ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Παραμετρική μελέτη ποδιού ρομπότ με πόδια και πειραματική αξιολόγηση επενέργησης πέλματος από τεχνητό μυ (DEAP)

Βασίλης Αγαπητός

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΕΜΠ 2011

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη βελτιστοποίηση σχεδιαστικών παραμέτρων του ποδιού ενός μονόποδου ρομπότ, με σκοπό τη μείωση της πρόνευσης του κορμού και της καταναλισκόμενης ενέργειας του ρομπότ για δεδομένη ταχύτητα πρόωσης. Η εργασία αποτελείται από τρία μέρη.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται η δυναμική ανάλυση του συστήματος βάσει της μεθόδου Lagrange. Το πρώτο μοντέλο που αναλύεται είναι το ανεστραμμένο εκκρεμές φορτισμένου ελατηρίου, επίσης γνωστό ως μοντέλο SLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum). Το μοντέλο αυτό επεκτείνεται ώστε να περιλαμβάνει τη μάζα και την αδράνεια του ποδιού και χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των εξισώσεων κίνησης του συστήματος. Για την αναλυτική μελέτη της επίδρασης της μάζας και της αδράνειας του ποδιού, θεωρείται σύστημα δυο εκκρεμών που περιγράφει την κίνηση του μονόποδου ρομπότ κατά την εναέρια φάση. Τα δυο εκκρεμή σώματα (κορμός και πόδι) είναι συζευγμένα στο στροφικό βαθμό ελευθερίας. Το πόδι επενεργείται μέσω συστήματος μετάδοσης της κίνησης από ηλεκτρικό κινητήρα που βρίσκεται στον κορμό του ρομπότ και τοποθετείται σε συγκεκριμένη γωνία στο οβελιαίο επίπεδο αντιδρώντας στη ροπή αδράνειας του κορμού και επηρεάζοντας τη γωνία πρόνευσής του. Στην παρούσα εργασία, διερευνάται η επίδραση της ιδιοσυχνότητας του ποδιού, δηλαδή του λόγου της μάζας προς τη ροπή αδράνειάς του, στη γωνία πρόνευσης του κορμού για συγκεκριμένες επιθυμητές γωνιακές ταχύτητες. Οι γωνιακές ταχύτητες του ποδιού ανάγονται σε επιθυμητές ταχύτητες πρόωσης του ρομπότ, σχετίζοντας με τον τρόπο αυτό την ιδιοσυχνότητα του ποδιού με την ταχύτητα πρόωσης. Επιπλέον, παρουσιάζονται κατευθυντήριες γραμμές για τη μεταβολή ή ρύθμιση της ιδιοσυχνότητας του ποδιού. Αποδεικνύεται ότι μεγαλύτερες ιδιοσυχνότητες επιτυγχάνονται για τη μορφολογία ποδιού που συναντάμε και στη φύση, δηλαδή πόδι με αυξημένη συγκέντρωση μάζας στο ανώτερο τμήμα του ή αλλιώς πόδι με γλουτό.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας αναπτύσσεται σύνθετο μοντέλο της πειραματικής πλατφόρμας του μονόποδου ρομπότ SAHR (Single Actuator Hopping Robot) του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου και χρησιμοποιείται για την εκτέλεση προσομοιώσεων με χρήση του λογισμικού ανάλυσης της δυναμικής πολλαπλών σωμάτων ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems). Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει απώλειες λόγω ολίσθησης και

πλαστικής κρούσης με το έδαφος, ιξώδεις και στατικές τριβές στο ρότορα του κινητήρα και στο μειωτήρα στροφών, ελαστικότητα στον ιμάντα μετάδοσης κίνησης, καθώς και πλήρη γεωμετρικά και αδρανειακά στοιχεία των φυσικών μερών του SAHR. Το μονόποδο ρομπότ στερεωμένο επάνω σε έναν βραχίονα, κινείται κυκλικά γύρω από μια σταθερή βάση. Η κίνηση του ρομπότ διατηρείται σταθερή ως προς την πρόσθια ταχύτητα και το ύψος αναπήδησης με χρήση κατάλληλου ελεγκτή που έχει αναπτυχθεί από τους Χερουβείμ και Παπαδόπουλο. Ο αλγόριθμος ελέγχου υλοποιείται σε περιβάλλον Matlab/Simulink και αλληλεπιδρά με το μοντέλο του ρομπότ στο ADAMS μέσω υπορουτίνας επικοινωνίας των δυο λογισμικών. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν τα θεωρητικά αποτελέσματα του πρώτου μέρους της εργασίας. Επιπλέον, η πλατφόρμα προσομοίωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω πειράματα με σκοπό τον προσδιορισμό παραμέτρων του φυσικού συστήματος ή/και την αξιολόγηση νέων σχεδιασμών ποδιού όπως πραγματοποιήθηκε για το πόδι με πέλμα.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται εισαγωγικά στοιχεία του θέματος των τεχνητών μυών και εξετάζεται η προσθήκη στροφικής άρθρωσης και πέλματος στο μονόποδο ρομπότ. Γίνεται προσομοίωση του συστήματος με πέλμα στο ADAMS και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό πέλματος για το φυσικό πρωτότυπο του μονόποδου ρομπότ. Για την επενέργηση του πέλματος χρησιμοποιείται τεχνητός μυς της κατηγορίας DEAP (Dielectric Electro Active Polymers) και συγκεκριμένα της εταιρίας Danfoss Polypower™. Αρχικά, κατασκευάζεται επίπεδος DEAP επενεργητής και διάταξη για την εκτέλεση πειραμάτων χαρακτηρισμού του υλικού. Στη συνέχεια, κατασκευάζεται κυλινδρικός DEAP επενεργητής έλξης και «ανταγωνιστικός» μηχανισμός ελατηρίου - επενεργητή DEAP για το μονόποδο ρομπότ. Η πειραματική αξιολόγηση επιβεβαιώνει την αρχή λειτουργίας του DEAP και τα πρώτα αποτελέσματα δείχνουν ότι το υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επενέργηση αρθρώσεων με μικρό εύρος κινήσεων και μικρές απαιτήσεις δυνάμεων/ροπών.

Abstract

This thesis addresses the optimization of design parameters of a single legged robot in order to reduce the pitch of the torso and the energy consumption of the robot for a given speed propulsion. The thesis is divided in three parts.

In the first part of this work, the dynamic analysis of the system using the Lagrange method is presented. The first model analyzed is the spring loaded inverted pendulum, also known as SLIP. The model is extended to include the mass and the inertia of the leg and it is used to extract the equations of motion of the system. For a detailed study of the effects of the mass and inertia of the leg we consider a system consisting from two pendulums. This model describes the motion of the monopod robot in the aerial phase. The two bodies are coupled to the torsion degree of freedom. The leg acts via the transmission of electric motor located in the torso of the robot and placed in a certain angle in the sagittal plane in response to the moment of inertia of the body and affecting the angle of pitch. In the present study we investigated the effect of the natural frequency of the leg, i.e. the ratio of mass to the moment of inertia, to the pitch angle of the torso for specific desired angular velocities. The angular velocities of the foot relate to the desired speed of propulsion of the robot, and therefore the resonant frequency of the leg is related to the speed of propulsion. We present guidelines for changing or adjusting the natural frequency of the leg. It turns out that higher natural frequencies are obtained for the foot morphology encountered in nature, i.e. legs with increased concentration of mass in the upper leg or otherwise in the buttock.

The second part develops a complex model of the experimental robot platform SAHR (Single Actuator Hopping Robot) of the Automation and Control Laboratory which is used to perform simulations using multi body dynamic simulation software ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems). This model includes losses due to Coulomb friction and plastic impact with the ground, viscous and static friction in the transmission gear, and full geometric and inertial data of physical parts of the SAHR. The monopod robot mounted onto an arm, moves cyclically around a fixed axis. The speed and bouncing height of the robot is controlled using a controller developed by Cherouvim & Papadopoulos. The control algorithm is implemented in the Matlab/Simulink environment and interacts with the model of the robot in ADAMS through a communication subroutine between the two s/w packages. Simulation results

confirm the theoretical results of the first part of the work. Furthermore, the simulation platform can be used for further experiments to determine the parameters of the physical system and / or evaluation of new designs stand out as the leg with foot.

In the latter part of the work, we first present introductory information on the issue of artificial muscles and test the addition of rotational joints and foot in monopod robot. The system with a foot is simulated in ADAMS and the results are used to design patterns for the natural original monopod robot. The tread is actuated using an artificial muscle group DEAP (Dielectric Electro Active Polymers), namely the company Danfoss Polypower ™. Initially, a flat DEAP actuator was built and was characterized using a special instrumented device. Next, we built a cylindrical DEAP pull actuator and an antagonistic actuation spring mechanism. The experimental evaluation confirms the principle of operation of DEAP and initial results show that the material can be used for joints with small-scale motions and small range of forces/moments.

Ευχαριστίες - Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη διπλωματική εργασία του συγγραφέα στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των σπουδών του στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με αντικείμενο τα ρομπότ με πόδια.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να αναφέρω και να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με βοήθησαν και μου συμπαραστάθηκαν στην μακρόχρονη πορεία ολοκλήρωσης της εργασίας αυτής.

Καταρχήν, ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου και τα αδέρφια μου που αγόγγυστα με υποστηρίζουν χρόνια τώρα. Χωρίς τη βοήθεια τη δική τους και την αμέριστη συμπαράσταση της Ελένης που με συντροφεύει όλο αυτό το διάστημα, δεν θα είχε καταστεί δυνατό να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή. Τους ευχαριστώ γιατί πιστέψαν στο στόχο που έθεσα και με εμψύχωσαν για να τον ολοκληρώσω.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τον δάσκαλο και επιβλέποντά μου καθηγητή κ. Ε. Παπαδόπουλο, που στάθηκε ακούραστα στο πλευρό μου. Τον ευχαριστώ για την ευκαιρία που μου έδωσε να τον γνωρίσω και να εξελιχθώ κοντά του, αποδεχόμενος τις ελλείψεις μου. Είναι ένας δάσκαλος που προσφέρει απλόχερα τόσο με τις γνώσεις του όσο και με το παράδειγμά του.

Θερμά ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Ιωάννη Κοντολάτη για τον χώρο που μοιραστήκαμε, για τον χρόνο που αφιέρωσε στις συζητήσεις μας, για τα τεχνικά θέματα που επιμελήθηκε αλλά κυρίως για τον ενθουσιασμό και την εμπιστοσύνη του, που αποτελέσαν πολύ σημαντικό κίνητρο στην πορεία μου.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους υποψήφιους διδάκτορες Μιχάλη Μακροδημήτρη και Αλέξανδρο Νικολακάκη για την σημαντικότατη βοήθειά τους στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας, καθώς και την εμπιστοσύνη και υποστήριξή τους. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Μιχάλη για την παρέα και τη βοήθεια που μου προσέφερε τις ώρες που θα μπορούσε να είναι μακριά από το εργαστήριο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Δρ. Νικόλαο-Δημήτριο Χερουβείμ και τον Δρ. Παναγιώτη Χατζάκο για την προθυμία με την οποία με δέχτηκαν στην ομάδα τους και με βοήθησαν κατά το πρώτο διάστημα της εργασίας. Το έργο που αφήσαν πίσω στο εργαστήριο είναι ιδιαίτερα πολύτιμο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας του εργαστηρίου για το ευχάριστο κλίμα εργασίας και την προθυμία τους όποτε τους χρειάστηκα.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

Βασίλης Γ. Αγαπητός

Αφιερώνεται στους γονείς μου
και στην Ελένη για την
μακρόχρονη υπομονή
και υποστήριξή τους...

Περιεχόμενα

Πίνακας Εικόνων

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας Μεταβλητών

Σύμβολο	***Μονάδες***	***Περιγραφή***
γ	deg	απόλυτη γωνία ποδιού
θ	deg	γωνία πρόνευσης κορμού
τ	N.m	εφαρμοζόμενη ροπή
b	N.m/s	συντελεστής ιξώδους τριβής
d	m	απόσταση: κέντρου μάζας – στροφικής άρθρωσης
g	m/s^2	επιτάχυνση της βαρύτητας
h	m	θέση άρθρωσης γοφού (hip)
I	$kg.m^2$	αδράνεια σώματος
k	N/m	σταθερά ελατηρίου
l	m	μήκος ποδιού
l_0	m	απόσταση: κάτω άκρο ποδιού - στροφικής άρθρωσης
l_e	m	απόσταση: άνω άκρο ποδιού - στροφικής άρθρωσης
L	m	συνολικό μήκος ποδιού
m	kg	μάζα σώματος
m_t	kg	συνολική μάζα σώματος
m_l	kg	μάζα ποδιού
R	m	εξωτερική ακτίνα ποδιού
r	m	εσωτερική ακτίνα ποδιού
x	m	οριζόντια μετατόπιση του κέντρου μάζας του κορμού
x_t	m	οριζόντια θέση άκρου του ποδιού (tip)
y	m	κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου μάζας του κορμού
a	–	δείκτης: εναέρια φάση (aerial)
cw	–	δείκτης: αντίβαρο (counterweight)
h	–	δείκτης: γοφός (hip)
lo	–	δείκτης: απογείωση (lift off)
l	–	δείκτης: πόδι (leg)
st	–	δείκτης: φάση εδάφους (stance)
td	–	δείκτης: πρόσπτωση (touch down)
ul	–	δείκτης: ανώτερο τμήμα ποδιού (upper leg)

Κεφάλαιο 1
Εισαγωγή

Παρατηρώντας κανείς την ευκολία και την ταχύτητα με την οποία κινούνται τα θηλαστικά σε ανώμαλα και ασυνεχή εδάφη με τη βοήθεια των ποδιών, καταλαβαίνει τα αίτια ανάπτυξης του βιο-μιμητικού κλάδου της ρομποτικής που ασχολείται με τα ρομπότ με πόδια. Ένα από τα πιο ενδεικτικά παραδείγματα που συναντάμε στη φύση και αποδεικνύει την εκτεταμένη προσαρμοστικότητα των συστημάτων αυτών σε ασυνεχή και απροσπέλαστα -από τα λοιπά μέσα- εδάφη, είναι αυτό των αγριοκάτσικων, βλ. Εικόνα 1-1.

Η έρευνα των ρομποτικών συστημάτων με πόδια αριθμεί μόνο λίγες δεκαετίες έρευνας και δεν μπορούμε σε καμία περίπτωση να πούμε πως είμαστε σε θέση να ανταγωνιστούμε τη φύση και τις δυνατότητές της.

Εικόνα 1-1. Ευρωπαϊκός Αίγαγρος (αγριοκάτσικο) σκαρφαλωμένος, υπό κλίση μεγαλύτερη των 60°, στο φράγμα της λίμνης Cingino, στην κοιλάδα Antrona της Ιταλίας, γεύεται αλάτι από τις πέτρες [5].

Αντιθέτως μάλιστα, το παραπάνω θέαμα αποτελεί πηγή έμπνευσης και για τα πιο εξελιγμένα και σύγχρονα ρομποτικά συστήματα με πόδια που συναντάμε στην διεθνή βιβλιογραφία, όπως αυτό του Big Dog [9]. Ενσωματώνονται στην εικόνα αυτή όλα τα προτερήματα των συστημάτων με πόδια που θα μπορούσαμε να τα χωρίσουμε σε τρεις βασικές κατηγορίες [44]:

- η αποσύνδεση της κίνησης του σώματος λόγω των ποδιών από τη διαμόρφωση του εδάφους, ούτως ώστε ένα ανώμαλο έδαφος να μην συνεπάγεται και ανώμαλη κίνηση του φορτίου,
- αυξημένες δυνατότητες υπερκέρασης εμποδίων και διάβασης εδαφών με έντονες κλίσεις,
- δεν υπάρχει ανάγκη συνεχούς τροχιάς στο έδαφος που διαβαίνουν καθώς η στήριξη γίνεται σε επιλεγμένα μόνο σημεία του εδάφους έναντι των τροχών.

Μπορούμε να φανταστούμε την χρησιμότητα τέτοιων εξελιγμένων συστημάτων σε χαλάσματα κτιρίων, σε απότομες ή σαθρές επιφάνειες της γης ή άλλων πλανητών και την υποστήριξη που θα μπορούσαν να παρέχουν στο ανθρώπινο δυναμικό μεταφέροντας το βαρύτερο μέρος του εξοπλισμού ή πιθανώς έναν τραυματία.

Οι δυσκολίες που πρέπει να ξεπεραστούν ως προς τη μελέτη και μίμηση αυτών των συστημάτων σχετίζονται με την πολυπλοκότητα της κίνησης όταν αυτή χρειάζεται τη συνδυασμένη χρήση πολλών ποδιών μαζί, τις εναλλαγές της δυναμικής του συστήματος και την ασταθή ισορροπία στην οποία βρίσκονται κατά τη διάρκεια της κίνησής τους. Έχουν μελετηθεί διάφοροι τρόποι ελέγχου της ευστάθειας της κίνησης όπως συναντάται στις εργασίες των Raibert [38], Buehler [9],[33] και Χερουβείμ [45].

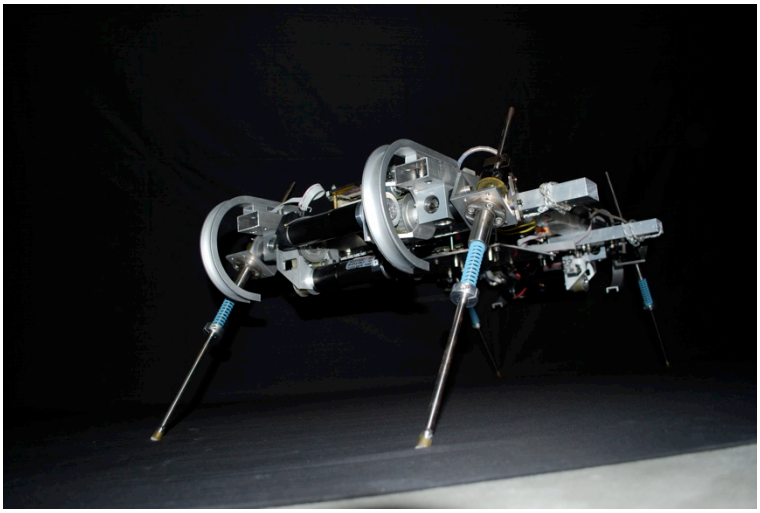
Η παρούσα εργασία βασίζεται και πραγματεύεται παραμέτρους του πρωτότυπου μονόποδου ρομπότ SAHR (Single Actuator Hopping Robot) (Εικόνα 1-3) που κατασκευάστηκε από τους Χατζάκο [44] και Χερουβείμ [45] στα πλαίσια της επιβεβαίωσης των θεωρητικών τους ευρημάτων και σαν ενδιάμεσο στάδιο για την μετάβαση σε τετράποδο ρομποτικό σύστημα (Εικόνα 1-2). Η προσοχή στο τετράποδο σύστημα εστιάζεται στην αύξηση της αυτονομίας του, στο συστηματικό σχεδιασμό του βελτιστοποιώντας το κατασκευαστικά για υψηλές ταχύτητες τρεξίματος της τάξης του 1.5 m/s, ενώ στο μονόποδο σύστημα γίνεται πειραματική αξιολόγηση του ελέγχου της πρόσθιας ταχύτητας και του ύψους αναπήδησης με υποεπενεργούμενους βαθμούς ελευθερίας. Το ρομπότ αποτελείται από ένα σώμα στερεωμένο σε πόδι το οποίο είναι περιορισμένο στην κίνηση στο επίπεδο. Επιτυγχάνεται έλεγχος πρόσθιας ταχύτητας και ύψους αναπήδησης χρησιμοποιώντας παθητικό στοιχείο στην πρισματική άρθρωση του ποδιού, ενώ εφαρμόζεται αλγεβρικός μηχανισμός μεταφοράς ενέργειας από την στροφική άρθρωση που επενεργείται με κινητήρα στην υποενεργούμενη πρισματική άρθρωση.

1.1 *Σκοπός Εργασίας - Κίνητρο*

Σκοπός της εργασίας είναι η συστηματική προσέγγιση του σχεδιασμού του ποδιού του μονόποδου ρομποτικού συστήματος SAHR, ώστε να παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση - πριν την εφαρμογή οποιουδήποτε ελέγχου- λόγω των κατασκευαστικών του χαρακτηριστικών. Με

άλλα λόγια, επιδιώκουμε η δυναμική του φυσικού συστήματος να είναι τέτοια, ώστε να μην αντιτίθεται στην επιβαλλόμενη κίνηση από τους νόμους ελέγχου [38]. Ένας παράπλευρος στόχος είναι η δημιουργία μιας εικονικής πειραματικής πλατφόρμας στην οποία θα δοκιμάζονται και θα αξιολογούνται εναλλακτικά σχέδια ποδιού. Στο τελευταίο μέρος της εργασίας που αφορά την επενέργηση πέλματος από τεχνητό μυ, το κίνητρο της ενασχόλησής μας έγκειται στην ευελιξία των υλικών αυτών. Αν αποδειχθούν αξιόπιστα και ικανά από θέμα ισχύος, ευελπιστούμε ότι θα δώσουν νέα όρια στο τι μπορεί να επιτευχθεί από την τεχνολογία και στο κατά πόσο οι τεχνητοί μηχανισμοί θα ομοιάζουν πλέον με τους φυσικούς.

Μπορεί να αναρωτηθεί γιατί η μελέτη γίνεται πάνω σε ένα μονόποδο ρομποτικό σύστημα. Ασχολούμαστε με το μονόποδο σύστημα, διότι έχει αποδείξει τον σημαντικό ρόλο που κατέχει σαν ενδιάμεσο στάδιο για οποιαδήποτε μεταβολή κρίνεται σκόπιμη στο τετράποδο σύστημα και στα πειραματικά πρωτότυπα του εργαστηρίου μας αλλά και στη διεθνή βιβλιογραφία. Απώτερος στόχος είναι η προσθήκη επιπλέον βαθμών ελευθερίας στο πόδι ώστε να αποκτήσει νέες δυνατότητες, όπως για παράδειγμα την αποφυγή εμποδίων ή την προσαρμογή σε ανώμαλο έδαφος.



Εικόνα 1-2. Το τετράποδο ρομποτικό σύστημα του εργαστηρίου μας [44], [45].

1.2 *Βιβλιογραφική επισκόπηση*

1.2.1 Ρομπότ με πόδια

Οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με την κίνηση ρομποτικών μηχανισμών με πόδια μπορούν να διαχωριστούν σε δυο βασικές κατηγορίες, εκείνες που αφορούν την δυναμική και τον έλεγχο των συστημάτων αυτών και εκείνες που αφορούν τους ίδιους τους μηχανισμούς και το σχεδιασμό τους.

Έχουν κατασκευαστεί παθητικά ρομπότ και ρομπότ με επενέργηση στα πόδια. Η πρώτη κατηγορία ενδιαφέρει περισσότερο ως προς τη φυσική κίνηση των μηχανισμών, όπως το δίποδο του McGeer [27], και αποτελεί πρόσφορο έδαφος για την επιβεβαίωση θεωρητικών

αποτελεσμάτων. Δεν μπορεί όμως να αποτελέσει χρήσιμη εφαρμογή μιας και τα ρομπότ αυτά δεν διαθέτουν αυτονομία κίνησης σε ανώμαλο έδαφος.

Αντιθέτως, τα ρομπότ με επενέργηση στα πόδια επιτελούν ακριβώς αυτό το σκοπό. Έχουν κατασκευαστεί ρομπότ με ένα, δύο, τέσσερα, έξι και οχτώ πόδια. Τα περισσότερα από αυτά κατασκευάζονται εμπειρικά. Στη συστηματική προσέγγιση του σχεδιασμού έχουν συνεισφέρει οι Chatzakos και Papadopoulos [12],[44]. Σημαντική επίδραση στην πολυπλοκότητα του μηχανισμού έχει ο αριθμός των επενεργητών που φέρει το ρομπότ. Ο έλεγχος απλοποιείται όσο αυξάνεται ο αριθμός αυτός ενώ υποσκελίζεται η αυτονομία, η κατασκευαστική δυσκολία και το κόστος. Για το λόγο αυτό μελετάται η περίπτωση να υπάρχει μόνο ένας επενεργητής ανά πόδι, ο οποίος επενεργεί στο στροφικό βαθμό ελευθερίας [33],[45]. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις που το ρομπότ διαθέτει δύο ή και τρεις επενεργητές σε κάθε πόδι [2],[11].

Στοχεύοντας στη μειωμένη κατανάλωση ισχύος, στα μέσα της δεκαετίας του '90, κατασκευάστηκε το Monopod II από το εργαστήριο ARL. Ο λόγος ήταν ότι το ρομποτικό σύστημα Monopod I έτρεχε με έναν αλγόριθμο ελέγχου που δεν εκμεταλλευόταν τη φυσική δυναμική του συστήματος και δεν χρησιμοποιούσε παθητικά στοιχεία στις αρθρώσεις του ώστε να αποθηκεύει δυναμική ενέργεια και να απαλύνει τον φόρτο εργασίας των επενεργητών. Το αποτέλεσμα ήταν το 40% της καταναλισκόμενης ενέργειας να χρησιμοποιείται για την επαναφορά του ποδιού στη θέση προσγείωσης [23]. Διάταξη ελατηρίου σε σειρά με τον περιστροφικό επενεργητή στο γοφό, καθώς και η λειτουργία του νέου ρομποτικού συστήματος με εύρωστο ελεγκτή που έκανε χρήση της παθητικής δυναμικής του ρομπότ, έφερε το επιθυμητό αποτέλεσμα βελτιώνοντας κατά 48% την αυτονομία του συστήματος [2].

Ως προς τη δυναμική μελέτη, το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας αναφέρεται σε συστήματα με ένα πόδι. Ο λόγος είναι ότι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συστημάτων με πόδια όπως οι διακριτές φάσεις δυναμικής, τα μη γραμμικά φαινόμενα, η έντονη σύζευξη μεταξύ των βαθμών ελευθερίας και η υποεπενέργηση συνιστούν ήδη ένα πολύπλοκο πρόβλημα προς επίλυση. Το μονόποδο ρομπότ ως αφαίρεση των ρομπότ με περισσότερα πόδια χρησιμοποιήθηκε σαν πρώτο στάδιο εξέλιξης πιο σύνθετων συστημάτων από τον Raibert [38]. Στη συνέχεια, κάνοντας χρήση της έννοιας των εικονικών ποδιών, δύο πόδια σε φάση μοντελοποιούνται σαν ένα. Τα εικονικά πόδια επενεργούνται στη συνέχεια με βάση τον αλγόριθμο ελέγχου για ένα πόδι και έτσι ελέγχονται πολυπλοκότερα συστήματα, που ανέπτυξε ο Raibert και η ομάδα του, με δύο και τέσσερα πόδια.

Ένα πολύ διαδεδομένο μοντέλο για τη μελέτη της δυναμικής ρομπότ με ένα πόδι είναι το μοντέλο SLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum) [18],[21]. Στο μοντέλο αυτό το ρομπότ περιγράφεται ως ανεστραμμένο εκκρεμές κατά τη φάση εδάφους και χρησιμοποιείται στην περίπτωση που το πόδι δεν διαθέτει ενδιάμεση άρθρωση.

Σημαντική θεωρείται επίσης η συμβολή των μελετών αυτών στον τομέα της υγείας, μιας και είτε προσαρμοσμένοι ρομποτικοί μηχανισμοί είτε οι γνώσεις μας για την κίνηση με πόδια, μπορούν να εφαρμοστούν στον άνθρωπο και τον αθλητισμό. Ενδιαφέρον παρουσιάζει λοιπόν

και η αντίστροφη πορεία, της εμβιομηχανικής, που μελετώντας τα έμβια όντα καταλήγει σε συμπεράσματα αξιοποιήσιμα για τους ρομποτικούς μηχανισμούς με πόδια.

Η εργασία του Gentle [20] είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της παραπάνω κατηγορίας. Αναπτύσσει παραμετρικό μοντέλο του ανθρώπινου ποδιού και θεωρεί φυσικό περιορισμό της ταχύτητας του αθλητή την ροπή αδράνειας του ποδιού. Το μοντέλο είναι αρκετά απλό ώστε να μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά και καταφέρνει μια καλή εκτίμηση του χρόνου που χρειάζεται ένας αθλητής για 60 m σπριντ κλειστού γηπέδου.

Μελέτες που έγιναν για τον προσδιορισμό των δυνάμεων που αναπτύσσονται στο τρέξιμο με γυμνά πόδια [25], καταδεικνύουν χρήσιμα συμπεράσματα για τον σημαντικό ρόλο που διαδραματίζει το πέλμα στην απορρόφηση κραδασμών. Καταλήγει η μελέτη στο ότι συνηθίζουμε σε ένα λάθος τρόπο τρεξίματος, διευκολυνόμενοι από τα αθλητικά μας παπούτσια. Αντιθέτως, αν κανείς τρέξει ξυπόλυτος αναγκάζεται να προσγειώνεται στο μπροστινό τμήμα του πέλματος, γεγονός που απαλείφει τις απότομες αλλαγές που εμφανίζονται στο διάγραμμα δυνάμεων κρούσης κατά την προσγείωση με τη φτέρνα.

Τέλος, οι ερευνητές του ARL στο McGill εμπνεύστηκαν από τις πρόσφατες ανακαλύψεις της βιολογίας και της εμβιομηχανικής [18] και κατασκεύασαν το RHex [39], μια κινούμενη πλατφόρμα με έξι πόδια σε σχήμα ημισελήνου και ακτινική δυσκαμψία που μιμείται τα βιολογικά χαρακτηριστικά των κατσαρίδων.

1.2.2 Το υλικό DEAP ως επενεργητής

Στην προσπάθεια των ερευνητών να βρουν το τεχνητό ανάλογο του μυ, φαίνεται να έχουν δώσει νέα ώθηση τα σύγχρονα και υποσχόμενα ελαστομερή ηλεκτροενεργά πολυμερή. Έχει καταβληθεί έντονη προσπάθεια τα τελευταία χρόνια για την βελτίωση της απόκρισης των υλικών αυτών καθώς και για την εύρεση εφαρμογών που εξυπηρετούνται από τις υπάρχουσες δυνατότητές τους.

Τα υλικά αυτά αποτελούνται από ένα πολύ λεπτό φιλμ πολυμερούς που αντιδρά στον ηλεκτρισμό. Η δυσκολία έγκειται στην κατασκευή επενεργητών, ώστε το φιλμ να μετατραπεί σε κύλινδρο ή πρίσμα για να μπορεί να ασκήσει δυνάμεις στα άκρα του. Κατασκευή κυλινδρικού DEAP επενεργητή ώσης έχει επιτευχθεί από διάφορες ομάδες ερευνητών και υπάρχουν χρήσιμα αποτελέσματα για την δυναμική τους συμπεριφορά [9],[13],[33],[40],[41]. Αντίστοιχα, έχει κατασκευαστεί και πρισματικός επενεργητής από στρώσεις του ίδιου υλικού από τους Carpi et al. [12]. Στον έλεγχο και τη μοντελοποίηση των κυλινδρικών επενεργητών έχουν συνεισφέρει οι Ozsecen και Mavroidis [34] καθώς και οι Oubaek και Sarban [33].

Δίποδο ρομπότ με πόδια από τεχνητούς μυς έχει επιτευχθεί πρόσφατα, αλλά με χρήση πνευματικών επενεργητών από τον Coldbrunn [15]. Αντίστοιχες προσπάθειες έχουν γίνει για πολύ μικρότερα σε μέγεθος ρομπότ, κάνοντας χρήση επενεργητών EAP (Electro Active Polymers) από τους Eckerl et al. με την κατασκευή του FLEX I. Αναλυτικότερα τις προσπάθειες που έχουν γίνει στην κατεύθυνση της εφαρμογής των EAP υλικών ως επενεργητές, μπορεί να βρει κανείς συγκεντρωμένες στο βιβλίο του Bar-Cohen [5].

1.3 *Περιεχόμενο & Δομή Εργασίας*

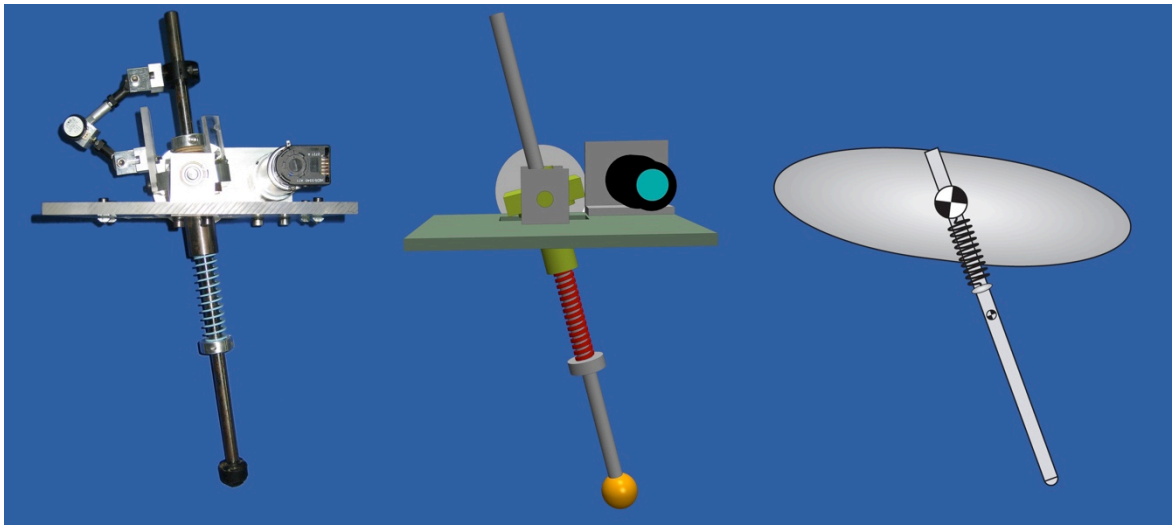
Στα κεφάλαια που ακολουθούν η δομή και το περιεχόμενο έχει ως εξής:

Στο 2° Κεφάλαιο της εργασίας η μελέτη εστιάζεται στην βελτιστοποίηση της ιδιοσυχνότητας του ποδιού και την μείωση της πρόνευσης του κορμού του ρομπότ. Η μείωση της πρόνευσης διερευνάται αρχικά μέσα από τη δυναμική ανάλυση αφαιρετικών και αργότερα πληρέστερων μοντέλων του συστήματος, με χρήση των εξισώσεων Lagrange και επίλυσή τους στο λογισμικό Mathematica [43].

Στο 3° Κεφάλαιο της εργασίας υλοποιείται εικονικό σύστημα σε περιβάλλον δυναμικής προσομοίωσης ADAMS [30] σε συνεργασία με το υπολογιστικό πακέτο MatLab [25]. Ο ελεγκτής που χρησιμοποιείται είναι ο ίδιος που υλοποιήθηκε στο πρωτότυπο μονόποδο ρομποτικό σύστημα, ικανός για ανώμαλο έδαφος.

Στην Εικόνα 1-3 φαίνεται το πραγματικό μονόποδο και τα μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια της εργασίας. Παρατηρεί κανείς τη διαδοχική αφαίρεση πληροφορίας καθώς εισερχόμαστε από το πραγματικό μοντέλο στο μαθηματικό που το προσεγγίζει. Οι λόγοι για τους οποίους ασχολούμαστε με την προσομοίωση του ρομποτικού συστήματος είναι οι εξής:

- Οικονομικότερη και ταχύτερη αξιολόγηση πιθανών μεταβολών είτε αυτές αφορούν κατασκευαστικές λεπτομέρειες είτε τον αλγόριθμο ελέγχου του ρομπότ, παρακάμπτοντας την κατασκευή φυσικών πρωτοτύπων.
- Βαθύτερη κατανόηση του φυσικού συστήματος μέσα από πειραματισμό με το εικονικό σύστημα.
- Επιβεβαίωση θεωρητικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα απλοποιημένα μοντέλα που έχουν αναλυτική λύση.



Εικόνα 1-3. Μοντελοποίηση του πραγματικού μονόποδου ρομπότ: το πραγματικό μονόποδο στα αριστερά, το εικονικό σε ADAMS στη μέση και το απλοποιημένο μοντέλο στα δεξιά που χρησιμοποιείται για την αναλυτική λύση των εξισώσεων κίνησης

- Προσδιορισμός φυσικών μεγεθών του συστήματος που είναι δύσκολο να υπολογιστούν πειραματικά: μέσα από πειραματισμό με τις παραμέτρους του εικονικού συστήματος μπορεί να κατορθώσει κανείς εντονότερη σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών που λαμβάνουμε από τους αισθητήρες. Γνωρίζουμε τότε ότι οι τιμές που έχουμε επιλέξει π.χ. για τις ιξώδεις τριβές προσεγγίζουν τις πραγματικές.

Η δυσκολία που αντιμετωπίζεται στην προκείμενη προσομοίωση είναι η πιστή μοντελοποίηση του μηχανισμού πρόσδεσης που περιορίζει το ρομποτικό σύστημα σε ένα σφαιρικό χώρο δράσης. Η προσομοίωση του σύνθετου αυτού μοντέλου τονίζει κάποια ευαίσθητα σημεία του μηχανισμού πρόσδεσης και αξιολογείται η σημασία της λεπτομερέστατης περιγραφής του φυσικού μοντέλου. Για το σκοπό αυτό, τα αποτελέσματα του σύνθετου μοντέλου συγκρίνονται με ένα αφαιρετικό μοντέλο όπου αμελείται το γεγονός ότι το πραγματικό ρομποτικό σύστημα βρίσκεται μέσα σε σφαιρικό χώρο δράσης και απλουστευτικά θεωρείται ότι κινείται σε επίπεδο. Εφόσον ξεπεραστούν οι αρχικές αυτές δυσκολίες, προτείνονται πιθανές μεταβολές για την πειραματική διάταξη που προκύπτουν απ' τις λύσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

Το 4ο Κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στα ηλεκτροενεργά πολυμερή (DEAP), περιγράφει την βασική αρχή λειτουργίας τους, αναφέρονται τα στοιχεία που διακρίνουν το συγκεκριμένο DEAP υλικό από τα υπόλοιπα της αγοράς και παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα του χαρακτηρισμού του υλικού.

Στο 5ο Κεφάλαιο και στα πλαίσια ενός εναλλακτικού σχεδίου ποδιού κατασκευάζεται επενεργητής από ηλεκτροενεργό πολυμερές (DEAP) και προσαρμόζεται στο άκρο του ποδιού με σκοπό την επενέργηση ενός νέου πέλματος. Διερευνάται η ικανότητα του νέου αυτού υλικού να ικανοποιήσει τις υψηλές απαιτήσεις των συστημάτων με πόδια, ενώ αντιμετωπίζονται οι δυσκολίες της κατασκευής του ίδιου του επενεργητή καθώς και των απαραίτητων προσδετήρων που μεσολαβούν για την αλληλεπίδραση DEAP και των μερών του ποδιού. Η συμπεριφορά του ρομποτικού συστήματος με το νέο πέλμα προσομοιώνεται επίσης δυναμικά στο λογισμικό ADAMS και συγκρίνεται με τα εναλλακτικά και απλούστερα μοντέλα ποδιού.

Τέλος, το 6ο Κεφάλαιο περιέχει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία, καθώς και την μελλοντική εργασία που προτείνεται.

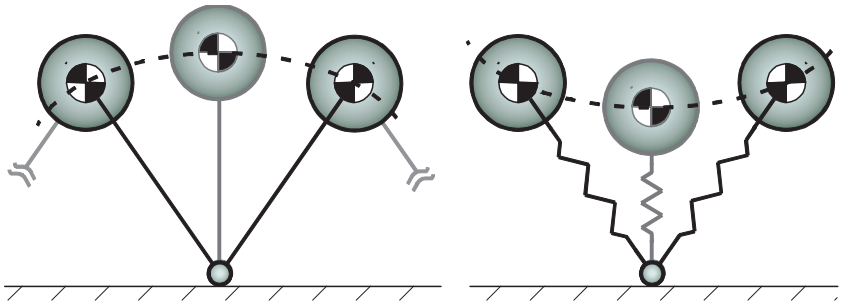
Κεφάλαιο 2
Δυναμική μονόποδου ρομπότ

2.1 *Μοντέλο SLIP*

2.1.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε δυναμικά το μοντέλο του ανεστραμμένου εκκρεμούς με φορτισμένο ελατήριο (Spring Loaded Inverted Pendulum), το οποίο αποτελεί τη βάση για την περαιτέρω ανάλυση των ρομποτικών συστημάτων με πόδια.

Το ερώτημα που τίθεται είναι με ποια απλούστερη κίνηση μπορούμε να περιγράψουμε τη βάδιση και το τρέξιμο ενός ρομπότ ή ενός έμβιου μηχανισμού με πόδια. Στην Εικόνα 2-1 παρουσιάζονται δυο μοντέλα. Το πρώτο, του ανεστραμμένου εκκρεμούς, προσεγγίζει την κίνηση ενός ρομπότ με πόδια όταν βαδίζει, ενώ το δεύτερο, με μοντελοποιημένη ελαστικότητα στο πόδι, προσεγγίζει την κίνηση του ρομπότ όταν τρέχει. Η βάδιση μπορεί να παρομοιαστεί με την κύλιση ενός αβγού ενώ το τρέξιμο με την αναπήδηση μιας μπάλας [38].

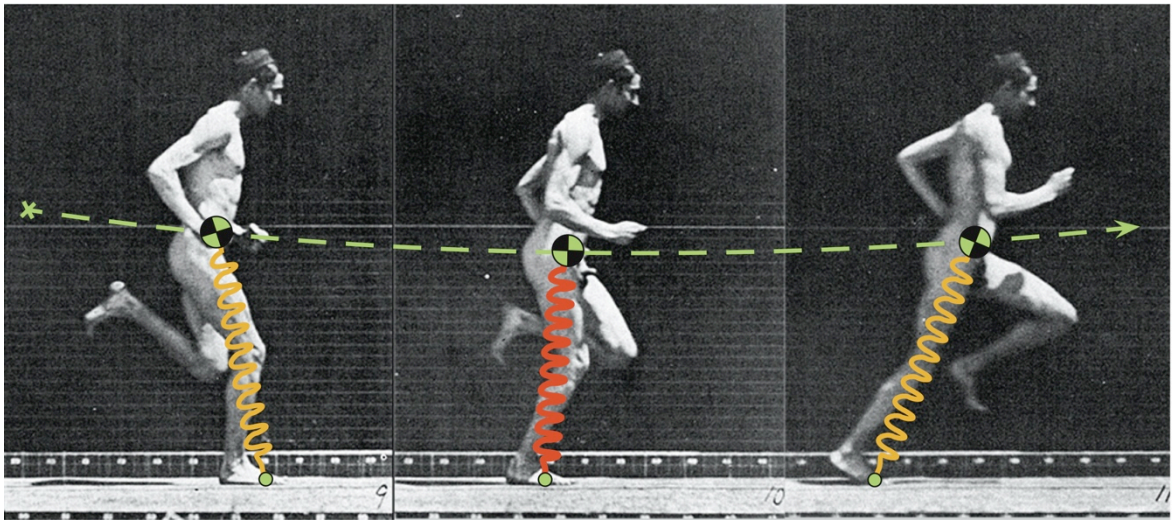


Εικόνα 2-1. Μοντελοποίηση βάδισης με το μοντέλο του ανεστραμμένου εκκρεμούς και τρεξίματος με το μοντέλο SLIP, ρομπότ και έμβιων οργανισμών με πόδια [44].

Εφόσον το τρέξιμο μοιάζει με την αναπήδηση μπάλας περιμένουμε δυο πράγματα. Πρώτον να χρειάζεται αναπλήρωση της διαχεόμενης ενέργειας ώστε να συνεχιστεί η αναπήδηση και

δεύτερον να υπάρχει εναλλαγή φάσεων όπως δείχνει η Εικόνα 2-2 και η Εικόνα 2-3. Γνωρίζουμε καλά πως ήδη σε ένα γρήγορο jogging το σώμα μας βρίσκεται εξολοκλήρου στον αέρα για κάποια ms. Αν και διαθέτουμε δυο πόδια, η εναλλαγή φάσεων εάν τρέξουμε με ένα πόδι, «κουτσό», παραμένει ίδια. Αυτό που αλλάζει είναι το γεγονός ότι το ένα πόδι πρέπει να προλάβει να επανέλθει μπροστά. Ίσως ακόμη αυξάνει η ροπή στα χέρια μας για να διατηρηθεί ισορροπία εφόσον η κίνηση δεν είναι πλέον συμμετρική. Στις εικόνες που ακολουθούν μοντελοποιείται το ανθρώπινο πόδι σε ένα ευθύγραμμο ελατήριο που αντιδρά στο έδαφος και στηρίζει το συνολικό κέντρο μάζας του σώματος.

Η δυναμική ενός μονόποδου ρομπότ περιέχει όπως γίνεται ξεκάθαρο λοιπόν, την εναλλαγή δυο φάσεων. Τη φάση της επαφής με το έδαφος, που στο εξής θα ονομάζουμε φάση εδάφους και την φάση της βαλλιστικής τροχιάς του συστήματος στον αέρα, που στο εξής θα ονομάζουμε εναέρια φάση.

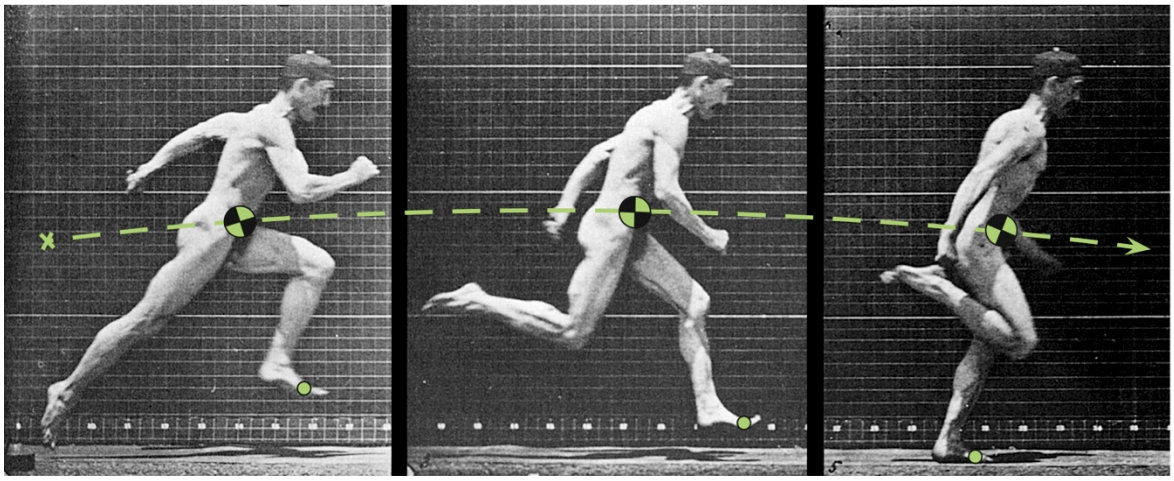


Εικόνα 2-2. Φωτογραφικά στιγμιότυπα αθλητή, το κέντρο μάζας του οποίου βρίσκεται σε τροχιά SLIP κατά την επαφή ενός ποδιού με το έδαφος, και μοντελοποίηση με ισοδύναμο ευθύγραμμο ελαστικό πόδι χωρίς γόνατο και πέλμα [31].

Κατά την εναέρια φάση το συνολικό κέντρο μάζας του μονόποδου ρομπότ βρίσκεται σε βαλλιστική τροχιά, ενώ το σύστημα διατηρεί τη στροφορμή που έχει κατά την απογείωση. Το ενδιαφέρον εκεί βρίσκεται στο να περιγραφεί η σχετική κίνηση των στοιχείων του συστήματος, ενώ η συνολική κίνηση είναι ήδη γνωστή. Υπάρχει λοιπόν μια πρώτη παραδοχή στην εναέρια φάση, ότι η αντίσταση του αέρα είναι αμελητέα και άρα η μόνη δύναμη που δέχεται το σύστημα είναι η βαρυτική έλξη.

Για να μιλήσουμε για τη φάση εδάφους είναι χρήσιμο να εισάγουμε την έννοια του δυναμικά ευσταθούς συστήματος. Η έννοια αυτή έρχεται σε αντιδιαστολή με το στατικά ευσταθές σύστημα που έχει κάθε χρονική στιγμή το κέντρο μάζας του μέσα σε ένα πολύγωνο σημείων στήριξης. Το απλούστερο πολύγωνο που μπορεί να υπάρξει είναι εκείνο που επαρκεί για να ορίσει επίπεδο, δηλαδή το τρίγωνο σημείων στήριξης. Στο δυναμικά ευσταθές σύστημα εναλλάσσονται διαρκώς οι θέσεις του κέντρου μάζας και των πολυγώνων στήριξης και στην

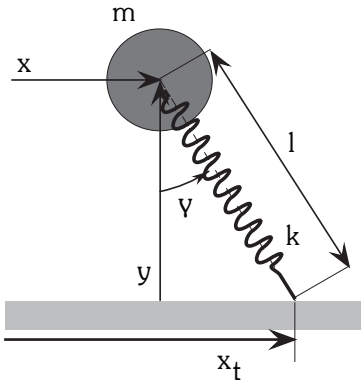
πλειονότητα των στιγμών το κέντρο μάζας βρίσκεται εκτός πολύγωνου. Η ταχύτητα όμως και η θέση του κέντρου μάζας είναι τέτοια που κατά μέσο όρο βρίσκεται πάνω απ' το πολύγωνο στήριξης.



Εικόνα 2-3. Φωτογραφικά στιγμιότυπα αθλητή από την αρχή ως το τέλος της εναέριας φάσης και βαλλιστική τροχιά του συνολικού κέντρου μάζας [31].

Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό αν σκεφτούμε την εναλλαγή στο τρέξιμο του σημείου στήριξης απ' το ένα πόδι στο άλλο. Υπάρχουν χρονικές διάρκειες που είτε δεν πατάμε πουθενά, είτε δίνουμε επίτηδες μια αρχική εκτροπή στο σώμα μας για να ξεκινήσει η εναλλαγή των ποδιών.

Μιλώντας για δυναμικά ευσταθές ρομπότ με πόδια, προϋποθέτουμε λοιπόν όπως εξηγήσαμε, κάποιες ελάχιστες ταχύτητες. Διαφορετικά βρισκόμαστε σε ταχύτητες βάδισης που αποτελεί το μεταίχμιο της στατικά και δυναμικά ευσταθούς κίνησης. Η ειδοποιός διαφορά της βάδισης από το τρέξιμο, είναι η ύπαρξη βαλλιστικής φάσης στο τελευταίο.



Εικόνα 2-4. Μοντέλο ανεστραμμένου εκκρεμούς με φορτισμένο ελατήριο (SLIP) [45].

Κατά την δυναμικά ευσταθή κίνηση του ρομπότ το μοντέλο SLIP αποτελεί το απλούστερο εργαλείο για να περιγράψουμε τη φάση εδάφους. Το χαρακτηριστικό του είναι ότι διαγράφει μια τροχιά που ομοιάζει με ανεστραμμένο εκκρεμές ενώ ταυτόχρονα, λόγω αρχικών συνθηκών, συμπιέζει και το γραμμικό ελατήριο πάνω στο οποίο στηρίζεται (Εικόνα 2-1 και Εικόνα 2-4).

2.1.2 Μέθοδος Euler-Lagrange

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να παραθέσουμε κάποια βασικά στοιχεία θεωρίας. Οι εξισώσεις κίνησης των μηχανικών συστημάτων σε αυτό και στα επόμενα κεφάλαια προκύπτουν με την επαυξημένη κατά Hamilton και Rayleigh, μέθοδο Euler-Lagrange με χρήση του λογισμικού πακέτου Mathematica [43], ενώ παρατίθεται και μια συμπτυγμένη εντολή για τον υπολογισμό των εξισώσεων Lagrange στο Παράρτημα Ι. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε μπορεί να περιγραφεί με τα εξής βήματα [7],[28]:

(α) Προσδιορίζονται οι βαθμοί ελευθερίας και επιλέγεται ένα σύνολο ανεξάρτητων γενικευμένων μεταβλητών. Το διάγραμμα ελευθέρου σώματος είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για το σκοπό αυτό. Για ένα μηχανικό σύστημα (N) βαθμών ελευθερίας, με ολόνομους περιορισμούς, μπορούν να επιλεχθούν (N) ανεξάρτητες γενικευμένες μεταβλητές που να περιγράφουν πλήρως το σύστημα και συνιστούν ένα N-διάστατο διάνυσμα q.

(β) Χρησιμοποιούνται οι κινηματικές σχέσεις για να βρεθούν οι ταχύτητες και οι δυνατές μετατοπίσεις που εμπλέκονται.

(γ) Γίνεται αναγνώριση των συντηρητικών και μη δυνάμεων.

(δ) Διατυπώνεται η δυναμική (V) και η κινητική ενέργεια (T) και προκύπτει η συνάρτηση Lagrange (L) από τη διαφορά τους:

$$L = T - V \tag{2-1}$$

(ε) Διατυπώνεται η επιδιδόμενη ισχύς των επενεργητών P_F (forces) ως το άθροισμα των γινομένων των επενεργούμενων δυνάμεων και δυνατών ταχυτήτων:

$$P_F = \sum_{i=1}^{N} f_i \cdot \dot{q}_i \tag{2-2}$$

(ζ) Διατυπώνεται η συνάρτηση σκέδασης ισχύος P_D (dissipation) του Rayleigh:

$$P_D = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} c_{ij}\dot{q}_i\dot{q}_j \tag{2-3}$$

όπου πρέπει να ληφθεί υπόψιν η σχετική ταχύτητα των άκρων των αποσβεστήρων όταν είναι συνδεδεμένοι σε σειρά.

(ε) Εφαρμόζονται οι επαυξημένες εξισώσεις Euler-Lagrange:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i}\right) + \left(\frac{\partial P_D}{\partial \dot{q}_i}\right) = \left(\frac{\partial P_F}{\partial \dot{q}_i}\right) \tag{2-4}$$

Οι δυναμικές εξισώσεις που προκύπτουν μπορούν να γραφούν σε μητρωϊκή (matrix) μορφή ως:

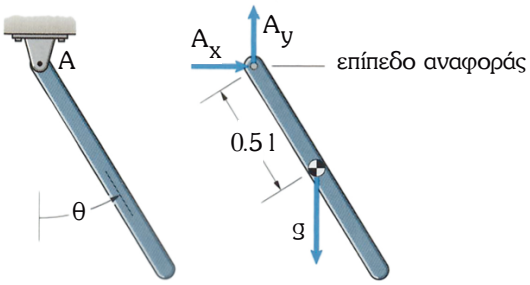
$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{F_b}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{F_k}(\mathbf{q}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{D}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} \tag{2-5}$$

όπου **M** είναι το μητρώο μάζας, **V** είναι το διάνυσμα φυγόκεντρων και δυνάμεων Coriolis, $\mathbf{F_b}$ είναι το διάνυσμα των δυνάμεων τριβής, $\mathbf{F_k}$ είναι το διάνυσμα των ελαστικών δυνάμεων, **G** είναι το διάνυσμα δυνάμεων βαρύτητας, **D** είναι ένας πίνακας καταμερισμού της επενέργησης και **τ** είναι το διάνυσμα ροπών.

2.1.3 Στιγμιαίο σημείο περιστροφής

Όταν διατυπώνουμε την κινητική ενέργεια ενός συστήματος έχουμε την δυνατότητα επιλογής της κίνησης και των μεταβλητών που θα θεωρήσουμε.

Εάν η κίνηση μπορεί να αναλυθεί σε μια μόνο περιστροφική συνιστώσα γύρω από ένα στιγμιαίο σημείο περιστροφής, τότε είναι συνήθως προτιμότερο να χρησιμοποιούμε αυτή την περιγραφή. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι αυτό της ταλαντευόμενης ράβδου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-5.



Εικόνα 2-5. Ταλαντευόμενη ράβδος [8].

Στην προκειμένη περίπτωση της ράβδου, είναι προφανές πως επιλέγοντας ως στιγμιαίο σημείο περιστροφής της στροφική άρθρωση A, η κίνηση περιγράφεται πλήρως από τον ένα βαθμό ελευθερίας, την γωνία θ. Η κινητική ενέργεια του συστήματος βρίσκεται τότε ως εξής:

$$T=\frac{1}{2}I_{bar}^{rev.jointA}\cdot\dot{\theta}^2 \tag{2-6}$$

όπου η αδράνεια γύρω από το άκρο A της ράβδου δίνεται από το θεώρημα παραλλήλων αξόνων (Steiner):

$$I_{bar}^{rev.jointA}=I_{bar}^{CoM}+m\left(\frac{1}{2}l\right)^2 \tag{2-7}$$

Εάν η κίνηση είναι πιο σύνθετη και προτιμούμε έναν γενικότερο τρόπο, διατυπώνουμε την γραμμική και περιστροφική ενέργεια του κέντρου μάζας του σώματος:

$$\left.\begin{aligned} T&=\frac{1}{2}I_{bar}^{CoM}\cdot\dot{\theta}^2+\frac{1}{2}m\cdot v_{CoM}^2 \\ v_{CoM}&=\frac{1}{2}l\cdot\dot{\theta}\end{aligned}\right\}\Rightarrow T=\frac{1}{2}\cdot\dot{\theta}^2\left[I_{bar}^{CoM}+m\left(\frac{1}{2}l\right)^2\right]=\frac{1}{2}I_{bar}^{rev.jointA}\cdot\dot{\theta}^2 \tag{2-8}$$

Όπως γίνεται κατανοητό στην Εξ. 2-6 καταλήγουν και οι δυο τρόποι. Αυτές τις δυο επιλογές έχουμε και στα ρομπότ με πόδια, όπως θα δούμε παρακάτω, όταν αναλύουμε τη φάση εδάφους που θεωρούμε ότι αποτελείται από μια ιδανική άρθρωση με το έδαφος.

2.1.4 Δυναμική ανάλυση του μοντέλου SLIP

Για το οποιοδήποτε ρομποτικό σύστημα, όταν πρόκειται να ολοκληρώσουμε αριθμητικά τη δυναμική σε ένα πρόγραμμα όπως το MATLAB, προτιμούμε να γνωρίζουμε κάθε στιγμή τη θέση του συνολικού κέντρου μάζας.

Στην περίπτωση του SLIP κατά την επαφή του ποδιού με το έδαφος, οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος είναι δυο, εφόσον η γωνία γ και το μήκος l του ποδιού καθορίζουν άμεσα τη θέση του κορμού του ρομπότ και το αντίστροφο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-4.

Οι παραδοχές που έχουν γίνει σε αυτό το σημείο είναι ότι η κίνηση γίνεται στο διαμήκες επίπεδο (κατά μήκος του κορμού του ρομπότ) και ότι η πρόσφυση του ποδιού με το έδαφος είναι τέτοια που δεν υπάρχει ολίσθηση και άρα το σημείο επαφής ουσιαστικά επιδρά σαν ιδανική στροφική άρθρωση χωρίς τριβές για όσο διαρκεί η φάση εδάφους.

