



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.

Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΟΝΟΠΟΔΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕ ΕΝΑΝ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΗ
ΣΕ ΕΔΑΦΟΣ ΜΕ ΥΠΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ**

Βασίλειος Βασιλόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2014

Περίληψη

Παρόλο που ο τομέας των ρομπότ με πόδια είναι από τους πιο αναπτυσσόμενους τομείς της ρομποτικής, πολλά ερωτήματα παραμένουν ακόμα ανοικτά. Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες ερευνητικές προκλήσεις είναι η μελέτη της απόδοσης των ρομποτικών συστημάτων με πόδια σε έδαφος με υποχωρητικότητα. Για το λόγο αυτό, πρέπει να μελετηθεί η αλληλεπίδραση πέλματος και εδάφους.

Για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης πέλματος και εδάφους συνήθως αγνοούνται ορισμένες από τις επιδράσεις της παραμόρφωσης του εδάφους, όπως η συμπίεση και η μόνιμη παραμόρφωση εδάφους. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση περιορίζει τη χρήση των ρομπότ με πόδια σε δύσκαμπτα εδάφη. Αυτή η εργασία εστιάζει στη μελέτη της αλληλεπίδρασης πέλματος-εδάφους στην περίπτωση ενός μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή σε έδαφος με υποχωρητικότητα.

Σε αυτή την εργασία, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο κρούσης που είναι εμπνευσμένο από άλλους κλάδους της μηχανικής και επιτρέπει μια πιο ενδελεχή μελέτη της συμπεριφοράς του ρομπότ κατά την κίνησή του σε έδαφος με υποχωρητικότητα. Αυτό το μοντέλο είναι μια επέκταση των βισκοελαστικών μοντέλων κρούσης και ονομάζεται βισκοπλαστικό.

Προκειμένου να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις της υποχωρητικότητας του εδάφους, αναπτύσσονται νέα δυναμικά μοντέλα του ρομπότ με αυξανόμενη πολυπλοκότητα. Τα δυναμικά μοντέλα ελέγχονται χρησιμοποιώντας διαφορετικούς ελεγκτές για άκαμπτο έδαφος και η συμπεριφορά τους εξετάζεται σε διαφορετικά εδάφη.

Ακόμη, αναπτύσσεται ένας νέος ελεγκτής, βασισμένος σε προηγούμενες εργασίες, που αντιμετωπίζει προβλήματα ενεργειακών απωλειών χωρίς να απαιτεί γνώση των παραμέτρων του εδάφους. Αυτός ο ελεγκτής προσαρμόζεται γρήγορα στις αλλαγές εδάφους και αναπληρώνει τις ενεργειακές απώλειες. Επιπλέον, ο ελεγκτής λαμβάνει επιτυχημένα υπόψη φαινόμενα ολίσθησης κατά την προσγείωση του ρομπότ, αντιμετωπίζει προβλήματα που προκύπτουν από την κρούση του πέλματος με δύσκαμπτο έδαφος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανώμαλο έδαφος. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται επιβεβαιώνουν αυτά τα στοιχεία.

Τέλος, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί για την επιβεβαίωση αυτών των προσομοιώσεων.

Abstract

Although legged locomotion is a rapidly advancing area of robotics, many unresolved questions still exist. One of the most intriguing research challenges is the performance of legged robots on compliant terrains. For this reason, the foot-terrain interaction must be studied.

The foot-terrain interaction is usually tackled by disregarding some of the effects of ground deformation like permanent deformation and compaction, however this approach restricts their application to stiff environments. This work focuses on the foot-terrain interaction of a hopping monopod robot with a single actuator when a compliant terrain exists.

In this work, an impact dynamics model is used, which is inspired by other areas of engineering and allows a more thorough and straightforward study of the robot behavior during fast dynamic walking on compliant terrains. This approach uses an extension of the viscoelastic impact models, called viscoplastic.

In order to include the effects of compliance, models of the robots with increasing complexity are presented. These dynamic models are tested using different controllers developed for stiff terrain and their performance is examined for different kinds of terrains.

A novel monopod controller is also developed, based on previous works, which deals with energy dissipation issues, without requiring the knowledge of ground parameters. This controller adapts quickly to terrain alterations, compensating for energy losses. Additionally, the controller successfully regards the effects of slip during touchdown, copes with the problems that arise during hard impacts as the ground becomes stiffer and can be used in the case of irregular terrain. Simulation results prove the validity of the analysis presented.

Finally, a specific approach towards the design and construction of the experimental setup, that will be used to validate the simulation results, is presented.

*Αφιερώνεται στους γονείς μου, Θανάση και Ζαχαρούλα
στον αδερφό μου, Παναγιώτη
και στην κοπέλα μου, Ξένια*

Πρόλογος

Η διπλωματική αυτή εργασία στηρίχθηκε στη βασική ιδέα ότι τα πέλματα των ποδιών σε ένα ρομπότ με πόδια δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να λειτουργούν ως απόλυτα σταθερές περιστροφικές αρθρώσεις σε κάθε έδαφος ανεξάρτητα με τα χαρακτηριστικά του. Από την εμπειρία μας, μπορούμε να σκεφτούμε περιπτώσεις εξαιρετικά παραμορφώσιμου εδάφους (π.χ λάσπη) ή εξαιρετικά ολισθηρού εδάφους (π.χ πάγος) που επηρεάζουν τη συμπεριφορά ενός συστήματος με πόδια (π.χ άνθρωπος) όταν προσπαθεί να τα διασχίσει. Παράλληλα, παρατηρήθηκε στο εργαστήριό μας ότι σε προσομοιώσεις του τετράποδου ρομπότ στο λογισμικό ADAMS εμφανίζονταν μη επιθυμητές αναπηδήσεις των ποδιών κατά τη φάση εδάφους σε δύσκαμπτο έδαφος, γεγονός που ενίσχυσε την πεποίθηση ότι χρειαζόταν μια νέα περιγραφή της δυναμικής των ρομποτικών συστημάτων με πόδια, που να ενσωματώνει ιδιότητες που αποδίδονται στο έδαφος.

Σε γενικές γραμμές, ένα μονόποδο ρομπότ μπορεί να λειτουργήσει ως η βασική μονάδα δοκιμής αλγορίθμων για ένα ρομπότ με πολλά πόδια, λόγω του ότι ο ερευνητής δεν χρειάζεται να ασχοληθεί με θέματα συγχρονισμού των ποδιών και μπορεί να εστιάσει αποκλειστικά στη δυναμική και στον έλεγχο ενός ποδιού. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία εστιάζουμε σε ένα μονόποδο ρομπότ με έναν επενεργητή, που αποτελεί ουσιαστικά τμήμα του τετράποδου ρομπότ που υπάρχει στο εργαστήριό μας. Παράλληλα, μιας και το συγκεκριμένο μονόποδο ρομπότ θεωρείται τμήμα ενός ρομποτικού συστήματος με πολλά πόδια, δεν μελετάται η κίνηση πρόνευσης (pitch) του κύριου σώματός του. Με τον τρόπο αυτό, η προσοχή επικεντρώνεται στην αλληλεπίδραση πέλματος και εδάφους.

Για την επίτευξη των στόχων της εργασίας, γίνεται ανανέωση του δυναμικού μοντέλου του ρομπότ προκειμένου να συμπεριληφθεί σε αυτό η επίδραση του εδάφους. Όπως αποδείχθηκε μέσω προσομοιώσεων στο λογισμικό MATLAB, η κρούση του πέλματος με το έδαφος παίζει έναν εξέχοντα ρόλο στη συνολική ευστάθεια του συστήματος. Για το λόγο αυτό, αναπτύσσεται ένας νέος ελεγκτής που μπορεί να αναιρεί φαινόμενα που σχετίζονται με την υποχωρητικότητα του εδάφους και να συντηρεί την κίνηση του ρομπότ ακόμα και σε ανώμαλο έδαφος. Η λογική του νέου ελεγκτή είναι ιδιαίτερα απλή και στηρίζεται σε ενεργειακά μεγέθη, προκειμένου να είναι δυνατή η

εφαρμογή του σε κάθε σύστημα μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή, ανεξάρτητα από το μοντέλο περιγραφής του.

Τέλος, με στόχο την εξακρίβωση των συμπερασμάτων από τις προσομοιώσεις, επανασχεδιάζεται και βελτιώνεται η ήδη υπάρχουσα διάταξη του μονόποδου ρομπότ που υπήρχε στο εργαστήριό μας. Ο σχεδιασμός των ηλεκτρονικών πλακετών του ρομπότ έγινε στο λογισμικό Eagle, ενώ ο σχεδιασμός του κύριου σώματος του ρομπότ στο λογισμικό Solidworks.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα αυτής της διπλωματικής εργασίας Καθηγητή κ. Παπαδόπουλο, για τις πολύτιμες συμβουλές και τη στήριξη που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ιωσήφ Παρασκευά για την πολύτιμη βοήθειά του, ιδιαίτερα σε θέματα κρούσεων. Αξίζει να αναφερθεί ότι το καινοτόμο βισκοπλαστικό μοντέλο κρούσης που χρησιμοποιείται στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι τμήμα της δικής του δουλειάς.

Η παρούσα εργασία έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο – ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: ΘΑΛΗΣ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract.....	3
Πρόλογος.....	5
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων.....	9
Κατάλογος Πινάκων	13
Κατάλογος Συντημήσεων.....	15
Κατάλογος Συμβόλων	16
1 Εισαγωγή	18
1.1 Σκοπός Εργασίας	18
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	19
1.3 Δομή Εργασίας	22
2 Μοντελοποίηση και έλεγχος ρομπότ σε άκαμπτο έδαφος.....	24
2.1 Διαδοχή των φάσεων κατά την κίνηση του ρομπότ	24
2.2 Μοντέλο ανεστραμμένου εκκρεμούς με ελατήριο	25
2.3 Απλό 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή	27
2.4 Χαρακτηριστικά ελεγκτών για ρομπότ με πόδια	29
2.5 Ελεγκτής του Raibert	30
2.6 Ο ελεγκτής MultiPart	32
2.7 Απόκριση του ρομπότ σε άκαμπτο έδαφος	34
3 Μελέτη επίδρασης τριβής και υποχωρητικότητας εδάφους.....	36
3.1 Σύνθετο 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή.....	36
3.2 Λεπτομερές 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή.....	39
3.3 Κινηματικός και ενεργειακός συντελεστής επανάταξης.....	42
3.4 Θεωρία κρούσεων Hertz.....	43
3.5 Μοντέλα κρούσης Kelvin-Voigt και Hunt-Crossley.....	45

3.6	Βισκοπλαστικό μοντέλο κρούσης.....	47
3.7	Επανασυμπιέσεις και επαναπηδήσεις.....	51
3.8	Υπολογισμός τριβής	54
3.9	Απόκριση ελεγκτή Raibert σε έδαφος με υποχωρητικότητα	55
3.10	Απόκριση ελεγκτή MP σε έδαφος με υποχωρητικότητα	57
4	Έλεγχος ρομπότ σε έδαφος με τριβή και υποχωρητικότητα	62
4.1	Προδιαγραφές και λογική νέου ελεγκτή	62
4.2	Extended MultiPart Controller I (x-MP-I).....	64
4.3	Extended MultiPart Controller II (x-MP-II).....	73
4.4	Extended MultiPart Controller III (x-MP-III) για ανώμαλα εδάφη	86
4.5	Επίδραση βαρύτητας στην απόδοση του ελεγκτή x-MP	96
4.6	Τρόπος εφαρμογής του ελεγκτή x-MP σε πραγματική διάταξη.....	100
5	Κατασκευή πειραματικής διάταξης.....	103
5.1	Παρουσίαση των βασικών στοιχείων της πειραματικής διάταξης	103
5.2	Σχεδιασμός ηλεκτρονικής διάταξης.....	108
5.3	Σχεδίαση και κατασκευή ηλεκτρονικών πλακετών	112
5.4	Επίδειξη λειτουργίας της ηλεκτρονικής διάταξης	116
5.5	Σχεδιασμός κύριου σώματος μονόποδου ρομπότ	118
6	Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία	121
6.1	Συμπεράσματα.....	121
6.2	Προτάσεις για μελλοντική εργασία	123
	Βιβλιογραφία	126
	Παράρτημα Α.....	130
A.1	Βοηθητικές σχέσεις ελεγκτή x-MP-II	130
A.2	Βοηθητικές σχέσεις ελεγκτή x-MP-III	132
	Παράρτημα Β.....	134
	Παράρτημα Γ	147

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1	Φάσεις κίνησης μονόποδου ρομπότ.	24
Σχήμα 2-2	Μοντέλο ανεστραμμένου εκκρεμούς με ελατήριο.....	25
Σχήμα 2-3	Απλό 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή.	27
Σχήμα 2-4	Προσδιορισμός ουδέτερου σημείου σύμφωνα με τον ελεγκτή του Raibert.....	31
Σχήμα 2-5	Απόκριση του μονόποδου ρομπότ σε άκαμπτο έδαφος: (a) πρόσθια ταχύτητα \dot{x} και (b) κατακόρυφη θέση σώματος ρομπότ y . .	35
Σχήμα 3-1	Σύνθετο 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή.	37
Σχήμα 3-2	Λεπτομερές 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή.	40
Σχήμα 3-3	Κρούση άκαμπτης σφαίρας σε παραμορφώσιμη επίπεδη επιφάνεια.....	44
Σχήμα 3-4	Καμπύλη κρούσης μοντέλου Hunt-Crossley.	46
Σχήμα 3-5	Μοντέλα κρούσης: (α) Βισκοελαστικό, (β) Βισκοπλαστικό.	48
Σχήμα 3-6	Καμπύλες κρούσης για το βισκοπλαστικό μοντέλο με διαφορετικές παραμέτρους λ και κατανομή ενεργειακών απωλειών.	50
Σχήμα 3-7	Μεταβολή Συντελεστή Μόνιμης Παραμόρφωσης Εδάφους λ ύστερα από διαδοχικές κρούσεις για διάφορες τιμές των παραμέτρων $a(i)$ και $\beta(i)$	50
Σχήμα 3-8	Περιγραφή της επανασυμπίεσης στο σύνθετο μοντέλου του μονόποδου ρομπότ.....	51
Σχήμα 3-9	Καμπύλες κρούσης με επανασυμπιέσεις στο σύνθετο μοντέλο.....	53
Σχήμα 3-10	Απόκριση σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή του Raibert σε διάφορα εδάφη: (a) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} , (b) Ύψος σώματος y	57
Σχήμα 3-11	Απόκριση του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή MP: (a) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} , (b) Ύψος σώματος y	58
Σχήμα 3-12	Απόκριση γωνίας γ του σύνθετου μοντέλου με τον ελεγκτή MP.	59
Σχήμα 3-13	Κάθετη δύναμη F_g από το έδαφος συναρτήσει του βάθους διείσδυσης y_g για σύνθετο μοντέλο σε διάφορα εδάφη.....	60
Σχήμα 3-14	Εστίαση στο χρονικό διάστημα μιας φάσης εδάφους: (a) Τριβή F_t , (b) Γωνία ποδιού γ	61

Σχήμα 4-1	Απόκριση του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-I σε εδάφη χωρίς μόνιμη παραμόρφωση: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x}	69
Σχήμα 4-2	Απόκριση του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-I σε εδάφη με μόνιμη παραμόρφωση: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x}	71
Σχήμα 4-3	Απόκριση γωνίας γ του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-I σε εδάφη με μόνιμη παραμόρφωση.....	72
Σχήμα 4-4	Ροπή επενεργητή τ για το σύνθετο μοντέλο με χρήση του ελεγκτή x-MP-I σε εδάφη με μόνιμη παραμόρφωση.....	72
Σχήμα 4-5	Εκτιμώμενη εξέλιξη της κίνησης του ρομπότ από την απογείωση στο διασκελισμό $j-1$ μέχρι την προσγείωση στο διασκελισμό j	75
Σχήμα 4-6	Απόκριση του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-II σε εδάφη χωρίς μόνιμη παραμόρφωση: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x}	80
Σχήμα 4-7	Διάγραμμα φάσεων $y-\dot{y}-t$ του σύνθετου μοντέλου κατά τη διαδρομή του σε εδάφη χωρίς μόνιμη παραμόρφωση.....	81
Σχήμα 4-8	Απόκριση σύνθετου και λεπτομερούς μοντέλου με χρήση ελεγκτή x-MP-II σε εδάφη με μόνιμη παραμόρφωση: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x}	84
Σχήμα 4-9	Ροπή επενεργητή τ για λεπτομερές μοντέλο με χρήση του ελεγκτή x-MP-II σε εδάφη με μόνιμη παραμόρφωση.....	85
Σχήμα 4-10	Προφίλ ροπής επενεργητή τ για το λεπτομερές μοντέλο σε εύρος ενός διασκελισμού.....	85
Σχήμα 4-11	Κίνηση του ρομπότ σε έδαφος με κλίση.....	88
Σχήμα 4-12	Απόκριση σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε ανώμαλο έδαφος μορφής κρατήρα: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x}	92
Σχήμα 4-13	Απόκριση σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε ανώμαλο έδαφος μορφής λόφου: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x}	93

Σχήμα 4-14	Απόκριση γωνίας γ του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-III στο έδαφος μορφής λόφου.....	94
Σχήμα 4-15	Ροπή επενεργητή τ στο σύνθετο μοντέλο στις διάφορες φάσεις εδάφους με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε έδαφος μορφής λόφου.....	95
Σχήμα 4-16	Εστίαση στην απόκριση του μήκους του ποδιού l στο σύνθετο μοντέλο με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε έδαφος μορφής λόφου.....	95
Σχήμα 4-17	Απόκριση σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε ανώμαλο έδαφος στον Άρη: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x}	97
Σχήμα 4-18	Απόκριση σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε ανώμαλο έδαφος στη Σελήνη: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x}	98
Σχήμα 4-19	Εστίαση στο διάγραμμα ροπής τ στο σύνθετο μοντέλο στις διάφορες φάσεις εδάφους με χρήση του ελεγκτή x-MP-III με διαφορετική επιτάχυνση βαρύτητας.....	99
Σχήμα 4-20	Εστίαση στην απόκριση του μήκους του ποδιού l στο σύνθετο μοντέλο με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε διαφορετικές βαρύτητες. ...	100
Σχήμα 5-1	Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης.....	103
Σχήμα 5-2	Ο μηχανισμός του ψευδογονάτου.....	105
Σχήμα 5-3	Βασικά στοιχεία πειραματικής διάταξης: (a) Αδρανειακός αισθητήρας (IMU), (b) Σύστημα Beagleboard-xM και Trainer-xM Board, (c) Ενισχυτής DZRALTE-012L080.	107
Σχήμα 5-4	Αποτύπωση σχεδιασμού ηλεκτρονικής διάταξης.....	108
Σχήμα 5-5	Απόκριση του εσωτερικού βρόχου ελέγχου ρεύματος στον ενισχυτή DZRALTE-012L080: (a) Κακή ρύθμιση των κερδών, (b) Καλή ρύθμιση των κερδών.....	110
Σχήμα 5-6	Σχηματικό διάγραμμα Main Board.	113
Σχήμα 5-7	Τελικό σχέδιο Main Board.....	114
Σχήμα 5-8	Σχηματικό διάγραμμα Auxiliary Board.....	115
Σχήμα 5-9	Τελικό σχέδιο Auxiliary Board.....	115
Σχήμα 5-10	Τρέχον setup μονόποδου ρομπότ.....	116

Σχήμα 5-11	Τοποθέτηση ποδιού σε γωνία 20.5° : (a) Απόκριση γωνίας γ , (b) Απόκριση σφάλματος.....	118
Σχήμα 5-12	Σχεδιασμός κύριου σώματος μονόποδου ρομπότ: (a) Τελικό σχέδιο, (b) Χρησιμοποιούμενα προφίλ αλουμινίου.	119

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1	Παράμετροι προσομοιώσεων σε άκαμπτο έδαφος.	34
Πίνακας 3-1	Παράμετροι προσομοίωσης για ανίχνευση επανασυμπιέσεων στο σύνθετο μοντέλο.	52
Πίνακας 3-2	Χαρακτηριστικά διαφόρων εδαφών χωρίς μόνιμη παραμόρφωση.	55
Πίνακας 3-3	Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή ελεγκτών σε έδαφος με υποχωρητικότητα.	56
Πίνακας 4-1	Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή x-MP-I σε έδαφος με υποχωρητικότητα και χωρίς μόνιμη παραμόρφωση.	68
Πίνακας 4-2	Χαρακτηριστικά διαφόρων εδαφών με μόνιμη παραμόρφωση για δοκιμή του ελεγκτή x-MP-I.	70
Πίνακας 4-3	Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή ελεγκτή x-MP-I σε έδαφος με υποχωρητικότητα και μόνιμη παραμόρφωση.	70
Πίνακας 4-4	Σύντομη περιγραφή αλγορίθμου ελεγκτή x-MP-II.	79
Πίνακας 4-5	Χαρακτηριστικά διαφόρων εδαφών με μόνιμη παραμόρφωση για δοκιμή του ελεγκτή x-MP-II.	81
Πίνακας 4-6	Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή ελεγκτή x-MP-II σε έδαφος με υποχωρητικότητα και με μόνιμη παραμόρφωση.	82
Πίνακας 4-7	Παράμετροι προσομοίωσης λεπτομερούς μοντέλου για δοκιμή ελεγκτή x-MP-II σε έδαφος με υποχωρητικότητα και με μόνιμη παραμόρφωση.	83
Πίνακας 4-8	Σύγκριση CoT για διαφορετικά εδάφη με βάση το λεπτομερές μοντέλο και τον ελεγκτή x-MP-II.	86
Πίνακας 4-9	Σύντομη περιγραφή αλγορίθμου ελεγκτή x-MP-III.	90
Πίνακας 4-10	Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή x-MP-III σε ανώμαλο έδαφος.	91
Πίνακας 4-11	Χαρακτηριστικά εδάφους μορφής κρατήρα για δοκιμή του x-MP-III. ...	92
Πίνακας 4-12	Χαρακτηριστικά εδάφους μορφής λόφου για δοκιμή του x-MP-III.	93
Πίνακας 4-13	Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή x-MP-III σε διαφορετικές βαρύτητες.	96

Πίνακας 4-14	Χαρακτηριστικά εδάφους μορφής κρατήρα για δοκιμή του x-MP-III σε διαφορετικές βαρύτητες.....	96
---------------------	---	----

Κατάλογος Συντμήσεων

CoT	Cost of Transport
des	Desired
est	Estimated
f	Flight
HC	Hunt-Crossley
KV	Kelvin-Voigt
lo	Liftoff
MP	MultiPart
nd	Nondeformable
s	Stance
SLIP	Spring Loaded Inverted Pendulum
td	Touchdown

Κατάλογος Συμβόλων

b_g	Συντελεστής απόσβεσης της κρούσης
b_h	Συντελεστής απωλειών στην περιστροφική άρθρωση
b_l	Συντελεστής απωλειών στην πρισματική άρθρωση
b_l'	Ισοδύναμος συντελεστής απωλειών x-MP
c_a	Συντελεστής συσχέτισης σχετικής ταχύτητας κρούσης και κινηματικού συντελεστή επανάταξης
E_{damp}	Ενεργειακές απώλειες λόγω τριβών
E_{des}	Επιθυμητή στάθμη ενέργειας συστήματος
E_{gdis}	Ενεργειακές απώλειες λόγω κρούσης με το έδαφος
E_{lo}	Ενέργεια συστήματος κατά την απογείωση
E_m	Προσφερόμενη ενέργεια από τον επενεργητή
E^*	Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της κρούσης
e	Κινηματικός συντελεστής επανάταξης
e_*	Ενεργειακός συντελεστής επανάταξης
F_g	Κάθετη δύναμη από το έδαφος
F_t	Οριζόντια δύναμη τριβής από το έδαφος
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας
h_{des}	Επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης
I_l	Αδράνεια ποδιού
k	Σταθερά ελατηρίου
k'	Ισοδύναμη σταθερά ελατηρίου x-MP
k_g	Συντελεστής δυσκαμψίας της κρούσης
k_p	P κέρδος ελεγκτή PD στη φάση πτήσης
k_d	D κέρδος ελεγκτή PD στη φάση πτήσης
l	Μήκος ποδιού
L	Ελεύθερο μήκος ποδιού
n	Εκθέτης Hertz
m	Ισοδύναμη μάζα ποδιού και πέλματος σύνθετου μοντέλου
m_b	Μάζα σώματος

m_l	Μάζα ποδιού
M	Μάζα σώματος για σύνθετο και λεπτομερές μοντέλο
M'	Ισοδύναμη μάζα σώματος x-MP
T_n	Φυσική περίοδος συστήματος
x	Οριζόντια θέση σώματος
x_{ft}	Οριζόντια θέση πέλματος
x_{ground}	Οριζόντια συντεταγμένη προφίλ εδάφους
x_l	Οριζόντια θέση κέντρου μάζας ποδιού
\dot{x}_{des}	Επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα
y	Κατακόρυφη θέση σώματος
y_{apex}	Μέγιστο ύψος αναπήδησης σε έναν διασκελισμό
y_{ft}	Κατακόρυφη θέση πέλματος
y_g	Σχετικό βάθος διείσδυσης κατά την κρούση
y_{ground}	Κατακόρυφη συντεταγμένη προφίλ εδάφους
y_l	Κατακόρυφη θέση κέντρου μάζας ποδιού
γ	Γωνία ποδιού με την κατακόρυφο
Δt_s	Διάρκεια φάσης εδάφους
Δt_f	Διάρκεια φάσης πτήσης
λ	Συντελεστής Μόνιμης Παραμόρφωσης Εδάφους
μ_c	Συντελεστής τριβής Coulomb
μ_s	Συντελεστής στατικής τριβής
τ	Ροπή επενεργητή
φ	Κλίση εδάφους

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Η ανάπτυξη του κλάδου των ρομπότ με πόδια είναι σχετικά πρόσφατη και εκτείνεται στις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Τα ρομπότ με πόδια σίγουρα δεν υπερτερούν των τροχοφόρων ρομπότ σε επίπεδα εδάφη, μιας και η μετακίνηση με τροχούς είναι ιδιαίτερα απλή και αποδοτική όταν το έδαφος είναι τελείως επίπεδο. Ωστόσο, ένα σημαντικό μέρος του πλανήτη μας, αλλά και άλλων πλανητών, αποτελείται από δύσβατες περιοχές με ανωμαλίες εδάφους και μεγάλες κλίσεις. Τέτοιες περιοχές καθίστανται απρόσιτες στην περίπτωση των συμβατικών τροχοφόρων ρομπότ. Αντίθετα, ένα ρομποτικό σύστημα με πόδια μπορεί να μετακινηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρεί την ισορροπία του και να μην ανατρέπεται σε περιπτώσεις όπου το έδαφος γίνεται εξαιρετικά δύσβατο.

Μια από τις σημαντικότερες διαφορές των ρομπότ με πόδια σε σχέση με τα συμβατικά τροχοφόρα ρομπότ είναι το γεγονός ότι δεν βρίσκονται σε συνεχή επαφή με το έδαφος. Τα ρομπότ με πόδια μπορούν, για παράδειγμα, να επιλέξουν τις περιοχές όπου θα τοποθετηθούν τα πέλματα των ποδιών, αποφεύγοντας και ξεπερνώντας τυχόν εμπόδια που εμφανίζονται στην πορεία τους. Με τον τρόπο αυτό, η τροχιά τους είναι διακριτή και όχι συνεχής. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των ρομπότ με πόδια είναι η αποσύζευξη (decoupling) της κίνησης του σώματος του ρομπότ από την κίνηση των ποδιών. Συγκεκριμένα, οι θέσεις των ποδιών μπορούν να επιλεγθούν με τέτοιο τρόπο ώστε το σώμα να ακολουθεί μια ομαλή τροχιά, παρά τις όποιες ανωμαλίες εμφανίζει το έδαφος. Αντίθετα, στην περίπτωση των τροχοφόρων ρομπότ, η κίνηση των τροχών που βρίσκονται σε συνεχή επαφή με το έδαφος προδιαγράφει πλήρως και την κίνηση του σώματος.

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές εξελίξεις στον τεχνολογικό κλάδο των ρομπότ με πόδια και έχουν κατασκευαστεί αρκετά πρωτότυπα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο διαγωνισμός της DARPA (DARPA Robotics Challenge – DRC) με την κατασκευή εντυπωσιακών ρομπότ με πόδια που έχουν ως στόχο την υποβοήθηση του ανθρώπου σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι ο ρόλος και η σημασία των ρομποτικών συστημάτων με πόδια διαρκώς αυξάνεται με την πάροδο των χρόνων.

Ωστόσο, παρόλο που έχουν ήδη προηγηθεί εντυπωσιακές κατασκευές, οι περισσότερες από αυτές θεωρούν το έδαφος εντελώς επίπεδο και άκαμπτο, χωρίς την εμφάνιση υποχωρητικότητας (compliance). Με τον όρο υποχωρητικότητα ονομάζουμε την ιδιότητα του εδάφους να συμπιέζεται, να παραμορφώνεται και να αποσυμπιέζεται, αποθηκεύοντας και απελευθερώνοντας ελαστική ενέργεια, κατά τη διάρκεια της κρούσης ενός σώματος με αυτό. Αντίθετα, όσα ρομπότ λαμβάνουν υπόψη τις ανωμαλίες του εδάφους ή/και την υποχωρητικότητα που εμφανίζει κινούνται συνήθως με στατική ισορροπία, μετακινώντας λίγα πόδια κάθε φορά, ενώ τα υπόλοιπα πόδια εξασφαλίζουν την ευστάθεια του σώματος δημιουργώντας ένα πολύγωνο στήριξης εντός του οποίου βρίσκεται διαρκώς η προβολή κατά την κατακόρυφο του κέντρου μάζας του συστήματος. Ελάχιστες εργασίες έχουν εστιάσει στην επίδραση της μορφής του εδάφους στην περίπτωση κίνησης ενός ρομποτικού συστήματος με πόδια με δυναμική ισορροπία, όπου το σύστημα μπορεί να αντέξει την απώλεια στήριξης για ένα μικρό χρονικό διάστημα με αντάλλαγμα μεγαλύτερες ταχύτητες κίνησης και αξιοποίηση όλων των ποδιών σε κάθε διασκελισμό (stride). Ακριβώς αυτός είναι και ο κεντρικός στόχος της παρούσας εργασίας, για την περίπτωση ενός μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή.

Συγκεκριμένα, σε αυτήν την εργασία μελετάται η επίδραση της υποχωρητικότητας του εδάφους στην κίνηση του μονόποδου ρομπότ χρησιμοποιώντας διάφορους ελεγκτές (controllers) που ρυθμίζουν την κίνηση του ρομπότ σε άκαμπτο έδαφος και γίνεται προσπάθεια βελτίωσης του δυναμικού μοντέλου του μονόποδου ρομπότ ώστε να συμπεριληφθεί και ο παράγοντας του εδάφους. Επίσης, σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός νέου ελεγκτή για την αντιμετώπιση της υποχωρητικότητας αλλά και τυχόν ανωμαλιών του εδάφους, ο οποίος θα επιτυγχάνει μια επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα και ένα επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης του σώματος του ρομπότ. Τέλος, ένας επιπλέον στόχος είναι η βελτίωση της ήδη υπάρχουσας πειραματικής διάταξης στο εργαστήριό μας για τη διεξαγωγή πειραμάτων σε ανώμαλο έδαφος με υποχωρητικότητα.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ο κεντρικός στόχος στον τομέα των ρομπότ με πόδια είναι, όπως προαναφέρθηκε, η κατασκευή μηχανών που μπορούν να διασχίζουν δύσβατα εδάφη τα οποία τα συμβατικά τροχοφόρα ρομπότ δεν μπορούν να διασχίσουν. Ωστόσο, τα ρομπότ με πόδια

υπόκεινται σε σημαντικά μεγαλύτερες απαιτήσεις ελέγχου. Το πρόβλημα αυτό γίνεται ακόμα μεγαλύτερο όταν το ρομπότ τρέχει σε έδαφος με άγνωστα χαρακτηριστικά.

Οι πιο παλιές προσεγγίσεις απαιτούσαν ένα γνωστό τύπο εδάφους προκειμένου το ρομπότ να μπορεί να το διασχίσει με στατική ισορροπία, απλοποιώντας τα θέματα ελέγχου [24]. Αντίθετα, τετράποδα ρομπότ όπως το HyQ του ιταλικού ινστιτούτου IIT εμπνέονται από τη φύση και μιμούνται βηματισμούς ζώων, παρουσιάζοντας ικανοποιητική δυναμική απόκριση σε συγκεκριμένες απαιτήσεις κίνησης [14]. Ωστόσο, η κίνησή τους γίνεται σε απόλυτα επίπεδο και άκαμπτο έδαφος. Άλλες εργασίες εστιάζουν σε δίποδα που τρέχουν σε γνωστό έδαφος μορφής σκάλας (stair-like terrain) [15]. Σχετικά πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί ρομπότ που μπορούν να τρέχουν σε άγνωστα εδάφη, όπως το ρομπότ RHex [30]. Ωστόσο, το RHex χρησιμοποιεί έλεγχο ανοικτού βρόχου, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ελεγχθεί με μεγάλη ακρίβεια η πρόσθια ταχύτητά του. Αντίθετα, το ρομπότ BigDog που αναπτύχθηκε από την εταιρία Boston Dynamics είναι ικανό να πραγματοποιήσει πολλά σενάρια κίνησης σε άγνωστα εδάφη, ωστόσο η κίνησή του είναι ενεργειακά μη βέλτιστη [3].

Από την άλλη πλευρά, το τετράποδο ρομπότ StarlETH χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο τοποθέτησης πέλματος, μαζί με κατάλληλη κατανομή διαφόρων ισοδύναμων δυνάμεων ανάμεσα στα πόδια που στηρίζουν το σώμα κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους, προκειμένου να διατηρεί τη δυναμική ευστάθεια της κίνησης και να απορρίπτει εξωτερικές διαταραχές, όπως μη αναμενόμενα εμπόδια ή εξωτερικές δυνάμεις [12]. Μια παρόμοια στρατηγική με αλγόριθμο τοποθέτησης πέλματος χρησιμοποιεί και το ρομπότ LittleDog της Boston Dynamics που αναπτύχθηκε για το διαγωνισμό της DARPA, προκειμένου να διαβεί δύσβατα εδάφη [19]. Ωστόσο, το LittleDog ισορροπεί με στατική και όχι με δυναμική ευστάθεια.

Παρά την πρόοδο που εμφανίζεται τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων και στρατηγικών ελέγχου για ρομποτικά συστήματα με πόδια, σε πολλές εργασίες δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη η αλληλεπίδραση πέλματος και εδάφους. Για παράδειγμα, η επαφή μεταξύ πέλματος και εδάφους για το μονόποδο ρομπότ με γόνατο που εμφανίζεται στο [2], μοντελοποιήθηκε ως μια απόλυτα σταθερή περιστροφική άρθρωση. Ανάλογες στρατηγικές έχουν εφαρμοστεί και σε άλλα ρομπότ [29], [31]. Μια παρόμοια προσέγγιση εφαρμόστηκε και για τη δυναμική αναπαράσταση ενός μονόποδου ρομπότ που παρουσιάζεται στα [5], [7], [8], όπου αναπτύχθηκε μια μέθοδος

ελέγχου η οποία καθιστά το ρομπότ ικανό να διασχίσει ανώμαλα εδάφη με έναν μόνο επενεργητή. Στην πραγματικότητα, τα περισσότερα δυναμικά μοντέλα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία θεωρούν ότι το έδαφος είναι μη παραμορφώσιμο.

Εκτός από τα δυναμικά μοντέλα για ρομπότ με πόδια που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία, αξίζει να γίνει μια μικρή αναφορά και στις προσπάθειες αναπαράστασης της αλληλεπίδρασης εδάφους και πέλματος που αναλύονται σε παλαιότερες εργασίες. Συνήθως, επιλέγεται ένα απλοποιημένο μοντέλο εδάφους και οι διάφοροι ελεγκτές τροποποιούν τη συμπεριφορά τους θεωρώντας το έδαφος ως μια εξωτερική διαταραχή. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση δεν εγγυάται τη διεξαγωγή μιας επιτυχούς κίνησης σε περιβάλλοντα υψηλής παραμορφωσιμότητας. Στη βιβλιογραφία, αναφέρεται ο όρος «terramechanics» [10], όπου γίνεται χρήση του μοντέλου Bekker ή άλλων παρόμοιων μοντέλων [36]. Αυτή η προσέγγιση δεν οδηγεί πάντα σε ακριβή αναπαράσταση της δυναμικής αλληλεπίδρασης πέλματος-εδάφους σε υψηλές ταχύτητες κίνησης ενός ρομπότ με πόδια. Για το λόγο αυτό, σε πρόσφατη εργασία έγινε εισαγωγή του όρου «terradynamics» [21]. Και πάλι, αυτή η προσέγγιση δεν ενσωματώνει βασικά χαρακτηριστικά κρούσεων, ο ρόλος των οποίων είναι εξαιρετικά σημαντικός στην περίπτωση γρήγορης δυναμικής κίνησης.

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση γρήγορης δυναμικής κίνησης ενός ρομπότ με πόδια, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι η φάση εδάφους, κατά την οποία ένα η περισσότερα πόδια του ρομπότ βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, μπορεί να θεωρηθεί ως μια κρούση. Τέτοιες κρούσεις, μπορούν να μοντελοποιηθούν με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Η στερεομηχανική θεωρία δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής, ενώ η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία είναι ιδιαίτερα απαιτητική υπολογιστικά και δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε online αλγόριθμους. Η χρήση «υποχωρητικών βισκοελαστικών μοντέλων» φαίνεται πιο κατάλληλη, αφού διαφορετικά εδάφη μπορούν να μοντελοποιηθούν με συγκεντρωμένα στοιχεία (lumped parameters) κατάλληλων χαρακτηριστικών [34]. Σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο, δεν μοντελοποιούνται οι διάφορες μόνιμες παραμορφώσεις που μπορεί να εμφανίζει το έδαφος, με αποτέλεσμα να προτείνονται παραλλαγμένα «βισκοπλαστικά μοντέλα» [9], [37]. Μια άλλη εργασία έχει δείξει τις προοπτικές μιας τέτοιας προσέγγισης [20]. Σε πρόσφατες εργασίες έχει επίσης γίνει προσπάθεια μοντελοποίησης αυτής της συμπεριφοράς σε σώματα που εμφανίζουν υποχωρητικότητα [1], ωστόσο τέτοιες προσεγγίσεις δεν ενσωματώνουν

φαινόμενα επαναλαμβανόμενων συμπίεσεων κατά την κρούση ενώ, παράλληλα, οι ενεργειακές απώλειες μοντελοποιούνται μόνο με τη χρήση όρων ιξώδους τριβής. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία θα γίνει χρήση ενός πιο πλήρους βισκοπλαστικού μοντέλου κρούσης, που ενσωματώνει όλα τα παραπάνω στοιχεία [35].

1.3 Δομή Εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται αρχικά μια απλούστερη αντιμετώπιση της δυναμικής του μονόποδου ρομπότ καθώς και διάφορες παραλλαγές ελεγκτών που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για την κίνηση ενός τέτοιου ρομπότ σε άκαμπτο έδαφος. Στη συνέχεια, επιχειρείται μια ανανέωση του δυναμικού μοντέλου αναπαράστασης του μονόποδου ρομπότ ώστε να ενσωματωθεί ο παράγοντας της υποχωρητικότητας του εδάφους, ενώ παράλληλα αναλύονται τα μειονεκτήματα των ελεγκτών για άκαμπτο έδαφος, σε μια τέτοια περίπτωση. Αναλύεται εκτενώς ένας νέος ελεγκτής που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας για την περίπτωση ενός μονόποδου ρομπότ που τρέχει σε άγνωστο έδαφος και εξετάζεται λεπτομερώς η απόκρισή του. Τέλος, παρουσιάζεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε για το σχεδιασμό και την κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης μονόποδου ρομπότ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πειράματα σε ανώμαλα εδάφη με υποχωρητικότητα.

Στο πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας, μια σύντομη ανασκόπηση στην εκτενή βιβλιογραφία αλλά και η δομή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, ξεκινά το κύριο μέρος της εργασίας. Μελετάται το πλέον απλό μοντέλο μονόποδου ρομπότ, το SLIP, καθώς και ένα απλό 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή. Ακόμη, αναλύονται δύο ελεγκτές που έχουν ήδη παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία, ο ελεγκτής του Raibert και ο ελεγκτής MultiPart, και επιβεβαιώνεται η σωστή λειτουργία τους σε άκαμπτο έδαφος χρησιμοποιώντας το απλό 2D μοντέλο.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναπτύσσονται δύο νέα δυναμικά μοντέλα αναπαράστασης του μονόποδου ρομπότ, ένα σύνθετο και ένα λεπτομερές, για την ακριβή αναπαράσταση της επίδρασης του εδάφους στο σύστημα. Ακόμη, γίνεται εκτενής παρουσίαση του βισκοπλαστικού μοντέλου εδάφους που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, ενώ μελετώνται οι αδυναμίες των ελεγκτών που αναλύθηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο στην περίπτωση εδάφους με υποχωρητικότητα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται η ανάπτυξη του νέου ελεγκτή που ονομάστηκε Extended MultiPart Controller (x-MP). Ο ελεγκτής αυτός έχει ως στόχο να αντιμετωπίζει τα φαινόμενα υποχωρητικότητας του εδάφους και να επιτυγχάνει μια επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα και ένα επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης του ρομπότ. Ο ελεγκτής x-MP παρουσιάζεται σε τρεις διαφορετικές εκδόσεις του με αυξανόμενη πολυπλοκότητα, ώστε να συμπεριληφθούν όσο το δυνατό περισσότερα στοιχεία. Η μελέτη της συμπεριφοράς του x-MP μέσω προσομοιώσεων γίνεται για πολλά διαφορετικά εδάφη, με ή χωρίς ανωμαλίες εδάφους και σε διαφορετικά περιβάλλοντα βαρύτητας. Τέλος, γίνεται μια σύντομη συζήτηση σχετικά με τον τρόπο εφαρμογής του ελεγκτή x-MP σε ένα πραγματικό ρομπότ, εκτός των προσομοιώσεων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, αναλύεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της ηλεκτρονικής διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί στο μονόποδο ρομπότ, ενώ εξακριβώνεται και η σωστή λειτουργία της. Ακόμη, δίνεται μια εναλλακτική καλύτερου σχεδιασμού του κύριου σώματος του μονόποδου ρομπότ, προκειμένου να ικανοποιούνται συγκεκριμένες προδιαγραφές κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων.

Στο έκτο κεφάλαιο, εκτίθεται μια ανασκόπηση των συμπερασμάτων που έχουν προκύψει από την εργασία, καθώς και δυνατότητες μελλοντικής εργασίας στο ίδιο αντικείμενο.

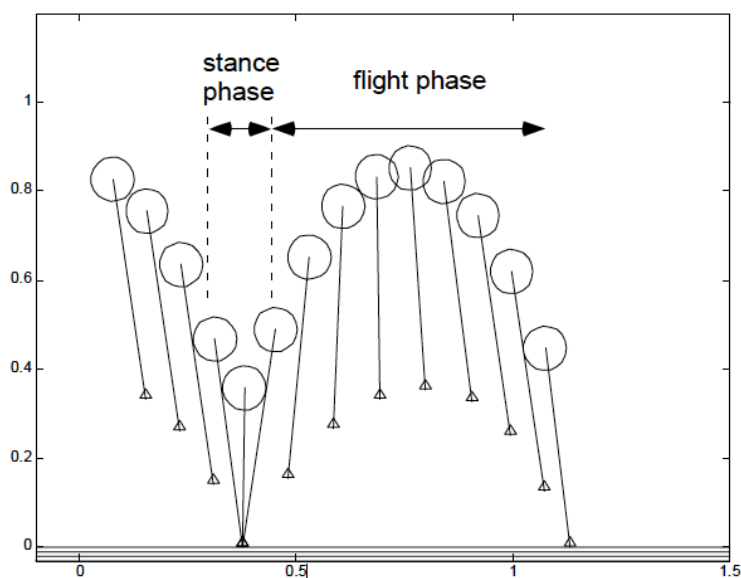
Ακολουθούν τρία παραρτήματα, στο πρώτο από τα οποία παρουσιάζονται διάφορες βοηθητικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται στους αλγορίθμους του ελεγκτή x-MP. Στο δεύτερο παράρτημα παρατίθεται ενδεικτικά ο πλήρης κώδικας για την προσομοίωση του λεπτομερούς δυναμικού μοντέλου του ρομπότ σε έδαφος με υποχωρητικότητα και ανωμαλίες με χρήση του ελεγκτή x-MP-III. Τέλος, στο τρίτο παράρτημα υπάρχουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των διαφόρων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη του μονόποδου ρομπότ.

Η διπλωματική εργασία συνοδεύεται και από ένα CD-ROM που περιέχει όλους τους κώδικες των προσομοιώσεων αλλά και τα προγράμματα ελέγχου του ρομπότ σε γλώσσα C που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη.

2 Μοντελοποίηση και έλεγχος ρομπότ σε άκαμπτο έδαφος

2.1 Διαδοχή των φάσεων κατά την κίνηση του ρομπότ

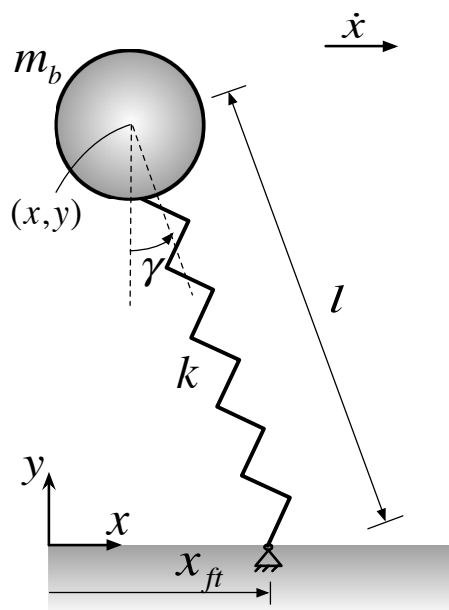
Αρχικά, παρατίθεται μια σύντομη περιγραφή της διαδοχής των φάσεων κατά τη διάρκεια της κίνησης του μονόποδου ρομπότ. Το ρομπότ ξεκινά την κίνησή του με μια οριζόντια βολή από ένα ορισμένο ύψος. Με τον τρόπο αυτό, ξεκινά η πρώτη **φάση πτήσης** (flight phase). Στη συνέχεια, το πόδι τοποθετείται σε μια συγκεκριμένη γωνία, ώστε να προετοιμαστεί για την επικείμενη πρόσκρουση με το έδαφος. Μόλις το πέλμα αγγίξει το έδαφος (touchdown-td), το ελατήριο αρχίζει να συμπιέζεται και ξεκινά η **φάση εδάφους** (stance phase). Στην περίπτωση όπου το έδαφος θεωρηθεί εντελώς άκαμπτο, το ελατήριο συνεχίζει να συμπιέζεται μέχρι ενός ορίου και έπειτα ξεκινά η αποσυμπίεσή του. Μόλις το ελατήριο φτάσει και πάλι στο φυσικό του μήκος, η φάση εδάφους λήγει και το πόδι απογειώνεται και πάλι (liftoff-lo), ώστε να ξεκινήσει μια νέα φάση πτήσης και ο κύκλος να επαναληφθεί, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2-1. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τη μοντελοποίηση και μεθόδους ελέγχου του ρομπότ στην περίπτωση όπου το έδαφος θεωρείται εντελώς άκαμπτο και δεν εμφανίζει στοιχεία **υποχωρητικότητας** (compliance).



Σχήμα 2-1: Φάσεις κίνησης μονόποδου ρομπότ.

2.2 Μοντέλο ανεστραμμένου εκκρεμούς με ελατήριο

Στη βιβλιογραφία [29], έχει προταθεί ένα ιδιαίτερα απλό μοντέλο που είναι ικανό να μοντελοποιήσει τη συμπεριφορά του μονόποδου ρομπότ σε άκαμπτο έδαφος κατά τη φάση εδάφους. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, που ονομάζεται **μοντέλο ανεστραμμένου εκκρεμούς με ελατήριο** (Spring Loaded Inverted Pendulum – SLIP), το ρομπότ μοντελοποιείται ως μια μάζα συνδεδεμένη με ένα ελατήριο, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2-2.



Σχήμα 2-2: Μοντέλο ανεστραμμένου εκκρεμούς με ελατήριο.

Η μάζα του κύριου σώματος του ρομπότ συμβολίζεται με m_b , το στιγμιαίο μήκος του ποδιού συμβολίζεται με l , ενώ το ελεύθερο μήκος του ποδιού είναι L . Η σταθερά του ελατηρίου είναι k , ενώ το κύριο σώμα του ρομπότ σχηματίζει γωνία γ με την κατακόρυφο, καθώς κινείται με πρόσθια ταχύτητα \dot{x} και κατακόρυφη ταχύτητα \dot{y} . Αξίζει να παρατηρηθεί ότι το σημείο επαφής του ποδιού με το έδαφος μοντελοποιείται ως μια σταθερή περιστροφική άρθρωση: το «πέλμα» του ποδιού δεν μετακινείται κατά την οριζόντια ή κάθετη διεύθυνση και φαινόμενα τριβής ή υποχωρητικότητας του εδάφους αμελούνται.

Η κινητική ενέργεια του συστήματος, κατά την διάρκεια της φάσης εδάφους, δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$T = \frac{1}{2} \cdot m_b \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \quad (2-1)$$

ενώ η δυναμική του ενέργεια από τη σχέση

$$U = m_b \cdot g \cdot y + \frac{1}{2} \cdot k \cdot (L-l)^2 \quad (2-2)$$

Συνεπώς, η συνάρτηση Lagrange είναι

$$L = T - U = \frac{1}{2} \cdot m_b \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) - m_b \cdot g \cdot y - \frac{1}{2} \cdot k \cdot (L-l)^2 \quad (2-3)$$

Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Lagrange και τη σχέση

$$l = \sqrt{(x_{ft} - x)^2 + y^2} \quad (2-4)$$

όπου x_{ft} η σταθερή οριζόντια θέση του ποδιού κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους και (x, y) οι συντεταγμένες της μάζας m_b που χρησιμοποιούνται ως γενικευμένες μεταβλητές για τη μέθοδο Lagrange (δηλαδή $q_1 = x$ και $q_2 = y$), μπορούμε να εξάγουμε τη δυναμική του μοντέλου κατά τη φάση εδάφους, που περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_1} = 0 \Rightarrow m_b \cdot \ddot{x} + k \cdot (x_{ft} - x) \cdot \frac{\left(L - \sqrt{(x_{ft} - x)^2 + y^2} \right)}{\sqrt{(x_{ft} - x)^2 + y^2}} = 0 \quad (2-5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_2} = 0 \Rightarrow m_b \cdot \ddot{y} + m_b \cdot g - k \cdot y \cdot \frac{\left(L - \sqrt{(x_{ft} - x)^2 + y^2} \right)}{\sqrt{(x_{ft} - x)^2 + y^2}} = 0 \quad (2-6)$$

Χρησιμοποιώντας την Εξ. (2-4), καταλήγουμε στις παρακάτω απλοποιημένες δυναμικές εξισώσεις:

$$m_b \cdot \ddot{x} + k \cdot (L-l) \cdot \sin \gamma = 0 \quad (2-7)$$

$$m_b \cdot \ddot{y} + m_b \cdot g - k \cdot (L-l) \cdot \cos \gamma = 0 \quad (2-8)$$

Κατά τη φάση πτήσης, το σώμα του ρομπότ θεωρείται ότι εκτελεί απλή βαλλιστική κίνηση αφού το πόδι θεωρείται στο σύνολό του αβαρές, συνεπώς η δυναμική κατά τη φάση πτήσης περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$\ddot{x} = 0 \quad (2-9)$$

$$\ddot{y} = -g \quad (2-10)$$

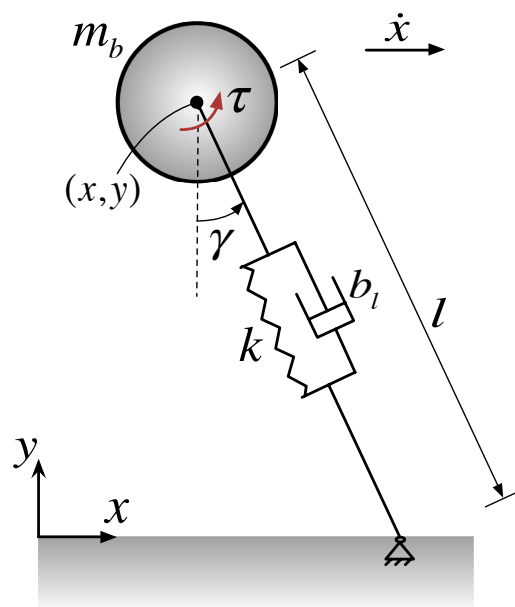
Οι Εξ. (2-7)-(2-10) περιγράφουν την παθητική κίνηση του μοντέλου μιας και στο σύστημα δεν υπάρχει καμία επενέργεια και είναι σημαντικά μη γραμμικές. Η μη

γραμμικότητα των δυναμικών εξισώσεων είναι σύνηθες φαινόμενο σε μοντέλα περιγραφής της κίνησης ρομπότ με πόδια.

Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον ότι το μοντέλο SLIP μπορεί, με κατάλληλες αρχικές συνθήκες και χωρίς καμία επενέργεια, να διατηρήσει τα στοιχεία της κίνησης εφόσον δεν υπάρχουν ενεργειακές απώλειες λόγω τριβών ή κρούσεων με το έδαφος και το πόδι μπορεί να τοποθετηθεί στην επιθυμητή γωνία πρόσπτωσης χωρίς δαπάνη ενέργειας. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα, όπου κάθε είδους απώλεια μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την κίνηση του ρομπότ.

2.3 Απλό 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή

Με στόχο την ακριβή αναπαράσταση των απωλειών που λαμβάνουν χώρα κατά την κίνηση του ρομπότ, προτάθηκε ένα νέο μοντέλο για την περιγραφή της κίνησης του ρομπότ [1]. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, που παρουσιάζεται στο Σχ. 2-3, έχει ενσωματωθεί μια απόσβεση b_l που αντιστοιχεί στις ιξώδεις τριβές στην πρισματική άρθρωση του ρομπότ. Προκειμένου να αναπληρώνονται οι συγκεκριμένες απώλειες και να διατηρείται η παθητική κίνηση του ρομπότ, χρησιμοποιείται ένας επενεργητής που ασκεί ροπή τ στην περιστροφική άρθρωση του ρομπότ. Τα υπόλοιπα μεγέθη παραμένουν ίδια, όπως παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 2.2.



Σχήμα 2-3: Απλό 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή.

Η κινητική ενέργεια του συστήματος, κατά τη φάση εδάφους, βρίσκεται και πάλι από την Εξ. (2-1) και η δυναμική του ενέργεια από την Εξ. (2-2). Η ισχύς των απωλειών περιγράφεται από τη σχέση:

$$P_c = \frac{1}{2} \cdot b_l \cdot \dot{l}^2 \quad (2-11)$$

ενώ η προσφερόμενη ισχύς στο σύστημα είναι:

$$P_i = \tau \cdot \dot{\gamma} \quad (2-12)$$

Οι δυναμικές εξισώσεις προσδιορίζονται και πάλι με τη μέθοδο Lagrange ως εξής:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial P_c}{\partial \dot{q}_i} = \frac{\partial P_i}{\partial \dot{q}_i} \quad (2-13)$$

όπου q_i μια γενικευμένη μεταβλητή του συστήματος και ο δείκτης $i = (1,2)$ αντιστοιχεί σε κάθε βαθμό ελευθερίας του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, χρησιμοποιώντας και πάλι ως γενικευμένες μεταβλητές τις συντεταγμένες (x,y) της μάζας m_b , καθώς και την Εξ. (2-4), παίρνουμε τις ακόλουθες δυναμικές εξισώσεις

$$m_b \cdot \ddot{x} + k \cdot (L-l) \cdot \sin \gamma - b_l \cdot \dot{l} \cdot \sin \gamma = -\frac{\tau}{l} \cdot \cos \gamma \quad (2-14)$$

$$m_b \cdot \ddot{y} + m_b \cdot g - k \cdot (L-l) \cdot \cos \gamma + b_l \cdot \dot{l} \cdot \cos \gamma = -\frac{\tau}{l} \cdot \sin \gamma \quad (2-15)$$

Κατά τη φάση πτήσης, το σώμα του ρομπότ θεωρείται και πάλι ότι εκτελεί βαλλιστική κίνηση, συνεπώς η δυναμική της πτήσης περιγράφεται από τις Εξ. (2-9) και (2-10).

Το συγκεκριμένο μοντέλο ενσωματώνει τις ιξώδεις τριβές στην πρισματική άρθρωση του ρομπότ, ενώ προβλέπει και μια μέθοδο εισόδου ενέργειας στο σύστημα ώστε να διατηρείται η κίνηση του μονόποδου ρομπότ και να αναπληρώνονται τυχόν απώλειες ενέργειας. Ωστόσο, η επίδραση του εδάφους αμελείται, καθώς το πέλμα του ρομπότ θεωρείται και πάλι ότι συμπεριφέρεται ως μια σταθερή περιστροφική άρθρωση κατά τη φάση εδάφους. Παράλληλα, το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρεί ότι η τοποθέτηση του ποδιού σε μια επιθυμητή γωνία πρόσπτωσης κατά τη φάση πτήσης γίνεται χωρίς δαπάνη ενέργειας, διότι το πόδι είναι αβαρές. Κάτι τέτοιο, ωστόσο, είναι ανακριβές, μιας και στην πραγματικότητα ο επενεργητής προσφέρει ροπή κατά την τοποθέτηση του ποδιού σε μια γωνία [1], [29]. Παρά τις απλοποιήσεις αυτές, το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει με αρκετά καλή ακρίβεια την κίνηση του ρομπότ σε άκαμπτο έδαφος και χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό ελεγκτών για ρομπότ με πόδια.

2.4 Χαρακτηριστικά ελεγκτών για ρομπότ με πόδια

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η δυσκολία κατά τη φάση του σχεδιασμού ελεγκτή για ένα ρομποτικό σύστημα με πόδια έγκειται κυρίως στο γεγονός ότι η δυναμική του συστήματος είναι διακριτή και διαφέρει ανάλογα με τη φάση στην οποία βρίσκεται το ρομπότ (εδάφους ή πτήσης). Με τον τρόπο αυτό, δεν μπορεί να δοθεί μια ενιαία εντολή την οποία θα ακολουθήσει το σύστημα σε όλη την πορεία του. Η συνήθης προσέγγιση προβλέπει την εκτέλεση διαφορετικών ενεργειών από το ρομπότ κατά τη φάση εδάφους από ότι κατά τη φάση πτήσης. Παράλληλα, η δυναμική του συστήματος περιγράφεται από εξαιρετικά μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, κάνοντας απαραίτητη τη χρήση διαφόρων προσεγγίσεων για τη γραμμικοποίησή τους και τον επιτυχή έλεγχο του ρομπότ.

