



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου

Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΒΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΕΤΡΑΠΟΔΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕΣΩ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ HILDEBRAND

Δημήτριος Η. Μυρισιώτης

Επιβλέπων: Καθηγητής Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2013



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

School of Mechanical Engineering

Section of Mechanical Design and Automatic Control

Laboratory of Automatic Control and Machine and Plant Regulation

Diploma Thesis

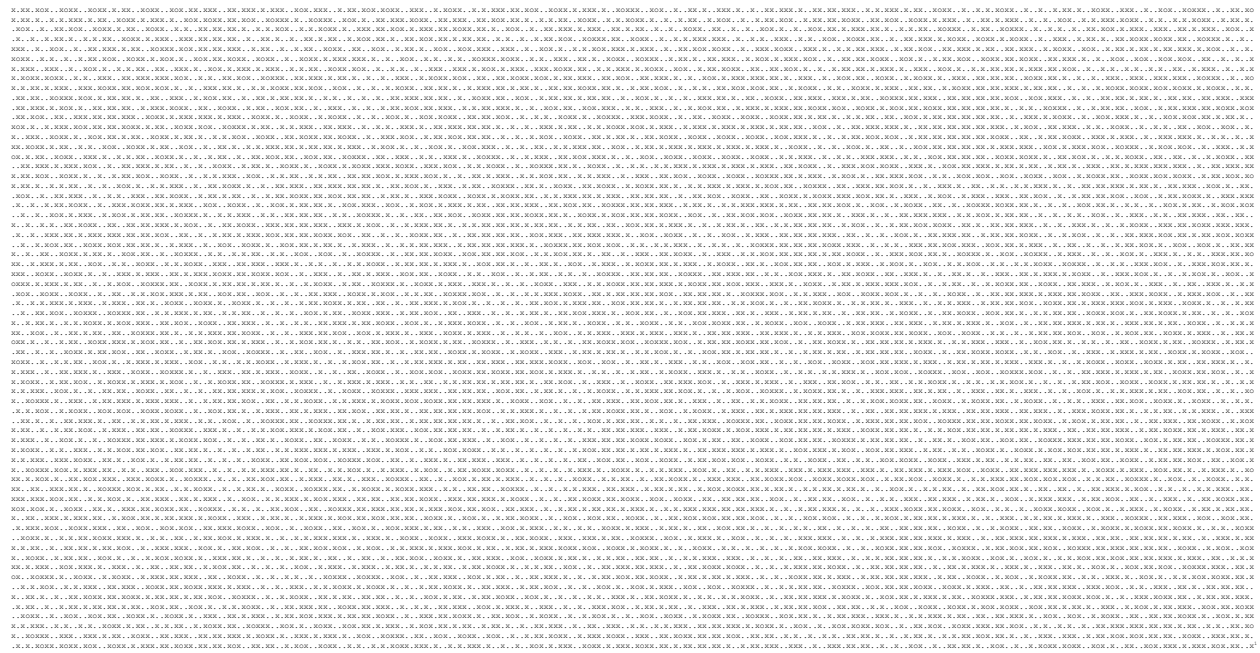
**PARAMETRIC STUDY OF THE GAITS OF A QUADRUPED ROBOT USING
HILDEBRAND DIAGRAMS**

Dimitrios I. Myrasiotis

Advisor: Professor E. G. Papadopoulos

ATHENS 2013

Blank page with a vertical line of noise artifacts on the right edge.



1 Εμφάνιση πλήθους διαδοχικών «γενεών» (ως οριζόντιες γραμμές, παρατιθέμενες κατακόρυφα), δανεισμένων από τη «συμβολοσειρά εξόδου» προγράμματος που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός στοιχειώδους κυτταρικού αυτομάτου (Elementary Cellular Automaton, βλ. το αντίστοιχο άρθρο της Wikipedia), με αλφάβητο το σύνολο,

$$A = \{x, o, \}$$

Η αρχική του γενεά (δηλ., η αρχική του συνθήκη) είναι η,

και, το σύνολο των κανόνων επικαιροποίησης των στοιχείων των γενεών του είναι το,

$$K = \left\{ \begin{array}{l} \cdot o \rightarrow \dots, \text{xo} \rightarrow x., \text{cox} \rightarrow x \cdot x \text{ x} \cdot \rightarrow \text{xx}, \text{oo} \rightarrow o., \\ \cdot x \rightarrow \dots, \cdot x \rightarrow \text{xx}, \text{xxx} \rightarrow \text{cox}, \dots \rightarrow x. \end{array} \right\}.$$

Η μετάβαση από μία οποιαδήποτε γενεά *α*, στην επόμενη της, γενεά *β*, λαμβάνει χώρα όταν κάθε στοιχείο της γενεάς *α*, που δύναται να μεταβληθεί με βάση τους κανόνες του συνόλου *K*, έχει ανανεωθεί. Τα στοιχεία ελέγχονται και ανανεώνονται από αριστερά προς δεξιά, και, για να ανανεωθεί ένα στοιχείο, πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα σε δύο άλλα στοιχεία, έτσι που, η τριάδα που συνιστούν, αυτά, να ταυτίζεται με το αριστερό μέλος κάποιου (μοναδικού) εκ των κανόνων που ανήκουν στο *K*, π.χ. του *r*. Η νέα τιμή του στοιχείου προς ανανέωση, ταυτίζεται με το *μεσαίο* στοιχείο του δεξιού μέλους του κανόνα *r*. Οι προκύπτουσες γενεές στοιβάζονται,

