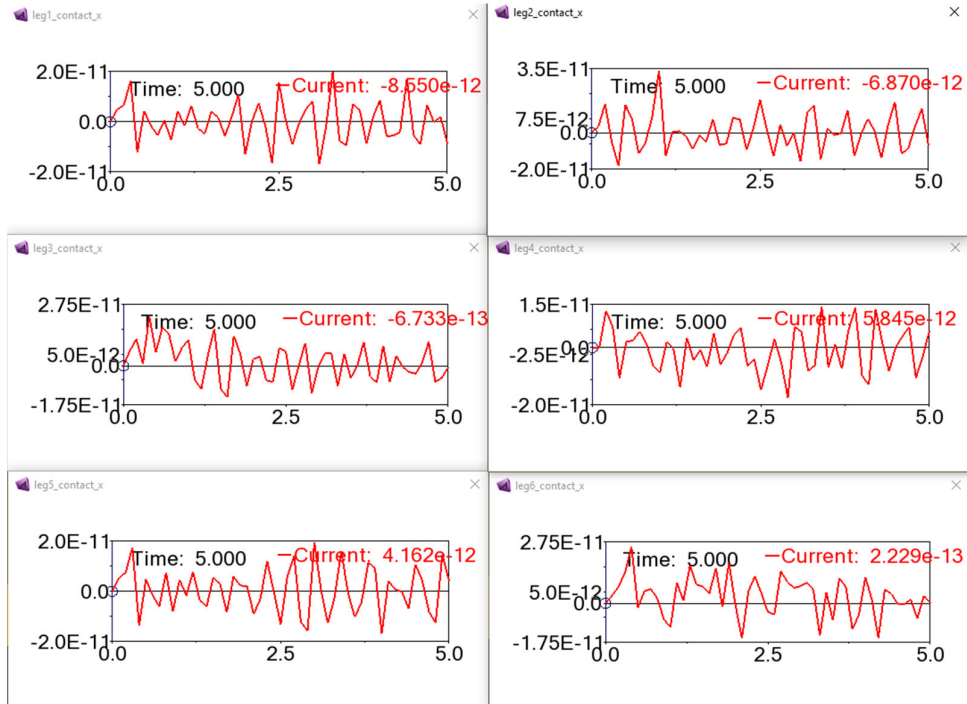
Σχήμα 3-12. Σύστημα Αναφοράς στο πέλμα του ποδιού.

Ένα τέτοιο σύστημα αναφοράς τοποθετείται στο άκρο κάθε ποδιού. Ο Πίνακας 3-6 παρουσιάζει τις ονομασίες και τα αντίστοιχα πόδια στα οποία αναφέρονται τα συστήματα αναφοράς.

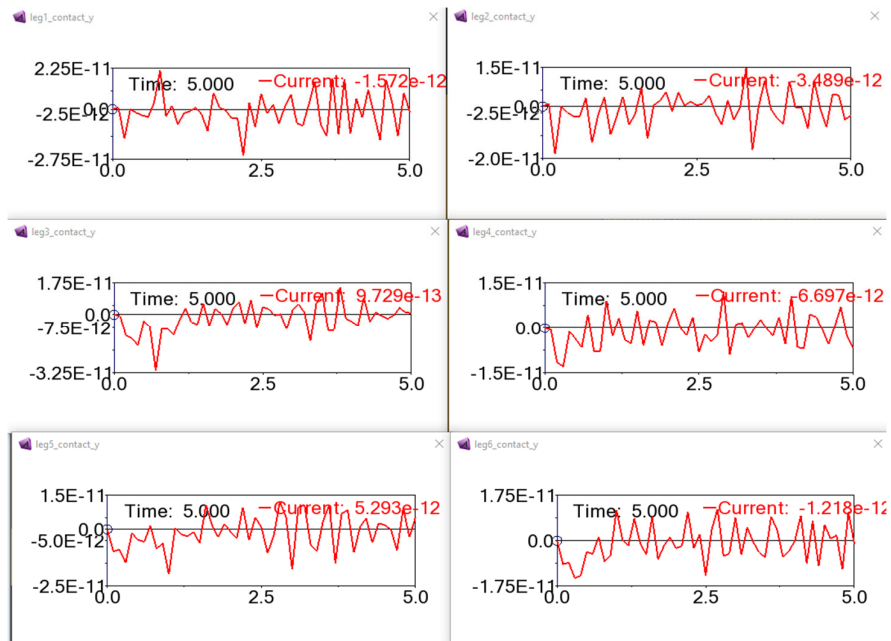
Πίνακας 3-6. Markers σε κάθε πόδι.

Leg	Marker
Leg1	Leg1_end_point
Leg2	Leg2_end_point
Leg3	Leg3_end_point
Leg4	Leg4_end_point
Leg5	Leg5_end_point
Leg6	Leg6_end_point

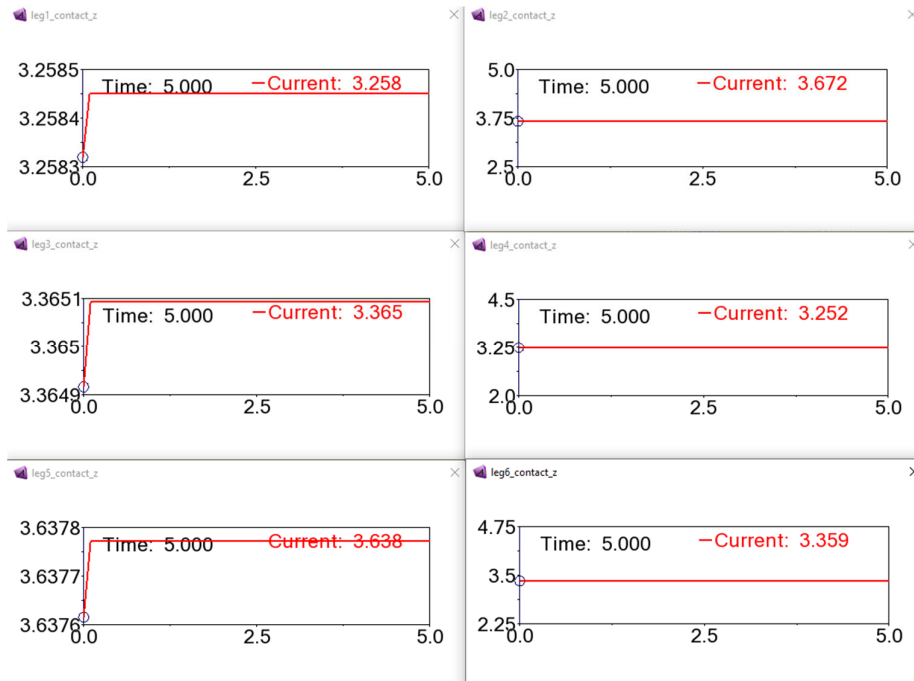
Προσομοιώνοντας το μοντέλο για διάρκεια 5 δευτερολέπτων, με αυτό να στέκεται ακίνητο, προκύπτουν τα εξής διαγράμματα σχετικά με την κάθετη δύναμη μετρημένη στους τρεις άξονες (Σχήμα 3-13, Σχήμα 3-14, Σχήμα 3-15).



Σχήμα 3-13. x συνιστώσα της κάθετης δύναμης.



Σχήμα 3-14. y συνιστώσα της κάθετης δύναμης.



Σχήμα 3-15. z συνιστώσα της κάθετης δύναμης.

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό ότι στον x (Σχήμα 3-13) και y (Σχήμα 3-14) άξονα, η μέτρηση της δύναμης επαφής είναι σχεδόν μηδενική. Οι μικρές διαφορές που εμφανίζονται οφείλονται στην ανάπτυξη της δύναμης ως ελατηρίου-αποσβεστήρα συστήματος με αποτέλεσμα την εμφάνιση θορύβου. Στον z (Σχήμα 3-15) άξονα παρατηρούμε ότι η τιμή της δύναμης επαφής είναι σχεδόν σταθερή για το διάστημα των 5 δευτερολέπτων της προσομοίωσης, και ισούται περίπου με το 1/6 του συνολικού βάρους του εξάποδου ρομπότ, αφού όπως μετρήθηκε:

$$\text{contact Force}_{(i)} = -\frac{\text{Total Weight}}{6} * g, i = (1, \dots, 6) \quad (3-3)$$

$$\text{contact Force}_{(i)} = -\frac{2.095 \text{ kg}}{6} * (-9.80665 \text{ m/s}^2) \approx 3.4242\text{N} \quad (3-4)$$

Παρατηρείτε διαφορά μεταξύ των θεωρητικών δεδομένων και πειραματικών μετρήσεων που πιθανώς οφείλεται σε απόκλιση του κέντρου μάζας του ρομπότ από θεωρητική θέση καθώς και στην προσομοίωση του εδάφους ως μοντέλο ελατηρίου-αποσβεστήρα.

3.5.2 Μέτρηση αποστάσεων

Για την μέτρηση των αποστάσεων των πελμάτων από το κέντρο μάζας, αρχικά θα πρέπει να βρεθούν οι συντεταγμένες του κέντρου μάζας του εξάποδου ρομπότ. Για την εύρεση του εκτελείται η εντολή Tools→Aggregate Mass. Στην συνέχεια επιλέγονται όλα τα τμήματα του

εξάποδου ρομπότ, καθώς και ως ποιο σύστημα αναφοράς θέλουμε να ορίσουμε τη συνολική μάζα του συστήματος και προκύπτει ο ακόλουθος διάλογος (Σχήμα 3-16).

```
Aggregate mass for objects:
.robot.torso
.robot.coxa2
.robot.femur2
.robot.tibia2
.robot.coxal
.robot.femur1
.robot.tibial
.robot.coxa3
.robot.femur3
.robot.tibia3
.robot.coxa4
.robot.femur4
.robot.tibia4
.robot.coxa6
.robot.femur6
.robot.tibia6
.robot.coxa5
.robot.femur5
.robot.tibia5
The aggregate mass in the global reference frame is:
Mass : 2.095 kg
Center of Mass :
Location : 0.2157750751, 3.2658041845E-02, 0.1824538728 (meter, meter, meter)
Orientation : 1.4368431114, 3.0472454451E-03, 4.8426198627 (rad)
Mass Inertia Tensor :
IXX : 0.1164147988 kg-meter**2
IYY : 0.1832949339 kg-meter**2
IZZ : 0.1527840163 kg-meter**2
IXY : 1.4868869433E-02 kg-meter**2
IZX : 8.2452213779E-02 kg-meter**2
IYZ : 1.2497974768E-02 kg-meter**2
```

Σχήμα 3-16. Συντεταγμένες κέντρου μάζας.

Το Center of Mass έχει τις παραπάνω συντεταγμένες και προσανατολισμό στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων. Το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων ορίζεται αυτόματα από το περιβάλλον Adams MSC. Στην συνέχεια δημιουργείται ένα νέο σύστημα αναφοράς, με κέντρο τις συντεταγμένες αυτές και κατεύθυνση ίδια την φορά κίνησης του ρομπότ.

Για τις απαραίτητες μετρήσεις των συντεταγμένων, ως προς το κέντρο μάζας, εκτελείται η εντολή.

DX(To_Marker , From_Marker , Along_Marker)

Με την εντολή αυτή δημιουργείται μια μέτρηση από το δεύτερο σύστημα αναφοράς (To_Marker) στο πρώτο σύστημα αναφοράς (From_Marker) κατά μήκος του συστήματος αναφοράς στην επιλογή Along_Marker. Για παράδειγμα για τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ του κέντρου μάζας και του πέλματος του πρώτου ποδιού, μετρημένη κατά μήκος του x άξονα του κέντρου μάζας, εκτελείται η εντολή:

DX(leg1_end_point,robot_CoM,robot_CoM)

όπου leg1_end_point το σύστημα αναφοράς στο πέλμα του ποδιού, όπως αυτό περιγράφηκε στην Υποενότητα 3.5.1 και robot_CoM το σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας του ρομπότ. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι ακόλουθες συντεταγμένες των πέλματων ως προς το σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας (Πίνακας 3-7).

Πίνακας 3-7. Συντεταγμένες των πέλματων ως προς το κέντρο μάζας.

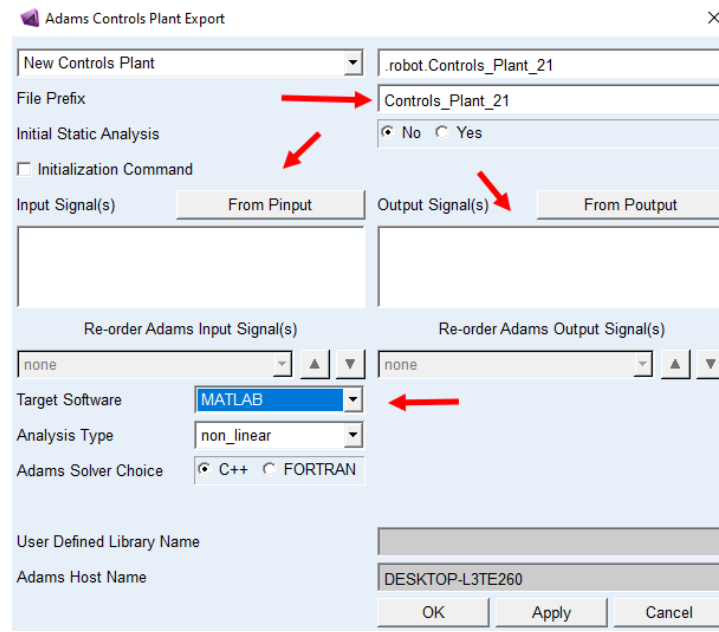
Leg	x-coordinate (mm)	y-coordinate (mm)	z-coordinate (mm)
Leg1	0.1228	0.2074	-0.1328
Leg2	0.1228	-0.2075	-0.1328
Leg3	0	0.25	-0.1328
Leg4	0	-0.25	-0.1328
Leg5	-0.1210	0.2074	-0.1328
Leg6	-0.1210	-0.2074	-0.1328

Στην συνέχεια το ολοκληρωμένο πλέον μοντέλο του εξάποδου ρομπότ μετατρέπεται σε plant format, ώστε να μπορεί να γίνει επεξεργασία του από το περιβάλλον Simulink. Για να γίνει ο έλεγχος της θέσης των σερβοκινητήρων, απαιτείται η δημιουργία μεταβλητών με τις οποίες το Adams MSC και το Simulink, να μπορούν να ανταλλάσουν πληροφορίες.

Για τη δημιουργία των μεταβλητών εκτελείται η εντολή **Elements→System Elements→Create a State Variable Defined by an Algebraic Equation**. Όπως δηλώνει και η εντολή, δημιουργούνται μεταβλητές κατάστασης του συστήματος, οι τιμές των οποίων καθορίζονται από αλγεβρικές εξισώσεις. Στις μεταβλητές αυτές κατάστασης αποθηκεύουμε τις εξής τιμές:

- Μεταβλητές q_i ($i=1, \dots, 18$): πρόκειται για τις μεταβλητές εισόδου του συστήματος. Οι τιμές των μεταβλητών αυτών ορίζονται ως κενές, προκειμένου να δέχονται τις τιμές που προκύπτουν από την εκτέλεση του αλγορίθμου στο Simulink.
- Μεταβλητές $leg(i)_{contact}(X,Y,Z)$: πρόκειται για μεταβλητές εξόδου του συστήματος. Σε αυτές αποθηκεύεται κάθε στιγμή της προσομοίωσης, η δύναμη επαφής μεταξύ του εδάφους και του κάθε πέλματος του εξάποδου ρομπότ. Ο δείκτης (i) ορίζει τον αριθμό του ποδιού, ενώ οι παράμετροι (x,y,z) ορίζουν τις τρεις συνιστώσες της τρισδιάστατης κάθετης δύναμης. Οι μεταβλητές αυτές παίρνουν τιμές από τις μετρήσεις που ορίστηκαν στην υποενότητα αισθητήρες.
- Μεταβλητή $klisshX$: πρόκειται για μεταβλητή εισόδου του συστήματος. Η τιμή που εισάγεται με αυτή την μεταβλητή στο σύστημα, καθορίζει την κλίση ως προς τον άξονα x της πλατφόρμας πάνω στην οποία κινείται το εξάποδο ρομπότ.
- Μεταβλητή $metrhsh_Klishs$: πρόκειται για μεταβλητή εξόδου του συστήματος, και χρησιμοποιείται για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της κλίσης του εδάφους, όπως αυτή καθορίζεται από την μεταβλητή $klisshX$.

Για τη δημιουργία του plant, εκτελείται η εντολή **Plugins→ Controls→ Plant Export**. Το μενού που προκύπτει από την εκτέλεση της εντολής φαίνεται στο Σχήμα 3-17:



Σχήμα 3-17. Menu δημιουργίας του plant.

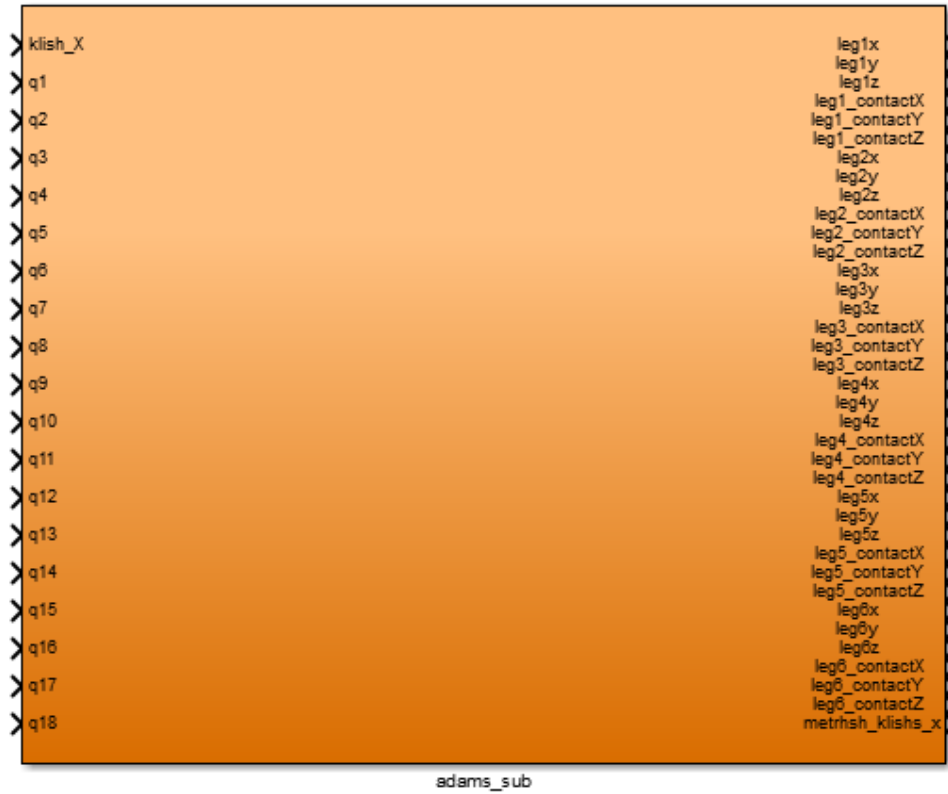
Στην επιλογή File Prefix επιλέγεται το όνομα του plant που θα εξαχθεί. Στις επιλογές Input Signals και Output Signals επιλέγονται οι μεταβλητές $q_i(i=1, \dots, 18)$, klishX και leg(i)_contact (X, Y, Z), metrshshKlishs αντίστοιχα.

3.6 Εισαγωγή Adams Plant στο Simulink

Κατά την εξαγωγή του Adams Plant από το περιβάλλον Adams MSC με την διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 3.6, προκύπτουν τα ακόλουθα αρχεία:

- **aviewAS.cmd**
- **(modelName).cmd**
- **(modelName).m**
- **(modelName).adm**

Τα τέσσερα παραπάνω αρχεία τοποθετούνται σε κοινό workspace με τον αλγόριθμο που θα αναπτυχθεί στο περιβάλλον Simulink. Για την σύνδεση των δυο προγραμματιστικών περιβαλλόντων, εκτελείται η εντολή στο περιβάλλον Matlab **adams_sys**. Με την εντολή αυτή, το Adams Plant μεταγλωττίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab/Simulink. Το block που αφορά το εξάποδο ρομπότ και το οποίο θα τροφοδοτείται από τον αλγόριθμο δίνεται στο Σχήμα 3-18.



Σχήμα 3-18. Adams Plant στο Περιβάλλον Simulink.

4 Κινηματική ανάλυση εξάποδου ρομπότ

4.1 Εισαγωγή

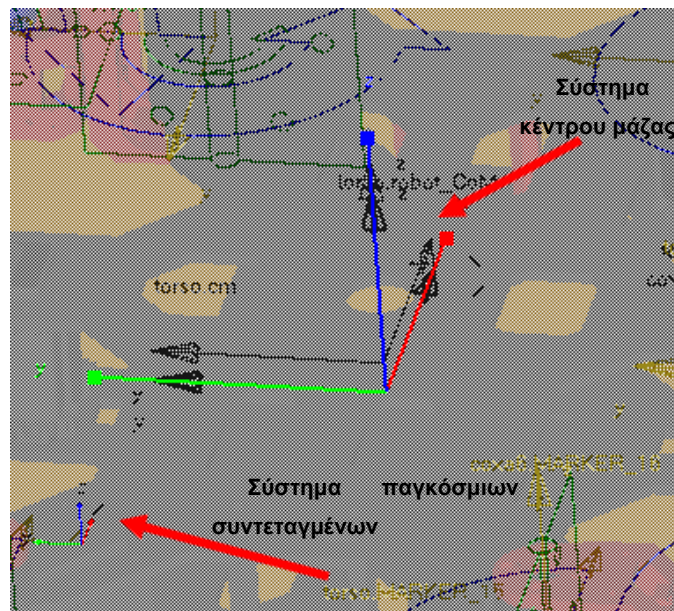
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται η ευθεία και η αντίστροφη κινηματική ανάλυση του ποδιού του εξάποδου ρομπότ. Ακόμη βρίσκονται ο χώρος εργασίας του κάθε ποδιού, υπολογίζεται η τροχιά των πελμάτων του κάθε ποδιού και περιγράφονται οι τρόποι βηματισμού. Τέλος παρατίθεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στο περιβάλλον Matlab/Simulink.

4.2 Παραδοχές

Καθ' όλη την εκτέλεση του αλγορίθμου βηματισμού του εξάποδου ρομπότ, γίνονται οι εξής παραδοχές:

1. Το εξάποδο κινείται στο xy επίπεδο παγκόσμιων συντεταγμένων.
2. Το κέντρο μάζας του εξάποδου κινείται σε ευθύγραμμη πορεία (path) η οποία βρίσκεται πάνω στον άξονα x του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων.
3. Ο άξονας z είναι κάθετος στο επίπεδο xy της κίνησης του εξάποδου, και είναι ο άξονας της βαρύτητας.
4. Η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι $g=-9.81 \text{ m/s}^2$.
5. Ο άξονας y βρίσκεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Στο Σχήμα 4-1 φαίνεται το αντίστοιχο σύστημα παγκόσμιων συντεταγμένων καθώς και το κέντρο μάζας του ρομπότ, όπως αυτό λήφθηκε από το περιβάλλον Adams MSC.



Σχήμα 4-1. Συστήματα παγκόσμιων συντεταγμένων και κέντρου μάζας

4.3 Το ευθύ κινηματικό πρόβλημα

Όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 2 (Adams MSC), τα συστήματα αναφοράς των στροφικών συνδέσμων καθώς και του τελικού σημείου δράσης, τοποθετήθηκαν στο εξάποδο ρομπότ με τέτοιο τρόπο, ώστε να ικανοποιείται η σύμβαση κατά Denavit Hartenberg.

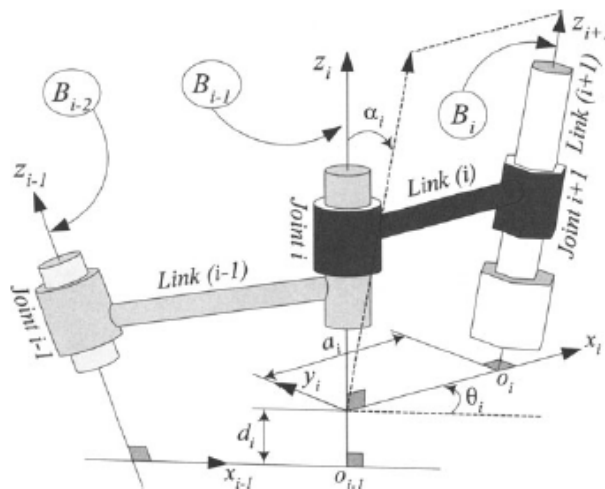
Σύμφωνα με την σύμβαση DH ισχύουν οι εξής κανόνες για την τοποθέτηση των αξόνων:

- Η περιστροφή των στροφικών συνδέσμων γίνεται ως προς τον άξονα z ο οποίος διέρχεται από το κέντρο τους, με φορά που καθορίζεται από το σύστημα μέτρησης της άρθρωσης του χεριού.
- Η τοποθέτηση των συστημάτων αναφοράς στους στροφικούς συνδέσμους είναι τέτοια, ώστε ο άξονας x να είναι παράλληλος στην κοινή κάθετο διαδοχικών συστημάτων αναφοράς.
- Ο άξονας y βρίσκεται από τον τριαδικό κανόνα του δεξιού χεριού.

Με βάση αυτούς τους κανόνες, οι ομογενείς μετασχηματισμοί μεταξύ των συστημάτων κατά DH, μπορούν να βρεθούν με βάση τέσσερις μεταβλητές:

- θ_i = η περιστροφή γύρω από τον άξονα z_{n-1} , που απαιτείται, ώστε ο άξονας x_{n-1} , να συμπίπτει με τον άξονα x_n .
- α_i = η περιστροφή γύρω από τον άξονα x_n , που απαιτείται, ώστε ο άξονας z_{n-1} να συμπίπτει με τον άξονα z_n . Η περιστροφή λαμβάνεται με ως προς το n-1 σύστημα αναφοράς.
- r_i = η απόσταση μεταξύ των συστημάτων αναφοράς n-1, n των στροφικών συνδέσμων, κατά μήκος του x_n άξονα.
- d_i = η απόσταση μεταξύ των συστημάτων αναφοράς n-1, n μετρημένη κατά μήκος του άξονα z_{n-1} .

Οι παραπάνω παραδοχές φαίνονται στο Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2. Η μεθοδολογία Denavit Hartenberg [12].