Με τον τρόπο αυτό, ένα βασικό στοιχείο που χαρακτηρίζει τους περισσότερους ελεγκτές είναι η εξάρτησή τους από το δυναμικό μοντέλο περιγραφής του συστήματος (**model-based controllers**) και η προβληματική απόδοσή τους σε περιπτώσεις όπου οι πραγματικές συνθήκες απέχουν σημαντικά από τα αρχικά κριτήρια σχεδιασμού. Μια τέτοια περίπτωση όπου θα μπορούσε να παρουσιαστεί προβληματική απόδοση τέτοιων ελεγκτών είναι η ύπαρξη εδάφους με υποχωρητικότητα ή/και τριβή, καθώς κάτι τέτοιο καταρρίπτει την υπόθεση της απόλυτα σταθερής περιστροφικής άρθρωσης που θεωρητικά περιγράφει τη συμπεριφορά του πέλματος κατά τη φάση εδάφους.

Για τους σκοπούς της εργασίας αυτής, θα μελετηθεί η απόδοση δύο κατηγοριών ελεγκτών, τόσο σε άκαμπτο έδαφος όσο και σε έδαφος με υποχωρητικότητα:

- i. **Αλγόριθμοι τοποθέτησης πέλματος (foot placement algorithms):** Σύμφωνα με τους αλγόριθμους τοποθέτησης πέλματος, τα επιθυμητά χαρακτηριστικά κίνησης του ρομπότ (π.χ πρόσθια ταχύτητα) μπορούν να επιτευχθούν υπολογίζοντας, σε κάθε διασκελισμό που εκτελεί το ρομπότ, μια κατάλληλη θέση στην οποία πρέπει να πατά το πέλμα κατά την έναρξη της φάσης εδάφους [29]. Η θέση αυτή του πέλματος αντιστοιχεί, στην περίπτωση ενός μονόποδου ρομπότ με μια περιστροφική και μια πρισματική άρθρωση, σε μια μοναδική επιθυμητή γωνία πρόσπτωσης την οποία το ρομπότ πρέπει να επιτύχει κατά τη φάση πτήσης. Παράλληλα με τον αλγόριθμο τοποθέτησης πέλματος, συμπληρωματικοί επενεργητές μπορούν να δρουν ώστε να συντηρούν την ταλάντωση του ποδιού επιτυγχάνοντας ένα συγκεκριμένο ύψος αναπήδησης. Σε μια παραλλαγή των

αλγορίθμων αυτών, μπορεί να γίνει «εκπαίδευση» (training) του ρομπότ, ώστε να επιλέγονται κάθε φορά σταθερές θέσεις πέλματος που θα επιτρέψουν στο σύστημα να διαβεί ιδιαίτερα ανώμαλα εδάφη [19]. Αυτού του είδους οι αλγόριθμοι είναι ιδιαίτερα διαδομένοι, ωστόσο απαιτούν συνήθως ένα μεγάλο πλήθος επενεργητών για την επίτευξη πολλαπλών επιθυμητών χαρακτηριστικών κίνησης, καθώς και ένα δεδομένο γνωστό προφίλ εδάφους. Για το λόγο αυτό, η εφαρμογή τους στο υπό μελέτη μονόποδο ρομπότ με έναν μόνο επενεργητή εμφανίζει δυσκολίες. Ένα παράδειγμα τέτοιου ελεγκτή είναι ο ελεγκτής του Raibert [29], που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

- ii. **Αλγόριθμοι υπολογισμού ροπής και γωνίας πρόσπτωσης:** Σε αντίθεση με τους αλγόριθμους τοποθέτησης πέλματος, οι συγκεκριμένοι ελεγκτές χρησιμοποιούν ταυτόχρονα τη δυναμική τόσο της φάσης εδάφους όσο και της φάσης πτήσης ώστε να υπολογιστεί ένα προφίλ ροπής που θα πρέπει να ασκηθεί κατά τη φάση εδάφους και μια επιθυμητή γωνία πρόσπτωσης που θα πρέπει να επιτευχθεί κατά τη φάση πτήσης [1]. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω στοιχείων αποδίδει τελικά τα επιθυμητά στοιχεία της κίνησης (π.χ συνδυασμός επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας και επιθυμητού ύψους αναπήδησης). Η χρήση ελεγκτών αυτής της κατηγορίας είναι σαφώς πιο κατάλληλη σε συστήματα όπου ο αριθμός των επενεργητών είναι μικρός, μιας και χρησιμοποιούν περισσότερο την ίδια την δυναμική του συστήματος για την επίτευξη των αναγκαίων στόχων κίνησης. Ένα παράδειγμα ελεγκτή αυτής της κατηγορίας είναι ο ελεγκτής MultiPart [1], [26], που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

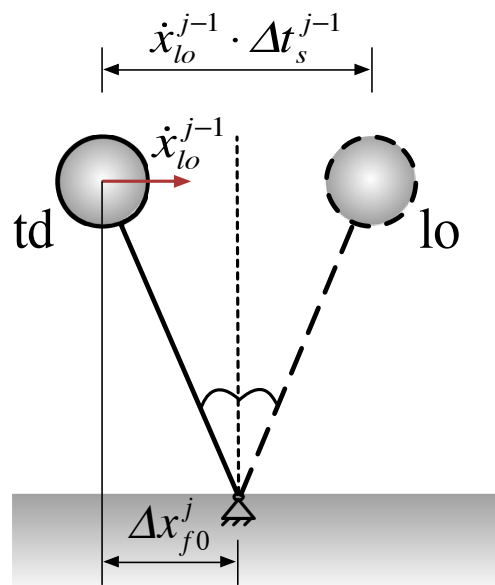
2.5 Ελεγκτής του Raibert

Ο ελεγκτής του Raibert ανήκει στην κατηγορία των *αλγορίθμων τοποθέτησης πέλματος* και προτείνει μια μέθοδο ώστε να επιτυγχάνεται μια επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα του ρομπότ [29]. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί την υπόθεση ότι υπάρχει μια μοναδική θέση πέλματος σε σχέση με το σώμα του ρομπότ κατά την οριζόντια διεύθυνση για κάθε τιμή πρόσθιας ταχύτητας, που διατηρεί την πρόσθια ταχύτητα στο ίδιο σημείο κάθε διασκελισμού σταθερή (**zero net forward acceleration**). Αυτή η θέση του πέλματος ονομάζεται **ουδέτερο σημείο** (neutral point). Έτσι, αν σε κάθε διασκελισμό το πέλμα τοποθετείται στο ουδέτερο σημείο και η ταχύτητα του ρομπότ εξετάζεται στο ίδιο σημείο

της ταλάντωσής του (π.χ στο σημείο της απογείωσης), η επιτάχυνση που θα προκύπτει θα είναι μηδενική. Για κάθε διασκελισμό j , το ουδέτερο σημείο προκύπτει ως η πρόσθια μετατόπιση Δx_{f0}^j του πέλματος από το σώμα του ρομπότ αμέσως πριν την προσγείωση σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

$$\Delta x_{f0}^j = \frac{\dot{x}_{lo}^{j-1} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{2} \quad (2-16)$$

όπου με \dot{x}_{lo}^{j-1} συμβολίζεται η πρόσθια ταχύτητα του σώματος του ρομπότ αμέσως μετά την απογείωση του διασκελισμού $j-1$ και με Δt_s^{j-1} συμβολίζεται η διάρκεια της φάσης εδάφους του διασκελισμού $j-1$. Ο υπολογισμός αυτός προϋποθέτει ότι η κίνηση του ρομπότ κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους είναι απόλυτα συμμετρική, με τη γωνία που σχηματίζει το πόδι με την κατακόρυφο κατά την προσγείωση να είναι ίση με την αντίστοιχη γωνία κατά την απογείωση, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2-4.



Σχήμα 2-4: Προσδιορισμός ουδέτερου σημείου σύμφωνα με τον ελεγκτή του Raibert.

Το σφάλμα από την επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί μια μετατόπιση από το ουδέτερο σημείο που θα επιταχύνει το σύστημα. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια γραμμική συνάρτηση του σφάλματος για να υπολογίσει αυτή τη μετατόπιση για το διασκελισμό j ($\Delta x_{f\Delta}^j$) ώστε

$$\Delta x_{f\Delta}^j = k_x \cdot (\dot{x}_{lo}^{j-1} - \dot{x}_{des}) \quad (2-17)$$

όπου \dot{x}_{des} είναι η επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα και k_x είναι ένα κέρδος ανάδρασης. Συνδυάζοντας τις Εξ. (2-16) και (2-17), προκύπτει ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό της θέσης του πέλματος Δx_f^j στο διασκελισμό j ως εξής

$$\Delta x_f^j = \Delta x_{f0}^j + \Delta x_{f\Delta}^j = \frac{\dot{x}_{lo}^{j-1} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{2} + k_x \cdot (\dot{x}_{lo}^{j-1} - \dot{x}_{des}) \quad (2-18)$$

Αυτή η θέση του πέλματος μεταφράζεται σε μια επιθυμητή γωνία πρόσπτωσης γ_{id}^j για το διασκελισμό j χρησιμοποιώντας το ελεύθερο μήκος του ποδιού L ως εξής

$$\gamma_{id}^j = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x_f^j}{L} \right) \quad (2-19)$$

Ο συγκεκριμένος ελεγκτής προτείνει επίσης και έναν αλγόριθμο προκειμένου να επιτευχθεί και να διατηρηθεί ένα επιθυμητό ύψος αναπήδησης. Ωστόσο, αυτός ο αλγόριθμος βασίζεται στην υπόθεση ότι υπάρχει επενεργητής στην πρισματική άρθρωση του ποδιού, ώστε να δίνεται μια συγκεκριμένη ώθηση στο ελατήριο κατά τη διάρκεια κάθε φάσης εδάφους. Στην περίπτωση μας, ωστόσο, δεν υπάρχει τέτοιος επενεργητής και το ελατήριο συμπεριφέρεται ως απλό παθητικό στοιχείο. Για το λόγο αυτό, στις δοκιμές του συγκεκριμένου ελεγκτή, θα ασκείται μια μικρή ροπή κατά τη διάρκεια κάθε φάσης εδάφους, ώστε να διατηρείται η ταλάντωση του ρομπότ και να γίνεται αναπλήρωση τυχόν απωλειών ενέργειας. Η τιμή αυτής της ροπής επιλέχθηκε ύστερα από δοκιμές και είναι ίση με $\tau_s = -0.7\text{Nm}$, με το αρνητικό πρόσημο να υποδηλώνει πρόσδοση ενέργειας κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους όπου η γωνιακή μετατόπιση του ποδιού είναι αρνητική. Με τον τρόπο αυτό, ο ελεγκτής του Raibert χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία μόνο για τη διατήρηση μιας επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας.

2.6 Ο ελεγκτής MultiPart

Στη βιβλιογραφία [1], [26], έχει προταθεί ένας ελεγκτής για το μονόποδο ρομπότ που παρουσιάζεται στο Σχ. 2-3, ο οποίος είναι ικανός να ελέγχει ταυτόχρονα τόσο το μέγιστο ύψος αναπήδησης όσο και την πρόσθια ταχύτητα του σώματος, χρησιμοποιώντας μόνο έναν επενεργητή στην περιστροφική άρθρωση του ρομπότ. Ο ελεγκτής αυτός ονομάστηκε MultiPart (MP). Ο έλεγχος του μέγιστου ύψους αναπήδησης είναι ιδιαίτερα σημαντικός στην περίπτωση που το ρομπότ διασχίζει άγνωστο έδαφος, καθώς επιτρέπει στο πέλμα να διατηρεί μια συγκεκριμένη απόσταση από το έδαφος αποφεύγοντας ξαφνικές ασυνέχειες (π.χ πέτρες). Ο ελεγκτής προσδιορίζει μια γωνία πρόσπτωσης για

την επίτευξη του επιθυμητού μέγιστου ύψους αναπήδησης, καθώς και μια σταθερή ροπή που θα ασκηθεί κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους για την επίτευξη της επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας. Συγκεκριμένα, ο MP προσπαθεί να διατηρήσει μια παθητική κίνηση του ρομπότ με επιθυμητά χαρακτηριστικά, αναπληρώνοντας τυχόν απώλειες ενέργειας. Αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας, ωστόσο απαιτεί μια εκτίμηση της δυσκαμψίας του ποδιού αλλά και των απωλειών του συστήματος.

Ο MP καλείται στο τέλος κάθε φάσης εδάφους και υπολογίζει μια επιθυμητή γωνία πρόσπτωσης γ_{td} και μια επιθυμητή ροπή τ_s που θα ασκηθεί κατά τη διάρκεια της επόμενης φάσης εδάφους. Η γωνία γ_{td} υπολογίζεται με τη χρήση της Εξ. (2-15) χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες υποθέσεις:

- i. Κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους, η γωνία του ποδιού μπορεί να προσεγγιστεί με μια γραμμική εξίσωση ώστε

$$\gamma(\Delta t) = \gamma_{td} - \frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t}{L} \quad (2-20)$$

όπου με Δt συμβολίζεται ο χρόνος από τη στιγμή της προσγείωσης.

- ii. Μπορούν να εφαρμοστούν οι τριγωνομετρικές απλοποιήσεις για μικρές γωνίες.
- iii. Λόγω των τριγωνομετρικών απλοποιήσεων, η ροπή τ_s από τον επενεργητή δεν συνεισφέρει στην κάθετη κίνηση του σώματος κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους.

Με τον τρόπο αυτό, η Εξ. (2-15) καταλήγει στην ακόλουθη μορφή:

$$m_b \cdot \ddot{y} + b_l \cdot \dot{y} + k \cdot y = k \cdot L \cdot \cos\left(\gamma_{td} - \frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t}{L}\right) - m_b \cdot g \quad (2-21)$$

αφού

$$y = l \cdot \cos \gamma \quad (2-22)$$

$$\dot{y} \approx \dot{l} \cdot \cos \gamma \quad (2-23)$$

Με τις κατάλληλες αρχικές συνθήκες σχετικά με την έναρξη της φάσης εδάφους και την υπόθεση της βαλλιστικής κίνησης κατά τη διάρκεια της φάσης πτήσης, η Εξ. (2-21) μπορεί να ολοκληρωθεί δύο φορές και να δώσει την επιθυμητή γωνία γ_{td} ώστε

$$\gamma_{td} = f(\text{state at liftoff}, \dot{x}_{des}, h_{des}) \quad (2-24)$$

όπου με h_{des} αναφέρεται το επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης.

Η σταθερή ροπή που πρέπει να ασκηθεί στην επόμενη φάση εδάφους βρίσκεται γραμμικοποιώντας και ολοκληρώνοντας την Εξ. (2-14) με παρόμοιο τρόπο, ώστε

$$\tau_s = g(\text{state at liftoff}, \dot{x}_{des}, h_{des}, \gamma_{td}) \quad (2-25)$$

Κατά τη διάρκεια της φάσης πτήσης, το πόδι τοποθετείται στη γωνία γ_{td} . Μόλις το πόδι προσγειωθεί, ξεκινά η φάση εδάφους όπου ασκείται η σταθερή ροπή τ_s και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

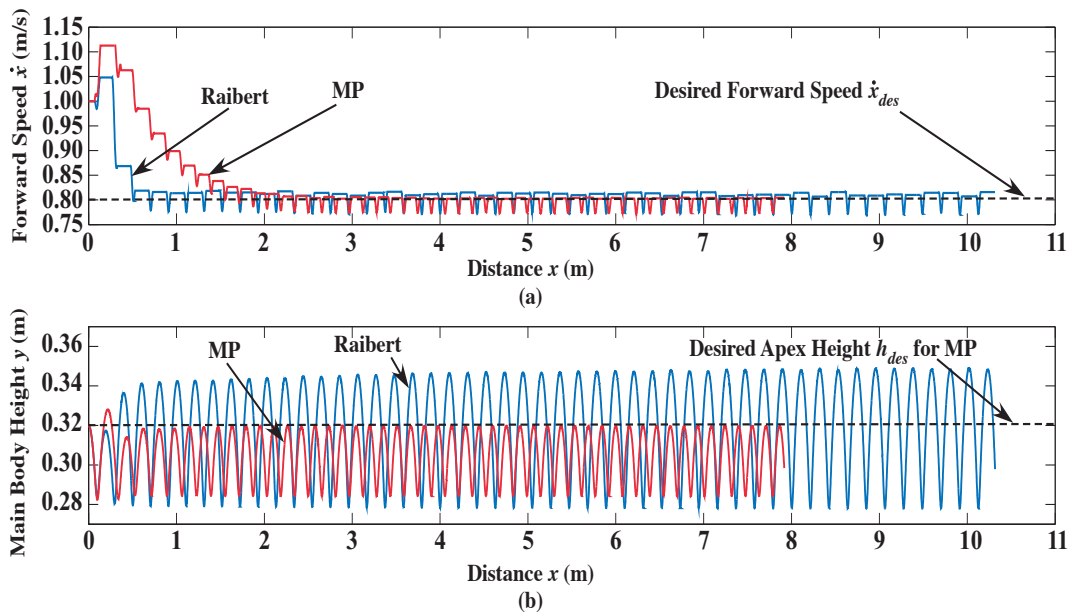
2.7 Απόκριση του ρομπότ σε άκαμπτο έδαφος

Σε αυτή την παράγραφο, εξετάζεται η συμπεριφορά του μονόποδου ρομπότ που παρουσιάζεται στο Σχ. 2-3 χρησιμοποιώντας τους δύο ελεγκτές που αναλύθηκαν στις Παραγράφους 2.5 και 2.6. Οι παράμετροι των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο MATLAB, χρησιμοποιώντας τον επιλύτη (solver) ode23s με απόλυτη και σχετική ακρίβεια 10^{-4} και 10^{-5} αντίστοιχα, καθώς και με μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης 10^{-3} για 50 διασκελισμούς (gaits) του ρομπότ. Ο συγκεκριμένος επιλύτης επιλέχθηκε διότι κρίνεται πιο κατάλληλος για stiff αριθμητικά προβλήματα, όπου το βήμα ολοκλήρωσης επηρεάζει και την τελική λύση.

Στο Σχ. 2-5 φαίνεται η απόκριση του μονόποδου ρομπότ αλλά και η σύγκριση του ελεγκτή του Raibert με τον ελεγκτή MP. Από το Σχ. 2-5, μπορούμε να δούμε ότι το ρομπότ φτάνει πιο γρήγορα στην επιθυμητή ταχύτητα με τον ελεγκτή του Raibert σε σχέση με τον MP. Ωστόσο, στην περίπτωση του ελεγκτή του Raibert, το ύψος του σώματος δεν μπορεί να ελεγχθεί, παρόλο που η ταλάντωση συντηρείται.

Πίνακας 2-1: Παράμετροι προσομοιώσεων σε άκαμπτο έδαφος.

Ποσότητα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Μάζα σώματος ρομπότ	m_b	4.0	kg
Ελεύθερο μήκος ποδιού	L	0.30	m
Σταθερά ελατηρίου	k	12000	N/m
Ιξώδης τριβή πρισματικής άρθρωσης	b_l	3.0	Ns/m
Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9.81	m/s ²
Επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_{des}	0.8	m/s
Επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης (για MP)	h_{des}	0.32	m
Αρχική πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_0	1.0	m/s
Αρχικό ύψος σώματος ρομπότ	h_0	0.32	m



Σχήμα 2-5: Απόκριση του μονόποδου ρομπότ σε άκαμπτο έδαφος: (a) πρόσθια ταχύτητα \dot{x} και (b) κατακόρυφη θέση σώματος ρομπότ y .

Όπως μπορούμε να δούμε από το γράφημα της ταχύτητας, η πρόσθια ταχύτητα του ρομπότ εμφανίζει μια διακύμανση μέσα σε κάθε διασκελισμό (απότομη μείωση). Η μείωση αυτή οφείλεται στην επαφή του ρομπότ με το έδαφος το οποίο θεωρείται απόλυτα άκαμπτο. Από την άλλη πλευρά, η απόκριση του ύψους του σώματος του ρομπότ μοιάζει με αυτήν ενός αρμονικού ταλαντωτή με ένα κατώτερο και ένα ανώτερο σημείο σε κάθε διασκελισμό.

Παρόλο που οι αποκρίσεις των ελεγκτών που παρουσιάστηκαν προηγούμενα ικανοποιούν τους επιθυμητούς στόχους που είχαν εξαρχής τεθεί, βασίζονται στην υπόθεση ενός ιδεατού ποδιού χωρίς μάζα καθώς και στην υπόθεση ότι η επαφή του πέλματος με το έδαφος μπορεί να μοντελοποιηθεί με μια πλήρως σταθερή περιστροφική άρθρωση. Παράλληλα, γίνεται η υπόθεση ότι το πόδι τοποθετείται στην επιθυμητή γωνία κατά τη φάση πτήσης χωρίς δαπάνη ενέργειας. Στα επόμενα κεφάλαια, οι υποθέσεις αυτές αίρονται και εξετάζεται η επίδραση του εδάφους αλλά και της μάζας του ποδιού στη συμπεριφορά του ρομπότ και στην επίτευξη των επιθυμητών στόχων.

3 Μελέτη επίδρασης τριβής και υποχωρητικότητας εδάφους

3.1 Σύνθετο 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή

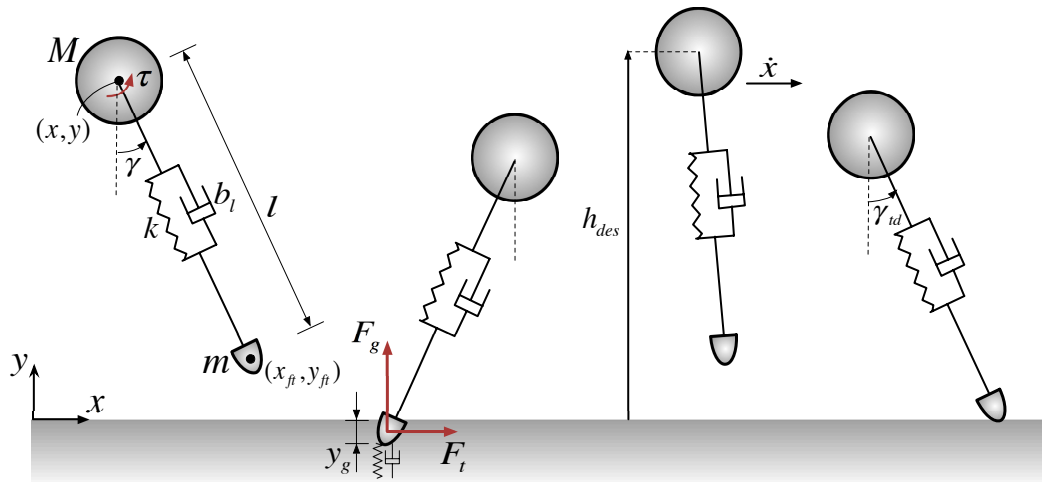
Προκειμένου να ενσωματωθεί στο απλό μοντέλο που παρουσιάστηκε στο Σχ. 2-3 η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους και πέλματος και να διερευνηθεί η επίδρασή της στη συμπεριφορά του ρομπότ, το πόδι του ρομπότ παύει να θεωρείται αβαρές. Ο απώτερος σκοπός είναι, φυσικά, να δημιουργηθεί ένας μηχανισμός αναπλήρωσης κάθε είδους απώλειας ενέργειας, ακόμα και αν προέρχεται από την υποχωρητικότητα του εδάφους ή την τριβή. Για το λόγο αυτό, η μάζα του ποδιού είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο, αφού κάθε δύναμη από το έδαφος εισάγεται στο σύστημα μέσω αυτού του στοιχείου του ρομπότ. Πέρα από αυτό, η περιγραφή του ποδιού ως ενός στοιχείου με μάζα θα μεταβάλει εν γένει και τη συμπεριφορά του ρομπότ κατά τη φάση πτήσης, αφού αίρεται η υπόθεση της βαλλιστικής κίνησης του σώματος.

Καταρχάς, εξετάζεται ένα βελτιωμένο διδιάστατο μοντέλο του μονόποδου ρομπότ που στα πλαίσια αυτής της εργασίας ονομάζεται **σύνθετο** (Extended Model). Το συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζεται στο Σχ. 3-1 και αποτελείται από μια μάζα M που περιγράφει το κύριο σώμα του ρομπότ και μια μάζα m που περιγράφει μια ισοδύναμη μάζα ποδιού και πέλματος και λειτουργεί ουσιαστικά ως το πέλμα του ρομπότ. Η μάζα m επιλέγεται έτσι ώστε το πόδι στο σύνθετο μοντέλο να έχει παραπλήσια αδράνεια με το πραγματικό σύστημα. Για παράδειγμα, αν σε ένα πραγματικό μονόποδο ρομπότ το πόδι έχει αδράνεια I_l , η ισοδύναμη μάζα m που θα το περιγράψει στο θεωρητικό μοντέλο θα επιλεγεί να είναι ίση με

$$m = \frac{I_l}{L^2} \quad (3-1)$$

Τα υπόλοιπα σύμβολα αντιστοιχούν στα ίδια μεγέθη, όπως αυτά περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2. Το Σχ. 3-1 παρουσιάζει έναν κύκλο κίνησης για το μονόποδο ρομπότ, όπως αυτό περιγράφεται από το σύνθετο μοντέλο. Μετά τη φάση πτήσης ακολουθεί η φάση εδάφους, όπου το πέλμα του ρομπότ δέχεται τη δύναμη από το έδαφος. Η δύναμη αυτή αναλύεται σε δύο συνιστώσες: την κατακόρυφη δύναμη F_g και την οριζόντια δύναμη τριβής F_t . Ο τρόπος υπολογισμού αυτών των δυνάμεων θα αναλυθεί στις επόμενες παραγράφους. Έπειτα ξεκινά μια νέα φάση πτήσης κ.ο.κ. Όπως παρατηρείται, η

αδράνεια του ποδιού σε αυτό το μοντέλο περιγράφεται μόνο από αδράνεια υλικού σημείου λόγω της μάζας m .



Σχήμα 3-1: Σύνθετο 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή.

Η κινητική ενέργεια του σύνθετου συστήματος μπορεί να βρεθεί ως εξής

$$T = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\dot{x}_{ft}^2 + \dot{y}_{ft}^2) \quad (3-2)$$

όπου με (x_{ft}, y_{ft}) συμβολίζεται η θέση του πέλματος του ρομπότ. Αντίστοιχα, η δυναμική ενέργεια του συστήματος είναι

$$U = M \cdot g \cdot y + m \cdot g \cdot y_{ft} + \frac{1}{2} \cdot k \cdot (L-l)^2 \quad (3-3)$$

Έτσι, υπολογίζουμε τη συνάρτηση Lagrange ως εξής

$$L = T - U = \frac{1}{2} M \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} m \cdot (\dot{x}_{ft}^2 + \dot{y}_{ft}^2) - M \cdot g \cdot y - m \cdot g \cdot y_{ft} - \frac{1}{2} k \cdot (L-l)^2 \quad (3-4)$$

Η ισχύς των απωλειών δίνεται από τη σχέση

$$P_c = \frac{1}{2} \cdot b_l \cdot \dot{l}^2 \quad (3-5)$$

ενώ η ισχύς που προσδίδεται γενικότερα στο σύστημα (και από τις δυνάμεις εδάφους) δίνεται από τη σχέση

$$P_t = \tau \cdot \dot{\gamma} + F_g \cdot \dot{y}_{ft} + F_t \cdot \dot{x}_{ft} \quad (3-6)$$

Για την εξαγωγή των δυναμικών εξισώσεων του συστήματος χρησιμοποιείται η μέθοδος Lagrange, όπως αυτή έχει ήδη παρουσιαστεί στην Εξ. (2-13). Αυτό που παρατηρείται πλέον είναι ότι οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος είναι 4: οι συντεταγμένες (x, y) του

κύριου σώματος του ρομπότ και οι συντεταγμένες (x_{ft}, y_{ft}) του πέλματος του ρομπότ. Αντίθετα, οι βαθμοί ελευθερίας του απλού μοντέλου που παρουσιάζεται στο Σχ. 2-3 είναι 2. Ως γενικευμένες μεταβλητές επιλέγονται οι συντεταγμένες του κύριου σώματος και του πέλματος του ρομπότ, ώστε $q_1 = x$, $q_2 = y$, $q_3 = x_{ft}$ και $q_4 = y_{ft}$. Έτσι, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Lagrange και γνωρίζοντας ότι

$$l = \sqrt{(x - x_{ft})^2 + (y - y_{ft})^2} \quad (3-7)$$

προκύπτουν οι ακόλουθες απλοποιημένες μη γραμμικές δυναμικές εξισώσεις

$$M \cdot \ddot{x} + k \cdot (L - l) \cdot \sin \gamma - b_l \cdot \dot{l} \cdot \sin \gamma = -\frac{\tau}{l} \cdot \cos \gamma \quad (3-8)$$

$$M \cdot \ddot{y} + M \cdot g - k \cdot (L - l) \cdot \cos \gamma + b_l \cdot \dot{l} \cdot \cos \gamma = -\frac{\tau}{l} \cdot \sin \gamma \quad (3-9)$$

$$m \cdot \ddot{x}_{ft} - k \cdot (L - l) \cdot \sin \gamma + b_l \cdot \dot{l} \cdot \sin \gamma = \frac{\tau}{l} \cdot \cos \gamma + F_t \quad (3-10)$$

$$m \cdot \ddot{y}_{ft} + m \cdot g + k \cdot (L - l) \cdot \cos \gamma - b_l \cdot \dot{l} \cdot \cos \gamma = \frac{\tau}{l} \cdot \sin \gamma + F_g \quad (3-11)$$

Αξίζει να τονιστεί ότι η κατασκευή του παραπάνω μοντέλου στηρίχθηκε μόνο στην υπόθεση ότι η επαφή του ποδιού με το έδαφος είναι σημειακή ενώ όλες οι άλλες υποθέσεις στις οποίες στηρίχτηκε το απλό 2D μοντέλο έχουν αναιρεθεί. Παράλληλα, οι δυναμικές εξισώσεις έχουν πλέον ενοποιημένη μορφή και είναι ίδιες τόσο για τη φάση εδάφους όσο και για τη φάση πτήσης, με τη μόνη διαφορά ότι στη φάση πτήσης $F_t, F_g = 0$.

Η φάση εδάφους ξεκινά με το πέλμα να αγγίζει το έδαφος ύστερα από μια φάση πτήσης ($y_{ft} = 0$) και τερματίζεται μόλις η κάθετη δύναμη από το έδαφος μηδενιστεί ($F_g = 0$). Κατά τη διάρκεια της κρούσης του πέλματος με το έδαφος, η απόλυτη τιμή της συντεταγμένης y_{ft} του πέλματος ισούται με το βάθος διείσδυσης y_g στο έδαφος. Μόλις το ρομπότ απογειωθεί, το πόδι πρέπει να τοποθετηθεί στην επιθυμητή γωνία γ_{td} . Για να συμβεί αυτό, χρησιμοποιείται ένας απλός PD ελεγκτής που περιγράφεται από την παρακάτω σχέση

$$\tau = k_p \cdot (\gamma_{td} - \gamma) - k_d \cdot \dot{\gamma} \quad (3-12)$$

Ύστερα από δοκιμές και με βάση πειραματικά δεδομένα, επιλέχθηκαν τα κέρδη $k_p = 150$ και $k_d = 2.4$ για χρήση στις προσομοιώσεις, τα οποία εξασφαλίζουν ότι ο ελεγκτής θα είναι αρκετά γρήγορος για να ρυθμίσει τη γωνία του ποδιού πριν την

επόμενη προσγείωση, αποφεύγοντας παράλληλα μη επιθυμητές υπερακοντίσεις και ταλαντώσεις.

Το συγκεκριμένο μοντέλο ενσωματώνει έναν τρόπο αναπαράστασης της αλληλεπίδρασης πέλματος-εδάφους και μπορεί να θεωρηθεί μια επέκταση του απλού 2D μοντέλου που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 2.3. Ωστόσο, δεν περιλαμβάνει τη ροπή αδράνειας του ποδιού, καθώς και τις ενεργειακές απώλειες λόγω τριβών στην περιστροφική άρθρωση του ρομπότ.

3.2 Λεπτομερές 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή

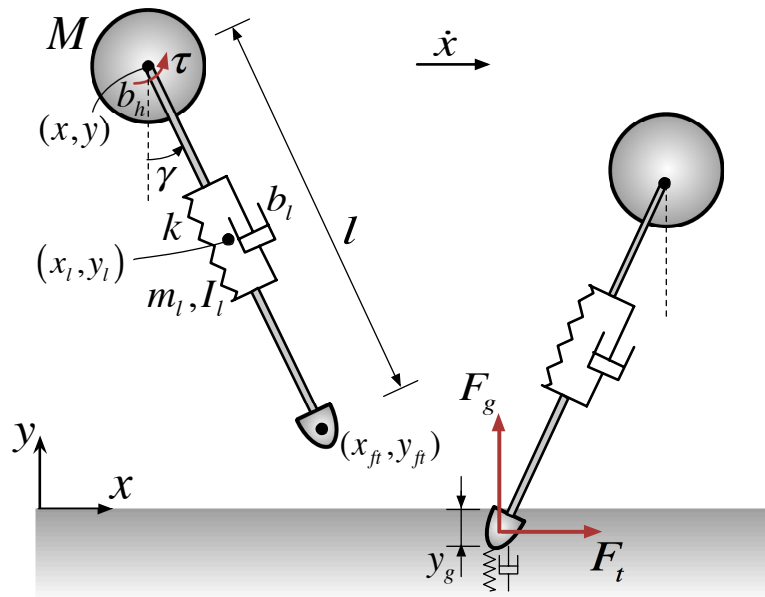
Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της ροπής αδράνειας του ποδιού και των απωλειών στην περιστροφική άρθρωση στη συμπεριφορά του ρομπότ, αλλά και να προσδιοριστούν τα όρια εφαρμογής του σύνθετου μοντέλου που παρουσιάστηκε νωρίτερα, αναπτύχθηκε ένα **λεπτομερές** μοντέλο (Detailed Model) του μονόποδου ρομπότ, που περιγράφει με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια κάθε συναλλαγή ενέργειας του ρομπότ με το περιβάλλον του.

Το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στο Σχ. 3-2 και περιλαμβάνει μια κύρια μάζα M , με όμοιο τρόπο με το σύνθετο μοντέλο, ενώ το πόδι θεωρείται ότι είναι μια κυλινδρική ράβδος με μάζα m_l και αδράνεια I_l . Το πέλμα θεωρείται ότι είναι το κατώτερο σημείο αυτής της ράβδου και, με όμοιο τρόπο με το σύνθετο μοντέλο, μια σημειακή επαφή λαμβάνει χώρα μεταξύ πέλματος και εδάφους. Το κέντρο μάζας (x_l, y_l) του ποδιού θεωρείται ότι βρίσκεται στο μέσο της κυλινδρικής ράβδου, έτσι ώστε

$$x_l = \frac{x + x_{ff}}{2} \quad (3-13)$$

$$y_l = \frac{y + y_{ff}}{2} \quad (3-14)$$

Οι ενεργειακές απώλειες λόγω ιξωδών τριβών στην πρισματική και στην περιστροφική άρθρωση αντιπροσωπεύονται από τους αντίστοιχους συντελεστές b_l και b_h . Τα υπόλοιπα σύμβολα αντιστοιχούν και πάλι στα ίδια μεγέθη, όπως αυτά περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2. Κατά τη διάρκεια της φάσης πτήσης, οι δυνάμεις από το έδαφος είναι και πάλι μηδέν, ώστε $F_l, F_g = 0$.



Σχήμα 3-2: Λεπτομερές 2D μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή.

Η κινητική ενέργεια του συστήματος βρίσκεται από τη σχέση

$$T = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} \cdot m_l \cdot (\dot{x}_{ft}^2 + \dot{y}_{ft}^2) + \frac{1}{2} \cdot I_l \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (3-15)$$

Αντίστοιχα, η δυναμική ενέργεια του συστήματος είναι

$$U = M \cdot g \cdot y + m_l \cdot g \cdot y_l + \frac{1}{2} \cdot k \cdot (L - l)^2 \quad (3-16)$$

Με βάση τις Εξ. (3-15) και (3-16) υπολογίζεται και η συνάρτηση Lagrange $L = T - U$. Η ισχύς των απωλειών είναι

$$P_c = \frac{1}{2} \cdot b_l \cdot \dot{l}^2 + \frac{1}{2} \cdot b_n \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (3-17)$$

ενώ η προσδιόμενη ισχύς στο σύστημα υπολογίζεται και πάλι από την Εξ. (3-6). Για την εξαγωγή των δυναμικών εξισώσεων, χρησιμοποιείται η μέθοδος Lagrange, με βάση την Εξ. (2-13). Το σύστημά μας είναι και πάλι ένα δυναμικό σύστημα 4 βαθμών ελευθερίας. Ωστόσο, αυτή τη φορά επιλέγονται ως γενικευμένες μεταβλητές το μήκος και η γωνία του ποδιού, καθώς και οι συντεταγμένες του πέλματος, ώστε $q_1 = l$, $q_2 = \gamma$, $q_3 = x_{ft}$ και $q_4 = y_{ft}$, καθώς οδηγούν σε απλούστερες εξισώσεις. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Lagrange, καταλήγουμε στην ακόλουθη μητρική έκφραση των δυναμικών εξισώσεων

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{U}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{T} \quad (3-18)$$

όπου $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} l & \gamma & x_{ft} & y_{ft} \end{bmatrix}^T$ και οι πίνακες $\mathbf{H}(\mathbf{q})$, $\mathbf{U}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ και \mathbf{T} προκύπτουν ως εξής

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} M_a & 0 & -M_b \cdot \sin \gamma & M_b \cdot \cos \gamma \\ 0 & M_a \cdot l^2 + I_l & -M_b \cdot l \cdot \cos \gamma & -M_b \cdot l \cdot \sin \gamma \\ -M_b \cdot \sin \gamma & -M_b \cdot l \cdot \cos \gamma & M + m_l & 0 \\ M_b \cdot \cos \gamma & -M_b \cdot l \cdot \sin \gamma & 0 & M + m_l \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

$$\mathbf{U}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} b_l \cdot \dot{l} - k \cdot (L - l) + M_b \cdot g \cdot \cos \gamma - M_a \cdot l \cdot \dot{\gamma}^2 \\ b_h \cdot \dot{\gamma} - M_b \cdot g \cdot l \cdot \sin \gamma + 2 \cdot M_a \cdot l \cdot \dot{l} \cdot \dot{\gamma} \\ M_b \cdot l \cdot \dot{\gamma}^2 \cdot \sin \gamma - 2 \cdot M_b \cdot \dot{l} \cdot \dot{\gamma} \cdot \cos \gamma \\ (M + m_l) \cdot g - M_b \cdot l \cdot \dot{\gamma}^2 \cdot \cos \gamma - 2 \cdot M_b \cdot \dot{l} \cdot \dot{\gamma} \cdot \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \\ F_t \\ F_g \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

όπου $M_a = M + 0.25 \cdot m_l$ και $M_b = M + 0.5 \cdot m_l$ βοηθητικές σταθερές.

Για μια ακόμη φορά, η απόλυτη τιμή της συντεταγμένης y_{ft} του πέλματος ισούται με το βάθος διείσδυσης στο έδαφος y_g . Η φάση εδάφους ξεκινά μόλις το πέλμα αγγίξει το έδαφος ($y_{ft} = 0$) και τερματίζεται μόλις η κάθετη δύναμη από το έδαφος μηδενιστεί ($F_g = 0$). Κατά τη διάρκεια της φάσης πτήσης, ο PD ελεγκτής που παρουσιάζεται στην Εξ. (3-12) τοποθετεί το πόδι στην επιθυμητή γωνία γ_{td} .

Το λεπτομερές μοντέλο που προτείνεται ενσωματώνει όλα τα βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν την κίνηση ενός μονόποδου ρομπότ σε οποιοδήποτε έδαφος, μέσω ενός μοντέλου συγκεντρωμένων στοιχείων (lumped parameters). Για το λόγο αυτό, θα χρησιμοποιείται ως αναφορά για την αξιολόγηση διαφόρων ελεγκτών. Ένα αρνητικό του στοιχείο, ωστόσο, είναι η μεγάλη πολυπλοκότητά του, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το χρόνο προσομοίωσης. Στις επόμενες παραγράφους, αφού γίνει πρώτα μια σύντομη εισαγωγή στη θεωρία των κρούσεων, θα αναλυθεί ο τρόπος εύρεσης τόσο της κάθετης δύναμης από το έδαφος F_g όσο και της δύναμης τριβής F_t .

3.3 Κινηματικός και ενεργειακός συντελεστής επανάταξης

Μέχρι σήμερα, στη μελέτη της επαφής μεταξύ του πέλματος του ποδιού του μονόποδου ρομπότ και του εδάφους θεωρούσαμε ότι η κρούση ήταν τελείως πλαστική: η κινητική ενέργεια του πέλματος χανόταν αμέσως μετά την επαφή του με το έδαφος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μάλιστα, υποθέταμε ότι ολόκληρη η διάταξη του ρομπότ αποτελείται από δύο διακριτά τμήματα που, ουσιαστικά, χωρίζονται από το ελατήριο του ποδιού. Το κατώτερο τμήμα του ποδιού έχανε την κινητική του ενέργεια αμέσως μετά την επαφή του με το έδαφος, ενώ το ανώτερο τμήμα του που περιέγραφε το κυρίως σώμα του ρομπότ συνέχιζε την καθοδική κίνησή του μέχρι την τελική απογείωση [29]. Η συγκεκριμένη προσέγγιση, δηλαδή, θεωρεί ότι το πέλμα του ποδιού συμπεριφέρεται ως μια απλή περιστροφική άρθρωση κατά τη φάση εδάφους, κάτι που δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα, καθώς το έδαφος στην πραγματικότητα υποχωρεί και το πέλμα δεν χάνει στιγμιαία όλη την ενέργεια που διαθέτει. Παράλληλα, με την προσέγγιση αυτή παραβλέπεται και η επίδραση της τριβής, η οποία είναι υπεύθυνη για τον περιορισμό της κίνησης του πέλματος του ρομπότ κατά την οριζόντια διεύθυνση.

Στην πραγματικότητα, για την κρούση μεταξύ δύο σωμάτων μπορούν να οριστούν δύο βασικά μεγέθη: ο **κινηματικός συντελεστής επανάταξης** (kinematic coefficient of restitution) και ο **ενεργειακός συντελεστής επανάταξης** (energetic coefficient of restitution). Ο κινηματικός συντελεστής επανάταξης (e) αφορά τις σχετικές ταχύτητες των δύο σωμάτων κατά την διεύθυνση της κρούσης και ορίζεται ως:

$$e = -\frac{u_o}{u_i} \quad (3-22)$$

όπου u_i και u_o η σχετική ταχύτητα πριν και μετά την κρούση μεταξύ των δύο σωμάτων αντίστοιχα. Ο κινηματικός συντελεστής επανάταξης παίρνει τιμές μεταξύ 0 (πλήρως πλαστική κρούση) και 1 (πλήρως ελαστική κρούση).

Για να ορίσουμε τον ενεργειακό συντελεστή επανάταξης [34], πρέπει να διακρίνουμε την κρούση μεταξύ δύο σωμάτων σε δύο φάσεις: α) τη φάση της συμπίεσης όπου η σχετική απόσταση μεταξύ των δύο σωμάτων μειώνεται και β) τη φάση της επανάταξης όπου τα σώματα απομακρύνονται το ένα από το άλλο. Με τον τρόπο αυτό, το τετράγωνο του ενεργειακού συντελεστή επανάταξης (e_*) ορίζεται ως το αντίθετο του λόγου της ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης που αποδίδεται κατά την επανάταξη προς την ενέργεια παραμόρφωσης που απορροφήθηκε κατά τη φάση της συμπίεσης, ώστε:

$$e_*^2 = -\frac{E_f - E_c}{E_c} \quad (3-23)$$

όπου E_c και E_f η ενέργεια παραμόρφωσης για το σύστημα, στο τέλος της φάσης συμπίεσης και στο τέλος της φάσης επανάταξης αντίστοιχα. Και πάλι, ο ενεργειακός συντελεστής επανάταξης λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 (για πλήρως πλαστική κρούση) και 1 (για πλήρως ελαστική κρούση) και εκφράζει το λόγο της ενέργειας παραμόρφωσης που επαναποδίδεται στο σύστημα με το τέλος της κρούσης.

Στην παρούσα εργασία, θα ασχοληθούμε μόνο με τον κινηματικό συντελεστή επανάταξης e . Όπως έχει αποδειχθεί [23], για κρούσεις χαμηλών ταχυτήτων, ο συντελεστής e μπορεί να περιγραφεί με μια γραμμική σχέση με βάση τη σχετική ταχύτητα των δύο σωμάτων στην έναρξη της κρούσης u_i , ώστε:

$$e = 1 - c_a \cdot u_i \quad (3-24)$$

με το συντελεστή c_a να λαμβάνει συνήθως τιμές μεταξύ 0.01 και 0.5. Για απλοποίηση της μελέτης των κρούσεων μεταξύ πέλματος και εδάφους, η παραπάνω προσέγγιση θα χρησιμοποιηθεί και στη συνέχεια.

3.4 Θεωρία κρούσεων Hertz

Η θεωρία κρούσεων Hertz μπορεί να εφαρμοστεί για ελαστικές κρούσεις χαμηλής ταχύτητας. Η συγκεκριμένη θεωρία βασίζεται στις εξής παραδοχές: α) η επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο σωμάτων είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την ισοδύναμη ακτίνα καθενός από τα δύο σώματα, ώστε ουσιαστικά να θεωρείται ότι δύο επίπεδες επιφάνειες έρχονται σε επαφή και β) δεν υπάρχει τριβή μεταξύ των δύο αυτών μικρών επιφανειών.

Έτσι, για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου μια άκαμπτη σφαίρα ακτίνας R με αρχική ταχύτητα v_o προσκρούσει σε μια επίπεδη επιφάνεια που μπορεί να παραμορφώνεται, όπως φαίνεται στο Σχ. 3-3, η θεωρία Hertz προβλέπει ότι η σχέση μεταξύ της κάθετης δύναμης F_g που θα παραλάβει η σφαίρα και του βάθους της διείσδυσής της y_g δίνεται από την παρακάτω σχέση [1]:

$$F_g = k_g \cdot (y_g)^n \quad (3-25)$$

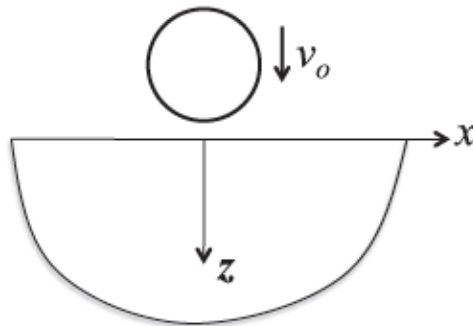
με το **συντελεστή δυσκαμψίας της κρούσης** k_g να περιγράφεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$k_g = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{R} \cdot E^* \quad (3-26)$$

Το μέγεθος E^* ονομάζεται **ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της κρούσης** και μπορεί να βρεθεί από τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας E_1 και E_2 , καθώς και από τους λόγους Poisson ν_1 και ν_2 των δύο σωμάτων που συμμετέχουν στην κρούση ως εξής:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (3-27)$$

Παράλληλα, ο συντελεστής n ονομάζεται **εκθέτης Hertz** (Hertz exponent) και είναι ίσος με $n=1.5$. Όπως καταλαβαίνουμε, η θεωρία του Hertz μοντελοποιεί την κρούση μεταξύ των δύο σωμάτων σαν ένα μη γραμμικό ελατήριο.



Σχήμα 3-3: Κρούση άκαμπτης σφαίρας σε παραμορφώσιμη επίπεδη επιφάνεια.

Η σημαντική συνεισφορά της θεωρίας Hertz είναι ότι επιτρέπει τον υπολογισμό ενός συντελεστή δυσκαμψίας για την κρούση, που αναφέρεται αποκλειστικά στο ζεύγος των δύο σωμάτων που συμμετέχουν στην κρούση και επιτρέπει, μέσω αυτού, τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης δύναμης μεταξύ των δύο σωμάτων. Η μέθοδος υπολογισμού της δυσκαμψίας της κρούσης μέσω των Εξ. (3-26) και (3-27) θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια της εργασίας για την εύρεση του αντίστοιχου συντελεστή k_g μεταξύ του πέλματος του ρομπότ και διαφόρων εδαφών. Έτσι, για παράδειγμα, μπορεί να βρεθεί ότι ο συντελεστής k_g μεταξύ ενός πέλματος από καουτσούκ με $E = 50MPa$ και μιας επιφάνειας γρανίτη με $E = 50GPa$ είναι $k_g = 327,000N/m$. Από τη βιβλιογραφία, μπορούμε να βρούμε ενδεικτικά μεγέθη για τα μέτρα ελαστικότητας διαφόρων τύπων εδαφών, όπως αυτά έχουν ληφθεί από πειραματικές μετρήσεις [38].

3.5 Μοντέλα κρούσης Kelvin-Voigt και Hunt-Crossley

Με τη θεωρία Hertz που παρουσιάστηκε παραπάνω, η κρούση μεταξύ δύο σωμάτων περιγράφεται ως η συσπίρωση και η αποσυσπίρωση ενός μη γραμμικού ελατηρίου, το οποίο έχει συγκεκριμένο συντελεστή δυσκαμψίας. Η ιδέα αυτή της μοντελοποίησης επιφανειών που εμφανίζουν υποχωρητικότητα (compliance) με χρήση συγκεντρωμένων στοιχείων (ελατήρια και αποσβεστήρες) επεκτάθηκε με την ανάπτυξη της βισκοελαστικής θεωρίας, ώστε να εμφανιστούν διάφορα απλά ή πιο σύνθετα μοντέλα κρούσης.

Δύο από τα πλέον διαδεδομένα βισκοελαστικά μοντέλα κρούσης είναι το μοντέλο Kelvin-Voigt (KV), καθώς και το μοντέλο Hunt-Crossley (HC). Στο **μοντέλο KV**, εκτός από το συντελεστή δυσκαμψίας κρούσης k_g , εισάγεται και ένας **συντελεστής απόσβεσης** b_g , προκειμένου να μοντελοποιηθούν οι ενεργειακές απώλειες που λαμβάνουν χώρα σε όλη τη διάρκεια της κρούσης. Με το μοντέλο κρούσης KV, η κάθετη δύναμη επαφής F_g μεταξύ των σωμάτων δίνεται ως συνάρτηση του βάθους διείσδυσης y_g με βάση την παρακάτω σχέση:

$$F_g = k_g \cdot y_g + b_g \cdot \dot{y}_g \quad (3-28)$$

Όπως έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία [23], ο συντελεστής απόσβεσης της κρούσης b_g μπορεί να δοθεί συναρτήσει της δυσκαμψίας k_g από την παρακάτω σχέση

$$b_g = 1.5 \cdot c_a \cdot k_g \quad (3-29)$$

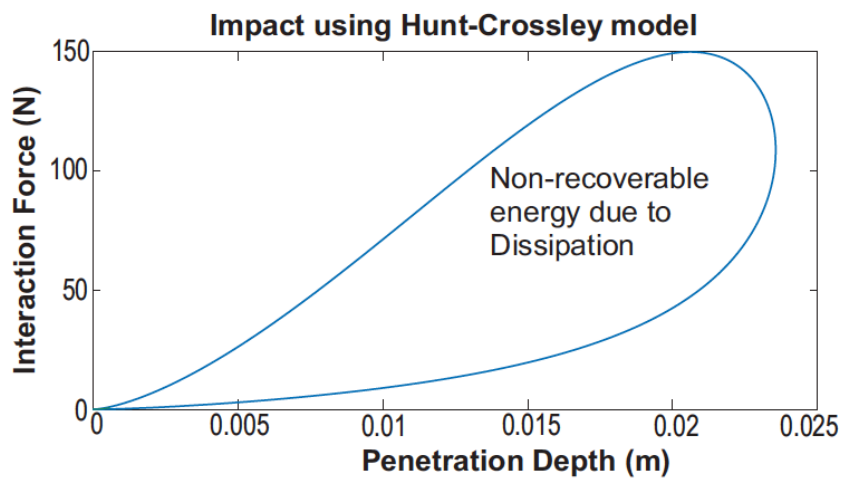
όπου c_a είναι ο συντελεστής που αναφέρθηκε στην Εξ. (3-24). Αυτή η προσέγγιση θα χρησιμοποιηθεί και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Το μοντέλο KV είναι γραμμικό, ωστόσο καταφέρνει εν μέρει να περιγράψει ένα ακόμα φαινόμενο που συμβαίνει κατά τη διάρκεια μιας κρούσης: τις ενεργειακές απώλειες. Οι αδυναμίες χρήσης του μοντέλου KV στη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του εδάφους κατά την κρούση με το πέλμα του ρομπότ έγκεινται στα εξής στοιχεία: α) η καμπύλη που περιγράφει η Εξ. (3-29) προβλέπει δύναμη ακόμα και όταν $y_g = 0$ λόγω του όρου $(b \cdot \dot{y}_g)$ αφού $\dot{y}_g \neq 0$ και β) η δύναμη επαφής F_g μπορεί να λάβει και αρνητικές τιμές, ακόμα και αν το έδαφος δεν είναι «κολλώδες» (sticky).

Το **μοντέλο HC** [34] θεωρείται εξέλιξη του μοντέλου KV, καθώς λύνει τα παραπάνω προβλήματα. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο κρούσης που ενσωματώνει συγκεντρωμένα μη γραμμικά στοιχεία, η δύναμη επαφής μεταξύ των σωμάτων δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$F_g = k_g \cdot y_g^n + b_g \cdot \dot{y}_g \cdot y_g^n \quad (3-30)$$

όπου $n=1.5$ ο εκθέτης Hertz. Η γραφική παράσταση $F_g - y_g$ της Εξ. (3-30) δίνει τον τύπο καμπύλης που παρουσιάζεται στο Σχ. 3-4. Το εμβαδό στο εσωτερικό της καμπύλης περιγράφει τις ενεργειακές απώλειες λόγω απόσβεσης και είναι τόσο μεγαλύτερο όσο αυξάνεται η παράμετρος b_g . Σε αντίθεση με το μοντέλο KV, η κρούση αρχίζει και τελειώνει για $y_g = 0$, ενώ η μέγιστη δύναμη επαφής επιτυγχάνεται πριν το τέλος της φάσης συμπίεσης λόγω της μη γραμμικότητας του μοντέλου.



Σχήμα 3-4: Καμπύλη κρούσης μοντέλου Hunt-Crossley.

Σε γενικές γραμμές, το μοντέλο HC ενσωματώνει όλα τα βασικά χαρακτηριστικά των βισκοελαστικών μοντέλων κρούσης: α) η κρούση ξεκινά και τελειώνει με μηδενικό βάθος διείσδυσης χωρίς να υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση, β) η δύναμη επαφής μηδενίζεται ταυτόχρονα με το βάθος διείσδυσης και γ) δεν μελετάται η περίπτωση μόνιμης πλαστικής παραμόρφωσης. Παρόλο που η εφαρμογή τέτοιων βισκοελαστικών μοντέλων κρούσης είναι εφικτή σε αρκετές περιπτώσεις, η χρήση τους καθίσταται ακατάλληλη στην περίπτωση όπου το πόδι ενός μονόποδου ρομπότ βυθίζεται σε έδαφος με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και στη συνέχεια απογειώνεται, μη επιτρέποντας στο έδαφος να επανέλθει πλήρως και δημιουργώντας μόνιμη πλαστική παραμόρφωση. Παράλληλα, τα βισκοελαστικά μοντέλα δεν μοντελοποιούν τη συμπεριφορά του εδάφους σε περιπτώσεις επαναλαμβανόμενης φόρτισης ή τοπικής συμπίεσης. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση ενός βισκοπλαστικού μοντέλου κρούσης που

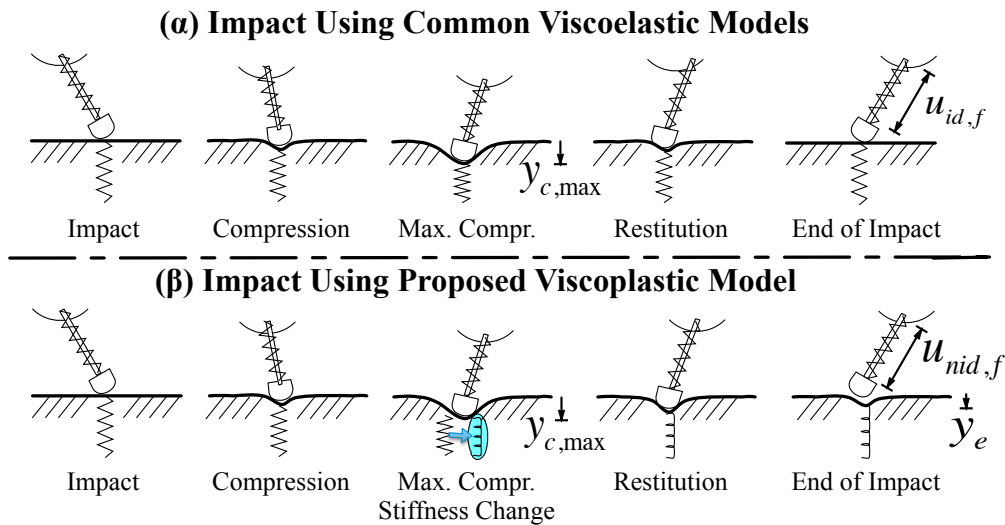
περιγράφει τις μόνιμες παραμορφώσεις στο έδαφος και παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο [35].

3.6 Βισκοπλαστικό μοντέλο κρούσης

Εξετάζοντας την ιδανική περίπτωση των βισκοελαστικών μοντέλων, όπου η κρούση ξεκινά και τελειώνει με μηδενικό βάθος διείσδυσης ($y_g = 0$), μπορούμε να υποθέσουμε ότι ένα ρομπότ όπως αυτό που παρουσιάζεται στο Σχ. 3-5 θα απογειωθεί με το μήκος του ελατηρίου να είναι $l_{id,e}$, ίσο με το ελεύθερο μήκος του. Σε μια μη ιδανική περίπτωση, ωστόσο, το ρομπότ θα απογειωθεί όταν το βάθος διείσδυσης είναι $y_g > 0$, λόγω της μόνιμης παραμόρφωσης του εδάφους. Με τον τρόπο αυτό, το μήκος του ελατηρίου κατά την απογείωση θα είναι $l_{nid,e}$ και εν γένει θα ισχύει $l_{nid,e} \neq l_{id,e}$.