⋮
α
β
⋮

και, πλέον, παρατηρούνται κάποιοι τριγωνικοί σχηματισμοί.

vi

Το παρόν σύγγραμμα, στοιχειοθετήθηκε σε περιβάλλον λειτουργικού συστήματος Microsoft Windows 7 Professional με τη βοήθεια του επεξεργαστή κειμένου Microsoft Word 2013 και του Adobe Acrobat X Pro. Οι εξισώσεις, εισάχθηκαν μέσω του – ενσωματωμένου στο Word – MathType 6.9 και τα σχήματα δημιουργήθηκαν στο Canvas 14. Τέλος, για την υλοποίηση των αλγορίθμων που συντάχθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον προγραμματισμού MATLAB R2012b.

Για την υποβολή αποριών, παρατηρήσεων ή σχολίων, γλωσσικού, ορθογραφικού, μαθηματικού ή άλλου χαρακτήρα – επί της εργασίας αυτής – καθώς και προτάσεων βελτίωσης ή διόρθωσης του περιεχομένου, ο αναγνώστης έρχεται σε επαφή με εμένα στα,

210 62 11 843,

697 396 2 396 ή

dimyrisiotis@gmail.com.

Περίληψη

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, μελετάται – εκτενώς – το πρόβλημα της συστηματικής περιγραφής της «μόνιμης κατάστασης»² της εκάστοτε *προσομοιωμένης κίνησης* ενός επίπεδου, υποεπενεργούμενου, τετράποδου ρομπότ. Ιδιαίτερη σημασία, αποδίδεται στη διερεύνηση της επίδρασης κάθε μίας εκ των διάφορων παραμέτρων που συνθέτουν το τετράποδο ρομπότ, το περιβάλλον του, τις αρχικές συνθήκες της κίνησής του ή τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου του, στο είδος και τα χαρακτηριστικά του επιλεγόμενου, από αυτό, διασκελισμού. Αυτός ο διασκελισμός, επαναλαμβανόμενος, συνθέτει την προαναφερόμενη μόνιμη κατάσταση της κίνησης του ρομπότ. Τέλος, αναπτύσσεται μία διαδικασία που υπολογίζει τα μοτίβα που δύνανται να *περιγράψουν αφαιρετικά* την εκάστοτε μόνιμη κίνηση του ρομπότ, αφού πρώτα εισαχθεί μία συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση των εκτελούμενων διασκελισμών.

Όσον αφορά στο θεωρητικό σκέλος της εργασίας, αξιοποιώντας τη μεθοδολογία των διαγραμμάτων Hildebrand, που χρησιμοποιούνται ευρέως στο πεδίο της Βιολογίας για την περιγραφή των βηματισμών των ζώων με πόδια, αναπτύσσεται ένας χαμηλού – επιπέδου αλγόριθμος που υπολογίζει τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του *αντιπροσωπευτικότερου διασκελισμού* κάθε δυνατής μόνιμης κίνησης του ρομπότ.

Ο αλγόριθμος που συντάσσεται για τον υπολογισμό των διαγραμμάτων Hildebrand, αποτελείται από τρία μέρη. Το πρώτο μέρος, αφορά στον υπολογισμό της χρονικής στιγμής μετάβασης από τη «μεταβατική» στη μόνιμη κατάσταση. Το δεύτερο, αφορά στη συλλογή των χρονικών στιγμών απογείωσης και προσγείωσης των ποδιών. Το τρίτο, και τελευταίο, σχετίζεται με τον αριθμητικό υπολογισμό των συστατικών στοιχείων των διαγραμμάτων. Για την περίπτωση των διδιάστατων τετράποδων ρομπότ, αυτά, είναι τρία, και, αφορούν στα (δύο, το πλήθος) ποσοστά φόρτισης των ποδιών και την ποσοστιαία χρονική διαφορά των προσγειώσεών τους.

² Περιοδικό κομμάτι της κίνησης.

Abstract

In this Diploma Thesis, the problem of the systematic description of the gait, that, when repeated creates the steady state part of a given simulated quadruped robot motion, is addressed. Of great importance, is considered to be the inspection of the effect of each parameter, that emerges either in the design process of the robot, the modeling of its environment, the portraiture of its initial motion conditions, or in its control system configuration, in the computed characteristics of the *selected*, by the quadruped robot, *gait*. Subsequently, a procedure is developed, such that, using *this*, one is able to derive the *pattern* that *abstractly* describes a given steady state motion part.

The theoretical part of this thesis, is deployed around the adoption of the Hildebrand diagrams methodology, which emerges in the field of Biology in cases where the compact description of the gait, which a legged animal uses in its motion, is necessary. What is done, is the derivation of a low – level algorithmic process that carries out the Hildebrand diagram computation (i.e., its quantitative characteristics) of the most typical gait that is respective of a given simulated robot motion.