Ο πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού, για δυο διαδοχικά συστήματα αναφοράς ορίζεται από την σχέση (4-1) :

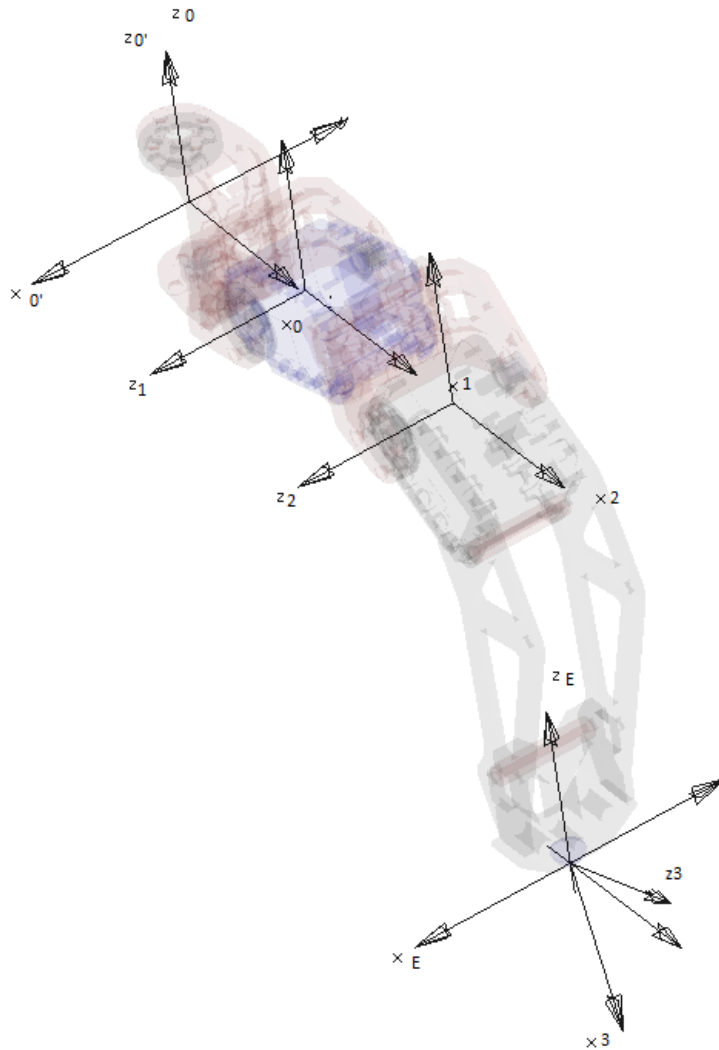
$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_i) & r_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_i) & r_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

όπου με A_i^{i-1} συμβολίζουμε τους ομογενείς πίνακες μετασχηματισμού μεταξύ διαδοχικών συστημάτων αναφοράς. Με βάση τα παραπάνω, για το εξάποδο ρομπότ της παρούσας εργασίας, προκύπτει ο Πίνακας 4-1 κατά DH.

Πίνακας 4-1. Πίνακας μεταβλητών DH.

i (σύστημα)	θ_i (rad)	α_i (rad)	r_i (m)	d_i (m)
A_0^0	$\pi/2$	0	0	0
A_0^1	q_1	0	l_c	0
A_1^2	$q_2 - q_{2_offset}$	0	l_f	0
A_2^3	$q_3 - q_{3_offset}$	0	l_t	0
A_3^E	$-\pi/2$	1.29	0	0

Οι παραπάνω τιμές προέκυψαν με γεωμετρική ανάλυση του εξάποδου ρομπότ. Παρά το γεγονός ότι διαθέτουμε τρεις στροφικές αρθρώσεις σε κάθε πόδι του εξάποδου ρομπότ, παρατηρείται (Πίνακας 4-1) ότι εμφανίζονται πέντε ομογενείς μετασχηματισμοί. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι, το σύστημα αναφοράς της βάσης $R_0(x_0, y_0, z_0)$ έχει τον ίδιο προσανατολισμό με το σύστημα αναφοράς του CoM, $R_B(x_B, y_B, z_B)$, για προγραμματιστικούς λόγους. Επίσης το σύστημα αναφοράς στο πέλμα του ποδιού, $R_E(x_E, y_E, z_E)$, έχει και αυτό τον ίδιο προσανατολισμό με τα συστήματα R_B και R_0 , επομένως πρέπει να γίνει μετασχηματισμός μεταξύ των συστημάτων $R_3(x_3, y_3, z_3)$ και R_E . Τα συστήματα αναφοράς φαίνονται στο Σχήμα 4-3.



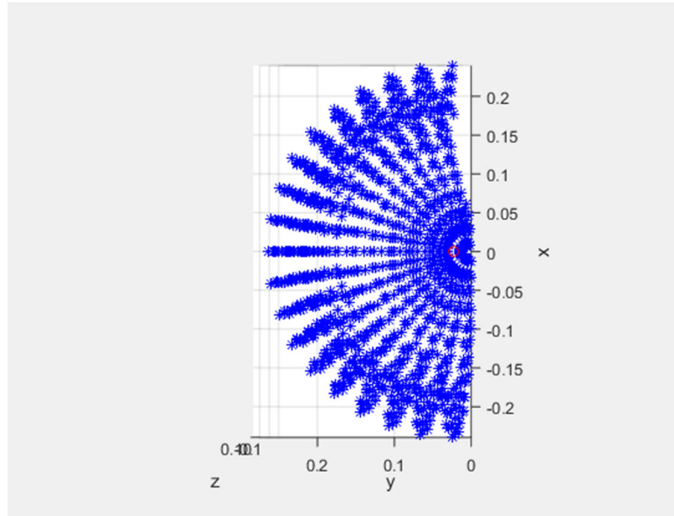
Σχήμα 4-3. Συστήματα αναφοράς κατά DH.

Μετρώντας στο περιβάλλον του Adams, τις γωνίες μετασχηματισμού μεταξύ των διαδοχικών συνδέσμων και λόγω περιορισμών του λογισμικού παρουσιάζονται τιμές offset για τις γωνίες q_2 , q_3 καθώς και οι γωνίες θ_i και α_i για τον μετασχηματισμό $R_3 \rightarrow R_E$. Ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζει τις τιμές offset αυτές.

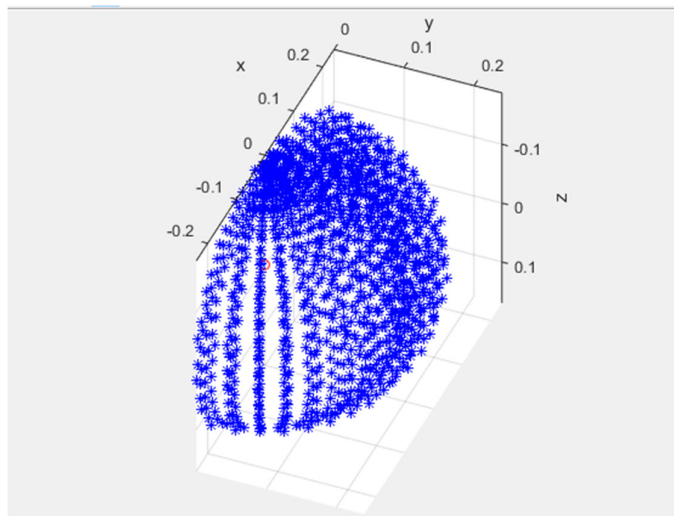
Πίνακας 4-2. Τιμές offset.

offset	Τιμή (rad)
q_{2_offset}	0.0534
q_{3_offset}	1.2645
$R_3 \rightarrow R_E(\theta_i)$	1.29
$R_3 \rightarrow R_E(\alpha_i)$	0

Με την επίλυση του ευθέως κινηματικού προβλήματος, βρίσκεται ο χώρος εργασίας για το κάθε πόδι του εξάποδου ρομπότ. Αν γίνει υπόθεση ότι η στροφική άρθρωση coxa μπορεί να κινηθεί μεταξύ των γωνιών $(-\pi/2, \pi/2)$, η στροφική άρθρωση femur μπορεί να πάρει λογικές για την πλοήγηση τιμές, μεταξύ $(-\pi/2, \pi/2)$, και η στροφική άρθρωση tibia μεταξύ $(-20*\pi/180, 20*\pi/180)$, τότε τα παρακάτω σχήματα δείχνουν τον χώρο εργασίας ενός ποδιού (Σχήμα 4-4 και Σχήμα 4-5).



Σχήμα 4-4. Χώρος εργασίας ποδιού σε xy επίπεδο (κάτοψη).



Σχήμα 4-5. Χώρος εργασίας ποδιού σε xyz χώρο (πλάγια όψη).

Ο αλγόριθμος για την εύρεση του χώρου εργασίας ενός ποδιού δίνεται στο Παράρτημα Β. Με βάση τον χώρο εργασίας, λαμβάνονται οι απαραίτητες τιμές των αξόνων της ελλειπτικής τροχιάς για το πέλμα του ποδιού, έτσι ώστε το κάθε πόδι του εξάποδου ρομπότ, να μην παραβιάζει τον χώρο εργασίας κάποιου άλλου ποδιού.

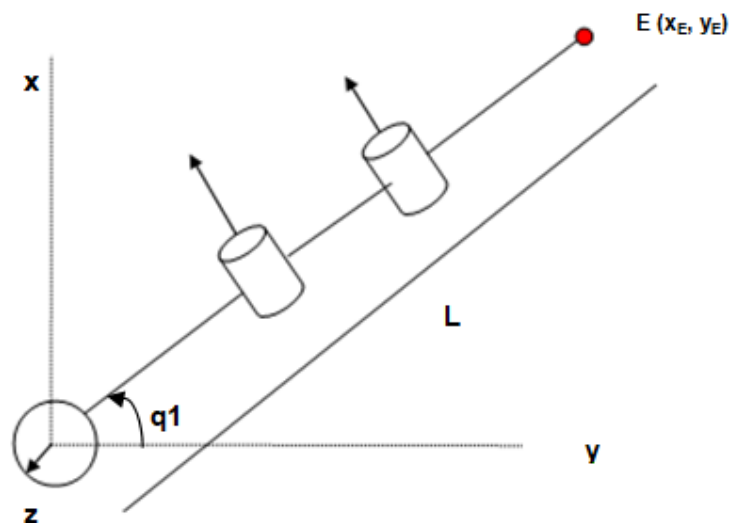
4.4 Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα

Ο υπολογισμός του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος γίνεται γεωμετρικά. Στο Σχήμα 4-6 φαίνεται η κάτοψη ενός ποδιού του εξάποδου ρομπότ στο επίπεδο xy . Με q_1, q_3, q_5 συμβολίζουμε τις στροφικές αρθρώσεις (revolute joints). Ο λόγος της ονοματολογίας των γωνιών ως q_1, q_3, q_5 και όχι q_1, q_2, q_3 είναι γιατί ακολουθείται η αρίθμηση των σερβοκινητήρων του hardware. Τα βέλη συμβολίζουν τους αντίστοιχους άξονες περιστροφής.

Στο Σχήμα 4-6 και στο Σχήμα 4-7 εμφανίζονται τα εξής σύμβολα:

- l_c = length coxa: μήκος συνδέσμου που συνδέει το κέντρο του coxa servo με το κέντρο του femur servo
- l_f = length femur: μήκος συνδέσμου που συνδέει το κέντρο του femur servo με το κέντρο του tibia servo
- l_t = length tibia : μήκος συνδέσμου που συνδέει το κέντρο του tibia servo με το τελικό σημείο δράσης (end-effector), που στην περίπτωση μας είναι το πέλμα του ποδιού.
- f_angle = femur_angle: η γωνία που σχηματίζει το ευθύγραμμο τμήμα (EB) με το σύνδεσμο l_f . Ισούται με την γωνία q_3 .
- t_angle = tibia_angle: η γωνία που σχηματίζει το ευθύγραμμο τμήμα (EK) με τον σύνδεσμο l_t . Ισούται με την γωνία q_5 .

Το τελικό σημείο δράσης φαίνεται με κόκκινο χρώμα σε σχήμα κύκλου. Για σχεδιαστικούς λόγους και για ευκολία του αναγνώστη, οι συμβολισμοί των γωνιών $f_angle, t_angle, A1, B1, A2$ έχουν το ίδιο χρώμα με τις γωνίες που ανήκουν στο Σχήμα 4-7.



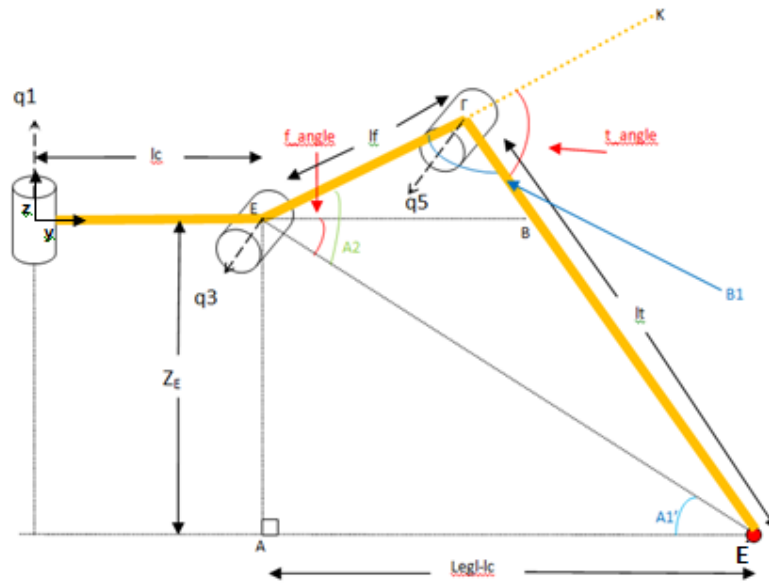
Σχήμα 4-6. Κάτοψη ενός ποδιού στο επίπεδο xy .

Από το Σχήμα 4-6 προκύπτει ότι η γωνία q_1 θα δίνεται κάθε φορά από την εξίσωση (4-2):

$$q_1 = \text{atan}\left(\frac{x_E}{y_E}\right) \quad (4-2)$$

όπου x , y οι συντεταγμένες του πέλματος του ποδιού σε σχέση με το σύστημα αναφοράς της βάσης. Η βάση επιλέγεται ως το σύστημα αναφοράς με κέντρο, το κέντρο της στροφικής άρθρωσης και άξονα z τον άξονα περιστροφής.

Για την εύρεση των τιμών q_3 και q_5 χρησιμοποιούμε την απεικόνιση του ποδιού στο επίπεδο yz όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-7.



Σχήμα 4-7. Το πόδι του εξάποδου ρομπότ στο επίπεδο yz .

Από το Σχήμα 4-7 προκύπτει ότι:

$$\text{Legl} = \sqrt{x_E^2 + y_E^2} \quad (4-3)$$

Από τον νόμο των συνημίτονων στο τρίγωνο (ΕΓΔ) προκύπτει:

$$l_t = l_f^2 + k^2 - 2 \cdot l_f \cdot k \cdot \cos(A_2) \quad (4-4)$$

$$A_2 = \text{acos}\left(\frac{l_t^2 - l_f^2 - k^2}{-2 \cdot l_f \cdot k}\right) \quad (4-5)$$

Από τα παράλληλα ευθύγραμμα (ΕΒ) και (ΑΔ), οι γωνίες A_1 και A_1' είναι ίσες ως εντός εναλλάξ. Από τον νόμο των συνημίτονων, στο τρίγωνο (ΕΒΔ) προκύπτει:

$$A_1' = A_1 = \text{acos}\left(\frac{z_E^2 - (\text{Legl} - l_c)^2 - k^2}{-2 \cdot (\text{Legl} - l_c) \cdot k}\right) \quad (4-6)$$

Η γωνία f_angle ($femur_angle$) ισούται με την γωνία q_3 και δίνεται με βάση των (4-5) και (4-6) από την παρακάτω σχέση:

$$f_ang = q_3 = A_2 - A_1 \quad (4-7)$$

Από τον νόμο των συνημίτονων στο τρίγωνο (ΕΔΓ) προκύπτει για την γωνία B_1 :

$$B_1 = \arccos\left(\frac{k^2 - l_f^2 - l_t^2}{2 \cdot l_f \cdot l_t}\right) \quad (4-8)$$

Η γωνία q_5 θα δίνεται με βάση την (4-8) από την σχέση:

$$q_5 = t_{ang} = \pi - B_1 \quad (4-9)$$

4.5 Βηματισμός κίνησης εξάποδου ρομπότ

Η λογική η οποία ακολουθείται σε κάθε αντίστοιχο βηματισμό (gaits), θέλει συγκεκριμένο αριθμό ποδιών να βρίσκεται στη φάση κίνησης ή αλλιώς ανύψωσης από το έδαφος. Η φάση αυτή ονομάζεται *swing phase* και η διάρκεια της, καθώς και ο αριθμός των ποδιών που μπορούν να βρεθούν σε αυτήν ταυτόχρονα, ποικίλουν ανάλογα με το *gait* στο οποίο βρισκόμαστε. Για την κίνηση του στο επίπεδο μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάθε φορά 3, 2 ή 1 πόδι, στον αέρα, σε κάθε φάση κίνησης, ανάλογα με το *gait* (*tripod*, *tetrapod*, *pentapod*).

Στον υπολειπόμενο χρόνο μέχρι την ολοκλήρωση ενός κύκλου εργασίας του ρομπότ, τα πόδια που βρίσκονταν σε *swing phase*, μεταβαίνουν στην κατάσταση στήριξης του ρομπότ (*stance phase*).

Ο κύκλος εργασίας ενός εξάποδου ρομπότ δίνεται από την σχέση:

$$\beta = \frac{T_{stance}}{T_{stance} + T_{swing}} \quad (4-10)$$

όπου T_{stance} ο χρόνος κατά τον οποίο το πόδι βρίσκεται σε φάση στήριξης και T_{swing} ο χρόνος κατά τον οποίο το πόδι βρίσκεται σε φάση ανύψωσης.

Η μεταβλητή αυτή παίρνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με το *gait* στο οποίο βρισκόμαστε. Στην παρούσα εργασία έχει επιλεγεί η διάρκεια ολοκλήρωσης της κίνησης για τρίποδο *gait* ίση με 1 δευτερόλεπτο, για τετράποδο με 1.5 δευτερόλεπτα και για πεντάποδο με 3 δευτερόλεπτα. Η λογική από την οποία προέκυψαν αυτές οι τιμές είναι ότι τα πόδια που βρίσκονται σε *swing phase* θα ολοκληρώνουν την κίνηση τους σε 0.5 δευτερόλεπτα, ενώ τον υπόλοιπο χρόνο θα

βρίσκονται σε κατάσταση στήριξης. Ο Πίνακας 4-3 παρουσιάζει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ένα μεμονωμένο πόδι σε διάρκεια ενός κύκλου εργασίας.

Πίνακας 4-3. Χρόνοι ανύψωσης και στήριξης για τα διαφορετικά gaits.

Gait	Swing Phase Duration	Stance Phase Duration	B
Tripod	0.5	0.5	1/2
Tetrapod	0.5	1	1/3
Pentapod	0.5	2.5	1/6

4.5.1 Tripod gait

Για την περίπτωση του tripod gait, η ολοκλήρωση της κίνησης απαιτεί 2 φάσεις. Στην πρώτη φάση, η πρώτη τριάδα πατάει στο έδαφος (stance phase), ενώ η δεύτερη βρίσκεται στον αέρα (swing phase). Στην δεύτερη φάση η σειρά εναλλάσσεται.

Οι δυο τριάδες ποδιών θα πρέπει να έχουν τον αντίστοιχο συγχρονισμό προκειμένου να επιτευχθεί ομαλή κίνηση. Η κίνηση σε tripod gait ολοκληρώνεται μετά από 2 φάσεις (Πίνακας 4-4).

Πίνακας 4-4. Φάσεις κίνησης Tripod Gait.

Φάση κίνησης	1 ^η τριάδα	2 ^η τριάδα
Phase1	Swing	Stance
Phase2	Stance	Swing

4.5.2 Tetrapod gait

Αντίστοιχη λογική επικρατεί για την κίνηση σε tetrapod gait, για την εκτέλεση της οποίας απαιτούνται 3 φάσεις κίνησης. Στην πρώτη φάση το πρώτο ζεύγος βρίσκεται στον αέρα, ενώ τα υπόλοιπα 2 ζεύγη είναι στο έδαφος και υποστηρίζουν την κίνηση. Στην δεύτερη φάση το δεύτερο ζεύγος βρίσκεται στον αέρα, ενώ το πρώτο και το τρίτο στο έδαφος. Στην τρίτη φάση το τρίτο ζευγάρι βρίσκεται στον αέρα και τα δυο πρώτα στηρίζουν. Η κίνηση σε τετράποδο gait ολοκληρώνεται σε 3 φάσεις (Πίνακας 4-5).

Πίνακας 4-5. Φάσεις κίνησης Tetrapod Gait.

Φάση κίνησης	1 ^ο ζευγάρι	2 ^ο ζευγάρι	3 ^ο ζευγάρι
Phase 1	Swing	Stance	Stance
Phase 2	Stance	Swing	Stance
Phase 3	Stance	Stance	Swing

4.5.3 Pentapod gait

Για την εκτέλεση της κίνησης σε pentapod gait απαιτούνται 6 φάσεις κίνησης. Κάθε πόδι παραμένει στον αέρα για μια φάση της κίνησης και βρίσκεται στο έδαφος για τις υπόλοιπες 5 (Πίνακας 4-6).

Πίνακας 4-6. Φάσεις κίνησης Pentapod Gait.

Φάση κίνησης	1 ^ο πόδι	2 ^ο πόδι	3 ^ο πόδι	4 ^ο πόδι	5 ^ο πόδι	6 ^ο πόδι
Phase1	Swing	Stance	Stance	Stance	Stance	Stance
Phase2	Stance	Swing	Stance	Stance	Stance	Stance
Phase3	Stance	Stance	Swing	Stance	Stance	Stance
Phase4	Stance	Stance	Stance	Swing	Stance	Stance
Phase5	Stance	Stance	Stance	Stance	Swing	Stance
Phase6	Stance	Stance	Stance	Stance	Stance	Swing

Σε κάθε μια από τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις, ο αριθμός του της τριάδας, ζευγαριού, ή του αύξοντα αριθμού που καθορίζει το κάθε πόδι κίνησης, εξαρτάται από τον τρόπο προγραμματισμού.

4.6 Τροχιά πέλματος

4.6.1 Παραμετροποίηση τροχιάς

Τα πέλματα του εξάποδου ρομπότ ακολουθούν μια συγκεκριμένη τροχιά στον τρισδιάστατο χώρο, προκειμένου το ρομπότ να πλοηγείται. Η μορφή αυτής της τροχιάς ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες πλοήγησης και ευστάθειας του ρομπότ.

Συνήθεις τροχιές που χρησιμοποιούνται στην πλοήγηση των εξάποδων ρομπότ είναι η τριγωνική τροχιά, η ελλειπτική, η κυκλική, καθώς και συνδυασμοί τους [13]. Η τριγωνική τροχιά αποτελείται από δυο ευθύγραμμα τμήματα. Κατά την κίνηση του σε τριγωνική τροχιά το πέλμα του ποδιού αυξάνει την ταχύτητα του μέχρι το μέγιστο ύψος στο οποίο έχει προγραμματιστεί να φτάσει, και στην συνέχεια αλλάζει απότομα το πρόσημο της ταχύτητας προκειμένου να φτάσει και πάλι στο έδαφος [14]. Η τροχιά αυτή καθιστά την πλοήγηση του ρομπότ ιδιαίτερα γρήγορη σε επίπεδα εδάφη, με μεγάλο κόστος όμως στην ευστάθεια του ρομπότ.

Μια πιο συνηθισμένη τροχιά του πέλματος είναι η ελλειπτική τροχιά. Το πέλμα ακολουθεί κατά την διάρκεια της ανύψωσης του από το έδαφος, το επάνω μέρος μιας έλλειψης. Η γραμμική ταχύτητα του, μεταβάλλεται ομαλότερα σε σχέση με την τριγωνική τροχιά, καθώς δεν παρουσιάζονται απότομες αλλαγές κλίσης. Οι παραμετρικές εξισώσεις της ελλειπτικής τροχιάς είναι οι ακόλουθες [15]:

$$x = a \cdot \cos(t) \quad (4-11)$$

$$z = b \cdot \sin(t) \quad (4-12)$$

$$y = \text{constant} \quad (4-13)$$

όπου a , b οι αντίστοιχοι άξονες της έλλειψης και t μια παράμετρος. Στην παρούσα εργασία, η παράμετρος αυτή είναι ο χρόνος t . Προκειμένου το πέλμα του ποδιού να εκτελεί ελλειπτική τροχιά στον τρισδιάστατο χώρο, θα πρέπει να οριστεί και η τρίτη μεταβλητή, y , η οποία και θα πρέπει να παραμένει σταθερή, ώστε το πέλμα να διατηρεί την κίνηση του όσο το δυνατόν στο επίπεδο xz .

Η κυκλική τροχιά ορίζεται με παρόμοιο τρόπο με την ελλειπτική, θέτοντας $a=b=r$, όπου r η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς. Και στις δυο περιπτώσεις, της ελλειπτικής και της κυκλικής τροχιάς σημειώνεται ανωμαλία στα άκρα επαφής με το έδαφος, καθώς στο σημείο αυτό, γίνεται απότομη αλλαγή του πρόσημου ταχύτητας, ώστε το άκρο να παραμείνει στο έδαφος για το υπόλοιπο μισό της κίνησης του. Η ανωμαλία αυτή μπορεί να εξαιρεθεί με συνδυασμό των δυο προηγούμενων τροχιών με κατάλληλο τρόπο, ώστε κατά την προσεδάφισή του ή την απογείωσή του, το πέλμα να εκτελεί ομαλότερες μεταβολές στην ταχύτητά του.

Κατά την διάρκεια της φάσης στήριξης, το πέλμα του εξάποδου ρομπότ, θα πρέπει να βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος, προκειμένου αυτό να μην χάνει την ισορροπία του. Για τον λόγο αυτό, η σχετική κίνηση του πέλματος, ως προς την βάση, θα πρέπει να είναι ευθύγραμμη ομαλή. Η σχετική αυτή κίνηση επιτυγχάνεται με το πέλμα να πατάει στο έδαφος, την δύναμη της τριβής να αντιστέκεται στην κίνηση του, και την πρώτη στροφική άρθρωση (coxa) να μεταβάλει την γωνία της έτσι ώστε κύριο σώμα του ρομπότ να κινείται ευθύγραμμα για ευθεία κίνηση στο επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα αναφοράς στο κέντρο μάζας του εξάποδου ρομπότ, κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση από την οποία κινούνταν κατά την διάρκεια της ελλειπτικής κίνησης, αν ο παρατηρητής τοποθετηθεί στο σύστημα αναφοράς του πέλματος. Η ταχύτητα με την οποία εκτελείται αυτή η σχετική ευθύγραμμη κίνηση, εξαρτάται από το βηματισμό στο οποίο βρίσκεται το ρομπότ κάθε φορά, και η τιμή της είναι τέτοια, ώστε τα πόδια που βρίσκονται σε φάση ανύψωσης, να φτάσουν στον προορισμό τους, πριν τα πέλματα που βρίσκονται σε φάση στήριξης, βρεθούν σε φάση ανύψωσης.

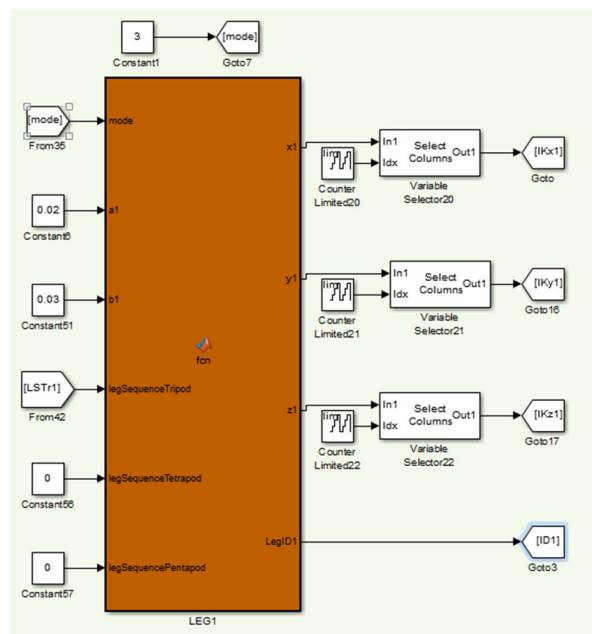
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η παραγωγή ελλειπτικής τροχιάς, και οι σχετικές ευθύγραμμες κινήσεις στις οποίες θα βρίσκονται κάθε φορά τα πέλματα σε φάση στήριξης υπολογίζονται ανάλογα με το βηματισμό και το μέγεθος της ελλειπτικής τροχιάς.

4.6.2 Αλγοριθμική υλοποίηση τροχιάς

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζεται η αλγοριθμική υλοποίηση της τροχιάς του πέλματος του εξάποδου ρομπότ, καθώς και ο τρόπος εξαγωγής των δεδομένων μετά τον υπολογισμό τους, προκειμένου να γίνει περαιτέρω χρήση τους αργότερα. Η υλοποίηση πραγματοποιείται στο περιβάλλον Simulink.