Θεωρώντας ένα βισκοελαστικό μοντέλο, όπως το μοντέλο HC που παρουσιάστηκε νωρίτερα, και υποθέτοντας ότι το ρομπότ συγκρούεται με το έδαφος όπως φαίνεται στο Σχ. 3-5, το βάθος διείσδυσης και η δύναμη αλληλεπίδρασης αυξάνονται καθώς η σχετική ταχύτητα μειώνεται. Όταν η σχετική ταχύτητα μηδενιστεί (δηλαδή $\dot{y}_g = 0$), έχει επιτευχθεί η μέγιστη συμπίεση $y_{c,max}$. Αξίζει να τονιστεί ότι η μέγιστη δύναμη εμφανίζεται πριν τη μέγιστη συμπίεση, λόγω της μη γραμμικότητας του βισκοελαστικού μοντέλου, όπως αυτό παρουσιάζεται π.χ στην Εξ. (3-30). Κατά τη διάρκεια της φάσης αποσυμπίεσης, η ταχύτητα του πέλματος αυξάνεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση και το βάθος διείσδυσης αλλά και η δύναμη αλληλεπίδρασης μειώνονται. Η κρούση τερματίζεται μόλις μηδενιστούν τόσο το βάθος διείσδυσης όσο και η δύναμη αλληλεπίδρασης, αλλά στην πραγματικότητα αυτό οφείλεται στον κλειστό βρόχο που θεωρείται ότι σχηματίζουν τα βισκοελαστικά μοντέλα. Αντίθετα, σε ένα βισκοπλαστικό μοντέλο, όπως αυτό που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, το βασικό γεγονός που καθορίζει το τέλος της κρούσης είναι ο μηδενισμός της δύναμης αλληλεπίδρασης, που δείχνει ότι τα σώματα δεν είναι πλέον σε επαφή, άσχετα με το τελικό βάθος διείσδυσης.

Εξετάζοντας τη συμπεριφορά διαφόρων εδαφών χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα [21], είναι φανερό ότι η παραμορφώσιμη φύση του εδάφους δεν περιγράφεται λεπτομερώς χρησιμοποιώντας ένα βισκοελαστικό μοντέλο. Ωστόσο, η περιγραφή του εδάφους με μοντέλα συγκεντρωμένων στοιχείων είναι ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση του βισκοπλαστικού μοντέλου τμηματικά (piecewise).



Σχήμα 3-5: Μοντέλα κρούσης: (α) Βισκοελαστικό, (β) Βισκοπλαστικό.

Συγκεκριμένα, στο βισκοπλαστικό μοντέλο η φάση συμπίεσης παραμένει ίδια με την περίπτωση του βισκοελαστικού μοντέλου. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, αποθηκεύεται ενέργεια στο υποθετικό ελατήριο που περιγράφει την κρούση και δίνεται από την Εξ. (3-26), όπως παρουσιάστηκε νωρίτερα. Αντίστοιχα, ένα άλλο ποσό ενέργειας διαχέεται λόγω εσωτερικών απωλειών στο υλικό, με συντελεστή απόσβεσης b_g από την Εξ. (3-29). Η διαφορά με το βισκοελαστικό μοντέλο έγκειται στο γεγονός ότι ένα τρίτο ποσό ενέργειας καταναλώνεται για την παραμόρφωση σχήματος του εδάφους (terrain shape deformation). Για παράδειγμα, απαιτείται ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας για το σχηματισμό ενός κρατήρα γύρω από το σημείο της κρούσης. Κατά τη φάση της επανάταξης, το υλικό του εδάφους έχει μετατοπιστεί λόγω της παραμόρφωσης ή/και το έδαφος έχει γίνει πιο στιβαρό. Για το λόγο αυτό, το ελατήριο με σταθερά k_g δεν μπορεί να φτάσει στο αρχικό του ύψος ώστε $y_g = 0$, αλλά φτάνει σε ένα μικρότερο τελικό ύψος με το τέλος της κρούσης ώστε $y_g > 0$. Δηλαδή, έχει γίνει η υπόθεση ότι κατά τη φάση της επανάταξης δρα ένα νέο ελατήριο που είναι πιο κοντό και πιο δύσκαμπτο. Συνεπώς, υπάρχει μια σημαντική μη γραμμικότητα μεταξύ συμπίεσης και επανάταξης, με αποτέλεσμα η κάθετη δύναμη αλληλεπίδρασης να παίρνει τη μορφή μιας δίκλαδης συνάρτησης.

Έτσι, σύμφωνα με τη λογική που παρουσιάστηκε προηγούμενα, η συνάρτηση που δίνει την κάθετη δύναμη αλληλεπίδρασης μεταξύ πέλματος και εδάφους μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση

$$F_g^i(y_g, \dot{y}_g) = \begin{cases} F_c^i = (\lambda_c^i \cdot k_g + b_g \cdot \dot{y}_g) \cdot (y_g - y_e^{i-1})^n, \dot{y}_g \geq 0 \\ F_r^i = (\lambda_r^i \cdot k_g + b_g \cdot \dot{y}_g) \cdot (y_g - y_e^i)^n, \dot{y}_g < 0 \end{cases} \quad (3-31)$$

όπου ο δείκτης c αναφέρεται σε συμπίεση (compression), ο δείκτης r σε επανάταξη (restitution) και με y_e συμβολίζεται το βάθος στο τέλος της κρούσης, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3-5(β). Προκειμένου να αναγνωρίζονται διαδοχικές κρούσεις στο ίδιο οριζόντιο σημείο του εδάφους, χρησιμοποιείται ο δείκτης i που αναφέρεται στον αύξοντα αριθμό κρούσεων σε αυτό το σημείο. Η σημασία του δείκτη αυτού είναι πολύ μεγάλη, καθώς το έδαφος διαθέτει «μνήμη» και κληρονομεί χαρακτηριστικά από προηγούμενες κρούσεις, λόγω των μόνιμων παραμορφώσεων. Η επίδραση των παραμορφώσεων αυτών εκφράζεται με το **Συντελεστή Μόνιμης Παραμόρφωσης Εδάφους** (Coefficient of Permanent Terrain Deformation) λ , ο οποίος έχει μια αναδρομική μορφή ως εξής

$$\lambda_c^i = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ \lambda_r^{i-1}, & i > 1 \end{cases} \quad (3-32)$$

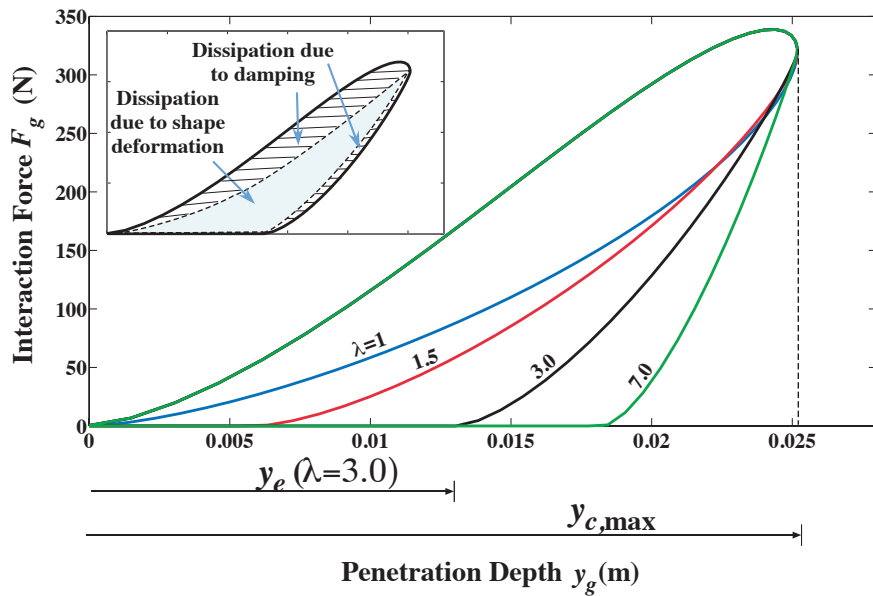
$$\lambda_r^i = \lambda_r^i(\text{materials, velocity, } i), \quad i \in \mathbb{N}$$

Λόγω του ότι το ελατήριο του εδάφους είναι πιο δύσκαμπτο κατά τη φάση της συμπίεσης σε σχέση με τη φάση της επανάταξης, ισχύει ότι $\lambda_r^i \geq \lambda_c^i \geq 1$. Το Σχ. 3-6 εμφανίζει τη δύναμη αλληλεπίδρασης ως συνάρτηση του βάθους διείσδυσης, όπως περιγράφεται από την Εξ. (3-31), για διάφορες σταθερές τιμές της παραμέτρου λ , στην περίπτωση μιας μπάλας με μάζα 1kg που πέφτει με μηδενική αρχική ταχύτητα από ένα ύψος 0.5m σε μια επιφάνεια για την οποία ισχύει $k_g = 8 \cdot 10^4 \text{ N/m}$. Στο εσωτερικό του Σχ. 3-6 εμφανίζεται και η κατανομή των απωλειών ενέργειας που λαμβάνει χώρα κατά την κρούση της μπάλας.

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, καθώς το ίδιο σημείο ενός εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση συμπιέζεται, γίνεται πιο δύσκαμπτο. Για το λόγο αυτό, μπορεί να θεωρηθεί ότι ύστερα από έναν αριθμό κρούσεων η δυσκαμψία του θα έχει φτάσει σε ένα οριακό σημείο και δεν θα μπορεί να συμπιεστεί περαιτέρω. Έτσι, προκειμένου να μοντελοποιηθεί αυτή η αυξανόμενη δυσκαμψία, χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

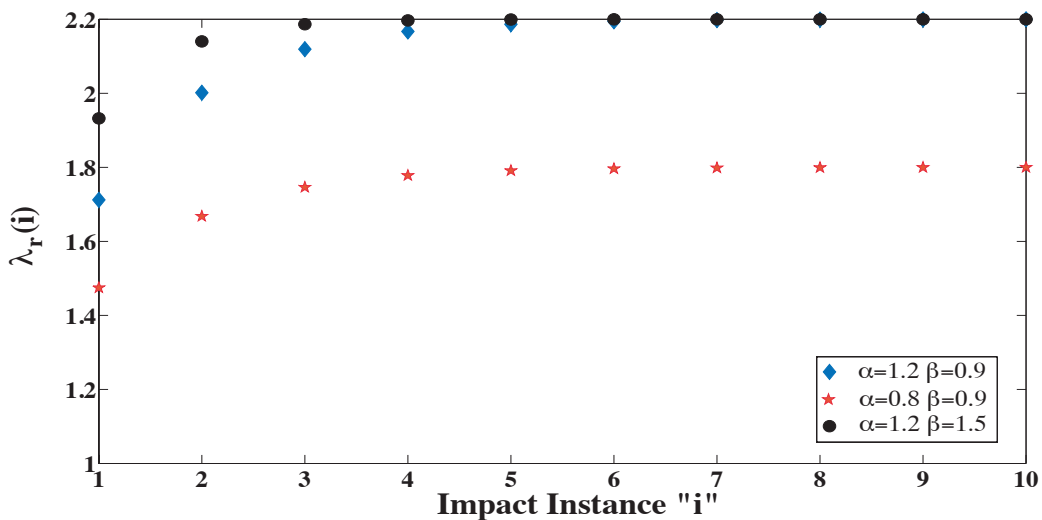
$$\lambda_r^i = 1 + a(i) \cdot (1 - e^{-i\beta(i)}), \quad i \in \mathbb{N} \quad (3-33)$$

όπου οι παράμετροι $a(i)$ και $\beta(i)$ είναι συναρτήσεις που εξαρτώνται επίσης από το υλικό του εδάφους και την ταχύτητα.



Σχήμα 3-6: Καμπύλες κρούσης για το βισκοπλαστικό μοντέλο με διαφορετικές παραμέτρους λ και κατανομή ενεργειακών απωλειών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση όπου $a(i)=0$ ή $\beta(i)=0$, το βισκοπλαστικό μοντέλο που περιγράφεται από την Εξ. (3-31) καταλήγει στο μοντέλο HC. Αυξάνοντας την παράμετρο a αυξάνεται η μέγιστη τιμή της παραμέτρου λ_r^i , ενώ αυξάνοντας την παράμετρο β αυξάνεται η ταχύτητα με την οποία η παράμετρος λ_r^i φτάνει στη μέγιστη τιμή της (απαιτούνται λιγότερες κρούσεις στο ίδιο σημείο ώστε η δυσκαμψία του εδάφους να φτάσει στο κρίσιμο σημείο της). Τα παραπάνω παρουσιάζονται και στο Σχ. 3-7.



Σχήμα 3-7: Μεταβολή Συντελεστή Μόνιμης Παραμόρφωσης Εδάφους λ ύστερα από διαδοχικές κρούσεις για διάφορες τιμές των παραμέτρων $a(i)$ και $\beta(i)$.

Τέλος, το τελικό βάθος y_e^i που αναφέρθηκε προηγουμένα μπορεί να υπολογιστεί παρατηρώντας ότι τη στιγμή της μέγιστης συμπίεσης $y_{c,\max}^i$ ισχύει

$$y_{c,\max}^i \Leftrightarrow F_c^i = F_r^i \quad \text{and} \quad \dot{y}_g = 0 \quad (3-34)$$

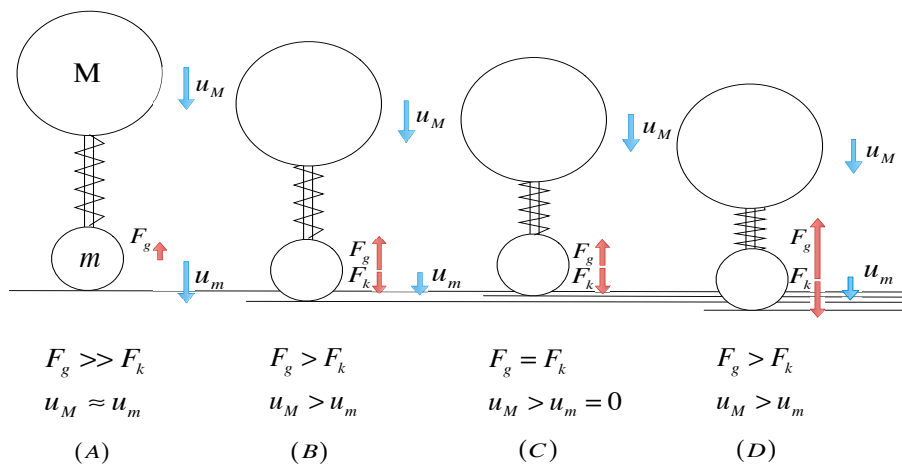
Με τον τρόπο αυτό, χρησιμοποιώντας την Εξ. (3-30) βρίσκουμε

$$y_e^i = y_{c,\max}^i \cdot \left(1 - \sqrt[n]{\frac{\lambda_c^i}{\lambda_r^i}} \right) + y_e^{i-1} \cdot \sqrt[n]{\frac{\lambda_c^i}{\lambda_r^i}} \quad (3-35)$$

όπου $y_e^0 = 0$.

3.7 Επανασυμπίεσεις και επαναπηδήσεις

Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξετάσουμε τη συμπεριφορά κρούσης σε ένα πιο σύνθετο σύστημα, όπως το σύνθετο μοντέλο που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 3.1, καθώς αυτό πέφτει κάθετα. Όπως παρατηρούμε στο Σχ. 3-8, καθώς η κατώτερη μάζα έρχεται σε επαφή με το έδαφος, πραγματοποιούνται διαδοχικά οι φάσεις της συμπίεσης (A) και της επανάταξης (B). Ωστόσο, λόγω της υποχωρητικότητας του ποδιού, η μεγαλύτερης αδράνειας ανώτερη μάζα συνεχίζει την καθοδική της κίνηση, συμπαρασύροντας και την κατώτερη μάζα. Έτσι, υπάρχει το ενδεχόμενο οι δυνάμεις που ασκούνται στην κατώτερη μάζα από το ελατήριο του ποδιού και από το έδαφος να εξισορροπηθούν, πριν το πόδι απογειωθεί (C), ξεκινώντας μια φάση **επανασυμπίεσης** (recompression). Το γεγονός αυτό θα αυξήσει φυσικά και τον αύξοντα αριθμό κρούσης ($i \rightarrow i+1$) για να ξεκινήσει μια νέα φάση συμπίεσης (D). Αυτό το φαινόμενο μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές μέχρι το σύστημα να απογειωθεί και η κρούση να τερματιστεί.



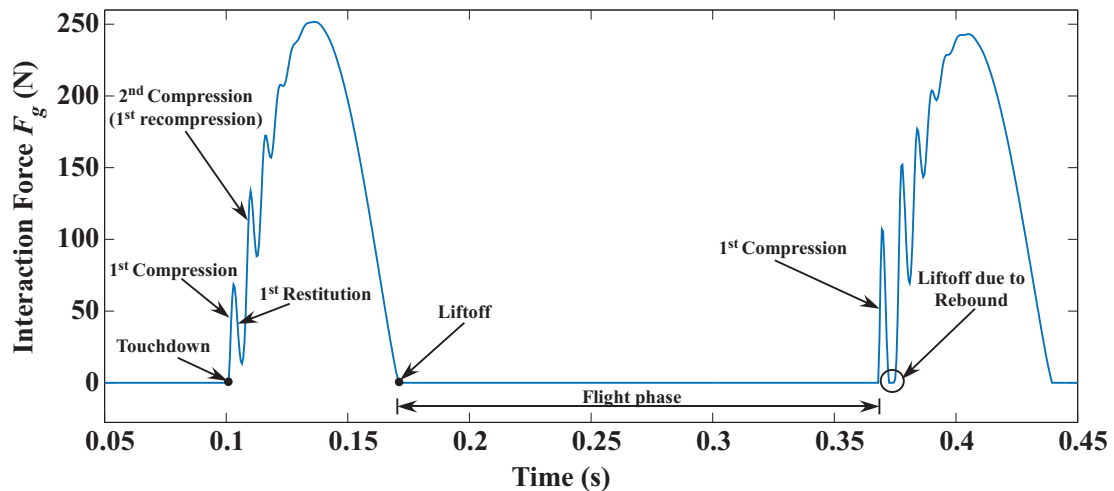
Σχήμα 3-8: Περιγραφή της επανασυμπίεσης στο σύνθετο μοντέλο του μονόποδου ρομπότ.

Αν τελικά η κατώτερη μάζα απογειωθεί, παρόλο που το κυρίως σώμα συνεχίζει την καθοδική του κίνηση, τότε συμβαίνει μια **επαναπήδηση** (rebound). Μια επαναπήδηση αποτελείται, προφανώς, από τουλάχιστον μια φάση συμπίεσης, ακολουθούμενη από μια φάση επανάταξης. Αυτό το φαινόμενο πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός ελεγκτή για πολύ σκληρό έδαφος, καθώς τέτοιες κρούσεις μεταξύ πολύ δύσκαμπτων σωμάτων [11] μπορούν να δημιουργήσουν αστάθειες.

Στο Σχ. 3-9 παρουσιάζεται η δύναμη κρούσης συναρτήσει του χρόνου στην περίπτωση ενός πολύ δύσκαμπτου εδάφους για το σύνθετο μοντέλο, όταν αυτό αφήνεται από ένα αρχικό ύψος χωρίς ταχύτητα και πραγματοποιεί δύο διαδοχικές κρούσεις με το έδαφος. Οι παράμετροι της προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 3-1. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο MATLAB, χρησιμοποιώντας τον επιλύτη (solver) ode23s με απόλυτη και σχετική ακρίβεια 10^{-5} και 10^{-4} αντίστοιχα, καθώς και με μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης 10^{-4} . Ήδη φαίνεται ότι η προσομοίωση του σύνθετου μοντέλου απαιτεί μεγαλύτερες ακρίβειες σε σχέση με το απλό 2D μοντέλο της παραγράφου 2.3, καθώς η αριθμητική ακαμψία του συστήματος αυξάνεται.

Πίνακας 3-1: Παράμετροι προσομοίωσης για ανίχνευση επανασυμπίεσεων στο σύνθετο μοντέλο.

Ποσότητα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Μάζα σώματος ρομπότ	M	4.0	kg
Ισοδύναμη μάζα ποδιού και πέλματος	m	0.1	kg
Ελεύθερο μήκος ποδιού	L	0.30	m
Σταθερά ελατηρίου	k	12000	N/m
Ιξώδης τριβή πρισματικής άρθρωσης	b_l	0.0	Ns/m
Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9.81	m/s ²
Αρχικό ύψος σώματος ρομπότ	h_0	0.35	m
Συντελεστής δυσκαμψίας κρούσης	k_g	10^6	N/m
Συντελεστής c_a	-	0.2	-
Παράμετρος a	-	0.5	-
Παράμετρος β	-	1.0	-



Σχήμα 3-9: Καμπύλες κρούσης με επανασυμπίεσεις στο σύνθετο μοντέλο.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 3-9, κατά τη διάρκεια της πρώτης κρούσης πραγματοποιούνται πολλές επιμέρους επανασυμπίεσεις, μέχρι να αρχίσει το κύριο μέρος της φάσης επανάταξης. Ωστόσο, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η καμπύλη κατά τη διάρκεια της δεύτερης κρούσης, όπου παρατηρείται επαναπήδηση. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της πρώτης επανασυμπίεσης, η δύναμη από το έδαφος μηδενίζεται και το πέλμα απογειώνεται. Η καθοδική κίνηση, όμως, του κύριου σώματος εξαναγκάζει το σύστημα σε μια νέα, πιο σταθερή φάση εδάφους, που επίσης περιλαμβάνει επανασυμπίεσεις. Αξίζει, τέλος, να αναφερθεί ότι η διαμόρφωση της καμπύλης που παρουσιάζεται στο Σχ. 3-9 εξαρτάται όχι μόνο από τα υλικά που έρχονται σε επαφή και τη σχετική ταχύτητα κρούσης, αλλά και από το λόγο της δυσκαμψίας του ελατηρίου του ποδιού σε σχέση με τη δυσκαμψία του εδάφους, καθώς και από το λόγο ανώτερης και κατώτερης μάζας, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο σύνθετο μοντέλο.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι το βισκοπλαστικό μοντέλο που αναλύθηκε είναι κατάλληλο για επαναλαμβανόμενη φόρτιση, αφού απαιτεί απλά αύξηση του αύξοντα αριθμού κρούσης i για ένα συγκεκριμένο σημείο του εδάφους στην εφαρμογή του. Μια ειδική περίπτωση επαναλαμβανόμενης φόρτισης είναι η περίπτωση του σύνθετου ή του λεπτομερούς μοντέλου του μονόποδου ρομπότ, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στις Παραγράφους 3.1 και 3.2, αφού περιλαμβάνουν πολλές μάζες που δρουν σε σύνδεση μεταξύ τους.

Το συγκεκριμένο βισκοπλαστικό μοντέλο μπορεί, επίσης, με κατάλληλες μετατροπές να καταλήξει σε ένα βισκοελαστικό μοντέλο, όπως το μοντέλο HC. Αντίθετα, με

κατάλληλη επιλογή του συντελεστή λ μπορούν να περιγραφούν ιδιαίτερα πολύπλοκα φαινόμενα κρούσης. Ο βαθμός πολυπλοκότητας του μοντέλου κρούσης εξαρτάται αποκλειστικά από τον ερευνητή που θα το χρησιμοποιήσει.

Πρέπει να επισημανθεί, τέλος, ότι το συγκεκριμένο μοντέλο κρούσης είναι ιδιαίτερα γενικό και η εφαρμογή του δεν περιορίζεται μόνο στην περιοχή των ρομπότ με πόδια. Στην περίπτωση όπου ένα άλλο σώμα με βισκοπλαστικά χαρακτηριστικά αντικαταστήσει το έδαφος, είναι δυνατή η εφαρμογή του ίδιου μοντέλου κρούσης. Ένα από τα λίγα μειονεκτήματα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η αδυναμία εφαρμογής του σε κοκκώδη εδάφη (granular terrains), όπως π.χ σε άμμο, όπου ξεχωρίζει η υδροδυναμική φύση των δυνάμεων εδάφους. Στην επόμενη παράγραφο θα γίνει περιγραφή του τρόπου υπολογισμού της στατικής τριβής και της τριβής ολίσθησης, όπως αυτές θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία.

3.8 Υπολογισμός τριβής

Θεωρώντας ένα 2D επίπεδο κίνησης για το μονόποδο ρομπότ, καθώς το πέλμα αγγίζει αρχικά το έδαφος, μπορεί να γλιστρήσει είτε προς τη μία είτε προς την άλλη διεύθυνση. Αυτό εξαρτάται τόσο από τη γωνία πρόσπτωσης του ποδιού όσο και από τα υλικά που έρχονται σε επαφή και την ταχύτητα με την οποία το πόδι προσγειώνεται [29]. Επιπλέον, λόγω του ότι η κάθετη δύναμη αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους και πέλματος δίνεται από την Εξ. (3-31), η δύναμη τριβής αναμένεται να είναι μικρότερη στην αρχή και στο τέλος της φάσης εδάφους. Συνεπώς, απαιτείται ένα μοντέλο περιγραφής της τριβής, ώστε να μπορούμε να αξιολογήσουμε σωστά τη συμπεριφορά του συστήματος.

Στη βιβλιογραφία, έχουν προταθεί πολλά μοντέλα τριβής με αυξανόμενη πολυπλοκότητα [28]. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ένα απλό μοντέλο στατικής τριβής – τριβής ολίσθησης (Static-plus-Coulomb Model) καθώς μπορεί να παράγει γρήγορα αλλά αξιόπιστα αποτελέσματα για χρήση στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς του μονόποδου ρομπότ κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους. Έτσι, η δύναμη τριβής F_t δίνεται με την παρακάτω έκφραση

$$F_t = \begin{cases} -\mu_c \cdot F_{\perp} \cdot \text{sgn} \dot{x}_{ft}, & \dot{x}_{ft} \neq 0 \\ -F_{\parallel} \cdot \text{sgn} F_{\parallel}, & |F_{\parallel}| < \mu_s \cdot |F_{\perp}|, \dot{x}_{ft} = 0, \ddot{x}_{ft} \neq 0 \end{cases} \quad (3-36)$$

όπου F_{\perp} και F_{\parallel} είναι η κάθετη και η οριζόντια συνιστώσα του διανυσματικού αθροίσματος των δυνάμεων στη διεπιφάνεια πέλματος-εδάφους αντίστοιχα, μ_c είναι ο συντελεστής τριβής Coulomb (τριβή ολίσθησης) και μ_s είναι ο συντελεστής στατικής τριβής που καθορίζει το όριο μεταξύ της περιοχής στατικής τριβής και της περιοχής τριβής ολίσθησης.

Η εισαγωγή αυτού του ασυνεχούς μοντέλου τριβής αυξάνει σημαντικά την αριθμητική ακαμψία (stiffness) του αριθμητικού προβλήματος. Όπως είναι προφανές, επίσης, η οριζόντια ταχύτητα του πέλματος στις προσομοιώσεις δεν μπορεί να είναι ποτέ ακριβώς ίση με μηδέν, ώστε να εφαρμοστεί με κάθε λεπτομέρεια το μοντέλο τριβής της Εξ. (3-36). Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία, η οριζόντια ταχύτητα του πέλματος θα θεωρείται μηδενική όταν είναι μικρότερη από 10^{-4} m/s. Σε αυτή την περίπτωση, θα εφαρμόζεται στο πέλμα στατική τριβή και όχι τριβή Coulomb.

3.9 Απόκριση ελεγκτή Raibert σε έδαφος με υποχωρητικότητα

Αφού παρουσιάστηκαν τόσο τα μοντέλα του μονόποδου ρομπότ που ενσωματώνουν την περιγραφή της επαφής του συστήματος με το έδαφος όσο και το βισκοπλαστικό μοντέλο εδάφους με τριβή, θα εξεταστεί η συμπεριφορά των ελεγκτών που παρουσιάστηκαν στις Παραγράφους 2.5 και 2.6 σε έδαφος με υποχωρητικότητα, σύμφωνα με την ανανεωμένη περιγραφή του ρομπότ.

Αρχικά, θα εξεταστεί η συμπεριφορά του αλγόριθμου τοποθέτησης πέλματος Raibert. Για τη δοκιμή θα χρησιμοποιηθούν τρεις κατηγορίες εδαφών: σκληρό (stiff), μέτριο (moderate) και μαλακό (soft), με χαρακτηριστικά που δίνονται στον Πίνακα 3-2.

Πίνακας 3-2: Χαρακτηριστικά διαφόρων εδαφών χωρίς μόνιμη παραμόρφωση.

Έδαφος	k_g (N/m)	Παράμετρος c_a	μ_s	μ_c	a	β	$\max \lambda$
Σκληρό	$4 \cdot 10^5$	0.2	0.7	0.6	0.0	0.0	1.0
Μέτριο	$2 \cdot 10^5$	0.2	0.6	0.5	0.0	0.0	1.0
Μαλακό	$8 \cdot 10^4$	0.2	0.5	0.4	0.0	0.0	1.0

Τα χαρακτηριστικά αυτά του εδάφους επιλέχθηκαν με βάση τη βιβλιογραφία [38] και χρησιμοποιώντας τις Εξ. (3-26) και (3-27) για διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας εδαφών. Φυσικά, αυτές οι τιμές είναι ενδεικτικές και χρησιμοποιούνται ως μέτρο σύγκρισης.

Σημειώνεται ότι επιλέχθηκαν εδάφη χωρίς μόνιμη παραμόρφωση ($\alpha, \beta = 0$). Οι δοκιμές που ακολουθούν θα μπορούσαν να επαναληφθούν για οποιοδήποτε έδαφος με οποιαδήποτε χαρακτηριστικά.

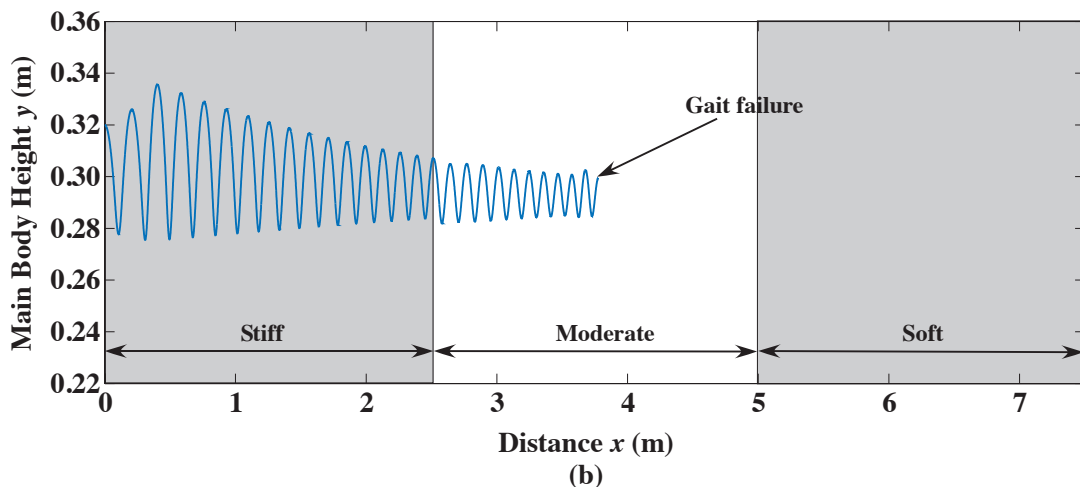
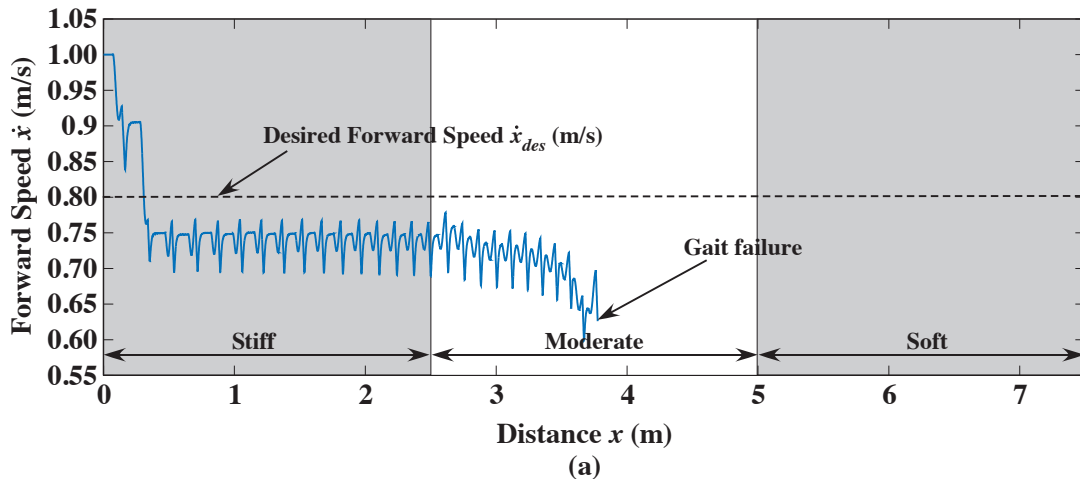
Στο Σχ. 3-10 εμφανίζεται η απόκριση του σύνθετου μοντέλου του μονόποδου ρομπότ σε έδαφος με υποχωρητικότητα, χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή του Raibert. Το έδαφος μεταβάλεται κάθε 2.5m από σκληρό έως μαλακό. Οι παράμετροι της προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 3-3. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο MATLAB, χρησιμοποιώντας τον επιλύτη (solver) ode23s με απόλυτη και σχετική ακρίβεια 10^{-2} , καθώς και με μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης 10^{-5} . Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της αριθμητικής ακαμψίας (stiffness) του αριθμητικού προβλήματος, η κρούση με το έδαφος θεωρείται ότι τελειώνει όταν η κάθετη δύναμη μεταξύ εδάφους και πέλματος γίνει μικρότερη από 5N. Η συγκεκριμένη τιμή θα χρησιμοποιηθεί σε όλο το εύρος της παρούσας εργασίας. Αυξάνοντας τις ακρίβειες, αυτή η τιμή μπορεί να γίνει μικρότερη, ωστόσο η προσομοίωση θα γίνει πολύ αργή.

Πίνακας 3-3: Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή ελεγκτών σε έδαφος με υποχωρητικότητα.

Ποσότητα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Μάζα σώματος ρομπότ	M	4.0	kg
Ισοδύναμη μάζα ποδιού και πέλματος	m	0.1	kg
Ελεύθερο μήκος ποδιού	L	0.30	m
Σταθερά ελατηρίου	k	12000	N/m
Ιξώδης τριβή πρισματικής άρθρωσης	b_l	3.0	Ns/m
Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9.81	m/s ²
Επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_{des}	0.8	m/s
Αρχικό ύψος σώματος ρομπότ	h_0	0.32	m
Αρχική πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_0	1.0	m/s

Από το Σχ. 3-10, βλέπουμε ότι παρόλο που ο ελεγκτής προσπαθεί να οδηγήσει το ρομπότ σε σταθερή κατάσταση (steady state) παρά τις όποιες ενεργειακές απώλειες λόγω εσωτερικών τριβών στο σκληρό έδαφος, αποτυγχάνει εντελώς καθώς η υποχωρητικότητα του εδάφους αυξάνεται, χωρίς μάλιστα να έχει εξεταστεί καν η

περίπτωση όπου το έδαφος εμφανίζει μόνιμες παραμορφώσεις. Στο μέσο περίπου της διαδρομής στο έδαφος μέτριας δυσκαμψίας, το ρομπότ οδηγείται σε αστάθεια. Συνεπώς, ο ελεγκτής Raibert κρίνεται ακατάλληλος για χρήση σε έδαφος με υποχωρητικότητα, μιας και δεν ενσωματώνει στρατηγικές για την αντιμετώπιση της υποχωρητικότητας του εδάφους.



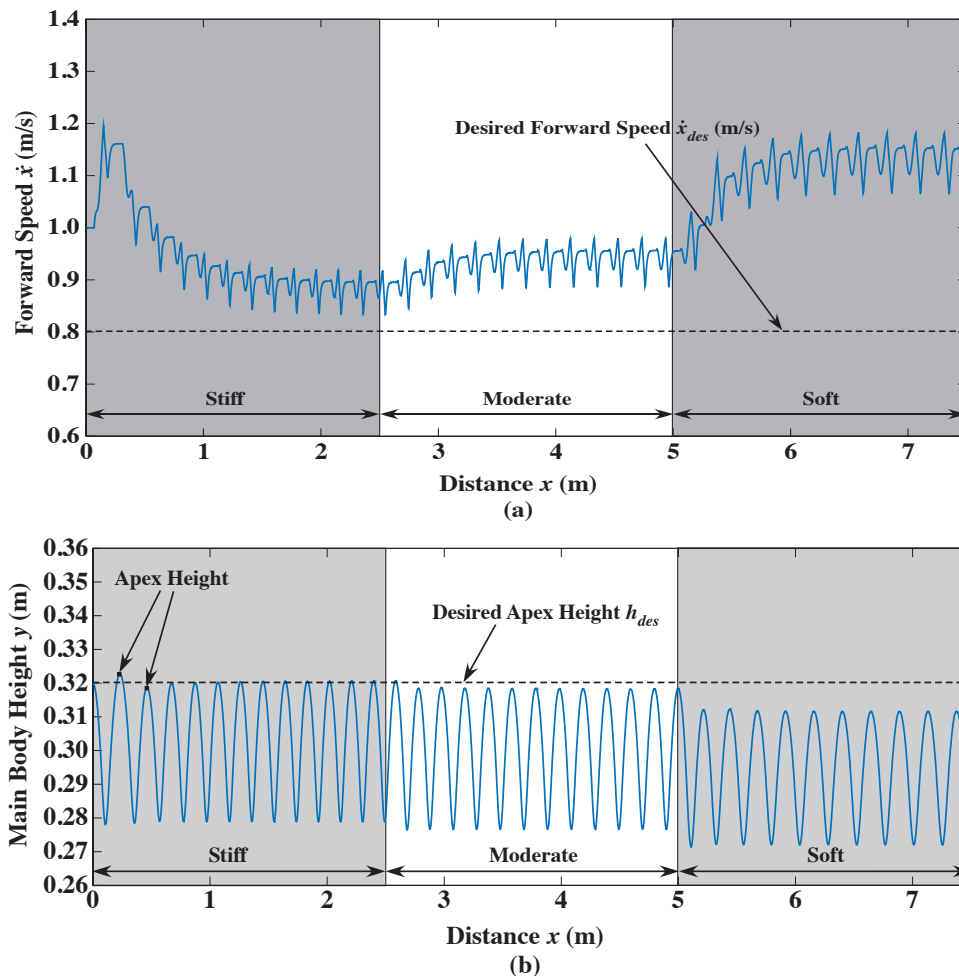
Σχήμα 3-10: Απόκριση σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή του Raibert σε διάφορα εδάφη: (a) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} , (b) Ύψος σώματος y .

3.10 Απόκριση ελεγκτή MP σε έδαφος με υποχωρητικότητα

Σε αυτήν την παράγραφο, θα εξεταστεί η απόδοση του ελεγκτή MP σε έδαφος που εμφανίζει υποχωρητικότητα. Οι παράμετροι περιγραφής των διαφόρων εδαφών παραμένουν ίδιοι, όπως παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3-2. Αντίστοιχα, οι παράμετροι της προσομοίωσης παραμένουν ίδιες, όπως εμφανίζονται στον Πίνακα 3-3, με τη μόνη

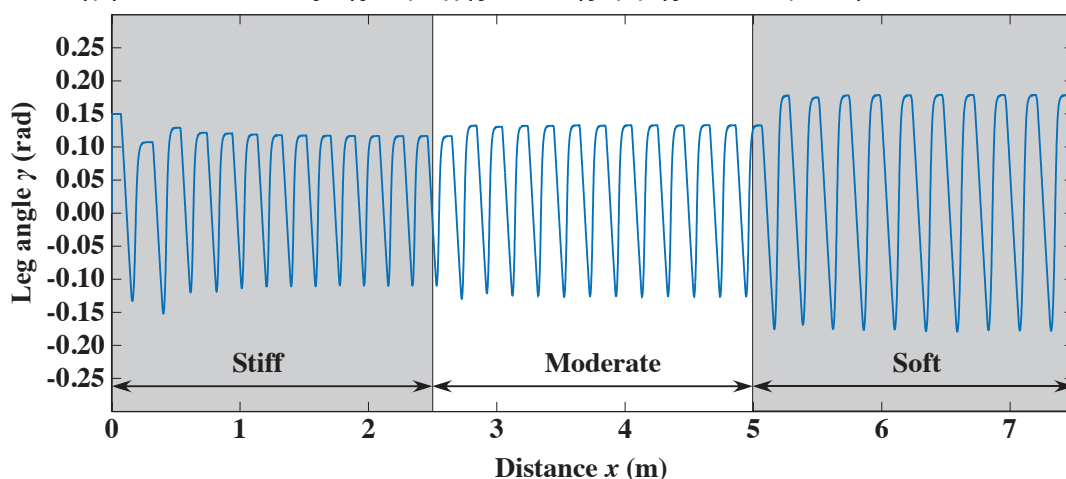
διαφορά ότι εισάγεται και ένα επιθυμητό μέγιστο ύψος $h_{des} = 0.32\text{m}$. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο MATLAB, χρησιμοποιώντας τον επιλύτη (solver) ode23s με απόλυτη και σχετική ακρίβεια 10^{-2} , καθώς και με μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης 10^{-5} . Στο Σχ. 3-11 παρουσιάζεται η απόκριση του ρομπότ χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή MP.

Όπως βλέπουμε, ο ελεγκτής MP και πάλι αποτυγχάνει να οδηγήσει το ρομπότ σε steady state, καθώς η υποχωρητικότητα του εδάφους αυξάνεται. Όσο το έδαφος παραμένει σκληρό, ο ελεγκτής πλησιάζει τα επιθυμητά μεγέθη, καθώς ισχύει με μικρές αποκλίσεις η υπόθεση της απόλυτα σταθερής περιστροφικής άρθρωσης κατά τη φάση εδάφους, στην οποία βασίζεται ο ελεγκτής MP. Αντίθετα, η αύξηση της υποχωρητικότητας του εδάφους και η αυξανόμενη βύθιση του πέλματος σε αυτό αποσταθεροποιεί τον ελεγκτή, μέχρι την τελική αστάθεια στο απόλυτα μαλακό έδαφος.



Σχήμα 3-11: Απόκριση του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή MP: (a) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} , (b) Ύψος σώματος y .

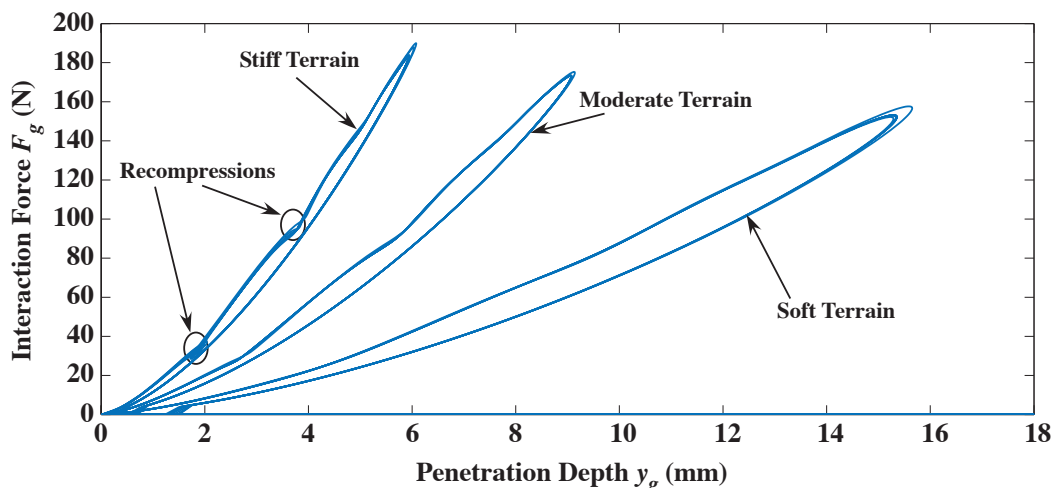
Παρόλο που ο ελεγκτής τελικά αποτυγχάνει να αποδώσει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά κίνησης, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξεταστεί η συμπεριφορά του, όσο η υποχωρητικότητα του εδάφους αυξάνεται. Στο Σχ. 3-12 φαίνεται η απόκριση της γωνίας του ποδιού κατά τη διάρκεια της παραπάνω διαδρομής του ρομπότ. Όπως γίνεται φανερό, ο ελεγκτής προσπαθεί να διατηρήσει την κίνηση του ρομπότ δίνοντας εντολή για μεγαλύτερες γωνίες καθώς η υποχωρητικότητα αυξάνεται. Αυτή είναι μια λογική αντίδραση, καθώς έτσι προσπαθεί να αναπληρώσει την ενέργεια που χάνεται από το σύστημα λόγω του εδάφους. Ωστόσο, αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης μπορεί να οδηγήσει το πόδι εκτός της περιοχής στατικής τριβής και να προκληθεί αστάθεια.



Σχήμα 3-12: Απόκριση γωνίας γ του σύνθετου μοντέλου με τον ελεγκτή ΜΡ.

Επίσης, αξίζει να εξεταστούν οι δυνάμεις που δέχθηκε το ρομπότ από το έδαφος κατά τη διάρκεια της όλης διαδρομής του. Στο Σχ. 3-13 παρουσιάζεται η κάθετη δύναμη F_g από το έδαφος, συναρτήσει του βάθους διείσδυσης y_g . Όπως φαίνεται, μαλακότερα εδάφη οδηγούν σε μεγαλύτερα βάθη διείσδυσης και μικρότερες δυνάμεις αλληλεπίδρασης. Ειδικά στο σκληρό έδαφος, μπορούν να εντοπιστούν δύο περιπτώσεις επανασυμπύεσης, όπως αυτές αναλύθηκαν στην Παράγραφο 3.7. Όσο το έδαφος γίνεται πιο μαλακό, η καμπύλη γίνεται πιο λεία και η κρούση εξελίσσεται πιο ομαλά. Τονίζεται ότι το εμβαδό που περικλείεται από κάθε καμπύλη εξαρτάται από την επιλογή του συντελεστή c_a [23], καθώς αύξηση του συγκεκριμένου συντελεστή οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή απόσβεσης της κρούσης b_g και έτσι σε αύξηση του εμβαδού. Με αυτό τον τρόπο, το εμβαδό αυτό αντιστοιχεί στις απώλειες ενέργειας λόγω εσωτερικών τριβών κατά τη διάρκεια της κρούσης. Όπως γίνεται φανερό συγκρίνοντας τα διάφορα εμβαδά

από το Σχ. 3-13, οι ενεργειακές απώλειες λόγω εσωτερικών τριβών κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση του μαλακού εδάφους.

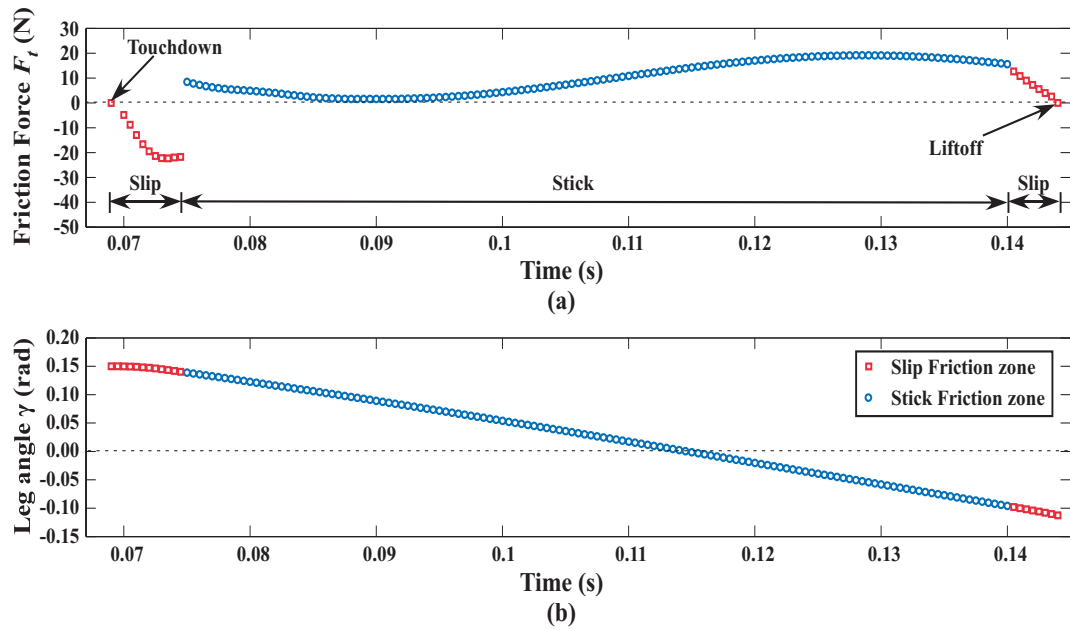


Σχήμα 3-13: Κάθετη δύναμη F_g από το έδαφος συναρτήσει του βάθους διείσδυσης y_g για σύνθετο μοντέλο σε διάφορα εδάφη.

Τέλος, στο Σχ. 3-14 παρουσιάζεται μια εστίαση στο γράφημα χρόνου-τριβής για μια φάση εδάφους παράλληλα με την εξέλιξη της γωνίας γ στο ίδιο διάστημα, ώστε να εξακριβωθεί η διαδοχή των γεγονότων καθώς το πέλμα πατά στο έδαφος. Όπως βλέπουμε, για ένα μικρό διάστημα στην αρχή της φάσης εδάφους, το πέλμα γλιστρά (τριβή Coulomb) και εμφανίζεται αρνητική τριβή ολίσθησης. Ύστερα από ένα μικρό χρονικό διάστημα, η επίδραση της τριβής ολίσθησης και των υπόλοιπων δυνάμεων καταφέρνουν να σταθεροποιήσουν το πέλμα, οπότε περνάμε στη φάση της στατικής τριβής με χαρακτηριστική ασυνέχεια. Η γωνία του ποδιού κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης βρίσκεται σε μια ζώνη γύρω από το μηδέν. Λίγο πριν την απογείωση και λόγω του ότι η γωνία του ποδιού έχει αυξηθεί αρκετά προς την αρνητική κατεύθυνση, το πέλμα του ρομπότ ξαναγλιστρά αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση (θετική τριβή ολίσθησης), μέχρι τελικώς να εγκαταλείψει το έδαφος. Έτσι, καταλαβαίνουμε ότι κατά τη φάση εδάφους δεν ισχύει η υπόθεση ότι το πέλμα συμπεριφέρεται ως άρθρωση, καθώς μετακινείται τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

Όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω δείχνουν ότι οι υπάρχοντες ελεγκτές δεν ενσωματώνουν την περιγραφή όλων των σύνθετων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την κρούση του πέλματος με το έδαφος (φάση εδάφους) και οδηγούν το ρομπότ σε αστάθεια όταν η υποχωρητικότητα του εδάφους αυξάνεται. Για το λόγο αυτό, στο

επόμενο κεφάλαιο θα γίνει προσπάθεια για την ανάπτυξη ενός νέου ελεγκτή που θα λαμβάνει υπόψη του όλα αυτά τα στοιχεία και θα καταστά ένα μονόποδο ρομπότ που περιγράφεται μέσω του σύνθετου ή του λεπτομερούς μοντέλου ικανό να διασχίσει τέτοια εδάφη.



Σχήμα 3-14: Εστίαση στο χρονικό διάστημα μιας φάσης εδάφους: (a) Τριβή F_t , (b) Γωνία ποδιού γ .

4 Έλεγχος ρομπότ σε έδαφος με τριβή και υποχωρητικότητα

4.1 Προδιαγραφές και λογική νέου ελεγκτή

Με στόχο να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που δημιουργεί η υποχωρητικότητα του εδάφους και παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναπτύσσεται ένας νέος ελεγκτής που έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη του το σύνολο των σύνθετων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη φάση εδάφους ενός μονόποδου ρομπότ. Ο συγκεκριμένος ελεγκτής ονομάστηκε **Extended MultiPart Controller (x-MP)** [35], καθώς βασίζεται στη λογική του MultiPart Controller (MP) που αναλύθηκε στην Παράγραφο 2.6.

Σε γενικές γραμμές, μπορούμε πούμε ότι ο ελεγκτής x-MP σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί να επιτυγχάνει τους ακόλουθους στόχους:

- i. *Επίτευξη επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας και επιθυμητού μέγιστου ύψους αναπήδησης*, με παρόμοιο τρόπο με τον ελεγκτή MP.
- ii. *Αντιμετώπιση υποχωρητικότητας εδάφους*, αφού, όπως φάνηκε στο Κεφάλαιο 3, το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κίνηση του ρομπότ.
- iii. *Αντιμετώπιση προβλήματος επαναπηδήσεων (rebounds)*, ιδίως σε έδαφος μεγάλης δυσκαμψίας όπου το πρόβλημα είναι πιο έντονο. Οι επαναπηδήσεις μπερδεύουν τον ελεγκτή, ο οποίος ανιχνεύει εσφαλμένα φάση πτήσης, παρόλο που η καθοδική κίνηση του σώματος του ρομπότ συνεχίζεται.
- iv. *Αντιμετώπιση φαινομένων τριβής*, μιας και το πέλμα του ρομπότ γλιστρά γενικώς προς τη μια ή την άλλη οριζόντια διεύθυνση.
- v. *Ανάγκη εισαγωγής όσο το δυνατό λιγότερων πρόσθετων αισθητήρων* σε μια πραγματική διάταξη, συγκριτικά με τα στοιχεία αίσθησης που απαιτεί ο MP.
- vi. *Επέκταση σε ανώμαλο έδαφος*, ώστε το ρομπότ να είναι ικανό να διασχίσει εδάφη μικρών ανωμαλιών και κλίσεων.

Για να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, χρησιμοποιήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση σε σχέση με τους υπάρχοντες ελεγκτές που βασίζονται αποκλειστικά στο μοντέλο περιγραφής του ρομπότ. Όπως έχει ήδη αναλυθεί, το κύριο πρόβλημα σχετικά με τους ελεγκτές ρομποτικών συστημάτων με πόδια είναι το γεγονός ότι βασίζονται

αυστηρά στη δυναμική του συστήματος και δεν μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν σε καταστάσεις που διαφέρουν από τα κριτήρια σχεδιασμού του ελεγκτή. Για το λόγο αυτό, ο x-MP αναπτύχθηκε έτσι ώστε να μπορεί να διαχειριστεί και να ελέγξει ένα μονόποδο ρομπότ με μια περιστροφική και μια πρισματική άρθρωση και έναν επενεργητή, όσο σύνθετο ή απλό και αν είναι το μοντέλο περιγραφής του, με ή χωρίς υποχωρητικότητα εδάφους.

Για να συμβεί αυτό, θα χρησιμοποιηθεί ως βάση το απλό 2D μοντέλο περιγραφής του μονόποδου ρομπότ που αναλύθηκε στην Παράγραφο 2.3, καθώς κάθε δυναμικό μοντέλο περιγραφής του ρομπότ θα αντιστοιχίζεται σε αυτό μέσω μιας ισοδύναμης μάζας M' , μιας ισοδύναμης σταθεράς ελατηρίου k' και μιας ισοδύναμης απόσβεσης b'_l . Φυσικά, η διαδικασία αυτή θα γίνει μόνο για το σύνθετο και το λεπτομερές μοντέλο περιγραφής του μονόποδου ρομπότ στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ωστόσο μπορεί να επεκταθεί και για άλλα δυναμικά μοντέλα. Με λίγα λόγια, παρόλο που η πραγματική δυναμική του συστήματος θα δίνεται σύμφωνα με την περιγραφή του σύνθετου ή του λεπτομερούς μοντέλου, ο ελεγκτής x-MP θα θεωρεί ότι διαχειρίζεται ένα σύστημα όπως αυτό που φαίνεται στο Σχ. 2-3 όπου η μάζα του ρομπότ, η σταθερά ελατηρίου και η απόσβεση στο πόδι έχουν αντικατασταθεί από τις παραμέτρους M' , k' και b'_l αντίστοιχα.

Η λογική πίσω από τη χρήση αυτών των εικονικών (virtual) παραμέτρων βασίστηκε στην ιδέα ότι η συνδυασμένη δράση τόσο του ελατηρίου του ποδιού k όσο και του υποθετικού ελατηρίου εδάφους k_g θα οδηγήσει σε ένα ισοδύναμο ελατήριο k' , με τρόπο τέτοιο ώστε η δυναμική του ρομπότ να μπορεί να περιγραφεί επιτυχώς από το απλό μοντέλο της παραγράφου 2.3 παρά την επίδραση του εδάφους, χρησιμοποιώντας φυσικά ένα διαφορετικό ελατήριο. Αντίστοιχα, οι συνδυασμένες ενεργειακές απώλειες λόγω του εδάφους (b_g) και της απόσβεσης b_l μπορούν να περιγραφούν από έναν ισοδύναμο συντελεστή απόσβεσης b'_l . Έτσι, ο x-MP λειτουργεί σαν «φίλτρο» αντιστοίχισης της πραγματικής δυναμικής με τη δυναμική του απλού μοντέλου και δίνει τη δυνατότητα στον MP να λειτουργήσει με ελάχιστες αλλαγές, χρησιμοποιώντας τις εικονικές παραμέτρους M' , k' και b'_l .

Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, ο τρόπος υπολογισμού αυτών των παραμέτρων στηρίζεται σε ενεργειακά μεγέθη και δεν απαιτεί ακριβή γνώση των παραμέτρων εδάφους. Αρχικά, θα παρουσιαστεί μια πρώτη έκδοση του x-MP (Extended MultiPart

Controller I ή x-MP-I) που αντιμετωπίζει απλά το θέμα της υποχωρητικότητας του εδάφους αγνοώντας το θέμα της τριβής ή των επαναπηδήσεων και έχει σημαντική εξάρτηση από τον ελεγκτή MP, ενώ, στη συνέχεια, θα ακολουθήσει η πλήρης έκδοση του x-MP (Extended MultiPart Controller II ή x-MP-II) που ενσωματώνει τους στόχους που περιγράφηκαν παραπάνω.

4.2 Extended MultiPart Controller I (x-MP-I)

Σε αυτή την παράγραφο, θα αναλυθεί η πρώτη εκδοχή του ελεγκτή x-MP όπως έχει ήδη παρουσιαστεί [35], με στόχο να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της υποχωρητικότητας του εδάφους και να συντηρείται η κίνηση του ρομπότ με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της. Όπως και ο ελεγκτής MP, ο ελεγκτής x-MP καλείται στο τέλος κάθε φάσης εδάφους και υπολογίζει μια επιθυμητή γωνία πρόσπτωσης γ_{td} και μια επιθυμητή ροπή τ_s που θα ασκηθεί κατά τη διάρκεια της επόμενης φάσης εδάφους.