The algorithm that is employed for the computation of the Hildebrand diagrams, consists of three parts. The first, refers to the computation of the instance that indicates the end of the “transient” state and the beginning of the “steady” state of its movement. The second, concerns the collection of the instance values that are respective to the touch – down and lift – off events of the two pairs of legs (hind and fore). Conclusively, the third part, contains the method for the calculation of the numeric values that compose a Hildebrand diagram. In the case of planar four – legged robots, these are three, namely, the hind and fore duty factors and the phase relationship between the ground contact instances of the leg pairs. Each of those three quantities, is considered as a percentage of the stride duration³.

³ The duration of the period that characterizes the periodical motion which is, currently, under examination.

Αφιερώνεται, ταπεινά, στην Μνήμη του Γεωργίου Δ. Χαρίτου (1989 – 2012).

Ευχαριστίες

Για την αποπεράτωση της παρούσας εργασίας δέχθηκα, με προσωπική ικανοποίηση, τη βοήθεια ενός πλήθους ανθρώπων οι οποίοι συνέθεσαν – σε συνδυασμό μεταξύ τους, και συνειδητά ή μη – ένα ιδανικό περιβάλλον για την εκπόνησή της.

Κατ' αρχάς, ευχαριστώ τον καθηγητή μου, κ. Ε. Παπαδόπουλο, για την καθολική του στήριξη κατά το *εκάστοτε* στάδιο σύστασης της εργασίας, όπως και για τις πολύτιμες μεθοδολογικές και θεματολογικές του συμβουλές. Ειδικές ευχαριστίες, επίσης, οφείλονται προς τον υποψήφιο διδάκτορα Ι. Κοντολάτη, για τις φορές που βρισκόταν στη διάθεσή μου για την απάντηση σε κάποια απορία, καθώς και για την ευχάριστη και δημιουργική πολύμηνη συνεργασία μας.

Ακόμη, ευχαριστώ θερμά, *κάθε* μέλος του εργαστηρίου για την φιλική του συμπεριφορά και τον αξιοσημείωτα ενθαρρυντικό του λόγο. Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τους (σε λεξικογραφική διάταξη, ως προς τη *λέξη* του επωνύμου) Κ. Λίκα, Π. Μανωλιουδάκη, Α. Μαστρογεωργίου, Κ. Μαχαιρά, Α. Νικολακάκη, Ι. Νταβλιάκο, Ι. Παρασκευά και Μ. Ραμπ, για την τεχνική υποστήριξή τους ή τις χρησιμότερες παρατηρήσεις τους.

Από την ερευνητική ομάδα του κ. Κ. Κυριακόπουλου, ευχαριστώ, για τις επικοινωνητικές και παραγωγικές μας συζητήσεις, τους Μ. Λιαροκάπη και Χ. Μαυρογιάννη.

Τέλος, το μεγαλύτερο εκ των «ευχαριστώ», απευθύνεται προς τους γονείς μου, Ηλία Μυρισιώτη και Καλλιόπη Φλώρου, για την αγάπη, την αφοσίωση και την οικονομική υποστήριξη που μου παρείχαν, σε κάθε ένα από τα χρόνια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα⁴

Περίληψη	xi
Abstract.....	xiii
Ευχαριστίες	xvii
Περιεχόμενα	xix
Κατάλογος Σχημάτων.....	xxi
Κατάλογος Πινάκων	xxv
Κατάλογος Συντηρήσεων.....	xxvii
1 Εισαγωγή.....	29
1.1 Σκοπός της Εργασίας	29
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	31
1.3 Δομή της Εργασίας.....	32
2 Διασκελισμοί και Διαγράμματα Hildebrand	35
2.1 Ορισμός του Διασκελισμού (Κλασικός Ορισμός).....	35
2.2 Διαγράμματα Hildebrand (Hildebrand Diagrams) και Γραφήματα Βηματισμού (Gait Graphs).....	36
2.3 Τύποι Διασκελισμών.....	40
3 Δυναμική Μοντελοποίηση του Ρομπότ.....	45
3.1 Μέθοδος Euler – Lagrange.....	45
3.1.1 Παράδειγμα Εφαρμογής της Μεθόδου Euler – Lagrange	47
3.2 Το Τετράποδο Ρομπότ	50
3.3 Παραδοχές Μοντελοποίησης.....	51
3.4 Δυναμικά Μοντέλα του Ρομπότ	52
3.4.1 Μοντέλο του Ρομπότ Χωρίς Μάζα στα Πόδια (Μοντέλο A).....	53
3.4.2 Μοντέλο του Ρομπότ με Μάζα στα Πόδια (Μοντέλο B).....	56
3.5 Συμβάντα Μετάβασης Φάσεων	61
3.6 Έλεγχος του Τετράποδου Ρομπότ	61
3.7 Το περιβάλλον προσομοιώσεων	62

⁴ Όπως παρατηρεί κάποιος, η λέξη «Περιεχόμενα» εμφανίζεται ως συστατικό στοιχείο του τμήματος *Περιεχόμενα*. Ακόμη μία περίπτωση «αυτοαναφορικότητας» (self – reference) είναι η εξής:

(Αυτή η πρόταση εσωκλείεται σε ζεύγος, μη πλαγίως τυπωμένων, παρενθέσεων.)

Για περισσότερες πληροφορίες επί της αυτοαναφορικότητας ή της μαθηματικής της μεταφοράς, δηλ. της αναδρομής (recursion), ο αναγνώστης ανατρέχει στα [17], [21] και [22].