4.6.2.1 LegBlock

Οι συναρτήσεις των τροχιών που αφορούν το κάθε πόδι του εξάποδου παρουσιάζονται στην παρούσα υποενότητα. Για κάθε πόδι υπάρχει και ένα ξεχωριστό block (καφέ χρώμα), το οποίο περιέχει τον αλγόριθμο που αφορά το συγκεκριμένο πόδι. Ο λόγος ο οποίος δίνονται 6 block, ένα για κάθε πόδι, εξυπηρετεί την εκτέλεση των πειραμάτων, καθώς συχνά απαιτείται να τροποποιηθούν οι τροχιές και οι χρόνοι εκτέλεσης της κίνησης διαφορετικών ποδιών. Κάθε block διαθέτει ορισμένες εισόδους και εξόδους όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-8, οι οποίες αποτελούν αντίστοιχα τα δεδομένα τα οποία απαιτούνται για τον υπολογισμό της τροχιάς, καθώς και οι συντεταγμένες της παραγόμενης τροχιάς.



Σχήμα 4-8. Leg Block για παραγωγή τροχιάς

Ξεκινώντας από τα αριστερά, στο Σχήμα 4-8 παρατηρούμε 6 επιμέρους block τα οποία έχουν τις εξής λειτουργίες:

- **Mode block:** Με το block αυτό δίνεται στο block του trajectory, ένα από τα 4 διαθέσιμα modes (λειτουργίες) που μπορεί να βρίσκεται το εξάποδο ρομπότ. Τα modes αυτά είναι: tripod, tetrapod, pentapod, stance, και αντίστοιχα σημαίνουν ότι

το ρομπότ περπατάει με 3 από τα 6 πόδια να στηρίζουν σε κάθε βήμα του, με 4 από τα 6 πόδια να στηρίζουν σε κάθε βήμα του, με 5 από τα 6 πόδια να στηρίζουν σε κάθε βήμα του και το ρομπότ παραμένει στην θέση του ακίνητο. Οι επιτρεπόμενες τιμές είναι 3 (tripod), 4 (tetrapod), 5 (pentapod), και 0 (stance).

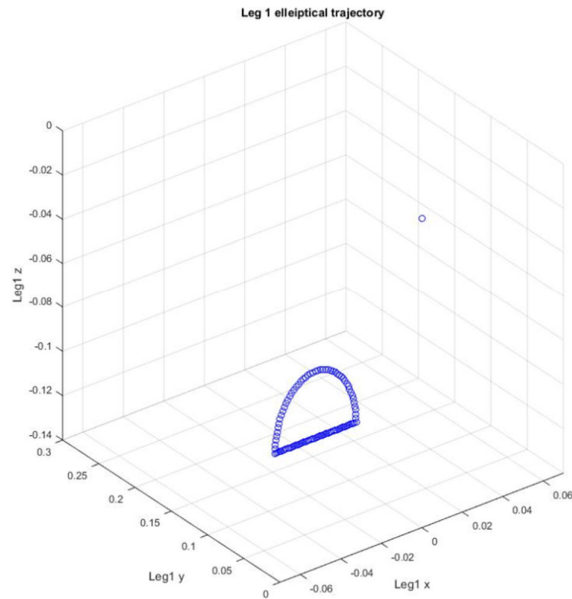
- **a1 block:** block με το οποίο ο χρήστης ή άλλο υποπρόγραμμα εισάγει το μέγιστο a1 άξονα της ελλειπτικής τροχιάς.
- **b1 block:** block με το οποίο ο χρήστης ή άλλο υποπρόγραμμα εισάγει το μέγιστο b1 άξονα της ελλειπτικής τροχιάς.
- **LSTr1 (Leg Sequence Tripod 1) block:** block με το οποίο ο χρήστης ή άλλο υποπρόγραμμα εισάγει την τριάδα κίνησης στην οποία βρίσκεται το πόδι για tripod mode. Λόγω του ότι στο tripod mode τα 6 πόδια κινούνται ανά 3 τριάδες, με το block αυτό καθορίζουμε σε ποια από τις 2 τριάδες θα βρίσκεται το πόδι. Οι επιτρεπόμενες τιμές που μπορούν να εισαχθούν στο block αυτό είναι 1 (πρώτη τριάδα) και 2 (δεύτερη τριάδα).
- **LSTet1 (Leg Sequence Tetrapod 1) block:** block με το οποίο ο χρήστης ή άλλο υποπρόγραμμα εισάγει την τριάδα κίνησης στην οποία βρίσκεται το πόδι για tetrapod mode. Λόγω του ότι στο tetrapod mode τα 6 πόδια κινούνται ανά 2 δυάδες, με το block αυτό καθορίζεται σε ποια από τις 3 δυάδες θα βρίσκεται το πόδι. Οι επιτρεπόμενες τιμές που μπορούν να εισαχθούν στο block αυτό είναι 1 (πρώτο ζευγάρι), 2 (δεύτερο ζευγάρι) και 3 (τρίτο ζευγάρι).
- **LSPen1 (Leg Sequence Pentapod 1) block:** block με το οποίο ο χρήστης ή άλλο υποπρόγραμμα εισάγει την τριάδα κίνησης στην οποία βρίσκεται το πόδι pentapod mode. Λόγω του ότι στο tripod mode τα 6 πόδια κινούνται ανά 1, με το block αυτό καθορίζεται η αλληλουχία με την οποία θα κινηθούν τα πόδια. Οι επιτρεπόμενες τιμές είναι 1 (πρώτο), 2 (δεύτερο), 3 (τρίτο), 4 (τέταρτο), 5 (πέμπτο) και 6 (έκτο).

Στο πρόγραμμα, τα blocks mode και LSTr1 αποτελούν From blocks από την βιβλιοθήκη του Simulink, που σημαίνει ότι η πληροφορία προέρχεται από υποπρογράμματα που θα αναλυθούν στην συνέχεια. Οι τιμές a1, b1, LSTet1, LSPen1 αποτελούν constant blocks, και ο χρήστης μπορεί να εισάγει οποιαδήποτε τιμή επιθυμεί για την προσομοίωση.

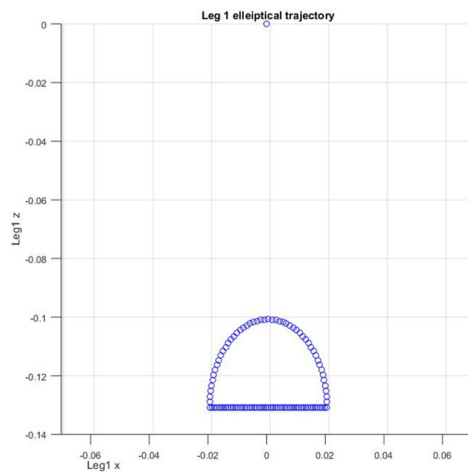
Στο επάνω μέρος του trajectory block υπάρχει ένα constant block και ένα GOTO block με το όνομα mode. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης εισαγάγει στο block τις τιμές που απαιτούνται ώστε το ρομπότ να βρεθεί σε tripod, tetrapod, pentapod και stance mode. Οι επιτρεπόμενες τιμές και εδώ είναι: 3,4,5,0 αντιστοίχως.

Ο αλγόριθμος παραγωγής της ελλειπτικής τροχιάς για 1 πόδι, βρίσκεται στο Παράρτημα Β. Για επιτυχημένη εκτέλεση του αλγορίθμου στο LEG1 block, το άκρο του ποδιού θα πρέπει

να έχει εκτελέσει την άνω περιφέρεια μιας έλλειψης με διαμέτρους $2 \cdot a_1$ και $2 \cdot b_2$. Στο Σχήμα 4-9 και Σχήμα 4-10 φαίνεται η ελλειπτική τροχιά του άκρου του ποδιού στο τρισδιάστατο χώρο και στο επίπεδο xz αντίστοιχα.



Σχήμα 4-9. Ελλειπτική τροχιά στον τρισδιάστατο χώρο.



Σχήμα 4-10. Ελλειπτική τροχιά στο επίπεδο xz.

Από τα διαγράμματα των Σχήμα 4-9 και Σχήμα 4-10 φαίνεται ότι στον άξονα x, το άκρο του ποδιού κινείται σε απόσταση -0.02 έως 0.02 μέτρων, σύμφωνα με την είσοδο a_1 block στο LEG1 block, ενώ στον z άξονα κινείται στο διάστημα -0.01 έως 0.01. Παρατηρεί κανείς ότι

στον z άξονα προστίθεται ο παράγοντας $z_i = -0.1328$, ο οποίος αντιστοιχεί στην απόσταση του άκρου ως προς τον άξονα z, από το σημείο το οποίο λαμβάνεται ως βάση του ποδιού. Η γεωμετρία του ποδιού και ο τρόπος μέτρησης από την βάση, αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.

4.6.3 Επιλογή Mode και Leg Sequence

Ξεκινώντας την ανάλυση του αλγορίθμου από την γραμμή 24 όπως φαίνεται στο Παράρτημα Β, ένα if statement χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του mode στο οποίο βρισκόμαστε. Αν για παράδειγμα, η τιμή mode ισούται με 3, τιμή την οποία και λαμβάνει από το mode block που περιγράφηκε, τότε ο αλγόριθμος ξεκινάει την παραγωγή trajectory του άκρου για tripod mode.

Η γραμμή 25 περιέχει μια εμφωλευμένη εντολή if, με την οποία γίνεται έλεγχος των τιμών που εισάγονται με τα blocks LSTr1, LSTet1, LSPen1. Οι τιμές των εισόδων αποθηκεύονται στις μεταβλητές legSequenceTripod, legSequenceTetrapod και legSequencePentapod αντίστοιχα, και καθορίζουν την τριάδα, το ζεύγος ή την σειρά με την οποία τα πόδια θα βρίσκονται σε φάση ανύψωσης. Οι επιτρεπόμενες τιμές είναι για το legSequenceTripod, 1 και 2, που σημαίνει ότι το πόδι θα βρίσκεται στην πρώτη ή την δεύτερη τριάδα κίνησης αντίστοιχα, για το legSequenceTetrapod, 1, 2 και 3, που σημαίνει ότι το πόδι θα βρίσκεται στο πρώτο, δεύτερο ή τρίτο ζευγάρι κίνησης, και για το legSequencePentapod, 1, 2, 3, 4, 5 και 6, που σημαίνει ότι το πόδι που βρίσκεται σε φάση ανύψωσης θα καθορίζεται από αυτή την σειρά.

Για παράδειγμα, για να εκτελεστεί ο αλγόριθμος παραγωγής pentapod mode trajectory, θα πρέπει οι τιμές του LSPen1 να είναι 1, 2, 3, 4, 5 ή 6, και οι υπόλοιπες τιμές LSTet1 και LSTr1 να είναι μηδενικές. Για να βρίσκεται το πόδι σε σειρά 4^ο σε φάση ανύψωσης, θα πρέπει LSPen1=4. Με αυτή την λογική εκτελούνται και οι αριθμήσεις για όλα τα modes και για κάθε συγχρονισμό των ποδιών.

4.6.4 Το δiάνυσμα χρόνου

Μετά από πειραματικές διατάξεις και πληθώρα αλγορίθμων, η παραγωγή του επιθυμητού trajectory γίνεται με την χρήση for loop. Το προγραμματιστικό περιβάλλον του Simulink είναι απαγορευτικό προς την χρήση for loop. Για την παραγωγή της τροχιάς με την χρήση for loop ακολουθείται η λογική:

Κατά την διάρκεια εκτέλεσης της for loop στο εσωτερικό του LEG1 block, οι μεταβλητές x,y,z που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες του πέλματος, λαμβάνουν κάποιες τιμές, το πλήθος των οποίων καθορίζεται από το μέγιστο του επαναλήπτη (iterator). Ο Πίνακας 4-7 παρουσιάζει τις τιμές του επαναλήπτη, όπως καθορίζονται από την διάρκεια και το είδος του κάθε βηματισμού.

Πίνακας 4-7. Αριθμός επαναλήψεων για κάθε gait.

Gait	Διάρκεια (s)	Επαναλήψεις
Tripod	1	101
Tetrapod	1.5	151
Pentapod	3	301

Ο αριθμός των επαναλήψεων για κάθε βηματισμό, ισούται με την διάρκεια σε δευτερόλεπτα, πολλαπλασιασμένη επί 100, συν 1 επανάληψη (Πίνακας 4-7). Ο λόγος που οι επαναλήψεις παίρνουν αυτές τις τιμές οφείλεται στο περιβάλλον Matlab. Το περιβάλλον μπορεί να ξεκινήσει την τοποθέτηση δεικτών σε arrays, από την τιμή 1 (one-based indexing) και όχι από το 0 (zero-based indexing). Οι παραμετροποιημένες μεταβλητές θα πρέπει να λαμβάνουν τιμή και για μηδενικές τιμές της παραμέτρου τους, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο χρόνος.

Για τον σκοπό αυτό, δημιουργούμε ένα διάνυσμα εικονικού χρόνου t , στο οποίο αποθηκεύεται ο εικονικός χρόνος για την παραγωγή του trajectory. Ο εικονικός χρόνος δημιουργείται με την εξίσωση (4-14):

$$t(i) = \frac{i}{100} - 0.01 \quad (4-14)$$

που σημαίνει ότι για κάθε αύξηση του δείκτη i των χρησιμοποιούμενων for loop, το διάνυσμα του χρόνου θα αυξάνει κατά 0.01 εικονικά δευτερόλεπτα και θα παίρνει τιμές από 0 μέχρι 0.99 δευτερόλεπτα. Με την αφαίρεση της ποσότητας 0.01 από κάθε τιμή του εικονικού χρόνου t , ουσιαστικά γίνεται mapping του των τιμών της i μεταβλητής των for loop (1-100) στις τιμές του εικονικού χρόνου $t(0-0.99)$, και προσομοιώνεται ένα δευτερόλεπτο χρόνου, χωρισμένο στην περίπτωση μας σε 100 ίσα διαστήματα.

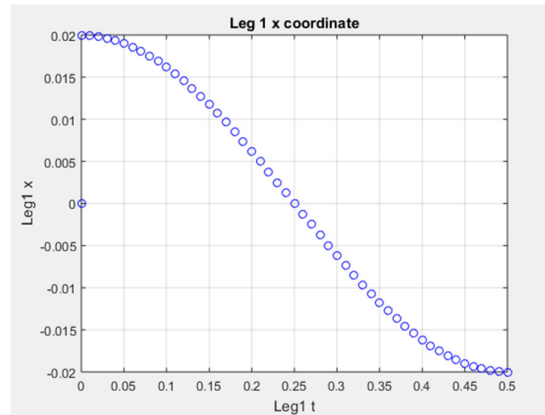
Εάν δεν είχε χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (4-14), οι μεταβλητές x και z , δεν θα είχαν τιμή στο πεδίο τιμών για $t=0$, αλλά το πεδίο τιμών τους θα ξεκινούσε με τιμή για $t=0.01$, γεγονός που δημιουργεί μετέπειτα σφάλματα.

4.6.5 Tripod Gait Trajectory

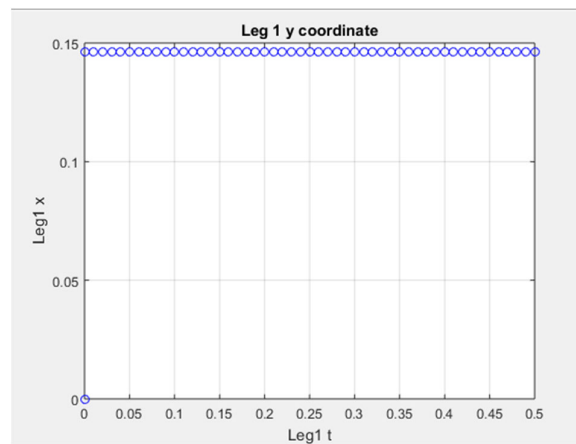
4.6.5.1 Το ελλειπτικό trajectory πρώτης τριάδας (1^η φάση κίνησης)

Για την κίνηση του ρομπότ στον άξονα x , θα πρέπει τα έξι πόδια του να εκτελούν ελλειπτική κίνηση στο επίπεδο xz , ενώ στον άξονα y , τα άκρα θα πρέπει να διατηρούν σταθερή τιμή της συντεταγμένης τους, προκειμένου το ρομπότ να μην αποκλίνει από τον άξονα x .

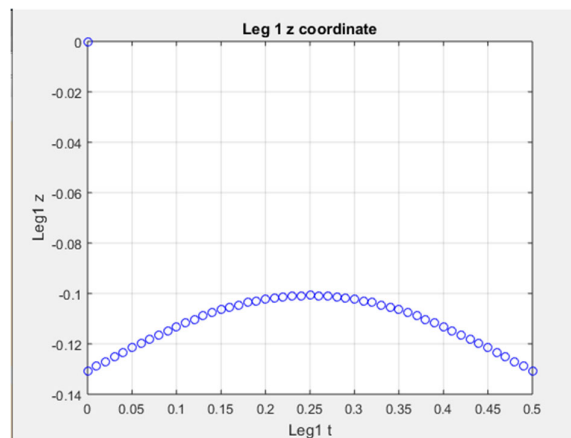
Το Σχήμα 4-11, το Σχήμα 4-12, και το Σχήμα 4-13 περιέχουν τα σημεία από τα οποία διέρχεται το άκρο του ποδιού (πέλμα) για κάθε άξονα xyz σε συνάρτηση του χρόνου t .



Σχήμα 4-11. x συντεταγμένη του πέλματος.



Σχήμα 4-12. y συντεταγμένη του πέλματος.



Σχήμα 4-13. z συντεταγμένη του πέλματος.

4.6.5.2 Ευθύγραμμη κίνηση πρώτης τριάδας (2^η φάση κίνησης)

Προκειμένου το εξάποδο να κινείται ευθύγραμμα, θα πρέπει η πρώτη φάση του βήματος της πρώτης τριάδας να είναι ελλειπτική τροχιά όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη

υποενοότητα. Στην πρώτη φάση της τροχιάς της πρώτης τριάδας το πόδι έχει εκτελέσει ανύψωση από το έδαφος, μετακίνηση στον αέρα σε έλλειψη και προσεδάφιση στην συνέχεια.

Μετά την προσεδάφιση τους, τα πόδια της πρώτης τριάδας κίνησης, θα πρέπει να παραμείνουν στο έδαφος έως ότου τα πόδια της δεύτερης τριάδας να εκτελέσουν και αυτά την ελλειπτική τους κίνηση (1^η φάση κίνησης). Κατά την παραμονή τους στο έδαφος, τα πόδια της πρώτης τριάδας, θα πρέπει να ωθούν ταυτόχρονα το σώμα του ρομπότ (torso) ευθεία εμπρός. Για τον λόγο αυτό τα άκρα του ποδιού, θα πρέπει να κινηθούν ευθύγραμμα στον άξονα x σχετικά με το σημείο πρόσδεσης, ενώ στους άξονες z και y θα πρέπει να διατηρούν σταθερές συντεταγμένες. Το 2^ο μέρος της κίνησης είναι σημαντικό για την ομαλή εκτέλεση του αλγορίθμου και τον ορθό βηματισμό του ρομπότ. Την στιγμή που το άκρο του ποδιού (πέλμα) έχει εκτελέσει την κίνηση του στον αέρα, θα πρέπει πατώντας στο έδαφος, να ξεκινήσει μια ευθύγραμμη ομαλή κίνηση. Η ταχύτητα αυτής της κίνησης είναι τέτοια ώστε, καθώς το πόδι φτάνει και πάλι στην αρχική του θέση, τα πόδια της επόμενης τριάδας να έχουν προλάβει να ολοκληρώσουν και αυτά την κίνηση τους στον αέρα.

Οι εξισώσεις (4-16), (4-17) και (4-18) που αφορούν την 2^η φάση της κίνησης προκύπτουν ως εξής: η συντεταγμένη x του άκρου του ποδιού θα πρέπει να επιστρέψει στην αρχική της θέση ($a_1=0.02$ m), ως προς την βάση coxa-torso. Οι συντεταγμένες του ποδιού y και z θα πρέπει να διατηρούνται σταθερές έτσι ώστε το άκρο να παραμένει στο έδαφος ($z=-0.1328$) και να μην αποκλίνει από την ευθύγραμμη ως προς τον x άξονα πορεία του ($y=σταθερό$). Επιλύοντας τις γνωστές σχέσεις για την ευθύγραμμη ομαλή κίνηση του άκρου, μεταξύ δυο οποιοδήποτε σημείων προκύπτει ότι η συντεταγμένη x θα δίνεται από την γενικευμένη εξίσωση:

$$x - x_1 = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \cdot (t - t_1) \quad (4-15)$$

όπου, x_1 είναι ένα οποιοδήποτε σημείο της ευθείας γραμμής, x_2 είναι το σημείο τέλους της ευθείας, t_1 και t_2 είναι οι χρόνοι κατά τους οποίους το άκρο του ποδιού βρίσκεται στα σημεία x_1 και x_2 αντίστοιχα. Στην περίπτωση του τρίποδου βηματισμού, η εξίσωση (4-16) προκύπτει για $x_1=-a_1$, $x_2=a_1$, $t_1=0.5$ s, $t_2=1$ s. Οι εξισώσεις κίνησης του άκρου του ποδιού για το 2^η φάση κίνησης του άκρου του ποδιού έχουν την εξής μορφή:

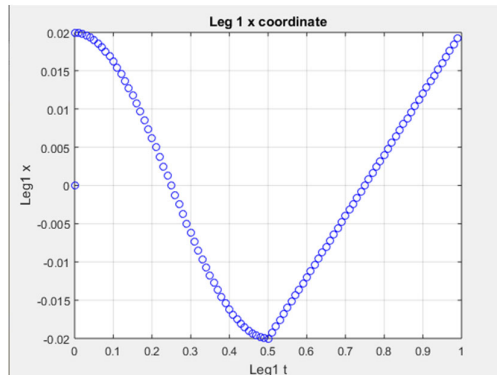
$$x_1 = 4 \cdot a_1 \cdot t(i) - 3 \cdot a_1 \quad (4-16)$$

$$y_1 = 0.1465 \quad (4-17)$$

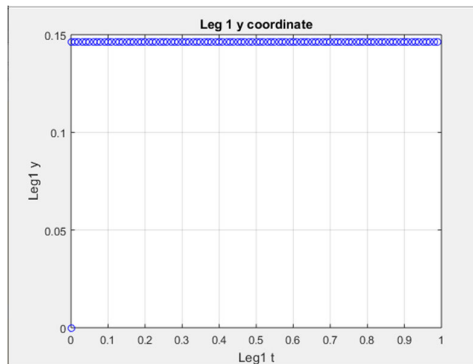
$$z_1 = -0.1328 \quad (4-18)$$

Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του άκρου του ποδιού, θα δίνεται από την κλίση της ευθείας (4-15) , και εξαρτάται κάθε φορά από τον χρόνο στον οποίο το πόδι θα πρέπει να την διατρέξει, καθώς και το μέγεθος του άξονα a_1 της ελλειπτικής τροχιάς.

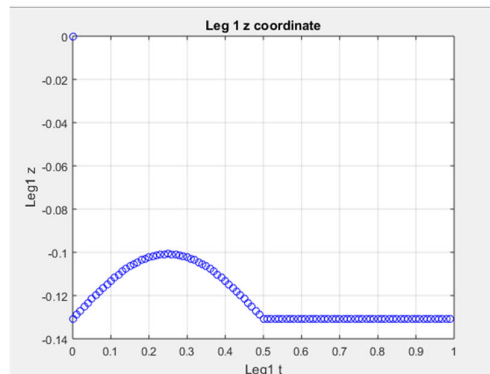
Το Σχήμα 4-14, το Σχήμα 4-15 και το Σχήμα 4-16 παρουσιάζουν τις τελικές μορφές των συντεταγμένων xyz του άκρου του ποδιού της πρώτης τριάδας μετά από εκτέλεση της κίνησης, σε διάστημα χρόνου 1 δευτερόλεπτο.



Σχήμα 4-14. x συντεταγμένη του πέλματος για τις δυο φάσεις της κίνησης.



Σχήμα 4-15. y συντεταγμένη του πέλματος για τις δυο φάσεις της κίνησης.



Σχήμα 4-16. z συντεταγμένη του πέλματος για τις δυο φάσεις της κίνησης.

4.6.5.3 Το ελλειπτικό trajectory δεύτερης τριάδας (1^ο και 2^ο μισό κίνησης)

Σε αντιστοιχία με την πρώτη τριάδα, τα πόδια της δεύτερης τριάδας εκτελούν στις αντίστοιχες φάσεις κίνησης της πρώτης τριάδας (swing/stance phase), την αντίθετη φάση κάθε φορά (stance/swing). Επομένως κατά την διάρκεια της swing φάσης της 1^{ης} τριάδας, η 2^η τριάδα θα πρέπει βρίσκεται στην stance phase, με το πέλμα του ποδιού να εκτελεί ευθύγραμμη κίνηση. Με τον ίδιο τρόπο όπως και για το trajectory της 1^{ης} τριάδας, υπολογίζονται οι εξισώσεις κίνησης του πέλματος για τις δυο φάσεις κίνησης. Αυτές δίνονται παρακάτω:

$$x_1 = 4 \cdot a_1 \cdot t(i) \quad (4-19)$$

$$y_1 = 0.1465 \quad (4-20)$$

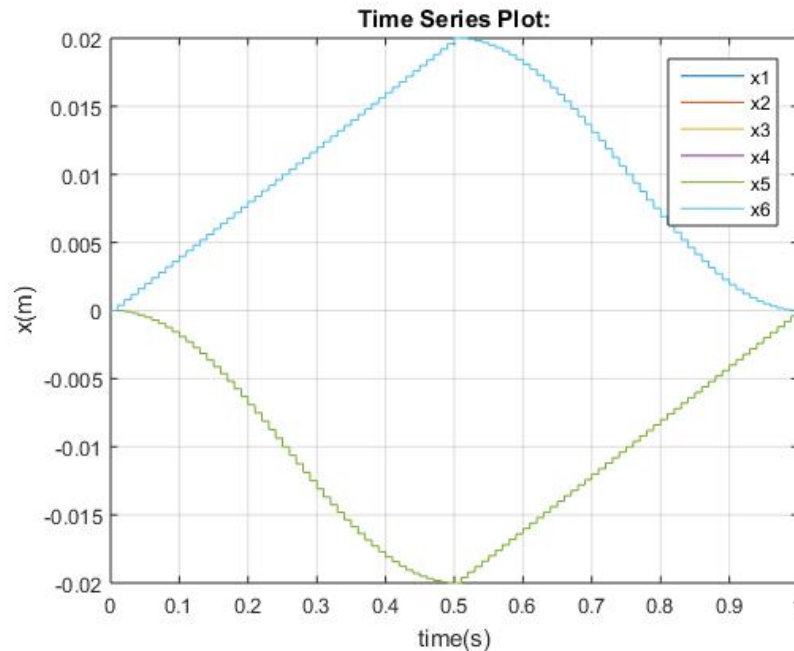
$$z_1 = -0.1328 \quad (4-21)$$

$$x_1 = -a_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t(i)) + a_1 \quad (4-22)$$

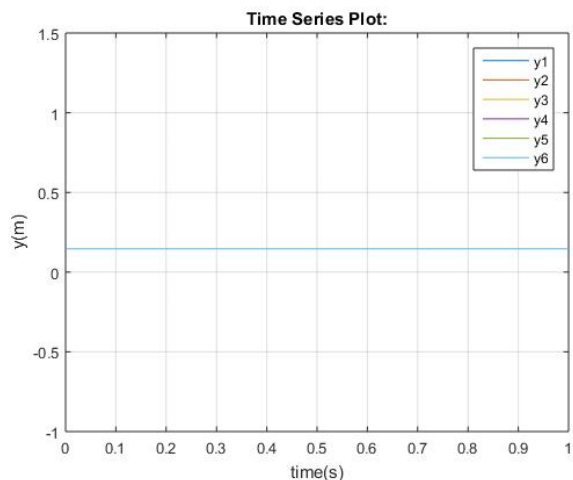
$$y_1 = 0.1465 \quad (4-23)$$

$$z_1 = -b_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t(i)) - 0.1328 \quad (4-24)$$

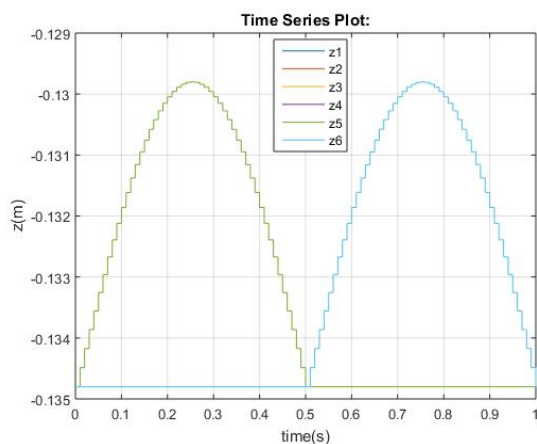
Εκτελώντας τον αλγόριθμο για κίνηση του εξάποδου ρομπότ για διάστημα ενός δευτερολέπτου, με τριάδες κίνησης να απαρτίζονται από τα πόδια (1, 3, 5) και (2, 4, 6) προκύπτουν τα διαγράμματα των σχημάτων για τα άκρα των 2 τριάδων, αν ο παρατηρητής βρίσκεται στην βάση του κάθε ποδιού (σημείο πρόσδεσης coxa-torso).