Για τον υπολογισμό της επιθυμητής γωνίας πρόσπτωσης γ_{td} , χρησιμοποιούνται οι ισοδύναμες παράμετροι M' , k' και b'_l . Για αρχή, θεωρείται ότι τόσο η ισοδύναμη μάζα ποδιού και πέλματος m στο σύνθετο μοντέλο όσο και η μάζα του ποδιού m_l στο λεπτομερές μοντέλο είναι πολύ μικρές σε σχέση με τη μάζα του κύριου σώματος M , ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση $M' = M$. Αυτή η υπόθεση μπορεί να επιβεβαιωθεί και στην πραγματικότητα, καθώς συνήθως η μάζα του κύριου σώματος σε ένα μονόποδο ρομπότ είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τη μάζα του ποδιού [17]. Η συγκεκριμένη υπόθεση θα χρησιμοποιηθεί σε όλο το εύρος της παρούσας εργασίας.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων k' και b'_l και την εύρεση της γωνίας γ_{td}^j για το διασκελισμό j θα γίνει χρήση των μεγεθών κίνησης του διασκελισμού $j-1$, ο οποίος ξεκινά στην αρχή της προηγούμενης φάσης πτήσης και ολοκληρώνεται με την απογείωση του ποδιού, μετά από μια φάση εδάφους, και την έναρξη μιας νέας φάσης πτήσης. Γενικότερα, ο ελεγκτής x-MP χρησιμοποιεί σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη των μεγεθών κίνησης του διασκελισμού $j-1$. Έτσι λοιπόν, η διάρκεια της φάσης εδάφους του διασκελισμού $j-1$ θεωρείται ότι είναι η μισή περίοδος μιας αρμονικής ταλάντωσης με φυσική συχνότητα ω_s^{j-1} ώστε

$$\Delta t_s^{j-1} = \frac{\pi}{\omega_s^{j-1}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{M}{k'}} \quad (4-1)$$

με τη διάρκεια της φάσης εδάφους Δt_s^{j-1} να δίνεται από τη σχέση

$$\Delta t_s^{j-1} = t_{lo}^{j-1} - t_{id}^{j-1} \quad (4-2)$$

όπου t_{id}^{j-1} και t_{lo}^{j-1} είναι οι χρονικές στιγμές προσγείωσης (td) και απογείωσης (lo) για το διασκελισμό $j-1$ αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη θεώρηση δεν απέχει πολύ από την πραγματική συμπεριφορά του ρομπότ, όπως φαίνεται π.χ από το Σχ. 3-11(b), όπου η εξέλιξη του ύψους του σώματος του ρομπότ μοιάζει πάρα πολύ με μια αρμονική ταλάντωση. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να προσδιοριστεί η παράμετρος k' αφού

$$k' = M \cdot \left(\frac{\pi}{\Delta t_s^{j-1}} \right)^2 \quad (4-3)$$

Εάν μια κίνηση με αυτά τα χαρακτηριστικά πραγματοποιούταν σε ένα μη παραμορφώσιμο έδαφος (nondeformable terrain – nd), η μέγιστη συμπίεση του ελατηρίου του ποδιού σε μια απόλυτα συμμετρική κίνηση θα ήταν

$$\Delta l_{\max}^{j-1} = L - y_{\min}^{j-1} \quad (4-4)$$

όπου y_{\min}^{j-1} είναι το χαμηλότερο σημείο της κίνησης του σώματος του ρομπότ κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Έτσι, το μήκος του ποδιού κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους με την προσέγγιση του αρμονικού ταλαντωτή που αναφέρθηκε προηγούμενα θα μπορούσε να προσεγγιστεί ως εξής

$$l_{nd}^{j-1}(t) = L - \Delta l_{\max}^{j-1} \cdot \sin \left[\omega_s^{j-1} \cdot (t - t_{id}^{j-1}) \right] \quad (4-5)$$

όπου $t_{id}^{j-1} \leq t \leq t_{lo}^{j-1}$ και η συχνότητα ω_s^{j-1} υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ. (4-1). Στον ελεγκτή ΜΡ, οι όποιες ενεργειακές απώλειες (από οποιαδήποτε αιτία) εισάγονται μέσω της ιξώδους τριβής στην πρισματική άρθρωση του ποδιού. Επίσης, δεν υπάρχουν απώλειες κατά τη διάρκεια της φάσης πτήσης, αφού το σώμα θεωρείται ότι εκτελεί βαλλιστική κίνηση. Συνεπώς, η εικονική ισοδύναμη παράμετρος b'_i που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να ενσωματώνει όλες τις ενεργειακές απώλειες (λόγω τριβών στο πόδι αλλά και λόγω εδάφους), καθώς και τις ενεργειακές απώλειες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της φάσης πτήσης (λόγω παραμένουσας ταλάντωσης στο ελατήριο του ποδιού το οποίο δεν θεωρείται πλέον ότι εκτελεί μια ελεύθερη κίνηση στον αέρα. Έτσι, εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας μεταξύ του εικονικού μοντέλου M' , k' , b'_i και του χρησιμοποιούμενου μοντέλου (σύνθετου ή λεπτομερούς) του μονόποδου ρομπότ, παίρνουμε

$$b'_l \cdot \int_{t_{id}^{j-1}}^{t_{lo}^{j-1}} (\dot{l}_{nd}^{j-1}) dt = E_{gdis}^{j-1} + E_{damp}^{j-1} \Rightarrow b'_l = \frac{E_{gdis}^{j-1} + E_{damp}^{j-1}}{\int_{t_{id}^{j-1}}^{t_{lo}^{j-1}} (\dot{l}_{nd}^{j-1}) dt} \quad (4-6)$$

όπου με E_{gdis}^{j-1} και E_{damp}^{j-1} συμβολίζονται οι απώλειες λόγω εδάφους και οι απώλειες λόγω ιξωδών τριβών αντίστοιχα, για όλο το εύρος του διασκελισμού $j-1$ αντίστοιχα. Αγνοώντας τον παράγοντα της τριβής που θα μας απασχολήσει στην επόμενη παράγραφο, μπορεί για παράδειγμα να αναφερθεί ότι οι ενεργειακές απώλειες για το σύνθετο μοντέλο υπολογίζονται από τη σχέση

$$E_{gdis}^{j-1} = \left| \int_{t_{id}^{j-1}}^{t_{lo}^{j-1}} F_g^{j-1} \cdot \dot{y}_{ft}^{j-1} dt \right| \quad (4-7)$$

ενώ οι απώλειες λόγω ιξωδών τριβών, επίσης για το σύνθετο μοντέλο, είναι ίσες με

$$E_{damp}^{j-1} = b_l \cdot \int_{t_{lo}^{j-2}}^{t_{lo}^{j-1}} (\dot{l}^{j-1})^2 dt \quad (4-8)$$

Αν το υπό εξέταση μοντέλο προς έλεγχο είναι το λεπτομερές, βρίσκουμε αντίστοιχα ότι

$$E_{damp}^{j-1} = b_l \cdot \int_{t_{lo}^{j-2}}^{t_{lo}^{j-1}} (\dot{l}^{j-1})^2 dt + b_h \cdot \int_{t_{lo}^{j-2}}^{t_{lo}^{j-1}} (\dot{\gamma}^{j-1})^2 dt \quad (4-9)$$

Έτσι, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους k' και b'_l που βρέθηκαν από τις Εξ. (4-3) και (4-6) αντίστοιχα, είναι δυνατή η χρήση του ελεγκτή ΜΡ με ακριβώς ίδιο τρόπο όπως στην Παράγραφο 2.6 (διπλή ολοκλήρωση της Εξ. (2-21) όπου αντί για m_b , k , b_l έχουμε M' , k' , b'_l αντίστοιχα) για τον υπολογισμό της επιθυμητής γωνίας πρόσπτωσης γ_{id}^j . Κατά τη διάρκεια της φάσης πτήσης, το πόδι τοποθετείται στη γωνία γ_{id}^j με χρήση του PD ελεγκτή που παρουσιάζεται στην Εξ. (3-12).

Η επιθυμητή σταθερή ροπή τ_s^j που θα πρέπει να ασκηθεί κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους του διασκελισμού j προκειμένου το σώμα του ρομπότ να αποκτήσει μια επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα βρίσκεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί και να διατηρηθεί μια επιθυμητή στάθμη ενέργειας. Συγκεκριμένα, στο ανώτερο ύψος του διασκελισμού j , επιδιώκεται το ρομπότ να έχει ήδη αποκτήσει την επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα \dot{x}_{des} . Θεωρείται δε ότι σε αυτό το ύψος το πόδι έχει αποκτήσει το ελεύθερο μήκος του L ενώ έχει ήδη τοποθετηθεί στην επιθυμητή γωνία γ_{id}^j και δεν περιστρέφεται. Έτσι, στην περίπτωση του σύνθετου μοντέλου, η επιθυμητή στάθμη ενέργειας για το διασκελισμό j είναι

$$E_{des}^j = \frac{1}{2}(M + m) \cdot \dot{x}_{des}^2 + M \cdot g \cdot h_{des} + m \cdot g \cdot (h_{des} - L \cdot \cos \gamma_{id}^j) \quad (4-10)$$

αφού το σώμα του ρομπότ θέλουμε να βρεθεί σε ύψος h_{des} . Για λόγους πληρότητας αναφέρουμε ότι για το λεπτομερές μοντέλο όπου το πόδι θεωρείται ως μια συμπαγής ράβδος, αυτή η στάθμη ενέργειας δίνεται από τη σχέση

$$E_{des}^j = \frac{1}{2}(M + m_l) \cdot \dot{x}_{des}^2 + M \cdot g \cdot h_{des} + m_l \cdot g \cdot (h_{des} - 0.5 \cdot L \cdot \cos \gamma_{id}^j) \quad (4-11)$$

Επίσης, η ενέργεια του συστήματος με την περιγραφή του σύνθετου μοντέλου, σύμφωνα με το Σχ. 3-1, κατά την απογείωση στο διασκελισμό $j-1$ είναι

$$E_{lo}^{j-1} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left[(\dot{x}_{lo}^{j-1})^2 + (\dot{y}_{lo}^{j-1})^2 \right] + \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left[(\dot{x}_{ft,lo}^{j-1})^2 + (\dot{y}_{ft,lo}^{j-1})^2 \right] + M \cdot g \cdot y_{lo}^{j-1} + m \cdot g \cdot y_{ft,lo}^{j-1} + \frac{1}{2} \cdot k \cdot (L - l_{lo}^{j-1})^2 \quad (4-12)$$

ενώ με την περιγραφή του λεπτομερούς μοντέλου, σύμφωνα με το Σχ. 3-2, είναι

$$E_{lo}^{j-1} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left[(\dot{x}_{lo}^{j-1})^2 + (\dot{y}_{lo}^{j-1})^2 \right] + \frac{1}{2} \cdot m_l \cdot \left[(\dot{x}_{l,lo}^{j-1})^2 + (\dot{y}_{l,lo}^{j-1})^2 \right] + \frac{1}{2} \cdot I_l \cdot (\dot{\gamma}_{lo}^{j-1})^2 + M \cdot g \cdot y_{lo}^{j-1} + m_l \cdot g \cdot y_{l,lo}^{j-1} + \frac{1}{2} \cdot k \cdot (L - l_{lo}^{j-1})^2 \quad (4-13)$$

Η ενέργεια που πρέπει να προσδώσει ο μοναδικός επενεργητής στην περιστροφική άρθρωση του ρομπότ κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους στο διασκελισμό j πρέπει να αναπληρώνει τις απώλειες και να διατηρεί την κίνηση. Συνεπώς, αυτή η ενέργεια για κάθε ένα από τα δύο δυναμικά μοντέλα (σύνθετο και λεπτομερές) είναι ίση με

$$E_m^j = (E_{des}^j - E_{lo}^{j-1}) + E_{gdis}^{j-1} + E_{damp}^{j-1} \quad (4-14)$$

Κάνοντας την υπόθεση ότι το εύρος μεταβολής της γωνίας γ κατά τη φάση εδάφους του διασκελισμού j θα είναι ίδιο με αυτό του διασκελισμού $j-1$, μπορούμε να βρούμε τη σταθερή ροπή τ_s^j ως

$$E_m^j = \tau_s^{j-1} \cdot (\gamma_{lo}^{j-1} - \gamma_{id}^{j-1}) \Rightarrow \tau_s^{j-1} = \frac{E_m^j}{(\gamma_{lo}^{j-1} - \gamma_{id}^{j-1})} \quad (4-15)$$

Αν δεν υπάρχουν ενεργειακές απώλειες (λόγω εδάφους ή λόγω τριβών), οι Εξ. (4-14) και (4-15) δείχνουν ότι καθώς το σύστημα επιτυγχάνει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της κίνησης ώστε $E_{des}^j = E_{lo}^{j-1}$, η κίνηση εξελίσσεται σε μια τέλεια ταλάντωση με αποτέλεσμα $\tau_s^j = 0$, που αντιστοιχεί σε παθητική κίνηση του ρομπότ.

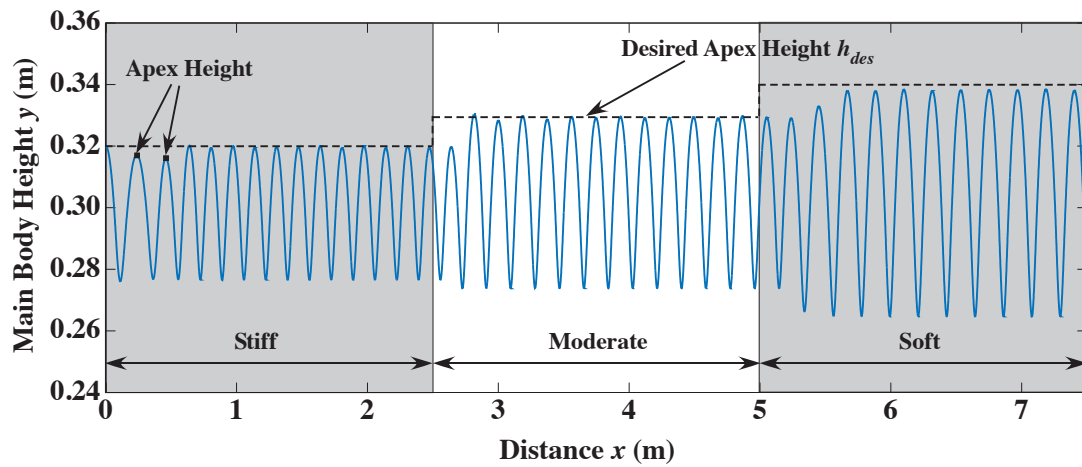
Στο Σχ. 4-1 παρουσιάζεται η απόκριση του σύνθετου μοντέλου σε τρεις διαδοχικές κατηγορίες εδαφών, με βάση τον Πίνακα 3-2, χρησιμοποιώντας τον x-MP-I. Οι παράμετροι της προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 4-1. Η προσομοίωση

πραγματοποιήθηκε στο MATLAB, χρησιμοποιώντας τον επιλύτη (solver) ode23s με απόλυτη και σχετική ακρίβεια 10^{-2} , καθώς και με μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης 10^{-5} , όπως ακριβώς και στο Κεφάλαιο 3. Τέλος, αναφέρεται ότι για την καλύτερη αναπαράσταση της συμπεριφοράς του επενεργητή, γίνεται η θεώρηση ότι ο επενεργητής του ρομπότ μπορεί να προσφέρει περιορισμένη ροπή προς τη θετική ή την αρνητική κατεύθυνση (συγκεκριμένα $4Nm$) πριν επέλθει κορεσμός. Αυτή η θεώρηση θα εφαρμοστεί σε όλο το εύρος του κεφαλαίου.

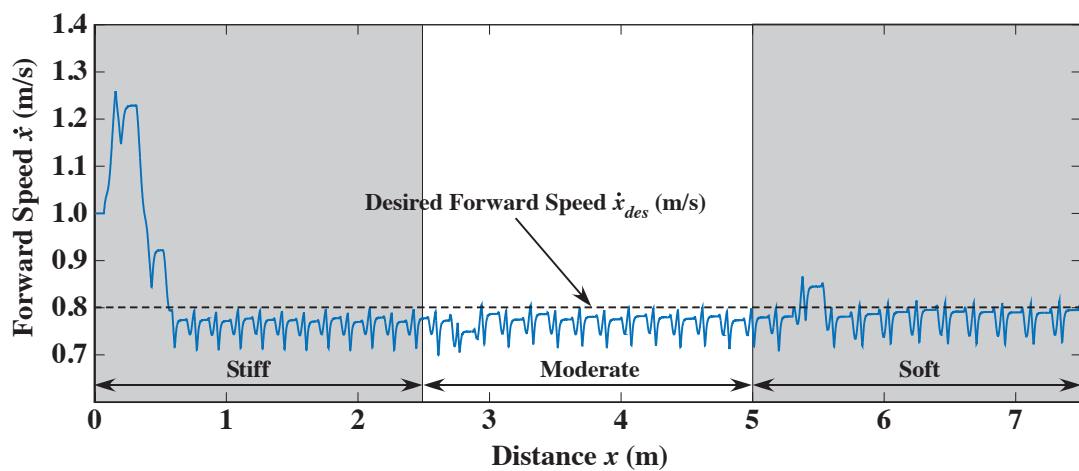
Πίνακας 4-1: Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή x-MP-I σε έδαφος με υποχωρητικότητα και χωρίς μόνιμη παραμόρφωση.

Ποσότητα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Μάζα σώματος ρομπότ	M	4.0	kg
Ισοδύναμη μάζα ποδιού και πέλματος	m	0.1	kg
Ελεύθερο μήκος ποδιού	L	0.30	m
Σταθερά ελατηρίου	k	12000	N/m
Ιξώδης τριβή πρισματικής άρθρωσης	b_l	3.0	Ns/m
Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9.81	m/s ²
Επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_{des}	0.8	m/s
Επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης	h_{des}	0.32 → 0.34	m
Αρχικό ύψος σώματος ρομπότ	h_0	0.32	m
Αρχική πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_0	1.0	m/s

Όπως γίνεται φανερό από το παρακάτω γράφημα, ο ελεγκτής x-MP-I καθιστά ικανό το ρομπότ (με βάση το σύνθετο μοντέλο) να διασχίζει κάθε κατηγορία εδάφους και μάλιστα να επιτυγχάνει τους επιθυμητούς στόχους πρόσθιας ταχύτητας και μέγιστου ύψους. Όπως φαίνεται, επίσης, το ρομπότ είναι ικανό να πετύχει πιο δύσκολους στόχους, ακόμα και αν η υποχωρητικότητα του εδάφους αυξάνεται. Το γεγονός ότι ο ελεγκτής x-MP δεν περιορίζεται απλά στη διαχείριση μιας παθητικής κίνησης αλλά μπορεί να διορθώνει τη συμπεριφορά του ρομπότ και να επιτυγχάνει άμεσα νέους στόχους ανάλογα με την περίπτωση είναι ένα σημαντικό στοιχείο, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ρομποτικά συστήματα με πόδια τα οποία διασχίζουν δύσκολα εδάφη.



(a)



(b)

Σχήμα 4-1: Απόκριση του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-I σε εδάφη χωρίς μόνιμη παραμόρφωση: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} .

Μέχρι στιγμής, έχει εξεταστεί η συμπεριφορά του σύνθετου μοντέλου σε εδάφη τα οποία εμφανίζουν μεν υποχωρητικότητα αλλά όχι μόνιμη παραμόρφωση ($\lambda = 1$). Για το λόγο αυτό, ακολουθεί μια δοκιμή του x-MP-I σε μια πολύπλοκη οριζόντια διαδρομή με ποικίλα εδάφη, των οποίων τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2.

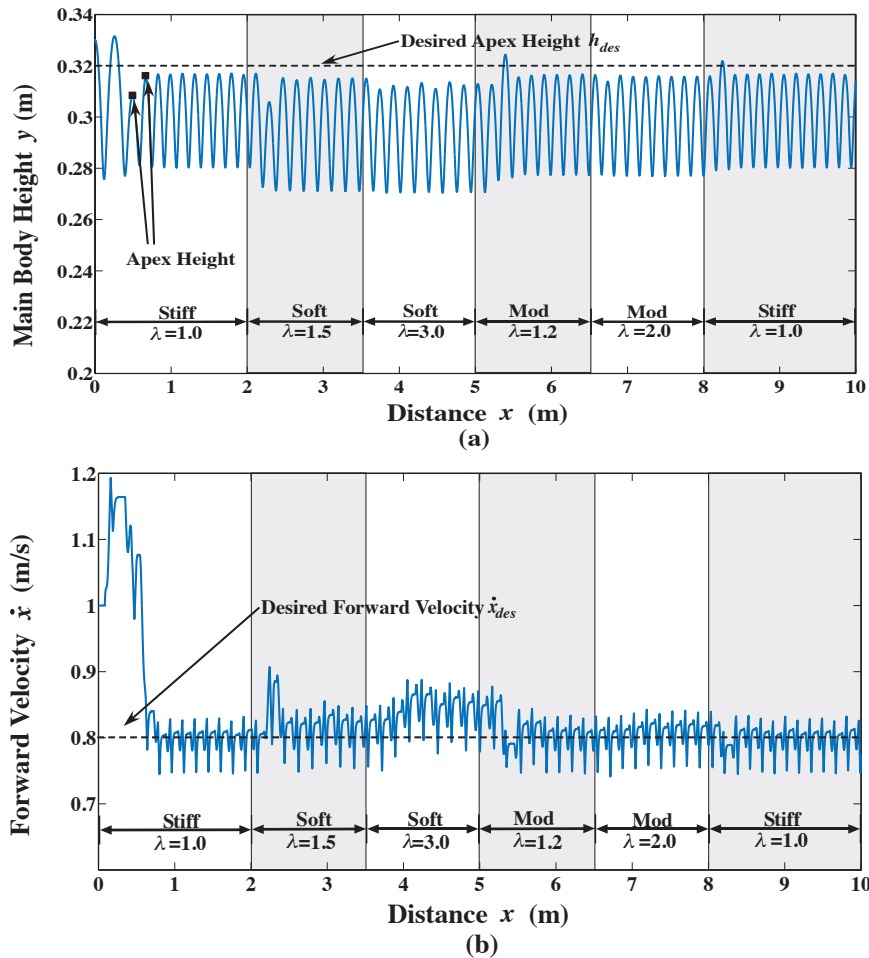
Πίνακας 4-2: Χαρακτηριστικά διαφόρων εδαφών με μόνιμη παραμόρφωση για δοκιμή του ελεγκτή x-MP-I.

Απόσταση (m)	Έδαφος	k_g (N/m)	c_a	μ_s	μ_c	a	β	max λ
0 – 2.0	Stiff	$4 \cdot 10^5$	0.2	0.7	0.6	0.0	0.0	1.0
2.0 – 3.5	Soft	$8 \cdot 10^4$	0.2	0.5	0.4	0.5	1.0	1.5
3.5 – 5.0	Soft	$8 \cdot 10^4$	0.2	0.5	0.4	2.0	1.0	3.0
5.0 – 6.5	Moderate	$2 \cdot 10^5$	0.2	0.6	0.5	0.2	1.0	1.2
6.5 – 8.0	Moderate	$2 \cdot 10^5$	0.2	0.6	0.5	1.0	1.0	2.0
8.0 – 10.0	Stiff	$4 \cdot 10^5$	0.2	0.7	0.6	0.0	0.0	1.0

Οι παράμετροι της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο MATLAB, χρησιμοποιώντας τον επιλύτη (solver) ode23s με απόλυτη και σχετική ακρίβεια 10^{-2} , καθώς και με μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης 10^{-5} . Η δε απόκριση του ρομπότ φαίνεται στο Σχ. 4-2.

Πίνακας 4-3: Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή ελεγκτή x-MP-I σε έδαφος με υποχωρητικότητα και μόνιμη παραμόρφωση.

Ποσότητα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Μάζα σώματος ρομπότ	M	4.0	kg
Ισοδύναμη μάζα ποδιού και πέλματος	m	0.1	kg
Ελεύθερο μήκος ποδιού	L	0.30	m
Σταθερά ελατηρίου	k	12000	N/m
Ιξώδης τριβή πρισματικής άρθρωσης	b_l	3.0	Ns/m
Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9.81	m/s ²
Επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_{des}	0.8	m/s
Επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης	h_{des}	0.32	m
Αρχικό ύψος σώματος ρομπότ	h_0	0.33	m
Αρχική πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_0	1.0	m/s

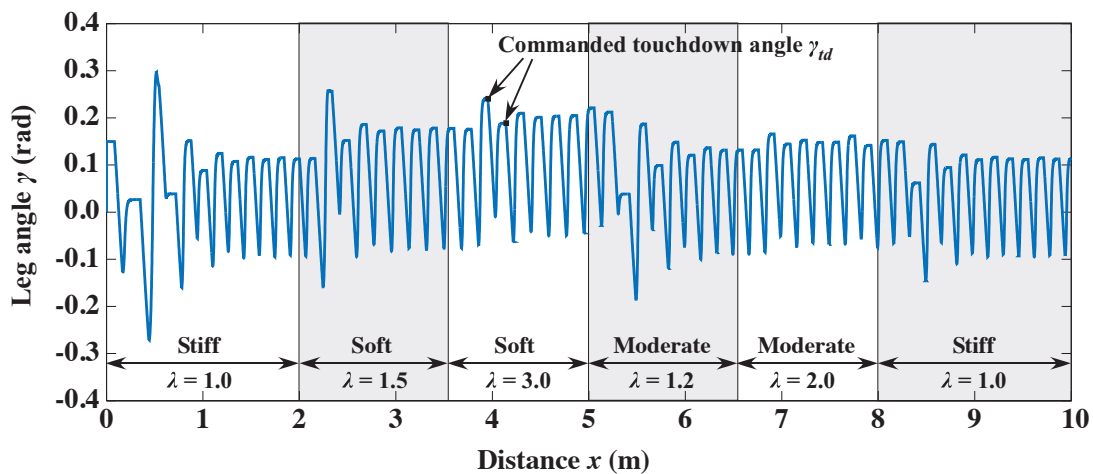


Σχήμα 4-2: Απόκριση του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-I σε εδάφη με μόνιμη παραμόρφωση: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} .

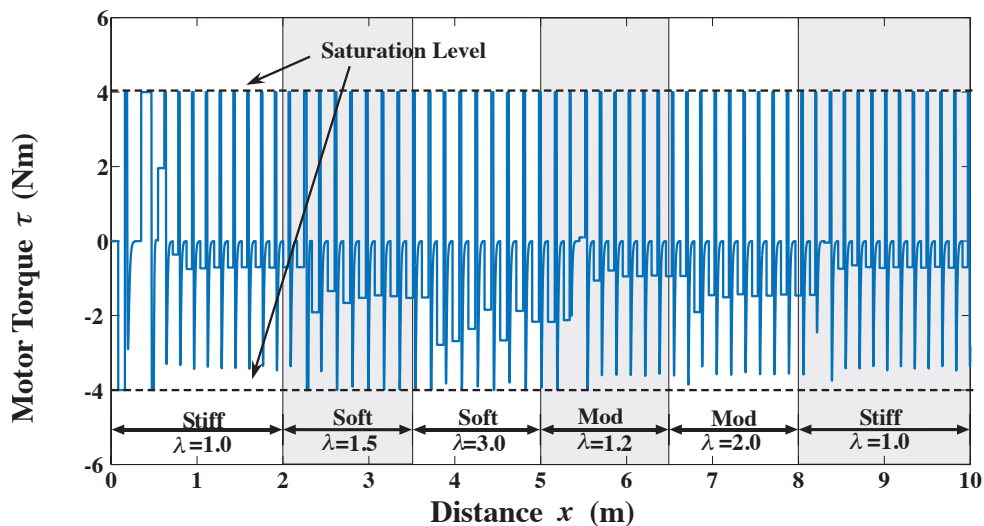
Με βάση το Σχ. 4-2, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι ο x-MP-I μπορεί να προσαρμόζεται μεταξύ διαφόρων εδαφών και οδηγεί το ρομπότ σε ευστάθεια, με χαρακτηριστικά κίνησης πολύ κοντά στα επιθυμητά. Παρά το γεγονός αυτό, βλέπουμε ότι η απόκριση αποκλίνει από την επιθυμητή όσο οι μόνιμες παραμορφώσεις στο έδαφος αυξάνονται. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο x-MP-I λαμβάνει υπόψη του μόνο την υποχωρητικότητα του εδάφους, ενώ δεν διαθέτει τρόπο αναπλήρωσης ενέργειας καθώς η παράμετρος λ αυξάνεται.

Στο Σχ. 4-3 φαίνεται η μεταβολή της γωνίας του ποδιού για την παραπάνω διαδρομή, ενώ στο Σχ. 4-4 φαίνεται η ροπή που ασκήθηκε από τον επενεργητή. Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, ο ελεγκτής x-MP-I τοποθετεί το πόδι σε μεγαλύτερες γωνίες κατά τη διάρκεια πτήσης καθώς η υποχωρητικότητα του εδάφους και οι μόνιμες

παραμορφώσεις αυξάνονται. Παράλληλα, οι ροπές που ασκούνται κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους αυξάνονται επίσης. Δηλαδή, ο επενεργητής αναγκάζεται να προσδώσει μεγαλύτερα ποσά ενέργειας για να διατηρήσει την κίνηση του μονόποδου ρομπότ. Αυτή η συμπεριφορά είναι απολύτως λογική αν αναλογιστούμε ανάλογα παραδείγματα από τη φύση. Ας υποθέσουμε, για παράδειγμα, ότι ένας άνθρωπος τρέχει αρχικά σε τσιμέντο και έχει ήδη επιτύχει μια συγκεκριμένη ταχύτητα. Αν το έδαφος αλλάξει ξαφνικά από τσιμέντο σε άμμο και είναι επιθυμητή η διατήρηση αυτής της μέσης ταχύτητας, αναγκαστικά ο άνθρωπος θα μεγαλώσει το βήμα διασκελισμού του δίνοντας παράλληλα μεγαλύτερη ώθηση στα πόδια του.



Σχήμα 4-3: Απόκριση γωνίας γ του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-I σε εδάφη με μόνιμη παραμόρφωση.



Σχήμα 4-4: Ροπή επενεργητή τ για το σύνθετο μοντέλο με χρήση του ελεγκτή x-MP-I σε εδάφη με μόνιμη παραμόρφωση.

Όπως είδαμε, ο ελεγκτής x-MP-I κατορθώνει να οδηγήσει το σύστημα σε steady state με επιθυμητές ιδιότητες κίνησης για διάφορα εδάφη με μικρή, μέτρια ή μεγάλη υποχωρητικότητα. Εκτός από αυτό, η λειτουργία του βασίζεται σε ενεργειακά μεγέθη, με αποτέλεσμα να είναι εύκολη η εναλλαγή και η χρήση του σε διαφορετικά μοντέλα περιγραφής του μονόποδου ρομπότ. Ωστόσο, παρουσιάζει κάποιες αποκλίσεις όταν αυξάνονται οι μόνιμες παραμορφώσεις του εδάφους, που αντιπροσωπεύονται από το συντελεστή λ . Για το λόγο αυτό, στην επόμενη παράγραφο θα παρουσιαστεί μια νέα βελτιωμένη εκδοχή του x-MP-I. Όπως θα δούμε, ο συγκεκριμένος νέος ελεγκτής είναι ικανός να διορθώνει την απόκριση του ρομπότ με βάση τις μόνιμες παραμορφώσεις του εδάφους, αλλά και να λαμβάνει υπόψη του φαινόμενα τριβής και επαναπηδήσεων που έχουν αγνοηθεί μέχρι το σημείο αυτό.

4.3 Extended MultiPart Controller II (x-MP-II)

Ο ελεγκτής x-MP-I υπολογίζει τις ισοδύναμες παραμέτρους M' , k' και b'_l τις οποίες εισάγει απευθείας στον ελεγκτή MP για τον υπολογισμό της επιθυμητής γωνίας πρόσπτωσης γ_{id}^j . Η Εξ. (2-21) (με τις αντικαταστάσεις των μεγεθών m_b , k και b_l από τα αντίστοιχα ισοδύναμα μεγέθη) ολοκληρώνεται δύο φορές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της γ_{id}^j όπως έχει παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία [26]. Με τον τρόπο αυτό, ωστόσο, η απόκριση του ρομπότ εμφανίζει κάποιες μικρές αποκλίσεις από τα επιθυμητά μεγέθη, όταν οι μόνιμες παραμορφώσεις του εδάφους αυξάνονται. Για το λόγο αυτό, απαιτείται μια διαφορετική διαχείριση των εξισώσεων για την ολοκλήρωση.

Συγκεκριμένα, ο ελεγκτής x-MP-II (Extended MultiPart Controller II) χρησιμοποιεί και πάλι την Εξ. (4-3), με ίδιον ακριβώς τρόπο, για τον υπολογισμό της ισοδύναμης παραμέτρου k' . Όμως, στον υπολογισμό της παραμέτρου b'_l ακολουθείται μια διαφορετική προσέγγιση για την εκτίμηση των ενεργειακών απωλειών λόγω τριβών και λόγω εδάφους. Αρχικά, λαμβάνονται υπόψη οι ιξώδεις τριβές που πραγματοποιήθηκαν μόνο κατά τη φάση εδάφους του διασκελισμού $j-1$. Οι ιξώδεις τριβές κατά τη φάση πτήσης θα ληφθούν αργότερα υπόψη στον υπολογισμό της επιθυμητής ροπής τ_s^j . Έτσι, συμβολίζοντας με s τη φάση εδάφους (stance phase) και με f τη φάση πτήσης (flight phase), βρίσκουμε για το σύνθετο μοντέλο

$$E_{damp,s}^{j-1} = b_l \cdot \int_{t_{id}^{j-1}}^{t_{lo}^{j-1}} (\dot{l}^{j-1}) dt \quad (4-16)$$

ενώ, αντίστοιχα, για το λεπτομερές μοντέλο

$$E_{damp,s}^{j-1} = b_l \cdot \int_{t_{id}^{j-1}}^{t_{lo}^{j-1}} (\dot{l}^{j-1})^2 dt + b_h \cdot \int_{t_{id}^{j-1}}^{t_{lo}^{j-1}} (\dot{\gamma}^{j-1})^2 dt \quad (4-17)$$

Πέρα από αυτό, στις ενεργειακές απώλειες λόγω της αλληλεπίδρασης με το έδαφος προστίθενται και οι απώλειες λόγω τριβής (τριβής Coulomb), ώστε τελικά

$$E_{gdis}^{j-1} = \left| \int_{t_{id}^{j-1}}^{t_{lo}^{j-1}} F_t^{j-1} \cdot \dot{x}_{ft}^{j-1} dt \right| + \left| \int_{t_{id}^{j-1}}^{t_{lo}^{j-1}} F_g^{j-1} \cdot \dot{y}_{ft}^{j-1} dt \right| \quad (4-18)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, η Εξ. (4-6) μετασχηματίζεται ώστε να ισχύει

$$b_l' \cdot \int_{t_{id}^{j-1}}^{t_{lo}^{j-1}} (\dot{l}_{nd}^{j-1}) dt = E_{gdis}^{j-1} + E_{damp,s}^{j-1} \quad (4-19)$$

όπου η θεωρητική εξέλιξη του μήκους του ελατηρίου για άκαμπτο έδαφος $l_{nd}(t)$ δίνεται και πάλι από την Εξ. (4-5). Με τον τρόπο αυτό, παίρνουμε τα ισοδύναμα μεγέθη M' , k' και b_l' (ισχύει πάντα $M' = M$). Με βάση τα όσα έχουν ήδη αναφερθεί, η Εξ. (2-21) για τη φάση εδάφους του διασκελισμού j γίνεται

$$M' \cdot \ddot{y}^j + b_l' \cdot \dot{y}^j + k' \cdot y^j = k' \cdot L \cdot \cos\left(\gamma_{id}^j - \frac{\dot{x}_{des} \cdot t}{L}\right) - M' \cdot g \quad (4-20)$$

όπου $0 \leq t \leq \Delta t_s^{j-1}$ ($t=0$ στην προσγείωση) κάνοντας την προσέγγιση ότι η φάση εδάφους του διασκελισμού j θα έχει ίδια διάρκεια με αυτήν του διασκελισμού $j-1$. Η Εξ. (4-20) είναι μια διαφορική εξίσωση 2^{ης} τάξης και μπορεί να λυθεί με τις ακόλουθες οριακές συνθήκες

$$y^j(0) = y_{id,est}^j = L \cdot \cos \gamma_{id}^j \quad (4-21)$$

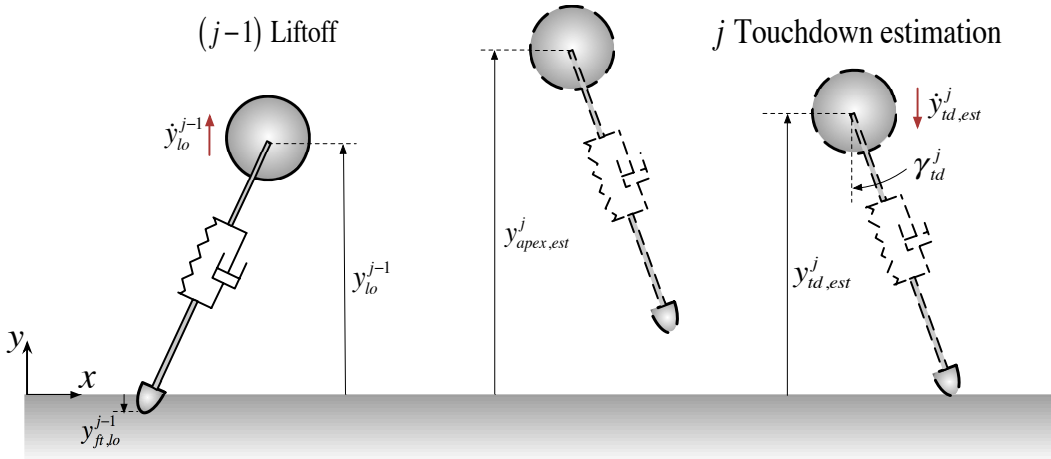
$$\dot{y}^j(0) = \dot{y}_{id,est}^j \quad (4-22)$$

όπου με $y_{id,est}^j$ και $\dot{y}_{id,est}^j$ συμβολίζεται το εκτιμώμενο ύψος σώματος και η εκτιμώμενη κατακόρυφη ταχύτητα σώματος κατά την προσγείωση για το διασκελισμό j . Υποθέτοντας βαλλιστική κίνηση του σώματος κατά τη φάση πτήσης του διασκελισμού j η εκτιμώμενη ταχύτητα $\dot{y}_{id,est}^j$ μπορεί να βρεθεί με χρήση του εκτιμώμενου μέγιστου ύψους αναπήδησης $y_{apex,est}^j$ για το διασκελισμό j , το οποίο μπορεί να βρεθεί από την κατακόρυφη ταχύτητα απογείωσης \dot{y}_{lo}^{j-1} και το κατακόρυφο ύψος y_{lo}^{j-1} κατά την απογείωση στο διασκελισμό $j-1$. Δηλαδή, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις

$$\dot{y}_{id,est}^j = -\sqrt{2 \cdot g \cdot (y_{apex,est}^j - y_{id,est}^j)} \quad (4-23)$$

$$y_{apex,est}^j = y_{lo}^{j-1} + \frac{(\dot{y}_{lo}^{j-1})^2}{2 \cdot g} \quad (4-24)$$

Τα παραπάνω μεγέθη παρουσιάζονται και στο Σχ. 4-5, όπου απεικονίζεται η κατάσταση του ρομπότ κατά την απογείωση στο διασκελισμό $j-1$ και η εκτιμώμενη εξέλιξη της κίνησης του ρομπότ μέχρι την προσγείωση στο διασκελισμό j . Όπως έχει ήδη τονιστεί, ο ελεγκτής καλείται αμέσως μετά την απογείωση στο διασκελισμό $j-1$.



Σχήμα 4-5: Εκτιμώμενη εξέλιξη της κίνησης του ρομπότ από την απογείωση στο διασκελισμό $j-1$ μέχρι την προσγείωση στο διασκελισμό j .

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η Εξ. (4-20) μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά και να δώσει την ακόλουθη λύση

$$y^j(t) = y_h^j(t) + y_p^j(t) \quad (4-25)$$

όπου

$$y_h^j(t) = c_1 \cdot e^{a_1 t} \cdot \cos(a_2 \cdot t) + c_2 \cdot e^{a_1 t} \cdot \sin(a_2 \cdot t) \quad (4-26)$$

$$y_p^j(t) = A \cdot \cos\left(\gamma_{td}^j - \frac{\dot{x}_{des} \cdot t}{L}\right) + B \cdot \sin\left(\gamma_{td}^j - \frac{\dot{x}_{des} \cdot t}{L}\right) - \frac{M' \cdot g}{k'} \quad (4-27)$$

και οι σταθερές a_1 , a_2 , c_1 , c_2 , A , B παρατίθενται στο Παράρτημα Α.1.

Θεωρώντας ότι το βάθος διείσδυσης στο τέλος της φάσης εδάφους του διασκελισμού j θα είναι ίδιο με αυτό στο τέλος της φάσης εδάφους του διασκελισμού $j-1$, το ύψος του σώματος $y_{lo,est}^j$ στο τέλος της φάσης εδάφους του διασκελισμού j μπορεί να προσεγγιστεί, με βάση και την Εξ. (2-20), σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

$$y_{lo,est}^j = y_{fi,lo}^{j-1} + L \cdot \cos\left(\gamma_{td}^j - \frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) \quad (4-28)$$

Επομένως, προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης h_{des} , η επιθυμητή κατακόρυφη ταχύτητα $\dot{y}_{lo,des}^j$ του σώματος στο τέλος της φάσης εδάφους του διασκελισμού j θα δίνεται από τη σχέση

$$\dot{y}_{lo,des}^j = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{des} - y_{lo,est}^j)} \quad (4-29)$$

σύμφωνα με την υπόθεση της βαλλιστικής κίνησης. Με τον τρόπο αυτό, προκειμένου να βρεθεί η γωνία γ_{td}^j που θα δώσει την παραπάνω κατακόρυφη ταχύτητα σώματος στο τέλος της φάσης εδάφους, θα πρέπει να λυθεί η παρακάτω εξίσωση

$$\dot{y}^j \left(\Delta t_s^{j-1} \right) = \dot{y}_{lo,des}^j \quad (4-30)$$

Χρησιμοποιώντας τα αναπτύγματα κατά Taylor των μεγεθών $\dot{y}_{td,est}^j$ και $\dot{y}_{lo,des}^j$, μπορεί να βρεθεί τελικά ότι

$$\gamma_{td}^j = \theta + \cos^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) \quad (4-31)$$

με τις παραμέτρους θ , r και R να δίνονται επίσης στο Παράρτημα Α.1.

Ύστερα από τον υπολογισμό της επιθυμητής γωνίας γ_{td}^j , ακολουθεί ο υπολογισμός της σταθερής ροπής τ_s^j που θα ασκηθεί κατά την επόμενη φάση εδάφους. Εδώ χρησιμοποιείται αντίστοιχη ενεργειακή προσέγγιση, όπως και με την περίπτωση του x-MP-I. Όμως, προκειμένου ο υπολογισμός της ροπής να ανεξαρτητοποιηθεί από τον υπολογισμό της επιθυμητής γωνίας πρόσπτωσης και να απλοποιηθεί ο όλος αλγόριθμος, εκτελούνται οι παρακάτω ενέργειες

- i. Το μέγεθος h_{des} στις Εξ. (4-10) και (4-11) αντικαθίσταται από το εκτιμώμενο μέγιστο ύψος αναπήδησης $y_{apex,est}^j$ με βάση την Εξ. (4-24).
- ii. Η συνεισφορά των μαζών m (για το σύνθετο μοντέλο) ή m_l (για το λεπτομερές μοντέλο) στην κινητική και την δυναμική ενέργεια θεωρείται αμελητέα, μιας και οι μάζες αυτές είναι πολύ μικρές σε σχέση με την κύρια μάζα σώματος M .

Έτσι, η επιθυμητή στάθμη ενέργειας τόσο για το σύνθετο όσο και για το λεπτομερές μοντέλο υπολογίζεται πλέον από τη σχέση

$$E_{des}^j \approx \frac{1}{2} \cdot M \cdot \dot{x}_{des}^j{}^2 + M \cdot g \cdot y_{apex,est}^j \quad (4-32)$$

Ακόμη, λόγω των ίδιων απλοποιήσεων, η ενέργεια του συστήματος κατά την απογείωση για το σύνθετο μοντέλο προσεγγίζεται από τη σχέση

$$E_{lo}^{j-1} \approx \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left[\left(\dot{x}_{lo}^{j-1} \right)^2 + \left(\dot{y}_{lo}^{j-1} \right)^2 \right] + M \cdot g \cdot y_{lo}^{j-1} + \frac{1}{2} \cdot k \cdot \left(L - l_{lo}^{j-1} \right)^2 \quad (4-33)$$

Αντίστοιχα, για το λεπτομερές μοντέλο

$$E_{lo}^{j-1} \approx \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left[\left(\dot{x}_{lo}^{j-1} \right)^2 + \left(\dot{y}_{lo}^{j-1} \right)^2 \right] + M \cdot g \cdot y_{lo}^{j-1} + \frac{1}{2} \cdot I_l \cdot \left(\dot{\gamma}_{lo}^{j-1} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot k \cdot \left(L - l_{lo}^{j-1} \right)^2 \quad (4-34)$$

Η ενέργεια που πρέπει να προσδώσει ο επενεργητής κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους του διασκελισμού j είναι $E_{m,s}$ και πρέπει να αναπληρώνει τις απώλειες ενέργειας και να συντηρεί την κίνηση. Για το λόγο αυτό, η ενέργεια $E_{m,s}$ υπολογίζεται από τη σχέση

$$E_{m,s}^j = \left(E_{des}^j - E_{lo}^{j-1} \right) + E_{dis}^{j-1} + E_{damp}^{j-1} - E_{m,f}^{j-1} \quad (4-35)$$

όπου οι συνολικές απώλειες λόγω τριβών για το διασκελισμό υπολογίζονται φυσικά και πάλι από την Εξ. (4-8) για το σύνθετο μοντέλο ή την Εξ. (4-9) για το λεπτομερές μοντέλο. Με $E_{m,f}$ συμβολίζεται η ενέργεια που αποδόθηκε από τον επενεργητή κατά τη διάρκεια της φάσης πτήσης του διασκελισμού $j-1$, για την τοποθέτηση του ποδιού στην επιθυμητή γωνία με τον ελεγκτή PD. Η συγκεκριμένη ενέργεια πρέπει, προφανώς, να αφαιρεθεί αφού και αυτή πρόσθεσε ενέργεια στο σύστημα και είναι ίση με

$$E_{m,f}^{j-1} = \int_{t_{lo}^{j-2}}^{t_{lo}^{j-1}} \tau^{j-1} \cdot \dot{\gamma}^{j-1} dt \quad (4-36)$$

Έτσι, τελικά, με όμοιο τρόπο με την Εξ. (4-15), υπολογίζουμε την ροπή τ_s^j ως

$$\tau_s^j = \frac{E_{m,s}^j}{\gamma_{lo}^{j-1} - \gamma_{td}^{j-1}} \quad (4-37)$$

Με όμοιο τρόπο με τον x-MP-I, αποδεικνύεται και στην περίπτωση του x-MP-II ότι, αν δεν υπάρχουν ενεργειακές απώλειες και καθώς το σύστημα επιτυγχάνει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της κίνησης ώστε $E_{des}^j = E_{lo}^{j-1}$, η κίνηση εξελίσσεται σε μια τέλεια ταλάντωση με αποτέλεσμα $\tau_s^j \approx 0$, που αντιστοιχεί σε παθητική κίνηση του ρομπότ.

Εκτός από τον υπολογισμό της γωνίας γ_{td}^j και της σταθερής ροπής τ_s^j , ο ελεγκτής x-MP-II αντιμετωπίζει και το πρόβλημα ολίσθησης του πέλματος που μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους. Όπως εξετάστηκε και στο Κεφάλαιο 3, η ολίσθηση συμβαίνει κυρίως στην αρχή της φάσης εδάφους και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την κίνηση του ρομπότ, αφού η γραμμική προσέγγιση της γωνίας κατά τη φάση εδάφους με την Εξ. (2-20) παύει να ισχύει. Το χρονικό διάστημα Δt_{slip}^{j-1} κατά το οποίο το πέλμα του ρομπότ γλιστρώσε στην αρχή της φάσης εδάφους του διασκελισμού $j-1$ μπορεί να βρεθεί εξετάζοντας το διάστημα όπου $\dot{x}_{ft,s}^{j-1} \neq 0$. Έτσι, δίνεται εντολή στον επενεργητή να ασκήσει μέγιστη αρνητική ροπή για χρονικό διάστημα

ίσο με Δt_{slip}^{j-1} στην αρχή της φάσης εδάφους του διασκελισμού j . Με τον τρόπο αυτό, η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του πέλματος (\dot{x}_{ft}) θα μηδενιστεί όσο το δυνατό πιο γρήγορα αμέσως μετά την προσγείωση και το πέλμα θα περάσει στην επιθυμητή περιοχή στατικής τριβής όπου δεν κινείται κατά την οριζόντια διεύθυνση.

Το τελευταίο πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο x-MP-II έχει να κάνει με τις επαναπηδησεις (rebounds) ειδικά σε πολύ σκληρό έδαφος. Σε μια τέτοια περίπτωση, αμέσως μετά από μια φάση πτήσης, η φάση εδάφους μπορεί να αποτελείται από πολλές μικρές κρούσεις, όπου το πέλμα θα χάνει και θα ξαναβρίσκει επαφή με το έδαφος μέχρι τελικά να σταθεροποιηθεί η κύρια φάση εδάφους. Ωστόσο, μιας και κάθε απώλεια επαφής με το έδαφος θα ανιχνεύεται ως κανονική φάση πτήσης από τον ελεγκτή, μπορεί να εμφανιστεί αστάθεια στην κίνηση. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, ο x-MP-II συγκρίνει τη διάρκεια της φάσης εδάφους Δt_s^{j-1} με το μισό της φυσικής περιόδου του συστήματος, που δίνεται από τη σχέση

$$T_n = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{M}{k}} \quad (4-38)$$

μιας και λόγω της επίδρασης του εδάφους και των λοιπών τριβών στο ρομπότ, το μέγεθος Δt_s^{j-1} σε μια φυσιολογική φάση εδάφους δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να είναι μικρότερο από $0.5T_n$. Έτσι, στην περίπτωση όπου $\Delta t_s^{j-1} \leq 0.5T_n$, ο ελεγκτής δεν υπολογίζει κανένα νέο μέγεθος και περιμένει να ολοκληρωθεί σωστά η φάση εδάφους για να προχωρήσει με τους υπολογισμούς. Τονίζεται δε ότι η πραγματική σταθερά του ελατηρίου k χρησιμοποιήθηκε αντί της εικονικής παραμέτρου k' , μιας και το κριτήριο που περιγράφηκε παραπάνω καλείται πριν τον υπολογισμό της σταθεράς k' για να καθορίσει αν ο ελεγκτής θα πρέπει να προχωρήσει ή όχι στις βασικές ενέργειές του.

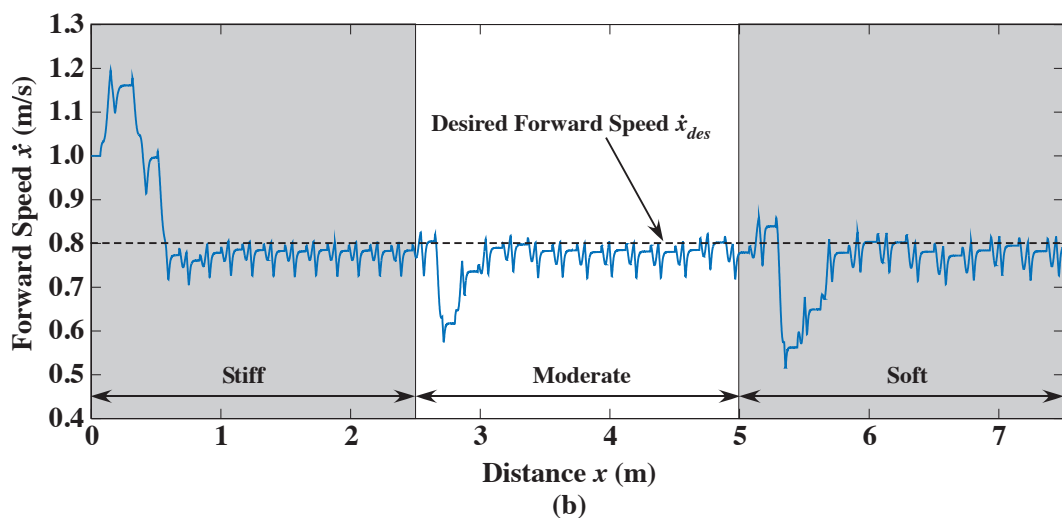
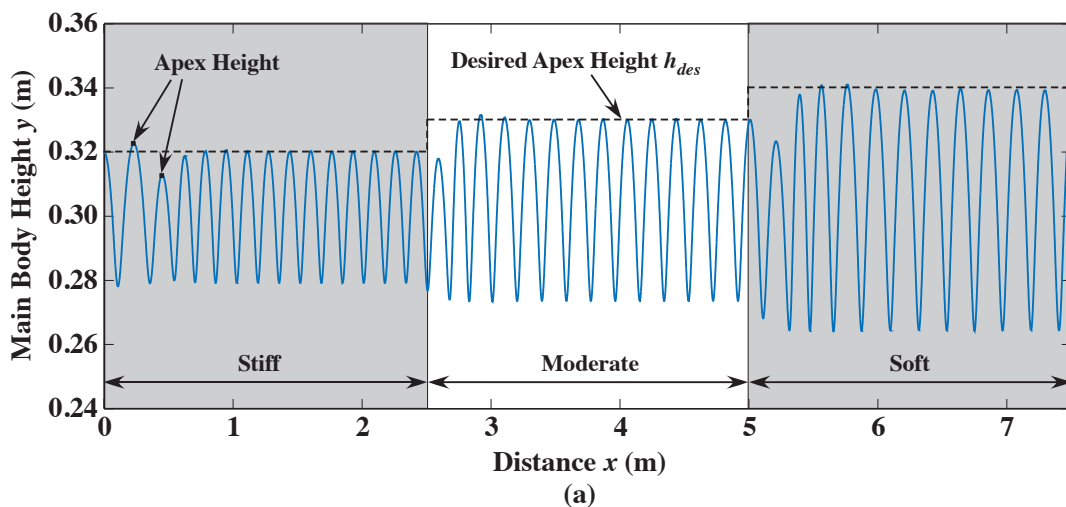
Συνοψίζοντας, οι ενέργειες του βελτιωμένου ελεγκτή x-MP-II παρουσιάζονται συγκεντρωμένες στον Πίνακα 4-4. Τονίζεται και πάλι ότι μιας και ο x-MP-II στηρίζεται σε ενεργειακά μεγέθη, η δράση του μπορεί να επεκταθεί σε οποιοδήποτε δυναμικό μοντέλο μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή. Στον Πίνακα 4-4, τονίζονται με κόκκινο χρώμα οι διαφορές στους ενεργειακούς υπολογισμούς ανάμεσα στα δύο μοντέλα. Στην Παράγραφο 4-6 αναλύεται εκτενώς ο τρόπος εφαρμογής του ελεγκτή x-MP σε μια πραγματική πειραματική διάταξη, καθώς και οι αισθητήρες και οι μετρήσεις που αυτός χρειάζεται.

Πίνακας 4-4: Σύντομη περιγραφή αλγορίθμου ελεγκτή x-MP-II.

Σύνθετο μοντέλο	Λεπτομερές μοντέλο
<p><AFTER LIFTOFF Calculate Δt_s^{j-1} > <If $\Delta t_s^{j-1} \leq 0.5T_n$ > <Use former values and exit> <Elseif $\Delta t_s^{j-1} > 0.5T_n$ > <Calculate Δl_{max}^{j-1} > Εξ. (4-4) <Calculate $E_{damp,s}^{j-1}$ > Εξ. (4-16) <Calculate E_{gdis}^{j-1} > Εξ. (4-18) <Calculate k', b_l' > Εξ. (4-3) και (4-19) <Determine γ_{id}^j > Εξ. (4-31) – Παρ. Α.1 <Calculate E_{des}^j > Εξ. (4-32) <Calculate E_{lo}^{j-1} > Εξ. (4-33) <Calculate $E_{m,f}^{j-1}$ > Εξ. (4-36) <Calculate E_{damp}^{j-1} > Εξ. (4-8) <Determine τ_s^j > Εξ. (4-37) <Determine time interval Δt_{slip}^{j-1} > <End></p>	<p><AFTER LIFTOFF Calculate Δt_s^{j-1} > <If $\Delta t_s^{j-1} \leq 0.5T_n$ > <Use former values and exit> <Elseif $\Delta t_s^{j-1} > 0.5T_n$ > <Calculate Δl_{max}^{j-1} > Εξ. (4-4) <Calculate $E_{damp,s}^{j-1}$ > Εξ. (4-17) <Calculate E_{gdis}^{j-1} > Εξ. (4-18) <Calculate k', b_l' > Εξ. (4-3) και (4-19) <Determine γ_{id}^j > Εξ. (4-31) – Παρ. Α.1 <Calculate E_{des}^j > Εξ. (4-32) <Calculate E_{lo}^{j-1} > Εξ. (4-34) <Calculate $E_{m,f}^{j-1}$ > Εξ. (4-36) <Calculate E_{damp}^{j-1} > Εξ. (4-9) <Determine τ_s^j > Εξ. (4-37) <Determine time interval Δt_{slip}^{j-1} > <End></p>

Στη συνέχεια, παρατίθενται αποτελέσματα προσομοιώσεων για το σύνθετο και το λεπτομερές μοντέλο, ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του x-MP-II. Σε πρώτη φάση, στο Σχ. 4-6 παρουσιάζεται η απόκριση του σύνθετου μοντέλου σε τρεις κατηγορίες εδαφών που δεν παρουσιάζουν μόνιμη παραμόρφωση, με βάση τον Πίνακα 3-2, χρησιμοποιώντας τον x-MP-II. Οι παράμετροι της προσομοίωσης δίνονται και πάλι από τον Πίνακα 4-1. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο MATLAB, χρησιμοποιώντας τον επιλύτη (solver) ode23s με απόλυτη και σχετική ακρίβεια 10^{-2} , καθώς και με μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης 10^{-5} .