4	Υπολογισμός Διαγραμμάτων Hildebrand	65
4.1	Στοιχεία Περιβάλλοντος Προσομοιώσεων προς Αξιοποίηση	66
4.2	Υπολογισμός Διαγραμμάτων Hildebrand	66
4.2.1	Υπολογισμός Χρονικής Στιγμής Μετάβασης	67
4.2.2	Συλλογή Χρονικών Στιγμών Συμβάντων Απογείωσης – Προσγείωσης ..	72
4.2.3	Υπολογισμός Συστατικών Μεγεθών Διαγραμμάτων	74
4.3	Μοτίβα Μόνιμης Κατάστασης	86
4.3.1	Ορισμός Μοτίβων	87
4.3.2	Κατηγοριοποίηση Μοτίβων	88
4.3.3	Υπολογισμός Μοτίβων	92
4.3.4	Χάρτες Poincaré	94
4.3.5	Κριτική επί των Μοτίβων	99
5	Πειραματικά Αποτελέσματα και Ανάλυση	101
5.1	Παρουσίαση Μοτίβων, Ονομαστικές Τιμές Παραμέτρων και Μέθοδος Ανάλυσης	101
5.1.1	Οπτική Παρουσίαση Μοτίβων	102
5.1.2	Ονομαστικές Τιμές Παραμέτρων	102
5.1.3	Μέθοδος Ανάλυσης	102
5.2	Μελέτη Βηματισμών	104
5.2.1	Επίδραση Κατασκευαστικών Παραμέτρων	104
5.2.2	Επίδραση Επιθυμητών Τιμών των Ελεγχόμενων Μεγεθών	109
5.2.3	Επίδραση Αρχικών Συνθηκών	114
5.2.4	Επίδραση Χαρακτηριστικών Περιβάλλοντος	123
5.3	Χάρτες Poincaré ανά Πλανήτη για Μεταβολή της Υποχωρητικότητας Ποδιών ..	125
5.3.1	Χάρτες για το Μοντέλο Α	127
5.3.2	Χάρτες για το Μοντέλο Β	129
5.4	Μελέτη της Αδιάστατης Παραμέτρου r	129
5.4.1	Επίδραση Σταθεράς Ελατηρίου Ποδιών και Βαρυτικής Έλξης	133
6	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	139
6.1	Συμπεράσματα	139
6.2	Μελλοντική Εργασία	140
	Βιβλιογραφία	143
	Παράρτημα Α	147
	Παράρτημα Β	151
	Παράρτημα Γ	155

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1.	Σχέση διασκελισμών και περιοδικών κινήσεων.	36
Σχήμα 2-2.	Παράδειγμα διαγράμματος Hildebrand.	37
Σχήμα 2-3.	Παράδειγμα γραφήματος βηματισμού (gait graph).	38
Σχήμα 2-4.	Συστατικά στοιχεία των διαγραμμάτων Hildebrand για διδιάστατους διασκελισμούς.	39
Σχήμα 2-5.	Συστατικά στοιχεία των gait graphs για διδιάστατους διασκελισμούς.	39
Σχήμα 2-6.	Gait graph για ένα πλήθος διασκελισμών όπου ο καθένας αντιστοιχεί σε διαφορετική προσομοιωμένη κίνηση (multiple gait graph ή gait cloud).	41
Σχήμα 2-7.	Ο τύπος διασκελισμού pronk, γενικά.	42
Σχήμα 2-8.	Διασκελισμός, ο οποίος, στο πλαίσιο της εργασίας χαρακτηρίζεται ως τύπου pronk.	42
Σχήμα 2-9.	Ο τύπος διασκελισμού bound.	43
Σχήμα 2-10.	Ο τύπος διασκελισμού trot.	43
Σχήμα 2-11.	Ο τύπος διασκελισμού race.	44
Σχήμα 2-12.	Ο τύπος διασκελισμού gallop.	44
Σχήμα 3-1.	Η πειραματική διάταξη του παραδείγματος εφαρμογής της Euler – Lagrange.	47
Σχήμα 3-2.	Οι δυνατές δυναμικές καταστάσεις ενός διδιάστατου τετράποδου ρομπότ, με ένα περιστροφικό βαθμό ελευθερίας ανά πόδι.	51
Σχήμα 3-3.	Το τετράποδο ρομπότ, με πόδια χωρίς μάζα.	53
Σχήμα 3-4.	Το τετράποδο ρομπότ, με πόδια με μάζα.	57
Σχήμα 3-5.	Η γενική μορφή του ποδιού του ρομπότ με σημειακές μάζες επί αυτό.	57
Σχήμα 4-1.	Κίνηση του ρομπότ, με μόνιμη κατάσταση.	68
Σχήμα 4-2.	Κίνηση του ρομπότ, χωρίς μόνιμη κατάσταση.	69
Σχήμα 4-3.	Κίνηση του ρομπότ, με μόνιμη κατάσταση.	70
Σχήμα 4-4.	Κίνηση του ρομπότ, με μόνιμη κατάσταση.	72
Σχήμα 4-5.	Αλγόριθμος συλλογής χρονικών στιγμών γεγονότων προσγείωσης και απογείωσης, για τα εμπρόσθια και οπίσθια πόδια.	73