Μπορούμε να επιλέξουμε ως ανεξάρτητες γενικευμένες μεταβλητές τα x, y και η συνάρτηση Lagrange διατυπώνεται τότε ως εξής, σύμφωνα με την Εξ. 2-1:

$$L = \frac{1}{2} m \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \cdot \dot{y}^2 - \frac{1}{2} k \left(l_0 - l\right)^2 - m \cdot g \cdot y \tag{2-9}$$

όπου l_0 το ελεύθερο μήκος του ποδιού πριν τη συμπίεση, ενώ κατά τη διάρκεια της συμπίεσης το μήκος του l δίνεται και αυτό συναρτήσει των καρτεσιανών συντεταγμένων x, y του κορμού:

$$l = \sqrt{(x_t - x)^2 + y^2} \tag{2-10}$$

όπου x_t η κατά τον άξονα των x απόσταση από την αρχή των αξόνων έως το σημείο επαφής του ποδιού με το έδαφος, βλ. Εικόνα 2-4. Επομένως έχοντας ως δεδομένα κατά την πρόσπτωση στο έδαφος, το ελεύθερο μήκος του ποδιού, δηλαδή $l(t_{td})=l_0$ (touch down), και τη θέση (x, y) του κέντρου μάζας, μπορούμε από την Εξ. 2-10 να υπολογίσουμε και το x_t που μένει σταθερό για όσο διαρκεί η φάση εδάφους.

Στο σύστημα στην προκειμένη περίπτωση διερευνούμε την παθητική δυναμική του και δεν έχουμε εισάγει επενεργητές. Έχουν απαλειφθεί επίσης τα στοιχεία διάχυσης ενέργειας, όπως η ιξώδης τριβή του ελατηρίου και η τριβή με το έδαφος. Επομένως μπορούμε να περάσουμε απευθείας στην εφαρμογή της Εξ. 2-4, δηλαδή στις εξισώσεις Euler-Lagrange απ' τις οποίες προκύπτουν οι εξισώσεις κίνησης του συστήματος:

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x} + k(x_t - x)\frac{\left(l_0 - \sqrt{(x_t - x)^2 + y^2}\right)}{\sqrt{(x_t - x)^2 + y^2}} &= 0 \\ m \cdot \ddot{y} + m \cdot g - k \cdot y \frac{\left(l_0 - \sqrt{(x_t - x)^2 + y^2}\right)}{\sqrt{(x_t - x)^2 + y^2}} &= 0 \end{aligned} \tag{2-11}$$

Με τον πρώτο αυτό τρόπο, έχουμε έτοιμες για αριθμητική επίλυση τις συνήθεις διαφορικές εξισώσεις κίνησης του ρομπότ, ως προς τις συντεταγμένες του κέντρου μάζας του.

Εναλλακτικά, μπορούμε να επιλέξουμε για ανεξάρτητες γενικευμένες μεταβλητές τη γωνία γ και το μήκος l του ποδιού, βλ. Εικόνα 2-4. Στην περίπτωση αυτή προκύπτουν απλούστερες εξισώσεις κίνησης, ενώ εμφανίζονται, λόγω του μη αδρανειακού συστήματος αναφοράς που εισάγουμε, οι όροι των φυγόκεντρων δυνάμεων και των δυνάμεων Coriolis. Η συνάρτηση Lagrange Εξ. 2-1, παίρνει τότε τη μορφή:

$$L = \frac{1}{2}m\left(l^2 \cdot \dot{\gamma}^2 + \dot{l}^2\right) - \frac{1}{2}k\left(l_0 - l\right)^2 - m \cdot g \cdot l \cdot \cos\gamma \tag{2-12}$$

Οι εξισώσεις κίνησης του συστήματος προκύπτουν εφαρμόζοντας τις εξισώσεις Εξ. 2-4 Euler-Lagrange:

$$\begin{aligned} m \cdot l^2 \cdot \ddot{\gamma} + 2m \cdot l \cdot \dot{l} \cdot \dot{\gamma} - m \cdot g \cdot l \cdot \sin\gamma = 0 \\ m \cdot \ddot{l} - m \cdot l \cdot \dot{\gamma}^2 + \left(l - l_0\right)k + m \cdot g \cdot \cos\gamma = 0 \end{aligned} \tag{2-13}$$

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τον μετασχηματισμό από την μορφή των Εξ. 2-13 στη μορφή των Εξ. 2-11, χωρίς την εφαρμογή των εξισώσεων Euler-Lagrange, χωρίς δηλαδή να ακολουθήσουμε τη διαδρομή από την Εξ. 2-9 στην Εξ. 2-11. Παρουσιάζεται ακόμη μια υβριδική μορφή των εξισώσεων κίνησης που είναι η απλούστερη δυνατή, αυτή των Εξ. 2-17.

Το πρώτο βήμα του μετασχηματισμού είναι η επίλυση των Εξ. 2-13 ως προς τις επιταχύνσεις των γενικευμένων μεταβλητών:

$$\begin{aligned} \ddot{\gamma} &= \frac{g \cdot \sin\gamma - 2 \cdot \dot{l} \cdot \dot{\gamma}}{l} \\ \ddot{l} &= \frac{m \cdot l \cdot \dot{\gamma}^2 - \left(l - l_0\right)k - m \cdot g \cdot \cos\gamma}{m} \end{aligned} \tag{2-14}$$

Οι κινηματικές σχέσεις που δηλώνουν τις καρτεσιανές συντεταγμένες του κέντρου μάζας συναρτήσει του μήκους και της γωνίας του ποδιού, είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} x &= x_t - l \cdot \sin\gamma \\ y &= l \cdot \cos\gamma \end{aligned} \tag{2-15}$$

Παραγωγίζοντας διπλά τις Εξ. 2-15 ως προς το χρόνο, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \left(l \cdot \dot{\gamma}^2 - \ddot{l}\right)\sin\gamma - \left(2\dot{l} \cdot \dot{\gamma} + l \cdot \ddot{\gamma}\right)\cos\gamma \\ \ddot{y} &= \left(\ddot{l} - l \cdot \dot{\gamma}^2\right)\cos\gamma - \left(2\dot{l}\dot{\gamma} + l \cdot \ddot{\gamma}\right)\sin\gamma \end{aligned} \tag{2-16}$$

και αντικαθιστώντας, όπου υπάρχουν οι επιταχύνσεις του μήκους και της γωνία του ποδιού, τις Εξ. 2-14, προκύπτει μια πολύ συμπτυγμένη υβριδική μορφή (εμπεριέχουν και τις τέσσερις μεταβλητές x, y, γ και l) των εξισώσεων κίνησης:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + k\left(l_0 - l\right)\sin\gamma &= 0 \\ m\ddot{y} - k(l_0 - l)\cos\gamma + mg &= 0 \end{aligned} \tag{2-17}$$

Εδώ πλέον γίνεται ξεκάθαρη η σύζευξη μεταξύ των καρτεσιανών συντεταγμένων και του μήκους l και της γωνίας γ του ποδιού, καθώς και η μη γραμμικότητα των εξισώσεων.

Για να φτάσουμε τέλος στις Εξ. 2-11, αρκεί να θεωρήσουμε τις αντίστροφες κινηματικές σχέσεις:

$$l = \sqrt{(x_t - x)^2 + y^2} \tag{2-10}$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{x_t - x}{y}\right) \tag{2-18}$$

τις οποίες εισάγουμε στις Εξ. 2-17 και προκύπτουν οι Εξ. 2-11 μετά από απλοποιήσεις. Αναφέραμε στο σημείο αυτό πως μετασχηματίζουμε τις εξισώσεις κίνησης απ' το ένα σύνολο ανεξάρτητων γενικευμένων μεταβλητών στο άλλο και στα επόμενα κεφάλαια όπου οι εξισώσεις είναι πιο σύνθετες, ο τρόπος είναι παρόμοιος και παρουσιάζονται απευθείας τα αποτελέσματα.

Για την εναέρια φάση δεν χρειάζεται δυναμική ανάλυση, εφόσον η μόνη μάζα στο σύστημα είναι εκείνη του κορμού του ρομπότ και είναι προφανές ότι το σύστημα βρίσκεται σε βαλλιστική τροχιά έχοντας ως μόνη επίδραση τη βαρυτική έλξη:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= 0 \\ \ddot{y} &= -g \end{aligned} \tag{2-19}$$

2.2 *Δυναμική ανάλυση μονόποδου χωρίς μάζα ποδιού*

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε δυναμικά το μοντέλο του μονόποδου ρομπότ, προσθέτοντας στο μοντέλο SLIP επιπλέον λεπτομέρεια. Στην Εικόνα 2-6 φαίνεται ένα μοντέλο του μονόποδου ρομπότ στο διαμήκες επίπεδο.

Εδώ λαμβάνεται υπόψιν η πρόνευση του κορμού του ρομπότ με τη γωνία θ, η αδράνεια του κορμού και του ποδιού, καθώς και οι ιξώδεις τριβές στον άξονα του ελατηρίου και στην στροφική άρθρωση του γοφού.

Η συνάρτηση Lagrange προκύπτει για το συγκεκριμένο μοντέλο, σύμφωνα με την Εξ. 2-1:

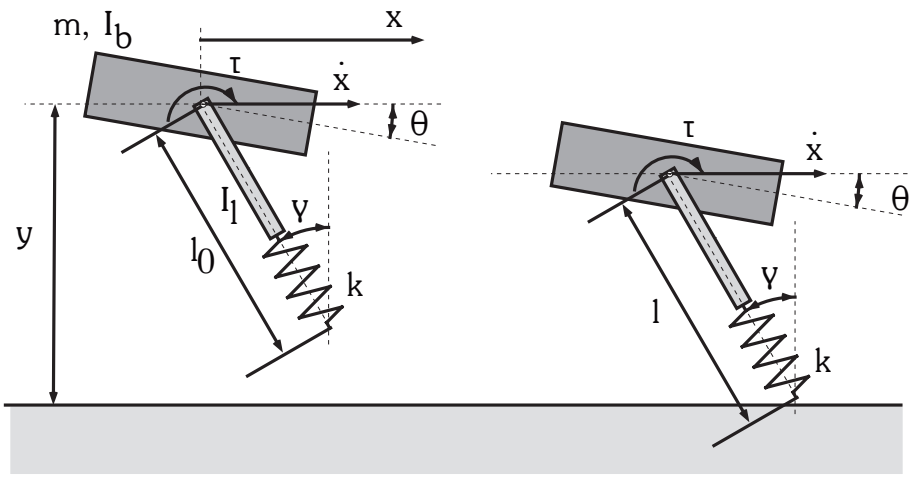
$$L = \frac{1}{2}\left[\left(m \cdot l^2 + I_l\right)\dot{\gamma}^2 + m \cdot \dot{l}^2 + I_b\dot{\theta}^2 - k\left(l_0 - l\right)^2\right] - m \cdot g \cdot l \cdot \cos\gamma \tag{2-20}$$

Η ισχύς του επενεργητή δίνεται σύμφωνα με την Εξ. 2-2 ως εξής:

$$P_F = \left(\dot{\gamma} - \dot{\theta}\right)\tau \tag{2-21}$$

Η σκέδαση ισχύος δίνεται από την Εξ. 2-3 ως εξής:

$$P_D = \frac{1}{2}\left[b_h\left(\dot{\gamma} - \dot{\theta}\right)^2 + b_l\dot{l}^2\right] \tag{2-22}$$



Εικόνα 2-6. Μοντέλο του μονόποδου ρομπότ, χωρίς μετατόπιση της στροφικής άρθρωσης κατά την φάση εδάφους και χωρίς μάζα ποδιού [45].

Οι εξισώσεις κίνησης προκύπτουν εφαρμόζοντας τις εξισώσεις Euler-Lagrange, σύμφωνα με την Εξ. 2-4:

$$\begin{gathered}\left[ml^2 + I_l\right]\ddot{\gamma} + 2m\cdot l\cdot \dot{l}\cdot\dot{\gamma} - m\cdot g\cdot l\cdot \sin\gamma + \left(\dot{\gamma}-\dot{\theta}\right)b_h = \tau \\ m\cdot\ddot{l} - m\cdot l\cdot\dot{\gamma}^2 + \left(l - l_0\right)k + m\cdot g\cdot\cos\gamma + \dot{l}\cdot b_l = 0 \\ I_b\ddot{\theta} - \left(\dot{\gamma}-\dot{\theta}\right)b_h = -\tau\end{gathered} \tag{2-23}$$

Παρατηρούμε ότι εισάγοντας έναν βαθμό ελευθερίας ακόμα, εκείνον της πρόνευσης, οι εξισώσεις κατά τη φάση εδάφους αυξάνονται για να δώσουν την περιστροφή του κορμού του ρομπότ με αδράνεια I_b, συναρτήσει της ασκούμενης ροπής στο πόδι και της ιξώδους τριβής στην άρθρωση.

Η εναέρια φάση του ρομπότ επαυξάνεται κατά δυο βαθμούς ελευθερίας, καθώς τώρα εκτός από την πρόνευση, το πόδι έχει αδράνεια και χρειάζεται άσκηση ροπής για να τοποθετηθεί στην γωνία πρόσπτωσης:

$$\begin{gathered}\ddot{x} = 0 \\ \ddot{y} = -g \\ I_l\ddot{\gamma} + b_h\left(\dot{\gamma}-\dot{\theta}\right) = \tau \\ I_b\ddot{\theta} - b_h\left(\dot{\gamma}-\dot{\theta}\right) = -\tau\end{gathered} \tag{2-24}$$

2.3 *Διερεύνηση μείωσης της πρόνευσης*

2.3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό προσεγγίζουμε το ερώτημα πως μπορούμε να μειώσουμε την πρόνευση του κορμού το ρομπότ, όχι μέσω ελεγκτή αλλά βελτιστοποιώντας κάποια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.

Αξίζει να διασαφηνίσουμε στο σημείο αυτό ότι η φαινόμενη αδράνεια του ποδιού είναι διαφορετική για το γοφό και για την άρθρωση με το έδαφος αν το πόδι δεν είναι συμμετρικό.

Όταν για παράδειγμα υπάρχει επιπλέον μήκος ποδιού πάνω από το γοφό ή αν προσθέσουμε αντίβαρο ή λόγω του ήδη τοποθετημένου ψευδογόνατου (Εικόνα 5-32). Κατά την φάση εδάφους, το σημαντικότερο τμήμα της αδράνειας του συστήματος είναι η θέση (ύψος στο οποίο βρίσκεται ο κορμός) και η μάζα του κορμού, ο οποίος αφαιρετικά μπορεί να θεωρηθεί ανεστραμμένο εκκρεμές συγκεντρωμένης μάζας. Επειδή όμως το ύψος και η μάζα του ρομπότ έχουν προκύψει από συστηματική μελέτη [44] τα θεωρούμε δεδομένα. Μελετάμε αναλυτικά λοιπόν την εναέρια φάση, διότι στη διάρκειά της η αδράνεια του ποδιού διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο.

Η μελέτη περιορίζεται στις παραμέτρους του ποδιού και αποδεικνύουμε ότι η απάντηση στο πως μειώνεται η πρόνευση, ισοδυναμεί με το ερώτημα που βρίσκεται η ιδιοσυχνότητα του ποδιού ως προς τις επιθυμητές ταχύτητες του ρομπότ. Το πόδι αποτελεί τον μοχλό για την πρόσδοση πρόσθιας ταχύτητας στο σύστημα κατά τη φάση εδάφους. Επομένως, το μήκος του ποδιού, η ιδιοσυχνότητά του και η πρόσθια ταχύτητα του ρομπότ είναι σε άμεση συνάρτηση.

Δίνονται εναλλακτικές λύσεις για την αύξηση ή μείωση της ιδιοσυχνότητας του ποδιού, ώστε η παθητική του κίνηση να βρεθεί μέσα στα επιθυμητά όρια. Ως αποτέλεσμα δεν απαιτείται υψηλή άσκηση ροπής για την τοποθέτησή του ποδιού στη γωνία πρόσπτωσης και άρα και ροπής αντίδρασης στον κορμό που οδηγεί σε γωνία πρόνευσης.

Η μελέτη πραγματοποιείται σε ένα εκκρεμές σύστημα το οποίο περιγράφεται στο επόμενο τμήμα του κεφαλαίου και σκοπό έχει να απλοποιήσει κομμάτια του πιο σύνθετου μοντέλου, ώστε να διαφανεί η επίδραση της ιδιοσυχνότητας στην πρόνευση. Σε επόμενο κεφάλαιο μελετάται η δυναμική του σύνθετου μοντέλου με μάζα στο πόδι.

2.3.2 Δυναμική εκκρεμούς συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό θεωρείται αμετάβλητο το μήκος του ποδιού από το σημείο της άρθρωσης ως το κάτω άκρο του και διερευνάται η επίδραση της προσθήκης επιπλέον μήκους ποδιού, από την άρθρωση και πάνω, στην ιδιοσυχνότητα του. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-7, μένει σταθερό το μήκος l_0 και αλλάζει το x και κατ' επέκταση και το συνολικό μήκος του ποδιού, δηλαδή το L.

Θεωρούμε απλοποιημένο μοντέλο όπου και τα δυο μέρη του συστήματος (κορμός και πόδι) είναι αρθρωμένα στο κέντρο μάζας του κορμού. Η άρθρωση αυτή είναι πακτωμένη και αποτελεί το γοφό που συμβολίζεται με h (hip). Το σύστημα το θεωρούμε πακτωμένο για να αποφύγουμε την μεταφορική κίνηση των δύο σωμάτων. Με τον τρόπο αυτό, μπορούμε να περιγράψουμε αναλυτικά την επίδραση της μορφολογίας του ποδιού στην πρόνευση του κορμού. Οι βαθμοί ελευθερίας είναι δυο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-7, η στροφή κατά γ του ποδιού και κατά θ του κορμού του ρομπότ.

Επειδή το σύστημα είναι αρκετά απλό, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις μη επαυξημένες εξισώσεις Euler-Lagrange, οι οποίες έχουν ως εξής:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}\right] - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial V}{\partial q_k} = Q_{knc} \qquad (2\text{-}25)$$

Η κινητική ενέργεια του κορμού (body) και του ποδιού (leg) έχουν ως εξής:

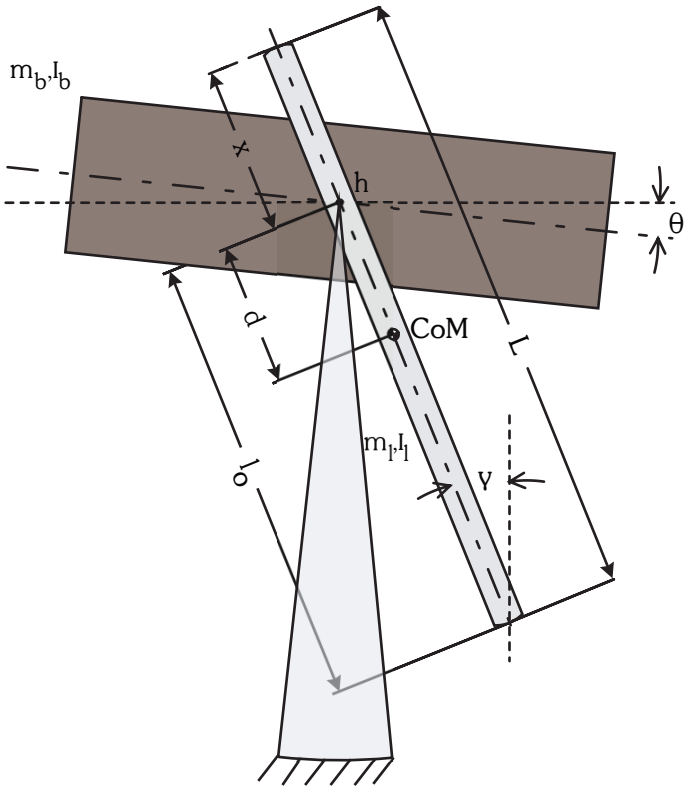
$$T_b = \frac{1}{2} I_b \cdot \dot{\theta}^2$$
$$T_l = \frac{1}{2} I_l \cdot \dot{\gamma}^2 \qquad (2\text{-}26)$$

άρα η συνολική κινητική ενέργεια του συστήματος ως άθροισμα των δυο προηγούμενων:

$$T = \frac{1}{2}(I_b \cdot \dot{\theta}^2 + I_l \cdot \dot{\gamma}^2) \qquad (2\text{-}27)$$

όπου I_l η ισοδύναμη αδράνεια του ποδιού όπως φαίνεται από την άρθρωση του γοφού και δίνεται από την Εξ. 2-36 παρακάτω. Η δυναμική ενέργεια εξαρτάται από την κατακόρυφη συνιστώσα της μετατόπισης του CoM και χρησιμοποιώντας το ύψος του γοφού ως επίπεδο αναφοράς προκύπτει ως:

$$V = -m \cdot g \cdot d \cdot \cos\gamma \qquad (2\text{-}28)$$



Εικόνα 2-7. Σύστημα σώματος - ποδιού, αρθρωμένα σε κοινό άξονα, πακτωμένο κατά τρόπο που να αιωρούνται από το έδαφος. Ο κινητήρας αντιδρά στο σώμα κατά την κίνηση του ποδιού, περιστρέφοντάς το κατά γωνία θ.

Επομένως η δυναμική ενέργεια είναι ελάχιστη και ίση με (V=-mgd) για γωνία (γ=0), δηλαδή κατακόρυφο πόδι και μέγιστη (V=0) για γωνία (γ=90°). Το ύψος του κέντρου μάζας της ράβδου προκύπτει όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-7, ως έξης:

$$d = \frac{l_0 + x}{2} - x = \frac{l_0 + x - 2x}{2} = \frac{l_0 - x}{2} \qquad (2\text{-}29)$$

Οι δυνάμεις στο δεξί μέλος των εξισώσεων Euler-Lagrange, Εξ. 2-25, προκύπτουν απ' την αρχή των δυνατών έργων:

$$\delta W_{nc} = \tau \cdot \delta(\gamma - \theta) = \tau \cdot \delta\gamma - \tau \cdot \delta\theta \tag{2-30}$$

όπου θεωρήσαμε ως θετική την αριστερόστροφη φορά των γωνιών. Επίσης, τ θεωρούμε τη ροπή που ασκείται από το σώμα προς το πόδι. Πρόσδοση θετικής ροπής κινεί στα θετικά το πόδι και στα αρνητικά το σώμα, όπως στην σύμβαση που ακολουθείται και αργότερα (Εικόνα 2-27). Οι γενικευμένες δυνάμεις που προκύπτουν από την αρχή των δυνατών έργων έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} Q_\gamma &= \tau \\ Q_\theta &= -\tau \end{aligned} \tag{2-31}$$

Εφαρμόζοντας τμηματικά τις εξισώσεις Euler-Lagrange, Εξ. 2-25, προκύπτουν δυο στήλες, μια για κάθε γενικευμένη μεταβλητή, ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} &= I_l \cdot \dot{\gamma} & \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} &= I_b \cdot \dot{\theta} \\ -\frac{\partial T}{\partial \gamma} &= 0 & -\frac{\partial T}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial \gamma} &= m \cdot g \cdot d \cdot \sin\gamma & \frac{\partial V}{\partial \theta} &= 0 \end{aligned} \tag{2-32}$$

Αντικαθιστώντας τέλος στην Εξ. 2-25 τις Εξ. 2-32, προκύπτουν οι εξισώσεις κίνησης του συστήματος ως εξής:

$$I_l \cdot \ddot{\gamma} + m \cdot g \cdot d \cdot \sin\gamma = \tau \tag{2-33α}$$

$$I_b \cdot \ddot{\theta} = -\tau \tag{2-33β}$$

Η Εξ. 2-33β που αφορά τον κορμό του ρομπότ, υποδεικνύει ότι για να μειώσουμε τις ταλαντώσεις του σώματος, δηλαδή την πρόνευση, αρκεί να μειώσουμε την ροπή που χρειάζεται το πόδι για να περιστραφεί. Συνεπώς, πρέπει να διερευνήσουμε την εξίσωση Εξ. 2-33α ως προς την ελαχιστοποίηση της.

2.3.3 Ελαχιστοποίηση απαιτούμενης ροπής

Ένας εύκολος τρόπος να ελαχιστοποιήσουμε την απαιτούμενη ροπή, είναι να θεωρήσουμε ένα ιδανικό σύστημα χωρίς τριβές όπως αυτό που μόλις αναλύσαμε και να εξάγουμε την παθητική του κίνηση. Στη συνέχεια, εφόσον η επιθυμητή λειτουργία του ρομπότ βρίσκεται κοντά στην φυσική αυτή κίνηση του συστήματος, η απαιτούμενη ροπή δεν θα είναι μηδενική όπως στο ιδανικό σύστημα, αλλά θα είναι πολύ μικρή εφόσον θα έχει να υπερνικήσει μόνο τις τριβές.

Θεωρούμε λοιπόν την Εξ. 2-33(α) και μηδενίζουμε τον όρο τ που είναι και το ζητούμενο. Παράλληλα, θεωρούμε μικρές γωνίες γ, δηλαδή 0° έως 10°, όπου το sinγ≈γ. Αντικαθιστώντας, προκύπτει η διαφορική εξίσωση του απλού αρμονικού ταλαντωτή:

$$\ddot{\gamma}(x) + \underbrace{\frac{m \cdot g \cdot d}{I_1}}_{\omega^2} \gamma = 0 \tag{2-34}$$

Αν και δεν είναι άμεσα εμφανές απ' την παραπάνω εξίσωση, η γωνιακή ιδιοσυχνότητα ω εξαρτάται από το επιπλέον μήκος ποδιού που επιβάλλουμε στο σύστημα αυξάνοντας το x. Για το μοχλοβραχίονα d έχουμε δώσει ήδη την αναλυτική του έκφραση συναρτήσει του x στην Εξ. 2-29. Η μάζα του ποδιού δεν χρειάζεται να εκφραστεί συναρτήσει του x διότι απλοποιείται, εφόσον βρίσκεται και στον αριθμητή αλλά και στον παρονομαστή μέσα στην αδράνεια. Το συνολικό μήκος του ποδιού είναι:

$$L(x) = l_0 + x \tag{2-35}$$

Η αδράνεια του ποδιού ως μια κούφια κυλινδρική ράβδος αρθρωμένη από ένα σταθερό ύψος l_0 και ένα μεταβαλλόμενο συνολικό μήκος, προκύπτει σύμφωνα με το θεώρημα παραλλήλων αξόνων (Steiner):

$$I_1(x) = \frac{1}{12} \cdot m \cdot [3r^2 + L^2] + m \cdot d^2 \tag{2-36}$$

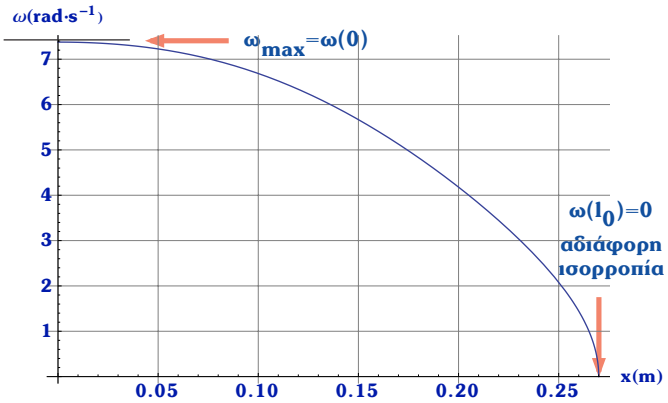
Αντικαθιστώντας τις σχέσεις αυτές προκύπτει το τετράγωνο της γωνιακής ιδιοσυχνότητας του ποδιού ως συνάρτηση του x:

$$\omega^2(x) = \frac{6g(l_0 - x)}{4l_0(l_0 - x) + 3r^2 + 4x^2} \tag{2-37}$$

όπου:

$$0 \le x \le l_0 \tag{2-38}$$

Θεωρώντας σταθερά τα l_0 και r, η τυπική απόκριση που παίρνουμε αυξάνοντας το x στην Εξ. 2-37 από 0 έως l_0, φαίνεται στην Εικόνα 2-8.



Εικόνα 2-8. Η γωνιακή ιδιοσυχνότητα του ποδιού συναρτήσει πρόσθετου μήκους ποδιού από την στροφική άρθρωση και πάνω, βλ. Εικόνα 2-7.

2.3.4 Συμπέρασμα 1ο

Προκύπτει από το διάγραμμα της Εικόνας 2-8 ότι η ιδιοσυχνότητα μηδενίζεται (αδιάφορη ισορροπία), όπως γνωρίζουμε, όταν η στροφική άρθρωση ταυτίζεται με το κέντρο μάζας του σώματος, όταν δηλαδή το $x=l_0=27cm$. Οι ενδιάμεσες τιμές δεν παρουσιάζουν κάποιο ενδιαφέρον, ενώ είναι ξεκάθαρο ότι προσθέτοντας επιπλέον μήκος στο πόδι πάνω από το σημείο άρθρωσής του, το κάνουμε λιγότερο ευκίνητο.

Δίνοντας ένα αριθμητικό παράδειγμα απ' το πραγματικό μονόποδο ρομπότ στο οποίο έχει χρησιμοποιηθεί για πόδι, ράβδος διαμέτρου 1cm και το ύψος του γοφού βρίσκεται στα 27cm, προκύπτει αντικαθιστώντας στην Εξ. 2-37:

$$\left.\begin{array}{l} g = 9.8m/s^2 \\ l_0 = 0.27m \\ r = 0.005m \\ x = 0m \end{array}\right\} \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = 1.17Hz \qquad (2\text{-}39)$$

Αυτή είναι η φυσική συχνότητα του ποδιού αν δεν περισσεύει ράβδος πάνω από τη στροφική άρθρωση. Αντιθέτως, στην υπάρχουσα κατασκευή, επειδή η επιπλέον ράβδος χρησιμοποιείται για την πρόσδεση του αισθητήρα θέσης (με χρήση ψευδογόνατου όπως δείχνει η Εικόνα 5-32) περισσεύουν 13cm:

$$\left.\begin{array}{l} g = 9.8m/s^2 \\ l_0 = 0.27m \\ r = 0.005m \\ x = 0.13m \end{array}\right\} f = \frac{\omega}{2\pi} = 0.98Hz \qquad (2\text{-}40)$$

Προκύπτει λοιπόν, όταν το ζητούμενο είναι η μέγιστη δυνατή ευκινησία, υψηλότερη ιδιοσυχνότητα Εξ. 2-39, και η κατανομή της μάζας στο πόδι είναι ομοιόμορφη και πάνω σε ράβδο, τότε το βέλτιστο είναι το πόδι να είναι ακριβώς ίσο με το ύψος στο οποίο βρίσκεται η στροφική άρθρωση.

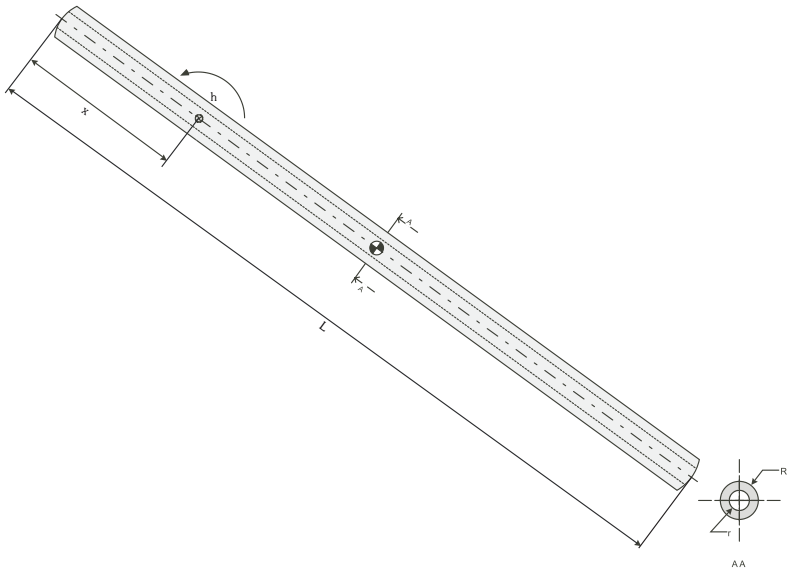
2.3.5 Τοποθέτηση της στροφικής άρθρωσης

Στο κομμάτι αυτό θέτουμε το πρόβλημα του βέλτιστου σημείου τοποθέτησης της στροφικής άρθρωσης για το πραγματικό μονόποδο ρομπότ. Σκοπός μας δηλαδή είναι να δείξουμε αν χωρίς να κόψουμε το απαραίτητο για το ψευδογόνατο επιπλέον μήκος της ράβδου του ποδιού, υπάρχει κάποια θέση που να βελτιστοποιεί την απόκριση του ποδιού.

Το πόδι αποτελείται από μια διαμπερή ατσάλινη ράβδο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-9. Η απόσταση x από το άκρο της ράβδου είναι η παράμετρος που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε. Το συνολικό μήκος της ράβδου L είναι σταθερό στα 40cm και ζητούμενο είναι το βέλτιστο x ώστε η ιδιοσυχνότητα της ράβδου ως απλό εκκρεμές να γίνει η μέγιστη δυνατή.

Η απόσταση του κέντρου μάζας από την στροφική άρθρωση h, προκύπτει ως:

$$d(x) = \frac{L}{2} - x = \frac{L - 2x}{2} \tag{2-41}$$



Εικόνα 2-9. Τοποθέτηση της στροφικής άρθρωσης σε απόσταση x απ' το άκρο του ποδιού, το οποίο αποτελείται από μια διάτρητη ράβδο.

Η αδράνεια στον άξονα περιστροφής δίνεται από το θεώρημα παραλλήλων αξόνων και τη γεωμετρία της ράβδου:

$$I_l(x) = \frac{1}{12} \cdot m \cdot [3(R^2 - r^2) + L^2] + m \cdot d^2 \tag{2-42}$$

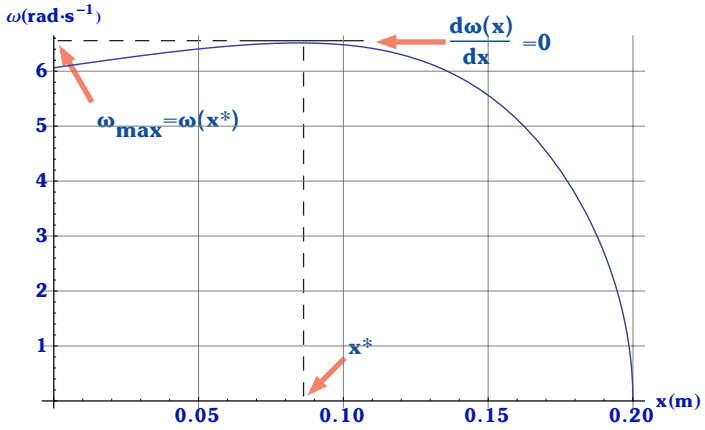
όπου το r συνήθως είναι περίπου ίσο με R/2 απ' τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Το τετράγωνο της γωνιακής ιδιοσυχνότητας που μας ενδιαφέρει όπως και πριν, προκύπτει:

$$\omega(x) = \sqrt{\frac{24g(L - 2x)}{16\left(L^2 - 3L \cdot x + 3x^2\right) + 9R^2}} \tag{2-43}$$

Σ' αυτή την περίπτωση, παρατηρούμε το αναμενόμενο ότι η ιδιοσυχνότητα μηδενίζεται για x=L/2, στην ταύτιση δηλαδή της στροφικής άρθρωσης με το κέντρο μάζας, αλλά πλέον υπάρχει και βέλτιστο σημείο για την στροφική άρθρωση όπως δείχνει η Εικόνα 2-10.

Το βέλτιστο σημείο οφείλεται στην χρυσή τομή ανάμεσα στον όσο το δυνατό μεγαλύτερο μοχλοβραχίονα d και όσο το δυνατόν μικρότερη αδράνεια I_l. Ο μηδενισμός της παραγώγου της Εξ. 2-43 δίνει τη λύση για τα βέλτιστα x* αφού εκτελέσουμε τα βήματα του υπολογισμού της ρίζας του $\omega^2(x)$ και της παραγώγου της. Τελικά, το βέλτιστο x* υπολογίζεται ως εξής:

$$\omega_{max} = \max_x \omega(x) \Rightarrow x^* = \frac{1}{12}\left(\sqrt{3}\sqrt{4L^2 + 9R^2} + 6L\right) \tag{2-44}$$



Εικόνα 2-10. Η γωνιακή ιδιοσυχνότητα του ποδιού συναρτήσει της θέσης της στροφικής άρθρωσης για σταθερό συνολικό μήκος ποδιού, βλ. Εικόνα 2-9.

Για την περίπτωση του μονόποδου ρομπότ, η βέλτιστη ιδιοσυχνότητα του ποδιού χωρίς να κόψουμε μέρος της ράβδου προκύπτει αντικαθιστώντας στην Εξ. 2-44:

$$\left.\begin{array}{l} L = 0.40\text{m} \\ R = 0.005\text{m} \end{array}\right\} x = 8.45\text{cm} \qquad (2\text{-}45)$$

Αντικαθιστώντας τέλος στην Εξ. 2-43:

$$\left.\begin{array}{l} g = 9.8\text{m}/\text{s}^2 \\ L = 0.40\text{m} \\ R = 0.005\text{m} \\ x = 0.0845\text{m} \end{array}\right\} f = \frac{\omega}{2\pi} = 1.04\text{Hz} \qquad (2\text{-}46)$$

2.3.6 Συμπέρασμα 2ο

Προκύπτει όπως αναμενόταν ότι η ιδιοσυχνότητα αν δεν αφαιρέσουμε υλικό δεν θα είναι η μέγιστη δυνατή, δηλαδή 1.17Hz όπως προκύπτει απ' την Εξ. 2-39, αλλά μπορεί να γίνει λίγο πιο γρήγορο στην περίπτωση που αντί στα 27cm, η στροφική άρθρωση τοποθετηθεί στα 31.5cm.

Παρατηρεί κανείς ότι στο προηγούμενο κεφάλαιο δεν χρησιμοποιήσαμε εξισώσεις για διάτρητη ράβδο. Ακόμα και αν ληφθεί υπόψιν, το αποτέλεσμα αλλάζει στα τελευταία δεκαδικά ψηφία που ούτως ή άλλως στρογγυλοποιούνται.

2.3.7 Τοποθέτηση αντίβαρου

Είδαμε ότι προσθέτοντας ράβδο για να μετατοπίσουμε το κέντρο μάζας κοντά στη στροφική άρθρωση και να προσπαθήσουμε να δημιουργήσουμε κατ' αυτή την έννοια ένα πιο ευκίνητο εκκρεμές δεν αποδίδει, διότι αυξάνεται πολύ πιο έντονα η αδράνεια του ποδιού.

Σε αυτή την παράγραφο θέτουμε το ερώτημα του πως μπορούμε να βελτιώσουμε την ευκινησία του ποδιού τοποθετώντας ένα αντίβαρο που θα φέρει το συνολικό κέντρο μάζας πιο ψηλά, χωρίς να αυξήσει ταυτόχρονα την αδράνεια (Εικόνα 2-11).

Θα εκφράσουμε τη μάζα του αντίβαρου m_{cw} (counterweight) ως συνάρτηση της μάζας του ποδιού m_l:

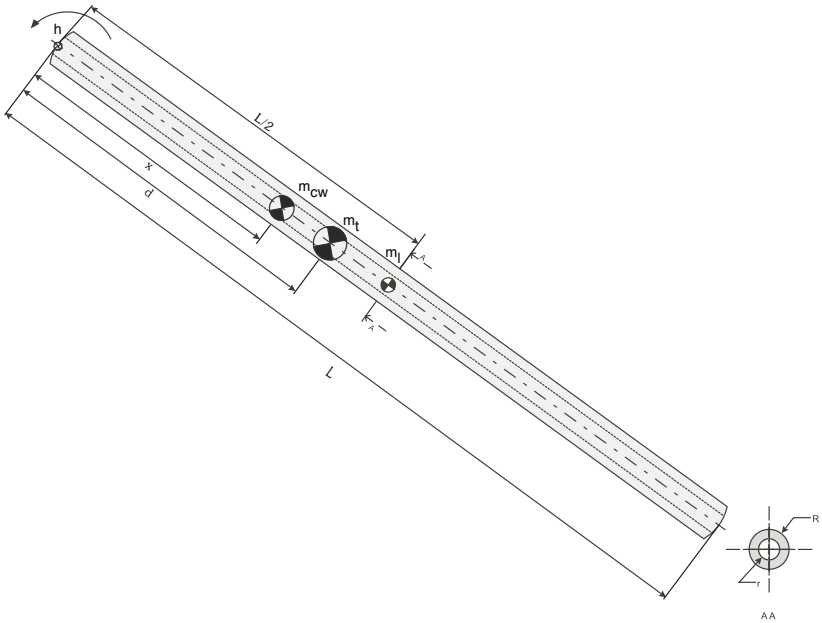
$$m_{cw}(k) = k \cdot m_l \tag{2-47}$$

Η συνολική μάζα του ποδιού έχει τότε ως εξής:

$$m_t(k) = m_{cw}(k) + m_l \tag{2-48}$$

Το συνολικό κέντρο μάζας βρίσκεται σε απόσταση d από τη στροφική άρθρωση όπως δείχνει η Εικόνα 2-11 και δίνεται ως:

$$d(k,x) = \frac{x \cdot m_{cw}(k) + \frac{L}{2} \cdot m_l}{m_t(k)} \tag{2-49}$$



Εικόνα 2-11. Τοποθέτηση αντίβαρου σε απόσταση x από το άκρο του ποδιού.

Η αδράνεια του ποδιού για τον άξονα περιστροφής που περνά από το γοφό h είναι:

$$I_l(k,x) = \frac{1}{12} m_l \left[3(R^2 - r^2) + L^2\right] + m_l \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2 + m_{cw}(k) \cdot x^2 \tag{2-50}$$

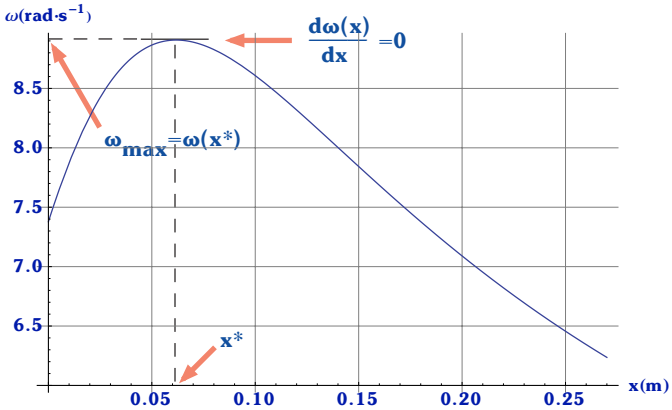
όπου:

$$r = \frac{R}{2} \Rightarrow 3(R^2 - r^2) = \frac{9R^2}{4} \tag{2-51}$$

Υπολογίζουμε το τετράγωνο της γωνιακής ιδιοσυχνότητας του ποδιού όπως προκύπτει από την Εξ. 2-34:

$$\omega(k,x) = \sqrt{\frac{m_t \cdot g \cdot d}{I_l}} = \sqrt{\frac{24g(2k \cdot x + L)}{48k \cdot x^2 + 16L^2 + 9R^2}} \tag{2-52}$$

Καταλήγουμε λοιπόν σε μια εξίσωση που συνδέει την προσθήκη αντίβαρου και την θέση του από το άκρο της ράβδου με την γωνιακή ιδιοσυχνότητα του ποδιού. Όπως δείχνει η Εικόνα 2-12, υπάρχει μια βέλτιστη απόσταση x*, τοποθέτησης του αντίβαρου, που δίνει τη μέγιστη δυνατή ιδιοσυχνότητα για κάθε πολλαπλάσιο της μάζας m_l.



Εικόνα 2-12. Η γωνιακή ιδιοσυχνότητα του ποδιού για $m_{cw}=2m_l$, συναρτήσει της απόστασης του αντίβαρου από το άκρο της ράβδου, βλ. Εικόνα 2-11.

Διαφορίζοντας την Εξ. 2-52 ως προς x και επιλύοντας για εκείνα τα x που μηδενίζουν την παράγωγο, προκύπτουν τα x συναρτήσει του k που δίνουν την μέγιστη γωνιακή ιδιοσυχνότητα:

$$x_1(k) = \frac{\sqrt{12(4k+3)L^2 + 27kR^2} - 6L}{12k} \tag{2-53}$$

Η επίλυση δίνει δυο ρίζες για το x εκ των οποίων η μια δεν είναι πραγματοποιήσιμη, διότι τοποθετεί το αντίβαρο εκτός ποδιού. Στην Εξ. 2-53 έχουμε κρατήσει την τιμή εκείνη του x που τοποθετεί το αντίβαρο κατά μήκος του διαθέσιμου μήκους L. Αν χρειάζεται να τοποθετήσουμε το αντίβαρο από την στροφική άρθρωση και επάνω χρησιμοποιούμε την εξίσωση:

$$x_2(k) = -\frac{\sqrt{12(4k+3)L^2 + 27kR^2} + 6L}{12k} \tag{2-54}$$

Επισημαίνουμε ότι οι δυο παραπάνω ρίζες δεν μπορούν να υπολογιστούν στην περίπτωση που δεν υπάρχει αντίβαρο, άρα πρέπει $k \neq 0$.

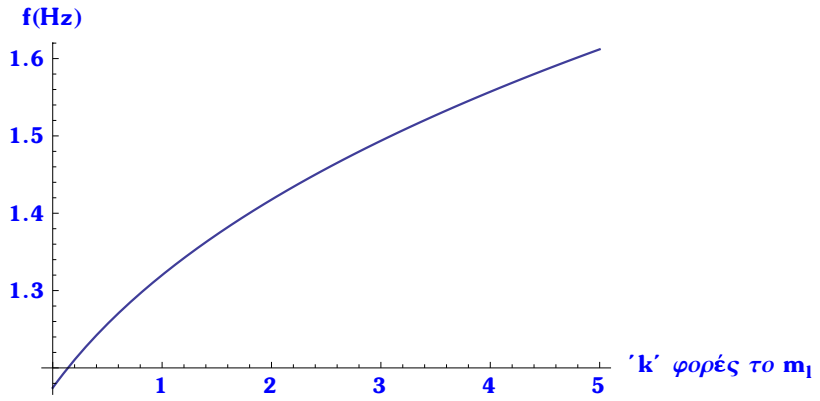
Αντικαθιστώντας την Εξ. 2-53 στην Εξ. 2-52 προκύπτει η ιδιοσυχνότητα του ποδιού για διαφορετικά πολλαπλάσια k του αντίβαρου:

$$f(k) = \frac{\omega}{2\pi} = \sqrt[4]{3}\sqrt{\frac{g\left(\sqrt{4(4k+3)L^2 + 9kR^2} + 2\sqrt{3}L\right)}{32L^2 + 18R^2}} \cdot \frac{1}{\pi} \tag{2-55}$$

Οι τιμές των παραμέτρων του πραγματικού μονόποδου ρομπότ έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} g &= 9.8 m/s^2 \\ L &= 0.27 m \\ R &= 0.005 m \end{aligned} \tag{2-56}$$

όπου έχουμε θεωρήσει ότι δεν υπάρχει επιπλέον ράβδος πάνω από τη στροφική άρθρωση. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην Εξ. 2-55 παίρνουμε το παρακάτω γράφημα για k από 0 έως 5.



Εικόνα 2-13. Ιδιοσυχνότητα του ποδιού συναρτήσει του αντίβαρου.

Παρατηρούμε ότι το πόδι γίνεται πιο ευκίνητο όσο αυξάνεται το αντίβαρο που τοποθετούμε, στο βέλτιστο πάντα σημείο, μεταξύ της στροφικής άρθρωσης του ποδιού και του κέντρου μάζας του. Στον Πίνακα 2-1 παραθέτουμε ορισμένες τυπικές τιμές του αντίβαρου και των αντίστοιχων θέσεων, καθώς και τις ιδιοσυχνότητες που επιτυγχάνονται:

Πίνακας 2-1. Τιμές αντίβαρου, αντίστοιχες αποστάσεις τοποθέτησης απ' το άκρο και επιτυγχανόμενη ιδιοσυχνότητα ποδιού.

m_{cw}	x(cm)	f(Hz)
0.001 m_l	8.99	1.17
0.5 m_l	7.86	1.26
1.0 m_l	7.12	1.32
1.5 m_l	6.59	1.37
2.0 m_l	6.18	1.42
5.0 m_l	4.78	1.61

Η πρώτη σειρά του Πίνακα 2-1 επιβεβαιώνει την ήδη γνωστή από την Εξ. 2-39 μέγιστη ιδιοσυχνότητα του ποδιού χωρίς προσθήκη αντίβαρου, εφόσον k=0.001 ισοδυναμεί με το να μην υπάρχει καν αντίβαρο.

2.3.8 Συμπέρασμα 3ο

Καταλήγοντας μπορούμε να πούμε ότι έχουμε τη δυνατότητα να αυξήσουμε περαιτέρω την ευκινησία του ποδιού, εφόσον αυτό κρίνεται απαραίτητο, με την προσθήκη αντίβαρου. Επισημαίνουμε ότι η αύξηση της ιδιοσυχνότητας του ποδιού είναι ωφέλιμη μόνο στην περίπτωση που θέλουμε το ρομπότ να τρέχει σ' αυτές τις ταχύτητες.

Διαφορετικά, μεγάλη κατανάλωση ισχύος από τον κινητήρα και δημιουργία γωνίας πρόνευσης επιφέρει και ένα πόδι υψηλής ιδιοσυχνότητας που προσπαθούμε να το κινήσουμε σε χαμηλότερες ταχύτητες. Σε αυτή την περίπτωση, αντί να προσθέτουμε ενέργεια στο πόδι, προσπαθούμε να του αφαιρέσουμε.

Αξίζει να επισημάνουμε ότι υπάρχει λύση και στην περίπτωση που δεν είναι εφικτή η προσθήκη αντίβαρου στο τμήμα μεταξύ της στροφικής άρθρωσης και του κέντρου μάζας του ποδιού, επειδή για παράδειγμα ο χώρος καταλαμβάνεται απ' το κεντρικό ελατήριο του ρομπότ και πρέπει να παραμείνει διαθέσιμος. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε την δεύτερη διακριτή ρίζα, την $x_2(k)$ που δίνεται από την Εξ. 2-54.

Παρατηρούμε ακόμα ότι η αύξηση της συνολικής μάζας του ποδιού δεν επηρεάζει αρνητικά την εναέρια φάση, μια απλοποιημένη έκδοση της οποίας μόλις αναλύσαμε. Ο λόγος είναι ότι το πόδι επιταχύνεται κατά το ήμισυ της κίνησης λόγω της βαρυτικής έλξης και άρα το επιπλέον βάρος εκεί δεν δημιουργεί ιδιαίτερο πρόβλημα. Αλλά τίθεται το ερώτημα πως αυτό το επιπλέον βάρος θα επηρεάσει στη φάση εδάφους όπου ο κινητήρας θα πρέπει να καταναλώσει ισχύ για να το μεταφέρει σε υψηλότερο δυναμικό επίπεδο. Πιθανώς να υπάρχει ένα βέλτιστο σημείο που να ευνοεί τη συνολική κίνηση του μονόποδου ρομπότ, αλλά το ερώτημα αυτό μένει να απαντηθεί μέσα από αριθμητικές προσομοιώσεις, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Παίρνοντας παράδειγμα από τα έμβια όντα, επιβεβαιώνεται τέλος η παρατήρηση πως η συγκέντρωση μάζας στο γλουτό επιτυγχάνει συνολικά ένα ταχύτερο πόδι.

2.3.9 Σταθερό αντίβαρο και πρόσθεση μήκους ποδιού

Στη συνέχεια εξετάζουμε αν το συμπέρασμα του Κεφ. 2.3.4, που θεωρεί βέλτιστο πόδι εκείνο που έχει μήκος ίσο με το ύψος του ρομπότ, μπορεί να γενικευτεί. Η πιο γενικευμένη περίπτωση, που τίθεται υπό εξέταση, αφορά πόδι με σταθερό αντίβαρο και άρα πλέον η μάζα του δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη. Η περίπτωση αυτή είναι ενδιαφέρουσα διότι προσεγγίζει με περισσότερη λεπτομέρεια αυτό που συμβαίνει και στο τετράποδο και στο μονόποδο ρομπότ, (Εικόνα 1-2) & (Εικόνα 1-3), όπου το στοιχείο του γραμμικού ένσφαιρου τριβέα δρα ουσιαστικά ως σταθερό αντίβαρο στην εναέρια φάση και ως κινούμενο αντίβαρο στη φάση εδάφους.

Τίθεται λοιπόν το ερώτημα αν υπάρχει βέλτιστο x για το πόδι στην Εικόνα 2-14 που να μεγιστοποιεί την ιδιοσυχνότητα και να είναι διαφορετικό από x=0 που έχει βρεθεί νωρίτερα στο Κεφ. 2.3.4.

Θα εκφράσουμε τη μάζα του αντίβαρου m_{ul} (upper leg) ως συνάρτηση της μάζας του ποδιού m_l:

$$m_{ul}(k) = k \cdot m_l \tag{2-57}$$

Η συνολική μάζα του ποδιού έχει τότε ως εξής:

$$m_t(k) = m_{ul} + m_l \tag{2-58}$$

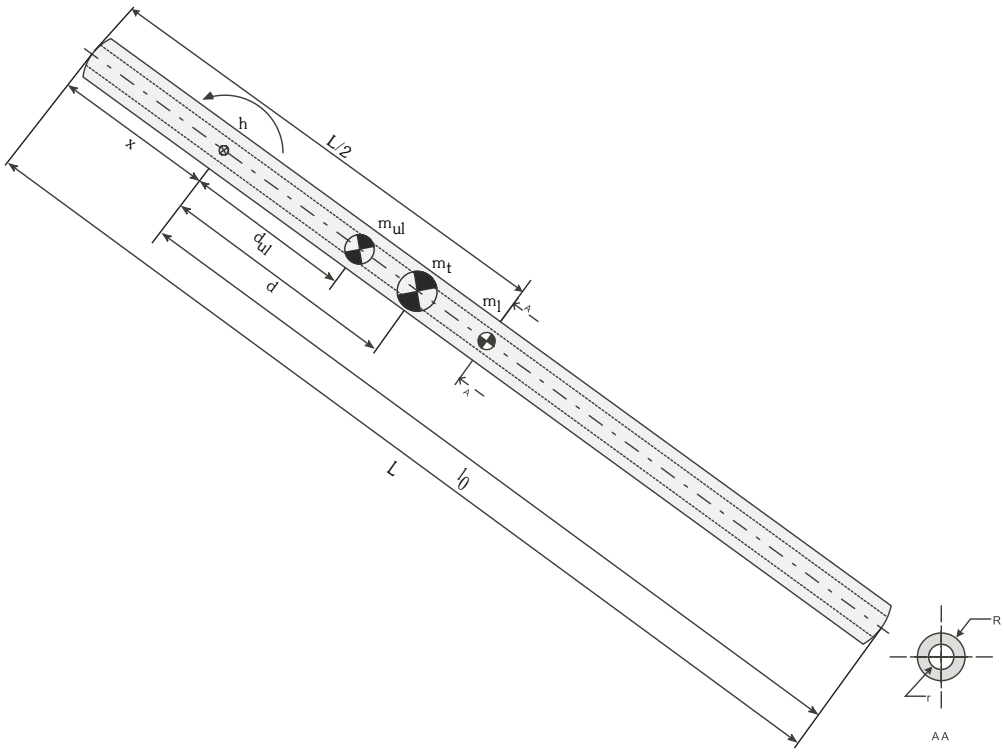
Το συνολικό κέντρο μάζας βρίσκεται σε απόσταση d από τη στροφική άρθρωση όπως δείχνει η Εικόνα 2-14 και δίνεται ως:

$$d(k, d_{ul}, x) = \frac{d_{ul} \cdot m_{ul} + \left(\frac{L}{2} - x\right) \cdot m_l}{m_t} \tag{2-59}$$

Η αδράνεια του ποδιού για τον άξονα περιστροφής που περνά από το γοφό h είναι:

$$I_l\left(k, d_{ul}, x\right) = \frac{1}{12} m_l \left[3(R^2 - r^2) + L^2\right] + m_l \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right)^2 + m_{ul} \cdot d_{ul}^2 \qquad (2\text{-}60)$$

όπου το r υπολογίζεται από την Εξ. 2-51.



Εικόνα 2-14. Σταθερό αντίβαρο σε απόσταση d_{ul} από τον γοφό και τοποθέτηση επιπλέον

Βρίσκουμε το τετράγωνο της γωνιακής ιδιοσυχνότητας του ποδιού όπως προκύπτει από την Εξ. 2-34 και υπολογίζουμε την ιδιοσυχνότητα σε (Hz), ως εξής:

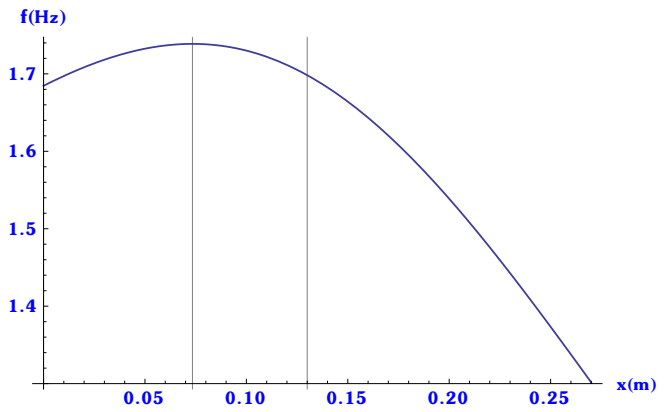
$$\left.\begin{aligned} \omega^2\left(k, d_{ul}, x\right) &= \frac{m_t \cdot g \cdot d}{I_l} \\ f &= \frac{\omega}{2\pi} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \qquad (2\text{-}61)$$

$$\Rightarrow f\left(k, d_{ul}, x\right) = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{g(2d_{ul} \cdot k + l_0 - x)}{48d_{ul}^2 \cdot k + 16 \cdot l_0^2 - 16l_0 \cdot x + 9R^2 + 16x^2}}$$

Καταλήγουμε λοιπόν σε μια εξίσωση που συνδέει την προσθήκη μήκους ποδιού και την θέση του αντίβαρου με την ιδιοσυχνότητα του ποδιού. Όπως δείχνει η Εικόνα 2-15, υπάρχει ένα βέλτιστο επιπρόσθετο μήκος ποδιού πάνω από τη στροφική άρθρωση $x \neq 0$ για τις συγκεκριμένες τιμές αντίβαρου και θέσης.

Διαφορίζοντας την Εξ. 2-61 ως προς x και επιλύοντας για εκείνα τα x που μηδενίζουν την παράγωγο, προκύπτουν τα x συναρτήσει του k και του d_{ul} που δίνουν την μέγιστη ιδιοσυχνότητα:

$$x(k,d_{ul}) = 2d_{ul}\cdot k + l_0 - \frac{1}{4}\sqrt{16d_{ul}^2\cdot k(4k+3) + 32d_{ul}\cdot k\cdot l_0 + 16l_0^2 + 9R^2} \qquad (2\text{-}62)$$



Εικόνα 2-15. Η ιδιοσυχνότητα του ποδιού για m_{ul}=8m_l και d_{ul}=0.025m, συναρτήσει του επιπλέον μήκους του ποδιού από τη στροφική άρθρωση (γοφό) και πάνω.