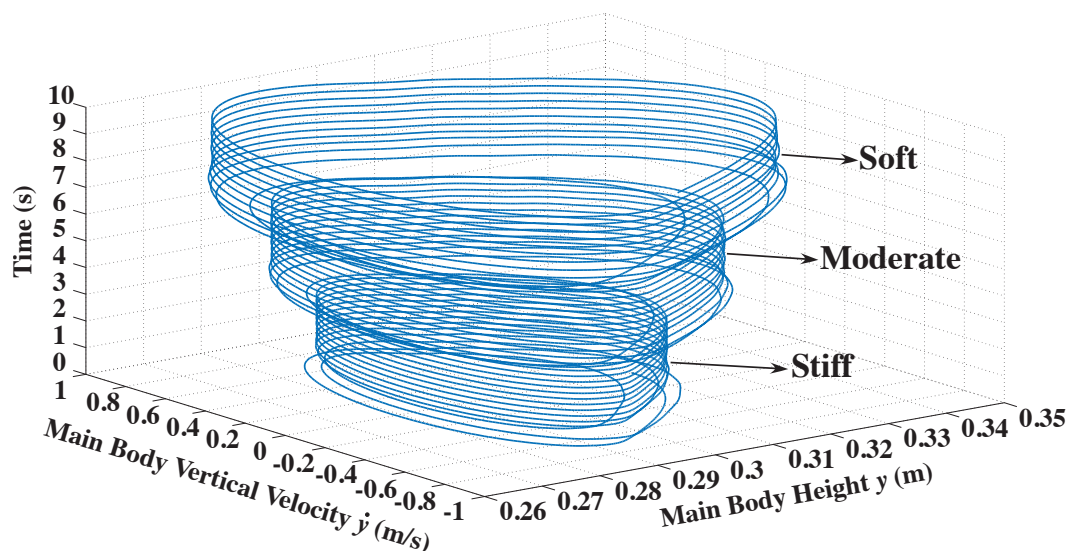
Από το Σχ. 4-6 παρατηρείται ότι ο ελεγκτής x-MP-II επιτυγχάνει τους στόχους που είχαν αρχικά τεθεί και μάλιστα με εξαιρετική ακρίβεια. Ίσως το μόνο του μειονέκτημα έναντι του x-MP-I είναι η μεγαλύτερη μεταβατική φάση που εμφανίζεται κατά τη μετάβαση από μια κατηγορία εδάφους σε μια άλλη, ωστόσο το διάστημα αυτό της μεταβατικής φάσης είναι πολύ μικρό.



Σχήμα 4-6: Απόκριση του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-II σε εδάφη χωρίς μόνιμη παραμόρφωση: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} .

Το γεγονός ότι ο x-MP-II οδηγεί το σύστημα σε απόλυτη ευστάθεια μπορεί να φανεί και από το **διάγραμμα φάσεων** $y - \dot{y}$. Το διάγραμμα φάσεων χρησιμοποιείται για να ελέγξουμε αν η ταλαντωτική συμπεριφορά ενός συστήματος είναι πράγματι ευσταθής. Για το λόγο αυτό, το διάγραμμα φάσεων είναι μια γραφική απεικόνιση της θέσης και της ταχύτητας του συστήματος. Καθώς η θέση με την ταχύτητα εναλλάσσονται και η δυναμική ενέργεια λόγω θέσης μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και αντίστροφα, το διάγραμμα φάσεων σχηματίζει τελικά μια κλειστή καμπύλη στο επίπεδο εφόσον ο ταλαντωτής είναι ευσταθής. Αντίστοιχα, μπορούμε να προσθέσουμε και έναν τρίτο άξονα χρόνου, ώστε να φαίνεται ξεκάθαρα η πορεία του συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση,

εφόσον το σύστημα είναι ευσταθές, σχηματίζεται μια σπειροειδής καμπύλη η οποία περικλείεται από έναν κύλινδρο σταθερής ακτίνας. Ένα τέτοιο παράδειγμα διαγράμματος φάσεων παρουσιάζεται στο Σχ. 4-7, το οποίο δείχνει την τελική ευστάθεια του συστήματος σε κάθε μια από τις τρεις κατηγορίες εδαφών.



Σχήμα 4-7: Διάγραμμα φάσεων $y - \dot{y} - t$ του σύνθετου μοντέλου κατά τη διαδρομή του σε εδάφη χωρίς μόνιμη παραμόρφωση.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η συμπεριφορά τόσο του σύνθετου όσο και του λεπτομερούς μοντέλου σε μια πολύπλοκη διαδρομή που περιλαμβάνει εδάφη που παρουσιάζουν σημαντική μόνιμη παραμόρφωση στο τέλος κάθε κρούσης. Παράλληλα, οι απαιτήσεις και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά μεταβάλλονται από έδαφος σε έδαφος. Τα χαρακτηριστικά αυτής της πολύπλοκης διαδρομής καταγράφονται στον Πίνακα 4-5.

Πίνακας 4-5: Χαρακτηριστικά διαφόρων εδαφών με μόνιμη παραμόρφωση για δοκιμή του ελεγκτή x-MP-II.

Απόσταση (m)	Έδαφος	k_g (N/m)	c_a	μ_s	μ_c	a	β	max λ
0 – 2.0	Stiff	$4 \cdot 10^5$	0.2	0.7	0.6	0.0	0.0	1.0
2.0 – 4.0	Soft	$8 \cdot 10^4$	0.2	0.5	0.4	0.5	1.0	1.5
4.0 – 6.0	Soft	$8 \cdot 10^4$	0.2	0.5	0.4	1.5	1.0	2.5
6.0 – 8.0	Moderate	$2 \cdot 10^5$	0.2	0.6	0.5	0.2	1.0	1.2
8.0 – 10.0	Moderate	$2 \cdot 10^5$	0.2	0.6	0.5	1.0	1.0	2.0
10.0 – 12.0	Stiff	$4 \cdot 10^5$	0.2	0.7	0.6	0.0	0.0	1.0

Οι παράμετροι της προσομοίωσης για το σύνθετο μοντέλο παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-6, ενώ για το λεπτομερές μοντέλο στον Πίνακα 4-7. Σημειώνεται ότι η μάζα m του σύνθετου μοντέλου επιλέχθηκε έτσι ώστε η αδράνεια του ποδιού στο σύνθετο μοντέλο να είναι παραπλήσια με τη συνολική αδράνεια ποδιού του λεπτομερούς μοντέλου, όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 3.1. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο MATLAB, χρησιμοποιώντας τον επιλύτη (solver) ode23s με απόλυτη και σχετική ακρίβεια 10^{-2} , καθώς και με μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης 10^{-5} . Η δε απόκριση των δύο μοντέλων φαίνεται στο Σχ. 4-8.

Από το Σχ. 4-8, βλέπουμε ότι η απόκριση των δύο μοντέλων είναι πολύ κοντά. Σχετικά με το λεπτομερές μοντέλο, παρατηρείται ότι εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερο μέγιστο ύψος αναπήδησης και μια ελαφρά καθυστέρηση στην επίτευξη της επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας σε σχέση με το σύνθετο μοντέλο. Κάτι τέτοιο είναι απόλυτα λογικό, λόγω της λεπτομερούς περιγραφής της αδράνειας του ποδιού αλλά και της προσθήκης τριβών στην περιστροφική άρθρωση του ρομπότ. Συνεπώς, η χρήση του σύνθετου μοντέλου για τις προσομοιώσεις κίνησης του μονόποδου ρομπότ δικαιολογείται έναντι της χρήσης του λεπτομερούς μοντέλου, καθώς το λεπτομερές μοντέλο αυξάνει σημαντικά το χρόνο προσομοίωσης, παρόλο που η συμπεριφορά του μοιάζει αρκετά με αυτή του σύνθετου μοντέλου με κατάλληλη επιλογή παραμέτρων.

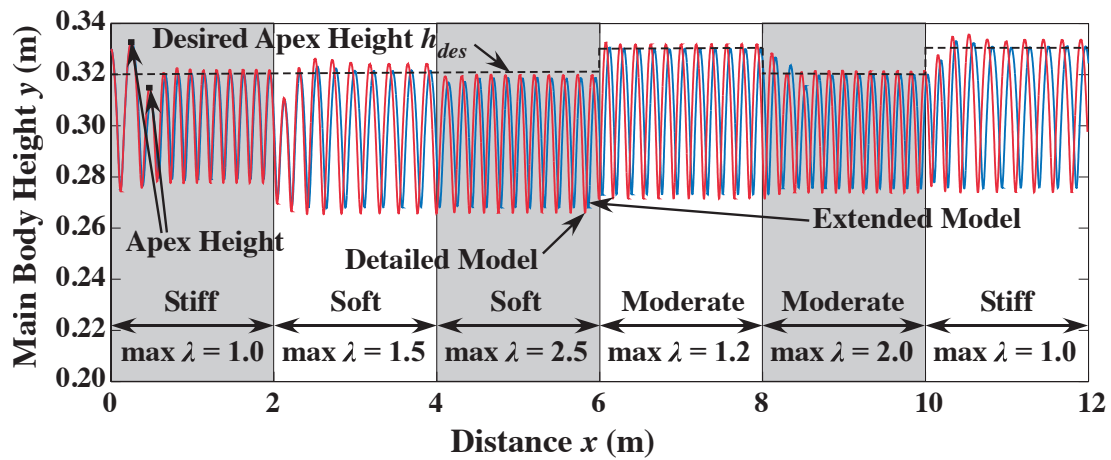
Πίνακας 4-6: Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή ελεγκτή x-MP-II σε έδαφος με υποχωρητικότητα και με μόνιμη παραμόρφωση.

Ποσότητα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Μάζα σώματος ρομπότ	M	4.0	kg
Ισοδύναμη μάζα ποδιού και πέλματος	m	0.16	kg
Ελεύθερο μήκος ποδιού	L	0.30	m
Σταθερά ελατηρίου	k	12000	N/m
Ιξώδης τριβή πρισματικής άρθρωσης	b_l	3.0	Ns/m
Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9.81	m/s ²
Επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_{des}	0.8 → 1.0	m/s
Επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης	h_{des}	0.32 → 0.33	m
Αρχικό ύψος σώματος ρομπότ	h_0	0.33	m
Αρχική πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_0	1.0	m/s

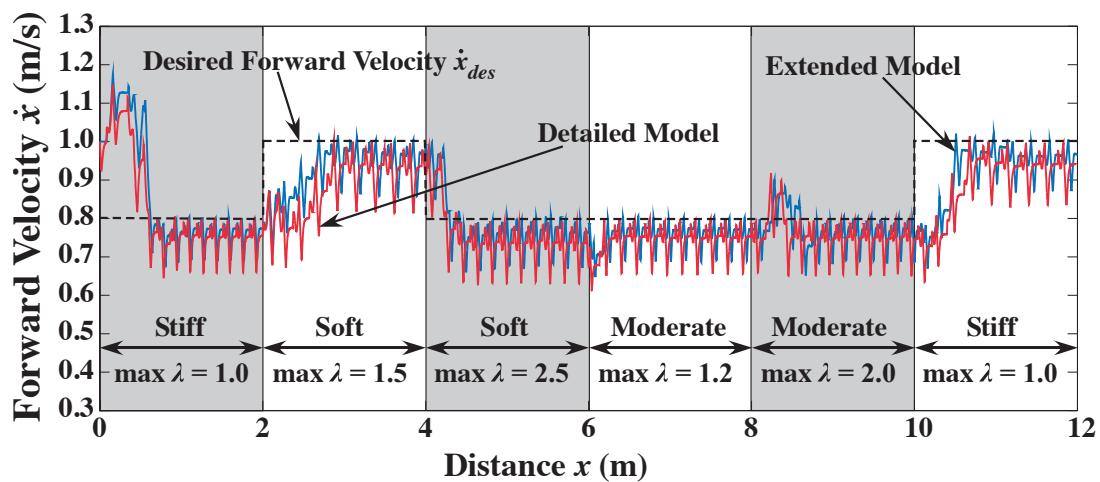
Πίνακας 4-7: Παράμετροι προσομοίωσης λεπτομερούς μοντέλου για δοκιμή ελεγκτή x-MP-II σε έδαφος με υποχωρητικότητα και με μόνιμη παραμόρφωση.

Ποσότητα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Μάζα σώματος ρομπότ	M	4.0	kg
Μάζα ποδιού	m_l	0.5	kg
Αδράνεια ποδιού	I_l	0.00375	kgm ²
Ελεύθερο μήκος ποδιού	L	0.30	m
Σταθερά ελατηρίου	k	12000	N/m
Ιξώδης τριβή πρισματικής άρθρωσης	b_l	3.0	Ns/m
Ιξώδης τριβή περιστροφικής άρθρωσης	b_h	0.2	Nms
Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9.81	m/s ²
Επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_{des}	0.8 → 1.0	m/s
Επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης	h_{des}	0.32 → 0.33	m
Αρχικό ύψος σώματος ρομπότ	h_0	0.33	m
Αρχική πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_0	1.0	m/s

Σχετικά με τη συμπεριφορά του ελεγκτή x-MP-II, φαίνεται ότι ο ελεγκτής προσαρμόζεται ανεξάρτητα από το αν το έδαφος είναι μικρής δυσκαμψίας ή εμφανίζει μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις και επιτυγχάνει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά κίνησης. Οι απότομες αλλαγές στην επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα απαιτούν κάποιους μεταβατικούς διασκελισμούς μέχρι το σύστημα να επανέλθει σε steady state. Το σημαντικό στοιχείο είναι ότι ο ελεγκτής κατορθώνει και προσαρμόζεται ανεξάρτητα από το δυναμικό μοντέλο που διαχειρίζεται και πραγματοποιεί τους επιθυμητούς στόχους κίνησης. Αυτό οφείλεται στην ενεργειακή προσέγγιση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης και της σταθερής ροπής που ασκείται κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους. Για την επιτυχή λειτουργία του ελεγκτή απαιτείται απλά μια εκτίμηση των ενεργειακών απωλειών που λαμβάνουν χώρα τόσο κατά τη διάρκεια της φάσης πτήσης όσο και κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους.



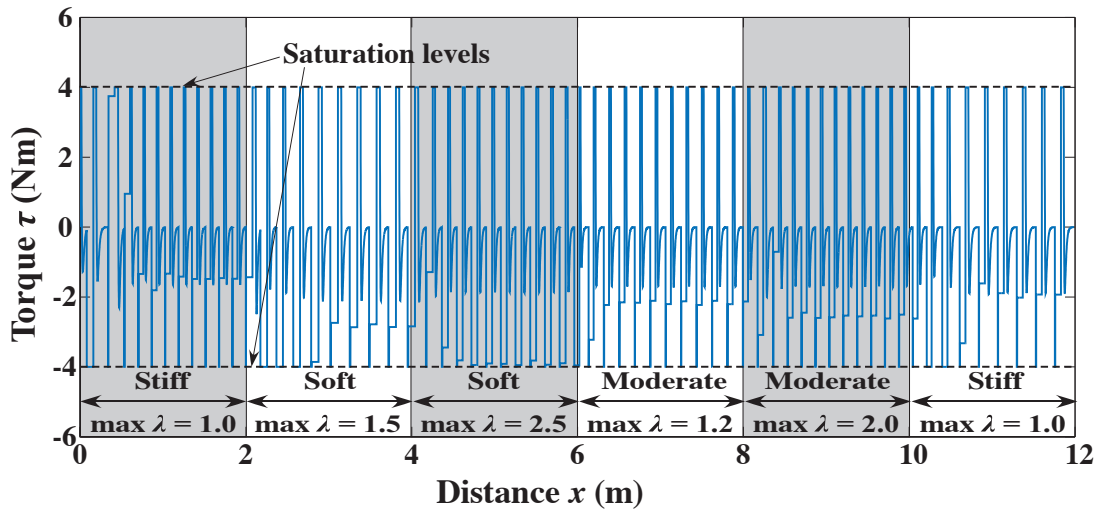
(a)



(b)

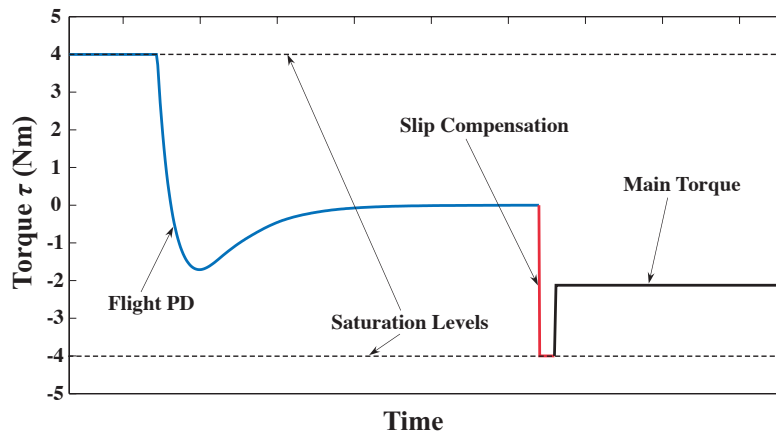
Σχήμα 4-8: Απόκριση σύνθετου και λεπτομερούς μοντέλου με χρήση ελεγκτή x-MP-II σε εδάφη με μόνιμη παραμόρφωση: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} .

Στο Σχ. 4-9 φαίνεται η ροπή που ασκήθηκε από τον επενεργητή στο λεπτομερές μοντέλο για όλη την παραπάνω διαδρομή. Όπως βλέπουμε, η απόλυτη τιμή της ροπής και πάλι αυξάνεται κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους όσο το έδαφος γίνεται πιο μαλακό και με μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις ή τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της κίνησης του ρομπότ γίνονται πιο απαιτητικά. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα φυσιολογικό αν αναλογιστούμε ανάλογα παραδείγματα από τη φύση, όπου κίνηση σε μαλακό έδαφος με υψηλή ταχύτητα απαιτεί την κατανάλωση μεγαλύτερων ποσών ενέργειας για τη διατήρησή της.



Σχήμα 4-9: Ροπή επενεργητή τ για λεπτομερές μοντέλο με χρήση του ελεγκτή x-MP-II σε εδάφη με μόνιμη παραμόρφωση.

Στο Σχ. 4-10 παρουσιάζεται το προφίλ ροπής που ασκείται κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου διασκελισμού, με στόχο να τονιστεί η διαδοχή των ενεργειών του ελεγκτή x-MP-II. Έτσι, με την έναρξη της φάσης πτήσης το πόδι τοποθετείται στην επιθυμητή γωνία γ_{td} χρησιμοποιώντας έναν ελεγκτή PD. Μόλις το πόδι προσγειωθεί, ασκείται για ένα μικρό διάστημα μέγιστη αρνητική ροπή προκειμένου το πέλμα να εισέλθει στην περιοχή στατικής τριβής όσο το δυνατό πιο γρήγορα. Στη συνέχεια και για την υπόλοιπη φάση εδάφους, ο επενεργητής ασκεί την σταθερή ροπή τ_s που έχει ήδη υπολογίσει ο ελεγκτής μέχρι την τελική απογείωση. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 4-10: Προφίλ ροπής επενεργητή τ για το λεπτομερές μοντέλο σε εύρος ενός διασκελισμού.

Τέλος, εξετάζεται το κόστος μετακίνησης (**Cost of Transport – CoT**) για όλη την παραπάνω διαδρομή του λεπτομερούς μοντέλου. Το CoT για τη μετακίνηση ενός συστήματος σε μια συγκεκριμένη απόσταση d μπορεί να οριστεί από την παρακάτω σχέση

$$CoT = \frac{W}{M \cdot g \cdot d} \quad (4-39)$$

όπου W είναι η ενέργεια που προσφέρθηκε από τον επενεργητή για να πραγματοποιηθεί αυτή η κίνηση. Με τον τρόπο αυτό, μπορούμε να ορίσουμε το συντελεστή CoT για κάθε ένα από τα 6 διαφορετικά εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν τη διαδρομή του λεπτομερούς μοντέλου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4-8.

Πίνακας 4-8: Σύγκριση CoT για διαφορετικά εδάφη με βάση το λεπτομερές μοντέλο και τον ελεγκτή x-MP-II.

Απόσταση (m)	Έδαφος	max λ	\dot{x}_{des} (m/s)	h_{des} (m)	CoT
0 – 2.0	Stiff	1.0	0.8	0.32	0.0568
2.0 – 4.0	Soft	1.5	1.0	0.32	0.1424
4.0 – 6.0	Soft	2.5	0.8	0.32	0.1499
6.0 – 8.0	Moderate	1.2	0.8	0.33	0.0867
8.0 – 10.0	Moderate	2.0	0.8	0.32	0.1045
10.0 – 12.0	Stiff	1.0	1.0	0.33	0.0864

Όπως φαίνεται, ο συντελεστής CoT αυξάνεται όσο το ρομπότ προσπαθεί να πετύχει πιο απαιτητικούς στόχους. Ωστόσο, εξαρτάται σημαντικά και από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και αυξάνεται σημαντικά καθώς το έδαφος γίνεται πιο υποχωρητικό. Το γεγονός αυτό μας δείχνει ξεκάθαρα ότι η υποχωρητικότητα του εδάφους είναι ένας παράγοντας μεγάλης σημασίας όταν σχεδιάζεται ελεγκτής που πρέπει να διαχειριστεί ένα ρομποτικό σύστημα με πόδια το οποίο διασχίζει απαιτητικά εδάφη.

4.4 Extended MultiPart Controller III (x-MP-III) για ανώμαλα εδάφη

Μέχρι τώρα έχει εξεταστεί μόνο η περίπτωση εδάφους με υποχωρητικότητα το οποίο είναι απόλυτα επίπεδο. Μάλιστα, έχει σιωπηρά εννοηθεί ότι η κατακόρυφη θέση της

επιφάνειας του εδάφους ταυτίζεται με την αρχή μέτρησης της κατακόρυφης συντεταγμένης του σώματος ($y_{ground} = 0$). Με τον τρόπο αυτό, η απόλυτη τιμή της συντεταγμένης y_{ft} του πέλματος ταυτίζεται με το βάθος διείσδυσης y_g ώστε $y_g = |y_{ft}|$ ή $y_g = -y_{ft}$. Αυτή η προσέγγιση ωστόσο καθίσταται ακατάλληλη όταν το ρομπότ πρόκειται να διαβεί ανώμαλα εδάφη, καθώς η κλίση του εδάφους μεταβάλλεται. Σε αυτή την παράγραφο, θα επιχειρηθεί μια διαφορετική προσέγγιση, ώστε, με μικρές τροποποιήσεις, ο ελεγκτής x-MP να μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση ανώμαλου εδάφους με υποχωρητικότητα, το οποίο γενικά περιγράφεται από ένα άγνωστο διδιάστατο προφίλ στη μορφή $y_{ground} = y_{ground}(x_{ground})$. Αυτός ο τροποποιημένος ελεγκτής ονομάζεται Extended MultiPart Controller III (x-MP-III) και βασίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό στον x-MP-II.

Η ανάπτυξη του x-MP-III στηρίζεται στην υπόθεση ότι το έδαφος έχει μορφή τύπου κλίμακας (stair-like terrain) σε μικροσκοπικό επίπεδο κατά τη σημειακή επαφή του πέλματος, παρά την όποια κλίση εμφανίζει. Με τον τρόπο αυτό, θεωρείται ότι το πέλμα πατά πάντα σε μια επίπεδη επιφάνεια (της οποίας φυσικά η κατακόρυφη θέση μεταβάλλεται από διασκελισμό σε διασκελισμό ανάλογα με την κλίση του εδάφους) και του ασκείται μια κατακόρυφη δύναμη που δίνεται από την Εξ. (3-31) και μια οριζόντια δύναμη τριβής από την Εξ. (3-36). Για το λόγο αυτό, η παρούσα ανάλυση περιορίζεται σε μικρές γωνίες $\pm 5^\circ$.

Για την ανάλυση που θα ακολουθήσει, θεωρείται ότι οι παράμετροι x_{ground} και y_{ground} για κάθε διασκελισμό του ρομπότ είναι γνωστές. Πράγματι, μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με κινηματικές σχέσεις χρησιμοποιώντας τα δεδομένα ανάδρασης από τους αισθητήρες του ρομπότ σε κάθε προσγείωση ως εξής

$$x_{ground} = x_{ft,td} = x_{td} + l_{td} \cdot \sin \gamma_{td} \quad (4-40)$$

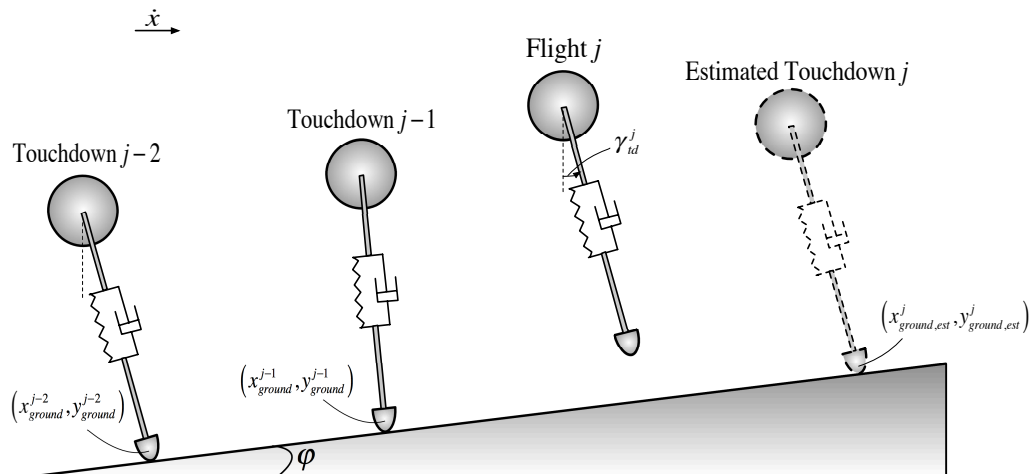
$$y_{ground} = y_{ft,td} = y_{td} - l_{td} \cdot \cos \gamma_{td} \quad (4-41)$$

όπως φαίνεται και από τα Σχ. 3-1 και 3-2. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα απλό αν θεωρήσουμε ότι ένα πραγματικό μονόποδο ρομπότ διαθέτει τουλάχιστον έναν αδρανειακό αισθητήρα (Inertial Measurement Unit – IMU) για τον προσδιορισμό της θέσης του κύριου σώματος του ρομπότ, έναν αισθητήρα μέτρησης του μήκους του ποδιού (π.χ encoder) και έναν αισθητήρα μέτρησης της γωνίας που σχηματίζει το πόδι με την κατακόρυφο.

Το βασικό νέο στοιχείο που εισάγει ο x-MP-III έχει να κάνει με το γεγονός ότι χρησιμοποιεί μια μέθοδο εκτίμησης της επόμενης κατακόρυφης συντεταγμένης του προφίλ εδάφους $y_{ground,est}^j$ για την προσγείωση στο διασκελισμό j . Για να πραγματοποιηθεί αυτό, χρησιμοποιούνται δεδομένα από τους δύο προηγούμενους διασκελισμούς $j-1$ και $j-2$. Αρχικά, γίνεται μια εκτίμηση της κλίσης φ του εδάφους ως εξής

$$\tan \varphi = \frac{y_{ground}^{j-1} - y_{ground}^{j-2}}{x_{ground}^{j-1} - x_{ground}^{j-2}} \quad (4-42)$$

Τα σημεία $(x_{ground}^{j-1}, y_{ground}^{j-1})$ και $(x_{ground}^{j-2}, y_{ground}^{j-2})$ ταυτίζονται με τις συντεταγμένες του πέλματος κατά την προσγείωση στους διασκελισμούς $j-1$ και $j-2$ αντίστοιχα, που έχουν ήδη καταγραφεί όπως φαίνεται και στο Σχ. 4-11.



Σχήμα 4-11: Κίνηση του ρομπότ σε έδαφος με κλίση.

Έπειτα, κάνοντας τις υποθέσεις ότι

- i. το πόδι θα προσγειωθεί στο διασκελισμό j με την ίδια περίπου γωνία γ_{id}^{j-1} όπως στο διασκελισμό $j-1$
- ii. η κλίση φ του εδάφους θα παραμείνει ίδια και
- iii. ισχύει η υπόθεση της βαλλιστικής κίνησης του σώματος κατά τη διάρκεια της φάσης πτήσης

μπορεί να διαμορφωθεί το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων

$$y_{td,est}^j = y_{ground,est}^j + L \cdot \cos \gamma_{id}^{j-1} = y_{lo}^{j-1} + \dot{y}_{lo}^{j-1} \cdot \Delta t_{f,est}^j - \frac{1}{2} \cdot g \cdot (\Delta t_{f,est}^j)^2 \quad (4-43)$$

$$x_{td,est}^j = x_{ground,est}^j - L \cdot \sin \gamma_{id}^{j-1} = x_{lo}^{j-1} + \dot{x}_{lo}^{j-1} \cdot \Delta t_{f,est}^j \quad (4-44)$$

$$y_{ground,est}^j = y_{ground}^{j-1} + (x_{ground,est}^j - x_{ground}^{j-1}) \cdot \tan \varphi \quad (4-45)$$

όπου με $\Delta t_{f,est}^j$ συμβολίζεται ο εκτιμώμενος χρόνος πτήσης στο διασκελισμό j με βάση την υπόθεση της βαλλιστικής κίνησης. Οι Εξ. (4-43) και (4-44) προκύπτουν από την υπόθεση της βαλλιστικής κίνησης κατά την διάρκεια της φάσης πτήσης, ενώ η Εξ. (4-45) από την υπόθεση ότι η κλίση του εδάφους θα παραμείνει ίδια. Το παραπάνω σύστημα είναι ένα σύστημα 3 εξισώσεων με 3 αγνώστους ($\Delta t_{f,est}^j, x_{ground,est}^j, y_{ground,est}^j$) και μπορεί, με τις κατάλληλες απαλοيفές, να καταλήξει στην ακόλουθη δευτεροβάθμια εξίσωση

$$p \cdot (x_{ground,est}^j)^2 + q \cdot x_{ground,est}^j + r = 0 \quad (4-46)$$

με τους συντελεστές p , q και r να δίνονται από τις εξής σχέσεις

$$p = g \quad (4-47)$$

$$q = -2 \cdot L \cdot g \cdot \sin \gamma_{td}^{j-1} - 2 \cdot x_{lo}^{j-1} \cdot g - 2 \cdot \dot{x}_{lo}^{j-1} \cdot \dot{y}_{lo}^{j-1} + 2 \cdot (\dot{x}_{lo}^{j-1})^2 \cdot \tan \varphi \quad (4-48)$$

$$\begin{aligned} r = & L \cdot g \cdot \sin \gamma_{td}^{j-1} \cdot (L \cdot \sin \gamma_{td}^{j-1} + 2 \cdot x_{lo}^{j-1}) + (x_{lo}^{j-1})^2 \cdot g + \\ & + 2 \cdot \dot{x}_{lo}^{j-1} \cdot \dot{y}_{lo}^{j-1} \cdot (x_{lo}^{j-1} + L \cdot \sin \gamma_{td}^{j-1}) + \\ & + 2 \cdot (\dot{x}_{lo}^{j-1})^2 \cdot (y_{ground}^{j-1} - x_{ground}^{j-1} \cdot \tan \varphi + L \cdot \cos \gamma_{td}^{j-1} - y_{lo}^{j-1}) \end{aligned} \quad (4-49)$$

Βρίσκοντας έτσι την εκτιμώμενη οριζόντια συντεταγμένη $x_{ground,est}^j$ του προφίλ εδάφους κατά την προσγείωση στο διασκελισμό j , μπορούμε να υπολογίσουμε το επιθυμητό μέγεθος $y_{ground,est}^j$ από την Εξ. (4-45).

Έχοντας το εκτιμώμενο μέγεθος $y_{ground,est}^j$, οι οριακές συνθήκες για την επίλυση της Εξ. (4-20) και τον υπολογισμό της επιθυμητής γωνίας πρόσπτωσης τροποποιούνται προκειμένου να συμπεριλάβουν την εκτίμηση της κατακόρυφης συντεταγμένης του προφίλ εδάφους στην επόμενη προσγείωση και γίνονται

$$y^j(0) = y_{td,est}^j = y_{ground,est}^j + L \cdot \cos \gamma_{td}^j \quad (4-50)$$

$$\dot{y}^j(0) = \dot{y}_{td,est}^j \quad (4-51)$$

όπου με ανάλογο τρόπο με την Παράγραφο 4.3, το μέγεθος $\dot{y}_{td,est}^j$ υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ. (4-23) με το μέγεθος $y_{td,est}^j$ να δίνεται από την Εξ. (4-50). Τονίζεται δε ότι μεταβάλλεται ο υπολογισμός του μεγέθους Δl_{max}^{j-1} της Εξ. (4-4) και γίνεται

$$\Delta l_{max}^{j-1} = L - (y_{min}^{j-1} - y_{ground}^{j-1}) \quad (4-52)$$

Στη συνέχεια, η διαφορική εξίσωση επιλύεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 4.3. Τέλος, η Εξ. (4-28) τροποποιείται ανάλογα ώστε

με την ίδια υπόθεση ότι το βάθος διείδυσης στο τέλος του διασκελισμού j θα είναι ίσο με το βάθος διείδυσης στο τέλος του διασκελισμού $j-1$ να ισχύει

$$y_{lo,est}^j = y_{ground,est}^j + (y_{fit,lo}^{j-1} - y_{ground}^{j-1}) + L \cdot \cos\left(\gamma_{id}^j - \frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) \quad (4-53)$$

Η επιθυμητή γωνία πρόσπτωσης γ_{id}^j υπολογίζεται και πάλι από την Εξ. (4-31), με τις παραμέτρους $a_1, a_2, c_1, c_2, A, B, \theta, r$ και R να έχουν τροποποιηθεί ανάλογα, βλ. Παράρτημα Α.2. Η μέθοδος υπολογισμού ροπής τ_s^j παραμένει ίδια, όπως και οι υπόλοιπες ενέργειες του ελεγκτή σύμφωνα με την Παράγραφο 4.3.

Και πάλι, οι ενέργειες του ελεγκτή x-MP-III παρουσιάζονται συγκεντρωμένες στον Πίνακα 4-9 για το σύνθετο και το λεπτομερές μοντέλο. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνονται οι διαφορές στους υπολογισμούς μεταξύ σύνθετου και λεπτομερούς μοντέλου.

Πίνακας 4-9: Σύντομη περιγραφή αλγορίθμου ελεγκτή x-MP-III.

Σύνθετο μοντέλο	Λεπτομερές μοντέλο
<p><AFTER LIFTOFF Calculate Δt_s^{j-1}> <If $\Delta t_s^{j-1} \leq 0.5T_n$> <Use former values and exit> <Elseif $\Delta t_s^{j-1} > 0.5T_n$> <Calculate $y_{ground,est}^j$> Εξ. (4-45) <Calculate Δl_{max}^{j-1}> Εξ. (4-52) <Calculate $E_{damp,s}^{j-1}$> Εξ. (4-16) <Calculate E_{gdis}^{j-1}> Εξ. (4-18) <Calculate k', b_l'> Εξ. (4-3) και (4-19) <Determine γ_{id}^j> Εξ. (4-31) – Παρ. Α.2 <Calculate E_{des}^j> Εξ. (4-32) <Calculate E_{lo}^{j-1}> Εξ. (4-33) <Calculate $E_{m,f}^{j-1}$> Εξ. (4-36) <Calculate E_{damp}^{j-1}> Εξ. (4-8) <Determine τ_s^j> Εξ. (4-37) <Determine time interval Δt_{slip}^{j-1}> <End></p>	<p><AFTER LIFTOFF Calculate Δt_s^{j-1}> <If $\Delta t_s^{j-1} \leq 0.5T_n$> <Use former values and exit> <Elseif $\Delta t_s^{j-1} > 0.5T_n$> <Calculate $y_{ground,est}^j$> Εξ. (4-45) <Calculate Δl_{max}^{j-1}> Εξ. (4-52) <Calculate $E_{damp,s}^{j-1}$> Εξ. (4-17) <Calculate E_{gdis}^{j-1}> Εξ. (4-18) <Calculate k', b_l'> Εξ. (4-3) και (4-19) <Determine γ_{id}^j> Εξ. (4-31) – Παρ. Α.2 <Calculate E_{des}^j> Εξ. (4-32) <Calculate E_{lo}^{j-1}> Εξ. (4-34) <Calculate $E_{m,f}^{j-1}$> Εξ. (4-36) <Calculate E_{damp}^{j-1}> Εξ. (4-9) <Determine τ_s^j> Εξ. (4-37) <Determine time interval Δt_{slip}^{j-1}> <End></p>

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η απόκριση του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε διάφορα ανώμαλα εδάφη με υποχωρητικότητα και με ή χωρίς μόνιμες παραμορφώσεις. Οι παράμετροι των προσομοιώσεων για το σύνθετο μοντέλο εμφανίζονται στον Πίνακα 4-10. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο MATLAB, χρησιμοποιώντας τον επιλύτη (solver) ode23s με απόλυτη και σχετική ακρίβεια 10^{-2} , καθώς και με μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης 10^{-5} . Για τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις, επιλέχθηκε εξ αρχής μια μικρότερη τιμή επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας \dot{x}_{des} , ώστε το ρομπότ να καταφέρει με επιτυχία να πραγματοποιήσει τη διαδρομή με εμπόδια. Γενικά, όσο αυξάνεται η τιμή της ταχύτητας \dot{x}_{des} τόσο αυξάνεται και η ενέργεια που καταναλώνεται από τον επενεργητή. Έτσι, σε ιδιαίτερα απαιτητικές διαδρομές, όπως αυτές με εμπόδια, ο επενεργητής μπορεί να οδηγηθεί σε κορεσμό και να μην μπορεί να προσδώσει μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα το ρομπότ να οδηγηθεί αργά ή γρήγορα σε αστάθεια μιας και η συνολική ενέργεια του συστήματος θα μειώνεται συνεχώς λόγω απωλειών. Το φαινόμενο αυτό είναι σίγουρα κάτι που θέλουμε να αποφύγουμε.

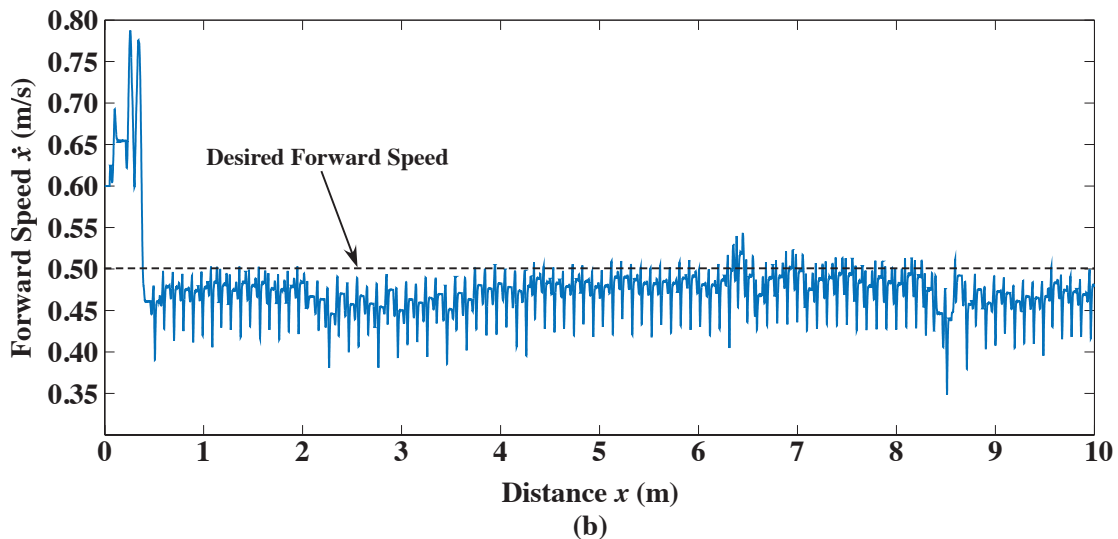
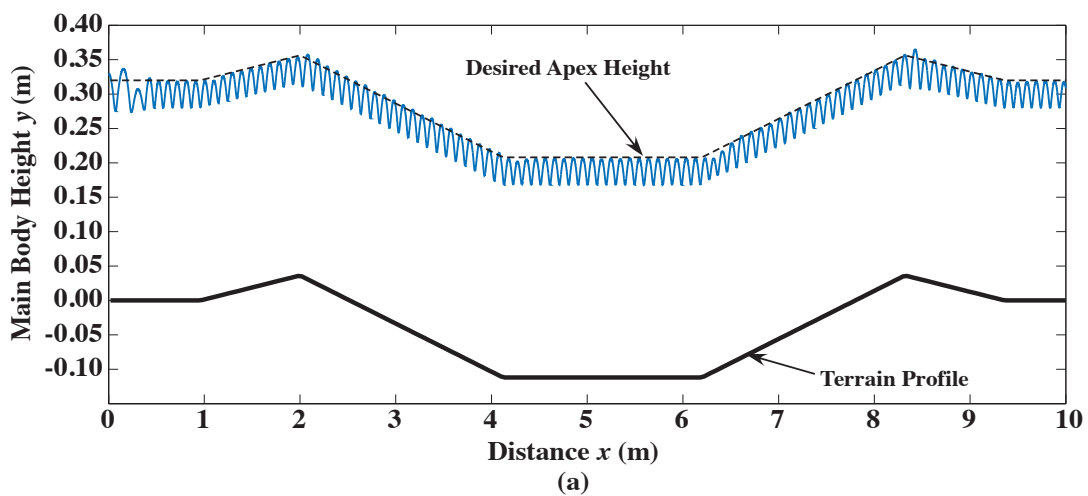
Πίνακας 4-10: Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή x-MP-III σε ανώμαλο έδαφος.

Ποσότητα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Μάζα σώματος ρομπότ	M	4.0	kg
Ισοδύναμη μάζα ποδιού και πέλματος	m	0.16	kg
Ελεύθερο μήκος ποδιού	L	0.30	m
Σταθερά ελατηρίου	k	12000	N/m
Ιξώδης τριβή πρισματικής άρθρωσης	b_l	3.0	Ns/m
Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9.81	m/s ²
Επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_{des}	0.5	m/s
Επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης	h_{des}	0.32	m
Αρχικό ύψος σώματος ρομπότ	h_0	0.33	m
Αρχική πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_0	0.6	m/s

Αρχικά, η απόδοση του x-MP-III εξετάζεται σε έδαφος μορφής κρατήρα με χαρακτηριστικά εδάφους που φαίνονται στον Πίνακα 4-11. Η απόκριση του ρομπότ καθώς και το προφίλ εδάφους φαίνεται στο Σχ. 4-12.

Πίνακας 4-11: Χαρακτηριστικά εδάφους μορφής κρατήρα για δοκιμή του x-MP-III.

Μέγιστη κλίση (deg)	k_g (N/m)	c_a	μ_s	μ_c	a	β	max λ
± 4	$4 \cdot 10^5$	0.2	0.7	0.6	0.0	0.0	1.0

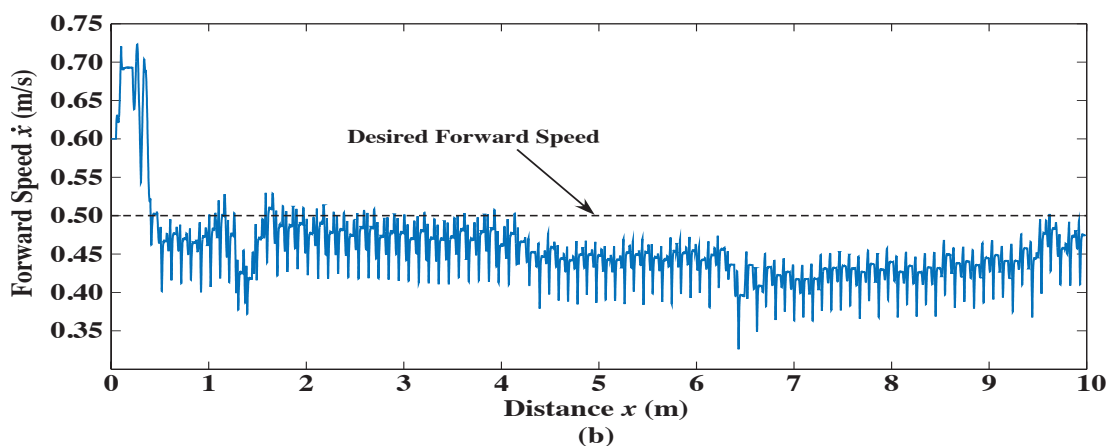
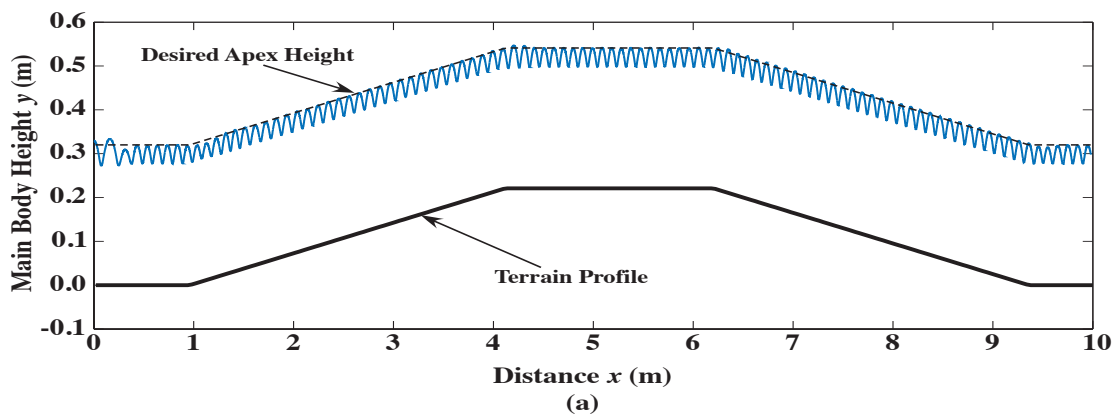


Σχήμα 4-12: Απόκριση σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε ανώμαλο έδαφος μορφής κρατήρα: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} .

Από το Σχ. 4-12 φαίνεται ότι το ρομπότ με χρήση του x-MP-III καταφέρνει να ακολουθήσει το επιθυμητό προφίλ μέγιστου ύψους αναπήδησης αλλά και να συντηρήσει την επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα, παρά τις όποιες ανωμαλίες του εδάφους. Ωστόσο προς το παρόν έχει εξεταστεί μόνο η περίπτωση δύσκαμπτου εδάφους χωρίς μόνιμες παραμορφώσεις. Για το λόγο αυτό, γίνεται μια νέα δοκιμή σε έδαφος μορφής λόφου με μεγαλύτερη υποχωρητικότητα και μεγαλύτερες μόνιμες παραμορφώσεις. Τα χαρακτηριστικά αυτά του εδάφους φαίνονται στον Πίνακα 4-12. Η απόκριση του ρομπότ, καθώς και το προφίλ εδάφους φαίνονται στο Σχ. 4-13.

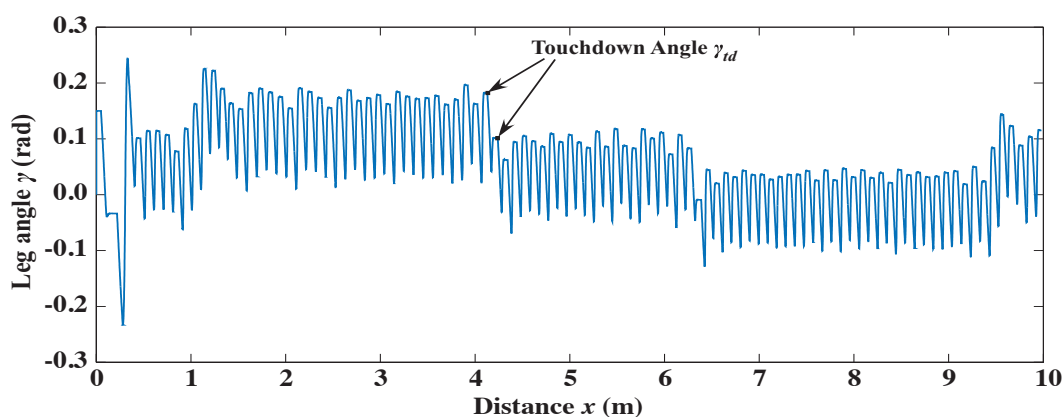
Πίνακας 4-12: Χαρακτηριστικά εδάφους μορφής λόφου για δοκιμή του x-MP-III.

Μέγιστη κλίση (deg)	k_g (N/m)	c_a	μ_s	μ_c	a	β	max λ
± 4	$2 \cdot 10^5$	0.2	0.6	0.5	0.2	0.0	1.2



Σχήμα 4-13: Απόκριση σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε ανώμαλο έδαφος μορφής λόφου: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} .

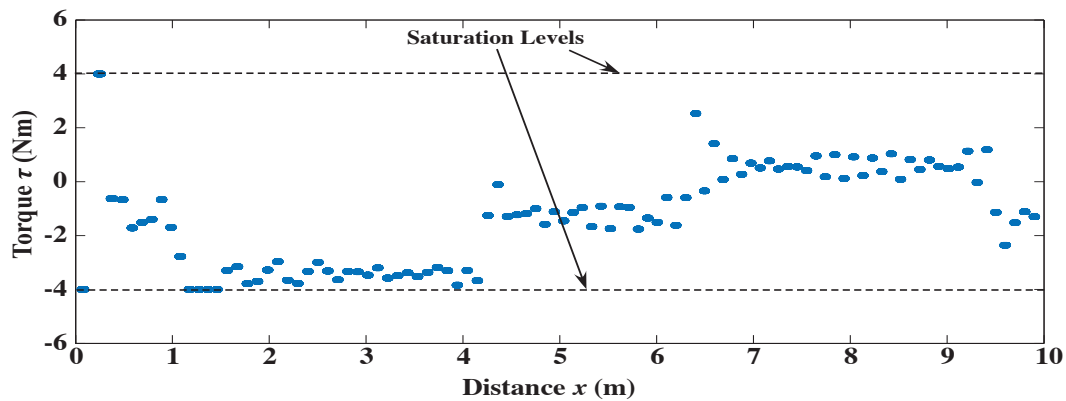
Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω γραφήματα, το ρομπότ καταφέρνει να ακολουθήσει το επιθυμητό προφίλ μέγιστου ύψους αναπήδησης και παράλληλα να συντηρεί την πρόσθια ταχύτητα σε λογικά όρια γύρω από την επιθυμητή τιμή. Οι όποιες αποκλίσεις οφείλονται στην υποχωρητικότητα του εδάφους, αλλά και στις μόνιμες παραμορφώσεις που αυτό εμφανίζει, πράγμα που σε συνδυασμό με την κλίση του εδάφους δυσκολεύει το έργο του ελεγκτή. Προκειμένου να μελετηθούν με λεπτομέρεια οι ενέργειες του ελεγκτή, παρατίθεται η απόκριση της γωνίας του σύνθετου μοντέλου στο Σχ. 4-14.



Σχήμα 4-14: Απόκριση γωνίας γ του σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-III στο έδαφος μορφής λόφου.

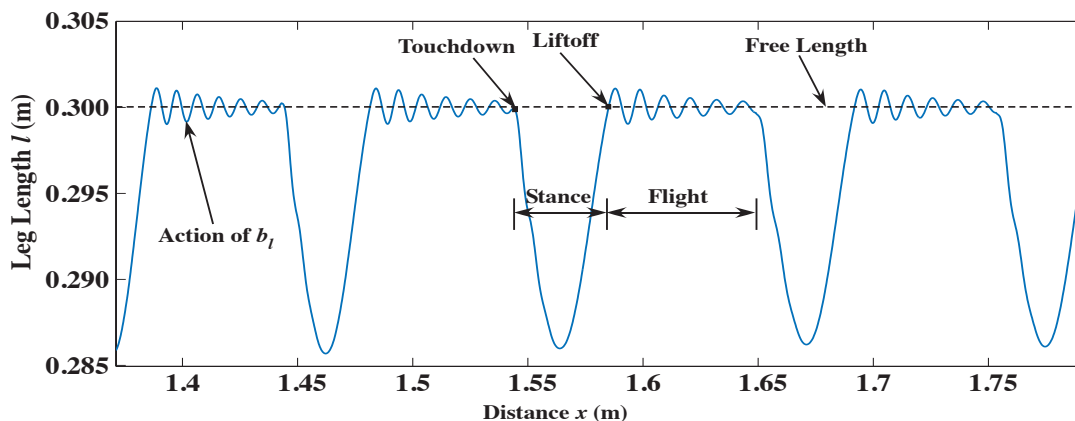
Από το Σχ. 4-14, βλέπουμε ότι στο διάστημα της ανωφέρειας (1–4m) ο ελεγκτής δίνει εντολή για μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης. Αντίθετα, στο διάστημα της κατωφέρειας (6.5–9.5m) δίνεται εντολή για μικρότερες γωνίες πρόσπτωσης. Η συμπεριφορά αυτή του ελεγκτή είναι απόλυτα λογική, αν αναλογιστούμε ανάλογα παραδείγματα και από τη φύση. Στην κατωφέρεια, η επίδραση της βαρύτητας είναι προς όφελος της πρόσθιας ταχύτητας του ρομπότ. Για το λόγο αυτό, ο ελεγκτής δίνει εντολή για μικρές γωνίες πρόσπτωσης προκειμένου να υπάρξει μια σχετική επιβράδυνση που θα συντηρήσει την επιθυμητή ταχύτητα. Το αντίθετο ακριβώς συμβαίνει στην περίπτωση της ανωφέρειας, όπου η επίδραση της βαρύτητας δυσκολεύει αντί να ωφελεί την κίνηση του ρομπότ. Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν παρατηρώντας το Σχ. 4-15, όπου φαίνεται η διασπορά των εντολών ροπής που δόθηκαν από τον ελεγκτή κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων εδάφους. Βλέπουμε ότι στην ανωφέρεια δίνονται εντολές για μεγαλύτερες ροπές (που σχεδόν πλησιάζουν στο επίπεδο κορεσμού) σε σχέση με την κατωφέρεια. Στην περίπτωση της κατωφέρειας δε, υπάρχει περίπτωση να δοθεί εντολή

ακόμα και για θετική ροπή, η οποία αφαιρεί ενέργεια από το σύστημα. Τονίζεται και πάλι ότι κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους, όπου το πόδι κινείται από θετικές σε αρνητικές γωνίες (αρνητική γωνιακή ταχύτητα), αρνητικές ροπές προσφέρουν ενέργεια στο σύστημα ενώ θετικές ροπές αφαιρούν ενέργεια από αυτό.



Σχήμα 4-15: Ροπή επενεργητή τ στο σύνθετο μοντέλο στις διάφορες φάσεις εδάφους με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε έδαφος μορφής λόφου.

Τέλος, στο Σχ. 4-16 παρουσιάζεται μια εστίαση στην απόκριση του μήκους l του ποδιού. Από το γράφημα αυτό, φαίνεται η φθίνουσα ταλάντωση του μήκους του ποδιού γύρω από το ελεύθερο μήκος L κατά τη διάρκεια της φάσης πτήσης με την επίδραση της απόσβεσης b_l . Αυτό το στοιχείο είχε αγνοηθεί σε παλαιότερες εργασίες μελέτης της συμπεριφοράς του μονόποδου ρομπότ μιας και το πόδι θεωρούταν αβαρές. Τέλος, φαίνεται ότι η υπόθεση του αρμονικού ταλαντωτή κατά τη διάρκεια της φάσης εδάφους στην οποία στηρίχθηκε ο x-MP είναι πολύ κοντά στην πραγματική συμπεριφορά, αφού η απόκριση του μήκους του ποδιού στη φάση εδάφους είναι σχεδόν ημιτονοειδής.



Σχήμα 4-16: Εστίαση στην απόκριση του μήκους του ποδιού l στο σύνθετο μοντέλο με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε έδαφος μορφής λόφου.

4.5 Επίδραση βαρύτητας στην απόδοση του ελεγκτή x-MP

Μέχρι στιγμής, έχει μελετηθεί η συμπεριφορά του μονόποδου ρομπότ (με το σύνθετο ή το λεπτομερές μοντέλο) μόνο στη βαρύτητα της Γης όπου $g = 9.81\text{m/s}^2$. Για το λόγο αυτό, στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια σύντομη εξέταση της απόκρισης του ρομπότ σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Ενδεικτικά θα χρησιμοποιηθούν οι επιταχύνσεις της βαρύτητας στον Άρη ($g = 3.71\text{m/s}^2$) και στη Σελήνη ($g = 1.62\text{m/s}^2$). Για τις προσομοιώσεις θα χρησιμοποιηθεί το σύνθετο μοντέλο, ενώ τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-13, με την επιτάχυνση της βαρύτητας να μεταβάλλεται ανάλογα με τον πλανήτη. Γίνεται χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε έδαφος τύπου κρατήρα, με χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στον Πίνακα 4-14. Τονίζεται ότι χρησιμοποιείται έδαφος μεγάλης δυσκαμψίας προκειμένου να εξεταστεί αποκλειστικά η επίδραση της επιτάχυνσης της βαρύτητας g στη συμπεριφορά του ελεγκτή, χωρίς τις δυσκολίες που εισάγονται λόγω αυξημένης υποχωρητικότητας εδάφους.