Σχήμα 4-6. Μικρή τιμή της διαφοράς φάσης, με βάση τον κλασσικό ορισμό.	81
Σχήμα 4-7. Μεγάλη τιμή της διαφοράς φάσης, με βάση τον κλασσικό ορισμό.	82
Σχήμα 4-8. Διάγραμμα Hildebrand για επίπεδο τετράποδο ρομπότ, με βάση τον εναλλακτικό ορισμό του διασκελισμού.	85
Σχήμα 4-9. Εξάρτηση μοτίβων από τον εκάστοτε συνδυασμό καταστάσεων των πινάκων A και B.	89
Σχήμα 4-10. Αδύνατη τιμή της διαφοράς φάσης με βάση τον εναλλακτικό ορισμό για τον πρώτο εκ των δύο διαδοχικών διασκελισμών, H και F, αντίστοιχα.	90
Σχήμα 4-11. Χάρτης Poincaré για τα μέγιστα ύψη αναπήδησης δύο διαδοχικών διασκελισμών.	95
Σχήμα 4-12. Παράδειγμα χάρτη Poincaré.	96
Σχήμα 4-13. Χάρτης Poincaré για το μοτίβο H.	97
Σχήμα 4-14. Χάρτης Poincaré για το μοτίβο F.	97
Σχήμα 4-15. Χάρτης Poincaré για το μοτίβο HFF.	98
Σχήμα 4-16. Χάρτης Poincaré για το μοτίβο FHH.	98
Σχήμα 5-1. Επίδραση μάζας σώματος για το μοντέλο A.	105
Σχήμα 5-2. Επίδραση μάζας σώματος για το μοντέλο B.	106
Σχήμα 5-3. Επίδραση μάζας ανά μοντέλο του ρομπότ.	106
Σχήμα 5-4. Επίδραση μεσοαπόστασης μηρών για το μοντέλο A.	107
Σχήμα 5-5. Επίδραση μεσοαπόστασης μηρών για το μοντέλο B.	108
Σχήμα 5-6. Επίδραση μεσοαπόστασης μηρών ανά μοντέλο του ρομπότ.	108
Σχήμα 5-7. Επίδραση ελεύθερου μήκους ποδιών για το μοντέλο A.	110
Σχήμα 5-8. Επίδραση ελεύθερου μήκους ποδιών για το μοντέλο B.	110
Σχήμα 5-9. Επίδραση ελεύθερου μήκους ποδιών ανά μοντέλο του ρομπότ.	111
Σχήμα 5-10. Επίδραση υποχωρητικότητας ποδιών για το μοντέλο A.	111
Σχήμα 5-11. Επίδραση υποχωρητικότητας ποδιών για το μοντέλο B.	112
Σχήμα 5-12. Επίδραση υποχωρητικότητας ποδιών ανά μοντέλο του ρομπότ.	112
Σχήμα 5-13. Επίδραση συντελεστή απωλειών ποδιών, για το μοντέλο A.	113

Σχήμα 5-14. Επίδραση συντελεστή απωλειών ποδιών, για το μοντέλο B.	113
Σχήμα 5-15. Επίδραση συντελεστή απωλειών ποδιών ανά μοντέλο του ρομπότ.....	114
Σχήμα 5-16. Επίδραση επιθυμητού ύψους KM σώματος για το μοντέλο A.	115
Σχήμα 5-17. Επίδραση επιθυμητού ύψους KM σώματος για το μοντέλο B.	116
Σχήμα 5-18. Επίδραση επιθυμητού ύψους KM σώματος ανά μοντέλο του ρομπότ.	116
Σχήμα 5-19. Επίδραση επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας για το μοντέλο A.	117
Σχήμα 5-20. Επίδραση επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας για το μοντέλο B.	117
Σχήμα 5-21. Επίδραση επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας ανά μοντέλο του ρομπότ.	118
Σχήμα 5-22. Επίδραση αρχικής πρόσθιας ταχύτητας για το μοντέλο A.	119
Σχήμα 5-23. Επίδραση αρχικής πρόσθιας ταχύτητας για το μοντέλο B.	119
Σχήμα 5-24. Επίδραση αρχικής πρόσθιας ταχύτητας ανά μοντέλο του ρομπότ.	120
Σχήμα 5-25. Επίδραση αρχικής γωνιακής ταχύτητας για το μοντέλο A.	120
Σχήμα 5-26. Επίδραση αρχικής γωνιακής ταχύτητας για το μοντέλο B.	121
Σχήμα 5-27. Επίδραση αρχικής γωνιακής ταχύτητας ανά μοντέλο του ρομπότ.	121
Σχήμα 5-28. Επίδραση αρχικού ύψους KM σώματος για το μοντέλο A.	122
Σχήμα 5-29. Επίδραση αρχικού ύψους KM σώματος για το μοντέλο B.	122
Σχήμα 5-30. Επίδραση αρχικού ύψους KM σώματος ανά μοντέλο του ρομπότ.	123
Σχήμα 5-31. Επίδραση κλίσης εδάφους για το μοντέλο A.	124
Σχήμα 5-32. Επίδραση κλίσης εδάφους για το μοντέλο B.	124
Σχήμα 5-33. Επίδραση κλίσης εδάφους ανά μοντέλο του ρομπότ.....	125
Σχήμα 5-34. Επίδραση βαρυτικής έλξης για το μοντέλο A.	126
Σχήμα 5-35. Επίδραση βαρυτικής έλξης για το μοντέλο B.	126
Σχήμα 5-36. Επίδραση κλίσης εδάφους ανά μοντέλο του ρομπότ.....	127
Σχήμα 5-37. Υπέρθυση περιγραμμάτων πλανητικών χαρτών Poincaré για το μοντέλο A. .	128
Σχήμα 5-38. Συνολικός χάρτης Poincaré για τη Γη (Μοντ. A).	128
Σχήμα 5-39. Συνολικός χάρτης Poincaré για τη Σελήνη (Μοντ. A).....	130