Σχήμα 4-17. x συντεταγμένη των δυο τριάδων.



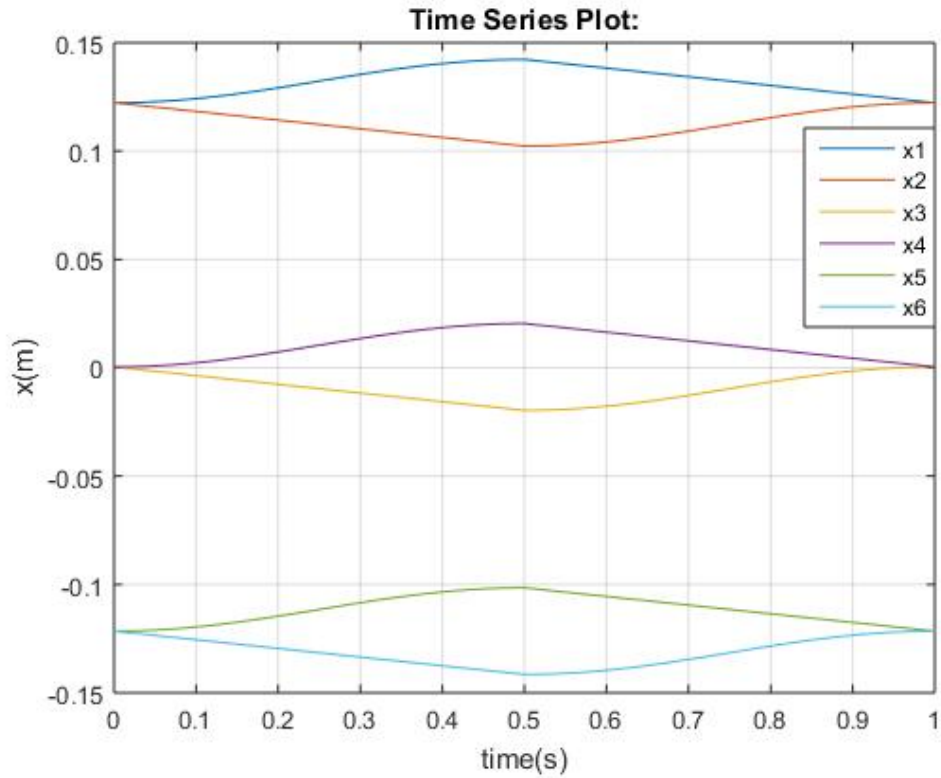
Σχήμα 4-18. y συντεταγμένη των δυο τριάδων



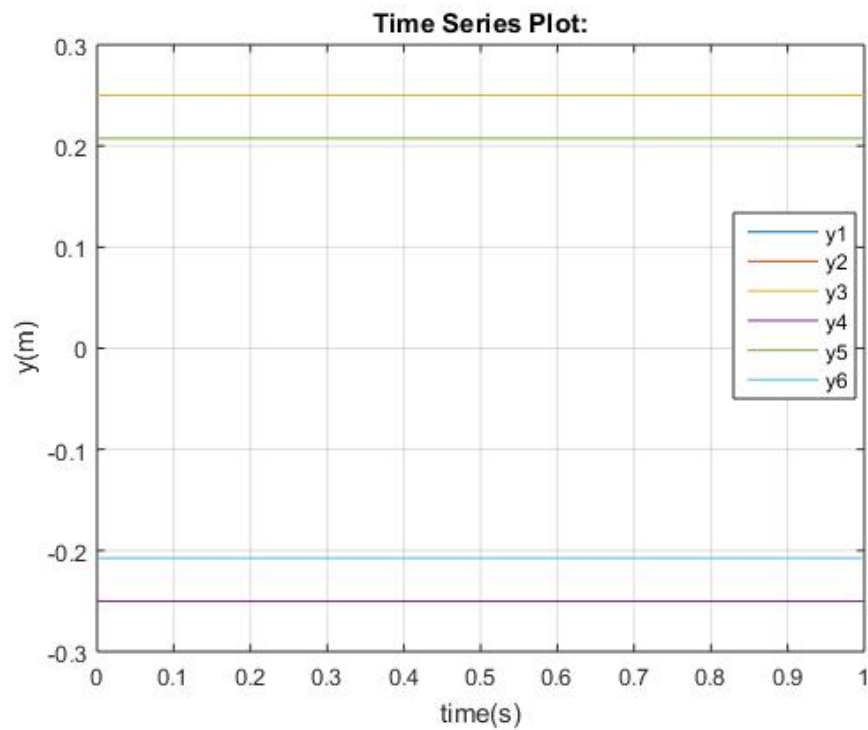
Σχήμα 4-19. z συντεταγμένη των δυο τριάδων

Στο Σχήμα 4-17, στο Σχήμα 4-18 και στο Σχήμα 4-19 παρατηρείται η συμμετρία των τροχιών για τις δύο τριάδες κίνησης. Το γεγονός ότι οι κυματομορφές παρουσιάζουν διαβαθμίσεις οφείλεται στον χρόνο δειγματοληψίας (t) όπως αυτός περιγράφηκε στην Ενότητα 4.6.4.

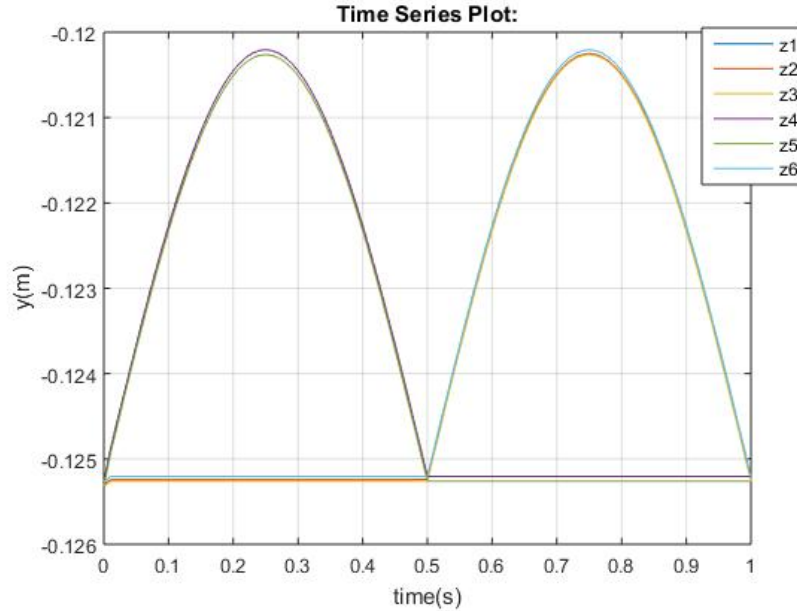
Στο Σχήμα 4-20, στο Σχήμα 4-21 και στο Σχήμα 4-22 φαίνονται οι συντεταγμένες των πελμάτων όταν ο παρατηρητής βρίσκεται στο κέντρο μάζας του εξάποδου ρομπότ. Οι διαφορές σε σχέση με το Σχήμα 4-17, το Σχήμα 4-18 και το Σχήμα 4-19 οφείλονται στις αποστάσεις των πελμάτων από το κέντρο μάζας (Πίνακας 3-7).



Σχήμα 4-20. x συντεταγμένες τρίποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).



Σχήμα 4-21. y συντεταγμένες τρίποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).



Σχήμα 4-22. z συντεταγμένες τρίποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).

Παρατηρώντας το Σχήμα 4-22, φαίνονται μικρές διαφορές στο μέγιστο και το ελάχιστο των z συντεταγμένων των πελμάτων. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος λογαριάζει το έδαφος ως συμπαγές σώμα και όχι ως μοντέλο ελατηρίου-αποσβεστήρα.

4.6.6 Tetrapod gait trajectory

Για την παραγωγή των τροχιών των πελμάτων σε τετράποδο βηματισμό ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με το τρίποδο βηματισμό. Στην περίπτωση αυτή η κίνηση διαιρείται σε τρία ζεύγη ποδιών τα οποία συγχρονίζονται για την μετατόπιση του ρομπότ. Οι εξισώσεις για κάθε φάση κίνησης του τετράποδου βηματισμού και τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται στην συνέχεια.

4.6.6.1 Τροχιά πρώτου ζευγαριού κίνησης

Η τροχιά του πρώτου ζευγαριού κίνησης ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση το πέλμα εκτελεί την ελλειπτική τροχιά για μισό δευτερόλεπτο, και στην δεύτερη το πέλμα εκτελεί την ευθύγραμμη σχετική κίνηση του ως προς τον άξονα x για ένα δευτερόλεπτο, με παρατηρητή στο σημείο πρόσδεσης. Οι εξισώσεις αφορούν στην κίνηση των πελμάτων του πρώτου ζευγαριού.

Πρώτη φάση

$$x = a \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t) - a$$

(4-25)

$$z = b \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) - 0.1348 \quad (4-26)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-27)$$

Δεύτερη
φάση

$$x = 2 \cdot a \cdot t - 3 \cdot a \quad (4-28)$$

$$z = -0.1348 \quad (4-29)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-30)$$

4.6.6.2 Τροχιά δεύτερου ζευγαριού κίνησης

Η τροχιά του δεύτερου ζευγαριού εκτελείται σε τρεις φάσεις. Στην πρώτη φάση τα πέλματα βρίσκονται σε φάση στήριξης για μισό δευτερόλεπτο, προκειμένου τα πέλματα της πρώτης φάσης να ολοκληρώσουν την ελλειπτική κίνηση τους. Στην δεύτερη φάση τα πέλματα εκτελούν ελλειπτική κίνηση. Στην τρίτη φάση τα πέλματα του δεύτερου ζευγαριού επιστρέφουν σε φάση στήριξης προκειμένου τα πέλματα του τρίτου ζευγαριού να εκτελέσουν την ελλειπτική τροχιά τους. Οι εξισώσεις συνθέτουν την τροχιά του δεύτερου ζευγαριού.

Πρώτη φάση $x = 2 \cdot a \cdot t \quad (4-31)$

$$z = -0.1348 \quad (4-32)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-33)$$

Δεύτερη φάση $x = -\alpha \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t) \quad (4-34)$

$$z = -b \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) - 0.1348 \quad (4-35)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-36)$$

Τρίτη φάση $x = 2 \cdot \alpha \cdot t - 3 \cdot a \quad (4-37)$

$$z = -0.1348 \quad (4-38)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-39)$$

4.6.6.3 Τροχιά τρίτου ζευγαριού κίνησης

Για το τρίτο ζευγάρι κίνησης, η κίνηση ολοκληρώνεται σε δυο φάσεις. Στην πρώτη φάση το τρίτο ζευγάρι στηρίζεται στο έδαφος προκειμένου το πρώτο και το δεύτερο ζευγάρι να ολοκληρώσουν την κίνηση, και στην δεύτερη φάση το τρίτο ζευγάρι εκτελεί την ελλειπτική κίνηση του.

Πρώτη φάση $x = 2a \cdot t \quad (4-40)$

$$z = -0.1348 \quad (4-41)$$

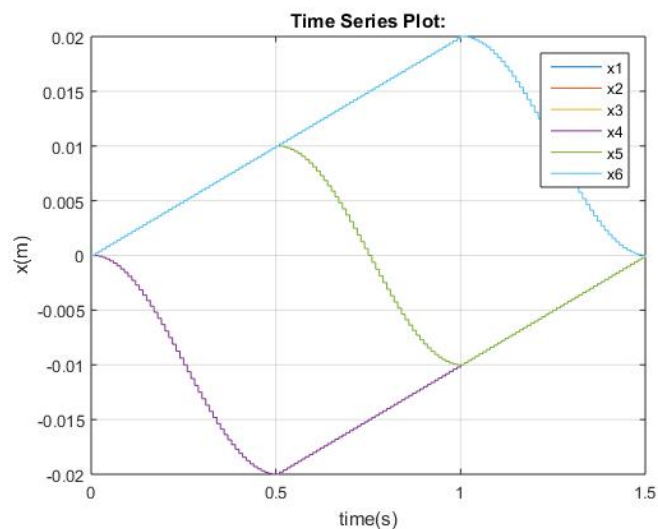
$$y = 0.1465 \quad (4-42)$$

Δεύτερη φάση $x = \alpha \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t) + \alpha \quad (4-43)$

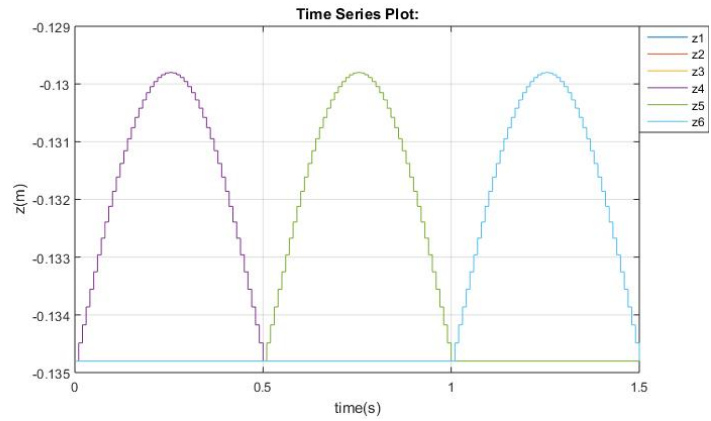
$$z = b \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) - 0.1348 \quad (4-44)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-45)$$

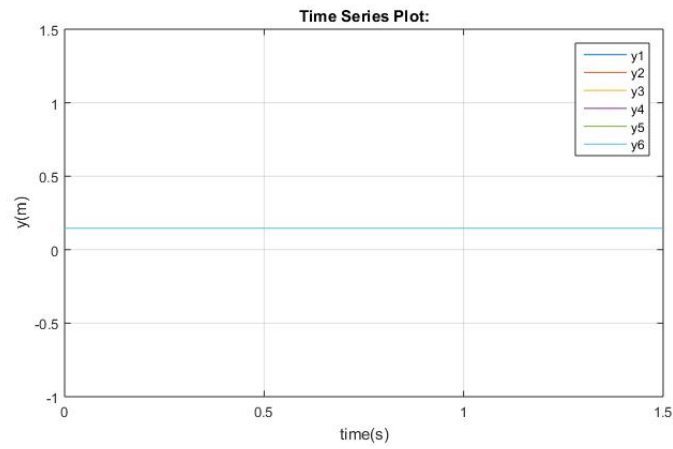
Τα διαγράμματα δείχνουν τις τροχιές των πελμάτων των ζευγαριών με παρατηρητή στο σημείο πρόσδεσης, αλλά και κέντρο μάζας.



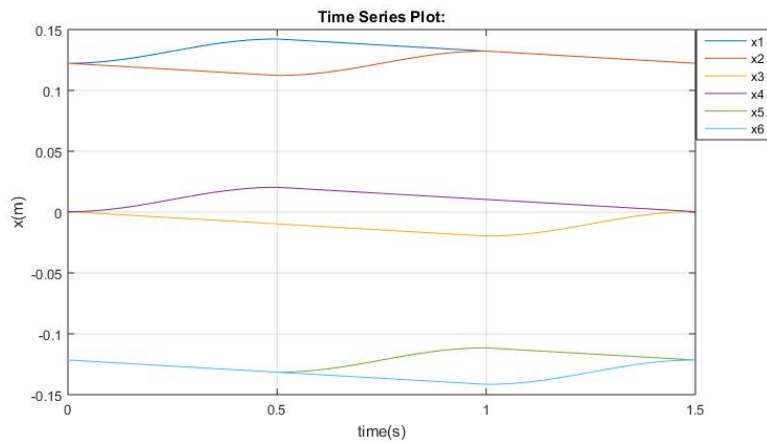
Σχήμα 4-23. x συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού.



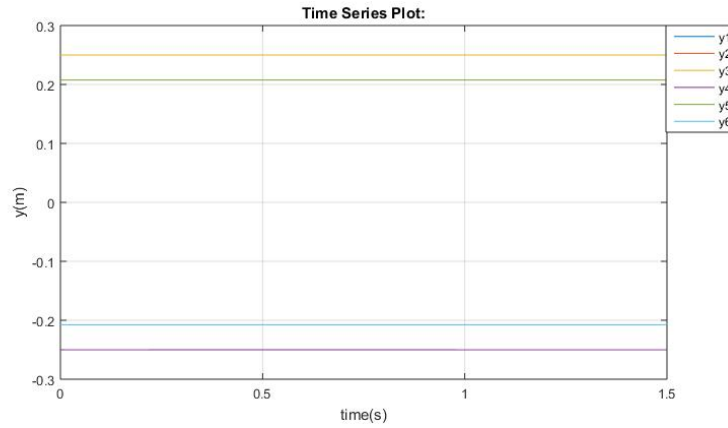
Σχήμα 4-24. z συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού.



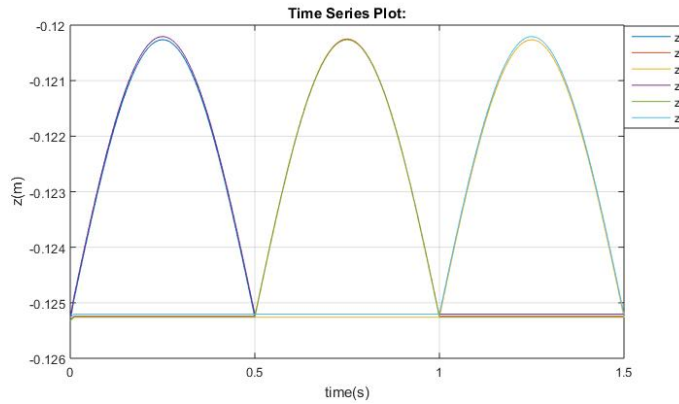
Σχήμα 4-25. y συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού.



Σχήμα 4-26. x συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).



Σχήμα 4-27. y συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).



Σχήμα 4-28. z συντεταγμένες τετράποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).

4.6.7 Pentapod gait Trajectory

Για την ολοκλήρωση της κίνησης σε πεντάποδο βηματισμό απαιτείται το κάθε πόδι να ολοκληρώνει μεμονωμένη κίνηση. Η διαδικασία της κίνησης ολοκληρώνεται με τα έξι πέλματα να έχουν εκτελέσει την ξεχωριστή τροχιά τους.

4.6.7.1 Πρώτο πόδι κίνησης

Η κίνηση ολοκληρώνεται σε 2 φάσης. Η πρώτη φάση είναι η ελλειπτική τροχιά και η δεύτερη η φάση στήριξης.

$$\text{Πρώτη φάση} \quad x = a \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t) - a \quad (4-46)$$

$$z = b \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) - 0.1348 \quad (4-47)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-48)$$

Δεύτερη φάση $x = \frac{4}{5} \cdot a \cdot t - \frac{12}{5} \cdot a$ (4-49)

$$z = -0.1348 \quad (4-50)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-51)$$

4.6.7.2 Δεύτερο πόδι κίνησης

Για τα πόδια με σειρά κίνησης 2^ο, 3^ο, 4^ο και 5^ο η κίνηση ολοκληρώνεται σε τρεις φάσεις. Στην πρώτη φάση τα πόδια στηρίζουν το σώμα στο έδαφος, στην δεύτερη φάση τα πόδια εκτελούν την ελλειπτική τους κίνηση και στην τρίτη φάση τα πόδια επιστρέφουν στην φάση στήριξης. Τα πόδια βρίσκονται σε διαφορά φάσης ως προς την ελλειπτική τους κίνηση, τέτοια ώστε το χρονικό διάστημα ανάμεσα στις διαδοχικές ελλειπτικές κινήσεις να ισούνται με μισό δευτερόλεπτο. Οι ευθύγραμμες κινήσεις τους προσαρμόζονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ομαλή μετάβαση του πέλματος από την μια φάση στην επόμενη.

Πρώτη φάση $x = 2 \cdot a \cdot t$ (4-52)

$$z = -0.1348 \quad (4-53)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-54)$$

Δεύτερη φάση $x = -a \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t)$ (4-55)

$$z = b \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) - 0.1348 \quad (4-56)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-57)$$

Τρίτη φάση $x = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t) - \frac{3}{2} a$ (4-58)

$$z = -0.1348 \quad (4-59)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-60)$$

4.6.7.3 Τρίτο πόδι κίνησης

Πρώτη φάση $x = \alpha \cdot t$ (4-61)

$$z = -0.1348 \quad (4-62)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-63)$$

Δεύτερη φάση $x = a \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t)$ (4-64)

$$z = b \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) - 0.1348 \quad (4-65)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-66)$$

Τρίτη φάση $x = \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot t - 2 \cdot a$ (4-67)

$$z = -0.1348 \quad (4-68)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-69)$$

4.6.7.4 Τέταρτο πόδι κίνησης

Πρώτη φάση $x = \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot t$ (4-70)

$$z = -0.1348 \quad (4-71)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-72)$$

Δεύτερη φάση $x = -a \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t)$ (4-73)

$$z = b \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) - 0.1348 \quad (4-74)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-75)$$

Τρίτη φάση $x = \alpha \cdot t - 3 \cdot a$ (4-76)

$$z = -0.1348 \quad (4-77)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-78)$$

4.6.7.5 Πέμπτο πόδι κίνησης

Πρώτη φάση $x = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot t \quad (4-79)$

$$z = -0.1348 \quad (4-80)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-81)$$

Δεύτερη φάση $x = a \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t) \quad (4-82)$

$$z = b \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) - 0.1348 \quad (4-83)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-84)$$

Τρίτη φάση $x = 2 \cdot \alpha \cdot t - 6 \cdot a \quad (4-85)$

$$z = -0.1348 \quad (4-86)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-87)$$

4.6.7.6 Έκτο πόδι κίνησης

Το έκτο πόδι που θα κινηθεί κατά σειρά θα ολοκληρώσει την κίνηση του σε δυο φάσεις. Στην πρώτη φάση θα στηρίζει το σώμα του εξάποδου ρομπότ, ενώ στην δεύτερη θα εκτελεί την ελλειπτική κίνηση του.

Πρώτη φάση $x = \frac{4}{5} \cdot \alpha \cdot t \quad (4-88)$

$$z = -0.1348 \quad (4-89)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-90)$$

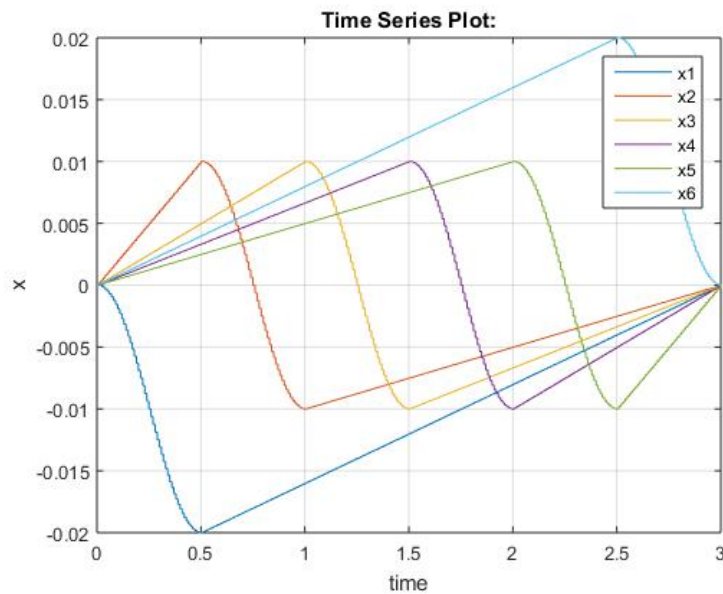
Δεύτερη
φάση

$$x = -a \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t) + a \quad (4-91)$$

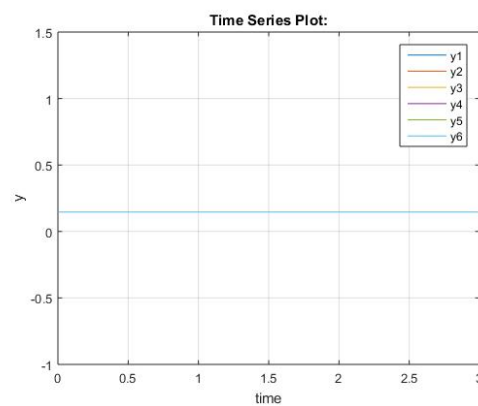
$$z = b \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) - 0.1348 \quad (4-92)$$

$$y = 0.1465 \quad (4-93)$$

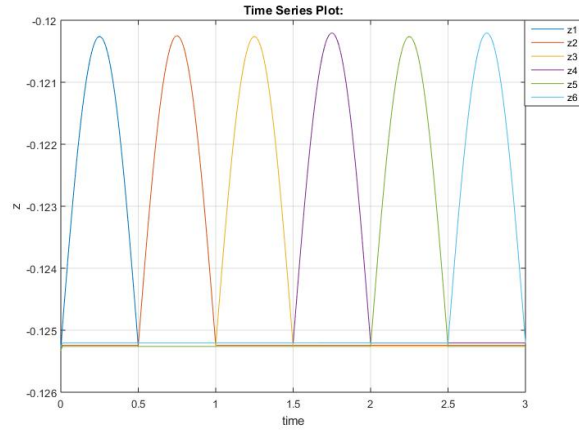
Τα διαγράμματα (Σχήμα 4-29, Σχήμα 4-30, Σχήμα 4-31, Σχήμα 4-32, Σχήμα 4-33 και Σχήμα 4-34) απεικονίζουν τις τροχιές των σχέσεων για διάρκεια προσομοίωσης 3 δευτερολέπτων.



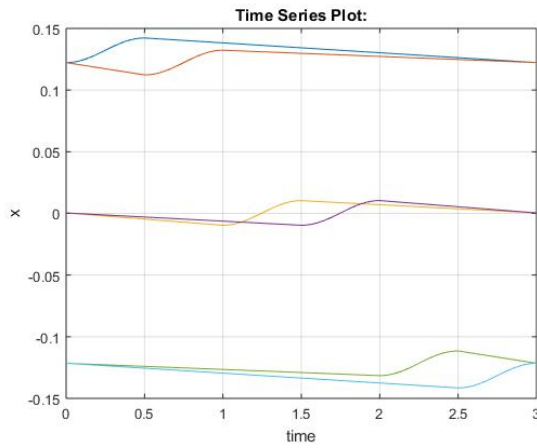
Σχήμα 4-29. x συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού.