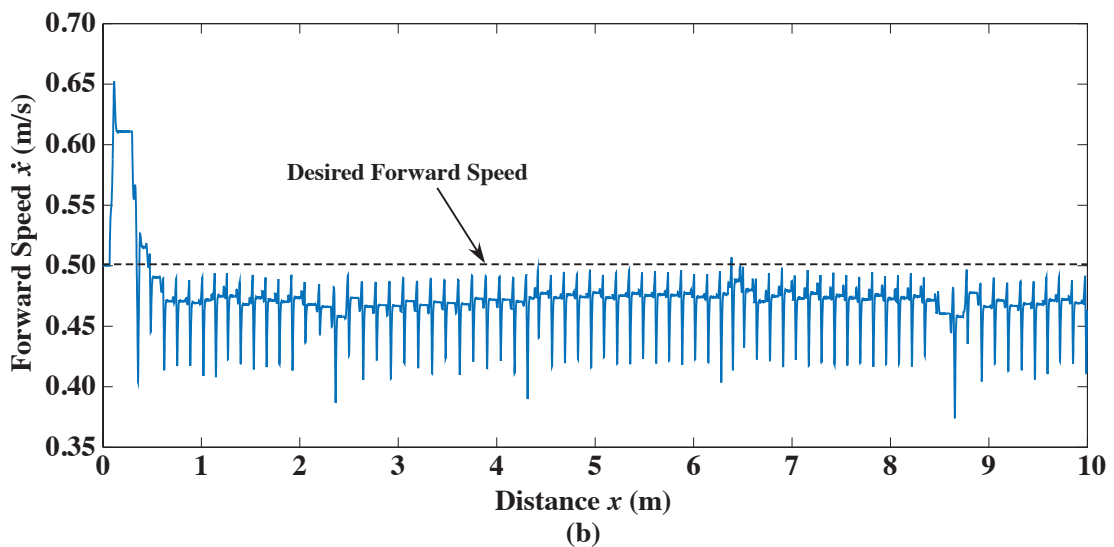
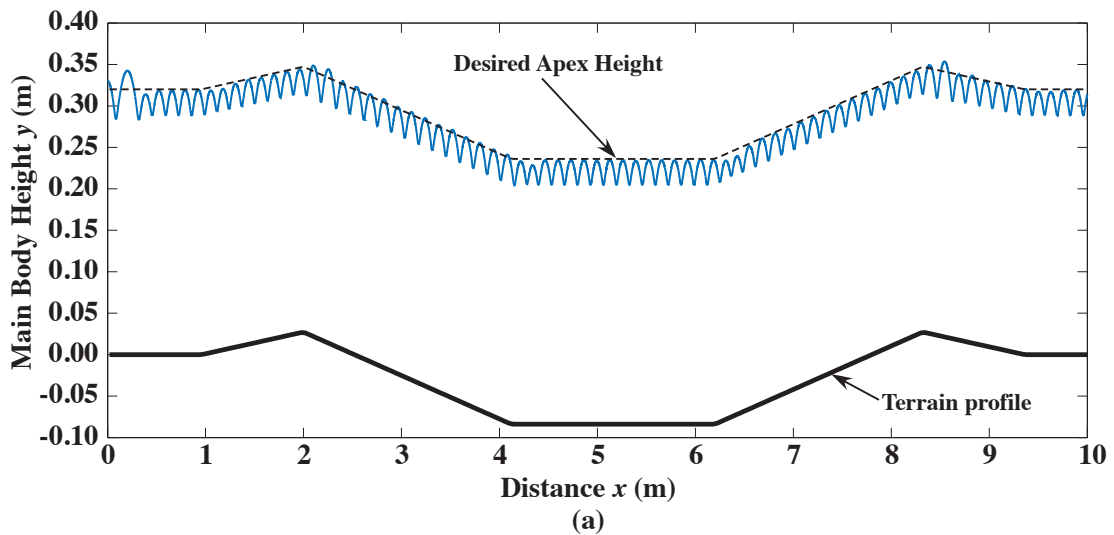
Πίνακας 4-13: Παράμετροι προσομοίωσης σύνθετου μοντέλου για δοκιμή x-MP-III σε διαφορετικές βαρύτητες.

Ποσότητα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Μάζα σώματος ρομπότ	M	4.0	kg
Ισοδύναμη μάζα ποδιού και πέλματος	m	0.16	kg
Ελεύθερο μήκος ποδιού	L	0.30	m
Σταθερά ελατηρίου	k	12000	N/m
Ιξώδης τριβή πρισματικής άρθρωσης	b_l	3.0	Ns/m
Επιθυμητή πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_{des}	0.5	m/s
Επιθυμητό μέγιστο ύψος αναπήδησης	h_{des}	0.32	m
Αρχικό ύψος σώματος ρομπότ	h_0	0.33	m
Αρχική πρόσθια ταχύτητα	\dot{x}_0	0.5	m/s

Πίνακας 4-14: Χαρακτηριστικά εδάφους μορφής κρατήρα για δοκιμή του x-MP-III σε διαφορετικές βαρύτητες.

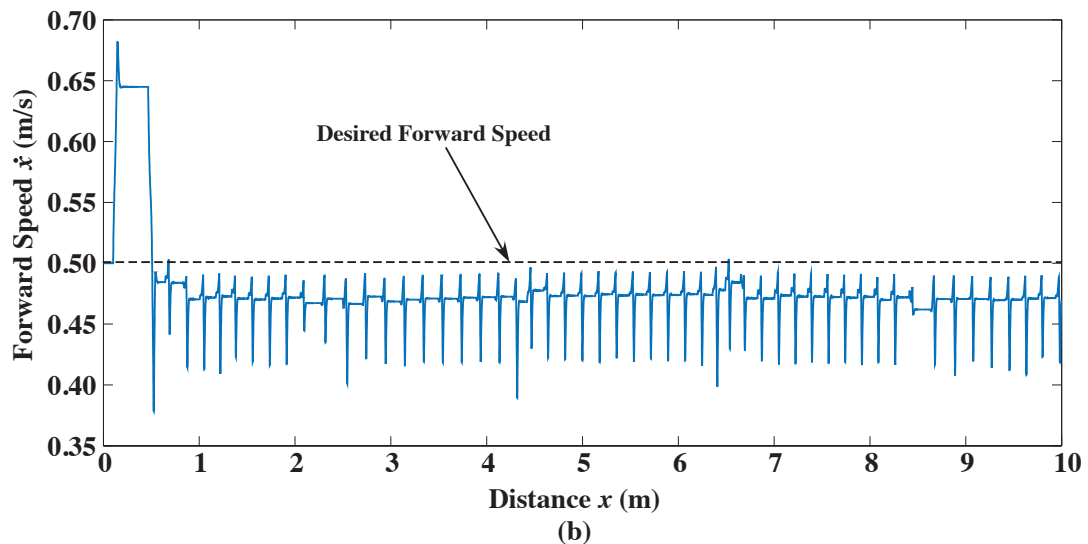
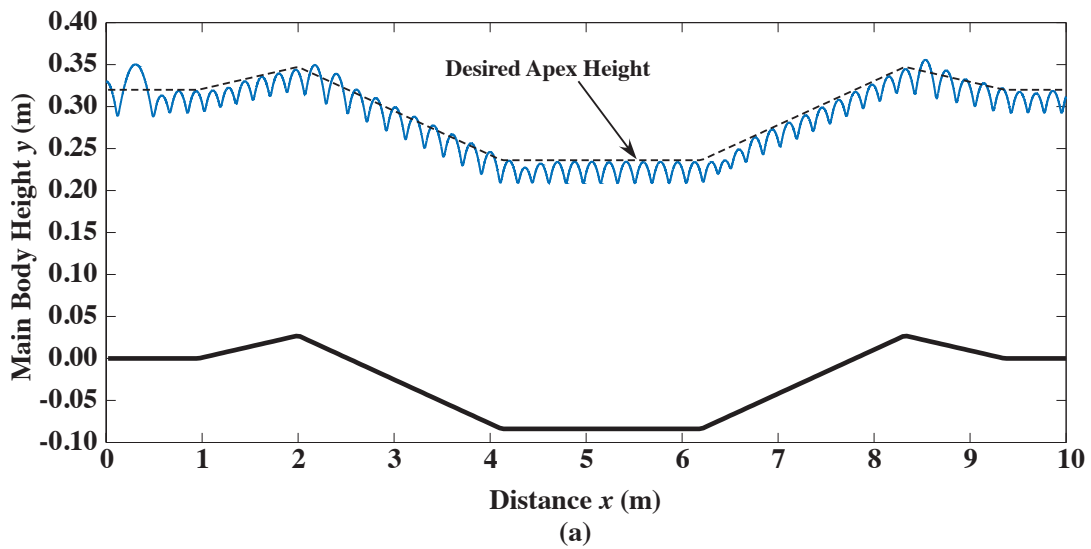
Μέγιστη κλίση (deg)	k_g (N/m)	c_a	μ_s	μ_c	a	β	max λ
± 3	$4 \cdot 10^5$	0.2	0.7	0.6	0.0	0.0	1.0

Σε πρώτη φάση, δοκιμάζεται ο ελεγκτής x-MP-III στη βαρύτητα του Άρη. Τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής φαίνονται στο Σχ. 4-17. Όπως γίνεται φανερό, ο ελεγκτής κατορθώνει και πάλι να φέρει το ρομπότ σε steady state με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά κίνησης.



Σχήμα 4-17: Απόκριση σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε ανώμαλο έδαφος στον Άρη: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} .

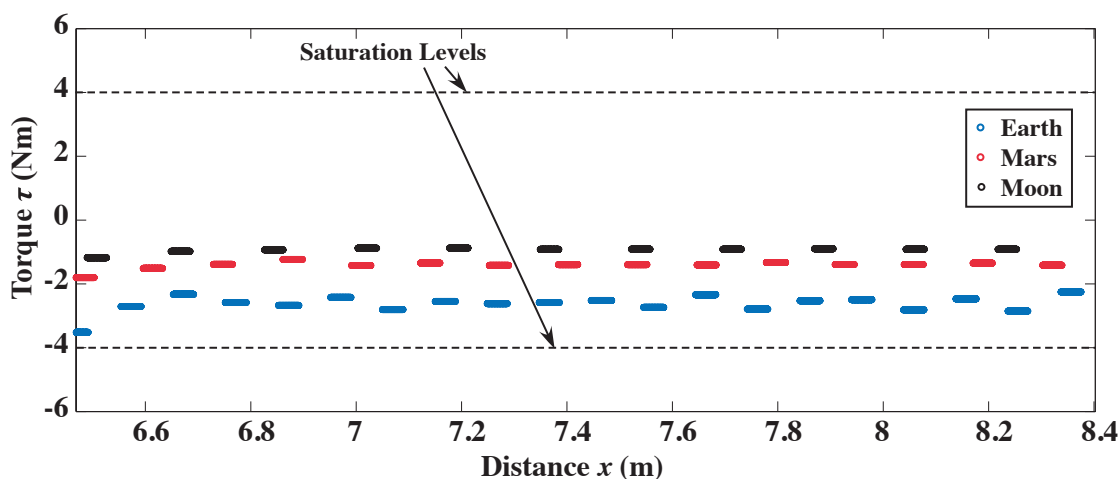
Αντίστοιχα, στο Σχ. 4-18 ακολουθεί η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη βαρύτητα της Σελήνης. Και πάλι ο ελεγκτής κατορθώνει να δημιουργήσει και να συντηρήσει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά κίνησης.



Σχήμα 4-18: Απόκριση σύνθετου μοντέλου με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε ανώμαλο έδαφος στη Σελήνη: (a) Ύψος σώματος y , (b) Πρόσθια ταχύτητα \dot{x} .

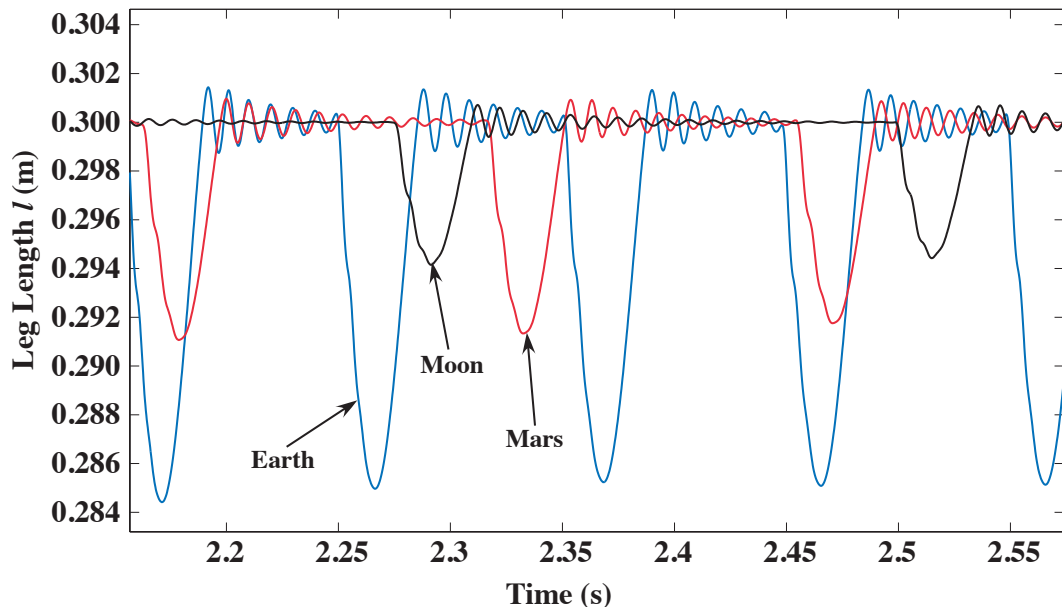
Από τα παραπάνω γραφήματα, φαίνεται ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας δεν επηρεάζει την απόδοση του ελεγκτή x-MP. Έχει, ωστόσο ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του καθώς η επιτάχυνση της βαρύτητας μειώνεται. Για το λόγο αυτό, παρατίθεται ενδεικτικά στο Σχ. 4-19 μία εστίαση στο γράφημα της διασποράς της ροπής από τον επενεργητή κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων εδάφους σε τρεις διαφορετικές βαρύτητες (Γη, Άρης, Σελήνη) στο ίδιο προφίλ εδάφους με προηγούμενα. Όπως βλέπουμε, με τη μείωση της επιτάχυνσης της βαρύτητας μειώνονται και οι απαιτήσεις ροπής από τον επενεργητή (κατ' απόλυτη τιμή)

προκειμένου να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά κίνησης. Από το γεγονός αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι σε άλλους πλανήτες με μικρότερη βαρύτητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επενεργητές που στη Γη δεν καλύπτουν τις απαιτήσεις κίνησης του ρομπότ.



Σχήμα 4-19: Εστίαση στο διάγραμμα ροπής τ στο σύνθετο μοντέλο στις διάφορες φάσεις εδάφους με χρήση του ελεγκτή x-MP-III με διαφορετική επιτάχυνση βαρύτητας.

Τέλος, στο Σχ. 4-20 παρουσιάζεται μια εστίαση στην απόκριση του μήκους l του ποδιού για διαφορετικές βαρύτητες στο ίδιο έδαφος με προηγούμενα. Όπως φαίνεται, η μείωση της επιτάχυνσης της βαρύτητας οδηγεί σε μικρότερες συσπειρώσεις του ελατηρίου του ποδιού, ενώ παράλληλα αυξάνει σε σημαντικό βαθμό τη διάρκεια τόσο της φάσης πτήσης όσο και της φάσης εδάφους. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται και το συνολικό μήκος διασκελισμού μεταξύ δύο προσγειώσεων του ποδιού στο έδαφος. Το γεγονός ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συσπείρωση του ελατηρίου καθιστά ιδιαίτερα σημαντική τη σωστή επιλογή ελατηρίου στο πόδι ανάλογα με το περιβάλλον χρήσης του ρομπότ. Έτσι, θα πρέπει να εξεταστεί με μεγάλη λεπτομέρεια η δυσκαμψία του ποδιού ανάλογα με το αν το ρομπότ προορίζεται για χρήση στη Γη ή για διαστημικές εφαρμογές, εφόσον τίθεται ως προδιαγραφή μια ελάχιστη συσπείρωση του ελατηρίου για τη σωστή αναπήδησή του. Φυσικά, αυτό το συμπέρασμα δεν περιορίζεται μόνο στην περίπτωση του μονόποδου ρομπότ αλλά γενικεύεται σε κάθε περίπτωση ρομποτικού συστήματος με πόδια που είναι εφοδιασμένο με ελατήριο και καλείται να πραγματοποιήσει κάποιους επιθυμητούς στόχους κίνησης.



Σχήμα 4-20: Εστίαση στην απόκριση του μήκους του ποδιού l στο σύνθετο μοντέλο με χρήση του ελεγκτή x-MP-III σε διαφορετικές βαρύτητες.

4.6 Τρόπος εφαρμογής του ελεγκτή x-MP σε πραγματική διάταξη

Στις προηγούμενες παραγράφους, αναλύθηκε εκτενώς η μεθοδολογία και η συμπεριφορά του ελεγκτή x-MP σε 3 διαφορετικές εκδόσεις του, καθεμιά με αυξανόμενη πολυπλοκότητα. Όπως αποδείχθηκε, ο συγκεκριμένος ελεγκτής οδηγεί το ρομπότ σε ευστάθεια ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά του εδάφους ή τις συνθήκες βαρύτητας, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει τους επιθυμητούς στόχους κίνησης. Η μέθοδος του ελεγκτή x-MP βασίζεται στην καταγραφή των μεγεθών ανάδρασης από προηγούμενους διασκελισμούς, οπότε η μόνη προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία του είναι να πραγματοποιηθεί ένας επιτυχής πρώτος διασκελισμός του μονόποδου ρομπότ.

Όπως έγινε φανερό από την ανάλυση που προηγήθηκε, η λειτουργία του ελεγκτή x-MP βασίζεται σε ενεργειακά μεγέθη. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να αντιμετωπίζει την υποχωρητικότητα του εδάφους, χωρίς να γνωρίζει τις παραμέτρους του. Η γνώση των παραμέτρων του εδάφους θα απαιτούσε ένα εξαιρετικά πολύπλοκο σύστημα αίσθησης (sensor system). Αντίθετα, ο ελεγκτής x-MP μπορεί να λειτουργήσει με τους ίδιους αισθητήρες που απαιτούνται για τη λειτουργία του ελεγκτή MP (αισθητήρες μέτρησης γωνίας και μήκους ποδιού), με τη μόνη προσθήκη ενός αισθητήρα δύναμης στο πέλμα

και ενός αδρανειακού αισθητήρα μέτρησης (Inertial Measurement Unit – IMU) για τον προσδιορισμό της θέσης του σώματος στο κατακόρυφο επίπεδο κίνησης.

Εκτός από αυτό, ο ελεγκτής x-MP συσχετίζει τη συμπεριφορά οποιουδήποτε μοντέλου του μονόποδου ρομπότ με αυτή του απλού 2D μοντέλου που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 2.3 μέσω των ισοδύναμων παραμέτρων M' , k' , b'_i και των διαφόρων ενεργειακών μεγεθών. Έτσι, αν χρησιμοποιούνται σωστές εκτιμήσεις των ενεργειακών μεγεθών, μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα σε οποιοδήποτε σύστημα χωρίς να απαιτείται εκτενής γνώση των στοιχείων του.

Ακόμη, ο ελεγκτής x-MP προσφέρει μια λύση για την αντιμετώπιση της ολισθηρότητας του εδάφους αλλά και των τοπικών επαναπηδήσεων που μπορούν να εμφανιστούν κατά την κρούση του πέλματος με το έδαφος, καθώς αυτά τα φαινόμενα μπορούν να συμβάλουν στη δημιουργία αστάθειας.

Τέλος, τονίζεται ότι η εφαρμογή του ελεγκτή x-MP είναι απόλυτα ρεαλιστική για ένα πραγματικό σύστημα μονόποδου ρομπότ, το σύστημα ελέγχου του οποίου συντονίζεται από έναν ψηφιακό υπολογιστή (π.χ PC-104, Beagleboard) που λειτουργεί σε κάποια συχνότητα. Συγκεκριμένα, για την ορθή υλοποίησή του απαιτείται αφενός η καταγραφή και αποθήκευση του χρόνου t από τον ψηφιακό υπολογιστή και αφετέρου η καταγραφή και αποθήκευση των μεγεθών x , y , l , γ , F_g και F_l από το σύνολο των αισθητήρων του συστήματος. Με αριθμητική διαφόριση των δεδομένων από τους αισθητήρες μπορούν επίσης να βρεθούν και να καταγραφούν τα αναγκαία μεγέθη \dot{x} , \dot{y} , \dot{l} και $\dot{\gamma}$. ενώ από κινηματικούς συσχετισμούς μπορούν να υπολογιστούν τα μεγέθη x_{fi} , \dot{x}_{fi} , y_{fi} , \dot{y}_{fi} . Επίσης, θα καταγράφεται και η τιμή ροπής τ που δίνεται ως εντολή στον επενεργητή σε κάθε κύκλο του κεντρικού βρόχου ελέγχου που θα υλοποιείται στον υπολογιστή. Η κάθετη δύναμη αλληλεπίδρασης από το έδαφος F_g είναι αυτή που θα καθορίζει τη διαδοχή των φάσεων, ώστε ο ελεγκτής να γνωρίζει σε ποια φάση βρίσκεται το ρομπότ. Έτσι, μπορεί για παράδειγμα να χρησιμοποιηθεί ένας δείκτης (*phase*) ο οποίος θα είναι ίσος με «1» αν το ρομπότ βρίσκεται σε φάση πτήσης ($F_g = 0$) και ίσος με «2» αν το ρομπότ βρίσκεται σε φάση εδάφους ($F_g > 0$). Η μετάβαση του *phase* από «2» σε «1» θα καθορίζει την απογείωση (liftoff) ενώ η μετάβασή του από «1» σε «2» θα καθορίζει την προσγείωση (touchdown). Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μετρητής (*gait_counter*) που θα μετρά τον αριθμό των διασκελισμών που έχουν

πραγματοποιηθεί και θα αυξάνεται κάθε φορά που πραγματοποιείται απογείωση, όπως περιγράφηκε πριν.

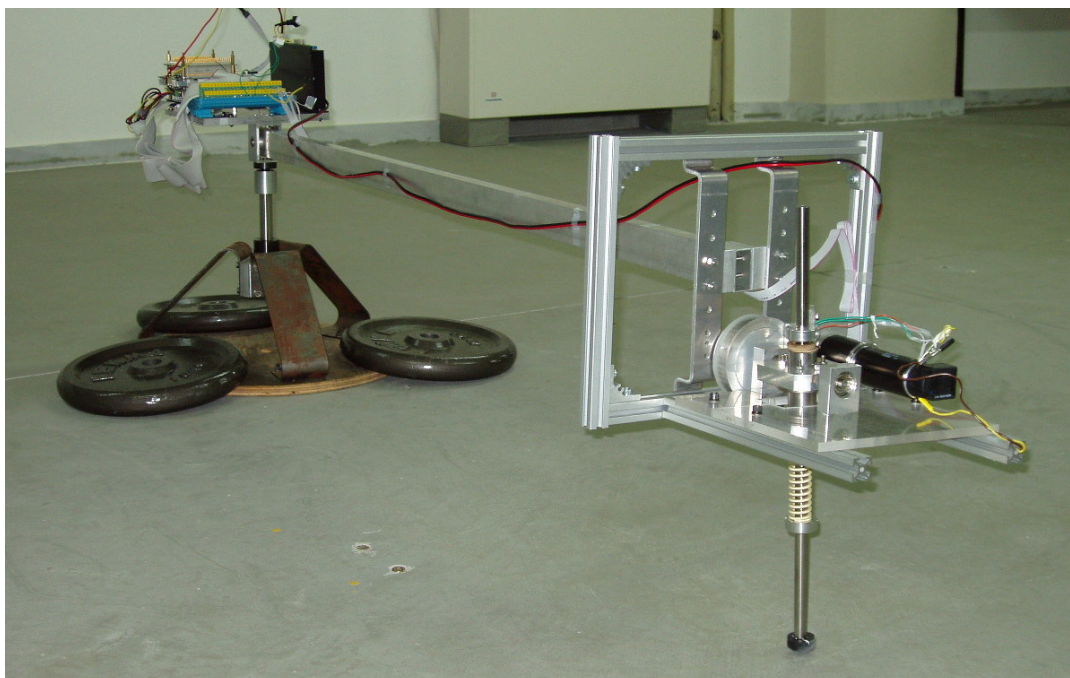
Συνοπτικά, δηλαδή, σε κάθε κύκλο του κεντρικού βρόχου ελέγχου που θα υλοποιείται στον ψηφιακό υπολογιστή θα γίνεται καταγραφή και αποθήκευση των μεγεθών t , x , \dot{x} , y , \dot{y} , x_{ft} , \dot{x}_{ft} , y_{ft} , \dot{y}_{ft} , l , \dot{l} , γ , $\dot{\gamma}$, τ , F_g , F_t , *phase* και *gait_counter*. Ο ελεγκτής x-MP θα καλείται κάθε φορά που θα υπάρχει αύξηση κατά 1 του *gait_counter* και θα κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς με βάση τα παραπάνω μεγέθη που αποθηκεύονται σε κάθε κύκλο του κεντρικού βρόχου και τη μεθοδολογία των προηγούμενων παραγράφων.

Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται η κατασκευή της πειραματικής διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας και την επαλήθευση των συμπερασμάτων που αντλήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο.

5 Κατασκευή πειραματικής διάταξης

5.1 Παρουσίαση των βασικών στοιχείων της πειραματικής διάταξης

Στο εργαστήριό μας, έχει ήδη χρησιμοποιηθεί η πειραματική διάταξη που φαίνεται στο Σχ. 5-1 για την επιβεβαίωση των συμπερασμάτων του ελεγκτή ΜΡ σε άκαμπτο έδαφος [5], η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς και στην παρούσα εργασία. Η διάταξη διαθέτει μια σταθερή κεντρική βάση η οποία συνδεόταν με το ρομπότ και επέτρεπε την περιστροφή του γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Η σύνδεση με το ρομπότ γινόταν μέσω μιας δοκού, η οποία προσαρμοζόταν με πάκτωση στο ρομπότ και με άρθρωση στην κεντρική βάση, επιτρέποντας έτσι και την κατακόρυφη κίνηση του ρομπότ. Αντίθετα, η σύνδεση της δοκού με το ρομπότ με πάκτωση δεν επέτρεπε την κίνηση πρόνευσης (pitch) του σώματος του ρομπότ, ώστε η κίνηση του σώματος να ανταποκρίνεται στο 2D μοντέλο που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 2.3. Σχεδόν ολόκληρη η συγκεκριμένη κατασκευή είχε γίνει με αλουμίνιο, για μικρότερο βάρος και αδράνεια. Αντίθετα, το πόδι, το οποίο παραλαμβάνει όλες τις δυνάμεις, ήταν χαλύβδινο.



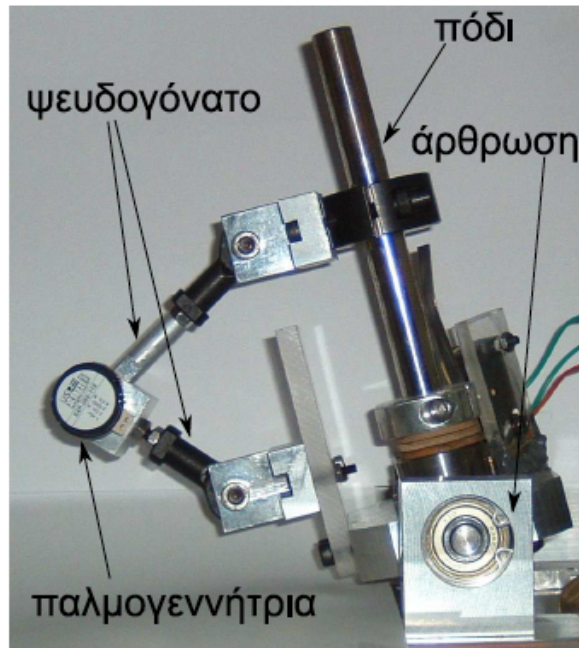
Σχήμα 5-1: Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης.

Λόγω του μεγάλου μήκους της δοκού και της σχετικά μικρής κίνησης του ποδιού σε κάθε διασκελισμό, μπορεί να θεωρηθεί ότι μια τέτοια διάταξη είναι η πλέον κατάλληλη

για την εξομοίωση της κίνησης του μονόποδου ρομπότ σε ένα κατακόρυφο επίπεδο κίνησης (2D sagittal plane), σύμφωνα με τη θεωρία που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Ανάλογες προσεγγίσεις έχουν αναφερθεί και στη βιβλιογραφία [29], [31]. Για το λόγο αυτό, η συγκεκριμένη ιδέα με τη χρήση μιας δοκού για τη σύνδεση του ρομπότ με μια σταθερή βάση θα χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα εργασία, με ανάλογο τρόπο όπως στο Σχ. 5-1. Μάλιστα, η διάταξη του ποδιού του ρομπότ παραμένει ίδια, ενώ τροποποιείται η κατασκευή του κύριου σώματος του ρομπότ, με τρόπο που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

Η επενέργεια στο ρομπότ γίνεται μέσω ενός ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος με κατάλληλο μειωτήρα στροφών. Ο κινητήρας είναι της Maxon, τύπου RE35, ισχύος 90W, μέγιστου συνεχούς ρεύματος 3.36A, ονομαστικής τάσης 24V, μέγιστης συνεχόμενης ροπής 0.0933Nm. Ο πλανητικός μειωτήρας είναι επίσης της Maxon, τύπου GP42C και είναι ενσωματωμένος με τον κινητήρα. Ο λόγος μείωσης στροφών του πλανητικού μειωτήρα είναι 26:1, ενώ χρησιμοποιείται επιπλέον και μια τροχαλία με λόγο μείωσης 2:1 για τη σύνδεση του συστήματος κινητήρα-μειωτήρα με το πόδι.

Το σύστημα αίσθησης στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο αισθητήρες και συγκεκριμένα δύο παλμογεννήτριες (incremental encoders) που μετρούν τη συμπίεση του ελατηρίου στο πόδι και τη γωνία που σχηματίζει το πόδι σε σχέση με την κατακόρυφο. Ο encoder που μετρά τη γωνία του ποδιού είναι ενσωματωμένος πάνω στον κινητήρα και είναι τύπου HEDS-5540, της εταιρίας HP, με δύο κανάλια και επιπλέον ένα τρίτο ειδικό κανάλι index. Παράγει 500 παλμούς ανά κύκλο, με ισοδύναμη διακριτική ικανότητα 2000 παλμών ανά κύκλο (quadrature encoder). Η μέτρηση της συμπίεσης του ποδιού γίνεται μέσω ενός ειδικού βοηθητικού μηχανισμού που ονομάζεται **ψευδογόνατο** [5] και φαίνεται στο Σχ. 5-2. Το ψευδογόνατο συνδέει το ακίνητο μέρος της πρισματικής άρθρωσης του ποδιού με το κινούμενο μέρος. Στην ένωση των δύο συνδέσμων του ψευδογονάτου υπάρχει ο δεύτερος encoder, της εταιρίας E4P, με 2 κανάλια και ένα τρίτο ειδικό κανάλι index. Ο συγκεκριμένος encoder παράγει 360 παλμούς ανά κύκλο με ισοδύναμη διακριτική ικανότητα 1440 παλμών ανά κύκλο (quadrature encoder). Η μέτρηση της συμπίεσης του ποδιού γίνεται έμμεσα μέσω της μέτρησης της γωνίας στο ψευδογόνατο και της γεωμετρίας του μηχανισμού. Όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν προηγούμενα υπήρχαν και στην αρχική πειραματική διάταξη.



Σχήμα 5-2: Ο μηχανισμός του ψευδογονάτου.

Πέρα από αυτά, ωστόσο, πρέπει να προστεθούν και νέα στοιχεία προκειμένου να πραγματοποιηθούν επιτυχή πειράματα σε έδαφος με υποχωρητικότητα αλλά και να μπορέσει να λειτουργήσει ο ελεγκτής x-MP. Αρχικά, απαιτείται η χρήση ενός αισθητήρα δύναμης (force sensor). Ο αισθητήρας δύναμης που χρησιμοποιείται είναι ένας αισθητήρας 5 αξόνων δύναμης/ροπής (5-axis force/torque sensor), που έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριό μας.

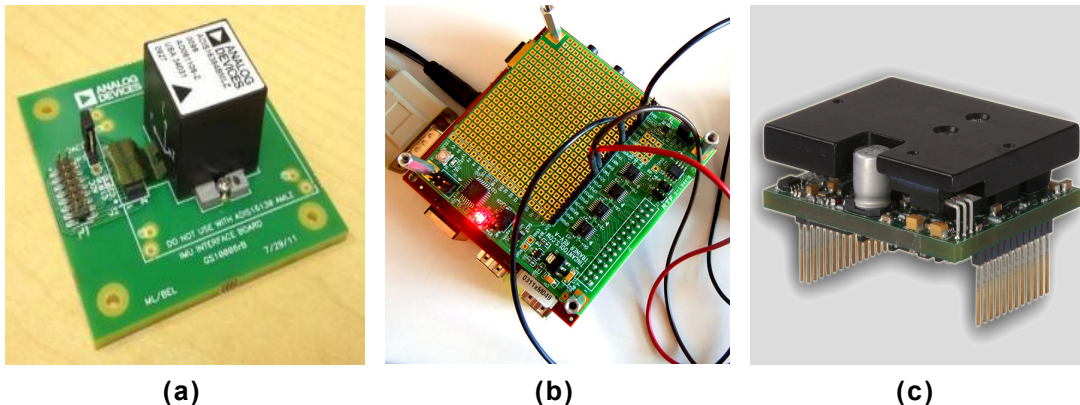
Επιπλέον, για την καταγραφή της θέσης του σώματος του ρομπότ στο κατακόρυφο επίπεδο κίνησης χρησιμοποιείται ένας αδρανειακός αισθητήρας μέτρησης (Inertial Measurement Unit – IMU), τύπου ADIS16364, της εταιρίας Analog Devices που φαίνεται στο Σχ. 5-3(a). Ο συγκεκριμένος αδρανειακός αισθητήρας είναι 6 βαθμών ελευθερίας και διαθέτει τρία γυροσκόπια (gyroscopes) και τρία επιταχυνσιόμετρα (accelerometers), ενώ λειτουργεί με συχνότητα δειγματοληψίας 820 δειγμάτων/δευτερόλεπτο. Η συγκεκριμένη συχνότητα έχει ιδιαίτερη σημασία να είναι υψηλή στην περίπτωσή μας, μιας και απαιτείται διαρκής παρακολούθηση της κρούσης του ποδιού με το έδαφος, η οποία λαμβάνει χώρα σε μόλις μερικά ms. Η χρήση της IMU κρίνεται απαραίτητη ώστε, σε συνδυασμό με τις δύο παλμογεννήτριες που αναφέρθηκαν προηγούμενα, να είναι δυνατή η καταγραφή της οριζόντιας και κατακόρυφης θέσης του πέλματος σε όλη τη

διάρκεια της κίνησης, μέσω κινηματικών συσχετισμών. Έτσι, θα είναι δυνατή η μέτρηση της βύθισης του πέλματος στο έδαφος, ενώ θα μπορεί να εκτιμηθεί και με καλή ακρίβεια το προφίλ εδάφους, με βάση τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 4.4.

Ο κεντρικός υπολογιστής του συστήματος του μονόποδου ρομπότ είναι τύπου Beagleboard-xM, με επεξεργαστή ARM Cortex A8 και συχνότητα 1GHz. Ο συγκεκριμένος υπολογιστής δεν διαθέτει σκληρό δίσκο ή άλλα μηχανικά μέρη, οπότε κρίνεται κατάλληλος για τέτοιες εφαρμογές με συχνές και έντονες ταλαντώσεις. Αντίθετα, τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μια micro-SD κάρτα (u-SD) χωρητικότητας 4GB. Από αυτήν την κάρτα φορτώνεται και το λειτουργικό του σύστημα, το οποίο είναι Linux (Ubuntu 12.04). Στον πυρήνα Linux προστέθηκαν τα απαραίτητα patches, προκειμένου να ενσωματωθούν οι drivers για τα πρωτόκολλα επικοινωνίας SPI και I²C.

Ο υπολογιστής Beagleboard-xM διαθέτει, έτσι, τη δυνατότητα να λάβει και να στείλει σήματα. Ωστόσο το επίπεδο τάσης που μπορεί να λάβει και να στείλει είναι μόλις 1.8V, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης δέχονται και στέλνουν σήματα στα 3.3V. Για το λόγο αυτό, προστέθηκε στη διάταξη μια επιπλέον πλακέτα πάνω από το Beagleboard-xM, η οποία είναι επιφορτισμένη με τη μετατροπή των σημάτων από 1.8V σε 3.3V και αντίστροφα (level translation). Η πλακέτα αυτή ονομάζεται Trainer-xM Board. Το σύστημα Beagleboard-xM και Trainer-xM Board φαίνεται στο Σχ. 5-3(b). Εκτός από το level translation, η συγκεκριμένη πλακέτα επέκτασης (expansion board) διαθέτει έναν επιπλέον επεξεργαστή Atmega328.

Η οδήγηση του κινητήρα γίνεται από έναν ενισχυτή τύπου DZRALTE-012L080, της εταιρίας Advanced Motion Controls και φαίνεται στο Σχ. 5-3(c). Το κύριο πλεονέκτημα του ενισχυτή είναι η δυνατότητα υψηλού ρεύματος σε συνδυασμό με το πολύ μικρό φυσικό του μέγεθος. Συγκεκριμένα, ο ενισχυτής μπορεί να τροφοδοτεί τον κινητήρα συνεχώς με ρεύμα μέχρι 6A, ενώ για πολύ μικρό διάστημα μπορεί να φτάσει και τα 12A. Παράλληλα, η μέγιστη διάστασή του φτάνει μόλις τα 70mm. Επίσης, στα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου ενισχυτή συγκαταλέγεται το γεγονός ότι παρέχεται από την εταιρία ειδικό λογισμικό για εγκατάσταση σε PC, μέσω του οποίου γίνεται αυτόματα ο προγραμματισμός των κερδών ενίσχυσης. Έτσι, ο ενισχυτής μπορεί να προγραμματιστεί χωρίς τη χρήση ποτενσιόμετρων ή άλλων μηχανικών στοιχείων και να λειτουργήσει σε mode θέσης, ταχύτητας ή ρεύματος. Στην αναπτυσσόμενη πειραματική διάταξη, ο ρόλος του περιορίζεται σε αυτόν του απλού ενισχυτή ρεύματος.



Σχήμα 5-3: Βασικά στοιχεία πειραματικής διάταξης: (a) Αδρανειακός αισθητήρας (IMU), (b) Σύστημα Beagleboard-xM και Trainer-xM Board, (c) Ενισχυτής DZRALTE-012L080.

Μεταξύ του ενισχυτή (motor drive) και του Beagleboard-xM παρεμβάλλεται ένας ψηφιο-αναλογικός μετατροπέας (Digital to Analog Converter – DAC) τύπου MAX517, της εταιρίας Maxim. Ο συγκεκριμένος DAC δέχεται ως είσοδο ένα ψηφιακό σήμα εύρους 0-255 μέσω επικοινωνίας I²C και παράγει στην έξοδό του μια αναλογική τάση 0-5V σύμφωνα με την είσοδο που δέχθηκε.

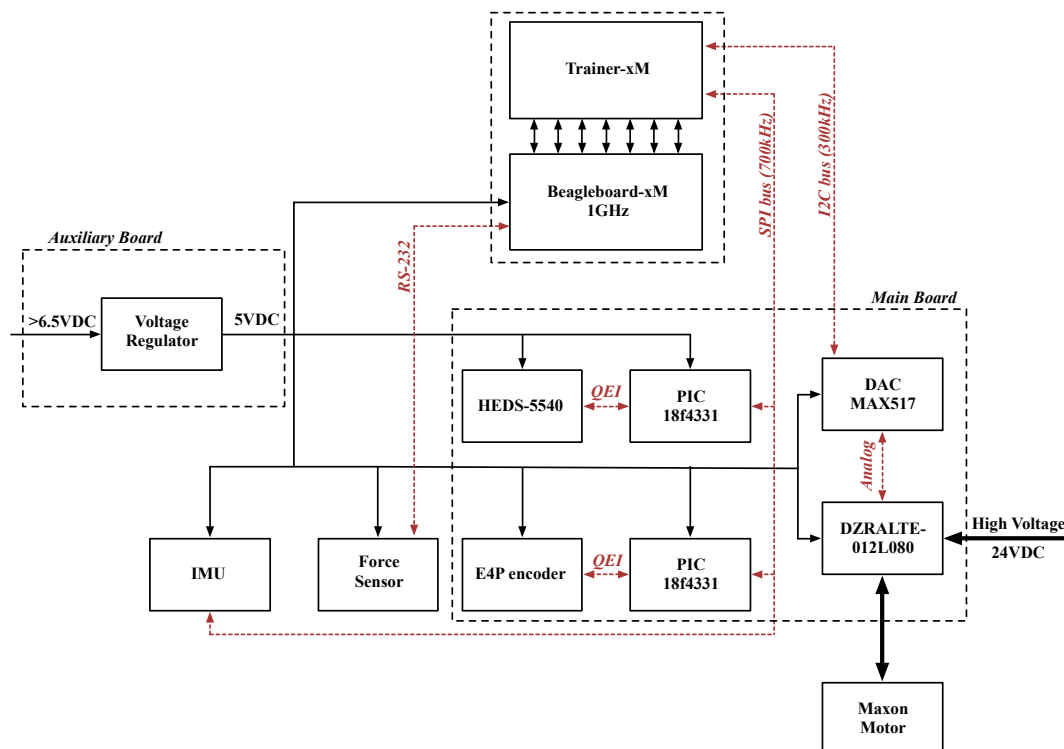
Τέλος, τη διάταξη συμπληρώνουν 2 μικροεπεξεργαστές τύπου PIC18f4331, της εταιρίας Microchip. Οι συγκεκριμένοι μικροεπεξεργαστές χρησιμοποιούνται για την ανάγνωση των δύο encoders που αναφέρθηκαν προηγουμένα, για τη μέτρηση της γωνίας του ποδιού αλλά και της συμπίεσης του ελατηρίου, μιας και διαθέτουν έτοιμη διεπαφή για ανάγνωση παλμογεννήτριας. Το σήμα που συλλέγει καθένας από τους 2 μικροεπεξεργαστές αποστέλλεται, στη συνέχεια, ψηφιακά στο Beagleboard-xM.

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο σύνδεσης των παραπάνω στοιχείων και την κατασκευή των απαραίτητων πλακετών για την επιτυχή λειτουργία της ηλεκτρονικής διάταξης παρατίθενται στην επόμενη παράγραφο. Σημειώνεται ότι το σύνολο των παραπάνω στοιχείων αποκτήθηκε με ιδιαίτερα χαμηλότερο κόστος σε σχέση με το σύνολο των ηλεκτρονικών στοιχείων που υπήρχαν στην παλιά πειραματική διάταξη του Σχ. 5-1. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στην παλιά πειραματική διάταξη γινόταν χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή τύπου PC-104, του οποίου το κόστος πλησιάζει τα 1000\$. Αντίθετα, το Beagleboard-xM που αντικατέστησε το PC-104 κόστισε μόνο 150\$. Η βελτίωση της παλιάς πειραματικής διάταξης και η κατασκευή μιας εξίσου αξιόπιστης νέας διάταξης με σημαντικά χαμηλότερο κόστος ήταν ένας από τους πρωταρχικούς

στόχους αυτής της εργασίας. Τα datasheets των βασικών στοιχείων της διάταξης παρατίθενται στο Παράρτημα Γ.

5.2 Σχεδιασμός ηλεκτρονικής διάταξης

Στο Σχ. 5-4 παρουσιάζεται συνοπτικά η διάταξη και ο τρόπος αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών στοιχείων, όπως τελικά σχεδιάστηκε.



Σχήμα 5-4: Αποτύπωση σχεδιασμού ηλεκτρονικής διάταξης.

Όπως είναι λογικό, στην ηλεκτρονική διάταξη που κατασκευάστηκε πρωτεύοντα ρόλο παίζει ο κεντρικός υπολογιστής Beagleboard-xM. Σε αυτόν φορτώνονται σε γλώσσα C ή C++ όλα τα προγράμματα ελέγχου για το μονόποδο ρομπότ, εκεί καταλήγουν όλα τα σήματα ανάδρασης, από εκεί στέλλονται οι εντολές προς τον περιστροφικό επενεργητή. Έτσι, στην πλακέτα Trainer-xM, που λειτουργεί ως μετατροπέας του επιπέδου τάσης για το Beagleboard-xM, καταλήγουν τόσο τα σήματα από τον αδρανειακό αισθητήρα όσο και τα σήματα από τους 2 PIC μικροεπεξεργαστές που διαβάζουν τις δύο παλμογεννήτριες χρησιμοποιώντας έτοιμο interface (Quadrature Encoder Interface – QEI). Και τα τρία αυτά στοιχεία αποστέλλουν δεδομένα

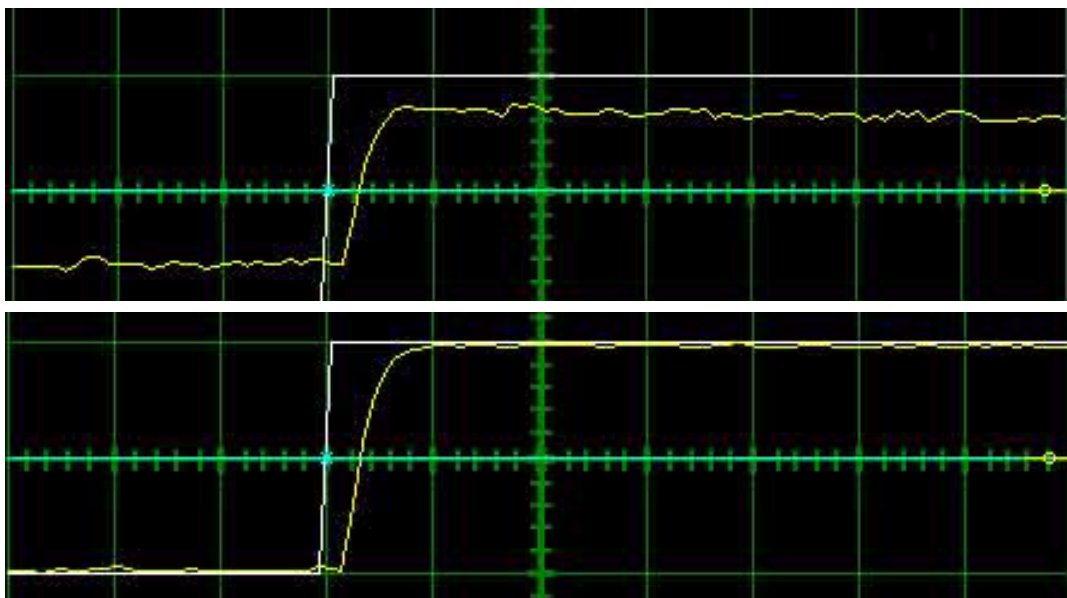
χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο επικοινωνίας SPI. Για τη λειτουργία του πρωτοκόλλου SPI μεταξύ δύο συσκευών που ανταλλάσσουν δεδομένα, απαιτείται η μία συσκευή να λειτουργεί ως Master και η δεύτερη συσκευή ως Slave. Ο Master είναι αυτός που καθορίζει το ρυθμό της επικοινωνίας, δημιουργώντας το ρολόι (clock generation) και ενεργοποιώντας το Slave. Αντίθετα, ο Slave λαμβάνει το σήμα του ρολογιού και δέχεται ή στέλνει δεδομένα με παθητικό τρόπο ανάλογα με τις εντολές του Master. Στην παρούσα ηλεκτρονική διάταξη, το Beagleboard-xM λειτουργεί ως Master με πολλαπλούς Slaves και παράγει ταχύτατο ρολόι (clock) συχνότητας 700kHz, με αποτέλεσμα η επικοινωνία με κάθε Slave να ολοκληρώνεται το συντομότερο δυνατό.

Αντίθετα, ο αισθητήρας δύναμης (force sensor) μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με το Beagleboard-xM χωρίς την παρεμβολή του Trainer-xM, μέσω της σειριακής θύρας που αυτό διαθέτει. Συγκεκριμένα, ο force sensor μπορεί να αποστείλει δεδομένα με συχνότητα 115200 baud rate. Για τη λειτουργία του ελεγκτή x-MP χρειάζονται οι τιμές δύναμης στους 3 κύριους άξονες (x-y-z) και για αυτόν το λόγο διαβάζονται διαδοχικά από το Beagleboard-xM με τη βοήθεια της σειριακής θύρας RS-232.

Η επικοινωνία του Beagleboard-xM με τον ψηφιο-αναλογικό μετατροπέα (DAC) γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας I²C. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο απαιτεί και πάλι έναν Master (Beagleboard-xM) και έναν Slave (DAC), ωστόσο, σε σχέση με το πρωτόκολλο SPI, η επικοινωνία είναι ελαφρώς πιο αργή μιας και ο Master πρέπει να στείλει πρώτα τη διεύθυνση (address) του Slave προκειμένου να τον ενεργοποιήσει. Γενικά, το πρωτόκολλο I²C χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου εμπλέκεται σημαντικός αριθμός συσκευών και η διευθυνσιοδότηση μπορεί να λύσει τυχόν προβλήματα. Η συχνότητα στην οποία λειτουργεί το πρωτόκολλο I²C στο Beagleboard-xM είναι στα 300kHz. Έτσι, το ψηφιακό σήμα 0-255 που αποστέλλεται από το Beagleboard-xM μετατρέπεται σε αναλογική τάση 0-5V από τον DAC και εισάγεται στον ενισχυτή DZRALTE-012L080.

Στον ενισχυτή, αυτή η αναλογική τάση μετατρέπεται σε εντολή ρεύματος (και άρα ροπής) προς τον κινητήρα. Συγκεκριμένα, ο ενισχυτής υλοποιεί έναν εσωτερικό βρόχο ρεύματος για την επίτευξη της επιθυμητής τιμής ρεύματος στον κινητήρα. Για το λόγο αυτό, τα κέρδη του βρόχου ρεύματος ρυθμίζονται εκ των προτέρων από το ειδικό λογισμικό που παρέχει η εταιρία του ενισχυτή, προκειμένου να υπάρχει μια αρκετά γρήγορη απόκριση. Ο συγκεκριμένος εσωτερικός βρόχος ρεύματος λειτουργεί σε αρκετά

υψηλή συχνότητα (περίπου 500Hz). Στο Σχ. 5-5 εμφανίζονται δύο αποκρίσεις του βρόχου ρεύματος, όπως αποτυπώθηκαν από τον εσωτερικό παλμογράφο του ενισχυτή κατά τη φάση ρύθμισης των κερδών.



Σχήμα 5-5: Απόκριση του εσωτερικού βρόχου ελέγχου ρεύματος στον ενισχυτή DZRALTE-012L080: (a) Κακή ρύθμιση των κερδών, (b) Καλή ρύθμιση των κερδών.

Για την αποστολή της σωστής εντολής ρεύματος προς τον ενισχυτή (και άρα προς τον ίδιο τον κινητήρα), λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει ο συγκεκριμένος κινητήρας. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ο χρησιμοποιούμενος επενεργητής της Maxon μπορεί να αποδώσει μέγιστη ροπή ίση με 0.0933Nm. Αν ληφθεί υπόψη και η συνολική μείωση λόγω πλανητικού μειωτήρα στροφών και τροχαλίας της οποίας η τιμή είναι 52:1, προκύπτει ότι η μέγιστη ροπή (σε απόλυτη τιμή) που μπορεί να αποδοθεί στο πόδι είναι ίση με $\tau_{sat} = 4.8516\text{Nm}$. Έτσι, κάθε εντολή ροπής μετατρέπεται σε έναν ακέραιο αριθμό (*val*) στο εύρος 0-255 σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

$$val = 255 \cdot \left(1 + \frac{\tau - \tau_{sat}}{2 \cdot \tau_{sat}} \right) \quad (5-1)$$

και αποστέλλεται στον DAC. Ο DAC μετατρέπει την παραπάνω τιμή της μεταβλητής *val* σε αναλογική τάση στο εύρος 0-5V, που είναι και η τελική είσοδος στον ενισχυτή DZRALTE-012L080. Αντίστοιχα, ο ενισχυτής αυτός έχει προγραμματιστεί έτσι ώστε να τροφοδοτεί τον κινητήρα με μέγιστο θετικό ρεύμα αν η τιμή της αναλογικής τάσης είναι

5V, μέγιστο αρνητικό ρεύμα αν η τιμή της αναλογικής τάσης είναι 0V και μηδενικό ρεύμα αν η τιμή της αναλογικής τάσης είναι 2.5V.

Όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διάταξη λειτουργούν με τάση 5V. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η χρήση ενός βοηθητικού ρυθμιστή τάσης (voltage regulator) που λειτουργεί στα 5V. Η χρήση του ρυθμιστή τάσης κρίνεται αναγκαία μιας και χρησιμοποιούνται μεγάλα καλώδια τροφοδοσίας όπου η πτώση τάσης λόγω εσωτερικών αντιστάσεων του καλωδίου και μεγάλων ρευμάτων μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του συστήματος. Στην παρούσα ηλεκτρονική διάταξη, χρησιμοποιείται ο ρυθμιστής τάσης LT1085, της εταιρίας Linear Technologies, που μπορεί να διαχειριστεί ρεύμα μέχρι 7.5A, μέγεθος που υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Για τη σωστή λειτουργία του, ο ρυθμιστής τάσης πρέπει να τροφοδοτείται με τάση εισόδου μεγαλύτερη των 6.5V. Προφανώς, ο ρυθμιστής τάσης παράγει την τάση τροφοδοσίας για όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία και, για το λόγο αυτό, προηγείται έναντι όλων.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 5-4, επιλέχθηκε να κατασκευαστεί μια μεγάλη πλακέτα που θα εξυπηρετεί τη λειτουργία των πιο σημαντικών στοιχείων της διάταξης (Main Board). Αντίθετα, λόγω του ότι ο ρυθμιστής τάσης είναι ένα ανεξάρτητο στοιχείο που καθορίζει το επίπεδο τάσης για όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά, προτιμήθηκε να βρίσκεται σε μια χωριστή πλακέτα (Auxiliary Board), από όπου θα γίνεται και η τροφοδοσία του αδρανειακού αισθητήρα (IMU) αλλά και του αισθητήρα δύναμης, που τοποθετούνται χωριστά από όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία (ο αδρανειακός αισθητήρας κοντά στην περιστροφική άρθρωση του ρομπότ και ο αισθητήρας δύναμης στο πέλμα του ρομπότ). Συνολικά, δηλαδή, η όλη ηλεκτρονική διάταξη αποτελείται από τα ακόλουθα ηλεκτρονικά στοιχεία:

- i. Main Board
- ii. Auxiliary Board
- iii. Σύστημα Beagleboard-xM και Trainer-xM Board
- iv. Inertial Measurement Unit (IMU)
- v. Force sensor
- vi. Σύστημα παλμογεννήτριας HEDS-5540, κινητήρα, πλανητικού μειωτήρα
- vii. Ψευδογόνατο με παλμογεννήτρια

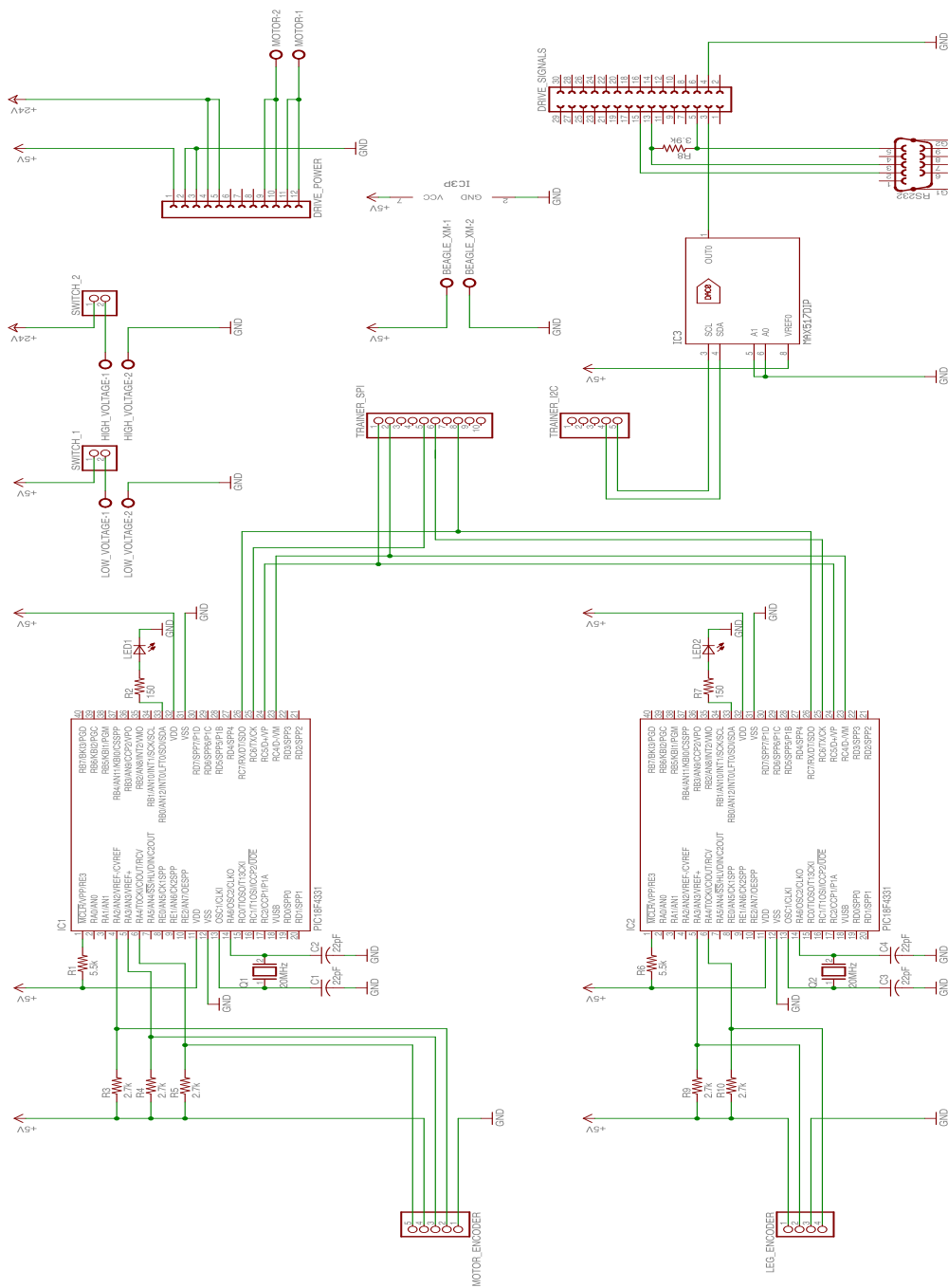
Ο τρόπος σχεδίασης και κατασκευής των δύο πλακετών (Main Board, Auxiliary Board) παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

5.3 Σχεδίαση και κατασκευή ηλεκτρονικών πλακετών

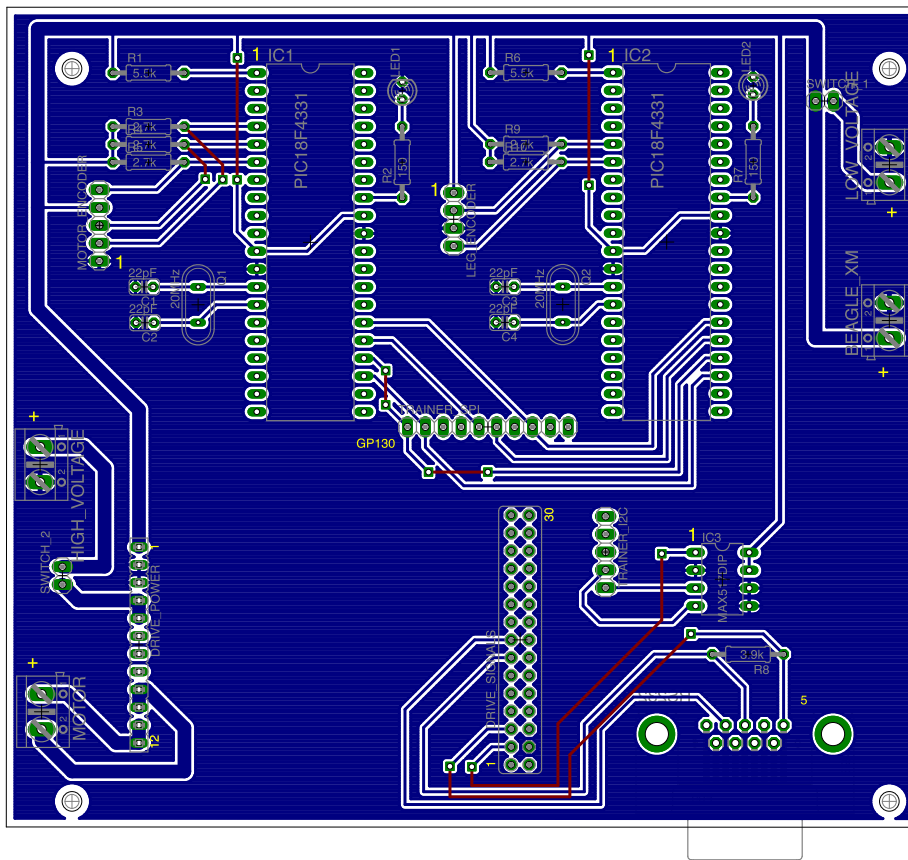
Για τη σχεδίαση των δύο πλακετών (Main Board και Auxiliary Board) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Eagle.