Σχήμα 5-40. Συνολικός χάρτης Poincaré για τον Άρη (Μοντ. Α).....	130
Σχήμα 5-41. Συνολικός χάρτης Poincaré για το Δία (Μοντ. Α).....	131
Σχήμα 5-42. Υπέρθεση περιγραμμάτων πλανητικών χαρτών Poincaré για το μοντέλο Β..	131
Σχήμα 5-43. Συνολικός χάρτης Poincaré για τη Γη (Μοντ. Β).....	132
Σχήμα 5-44. Συνολικός χάρτης Poincaré για τη Σελήνη (Μοντ. Β).....	132
Σχήμα 5-45. Συνολικός χάρτης Poincaré για τον Άρη (Μοντ. Β).....	133
Σχήμα 5-46. Συνολικός χάρτης Poincaré για το Δία (Μοντ. Β).....	133
Σχήμα 5-47. Επίδραση της σταθεράς ελατηρίου και της βαρυτικής έλξης στις παραμέτρους r και t για το μοντέλο Α.	134
Σχήμα 5-48. Σύνδεση οικογενειών τιμών της μέσης τιμής των παραγόντων φόρτισης με τις παραμέτρους r και t για το μοντέλο Α.....	135
Σχήμα 5-49. Σύνδεση οικογενειών τιμών της διαφοράς φάσης με τις παραμέτρους r και t για το μοντέλο Α.....	136
Σχήμα 5-50. Επίδραση της σταθεράς ελατηρίου και της βαρυτικής έλξης στην παράμετρο r για το μοντέλο Β.	136
Σχήμα 5-51. Επίδραση της σταθεράς ελατηρίου και της βαρυτικής έλξης στην παράμετρο r για το μοντέλο Β, με χρήση χρωμάτων για τη δήλωση των οικογενειών των τιμών του r	137
Σχήμα 5-52. Επίδραση της σταθεράς ελατηρίου και της βαρυτικής έλξης στην παράμετρο r για το μοντέλο Β, με χρήση χρωμάτων για τη δήλωση των οικογενειών των τιμών του r	137
Σχήμα ΠΒ-1. Η λειτουργία <i>linear regression</i> με χρήση ενός Τ.Ν.Δ.	152
Σχήμα ΠΒ-2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων του νευρωνικού δικτύου με τιμές υπολογισμένες από διεξαγωγή προσομοιώσεων και συνακόλουθο υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών του επιλεγόμενου διασκελισμού.	153

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Αποσαφήνιση των συμβόλων της διάταξης του παραδείγματος εφαρμογής της Euler – Lagrange.....	48
Πίνακας 3-2. Περιγραφικά μεγέθη του ρομπότ χωρίς μάζες στα πόδια.	54
Πίνακας 3-3. Περιγραφικά μεγέθη του ρομπότ με μάζες στα πόδια.	58
Πίνακας 3-4. Αντιστοίχιση συμβάντων ποδιών με τις συνθήκες τους.	61
Πίνακας 3-5. Τιμές μεγεθών, τα οποία, χαρακτηρίζουν την αριθμητική ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων.	63
Πίνακας 4-1. Αντιστοίχιση δυναμικών φάσεων με τους δείκτες τους.	67
Πίνακας 4-2. Αντιστοίχιση των δυνατών δυάδων τύπων διασκελισμού, με τις τιμές των πινάκων A και B για τον πρώτο, εκ των δύο, αντίστοιχων διαδοχικών διασκελισμών.	90
Πίνακας 4-3. Αντιστοίχιση των μοτίβων με τις συνθήκες υπολογισμού τους.	93
Πίνακας 5-1. Αντιστοίχιση μοτίβων με τα χρώματα παρουσίασής τους.	102
Πίνακας 5-2. Ονομαστικές τιμές των παραμέτρων του ρομπότ, του περιβάλλοντός του, των συνθηκών της κίνησής του και του δυναμικού ελέγχου του.....	103

Κατάλογος Συντμήσεων

Εξ.	Εξίσωση
ΚΜ	Κέντρο Μάζας
μ.υ.α.	Μέγιστο Ύψος Αναπήδησης
Παρ.	Παράγραφος
Πιν.	Πίνακας
Σχ.	Σχήμα
Τ.Ν.Δ.	Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο
CoM	Center of Mass
d.o.f	Degree of Freedom
FDF	Fore Duty Factor
HDF	Hind Duty Factor
PR	Phase Relationship

1 Εισαγωγή

Στο Κεφ. 1 επιχειρείται η εισαγωγή του αναγνώστη στο πρόβλημα που πραγματεύεται η εργασία, καθώς και η εξοικείωσή του με τον τρόπο σκέψης που υιοθετήθηκε για την αντιμετώπισή του.