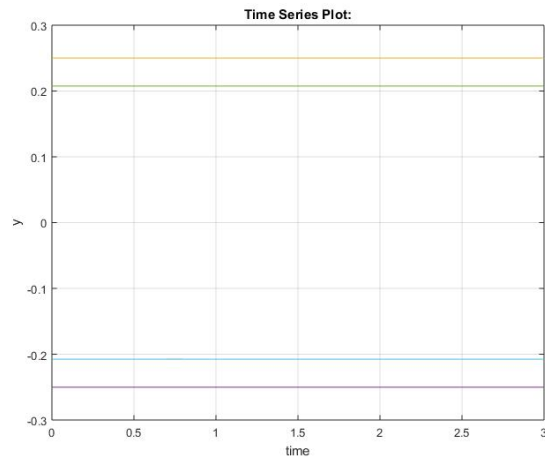
Σχήμα 4-30. y συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού.



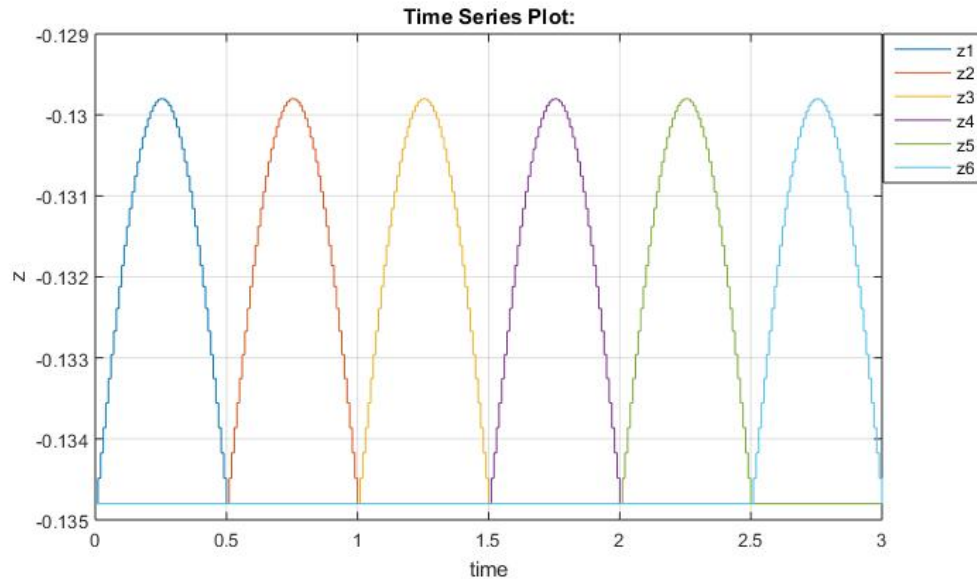
Σχήμα 4-31. z συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού.



Σχήμα 4-32. x συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).



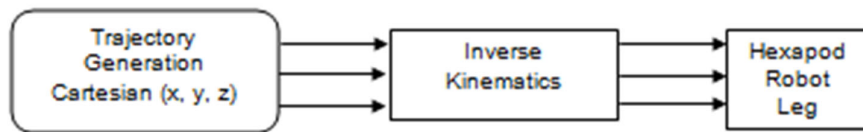
Σχήμα 4-33. y συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).



Σχήμα 4-34. z συντεταγμένες πεντάποδου βηματισμού (ως προς το κέντρο μάζας).

4.6.8 Διάγραμμα ροής κίνησης του εξάποδου ρομπότ.

Στο Σχήμα 4-35 παρουσιάζεται η μεθοδολογία με την οποία παράγεται ο αλγόριθμος κίνησης του εξάποδου ρομπότ.

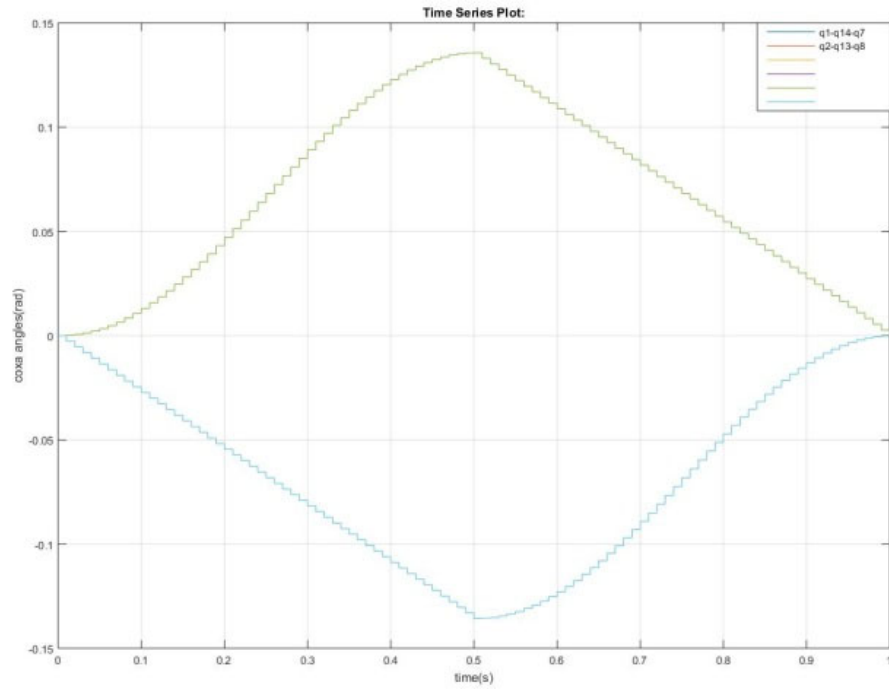


Σχήμα 4-35. Διάγραμμα ροής παραγωγής τροχιάς ποδιού

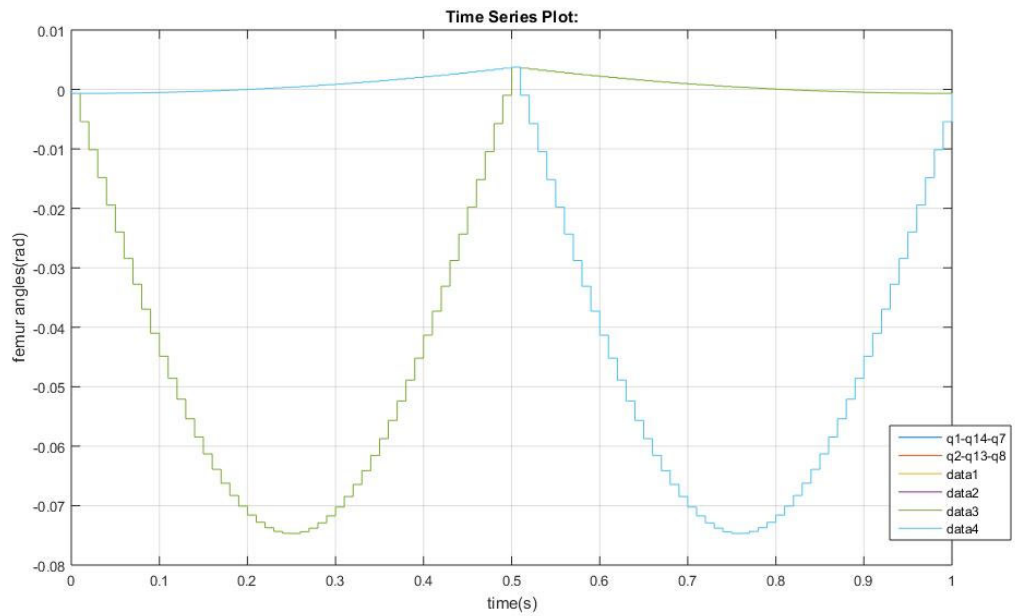
Στα σχήματα Σχήμα 4-36, Σχήμα 4-37, Σχήμα 4-38, Σχήμα 4-39, Σχήμα 4-40, Σχήμα 4-41, Σχήμα 4-42, Σχήμα 4-43 και Σχήμα 4-44 παρουσιάζονται οι τιμές εξόδου του αλγορίθμου της αντίστροφης κινηματικής, εφαρμοσμένα για κάθε έναν από τους διαφορετικούς βηματισμούς του ρομπότ. Σε αυτά τα σχήματα τα χρώματα του υπομνήματος συμπίπτουν αφού οι κυματομορφές αλληλεπικαλύπτονται.

4.6.8.1 Τιμές αρθρώσεων για tripod gait

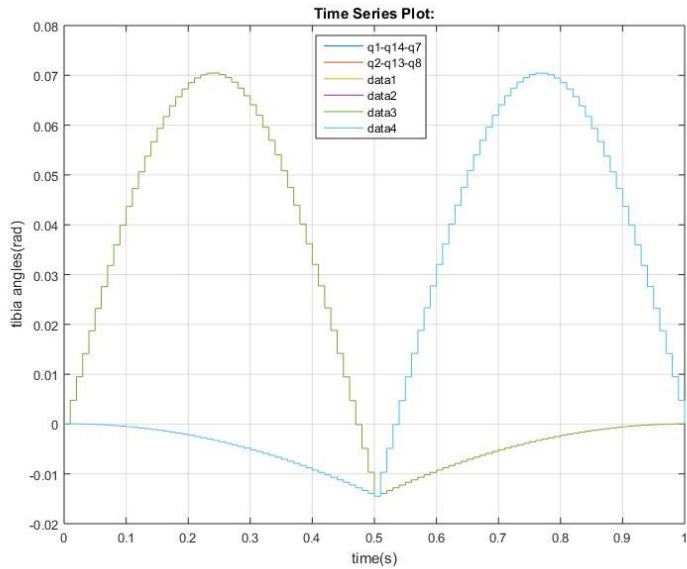
Οι τιμές της κάθε στροφικής άρθρωσης για τρίποδο βηματισμό φαίνονται στο Σχήμα 4-36, στο Σχήμα 4-37 και στο Σχήμα 4-38 για την πρώτη, δεύτερη και τρίτη άρθρωση αντιστοίχως.



Σχήμα 4-36. Τιμές πρώτη στροφικής άρθρωσης για τρίτοδο βηματισμό.



Σχήμα 4-37. Τιμές δεύτερης στροφικής άρθρωσης για τρίτοδο βηματισμό

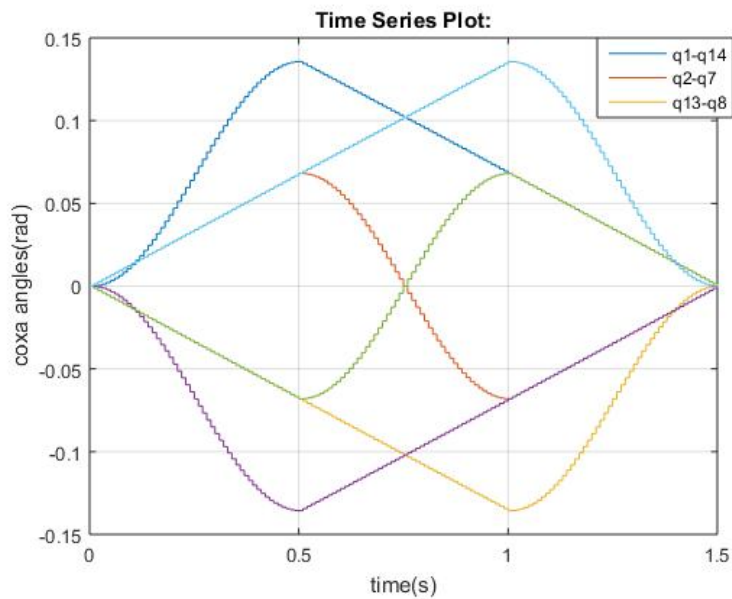


Σχήμα 4-38. Τιμές τρίτης στροφικής άρθρωσης για τρίποδο βηματισμό.

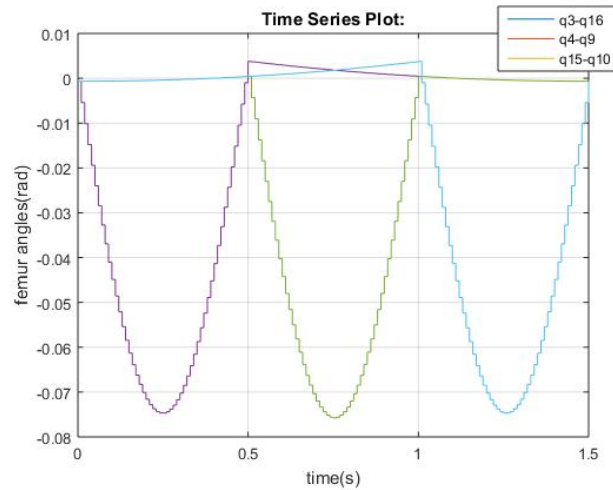
Γίνεται φανερή η συμμετρία των γωνιών των στροφικών αρθρώσεων για τις δυο διαφορετικές τριάδες κίνησης.

4.6.8.2 Τιμές αρθρώσεων για tetrapod gait

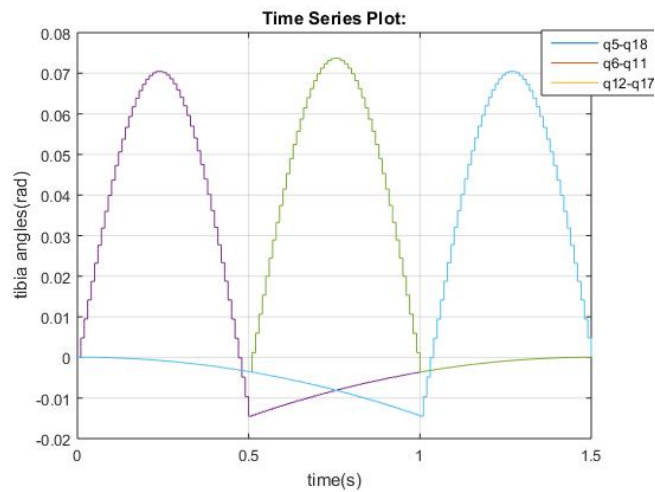
Οι τιμές της κάθε στροφικής άρθρωσης για τετράποδο βηματισμό φαίνονται στο Σχήμα 4-39, στο Σχήμα 4-40 και στο Σχήμα 4-41 για την πρώτη, δεύτερη και τρίτη άρθρωση αντιστοίχως.



Σχήμα 4-39. Τιμές πρώτης στροφικής άρθρωσης για τετράποδο βηματισμό.



Σχήμα 4-40. Τιμές δεύτερης στροφικής άρθρωσης για τετράποδο βηματισμό.

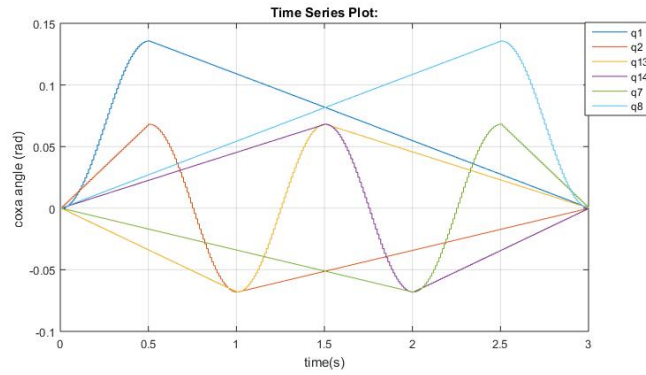


Σχήμα 4-41. Τιμές τρίτης στροφικής άρθρωσης για τετράποδο βηματισμό.

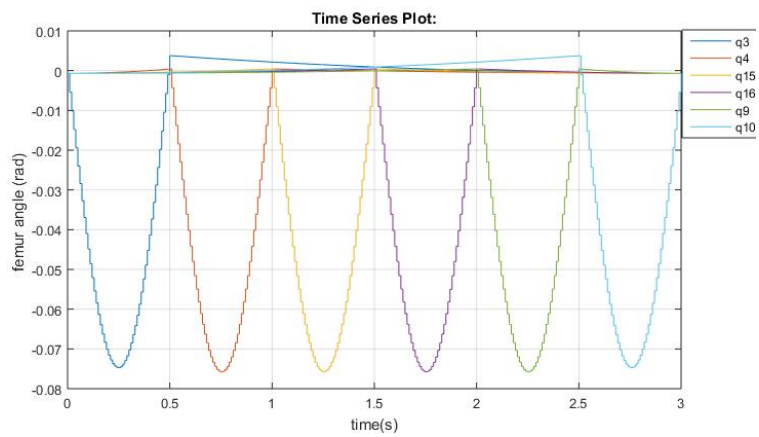
Στο Σχήμα 4-40 και στο Σχήμα 4-41 γίνεται φανερό, ότι για τις στροφικές αρθρώσεις 2 (coxa-femur) και 3 (femur-tibia), οι τιμές των γωνιών είναι σχεδόν ίδιες με χρονική διαφορά στα μέγιστα των τιμών τους ίση με μισό δευτερόλεπτο. Για τις τιμές της πρώτης στροφικής άρθρωσης (Σχήμα 4-39) παρατηρείται συμμετρία στις τιμές που αφορούν το κάθε ζευγάρι.

4.6.8.3 Τιμές αρθρώσεων για pentapod gait

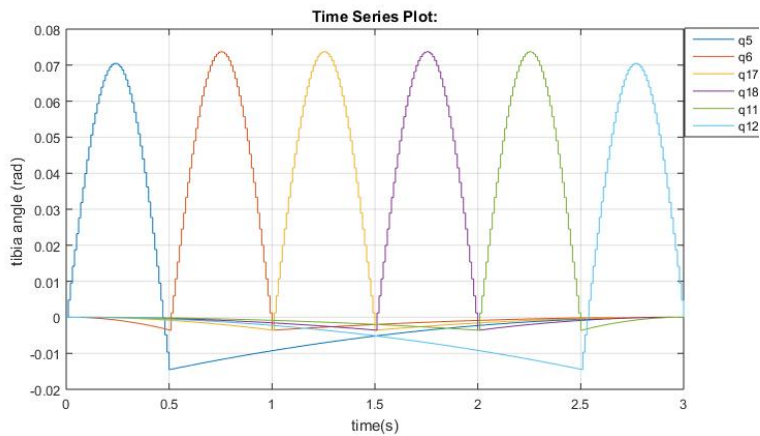
Οι τιμές της κάθε στροφικής άρθρωσης για πεντάποδο βηματισμό φαίνονται στα σχήματα Σχήμα 4-42, Σχήμα 4-43 και Σχήμα 4-44 για την πρώτη, δεύτερη και τρίτη άρθρωση αντιστοίχως.



Σχήμα 4-42. Γωνίες πρώτης στροφικής άρθρωσης για πεντάποδο βηματισμό.



Σχήμα 4-43. Γωνίες δεύτερης στροφικής άρθρωσης για πεντάποδο βηματισμό.



Σχήμα 4-44. Γωνίες τρίτης στροφικής άρθρωσης για πεντάποδο βηματισμό.

Και στην περίπτωση του πεντάποδου βηματισμού φαίνεται η συμμετρία των τιμών της πρώτης στροφικής άρθρωσης. Τα δυο άκρα της κίνησης (1° και 6° πόδι), φτάνουν σε μεγαλύτερες τιμές γωνιακής μετατόπισης κατά την ολοκλήρωση της κίνησης, ενώ τα μεσαία

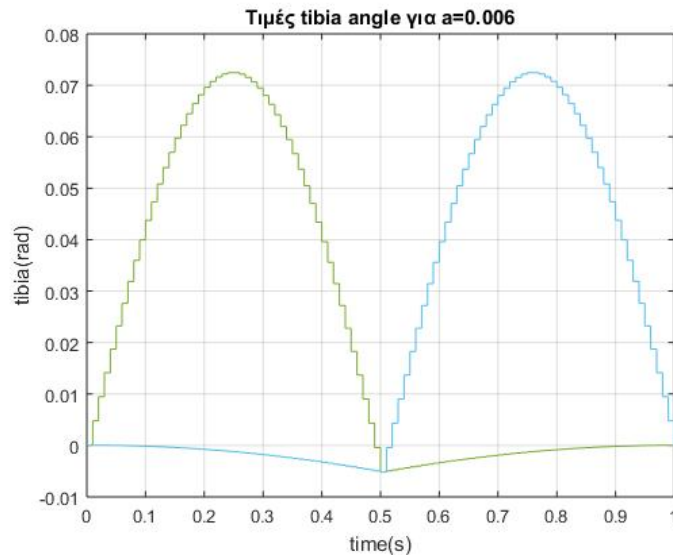
πόδια (2° , 3° , 4° και 5°), εμφανίζονται με τις ελλειπτικές τροχιές τους να διαδέχονται η μια την άλλη.

Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι οι στροφικές αρθρώσεις 2 και 3 για κάθε βηματισμό, λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Σύμφωνα με την (4-7) και (4-9), η τιμές των στροφικών αρθρώσεων που προκύπτουν από την αντίστροφη κινηματική ανάλυση, εξαρτώνται άμεσα από την τιμή της συντεταγμένης x . Για τον λόγο αυτό κατά την διάρκεια της ελλειπτικής κίνησης, οι τιμές των γωνιών ακολουθούν τις επιθυμητές τιμές. Κατά την διάρκεια της φάσης στήριξης, οι μεταβλητές y και z διατηρούνται σταθερές, ενώ η μεταβλητή x μεταβάλλεται ώστε το πέλμα να εκτελέσει ευθύγραμμη κίνηση. Η μεταβολή αυτή της μεταβλητής x , επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις τιμές των αρθρώσεων 2 και 3, οι οποίες θα πρέπει όσο το δυνατόν να διατηρούνται σταθερές.

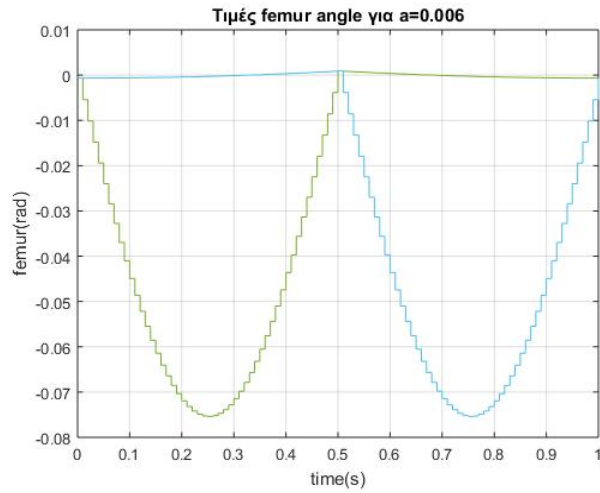
4.7 Επίδραση πλάτους βηματισμού

Μετά από πειράματα παρατηρήθηκε ότι η απόκλιση των μεταβολών των γωνιών των αρθρώσεων 2 και 3, μειώνεται αισθητά με μείωση του πλάτους a της ελλειπτικής τροχιάς, και κατά συνέπεια του μεγέθους του βηματισμού.

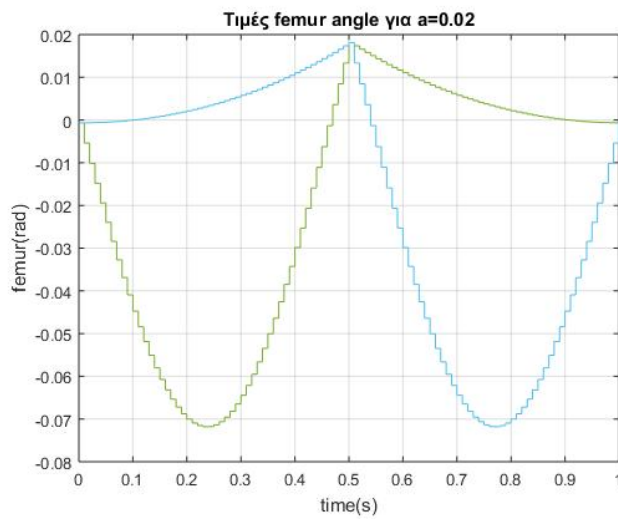
Στα σχήματα Σχήμα 4-45, Σχήμα 4-46, Σχήμα 4-47 και Σχήμα 4-48 φαίνεται η διαφορά του βηματισμού και η επίδραση του βηματισμού στις τιμές των αρθρώσεων για $a=0.02m$ και $a=0.006m$



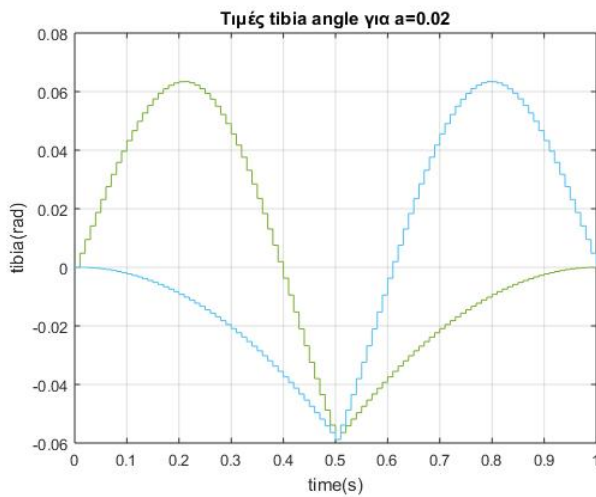
Σχήμα 4-45. Τιμές γωνιακών αρθρώσεων (femur-tibia) για πλάτος βηματισμού $a=0.006$.



Σχήμα 4-46. Τιμές γωνιακών αρθρώσεων (coxa-femur) για πλάτος βηματισμού $a=0.006$.



Σχήμα 4-47. Τιμές γωνιακών αρθρώσεων (coxa-femur) για πλάτος βηματισμού $a=0.02$.



Σχήμα 4-48. Τιμές γωνιακών αρθρώσεων (femur-tibia) για πλάτος βηματισμού $a=0.02$.

4.8 Leg Sequences

Το εξάποδο ρομπότ διαθέτει όπως περιγράφηκε 3 διαφορετικούς βηματισμούς με τους οποίους τα 6 πόδια του μπορούν να συγχρονιστούν και να οδηγήσουν στην μετατόπιση του. Οι 3 διαφορετικοί βηματισμοί (τρίποδο, τετράποδο και πεντάποδο) μπορούν να υλοποιηθούν με την ανύψωση τριών, δύο και ενός ποδιού αντίστοιχα από το έδαφος.

Σημαντικό παράγοντα στην ευστάθεια του εξάποδου ρομπότ, παίζει ο τρόπος ομαδοποίησης των ποδιών αυτών κάθε φορά. Για τον τρίποδο βηματισμό θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε φάση κίνησης 3 πόδια, ενώ τα εναπομείναντα πόδια θα βρίσκονται στο έδαφος. Αυτό που μας ενδιαφέρει κάθε φορά είναι αν κάποιο πόδι υπάρχει σε κάποια τριάδα και όχι η σειρά με την οποία εμφανίζεται μέσα σε αυτό. Για παράδειγμα η τριάδα ποδιών (1-2-3) έχει το ίδιο αποτέλεσμα στην κίνηση του ρομπότ με την τριάδα (1-3-2).

Με βάση τη παραπάνω λογική μπορούν να δημιουργηθούν 20 διαφορετικοί μοναδικοί συνδυασμοί τριάδων ποδιών σύμφωνα με την σχέση:

$$C(n, k) = \frac{n!}{(n - k)! k!} \quad (4-94)$$

όπου n ο αριθμός των ποδιών και k , το πλήθος των συνδυαζόμενων αντικειμένων.

Συμπερασματικά, για το εξάποδο ρομπότ προκύπτουν $C(6,3)=20$ συνδυασμοί τρίποδου βηματισμού, $C(6,4)=90$ συνδυασμοί τετράποδου βηματισμού και $C(6,1)=720$ συνδυασμοί πεντάποδου βηματισμού. Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί για το τρίποδο και τον τετράποδο βηματισμό δίνονται στο παράρτημα Δ. Για τον πεντάποδο βηματισμό οι συνδυασμοί είναι προφανείς.