Αντικαθιστώντας την Εξ. 2-62 στην Εξ. 2-61 προκύπτει η ιδιοσυχνότητα του ποδιού για διαφορετικά πολλαπλάσια k του αντίβαρου και θέσης του d_{ul}:

$$f(k,d_{ul}) = \frac{1}{2\pi}\cdot\sqrt{\frac{g\left(\sqrt{16\left(d_{ul}\cdot^2 k(4k+3) + 2d_{ul}\cdot k\cdot l_0 + l_0^2\right) + 9R^2} + 8d_{ul}\cdot k + 2l_0\right)}{16d_{ul}^2\cdot k + 4l_0^2 + 3R^2}} \qquad (2\text{-}63)$$

Ποια είναι η χρησιμότητα της Εξ. 2-63: εάν γνωρίζουμε μέσα από ένα σχέδιο CAD το βάρος και τη θέση του κέντρου μάζας του γραμμικού ένσφαιρου τριβέα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέγιστη ιδιοσυχνότητα που μπορούμε να επιτύχουμε, αφήνοντας επιπλέον μήκος ποδιού πάνω από τη στροφική άρθρωση ίσο με x που το υπολογίζουμε από την Εξ. 2-62.

2.3.10 Συμπέρασμα 4ο

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως όταν δεν είναι ομοιόμορφη η κατανομή μάζας στο πόδι και υπάρχει, όπως στο πραγματικό ρομποτικό σύστημα, συγκέντρωση μάζας σε κάποιο σημείο τότε μπορεί να προκύψει διαφορετικό βέλτιστο για το επιπλέον μήκος ποδιού απ' το x=0 που υπολογίσαμε στο Κεφ. 2.3.4. Το βέλτιστο αυτό μήκος είναι συνάρτηση των παραμέτρων του βάρους και της θέσης του συγκεντρωμένου κέντρου μάζας και μπορεί να υπολογιστεί από την Εξ. 2-62.

2.3.11 Τοποθέτηση αντίβαρου & επιπλέον μήκους ποδιού

Μπορούμε ήδη να φανταστούμε από τα προηγούμενα ότι συνδυάζοντας μια σωστή θέση για το αντίβαρο και ένα ιδανικό επιπλέον μήκος ποδιού, θα μπορέσουμε να επιτύχουμε μια ακόμη υψηλότερη ιδιοσυχνότητα από εκείνη που υπολογίσαμε στο Κεφ. 2.3.8. Πράγματι, αυτό ισχύει και θα το δείξουμε στη συνεχεία. Προεκτείνουμε λοιπόν τη λύση για ελεγχόμενο μέγεθος και θέση του αντίβαρου.

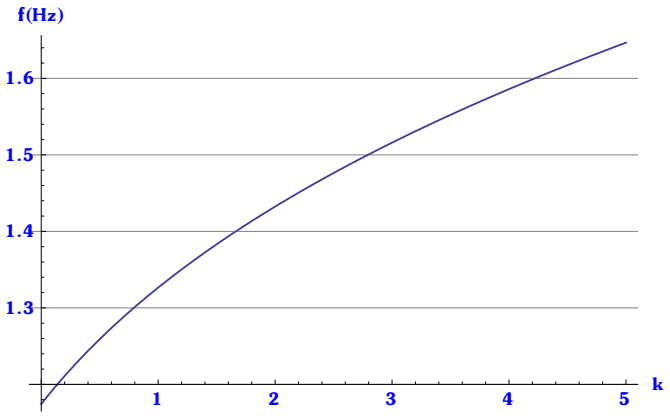
Διαφορίζοντας την Εξ. 2-63 ως προς $d_{ul}=d_{cw}$ (αλλάζουμε τον συμβολισμό για να υποδηλώσουμε ότι πλέον είναι ελέγξιμο μέγεθος η θέση του αντίβαρου), προκύπτει η βέλτιστη θέση του ως:

$$d_{cw}(k) = \frac{\sqrt{16(k+1)l_0^2 + 3(4k+3)R^2} - 2l_0}{8k+6} \tag{2-64}$$

Τέλος, αντικαθιστώντας την Εξ. 2-64 πίσω στην Εξ. 2-63, προκύπτει η ιδιοσυχνότητα ως συνάρτηση του k, ως εξής:

$$f(k) = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g\left(\sqrt{16(k+1)l_0^2 + 3(4k+3)R^2} + 2l_0\right)}{4l_0^2 + 3R^2}} \tag{2-65}$$

Για να δούμε ένα παράδειγμα εφαρμογής των παραπάνω εξισώσεων και να κατανοήσουμε σε τι διαφέρει από τα προηγούμενα αποτελέσματα, θα χρησιμοποιήσουμε τις παραμέτρους του μονόποδου ρομπότ από τις Εξ. 2-56 και θα υπολογίσουμε την ιδιοσυχνότητα που προκύπτει. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην Εξ. 2-65 παίρνουμε το παρακάτω γράφημα για k από 0 έως 5.



Εικόνα 2-16. Ιδιοσυχνότητα του ποδιού συναρτήσει του αντίβαρου.

Παρατηρούμε ότι το πόδι γίνεται πιο ευκίνητο όσο αυξάνεται το αντίβαρο, όπως αναμένουμε από το Κεφ. 2.3.8, αλλά σε αυτή την περίπτωση που παράλληλα αυξάνουμε το μήκος του ποδιού πάνω από τη στροφική άρθρωση, επιτυγχάνουμε ελαφρώς υψηλότερες ιδιοσυχνότητες όπως υπολογίζονται και αναλυτικότερα στον Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2. Τιμές αντίβαρου, αντίστοιχες αποστάσεις τοποθέτησης απ' το άκρο, επιπλέον μήκος ποδιού και επιτυγχανόμενη ιδιοσυχνότητα ποδιού

m_{cw}	d_{cw}(cm)	x(cm)	f(Hz)
0.001 m_l	9.00	0.00	1.17
0.5 m_l	7.83	1.75	1.26
1.0 m_l	7.05	2.92	1.33
1.5 m_l	6.49	3.77	1.38
2.0 m_l	6.05	4.43	1.43
5.0 m_l	4.58	6.63	1.65

Στον Πίνακα 2-2 οι τιμές έχουν υπολογιστεί με τον εξής τρόπο: η είσοδος είναι το πολλαπλάσιο της μάζας k=0.001, 0.5, ..., 5 και από εκεί προκύπτει το d_{cw} σύμφωνα με την Εξ. 2-64. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας k και d_{cw} το x υπολογίζεται από την Εξ. 2-62 όπου $d_{ul}=d_{cw}$. Τέλος το f προκύπτει από την Εξ. 2-65 που έχει ήδη ενσωματωμένες τις εξισώσεις 2-64 και 2-62.

Η πρώτη γραμμή του πίνακα επιβεβαιώνει την ήδη γνωστή από την Εξ. 2-39 μέγιστη ιδιοσυχνότητα του ποδιού χωρίς προσθήκη αντίβαρου, εφόσον όταν το k τείνει στο μηδέν το αντίβαρο είναι μια αμελητέα μάζα. Για τις επόμενες τιμές μπορεί να διαπιστώσει κανείς την μικρή αύξηση της ιδιοσυχνότητας σε σχέση με τον Πίνακα 2-1.

2.3.12 Συμπέρασμα 5ο

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι θεωρώντας σημειακή μάζα αντίβαρου μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε περαιτέρω την απόκριση του ποδιού προσθέτοντας παράλληλα επαρκές μήκος ποδιού από την στροφική άρθρωση και πάνω. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν συνδυασμό των προηγούμενων μεθόδων: προσθέτουμε αντίβαρο που τοποθετούμε στη βέλτιστη θέση και στη συνέχεια βρίσκουμε το βέλτιστο εκείνο μήκος ποδιού που θα περισσεύει από την στροφική άρθρωση και πάνω (ισοδυναμεί με την τοποθέτηση στροφικής άρθρωσης Κεφ. 2.3.6, εάν είχαμε ήδη το βέλτιστο συνολικό μήκος επιλεγμένο) ώστε το συνολικό κέντρο μάζας να ανέβει πιο κοντά στον γοφό, σταθμίζοντας το πλεονέκτημα αυτό με το μειονέκτημα της επιπλέον αδράνειας που έχει η μεγαλύτερη ράβδος.

2.3.13 Γενικευμένη προσέγγιση

Αν θεωρήσουμε όλες τις πιθανές παραμέτρους που μπορούν να αλλάξουν και κρατήσουμε τους αδιάστατους λόγους τους ως προς τα ενδογενή μεγέθη του ποδιού (ύψος άρθρωσης και μάζα ποδιού) προκύπτει η ιδιοσυχνότητα σαν συνάρτηση των έξι αυτών συντελεστών, ως εξής:

$$f = \frac{\sqrt{6}}{\pi}\sqrt{\frac{g\cdot(2k_{cw}\cdot k_{xcw}+2k_f-k_x+1)}{l_0\left(48k_{cw}\cdot k_{xcw}^2+48k_f+k_i\left(9k_r^2+4(k_x+1)^2\right)+9k_r^2+16k_x^2-16k_x+16\right)}} \qquad (2\text{-}66)$$

όπου το f έχει υπολογιστεί ως εξής:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{d\cdot g\cdot m_t}{I_l^{hip}}} \qquad (2\text{-}67)$$

Οι εξισώσεις που συνδέουν τις μεταβλητές μεταξύ τους είναι συγκεντρωτικά δοσμένες στις Εξ. 2-68. Η αδράνεια του αντίβαρου και η επιπλέον διάμετρος του ποδιού είναι στον παρονομαστή, άρα όσο μικρότερες τόσο καλύτερο. Τα υπόλοιπα χρήζουν διερεύνησης: κρατώντας σταθερά τα υπόλοιπα και επιλύοντας την ιδιοσυχνότητα για ύπαρξη μέγιστης τιμής προκύπτει ότι η μάζα στην άκρη του ποδιού επιβραδύνει το πόδι, ενώ υπάρχει βέλτιστη ρύθμιση για τα k_x και k_{xcw} που προσδιορίζεται μοναδικά για κάθε k.

$$
\begin{aligned}
R &= k_r \cdot l_0 \\
r &= \frac{R}{2} \\
L &= l_0 + x \\
I_l^{CoM} &= \frac{1}{12} m_l \left(L^2 + 3\left(R^2 - r^2\right)\right) \\
I_{cw} &= k_i \cdot I_l^{CoM} \\
x &= k_x \cdot l_0 \\
d_{cw} &= k_{xcw} \cdot l_0 \\
d_f &= l_0 \\
m_{cw} &= k_{cw} \cdot m_l \\
m_f &= k_f \cdot m_l \\
m_t &= m_l + m_{cw} + m_f
\end{aligned}
\tag{2-68α}
$$

$$
\begin{aligned}
d &= \frac{d_{cw} \cdot m_{cw} + d_f \cdot m_f + m_l \left(\frac{L}{2} - x \right)}{m_t} \\
I_l^{hip} &= I_l^{CoM} + I_{cw} + d_{cw}^2 \cdot m_{cw} + d_f^2 \cdot m_f + \left(\frac{L}{2} - x \right)^2 \cdot m_l
\end{aligned}
\tag{2-68β}
$$

Συνοπτικά τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

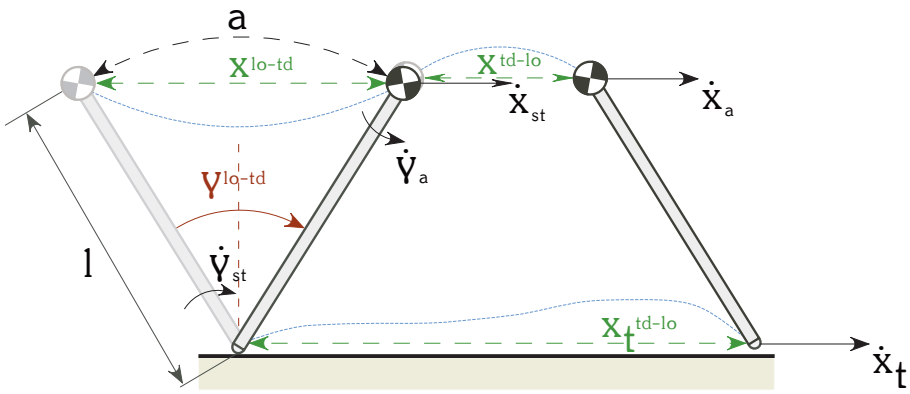
1. Όσο μεγαλύτερη ακτίνα ράβδου, τόσο χαμηλότερη η ιδιοσυχνότητα.
2. Το μήκος της ράβδου που προεξέχει από τη στροφική άρθρωση και πάνω, παρουσιάζει βέλτιστη τιμή που μεγιστοποιεί την ιδιοσυχνότητα του ποδιού. Το ιδανικό αυτό μήκος βρίσκεται ως συνάρτηση της θέσης και της μάζας του αντίβαρου.
3. Η θέση του αντίβαρου από τη στροφική άρθρωση επίσης μεγιστοποιεί την ιδιοσυχνότητα για συγκεκριμένη τιμή που εξαρτάται από το μέγεθος της μάζας του αντίβαρου.
4. Η μάζα του αντίβαρου επηρεάζει θετικά την ιδιοσυχνότητα εφόσον τοποθετείται πάντα στη βέλτιστη θέση. Ο περιορισμός εδώ προκύπτει από πρακτικούς λόγους όπως π.χ. ότι ένα μεγάλο αντίβαρο θα αυξάνει σημαντικά την ροπή αδράνειας στη φάση εδάφους και θα απαιτείται για βέλτιστη τοποθέτηση κάποια απόσταση της τάξης των χιλιοστών από τη στροφική άρθρωση.
5. Όσο μεγαλύτερη αδράνεια αντίβαρου, τόσο χαμηλότερη η ιδιοσυχνότητα.
6. Όσο μεγαλώνει η μάζα στην άκρη του ποδιού, τόσο τείνει στην ιδιοσυχνότητα απλού εκκρεμούς συγκεντρωμένης μάζας σε απόσταση l_0 με τιμή l_0/g.

2.3.14 Βέλτιστη ιδιοσυχνότητα συναρτήσει πρόσθιας ταχύτητας

Σκοπός μας είναι όπως είπαμε και πρωτύτερα να προσδιορίσουμε την βέλτιστη ιδιοσυχνότητα για το πόδι και στη συνέχεια με έναν από τους τρόπους που αναλύθηκαν στα Κεφ. 2.3.3-2.3.8 να την προσεγγίσουμε πειραματικά.

Πρώτο βήμα στην κατεύθυνση αυτή είναι να συνδέσουμε την ιδιοσυχνότητα του ποδιού με την επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα του μονόποδου ρομπότ. Στην Εικόνα 2-17 φαίνεται ένας πλήρης βηματισμός του μονόποδου συστήματος και με κάποιες παραδοχές, όπως θα εξηγήσουμε στη συνέχεια, προκύπτουν απλοποιημένες συναρτήσεις της πρόσθιας ταχύτητας βάσει της γωνιακής ταχύτητας του ποδιού και αντιστρόφως.

Οι τροχιές με μικρές τελείες αποτελούν τις ρεαλιστικές τροχιές που ακολουθεί το κέντρο μάζας του κορμού του ρομπότ και το άκρο του ποδιού, ενώ με διακεκομμένες είναι οι τροχιές που θα αναλύσουμε για να πάρουμε μια προσεγγιστική συνάρτηση της ιδιοσυχνότητας του ποδιού βάσει της πρόσθιας ταχύτητας. Οι δείκτες αναφέρονται στην πρόσπτωση td (touch down), στην απογείωση lo (lift off), στη φάση εδάφους st (stance) και στην εναέρια φάση a (aerial).



Εικόνα 2-17. Ένας πλήρης βηματισμός του μονόποδου συστήματος και μεταβλητές πρόσθιας ταχύτητας και γωνιακής ταχύτητας του ποδιού.

Παρατηρούμε ότι στη φάση εδάφους, αν προσεγγίσουμε την κίνηση με το μοντέλο του ανεστραμμένου εκκρεμούς, το κέντρο μάζας του κορμού διαγράφει τόξο a. Η χορδή x^{lo-td} του τόξου a υπολογίζεται βάσει τριγωνομετρίας ως εξής:

$$x^{lo-td} \approx l \cdot \mathrm{crd}\left(y^{lo-td}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{y^{lo-td}}{2}\right) \cdot l \qquad (2\text{-}69)$$

Η πρόσθια ταχύτητα σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να υπολογιστεί ως η παράγωγος του μήκους x^{lo-td} ως προς το χρόνο, θεωρώντας το l σταθερό, ως εξής:

$$\dot{x}_{st} \approx \dot{y}_{st} \cdot \cos\left(\frac{y^{lo-td}}{2}\right) \cdot l \qquad (2\text{-}70)$$

Έχοντας υπόψιν ότι η κίνηση του ποδιού είναι συμμετρική ως προς την κατακόρυφο (κάθετη διακεκομμένη) στην μόνιμη κατάσταση και ότι η γωνία πρόσπτωσης σπάνια ξεπερνά τις 14°, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο όρος του συνημιτόνου είναι ουσιαστικά μονάδα:

$$1 \geq \cos\left(\frac{y^{lo-td} \leq 28^{\circ}}{2}\right) \geq 0.97 \qquad (2\text{-}71)$$

Για την φάση εδάφους προκύπτει λοιπόν η απλοποιημένη σχέση:

$$\dot{\gamma}_{st} \approx \frac{\dot{x}_{st}}{l} \tag{2-72}$$

Δίνοντας στην Εξ. 2-72 τιμή για τη επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα, υπολογίζουμε την γωνιακή ταχύτητα με την οποία θα πρέπει να περιστραφεί το πόδι γύρω από την ιδανική άρθρωση με το έδαφος.

Στο σημείο αυτό θα διατυπώσουμε τη συσχέτιση της γωνιακής ταχύτητας της άρθρωσης με την γωνιακή ιδιοσυχνότητα του ποδιού. Πρόκειται για δυο διαφορετικούς όρους που συμπίπτουν μόνο κατά τύχη. Όταν για παράδειγμα το πόδι αφήνεται από τις 60° από την κατακόρυφο και το γινόμενο της Εξ. 2-74: $\gamma^{td}\ \omega \approx \omega$, επειδή οι 60°≈1rad. Τότε στο χρόνο t της Εξ. 2-75 η γωνιακή ταχύτητα εξισώνεται με την γωνιακή ιδιοσυχνότητα.

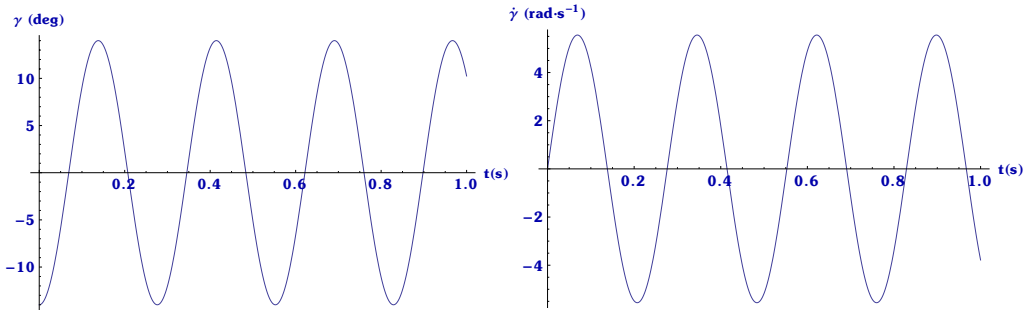
Οι εξισώσεις αυτές προκύπτουν ως εξής. Έχοντας κάνει την παραδοχή των μικρών γωνιών, το πόδι μπορεί να θεωρηθεί ότι διέπεται από την εξίσωση κίνησης του απλού αρμονικού ταλαντωτή της Εξ. 2-34. Θεωρώντας επιπλέον ότι το πόδι αφήνεται ελεύθερο να ταλαντωθεί από γωνία συμμετρική με εκείνη της πρόσπτωσης:

$$\gamma^{lo} = -\gamma^{td} \tag{2-73}$$

η αναλυτική λύση της Εξ. 2-34, δίνει την γωνία και την γωνιακή ταχύτητα συναρτήσει του χρόνου, ως εξής:

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= -\gamma^{td} \cdot \cos(\omega t) \\ \dot{\gamma}(t) &= \gamma^{td} \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \end{aligned} \tag{2-74}$$

Η γραφικές παραστάσεις των Εξ. 2-74 φαίνονται στα διαγράμματα της Εικόνας 2-18. Στις γραφικές έχουμε θεωρήσει ότι το πόδι αφήνεται ελεύθερο από γωνία 14° με μηδενική ταχύτητα και έχει τιμή γωνιακής ιδιοσυχνότητας ω=22.74rad/s.



Εικόνα 2-18. Γωνία και γωνιακή ταχύτητα του ποδιού συναρτήσει του χρόνου.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι το πόδι επιταχυνόμενο από τη βαρύτητα χρειάζεται έναν δεδομένο χρόνο για να αποκτήσει την μέγιστη γωνιακή ταχύτητα που μπορεί να φτάσει βάσει της γωνιακής του ιδιοσυχνότητας και της γωνίας απ' την οποία αφέθηκε ελεύθερο.

Στο ρομπότ είναι δεδομένη η μέγιστη γωνία που αφήνεται ελεύθερο το πόδι και είναι περίπου η τιμή που επιλέχθηκε και για τις γραφικές παραστάσεις, η γωνία των 14°. Επομένως

υπάρχει πολύ λίγος χρόνος διαθέσιμος για να επιταχυνθεί μέχρι τη μέγιστη γωνιακή του ταχύτητα που εμφανίζεται στην κατακόρυφο, δηλ. για $\gamma=0^{o}$ και χρόνο t* που υπολογίζεται από την Εξ. 2-74 για ημίτονο ίσο με τη μονάδα, ως εξής:

$$\dot{\gamma}(t^*) = \gamma^{td} \cdot \omega \cdot \cancel{\sin(\omega t^*)}^{1} \Rightarrow$$
$$\omega t^* = \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow t^* = \frac{\pi}{2\omega} \tag{2-75}$$

Αντικαθιστώντας λοιπόν στην Εξ. 2-72 τις εξισώσεις 2-74 και 2-75, προκύπτει το ζητούμενο, δηλαδή η γωνιακή ιδιοσυχνότητα του ποδιού συναρτήσει της πρόσθιας ταχύτητας του ρομπότ, ως εξής:

$$\gamma^{td} \cdot \omega = \frac{\dot{x}_{st}}{l} \Leftrightarrow$$
$$\omega = \frac{\dot{x}_{st}}{l \cdot \gamma^{td}} \tag{2-76}$$

Αντίστοιχα η ιδιοσυχνότητα προκύπτει ως εξής:

$$f = \frac{\dot{x}_{st}}{2\pi \cdot l \cdot \gamma^{td}} \tag{2-77}$$

Εάν θέλουμε για παράδειγμα την γωνιακή ιδιοσυχνότητα του ποδιού για ταχύτητα πρόωσης 1.5m/s, ύψος ποδιού 27cm και γωνία πρόσπτωσης-απογείωσης 14°, η γωνιακή ιδιοσυχνότητα και η ιδιοσυχνότητα του ποδιού προκύπτουν ίσες με εκείνες των παραπάνω γραφικών παραστάσεων:

$$\omega = 22.74 \frac{rad}{s}$$
$$f = 3.62Hz \tag{2-78}$$

Στην εναέρια φάση η ταχύτητα του άκρου του ποδιού υπολογίζεται με παρόμοιο τρόπο:

$$\dot{x}_t \approx \dot{x}_a + \dot{\gamma}_a \cdot \cos\left(\frac{\gamma^{td-lo}}{2}\right) \cdot l \tag{2-79}$$

όπου εκτός από την απλοποίηση ότι το άκρο του ποδιού κινείται πάνω σε τόξο, έχουμε θεωρήσει ακόμη ότι οι αντιδράσεις στον γοφό κατά την επενέργηση του ποδιού δεν επηρεάζουν έντονα την πρόσθια ταχύτητα του κορμού.

Εδώ παρατηρούμε πως αν θεωρήσουμε ότι η πρόσθια ταχύτητα παραμένει σταθερή από την απογείωση έως την επόμενη πρόσπτωση στο έδαφος και ότι το πόδι περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα όπως και στην φάση εδάφους, Εξ. 2-72, τότε το άκρο του ποδιού έχει διπλάσια ταχύτητα απ' τον κορμό του ρομπότ:

$$\dot{x}_t \approx 2\dot{x}_{st} \tag{2-80}$$

Το ερώτημα που τίθεται εδώ είναι ποια ταχύτητα είναι επαρκής για το πόδι ώστε να προλάβει να τοποθετηθεί στη σωστή γωνία πρόσπτωσης χωρίς να σκοντάψει στο έδαφος. Επειδή όμως η απάντηση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το ύψος αναπήδησης και η μεταβατική ή μόνιμη κατάσταση του ρομπότ, θα χρησιμοποιήσουμε αποτελέσματα προσομοιώσεων από επόμενο κεφάλαιο ώστε να δώσουμε μια κατεύθυνση.

Όπως βλέπουμε από τις προσομοιώσεις (Εικόνα 3-21) και από την μαγνητοσκοπημένη κίνηση του πραγματικού μονόποδου ρομπότ, το πόδι κινείται γενικά στην κατεύθυνση της γωνιάς πρόσπτωσης, δηλαδή στα θετικά όπως ορίζουμε στην Εικόνα 2-27, πιο γρήγορα απ' ότι όταν σπρώχνει κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους. Το αποτέλεσμα είναι λογικό, εφόσον εκτελείται έλεγχος θέσης με κοφτά χτυπήματα (bang - bang) για την γωνία πρόσπτωσης και φυσικά στην εναέρια φάση δεν επιταχύνεται η αδράνεια του κορμού. Επομένως η ταχύτητα τοποθέτησης είναι καθαρά συνάρτηση της αδράνειας του ποδιού και των φυσικών περιορισμών του κινητήρα.

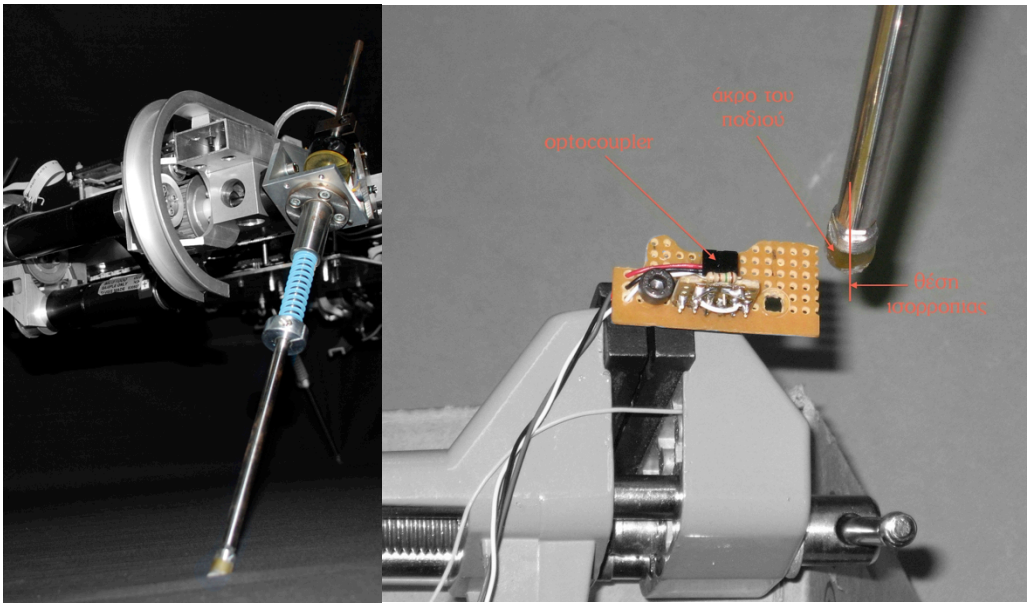
Παρατηρούμε επίσης ότι η συχνότητα και το μήκος του διασκελισμού αυξάνονται για υψηλότερες ταχύτητες και στη μόνιμη κατάσταση οι γωνιακές ταχύτητες φάσης εδάφους και εναέριας φάσης του ποδιού έρχονται πιο κοντά. Τέλος παρατηρούμε ότι με αυτή την κατά κάτι μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα στεην εναέρια φάση το πόδι μένει για αρκετά μεγάλο διάστημα σταθερό στην γωνία πρόσπτωσης πριν φτάσει στο έδαφος (Εικόνα 3-11).

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι εκτιμώντας μια τιμή της γωνιακής ταχύτητας του ποδιού σταθερή για την εναέρια φάση και την φάση εδάφους και ίση με την Εξ. 2-72, μπορούμε να υπολογίσουμε με μια καλή προσέγγιση την βέλτιστη ιδιοσυχνότητα του ποδιού από την Εξ. 2-77.

2.3.15 Πειραματική μέτρηση ιδιοσυχνότητας

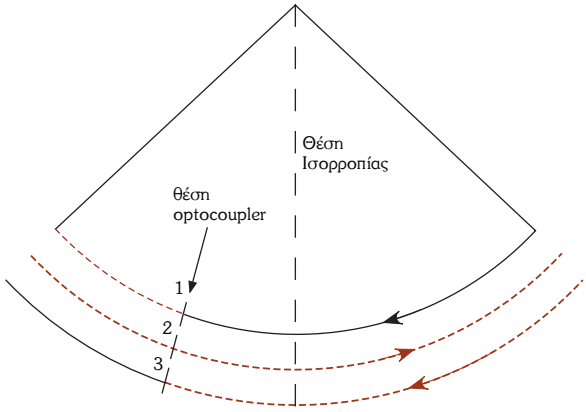
Στα πλαίσια της παραπάνω μελέτης θεωρήθηκε σκόπιμο να πραγματοποιήσουμε πειραματική μέτρηση της ιδιοσυχνότητας του ποδιού του τετράποδου ρομπότ, στο οποίο και θα εφαρμοστεί η όποια βελτίωση κριθεί δυνατή. Για το σκοπό αυτό αποσυνδέθηκε ο κινητήρας από το πόδι, αφαιρώντας την τροχαλία και τον ιμάντα μετάδοσης κίνησης από τον στροφικό άξονα του ποδιού. Στα αριστερά της Εικόνας 2-19 διακρίνεται το μπροστά αριστερό πόδι του τετράποδου ρομπότ, πλήρως συναρμολογημένο. Στα δεξιά της ίδιας εικόνας, το τετράποδο ρομπότ το έχουμε ανυψώσει και έχουμε αποσυνδέσει τον κινητήρα για να μετρήσουμε την περίοδο ταλάντωσής του όπως περιγράφουμε στη συνέχεια.

Η μέτρηση έγινε με χρήση ενός αισθητήρα οπτικής σύζευξης (optocoupler) που τοποθετήθηκε κοντά στο άκρο του ποδιού όπως δείχνει η Εικόνα 2-19. Τα δεδομένα του αισθητήρα συλλέγονται σε παλμογράφο όπως δείχνει η Εικόνα 2-21, στην οθόνη του οποίου



Εικόνα 2-19. Μέτρηση ιδιοσυχνότητας ποδιού με χρήση αισθητήρα οπτικής σύζευξης (optocoupler)

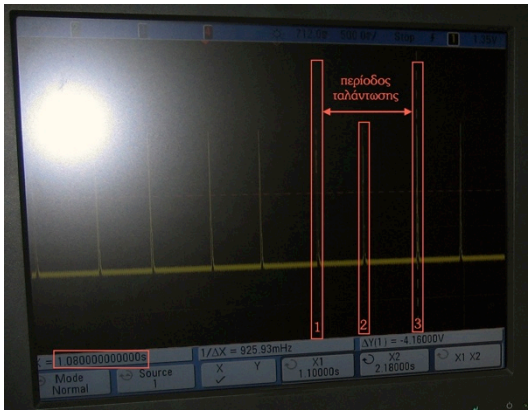
με χειροκίνητους δείκτες μετράμε τη χρονική διάρκεια μεταξύ τριών περασμάτων του ποδιού μπροστά από τον αισθητήρα. Κάθε πέρασμα του ποδιού αντιστοιχεί σε μια ακμή στην οθόνη του παλμογράφου. Χρειαζόμαστε τρία περάσματα του ποδιού διότι όπως δείχνει και η Εικόνα 2-20 τότε ολοκληρώνεται μια πλήρης ταλάντωση.



Εικόνα 2-20. Διαδρομή του ποδιού μπροστά από τον αισθητήρα οπτικής σύζευξης

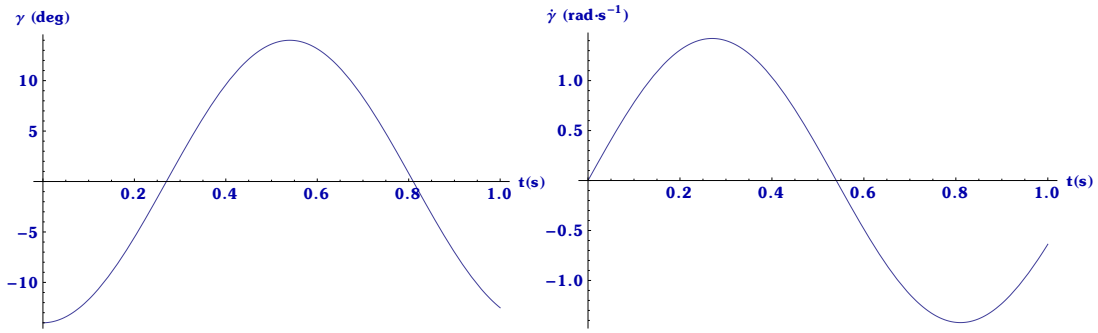
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, όπως προκύπτουν από την οθόνη του παλμογράφου στην Εικόνα 2-21, έχουν ως εξής:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = 1.08s$$
$$f = 0.926Hz \qquad (2\text{-}81)$$
$$\omega = 5.818\frac{rad}{s}$$



Εικόνα 2-21. Τα δεδομένα από τον αισθητήρα οπτικής σύζευξης στην οθόνη του παλμογράφου

Επισημαίνουμε ότι η ιδιοσυχνότητα αυτή είναι η «damped frequency» (συμπεριλαμβάνει δηλαδή τις ιξώδεις τριβές των εδράνων κύλισης στα οποία στηρίζεται το πόδι). Με βάση της γωνιακή ιδιοσυχνότητα του ποδιού και αφήνοντας το πόδι ελεύθερο από γωνία 14° προκύπτουν υπολογιστικά οι γραφικές παραστάσεις για την γωνία και την γωνιακή ταχύτητα του ποδιού συναρτήσει του χρόνου, όπως φαίνεται στα διαγράμματα της Εικόνας 2-22. Παρατηρούμε το ζήτημα που έχουμε επισημάνει και στο Κεφ. 2.3.14 που έχει να κάνει με τη συσχέτιση της γωνιακής ιδιοσυχνότητας με την γωνιακή ταχύτητα και κατ' επέκταση με την πρόσθια ταχύτητα του ρομπότ. Καταρχήν συγκρίνοντας τα διαγράμματα των Εικόνων 2-18 και 2-22 βλέπουμε ποιοτικά πόσο απέχει η επιθυμητή απόκριση από την πραγματική αντίστοιχα. Στην επιθυμητή κατάσταση μέσα σε ένα δευτερόλεπτο το πόδι ολοκληρώνει 3 ταλαντώσεις και φθάνει μέγιστη γωνιακή ταχύτητα 5.56 rad/s, ενώ στην πραγματικότητα ολοκληρώνει 1 ταλάντωση και φθάνει τα 1.42 rad/s. Παρατηρούμε λοιπόν ότι αφήνοντας το πόδι από την γωνία των 14° δεν προλαβαίνει να αναπτύξει υψηλή γωνιακή ταχύτητα, μόλις 1.42 rad/s, ενώ έχει μια κατά πολύ υψηλότερη γωνιακή ιδιοσυχνότητα όπως φαίνεται από την Εξ. 2-81.



Εικόνα 2-22. Γωνία και γωνιακή ταχύτητα του πραγματικού ποδιού του τετράποδου ρομπότ συναρτήσει του χρόνου.

Αποδεικνύεται από μετρήσεις, όπως θα δείξουμε παρακάτω, ότι οι τριβές είναι αμελητέες και ότι η γωνιακή ιδιοσυχνότητα ω_o του ελεύθερου (αμείωτου πλάτους) ταλαντωτή ουσιαστικά ταυτίζεται με την γωνιακή ιδιοσυχνότητα ω του ελεύθερου αποσβενόμενου ταλαντωτή. Οι εξισώσεις που συνδέουν την ω_o με την ω έχουν ως εξής:

$$\omega_o^2 = \frac{\omega^2}{1 - \frac{1}{4Q^2}} \tag{2-82}$$

όπου:

$$Q = \frac{\omega_o}{\gamma}, \gamma = \frac{b}{m} \tag{2-83}$$

και b είναι ο συντελεστής ιξώδους τριβής, m η μάζα του εκκρεμούς και Q ο συντελεστής ποιότητας του ταλαντωτή. Όσο υψηλότερος, τόσο μικρότερες τριβές. Από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης ελεύθερου αποσβενόμενου ταλαντωτή με ιξώδη τριβή, προκύπτει η θέση του συναρτήσει του χρόνου ως εξής [29]:

$$\begin{gathered} \ddot{x} + \gamma \cdot \dot{x} + \omega_o^2 \cdot x = 0 \\ x = A \cdot e^{-\frac{\gamma}{2}t} \cos\left(\omega \cdot t + \alpha\right) \end{gathered} \tag{2-84}$$

όπου A το αρχικό πλάτος και α η γωνία φάσης. Επειδή είναι ευκολότερο να μετρήσουμε το μειούμενο πλάτος της ταλάντωσης απ' ότι να μετρήσουμε το χρόνο, θεωρούμε τις εξής απλοποιήσεις:

$$\left.\begin{gathered} A(N) = A \cdot e^{-\frac{\gamma}{2}t} \\ t = N \cdot T \approx N \cdot T_o \approx N \cdot \frac{2\pi}{\omega_o} \end{gathered}\right\} \Rightarrow A(N) = A \cdot e^{-\frac{N\pi}{Q}} \tag{2-85}$$

όπου N ο αριθμός των πληρών ταλαντώσεων. Από την Εξ. 2-85 γίνεται φανερό πως αν μετρήσουμε τον αριθμό των ταλαντώσεων για μείωση του πλάτους ταλάντωσης ίσο με τον λόγο e, τότε ξέρουμε ότι ο εκθέτης στην παραπάνω εξίσωση έχει γίνει -1 και άρα:

$$Q = N \cdot \pi \tag{2-86}$$

Γενικά αν το Q είναι μεγαλύτερο του 10 θεωρούνται αμελητέες οι τριβές. Στο πείραμά μας εκτρέψαμε κατά 19cm το άκρο του ποδιού και το πλάτος ταλάντωσης μειώθηκε στα 19/2.7≈7cm μετά από N=14 ταλαντώσεις, άρα:

$$Q \approx 44 \tag{2-87}$$

Μπορούμε να είμαστε βέβαιοι λοιπόν ότι η μείωση της ιδιοσυχνότητας του ποδιού λόγω των τριβών των εδράνων κύλισης, είναι ουσιαστικά αμελητέα. Επίσης, βάσει της Εξ. 2-76 μπορούμε να υπολογίσουμε την πρόσθια ταχύτητα του ρομπότ για την οποία ευνοείται η υπάρχουσα κατασκευή:

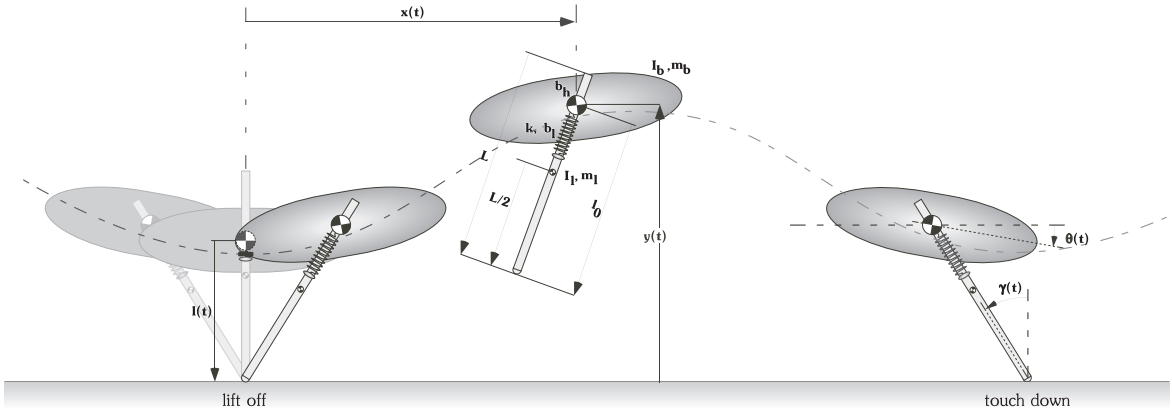
$$\dot{x} = \omega \cdot l \cdot \gamma^{td} = 5.82\frac{rad}{s} \cdot 0.27m \cdot 14^\circ \frac{\pi}{180^\circ} = 0.38\frac{m}{s} \tag{2-88}$$

Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό αυτό δεν έχει ληφθεί υπόψιν η αδράνεια του δρομέα του κινητήρα και των λοιπών εμπλεκομένων μερών, όπως οι τροχαλίες και ο ιμάντας μετάδοσης κίνησης.

2.4 *Δυναμική ανάλυση μονόποδου με μάζα ποδιού*

Στο κεφάλαιο αυτό θα διατυπώσουμε τις δυναμικές εξισώσεις του μονόποδου ρομποτικού συστήματος λαμβάνοντας υπόψιν την υλοποιημένη έκδοση του ποδιού. Συνυπολογίζεται η επίδραση της μάζας και της αδράνειας του ποδιού, ενώ λαμβάνεται επιπλέον υπόψιν η αλλαγή του σημείου της στροφικής άρθρωσης καθώς το ελατήριο συμπιέζεται κατά την φάση εδάφους (Εικόνα 2-23).

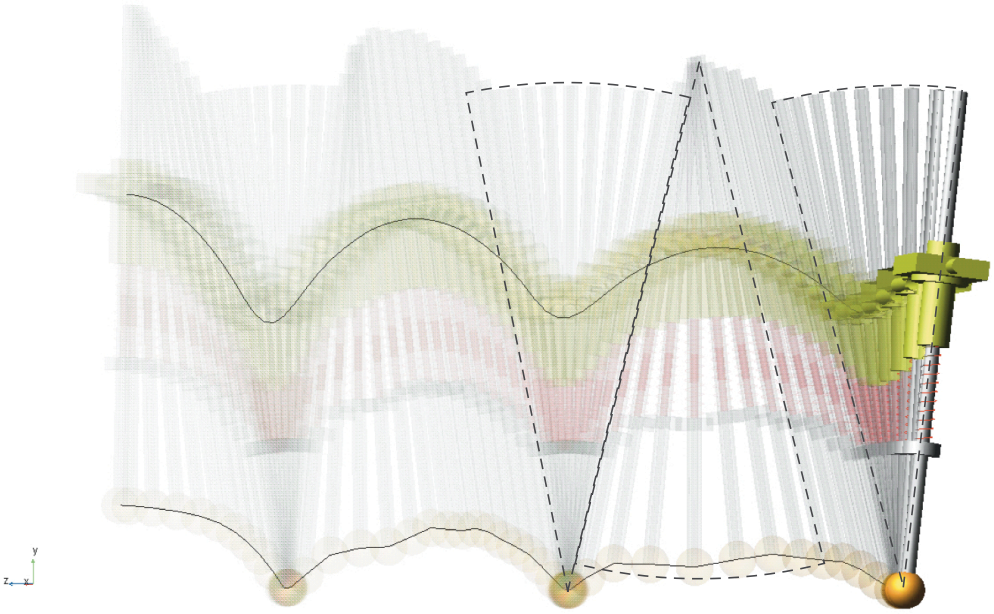
Αντίθετα με το μοντέλο του μονόποδου ρομπότ χωρίς μάζα στο πόδι, εδώ τα διακριτά σημεία του κέντρου μάζας κορμού και ποδιού, έχουν πιο σύνθετες εξισώσεις κατά την εναέρια φάση. Η τροχιά τους επηρεάζεται άμεσα από την άσκηση ροπής του κινητήρα. Σχηματικά μπορούμε να πούμε ότι το συνολικό κέντρο μάζας του συστήματος βρίσκεται σε βαλλιστική τροχιά με τα κέντρα μάζας του ποδιού και του κορμού να περιστρέφονται γύρω από την σταθερή αυτή τροχιά. Η σχετική τους κίνηση βρίσκεται σε αναλογία με τη ροπή που ασκεί ο κινητήρας στην προσπάθειά του να φέρει το πόδι στη γωνία πρόσπτωσης.



Εικόνα 2-23. Ένας πλήρης επαναληπτικός κύκλος της εναλλαγής καταστάσεων του συστήματος.

Το σύστημα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-23 περνά από δυο διαδοχικές επαναληπτικές φάσεις, την εναέρια και τη φάση εδάφους. Κατά τη φάση εδάφους, οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος είναι τρεις: κατά x(t), y(t) και θ(t), βλ. Εικόνα 2-23. Οι δυο πρώτοι επαρκούν για την θέση του κέντρου μάζας του κορμού, ενώ η γωνία θ(t) προσδιορίζει την πρόνευση του κορμού.

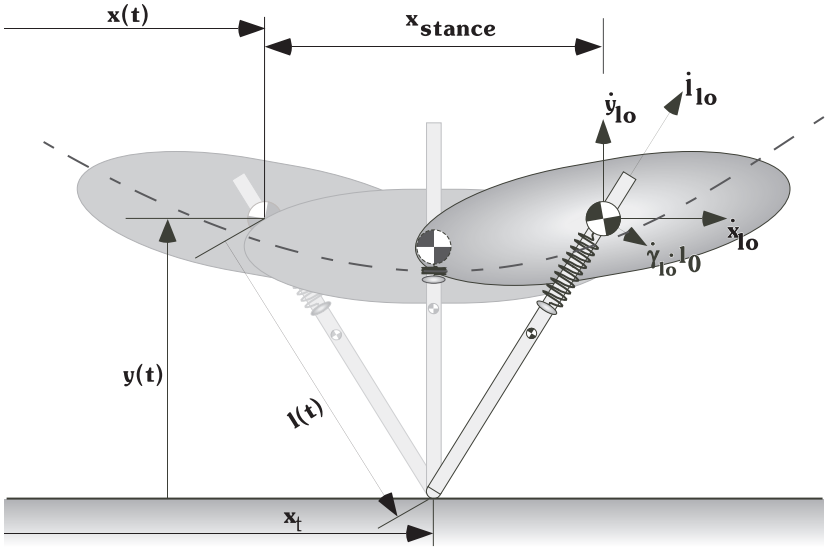
Όσο για τη γωνία γ(t) και το μήκος l(t) του ποδιού, στο έδαφος αποτελούν εξαρτημένες μεταβλητές των συντεταγμένων x(t) και y(t) του κέντρου μάζας του κορμού του ρομπότ. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει κατά την εναέρια φάση, στην οποία χρειαζόμαστε τέσσερις γενικευμένες μεταβλητές για να περιγράψουμε πλήρως το σύστημα: x(t), y(t), γ(t) και θ(t), ενώ το μήκος του ποδιού θεωρείται σταθερό και ίσο με l_0 στη διάρκεια της εναέριας φάσης, βλ. Εικόνα 2-28.



Εικόνα 2-24. Εναλλαγή καταστάσεων και τροχιά του κορμού και του άκρου του ποδιού όπως προκύπτει από προσομοίωση στο ADAMS: η τροχιά δεν είναι ακριβώς επαναληπτική γιατί το σύστημα μπαίνει σε μόνιμη κατάσταση περίπου απ' το τρίτο βήμα και μετά.

2.4.1 Φάση Εδάφους

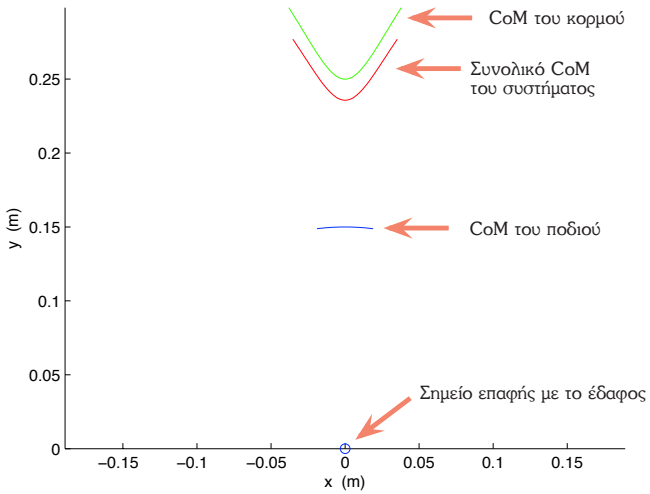
Στην Εικόνα 2-25 φαίνονται οι συμμετρικές διαδοχικές θέσεις που καταλαμβάνει το ρομπότ κατά τη φάση εδάφους, όταν έχει σταθεροποιηθεί η απόκρισή του και συντηρεί μια απαιτητική ταχύτητα πρόωσης. Η διακεκομμένη γραμμή διαγράφει την τροχιά του συνολικού κέντρου μάζας.



Εικόνα 2-25. Διαδοχικές θέσεις και μεταβλητές κατάστασης κατά την φάση εδάφους του συστήματος.

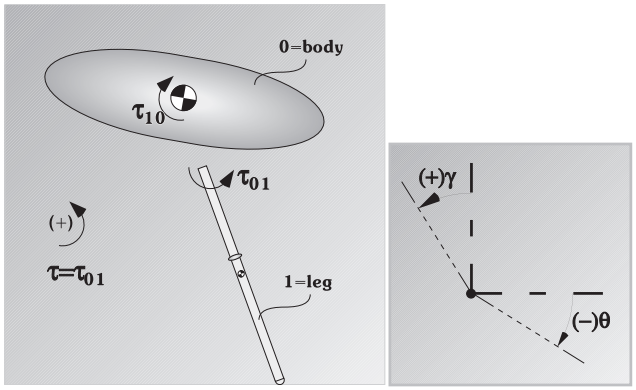
Ο κορμός του ρομπότ κατά τη φάση εδάφους διαγραφεί τροχιά ενός SLIP, ενώ το κέντρο μάζας του ποδιού ενός απλώς αντεστραμμένου εκκρεμούς. Το κέντρο μάζας του συστήματος, επηρεάζεται και από τις δυο αυτές τροχιές ανάλογα με τις μάζες των δυο σωμάτων.

Θεωρώντας μια τάξη μικρότερη τη μάζα του ποδιού, το συνολικό κέντρο μάζας του συστήματος διαγράφει μια τροχιά σχεδόν πανομοιότυπη με αυτή του κορμού. Πιο λεπτομερώς, η τροχιά αυτή είναι μετατοπισμένη προς τα κάτω και ελαφρώς ανοιγμένη σε σχέση με αυτή του κορμού, λόγω της αντίθετης καμπυλότητας που έχει η τροχιά του κέντρου μάζας του ποδιού (Εικόνα 2-26).



Εικόνα 2-26. Τροχιές των κέντρων μάζας του κορμού, του ποδιού και του συνολικού του συστήματος κατά τη φάση εδάφους.

Καταστρώνοντας τις δυναμικές εξισώσεις έχουμε την επιλογή να χρησιμοποιήσουμε τις συντεταγμένες του κορμού ή μεταβλητές που προκύπτουν απ' την κινηματική ανάλυση του συστήματος. Οι εξισώσεις που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές με βάση την κινηματική ανάλυση είναι πολύ απλούστερες, κάτι που δεν μας εκπλήσσει διότι οι μεταβλητές αυτές περιγράφουν τη σχετική θέση των σωμάτων του συστήματος. Σε αντίθεση με τις συντεταγμένες του κορμού x(t) & y(t) που περιγράφουν τις θέσεις των σωμάτων ως προς ένα αδρανειακό σύστημα.



Εικόνα 2-27. Συμβάσεις προσήμων γωνιών και ροπών.

Ως γενικευμένες μεταβλητές επιλέγουμε λοιπόν την γωνία του ποδιού με την κατακόρυφο γ(t), την απόσταση του κέντρου μάζας του κορμού από την άκρη του ποδιού που αλλάζει ανάλογα με τη συμπίεση του ελατηρίου l(t) και τέλος τη γωνία πρόνευσης του σώματος θ(t). Στη συνέχεια αντικαθιστούμε τα γ(t) και l(t) συναρτήσει των x(t), y(t).

Η συνάρτηση Lagrange δίνεται ως η διαφορά της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας, Εξ. 2-1, που έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}\left[(m_b + \frac{m_l}{4})l^2 + I_l\right]\dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2}\left(m_b + m_l\right)\dot{l}^2 + \frac{1}{2}I_b\dot{\theta}^2 \\ V &= \frac{1}{2}k\left(l_0 - l\right)^2 + \left(m_b + \frac{m_l}{2}\right)g \cdot l \cdot \cos\gamma \end{aligned} \tag{2-89}$$

Για το παραπάνω μονόποδο ρομπότ, σκέδαση ισχύος γίνεται λόγω ιξώδους τριβής στο ελατήριο και στην άρθρωση του γοφού (hip):

$$P_D = \frac{1}{2}\left[b_h\left(\dot{\gamma} - \dot{\theta}\right)^2 + b_l\dot{l}^2\right] \tag{2-90}$$

Η συνάρτηση που εκφράζει την ισχύ της ροπής του επενεργητή είναι:

$$P_F = \left(\dot{\gamma} - \dot{\theta}\right)\tau \tag{2-91}$$

Η δυναμική του συστήματος προκύπτει εφαρμόζοντας τις εξισώσεις Euler-Lagrange Εξ. 2-4, δίνοντας τρεις εξισώσεις κινήσεις, όσες και οι γενικευμένες μεταβλητές που επιλέξαμε:

$$\left[m_b l^2 + m_l\left(\frac{L}{2}\right)^2 + I_l\right]\ddot{\gamma} + 2m_b l \cdot \dot{l} \cdot \dot{\gamma} - g\sin\gamma\left(m_b \cdot l + m_l\frac{L}{2}\right) + b_h(\dot{\gamma} - \dot{\theta}) = \tau \tag{2-92}$$

$$m_b\ddot{l} - m_b l\dot{\gamma}^2 + k\left(l - l_0\right) + m_b g\cos\gamma + b_l \cdot \dot{l} = 0 \tag{2-93}$$

$$I_b\ddot{\theta} - b_h\left(\dot{\gamma} - \dot{\theta}\right) = -\tau \tag{2-94}$$

Γράφοντας τις εξισώσεις (2-92) έως (2-94) σε μητρωϊκή μορφή σύμφωνα με την Εξ. 2-5, η δυναμική του συστήματος παίρνει την παρακάτω μορφή για τη φάση εδάφους:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_b l^2 + m_l\left(\frac{L}{2}\right)^2 + I_l & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & I_b \end{bmatrix} \tag{2-95a}$$

$$\ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{\gamma} \\ \ddot{l} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$V(q,\dot{q}) = \begin{bmatrix} 2m_b l \cdot \dot{l} \cdot \dot{\gamma} \\ -m_b l \dot{\gamma}^2 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2-95β}$$

$$F_b(\dot{q}) = \begin{bmatrix} b_h(\dot{\gamma} - \dot{\theta}) \\ b_l \cdot \dot{l} \\ b_h(\dot{\theta} - \dot{\gamma}) \end{bmatrix}$$

$$F_k(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ k(l - l_0) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} -g \sin\gamma \left(m_b \cdot l + m_l \frac{L}{2} \right) \\ m_b g \cos\gamma \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2-95γ}$$

$$D(q) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

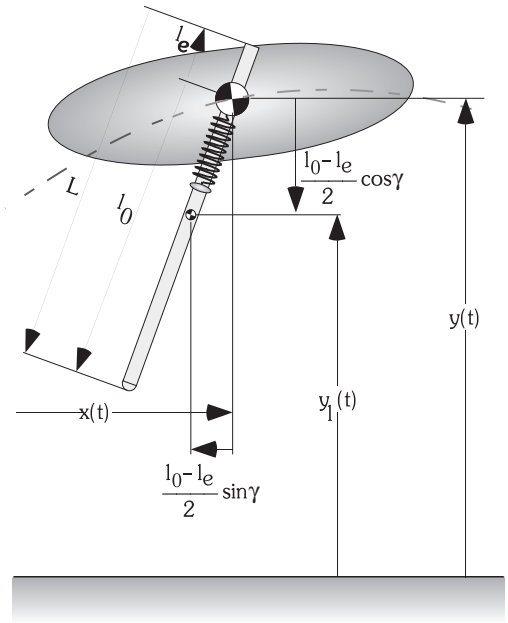
Για το μετασχηματισμό των παραπάνω εξισώσεων στις συντεταγμένες του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων, υπολογίζουμε τις επιταχύνσεις της γωνίας γ και της μετατόπισης l από τις εξισώσεις (2-92) και (2-93) και στη συνέχεια παραγωγίζουμε ως προς το χρόνο τις κινηματικές εξισώσεις:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_t - l(t)\sin(\gamma(t)) \\ y(t) &= l(t)\cos(\gamma(t)) \end{aligned} \tag{2-96}$$

Αντικαθιστώντας στις παραγώγους των παραπάνω σχέσεων τις επιταχύνσεις των γ και l, βρίσκουμε τις επιταχύνσεις του κέντρου μάζας του σώματος κατά x και y.

2.4.2 Εναέρια φάση

Στην Εικόνα 2-28 το σύστημα βρίσκεται σε ένα τυχαίο σημείο της εναέριας φάσης και φαίνονται τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον πλήρη ορισμό της θέσης του.



Εικόνα 2-28. Εναέρια φάση και μεταβλητές κατάστασης του συστήματος.

Η συνάρτηση Lagrange ως η διαφορά της κινητικής και δυναμικής ενέργειας Εξ. 2-1:

$$T = \frac{1}{2}m_b\left(\dot{x}^2+\dot{y}^2\right)+\frac{1}{2}I_b\dot{\theta}^2+\frac{1}{2}I_l\dot{\gamma}^2+\frac{1}{2}m_l\left(\dot{x}_l^2+\dot{y}_l^2\right)$$
$$V = m_b\cdot g\cdot y + m_l\cdot g\cdot y_l \tag{2-97}$$

Βλέπουμε από τις Εξ. 2-97 ότι η ταχύτητα του κέντρου μάζας του ποδιού πρέπει να είναι γνωστή για να υπολογιστούν οι εξισώσεις κίνησης του συστήματος. Γνωρίζουμε όμως ότι υπάρχουν κινηματικοί περιορισμοί που προκαθορίζουν το που βρίσκεται το πόδι εφόσον γνωρίζουμε επαρκή μεγέθη για το κέντρο μάζας του κορμού. Η κινηματική ανάλυση δίνει για τη θέση του κέντρου μάζας του ποδιού, όπως δείχνει και η Εικόνα 2-28:

$$x_l = x - \frac{l_0-l_e}{2}\sin\gamma$$
$$y_l = y - \frac{l_0-l_e}{2}\cos\gamma \tag{2-98}$$

Παραγωγίζοντας ως προς το χρόνο τις σχέσεις της Εξ. 2-98 και αντικαθιστώντας στη συνάρτηση Lagrange έχουμε τέσσερις γενικευμένες μεταβλητές, το x(t), y(t), γ(t) και θ(t).