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Ο σκοπός της εργασίας, συνοπτικά, είναι η διερεύνηση της επίδρασης των διάφορων φυσικών ποσοτήτων που ανακύπτουν κατά τη *διδιάστατη αναλυτική περιγραφή*⁵ ενός υποεπενεργούμενου⁶ τετράποδου ρομπότ, στην περιπατητική του συμπεριφορά (walking behavior).

Για να ικανοποιηθεί όμως αυτός ο σκοπός, είναι αναγκαία η δυνατότητα υπολογισμού, για

⁵ Το ρομπότ, εδώ, απεικονίζεται ως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο επί του οποίου αρθρώνονται δύο πόδια σε θέσεις συμμετρικές ως προς την κάθετη, στις – μεταξύ τους παράλληλες – «μεγαλύτερες» πλευρές του, ευθεία που διέρχεται από το γεωμετρικό του κέντρο. Όσον αφορά στα πόδια του, χαρακτηρίζονται από έναν επενεργούμενο (δηλ., ενεργητικό) περιστροφικό βαθμό ελευθερίας στην ένωσή τους με το σώμα, και έναν παθητικό, πρισματικό.

⁶ Με την έννοια ότι το πλήθος των επενεργούμενων βαθμών ελευθερίας του είναι μικρότερο από το συνολικό πλήθος των βαθμών ελευθερίας. Το πλήθος των βαθμών ελευθερίας δηλώνει το *ελάχιστο πλήθος μεταβλητών*, που απαιτούνται για να προσδιοριστεί πλήρως η θέση ενός συστήματος.

κάθε δυνατή προσομοιωμένη κίνηση⁷, των χαρακτηριστικών του εκάστοτε επιλεγόμενου προς χρήση, από το τετράποδο ρομπότ, διασκελισμού, έτσι που, να είναι δυνατή η μεταβολή μίας παραμέτρου και η συνακόλουθη παρατήρηση της εκάστοτε εκτυλισσόμενης κίνησης για κάθε μία εκ των τιμών της. Οπότε, η ανάπτυξη μίας *αποτελεσματικώς υπολογίσιμης διαδικασίας*⁸ που προσδιορίζει ποσοτικά και με ευκόλως εποπτεύσιμο τρόπο τις σχέσεις μεταξύ των ποδιών κατά τον βηματισμό ενός τετράποδου ρομπότ, αποτελεί ουσιώδες κομμάτι του σκοπού της εργασίας.

Το αντίστοιχο πρόβλημα στην περιοχή της Βιολογίας, δηλ., ο υπολογισμός του τρόπου βηματισμού για τετράποδα ζώα, αντιμετωπίζεται με τη διεξαγωγή πειραμάτων, όπου, λ.χ., τα ζώα βηματίζουν μπροστά από συστοιχίες καμερών ή επί δυναμοπλακών (βλ. [19]) με απώτερο στόχο τη χάραξη κάποιων διαγραμμάτων που είναι γνωστά σήμερα ως *διαγράμματα Hildebrand* προς τιμή του Milton Hildebrand που τα εισήγαγε στα μέσα, περίπου, του εικοστού αιώνα (βλ. [7]). Χρησιμοποιώντας αυτά, είναι δυνατή η περιγραφή της κίνησης των ζώων με πόδια, με σαφήνεια και πληρότητα.

Όπως θα παρουσιαστεί, στο συγκεκριμένο πόνημα υιοθετείται η μέθοδος του Hildebrand, επεκτείνεται, προσαρμόζεται στη μελέτη των τετράποδων ρομπότ και διατυπώνεται σε μορφή τέτοια που να είναι φιλική προς χαμηλού – επιπέδου υλοποίηση (low – level implementation) μέσω κάποιας γλώσσας ή περιβάλλοντος προγραμματισμού (εδώ, χρησιμοποιήθηκε το πακέτο MATLAB, βλ. [12]). Ο τελικός στόχος είναι η αυτοματοποιημένη και επαναλαμβανόμενη χρήση της μεθόδου επί δεδομένων που έχουν παραχθεί από πειράματα, δηλ. προσομοιώσεις, όπου στο κάθε πείραμα μεταβάλλεται η ίδια «συμφωνημένη» και συγκεκριμένη μεταβλητή, ώστε να καθίσταται δυνατή η επισκόπηση της επίδρασής της στα χαρακτηριστικά του βηματισμού.

Όσον αφορά στα κίνητρα για την ενασχόληση με την μελέτη της επίδρασης των

⁷ Εικονικό πείραμα υλοποιημένο σε ψηφιακό περιβάλλον που διενεργείται επιλύοντας τις διαφορικές εξισώσεις που διέπουν μηχανικά το τετράποδο ρομπότ (βλ. Παρ. 3.7).