5 Το κριτήριο Force Angle Stability Margin

5.1 Θεωρητική εισαγωγή

Όπως παρουσιάστηκε και στην Εισαγωγή, η παρούσα εργασία αφορά μελέτη της ευστάθειας του εξάποδου ρομπότ, με χρήση του κριτηρίου FASM.

Η εφαρμογή του κριτηρίου, προϋποθέτει την μέτρηση των δυνάμεων στα πέλματα, γεγονός που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή αισθητήρων δύναμης σε κάθε πέλμα, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.

Για κάθε όχημα η σημείων επαφής με το έδαφος, ισχύουν με βάση τις αρχές τις αδράνειας η σχέση (5-1).

$$\mathbf{f}_r = \sum \mathbf{f}_{\text{grav}} + \sum \mathbf{f}_{\text{ee}} + \sum \mathbf{f}_{\text{dist}} - \sum \mathbf{f}_{\text{inertial}} \quad (5-1)$$

όπου,

$\sum \mathbf{f}_{\text{grav}}$, το άθροισμα της δύναμης βαρύτητας, για κάθε εξάρτημα- μέλος του οχήματος.

$\sum \mathbf{f}_{\text{ee}}$, το άθροισμα των δυνάμεων που οφείλονται στο βάρος και στις δυνάμεις αντίδρασης με το περιβάλλον, από το τελικό εργαλείο δράσης του οχήματος, αν αυτό φέρει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα οι δυνάμεις από το εργαλείο σκαφτικού οχήματος, στο κύριο σώμα του οχήματος.

$\sum \mathbf{f}_{\text{dist}}$, το άθροισμα των δυνάμεων παρεμβολών που οφείλονται στο περιβάλλον του οχήματος (δυνατός αέρας, ρεύματα νερού) ή σε εξαρτήματα προσκολλημένα στο όχημα με κάποιο σύνδεσμο (ρυμουλκημένο).

$\sum \mathbf{f}_{\text{inertial}}$, οι δυνάμεις αδράνειας που ασκούνται στο όχημα (τριβές).

Στην ιδανική περίπτωση στην οποία δεν υπάρχουν ανεξάρτητες αδρανειακές δυνάμεις μεταξύ του οχήματος και του εδάφους, η (5-1) δίνεται από την απλουστευμένη μορφή της (5-2):

$$\mathbf{f}_r = - \sum \mathbf{f}_{\text{support}} \quad (5-2)$$

όπου με f_{support} συμβολίζονται οι δυνάμεις στήριξης του οχήματος όταν αυτό βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος. Η δυνάμεις αυτές αποτελούν την κάθετη δύναμη αντίδρασης του εδάφους στην επαφή του οχήματος με αυτό. Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στο γεγονός ότι, οι κάθετες δυνάμεις είναι στην γενική περίπτωση θετικές, αν λάβουμε την αρνητική φορά ως προς την επιτάχυνση της βαρύτητας (αρνητικά προς το έδαφος). Με αυτόν τον τρόπο καταλαβαίνουμε ότι η δύναμη στο κέντρο μάζας του οχήματος θα έχει φορά από το όχημα προς το έδαφος.

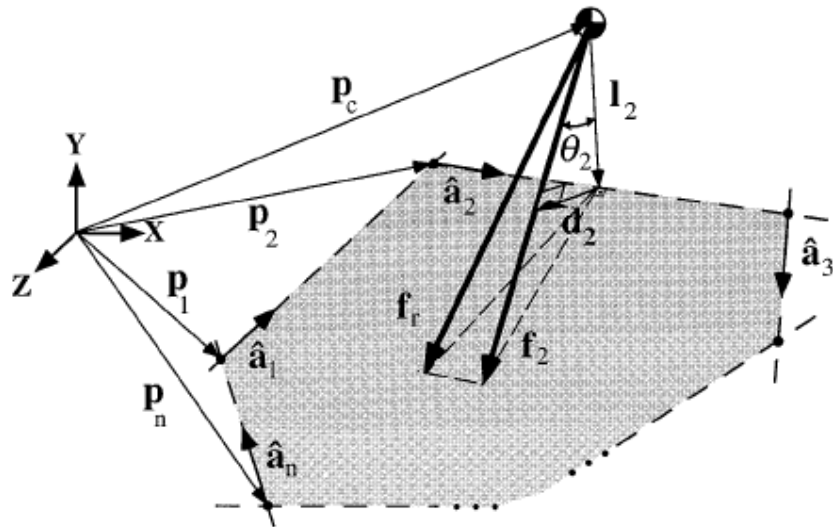
Η συνολική ροπή που ασκείται στο κέντρο μάζας του οχήματος, θα δίνεται από την σχέση:

$$\mathbf{n}_r = \sum \mathbf{n}_{ee} + \sum \mathbf{n}_{dist} - \sum \mathbf{n}_{inertial} \quad (5-3)$$

ή σύμφωνα με την σχέση (5-2):

$$\mathbf{n}_r = - \sum \mathbf{n}_{support} \quad (5-4)$$

Η σχέση (5-4) σημαίνει ότι το άθροισμα των ροπών στο κέντρο μάζας του οχήματος, από όλες τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό, ισούται με το άθροισμα των ροπών των δυνάμεων αντίδρασης στα σημεία επαφής του οχήματος με το έδαφος.



Σχήμα 5-1. Το κριτήριο FASM σε τρισδιάστατη εφαρμογή

Στο Σχήμα 5-1 φαίνεται η εφαρμογή του κριτηρίου FASM για όχημα n σημείων επαφής με το έδαφος. Για τον υπολογισμό της τιμής του FASM, απαιτείται η εξαγωγή ορισμένων μεγεθών με βάση την γεωμετρία του σχήματος.

Κάθε σημείο επαφής με το έδαφος, εκφράζεται ως προς το κέντρο μάζας, με ένα διάνυσμα \mathbf{p} το οποίο δίνεται από την σχέση (5-5):

$$\mathbf{p}_i = [p_x, p_y, p_z]^T \quad (5-5)$$

με $i=(1, \dots, n)$, όπου n ο μέγιστος αριθμός σημείων επαφής του οχήματος με το έδαφος.

Οι υποψήφιοι άξονες ανατροπής του οχήματος (tipover axis), θα δίνονται από την σχέση (5-6), (5-7):

$$\alpha_i = \mathbf{p}_{i+1} - \mathbf{p}_i, i = \{1, \dots, n - 1\} \quad (5-6)$$

$$\alpha_n = \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_n \quad (5-7)$$

Οι σχέσεις (5-6) και (5-7) παράγουν τους άξονες ανατροπής οχήματος με n σημεία επαφής με το έδαφος. Η σχέση (5-7) αποτελεί την αφαίρεση του διανύσματος θέσης του

τελευταίου σημείου επαφής, με το πρώτο, έχοντας ως αποτέλεσμα, οι υποψήφιοι άξονες ανατροπής, προβαλλόμενοι στο έδαφος, να σχηματίζουν ένα πολύγωνο.

Αν το αδρανειακό σύστημα αναφοράς ληφθεί ως το κέντρο μάζας του οχήματος τότε, οι κάθετοι άξονες στους υποψήφιους άξονες ανατροπής, δίνονται από την σχέση:

$$\mathbf{l}_i = (\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\alpha}}_i \cdot \hat{\mathbf{a}}_i^T) \cdot (\mathbf{p}_{i+1}) \quad (5-8)$$

όπου \mathbf{I} ο (3x3) μοναδιαίος πίνακας, και $\hat{\mathbf{a}}_i = \frac{\boldsymbol{\alpha}_i}{\|\boldsymbol{\alpha}_i\|}$.

Η εξίσωση (5-8) απαιτείται για τον υπολογισμό της ποσότητας $\|\mathbf{d}_i\|$, για τον υπολογισμό της ποσότητας β . Το σύνολο των δυνάμεων που εφαρμόζονται στο όχημα, έχουν σημασία μόνο οι ποσότητες εκείνες που βρίσκονται πάνω στον άξονα ανατροπής. Οι σχέσεις (5-9) και (5-10) αφορούν την προβολή των δυνάμεων \mathbf{f}_r και \mathbf{n}_r στους αντίστοιχους άξονες ανατροπής.

$$\mathbf{f}_i = (\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\alpha}}_i \cdot \hat{\mathbf{a}}_i^T) \cdot \mathbf{f}_r \quad (5-9)$$

$$\mathbf{n}_i = (\hat{\boldsymbol{\alpha}}_i \cdot \hat{\mathbf{a}}_i^T) \cdot \mathbf{n}_r \quad (5-10)$$

Εφόσον το κριτήριο FASM, απαιτεί την εύρεση της συνολικής δύναμης που εφαρμόζεται στο σημείο επαφής του οχήματος και του εδάφους, η ροπή \mathbf{n}_i αναλύεται σε ένα ζεύγος δυνάμεων. Το ζεύγος δυνάμεων θα βρίσκεται στο κάθετο επίπεδο στις ροπές \mathbf{n}_i . Από τους άπειρους συνδυασμούς των ζευγών που προκύπτουν για τις ροπές \mathbf{n}_i , επιλέγεται εκείνο το ζεύγος, για το οποίο η μια εκ των δυο δυνάμεις, διέρχεται από το κέντρο μάζας του οχήματος, και η εναπομένουσα διέρχεται από τον άξονα ανατροπής (Παράρτημα Γ). Η παραπάνω θεώρηση οδηγεί στην δημιουργία των σχέσεων (5-11) και (5-12).

$$\mathbf{f}_{ni} = \frac{\hat{\mathbf{i}}_i \times \mathbf{n}_i}{\|\mathbf{l}_i\|} \quad (5-11)$$

$$\mathbf{f}_i^* = \mathbf{f}_i + \mathbf{f}_{ni} = \mathbf{f}_i + \frac{\hat{\mathbf{i}}_i \times \mathbf{n}_i}{\|\mathbf{l}_i\|} \quad (5-12)$$

Η σχέση (5-12) είναι μια εκ των τριών σχέσεων οι οποίες απαιτούνται για τον υπολογισμό του κριτηρίου FASM.

Η μεταβλητή $\|\mathbf{d}_i\|$ η οποία εκφράζει την απόσταση του φορέα της δύναμης \mathbf{f}_i^* από την κάθετη στους άξονες ανατροπής \mathbf{l}_i δίνεται από την σχέση (5-13):

$$\mathbf{d}_i = -\mathbf{l}_i + (\mathbf{l}_i^T \cdot \hat{\mathbf{f}}_i^*) \cdot \hat{\mathbf{f}}_i^*, i=(1, \dots, n) \quad (5-13)$$

Η γωνία που σχηματίζει η δύναμη \mathbf{f}_i^* με την αντίστοιχη κάθετο στον άξονα ανατροπής στον οποίο αναφέρεται, δίνεται από την σχέση (5-14):

$$\theta_i = \sigma_i \cdot \cos^{-1}(\hat{\mathbf{f}}_i^* \cdot \hat{\mathbf{l}}_i), i = (1, \dots, n) \quad (5-14)$$

Η γωνία θ_i λαμβάνει επιτρεπόμενες τιμές στο διάστημα $0 \leq \theta_i \leq \pi \cdot \sigma_i$. Η μεταβλητή σ_i αποτελεί το πρόσημο της γωνίας θ_i , και υποδηλώνει αν το διάνυσμα της συνολικής δύναμης

\mathbf{f}_i^* , κινείται στο προς το εσωτερικό ή το εξωτερικό του πολυγώνου που δημιουργείται από τους άξονες ανατροπής. Η τιμή του σ_i υπολογίζεται από την σχέση (5-15).

$$\sigma_i = \begin{cases} +1, & \text{αν } (\hat{\mathbf{f}}_i^* \times \hat{\mathbf{l}}_i) \cdot \hat{\mathbf{a}}_i > 0 \\ -1, & \text{αλλιού} \end{cases} \quad (5-15)$$

Σύμφωνα με το κριτήριο FASM, η ευστάθεια ενός οχήματος, καθορίζεται από την μεταβλητή β , όπως αυτή ορίζεται από την σχέση (5-16):

$$\beta = \min (\theta_i \cdot \|\mathbf{d}_i\| \cdot \|\mathbf{f}_i^*\|) \quad (5-16)$$

όπου,

- θ_i , η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα του αθροίσματος όλων των δυνάμεων που δέχεται το όχημα, και το οποίο διέρχεται από το κέντρο μάζας του οχήματος, με τα κάθετα διανύσματα στους άξονες ανατροπής.
- $\|\mathbf{d}_i\|$, η απόσταση του φορέα της δύναμης, η οποία διέρχεται από το κέντρο μάζας, με τους άξονες \mathbf{l}_i , όπως ορίζεται από την (5-13).
- $\|\mathbf{f}_i^*\|$, η συνολική δύναμη που ασκείται στο όχημα από αδρανειακές δυνάμεις, όπως δίνεται στην (5-12).

5.2 Εφαρμογή FASM στο εξάποδο ρομπότ

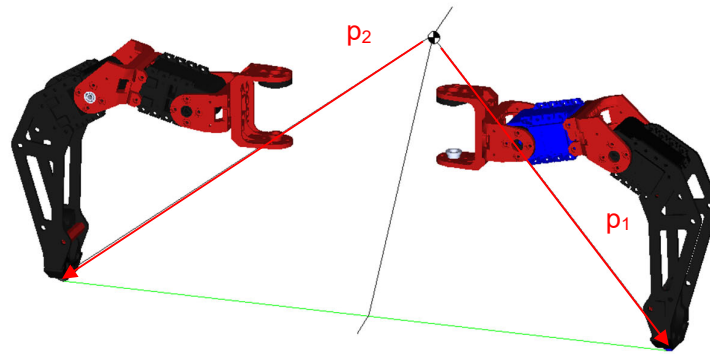
Για την εφαρμογή του κριτηρίου FASM στο εξάποδο ρομπότ, ορίζονται τα μεγέθη της ενότητας 5.1.

Τα διανύσματα θέσης των πελμάτων των ποδιών ορίζονται ως προς το κέντρο μάζας του ρομπότ. Το κέντρο μάζας του ρομπότ θεωρείται αδρανειακό σύστημα για παρατηρητές τοποθετημένους στα πέλματα των ποδιών. Για το εξάποδο ρομπότ της εργασίας ορίζονται τα διανύσματα \mathbf{p}_i , ($i=1,2,3,4,5,6$). Ο δείκτης i παίρνει τιμές ώστε να καθορίζεται η καταμέτρηση των πελμάτων δεξιόστροφα. Η μεθοδολογία για την απόδοση τιμών στα διανύσματα θέσης των πελμάτων παρουσιάζεται αναλυτικά στην παρακάτω Ενότητα 5.3.

Με βάση τις σχέσεις (5-6) και (5-7), για το εξάποδο ρομπότ σε κατάσταση ακινησίας (με τα έξι πόδια να πατάνε στο έδαφος), οι υποψήφιοι άξονες ανατροπής δίνονται για $i=(1,\dots,6)$. Ο τελευταίος άξονας περιστροφής, υπολογίζεται αφαιρώντας τις συντεταγμένες του τελευταίου ποδιού που αριθμείται δεξιόστροφα, από τις συντεταγμένες του πρώτου ποδιού. Για κάθε άξονα ανατροπής \mathbf{a}_i , ορίζεται σύμφωνα με την (5-8). Στην Ενότητα 3.5, περιγράφηκε η δημιουργία αισθητήρων για την μέτρηση των δυνάμεων στα πόδια του ρομπότ. Από τις μετρήσεις των αισθητήρων, λαμβάνονται οι τιμές των δυνάμεων \mathbf{f}_i , για κάθε άξονα του τρισδιάστατου συστήματος αναφοράς που υπάρχει σε κάθε πόδι (βλ. Ενότητα 3.5.1). Οι τιμές αυτών των δυνάμεων χρησιμοποιούνται και για τον υπολογισμό των ροπών που προκαλούν στο κέντρο μάζας, όπως ορίζεται από την (5-9).

Τα παραπάνω μεγέθη έχουν νόημα μόνο για τα πόδια τα οποία βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος. Τα πόδια του ρομπότ τα οποία βρίσκονται σε φάση ανύψωσης, θα έχουν μηδενικές τιμές δυνάμεων μετρημένες από τους αισθητήρες. Για μηδενικές τιμές δύναμης, το κριτήριο είναι μηδενικό, επομένως πόδια που δεν βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος δεν θα περιλαμβάνονται στον τελικό υπολογισμό του.

Το Σχήμα 5-2 παρουσιάζει τον άξονα ανατροπής για τα πόδια 1 και 2 του εξάποδου ρομπότ. Με \mathbf{p}_1 και \mathbf{p}_2 , δηλώνονται τα διανύσματα θέσης των πελμάτων ως προς το κέντρο μάζας. Με \mathbf{f}_{n1} και \mathbf{f}_{n1}' , αναφέρεται το ζεύγος δυνάμεων για την αντικατάσταση του μεγέθους της ροπής με ισόποση δύναμη, όπως δηλώνεται στην σχέση (5-10).



Σχήμα 5-2. Μεταβλητές υπολογισμού FASM για τα πόδια 1 και 2

Για τον υπολογισμό του FASM, λαμβάνονται υπόψη μόνο τα πόδια τα οποία βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος. Ο υπολογισμός του FASM διαφέρει με βάση το gait που βρίσκεται το εξάποδο ρομπότ. Ο Πίνακας 5-1 παρουσιάζει τις διαφορετικές περιπτώσεις για τις μεταβλητές του κριτηρίου β .

Πίνακας 5-1. Μεταβλητές του κριτηρίου β .

Gait	Πέλματα στο έδαφος	Πλήθος αξόνων ανατροπής(a)	Πλήθος κάθετων αποστάσεων d	Πλήθος δυνάμεων σε κάθε πέλμα	Πλήθος ροπών σε κάθε πέλμα	Πλήθος δυνάμεων στο κέντρο μάζας
Tripod	3	3	3	3	3	18
Tetrapod	4	4	4	3	3	24
Pentapod	5	5	5	3	3	30
Stance	6	6	6	3	3	36

5.3 Αρίθμηση πελμάτων για εφαρμογή κριτηρίου FASM

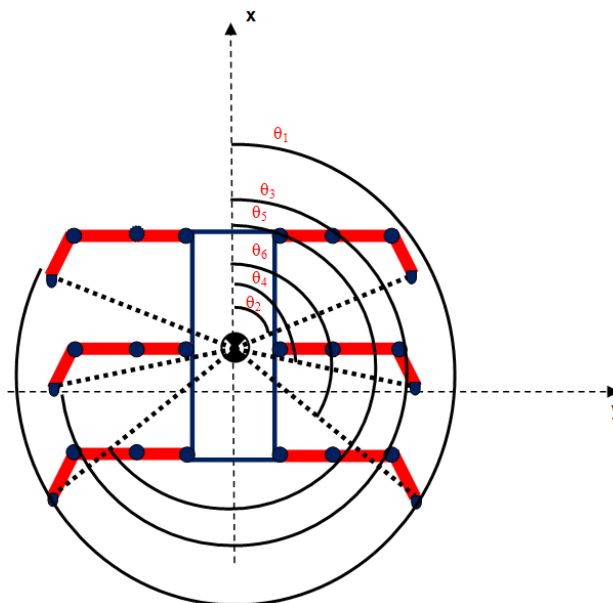
Για την εφαρμογή του κριτηρίου, απαιτείται η αρίθμηση των πελμάτων με διαφορετικό τρόπο από αυτόν που προτάθηκε στην Ενότητα 3.2. Σύμφωνα με τους Papadopoulos, Rey [1] για την αλγοριθμική υλοποίηση του κριτηρίου FASM, θα πρέπει τα διανύσματα \mathbf{p}_i να οργανωθούν κατά αύξοντα αριθμό, ακολουθώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού (clockwise).

Το Σχήμα 5-3 δείχνει το εξάποδο ρομπότ σε ακινησία, με τα έξι πόδια να βρίσκονται στο έδαφος. Οι γωνίες θ_1 - θ_6 αποτελούν τις γωνίες των διανυσμάτων \mathbf{p}_i ($i=1,\dots,6$), που συνδέουν τα πέλματα των ποδιών με το κέντρο μάζας του ρομπότ, και του άξονα x των παγκόσμιων συντεταγμένων.

Για την οργάνωση των πελμάτων κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού, αρχικά γίνεται μέτρηση των γωνιών θ_1 - θ_6 , κατά την αντίθετη φορά των δεικτών. Ο Πίνακας 5-2 παρουσιάζει τις τιμές υπολογισμού των βοηθητικών γωνιών.

Πίνακας 5-2. Γωνίες διανυσμάτων \mathbf{p} με άξονα x .

Πέλημα	Γωνία θ_i (deg)
1	301
2	60
3	271
4	90.5
5	240
6	121



Σχήμα 5-3. Γωνίες διανυσμάτων \mathbf{p}_i ως προς τον άξονα x .

Για την αναδιοργάνωση των πελμάτων σε σειρά clockwise, οι γωνίες αποθηκεύονται σε ένα διάνυσμα

theta_clw=[301,60,271,90.5,240,121];

Δίνοντας την εντολή **sort(theta_clw)**, προκύπτει ένα νέο διάνυσμα το οποίο περιέχει τις γωνίες κατά αύξοντα αριθμό. Έτσι τα πέλματα των ποδιών ταξινομούνται σε ένα νέο βοηθητικό διάνυσμα σύμφωνα με την γωνία την οποία απέχουν από τον άξονα x. Ο Πίνακας 5-3 και ο Πίνακας 5-4, παρουσιάζουν την ταξινόμηση των ποδιών. Η αρίθμηση των ποδιών αναφερόμενη στο μοντέλο του εξάποδου ρομπότ έχει περιγραφεί αναλυτικά στην Ενότητα 3.2.

Πίνακας 5-3. Γωνίες πελμάτων των ποδιών ως προς τον άξονα x.

Leg No	1	2	3	4	5	6
Γωνίες ως προς x	301	60	271	90.5	240	121

Πίνακας 5-4. Ανακατάταξη των ποδιών clockwise.

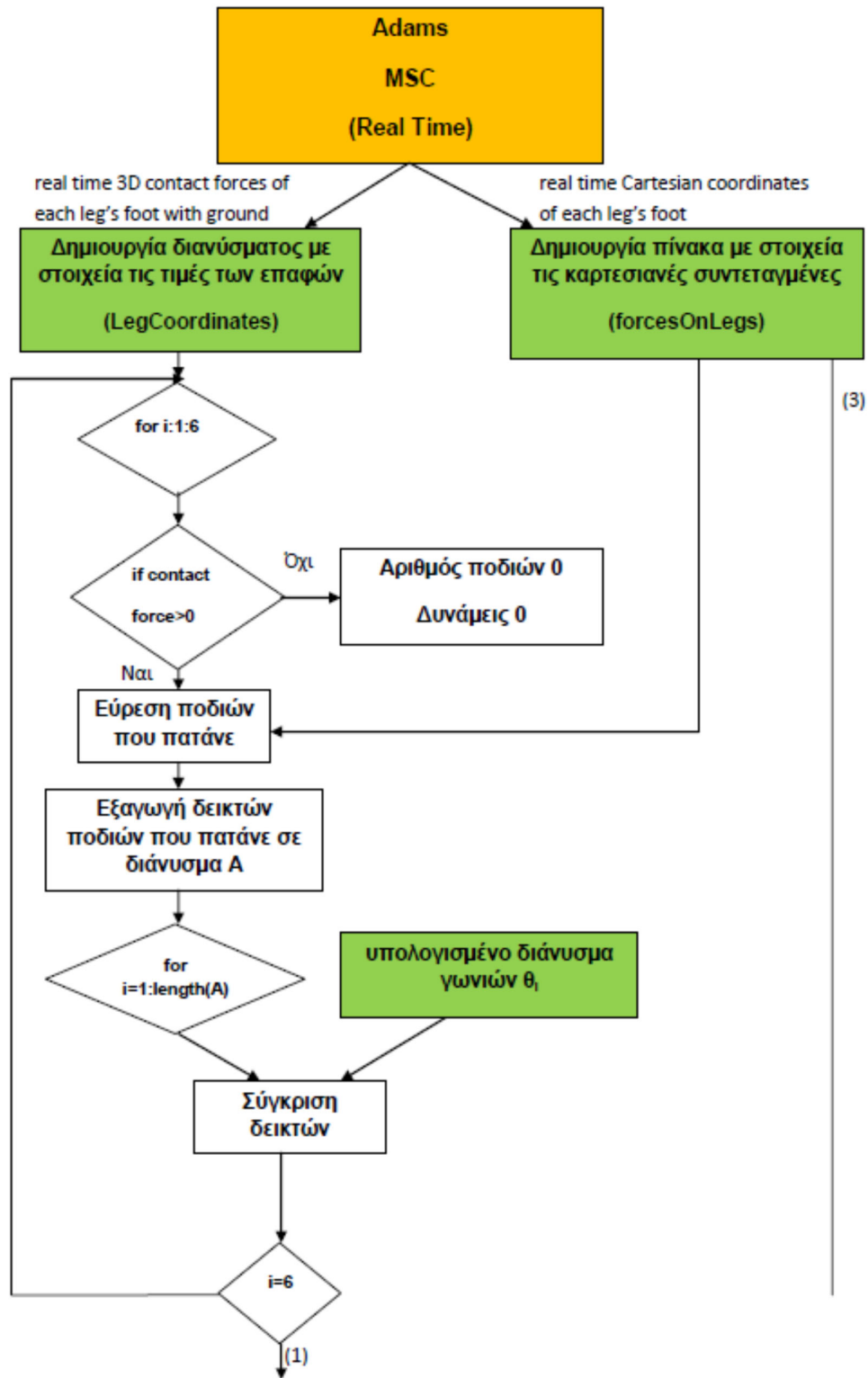
Leg No	2	4	6	5	3	1
Γωνίες ως προς x κατά αύξοντα αριθμό	60	90.5	121	240	271	301

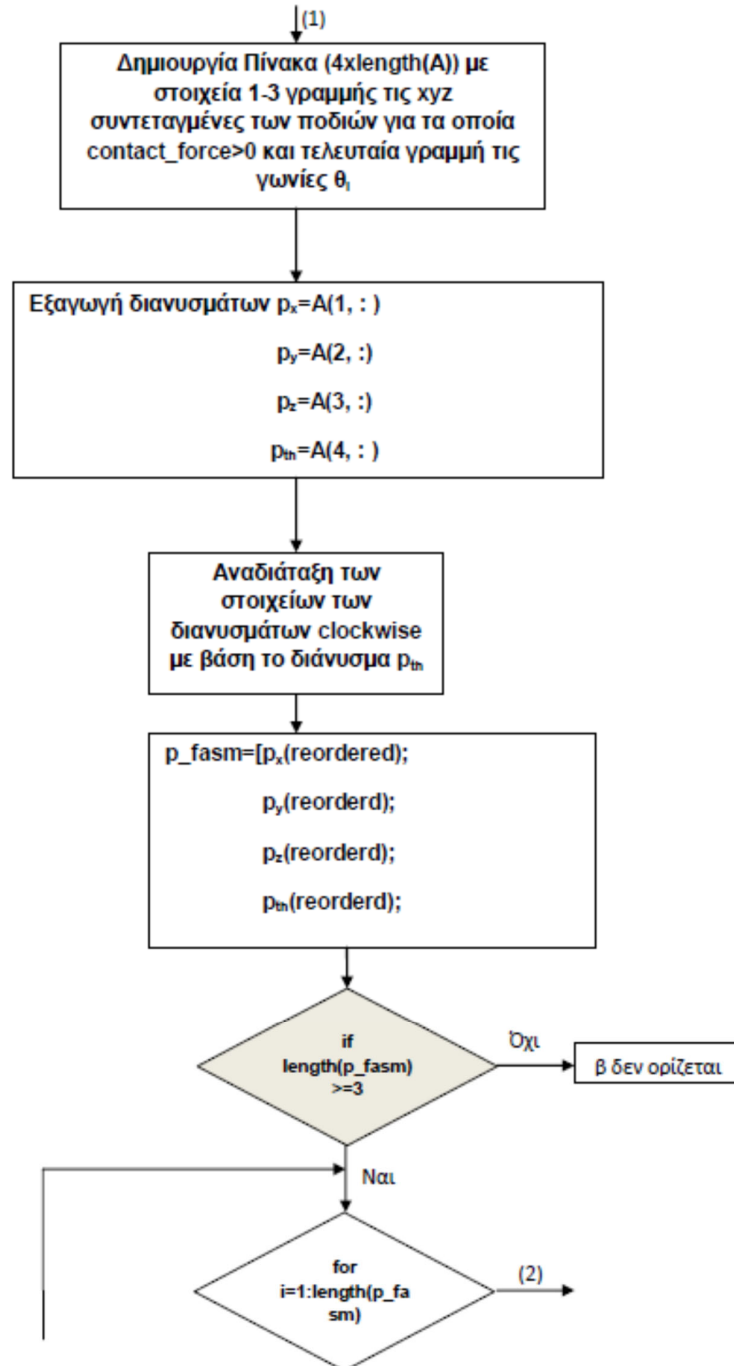
Με την παραπάνω μεθοδολογία, αν γίνει η υπόθεση ότι το ρομπότ βρίσκεται σε τρίποδο βηματισμό με την 2η τριάδα να βρίσκεται στο έδαφος, τα πόδια που θα στηρίζουν θα είναι τα 2, 3, 6. Εισάγοντας τα δεδομένα στον αλγόριθμο που περιγράφηκε, τα πόδια θα ανακατατάσσονται στην σειρά [2,6,3], εφαρμόζοντας έτσι την δεξιόστροφη φορά που απαιτείται για τον υπολογισμό του κριτηρίου.