Για το παραπάνω μονόποδο ρομπότ, σκέδαση ισχύος γίνεται λόγω ιξώδους τριβής στην άρθρωση του γοφού μόνον, εφόσον το μήκος ελατηρίου θεωρείται σταθερό στην εναέρια φάση:

$$P_c = \frac{1}{2}b_h\left(\dot{\gamma}-\dot{\theta}\right)^2 \tag{2-99}$$

Η συνάρτηση που εκφράζει την ισχύ της ροπής του επενεργητή είναι:

$$P_f = \left(\dot{\gamma}-\dot{\theta}\right)\tau \tag{2-100}$$

Προκύπτουν τέσσερις εξισώσεις κινήσεις, όσες και οι γενικευμένες μεταβλητές που επιλέξαμε, σε πεπλεγμένη μορφή:

$$\left(m_b + m_l\right)\ddot{x} + m_l\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)\left(\dot{\gamma}^2 \sin\gamma - \ddot{\gamma}\cos\gamma\right) = 0 \tag{2-101}$$

$$\left(m_b + m_l\right)\ddot{y} + (m_b + m_l)g + m_l\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)\left(\dot{\gamma}^2 \cos\gamma + \ddot{\gamma}\sin\gamma\right) = 0 \tag{2-102}$$

$$\begin{gathered}\left(\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)^2 m_l + I_l\right)\ddot{\gamma} + m_l\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)\left(\ddot{y}\sin\gamma - \ddot{x}\cos\gamma\right) + \\ + b_h\left(\dot{\gamma} - \dot{\theta}\right) + m_l g\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)\sin\gamma = \tau\end{gathered} \tag{2-103}$$

$$I_b\ddot{\theta} - b_h\left(\dot{\gamma} - \dot{\theta}\right) = -\tau \tag{2-104}$$

Γράφοντας τις εξισώσεις (2-101) έως (2-104) σε μητρωϊκή μορφή σύμφωνα με την Εξ. 2-5 προκύπτει η δυναμική του συστήματος για την εναέρια φάση ως εξής:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_b + m_l & 0 & -m_l\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)\cos\gamma & 0 \\ 0 & m_b + m_l & m_l\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)\sin\gamma & 0 \\ -m_l\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)\cos\gamma & m_l\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)\sin\gamma & m_l\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)^2 + I_l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_b \end{bmatrix}$$

$$\ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\gamma} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} \tag{2-105α}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} m_l\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)\dot{\gamma}^2 \sin\gamma \\ m_l\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)\dot{\gamma}^2 \cos\gamma \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$F_b(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_h(\dot{\gamma} - \dot{\theta}) \\ -b_h(\dot{\gamma} - \dot{\theta}) \end{bmatrix}$$

$$F_k(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ (m_b + m_l)g \\ m_l g\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)\sin\gamma \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (2\text{-}105\beta)$$

$$D(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

Στο Παράρτημα Ι δίνονται οι εξισώσεις σε μορφή κατάλληλη για την αριθμητική ολοκλήρωση των δυναμικών εξισώσεων σε περιβάλλον MATLAB.

2.4.3 Παρατηρήσεις

Έχοντας τις εξισώσεις κίνησης για την εναέρια φάση μπορούμε να αποκτήσουμε μια αίσθηση της απόκρισης του συστήματος δίνοντας κάποιες τιμές στις μεταβλητές του. Για την εφαρμογή αυτή θα χρησιμοποιήσουμε την αποζευγμένη μορφή της Εξ. 2-103:

$$\left(\frac{m_b \cdot m_l}{m_b + m_l}\left(\frac{l_0 - l_e}{2}\right)^2 + I_l\right)\ddot{\gamma} + b_h(\dot{\gamma} - \dot{\theta}) = \tau \qquad (2\text{-}106)$$

Παρατηρούμε εδώ ότι για να ελαχιστοποιήσουμε την απαιτούμενη ροπή για την περιστροφή του ποδιού και την τοποθέτησή του στη γωνία πρόσπτωσης, αρκεί να ελαχιστοποιήσουμε τον αδρανειακό όρο στα αριστερά της γωνιακής επιτάχυνσης. Θα χρειαστεί να κάνουμε την εξής απλοποίηση: η μάζα του ποδιού παραμένει σταθερή καθώς αυξάνουμε το μήκος l_e , δηλαδή κατά μια έννοια θεωρούμε ότι το πόδι εφελκύεται και αλλάζει το μήκος του και η αδράνειά του αλλά η μάζα του δεν μεταβάλλεται, δηλαδή αραιώνει η πυκνότητά του.

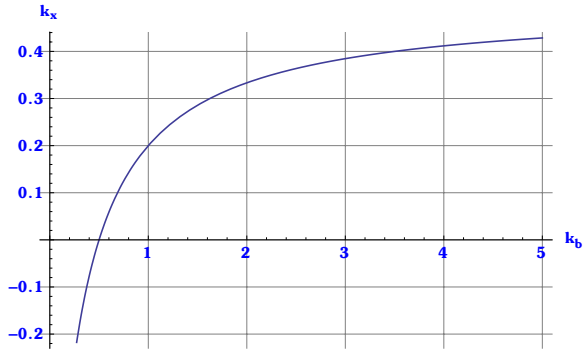
Με την παραδοχή αυτή, όλος ο αδρανειακός όρος παρουσιάζει ελάχιστο σε συγκεκριμένα μήκη προεξοχής από τη στροφική άρθρωση και πάνω που εξαρτώνται από τη σχετική μάζα του κορμού του ρομπότ ως προς το πόδι:

$$m_b = k_b \cdot m_l \tag{2-107}$$

Τα βέλτιστα αυτά l_e δίνονται και αυτά κατ' αναλογία του l_0 όπως έχουμε δει και σε προηγούμενο κεφάλαιο 2.3.13:

$$l_e = k_x \cdot l_0 \tag{2-108}$$

όπου το l_e συμπίπτει με το μήκος που έχουμε θεωρήσει ως x στο κεφάλαιο 2.3.13. Το διάγραμμα που δίνει τα βέλτιστα μήκη προεξοχής σαν συνάρτηση της σχετικής μάζας του κορμού φαίνεται στην Εικόνα 2-29.



Εικόνα 2-29. Βέλτιστα σχετικά μήκη προεξοχής του ποδιού από την στροφική άρθρωση και πάνω, σε συνάρτηση με τη σχετική μάζα του κορμού του ρομπότ.

Παρατηρούμε ότι οι απλοποιημένες εξισώσεις απαντούν πως για μάζα κορμού του ρομπότ ίση με τη μισή του ποδιού, το βέλτιστο είναι να μην προεξέχει καθόλου επιπλέον μήκος ποδιού. Αντίθετα, καθώς η σχετική μάζα του κορμού ξεπερνά κατά πολύ την μάζα του ποδιού, το βέλτιστο προκύπτει για προεξοχή ίση με το μισό μήκος l_0. Η συνάρτηση αυτή μας δίνει μια καλύτερη αίσθηση για το ότι τα δυο σώματα (πόδι και κορμός) στην εναέρια φάση δεν δέχονται εξωτερικές δυνάμεις και αντιδρά το ένα πάνω στο άλλο, ωθούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις και κάνοντας χρήση των παραπάνω τιμών αποφεύγουμε την ανύψωση του κέντρου μάζας του ποδιού σε υψηλότερο δυναμικό. Προτιμά το σύστημα, για να μην ξοδέψει ενέργεια, να έχει μια μεγάλη αδράνεια ποδιού που θα του δώσει την απαραίτητη αντίσταση για να κατεβάσει το κέντρο μάζας του κορμού χαμηλότερα.

Κεφάλαιο 3
Προσομοίωση

Η συνεισφορά της προσομοίωσης έχει συζητηθεί στο Κεφ. 1.1 και όπως θα δούμε στη συνέχεια του κεφαλαίου, φαίνεται στην πράξη να επιβεβαιώνει τη χρησιμότητά της. Με τη βοήθειά της επιβεβαιώνουμε τα θεωρητικά αποτελέσματα που πήραμε από την αναλυτική προσέγγιση του συστήματος. Επίσης αποκτούμε βαθύτερη κατανόηση του φυσικού συστήματος μέσα από τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουμε για να επιτύχουμε σωστή προσομοίωση. Η ύπαρξη, τέλος, ενός εικονικού αντίγραφου του συστήματος μας δίνει την ευχέρεια να κάνουμε ταχύτερη αξιολόγηση εναλλακτικών ποδιών προσεγγίζοντας με ένα επαρκώς σύνθετο μοντέλο την απόκριση του φυσικού συστήματος.

Οι προσομοιώσεις επιτυγχάνονται με τη συνεργασία δυο λογισμικών. Το πρώτο είναι το ADAMS που αποτελεί προϊόν εξειδικευμένο στην δυναμική προσομοίωση συστημάτων. Στο ADAMS εισάγονται τα δομικά στοιχεία του μη γραμμικού συστήματος ως στερεά σώματα και σύνδεσμοι και το λογισμικό φροντίζει για την προσομοίωση της κίνησης, βασισμένο σε μεθόδους αριθμητικής ολοκλήρωσης.

Σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης μας δίνεται η δυνατότητα από το ADAMS να εξάγουμε τις μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν. Έχουμε δηλαδή την δυνατότητα να εισάγουμε όσους αισθητήρες χρειαζόμαστε για να επιτύχουμε έλεγχο της διάταξης. Το ίδιο ισχύει και για τις μεταβλητές που χρησιμοποιούμε ως εισόδους ελέγχου.

Τα δεδομένα αυτά των εξόδων του συστήματος, επεξεργάζονται από το MatLab στο οποίο έχει δημιουργηθεί κατάλληλος ελεγκτής ελέγχου της πρόσθιας ταχύτητας και του ύψους αναπήδησης [45]. Στη συνέχεια, η έξοδος του ελεγκτή που είναι η ροπή του κινητήρα εισάγεται πίσω στην διάταξη του ADAMS για να υπολογιστεί η κατάσταση του συστήματος στο επόμενο βήμα ολοκλήρωσης.

3.1 *Λογισμικό προσομοίωσης ADAMS*

3.1.1 Εισαγωγή στο ADAMS

Το λογισμικό ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) ανήκει στην κατηγορία των προγραμμάτων που προσφέρουν τη δυνατότητα αριθμητικής επίλυσης σύνθετων μη γραμμικών συστημάτων χωρίς την διατύπωση των αναλυτικών μαθηματικών εξισώσεων.

Ο σχεδιασμός του συστήματος γίνεται χρησιμοποιώντας απαραμόρφωτα στερεά σώματα και είδη συνδέσμων από βιβλιοθήκες του λογισμικού. Τα αντικείμενα αυτά επιδέχονται παραμετροποιήσεις και συνδυασμούς τους. Επίσης, είναι δυνατόν να εισαχθούν και αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις για οποιοδήποτε στοιχείο του συστήματος δεν περιγράφεται διαφορετικά, π.χ. ένα μη γραμμικό ελατήριο ή ένας μηχανισμός μετάδοσης με έκκεντρο (cam).

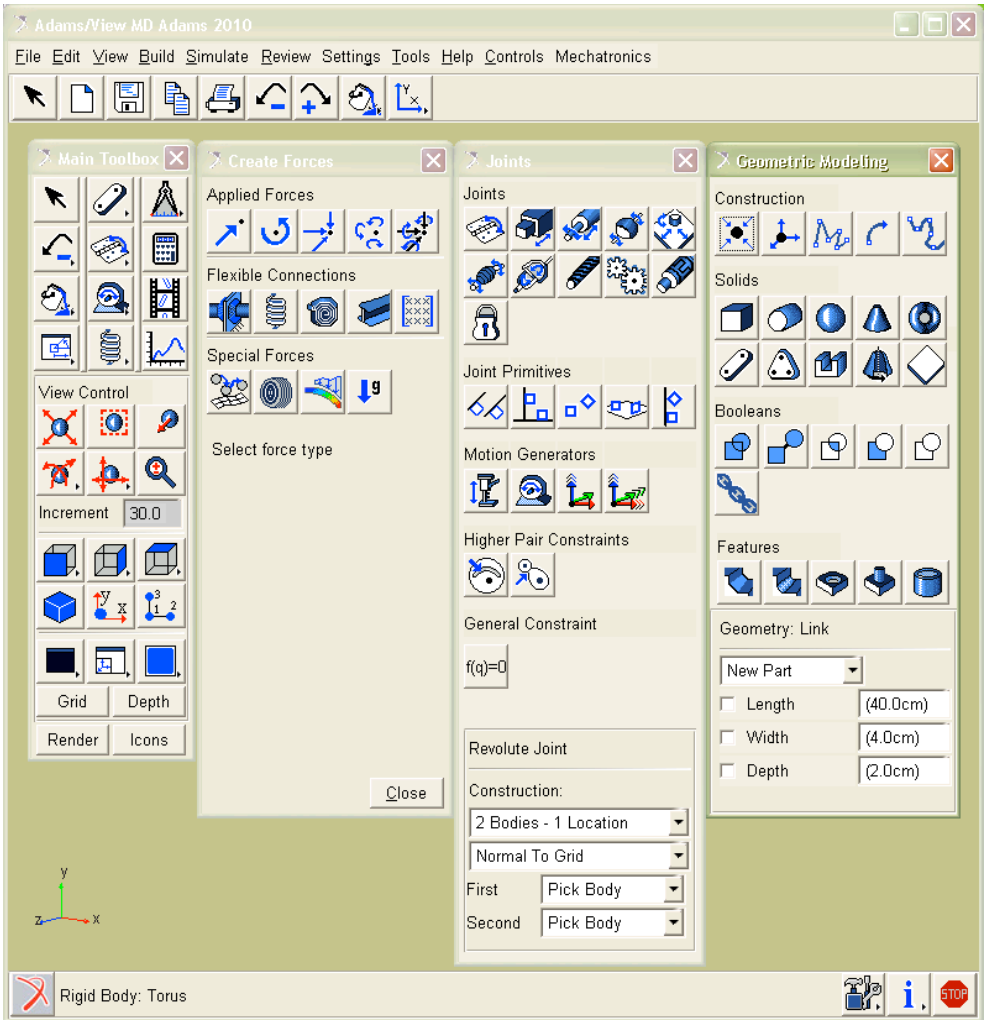
Το λογισμικό δέχεται ακόμη την μετάφραση των απαραμόρφωτων στερεών σωμάτων που έχουν εισαχθεί, σε παραμορφώσιμα. Για να επιτευχθεί η μετάφραση χρειάζεται η εισαγωγή αρχείων που περιέχουν το πλέγμα του στερεού, τα οποία έχουν δημιουργηθεί σε λογισμικό FEA (Finite Element Analysis).

Το μοντέλο που κατασκευάζουμε αποτελείται από ένα σύνολο στερεών σωμάτων. Τα στερεά αυτά σώματα αποτελούνται από απλά γεωμετρικά σχήματα ή και από τομές/αφαίρεση/σύνθεση απλούστερων σχημάτων. Καθορίζοντας λοιπόν τη γεωμετρία του στερεού σώματος και επιλέγοντας κάποια τιμή πυκνότητας (είτε βάσει υλικού, π.χ. τιτάνιο, είτε με απευθείας εισαγωγή μιας τιμής πυκνότητας, π.χ. 1000 kg/m^3) υπολογίζονται αυτόματα από το λογισμικό και βάσει των παραμέτρων αυτών, οι τιμές των μαζών και των ροπών αδράνειάς τους. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο λογισμικό, συνυπολογίζοντας τους περιορισμούς που επιβάλλουν οι αρθρώσεις. Λαμβάνοντας υπόψιν και τις αρχικές συνθήκες και τυχόν εξωτερικές δυνάμεις που έχουν επιβληθεί στο σύστημα, π.χ. βαρύτητα, ροπή ενός κινητήρα κλπ., το λογισμικό υπολογίζει τις εξόδους του που είναι οι θέσεις, ταχύτητες και επιταχύνσεις των σωμάτων. Σε μια απλοποιημένη εκδοχή θα μπορούσαμε να πούμε ότι η είσοδος του λογισμικού είναι το σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα (ΣF) και το μητρώο των μαζών του (m) και υπολογίζονται βάσει της Εξ. 3-1 οι Εξ. 3-2, όπως ακολούθως:

$$\Sigma F = m \cdot \ddot{x} \tag{3-1}$$

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{\Sigma F}{m} \\ \dot{x} &= \dot{x}_0 + \ddot{x} \cdot t \\ x &= x_0 + \dot{x}_0 \cdot t + \frac{1}{2}\ddot{x} \cdot t^2 \end{aligned} \tag{3-2}$$

Στην Εικόνα 3-1 φαίνονται από αριστερά προς τα δεξιά το κεντρικό μενού, η βιβλιοθήκη επενεργητών-δυνάμεων, η βιβλιοθήκη συνδέσμων και στην άκρη δεξιά η βιβλιοθήκη στερεών σωμάτων.



Εικόνα 3-1. Κεντρικό μενού και βιβλιοθήκες του λογισμικού ADAMS.

3.1.2 Παρατηρήσεις

Στο πεδίο της ρομποτικής όπου συνήθως ο μηχανισμός που σχεδιάζουμε υπόκειται σε έλεγχο, χρειάζεται αλληλεπίδραση του ADAMS με ένα εξωτερικό λογισμικό που επιφορτίζεται με τον αλγόριθμο ελέγχου της διάταξης, όπως στην περίπτωσή μας το MATLAB. Προς την κατεύθυνση αυτή φαίνεται να έχει κινηθεί και η εταιρία που σχεδιάζει το ADAMS και διαθέτει ένα επιπρόσθετο (plug in) πακέτο λειτουργιών που ονομάζεται Mechatronics.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να κάνω κάποιες επισημάνσεις όσον αφορά τη χρήση του προγράμματος. Πρέπει κανείς να έχει υπόψιν του ότι, όπως κάθε πρόγραμμα αριθμητικής επίλυσης, έτσι και το ADAMS είναι ευάλωτο σε σφάλματα αριθμητικής ολοκλήρωσης της δυναμικής του συστήματος. Τα σφάλματα αυτά μπορεί να έχουν να κάνουν κάποιες φορές με τις παραμέτρους του επιλεγμένου αριθμητικού επιλυτή (solver) σε συνδυασμό με φαινόμενα ευαίσθητα στο βήμα ολοκλήρωσης, όπως π.χ. η σύγκρουση δυο στερεών σωμάτων. Επίσης, πιθανό είναι να προέρχονται από σχεδιαστικές λεπτομέρειες που μας διαφεύγουν, όπως περιγράφουμε στη συνέχεια.

Ως γραφικό περιβάλλον, έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι τα αντικείμενα ακόμη και αν δεν είναι έτοιμα στη βιβλιοθήκη του λογισμικού, χτίζονται σχετικά γρήγορα και η απεικόνισή τους ομοιάζει πολύ με την πραγματικότητα. Εκεί ακριβώς κρύβεται και μια παγίδα. Το πρόγραμμα ενώ δείχνει ρεαλιστικό, δεν έχει καμία σχέση με την πραγματικότητα. Αντιθέτως, κατανοεί μόνο ό,τι του έχουμε ρητά δηλώσει μέσα από τις παραμέτρους των στοιχείων του.

Στην πραγματικότητα, μια κατασκευή ανέχεται αποκλίσεις μέσα σε κάποιο εύρος τιμών. Έτσι και αλλιώς γνωρίζουμε καλά από τη φυσική ότι ένα μέγεθος δεν είναι ποτέ απολύτως γνωστό και εξαρτόμαστε από την ακρίβεια των μετρητικών μας οργάνων. Το λογισμικό αντιθέτως, «κατανοεί» τα πάντα απόλυτα μέσα από τις δηλωμένες τους ονομαστικές τιμές και ακαμψίες. Για παράδειγμα, μια απόκλιση της τάξης των 10^{-6} rad μεταξύ δυο «παράλληλων» ευθειών μπορεί σε μια κατασκευή να μην σημαίνει απολύτως τίποτα και να μην γίνεται καν αισθητή. Για το λογισμικό όμως η διαφορά αυτή καθιστά τις ευθείες μη παράλληλες και οτιδήποτε βασιστεί στη θεώρηση πως είναι παράλληλες, θα εμπεριέχει αριθμητικό σφάλμα. Τα αποτελέσματα ενός τέτοιου σφάλματος, είναι σε άλλες περιπτώσεις αμελητέα και άλλες φορές μεγεθύνονται τόσο που τελικά μπορεί να μπλοκάρει και κάποιος βαθμός ελευθερίας του μηχανισμού.

Χρειάζεται λοιπόν προσοχή στη συναρμολόγηση των σωμάτων και συνίσταται να γίνεται αφαιρετική περιγραφή του πραγματικού μοντέλου, προσθέτοντας όσο το δυνατόν λιγότερες λεπτομέρειες. Όσο πιο σύνθετο γίνεται το μοντέλο και όσο πιο πολύ ομοιάζει με το πραγματικό σαν εικόνα, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα να αποκλίνει από αυτό στην πράξη, για τους λόγους που περιγράψαμε παραπάνω.

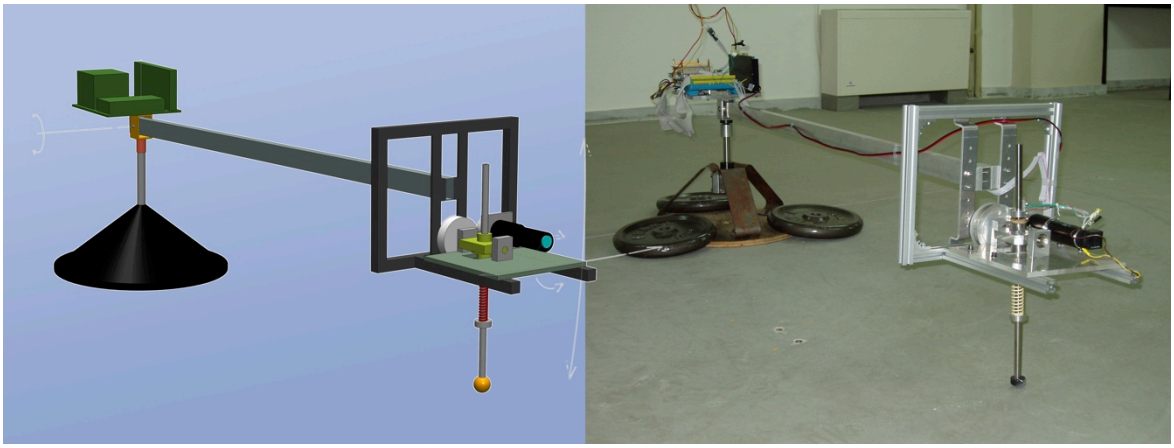
Συνίσταται δηλαδή, το εικονικό μοντέλο να είναι κατά το δυνατόν απλό και εύκολα επαληθεύσιμο, ώστε σφάλματα που εισάγονται κατά την γραφική τοποθέτηση των αντικειμένων να εντοπίζονται εύκολα με μια πιο προσεκτική ματιά στις αριθμητικές τιμές των συστημάτων συντεταγμένων των διαφόρων σωμάτων και συνδέσμων.

Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικό καθίσταται το να συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο κάποιες ελαστικότητες του φυσικού συστήματος. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου ένα σύστημα δεν έχει λύση χωρίς τη θεώρηση ελαστικότητας και είναι εύκολο να αμελήσουμε την σημασία της επειδή και στην πραγματικότητα η αντίστοιχη παραμόρφωση είναι αμελητέα, π.χ. μια μικρή κάμψη του βραχίονα συγκράτησης δίνει κάποιο σημαντικό βαθμό ελευθερίας κατά την κρούση όπως θα δούμε στη συνέχεια.

3.1.3 Παράμετροι μοντέλου στο ADAMS

Η προσομοίωση έγινε με σκοπό να πλησιάσουμε κατά το δυνατόν την φυσική κίνηση του μονόποδου ρομπότ SAHR (Single Actuator Hopping Robot) του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου. Για το λόγο αυτό έχουν εισαχθεί όλα τα μέρη του μηχανισμού με τις φυσικές τους διαστάσεις και τις σχετικές τους θέσεις. Επιπλέον, επειδή τα μέρη του μηχανισμού είναι κατά κύριο λόγο τυποποιημένα, τα σχέδια τους παρέχονται από την κατασκευάστρια εταιρία σε ηλεκτρονική μορφή. Από τα αρχεία αυτά εξάγονται τα δεδομένα των μαζών των διαφόρων στοιχείων του μηχανισμού.

Κατόπιν, εφόσον η πυκνότητα σε κάθε τμήμα του μηχανισμού έχει εισαχθεί από τον χρήστη το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα τις ροπές αδράνειας βάσει της γεωμετρίας του σώματος. Αυτό γίνεται εφικτό αν κανείς υπολογίσει με τη μέθοδο των τριών την πυκνότητα που αναλογεί στη μάζα του πραγματικού αντικειμένου. Υπολογίζει για παράδειγμα το λογισμικό, για ένα στοιχείο σύνθετης γεωμετρίας, βάρος m=200 gr όταν επιλέξουμε σίδηρο για υλικό με πυκνότητα d=7801 kg/m^3. Μπορούμε, ενώ δεν γνωρίζουμε με ακρίβεια τον όγκο, να προσδιορίσουμε με ποια πυκνότητα το υλικό αποκτά το επιθυμητό βάρος, π.χ. για m=112 gr → d=4369 kg/m^3. Δεν θέτουμε απευθείας λοιπόν τη μάζα ίση με τη σωστή τιμή για να μην χάσουμε τον αυτοματισμό του υπολογισμού των αδρανειών. Διαφορετικά, περνάμε στην πλήρως ελέγξιμη κατάσταση λειτουργίας και οι ροπές πρέπει να οριστούν και αυτές από τον χρήστη. Το μοντέλο που προέκυψε από τη διαδικασία αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 3-2 πλάι στο πραγματικό του ανάλογο.



Εικόνα 3-2. Το εικονικό πλάι στο πραγματικό μονόποδο ρομποτικό σύστημα SAHR.

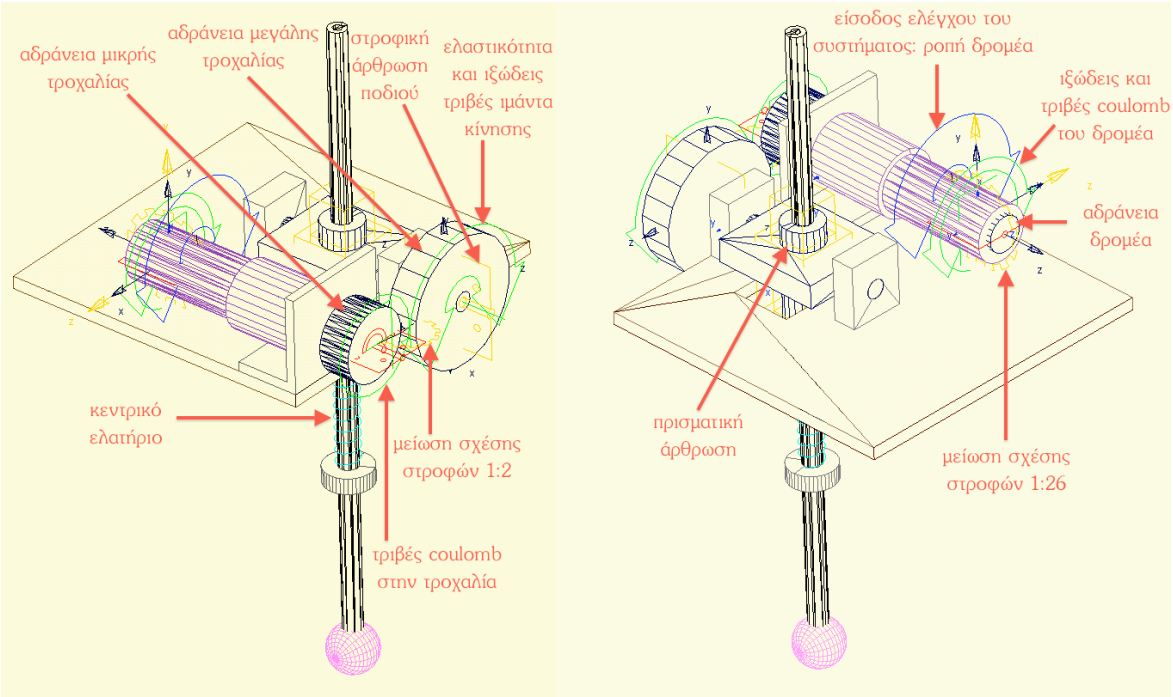
Το μοντέλο περιλαμβάνει τις σχέσεις μετάδοσης (Εικόνα 3-3) και έχουν πραγματοποιηθεί προσομοιωτικά πειράματα με σκοπό να αναπαραχθεί η απόκριση του φυσικού συστήματος ως προς τις στατικές τριβές του κινητήρα.

Είναι χαρακτηριστικό ότι στο φυσικό σύστημα, το πόδι με κλειστή την τροφοδοσία του κινητήρα στέκεται σε όποια γωνία τοποθετηθεί, αν είναι σχετικά μικρή. Αυτό οφείλεται στον πολλαπλασιασμό των στατικών τριβών (Coulomb) του δρομέα του κινητήρα στην έξοδο του μειωτήρα, βάσει της σχέσης μετάδοσης (1:52). Στις προσομοιώσεις έχει επιλεχθεί παραμένουσα στατική ροπή τριβής 0.8 mNm, η οποία επιτυγχάνει παρόμοια συμπεριφορά με το φυσικό σύστημα. Εκτός από τις στατικές τριβές το μοντέλο περιλαμβάνει και ιξώδεις τριβές στο δρομέα.

Επίσης ιξώδεις τριβές φέρει το μοντέλο και στην μικρή τροχαλία. Τέλος, ελαστικότητα και ιξώδεις τριβές περιλαμβάνονται στον ιμάντα μετάδοσης κίνησης (χρονισμού) και στο γραμμικό ελατήριο του ποδιού.

Η επαφή με το έδαφος μοντελοποιείται ως πλαστική κρούση μεταξύ της μικρής σφαίρας στο άκρο του ποδιού και ενός επιπέδου που προσομοιώνει το έδαφος. Λαμβάνεται επίσης

υπόψιν η ολίσθηση με το έδαφος, εφόσον αναπτύσσονται στατικές και ιξώδεις τριβές κατά την επαφή των δυο στερεών.



Εικόνα 3-3. Παράμετροι του μοντέλου στο ADAMS.

3.1.4 Ελαστικότητα βραχίονα πρόσδεσης

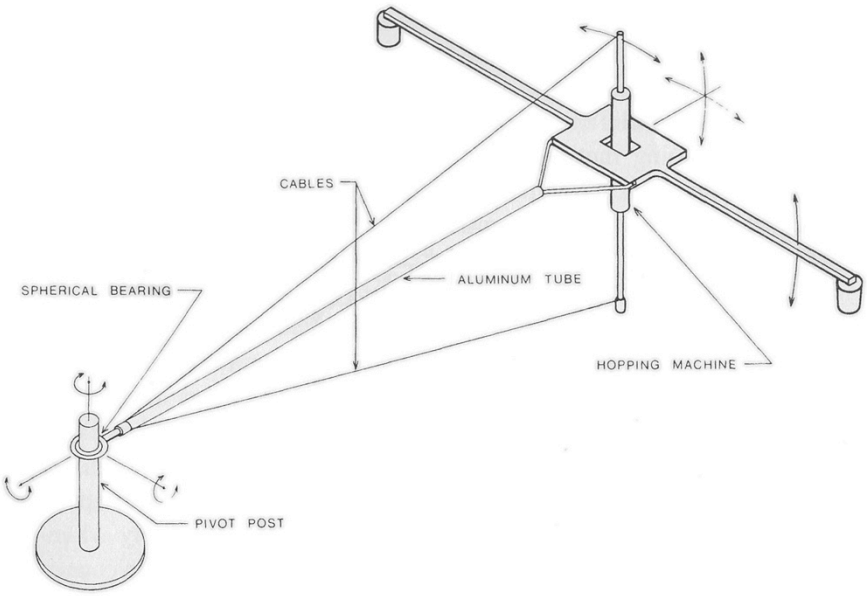
Ένα από τα πιο κρίσιμα σημεία αποδείχτηκε πως είναι η μοντελοποίηση της ελαστικότητας του βραχίονα και της βάσης στήριξης του μηχανισμού πρόσδεσης, βλ. Εικόνα 3-2. Με μια προσεκτική ματιά στα μαγνητοσκοπημένα πειράματα του φυσικού συστήματος, παρατηρεί κανείς πόσο έντονος είναι ο τζόγος του μηχανισμού πρόσδεσης.

Αν στην προσομοίωση θεωρήσουμε πακτωμένο το σύστημα πρόσδεσης και απαραμόρφωτα τα στερεά, τότε οι απώλειες είναι πολύ σημαντικές, με αποτέλεσμα το μοντέλο του ρομπότ να αποτυγχάνει. Για την ακρίβεια, χωρίς τις ελαστικότητες αυτές και αν θεωρήσουμε επαρκώς υψηλές τριβές με το έδαφος, η δομή του μηχανισμού μπλοκάρει τη συμπίεση του ελατηρίου. Καταλήγουμε δηλαδή με ένα βαθμό ελευθερίας λιγότερο. Χαρακτηριστικό επίσης είναι ότι αν θεωρήσουμε κυλινδρική άρθρωση στο πόδι, αντί για πρισματική, ο μηχανισμός ξεμπλοκάρει επειδή το πόδι στρέφεται γύρω από τον κάθετο άξονα του και καταφέρνει να ολισθήσει προς την κίτρινη επιφάνεια Εικόνα 3-5, καθώς συμπιέζεται το ελατήριο.

Το πρόβλημα αυτό έχει αντιμετωπισθεί στο παρελθόν στη διεθνή βιβλιογραφία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-4 με έναν πολύπλοκο μηχανισμό που εξασφαλίζει καθετότητα του ποδιού κατά την πρόσπτωσή του στο έδαφος. Προσπαθεί ακόμη να μειώσει τις ακτινικές τριβές που οφείλονται στο σφαιρικό χώρο δράσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-5, Εικόνα 3-6 και Εικόνα 3-7.

Για να αποφύγουμε όμως στην προσομοίωση τον υπολογιστικό κόπο των παραμορφώσιμων στερεών, θεωρήσαμε στροφική άρθρωση στο σημείο επαφής του πλαισίου με

τον βραχίονα πρόσδεσης, βλ. Εικόνα 3-5. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το πόδι να μπορεί να περιστραφεί στη πλευρική διεύθυνση (roll) ελεύθερα από τον βραχίονα. Για να μην καταλήξει όμως να αποτύχει, χρειάζεται ένας ακόμη περιορισμός που το αναγκάζει να παραμένει πάντοτε κάθετο ως προς το έδαφος. Με τον τρόπο αυτό έχει όλα τα οφέλη από το μηχανισμό πρόσδεσης, χωρίς το μεγάλο μειονέκτημα που είναι ότι οδηγεί τον κορμό και το πόδι πάνω στις σφαιρικές επιφάνειες (χρώμα μπλε και κίτρινο Εικόνα 3-5).



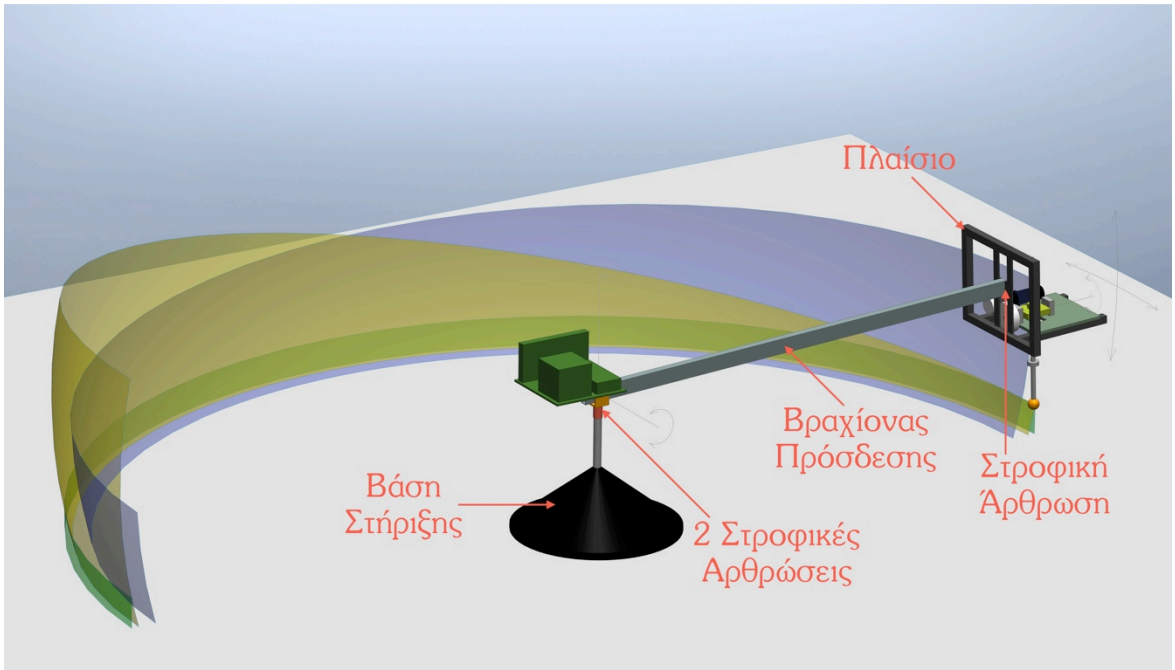
Εικόνα 3-4. Μηχανισμός με ιμάντες στήριξης που οδηγούν το μονόποδο ρομπότ να κινηθεί προσεγγιστικά σε επίπεδο, απεμπλέκοντας το από τον σφαιρικό χώρο εργασίας του βραχίονα στήριξης [38].

Με τις δυο παραπάνω αρθρώσεις το πόδι κινείται πάνω στην κυλινδρική επιφάνεια με χρώμα πράσινο. Βέβαια όταν το ελατήριο συμπιεστεί επαρκώς, το άκρο του ποδιού κινείται προς την κίτρινη επιφάνεια και υπόκειται σε ακτινικές τριβές.

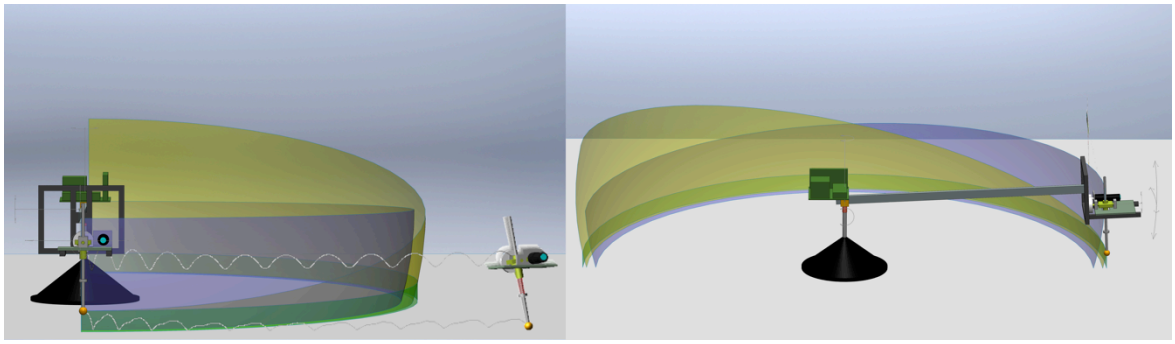
Εναλλακτικά λοιπόν, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο φυσικό σύστημα ένας μηχανισμός τύπου παραλλήλων πλευρών (4bar), αν και κάτι τέτοιο έχει αποφευχθεί για μείωση αδράνειας και βάρους.

Επομένως μια σημαντική αλλά αναγκαία απόκλιση από το φυσικό σύστημα είναι η ανυπαρξία ελαστικότητας στον βραχίονα. Επίσης, όπως έχουμε ήδη αναφέρει ελαστικότητα δεν έχει μοντελοποιηθεί και στο άκρο του ποδιού που στο φυσικό σύστημα είναι λαστιχένιο.
Εύλογα γεννάται η απορία πως επηρεάζεται επίσης η δυναμική του συστήματος από τον μηχανισμό πρόσδεσης. Σε τι διαφέρει δηλαδή ένα επιταχυνόμενο σώμα στην ευθεία και σε τροχιά ή σε τι διαφέρει ένα σώμα σε ελεύθερη πτώση και σε επιταχυνόμενη περιστροφή λόγω της βαρύτητας Εικόνα 3-8.

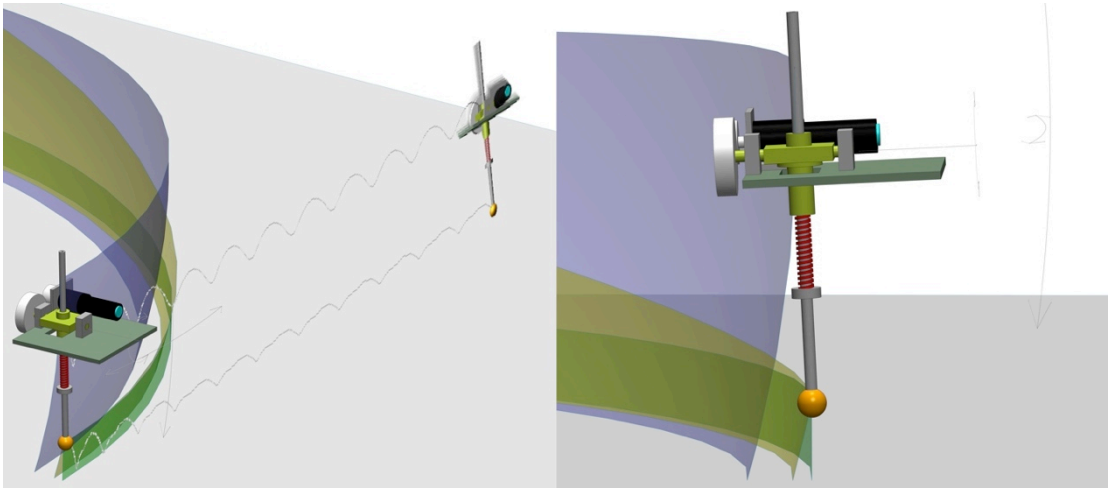
Αμέσως γίνεται ξεκάθαρο ότι η διανυόμενη απόσταση μέχρι να φτάσει στο έδαφος είναι μεγαλύτερη για την προσδεδεμένη σφαίρα, διότι δεν ακολουθεί το βέλτιστο μονοπάτι αλλά αυτό στο οποίο το εξαναγκάζουν οι βαθμοί ελευθερίας του.



Εικόνα 3-5. Μηχανισμός συγκράτησης με 2 βαθμούς ελευθερίας και τελικό σημείο δράσης του μηχανισμού με 5 βαθμούς ελευθερίας (στο άκρο του ποδιού)



Εικόνα 3-6. Σφαιρικός χώρος δράσης του βραχίονα συγκράτησης ο οποίος οδηγεί το μονόποδο ρομπότ σε τριβές κατά την ακτινική διεύθυνση.



Εικόνα 3-7. Εστίαση στην πλευρική όψη του μονόποδου ρομπότ αποκρύπτοντας τον βραχίονα συγκράτησης

Περιμένουμε λοιπόν να απαιτείται και περισσότερος χρόνος. Σε αντίθεση με την ελεύθερη πτώση όπου η κάθετη στο έδαφος επιτάχυνση παραμένει σταθερή, για την προσδεδεμένη σφαίρα η κάθετη επιτάχυνση προκύπτει ως εξής:

$$\ddot{y} = -g\left(\cos^2\gamma + \frac{r}{g}\dot{\gamma}^2\sin\gamma\right) \tag{3-3}$$

όπου γ συμβολίζουμε τη γωνία του βραχίονα από την οριζόντιο. Βέβαια, για το μηχανισμό πρόσδεσης του ρομπότ δεν αναπτύσσονται τόσο έντονες διαφορές στην κάθετη επιτάχυνση επειδή ο βραχίονας παραμένει σχεδόν οριζόντιος και άρα μιλάμε για πολύ μικρές γωνίες.

Οι δυνάμεις Coriolis στις οποίες υπόκειται το ρομπότ είναι αυτές που αναπτύσσονται πιο έντονα. Το ρομπότ προσαρτημένο στο βραχίονα πρόσδεσης κινείται με ταχύτητα πρόωσης ($\dot{\mathbf{x}}$) που μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής ($\mathbf{\Omega}$ - διάνυσμα κάθετο στο έδαφος) του βραχίονα επί το μήκος του βραχίονα (r_{arm}). Συνέπεια της περιστροφικής αυτής κίνησης είναι η εμφάνιση του διανύσματος της Coriolis επιτάχυνσης ($\mathbf{a_{cor}}$), παράλληλο με τον βραχίονα. Προσδιορίζουμε στη συνέχεια σε ποιες ταχύτητες πρόωσης του ρομπότ η επιτάχυνση Coriolis φτάνει την βαρυτική επιτάχυνση, ως εξής:

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{a_{cor}} &= -2\mathbf{\Omega}\times\dot{\mathbf{x}} \\ \Omega &= \frac{\dot{x}}{r_{arm}} \\ a_{cor} &= g \end{aligned}\right\} \Rightarrow \dot{x} = \sqrt{\frac{g\cdot r_{arm}}{2}} \tag{3-4}$$

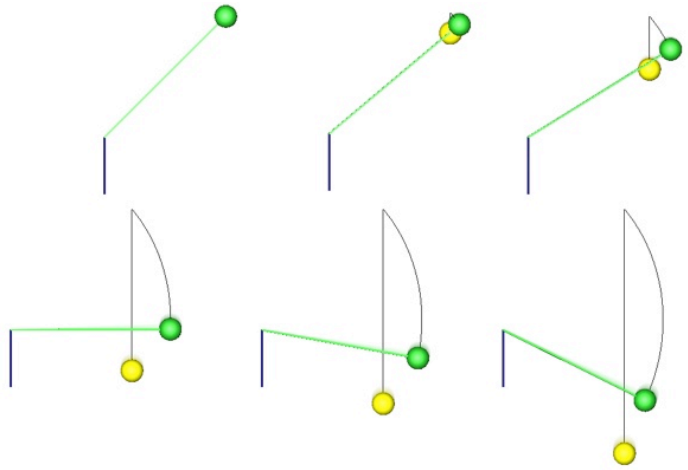
$$\dot{x}^{1g}_{1.2mArm} = 2.4\,\frac{m}{s} \tag{3-5}$$

άρα στον υπάρχοντα μηχανισμό με μήκος βραχίονα 1.2 m, το ρομπότ δέχεται επιτάχυνση Coriolis ίση με 9.8 m/s^2 όταν η πρόσθια ταχύτητα του φθάσει τα 2.4 m/s. Αντίστοιχα, η φυγόκεντρη επιτάχυνση έχει ως εξής:

$$\left.\begin{aligned} a_{cent} &= \frac{\dot{x}^2}{r_{arm}} \\ a_{cent} &= g \end{aligned}\right\} \Rightarrow \dot{x} = \sqrt{g\cdot r_{arm}} \tag{3-6}$$

$$\dot{x}^{1g}_{1.2mArm} = 3.4\,\frac{m}{s} \tag{3-7}$$

άρα στον υπάρχοντα μηχανισμό με μήκος βραχίονα 1.2 m, το ρομπότ δέχεται φυγόκεντρη επιτάχυνση ίση με 9.8 m/s^2 όταν η πρόσθια ταχύτητα του φθάσει τα 3.4 m/s.

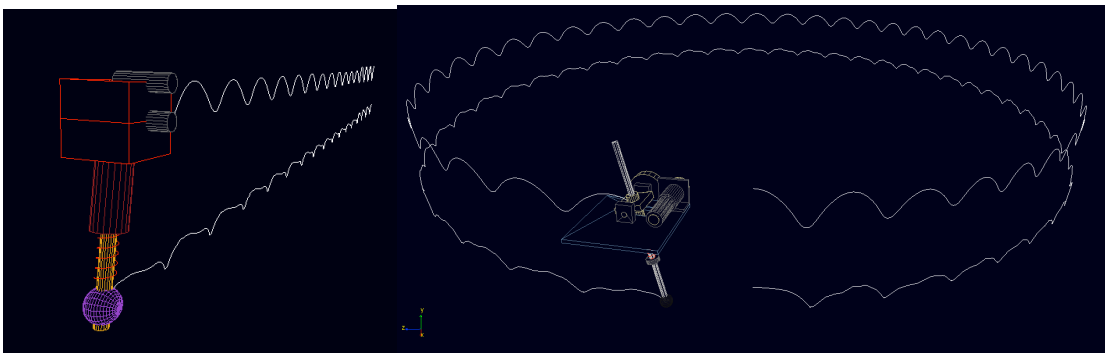


Εικόνα 3-8. Πρόσθια όψη δυο σφαιρών με μηδενική αρχική ταχύτητα, εκ των οποίων η μια είναι προσδεδεμένη σε περιστρεφόμενο άξονα μηδενικής αδράνειας (πράσινη σφαίρα), ενώ η δεύτερη εκτελεί ελεύθερη πτώση.

Στην παραπάνω προσομοίωση ADAMS, Εικόνα 3-8, δίνονται στιγμιότυπα της κίνησης 2 σφαιρών. Τα στιγμιότυπα βρίσκονται σε χρονική σειρά, ξεκινώντας από επάνω αριστερά μέχρι το τέλος της γραμμής και διαγώνια απ' την αρχή της επόμενης γραμμής, όπως το κείμενο. Οι σφαίρες αφήνουν πίσω τους ίχνος της τροχιάς που ακολούθησαν, ενώ ο χρόνος είναι φυσικά κοινός και για τις 2. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι για υψηλές γωνίες του βραχίονα πρόσδεσης, αναμένουμε επίδραση στον χρόνο της εναέριας φάσης.

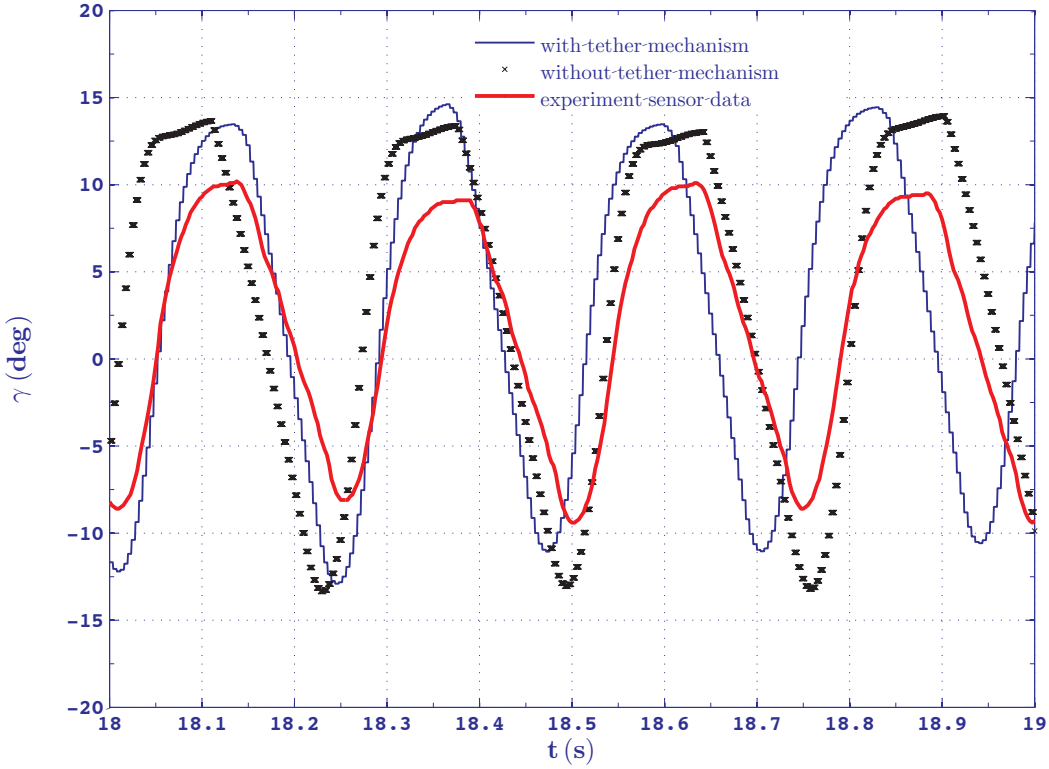
3.1.5 Σύγκριση με το μοντέλο χωρίς μηχανισμό πρόσδεσης

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρατίθενται στη συνέχεια σε αντιπαραβολή με το μοντέλο του μονόποδου ρομπότ χωρίς μηχανισμό πρόσδεσης [45], Εικόνα 3-9.

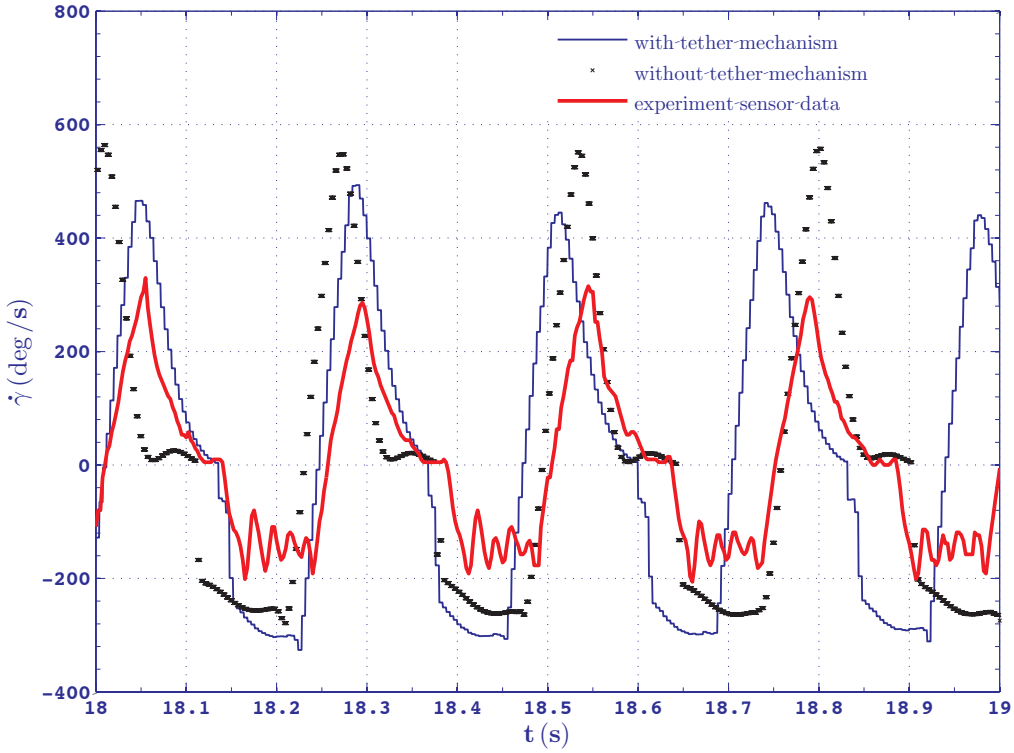


Εικόνα 3-9. Σύγκριση τροχιών μεταξύ του μονόποδου μοντέλου χωρίς και με μηχανισμό πρόσδεσης.

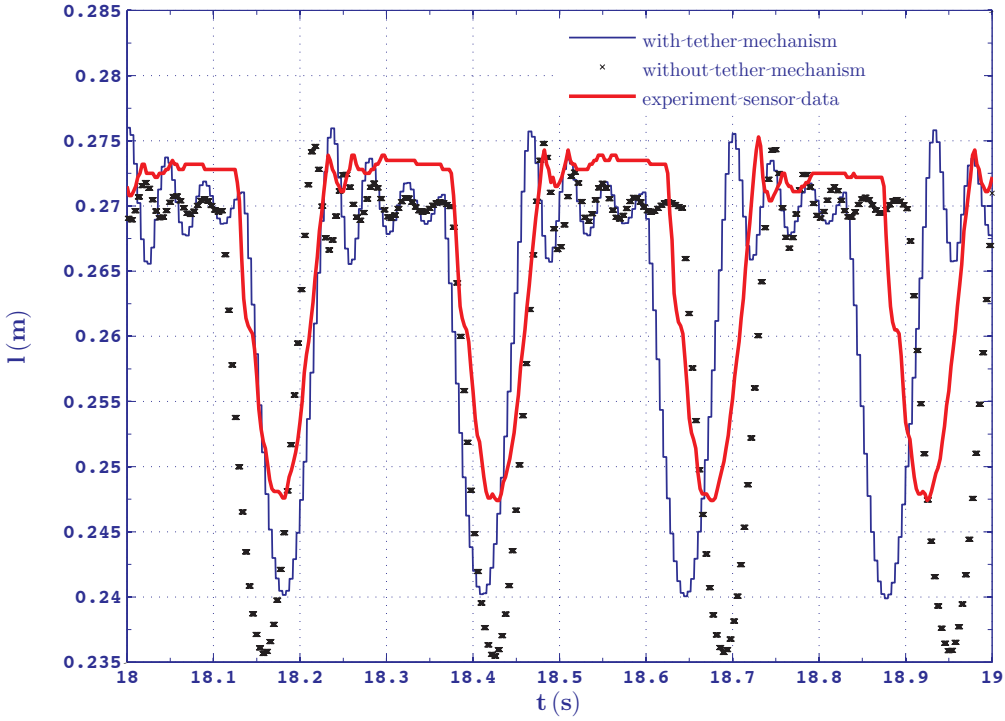
Οι προσομοιώσεις αυτές απαιτούν τη συνεργασία του αλγόριθμου ελέγχου στο MatLab και του μοντέλο του συστήματος στο ADAMS. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιήθηκε στις δύο προσομοιώσεις που ακολουθούν και βελτιστοποιεί την γωνία πρόσπτωσης με σκοπό τη διατήρηση του ύψους αναπήδησης στο 1.5cm από το έδαφος, ενώ η ροπή κατά τη φάση εδάφους είναι σταθερή και ίση με 5.2 Nm.