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, στη Main Board τοποθετήθηκαν οι 2 PIC για την ανάγνωση των 2 παλμογεννητριών του συστήματος, ο ενισχυτής DZRALTE-012L080 και ο DAC MAX517. Επίσης, από τη Main Board τροφοδοτείται το σύστημα Beagleboard-xM και Trainer-xM, καθώς και οι 2 παλμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται, ενώ, με τη βοήθεια καλωδίων, εκεί γίνεται η ανταλλαγή σημάτων με το Beagleboard-xM μέσω του SPI bus, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5-4. Ακόμη, από τη Main Board γίνεται η τελική τροφοδοσία του κινητήρα (μέσω του ενισχυτή), ενώ έχει τοποθετηθεί και ένας προσαρμογέας σειριακής θύρας (RS-232) για τον προγραμματισμό του ενισχυτή μέσω του ειδικού λογισμικού που παρέχει η εταιρία. Τέλος, η συγκεκριμένη πλακέτα περιλαμβάνει και το σύνολο των βοηθητικών στοιχείων (πυκνωτές, αντιστάσεις, pins κλπ.) που απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία της ηλεκτρονικής διάταξης. Η Main Board δέχεται ως είσοδο μια χαμηλή τάση (5V) την οποία παράγει ο ρυθμιστής τάσης στην Auxiliary Board και μια υψηλή τάση (24V) για τη λειτουργία του κινητήρα. Το σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας φαίνεται στο Σχ. 5-6, ενώ το σχέδιο της πλακέτας στο Σχ. 5-7.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 5-7, η κατασκευή της πλακέτας έγινε σε 2 επίπεδα (layers): ένα στην πάνω (upper layer – κόκκινο χρώμα) και ένα στην κάτω όψη (bottom layer – μπλε χρώμα) της πλακέτας. Για καλύτερη γείωση του συνόλου του συστήματος, η κοινή γείωση τοποθετήθηκε σε ολόκληρο το bottom layer, σε ασφαλή απόσταση από τις όποιες διαδρομές (tracks) υπάρχουν εκεί. Για την προστασία των δύο layers, τοποθετήθηκε η κατάλληλη μάσκα (solder mask). Η δε επικοινωνία των 2 layers γίνεται μέσω ειδικών στοιχείων, που ονομάζονται vias και στην παρούσα εφαρμογή είναι διαμέτρου 0.4mm. Σημειώνεται, τέλος, ότι το πλάτος των tracks διαμορφώθηκε μεγαλύτερο στα κανάλια τροφοδοσίας των διαφόρων συσκευών και μικρότερο στα κανάλια σημάτων, που δεν έχουν υψηλές απαιτήσεις σε ρεύμα.



Σχήμα 5-6: Σχηματικό διάγραμμα Main Board.

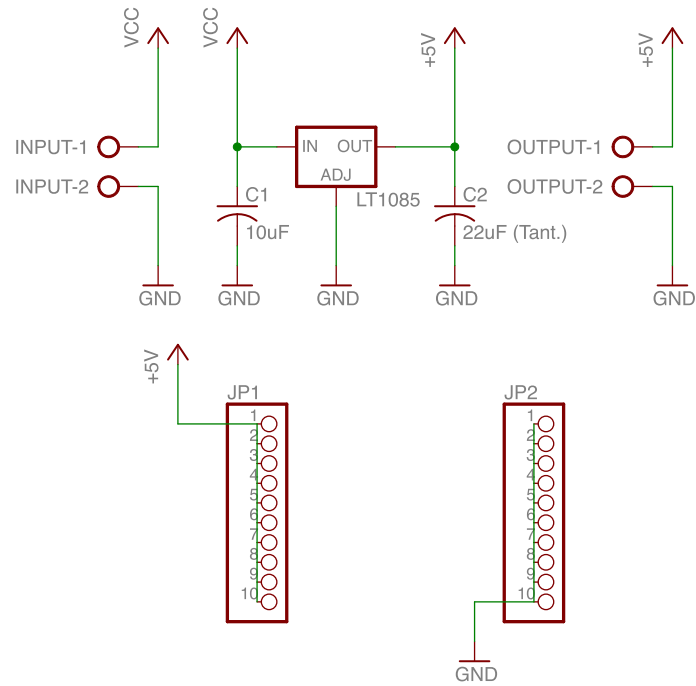


Σχήμα 5-7: Τελικό σχέδιο Main Board.

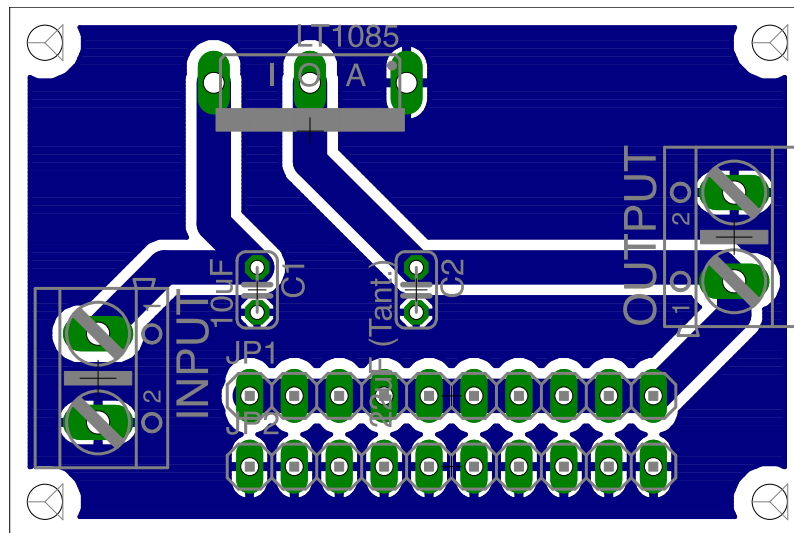
Με ανάλογο τρόπο έγινε η κατασκευή και της βοηθητικής πλακέτας τροφοδοσίας του συστήματος με χαμηλή τάση 5V (Auxiliary Board). Στη συγκεκριμένη πλακέτα τοποθετήθηκε ο ρυθμιστής τάσης LT1085 μαζί με τους πυκνωτές που απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία του και τα στοιχεία εισόδου και εξόδου τάσης. Παράλληλα, τοποθετήθηκε ένα σύνολο pins, ώστε να είναι εύκολη η διανομή δυναμικού γείωσης ή 5V σε όλο το ηλεκτρονικό σύστημα. Από αυτά τα pins τροφοδοτούνται τόσο ο αδρανειακός αισθητήρας (IMU) όσο και ο αισθητήρας δύναμης.

Σε αντίθεση με τη Main Board, η Auxiliary Board αναπτύχθηκε μόνο σε ένα επίπεδο (bottom layer). Και πάλι όμως, η κοινή γείωση τοποθετήθηκε σε ολόκληρο το bottom layer, σε ασφαλή απόσταση από όποια διαδρομή (track) υπάρχει εκεί. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, το μέγεθος των tracks επιλέχθηκε να είναι αρκετά μεγάλο (0.076in), μιας και πρόκειται για κανάλια τροφοδοσίας που διαρρέονται από υψηλά ρεύματα. Το σχηματικό

διάγραμμα της πλακέτας φαίνεται στο Σχ. 5-8, ενώ το σχέδιο της πλακέτας φαίνεται στο Σχ. 5-9.



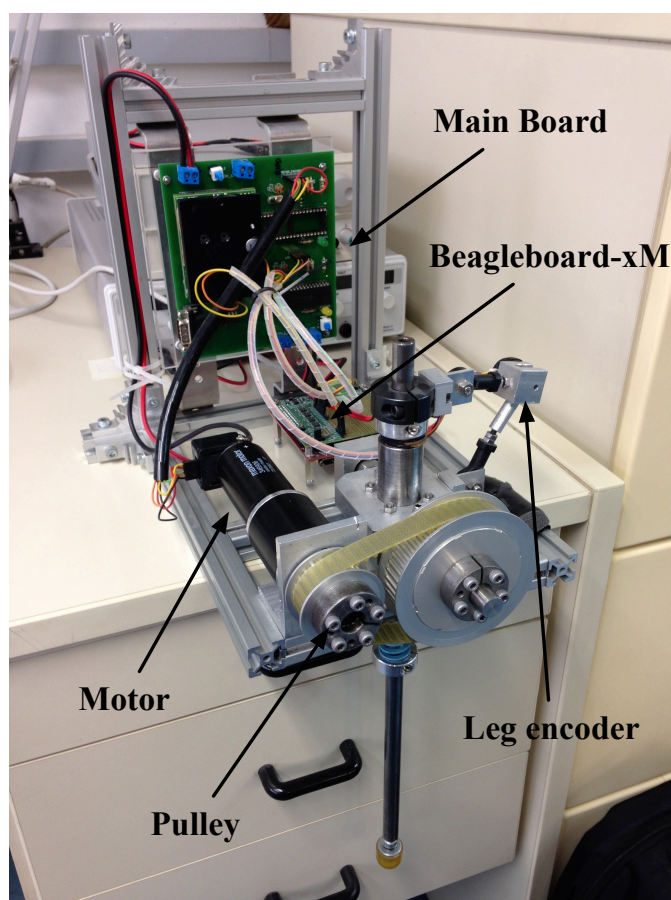
Σχήμα 5-8: Σχηματικό διάγραμμα Auxiliary Board.



Σχήμα 5-9: Τελικό σχέδιο Auxiliary Board.

5.4 Επίδειξη λειτουργίας της ηλεκτρονικής διάταξης

Στην παλιά διάταξη του μονόποδου ρομπότ, που αναφέρθηκε στην Παράγραφο 5.1, όλα τα ηλεκτρονικά βρίσκονταν εκτός της κύριας διάταξης του ρομπότ, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5-1. Προκειμένου να δοθεί μια όσο το δυνατό πιο ρεαλιστική απεικόνιση της συμπεριφοράς ενός ρομποτικού συστήματος με πόδια που κινείται αυτόνομα σε ένα άγνωστο έδαφος, αποφασίστηκε ότι όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα πρέπει να τοποθετηθούν πάνω στο κύριο σώμα του ρομπότ. Μια τέτοια πρώτη προσπάθεια αποτυπώνεται στο Σχ. 5-10.



Σχήμα 5-10: Τρέχον setup μονόποδου ρομπότ.

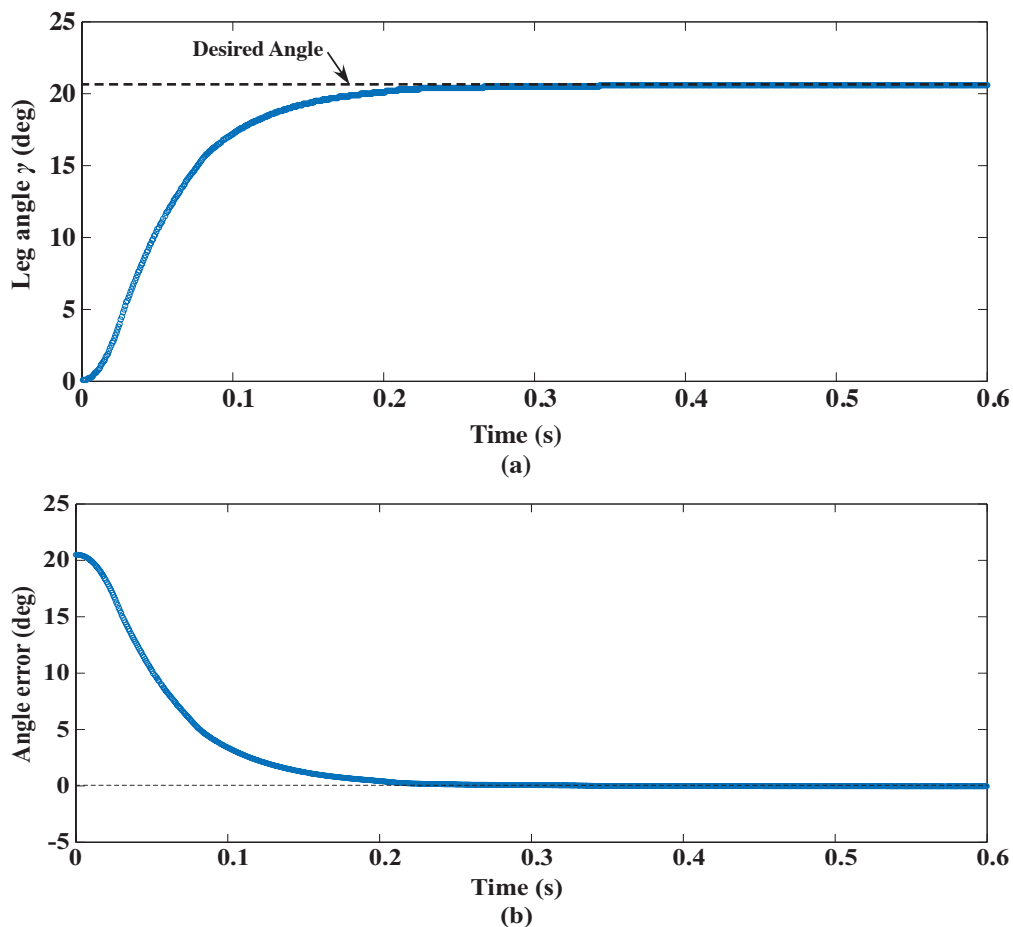
Πάνω στο ρομπότ έχουν τοποθετηθεί το σύστημα Beagleboard-xM και Trainer-xM, η Main Board, το σύστημα κινητήρα-πλανητικού μειωτήρα και οι 2 παλμογεννήτριες. Στην πορεία αποδείχτηκε ότι με την υπάρχουσα μηχανολογική κατασκευή του ρομπότ δεν υπάρχει αρκετός χώρος για να τοποθετηθεί ο αδρανειακός αισθητήρας (IMU) και η

Auxiliary Board που, λόγω του ελεγκτή x-MP, αποτελούν νέες προσθήκες. Για τον λόγο αυτό, το κύριο σώμα του ρομπότ σχεδιάστηκε από την αρχή, με την τελική μορφή του σχεδιασμού αυτού να αποτυπώνεται στην Παράγραφο 5.5. Ωστόσο, σε πρώτη φάση, η διάταξη του Σχ. 5-10 είναι επαρκής για να ελέγξουμε τη λειτουργία της ηλεκτρονικής διάταξης, κινώντας μόνο το πόδι του ρομπότ στον αέρα.

Με στόχο τη σωστή τοποθέτηση του ποδιού στον αέρα, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος εύρεσης της γωνιακής θέσης του ποδιού σε σχέση με την κατακόρυφο. Η ανάπτυξη αυτού του αλγορίθμου ήταν απαραίτητη, μιας και χρησιμοποιείται ένας incremental encoder (HEDS-5540) που δίνει σχετική μετατόπιση με βάση μια τυχαία αρχική τιμή θέσης και όχι ένας absolute encoder που δίνει απόλυτη τιμή θέσης. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της αρχικής τυχαίας γωνίας του ποδιού σε σχέση με την κατακόρυφο, όταν το πρόγραμμα ελέγχου ξεκινά. Στη συνέχεια, όλες οι άλλες γωνιακές θέσεις θα δίνονται με βάση τη σωστή αρχική τιμή γωνίας που θα έχει βρεθεί. Για την εφαρμογή του αλγορίθμου, απαιτείται η γνώση της μέγιστης γωνίας προς τα αρνητικά που μπορεί να μετακινηθεί το πόδι πριν συγκρουστεί με το μηχανικό stop της διάταξης. Στην περίπτωση μας, βρέθηκε ότι η γωνία αυτή είναι $\gamma_n = -50.5^\circ$.

Έτσι, πριν ο ελεγκτής προχωρήσει σε οποιαδήποτε ενέργεια, δίνεται στον κινητήρα εντολή μιας μικρής αρνητικής ροπής ($\tau = -0.5\text{Nm}$) ώστε το πόδι να μετακινηθεί προς τη γωνία γ_n μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα και να σταματήσει από το μηχανικό stop. Μόλις ολοκληρωθεί αυτή η κίνηση, ο ελεγκτής θα γνωρίζει ότι το πόδι βρίσκεται στη γωνία γ_n και προχωρά στο κύριο μέρος του ελέγχου.

Για την εξακρίβωση της σωστής λειτουργίας του συστήματος ελέγχου που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους, εμφανίζεται στο Σχ. 5-11 η απόκριση της γωνίας του ποδιού κατά την τοποθέτησή του από γωνία $\gamma = 0$ σε γωνία $\gamma = 20.5^\circ$, καθώς και η εξέλιξη του γωνιακού σφάλματος με το χρόνο. Η τοποθέτηση του ποδιού γίνεται υπό την επίδραση του ελεγκτή PD, που παρουσιάστηκε στην Εξ. (3-12). Όπως βλέπουμε, ο PD ελεγκτής κατορθώνει να τοποθετήσει αρκετά γρήγορα το πόδι στην επιθυμητή γωνία, με ανάλογο τρόπο όπως στις προσομοιώσεις που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Από την απόκριση της γωνίας, επίσης, επιβεβαιώνεται ότι το σύστημα του μονόποδου ρομπότ είναι ένα σύστημα 2^{ης} τάξης, όπως είχε περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια, μέσω π.χ της Εξ. (3-18).



Σχήμα 5-11: Τοποθέτηση ποδιού σε γωνία 20.5° : (a) Απόκριση γωνίας γ , (b) Απόκριση σφάλματος.

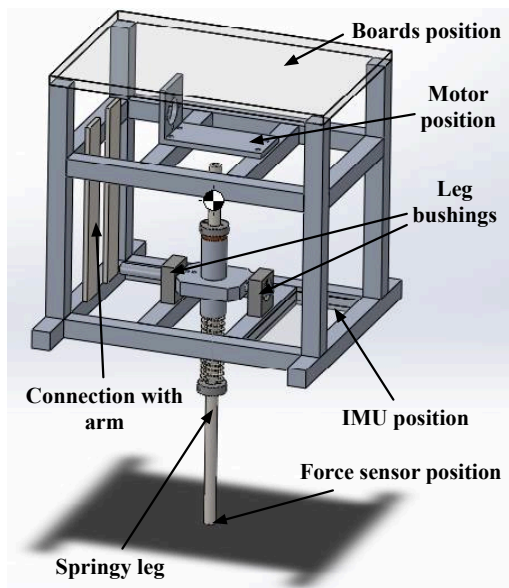
5.5 Σχεδιασμός κύριου σώματος μονόποδου ρομπότ

Στην παράγραφο αυτή προτείνεται μια νέα μορφή του σώματος του μονόποδου ρομπότ, ώστε να είναι λειτουργικό στην περίπτωση πειραμάτων σε ανώμαλο έδαφος. Τα κριτήρια με τα οποία έγινε ο συγκεκριμένος σχεδιασμός είναι τα ακόλουθα:

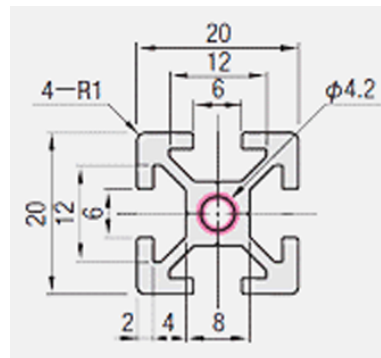
- i. Πρόβλεψη χώρου για την τοποθέτηση των ηλεκτρονικών πλακετών του ρομπότ στο κύριο σώμα του.
- ii. Δυνατότητα ρύθμισης προέντασης (τάνυσης) του ιμάντα της τροχαλίας.
- iii. Κατασκευή όσο το δυνατό μικρότερου βάρους μέσω ελαφρών υλικών.
- iv. Τοποθέτηση κέντρου μάζας συστήματος πάνω στον άξονα του ποδιού μέσω συμμετρικής κατασκευής, για αποφυγή ανεπιθύμητων πλευρικών δυνάμεων λόγω βαρύτητας.

- v. Πρόβλεψη χώρου κοντά στο κέντρο μάζας του ρομπότ για την τοποθέτηση του αδρανειακού αισθητήρα (IMU) ώστε να υπάρχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις.

Η κατασκευή που προτείνεται εμφανίζεται στο Σχ. 5-12(a), όπου έχουν επισημανθεί τα βασικότερα τμήματα της διάταξης. Όπως φαίνεται, έχει προβλεφθεί χώρος για την τοποθέτηση των ηλεκτρονικών συστημάτων στην οροφή του ρομπότ, με χρήση μιας πλάκας πάχους 3mm από plexiglass. Επίσης, το σύστημα κινητήρα-πλανητικού μειωτήρα μετακινείται και τοποθετείται ακριβώς πάνω από το πόδι, σε έναν ξεχωριστό «όροφο». Μεταβάλλοντας το ύψος τοποθέτησης αυτού του ορόφου, μπορεί να ρυθμιστεί με επιτυχία η τάνυση του ιμάντα της τροχαλίας. Παράλληλα, η κατασκευή είναι απόλυτα συμμετρική. Έτσι, όπως βλέπουμε, το κέντρο βάρους του ρομπότ τοποθετείται πάνω στον άξονα του ποδιού και μάλιστα σε αρκετά μικρή απόσταση από την περιστροφική άρθρωση του ρομπότ, όπως ακριβώς έχει υποθεθεί και στα αντίστοιχα δυναμικά μοντέλα των προηγούμενων κεφαλαίων. Κοντά στο κέντρο βάρους τοποθετείται και ο αδρανειακός αισθητήρας, προσαρμοσμένος σε μια ακόμη λεπτή πλάκα 3mm από plexiglass.



(a)



(b)

Σχήμα 5-12: Σχεδιασμός κύριου σώματος μονόποδου ρομπότ: (a) Τελικό σχέδιο, (b) Χρησιμοποιούμενα προφίλ αλουμινίου.

Για την όλη κατασκευή του σώματος, χρησιμοποιούνται μη συμπαγή αλουμινένια προφίλ της εταιρίας MISUMI, όπως φαίνεται στο Σχ. 5-12(b). Η μορφή των συγκεκριμένων προφίλ μειώνει σημαντικά το βάρος του σώματος ενώ, παράλληλα, τα κενά πλάτους 6mm που διαθέτουν επιτρέπουν τη συγκράτηση μιας πλάκας από plexiglass πάχους 5mm χωρίς πρόσθετα στοιχεία. Με τον τρόπο αυτό συγκρατείται η πλάκα plexiglass στην οποία προσαρμόζεται ο αδρανειακός αισθητήρας (IMU). Ο σχεδιασμός του κύριου σώματος έγινε στο λογισμικό Solidworks, το οποίο προβλέπει ότι το βάρος του σώματος στη μορφή που παρουσιάστηκε θα είναι περί τα 4.2kg.

6 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας, παρουσιάζονται τα βασικότερα συμπεράσματα και μια σύνοψη των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε κεφάλαιο της εργασίας.

Στην εργασία μελετήθηκε αρχικά η συμπεριφορά του μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή σε άκαμπτο έδαφος. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε αρχικά το μοντέλο SLIP και το απλό 2D δυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιείται ευρέως στην περίπτωση ενός τέτοιου ρομπότ για τη μελέτη της κίνησής του σε άκαμπτο έδαφος. Παράλληλα, τονίστηκε ότι τέτοια δυναμικά μοντέλα θεωρούν ότι το πέλμα κατά τη φάση εδάφους συμπεριφέρεται σαν μια απόλυτα σταθερή περιστροφική άρθρωση και αγνοούν φαινόμενα που σχετίζονται με την υποχωρητικότητα του εδάφους. Έπειτα, παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά δύο κατηγοριών ελεγκτών: των αλγορίθμων τοποθέτησης πέλματος και των αλγορίθμων υπολογισμού ροπής και γωνίας πρόσπτωσης, και μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός ελεγκτή από κάθε κατηγορία (ελεγκτής Raibert και ελεγκτής MP) σε άκαμπτο έδαφος.

Στη συνέχεια, με στόχο να εξεταστεί η συμπεριφορά του μονόποδου ρομπότ σε εδάφη με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, παρουσιάστηκαν δύο νέα δυναμικά μοντέλα που ενσωματώνουν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε περίπτωση υποχωρητικότητας εδάφους. Η διαφορά του πρώτου δυναμικού μοντέλου (σύνθετου) από το δεύτερο (λεπτομερές) έγκειται στην ενσωμάτωση της αδράνειας του ποδιού αλλά και επιπλέον απωλειών λόγω ιξώδους τριβής στην περιστροφική άρθρωση του ποδιού.

Στα δύο αυτά δυναμικά μοντέλα δεν ενσωματώθηκαν η υπόθεση βαλλιστικής κίνησης κατά τη φάση πτήσης και η απλοποίηση της απόλυτα σταθερής περιστροφικής άρθρωσης στο πέλμα κατά τη φάση εδάφους. Η καινοτομία που εισάγεται, λοιπόν, με την περιγραφή αυτών των μοντέλων είναι ότι οι δυναμικές εξισώσεις έχουν πλέον συνεχή και όχι διακριτή μορφή μεταξύ των φάσεων πτήσης και εδάφους του ρομπότ. Δηλαδή, οι ίδιες εξισώσεις ισχύουν τόσο κατά τη φάση πτήσης όσο και κατά τη φάση εδάφους, ενώ οι δυνάμεις από το έδαφος είναι ο μόνος παράγοντας που διαφέρει μεταξύ των δύο φάσεων.

Έπειτα, αφού έγινε μια σύντομη αναφορά στο υπόβαθρο της θεωρίας κρούσεων, αναλύθηκε εκτενώς το βισκοπλαστικό μοντέλο κρούσης πάνω στο οποίο στηρίχτηκε

ολόκληρη η εργασία και τονίστηκαν τα βασικά πλεονεκτήματά του. Συγκεκριμένα, αυτό το βισκοπλαστικό μοντέλο κρούσης επιτρέπει τη λεπτομερή περιγραφή όλων των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο μικρό διάστημα της κρούσης του πέλματος με το έδαφος. Ενσωματώνει φαινόμενα αποθήκευσης, διάχυσης και επαναπόδοσης ενέργειας από το έδαφος αλλά και φαινόμενα μόνιμης παραμόρφωσης του εδάφους. Ακόμη, μπορεί να περιγράψει με λεπτομέρεια φαινόμενα επανασυμπίεσεων και επαναπηδήσεων που μπορούν να εμφανιστούν, ειδικά κατά την κίνηση του ρομπότ σε δύσκαμπτο έδαφος. Τέτοια φαινόμενα αποσυντονίζουν τον ελεγκτή και μπορούν να οδηγήσουν σε αστάθεια.

Με την εφαρμογή του βισκοπλαστικού μοντέλου κρούσης, εξετάστηκε η συμπεριφορά του μονόποδου ρομπότ που περιγράφεται από το σύνθετο και το λεπτομερές μοντέλο σε έδαφος με υποχωρητικότητα. Διαπιστώθηκε ότι οι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται σε άκαμπτο έδαφος δεν επαρκούν για την κίνηση του ρομπότ σε έδαφος με υποχωρητικότητα ή/και μόνιμες παραμορφώσεις. Μάλιστα, η απόδοση αυτών των ελεγκτών μειώνεται δραματικά καθώς η υποχωρητικότητα του εδάφους αυξάνεται. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η ανάπτυξη ενός νέου ελεγκτή.

Έτσι, αναπτύχθηκε ο Extended MultiPart Controller (x-MP) σε τρεις διαφορετικές εκδόσεις του, ο οποίος στηρίζεται στον ελεγκτή MP. Ο ελεγκτής x-MP-I αντιμετωπίζει το πρόβλημα της υποχωρητικότητας του εδάφους, ωστόσο αγνοεί προβλήματα μόνιμης παραμόρφωσης. Ο ελεγκτής x-MP-II αντιμετωπίζει το σύνολο των προβλημάτων που ανακύπτουν με την περιγραφή του εδάφους από το βισκοπλαστικό μοντέλο κρούσης, ωστόσο δεν μπορεί να λειτουργήσει σε έδαφος με κλίση. Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ο ελεγκτής x-MP-III που αποτελεί την πιο πλήρη έκδοση του ελεγκτή x-MP.

Η εφαρμογή του ελεγκτή x-MP βασίζεται σε ενεργειακά μεγέθη. Για το λόγο αυτό, δεν απαιτεί τη γνώση των παραμέτρων του εδάφους που θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικά πιο πολύπλοκο σύστημα αίσθησης στο ρομπότ. Αντίθετα, ο ελεγκτής x-MP λειτουργεί με το ίδιο σύστημα αίσθησης που χρειάζεται ο ελεγκτής MP με τη μόνη προσθήκη ενός αισθητήρα δύναμης για τη μέτρηση των δυνάμεων από το έδαφος και ενός αδρανειακού αισθητήρα (IMU) για τον προσδιορισμό της θέσης του σώματος του ρομπότ.

Εκτός από αυτό, ο ελεγκτής x-MP συσχετίζει τη συμπεριφορά οποιουδήποτε μοντέλου του μονόποδου ρομπότ με το απλό 2D δυναμικό μοντέλο μέσω εύρεσης

ισοδύναμων παραμέτρων μάζας σώματος, δυσκαμψίας ποδιού και τριβής ποδιού. Με τον τρόπο αυτό, αν χρησιμοποιούνται επιτυχείς προβλέψεις των διαφόρων ενεργειακών μεγεθών, ο ελεγκτής x-MP μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιοδήποτε σύστημα χωρίς εκτενή γνώση των παραμέτρων του.

Ακόμη, ο ελεγκτής x-MP παρέχει λύσεις για την αντιμετώπιση της τριβής ολίσθησης αλλά και των επαναπηδήσεων (rebounds) που μπορούν να εμφανιστούν κατά τη φάση εδάφους του μονόποδου ρομπότ και να οδηγήσουν σε ολική αστάθεια του συστήματος, ενώ μπορεί να εφαρμοστεί και σε ανώμαλο έδαφος μικρής κλίσης.

Έπειτα από αυτό, εξετάστηκε η συμπεριφορά του ελεγκτή x-MP σε διαφορετικές συνθήκες βαρύτητας, με σύγκριση των αποκρίσεων στη Γη, στον Άρη και στη Σελήνη. Αποδείχθηκε ότι, παρόλο που οδηγεί το σύστημα σε ευστάθεια, η απόκριση του ρομπότ διέφερε από πλανήτη σε πλανήτη. Με τη μείωση της βαρύτητας, η χρονική διάρκεια του διασκελισμού αυξάνεται, ενώ η συμπίεση του ελατηρίου του ποδιού μειώνεται. Για το λόγο αυτό, τονίστηκε ότι η επιλογή ελατηρίου απαιτεί σημαντική μελέτη ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος στις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιηθεί γενικότερα ένα τέτοιο ρομποτικό σύστημα.

Τέλος, μέσα από αυτή την εργασία τέθηκαν οι βάσεις για την κατασκευή μιας διάταξης με στόχο τη διεξαγωγή πειραμάτων με το μονόποδο ρομπότ σε έδαφος με υποχωρητικότητα. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε η ηλεκτρονική διάταξη στην οποία θα τρέχει το πρόγραμμα ελέγχου του ρομπότ. Η σωστή λειτουργία της συγκεκριμένης διάταξης εξακριβώθηκε μέσα από πείραμα τοποθέτησης του ποδιού σε συγκεκριμένη γωνία. Παράλληλα, σχεδιάστηκε από την αρχή το κύριο σώμα του μονόποδου ρομπότ, προκειμένου να τοποθετηθούν πάνω σε αυτό όλα τα ηλεκτρονικά του συστήματος, αλλά και να υπάρχει χώρος για την τοποθέτηση των πρόσθετων αισθητήρων που απαιτεί ο ελεγκτής x-MP.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Η συμπεριφορά του ελεγκτή x-MP μελετήθηκε σε βάθος με διαφορετικές βαρύτητες για έδαφος με υποχωρητικότητα, μόνιμες παραμορφώσεις και διάφορες ανωμαλίες επιφάνειας. Ωστόσο, η μελέτη αυτή περιορίστηκε στην περίπτωση ενός μονόποδου ρομπότ με έναν επενεργητή. Μια ανάλογη μελέτη, αρχικά για την επίδραση της υποχωρητικότητας του εδάφους και έπειτα για την εφαρμοσιμότητα του ελεγκτή x-MP,

μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα ρομποτικό σύστημα με πολλά πόδια (π.χ τετράποδο, εξάποδο). Ο βασικότερος στόχος άλλωστε για τη χρήση μονόποδων ρομπότ είναι η μελέτη αλγορίθμων που μπορούν να εφαρμοστούν σε ρομπότ με περισσότερα από ένα πόδια.

Κάτι ανάλογο ισχύει και για τα δυναμικά μοντέλα περιγραφής των διαφόρων ρομπότ με πόδια. Το γεγονός ότι η δυναμική των ρομπότ με πόδια είναι διακριτής φύσης με ξεχωριστές εξισώσεις στη φάση πτήσης σε σχέση με τη φάση εδάφους οφείλεται ακριβώς στο γεγονός ότι δεν έχουν ενσωματωθεί μοντέλα περιγραφής του εδάφους. Με την ενσωμάτωση, για παράδειγμα, του προτεινόμενου βισκοπλαστικού μοντέλου κρούσης θα μπορούσε κανείς να προχωρήσει σε μια γενικευμένη αντιμετώπιση της δυναμικής του ρομπότ. Αυτό ακριβώς πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας για την περίπτωση του μονόποδου ρομπότ. Θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον η δουλειά αυτή να γενικευθεί για ρομπότ με περισσότερα πόδια, μιας και θα απλοποιούσε πολλά ζητήματα ελέγχου.

Παράλληλα, θα ήταν εξαιρετικά ενδιαφέρον να μελετηθεί η επίδραση του λόγου μαζών κύριου σώματος/ποδιού στην συμπεριφορά του μονόποδου ρομπότ. Με τον τρόπο αυτό, θα μπορούσαν να χαραχθούν τα όρια πρόσθιας ταχύτητας και μέγιστου ύψους αναπήδησης εντός των οποίων το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει για ορισμένο λόγο μαζών, έδαφος, ελατήριο και επενεργητή. Σε αυτήν την κατεύθυνση, ιδιαίτερα χρήσιμη θα ήταν και μια μελέτη σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο το μονόποδο ρομπότ θα αναγνωρίζει σε τι είδους έδαφος κινείται ώστε να προσαρμόζει ανάλογα και τις απαιτήσεις κίνησης.

Επιπλέον, σχετικά με το μονόποδο ρομπότ, θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένα νέο μοντέλο με γόνατο (μία επιπλέον περιστροφική άρθρωση) που, όπως αποδεικνύεται από τη βιβλιογραφία, είναι καταλληλότερο για την πραγματοποίηση διαφόρων σύνθετων κινήσεων σε ανώμαλο έδαφος. Η ενσωμάτωση του βισκοπλαστικού μοντέλου εδάφους σε ένα τέτοιο ρομπότ θα ήταν σίγουρα μια καινοτόμος εργασία στο αντικείμενο των ρομπότ με πόδια.

Ακόμη, στο πειραματικό κομμάτι, θα μπορούσε να κατασκευαστεί ολόκληρο το σώμα του μονόποδου ρομπότ όπως έχει παρουσιαστεί στην παρούσα εργασία και να πραγματοποιηθούν πειράματα με τη νέα διάταξη που θα περιλαμβάνει και αισθητήρα δύναμης για την ανίχνευση των δυνάμεων από το έδαφος. Έτσι, θα γίνει και πειραματική

εξακρίβωση των συμπερασμάτων για τον ελεγκτή x-MP και θα επιδειχθεί η επιτυχής κίνηση του ρομπότ σε έδαφος με υποχωρητικότητα.

Τέλος, μια ενδιαφέρουσα εργασία θα ήταν και η κατασκευή μιας ξεχωριστής διάταξης που θα περιλαμβάνει υλικά διαφόρων εδαφών, για τη δοκιμή του μονόποδου ρομπότ ή άλλων ρομπότ με περισσότερα πόδια σε έδαφος με υποχωρητικότητα. Η συγκεκριμένη διάταξη θα μπορούσε, για παράδειγμα, να είναι σε μορφή διαδρόμου ενώ τα υλικά των διαφόρων εδαφών θα τοποθετούνταν σε ξεχωριστά τμήματα του διαδρόμου (π.χ σε παλέτες). Με τον τρόπο αυτό, θα εξασφαλίζεται και εναλλαξιμότητα της όλης διάταξης ώστε τα υλικά να μπορούν να αλλάζουν και να δημιουργείται μια νέα διαδρομή κάθε φορά.

Βιβλιογραφία

- [1] Azad, M. and Featherstone, R., “A New Nonlinear Model of Contact Normal Force”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, iss. 3, 2014.
- [2] Berkemeier, M. D and Fearing, R. S., “Sliding and hopping gaits for the underactuated acrobot”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(4), 1998, pp. 629-634.
- [3] Buehler, M., Playter, R. and Raibert, M., “Robots Step Outside”, in *International Symposium Adaptive Motion of Animals and Machines*, Ilmenau, 2005.
- [4] Caurin, G. et al, “The Development of a Robot Terrain Interaction System for Walking Machines”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '94)*, San Diego, CA, USA, May 1994.
- [5] Cherouveim, N. and Papadopoulos, E., “Control of Hopping Speed and Height Over Unknown Rough Terrain Using a Single Actuator”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '09)*, Kobe, Japan, May 2009, pp. 2743-2748.
- [6] Cherouveim, N. and Papadopoulos, E., “Energy Saving Passive-Dynamic Gait for a One-Legged Hopping Robot”, *Robotica*, vol. 24, No. 4, July 2006, pp. 491-498.
- [7] Cherouveim, N. and Papadopoulos, E., “Single Actuator Control of a 3DOF Hopping Robot”, Chapter in *Robotics: Science and Systems I*, MIT Press, Cambridge, MA, December 2005.
- [8] Cherouveim, N. and Papadopoulos, E., “The SAHR Robot – Controlling Hopping Speed and Height Using a Single Actuator”, *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 5, No. 3, September 2008, pp. 149-156.
- [9] Christoforou, A. et al, Impact Response Characterization in Composite Plates – Experimental Validation”, *Applied Composite Materials*, vol. 17, iss. 5, 2010, pp. 463-472.
- [10] Ding, L. et al, “Foot-Terrain Interaction for Legged Robots: Modeling and Experimental Validation”, *The International Journal of Robotics Research*, 2013.
- [11] Doh, N., Chung, W., K. and Youm, Y., “On Hard Contact Force Control”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Takamatsu, Japan, pp. 1528-1533, 2000.

- [12] Gehring, C. et al, "Control of Dynamic Gaits for a Quadrupedal Robot", *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA' 13)*, Karlsruhe, Germany, pp. 3287-3292, May 2013.
- [13] Gilardi, G. and Sharf, I., "Literature Survey of Contact Dynamics Modelling", *Mechanism and Machine Th.*, 37(10), 2002, pp. 1213-1239.
- [14] Havoutis, I. et al, "Progress in quadrupedal trotting with active compliance", *Dynamic Walking*, 2012.
- [15] Hodgins, J., "Legged Robots on Rough Terrain: Experiments in Adjusting Step Length", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, USA, 1988, pp. 824-826.
- [16] Hoepflinger, M. et al, "Haptic terrain classification for legged robots", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '10)*, Anchorage, Alaska, May 2010, pp. 2828-2833.
- [17] Hutter, M. et al, "ScarIETH: Design and Control of a Planar Running Robot", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '11)*, San Francisco, CA, USA, pp. 562-567, September 2011.
- [18] Johnson, K. L., *Contact Mechanics*, Cambridge, MA, USA, 2010.
- [19] Kalakrishnan, M. et al, "Fast, Robust Quadruped Locomotion over Challenging Terrain", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '10)*, Anchorage, Alaska, USA, pp. 2665-2670, May 2010.
- [20] Kontolatis, I. et al, "Quadruped optimum gaits analysis for planetary exploration", *12th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA '13)*, ESA, Noordwijk, 2013.
- [21] Li, C., Zhang, T. and Goldman, D.I., "A terradynamics of legged locomotion on granular media", *Science*, 339(6126), 2013, pp. 1408-1412.
- [22] Majeed, M. A, Yigit, A. S and Christoforou, A. P, "Elastoplastic contact/impact of rigidly supported composites", *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 3, 2012, pp. 1244-1251.
- [23] Marhefka, D. W. and Orin, D. E., "A compliant contact model with nonlinear damping for simulation of robotic systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part A: Systems and Humans*, vol. 29, no. 6, 1999, pp. 566-572.

- [24] McGhee, R. B. and Iswandhi, G. I., "Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 9, 1979, pp. 176-182.
- [25] Miller, B. et al, "Leg Stiffness Adaptation for Running on Unknown Terrains", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '13)*, Tokyo Big Sight, Japan, November 2013, pp. 5108-5113.
- [26] Nikolakakis, A. et al, "Implementation of a Quadruped Robot Pronking/Bounding Gait Using a Multipart Controller", *Dynamic Systems and Control Conference*, Cambridge, MA, USA, 2010.
- [27] Papadopoulos, E. and Cherouveim, N., "On Increasing Energy Autonomy for a One-Legged Hopping Robot", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '04)*, New Orleans, Louisiana, pp. 4645-4650, April 2004.
- [28] Papadopoulos, E. G. and Chasparis, G. C., "Analysis and Model-Based Control of Servomechanisms with Friction", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 126(4), pp. 911-915, 2004.
- [29] Raibert, M. H, *Legged robots that balance*, MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [30] Saranli, U., Buehler, M. and Koditschek, D. E, "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 20, 2001, pp. 616-631.
- [31] Sato, A. and Buehler, M., "A Planar Hopping Robot with One Actuator", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '04)*, Sendai, Japan, September 2004.
- [32] Sayyad, A. et al, "Single-legged hopping robotics research – A review", *Robotica*, vol. 25, iss. 5, 2007, pp. 587-613.
- [33] Shill, J. J. et al, "Terrain Identification on a One-Legged Hopping Robot using High-Resolution Pressure Images", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '14)*, Hong Kong, China, May 2014, pp. 4723-4728.
- [34] Stronge, W. J., *Impact Mechanics*, Cambridge Univ. Press, 2000.
- [35] Vasilopoulos, V., Paraskevas, I. S. and Papadopoulos, E., "Compliant Terrain Legged Locomotion Using a Viscoplastic Approach", *IEEE/RSJ International*

- Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '14)*, Chicago, Illinois, USA, September 2014 (accepted).
- [36] Wong, J. Y., *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*, 2nd Edition, Elsevier Ltd., 2010.
- [37] Yigit, A. S., Christoforou, A. P. and Majeed, M. A., "A nonlinear visco-elastoplastic impact model and the coefficient of restitution", *Nonlinear Dynamics*, 66(4), 2011, pp. 509-521.
- [38] <http://www.stanford.edu/~tyzhu/Documents/Some%20Useful%20Numbers.pdf>.

Παράρτημα Α

Α.1 Βοηθητικές σχέσεις ελεγκτή x-MP-II

Σε αυτό το τμήμα του παραρτήματος, παρατίθενται οι εκφράσεις για τον υπολογισμό των παραμέτρων a_1 , a_2 , c_1 , c_2 , A , B , θ , r και R για τον ελεγκτή x-MP-II που αναλύθηκε στην Παράγραφο 4.3.

$$a_1 = -\frac{b'_l}{2 \cdot M'} \quad (\text{A-1})$$

$$a_2 = \frac{\sqrt{4 \cdot M' \cdot k' - (b'_l)^2}}{2 \cdot M'} \quad (\text{A-2})$$

$$A = \frac{k' \cdot L \cdot \left(k' - M' \cdot \frac{\dot{x}_{des}^2}{L^2} \right)}{\left(k' - M' \cdot \frac{\dot{x}_{des}^2}{L^2} \right)^2 + \left(\frac{b'_l \cdot \dot{x}_{des}}{L} \right)^2} \quad (\text{A-3})$$

$$B = \frac{k' \cdot b'_l \cdot \dot{x}_{des}}{\left(k' - M' \cdot \frac{\dot{x}_{des}^2}{L^2} \right)^2 + \left(\frac{b'_l \cdot \dot{x}_{des}}{L} \right)^2} \quad (\text{A-4})$$

$$c_1 = (L - A) \cdot \cos \gamma_{id}^j - B \cdot \sin \gamma_{id}^j + \frac{M' \cdot g}{k'} \quad (\text{A-5})$$

$$c_2 = \left(\dot{y}_{id,est}^j - \frac{A \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \sin \gamma_{id}^j + \frac{B \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \cos \gamma_{id}^j - c_1 \cdot a_1 \right) \cdot a_2^{-1} \quad (\text{A-6})$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \quad (\text{A-7})$$

$$R = \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2} \quad (\text{A-8})$$

$$r = \varepsilon_1 + \frac{\delta_2}{a_2} \cdot \left(a_1 \cdot \frac{M' \cdot g}{k'} - \varepsilon_5 \right) - \delta_1 \cdot \frac{M' \cdot g}{k'} \quad (\text{A-9})$$

όπου

$$\rho_1 = \delta_1 \cdot (L - A) + \frac{\delta_2}{a_2} \cdot \left[\frac{B \cdot \dot{x}_{des}}{L} - a_1 \cdot (L - A) + \varepsilon_6 \right] + \delta_3 - \varepsilon_3 \quad (\text{A-10})$$

$$\rho_2 = -B \cdot \delta_1 + \frac{\delta_2}{a_2} \cdot \left[-\frac{A \cdot \dot{x}_{des}}{L} + a_1 \cdot B \right] + \delta_4 - \varepsilon_4 \quad (\text{A-11})$$

και οι βοηθητικές μεταβλητές $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ και $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$ δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$\delta_1 = a_1 \cdot e^{a_1 \cdot \Delta t_s^{j-1}} \cdot \cos(a_2 \cdot \Delta t_s^{j-1}) - a_2 \cdot e^{a_1 \cdot \Delta t_s^{j-1}} \cdot \sin(a_2 \cdot \Delta t_s^{j-1}) \quad (\text{A-12})$$

$$\delta_2 = a_1 \cdot e^{a_1 \cdot \Delta t_s^{j-1}} \cdot \sin(a_2 \cdot \Delta t_s^{j-1}) + a_2 \cdot e^{a_1 \cdot \Delta t_s^{j-1}} \cdot \cos(a_2 \cdot \Delta t_s^{j-1}) \quad (\text{A-13})$$

$$\delta_3 = -\frac{A \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \sin\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) - \frac{B \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \cos\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) \quad (\text{A-14})$$

$$\delta_4 = \frac{A \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \cos\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) - \frac{B \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \sin\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) \quad (\text{A-15})$$

$$\varepsilon_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{des} - L - y_{ft,lo}^{j-1})} + \frac{g \cdot L}{\sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{des} - L - y_{ft,lo}^{j-1})}} \quad (\text{A-16})$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{g \cdot L}{\sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{des} - L - y_{ft,lo}^{j-1})}} \quad (\text{A-17})$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_2 \cdot \cos\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) \quad (\text{A-18})$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_2 \cdot \sin\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) \quad (\text{A-19})$$

$$\varepsilon_5 = -\sqrt{2 \cdot g \cdot (y_{apex,est}^j - L)} - \frac{g \cdot L}{\sqrt{2 \cdot g \cdot (y_{apex,est}^j - L)}} \quad (\text{A-20})$$

$$\varepsilon_6 = \frac{g \cdot L}{\sqrt{2 \cdot g \cdot (y_{apex,est}^j - L)}} \quad (\text{A-21})$$

A.2 Βοηθητικές σχέσεις ελεγκτή x-MP-III

Σε αυτό το τμήμα του παραρτήματος, παρατίθενται οι εκφράσεις για τον υπολογισμό των παραμέτρων a_1 , a_2 , c_1 , c_2 , A , B , θ , r και R για τον ελεγκτή x-MP-III που αναλύθηκε στην Παράγραφο 4.4.

$$a_1 = -\frac{b'_l}{2 \cdot M'} \quad (\text{A-22})$$

$$a_2 = \frac{\sqrt{4 \cdot M' \cdot k' - (b'_l)^2}}{2 \cdot M'} \quad (\text{A-23})$$

$$A = \frac{k' \cdot L \cdot \left(k' - M' \cdot \frac{\dot{x}_{des}^2}{L^2} \right)}{\left(k' - M' \cdot \frac{\dot{x}_{des}^2}{L^2} \right)^2 + \left(\frac{b'_l \cdot \dot{x}_{des}}{L} \right)^2} \quad (\text{A-24})$$

$$B = \frac{k' \cdot b'_l \cdot \dot{x}_{des}}{\left(k' - M' \cdot \frac{\dot{x}_{des}^2}{L^2} \right)^2 + \left(\frac{b'_l \cdot \dot{x}_{des}}{L} \right)^2} \quad (\text{A-25})$$

$$c_1 = y_{ground,est}^j + (L - A) \cdot \cos \gamma_{td}^j - B \cdot \sin \gamma_{td}^j + \frac{M' \cdot g}{k'} \quad (\text{A-26})$$

$$c_2 = \left(\dot{y}_{td,est}^j - \frac{A \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \sin \gamma_{td}^j + \frac{B \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \cos \gamma_{td}^j - c_1 \cdot a_1 \right) \cdot a_2^{-1} \quad (\text{A-27})$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \quad (\text{A-28})$$

$$R = \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2} \quad (\text{A-29})$$

$$r = \varepsilon_1 + \frac{\delta_2}{a_2} \cdot \left(a_1 \cdot \frac{M' \cdot g}{k'} - \varepsilon_5 \right) - \delta_1 \cdot \frac{M' \cdot g}{k'} + \left(\frac{\delta_2 \cdot a_1}{a_2} - \delta_1 \right) \cdot y_{ground,est}^j \quad (\text{A-30})$$

όπου

$$\rho_1 = \delta_1 \cdot (L - A) + \frac{\delta_2}{a_2} \cdot \left[\frac{B \cdot \dot{x}_{des}}{L} - a_1 \cdot (L - A) + \varepsilon_6 \right] + \delta_3 - \varepsilon_3 \quad (\text{A-31})$$

$$\rho_2 = -B \cdot \delta_1 + \frac{\delta_2}{a_2} \cdot \left[-\frac{A \cdot \dot{x}_{des}}{L} + a_1 \cdot B \right] + \delta_4 - \varepsilon_4 \quad (\text{A-32})$$

και οι βοηθητικές μεταβλητές $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ και $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$ δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$\delta_1 = a_1 \cdot e^{a_1 \cdot \Delta t_s^{j-1}} \cdot \cos(a_2 \cdot \Delta t_s^{j-1}) - a_2 \cdot e^{a_1 \cdot \Delta t_s^{j-1}} \cdot \sin(a_2 \cdot \Delta t_s^{j-1}) \quad (\text{A-33})$$

$$\delta_2 = a_1 \cdot e^{a_1 \cdot \Delta t_s^{j-1}} \cdot \sin(a_2 \cdot \Delta t_s^{j-1}) + a_2 \cdot e^{a_1 \cdot \Delta t_s^{j-1}} \cdot \cos(a_2 \cdot \Delta t_s^{j-1}) \quad (\text{A-34})$$

$$\delta_3 = -\frac{A \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \sin\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) - \frac{B \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \cos\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) \quad (\text{A-35})$$

$$\delta_4 = \frac{A \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \cos\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) - \frac{B \cdot \dot{x}_{des}}{L} \cdot \sin\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) \quad (\text{A-36})$$

$$\varepsilon_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \left[h_{des} - L - y_{ground,est}^j - (y_{ft,lo}^{j-1} - y_{ground}^{j-1}) \right]} + \frac{g \cdot L}{\sqrt{2 \cdot g \cdot \left[h_{des} - L - y_{ground,est}^j - (y_{ft,lo}^{j-1} - y_{ground}^{j-1}) \right]}} \quad (\text{A-37})$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{g \cdot L}{\sqrt{2 \cdot g \cdot \left[h_{des} - L - y_{ground,est}^j - (y_{ft,lo}^{j-1} - y_{ground}^{j-1}) \right]}} \quad (\text{A-38})$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_2 \cdot \cos\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) \quad (\text{A-39})$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_2 \cdot \sin\left(\frac{\dot{x}_{des} \cdot \Delta t_s^{j-1}}{L}\right) \quad (\text{A-40})$$

$$\varepsilon_5 = -\sqrt{2 \cdot g \cdot \left(y_{apex,est}^j - L - y_{ground,est}^j \right)} - \frac{g \cdot L}{\sqrt{2 \cdot g \cdot \left(y_{apex,est}^j - L - y_{ground,est}^j \right)}} \quad (\text{A-41})$$

$$\varepsilon_6 = \frac{g \cdot L}{\sqrt{2 \cdot g \cdot \left(y_{apex,est}^j - L - y_{ground,est}^j \right)}} \quad (\text{A-42})$$

Παράρτημα Β

Στο παράρτημα αυτό παρατίθεται ενδεικτικά ο πλήρης κώδικας της προσομοίωσης του μονόποδου ρομπότ σε ανώμαλο έδαφος με χρήση του ελεγκτή x-MP-III για το σύνθετο μοντέλο (συνάρτηση *ExtendedModel_xMPv3*) σε περιβάλλον MATLAB. Για την επιτυχή διεξαγωγή της προσομοίωσης, ο συγκεκριμένος κώδικας απαιτεί αρχικά τη δημιουργία ενός 2D προφίλ εδάφους με το όνομα 'environment.mat' από τη συνάρτηση *mainenv*. Η συγκεκριμένη συνάρτηση, καθώς και το σύνολο των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε ελεγκτή και για κάθε μοντέλο του μονόποδου ρομπότ βρίσκονται στο CD-ROM που συνοδεύει την παρούσα διπλωματική εργασία.

```
%CONFIGURATION
%K, n, a, lamdac, lamdar_ind_1, lamdar_ind_2 (ground)
%static_friction_coeff, slip_friction_coeff (friction)
%m,ml,k,b,l0 (robot parameters)
%x0,xd0,y0,yd0,yg0,ygd0,gam0 (initial conditions)
%xddes, h (desired motion characteristics)
%kp,kd (PD Flight phase servo)
%tfin,i3fin (simulation parameters)

%OUTPUT
%indp:                1 for flight, 2 for stance
%tp:                  time (sec)
%yp:                  body vertical position (m)
%ygp:                 foot vertical position (m)
%xp:                  body horizontal position (m)
%xgp:                 foot horizontal position (m)
%xdp:                 body horizontal velocity (m/s)
%ydp:                 body vertical velocity (m/s)
%xgdp:                foot horizontal velocity (m/s)
%ygdp:                foot vertical velocity (m/s)
%lp:                  leg length (m)
%ldp:                 leg compression rate (m/s)
%gamp:                leg angular position (rad)
%gamdp:               leg angular velocity (rad/s)
%torp:                torque applied (Nm)
%Fyp:                 force from the ground (N)
%Ftp:                 friction force (N)
%Fslipp:              maximum friction force allowed for some Fy (N)

%SIMULATION PARAMETERS
%abstol, reltol, maxstep
%Zero crossing adjusted through the events function
%Friction zero crossing adjusted through the dynamics function

%THIS SOURCE CODE REQUIRES A .MAT FILE 'environment.mat' FOR GENERATING
%THE TERRAIN PROFILE

function ExtendedModel_xMPv3()
clear all
clc

%Data gathering
clear indp tch tp xp xdp yp ydp xgp xgdp ygp ygdp lp ldp gamp gamdp torp
```

```

clear Ftp Fyp lock yc yf lamda_old lamda_new recompr_ind
clear tstp
clear gait_counter
clear torctr_previous gamtd_previous
clear y_td
clear y_level_previous x_level_previous
global indp tch tp xp xdp yp ydp xgp xgdp ygp ygdg lp ldp gamp gamdp torp
global Fslipp Ftp Fyp lock yc yf lamda_old lamda_new recompr_ind
global tstp
global gait_counter
global torctr_previous gamtd_previous
global y_td
global y_level_previous x_level_previous

clear gotap xdap yap
global gotap xdap yap

%Counters
clear i7 i3
global i7 i3

%Motion phase
clear told indold
global told indold

%Desired motion characteristics
clear xddes h
global xddes h

%***** Load ground surface parameters *****%
load('environment.mat');
x_ground = datamatrix(:,1)/1000;
y_ground = datamatrix(:,2)/1000;

%*****
%===== OPTIONS =====%
%----- Robot & Environment Parameters -----%
i3 = 0;           %number of current cycle

% Leg
k = 12000;       % leg spring constant (N/m)
b = 3.0;         % linear joint viscous damping coefficient (Ns/m)
l0 = 0.30;       % leg uncompressed length (m)

% Body
m = 4.0;         % body mass (kg)
ml = 0.16;       % leg mass (kg)

% Gravity
g = 9.81;

%Motion initial conditions
gam0 = 0;

yg0 = 0.03;      % will be overwritten on the first call of the controller
ygd0 = 0;

x0 = 0;
xd0 = 1.0;       % initial speed of the lower mass as well

y0 = yg0+l0*cos(gam0);

```

```

yd0 = 0;

ind0 = 1;
indp(1) = ind0;    %phase indicator - 1 flight, 2 stance
%-----
% ----- Control and simulation parameters -----
%
tfin = 1e6;    % total time to be simulated
i3fin = 10e6;    % total cycles to be simulated
%-----
% ----- Initializing -----
gam = gam0;

x = x0;    %mass initial horizontal position
xd = xd0;    %mass initial horizontal velocity

y = y0;    %mass initial vertical position
yd = yd0;    %mass initial vertical velocity

yg = yg0;    %foot initial vertical position
ygd = ygd0;    %foot initial vertical velocity

ind = ind0;    %phase indicator
indold = 0;
told = 0;
err = 0;

gait_counter = 1;

tlo = 0;
ttd = 0;
%-----
% ----- Counters and data gathering vectors -----
% Initializing data-gathering vectors      (SUBSCRIPT p)
tp(1) = 0;
xp(1) = x;
xdp(1) = xd;
yp(1) = y;
ydp(1) = yd;
xgp(1) = 0;    %will be overwritten on the first call of the controller
xgdp(1) = xd0;
ygp(1) = yg;
ygdp(1) = ygd;
lp(1) = l0;
ldp(1) = 0;
gamp(1) = gam;
gamdp(1) = 0;
torp(1) = 0;
Fyp(1) = 0;
i7 = 1;    %counter for data gathering
tch = 0;
%-----
%=====
%*****

% ***** MAIN LOOP *****
while told<tfin && i3<i3fin && err==0