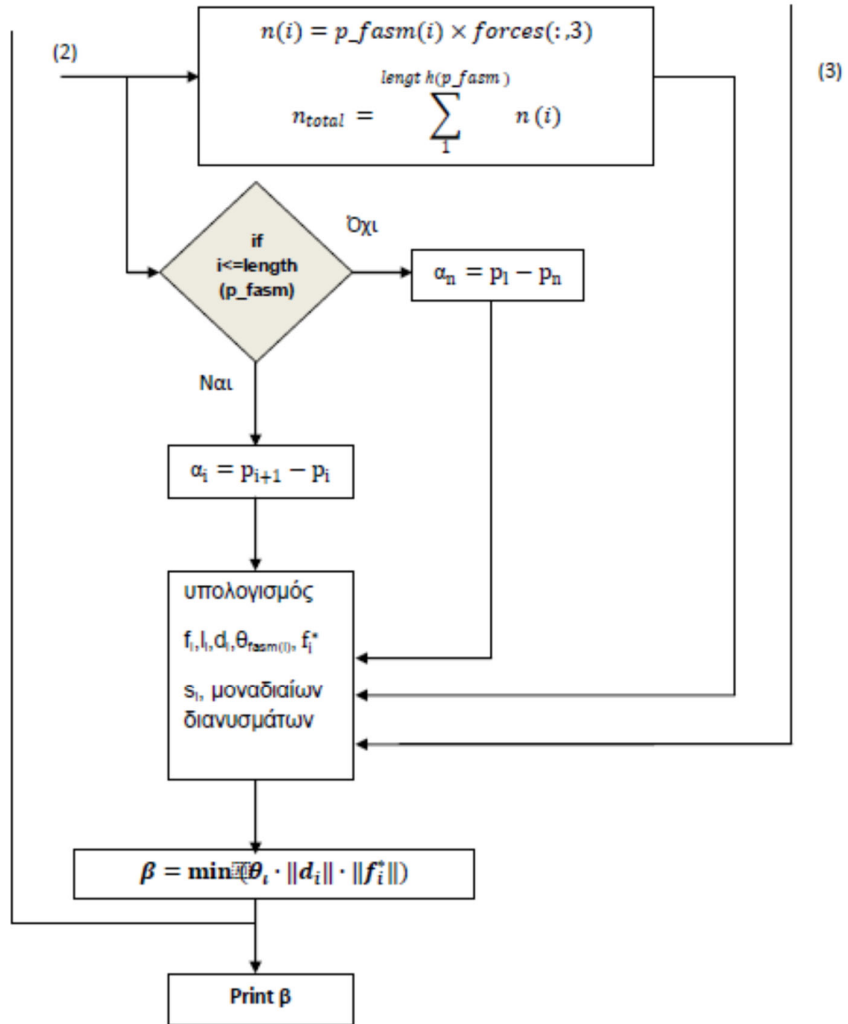
5.4 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου FASM

Στο Σχήμα 5-4 φαίνεται το διάγραμμα ροής που εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της τιμής του κριτηρίου FASM. Στο διάγραμμα ροής με κίτρινο χρώμα σημειώνεται το Adams Plant όπως αυτό περιγράφηκε στην Ενότητα 3.6. Με πράσινο χρώμα σημειώνονται οι τιμές που εξάγονται από το Adams Plant (Καρτεσιανές συντεταγμένες και δυνάμεις στα πέλματα) καθώς και οι προκαθορισμένες για την αρίθμηση κατά clockwise γωνίες. Το αποτέλεσμα που εξάγεται από την εκτέλεση του αλγορίθμου, είναι η τιμή του FASM, β , όπως αυτή περιγράφεται από την (5-16).

Ο αλγόριθμος εκτελείται για κάθε τιμή του εικονικού χρόνου (βλ 4.6.4).







Σχήμα 5-4. Διαγραμμα ροής υπολογισμού κριτηρίου FASM.

6 Αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του εξάποδου ρομπότ σε επίπεδη και επικλινή επιφάνεια. Η ευστάθεια του ρομπότ αναδεικνύεται σε κάθε περίπτωση από την εφαρμογή του κριτηρίου FASM. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται 4 διαφορετικά μέρη, ένα για κάθε mode το οποίο βρίσκεται το ρομπότ.

6.1 Stance Mode

Στο stance mode, το εξάποδο ρομπότ παραμένει ακίνητο στο έδαφος. Ο σχηματισμός των ποδιών είναι σε reptile form, όπως αναπτύχθηκε στην Ενότητα 2.3.4. Στο τμήμα control room όπως αυτό φαίνεται στο Παράρτημα Γ, προκειμένου να παραμείνει το ρομπότ ακίνητο, αρκεί να δωθεί στο block Mode, η τιμή 0. Ο αλγόριθμος με είσοδο στην τιμή mode 0, θα επιλέξει το section στο οποίο οι τιμές των καρτεσιανών συντεταγμένων των ποδιών θα παραμένουν σταθερές.

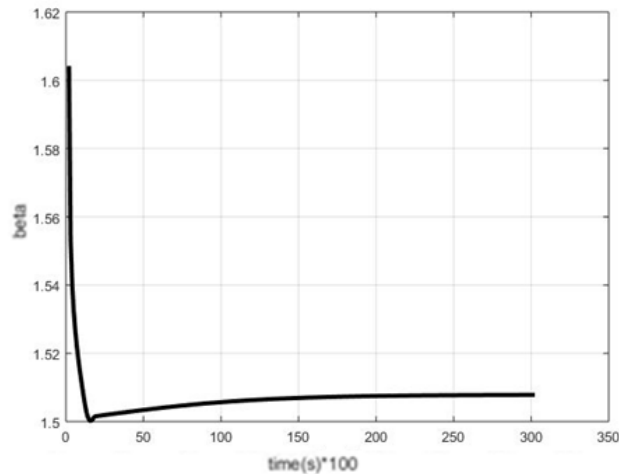
Ο Πίνακας 6-1 παρουσιάζει τις τιμές που εισάχθηκαν στο περιβάλλον Adams MSC για την προσομοίωση των δυνάμεων επαφής.

Πίνακας 6-1. Contact force variables για την προσομοίωση.

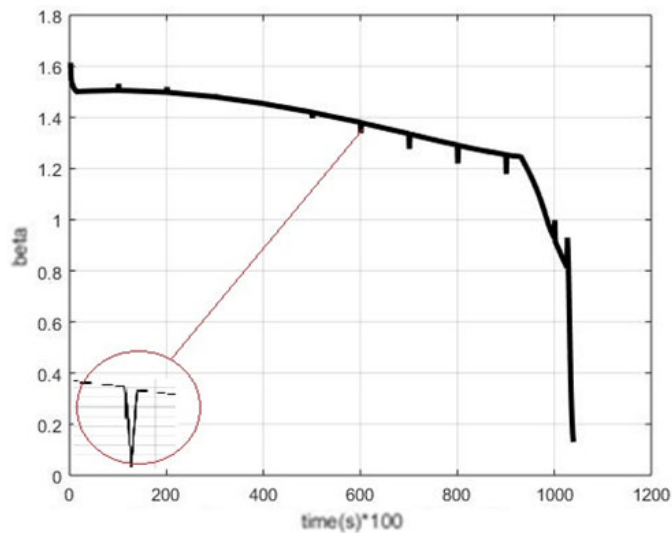
Variables	Τιμή
Stiffness	1 E+09 N/m
Force Exponent	2.2
Damping	1 E+04 Ns/m
Penetration Depth	1 E-02 m
Static Coefficient	0.8
Dynamic Coefficient	0.76
Stiction Transition Velocity	1 E-02 m/s
Friction Transition Velocity	0.5 m/s

Για την προσομοίωση σε έδαφος με κλίση, τοποθετήθηκε ένας στροφικός σύνδεσμος ανάμεσα στην πλατφόρμα που αποτελεί το έδαφος, και στο ground. Η μοντελοποίηση στο περιβάλλον Adams, αλλά και η υλοποίηση στο περιβάλλον Simulink, δίνονται στο Παράρτημα Β.

Στο Σχήμα 6-1 και στο Σχήμα 6-2 φαίνεται η τιμή του κριτηρίου β , για το εξάποδο ρομπότ σε πλήρη ακινησία, για επιφάνεια με μηδενική κλίση, αλλά και με μεταβαλλόμενη κλίση.



Σχήμα 6-1. Τιμή κριτηρίου για επίπεδο έδαφος χωρίς κλίση.



Σχήμα 6-2. Τιμή κριτηρίου για μεταβαλλόμενη κλίση εδάφους.

Στο Σχήμα 6-2, γίνεται φανερή η μείωση της τιμής του κριτηρίου FASM, καθώς η κλίση μεταβάλλεται με τον χρόνο. Οι μικρές κορυφές που εμφανίζονται οφείλονται κυρίως στην προσομοίωση του εδάφους ως σύστημα ελατηρίου-αποσβεστήρα, καθώς και στην προσπάθεια προσαρμογής του ρομπότ στην αλλαγή κλίσης του εδάφους (τραντάγματα).

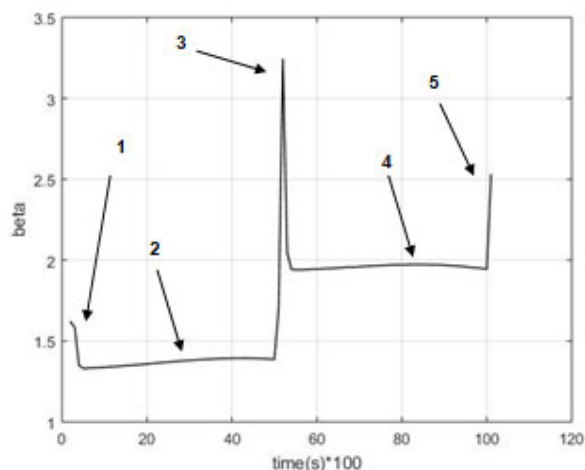
Παρατηρούμε ότι το κριτήριο FASM, ξεκινάει να τείνει προς το μηδέν, για γωνία εδάφους περίπου 50 μοίρες, οπότε και το ρομπότ οδεύει προς την αστάθεια με την έννοια ότι η δύναμη του βάρους υπερνικά τις δυνάμεις τριβής επομένως υπάρχει κύλιση του.

Η τιμή του κριτηρίου για επίπεδο έδαφος χωρίς κλίση, φαίνεται στα αρχικά δευτερόλεπτα της προσομοίωσης και ισούται περίπου με 1.56 (Σχήμα 6-1). Σημειώνεται ότι για την μέτρηση του κριτηρίου οι δυνάμεις μετρώνται σε N, οι γωνίες σε rad και οι αποστάσεις d σε meters.

6.2 Tripod Gait

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τρίποδο βηματισμό τόσο σε μηδενική κλίση, όσο και σε μεταβαλλόμενη κλίση εδάφους. Οι τριάδες ποδιών στην οποία αντιστοιχούν τα διαγράμματα του Σχήμα 6-3 και του Σχήμα 6-4 είναι οι (1-4-5) και (2-3-6).

Στο Σχήμα 6-3 παρουσιάζεται η τιμή του κριτηρίου FASM, σε διάστημα ενός δευτερολέπτου, με μηδενική κλίση εδάφους.



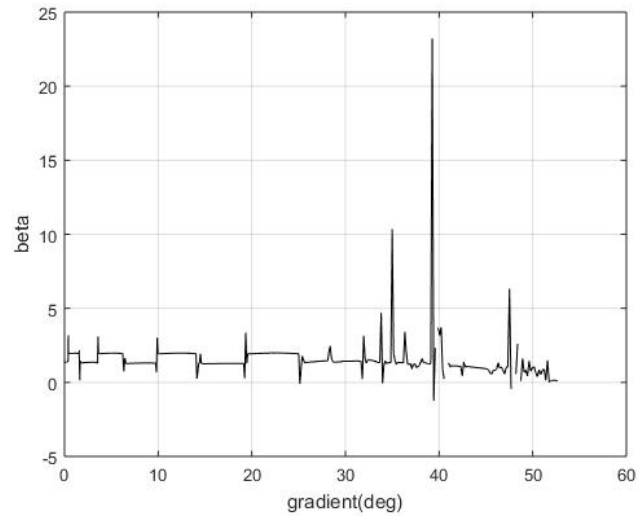
Σχήμα 6-3. Τιμή κριτηρίου FASM για τρίποδο βηματισμό σε έδαφος χωρίς κλίση για διάρκεια 1 s.

Το πρώτο βέλος (1) δείχνει μια έλλειψη στην μέτρηση της τιμής του κριτηρίου. Αυτό οφείλεται στην φάση αρχικοποίησης του εξάποδου ρομπότ και στον ρυθμό επικοινωνίας των περιβαλλόντων ADAMS και Simulink.

Το δεύτερο βέλος (2) δείχνει την τιμή του κριτηρίου με την τριάδα (2-3-6) να βρίσκεται σε φάση στήριξης και την τριάδα (1-4-5) σε φάση ανύψωσης. Η τιμή κυμαίνεται γύρω από την τιμή 1.4, μικρότερη από την τιμή 1.56 που είναι η τιμή του κριτηρίου για stance mode.

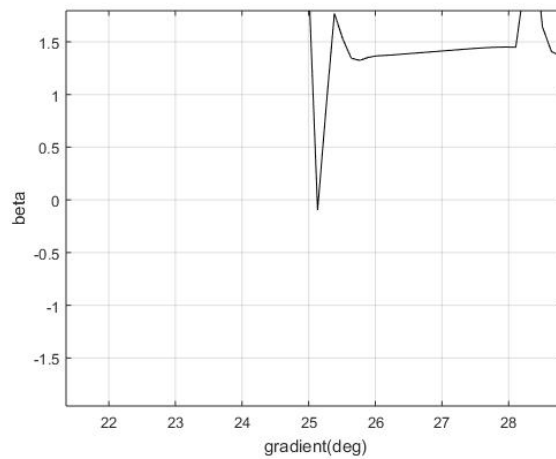
Το τρίτο βέλος (3) δείχνει μια κορυφή η οποία δημιουργείται κατά τον υπολογισμό του κριτηρίου. Η κορυφή οφείλεται στο γεγονός ότι όλα τα πόδια του εξάποδου ρομπότ βρίσκονται σε φάση στήριξης. Η μέγιστη τιμή είναι περίπου 2.4, πολύ μεγαλύτερη από την τιμή που έχει το ρομπότ σε ακινησία. Αυτό οφείλεται στην δημιουργία τριβών στα πόδια του ρομπότ, λόγω της κίνησης του στο επίπεδο, γεγονός το οποίο δεν συμβαίνει για κατάσταση ακινησίας.

Το τέταρτο βέλος (4) δείχνει την τιμή για την τριάδα (2-3-6) σε φάση ανύψωσης και την τριάδα (1-4-5) σε φάση στήριξης. Η τιμή είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή για την πρώτη φάση βηματισμού γεγονός που οφείλεται σε μετακίνηση του κέντρου μάζας και των ποδιών πιο κοντά στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 6-4, φαίνεται η μεταβολή του κριτηρίου για τρίποδο βηματισμό, καθώς η τιμή της κλίσης του εδάφους αυξάνεται με τον χρόνο.

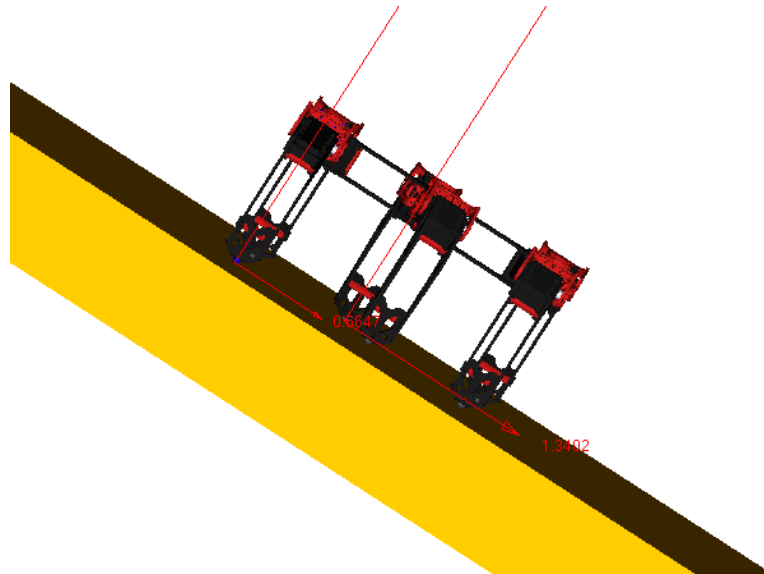


Σχήμα 6-4. Τιμή κριτηρίου για τρίποδο βηματισμό σε έδαφος με κλίση.

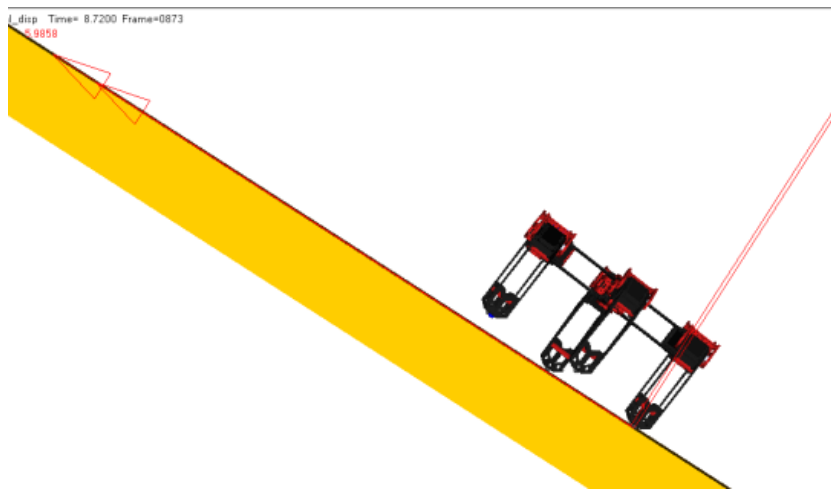
Στο Σχήμα 6-4 φαίνεται η ανατροπή του ρομπότ καθώς η τιμή του κριτηρίου μηδενίζεται. Αυτό σημαίνει ότι με τρίποδο βηματισμό, με την συγκεκριμένη διαδοχή ποδιών, η μέγιστη κλίση στην οποία μπορεί το ρομπότ να προχωράει χωρίς να ανατρέπεται είναι μικρότερη ή ίση από 25 μοίρες (Σχήμα 6-5).



Σχήμα 6-5. Ανατροπή τρίποδου βηματισμού στις 25°.



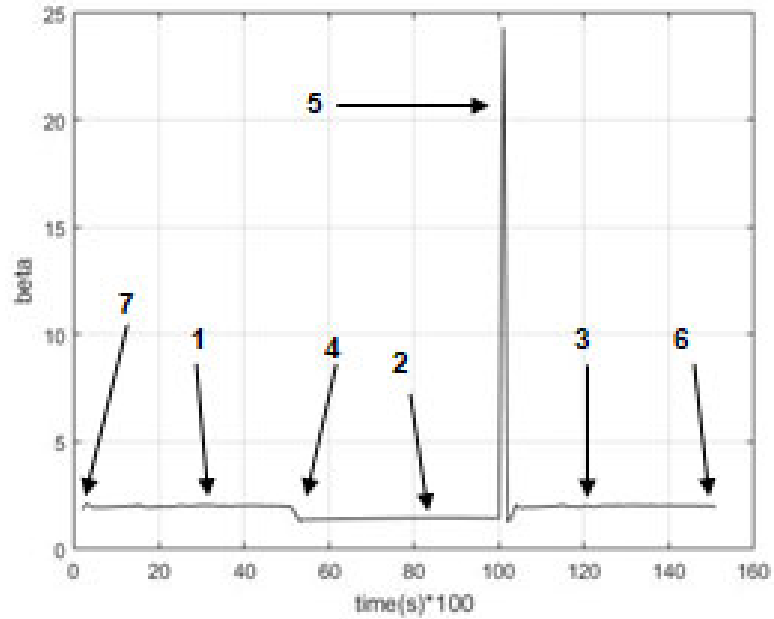
Σχήμα 6-6. Στιγμιότυπο για τρίποδο βηματισμό σε έδαφος με κλίση με ρομπότ ευσταθές



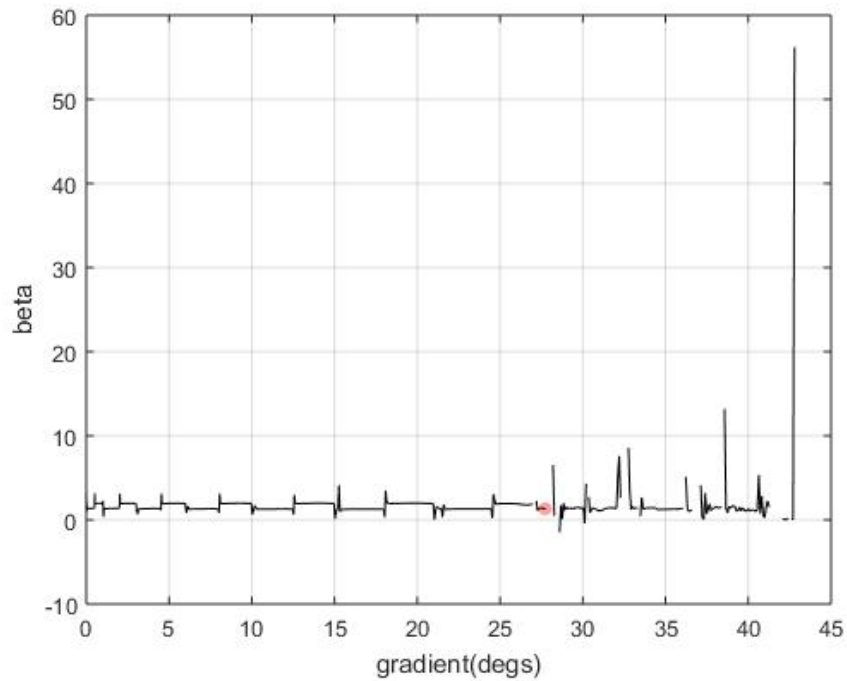
Σχήμα 6-7. Στιγμιότυπο τρίποδου βηματισμού σε έδαφος με κλίση με ρομπότ σε κατάσταση αστάθειας

6.3 Tetrapod Gait

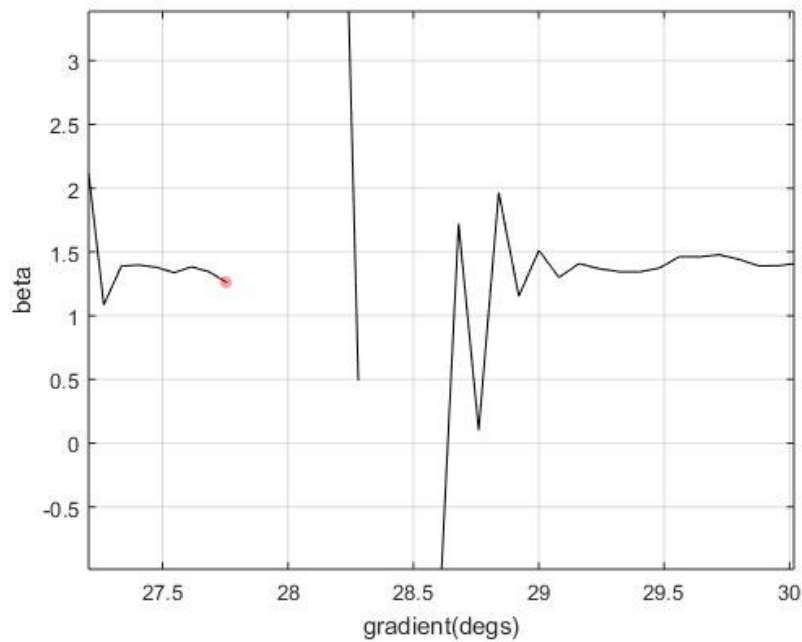
Στο Σχήμα 6-8 και στο Σχήμα 6-9 παρουσιάζονται οι τιμές του κριτηρίου για τετράποδο βηματισμό και leg Sequence (1-4), (2-5), (3-6). Με την ίδια λογική όπως και στον τρίποδο βηματισμό τα βέλη υποδεικνύουν τις καταστάσεις στήριξης (βέλη 1,2,3), τις δημιουργίες των κορυφών λόγω της εμφάνισης τριβών (4,5,6) στα άκρα από την προσομοίωση ως spring damper των δυνάμεων επαφής, και τέλος την αρχικοποίηση της προσομοίωσης (7). Παρατηρείτε αδυναμία μέτρησης του κριτηρίου στις 28 μοίρες που σημαίνει και την ανατροπή του ρομπότ (Σχήμα 6-10). Συμπερασματικά το εξάποδο ρομπότ σε τετράποδο βηματισμό ανατράπηκε σε μεγαλύτερη κλίση από ότι σε τρίποδο βηματισμό.



Σχήμα 6-8. Τιμή κριτηρίου FASM για τετράποδο βηματισμό σε έδαφος χωρίς κλίση για διάρκεια 1.5 s.



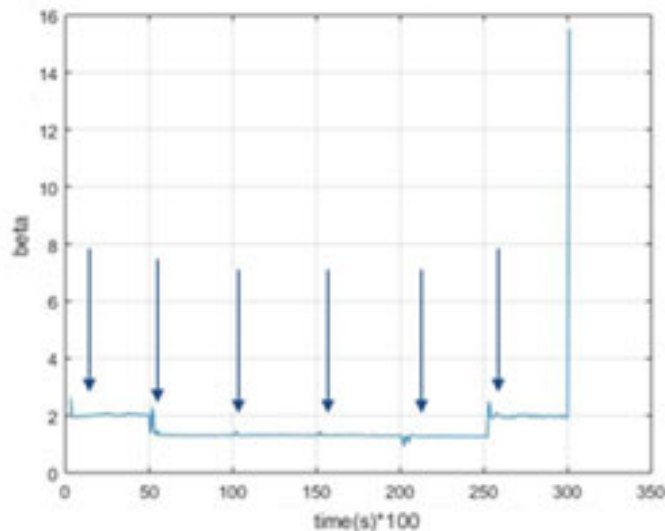
Σχήμα 6-9. Τιμή κριτηρίου για τετράποδο βηματισμό σε έδαφος με κλίση.