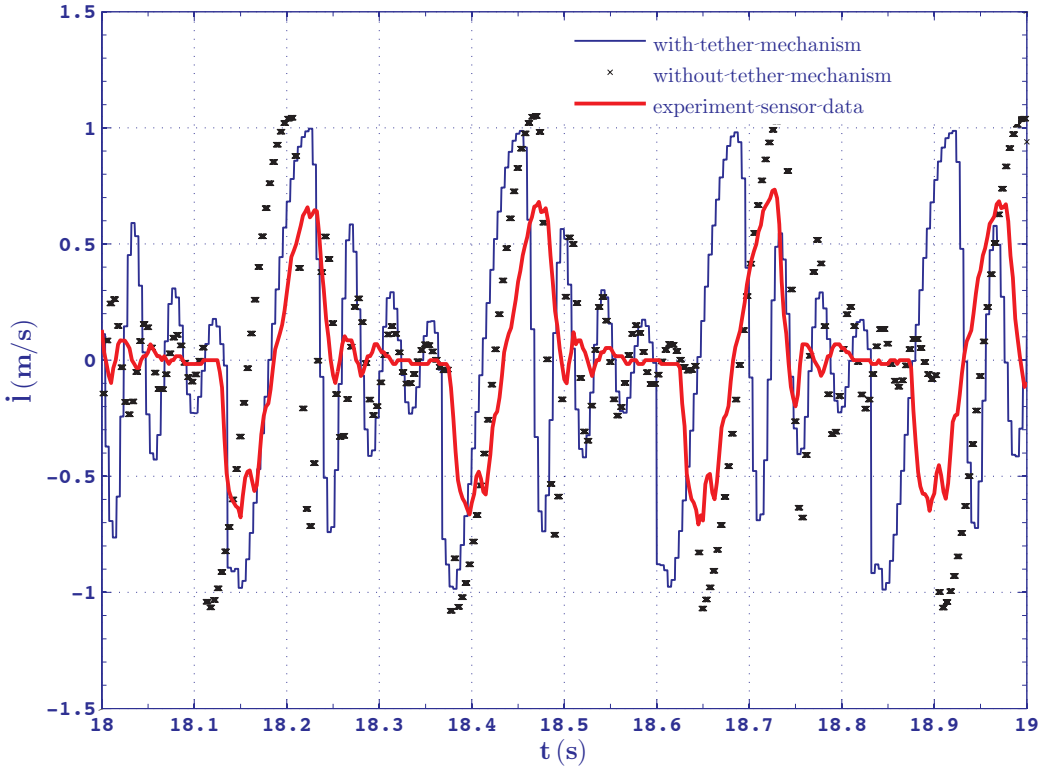
Εικόνα 3-10. Απόλυτη γωνία θέσης του ποδιού και σύγκριση των πειραματικών (κόκκινη γραμμή) με τα προσομοιωτικά αποτελέσματα.



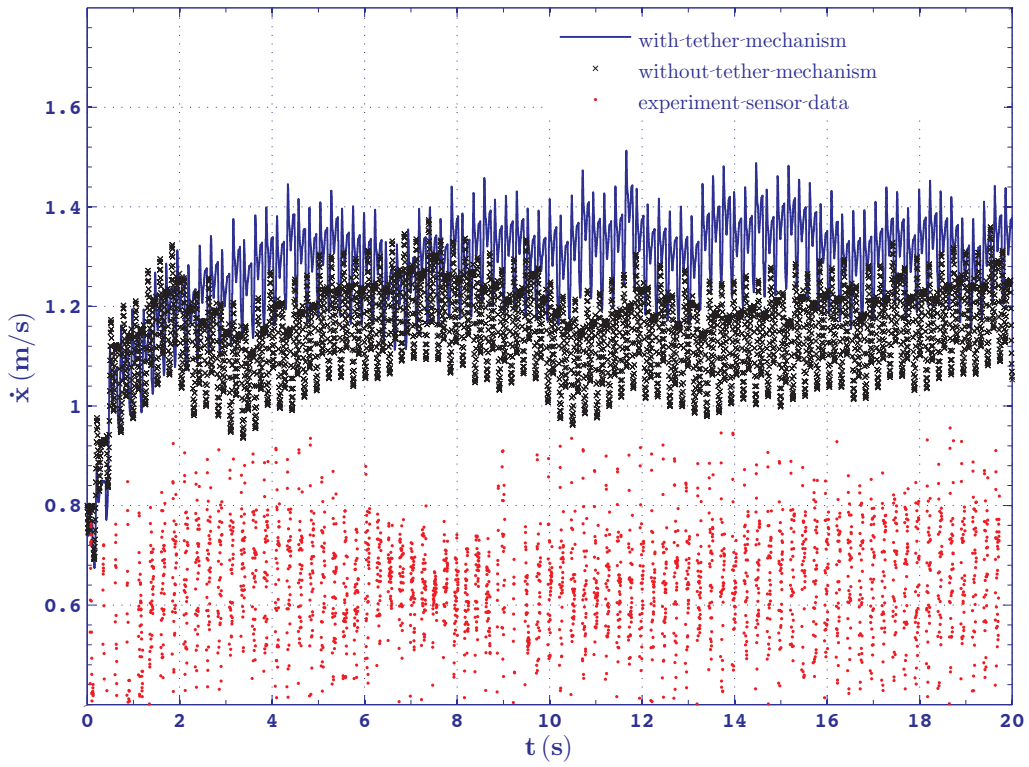
Εικόνα 3-11. Γωνιακή ταχύτητα του ποδιού και σύγκριση των πειραματικών (κόκκινη γραμμή) με τα προσομοιωτικά αποτελέσματα.



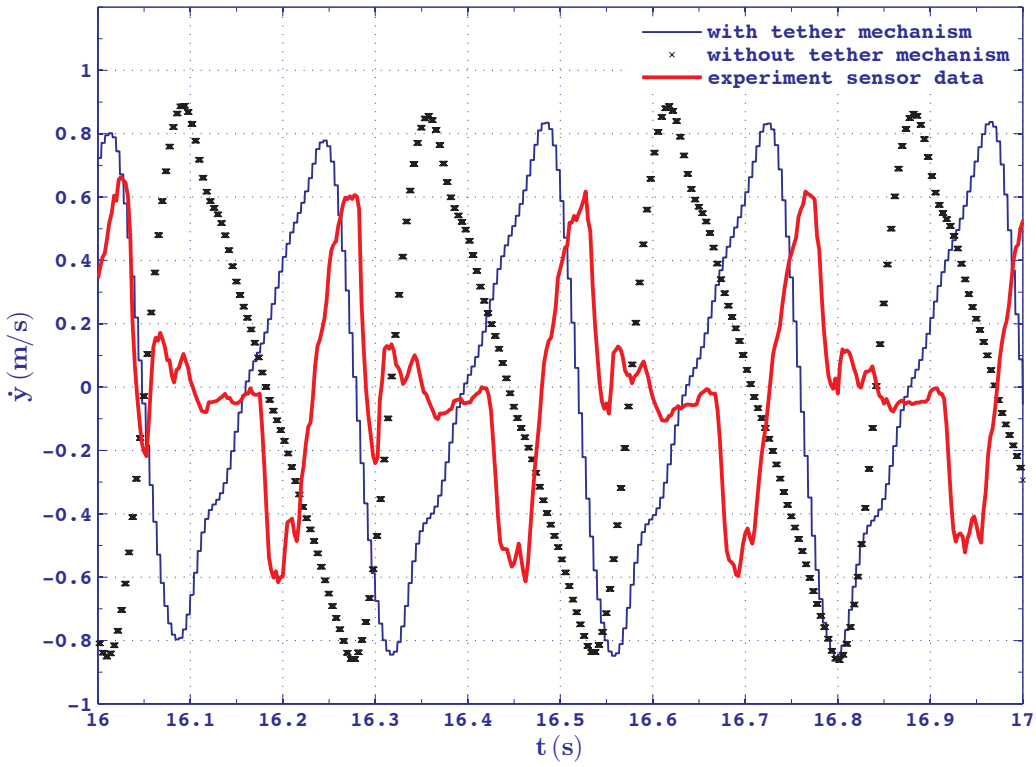
Εικόνα 3-12. Μήκος ποδιού και σύγκριση των πειραματικών (κόκκινη γραμμή) με τα προσομοιωτικά αποτελέσματα.



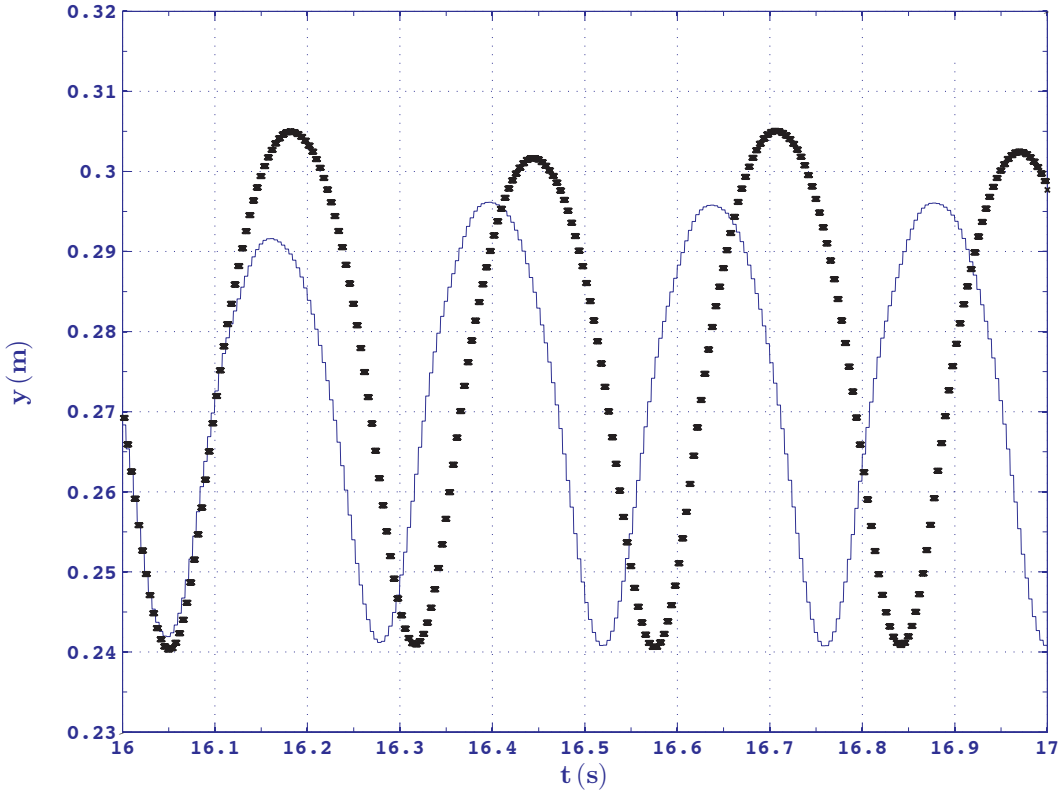
Εικόνα 3-13. Γραμμική ταχύτητα ελατηρίου και σύγκριση των πειραματικών (κόκκινη γραμμή) με τα προσομοιωτικά αποτελέσματα.



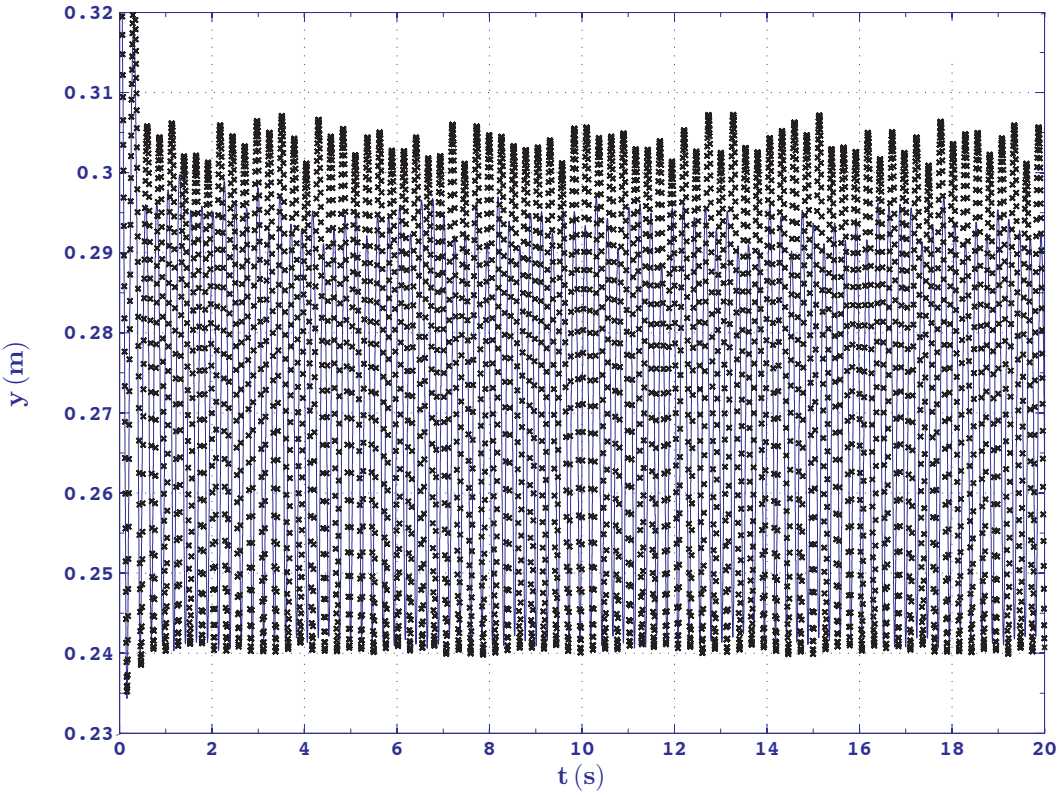
Εικόνα 3-14. Πρόσθια ταχύτητα του ρομπότ και σύγκριση των πειραματικών (κόκκινες τελείες) με τα προσομοιωτικά αποτελέσματα.



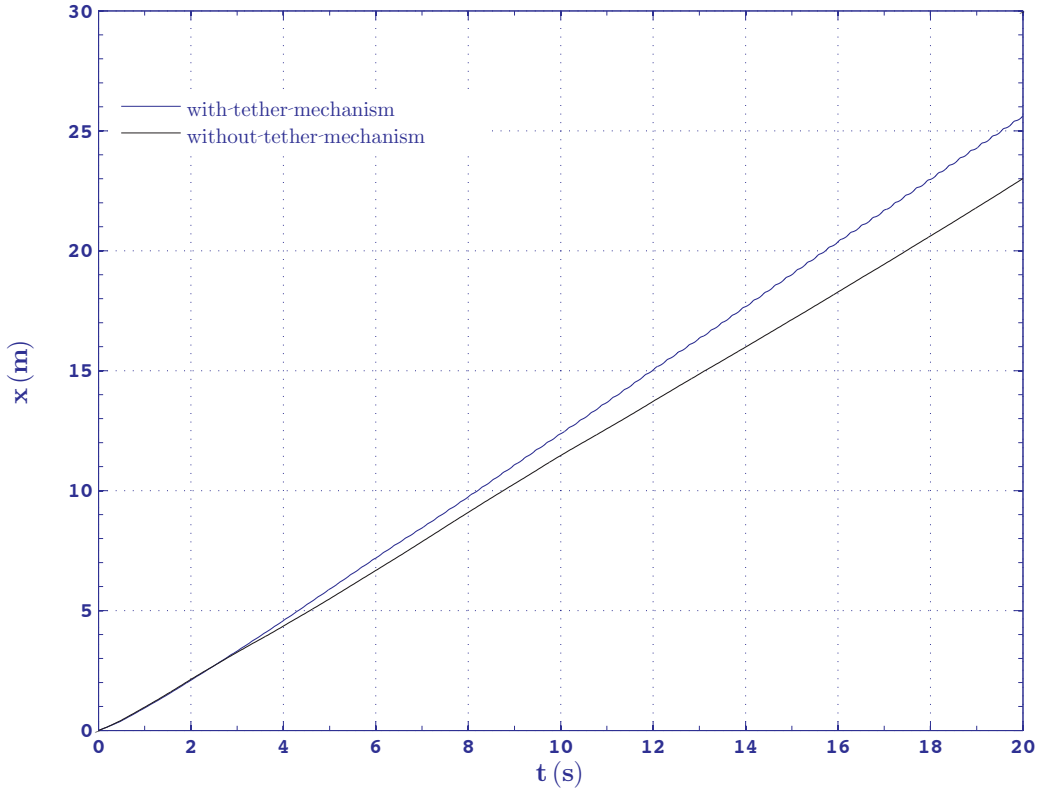
Εικόνα 3-15. Ταχύτητας αναπήδησης του ρομπότ και σύγκριση των πειραματικών (κόκκινη γραμμή) με τα προσομοιωτικά αποτελέσματα.



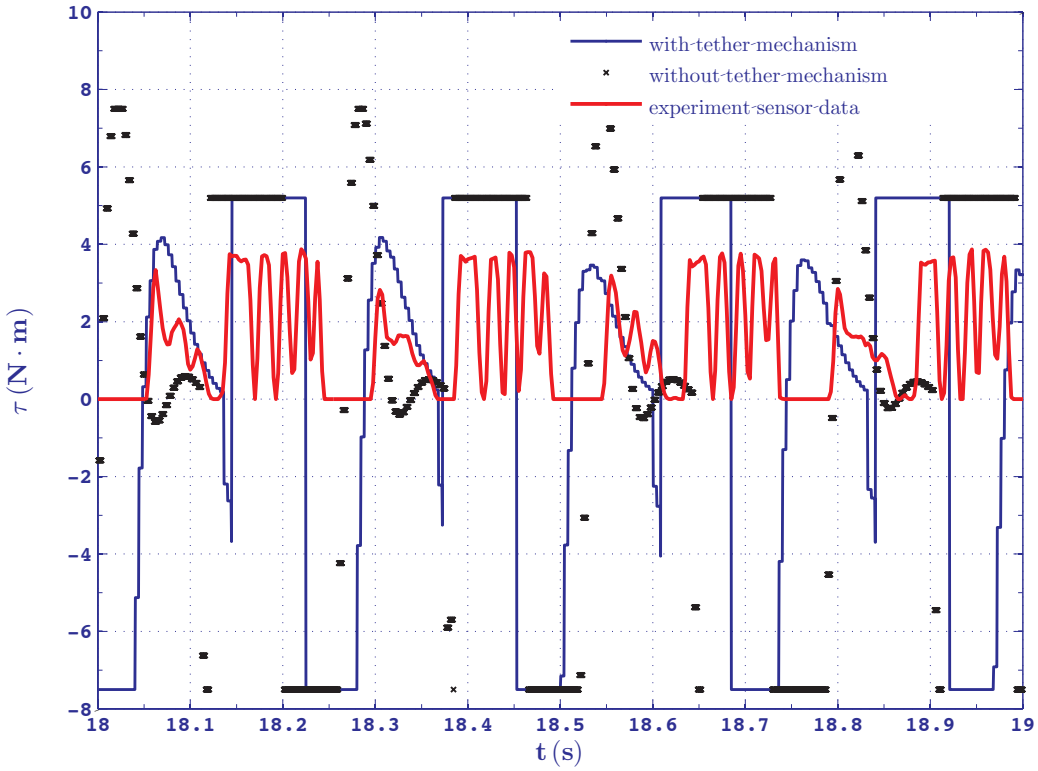
Εικόνα 3-16. Ύψος αναπήδησης του ρομπότ και σύγκριση των δύο προσομοιώσεων για μικρό μέρος της κίνησης.



Εικόνα 3-17. Ύψος αναπήδησης του ρομπότ και σύγκριση των δύο προσομοιώσεων καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης.



Εικόνα 3-18. Συνολική διανυόμενη απόσταση που καλύπτει το ρομπότ και σύγκριση των δύο προσομοιώσεων.



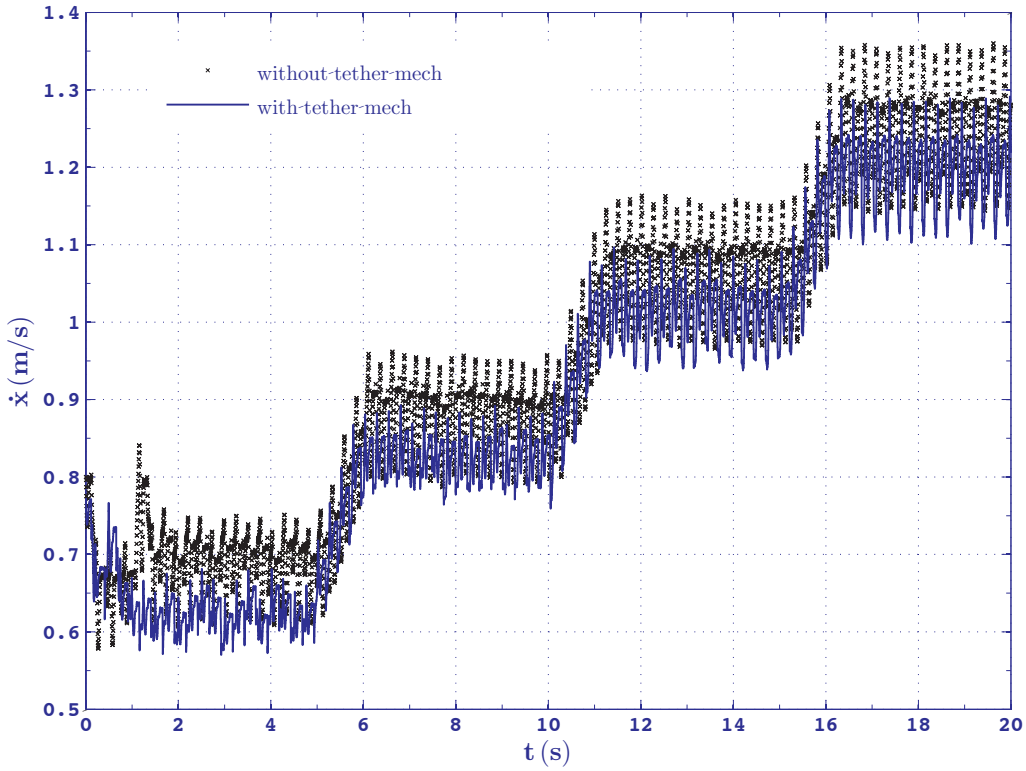
Εικόνα 3-19. Ροπή που ασκεί ο κινητήρας στο πόδι συνυπολογίζοντας την προσαύξηση του μειωτήρα στροφών και σύγκριση των πειραματικών (κόκκινη γραμμή) με τα προσομοιωτικά αποτελέσματα.

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των πειραματικών δεδομένων είναι κοντά αλλά δεν ταυτίζονται. Αυτό οφείλεται κατά ένα μέρος στα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος που δεν έχουμε μοντελοποιήσει και κατά ένα άλλο ίσως και σημαντικότερο μέρος στις απαιτήσεις που έχουν τεθεί στον αλγόριθμο ελέγχου.

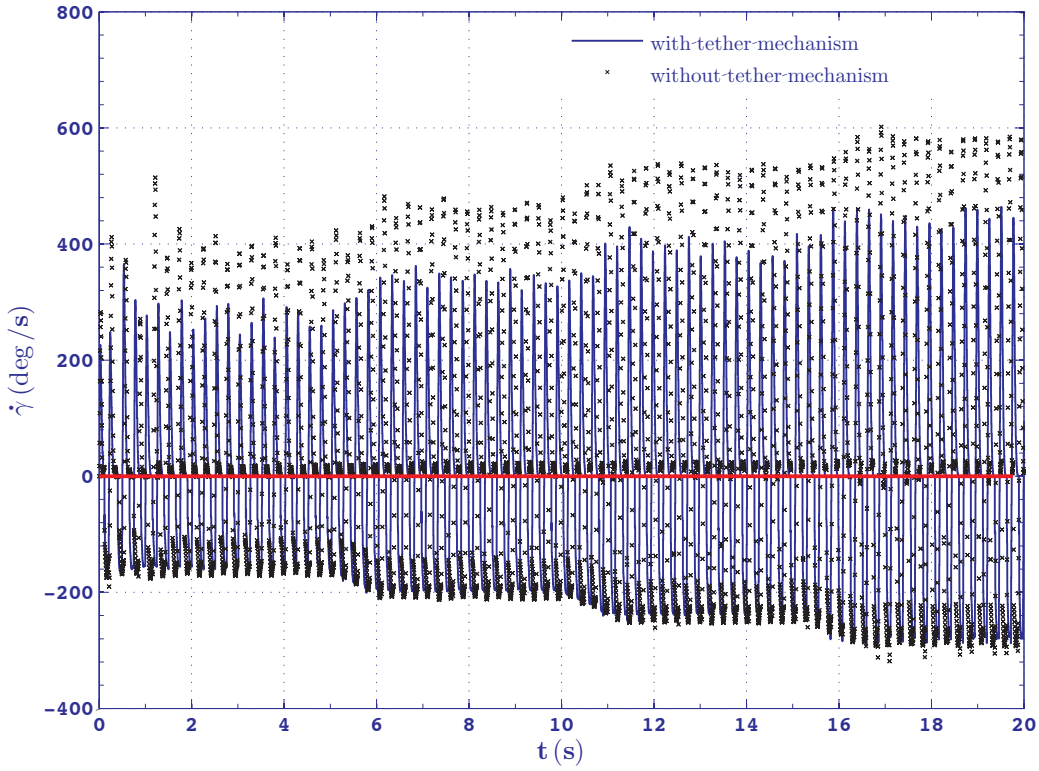
Επειδή δεν είναι διαθέσιμες με βεβαιότητα οι αρχικές συνθήκες και οι επιθυμητές ταχύτητες και τα ύψη αναπήδησης που χρησιμοποιήθηκαν κατά τα πειράματα, είναι αναμενόμενο να έχουμε αποκλίσεις.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το μοντέλο με το μηχανισμό πρόσδεσης, αν και περιλαμβάνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις αδράνειες και τις τριβές του φυσικού συστήματος, φαίνεται να κινείται ταχύτερα και να διανύει μεγαλύτερη απόσταση.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιήσουμε PD έλεγχο για τη ροπή της φάσης εδάφους που βασίζεται στην επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα, τα αποτελέσματα αντιστρέφονται, δηλαδή προηγείται το μοντέλο που κινείται στο επίπεδο, και τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Επειδή εδώ είναι εφικτό, έχουμε ορίσει και προφίλ ταχύτητας που θα ακολουθήσουν τα δυο μοντέλα.



Εικόνα 3-20. Πρόσθια ταχύτητα του ρομπότ και σύγκριση των δύο προσομοιώσεων για ελεγχόμενη ροπή στη φάση εδάφους.



Εικόνα 3-21. Γωνιακή ταχύτητα του ποδιού και σύγκριση των δύο προσομοιώσεων για ελεγχόμενη ροπή στη φάση εδάφους.

3.1.6 Εναλλακτικά πόδια

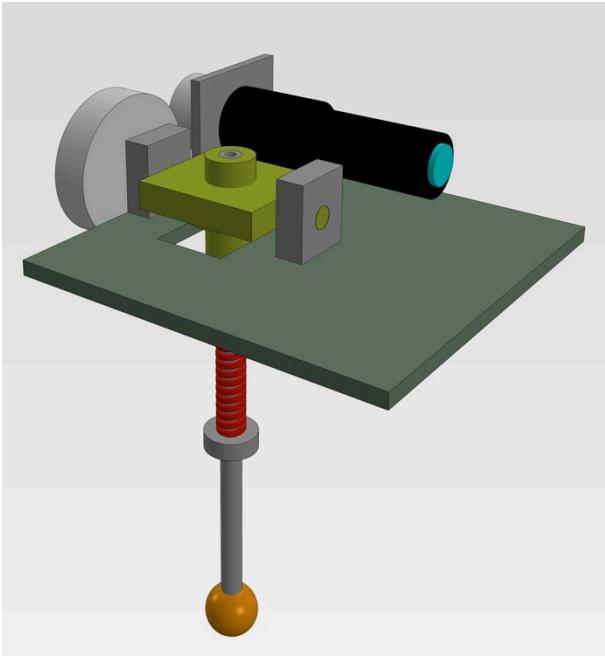
Με σκοπό την επιβεβαίωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων ως προς την αύξηση της ιδιοσυχνότητας του ποδιού κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε περιβάλλον προσομοίωσης δυο εναλλακτικά πόδια. Το πρώτο δεν φέρει προεξοχή και από την στροφική άρθρωση του ποδιού και πάνω Εικόνα 3-22 και το δεύτερο φέρει αντίβαρο προσαρμοσμένο πάνω στο στοιχείο του ένσφαιρου γραμμικού τριβέα Εικόνα 3-23.

Το πρώτο πόδι στην παραπάνω εικόνα έχει μικρότερη συνολική μάζα και αδράνεια ποδιού. Επίσης κατεβάζει χαμηλότερα το κέντρο μάζας στη φάση εδάφους. Περιμένουμε να έχει αυξημένη ιδιοσυχνότητα σε σχέση με εκείνο που φέρει προεξοχή και πράγματι με μέτρηση της περιόδου ταλαντώσεως σε προσομοιωτικό πείραμα στο ADAMS υπολογίζουμε ότι η ιδιοσυχνότητά του έχει ως εξής:

$$f_{cutted} = 1.14\text{Hz} \tag{3-8}$$

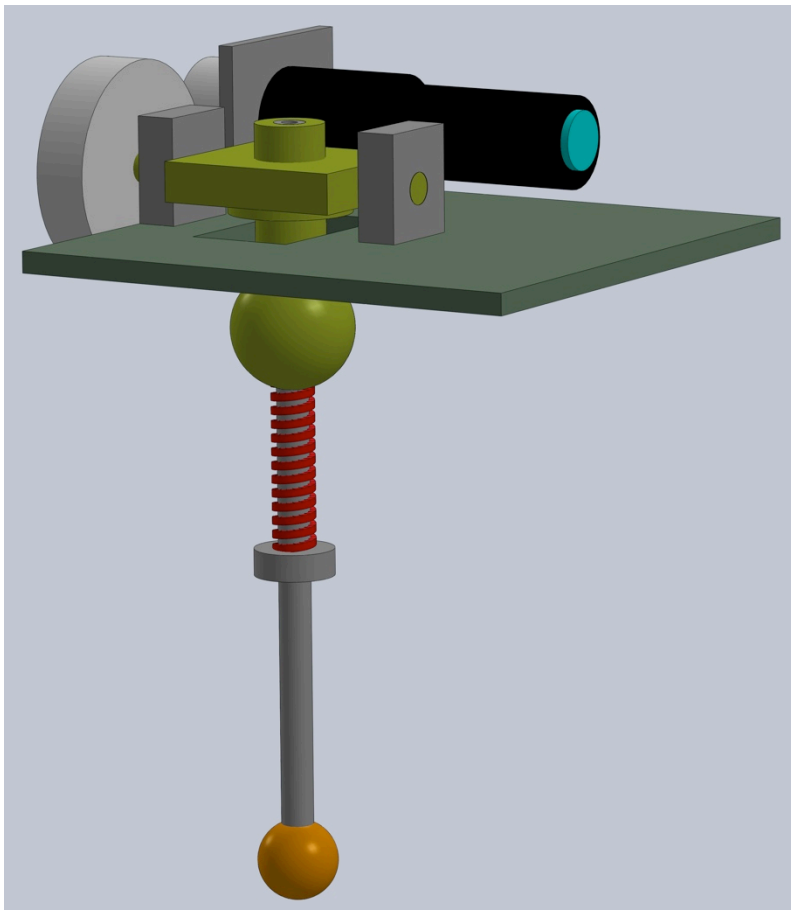
τη στιγμή που η ιδιοσυχνότητα του αρχικού μοντέλου ποδιού έχει ιδιοσυχνότητα που υπολογίζεται από το αντίστοιχο πείραμα ως εξής:

$$f_{mockup} = 1.02\text{Hz} \tag{3-9}$$



Εικόνα 3-22. Μοντέλο μονόποδου με μήκος ποδιού ίσο με το ύψος του ρομπότ.

Αντίστοιχα σχεδιάζεται στο ADAMS το μοντέλο ποδιού με προσθήκη αντίβαρου Εικόνα 3-23 το οποίο και τοποθετείται στη βέλτιστη θέση, όπως υπολογίζεται από τις εξισώσεις του Κεφ. 2.



Εικόνα 3-23. Μοντέλο μονόποδου με αντίβαρο κάτω από τον γοφό.

Το εναλλακτικό αυτό πόδι έχει πλεονέκτημα στην εναέρια φάση, διότι έχει υψηλότερα (πιο κοντά στη στροφική άρθρωση) το συνολικό κέντρο μάζας του ποδιού και του γραμμικού ένσφαιρου τριβέα. Στη φάση εδάφους όμως έχει μειονέκτημα, επειδή η άρθρωση πλέον βρίσκεται στο έδαφος, δηλαδή πιο μακριά από το συνολικό κέντρο μάζας.

Το μειονέκτημα αυτό έρχεται να αντισταθμίσει το γεγονός ότι το αντίβαρο είναι τοποθετημένο στο κινούμενο μέρος του μηχανισμού και άρα θα πλησιάζει την άρθρωση με το έδαφος στη φάση εδάφους. Η ιδιοσυχνότητά του μετριέται με αντίστοιχο πείραμα για την εναέρια φάση πάντα και βρίσκεται ως εξής:

$$f_{cw} = 1.22\text{Hz} \tag{3-10}$$

3.1.7 Σύγκριση εναλλακτικών ποδιών

Για την σύγκριση των εναλλακτικών ποδιών γίνεται χρήση της δυνατότητας του λογισμικού για συγχρονισμένη αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων σε μορφή γραφικών (Εικόνα 3-24). Μπορούμε επίσης να αντιπαραβάλλουμε τις γραφικές παραστάσεις των διαφόρων χαρακτηριστικών μεγεθών, όπως η ροπή του κινητήρα, το ύψος αναπήδησης και η πρόσθια ταχύτητα.

Κρίνεται όμως σκόπιμο να αναπαραστήσουμε τα αποτελέσματα και γραφικά, διότι κάτι τέτοιο αυξάνει την κατανόησή μας για το σύστημα. Κατά μια έννοια η συγχρονισμένη αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων θα μπορούσε να παρομοιαστεί με την αντιπαραβολή όλων των χαρακτηριστικών μεγεθών ταυτόχρονα. Το όφελος αυτό βέβαια γίνεται πιο έντονα αισθητό παρακολουθώντας το βίντεο που προκύπτει, ενώ εδώ στην έντυπη μορφή έχουμε την δυνατότητα να δώσουμε μόνο λίγα στιγμιότυπα.

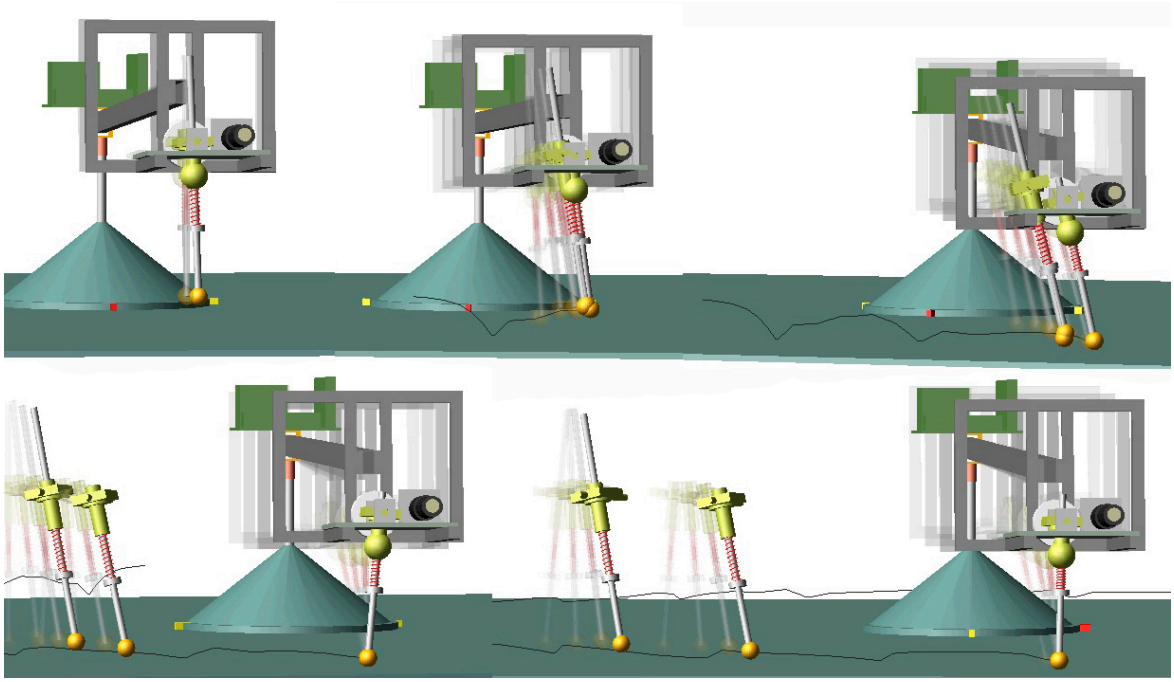
Για πιο εγγυημένα αποτελέσματα και ασφαλέστερα συμπεράσματα, επιλέξαμε για την σύγκριση των εναλλακτικών ποδιών να αχρηστεύσουμε κατά μέρος τον σύνθετο αλγόριθμο ελέγχου. Έτσι, κατά την φάση εδάφους, δίνουμε σταθερή ροπή ίση με 5.2 Nm. Διαφορετικά ο αλγόριθμος ελέγχου καθορίζει την ροπή εδάφους ώστε να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας, κάτι που περιπλέκει το αποτέλεσμα. Ανέπαφο μένει το κομμάτι του ελεγκτή που καθορίζει την γωνία πρόσπτωσης ώστε να διατηρηθεί το ύψος αναπήδησης ίσο με 1.5 cm. Τα εναλλακτικά πόδια έχουν λοιπόν κοινή ροπή για τη φάση εδάφους, ενώ η γωνία πρόσπτωσης είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του καθενός ώστε να διατηρηθεί το ύψος αναπήδησης και κατά συνέπεια και η ίδια η κίνηση.

Επίσης κοινή τίθεται η επιθυμητή ταχύτητα πρόωσης και ίση με 0.8 m/s, που είναι και η αρχική ταχύτητα που δίνουμε στο σύστημα. Ο αλγόριθμος ελέγχου στην προσπάθειά του να επιτύχει την επιθυμητή ταχύτητα πρόωσης και έχοντας αχρηστευμένο το κομμάτι για τη φάση εδάφους, φθάνει το εκάστοτε σύστημα στα όρια του.

Ο λόγος είναι ότι η ροπή που έχουμε επιλέξει είναι αρκετά ισχυρή για να επιταχύνει έντονα το σύστημα. Ο αλγόριθμος ελέγχου μειώνει την γωνία πρόσπτωσης θέλοντας να μπει σε ελαφρύτερο βηματισμό (μπορεί κανείς να σκεφθεί σαν ανάλογο το jogging αντί για sprint). Στην επόμενη όμως φάση εδάφους η ροπή είναι το ίδιο ισχυρή και το σύστημα επιταχύνεται πιο

έντονα και χάνει και ύψος. Ο αλγόριθμος ελέγχου συνεχίζει την «λανθασμένη» αυτή λογική μέχρις ότου γίνει επιτακτική η προτεραιότητα της διατήρησης του ύψους αναπήδησης. Τότε αυξάνει την γωνία πρόσπτωσης για να προσδώσει ενέργεια στο κεντρικό ελατήριο. Με τον τρόπο αυτό το κάθε σύστημα φθάνει στη μέγιστη ταχύτητα πρόωσής του.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται στην Εικόνα 3-24, όπου προκρίνεται όπως αναμένουμε το πόδι με το αντίβαρο ενώ τελευταίο έρχεται το υπάρχον πόδι με προεξέχον τμήμα.

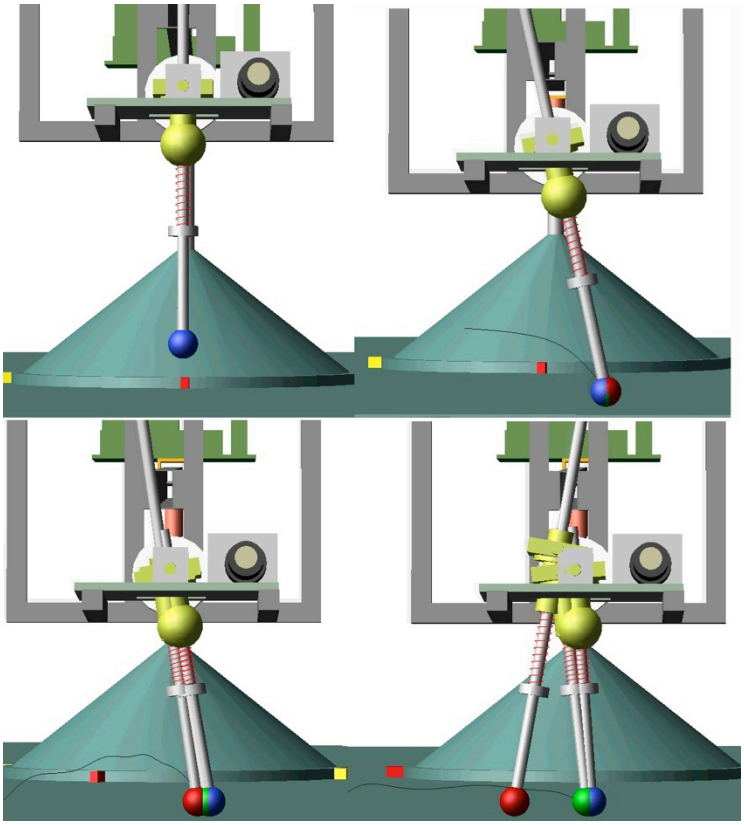


Εικόνα 3-24. Στιγμιότυπα από την συγχρονισμένη αναπαράσταση τριών διαφορετικών ποδιών: ο αλγόριθμος ελέγχου επιβάλλει σταθερή ροπή κατά τη φάση εδάφους.

Στη συνέχεια για να επιβεβαιώσουμε το αποτέλεσμα και να αποκλείσουμε την επίδραση άλλων παραγόντων, αχρηστεύουμε και το δεύτερο κομμάτι του αλγόριθμου ελέγχου. Καταλήγουμε με τον τρόπο αυτό σε ένα σύστημα που προδιαγεγραμμένα θα αποτύχει, θα χάσει δηλαδή το ύψος αναπήδησης και η κίνηση θα σταματήσει. Μας ενδιαφέρει όμως αν μέχρι το σημείο εκείνο θα επιβεβαιωθεί το προηγούμενο αποτέλεσμα, ότι δηλαδή η σειρά κατάταξης των εναλλακτικών ποδιών παραμένει.

Θέτουμε λοιπόν στον αλγόριθμο ελέγχου κοινή και την γωνία πρόσπτωσης και ίση με 12° μοίρες. Επιλέγουμε για κάθε πόδι ένα διαφορετικό χρώμα ώστε να γίνει εφικτή η ταυτοποίηση μιας και η χρονική διάρκεια της κίνησης δεν επαρκεί για να αναπτυχθεί διαφορά μεταξύ τους και να διαφανεί ξεκάθαρα το επικρατέστερο. Το κόκκινο αντιστοιχεί στο πόδι με το προεξέχων τμήμα. Το πράσινο σε εκείνο χωρίς προεξέχων τμήμα και το μπλε στο πόδι με το αντίβαρο. Περιμένουμε λοιπόν να δούμε την κατάταξη RGB (Red-Green-Blue), με το μπλε ταχύτερο των υπολοίπων.

Πράγματι, όπως φαίνεται από τη συρραφή στιγμιότυπων στην Εικόνα 3-25 η κατάταξη παραμένει η ίδια. Το πόδι με το αντίβαρο πέφτει μετά από 11 πλήρεις βηματισμούς, ενώ τα άλλα δυο καταφέρνουν 13 πλήρεις βηματισμούς πριν χάσουν το ύψος αναπήδησης.



Εικόνα 3-25. Στιγμιότυπα από την συγχρονισμένη αναπαράσταση τριών διαφορετικών ποδιών: ο αλγόριθμος ελέγχου επιβάλλει σταθερή ροπή κατά τη φάση εδάφους και σταθερή γωνία πρόσπτωσης.

Το πλήθος των ολοκληρωμένων βηματισμών θεωρείται όμως ότι είναι ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες της κίνησης και δεν λαμβάνεται υπόψιν. Αντιθέτως, η σταθερή κατάταξη καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης κρίνεται ως αποτέλεσμα που μπορούμε να εμπιστευτούμε.

3.2 *Συμπεράσματα*

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δικαιώνουν την πρώτη αναλυτική προσέγγιση που έγινε βάσει της οποίας το αντίβαρο έχει να συνεισφέρει στην κατεύθυνση της αύξησης της ιδιοσυχνότητας του ποδιού. Στο μονόποδο σύστημα βέβαια δεν μπορούμε να δούμε σαν αποτέλεσμα υπολογιστικό την μείωση της πρόνευσης, αλλά εφόσον το πόδι με αντιδράσεις στήριξης μετακινείται γρηγορότερα μπροστά, αυτό σημαίνει πως στον αέρα και λόγω διατήρησης της στροφορμής θα επιτύχει την μετατόπιση αυτή και πάλι με ευνοϊκότερους όρους. Θα φτάσει δηλαδή στην επιθυμητή γωνία συντομότερα, ασκώντας μικρότερη ώση στον κορμό.

Κεφάλαιο 4
Τεχνητοί Μύες

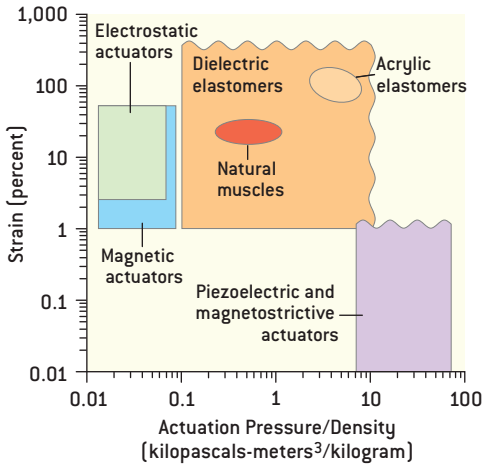
4.1 *Εισαγωγή*

Επί δεκαετίες, οι μηχανικοί αναζητούν το τεχνητό ισοδύναμο του μυός, ένα από τα πιο αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά των οποίων είναι η ανεξαρτησία μεγέθους. Μπορούν δηλαδή να επιδρούν το ίδιο αποτελεσματικά σε όλες τις κλίμακες, από τα έντομα μέχρι τον ελέφαντα.

Με την εμφάνιση των ευφυών υλικών υπήρξε εύλογη αισιοδοξία πως ίσως να μην απέχουμε πλέον πολύ από την αντικατάσταση των μηχανικών επενεργητών. Η ανάγκη που μας οδηγεί εκεί είναι από τεχνικής πλευράς η αναζήτηση ελαφρύτερων και πιο ευέλικτων λύσεων επενέργησης σε μικρής κλίμακας κατασκευές. Σε όρους εξέλιξης των τεχνολογικών κατασκευών ως προς την ομαλότερη ενσωμάτωσή τους στο περιβάλλον του ανθρώπου, μας οδηγεί η ανάγκη για μίμηση του τρόπου επενέργησης και της εμπειρίας –υφή, όψη, βάρος, άκουσμα– που γνωρίζουμε από τη φύση. Για το σκοπό αυτό δεν αρκεί να είναι απλώς ελαφρύτεροι και χωρίς μηχανικά τμήματα, όπως γρανάζια και άξονες μετάδοσης κίνησης, αλλά θα πρέπει οι νέοι αυτοί επενεργητές να είναι αθόρυβοι και να προσαρμόζονται στο περιβάλλον του ανθρώπου ή ακόμα και στο ανθρώπινο σώμα.

Από τα τέλη της δεκαετίας του '90 οι έρευνες εστιάζονται σε ένα από τα πιο υποσχόμενα υλικά σε αυτή την πρόκληση, τα ηλεκτροενεργά πολυμερή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-1, τα ηλεκτροενεργά πολυμερή βρίσκονται σε μια ευρεία περιοχή σε όρους παραμόρφωσης - τάσης που περιλαμβάνει και ξεπερνά σε ικανότητες τους φυσικούς μυς.

Πρόκειται για ελαστομερή υλικά (λαστιχένια, όπως οι σιλικόνες και τα ακριλικά) με χαρακτηριστικά διηλεκτρικού τα οποία επενδύονται με αγώγιμα σωματίδια και στις δυο μεγάλες τους επιφάνειες, όπως δείχνει η Εικόνα 4-2. Τα αγώγιμα αυτά σωματίδια βρίσκονται σε αιώρηση μέσα στο πλέγμα ενός μαλακού πολυμερούς. Ο λόγος είναι να είναι εύκαμπτα όπως θα δούμε παρακάτω. Κατόπιν, οι αγώγιμες αυτές επιφάνειες εκτίθενται σε ηλεκτρικό πεδίο υψηλής τάσης – της τάξης των kV– και φορτία αντίθετης πολικότητας συσσωρεύονται σ' αυτές.

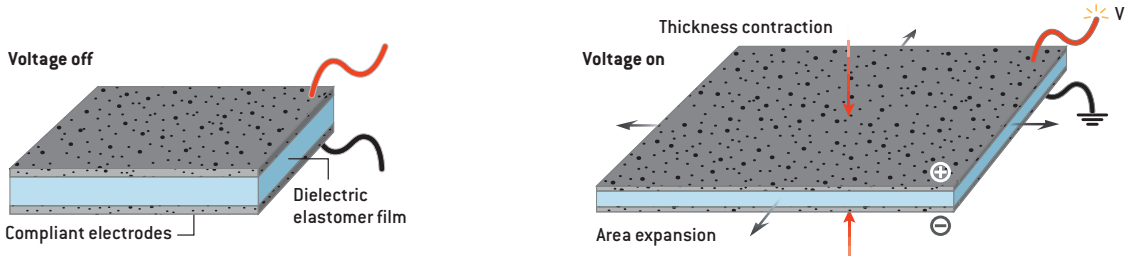


Εικόνα 4-1. Ταξινόμηση των ηλεκτροενεργών πολυμερών σε σχέση με άλλα ευφυή υλικά και τους φυσικούς μυς σε όρους τάσης (ανά πυκνότητα)-παραμόρφωσης [4].

Το διηλεκτρικό που βρίσκεται ανάμεσά τους, εμποδίζει το φορτίο να περάσει ακριβώς όπως σε έναν πυκνωτή. Αναπτύσσεται λοιπόν μια ελκτική τάση ανάμεσα στις δυο επιφάνειες που περιγράφεται από την εξίσωση Maxwell, ως εξής:

$$P = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_o \left(\frac{V}{t}\right)^2 (Pa) \qquad (4\text{-}1)$$

όπου ε_o η διηλεκτρική σταθερά του κενού, ε_r η διηλεκτρική σταθερά του υλικού, V η τάση που εφαρμόζεται σε kV και t το πάχος του υλικού. Το διηλεκτρικό αν και ελαστικό, είναι ασυμπίεστο που σημαίνει ότι ο όγκος του δεν μπορεί να συρρικνωθεί. Συμπιέζεται λοιπόν υπό την τάση Maxwell στην διεύθυνση του πάχους και εκτείνεται στις υπόλοιπες διευθύνσεις για κρατήσει τον όγκο του σταθερό, Εικόνα 4-2.



Εικόνα 4-2. Βασική αρχή λειτουργίας των ηλεκτροενεργών πολυμερών (DEAP) [4].

Η παραμόρφωση εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας (Young' s modulus) του υλικού και δίνεται αδιάστατη και στη διεύθυνση του πάχους t, ως εξής:

$$S_t = -\frac{P}{Y} \qquad (4\text{-}2)$$

Τα αγώγιμα σωματίδια επειδή αιωρούνται μέσα στο μαλακό πολυμερές, μπορούν να ακολουθήσουν την παραμόρφωση του διηλεκτρικού. Κατ' αυτή την έννοια οι δυο επενδεδυμένες

με αγώγιμα σωματίδια επιφάνειες αποτελούν ελαστικά ηλεκτρόδια που παρακολουθούν τη μεταβολή του διηλεκτρικού ενώ δεν παύουν να παραμένουν φορτισμένα. Κατά την αποφόρτιση παρεμβάλλονται αντιστάσεις μεταξύ των βραχυκυκλωμένων ηλεκτροδίων και το φορτίο αποβάλλεται με τη μορφή θερμότητας. Χωρίς πλέον την ύπαρξη της τάσης Maxwell το ηλεκτροενεργό πολυμερές επιστρέφει στο φυσικό του σχήμα.

Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των υλικών αυτών είναι ότι διατείνονται και για εναλλακτικές χρήσεις, όπως αυτή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή του αισθητήρα θέσης. Επειδή το πάχος και το συνολικό εμβαδόν των επιφανειών του υλικού είναι άμεσα συνδεδεμένο με την ηλεκτρική χωρητικότητά του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανάδραση. Επίσης με αντιστροφή του ρόλου και έναν συγχρονισμό της φόρτισης με την μηχανική παραμόρφωση, μπορούμε να επιτύχουμε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το ηλεκτροενεργό πολυμερές φορτίζεται ενώ έχει επιμηκυνθεί με μηχανικά μέσα και αφήνεται να επιστρέψει σε μεγαλύτερο πάχος με αποτέλεσμα οι δυο αγώγιμες επιφάνειες να απομακρύνονται και να αυξάνεται η τάση στους ακροδέκτες τους.

Τα υλικά αυτά περιγράφονται από τον σύνθετο όρο: διηλεκτρικά ηλεκτροενεργά πολυμερή (Dielectric Electro Active Polymers) και εν συντομία θα αναφέρονται στο εξής ως DEAP.

4.2 *Ομάδα εργαστηρίου*

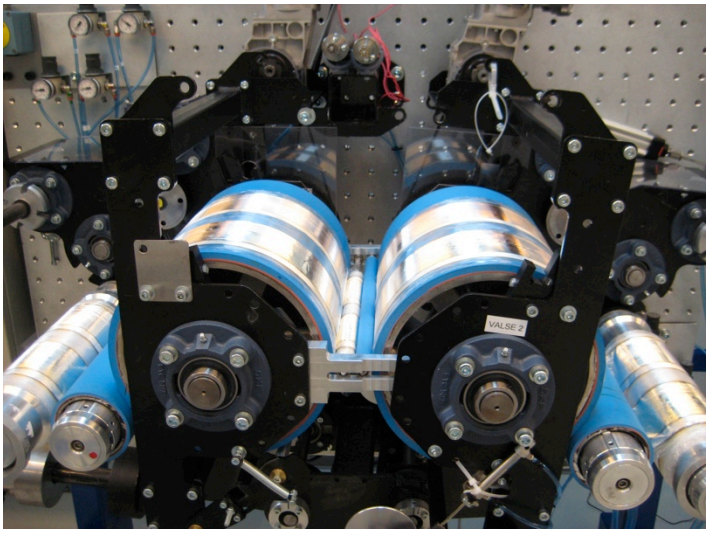
Στο σημείο αυτό θα ήθελα να αναφέρω τους ανθρώπους που συνέβαλλαν με τις δυνάμεις τους στην πραγματοποίηση των παρακάτω πειραμάτων.

Ο Ι. Κοντολάτης σχεδίασε και κατασκεύασε το πέλμα, έκανε εκτίμηση των απαιτούμενων ροπών επενέργησης, πρότεινε και κατασκεύασε τη συγκράτηση του ανταγωνιστικού ελατηρίου και βοήθησε στην κατασκευή του τελικού επενεργητή. Ο Μ. Μακροδημήτρης συνέβαλλε συνολικά στο έργο, από την υλοποίηση των ηλεκτρονικών και την κατασκευή των επενεργητών, τις μετρήσεις δυνάμεων με χρήση dSpace και ATI nano, τον χαρακτηρισμό των ελατηρίων και την διάγνωση και επισκευή των παράταιρων απωλειών που είχαμε στα ηλεκτρονικά. Ο Α. Νικολακάκης προσάρμοσε την μηχανοτρονική διάταξη του Α. Δημόπουλου -αρχικά ικανή για αναγνώριση μηχανικών παραμέτρων ιστών- στις ανάγκες των πειραμάτων χαρακτηρισμού του DEAP ενώ επίλυσε ποικίλα πρακτικά προβλήματα που προέκυψαν καθώς επίσης υλοποίησε τα ηλεκτρονικά ελέγχου του ρομπότ. Ο Α. Δημόπουλος, αν και απών, βοήθησε με την υπάρχουσα κατασκευή και τις σαφείς και καλογραμμένες οδηγίες που διατίθενται στη διπλωματική του εργασία ως προς τη χρήση της dSpace.

Τους ευχαριστώ θερμά καθώς τίποτα απ' τα επόμενα δεν θα ήταν δυνατό χωρίς τη συμμετοχή τους.

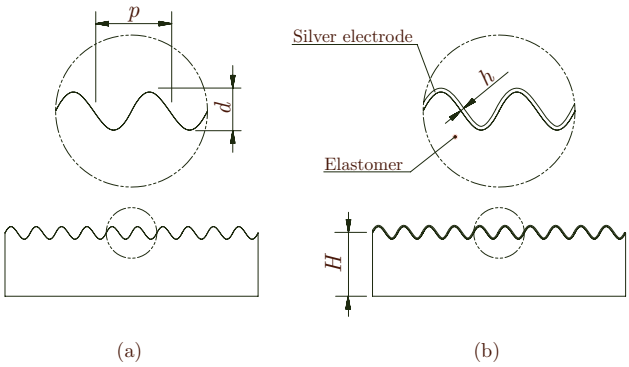
4.3 *Danfoss Polypower™ DEAP*

Τα τελευταία χρόνια η Danfoss Polypower A/S [16] ερευνά τα ηλεκτροενεργά πολυμερή και είναι σε θέση σήμερα να παράγει σε εμπορικό επίπεδο το προϊόν των ερευνών της. Πρόκειται για ένα ηλεκτροενεργό πολυμερές που διαμορφώνεται με διαδικασίες roll-to-roll (R2R), Εικόνα 4-3, και διατίθεται σε ενιαία κομμάτια πλάτους λίγων εκατοστών και μήκους κάποιων μέτρων, τυλιγμένα σε καρούλια. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα του προϊόντος είναι ότι διατίθεται έτοιμο προς χρήση, δηλαδή δεν χρειάζεται να επενδυθεί με αγώγιμα σωματίδια μιας και φέρει επιμεταλλωμένα ηλεκτρόδια. Η διαδικασία αυτή γίνεται εργοστασιακά με ειδικές μεθόδους ψεκασμού.



Εικόνα 4-3. Επεξεργασία και διαμόρφωση του φιλμ DEAP με διεργασίες roll-to-toll [40].

Ένα επιπλέον γνώρισμα του προϊόντος είναι η ύπαρξη κυματοειδών αυλακώσεων στη μια του πλευρά όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-4. Η αυλάκωση αυτή επιτυγχάνεται με μεθόδους φωτολιθογραφίας (laser).



Εικόνα 4-4. Κυματοειδής αυλάκωση στην επιφάνεια του φιλμ DEAP [39].