```



```

lm=length(tp); % lm is the last saved measurement - length returns
                % the length of the array

% Ground parameters
if xgp(i7) <= 10
    K = 400000; % ground spring constant (N/m)
    a = 0.2;
    n = 1.5; % Hunt Crossley exponent
    B = (3/2)*a*K; % ground damping (Ns/m)
    lamdac = 1.0; % lamda factor for the phase of compression
    lamdar_ind_1 = 0.5; % 1st factor to determine lamdar
    lamdar_ind_2 = 0.0; % 2nd factor to determine lamdar
    static_friction_coeff = 0.7;
    slip_friction_coeff = 0.6;
    xddes = 0.8;
    h = 0.32;
elseif xgp(i7) > 10
    break;
end

%===== Flight Phase =====%
if ind==1 && indold~=1 %indications of flight phase
    % Cycle counter increase
    i3=i3+1;

    %*****%
    gotap = 0;
    %*****%

    % Liftoff Initial Conditions
    xdlo = xdp(lm); ylo = ydp(lm); ydlo = ydp(lm);

    % Controller: Simple PD
    tst = (tlo - ttd); %duration of stance phase
    if i3>=2
        tstp(i3-1,1) = tst;
    end
    [gamtd, torctr, max_time] = controller1(i3,xdlo,ydlo,ylo,xddes,h,...
        g,m,ml,k,b,l0);

    [i3,told,gamtd,torctr,xdp(lm),ygp(lm),xp(lm)]
end
%=====

%===== Dynamics Evaluation =====%
switch ind
    case 1
        yinit =
[xp(lm),xdp(lm),yp(lm),ydp(lm),xgp(lm),xgdp(lm),ygp(lm),ygdp(lm)];
    case 2
        yinit =
[xp(lm),xdp(lm),yp(lm),ydp(lm),xgp(lm),xgdp(lm),ygp(lm),ygdp(lm)];
    end

    tspan = [told,told+1];
    abstol=1e-2; reltol=1e-2; maxstep=1e-5; %setting for ODE solver
    options=odeset('events',@events1,'RelTol',reltol,'MaxStep',...
        maxstep,'AbsTol',abstol);
    [T,~,TE,YE,IE]=ode23s(@dynamics1,tspan,yinit,options,K,B,n,lamac,...
        lamdar_ind_1,lamdar_ind_2,m,ml,b,k,l0,g,ind,gamtd,torctr,max_time,...
        static_friction_coeff,slip_friction_coeff,x_ground,y_ground);

    told=TE; indold=ind;
    if ind==1

```

```

    ttd = told;
    ind = (IE==1)*3 + (IE==2)*2;
elseif ind==2
    tlo = told;
    ind = (IE==1)*1 + (IE==2)*3;
end
%=====
end
% *****

gait_counter = 1 : gait_counter-1;

save('ExtendedModel_xMPv3.mat');
end

%===== CONTROLLER =====
function [gamtd,torctr,max_time] = controller1(i3,xdlo,ydlo,ylo,xddes,h,...
    g,m,ml,k,b,l0)
global tp xp xdp yp ydp xgp xgdp ygp ygdp lp ldp gamp gamdp torp Fyp Ftp indp
global i7
global torctr_previous gamtd_previous
global y_level_previous x_level_previous
if i3 == 1
    gamtd = 0.15;
    torctr = -4.0;
    max_time = 0;
    ygp(1) = yp(1)-lp(1)*cos(gamtd);
    xgp(1) = xp(1)+lp(1)*sin(gamtd);
    y_level_previous = 0;
    x_level_previous = 0;
else
    if i3 == 2
        % Save actual k
        kactual = k;

        % Find i7 counters that indicates the first flight and stance
        first_flight_indicators = find(indp==1);
        first_stance_indicators = find(indp==2);
        flight_indicator = first_flight_indicators(1,1);
        stance_indicator = first_stance_indicators(1,1);

        % Ground level for previous gait
        ground_level = ygp(1,stance_indicator);

        % Angle span during stance
        theta_span_stance = gamp(1,i7)-gamp(1,stance_indicator);

        % Calculate stance time
        stance_time = tp(1,i7)-tp(1,stance_indicator);

        % Calculate ground energy losses
        sum = 0;
        for j = stance_indicator+1 : i7-1
            sum = sum + Fyp(1,j)*ygdp(1,j);
        end
        integrA = ((tp(1,i7)-tp(1,stance_indicator))/...
            (2*(i7-stance_indicator)))*...
            (Fyp(1,stance_indicator)*ygdp(1,stance_indicator)+2*sum+...
            Fyp(1,i7)*ygdp(1,i7));
        sum = 0;
        for j = stance_indicator+1 : i7-1

```

```

        sum = sum + Ftp(1,j)*xgdp(1,j);
    end
    integrB = ((tp(1,i7)-tp(1,stance_indicator))/...
        (2*(i7-stance_indicator)))*...
        (Ftp(1,stance_indicator)*xgdp(1,stance_indicator)+2*sum+...
        Ftp(1,i7)*xgdp(1,i7));
    ground_energy_losses = abs(integrA)+abs(integrB);

    % Calculate leg viscous energy losses FOR THE WHOLE GAIT
    sum = 0;
    for j = flight_indicator+1 : i7-1
        sum = sum + ldp(1,j)^2;
    end
    integr = ((tp(1,i7)-tp(1,flight_indicator))/...
        (2*(i7-flight_indicator)))*...
        (ldp(1,flight_indicator)^2+2*sum+ldp(1,i7)^2);
    viscous_energy_losses = b*abs(integr);

    % Calculate leg viscous energy losses FOR STANCE
    sum = 0;
    for j = stance_indicator+1 : i7-1
        sum = sum + ldp(1,j)^2;
    end
    integr = ((tp(1,i7)-tp(1,stance_indicator))/...
        (2*(i7-stance_indicator)))*...
        (ldp(1,stance_indicator)^2+2*sum+ldp(1,i7)^2);
    viscous_energy_losses_stance = b*abs(integr);

    % Calculate energy offered from motor during flight
    sum = 0;
    for j = flight_indicator+1 : stance_indicator-2
        sum = sum + torp(1,j)*gamdp(1,j);
    end
    integr = ((tp(1,stance_indicator-1)-tp(1,flight_indicator))/...
        (2*(stance_indicator-flight_indicator-1)))*...
        (torp(1,flight_indicator)*gamdp(1,flight_indicator)+2*sum+...
        torp(1,stance_indicator-1)*gamdp(1,stance_indicator-1));
    energy_motor_flight = integr;

    % Calculate liftoff energy level
    Einit = 0.5*m*(xdlo^2+ydlo^2)+...
        m*g*ylo+...
        0.5*k*(l0-lp(1,i7))^2;

    % Calculate the "virtual" stiffness to be used by the controller
    k = m*(3.14/stance_time)^2;

    % Calculate the "virtual" damping to be used by the controller
    dltmin = l0 - (min(yp(1,stance_indicator : i7)) - ...
        ground_level);
    w = 3.14/stance_time;
    T = 2*stance_time;
    integr1 = dltmin^2*w^2*(T/4+(1/(4*w))*sin(w*T));
    b = (ground_energy_losses + viscous_energy_losses_stance)/integr1;
end

if i3 > 2
    % Save actual k
    kactual = k;

    % Find i7 counters that indicates flight and stance
    flight_indicators = find(indp==1);
    for i = 1 : length(flight_indicators)-1

```

```

        if flight_indicators(1,i+1)-flight_indicators(1,i) > 1
            flight_indicator = flight_indicators(1,i+1);
        end
    end

    stance_indicators = find(indp==2);
    for i = 1 : length(stance_indicators)-1
        if stance_indicators(1,i+1)-stance_indicators(1,i) > 1
            stance_indicator = stance_indicators(1,i+1);
        end
    end

    % Ground level for previous gait
    ground_level = ygp(1,stance_indicator);

    % Angle span during stance
    theta_span_stance = gamp(1,i7)-gamp(1,stance_indicator);

    % Calculate stance time
    stance_time = tp(1,i7)-tp(1,stance_indicator);

    % Calculate ground energy losses
    sum = 0;
    for j = stance_indicator+1 : i7-1
        sum = sum + Fyp(1,j)*ygd(1,j);
    end
    integrA = ((tp(1,i7)-tp(1,stance_indicator))/...
        (2*(i7-stance_indicator)))*...
        (Fyp(1,stance_indicator)*ygd(1,stance_indicator)+2*sum+...
        Fyp(1,i7)*ygd(1,i7));
    sum = 0;
    for j = stance_indicator+1 : i7-1
        sum = sum + Ftp(1,j)*xgd(1,j);
    end
    integrB = ((tp(1,i7)-tp(1,stance_indicator))/...
        (2*(i7-stance_indicator)))*...
        (Ftp(1,stance_indicator)*xgd(1,stance_indicator)+2*sum+...
        Ftp(1,i7)*xgd(1,i7));
    ground_energy_losses = abs(integrA)+abs(integrB);

    % Calculate leg viscous energy losses FOR THE WHOLE GAIT
    sum = 0;
    for j = flight_indicator+1 : i7-1
        sum = sum + ldp(1,j)^2;
    end
    integr = ((tp(1,i7)-tp(1,flight_indicator))/...
        (2*(i7-flight_indicator)))*...
        (ldp(1,flight_indicator)^2+2*sum+ldp(1,i7)^2);
    viscous_energy_losses = b*abs(integr);

    % Calculate leg viscous energy losses FOR STANCE
    sum = 0;
    for j = stance_indicator+1 : i7-1
        sum = sum + ldp(1,j)^2;
    end
    integr = ((tp(1,i7)-tp(1,stance_indicator))/...
        (2*(i7-stance_indicator)))*...
        (ldp(1,stance_indicator)^2+2*sum+ldp(1,i7)^2);
    viscous_energy_losses_stance = b*abs(integr);

    % Calculate energy offered from motor during flight
    sum = 0;
    for j = flight_indicator+1 : stance_indicator-2
        sum = sum + torp(1,j)*gamdp(1,j);
    end
end

```

```

    integr = ((tp(1,stance_indicator-1)-tp(1,flight_indicator))/...
              (2*(stance_indicator-flight_indicator-1))*...
              (torp(1,flight_indicator)*gamdp(1,flight_indicator)+2*sum+...
              torp(1,stance_indicator-1)*gamdp(1,stance_indicator-1));
    energy_motor_flight = integr;

    % Calculate liftoff energy level
    Einit = 0.5*m*(xdlo^2+ydlo^2)+...
            m*g*ylo+...
            0.5*k*(l0-lp(1,i7))^2;

    % Calculate the "virtual" stiffness to be used by the controller
    k = m*(3.14/stance_time)^2;

    % Calculate the "virtual" damping to be used by the controller
    dltmin = l0 - (min(yp(1,stance_indicator : i7)) - ...
                  ground_level);
    w = 3.14/stance_time;
    T = 2*stance_time;
    integr1 = dltmin^2*w^2*(T/4+(1/(4*w))*sin(w*T));
    b = (ground_energy_losses + viscous_energy_losses_stance)/integr1;
end

% CONTROL TOUCHDOWN ANGLE
% Find slope and estimate next ground level
slope = atan2(ground_level-y_level_previous, xgp(i7)-x_level_previous);
gamtd_estimation = gamp(stance_indicator);
A1 = g;
A2 = -2*l0*g*sin(gamtd_estimation)-...
      2*xp(i7)*g-...
      2*xdlo*ydlo+...
      2*xdlo^2*tan(slope);
A3 = 10*g*sin(gamtd_estimation)*(10*sin(gamtd_estimation)+2*xp(i7))+...
      xp(i7)^2*g+...
      2*xdlo*ydlo*(xp(i7)+10*sin(gamtd_estimation))+...
      2*xdlo^2*ground_level-...
      2*xdlo^2*tan(slope)*xgp(i7)+...
      2*xdlo^2*(10*cos(gamtd_estimation)-ylo);
rootpoly = roots([A1 A2 A3]);
ground_level_next = ground_level + (rootpoly(1)-xgp(i7))*tan(slope);

% Ground penetration at the end of the previous gait
final_depth = ygp(i7) - ground_level;

% Correction of the desired height and desired speed
h = h + ground_level_next;
xd = xddes;

A = k*l0*(k-m*xd^2/l0^2)/((k-m*xd^2/l0^2)^2+(b*xd/l0)^2);
B = -k*b*xd/((k-m*xd^2/l0^2)^2+(b*xd/l0)^2);
l1 = -b/(2*m);
l2 = sqrt(4*m*k-b^2)/(2*m);

yapex = ylo + ydlo^2/(2*g);

m1 = l1*exp(l1*stance_time)*cos(l2*stance_time)...
      -l2*exp(l1*stance_time)*sin(l2*stance_time);
m2 = l1*exp(l1*stance_time)*sin(l2*stance_time)...
      +l2*exp(l1*stance_time)*cos(l2*stance_time);
m3 = -(A*xd/l0)*sin(xd*stance_time/l0)...
      -(B*xd/l0)*cos(xd*stance_time/l0);
m4 = (A*xd/l0)*cos(xd*stance_time/l0)...
      -(B*xd/l0)*sin(xd*stance_time/l0);

```

```

n1 = sqrt(2*g*(h-final_depth-ground_level_next)-2*g*10) + ...
      (2*g*10)/(2*sqrt(2*g*(h-final_depth-ground_level_next)-2*g*10));
n2 = -(2*g*10)/(2*sqrt(2*g*(h-final_depth-ground_level_next)-2*g*10));
n3 = n2*cos(xd*stance_time/10);
n4 = n2*sin(xd*stance_time/10);
n5 = -sqrt(2*g*(yapex-ground_level_next)-2*g*10) - ...
      (2*g*10)/(2*sqrt(2*g*(yapex-ground_level_next)-2*g*10));
n6 = (2*g*10)/(2*sqrt(2*g*(yapex-ground_level_next)-2*g*10));

m5 = (10-A)*m1 + (B*xd/10)*(m2/12) - (m2/12)*l1*(10-A) + ...
      m3 - n3 + (m2/12)*n6;
m6 = -B*m1 - (A*xd/10)*(m2/12) + (m2/12)*l1*B + m4 - n4;
m7 = n1 - (m2/12)*n5 - m1*(m*g/k) + (m2/12)*l1*(m*g/k) - ...
      m1*ground_level_next + (m2/12)*l1*ground_level_next;

R1 = sqrt(m5^2+m6^2);
theta1 = atan2(m6,m5);
theta2 = -acos(m7/R1);
gamtd = theta1 + theta2;

y_level_previous = ground_level;
x_level_previous = xgp(i7);

% CONTROL TORQUE
% Calculate desired apex height energy level
Esys_d = 0.5*m*(xddes^2)+...
      m*g*yapex;
% Find the static friction time span from the previous gait
static_friction_indices = find(xgdp(stance_indicator:i7) <= 1e-4);
static_friction_start = stance_indicator + static_friction_indices(1) -
1;
max_time = tp(static_friction_start) - tp(stance_indicator);
% Calculate torque
torctr = (Esys_d + ...
      ground_energy_losses + ...
      viscous_energy_losses - ...
      energy_motor_flight - ...
      Einit)/theta_span_stance;

% Check if a rebound has occurred and defy the controller
if stance_time <= 3.14*sqrt(m/kactual)
    disp('rebound');
    torctr = torctr_previous;
    gamtd = gamtd_previous;
end
torctr_previous = torctr;
gamtd_previous = gamtd;

% Introduce mechanical limits of gamtd and torctr
% Max value 0.26rad for angle and 4Nm for the motor
% REMEMBER TO CHANGE TORQUE MAXIMUM VALUE IN DYNAMICS
gamtd = gamtd*(abs(gamtd)<=0.26)+0.26*sign(gamtd)*(abs(gamtd)>0.26);
torctr = torctr*(abs(torctr)<=4.0)+4.0*sign(torctr)*(abs(torctr)>4.0);
end
end
%=====

%===== DYNAMICS =====
function sys = dynamics1(t,yi,K,B,n,lamdac,lamdar_ind_1,lamdar_ind_2,...

```

```

m,ml,b,k,l0,g,ind,gamtd,torctr,max_time,static_friction_coeff,...
slip_friction_coeff,x_ground,y_ground)

global i3 indp indold i7 tch tp xp xdp yp ydp xgp xgdp ygp ygdp lp ldp gamp
gamdp torp
global Fslipp Ftp Fyp lock ygc ygf lamda_old lamda_new recompr_ind

global gotap xdap yap
global y_td

global told

switch ind
  case 1

    ygc = 0;
    ygf = 0;
    lock = 0;
    recompr_ind = 0;
    lamda_old = lamdac;
    lamda_new = lamdac;

    % Flight PD controller
    kp = 150;
    kd = 2.4;

    x = yi(1); xd = yi(2); y = yi(3); yd = yi(4);
    xg = yi(5); xgd = yi(6); yg = yi(7); ygd = yi(8);

    gam = atan2(xg-x,y-yg);
    l = sqrt((xg-x)^2+(y-yg)^2);

    gamd = (xgd-xd)*cos(gam)/l-(yd-ygd)*sin(gam)/l;
    ld = (xgd-xd)*sin(gam)+(yd-ygd)*cos(gam);

    tor = kp*(gamtd-gam)-kd*gamd;
    tor = tor*(abs(tor)<=4.0)+4.0*sign(tor)*(abs(tor)>4.0);

    Fy = 0;
    Ft = 0;
    Fslip = 0;

    sys(1) = xd;
    sys(2) = (1/m)*(-tor*cos(gam)/l-...
      k*sin(gam)*(l0-l)+b*ld*sin(gam));
    sys(3) = yd;
    sys(4) = -g+(1/m)*(-tor*sin(gam)/l+...
      k*cos(gam)*(l0-l)-b*ld*cos(gam));
    sys(5) = xgd;
    sys(6) = -(1/ml)*(-tor*cos(gam)/l-...
      k*sin(gam)*(l0-l)+b*ld*sin(gam));
    sys(7) = ygd;
    sys(8) = -g-(1/ml)*(-tor*sin(gam)/l+...
      k*cos(gam)*(l0-l)-b*ld*cos(gam));

  case 2

    x = yi(1); xd = yi(2); y = yi(3); yd = yi(4);
    xg = yi(5); xgd = yi(6); yg = yi(7); ygd = yi(8);

    l = sqrt((xg-x)^2+(y-yg)^2);
    gam = atan2(xg-x,y-yg);

    gamd = (xgd-xd)*cos(gam)/l-(yd-ygd)*sin(gam)/l;
    ld = (xgd-xd)*sin(gam)+(yd-ygd)*cos(gam);

```

```

if t - told <= max_time
    tor = -4;
else
    tor = torctr;
end

% Implement impact model taking into consideration 'y_td'
if yg-ygp(i7)>0 && lock==0
    lock = 1;
    recompr_ind = recompr_ind+1;
    lamda_new = 1+...
        lamdar_ind_1*(1-exp(-lamdar_ind_2*recompr_ind));
    ygc = ygp(i7) - y_td;
    ygf = ygc*(1-(lamda_old/lamda_new)^(1/n))+...
        ygf*(lamda_old/lamda_new)^(1/n);
elseif yg-ygp(i7)<0 && lock == 1
    lock = 0;
    lamda_old = lamda_new;
end

% Calculate force from the ground
Fy = (lamda_old*(lock==0)+lamda_new*(lock==1))*...
    K*(abs(yg - y_td)-abs(ygf))^n + ...
    B*(abs(yg - y_td)-abs(ygf))^n*(-ygd);

% Calculate friction
Fstatic = static_friction_coeff * Fy;
Fslip = slip_friction_coeff * Fy;
Fe = k*(l0-1)*sin(gam) - b*ld*sin(gam) + (tor/l)*cos(gam);

if abs(xgd) <= 1e-4 % FRICTION ZERO CROSSING !!!
    slip = 0;
    stick = 1;
else
    slip = 1;
    stick = 0;
end

if stick == 1 && abs(Fe) >= Fstatic
    Ft = -sign(Fe)*Fstatic;
elseif stick == 1 && abs(Fe) < Fstatic
    Ft = -Fe;
end

if slip == 1
    Ft = -sign(xgd)*Fslip;
end

sys(1) = xd;
sys(2) = (1/m)*((-tor*cos(gam))/l-k*sin(gam)*(l0-1)+b*ld*sin(gam));
sys(3) = yd;
sys(4) = (1/m)*(-m*g+(-tor*sin(gam))/l+k*cos(gam)*(l0-1)-...
    b*ld*cos(gam));
sys(5) = xgd;
sys(6) = (1/ml)*(tor*cos(gam)/l+...
    k*sin(gam)*(l0-1)-b*ld*sin(gam)+Ft);
sys(7) = ygd;
sys(8) = (1/ml)*(-ml*g+(tor*sin(gam))/l+...
    Fy-k*cos(gam)*(l0-1)+b*ld*cos(gam));

end

sys = sys';

%-----%

```



```

% Data Gathering

if (t>=(i7+1)*5e-4)
    tch      = 0;
end

if tch==0
    i7      = i7+1;
    tch     = 1;
    tp(i7)  = t;
    indp(i7) = ind;
    xp(i7)  = x;
    xdp(i7) = xd;
    yp(i7)  = y;
    ydp(i7) = yd;
    xgp(i7) = xg;
    xgdp(i7) = xgd;
    ygp(i7) = yg;
    ygdp(i7) = ygd;
    lp(i7)  = l;
    ldp(i7) = ld;
    gamp(i7) = gam;
    gamdp(i7) = gamd;
    torp(i7) = tor;
    Fyp(i7)  = Fy;
    Ftp(i7)  = Ft;
    Fslipp(i7) = Fslip;
end

if ydp(i7)<=0 & gotap==0
    xdap(i3) = xdp(i7);
    yap(i3)  = yp(i7);
    gotap    = 1;
end

end

%===== EVENTS =====%
function [value,isterminal,direction] = events1(t,yi,K,B,n,lamdac,...
    lamdar_ind_1,lamdar_ind_2,m,ml,b,k,l0,g,ind,gamtd,torcctr,max_time,...
    static_friction_coeff,slip_friction_coeff,x_ground,y_ground)

global Fyp i7 y_td

switch ind
case 1
    % flight phase
    x = yi(1); xd = yi(2); y = yi(3); yd = yi(4);
    xg = yi(5); xgd = yi(6); yg = yi(7); ygd = yi(8);

    x_index = find(abs(x_ground-xg) == min(abs(x_ground-xg)));
    if xg < x_ground(x_index)
        x_index = x_index - 1;
    end
    y_td = ((y_ground(x_index+1) - y_ground(x_index))/(x_ground(x_index+1) -
x_ground(x_index))) * ...
        (xg - x_ground(x_index)) + y_ground(x_index);

    value(1) = 1;
    value(2) = (yg-y_td);

```

```

case 2
% stance phase
x = yi(1); xd = yi(2); y = yi(3); yd = yi(4);
xg = yi(5); xgd = yi(6); yg = yi(7); ygd = yi(8);

value(1) = Fyp(i7)-5;      % FORCE ZERO CROSSING !!!
value(2) = 1;
end
%
value=value';
%
isterminal = ones(length(value),1);
direction = zeros(length(value),1);
direction(1) = -1;
direction(2) = -1;
end
%=====

```

Παράρτημα Γ

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται τεχνικά χαρακτηριστικά από τα διάφορα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν στη διάταξη του μονόποδου ρομπότ.

BeagleBoard-xM breaks 1-GHz performance barrier for embedded design innovators and hobbyists



BeagleBoard-xM delivers extra MIPS with 1-GHz ARM® Cortex™-A8 performance and extra memory with 512MB of low-power DDR RAM, enabling hobbyists, innovators and engineers to go beyond their current imagination and be inspired by the **BeagleBoard.org** community. Designed with the community inputs in mind, this open hardware design improves upon the laptop-like performance and expandability, while keeping at hand-held power levels. Direct connectivity is supported by the on-board four-port hub with 10/100 Ethernet, while maintaining a tiny 3.25" × 3.25" footprint.

As with previous **BeagleBoard.org** offerings, the BeagleBoard-xM is not intended to be a complete development environment, but rather a community-supported platform that can be used as the basis for building more complete development systems and as a target for community software baselines. For a complete development system, please consider the Sitara™ AM37x Evaluation Module from Texas Instruments (www.ti.com/am37x).

Specifications:

Hardware:

- 1-GHz super-scalar ARM Cortex™-A8
- 512-MB LPDDR RAM
- High-speed USB 2.0 OTG port optionally powers the board
- On-board four-port high-speed USB 2.0 hub with 10/100 Ethernet
- DVI-D (digital computer monitors and HDTVs)
- S-video (TV out)
- Stereo audio out/in
- High-capacity microSD slot and 4-GB microSD card
- JTAG
- Camera port

Software*:

- Validation and demonstration image from the Angstrom Distribution

Applications of BeagleBoard-xM:

- Web services
- 3-D gaming
- 3-D UI
- Linux kernel and driver development
- Boot loaders and firmware
- UI framework
- ARM® NEON codecs
- Codec plug-ins for GStreamers
- OpenGL® applications
- OpenMAX™ IL applications
- Ubuntu, Android, MeeGo, WinCE, QNX, Angstrom, Symbian, Debian, Gentoo and others
- Home media centers
- In-vehicle entertainment
- Robotics
- Web kiosks
- Digital signage
- And many more ...!

Compatible with:

- OMAP35x processor
- DaVinci™ DM37x processor
- Sitara AM37x processor



Go to **BeagleBoard.org** to order your BeagleBoard-xM (U.S. \$179) – available end of June 2010

* Open source software is included for validation and demonstration purposes only. Learn about additional available software at **BeagleBoard.org**

BeagleBoard.org

BeagleBoard.org promotes and motivates open source development on OMAP™-, DaVinci- and Sitara-based systems. The key objectives of the organizations are to:

- Enable hobbyists and innovators to explore new domains and experiment with their ideas on an open platform
- Enable such experiments to be conducted cost effectively – to nurture innovation – by enabling supply of ultra-low-cost OMAP, DaVinci and Sitara hardware platforms
- Bring together the OMAP, DaVinci and Sitara communities by providing the basic infrastructure to exchange ideas and thoughts on OMAP, DaVinci and Sitara technologies
- Enhance the visibility and facilitate widespread adoption of the technology developed by the community by providing a source-controlled and consolidated project hosting service



FEATURES

- Triaxis digital gyroscope with digital range scaling**
 $\pm 75^\circ/\text{sec}$, $\pm 150^\circ/\text{sec}$, $\pm 300^\circ/\text{sec}$ settings
- Tight orthogonal alignment:** $< 0.05^\circ$
- Triaxis digital accelerometer:** $\pm 5 g$
- Autonomous operation and data collection**
No external configuration commands required
Start-up time: 180 ms
Sleep mode recovery time: 4 ms
- Factory-calibrated sensitivity, bias, and axial alignment**
Calibration temperature range: -20°C to $+70^\circ\text{C}$
- SPI-compatible serial interface**
- Wide bandwidth:** 330 Hz
- Embedded temperature sensor**
- Programmable operation and control**
Automatic and manual bias correction controls
Bartlett window, FIR filter length, number of taps
Digital I/O: data ready, alarm indicator, general-purpose
Alarms for condition monitoring
Sleep mode for power management
DAC output voltage
Enable external sample clock input: up to 1.2 kHz
Single-command self-test
- Single-supply operation:** 4.75 V to 5.25 V
- 2000 g shock survivability**
- Operating temperature range:** -40°C to $+105^\circ\text{C}$

APPLICATIONS

- Medical instrumentation
- Robotics
- Platform controls
- Navigation

GENERAL DESCRIPTION

The ADIS16364 *iSensor*[®] is a complete inertial system that includes a triaxis gyroscope and triaxis accelerometer. Each sensor in the ADIS16364 combines industry-leading *iMEMS*[®] technology with signal conditioning that optimizes dynamic performance. The factory calibration characterizes each sensor for sensitivity, bias, alignment, and linear acceleration (gyro bias). As a result, each sensor has its own dynamic compensation formulas that provide accurate sensor measurements over a temperature range of -20°C to $+70^\circ\text{C}$.

The ADIS16364 provides a simple, cost-effective method for integrating accurate, multi-axis inertial sensing into industrial systems, especially when compared with the complexity and investment associated with discrete designs. All necessary motion testing and calibration are part of the production process at the factory, greatly reducing system integration time. Tight orthogonal alignment simplifies inertial frame alignment in navigation systems. An improved SPI interface and register structure provide faster data collection and configuration control.

The ADIS16364 uses a compatible pinout and the same package as the ADIS1635x family. Therefore, systems that currently use the ADIS1635x family can upgrade their performance with minor firmware adjustments in their processor designs.

This compact module is approximately 23 mm × 23 mm × 23 mm and provides a flexible connector interface that enables multiple mounting orientation options.

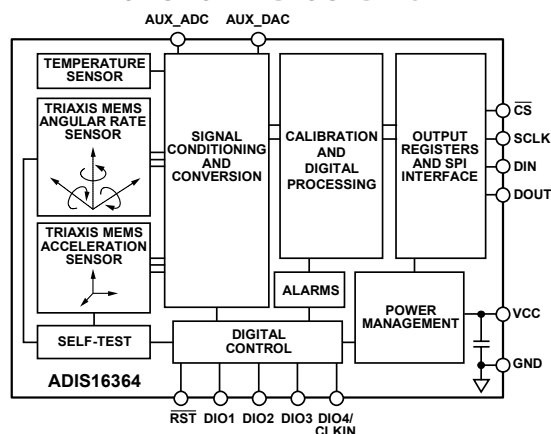
FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM


Figure 1.

Rev. E

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



2-Wire Serial 8-Bit DACs with Rail-to-Rail Outputs

MAX517/MAX518/MAX519

General Description

The MAX517/MAX518/MAX519 are 8-bit voltage output digital-to-analog converters (DACs) with a simple 2-wire serial interface that allows communication between multiple devices. They operate from a single 5V supply and their internal precision buffers allow the DAC outputs to swing rail-to-rail.

The MAX517 is a single DAC and the MAX518/MAX519 are dual DACs. The MAX518 uses the supply voltage as the reference for both DACs. The MAX517 has a reference input for its single DAC and each of the MAX519's two DACs has its own reference input.

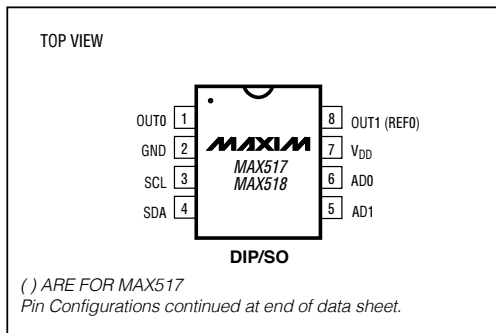
The MAX517/MAX518/MAX519 feature a serial interface and internal software protocol, allowing communication at data rates up to 400kbps. The interface, combined with the double-buffered input configuration, allows the DAC registers of the dual devices to be updated individually or simultaneously. In addition, the devices can be put into a low-power shutdown mode that reduces supply current to 4µA. Power-on reset ensures the DAC outputs are at 0V when power is initially applied.

The MAX517/MAX518 are available in space-saving 8-pin DIP and SO packages. The MAX519 comes in 16-pin DIP and SO packages.

Applications

- Minimum Component Analog Systems
- Digital Offset/Gain Adjustment
- Industrial Process Control
- Automatic Test Equipment
- Programmable Attenuators

Pin Configurations



Features

- ◆ Single +5V Supply
- ◆ Simple 2-Wire Serial Interface
- ◆ I²C Compatible
- ◆ Output Buffer Amplifiers Swing Rail-to-Rail
- ◆ Space-Saving 8-pin DIP/SO Packages (MAX517/MAX518)
- ◆ Reference Input Range Includes Both Supply Rails (MAX517/MAX519)
- ◆ Power-On Reset Clears All Latches
- ◆ 4µA Power-Down Mode

Ordering Information

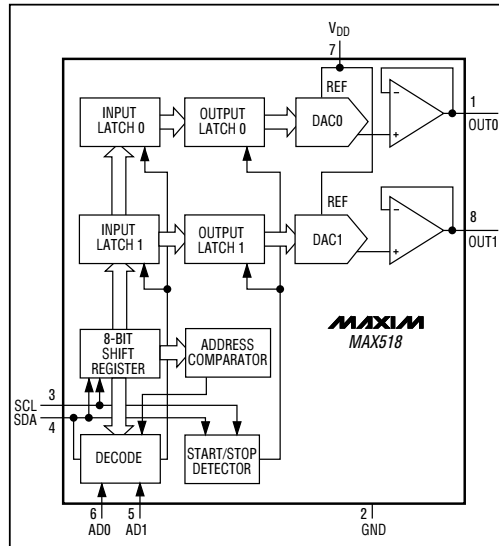
PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE	TUE (LSB)
MAX517ACPA	0°C to +70°C	8 Plastic DIP	1
MAX517BCPA	0°C to +70°C	8 Plastic DIP	1.5
MAX517ACSA	0°C to +70°C	8 SO	1
MAX517BCSA	0°C to +70°C	8 SO	1.5
MAX517BC/D	0°C to +70°C	Dice*	1.5

Ordering Information continued at end of data sheet.

*Dice are specified at T_A = +25°C, DC parameters only.

**Contact factory for availability and processing to MIL-STD-883.

Functional Diagram



Call toll free 1-800-998-8800 for free samples or literature.

Description	Power Range						
<p>The DZRALTE-012L080 digital servo drive is designed to drive brushed and brushless servomotors from a compact form factor ideal for embedded applications. This fully digital drive operates in torque, velocity, or position mode and employs Space Vector Modulation (SVM), which results in higher bus voltage utilization and reduced heat dissipation compared to traditional PWM. The command source can be generated internally or can be supplied externally. In addition to motor control, this drive features dedicated and programmable digital and analog inputs and outputs to enhance interfacing with external controllers and devices.</p> <p>The DZRALTE-012L080 features a RS-232 interface for drive configuration and setup as well as a RS-485 interface for drive networking. Drive commissioning is accomplished using DriveWare available at www.a-m-c.com.</p> <p>All drive and motor parameters are stored in non-volatile memory.</p>	<table border="1"> <tr> <td>Peak Current</td> <td>12 A (8.5 A_{RMS})</td> </tr> <tr> <td>Continuous Current</td> <td>6 A (4.2 A_{RMS})</td> </tr> <tr> <td>Supply Voltage</td> <td>20 - 80 VDC</td> </tr> </table>	Peak Current	12 A (8.5 A _{RMS})	Continuous Current	6 A (4.2 A _{RMS})	Supply Voltage	20 - 80 VDC
	Peak Current	12 A (8.5 A _{RMS})					
	Continuous Current	6 A (4.2 A _{RMS})					
Supply Voltage	20 - 80 VDC						



Features

- ▲ Four quadrant regenerative operation
 - ▲ Space vector modulation (SVM) technology
 - ▲ Fully digital state-of-the-art design
 - ▲ Programmable gain settings
- ▲ Fully configurable current, voltage, velocity and position limits
 - ▲ PIDF velocity loop
 - ▲ PID + FF position loop
 - ▲ Compact size, high power density

MODES OF OPERATION

- Current
- Position
- Velocity

COMMAND SOURCE

- Encoder Following
- ±10 V Analog
- 5 V Step & Direction

FEEDBACK SUPPORTED

- Halls
- Incremental Encoder
- ±10 V Analog
- Auxiliary Incremental Encoder

INPUTS/OUTPUTS

- 2 High Speed Captures
- 1 Programmable Analog Input (12-bit Resolution)
- 2 Programmable Digital Inputs (Differential)
- 3 Programmable Digital Inputs (Single-Ended)
- 3 Programmable Digital Outputs (Single-Ended)

COMPLIANCES & AGENCY APPROVALS

- RoHS
- UL/cUL Pending
- CE Pending

Description

The E4P miniature encoder is designed to provide digital quadrature encoder feedback for high volume applications with limited space constraints. The E4P version utilizes an innovative, patented push-on codewheel which accepts shaft diameters of 1.5mm to .250".

The E4P encoder is the leader for high quantity OEM applications, but the E4 is the ideal choice when a set-screw codewheel encoder is required (see the E4 page).

The E4P miniature encoder base provides mounting holes for two #3-48, length 1/4" or two M2.5x.45mm, length 6mm screws on a .586" bolt circle. When mounting holes are not available, a pre-applied transfer adhesive (with peel-off backing) is available for "stick-on" mounting.

The encoder cover is easily snapped onto the base and is embossed with the connector pin-out.

The E4P series encoder can be connected by using a (high retention 4-conductor snap-in polarized 1.25mm pitch) connector. Mating cables and connectors (see the Cables / Connectors web page) are not included and are available separately.



Features

- ▶ Miniature size
- ▶ Push-on hub - spring loaded collet design
- ▶ Minimum shaft length of .375"
- ▶ Fits shaft diameters of .059" to .250"
- ▶ Accepts +/- .020" Axial shaft play
- ▶ Off-axis mounting tolerance of .010"
- ▶ 100 to 360 cycles per revolution (CPR)
- ▶ 400 to 1440 pulses per revolution (PPR)
- ▶ Single +5V supply

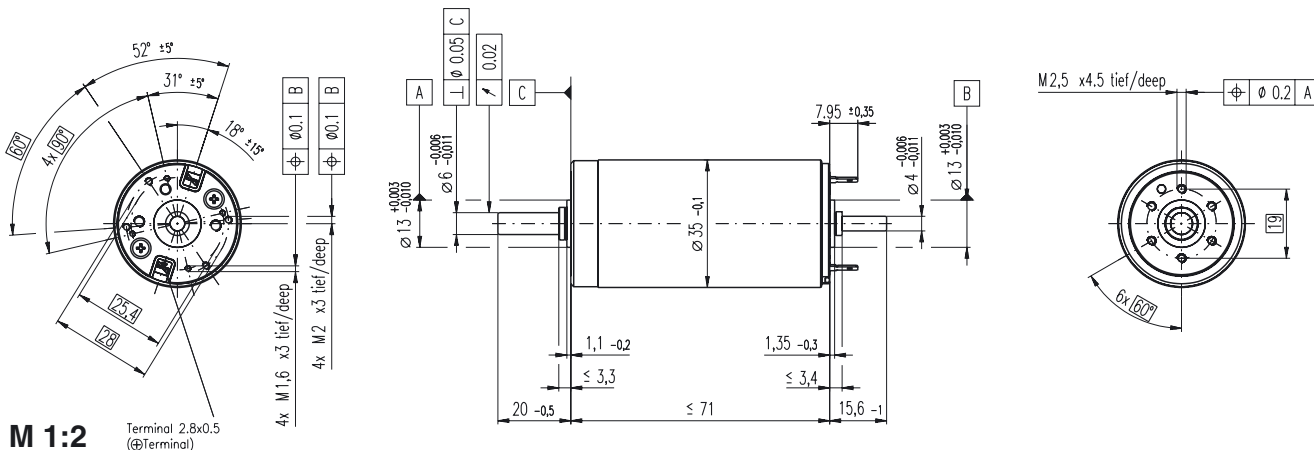
Related Products & Accessories

- ▶ CA-FC5-SH-MIC4 5-Pin Latching / 4-Pin Micro Shielded Cable (Base price \$15.18)
- ▶ CA-MD6-SS-MIC4 6-Pin Modular / 4-Pin Micro Unshielded Cable (Base price \$11.53)
- ▶ CA-MIC4-SH-NC 4-Pin Micro / Unterminated Shielded Cable (Base price \$7.30)
- ▶ CA-MIC4-W4-NC 4-Pin Micro / Unterminated 4-Wire Discrete Cable (Base price \$6.80)
- ▶ CON-MIC4 4-Pin Micro Connector (Base price \$3.15)
- ▶ MCTOOL Centering Tool for E4, E4P, and E8P (Base price \$5.25)
- ▶ SPACER Spacer Tool (Base price \$0.95)

Mechanical Drawing

RE 35 $\varnothing 35$ mm, Graphite Brushes, 90 Watt

new with lever brushes



M 1:2 Terminal 2.8x0.5 (Terminal)

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request!)

Order Number

according to dimensional drawing
Shaft length 15.6 shortened to 4 mm

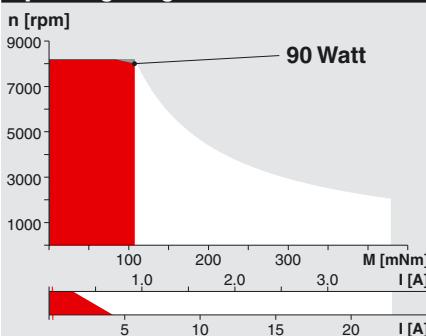
273752	273753	273754	273755	273756	273757	273758	273759	273760	273761	273762	273763	273764	273765	273766
285785	285786	285787	285788	285789	285790	285791	285792	285793	285794	285795	285796	285797	285798	285799

Motor Data (provisional)		273752	273753	273754	273755	273756	273757	273758	273759	273760	273761	273762	273763	273764	273765	273766
1 Assigned power rating	W	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
2 Nominal voltage	Volt	15.0	30.0	42.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
3 No load speed	rpm	7070	7220	7530	7270	6650	5970	4750	3810	3140	2570	2100	1620	1290	1060	856
4 Stall torque	mNm	872	949	1070	966	878	766	613	493	394	320	253	194	155	125	99.5
5 Speed / torque gradient	rpm / mNm	8.45	7.77	7.17	7.63	7.68	7.89	7.86	7.84	8.09	8.19	8.47	8.55	8.54	8.80	8.94
6 No load current	mA	245	124	93	77	69	60	45	34	27	22	17	13	10	8	7
7 Starting current	A	44.9	24.4	20.3	15.5	12.9	10.1	6.43	4.16	2.74	1.83	1.18	0.704	0.448	0.298	0.193
8 Terminal resistance	Ohm	0.334	1.23	2.07	3.09	3.72	4.75	7.46	11.5	17.5	26.2	40.5	68.2	107	161	248
9 Max. permissible speed	rpm	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200
10 Max. continuous current	A	4.00	2.74	2.15	1.78	1.63	1.45	1.17	0.944	0.768	0.630	0.508	0.392	0.313	0.256	0.206
11 Max. continuous torque	mNm	77.7	107	113	111	111	110	111	112	111	110	109	108	108	107	106
12 Max. power output at nominal voltage	W	152	175	206	181	150	118	75.0	48.4	31.8	21.2	13.7	8.07	5.10	3.36	2.15
13 Max. efficiency	%	81	84	86	85	85	84	83	82	80	79	77	74	72	69	66
14 Torque constant	mNm / A	19.4	38.9	52.5	62.2	68.0	75.8	95.2	119	144	175	214	276	346	418	515
15 Speed constant	rpm / V	491	246	182	154	140	126	100.0	80.6	66.4	54.6	44.7	34.6	27.6	22.9	18.5
16 Mechanical time constant	ms	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
17 Rotor inertia	gcm ²	65.5	65.5	69.6	65.0	64.5	62.7	62.8	62.8	60.7	59.9	57.9	57.2	57.2	55.5	54.5
18 Terminal inductance	mH	0.09	0.34	0.62	0.87	1.04	1.29	2.04	3.16	4.65	6.89	10.30	17.10	26.90	39.30	59.70
19 Thermal resistance housing-ambient	K / W	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
20 Thermal resistance rotor-housing	K / W	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
21 Thermal time constant winding	s	27	27	29	27	27	26	26	26	25	25	24	24	24	23	23

Specifications

- Axial play 0.05 - 0.15 mm
- Max. **ball bearing** loads
 - axial (dynamic) 5.6 N
 - not preloaded 2.4 N
 - radial (5 mm from flange) 28 N
 - Force for press fits (static) 110 N
 - (static, shaft supported) 1200 N
- Radial play **ball bearing** 0.025 mm
- Ambient temperature range -20 ... +100°C
- Max. rotor temperature +155°C
- Number of commutator segments 13
- Weight of motor 340 g
- 2 pole permanent magnet
- Values listed in the table are nominal. For applicable tolerances see page 43. For additional details please use the maxon selection program on the enclosed CD-ROM.

Operating Range



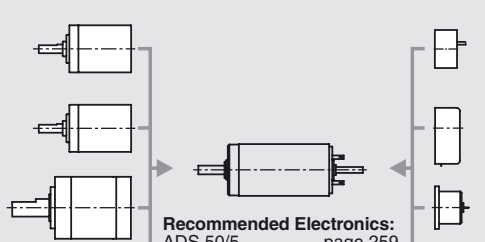
Comments

- Recommended operating range**
- Continuous operation**
In observation of above listed thermal resistances (lines 19 and 20) the maximum permissible rotor temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.
- Short term operation**
The motor may be briefly overloaded (recurring).
- 273766** Motor with high resistance winding
- 273752** Motor with low resistance winding

maxon Modular System

Overview on page 17 - 21

- Planetary Gearhead**
 $\varnothing 32$ mm
0.75 - 4.5 Nm
Details page 219
- Planetary Gearhead**
 $\varnothing 32$ mm
1.0 - 6.0 Nm
Details page 220
- Planetary Gearhead**
 $\varnothing 42$ mm
3 - 15 Nm
Details page 224

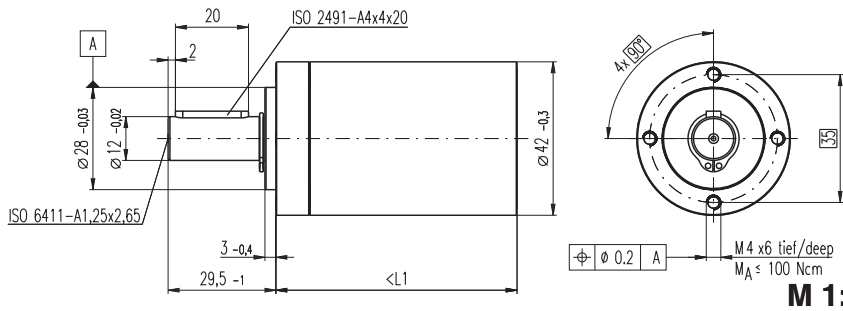


- Recommended Electronics:**
- ADS 50/5 page 259
- ADS 50/10 259
- ADS_E 50/5, 50/10 260
- EPOS 24/5 271
- MIP 50 273
- Notes 17

- Encoder MR**
256 - 1024 CPT,
3 channels
Details page 239
- Encoder HED_5540**
500 CPT,
3 channels
Details page 242 / 244
- DC-Tacho DCT**
 $\varnothing 22$ mm
0.52 V
Details page 252
- Brake AB**
 $\varnothing 40$ mm
24 VDC, 0.4 Nm
Details page 279

Planetary Gearhead GP 42 C $\varnothing 42$ mm, 3 - 15 Nm

Ceramic Version



Technical Data

Planetary Gearhead	straight teeth
Output shaft	stainless steel
Bearing at output	preloaded ball bearings
Radial play, 12 mm from flange	max. 0.06 mm
Axial play at axial load	< 5 N 0 mm > 5 N max. 0.3 mm
Max. permissible axial load	150 N
Max. permissible force for press fits	300 N
Sense of rotation, drive to output	=
Recommended input speed	< 8000 rpm
Recommended temperature range	-20 ... +100°C
Extended area as option	-35 ... +100°C
Number of stages	1 2 3 4
Max. radial load, 12 mm from flange	120 N 150 N 150 N 150 N

maxon gear

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Order Number

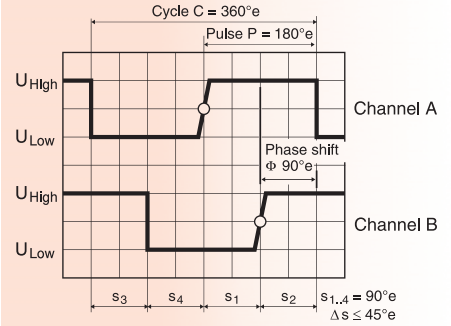
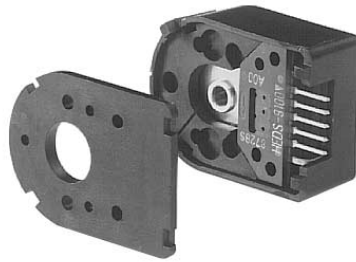
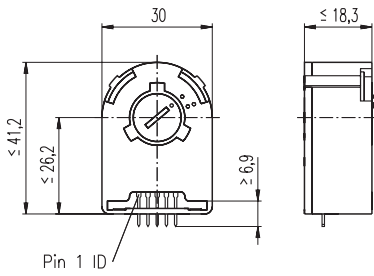
	203113	203115	203119	203120	203124	203129	203128	203133	203137	203141
Gearhead Data										
1 Reduction	3.5 : 1	12 : 1	26 : 1	43 : 1	81 : 1	156 : 1	150 : 1	285 : 1	441 : 1	756 : 1
2 Reduction absolute	7/2	49/4	26	343/8	2197/27	156	2401/16	15379/54	441	756
3 Mass inertia gcm ²	14	15	9.1	15	9.4	9.1	15	15	14	14
4 Max. motor shaft diameter mm	10	10	8	10	8	8	10	10	10	10
Order Number	203114	203116		203121	203125		203130	203134	203138	203142
1 Reduction	4.3 : 1	15 : 1		53 : 1	91 : 1		186 : 1	319 : 1	488 : 1	936 : 1
2 Reduction absolute	13/3	91/6		637/12	91		4459/24	637/2	4394/9	936
3 Mass inertia gcm ²	9.1	15		15	15		15	15	9.4	9.1
4 Max. motor shaft diameter mm	8	10		10	10		10	10	8	8
Order Number		203117		203122	203126		203131	203135	203139	
1 Reduction		19 : 1		66 : 1	113 : 1		230 : 1	353 : 1	546 : 1	
2 Reduction absolute		169/9		1183/18	338/3		8281/36	28561/81	546	
3 Mass inertia gcm ²		9.4		15	9.4		15	9.4	14	
4 Max. motor shaft diameter mm		8		10	8		10	8	10	
Order Number		203118		203123	203127		203132	203136	203140	
1 Reduction		21 : 1		74 : 1	126 : 1		257 : 1	394 : 1	676 : 1	
2 Reduction absolute		21		147/2	126		1029/4	1183/3	676	
3 Mass inertia gcm ²		14		15	14		15	15	9.1	
4 Max. motor shaft diameter mm		10		10	10		10	10	8	
5 Number of stages	1	2	2	3	3	3	4	4	4	4
6 Max. continuous torque Nm	3.0	7.5	7.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
7 Intermittently permissible torque at gear output Nm	4.5	11.3	11.3	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
8 Max. efficiency %	90	81	81	72	72	72	64	64	64	64
9 Weight g	260	360	360	460	460	460	560	560	560	560
10 Average backlash no load °	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
11 Gearhead length L1 mm	40.9	55.4	55.4	69.9	69.9	69.9	84.4	84.4	84.4	84.4



maxon Modular System

+ Motor	Page	+ Sensor	Page	+ Brake	Page	Overall length [mm] = Motor length + gearhead length + (sensor / brake) + assembly parts									
EC 45, 250 W	159					185.0	199.5	199.5	214.0	214.0	214.0	228.5	228.5	228.5	228.5
EC 45, 250 W	159	HEDL 9140	273			200.6	215.1	215.1	229.6	229.6	229.6	244.1	244.1	244.1	244.1
EC 45, 250 W	159	Res 26	278			185.0	199.5	199.5	214.0	214.0	214.0	228.5	228.5	228.5	228.5
EC 45, 250 W	159			AB 28	317	192.4	206.9	206.9	221.4	221.4	221.4	235.9	235.9	235.9	235.9
EC 45, 250 W	159	HEDL 9140	273	AB 28	317	209.4	223.9	223.9	238.4	238.4	238.4	252.9	252.9	252.9	252.9
EC-max 30, 60 W	171					105.0	119.5	119.5	134.0	134.0	134.0	148.5	148.5	148.5	148.5
EC-max 30, 60 W	171	MR	264			117.2	131.7	131.7	146.2	146.2	146.2	160.7	160.7	160.7	160.7
EC-max 30, 60 W	171	HEDL 5540	271			125.6	140.1	140.1	154.6	154.6	154.6	169.1	169.1	169.1	169.1
EC-max 30, 60 W	171			AB 20	314	140.6	155.1	155.1	169.6	169.6	169.6	184.1	184.1	184.1	184.1
EC-max 30, 60 W	171	HEDL 5540	271	AB 20	314	164.6	179.1	179.1	193.6	193.6	193.6	208.1	208.1	208.1	208.1
EC-max 40, 70 W	172					99.0	113.5	113.5	128.0	128.0	128.0	142.5	142.5	142.5	142.5
EC-max 40, 70 W	172	MR	265			114.9	129.4	129.4	143.9	143.9	143.9	158.4	158.4	158.4	158.4
EC-max 40, 70 W	172	HEDL 5540	271			122.4	136.9	136.9	151.4	151.4	151.4	165.9	165.9	165.9	165.9
EC-max 40, 70 W	172			AB 28	315	139.0	153.5	153.5	168.0	168.0	168.0	182.5	182.5	182.5	182.5
EC-max 40, 70 W	173	HEDL 5540	271	AB 28	315	162.4	176.9	176.9	191.4	191.4	191.4	205.9	205.9	205.9	205.9
EC-power 30, 100 W	179					88.0	102.5	102.5	117.0	117.0	117.0	131.5	131.5	131.5	131.5
EC-power 30, 100 W	179	MR	264			100.2	114.7	114.7	129.2	129.2	129.2	143.7	143.7	143.7	143.7
EC-power 30, 100 W	179	HEDL 5540	272			108.6	123.1	123.1	137.6	137.6	137.6	152.1	152.1	152.1	152.1
EC-power 30, 100 W	179			AB 20	314	124.2	138.7	138.7	153.2	153.2	153.2	167.7	167.7	167.7	167.7
EC-power 30, 100 W	179	HEDL 5540	272	AB 20	314	145.0	159.5	159.5	174.0	174.0	174.0	188.5	188.5	188.5	188.5
EC-power 30, 200 W	180					105.0	119.5	119.5	134.0	134.0	134.0	148.5	148.5	148.5	148.5
EC-power 30, 200 W	180	MR	264			117.2	131.7	131.7	146.2	146.2	146.2	160.7	160.7	160.7	160.7
EC-power 30, 200 W	180	HEDL 5540	272			125.6	140.1	140.1	154.6	154.6	154.6	169.1	169.1	169.1	169.1
EC-power 30, 200 W	180			AB 20	314	141.2	155.7	155.7	170.2	170.2	170.2	184.7	184.7	184.7	184.7
EC-power 30, 200 W	180	HEDL 5540	272	AB 20	314	162.0	176.5	176.5	191.0	191.0	191.0	205.5	205.5	205.5	205.5
MCD EPOS, 60 W	311					161.0	175.5	175.5	190.0	190.0	190.0	204.5	204.5	204.5	204.5
MCD EPOS P, 60 W	311					161.0	175.5	175.5	190.0	190.0	190.0	204.5	204.5	204.5	204.5

Encoder HEDS 5540, 500 Counts per turn, 3 Channels



- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Order Number

110511	110513	110515
--------	--------	--------

Type

Counts per turn	500	500	500
Number of channels	3	3	3
Max. operating frequency (kHz)	100	100	100
Shaft diameter (mm)	3	4	6



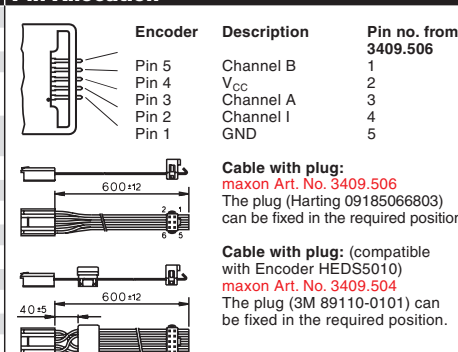
Combination

+ Motor	Page	+ Gearhead	Page	+ Brake	Page	Overall length [mm] / • see: + Gearhead
RE 25, 10 W	77					75.3
RE 25, 10 W	77	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	235			•
RE 25, 10 W	77	GP 32, 0.4 - 2.0 Nm	237			•
RE 25, 10 W	77	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	238/240			•
RE 25, 20 W	79					75.3
RE 25, 20 W	79	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	235			•
RE 25, 20 W	79	GP 32, 0.4 - 2.0 Nm	237			•
RE 25, 20 W	79	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	238/240			•
RE 25, 20 W	79			AB 28	308	105.7
RE 25, 20 W	79	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	235	AB 28	308	•
RE 25, 20 W	79	GP 32, 0.4 - 2.0 Nm	237	AB 28	308	•
RE 25, 20 W	79	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	238/240	AB 28	308	•
RE 26, 18 W	80					77.2
RE 26, 18 W	80	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	235			•
RE 26, 18 W	80	GP 32, 0.4 - 2.0 Nm	237			•
RE 26, 18 W	80	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	238/240			•
RE 35, 90 W	82					91.9
RE 35, 90 W	82	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	239/240			•
RE 35, 90 W	82	GP 32, 8 Nm	242			•
RE 35, 90 W	82	GP 42, 3.0 - 15 Nm	244			•
RE 35, 90 W	82			AB 28	308	124.1
RE 35, 90 W	82	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	239/240	AB 28	308	•
RE 35, 90 W	82	GP 42, 3.0 - 15 Nm	244	AB 28	308	•
RE 36, 70 W	83					92.2
RE 36, 70 W	83	GP 32, 0.4 - 2.0 Nm	237			•
RE 36, 70 W	83	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	239/240			•
RE 36, 70 W	83	GP 42, 3.0 - 15 Nm	244			•
RE 40, 150 W	84					91.7
RE 40, 150 W	84	GP 42, 3.0 - 15 Nm	244			•
RE 40, 150 W	84	GP 52, 4.0 - 30 Nm	247			•
RE 40, 150 W	84			AB 28	308	124.2
RE 40, 150 W	84	GP 42, 3.0 - 15 Nm	244	AB 28	308	•
RE 40, 150 W	84	GP 52, 4.0 - 30 Nm	247	AB 28	308	•

Technical Data

Supply voltage	5 V ± 10 %
Output signal	TTL compatible
Phase shift F (nominal)	90°e ± 45°e
Signal rise time (typical at C _L = 25 pF, R _L = 2.7 kΩ, 25°C)	180 ns
Signal fall time (typical at C _L = 25 pF, R _L = 2.7 kΩ, 25°C)	40 ns
Index pulse width (nominal)	90°e
Operating temperature range	-40 ... +100°C
Moment of inertia of code wheel	≤ 0.6 gcm ²
Max. angular acceleration	250 000 rad s ⁻²
Output current per channel	min. -1 mA, max. 5 mA

Pin Allocation



Connection example