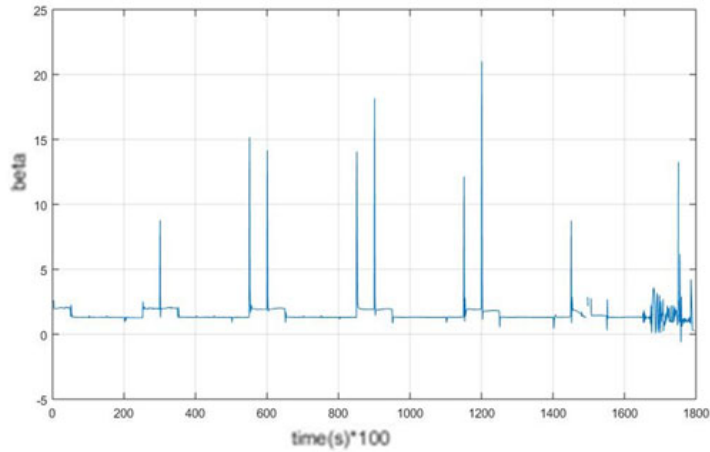
Σχήμα 6-10. Ανατροπή τετράποδου βηματισμού στις 28°.

6.4 Pentapod Gait

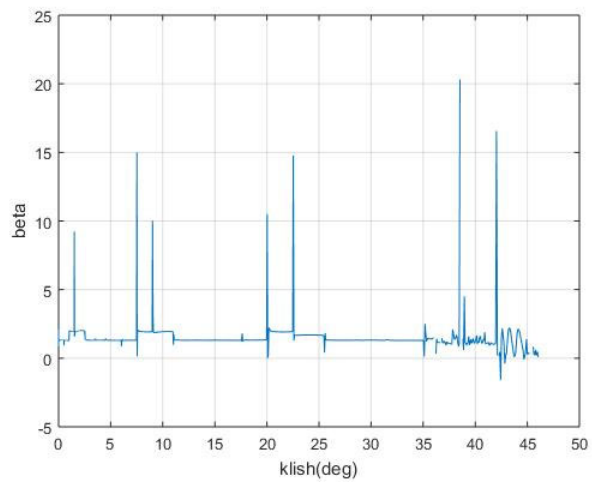
Με την ίδια λογική εκτελείται ο αλγόριθμος για την εύρεση του κριτηρίου FASM για πεντάποδο βηματισμό (Σχήμα 6-11). Παρατηρούμε μεγαλύτερη ευστάθεια για τις τιμές του κριτηρίου σε σχέση με τον τρίποδο και τετράποδο βηματισμό (Σχήμα 6-12). Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι η ανατροπή γίνεται περίπου στις 41 μοίρες (Σχήμα 6-13).



Σχήμα 6-11. Τιμή κριτηρίου FASM για πεντάποδο βηματισμό σε έδαφος χωρίς κλίση για διάρκεια 3 s.



Σχήμα 6-12. Τιμή κριτηρίου για πεντάποδο βηματισμό σε έδαφος με κλίση.



Σχήμα 6-13. Ανατροπή πεντάποδου βηματισμού στις 42°.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το κριτήριο FASM είναι ικανοποιητικό στην εύρεση της μέγιστης ευστάθειας του εξάποδου ρομπότ, για κάθε δοσμένο σχηματισμό και βηματισμό του.

Στην παρούσα εργασία, το εξάποδο ρομπότ θα μπορούσε να κινηθεί σε έδαφος με κλίση (Πίνακας 6-2). Σε κάθε οριακή τιμή θα πρέπει αλλάζει το βηματισμό του κατάλληλα.

Πίνακας 6-2. Βέλτιστες κλίσεις εδάφους.

Βηματισμός	Κλίση εδάφους (ανηφορική)
Tripod	≤ 25 deg
Tetrapod	≤ 28 deg
Pentapod	≤ 42 deg

7 Μελλοντική εργασία

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση και ο κινηματικός έλεγχος εξάποδου ρομπότ με σκοπό την επίτευξη την μέγιστη ευστάθεια. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το κριτήριο FASM είναι ικανοποιητικό για την εύρεση της ευστάθειας του ρομπότ, με την χρήση μόνο αισθητήρων δύναμης.

Υπάρχουν αρκετά επιπρόσθετα χαρακτηριστικά τα οποία θα χρήζουν μελέτης και πειραμάτων.

Ένα από τα βασικά πειράματα που χρήζουν εκτέλεσης είναι η μελέτη όλων των συνδυασμών για τους τρεις διαφορετικούς βηματισμούς του εξάποδου ρομπότ και η εξαγωγή του κριτηρίου FASM για κάθε έναν από τους 830 διαφορετικούς συνδυασμούς. Οι τιμές θα αποθηκεύονται σε ένα database για διάφορες τιμές της κλίσης του εδάφους. Ένας αλγόριθμος θα διαβάζει τις τιμές της βάσης δεδομένων και ανάλογα θα μπορεί να μεταβάλει τον βηματισμό του μεγιστοποιώντας την ευστάθεια του ρομπότ.

Σημαντικό παράγοντα παίζει και η τοπολογία των ποδιών στο έδαφος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η διάταξη κατά reptile. Θα πρέπει να γίνει μελέτη και άλλων διατάξεων των ποδιών προκειμένου να εξαχθεί συμπέρασμα για το ποια είναι η βέλτιστη για τις συνθήκες εδάφους στο οποίο πλοηγείται το ρομπότ.

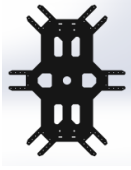
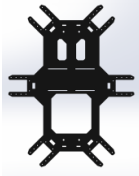


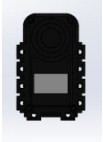





Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα διάνυσμα χρόνου το οποίο δεν αντιστοιχεί στον πραγματικό, αλλά χρησιμεύει στην εκτέλεση των τροχιακών των πελμάτων. Ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους δημιουργήθηκε, είναι η ταχύτερη εναλλαγή του βηματισμού του ρομπότ όταν αυτό κριθεί απαραίτητο, χωρίς το ρομπότ να ολοκληρώνει τον κύκλο εργασίας του. Για τον λόγο αυτό μετά από πειράματα, φαίνεται ότι οι κινητήρες του ρομπότ δεν θα πρέπει να λειτουργούν στην μέγιστη ταχύτητα τους, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα από την τρέχουσα του βηματισμού, προκειμένου κάποιο πόδι ίδιας φάσης, να πατήσει στο έδαφος πριν από τα υπόλοιπα.

Τέλος σημαντική επίδραση θα είχε η τοποθέτηση ενός ακόμα σερβοκινητήρα στο κάθε πόδι, δημιουργώντας έτσι πλεονάζοντες βαθμούς ελευθερίας, δίνοντας όμως στο ρομπότ μεγαλύτερη ευχέρεια αλλαγής του σχήματος του για την αναρρίχηση ή την κατάβαση από δύσβατες περιοχές, καθώς και η μελέτη της επίδρασης του μεγέθους του βήματος του ρομπότ στην ευστάθεια του.

Βιβλιογραφία

- [1] Papadopoulos, E. and Rey, D., "The Force-Angle Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators," *Vehicle System Dynamics*, (2000), 33:1, 29-48
[https://doi.org/10.1076/0042-3114\(200001\)33:1;1-5;FT029](https://doi.org/10.1076/0042-3114(200001)33:1;1-5;FT029)
- [2] Davliakos I., Roditis I., Lika K., Breki Ch.-M., Papadopoulos E., "Design, development, and control of a tough electrohydraulic hexapod robot for subsea operations", *Advanced Robotics*, (2018), 32:9, 477-499, DOI: [10.1080/01691864.2018.1461684](https://doi.org/10.1080/01691864.2018.1461684)
- [3] Tedeschi F, Carbone G. "Design Issues for Hexapod Walking Robots", *Robotics*. (2014), 3(2):181-206. <https://doi.org/10.3390/robotics3020181>
- [4] Rekleitis G., Vidakis M., Papadopoulos, E. "Optimal Leg Sequencing for a Hexapod Subject to External Forces and Slopes," *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019, pp. 6302-6308, DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793826.
<https://www.trossenrobotics.com/hex-mk2>
- [5] <https://grabcad.com/library/hexapod-robot-12>
- [6] Ratiu M., & Rus A. & Balas M., "Modeling in ADAMS of a 6R industrial robot." *MATEC Web of Conferences*, (2018),pp. 184. DOI: 02006. 10.1051/matecconf/201818402006.
- [7] Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2006). *Robot modeling and control*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons
- [8] Marhefka W. and Orin E., "Simulation of contact using a nonlinear damping model," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996, pp. 1662-1668 vol.2, DOI: 10.1109/ROBOT.1996.506951.
- [9] Popov, V & Heß, M. & Willert, E. *Handbook of Contact Mechanics: Exact Solutions of Axisymmetric Contact Problems*, (2019), Springer, DOI: 10.1007/978-3-662-58709-6.
<https://www.MSCsoftware.com/exercise-modules/contact-analysis-friction>
- [10] <https://www.MSCsoftware.com/exercise-modules/contact-analysis-friction>
- [11] Jazar N. R. (2007) *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- [12] Biagiotti L and Melchiorri C. 2008. *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots* (1st. ed.). Springer Publishing Company, Incorporated.
- [13] Kottege, Navinda et al. "Energetics-informed hexapod gait transitions across terrains." 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2015): 5140-5147.
- [14] K. Machairas and E. Papadopoulos, "An active compliance controller for quadruped trotting," *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2016, pp. 743-748, doi: 10.1109/MED.2016.7536064.
- [15] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/torque.html>
- [16] https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
- [17] https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html

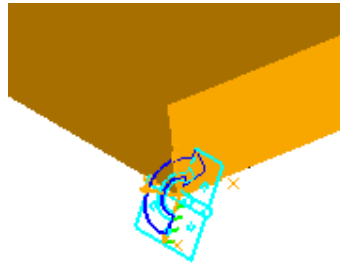
Παράρτημα Α

Εξάρτημα		Ποσότητα
Top body plate		1
Bottom body plate		1
Άξονας στήριξης εξαρτημάτων		20
Άξονας κίνησης σερβοκινητήρα(aksonaki1)		18
AX-12 servo motor		18
Απόληξη ποδιού		6
Femur-tibia connector Πρώτο τμήμα		6
Coxa-femur connector (απαιτούνται για κάθε ένωση)		12
Tibia link (2 σε κάθε πόδι)		12
Πέλμα ποδιού		6

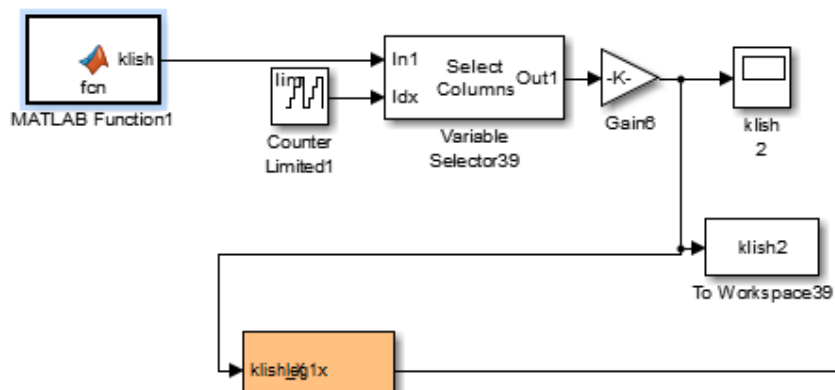
Ένωση σερβοκινητήρα με connectors		18
Femur-tibia connector Δεύτερο τμήμα		6

Παράρτημα Β

Έλεγχος κλίσης εδάφους



Σχήμα Β-1. Τοποθέτηση στροφικού συνδέσμου στην πλατφόρμα κίνησης



Σχήμα Β-2. Αλγόριθμος μεταβολής κλίσης εδάφους

Leg Forward Kinematics Algorithm

Στο σημείο αυτό παρατίθεται ο αλγόριθμος παραγωγής του workspace του ποδιού του εξάποδου ρομπότ.

```
q1d= zeros(1,300);  
q2d= zeros(1,300);  
q3d= zeros(1,300);  
x= zeros(1,300);  
y= zeros(1,300);  
z= zeros(1,300);
```

```
for i=1:1:300  
q1d(i)=q1.data(i);  
q2d(i)=q3.data(i);  
q3d(i)=q5.data(i);  
lc=0.052; lf=0.0611; lt=0.1338;  
q3_j=1.2645;q2_j=0.0534;
```

```
A00=[cos(pi/2) -sin(pi/2)*cos(0) sin(pi/2)*sin(0) 0;  
sin(pi/2) cos(pi/2)*cos(0) -cos(pi/2)*sin(0) 0;  
0 sin(0) cos(0) 0;  
0 0 0 1;];
```

```

A01=[cos(q1d(i)) -sin(q1d(i))*cos(pi/2) sin(q1d(i))*sin(pi/2) lc*cos(q1d(i));
sin(q1d(i)) cos(q1d(i))*cos(pi/2) -cos(q1d(i))*sin(pi/2) lc*sin(q1d(i));
0 sin(pi/2) cos(pi/2) 0;
0 0 0 1;];

A12=[cos(q2d(i)-q2_i) -sin(q2d(i)-q2_i)*cos(0) sin(q2d(i)-q2_i)*sin(0) lf*cos(q2d(i)-
q2_i);
sin(q2d(i)-q2_i) cos(q2d(i)-q2_i)*cos(0) -cos(q2d(i)-q2_i)*sin(0) lf*sin(q2d(i)-q2_i);
0 sin(0) cos(0) 0;
0 0 0 1;];

A23=[cos(q3d(i)-q3_i) -sin(q3d(i)-q3_i)*cos(0) sin(q3d(i)-q3_i)*sin(0) lf*cos(q3d(i)-
q3_i);
sin(q3d(i)-q3_i) cos(q3d(i)-q3_i)*cos(0) -cos(q3d(i)-q3_i)*sin(0) lf*sin(q3d(i)-q3_i);
0 sin(0) cos(0) 0;
0 0 0 1;];
A3E=[cos(-pi/2) -sin(-pi/2)*cos(1.29) sin(-pi/2)*sin(1.29) 0;
sin(-pi/2) cos(-pi/2)*cos(1.29) -cos(-pi/2)*sin(1.29) 0;
0 sin(1.29) cos(1.29) 0;
0 0 0 1;];

A0E=(A00*A01*A12*A23*A3E);
x(i)=A0E(1,4);
y(i)=A0E(2,4);
z(i)=A0E(3,4);
end

```

Trajectory Algorithm

Στην συνέχεια δίνεται ο αλγόριθμος παραγωγής της τροχιάς του κάθε ποδιού για κάθε βηματισμό.

```

function[x1,y1,z1]=fcn(mode,a1,b1,legSequenceTripod,legSequenceTetrapod,legSequen
cePentapod)
x1=zeros(1,300);
y1=zeros(1,300);
z1=zeros(1,300);
t=zeros(1,300);
if mode==3
if legSequenceTripod==1 && legSequencePentapod==0 && legSequenceTetrapod==0
for i=1:1:51
t(i)=i/100-0.01;
x1(i)=a1*cos(2*pi*t(i))-a1;
z1(i)=b1*sin(2*pi*t(i))-0.1348;
y1(i)=0.1465;
end

for i=51:1:100
t(i)=i/100-0.01;
x1(i)=4*a1*t(i)-4*a1;
z1(i)=-0.1348;
y1(i)=0.1465;
end
end

```

```

end
if legSequenceTripod==2 && legSequencePentapod==0 && legSequenceTetrapod==0
    for i=1:1:51
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=4*a1*t(i);
        z1(i)=-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
    for i=51:1:100
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=-a1*cos(2*pi*t(i))+a1;
        z1(i)=-b1*sin(2*pi*t(i))-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
end
end
if mode==4
%%first pair
if legSequenceTetrapod==1 && legSequencePentapod==0 && legSequenceTripod==0
    for i=1:1:51
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=a1*cos(2*pi*t(i))-a1;
        z1(i)=b1*sin(2*pi*t(i))-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
    for i=51:1:150
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=2*a1*t(i)-3*a1;
        z1(i)=-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
end
end
%%second pair
if legSequenceTetrapod==2 && legSequencePentapod==0 && legSequenceTripod==0
    for i=1:1:51
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=2*a1*t(i);
        z1(i)=-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
    for i=51:1:101
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=-a1*cos(2*pi*t(i));
        z1(i)=-b1*sin(2*pi*t(i))-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
    for i=101:1:150
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=2*a1*t(i)-3*a1;
        z1(i)=-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
end
end
%%third pair
if legSequenceTetrapod==3 && legSequencePentapod==0 && legSequenceTripod==0

```

```

for i=1:1:101
    t(i)=i/100-0.01;
    x1(i)=2*a1*t(i);
    z1(i)=-0.1348;
    y1(i)=0.1465;
end
for i=101:1:150
    t(i)=i/100-0.01;
    x1(i)=a1*cos(2*pi*t(i))+a1;
    z1(i)=b1*sin(2*pi*t(i))-0.1348;
    y1(i)=0.1465;
end
end
end
if mode==5
if legSequencePentapod==1 && legSequenceTetrapod==0 && legSequenceTripod==0
    for i=1:1:51
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=(a1*cos(2*pi*t(i)))-a1;
        z1(i)=b1*sin(2*pi*t(i))-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
    for i=51:1:300
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=4/5*a1*t(i)-7/5*a1-a1;
        z1(i)=-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
end
end
if legSequencePentapod==2 && legSequenceTetrapod==0 && legSequenceTripod==0
    for i=1:1:51
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=2*a1*t(i);
        z1(i)=-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
    for i=51:1:101
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=-(a1*cos(2*pi*t(i)));
        z1(i)=b1*sin(2*pi*t(i))-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
    for i=101:1:300
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=(1/2)*a1*t(i)-(3/2)*a1;
        z1(i)=-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
end
end
if legSequencePentapod==3 && legSequenceTetrapod==0 && legSequenceTripod==0
    for i=1:1:101
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=a1*t(i);
        y1(i)=0.1465;
        z1(i)=-0.1348;
    end
end

```

```

end
for i=101:1:151
    t(i)=i/100-0.01;
    x1(i)=(a1*cos(2*pi*t(i)));
    z1(i)=b1*sin(2*pi*t(i))-0.1348;
    y1(i)=0.1465;

end
for i=151:1:300
    t(i)=i/100-0.01;
    x1(i)=(2/3)*a1*t(i)-2*a1;
    z1(i)=-0.1348;
    y1(i)=0.1465;
end
end
if legSequencePentapod==4 && legSequenceTetrapod==0 && legSequenceTripod==0
    for i=1:1:151
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=(2/3)*a1*t(i);
        z1(i)=-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
    for i=151:1:201
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=-(a1*cos(2*pi*t(i)));
        z1(i)=b1*sin(2*pi*t(i))-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
    for i=201:1:300
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=a1*t(i)-3*a1;
        y1(i)=0.1465;
        z1(i)=-0.1348;
    end
end
end
if legSequencePentapod==5 && legSequenceTetrapod==0 && legSequenceTripod==0
    for i=1:1:201
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=(a1/2)*t(i);
        y1(i)=0.1465;
        z1(i)=-0.1348;
    end
    for i=201:1:251
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=(a1*cos(2*pi*t(i)));
        z1(i)=b1*sin(2*pi*t(i))-0.1348;
        y1(i)=0.1465;
    end
    for i=251:1:300
        t(i)=i/100-0.01;
        x1(i)=2*a1*t(i)-6*a1;
        y1(i)=0.1465;
        z1(i)=-0.1348;
    end
end
end

```

```

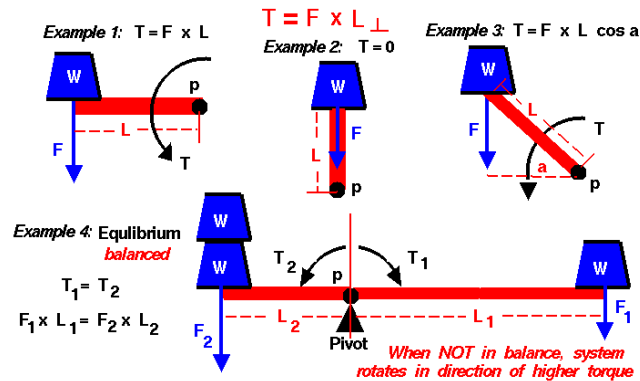
if legSequencePentapod==6 && legSequenceTetrapod==0 && legSequenceTripod==0
  for i=1:1:251
    t(i)=i/100-0.01;
    x1(i)=(4/5)*a1*t(i);
    y1(i)=0.1465;
    z1(i)=-0.1348;
  end
  for i=251:1:300
    t(i)=i/100-0.01;
    x1(i)=-(a1*cos(2*pi*t(i)))+a1;
    z1(i)=b1*sin(2*pi*t(i))-0.1348;
    y1(i)=0.1465;
  end
end
end
if mode==6
  for i=1:1:300
    x1(i)=0;
    y1(i)=0.1465;
    z1(i)=-0.1348;
  end
end
end

```

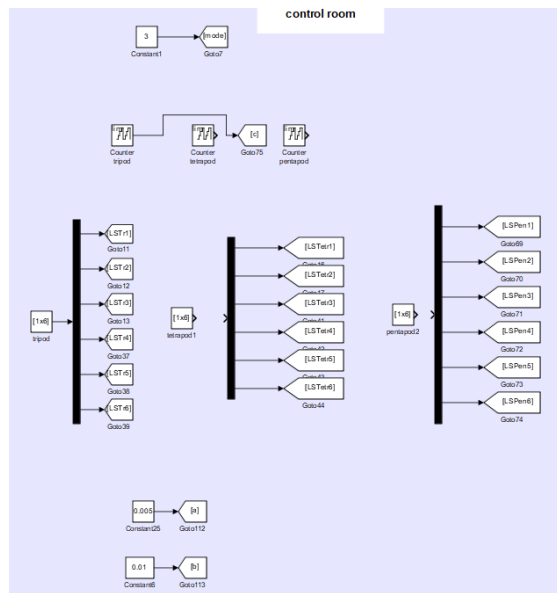

Παράρτημα Γ

Πίνακας Γ-1. Συντελεστές τριβής

Rubber	Rubber	Clean and Dry	1.16	
Rubber	Cardboard	Clean and Dry	0.5 - 0.8	
Rubber	Dry Asphalt	Clean and Dry	0.9	0.5 - 0.8
Rubber	Wet Asphalt	Clean and Dry		0.25 - 0.75
Rubber	Dry Concrete	Clean and Dry		0.6 - 0.85
Rubber	Wet Concrete	Clean and Dry		0.45 - 0.75



Σχήμα Γ-1. Δύναμη και προκληθείσα ροπή



Σχήμα Γ-2. Section ελέγχου legSequence, mode και ελλειπτικού trajectory

Με τα blocks tripod, tetrapod και pentapod δίνουμε το Leg Sequence με το οποίο θα κινηθούν τα πόδια του εξάποδου ρομπότ, ανάλογα με το mode στο οποίο βρισκόμαστε. Με τα counter block δειγματοληπτούνται τα τροχιακά των πελμάτων και ανάλογα με το mode στο οποίο βρισκόμαστε οι τιμές τους είναι Tripod:1-99, Tetrapod:1-149, Pentapod:1-299 και γενικά mode:1 έως (for loop max - 1). Ο λόγος ο οποίος υπάρχει το -1 στα δείγματα, είναι η

ομαλή μετάβαση από την μια περίοδο στην επόμενη, ώστε τα δειγμάτα της να ισούται με 100,150 ή 300 ανάλογα με το mode που βρίσκεται το ρομπότ. Με τα goto tags LSTri(i), LSTet(i) και LSPen(i) επιλέγουμε τις διαδρομές για την ροή των δεδομένων ανάλογα με το mode στο οποίο βρισκόμαστε. Με τα goto tags a,b επιλέγουμε το μέγεθος των αξόνων του ελλειπτικού τροχιακού.

Παράρτημα Δ

Πίνακας Δ-1. Συνδυασμοί τριάδων για τρίποδο βηματισμό

1 ^η τριάδα				2 ^η τριάδα		
1	2	3		4	5	6
1	2	4		3	5	6
1	2	5		3	4	6
1	2	6		3	4	5
1	3	4		2	5	6
1	3	5		2	4	6
1	3	6		2	4	5
1	4	5		2	3	6
1	4	6		2	3	5
1	5	6		2	3	4
2	3	4		1	5	6
2	3	5		1	4	6
2	3	6		1	4	5
2	4	5		1	3	6
2	4	6		1	3	5
2	5	6		1	3	4
3	4	5		1	2	6
3	4	6		1	2	5
3	5	6		1	2	4
4	5	6		1	2	3

Πίνακας Δ-2. Συνδυασμοί ζευγαριών για τετράποδο βηματισμό

Πρώτο ζευγάρι			Δεύτερο ζευγάρι			Τρίτο ζευγάρι	
1	2		3	4		5	6
1	2		3	5		4	6
1	2		3	6		4	5
1	2		5	6		3	4
1	2		4	6		3	5
1	2		4	5		3	6
1	3		2	4		5	6
1	3		2	5		4	6
1	3		2	6		4	5
1	3		5	6		2	4
1	3		4	6		2	5
1	3		4	5		2	6
1	4		2	3		5	6
1	4		2	5		3	6

1	4		2	6		3	5
1	4		5	6		2	3
1	4		3	6		2	5
1	4		3	5		2	6
1	5		2	3		4	6
1	5		2	4		3	6
1	5		2	6		3	4
1	5		4	6		2	3
1	5		3	6		2	4
1	5		3	4		2	6
1	6		2	3		4	5
1	6		2	4		3	5
1	6		2	5		3	4
1	6		4	5		2	3
1	6		3	5		2	4
1	6		3	4		2	5
2	3		1	4		5	6
2	3		1	5		4	6
2	3		1	6		4	5
2	3		5	6		1	4
2	3		4	6		1	5
2	3		4	5		1	6
2	4		1	3		5	6
2	4		1	5		3	6
2	4		1	6		3	5
2	4		5	6		1	3
2	4		3	6		1	5
2	4		3	5		1	6
2	5		1	3		4	6
2	5		1	4		3	6
2	5		1	6		3	4
2	5		4	6		1	3
2	5		3	6		1	4
2	5		3	4		1	6
2	6		1	3		4	5
2	6		1	4		3	5
2	6		1	5		3	4
2	6		4	5		1	3

2	6		3	5		1	4
2	6		3	4		1	5
3	4		1	2		5	6
3	4		1	5		2	6
3	4		1	6		2	5
3	4		5	6		1	2
3	4		2	6		1	5
3	4		2	5		1	6
3	5		1	2		4	6
3	5		1	4		2	6
3	5		1	6		2	4
3	5		4	6		1	2
3	5		2	6		1	4
3	5		2	4		1	6
3	6		1	2		4	5
3	6		1	4		2	5
3	6		1	5		2	4
3	6		4	5		1	2
3	6		2	5		1	4
3	6		2	4		1	5
4	5		1	2		3	6
4	5		1	3		2	6
4	5		1	6		2	3
4	5		3	6		1	2
4	5		2	6		1	3
4	5		2	3		1	6
4	6		1	2		3	5
4	6		1	3		2	5
4	6		1	5		2	3
4	6		3	5		1	2
4	6		2	5		1	3
4	6		2	3		1	5
5	6		1	2		3	4
5	6		1	3		2	4
5	6		1	4		2	3
5	6		3	4		1	2
5	6		2	4		1	3
5	6		2	3		1	4