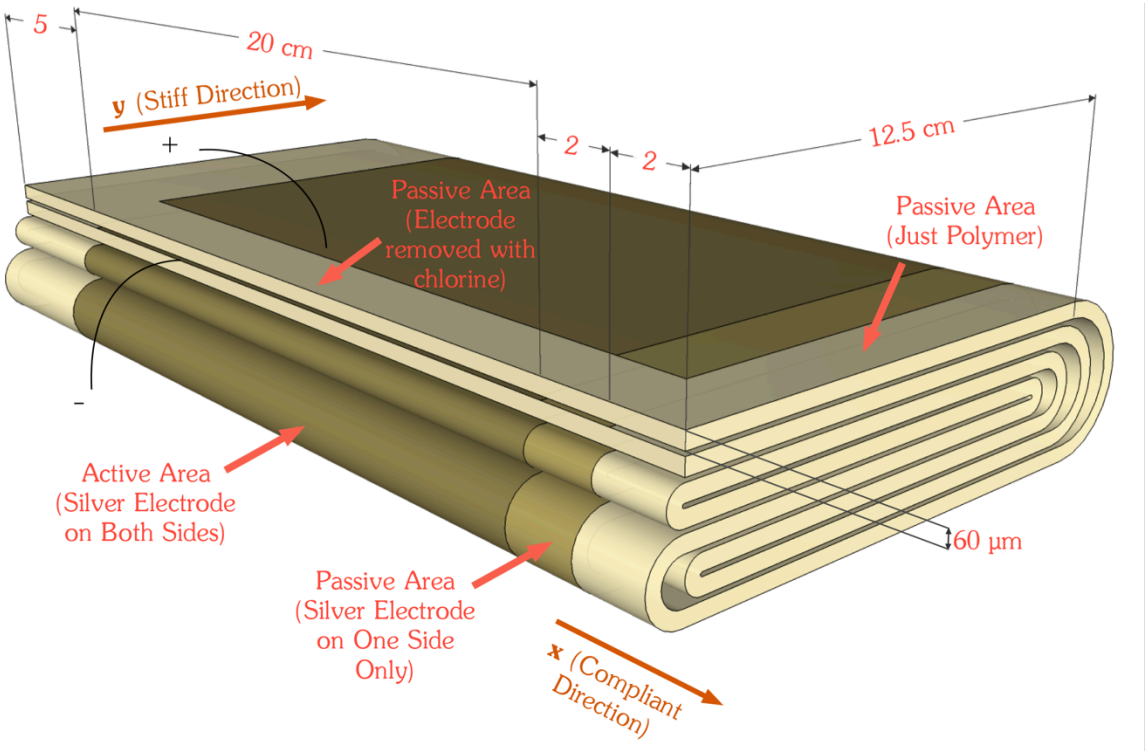
Τα αντίστοιχα μεγέθη που απεικονίζονται στην Εικόνα 4-4, έχουν ως εξής:

$$p = 10\mu m$$
$$d = 5\mu m$$
$$H = t = 60\mu m \qquad (4\text{-}3)$$
$$h = 100nm$$

Η αυλάκωση αυτή δίνει την προδιάθεση στο υλικό για σύσπαση στη διεύθυνση επιμήκυνσης της. Κατ' αυτή την έννοια όταν το υλικό φορτίζεται, δεν επιμηκύνεται προς όλες τις κατευθύνσεις αλλά όλη η δυνατή παραμόρφωση ακολουθεί την εύκαμπτη διεύθυνση (compliant direction), βλ. Εικόνα 4-5 και Εικόνα 4-6, λόγω της αυλάκωσης. Κατά την εύκαμπτη διεύθυνση το υλικό μπορεί να επιμηκυνθεί μέχρι το 30% του αρχικού του πλάτους. Κατά την δύσκαμπτη διεύθυνση η παραμόρφωση δεν είναι επιτρεπτή διότι καταστρέφει τα επιμεταλλωμένα ηλεκτρόδια.

Βάσει των ανωτέρω χαρακτηριστικών του υλικού, υπάρχουν δυο τρόποι κατασκευής επενεργητών από φιλμ DEAP. Στην πρώτη περίπτωση, Εικόνα 4-5, το φιλμ διπλώνεται στο επίπεδο. Χρειάζεται προσοχή να μην εισαχθούν τσαλακωμένες στρώσεις φιλμ που δεν θα συνεισφέρουν στην λειτουργία του επενεργητή. Για το λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να μην διπλώνεται το φιλμ περισσότερες από 3 φορές στο επίπεδο, καθώς από εκεί και έπειτα η επίδραση των τσαλακωμένων στρώσεων επιδρά ισχυρά στην απόδοση του επενεργητή.

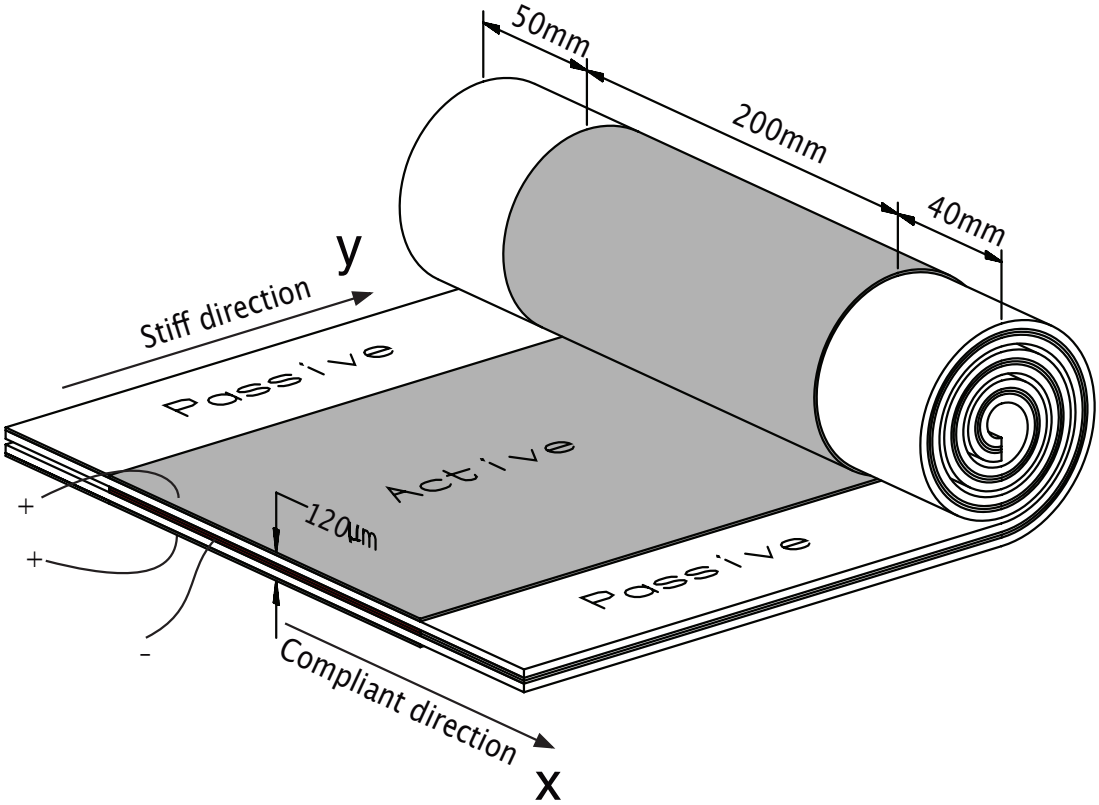
Αυτός ο τρόπος διπλώματος είναι κατάλληλος για μικρά κομμάτια φιλμ και όπως γίνεται κατανοητό, η κατασκευή δεν είναι αρκετά συμπαγής για να χρησιμοποιηθεί ως επενεργητής ώσης (push actuator).



Εικόνα 4-5. Φιλμ DEAP ενός μέτρου, διπλωμένο 3 φορές στη μέση, σχηματίζοντας επίπεδο επενεργητή έλξης (pull actuator).

Για το λόγο αυτό, ο επίπεδος επενεργητής είναι ικανός μόνο για ανάρτηση βάρους επάνω του ή για λειτουργία υπό προένταση σε διάταξη που φέρει ανταγωνιστικό ελατήριο, βλ. Εικόνα 5-2. Η αρχή λειτουργίας του υλικού παραμένει ίδια, δηλαδή με φόρτιση ο επενεργητής επιμηκύνεται στην διεύθυνση x, Εικόνα 4-5. Καθώς η φόρτιση χαμηλώνει τη σταθερά ελατηρίου του επενεργητή, η διάταξη και ο χρονισμός της επενέργησης γίνονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο επενεργητής να υπόκειται σε μεγάλη επιμήκυνση. Όταν, τελικά, αποφορτιστεί ηλεκτρικά έχει τόση δυναμική ενέργεια αποθηκευμένη, λόγω της επιμήκυνσης, που επιστρέφει έργο στο μηχανισμό.

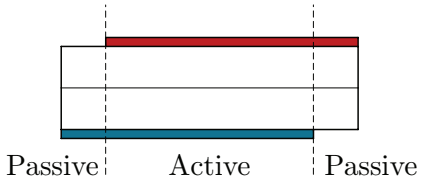
Στην δεύτερη περίπτωση, Εικόνα 4-6, διπλή στρώση φιλμ DEAP τυλίγεται σε κύλινδρο. Η λύση αυτή είναι πολύ πιο δύσκολη κατασκευαστικά, αλλά δημιουργεί έναν συμπαγή επενεργητή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως επενεργητής έλξης, είτε ως επενεργητής ώσης. Η αρχή λειτουργίας του υλικού χρησιμοποιείται ευθέως στον επενεργητή ώσης για την παραγωγή έργου. Καθώς το φιλμ φορτίζεται και επιμηκύνεται, ο κύλινδρος είναι επαρκώς συμπαγής ώστε να απομακρύνει μεταξύ τους τα δυο του άκρα και τα προσαρμοσμένα σε αυτά μέρη του μηχανισμού.



Εικόνα 4-6. Διπλή στρώση φιλμ DEAP τυλίγεται για να αποτελέσει κυλινδρικό επενεργητή ώσης (push actuator), διακρίνεται η εύκαμπτη (compliant) και η δύσκαμπτη (stiff) διεύθυνση καθώς και η ενεργή (active – επιμεταλλωμένη εκατέρωθεν) και η παθητική (επιμεταλλωμένη μερικώς ή καθόλου) περιοχή και οι διαστάσεις τους [39].

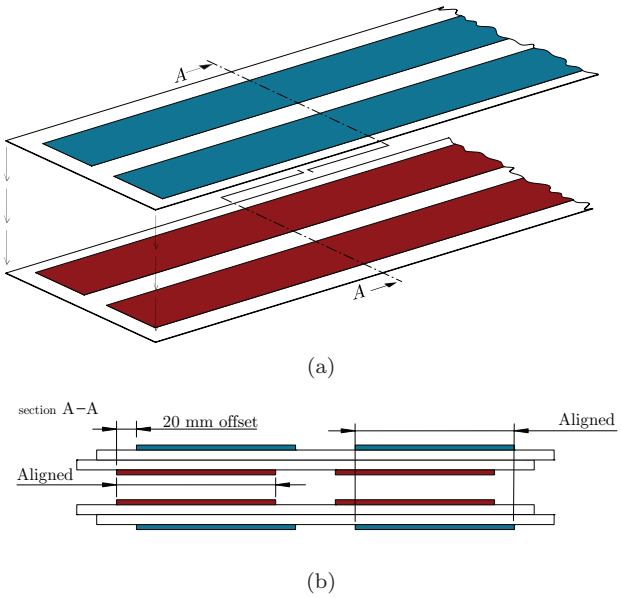
Σημαντική κατασκευαστική λεπτομέρεια που λαμβάνουμε υπόψιν μας σε όλες τις περιπτώσεις είναι η αποτροπή σπινθήρων μεταξύ των δυο επιμεταλλωμένων πλευρών του φιλμ. Για το λόγο

αυτό η επιμετάλλωση δεν γίνεται ακριβώς αντικριστά στις δυο πλευρές του φιλμ, αλλά με μια μικρή απόκλιση όπως δείχνει η Εικόνα 4-7. Αντίστοιχα δημιουργείται παθητική και ενεργή περιοχή, ανάλογα με το αν το υλικό περικλείεται εκατέρωθεν από επιμεταλλωμένο ηλεκτρόδιο ή όχι.



Εικόνα 4-7. Η επιμετάλλωση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται δυο περιοχές, μια ενεργή και μια παθητική [39].

Όπως ήδη δείξαμε στον επίπεδο και τον κυλινδρικό επενεργητή, φροντίζουμε να αποφευχθεί το βραχυκύκλωμα, είτε διπλώνοντας το φιλμ στη μέση είτε τοποθετώντας δυο στρώσεις φιλμ το ένα πάνω στο άλλο, Εικόνα 4-8. Έτσι κρατάμε πάντα την αντίθετα φορτισμένη επιφάνεια εσωτερικά (βλ. κόκκινη επιφάνεια). Η Εικόνα 4-8 αναφέρεται σε μια ειδική κατασκευή της εταιρίας που την προορίζει για κυλινδρικούς επενεργητές άπωσης (push actuator) μικρού πλάτους και φέρει δυο λωρίδες επιμετάλλωσης σε ένα κομμάτι φιλμ που θα κοπεί στη συνέχεια στη μέση. Το απλό φιλμ, που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματα, φέρει ενιαία επιμετάλλωση. Η λογική αποφυγής του βραχυκυκλώματος, βέβαια, παραμένει ίδια με αυτή που διαφαίνεται στην Εικόνα 4-8.



Εικόνα 4-8. Δυο φιλμ DEAP τοποθετημένα πρόσωπο-πλάτη με σκοπό την αποφυγή βραχυκυκλώματος μεταξύ των θετικών (κόκκινα) και των αρνητικών (μπλε) επιμεταλλωμένων ηλεκτροδίων, όταν το φιλμ τυλιχτεί για να αποτελέσει τον επενεργητή [39].

Στην εύκαμπτη διεύθυνση το υλικό έχει πλάτος w_o=20cm όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-6 και διατίθεται σε καρούλια των l_o=5m μήκος. Το πάχος του μονού φιλμ είναι t_o=60μm, όπως αναφέραμε και νωρίτερα. Η χωρητικότητά του καθορίζεται τότε, ως εξής:

$$C = C_o\left(1 + S_t\right)^{1.8}$$
$$C_o = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_o \frac{w_o \cdot l_o}{t_o} \qquad (4\text{-}4)$$

Παρατηρεί κανείς ότι έχουν δοθεί μεγάλα περιθώρια από την κατασκευάστρια εταιρία στα άκρα του φιλμ, Εικόνα 4-6 παθητικές περιοχές. Το φιλμ τσαλακώνει και μαζεύει το ίδιο εύκολα και έντονα όπως το σπιτικό σελοφάν. Στο πρόβλημα αυτό συνεισφέρει και το γεγονός ότι στα άκρα το φιλμ είναι πιο λεπτό απ' ότι στο κυρίως μέρος και λόγω της έλλειψης επιμετάλλωσης αλλά και πιθανώς λόγω των διεργασιών που το φθείρουν εντονότερα εξωτερικά. Τα σημαντικότερα μεγέθη που αφορούν το υλικό υπάρχουν στον παρακάτω πίνακα, με τη διαφορά ότι το υλικό που δοκιμάστηκε στα επόμενα πειράματα είχε πάχος 60 μm.

Στην διεύθυνση y, βλ. Εικόνα 4-6, λοιπόν και εφόσον κανείς χρειάζεται να χρησιμοποιήσει και τα 20 cm της ενεργής περιοχής, το φιλμ είναι έτοιμο για χρήση διότι διαθέτει παθητική περιοχή. Η προδιαγραφή του προϊόντος είναι τέτοια δηλαδή, ώστε να αποφεύγεται η αφαίρεση επιμετάλλωσης για μεγάλες περιοχές του φιλμ, κάτι που θα ήταν πολύ επίπονο και χρονοβόρο. Στην διεύθυνση x αντιθέτως, βλ. Εικόνα 4-5, επιβάλλεται η αφαίρεση της επιμετάλλωσης για τη δημιουργία παθητικής περιοχής. Χρειάζεται, λοιπόν, να αφαιρέσουμε επιμετάλλωση μόνο από τα δυο άκρα του φιλμ, πλάτους 20 cm.

Η επιμετάλλωση μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα εφόσον αντιδρά σε αραιωμένη χλωρίνη. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν η αραίωση ενός μέρους χλωρίνης και ενός μέρους νερού και η επάλειψη της προς αφαίρεση περιοχής με χρήση μπατονέτας. Χρειάζεται να αφήσουμε την χλωρίνη για ένα μικρό χρονικό διάστημα ώστε να αντιδράσει με τα προστατευτικό στρώμα της επιμετάλλωσης και θα παρατηρήσουμε ότι σκουραίνει όταν είναι έτοιμο προς αφαίρεση. Στο σημείο αυτό χρησιμοποιούμε κατά προτίμηση ένα καθαρό κομμάτι πανιού.

Πίνακας 4-1. Σημαντικά μεγέθη που αφορούν τις ιδιότητες του υλικού.

Static Material Properties			
ATTRIBUTE	Unit Of Measure	Demonstrated Current Performance	Expected Performance Medium Term
Dielectric Withstanding	V/μm	40	60
Dielectric Constant	Dimensionless	3,1	3,1
Film Thickness	μm	40	30
Volume Resistance	Ohm cm	> 10^{14}	> 10^{14}
Density	Kg/m3	1100	1100

Properties for back to back laminated film			
ATTRIBUTE	Unit Of Measure	Demonstrated Current Performance	Expected Performance Medium Term
Elongation	% at 2500V	3%	5%
Load capability (sq area)	N/cm2 at 2500V & 5% elongation	3	5
	N/cm2 at 2500 V & << 0.1% elongation (blocking force)	10	20
Response time	msec	< 10	< 10

Ένα από τα σημαντικότερα και πλέον προβληματικά σημεία του υλικού είναι η σύνδεσή του με την τροφοδοσία. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα πειράματα τα εύκαμπτα (μη ελαστικά) ηλεκτρόδια χαλκού (flexible PCBs) που διατέθηκαν από την κατασκευάστρια

εταιρία σε συνδυασμό με μια αγώγιμη κολλητική ταινία, αλλά υπήρξαν προβλήματα. Κύριος λόγος υπήρξε η δυσκαμψία τους που απαγόρευε την παρακολούθηση του παραμορφώσιμου DEAP, καταλήγοντας είτε στη φθορά της επιμετάλλωσης είτε στον εγκλωβισμό αέρα μεταξύ του ηλεκτροδίου και της επιμετάλλωσης, είτε στην εξολοκλήρου αποκόλληση του ηλεκτροδίου.

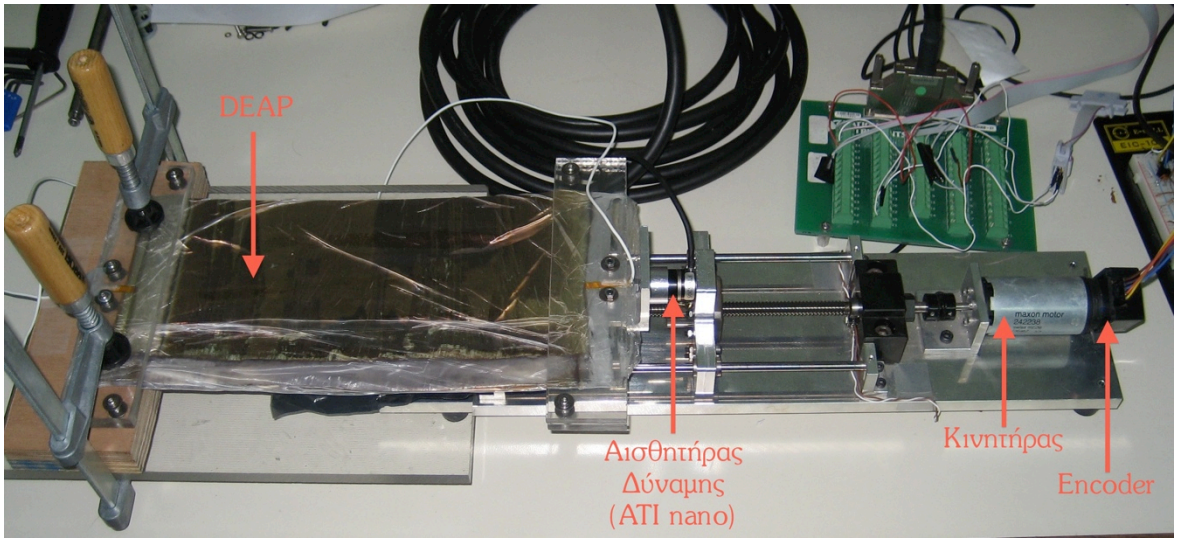
Μετά από έρευνα αγοράς, αγοράστηκαν τα υλικά που διακρίνονται στην Εικόνα 4-9. Αυτά τοποθετούνται επιτούτου πλάι σε ένα φύλλο αλουμινόχαρτο για να φανεί το μικρό τους πάχος. Σε επόμενα πειράματα θα δοκιμαστεί η κολλητική ταινία χαλκού σε συνδυασμό με μονωτικό σπρέι και με ένα μικρότερο κομμάτι φιλμ DEAP, απ' το οποίο θα έχει αφαιρεθεί η μια πλευρά επιμετάλλωσης, ως εναλλακτική λύση ηλεκτροδίου.

Εικόνα 4-9. Φύλλα χαλκού και αλουμινίου 0.025 mm(1 mil) πάχους και κολλητική ταινία χαλκού 4 mm x 0.025 mm x 33 m.

4.4 *Πειράματα χαρακτηρισμού*

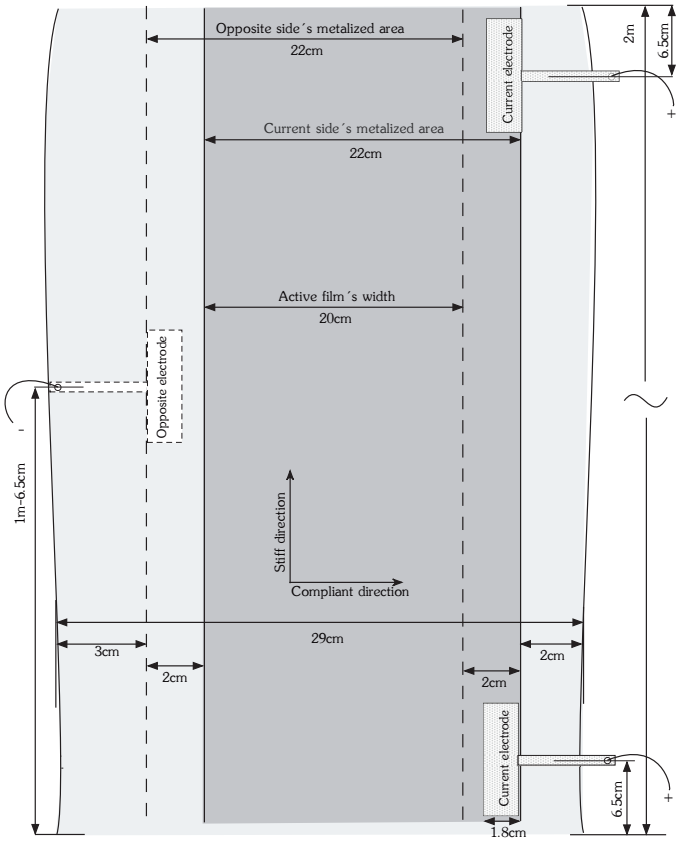
Για τον χαρακτηρισμό του υλικού είναι απαραίτητη η μέτρηση δύναμης και μετατόπισης με ικανοποιητική ακρίβεια. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μηχανοτρονική διάταξη του Α. Δημόπουλου με κάποιες μετατροπές. Προστέθηκε ένα μεγάλο κομμάτι plexiglass για να εκταθεί επαρκώς το μήκος της διάταξης ώστε να χωρέσει το DEAP. Προσαρμόστηκε στην άκρη του αισθητήρα δύναμης ATI nano ένα συνδετικό κομμάτι σχήματος L. Τέλος, στερεώθηκαν με σφιγκτήρες κομμάτια plexiglass που συγκρατούν τον επίπεδο επενεργητή έλξης της Εικόνας 4-5 πάνω σε κομμάτια ξύλου, βλ. Εικόνα 4-10.

Η μετατροπή αυτή μας επέτρεψε να έχουμε μια πολύ καλή ακρίβεια της επιβαλλόμενης μετατόπισης, εφόσον κάθε πλήρης περιστροφή του κοχλία της διάταξης, αντιστοιχεί σε μόλις 2 mm ευθύγραμμης μετατόπισης του αισθητήρα δύναμης. Η δύναμη και η απόκριση συναρτήσει του χρόνου μετρήθηκε με χρήση της dSpace.



Εικόνα 4-10. Επίπεδος επενεργητής έλξης DEAP τοποθετημένος στη διάταξη μέτρησης δύναμης.

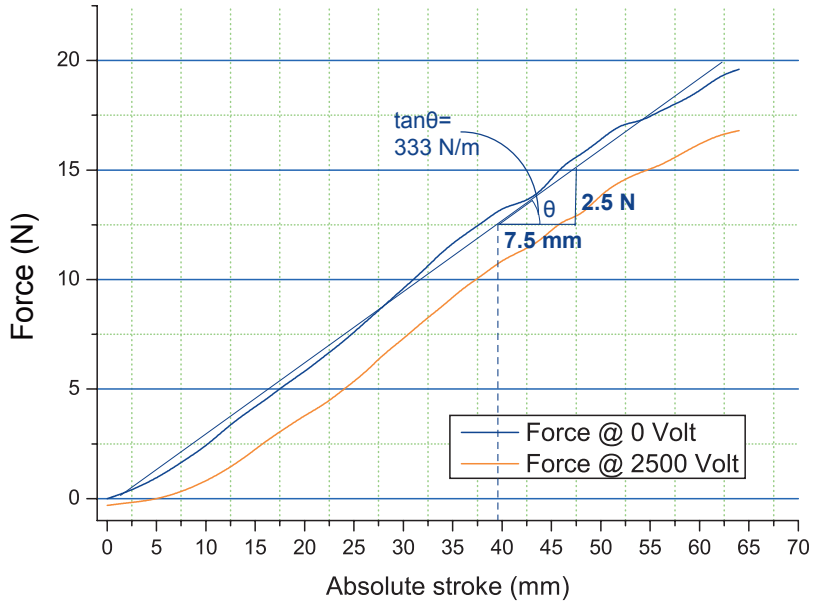
Ως προς την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων δοκιμάστηκαν δυο εναλλακτικοί τρόποι, όπως δείχνει η Εικόνα 4-11, χωρίς να παρατηρηθούν ιδιαίτερες διαφορές στην απόκριση. Προτείνεται λοιπόν να ακολουθείται ο πρώτος τρόπος (2 ηλεκτροδίων) ως ευκολότερος στην υλοποίηση.



Εικόνα 4-11. Τοποθέτηση εύκαμπτων ηλεκτροδίων και χαρακτηριστικά μήκη του φιλμ DEAP.

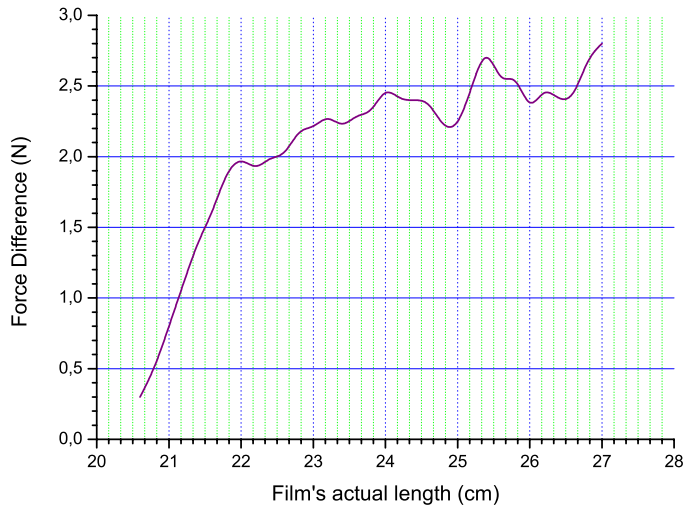
4.4.1 Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων για 1m επίπεδου υλικού, διπλωμένο στη μέση 3 φορές, με αρχική χωρητικότητα 67 μF απεικονίζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 4-12. Η συμπεριφορά του συμπίπτει με τις προδιαγραφές της κατασκευάστριας εταιρίας.



Εικόνα 4-12. Διάγραμμα δύναμης και μετατόπισης για επίπεδο επενεργητή DEAP διαστάσεων 1 m x 20 cm.

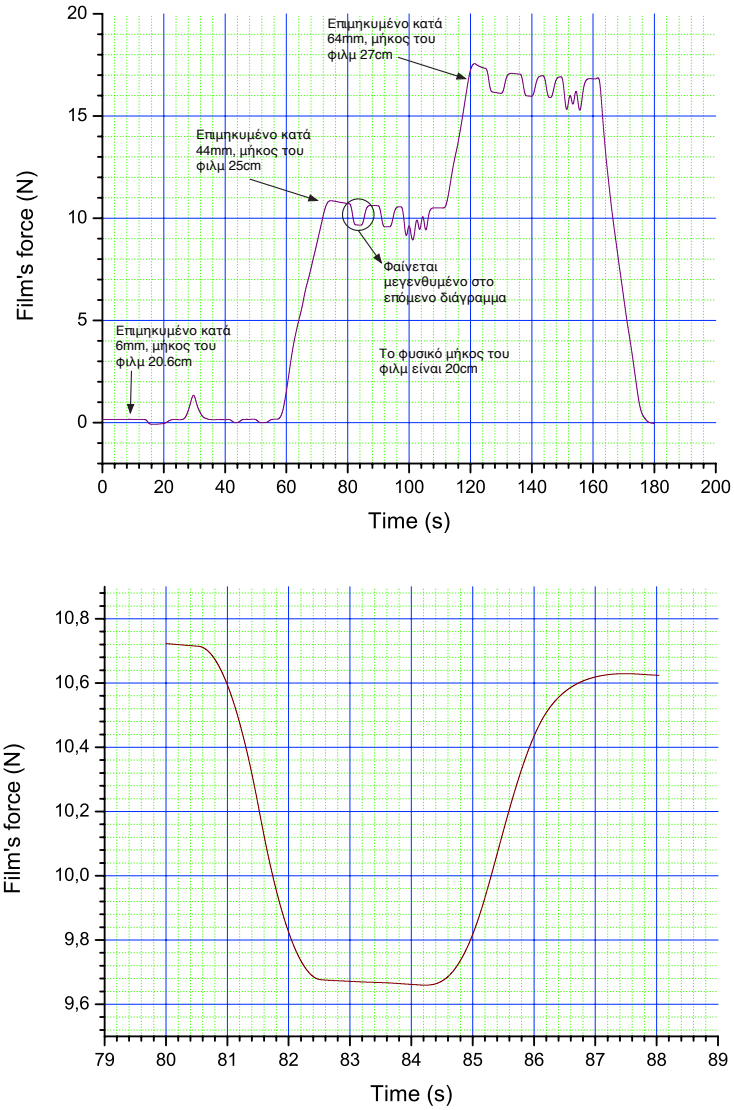
Η εκμεταλλεύσιμη δύναμη προκύπτει από την διαφορά ανάμεσα στην φορτισμένη και μη κατάσταση και για το 1 m υλικού προκύπτει κατά μέσο όρο περίπου ίση με 2 N, όπως δείχνει το διάγραμμα στην Εικόνα 4-13. Όπως περιμένουμε βάσει της αναλογίας μήκους και δύναμης, για τα 2 m υλικού που χρησιμοποιήθηκαν για τον τελικό επενεργητή η αντίστοιχη ωφέλιμη δύναμη είναι 4 N.



Εικόνα 4-13. Επιτυγχανόμενη διαφορά δύναμης ως προς το συνολικό ενεργό πλάτος του επενεργητή.

4.4.2 Διάγραμμα απόκρισης δύναμης

Με τη βοήθεια της dSpace καταγράφηκε ταυτόχρονα με τη δύναμη και ο χρόνος της φόρτισης - εκφόρτισης. Η εντολή δίνεται χειροκίνητα σε τυχαίες χρονικές στιγμές, όπως δείχνει το διάγραμμα στην Εικόνα 4-14. Στο συγκεκριμένο πείραμα αλλάζουμε την τάση ελέγχου από μηδέν σε 5V ακαριαία ανοιγοκλείνοντας το τροφοδοτικό. Αυτό διαπιστώσαμε αργότερα με έναν παλμογράφο ότι αφήνει την τάση σε μια τυχαία στάθμη πάνω από το μηδέν. Όταν δοκιμάσαμε να την μηδενίσουμε με το τροφοδοτικό ανοιχτό στα 0V, η επιμήκυνση και η αντίστοιχη πτώση δύναμης του DEAP ήταν εντονότερη. Η απόκριση του υλικού μπορεί να γίνει και καλύτερη από την απεικονιζόμενη και οι βελτιώσεις οφείλονται κυρίως στην ορθότερη χρήση των ηλεκτρονικών, π.χ. χρήση της επιπλέον εισόδου enable του φορτιστή όταν θέλουμε να επιτύχουμε ακαριαία φόρτιση – εκφόρτιση.



Εικόνα 4-14. Απόκριση δύναμης του επίπεδου επενεργητή DEAP 1 m συναρτήσει του χρόνου υπό τυχαίες φορτίσεις - εκφορτίσεις.

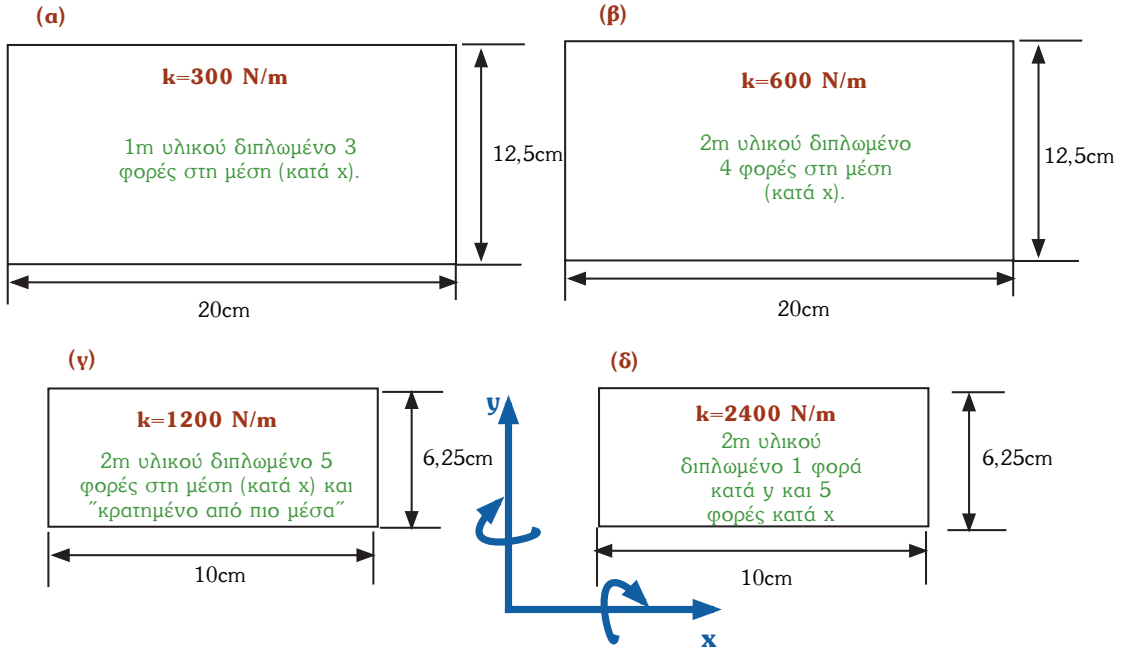
4.4.3 Προσδιορισμός σταθεράς ελατηρίου

Ο προσδιορισμός της σταθεράς του ελατηρίου είναι εύκολη υπόθεση όταν έχουμε ένα σωστό διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης όπως εκείνο στην Εικόνα 4-12. Για το 1m υλικό x 20cm η σταθερά ελατηρίου προκύπτει k=333 N/m. Σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις, η σταθερά ελατηρίου του φιλμ DEAP έχει τις αναλογίες συνδεσμολογίας ελατηρίων σε σειρά και παράλληλα, όπως δείχνει η Εικόνα 4-15.

Αναλυτικότερα, η συμπεριφορά του φιλμ στην προσθήκη μήκους (διεύθυνση y, Εικόνα 4-5) αναλογεί σε αύξηση της παρεχόμενης δύναμης -είτε ηλεκτρικής εφόσον επενεργείται, είτε παθητικής ως περισσότερα παράλληλα ελατήρια ίδιας ελαστικότητας. Κατά την αφαίρεση πλάτους (διεύθυνση x) το φιλμ αυξάνει την δυσκαμψία του, συμπεριφορά που αναλογεί στην αφαίρεση ελατηρίων που βρίσκονται σε συνδεσμολογία σειράς.

Το πόσες φορές είναι διπλωμένο στη μέση το φιλμ, βλ. Εικόνα 4-15 και εφόσον δεν εισαχθούν πολλές τσαλακωμένες στρώσεις, φαίνεται ότι δεν επιδρά στη σταθερά ελατηρίου του επενεργητή. Στην διεύθυνση x, το σημαντικό είναι το μήκος του φιλμ το οποίο είναι και σε άμεση συνάρτηση με την παραγόμενη δύναμη. Το δίπλωμα στην διεύθυνση y προκαλεί συμπεριφορά ανάλογη με την τοποθέτηση παράλληλου ελατηρίου όπως στην περίπτωση (δ). Επίσης η θέση σε αχρηστία τμήματος του ελατηρίου, περίπτωση (γ), προκαλεί συμπεριφορά ανάλογη με την αφαίρεση ελατηρίου από τη σειρά, δηλαδή αύξηση της σταθεράς ελατηρίου.

Ο τρόπος είναι ανάλογος με εκείνο των εμπορικών ελατηρίων που μετρώνται σε σκληρότητα ανά σπείρα και διατομή. Αν π.χ. επιλέγουμε τρόπο διπλώματος για φιλμ μήκους 2 m, η σταθερά ελατηρίου ανά πλάτος του φιλμ διαμορφώνεται στα k_{10cm}=1200 N/m, περίπτωση (γ). Αν κανείς χρησιμοποιήσει και τα 20 διαθέσιμα εκατοστά, επιστρέφει στην περίπτωση (β) με τα δυο ελατήρια των 10 cm σε σειρά και υποδιπλασιασμό της ισοδύναμης σταθεράς ελατηρίου.



Εικόνα 4-15. Διαμόρφωση της σταθεράς ελατηρίου του φιλμ DEAP αναλογικά με το μήκος και την διεύθυνση διπλώματός του, βλ. Εικόνα 4-5.

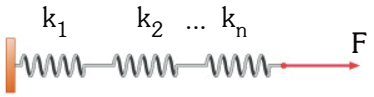
Υπενθυμίζουμε στο σημείο αυτό ότι στη συνδεσμολογία σειράς τα δυο ή περισσότερα ελατήρια δέχονται την ίδια δύναμη, ενώ το καθένα επιμηκύνεται αναλόγως τη σταθερά ελατηρίου του, βλ. Εικόνα 4-16, ως εξής:

$$\begin{gathered} F = k_{eq} \cdot x = k_1 x_1 = k_2 x_2 = \ldots = k_n x_n \Rightarrow \\ \left.\begin{gathered} x = \frac{F}{k_{eq}}, x_1 = \frac{F}{k_1}, x_2 = \frac{F}{k_2}, \ldots, x_n = \frac{F}{k_n} \\ x = x_1 + x_2 + \ldots + x_n \end{gathered}\right\} \Leftrightarrow \\ \frac{\cancel{F}}{k_{eq}} = \cancel{F}\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \ldots + \frac{1}{k_n}\right) \Rightarrow \\ \frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \ldots + \frac{1}{k_n} \end{gathered} \tag{4-5}$$

Επομένως αν $k=k_1=k_2=\ldots=k_n$, η Εξ. 4-5 μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{n}{k} \Rightarrow k_{eq} = \frac{k}{n} \tag{4-6}$$

Από την (γ) που έχουμε αχρηστεύσει 10 cm υλικού, πίσω στην (β) ισχύει η Εξ. 4-6. Όταν περνάμε από την περίπτωση (β) στην (δ), θεωρούμε δυο ελατήρια σταθεράς k_{10cm}=1200 N/m συνδεδεμένα παράλληλα που ισοδυναμούν με k_{eq}=2x1200 N/m.



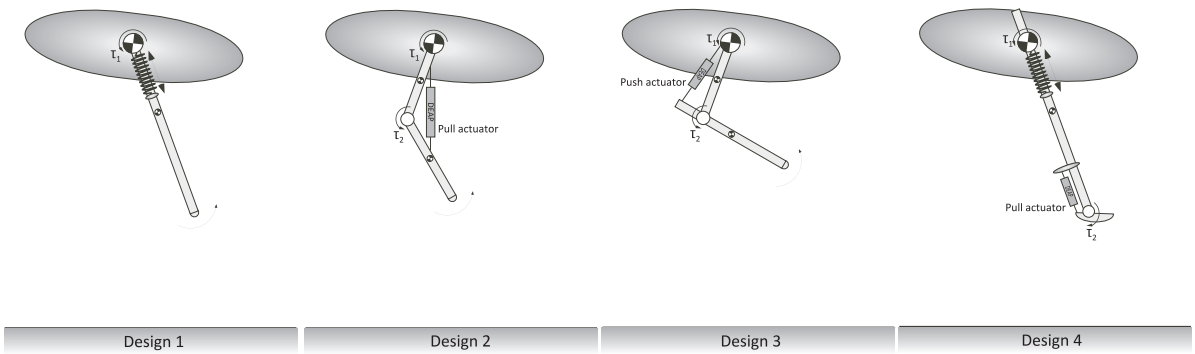
Εικόνα 4-16. Ελατήρια σε σειρά, δέχονται όλα την ίδια δύναμη, ενώ το καθένα επιμηκύνεται αντιστρόφως ανάλογα με τη σταθερά ελατηρίου του.

Κεφάλαιο 5
Πέλμα με DEAP

5.1 *Εισαγωγή*

Παράλληλα με την διαδικασία του χαρακτηρισμού του υλικού, θεωρήσαμε τρία προσχέδια εναλλακτικών ποδιών με χρήση του υλικού DEAP. Τα σχέδια αυτά φαίνονται στην Εικόνα 5-1. Το καθένα από αυτά έχει μειονεκτήματα και προτερήματα όσον αφορά την απαιτούμενη ροπή και το βαθμό δυσκολίας κατασκευής του επενεργητή, όπως θα αναλύσουμε παρακάτω. Μέσα από την διαδικασία αυτή και έχοντας πλέον υπόψιν μας τους φυσικούς και τεχνικούς περιορισμούς που μας επιβάλλει το υλικό DEAP, γίνεται σαφές το πως καταλήξαμε σε μια παραλλαγή του Design 4 (Εικόνα 5-2).

Το Design 1 είναι το υπάρχον και παρατίθεται μόνο για εποπτικούς λόγους. Το Design 2 θεωρεί προσθήκη γόνατου και κατασκευή επενεργητή έλξης (pull actuator) από DEAP. Σκοπός μας είναι να μπορούμε να δημιουργήσουμε ελεύθερο χώρο στο ρομπότ όταν μπροστά του συναντήσει κάποιο εμπόδιο. Αυτό επιτυγχάνεται με την επενέργηση του DEAP κατά την εναέρια φάση, λίγο πριν το εμπόδιο, σηκώνοντας το κάτω άκρο υψηλότερα και αποφεύγοντας τη σύγκρουση. Οι ροπές που απαιτούνται για την ανύψωση του κάτω άκρου είναι σχετικά υψηλές



Εικόνα 5-1. Προσχέδια εναλλακτικών ποδιών με χρήση του υλικού DEAP .

για τις δυνατότητες του DEAP και επιπλέον πρόβλημα δημιουργείται κατά την φάση εδάφους, όπου οι κρουστικές δυνάμεις-ροπές είναι πολύ υψηλές.

Για την υλοποίηση του σχεδίου, χρειάζεται επιπλέον προσθήκη ανταγωνιστικού ελατηρίου και πιθανώς και κάποιου μηχανισμού κλειδώματος του DEAP. Κατά την έννοια αυτή όταν το ρομπότ βρίσκεται στη φάση εδάφους, το DEAP δεν θα συμμετάσχει στην παραλαβή ροπών και δυνάμεων. Διαφορετικά, επειδή οι ροπές είναι υψηλές και αναμένεται και οι γωνίες του κάτω άκρου να είναι υψηλές κατά τη φάση εδάφους, το DEAP μπορεί να τσαλακωθεί και άρα να καταστραφεί. Το τσαλάκωμα το ίδιο δεν καταστρέφει το υλικό, αλλά εφόσον το DEAP φεύγει απ' τη θέση του, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος να συναντήσει οτιδήποτε αιχμηρό υπάρχει στη γειτονική του περιοχή και άρα να σκιστεί.

Στα πλεονεκτήματα του Design 2 συγκαταλέγεται η χρήση επενεργητή έλξης (pull actuator), που όπως έχουμε δείξει απ' τα πειράματα χαρακτηρισμού αναπτύσσει υψηλότερες δυνάμεις για το ίδιο μήκος υλικού, κάνοντας χρήση της δύναμης που παράγει το υλικό λόγω της ελαστικότητάς του και της επιβαλλόμενης επιμήκυνσης.

Στο Design 3 αντιθέτως, όταν το DEAP καλείται να δράσει ως επενεργητής ώσης (push actuator), οι ελαστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι εμπόδιο στη λειτουργία του και πρέπει να τις υπερνικήσει. Στη διάταξη αυτή επιτυγχάνεται και πάλι ο στόχος της αποφυγής εμποδίων, μόνο που λόγω διαφορετικής θέσης σύνδεσης του DEAP, τώρα απαιτείται επενεργητής ώσης. Το σοβαρότερο μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι τα πολλά μέτρα υλικού που θα χρειαστούν ώστε να πάρουμε τις απαιτούμενες ροπές και δυνάμεις. Μια τέτοια διαδικασία όμως χρειάζεται ειδικές διατάξεις τυλίγματος και περαιτέρω μελέτη για να επιτευχθεί.

Στα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι η επιμήκυνση του DEAP κατά τη φάση εδάφους και η αποθήκευση της κινητικής ενέργειας σε δυναμική λόγω ελαστικότητας του υλικού.

Στο Design 4, επιλέγεται η χρήση επενεργητή έλξης που έχει μεγαλύτερες πιθανότητες να κατασκευαστεί με επιτυχία. Μια τέτοια διάταξη, θα επιτρέψει όπως είπαμε τη δημιουργία πιο ισχυρών επενεργητών, αλλά λόγω στενών χρονικών περιθωρίων δεν επιλέχθηκε σαν λύση.

Η διάταξη αυτή έχει ενδιαφέρον γιατί επιτρέπει την προσθήκη βαθμού ελευθερίας στο ρομπότ, μακριά από τον κορμό του, όπου απαιτούνται ελαφρύτεροι μηχανισμοί για να μην αυξάνουν πολύ την αδράνεια του ποδιού. Η ιδέα είναι να ξεκινά τη δράση του το DEAP, εφόσον το πόδι περάσει την κατακόρυφο κατά τη φάση εδάφους. Επιμηκύνεται χρονικά, με αυτό τον τρόπο, η επαφή του ρομπότ με το έδαφος καθότι ενώ το άκρο του ποδιού θα έχει ήδη απογειωθεί, το άκρο του πέλματος θα είναι ακόμα σε επαφή συνεισφέροντας ώση στο σύστημα.

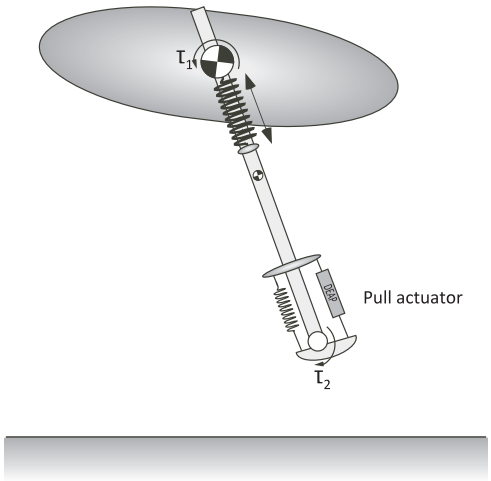
Επιπλέον, παρακάμπτει την απαίτηση υψηλών δυνάμεων, διότι το πέλμα έχει μικρό σχετικά μήκος και αν κατασκευαστεί και από ελαφρύ υλικό μπορεί να έχει ιδιαίτερα χαμηλή αδράνεια.

Το μειονέκτημα, όπως γίνεται φανερό, είναι ότι δεν συνεισφέρει στην αποφυγή εμποδίων κατά την εναέρια φάση. Επιπλέον, ο ρόλος του είναι καθαρά συμπληρωματικός,

εφόσον θα δίνει κάτι παραπάνω κατά τη φάση της απογείωσης. Δεν παραλαμβάνει δηλαδή δυνάμεις και ροπές. Αποτελεί όμως ένα πολύ κατάλληλο δοκιμαστικό πεδίο για το DEAP.

Το σοβαρότερο μειονέκτημα της εν λόγο διάταξης που χρειάστηκε να ξεπεραστεί, ήταν η ελεύθερη κίνηση του πέλματος στην εναέρια φάση. Κατά τη διάρκεια της εναέριας φάσης, όπου το DEAP παραμένει ανενεργό και δεν υπάρχει και η αντίδραση του εδάφους, το πέλμα θα ήταν ελεύθερο να περιστραφεί και πιθανώς να δράσει το ίδιο σαν εμπόδιο κατά την τοποθέτηση του ποδιού στη γωνία πρόσπτωσης. Η ιδέα που υπήρξε εδώ, οφείλεται στους ανταγωνιστικούς μυς που συναντώνται στη φύση και μας οδήγησε στην τοποθέτηση ανταγωνιστικού ελατηρίου με παρόμοια χαρακτηριστικά με το DEAP, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-2.

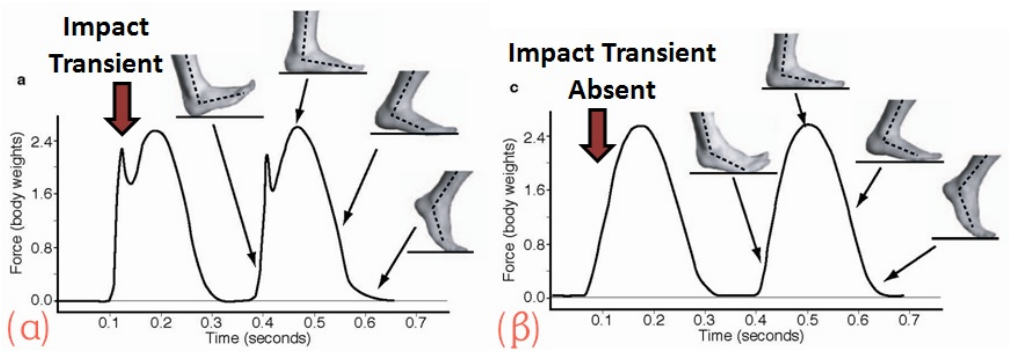
Στη διάταξη αυτή, φροντίζουμε να δώσουμε μια αρχική προένταση και στα δυο στοιχεία (ελατήριο και DEAP) ώστε να ισορροπήσουν στο σημείο όπου το πέλμα είναι κάθετο στο πόδι. Φορτίζοντας λοιπόν το DEAP, μετά την κατακόρυφο κατά τη φάση εδάφους, χαμηλώνουμε ουσιαστικά την σταθερά ελατηρίου του DEAP και αφήνουμε το ανταγωνιστικό ελατήριο να υπερισχύσει.



Εικόνα 5-2. DEAP με τη βοήθεια ανταγωνιστικού ελατηρίου επενεργεί στο πέλμα.

Το πέλμα θα κινηθεί δεξιόστροφα, ωθώντας όλο το σύστημα μπροστά. Το DEAP θα πρέπει να αποφορτιστεί εγκαίρως, πριν το πόδι ξεκινήσει την πορεία του για να φτάσει στη γωνία πρόσπτωσης και αφού το σύστημα έχει απογειωθεί. Με αυτό τον τρόπο θα προλάβει το πέλμα να επανέλθει στην οριζόντια θέση, ώστε να μην αποτελέσει εμπόδιο στην περίπτωση χαμηλού ύψους αναπήδησης του ρομπότ.

Σημαντική επίσης μπορεί να αποδειχτεί η ύπαρξη πέλματος στην απορρόφηση των κραδασμών, αν τοποθετηθεί έτσι ώστε να έρχεται πρώτο σε επαφή με το έδαφος Εικόνα 5-3. Οι έρευνες που έχουν γίνει σε αυτή την κατεύθυνση δείχνουν ότι όταν ο άνθρωπος τρέχει ξυπόλυτος, τα ένστικτα αυτοσυντήρησης τον ωθούν προς την ομαλότερη για το σώμα του κίνηση που είναι εκείνη που επιτυγχάνεται με το πέλμα να προσγειώνεται πριν τον αστράγαλο.



Εικόνα 5-3. Δυνάμεις κρούσης από πειραματικά δεδομένα σε αθλητές [25]. (α) Δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά το τρέξιμο με τη φτέρνα να έρχεται πρώτα σε επαφή με το έδαφος, (β) Με το πέλμα να έρχεται πρώτο σε επαφή με το έδαφος

5.2 *Κατασκευή του επενεργητή*

5.2.1 Επιλογή διαστάσεων επενεργητή

Όπως γνωρίζουμε από τον χαρακτηρισμού του DEAP, το μήκος του υλικού μπορεί να είναι από λίγα εκατοστά μέχρι 5 m συνεχόμενα (η PolyPower™ διαθέτει καρούλια των 5m) και συνεισφέρει στη δύναμη του επενεργητή. Αντίστοιχα, το ενεργό πλάτος, δηλαδή το πλάτος εκείνο του DEAP που καλύπτεται και από τις δυο πλευρές με επιμεταλλωμένα ηλεκτρόδια, ευθύνεται για την επιτρεπόμενη επιμήκυνση.

Στην εφαρμογή του ποδιού με πέλμα, χρειαζόμαστε όσο το δυνατόν συμπαγή επενεργητή. Υπάρχει όμως παράλληλα ο περιορισμός της επιτρεπόμενης επιμήκυνσης πριν αρχίσουν να καταστρέφονται τα επιμεταλλωμένα ηλεκτρόδια, το οποίο σημαίνει ότι όσο μικρότερο ενεργό πλάτος διαθέτει ο επενεργητής τόσο μικρότερη επιμήκυνση του επιτρέπεται. Το αρχικό ενεργό πλάτος του DEAP είναι 20 cm και η επιτρεπόμενη επιμήκυνση είναι 30%, δηλαδή 6cm. Θεωρήσαμε λοιπόν μια ασφαλή τιμή τα 10 cm ενεργού πλάτους DEAP με 3 cm επιτρεπόμενη επιμήκυνση.

Στον περιορισμό του μήκους μας έχει οδηγήσει μια ακόμα κατασκευαστική απαίτηση εκτός του συμπτυγμένου χώρου, εκείνη των ηλεκτροδίων να βρίσκονται εκτός της περιοχής που επιμηκύνεται.

Όσον αφορά το μήκος του επενεργητή και την συγκεκριμένη εφαρμογή, θα μας ενδιέφερε να παράγουμε περίπου 3 Nm που είναι ένα όριο πάνω από το οποίο το πέλμα σηκώνει το βάρος του υπόλοιπου ρομπότ και στέκεται στη μύτη. Με ένα μικρό πέλμα των 5cm, χρειάζονται 60 N δύναμη για να επιτευχθούν τα 3 Nm. Χρειάζονται δηλαδή, βάσει του χαρακτηρισμού, 30 m DEAP (2 N για κάθε μέτρο) τα οποία και δεν διαθέταμε αλλά θα απαιτούσαν και ειδικές συνθήκες για να τυλιχτούν σωστά.

Περιοριστήκαμε λοιπόν σε έναν επενεργητή που θα δοκιμάσει την αξιοπιστία της αρχής λειτουργίας που περιγράψαμε στην ενότητα 5.1 και φαίνεται στην Εικόνα 5-2.

Καταλήξαμε στα 2m DEAP που είχαν δοκιμαστεί και κατά τα πειράματα χαρακτηρισμού. Το μήκος αυτό παράγει μια διαφορά δύναμης από την φορτισμένη στην αφόρτιστη κατάσταση

της τάξης των 4N και γνωρίζουμε ότι μπορούμε να επιτύχουμε το τύλιγμα με τα ήδη υπάρχοντα μέσα. Περιμένουμε επίσης η περιστροφή του πέλματος να είναι πολύ μικρή μεν, ορατή δε.

5.2.2 Επιλογή κυλινδρικού τυλίγματος

Ενώ τα πειράματα χαρακτηρισμού έγιναν με το DEAP διπλωμένο στο επίπεδο, για την εφαρμογή του ρομπότ θεωρήθηκε σκόπιμο να τυλιχτεί το υλικό κυλινδρικά. Εκεί μας οδηγεί η ανάγκη για συμπτυγμένα στοιχεία σε ένα τόσο μικρό χώρο. Επιπλέον, μια κυλινδρική διάταξη μπορεί να στηριχτεί με πολύ παρόμοιο τρόπο με του ελατηρίου, ελαχιστοποιώντας τις απαραίτητες κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες.

Ένας ακόμη πιο σημαντικός παράγοντας, όπως παρατηρήθηκε από τα πειράματα χαρακτηρισμού, είναι ότι το δίπλωμα στο επίπεδο υποβαθμίζει την ποιότητα του επενεργητή. Πολλές στρώσεις υλικού, επιφέρουν και πολλά τσαλακωμένα (ζαρωμένα) τμήματα τα οποία δεν συνεισφέρουν στην παραγωγή δύναμης. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο το τύλιγμα γύρω από έναν κυλινδρικό πυρήνα που θα εξασφαλίσει λιγότερα τσαλακωμένα τμήματα υλικού. Αργότερα, ο πυρήνας αυτός θα αφαιρεθεί.

5.2.3 Περιγραφή της μεθόδου τυλίγματος

Πριν όμως τυλίξουμε το υλικό γύρω από τον πυρήνα, χρειάζεται να το διπλώσουμε στη μέση. Ο λόγος είναι ότι πρέπει να αποφύγουμε οι δυο αντίθετα φορτισμένες πλευρές του DEAP να έρθουν σε επαφή, προκαλώντας βραχυκύκλωμα. Υπάρχει και η δυνατότητα να τυλίξουμε δυο χωριστά φύλλα το ένα πάνω στο άλλο, κάτι που απαιτεί περισσότερα ηλεκτρόδια, αλλά μας γλιτώνει από ένα χρονοβόρο κομμάτι της διαδικασίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήσαμε την πρώτη μέθοδο, προσπαθώντας να αφήσουμε άθικτους τους υπόλοιπους κυλίνδρους υλικού DEAP για μελλοντικά πειράματα.

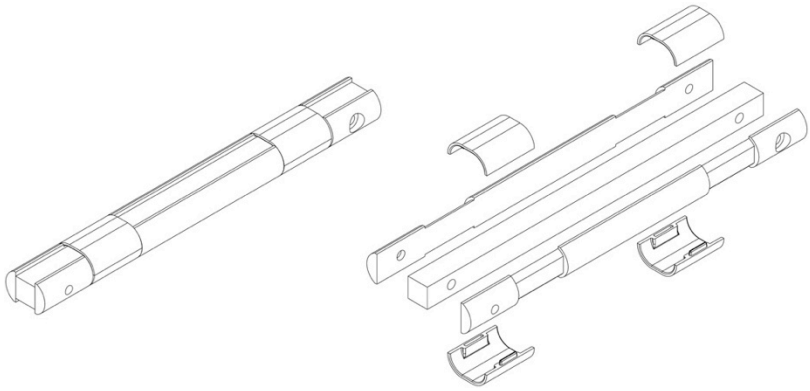
Χρησιμοποιήσαμε έναν βοηθητικό κύλινδρο όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-4, ώστε να φτάσουμε μέχρι τη μέση του απαιτούμενου μήκους DEAP, στη συγκεκριμένη περίπτωση 1m μιας και ο τελικός επενεργητής θέλουμε να έχει μήκος 2m. Με αυτή τη μέθοδο, το υλικό δεν ξετυλίγεται ολόκληρο από τον αρχικό του κύλινδρο για να διπλωθεί μετά στη μέση και να υπεισέλθουν πολλά τσαλακωμένα τμήματα. Στο τέλος της πρώτης φάσης αυτής της μεθόδου, ο βοηθητικός κύλινδρος φέρει το μισό του απαιτούμενου μήκους για τον επενεργητή DEAP. Ο αρχικός κύλινδρος εννοείται πως θα πρέπει να φέρει και αυτός το μισό ή περισσότερο από το μισό. Έπειτα, παίρνουμε έναν τρίτο μικρότερο κύλινδρο στον οποίο τυλίγουμε αντικολλητικό χαρτί (μαγειρικής χρήσης) και πάνω σε αυτό το χαρτί τυλίγουμε 2-3 στρώσεις από την προστατευτική μεμβράνη.

Τέλος, κρατάμε το DEAP από τη μέση και αρχίζουμε να τυλίγουμε ταυτόχρονα δυο στρώσεις υλικού πάνω στον πυρήνα, ξετυλίγοντας ταυτόχρονα τους δυο μεγαλύτερους κυλίνδρους.

Στη συνέχεια αφαιρούμε τον χάρτινο κυλινδρικό πυρήνα και τέλος αφαιρούμε το αντικολλητικό χαρτί. Το τελευταίο, δεν κατέστη δυνατό χωρίς τη χρήση κάποιου πιο εξειδικευμένου πυρήνα όπως αυτόν που φαίνεται στην Εικόνα 5-5.

Εικόνα 5-4. Διαδικασία τυλίγματος κυλινδρικού επενεργητή.

Αντιθέτως, ο τελικός επενεργητής δεν περιέχει προστατευτική μεμβράνη στο εσωτερικό του. Η δυσκολία αυτή οφείλεται στην φύση της προστατευτικής μεμβράνης, η οποία αναπτύσσει πολύ ισχυρές δυνάμεις κυρίως ηλεκτροστατικής φύσης γύρω από ό,τι τυλιχτεί. Θεωρείται πιθανό να χρειαστεί κάποιο στρώμα ταλκ ανάμεσα στο αντικολλητικό χαρτί και την προστατευτική μεμβράνη, προκειμένου να μπορέσει να αφαιρεθεί το χαρτί χωρίς να παρασυρθεί και το εσωτερικό του επενεργητή.



Εικόνα 5-5. Ελλειπτικός πυρήνας που αποσυναρμολογείται [40].

Αφού αφαιρεθεί ο πυρήνας και πριν ακόμα προστεθεί προστατευτική μεμβράνη εξωτερικά του κυλινδρικού επενεργητή (Εικόνα 5-6), προσθέτουμε τα ηλεκτρόδια ξετυλίγοντας ένα πολύ μικρό μήκος του DEAP και αποκαλύπτοντας τις άκρες του.

Εικόνα 5-6. Κυλινδρικός επενεργητής χωρίς προστατευτική μεμβράνη και ηλεκτρόδια.

Στον τελικό επενεργητή χρησιμοποιήθηκαν τα ηλεκτρόδια που παρείχε η PolyPower™, δηλαδή οι εύκαμπτοι χάλκινοι ακροδέκτες (flexible PCBs). Στη συνέχεια των πειραμάτων αποδείχτηκε πως αυτή δεν είναι η βέλτιστη επιλογή και αναζητήθηκαν εναλλακτικά ηλεκτρόδια, όπως φύλλο αλουμινίου και χαλκού (Εικόνα 4-9).

Μετά την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων και της προστατευτικής μεμβράνης, ο κυλινδρικός επενεργητής φαίνεται στην Εικόνα 5-7.

Εικόνα 5-7. Κυλινδρικός επενεργητής με προστατευτική μεμβράνη και ηλεκτρόδια.

5.2.4 Χαρακτηρισμός του επενεργητή

Ο επενεργητής θα πρέπει να χαρακτηριστεί και να βεβαιωθούμε για την σωστή λειτουργία του. Αφού τοποθετήσουμε τα ηλεκτρόδια, ελέγχουμε με το πολύμετρο για τυχόν βραχυκύκλωμα. Εφόσον, η αντίσταση βρίσκεται στην τάξη των ΜΩ, συνεχίζουμε μετρώντας την χωρητικότητα του επενεργητή.

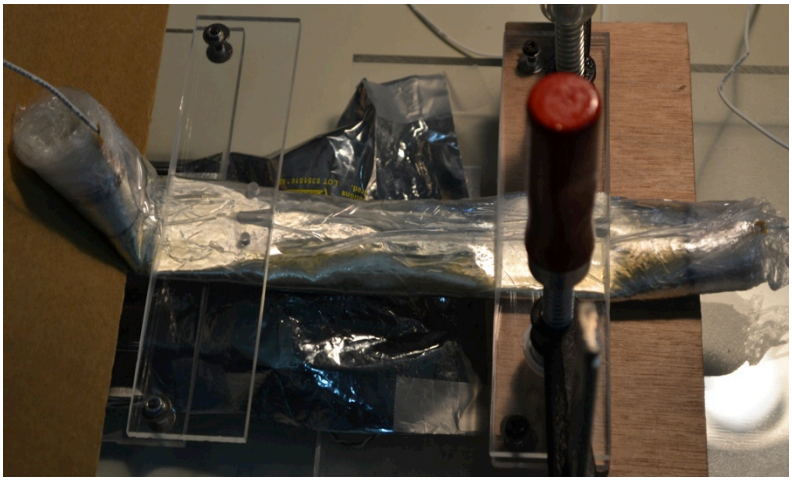
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-7, η χωρητικότητά του τελικού επενεργητή είναι 165.3 nF. Σύμφωνα με τα διαγράμματα της PolyPower™ [17], αντιστοιχούν 0.03425nF/cm^2. Η διαδικασία τυλίγματος δύσκολα ελέγχεται και επαναλαμβάνεται εφόσον είναι καθαρά χειρωνακτική όπως περιγράψαμε. Επομένως στο σημείο αυτό, μπορούμε να επαληθεύσουμε πόσο υλικό ακριβώς τυλίχτηκε. Ο επενεργητής που κατασκευάσαμε έχει ενεργό πλάτος όσο και το αρχικό καρούλι, δηλαδή 20cm, επομένως:

$$\frac{165.3\text{nF}}{0.03425\,\text{nF}/\text{cm}^2} = 4.826\text{cm}^2, \frac{4.826\text{cm}^2}{20\text{cm}} = 241.3\cdot 10^{-2}\text{m} \cong 2.4\text{m} \qquad (5\text{-}1)$$

Από τη χωρητικότητα μπορούμε επομένως να ξέρουμε το ακριβές μήκος DEAP που τυλίξαμε, που στην περίπτωση του επενεργητή είναι 2.4m.

Εφόσον η αντίσταση και η χωρητικότητα βρίσκονται μέσα στις αναμενόμενες τιμές, μπορούμε να συνεχίσουμε με τη φόρτιση του επενεργητή. Χρειάστηκαν κάποιες μικρές μετατροπές για να συγκρατηθεί ο κυλινδρικός επενεργητής στη διάταξη μέτρησης δύναμης, όπως δείχνει η Εικόνα 5-8. Η διαδικασία είναι πανομοιότυπη με εκείνη του χαρακτηρισμού του επίπεδου επενεργητή.

Ο επενεργητής επιμηκύνεται με βήμα 2mm και μετράται η δύναμη για 0 & 2500V. Τα δεδομένα αυτά μας δίνουν μια προσέγγιση της σταθεράς ελατηρίου του επενεργητή για 0 & 2500V, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-1.



Εικόνα 5-8. Τοποθέτηση του επενεργητή στη διάταξη μέτρησης δύναμης.

Ο επενεργητής όπως δείχνει και η Εικόνα 5-8 στερεώθηκε στη διάταξη επιμηκύνοντας μόνο τα 10cm που σκοπεύουμε να χρησιμοποιήσουμε και στο πόδι με πέλμα. Οι μετρήσεις ξεκινούν από τα 10.4cm, ώστε να αναπτυχθεί μια αρχική μετρήσιμη τάση και τελειώνουν στα 11.6cm, έχοντας φτάσει μόλις στο 15% της επιτρεπόμενης επιμήκυνσης.

Πίνακας 5-1. Τιμές δυνάμεων/επιμηκύνσεων του τελικού επενεργητή.

Επιμήκυνση	**@0V**	**@2500V**	**Διαφορά**	**Σταθερά Ελατηρίου**		**Διαφορά**
cm	N	N	μ. όρος: 4.1 N	N/m @0V	N/m @2500V	N/m
0.4	*2.0*	*0.0*	2.0	-	-	-
0.6	*4.2*	*0.7*	3.5	*1070*	*332*	737
0.8	*6.7*	*2.4*	4.3	*1250*	*828*	421
1.0	*9.2*	*4.6*	4.6	*1250*	*1100*	149
1.2	*11.5*	*6.7*	4.8	*1150*	*1050*	100
1.4	*13.6*	*8.8*	4.8	*1050*	*1050*	0
1.6	*15.5*	*10.6*	4.9	*950*	*900*	50
Γραμμή Τάσης (trend line):				**1.141.4**	**928.3**	**213.1**

Οι σταθερές ελατηρίου υπολογίζονται στον Πίνακα 5-1 ως η κλίση των τμημάτων των ευθειών μεταξύ των σημείων του παρακάτω διαγράμματος (Εικόνα 5-9). Το DEAP εμφανίζει, όπως παρατηρήσαμε και στο χαρακτηρισμό του επίπεδου επενεργητή, μη γραμμική συμπεριφορά στις πρώτες επιμηκύνσεις (4mm ÷ 8mm), ειδικά στην φορτισμένη κατάσταση.

Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (least-squares) μας δίνει μια γραμμή τάσης (trend line) με καλή προσέγγιση, ελαχιστοποιώντας το άθροισμα:

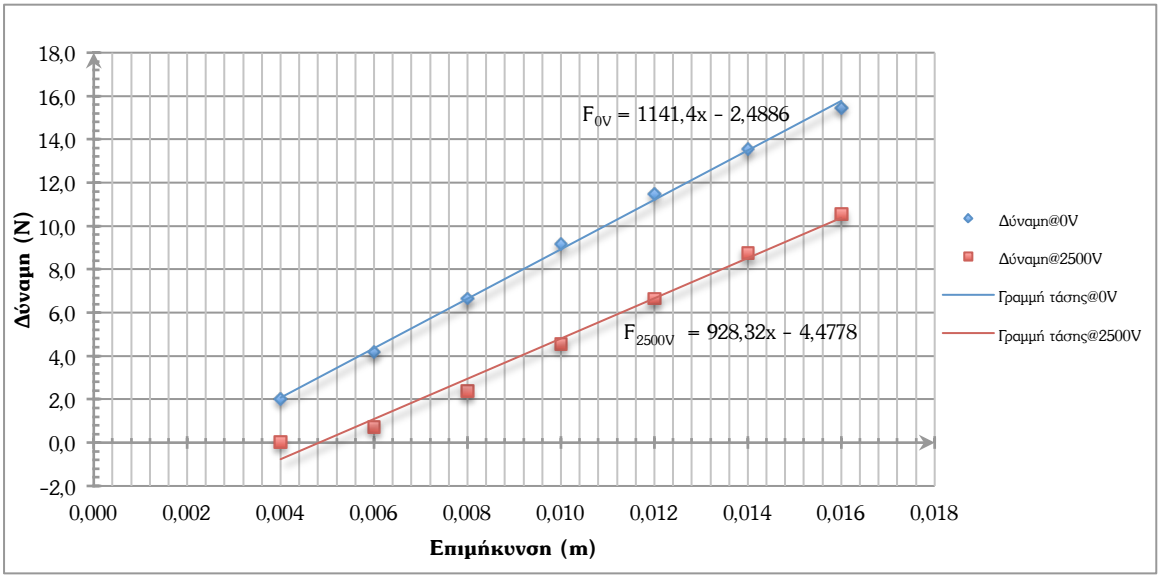
$$\sum_{x}\left\{\left[\left(\alpha \cdot x + \beta\right) - F\right]^2\right\} \tag{5-2}$$

όπου, το «α» αντιστοιχεί στην κλίση της γραμμής τάσης, δηλαδή στη σταθερά ελατηρίου του DEAP. Το «β» αντιστοιχεί στο σημείο τομής της γραμμής τάσης με τον άξονα της δύναμης «F». Η εξισώσεις δύναμης συναρτήσει της επιμήκυνσης είναι για τον τελικό επενεργητή:

$$F_{DEAP}^{@0V}(N) = 1141.4 \cdot x(m) - 2.5$$
$$F_{DEAP}^{@2500V}(N) = 928.3 \cdot x(m) - 4.5 \quad (5\text{-}3)$$

Για να δούμε τι ακριβώς συμβαίνει στην περιοχή πριν τα σημεία (4mm,2N στα 0V) και (4mm,0N στα 2500V) χρειαζόμαστε μια διάταξη πιο ειδική ώστε να αφαιρεί το βάρος του ίδιου του DEAP από τη μέτρηση και να γνωρίζουμε που ακριβώς ξεκινά η επιμήκυνση. Κάτι τέτοιο όμως δεν ενδιαφέρει ιδιαίτερα λόγω των ασήμαντων δυνάμεων που αναπτύσσονται στην περιοχή αυτή.

Αν παρατηρήσουμε την Εικόνα 4-15 (γ) του προηγούμενου κεφαλαίου, βλέπουμε ότι η τιμή που έχουμε υπολογίσει κατά αναλογία, δηλαδή k_{10cm}=1200N/m, για τα 2m υλικού πέφτουν αρκετά κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα. Η απόκλιση των περίπου 60N/m (1200-1140) πιθανότατα να οφείλεται σε όχι βέλτιστο τύλιγμα και στην ύπαρξη τσαλακωμένων τμημάτων υλικού.



Εικόνα 5-9. Διάγραμμα δυνάμεων του τελικού επενεργητή.

5.2.5 Τρόπος συγκράτησης του επενεργητή

Επόμενος στόχος εδώ είναι να βρεθεί ένας τρόπος συγκράτησης του επενεργητή. Καταρχήν η λύση των επίπεδων plexiglass που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον χαρακτηρισμό, απορρίπτονται λόγω όγκου, καταπόνησης του DEAP στα σημεία συγκράτησης και μη ικανοποιητικής λαβής για περαιτέρω στερέωση του επενεργητή πάνω στο πόδι.

Αναζητούμε κάτι που να εκμεταλλεύεται το ήδη συμπτυγμένο σχήμα του επενεργητή. Επιπρόσθετη δυσκολία εδώ αποτελεί το γεγονός ότι τα εύκαμπτα ηλεκτρόδια δεν είναι και ελαστικά και άρα πρέπει να μείνουν εκτός της περιοχής που επιμηκύνεται. Επίσης, όπως έδειξε ο χαρακτηρισμός του επενεργητή, θα χρειαστούμε μικρότερο μήκος καθ' ύψος του επενεργητή. Άρα καταλήγουμε με δυο άκρα που πρέπει να προσέξουμε να μην παραμορφωθούν και ξεκολλήσουν τα εύκαμπτα ηλεκτρόδια, ενώ τα κομμάτια αυτά υλικού φορτίζονται ηλεκτρικά, καταναλώνουν ισχύ από τον φορτιστή και άρα επιβραδύνουν τη φόρτιση, χωρίς όμως να

συνεισφέρουν σε δύναμη. Για τους λόγους αυτούς κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων τυλίγματος και ηλεκτροδίων.

Επειδή το DEAP φιλοδοξεί να μιμηθεί τους ανθρώπινους μυς και στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει και κυλινδρικό σχήμα, δεν είναι δύσκολο να μας παραπέμψει σε μυϊκή ίνα και να επιδιώξουμε να το συγκρατήσουμε παρομοίως. Παρατηρήστε την κατάληξη σε τένοντες (λευκές ίνες) όλων των μυών του ανθρώπινου ποδιού στην Εικόνα 5-10.

Εικόνα 5-10. Οι μυς του ανθρώπινου ποδιού, πλάγια όψη [32].

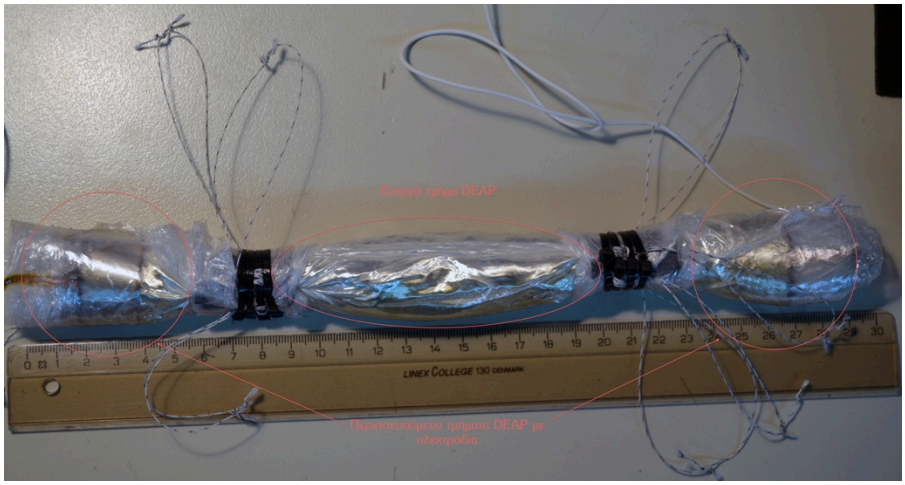
Στην κατεύθυνση αυτή δοκιμάσαμε να τυλίξουμε κομμάτια από λάστιχο ποτίσματος μέσα στην προστατευτική μεμβράνη, η οποία είναι γνωστή πλέον για τις έντονες τριβές που προκαλεί (Εικόνα 5-11). Τα κομμάτια που χρησιμοποιήσαμε προέρχονται από το εσωτερικό ενός διπλά επενδεδυμένου λάστιχου ποτίσματος και είναι ιδιαίτερα εύκαμπτα.

Εικόνα 5-11. Εσωτερικά κομμάτια από λάστιχο ποτίσματος.

Φροντίσαμε επίσης να λειάνουμε τις ακμές τους ώστε να μην προκαλέσουν κάποια σχισμή στο DEAP. Στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε αυτά τα υψηλής πρόσφυσης λάστιχα για να συγκρατήσουμε το υλικό με την επιπλέον βοήθεια δετικών καλωδίων (cable ties). Πάνω σε ένα από τα δετικά καλωδίων είναι περασμένα τέσσερα, συμμετρικά ως προς την περίμετρο του κυλίνδρου, νήματα υψηλής αντοχής και μικρής ελαστικότητας.

Εικόνα 5-12. Δετικά καλωδίων, νήμα και λάστιχο αποτελούν τη λαβή του DEAP.

Η λαβή, όπως έδειξαν τα περαιτέρω πειράματα, φάνηκε να επιτελεί το σκοπό της. Δεν τραυματίζεται το DEAP από το λάστιχο, ενώ είναι αρκετά σφιχτή και με υψηλή τριβή, ώστε να εμποδίσει το DEAP να γλιστρήσει από μέσα της. Ο τελικός επενεργητής, των 10cm x 2.4m, φαίνεται στην Εικόνα 5-13.



Εικόνα 5-13. Τελικός κυλινδρικός επενεργητής με λαβές.

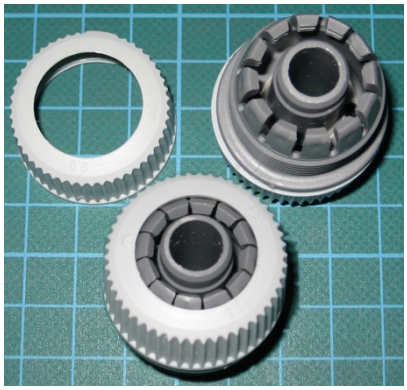
Όπως γίνεται αισθητό από την Εικόνα 5-13, τα τμήματα DEAP που περισσεύουν δεξιά και αριστερά απ' το ενεργό τμήμα του επενεργητή και φέρουν τα ηλεκτρόδια αποτελούν πρόβλημα από πολλές απόψεις. Ηλεκτρικά για τους λόγους που αναφέραμε, λειτουργικά διότι είναι στην ευθεία που πρόκειται να δεθεί το DEAP με το πέλμα και το πόδι και τέλος είναι επικίνδυνο από κακή τοποθέτηση ή παραμόρφωση αυτών των άκρων να ξεκολλήσουν τα ηλεκτρόδια.

Κρίνεται σκόπιμο λοιπόν να μελετηθεί περαιτέρω η κατασκευή του επενεργητή, εστιάζοντας στα σημεία αυτά.

Μια πρόταση που αξίζει επίσης να δοκιμαστεί είναι το να αποφύγουμε τη χρήση δετικών καλωδίων και στη θέση τους να μπουν πλαστικοί σφιγκτήρες που χρησιμοποιούνται ως σύνδεσμοι σε λάστιχα ποτίσματος (Εικόνα 5-14).

Οι σύνδεσμοι αυτοί είναι κατασκευασμένοι για να προσδένονται σε κούφιους εσωτερικά σωλήνες, γι' αυτό διαθέτουν και τον κυλινδρικό πυρήνα. Αφαιρώντας όμως αυτό το κομμάτι, ο υπόλοιπος μηχανισμός σύσφιξης θα μπορούσε να αποτελέσει μια λειτουργική λύση. Σε

συνδυασμό βέβαια με τα λαστιχένια κομμάτια που έχουμε περιγράψει και προστατεύουν τον επενεργητή.

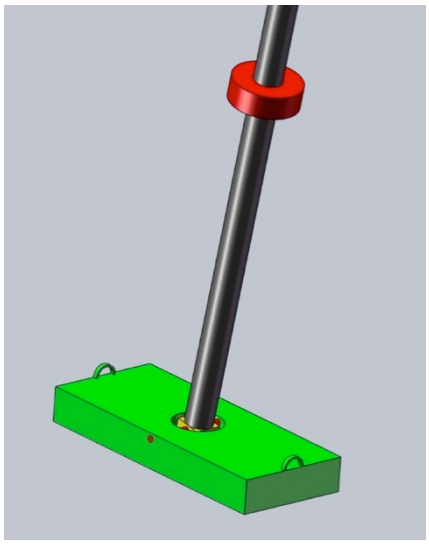


Εικόνα 5-14. Σύνδεσμος για λάστιχα ποτίσματος.

5.3 *Κατασκευή του πέλματος*

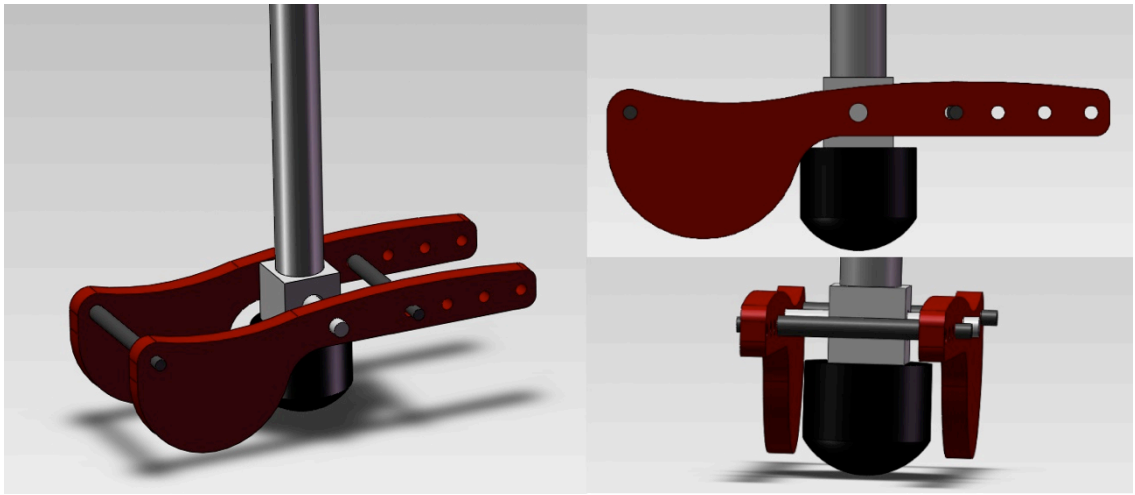
Το πέλμα σχεδιάστηκε με γνώμονα την μεταφορά των κρουστικών δυνάμεων της πρόσπτωσης στο ελατήριο συμπίεσης (κεντρικό ελατήριο του ποδιού), ώστε να μην υπάρξουν μεγάλες απώλειες ενέργειας λόγω ελαστικών ή μη παραμορφώσεων.

Το σχέδιο που φαίνεται στην Εικόνα 5-15 διαθέτει ημισφαιρική κοιλότητα υψηλής ποιότητας επιφανείας στο πέλμα και συμπληρωματική ημισφαιρική ακμή στον σύνδεσμο του ποδιού. Με την διαμόρφωση αυτή, σε οποιαδήποτε γωνία πέλματος και ποδιού δεν καταπονείται ο συνδετικός άξονας.



Εικόνα 5-15. Προσχέδιο πέλματος.

Το σχέδιο που τελικά υλοποιήθηκε, διέπεται από την ίδια αρχή λειτουργίας. Έχει πολύ μικρότερο όγκο και βάρος υλικού και θυμίζει περισσότερο μεγάλο δάχτυλο ανθρώπινου ποδιού παρά ολόκληρο πέλμα (Εικόνα 5-16).



Εικόνα 5-16. Τελικό πέλμα.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-16, με το σχέδιο αυτό διατηρείται το ήδη δοκιμασμένο σε πειράματα λαστιχένιο άκρο, απομακρύνεται το πίσω μέρος του πέλματος όσο το δυνατόν από το έδαφος, ενώ τέλος το μπροστινό είναι σε μικρή απόσταση από το έδαφος.

Επιπλέον οι διαστάσεις των κομματιών είναι μικρές και έτσι κατέστη δυνατό να κοπούν από φύλλα plexiglass στο laser. Σε σχέση με την κατεργασία κομματιών αλουμινίου στη CNC, το laser μειώνει το χρόνο κοπής δραματικά και αφήνει περιθώρια για βελτιώσεις μετά από τυχόν δοκιμές. Παράλληλα μειώνεται σημαντικά και το βάρος τους πέλματος, εφόσον το plexiglass έχει κατά 30% (και άνω) μικρότερη πυκνότητα από το αλουμίνιου [3],[37], [42].

5.4 *Επιλογή ανταγωνιστικού ελατηρίου*

5.4.1 Χαρακτηρισμός δοκιμίων

Για την επιλογή του ανταγωνιστικού ελατηρίου αγοράστηκε ένας μεγάλος αριθμός δειγμάτων στα οποία έγινε χαρακτηρισμός και από εκεί προέκυψε και η τελική επιλογή. Ο λόγος ήταν ότι στην ελληνική αγορά δεν κατέστη δυνατό να βρούμε κατάστημα που να διαθέτει βάση δεδομένων με τις διαστάσεις των ελατηρίων και τις αντίστοιχες σταθερές ελατηρίων.

Ο χαρακτηρισμός γίνεται στην διάταξη μέτρησης δύναμης αφαιρώντας τα plexiglass που φαίνονται στην Εικόνα 5-8. Διαμορφώνουμε επίσης μικρούς γάντζους στα άκρα των προς χαρακτηρισμό ελατηρίων και τους προσδένουμε σε οπές που έχουμε διαμορφώσει Το βήμα επιμήκυνσης είναι εδώ 5mm και εφόσον η ένδειξη δύναμης σταθεροποιείται, καταγράφεται η τιμή της. Στον Πίνακα 5-2 υπάρχουν οι μετρήσεις για το ελατήριο που επιλέχθηκε ως καταλληλότερο. Οι μεγάλες αποκλίσεις στην τιμή της σταθεράς του θεωρούμε ότι οφείλονται στην προβληματική συγκράτηση του ελατηρίου κατά τον χαρακτηρισμό του.

Πίνακας 5-2. Τιμές δυνάμεων/επιμηκύνσεων ανταγωνιστικού ελατηρίου.

Επιμήκυνση	**Δύναμη**	**Σταθερά Ελατηρίου**
cm	N	N/m
0,0	0,4	-
1,0	17,9	1750
1,5	25,0	1420
2,0	28,9	776
Γραμμή τάσης (trend line):		**1460.9**

Υπάρχει μια διαφορά περίπου 300 N/m ανάμεσα στη σταθερά ελατηρίου του DEAP και του ανταγωνιστικού ελατηρίου, αλλά χρησιμοποιήθηκε εκείνο που είχε τα πιο καλά χαρακτηριστικά μήκους και σταθεράς. Θεωρείται όμως ένα σημείο που δεν δημιουργεί ιδιαίτερο πρόβλημα, εφόσον το DEAP και το ελατήριο θα μπορέσουν να ισορροπήσουν και πάλι αλλά με διαφορετικές επιμηκύνσεις το καθένα.

Η εξίσωση δύναμης και επιμήκυνσης για το ελατήριο, προκύπτει:

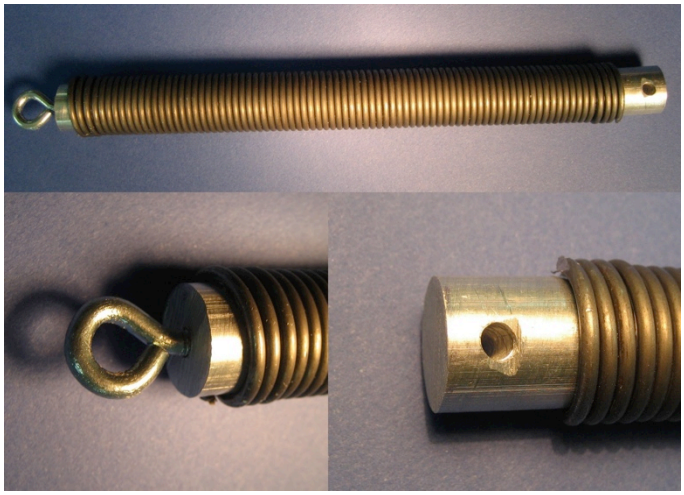
$$F_{\varepsilon\lambda.}(N) = 1460.9 \cdot x(m) + 1.6 \tag{5-4}$$

Αν δώσουμε και στα δυο κοινό μήκος μοχλοβραχίονα στο πέλμα, μπορούν να ισορροπήσουν για αρχική επιμήκυνση του DEAP 1.5cm ως εξής:

$$\begin{aligned} F_{DEAP}^{@0V} &= 1141.4N/m \cdot 0.015m - 2.5N = 14.6N \Rightarrow \\ F_{\varepsilon\lambda.} &= 1460.9N/m \cdot x + 1.6N = 14.6N \Rightarrow \\ x_{\varepsilon\lambda.} &= 0.89cm \end{aligned} \tag{5-5}$$

5.4.2 Διαμορφώσεις συγκράτησης του ανταγωνιστικού ελατηρίου

Για τη συγκράτηση του ελατηρίου χρησιμοποιήθηκαν αλουμινένια κυλινδρικά κομμάτια τα οποία διαμορφωθήκαν κατάλληλα (Εικόνα 5-17).



Εικόνα 5-17. Διαμορφώσεις συγκράτησης ανταγωνιστικού ελατηρίου.

Τα κυλινδρικά αυτά κομμάτια έχουν ελαφρώς μεγαλύτερη διάμετρο από την εσωτερική διάμετρο του ελατηρίου και προσαρμόστηκαν με περιστροφή, εισχωρώντας συνολικά σε 3 δακτυλίους του

ελατηρίου. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργείται μια πολύ σφιχτή συναρμογή που στο εύρος των επιμηκύνσεων που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το ελατήριο, δεν κινδυνεύει να απασφαλιστεί.

Επίσης στο επάνω μέρος του ελατηρίου έχει τοποθετηθεί ένας γάντζος πάνω στον οποίο θα δεθεί το νήμα που χρησιμοποιήθηκε και στον επενεργητή από DEAP.

Το αλουμίνιο μπορεί επίσης να αντικατασταθεί από αντίστοιχα κυλινδρικά κομμάτια plexiglass, ώστε να μειωθεί το προσαρτημένο βάρος στο ελατήριο.

5.5 *Μηχανισμός ρύθμισης προέντασης*

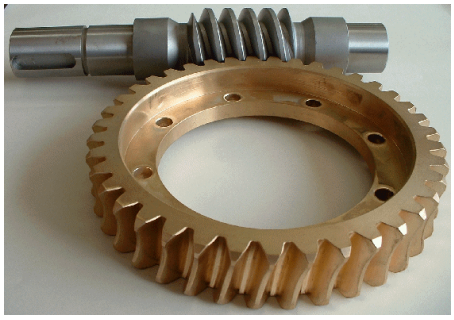
Για την πρόσδεση του ελατηρίου και του DEAP στο πόδι, είναι απαραίτητος έναν μηχανισμός προέντασης που να μας επιτρέπει να ρυθμίσουμε χωριστά στο καθένα την αρχική του τάση.

Η αρχική αυτή τάση πρέπει να είναι η κατάλληλη ώστε το πέλμα να ισορροπεί στην οριζόντια θέση, όταν το DEAP είναι αποφορτισμένο, όπως δείχνει η Εικόνα 5-2. Το ελατήριο έχει επιλεχθεί ώστε να βρίσκεται κοντά στη σταθερά ελατηρίου που παρουσιάζει το DEAP. Η απόλυτη ταύτιση όμως των δύο δεν θα ήταν ποτέ εφικτή, μιας και το DEAP παρουσιάζει έντονα συμπτώματα κόπωσης, δηλαδή μείωση της σκληρότητάς του, ακόμη και έπειτα από μικρά χρονικά διαστήματα που παραμένει τανυσμένο. Επιπλέον, υπάρχει πάντα η παράμετρος του τι είναι διαθέσιμο στην αγορά.

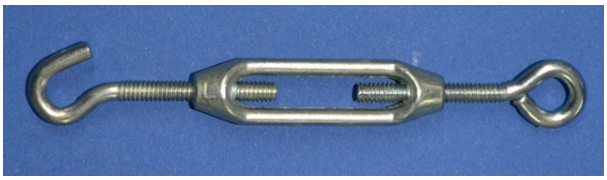
Γίνεται φανερό λοιπόν ότι δεν αρκεί να στηρίξουμε το ελατήριο και το DEAP με μια κοινή προένταση η οποία θα είναι σταθερή. Γεννάται ανάγκη για ένα μηχανισμό προέντασης, ο οποίος θα είναι αρκετά συμπτυγμένος, ώστε να χωρέσει στον ήδη περιορισμένο χώρο μεταξύ του πέλματος και του κορμού, ενώ παράλληλα θα είναι ανεπίστροφης μετάδοσης κίνησης (non back drivable).

Ένας συνήθης μηχανισμός περιορισμένης μετάδοσης κίνησης είναι οι μειωτήρες ατέρμονα κοχλία (Εικόνα 5-18), ενώ για εφαρμογές όπου απαιτείται πρόσδοση προέντασης συναντάται συχνά ο κοχλιωτός εντατήρας (Εικόνα 5-19). Ο κοχλιωτός εντατήρας έχει το ένα απ' τα δύο σπειρώματα του αριστερόστροφο (αυτό που έχει ένα «L» στην Εικόνα 5-19). Αυτή η ιδιαιτερότητα του επιτρέπει να φέρνει πιο κοντά τα δύο άκρα, περιστρέφοντας μόνο το κυρίως σώμα του.

Ψάχνοντας για μικρούς και διαθέσιμους ήδη στην αγορά μειωτήρες ατέρμονα κοχλία, καταλήξαμε στα κλειδιά κουρδίσματος ηλεκτρικής κιθάρας (Εικόνα 5-20). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-21 το κλειδί κουρδίσματος είναι πιο μικρό συνολικά από τον μικρότερο κοχλιωτό εντατήρα που μπορέσαμε να βρούμε, ενώ στη διεύθυνση της τανύσης, που έχουμε και τον χωρικό περιορισμό, παρεμβάλλει μόνο τη διάμετρο ενός άξονα.



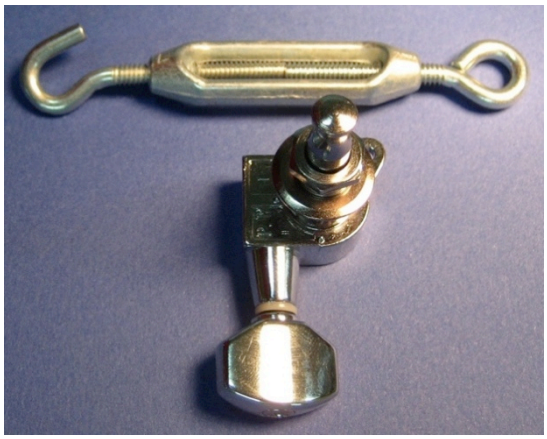
Εικόνα 5-18. Μειωτήρας ατέρμονα κοχλία.



Εικόνα 5-19. Κοχλιωτός εντατήρας.

Επιπλέον, ο όγκος του μπορεί να μειωθεί περαιτέρω αφαιρώντας την πεταλούδα και πακτώνοντας πάνω στον άξονα, με δυνατή κόλλα σπειρωμάτων (red thread locker), τον κοχλία που την συγκρατούσε (Εικόνα 5-25).

Εικόνα 5-20. Κλειδί κουρδίσματος ηλεκτρικής κιθάρας.

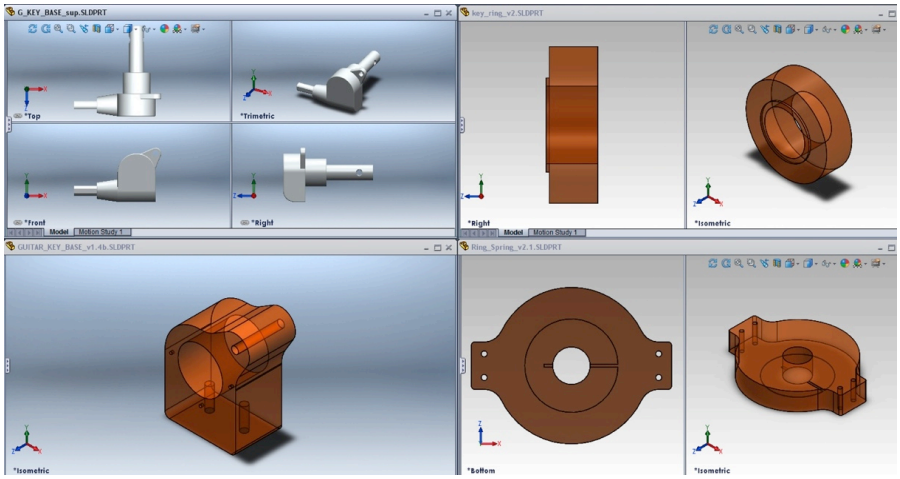


Εικόνα 5-21. Σύγκριση μεγέθους εντατήρα και κλειδιού κουρδίσματος.

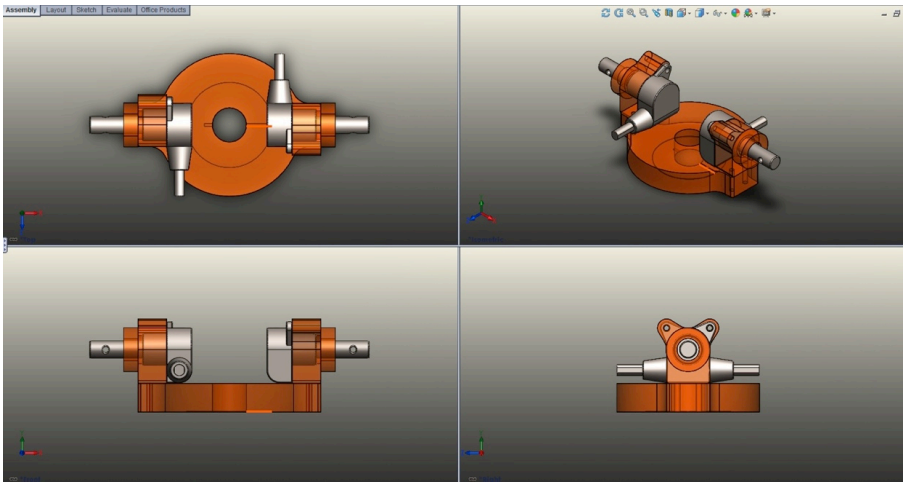
Το μειονέκτημα του κλειδιού είναι ότι απαιτεί μια ειδική κατασκευή για να στηριχτεί το ίδιο πάνω στο πόδι. Με τον εκτυπωτή laser και φύλλα plexiglass η διαδικασία αυτή απλοποιήθηκε και επιταχύνθηκε αρκετά ώστε να μην αποτελέσει εμπόδιο (Εικόνα 5-24).

Το σχέδιο των τεμαχίων έγινε με CAD, αφού πρώτα φτιάχτηκε ένα ομοίωμα του κλειδιού (Εικόνα 5-22). Το ομοίωμα βοήθησε στο να δούμε και να διορθώσουμε το συναρμολογημένο μηχανισμό στην οθόνη, πριν ακόμα κόψουμε τα τεμάχια (Εικόνα 5-23). Το 3D CAD πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το SolidWorks.

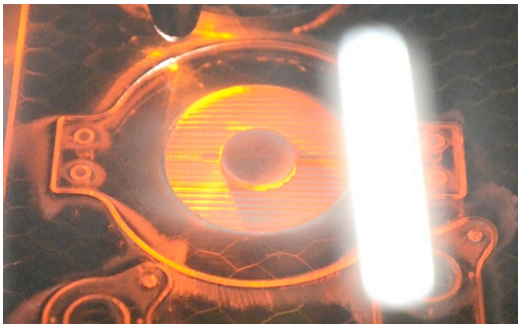
Το πρώτο τεμάχιο που σχεδιάστηκε είναι εκείνο που φαίνεται κάτω αριστερά στην Εικόνα 5-22. Είναι το συμπληρωματικό του κλειδιού, φέροντας μικρές χαραγμένες οπές στην μια πλευρά για τα αγκάθια που φέρει το κλειδί (Εικόνα 5-20). Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε η κυκλική βάση που φαίνεται κάτω δεξιά στην Εικόνα 5-22, ώστε να μπορούν να πατήσουν τα συμπληρωματικά τεμάχια, χωρίς να εμποδίζουν το πόδι με το ελατήριο (Εικόνα 5-26).



Εικόνα 5-22. 3D CAD των τεμαχίων από plexiglass (διαφανή) που χρησιμοποιήθηκαν για τη στήριξη των κλειδιών.



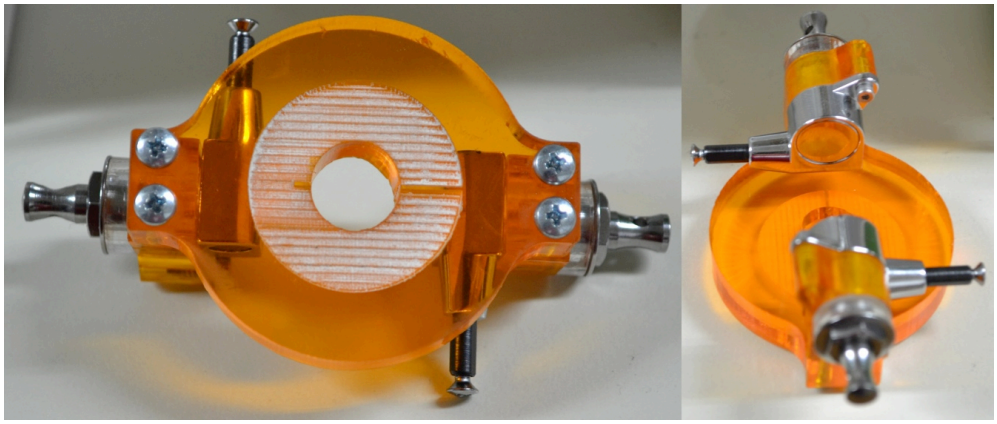
Εικόνα 5-23. 3D CAD του συναρμολογημένου μηχανισμού.



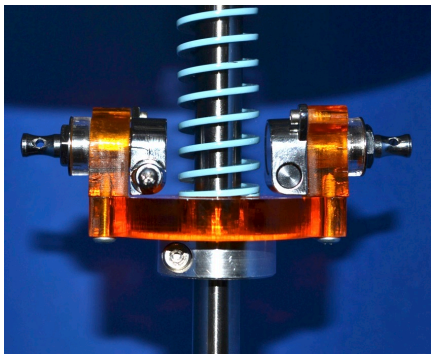
Εικόνα 5-24. Κατεργασία κοπής και εγχάραξης plexiglass (πάχους 1cm) στο laser.

Στο κάτω μέρος της κυκλικής βάσης κρίθηκε σκόπιμο να δημιουργηθεί εγχάραξη (Εικόνα 5-25), μέσα στην οποία κουμπώνει ο κοχλιωτός μεταλλικός δακτύλιος συγκράτησης (Εικόνα 5-26 και Εικόνα 5-32). Ο δακτύλιος αυτός, πλέον, συγκρατεί όχι μόνο το ελατήριο συμπίεσης (το κεντρικό ελατήριο) του ποδιού, αλλά και το μηχανισμό ρύθμισης προέντασης. Λόγω της εγχάραξης, ο μηχανισμός δεν μπορεί να περιστραφεί γύρω από το πόδι. Λόγω του ελατηρίου συμπίεσης και του δακτυλίου δεν μπορεί να μετακινηθεί ούτε κατά τη διεύθυνση του άξονα του ποδιού.

Τέλος, κόπηκε μια ροδέλα plexiglass με πάχος 5mm με τη συσκευή Verslaser (Εικόνα 5-22) πάνω δεξιά, ώστε να μπορέσει το περικόχλιο που φαίνεται στην Εικόνα 5-20 να κάνει σφιχτή τη συναρμογή ανάμεσα στο κλειδί και το συμπληρωματικό κομμάτι (Εικόνα 5-26)διαφανής ροδέλα.



Εικόνα 5-25. Κάτω και πλάγια όψη του μηχανισμού ρύθμισης προέντασης.



Εικόνα 5-26. Συναρμογή του μηχανισμού ρύθμισης προέντασης πάνω στο πόδι.

5.6 *Προσομοίωση σε ADAMS*

5.6.1 Εισαγωγή

Στα ήδη υπάρχοντα μοντέλα του μονόποδου ρομπότ προστέθηκε το πέλμα και δυο ανταγωνιστικά ελατήρια. Το πέλμα έχει μοντελοποιηθεί με μια επιπλέον σφαίρα που έρχεται σε επαφή με το έδαφος και βρίσκεται σε απόσταση 5 cm από τη «φτέρνα» του ποδιού. Το DEAP μοντελοποιήθηκε με μια δύναμη η οποία επενεργεί κατά την φάση εδάφους εφόσον το κεντρικό ελατήριο βρίσκεται πλέον στη φάση αποσυμπίεσης. Η μοντελοποίηση αυτή είναι δόκιμη αν αναλογιστούμε την ηλεκτροστατική δύναμη maxwell που επιδρά στο DEAP κατά την φόρτιση σαν μια διαμήκη δύναμη στον επενεργητή που τον αναγκάζει, σε αναλογία πάντα και με τη σταθερά ελατηρίου του, να επιμηκυνθεί κατά μήκος.

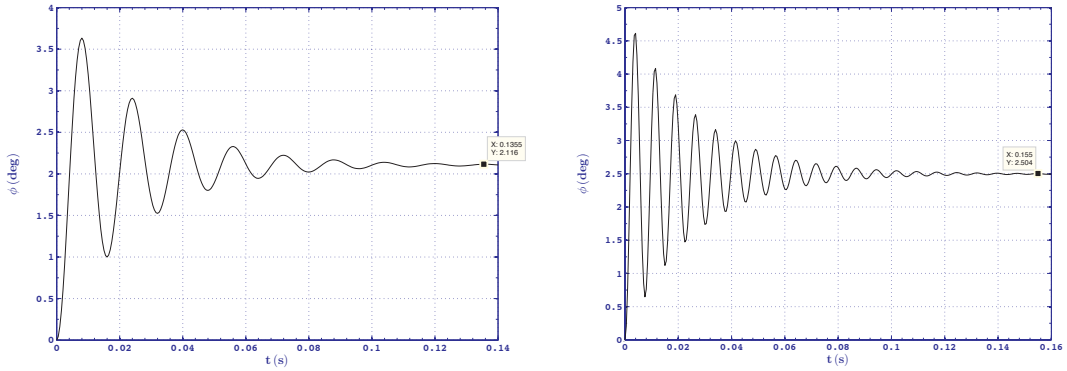
Με άλλα λόγια μπορούμε να μοντελοποιήσουμε την πτώση της σταθεράς ελατηρίου του DEAP κατά την φόρτιση, ως επενέργηση μιας δύναμης που μας υποβοηθά να επιμηκύνουμε το DEAP. Καταλαβαίνουμε ωστόσο ότι η δύναμη που χρειαζόμαστε είναι ανάλογη με τα μέτρα φιλμ DEAP που έχουμε τυλίξει κατά την κατασκευή του επενεργητή. Έτσι για περισσότερα μέτρα παίρνουμε μεγαλύτερη δύναμη αλλά έχουμε και μεγαλύτερη αντίσταση, διότι ανάλογα με τη δύναμη αυξάνεται και η σταθερά ελατηρίου του υλικού.

Για το λόγο αυτό το DEAP έχει περιορισμένη μεταβολή του πλάτους του (strike) και το πρόβλημα ανάγεται στο πλάτος του υλικού. Αν για παράδειγμα έχουμε χρησιμοποιήσει και τα 20 cm πλάτους από το καρούλι του DEAP, δεν έχει σημασία πόσα μέτρα μήκος θα βάλουμε. Η μεταβολή του θα είναι πάντοτε της τάξης του 3%, ενώ το τμήμα έρευνας της κατασκευαστικής εταιρίας αναφέρει ότι αναμένεται να φτάσει το 5% στο εγγύς μέλλον. Άρα, στα 20 cm πλάτος η αναμενόμενη επιμήκυνση είναι 6 mm. Επειδή στον επενεργητή έχουμε χρησιμοποιήσει το μισό πλάτος, αναμένουμε μέγιστη επιμήκυνση 3 mm.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή μας ενδιαφέρει η επιτυγχανόμενη γωνία περιστροφής του πέλματος και γι' αυτό έχουμε προσομοιώσει δυο περιπτώσεις στην Εικόνα 5-27. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η σταθερά του ανταγωνιστικού ελατηρίου τίθεται ίση με τη σταθερά ελατηρίου του DEAP.

Πίνακας 5-3. Παράμετροι προσομοίωσης για την εύρεση επιτυγχανόμενης γωνίας πέλματος.

Μήκος φιλμ (m)	Διαφορά Δύναμης 0➔2500V (N)	Σταθερά Ελατηρίου (N/m)	Προένταση (N)	Γωνία πέλματος (°)
2	4	1141	14.6	2.1
10	20	5705	73	2.5



Εικόνα 5-27. Γωνία περιστροφής του πέλματος για επενεργητή 2m (αριστερά) και 5m (δεξιά).

Στις προσομοιώσεις το πόδι κρατιέται στον αέρα και τα δυο ανταγωνιστικά ελατήρια (DEAP και ελατήριο έλξης) βρίσκονται σε ισορροπία. Την χρονική στιγμή t=0 s θέτουμε σε ισχύ την δύναμη επενέργησης που αντιστοιχεί στην φόρτιση του DEAP. Παρατηρούμε λοιπόν ότι ενώ η ισχύς και η δύναμη του επενεργητή πενταπλασιάζονται, η επιμήκυνση παραμένει ουσιαστικά ίδια. Επομένως για την αύξηση της γωνίας θα πρέπει είτε να χρησιμοποιήσουμε επενεργητή μεγαλύτερου πλάτους, είτε να μικρύνουμε τον μοχλοβραχίονα που είναι 5 cm, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5-4. Απώλεια σε ροπή – κέρδος σε γωνία πέλματος για επενεργητή 10 m και παραγόμενη δύναμη 20 N.

Μήκος μοχλοβραχίονα (cm)	Γωνία πέλματος (°)	Διαφορά Ροπής 0➔2500V (Nm)
5	2.5	1
1	10	0.2

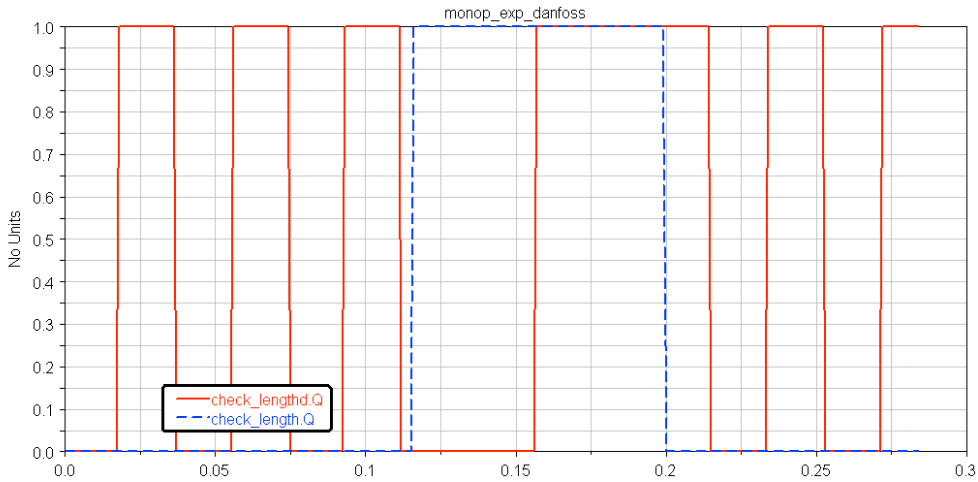
5.6.2 Επενέργηση υπό συνθήκες

Από τις πρώτες προσομοιώσεις, έγινε φανερή η σημασία του συγχρονισμού της ώθησης του πέλματος με την συνολική κίνηση του συστήματος. Δεν είναι αρκετό, δηλαδή, να επενεργείται το πέλμα κατά τη φάση εδάφους, αλλά από συγκεκριμένο σημείο και έπειτα. Ο λόγος είναι να συγχρονιστεί η ώθηση από το πέλμα με την απογείωση του ρομπότ. Διαφορετικά, η ενέργεια που προσφέρει το DEAP επιδρά ετερόχρονα, συμπιέζει επιπλέον το κεντρικό ελατήριο ενώ είναι ήδη συμπιεσμένο λόγω της πρόσπτωσης και πιθανώς ωθεί και προς τα πίσω όλο το ρομπότ.

Είναι απαραίτητο λοιπόν να διασφαλίσουμε ότι βρισκόμαστε στο ξεκίνημα της απογείωσης, δηλαδή όταν ξεκινά η αποσυμπίεση του κεντρικού ελατηρίου. Επειδή η φάση εδάφους είναι συμμετρική χρονικά, η παραπάνω συνθήκη ισοδυναμεί με το να βρισκόμαστε στο δεύτερο μισό της φάσης εδάφους.

Ο έλεγχος γίνεται μέσα στο ADAMS με χρήση της εντολής «IF» η οποία όμως δεν δέχεται «WHILE». Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δυο μεταβλητές. Η πρώτη για τον έλεγχο της συμπίεσης του ελατηρίου, η οποία δίνει άσο όταν το ελατήριο έχει συμπιεστεί

περισσότερο από 9mm και άρα παραμένει άσος μέχρι το τέλος της φάσης εδάφους. Η δεύτερη ελέγχει το πρόσημο της ευθύγραμμης ταχύτητας του ελατηρίου και δίνει άσο όταν το βρίσκει θετικό, δηλαδή κατά την αποσυμπίεση. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-28, η δεύτερη μεταβλητή (κόκκινη γραμμή) γίνεται 1 στη μέση της φάσης εδάφους, η διάρκεια της οποίας φαίνεται από την πρώτη μεταβλητή ελέγχου, εκείνη της συνθήκης συμπίεσης (μπλε γραμμή).



Εικόνα 5-28. Έλεγχος συνθήκης μέτρου και προσήμου συμπίεσης κατά τη φάση εδάφους.

Αθροίζοντας τις δυο αυτές μεταβλητές και συγκρίνοντας μπορούμε να γνωρίζουμε όταν είναι ίσες με «2» ότι έχει ξεκινήσει το δεύτερο μισό της φάσης εδάφους.

Το θέμα όμως του συγχρονισμού του πέλματος με την αποσυμπίεση του ελατηρίου δεν είναι το μόνο που πρέπει να ληφθεί υπόψιν. Διαπιστώθηκε από τις προσομοιώσεις ότι ο ελεγκτής του ρομπότ υπό συγκεκριμένες απαιτήσεις ύψους αναπήδησης και πρόσθιας ταχύτητας, επιλέγει γωνίες πρόσπτωσης και ροπές φάσης εδάφους που καταλήγουν να μην προσδίδουν συμμετρική κίνηση στο πόδι. Αυτό σημαίνει ότι η γωνία πρόσπτωσης με την γωνία απογείωσης πολλές φορές δεν συμπίπτουν ή δεν έχουν καμία σχέση μεταξύ τους, π.χ. 15° γωνία πρόσπτωσης και -1° γωνία απογείωσης.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή αυτό αποτελεί πρόβλημα. Στην περίπτωση που απογειώνεται το ρομπότ όταν το πόδι είναι σχεδόν κάθετο με το έδαφος δεν πρέπει να επενεργεί το πέλμα, διαφορετικά δίνει μια ώθηση προς τα πάνω ή προς τα πίσω όπως έχουμε εξηγήσει.

Μας χρειάζεται επομένως μια ακόμα συνθήκη, εκείνη που θα εξασφαλίζει ότι το πέλμα συνεισφέρει στην κίνηση όταν ο κορμός του ρομπότ έχει ξεπεράσει το σημείο επαφής με το έδαφος. Ακριβώς, όπως οι αθλητές γέρνουν το σώμα μπροστά για να ξεκινήσουν να τρέχουν, έτσι και εδώ το πέλμα πρέπει να περιμένει τον κορμό να το προσπεράσει πριν δώσει εκμεταλλεύσιμη ώθηση.

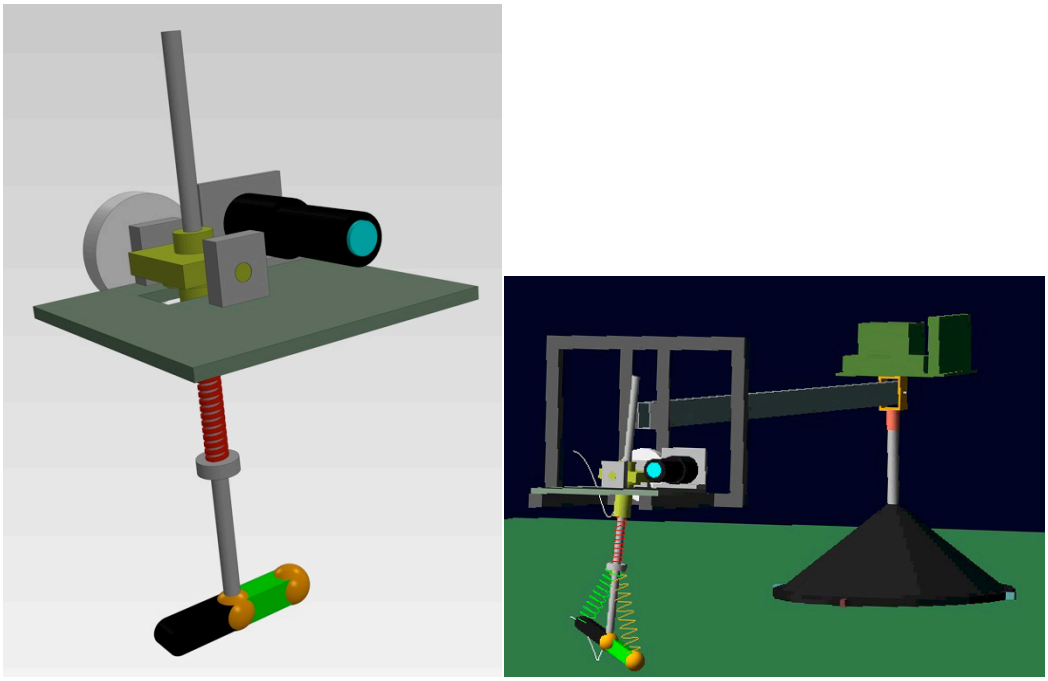
Για το λόγο αυτό προστέθηκε ένας ακόμη έλεγχος, αυτός της γωνίας του ποδιού. Όταν η γωνία ξεπερνά την κάθετη με το έδαφος ενεργοποιείται και αυτός ο διακόπτης. Πλέον η εντολή για την εικονική φόρτιση του επενεργητή DEAP δίνεται μετά την επιβεβαίωση αυτών των

τριών συνθηκών: (1η)το ελατήριο είναι συμπιεσμένο πλέον των 9mm, (2η) το πρόσημο της ταχύτητας αποσυμπίεσης είναι θετικό, δηλαδή το ελατήριο αποσυμπιέζεται και (3η) το πόδι έχει ξεπεράσει την κάθετη με το έδαφος, δηλαδή ο κορμός του ρομπότ γέρνει προς τα εμπρός.

5.6.3 Μοντέλο μονόποδου ρομπότ με πέλμα στο ADAMS

Στην Εικόνα 5-29 φαίνεται το γραφικό κομμάτι του εξελιγμένου μοντέλου του μονόποδου ρομπότ με πέλμα. Το πέλμα έχει εμπρός και πίσω από το πόδι μήκος 5cm, με την σημαντική διαφορά ότι για το πίσω μέρος του πέλματος δεν θεωρούμε πρόσκρουση με το έδαφος. Για το μπροστινό μέρος του πέλματος επίσης θεωρούμε κατά μια έννοια «καμάρα του πέλματος» και σε επαφή με το έδαφος υπολογίζεται ότι έρχεται μόνο η σφαίρα που βρίσκεται στο άκρο του πέλματος.

Αυτό διευκολύνει κατά πολύ την υπολογιστική δουλειά του ADAMS και μειώνει το χρόνο προσομοίωσης. Επίσης σε επαφή με το έδαφος υπολογίζεται ότι έρχεται η «φτέρνα» του ποδιού, όπως και στο μοντέλο πριν την τοποθέτηση του πέλματος.



Εικόνα 5-29. Μοντέλο ADAMS με πέλμα εμπρός που αποτελείται από δυο σφαίρες που έρχονται σε επαφή με το έδαφος.

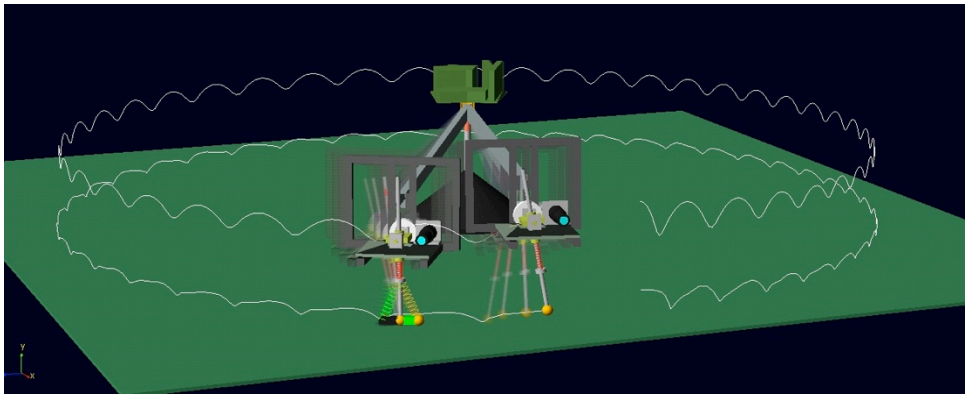
Η ιδιοσυχνότητα του εναλλακτικού ποδιού προσδιορίζεται μετρώντας την περίοδο ταλάντωσης όπως έχουμε δείξει και σε προηγούμενα κεφάλαια. Για να μην υποβιβάσουμε εξαρχής την λύση αυτή, έχουμε θεωρήσει πολύ μικρές μάζες και αδράνειες για τα στοιχεία του πέλματος. Η ιδιοσυχνότητα λοιπόν του εναλλακτικού ποδιού προκύπτει μόνο κατά κάτι μικρότερη του αρχικού ποδιού, ως εξής:

$$f_{pelma} = 1.01\text{Hz} \tag{5-6}$$

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση προκύπτουν από τις εξισώσεις (5-3) και (5-5). Κατά την εικονική επενέργηση του DEAP θεωρήσαμε μια δύναμη

πολύ μεγαλύτερη (20N) και δεν αυξήσαμε αντίστοιχα την σταθερά ελατηρίου όπως αναλογεί, ώστε να γίνουν εμφανή τα θετικά ή μη αποτελέσματα της νέας προσθήκης.

Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με εκείνα μιας πανομοιότυπης όσον αφορά ροπή φάσης εδάφους, ταχύτητας πρόωσης και ύψους αναπήδησης, αλλά χωρίς την ύπαρξη του πέλματος. Στιγμιότυπο της προσομοίωσης αυτής φαίνεται στην Εικόνα 5-30.



Εικόνα 5-30. Παράλληλη αναπαράσταση της προσομοιωμένης κίνησης του απλού μονόποδου ρομπότ χωρίς πέλμα και του μονόποδου ρομπότ με πέλμα εμπρός.

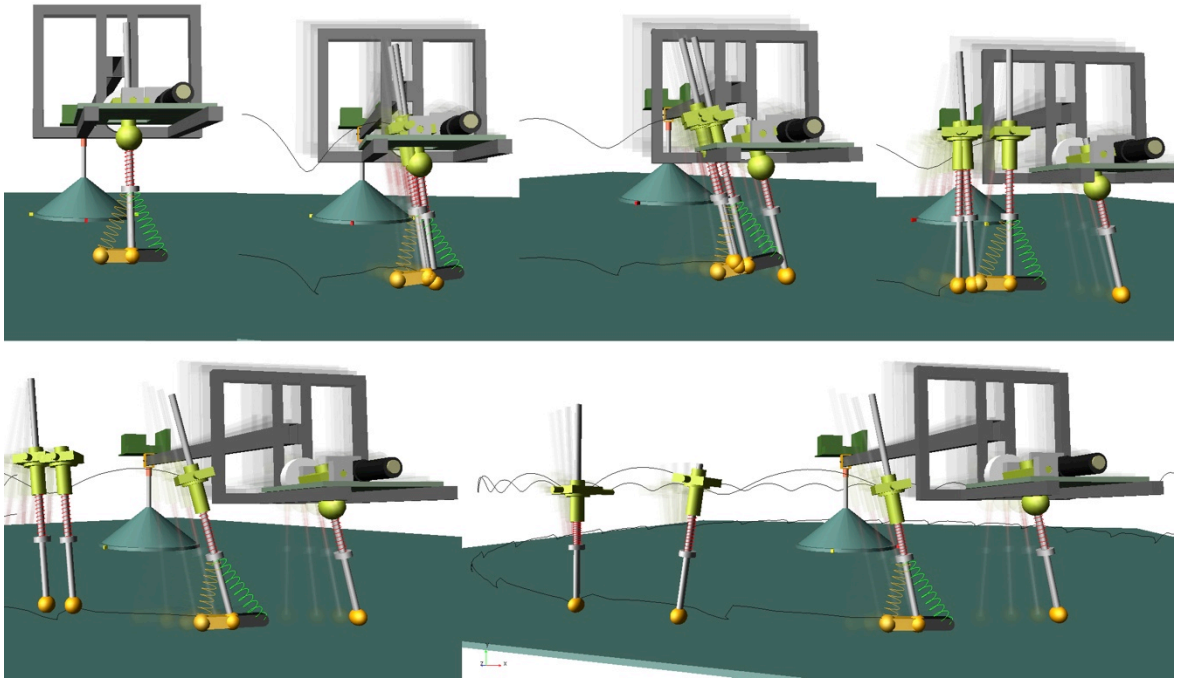
Παρατηρούμε λοιπόν ότι το πέλμα παρά τις συνθήκες επενέργησης που έχουμε θέσει, δεν υποβοηθά την κίνηση του ρομπότ. Το γεγονός αυτό έγκειται πιθανώς στο ότι οι συνθήκες χρειάζεται να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια, π.χ. να επενεργείται το πέλμα ακριβώς λίγο πριν την αποκόλληση από το έδαφος. Άλλη πιθανή αιτία επίσης είναι η διατήρηση της ελαστικότητας του κεντρικού ελατηρίου. Για να μεταδοθεί με επιτυχία η ώση του πέλματος, χρειαζόμαστε το ελατήριο να δράσει σαν στερεό σώμα, όπως κάνει ο τετρακέφαλος όταν σπρώχνουμε με το πέλμα μας. Διαφορετικά το ελατήριο συσπειρώνεται και αντί να προωθήσει την ώση αυτή, την αποθηκεύει.

5.6.4 Εναλλακτική πρόταση

Μπορούμε να προτείνουμε μια εναλλακτική τοποθέτηση για το πέλμα η οποία ομοιάζει με την αντίστροφη κίνηση του ρομπότ. Στην περίπτωση που ήταν εφικτό να κάνει ένας αθλητής τρέξιμο προς τα πίσω με την ίδια ευκολία και τον ίδιο ευρύ δρασκελισμό με το πρόσθιο τρέξιμο, τότε η κίνηση του και αυτή που μπορεί να επιτύχει το ρομπότ στην προσομοίωση (Εικόνα 5-31) θα ήταν παρόμοιες.

Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της εναλλακτικής πρότασης είναι ότι οι συνθήκες επενέργησης είναι πολύ χαλαρότερες. Το πέλμα ωφελεί στην πρόσθια ταχύτητα όταν επενεργείται από την αρχή της φάσης εδάφους διότι σπρώχνει το πόδι και τον κορμό προς τα μπροστά. Βέβαια αν η επενέργηση αυτή συνεχιστεί κατά την απογείωση και είναι επαρκώς δυνατή, τότε μπορεί να αποκόψει πρόσθια ταχύτητα από το ρομπότ.

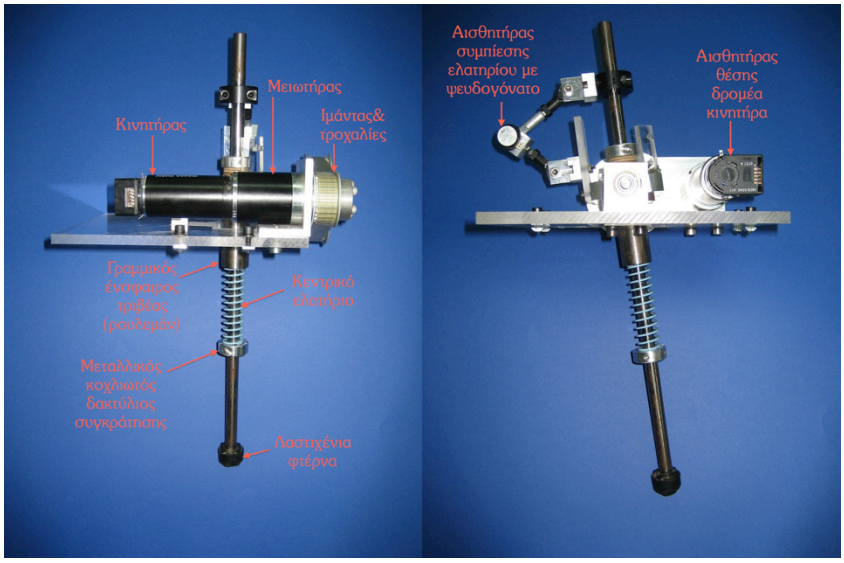
Κάτι τέτοιο είναι μάλλον απίθανο με τις μετατοπίσεις και ροπές που μπορεί να παράγει το DEAP. Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις, η διάταξη αυτή υπερέχει των προηγούμενων.



Εικόνα 5-31. Στιγμιότυπα από την παράλληλη προσομοίωση του επενεργούμενου με DEAP πέλματος και 3 άλλων εναλλακτικών ποδιών.

5.7 *Πειραματική διάταξη*

Η τελική πειραματική διάταξη αποτελείται από τον κορμό του ρομπότ και τις κατάλληλες προσθήκες. Ο κορμός του ρομπότ έχει αφαιρεθεί από τον περιστροφικό βραχίονα και τη βάση (Εικόνα 5-32). Αφαιρέθηκε το ψευδογόνατο του αισθητήρα συμπίεσης του ελατηρίου και αντικαταστάθηκε από έναν οπτικό αισθητήρα προσέγγισης για να ελευθερωθεί το διαθέσιμο μήκος της ράβδου του ποδιού από το πάνω μέρος του κορμού (Εικόνα 5-35).

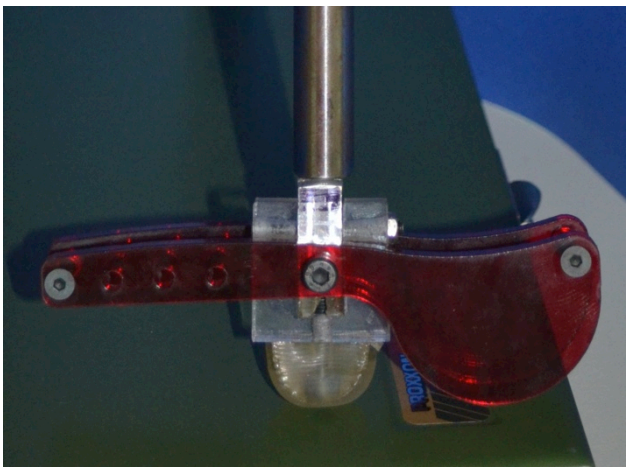


Εικόνα 5-32. Κορμός του μονόποδου ρομπότ χωρίς πέλμα.

Έχοντας πλέον στη διάθεσή μας επαρκές μήκος ποδιού, το πέλμα, το μηχανισμό συγκράτησης, το ελατήριο και το DEAP, μένει να κατασκευαστεί ένας στοιχείο που θα επιτρέψει να συνδεθεί το πόδι και το πέλμα λειτουργώντας ως στροφική άρθρωση.

Το στοιχείο αυτό είναι αλουμινένιο, κόπηκε στην CNC και έχει μια προεξοχή για να κάνει συναρμογή με την κούφια ράβδο του ποδιού. Φέρει επίσης διαμπερή οπή, κάθετη ως προς την προεξοχή, ώστε να περνά ο κεντρικός άξονας του πέλματος.

Στη συνέχεια προστέθηκε πάνω στην άρθρωση ένα διαφανές κομμάτι plexiglass σχήματος «Π» ώστε να προσαρμοστεί εκεί η λαστιχένια «φτέρνα» του ποδιού (Εικόνα 5-33).

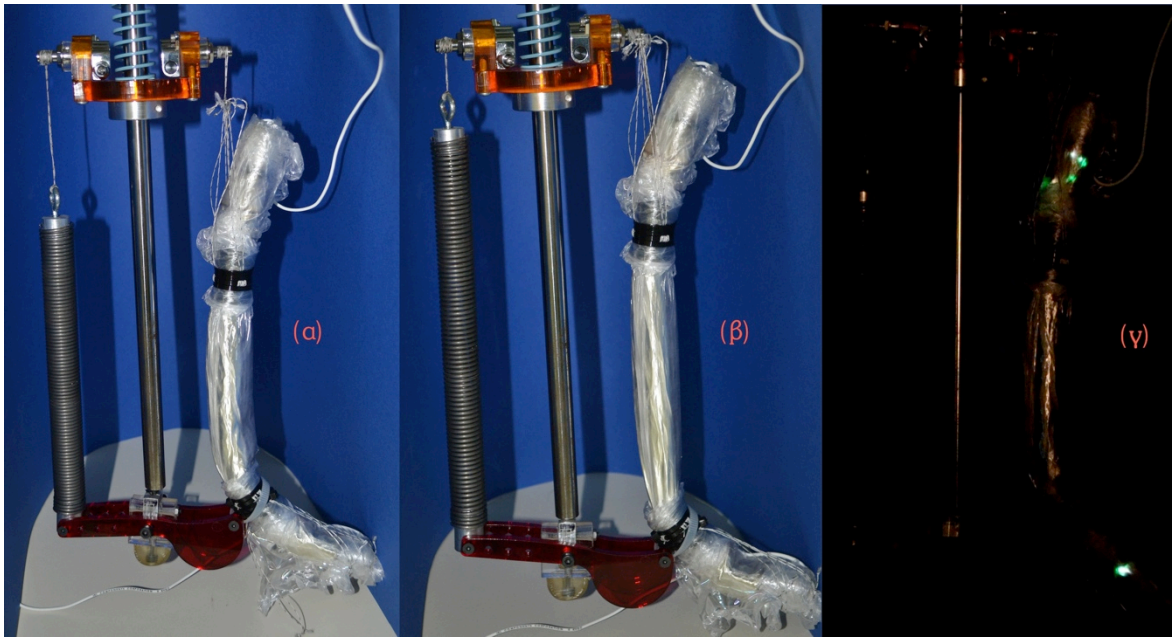


Εικόνα 5-33. Πέλμα και άρθρωση.

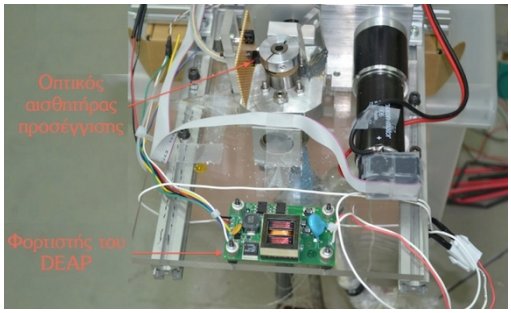
Στο σημείο αυτό είναι εφικτό να δοκιμάσουμε την αρχή λειτουργίας του κυλινδρικού επενεργητή σε συνεργασία με ένα ανταγωνιστικό ελατήριο. Το πόδι με το πέλμα είναι πλήρως συναρμολογημένο στην Εικόνα 5-34.

Φορτίζοντας το DEAP το πέλμα πραγματοποίησε μια πολύ μικρή περιστροφή δεξιόστροφα, εκτείνοντας τον κυλινδρικό επενεργητή και επιτρέποντας στο ελατήριο να συσπειρωθεί. Η περιστροφή αυτή είναι της τάξης των 2 μοιρών όπως προβλέπει και η προσομοίωση στο ADAMS. Με την πρώτη φόρτιση όμως εμφανίστηκαν ηλεκτρικά τόξα γύρω από τα εύκαμπτα ηλεκτρόδια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-34,(γ).

Γνωρίζουμε ότι το υλικό καίγεται τοπικά από ηλεκτρικά τόξα που οφείλονται σε μικρά κατασκευαστικά ελαττώματα του DEAP, τα οποία όμως κατά μια έννοια αυτοθεραπεύονται. Στην προκειμένη περίπτωση, τα ηλεκτρικά τόξα συνεχίστηκαν, μέχρι το σημείο που απέτρεψαν τα περαιτέρω πειράματα. Ο επενεργητής έχασε τα χαρακτηριστικά χωρητικότητας και αντίστασης που του επιτρέπουν να λειτουργήσει σωστά. Ξετυλίγοντας τον επενεργητή πήραμε την Εικόνα 5-36 γύρω από τα εύκαμπτα ηλεκτρόδια. Η περιοχή δείχνει καμένη από ηλεκτρικά τόξα.



Εικόνα 5-34. Το πόδι πριν (α) και μετά (β) την πρόσδοση προέντασης στο ελατήριο και το DEAP, (γ) ηλεκτρικά τόξα κατά τη φόρτιση.



Εικόνα 5-35. Επάνω μέρος του κορμού μετά τις τροποποιήσεις.

Εικόνα 5-36. Ίχνη καψίματος του DEAP γύρω απ' τα εύκαμπτα ηλεκτρόδια, λόγω δημιουργίας ηλεκτρικών τόξων.

Τα ηλεκτρικά τόξα είναι κάτι που δεν αναμέναμε αν και ήταν η πρώτη δοκιμή κυλινδρικού τυλίγματος του DEAP. Παρακάτω γίνεται μια διερεύνηση πιθανών αιτιών για τη δημιουργία τους.

5.7.1 Συμπέρασμα

Η αρχή λειτουργίας του DEAP σε συνεργασία με ανταγωνιστικό ελατήριο πραγματοποιεί την αναμενόμενη κίνηση. Πειράματα μέτρησης δύναμης και επιμήκυνσης δεν μπόρεσαν να πραγματοποιηθούν λόγω σφάλματος του επενεργητή.

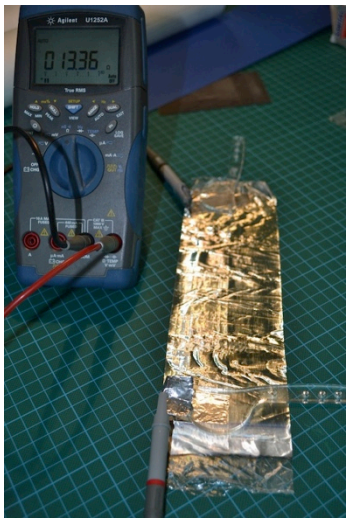
5.8 *Αίτια ηλεκτρικών τόξων*

5.8.1 Εισαγωγή

Για την διερεύνηση της δημιουργίας των σπινθήρων έγιναν 4 πειράματα με σκοπό να αναπαράγουμε τα ηλεκτρικά τόξα που προέκυψαν στον κυλινδρικό επενεργητή. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν αλουμινένια ηλεκτρόδια (κομμάτια αλουμινόχαρτου) για τη σύνδεση του DEAP με τον φορτιστή. Ανάμεσα στα αλουμινένια ηλεκτρόδια και την επιμεταλλωμένη επιφάνεια του DEAP χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρικά αγώγιμη κολλητική ταινία που παρέχεται από την Polypower™. Στην Εικόνα 5-37 δεν είχε τοποθετηθεί ακόμα η κολλητική αυτή ταινία, γι' αυτό για να μετρηθεί η χωρητικότητα του κομματιού (13.36 nF) έχουν χρησιμοποιηθεί δυο πρόχειρα κομμάτια από plexiglass σαν πρόσθετο βάρος επάνω τους.

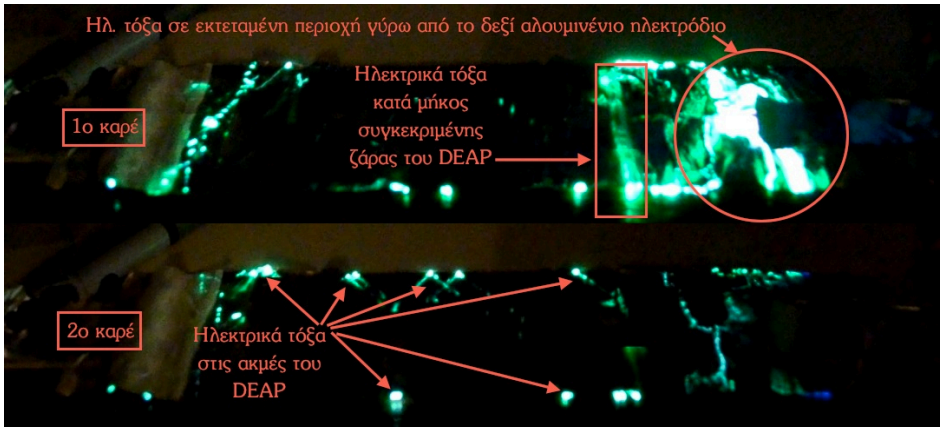
5.8.2 1° Πείραμα, χωρίς αφαίρεση επιμετάλλωσης

Στην πρώτη περίπτωση δεν αφαιρέθηκε επιμεταλλωμένο ηλεκτρόδιο περιμετρικά της ενεργής περιοχής (Εικόνα 5-37), γεγονός που γνωρίζουμε από τις οδηγίες της κατασκευάστριας ότι θα δημιουργήσει κάποια μορφή βραχυκυκλώματος. Περιμένουμε παρόμοια συμπεριφορά να αναπτυχθεί εάν τυχόν το λεπτό φιλμ από DEAP σχιστεί σε κάποιο σημείο της ενεργής περιοχής.



Εικόνα 5-37. 1° Πείραμα, χωρίς αφαίρεση επιμετάλλωσης περιμετρικά της ενεργής περιοχής.

Το αποτέλεσμα ήταν να προκύπτουν ηλεκτρικά τόξα κατά μήκος των ακμών του φύλλου DEAP, σε ολόκληρη την ενεργή περιοχή (Εικόνα 5-38, 2° καρέ) κάτι που δεν παρουσιάζει ομοιότητα με το πρόβλημα του κυλινδρικού επενεργητή().



Εικόνα 5-38. Δυο καρέ στο ξεκίνημα των ηλεκτρικών τόξων από το 1° πείραμα.

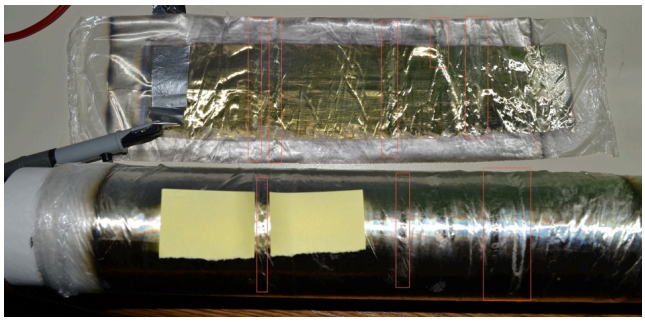
Παρατηρούμε όμως ότι στο 1ο καρέ στην Εικόνα 5-38, γύρω από το δεξί αλουμινένιο ηλεκτρόδιο εκδηλώνονται εκτεταμένα ηλεκτρικά τόξα. Κάτι το οποίο δεν ισχύει για την γειτονική περιοχή του αριστερού αλουμινένιου ηλεκτροδίου.

Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δυο αλουμινένιων ηλεκτροδίων εξαρτάται από το αν έρχονται σε επαφή με την επιμεταλλωμένη πλευρά του DEAP που φέρει την κυματοειδή αυλάκωση ή όχι. Παρόλο που δεν φαίνεται εδώ με βεβαιότητα, φορτίσεις με την αντίθετη πλευρά επάνω έδειξαν ότι το πρόβλημα εμφανίζεται με τόση ένταση στο ένα μόνο αλουμινένιο ηλεκτρόδιο, βλ. π.χ. Εικόνα 5-42. Η πλευρά που έχει πρόβλημα είναι, όπως είναι ίσως λογικό, εκείνη με την κυματοειδή αυλάκωση.

Αξιοσημείωτο είναι, επίσης, ότι στο 1ο καρέ εμφανίζονται ηλεκτρικά τόξα μέσα σε μια πολύ συγκεκριμένη ευθεία. Επειδή όλα τα πειράματα έγιναν παίρνοντας δείγματα των 5x20cm από ένα καρούλι DEAP (Εικόνα 5-39), η ευθεία αυτή έχει να κάνει με κάποια από τις ζάρες που φέρει το καρούλι για ένα μεγάλο μέρος του.

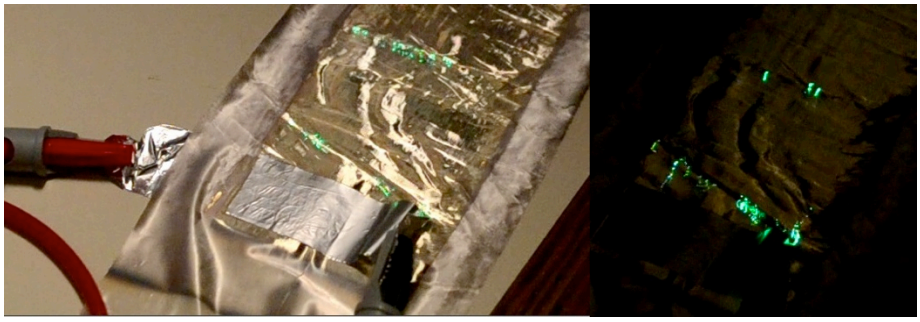
5.8.3 2° Πείραμα, με αφαίρεση επιμετάλλωσης

Στην 2η περίπτωση, σε καινούργιο δείγμα υλικού, δοκιμάσαμε να αφαιρέσουμε την επιμετάλλωση περιμετρικά της ενεργής περιοχής (Εικόνα 5-39). Τα ηλεκτρικά τόξα παρουσίασαν και πάλι προτίμηση στην πλευρά με την κυματοειδή αυλάκωση σε κάποια σημεία κοντινά του αλουμινένιου ηλεκτροδίου καθώς και στις πλέον ύποπτες περιοχές (Εικόνα 5-40), όπως είδαμε προηγουμένως.



Εικόνα 5-39. 2° Πείραμα, καρούλι DEAP και δείγμα με αφαίρεση επιμετάλλωσης περιμετρικά της ενεργής περιοχής, σημειώνονται οι ζάρες.

Η συμπεριφορά αυτή δεν ήταν η αναμενόμενη, καθώς τα πρώτα πειράματα χαρακτηρισμού είχαν γίνει αφαιρώντας επιμετάλλωση κατ' αυτό τον τρόπο, χωρίς να δημιουργούνται ηλεκτρικά τόξα.



Εικόνα 5-40. Ηλεκτρικά τόξα κατά το 2° πείραμα.

5.8.4 Πείραμα (2α), με αντικριστά ηλεκτρόδια

Επιπλέον, δοκιμάστηκαν στο ίδιο δείγμα υλικού δυο ακόμη πιθανές αιτίες πρόκλησης ηλεκτρικών τόξων. Στην Εικόνα 5-40 τα δυο αλουμινένια ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα αντικριστά, κάτι που προτείνεται να αποφεύγεται από την κατασκευάστρια εταιρία.

Περιμένουμε λοιπόν να δημιουργηθεί κάποια φθορά στην συγκεκριμένη περιοχή του DEAP που βρίσκεται ακριβώς ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Το πείραμα όμως δείχνει πως δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο. Φαίνεται να έχει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με το να βρίσκονται τα ηλεκτρόδια σε απόσταση.

Επίσης το ίδιο δείχνει και το τελευταίο πείραμα όπου έχει αφαιρεθεί η επιμετάλλωση και από τις δυο πλευρές του DEAP και τα αλουμινένια ηλεκτρόδια τοποθετούνται και εκεί αντικριστά (Εικόνα 5-43). Δεν δημιουργείται κανένα ηλεκτρικό τόξο ή φθορά στο DEAP.

5.8.5 Πείραμα (2β), με καταστρεπτική επιμήκυνση

Η δεύτερη πιθανή αιτία που δοκιμάστηκε είναι εκείνη της επιμήκυνσης του DEAP πάνω από τα επιτρεπτά όρια, δηλαδή 30% στην εύκαμπτη διεύθυνση και 1% στην δύσκαμπτη. Σύμφωνα με την Polypower™, πάνω από τα όρια αυτά καταστρέφεται η επιμετάλλωση.

Το αποτέλεσμα του πειράματος ήταν πανομοιότυπο με αυτό της Εικόνας 5-40. Ένα πιθανό συμπέρασμα είναι λοιπόν εδώ, ότι το DEAP από το συγκεκριμένο καρούλι συμπεριφέρεται σαν να είναι ήδη κατεστραμμένη η επιμετάλλωσή του.

5.8.6 Πείραμα (2γ), ένα ηλεκτρόδιο

Δοκιμάζοντας να φορτίσουμε το υλικό έχοντας μόνο το ένα αλουμινένιο ηλεκτρόδιο σε επαφή μαζί του και μάλιστα από την πλευρά χωρίς κυματοειδείς αυλακώσεις, διαπιστώσαμε ότι το DEAP αποκρίνεται.

Πιθανότατα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι δυο πλευρές έχουν διαφορά φορτίου εφόσον η μια φορτίζεται ενώ η άλλη μένει ελεύθερη. Λογικά η διαφορά αυτή μεγιστοποιείται όταν συνδέσουμε και το ουδέτερο άκρο του φορτιστή.

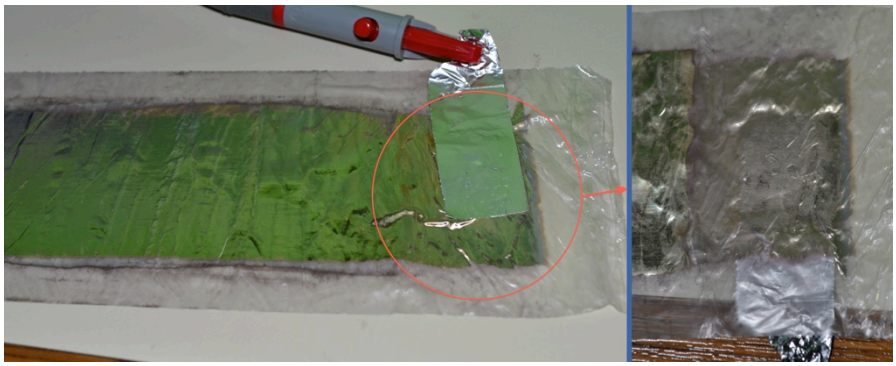
Ηλεκτρικά τόξα δεν περιμέναμε να δούμε στο πείραμα αυτό, το συμπέρασμα που μπορεί να βγει όμως είναι ότι τα επιμεταλλωμένα ηλεκτρόδια φαίνονται μονωμένα από το σιλικονάτο

σώμα του DEAP και πριν εμφανιστεί η μέγιστη διαφορά φορτίου, το DEAP λειτουργεί όπως αναμένεται. Είναι ένας πυκνωτής που προσπαθεί να φέρει πιο κοντά τις δυο φορτισμένες πλευρές του.

5.8.7 3ο Πείραμα, αφαίρεση επιμετάλλωσης αντικριστά από τα ηλεκτρόδια

Στην 3η περίπτωση, σε καινούργιο δείγμα υλικού και πηγαίνοντας σε μια πιο συντηρητική προσέγγιση, αφαιρέσαμε περιμετρικά την επιμετάλλωση και από τις δυο πλευρές του υλικού.

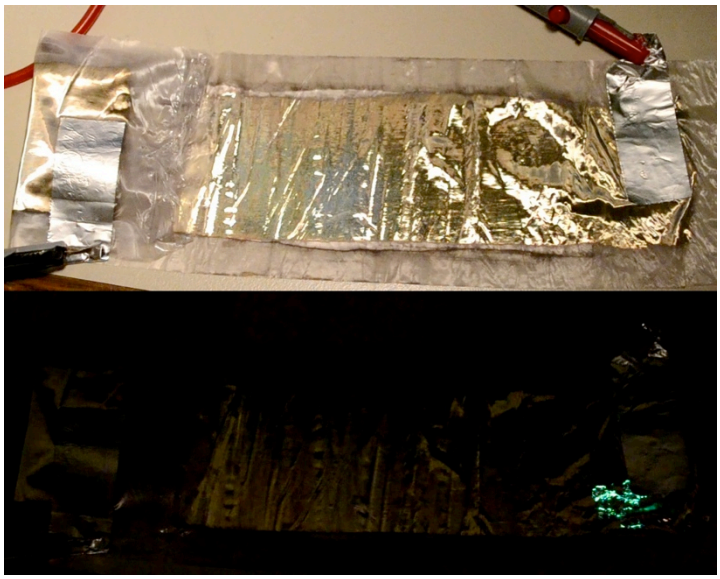
Επιπλέον, αφαιρέσαμε επιμετάλλωση και αντικριστά από τα αλουμινένια ηλεκτρόδια, όπως δείχνει ξεκάθαρα η Εικόνα 5-41.



Εικόνα 5-41. 3ο Πείραμα, με αφαίρεση επιμετάλλωσης αντικριστά απ' τα ηλεκτρόδια.

Στο πείραμα αυτό, είμαστε πλέον από την ασφαλή πλευρά και θα περιμέναμε να μην δούμε ανάπτυξη ηλεκτρικών τόξων, εφόσον το δείγμα δεν είναι ελαττωματικό. Κατά την φόρτιση όμως αναπτυχθήκαν και στην περίπτωση αυτή ηλεκτρικά τόξα και πάλι από την πλευρά της κυματοειδούς αυλάκωσης.

Η διαφορά με τα προηγούμενα δυο πειράματα είναι ότι τα ηλεκτρικά τόξα τώρα ξεσπούν έως ότου συναντήσουν το σημείο εκείνο του DEAP όπου ακριβώς αντικριστά υπάρχει και πάλι επιμετάλλωση (Εικόνα 5-42).



Εικόνα 5-42. Ηλεκτρικά τόξα κατά το 3ο πείραμα.

Επίσης στην Εικόνα 5-42 φαίνεται ότι είναι διπλωμένο το ένα άκρο του DEAP ώστε να έχουμε οπτική επαφή και των δυο αλουμινένιων ηλεκτροδίων. Επιβεβαιώνεται για άλλη μια φορά λοιπόν ότι τα ηλεκτρικά τόξα εμφανίζονται στην μια πλευρά του DEAP.

Εδώ θα ήταν χρήσιμο να γίνει ένα ακόμη πείραμα χωρίς διπλωμένο κάποιο από τα άκρα ώστε να δούμε αν εμφανίζονται και πάλι ηλεκτρικά τόξα στις γνωστές ύποπτες ευθείες.

5.8.8 4ο Πείραμα, ολική αφαίρεση επιμετάλλωσης

Στην τελευταία περίπτωση αφαιρέσαμε την επιμετάλλωση από ολόκληρη την επιφάνεια του DEAP και από τις δυο πλευρές. Στη συνέχεια μετρήσαμε τη χωρητικότητα του υλικού με τα αλουμινένια ηλεκτρόδια αντικριστά (Εικόνα 5-43) και βρέθηκε μετρήσιμη.

Στη συνέχεια φορτίσαμε το DEAP το οποίο αποκρίθηκε στην πολύ περιορισμένη περιοχή ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, όπως ήταν αναμενόμενο.

Εικόνα 5-43. 4ο Πείραμα, ολική αφαίρεση επιμετάλλωσης.

Το γεγονός ότι δεν αναπτύχθηκαν σπινθήρες μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πιθανό ελάττωμα δεν βρίσκεται στο σιλικονάτο σώμα του DEAP αλλά προέρχεται από τη διεργασία της επιμετάλλωσης και συγκεκριμένα εκείνης με την κυματοειδή αυλάκωση.

5.8.9 Συμπέρασμα

Από τα παραπάνω πειράματα προκύπτει πως το συγκεκριμένο καρούλι DEAP από το οποίο κατασκευάστηκε και ο κυλινδρικός επενεργητής, φέρεται να έχει κατασκευαστικές ατέλειες που σχετίζονται με το επιμεταλλωμένο ηλεκτρόδιο από την πλευρά των κυματοειδών αυλακώσεων.

Κεφάλαιο 6
Συμπεράσματα & Μελλοντική Εργασία

Η διπλωματική εργασία εστίασε στη βελτιστοποίηση σχεδιαστικών παραμέτρων του ποδιού ενός μονόποδου ρομπότ και στην πειραματική αξιολόγηση επενέργησης πέλματος με τεχνητό μυ. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης αντιμετωπίστηκε μέσα από την ανάλυση της δυναμικής του συστήματος και την αριθμητική του επίλυση σε λογισμικό προσομοίωσης . Οι προκλήσεις που παρουσιάζονται σε τέτοιου είδους ρομποτικά συστήματα σχετίζονται με την εναλλαγή της δυναμικής ανάλογα με τη φάση κίνησης, με την έντονα μη - γραμμική φύση τους και τη δυναμική σύζευξη μεταξύ των βαθμών ελευθερίας. Σκοπός της εργασίας είναι η συστηματική προσέγγιση του σχεδιασμού του ποδιού, ώστε να παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση - πριν την εφαρμογή οποιουδήποτε ελέγχου- λόγω των κατασκευαστικών του χαρακτηριστικών. Με άλλα λόγια, επιδιώκουμε η δυναμική του φυσικού συστήματος να είναι τέτοια, ώστε να μην αντιτίθεται στην επιβαλλόμενη κίνηση από τους νόμους ελέγχου [38]. Ένας παράπλευρος στόχος είναι η δημιουργία μιας εικονικής πειραματικής πλατφόρμας στην οποία θα δοκιμάζονται και θα αξιολογούνται εναλλακτικά σχέδια ποδιού. Στο τελευταίο μέρος της εργασίας, οι προκλήσεις που παρουσιάζονται σχετίζονται κυρίως με την κατασκευή του DEAP επενεργητή και την προσαρμογή του επάνω στο ρομποτικό σύστημα.

6.1 *Συμπεράσματα*

Μέσα από την πορεία της εργασίας αναδείχθηκαν τα ακόλουθα σημεία με ιδιαίτερο ενδιαφέρον:

- Η αναλυτική λύση απλοποιημένου μοντέλου καταδεικνύει ότι δεν ωφελεί την ευκινησία του ποδιού η προσθήκη επιπλέον μήκους από τη στροφική άρθρωση και πάνω. Το συμπέρασμα αφορά πόδι που αποτελείται από ευθύγραμμη ράβδο με ομοιόμορφη κατανομή μάζας.
- Το ίδιο απλοποιημένο μοντέλο καταδεικνύει ότι ωφελεί η προσθήκη επιπλέον μήκους ποδιού, από την στροφική άρθρωση και πάνω, στην περίπτωση που το πόδι διαθέτει

ανομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα. Συγκεκριμένα, η μορφολογία που αναδεικνύεται ως βέλτιστη, προς την ευκινησία του ποδιού, είναι εκείνη που συναντάται και στη φύση, με την υψηλότερη συγκέντρωση μάζας να βρίσκεται κοντά στο γοφό ή αλλιώς πόδι με γλουτό.

- Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από την αριθμητική επίλυση του σύνθετου μοντέλου, μέσα από το λογισμικό προσομοίωσης ADAMS. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης της κίνησης που διαγράφει το σύστημα για κάθε εναλλακτικό σχέδιο ποδιού. Στη συνέχεια, οι απεικονίσεις αυτές αναπαράγονται αλληλοεπικαλυπτόμενες και συγχρονισμένες με τρόπο ώστε να μπορεί να παρατηρήσει κανείς την εξέλιξη και τη διαφοροποίηση της κίνησης στο χρόνο.
- Η προσομοίωση καταδεικνύει επίσης ότι η ελαστικότητα του μηχανισμού πρόσδεσης παίζει σημαντικότατο ρόλο στη διατήρηση της κίνησης. Προκύπτει ότι για εναλλακτικά πόδια που δεν έχουν σημειακή επαφή με το έδαφος και χρειάζεται να κρατούν συγκεκριμένο προσανατολισμό, θα χρειαστούν μετατροπές τύπου μηχανισμού τεσσάρων συνδέσμων (4-bar) και αλλαγή της κυλινδρικής άρθρωσης, που φέρει μέχρι σήμερα το SAHR, σε πρισματική. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στην άποψη ότι η προσομοίωση σύνθετων δυναμικών συστημάτων μπορεί να δώσει μια βαθύτερη κατανόηση ανεπαίσθητων φαινομένων. Ένα ακόμη παρόμοιο παράδειγμα είναι η τριβή που παρουσιάζεται στο άκρο του ποδιού λόγω του σφαιρικού χώρου δράσης του μηχανισμού πρόσδεσης ή η στατική τριβή του ρότορα.
- Η επενέργηση του πέλματος με ηλεκτροενεργό πολυμερές (DEAP) παρουσίασε χαμηλές επιδόσεις, ενώ το υλικό φαίνεται να μην είναι ακόμα αξιόπιστο. Αν και περαιτέρω διερεύνηση κρίνεται απαραίτητη, θα μπορούσαμε να πούμε ότι μέχρι τώρα το υλικό αυτό δείχνει ικανό για επενέργηση μηχανισμών μικρότερης κλίμακας που έχουν και μικρότερες απαιτήσεις σε ισχύ. Η επιτεύξιμη επιμήκυνση και το μέγεθος της δύναμης που παράγεται προς το χρόνο, βρίσκεται ακόμα σε επίπεδα χαμηλά για ρομποτικά συστήματα με πόδια.

6.2 *Μελλοντική εργασία*

Στα πλαίσια της μελλοντικής εργασίας παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξεταστούν τα παρακάτω:

- Μέτρηση της ιδιοσυχνότητας ολόκληρου του συστήματος κινητήρα - μειωτήρα και ποδιού, όπως έγινε στο Κεφ. 2.3.15 σελ. 54 για το ελεύθερο από τροχαλίες και κινητήρα πόδι. Αυτό απαιτεί πιο σύνθετο πείραμα μιας και η ταλάντωση θα πρέπει τώρα να επιβάλλεται σε ολόκληρο το σύστημα, δίνοντας εντολή ρεύματος στον κινητήρα για ημιτονοειδή ταλάντωση. Το κριτήριο εύρεσης της ιδιοσυχνότητας του συστήματος θα είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος από τον κινητήρα για συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων.

- Μεγαλύτερη σύγκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με εκείνα της προσομοίωσης, πιθανώς και με την επανάληψη πειραμάτων με το μονόποδο ρομπότ SAHR. Με βάσει τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να εξαχθούν προσεγγιστικά μεγέθη για παραμέτρους του πραγματικού συστήματος.
- Διερεύνηση ύπαρξης βέλτιστης τροχιάς που μπορεί να ακολουθήσει το πόδι στην εναέρια φάση, βασισμένη στη διαχείριση της στροφορμής που υπάρχει στο σύστημα κατά την απογείωση. Σκοπός θα είναι και εκεί η ελαχιστοποίηση της πρόνευσης του κορμού.

Βιβλιογραφία

[1] Ahmadi, M., and M. Buehler. *Stable Control of a One - Legged Robot Exploiting Passive Dynamics.* Canada: McGill University, 1998.

[2] Ahmadi, M., and M. Buehler. «The ARL monopod II running robot: control and energetics.» *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation.* 1999. 1689-1694.

[3] «Aluminium, oxide density.» http://www.simetric.co.uk/si_materials.htm (πρόσβαση 2 13, 2011).

[4] Ashley, Steven. «Artificial Muscles.» *Scientific American*, 1 October 2003: 53-59.

[5] Bar-Cohen, Yoseph. *Electroactive Polymer (EAP) actuators as Artificial Muscles: reality, potential and challenges.* Second. Μοντάζ: Yoseph Bar-Cohen. Washington: SPIE PRESS, 2004.

[6] Barone, Roberto. «Stambecchi al lago del Cingino (Valle Antrona).» *You Tube.* http://www.youtube.com/user/robby4815#p/u/19/N2Jad7Yk1Dw (21-02-2011).

[7] Baruh, H. (1999). Analytical Dynamics. Singapore: McGraw-Hill Book Co.

[8] Bedford, A., & Fowler, W. (2008). *Engineering Mechanics: Dynamics* (5η εκδ.). Singapore: Pearson.

[9] Benslimane, M. Y, Hans-Erik Kiil, and M. J. Tryson. «Dielectric electro-active polymer push actuators: performance and challenges.» *Wiley Interscience*, 2010: 415-421.

[10] Buehler, M. «Dynamic Locomotion with One, Four and Six - Legged Robots.» *Robotics Society of Japan* 20, n. 3 (2002): 15-20.

[11] Buehler, M., R. Playter, and M. Raibert. «Robots Step Outside.» *International Symposium Adaptive Motion of Animals and Machines.* (AMAM), 2005.

[12] Carpi, F., C. Salaris, and D. De Rossi. «Folded dielectric elastomer actuators.» *Smart Materials and Structures*, 2007: S300-S305.

[13] Carpi, F., and D. De Rossi. «Dielectric elastomer cylindrical actuators: electromechanical modeling and experimental evaluation.» *Materials Science and Engineering* C24 (2004): 555-562.

[14] Chatzakos, P., and E. Papadopoulos. «Bio-Inspired Design of Electrically-Driven Bounding Quadrupeds via Parametric Analysis.» *Mechanisms and Machine Theory* 44 (2009): 559-579.

[15] Coldbrunn, R. W. *Design and Control of a Robotic Leg with Braided Pneumatic Actuators.* MSc: Case Western Reserve university, 2000.

[16] Danfoss. *PolyPower DEAP technology for actuators, sensors and energy converters.* http://www.polypower.com/ (03-01-2011).

[17] Danfoss Polypower. «Engineering Data Sheets.» *Polypower.* 2011. http://www.polypower.com/Files/Filer/Data_sheets/094F0031_Film_Kit_Engineering_Sheet.pdf (πρόσβαση 2 10, 2011).

[18] Full, R. J., K. Autumn, J. Chung, and A. Ahn. «Rapid Negotiation of Rough Terrain by the Death-Head Cockroach.» *America Zoologist* 38 (1998): 81A

[19] Full, R.J., and D.E. Koditschek. «Templates and Anchors: Neuromechanical Hypotheses of Legged Locomotion on Land.» *The Journal of Experimental Biology* 202 (1999): 3325-3352.

[20] Gentle, R. «A parametric model of sprinting with speed limited by rotational inertia of the legs.» *Acta of Bioengineering and Biomechanics* 3, αρ. 1 (2001).

[21] Ghigliazza, R.M., R. Altendorfer, P. Holmes, και D.E. Koditschek. «A Simply Stabilized Running Model.» *SIAM Journal of Applied Dynamical Systems* 2, n. 2 (2003): 187-218.

[22] Gregorio, P. *Design, control and energy minimization strategies for an Electrically Actuated Legged Robot.* McGill University, M. Eng. Thesis, 1994.

[23] Gregorio, P., M. Ahmadi, και M. Buehler. «Design, Control and Energetics of an Electrically Actuated Legged Robot.» *Systems, Man and Cybernetics - Part B: Cybernetics* 27, αρ. 4 (1997): 626-634.

[24] Knutzen, H. &. (1995). *Biomechanical basis of human movement.* Baltimore: Williams & Wilkins.

[25] Lieberman, D., et al. *Running Barefoot: Biomechanics of Foot Strike.* http://www.barefootrunning.fas.harvard.edu/4BiomechanicsofFootStrike.html (02-28-2011).

[26] MathWorks. *MATLAB.* http://www.mathworks.com/products/matlab/ (03-09-2011).

[27] McGeer, T. «Passive bipedal running.» IS-TR-89-02, Centre for Syst. Sci., Simon Fraser University, 1989.

[28] Meirovitch, L. (1998). Methods of Analytical Dynamics. New York, USA: Dover.

[29] MIT. *8.03 Physics III: Vibrations and Waves.* http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-03-physics-iii-vibrations-and-waves-fall-2004/ (02-10-2011).

[30] MSC. *Adams for Multibody Dynamics.* http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/Adams.aspx(03-01-2011).

[31] Muybridge, E. (2007). Muybridge´s Human Figure in Motion CD-ROM and Book (1899 από τους Chapman και Hall, 1η εκδ.). N.Y., US: Dover Electronic Clip Art.

[32] Netter, F. *Άτλας βασικών ιατρικών επιστημών: Ανατομία του ανθρώπου.* Αθήνα: Ιατρικές εκδόσεις Π. Χ. Πασχαλίδης, 2004.

[33] Oubaek, J., και R. Sarban. *Modeling and Feedback Control of an Electro Active Polymer (EAP) actuator.* Denmark: University of Southern Denmark, 2009.

[34] Ozsecen, M. Y., and C. Mavroidis. «Nonlinear Force Control od Dielectric Electroactive Polymer Actuators.» *EAPAD.* San Diego, 2010. 76422C-1:8.

[35] Papadopoulos, E., and M. Buehler. «Stable running in a quadruped robot with compliant legs.» *Proceeding 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation.* 2000. 444-449.

[36] Papadopoulos, E., and N. Cherouvim. «On Increasing Energy Autonomy for a One - Legged Hopping Robot.» *Robotics and Automation.* New Orleans: IEEE, 2004.

[37] «Plexiglass.» *Wikipedia.* http://en.wikipedia.org/wiki/Poly(methyl_methacrylate) (02-13-2011).

[38] Raibert, Marc H. *Legged Robots That Balance.* London: The MIT Press, 1986.

[39] Saranli, U., M. Buehler, and D. Koditschek. «RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot.» *Robotics Research* 20, αρ. 7 (2001): 616-631.

[40] Tryson, M., R. Sarban, και K. P. Lorenzen. «The dynamic properties of tubular DEAP actuators.» *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD).* Denmark, 2010.

[41] Tryson, Michael, Hans-Erik Kiil, and Mohamed Benslimane. «Powerful tubular core free dielectric electro activate polymer (DEAP) ″PUSH″ actuator.» *Electroactive Polymer Actuators and Devices* (SPIE) 7287 (2009): 72871F-1,1F-11.

[42] Walker, R. (2011). Mass, Weight, Density or Specific Gravity of Bulk Materials. (02-10-2011, from The SI System for Metric Conversion: http://www.simetric.co.uk/si_materials.htm

[43] Wolfram. *Mathematica: Technical Computing Software - Taking You from Idea to Solution.* http://www.wolfram.com/mathematica/ (πρόσβαση 3 1, 2011).

[44] Χατζάκος, Παναγιώτης. *Παραμετρική Ανάλυση και Συστηματικός Σχεδιασμός Ρομπότ με Πόδια.* Αθήνα: ΕΜΠ, 2009.

[45] Χερουβείμ, Νικόλαος Δημήτριος. *Δυναμική και Έλεγχος Ρομποτικών Συστημάτων με Πόδια.* Αθήνα: ΕΜΠ, 2009.

Παράρτημα Ι

Παρατίθενται οι εξισώσεις κίνησης σε MATLAB για την περίπτωση του πλήρους μοντέλου του μονόποδου ρομπότ που αναλύεται στο Κεφ. 2.4.

Επιταχύνσεις κατά την φάση εδάφους

$\ddot{x}(t)$

```
(-2).*gamd.*ld.*cos(gam)+gamd.^2.*l.*sin(gam)+(-1).*mb.^(-1).*((...
-1).*k.*l+k.*l0+(-1).*bl.*ld+gamd.^2.*l.*mb+(-1).*g.*mb.*cos(gam))...
.*sin(gam)+(-2).*l.*(4.*il+4.*l.^2.*mb+L.^2.*ml).^(-1).*cos(gam).*...
((-2).*bh.*gamd+(-4).*gamd.*l.*ld.*mb+2.*bh.*thd+2.*tor+2.*g.*l.*...
mb.*sin(gam)+g.*L.*ml.*sin(gam));
```

$\ddot{y}(t)$

```
(-1).*gamd.^2.*l.*cos(gam)+mb.^(-1).*cos(gam).*((-1).*k.*l+k.*l0+( ...
-1).*bl.*ld+gamd.^2.*l.*mb+(-1).*g.*mb.*cos(gam))+(-2).*gamd.*ld.* ...
sin(gam)+(-2).*l.*(4.*il+4.*l.^2.*mb+L.^2.*ml).^(-1).*sin(gam).*(( ...
-2).*bh.*gamd+(-4).*gamd.*l.*ld.*mb+2.*bh.*thd+2.*tor+2.*g.*l.* ...
mb.*sin(gam)+g.*L.*ml.*sin(gam));
```

$\ddot{\theta}(t)$

```
ib.^(-1).*(bh.*(gamd+(-1).*thd)+(-1).*tor);
```

Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι επιταχύνσεις των γ(t) και l(t) αντί για τις επιταχύνσεις των x(t) και y(t):

$\ddot{\gamma}(t)$

```
2.*(4.*il+4.*l.^2.*mb+L.^2.*ml).^(-1).*((-2).*bh.*gamd+(-4).* ...
gamd.*l.*ld.*mb+2.*bh.*thd+2.*tor+2.*g.*l.*mb.*sin(gam)+g.*L.*ml.* ...
sin(gam));
```

$\ddot{l}(t)$

```
mb.^(-1).*((-1).*k.*l+k.*l0+(-1).*bl.*ld+gamd.^2.*l.*mb+(-1).*g.* ...
mb.*cos(gam));
```

Επιταχύνσεις κατά την εναέρια φάση

$\ddot{x}(t)$

```
(-1/2).*(l0+(-1).*le).*ml.*(mb+ml).^(-1).*((-4).*(mb+ml).*((l0+( ...
-1).*le).^2.*mb.*ml+4.*il.*(mb+ml)).^(-1).*(bh.*((-1).*gamd+thd)+ ...
tor).*cos(gam)+gamd.^2.*sin(gam));
```

$\ddot{y}(t)$

```
(1/2).*(mb+ml).^(-1).*((-2).*g.*mb+ml.*((-2).*g+(-1).*(l0+(-1).* ...
le).*(gamd.^2.*cos(gam)+4.*(mb+ml).*(l0.^2.*mb.*ml+(-2).*l0.*le.* ...
mb.*ml+le.^2.*mb.*ml+4.*il.*(mb+ml)).^(-1).*(bh.*((-1).*gamd+thd)+ ...
tor).*sin(gam))));
```

$\ddot{\gamma}(t)$

```
4.*(mb+ml).*(l0.^2.*mb.*ml+(-2).*l0.*le.*mb.*ml+le.^2.*mb.*ml+4.* ...
il.*(mb+ml)).^(-1).*(bh.*((-1).*gamd+thd)+tor);
```

$\ddot{\theta}(t)$

```
ib.^(-1).*(bh.*(gamd+(-1).*thd)+(-1).*tor);
```