⁸ *Effectively computable procedure*: Αλγόριθμος που υπολογίζεται με βάση κάποιο συγκεκριμένο υπολογιστικό μοντέλο, συνοδευόμενο από ένα σύνολο στοιχειωδών λειτουργιών (primitive operations), χρησιμοποιώντας πεπερασμένες (διάβαζε «φραγμένες») ποσότητες χρόνου και χώρου (βλ. [21]).

παραμέτρων στον επιλεγόμενο διασκελισμό του ρομπότ, αυτά ανακύπτουν, κυρίως, στο πεδίο του σχεδιασμού ρομποτικών συστημάτων με πόδια. Εκεί, είναι απαραίτητη η επίγνωση των σχέσεων μεταξύ παραμέτρων και τύπων διασκελισμών ώστε να είναι δυνατή η προεπιλογή (μέσω της ρύθμισης των κατάλληλων κατασκευαστικών μεγεθών, των συνθηκών της κίνησης κ.λπ.) κάποιων «οικογενειών» διασκελισμών με ιδιαίτερα επιθυμούμενα χαρακτηριστικά όπως π.χ. χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, υψηλότερη δυναμική ευστάθεια (δηλ., ανθεκτικότητα έναντι των διαταραχών) κ.ο.κ.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Για τη σύνταξη της εργασίας, αξιοποιήθηκαν πληροφορίες οι οποίες περιέχονται σε επιστημονικές δημοσιεύσεις περιοδικών ή συνεδρίων, καθώς και σε διδακτικά συγγράμματα ή ιστοσελίδες. Για καθένα εκ των περιοχών της εργασίας, παρατηρήθηκε η διάθεση αξιόλογων βιβλιογραφικών πηγών.

Αναλυτικότερα, για την κίνηση των ζώων γενικά (δηλ., για ζώα με ή χωρίς πόδια) – αξιοσημείωτη είναι η εργασία που αναπτύσσεται στο [2]. Στο [13], παρουσιάζονται αρκετά είδη κίνησης, που αφορούν, κυρίως, σε ζώα με πόδια.

Για τη μορφή και τη χρήση (στο πεδίο της Βιολογίας) των διαγραμμάτων Hildebrand, έχουν δημοσιευτεί αρκετές ενδιαφέρουσες εργασίες. Τα [6] και [7] είναι γραμμένα από τον ίδιο τον Hildebrand και, εκεί, αναλύονται λεπτομερειακά, η φύση των διαγραμμάτων, τα μεγέθη που τα συνιστούν καθώς και κάποιες εκ των εφαρμογών τους στη συστηματική παρατήρηση των διασκελισμών των ζώων με πόδια. Επίσης, χρήσιμες πληροφορίες περιέχονται στα [1], [3], [5], [16], [19] και [20] για την συμπλήρωση και την επέκταση της μεθόδου του Hildebrand, καθώς και για τη σύνδεση της θεωρητικής διαδικασίας υπολογισμού των εν λόγω διαγραμμάτων με πειραματικές τεχνικές υλοποιημένες σε εργαστηριακό περιβάλλον, προσφέροντας, έτσι, μία πρακτική οπτική γωνία στη διαδικασία αυτή.

Ένα μεγάλο μέρος της παρούσας εργασίας, ιδίως το κομμάτι που αφορά στην παρατήρηση της περιπατητικής συμπεριφοράς του τετράποδου ρομπότ, αποτελεί τη θεματική επέκταση του [9]. Εκεί, δημοσιεύτηκε μέρος της εργασίας της ερευνητικής ομάδας που συμμετέχει ο συγγραφέας, πριν την σύνταξη του παρόντος πονήματος.

Για τα τετράποδα ρομπότ, γενικά (κίνηση, έλεγχος, ευστάθεια κ.λπ.), σημείο αναφοράς

αποτελεί το [15]. Χρήσιμες πληροφορίες, που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία για την κίνηση των τετράποδων ρομπότ, περιέχονται, επίσης, στα [10], [14], [24] και [25].

Για την παρουσίαση της δυναμικής μοντελοποίησης του ρομπότ, αξιοποιήθηκαν τα [10], [24] και [25]. Για τη μέθοδο Euler – Lagrange, ιδανικές αναφορές αποτελούν τα [18] και [23].

Για τους χάρτες Poincaré και τα παρελκόμενά τους, κάποιος ελέγχει το αντίστοιχο άρθρο της Wikipedia (Poincaré Maps) καθώς και το [8].

Για τη χρήση του πακέτου MATLAB, επισημαίνεται το [12] καθώς και το υλικό που προσφέρει δωρεάν στους χρήστες της, μέσω της διαδικτυακής της ιστοσελίδας, η κατασκευάζουσα εταιρία (MathWorks).

Τέλος, τα [11], [17], [21] και [22], δεν εμπίπτουν *ακριβώς* σε κάποιο από τα θέματα της Διπλωματικής, αλλά, χρησιμεύουν στην ανάπτυξη και την υποστρωμάτωση των περισσότερων εκ των αφηρημένων ιδεών που υλοποιούνται σε αλγορίθμους στο πλαίσió της. Επίσης, κυρίως επί αυτών, οικοδομείται το περιεχόμενο των περισσότερων από τις – συχνά εμφανιζόμενες, πράγματι – υποσημειώσεις (footnotes) της εργασίας.

1.3 Δομή της Εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο, ο αναγνώστης εισάγεται στις έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν κατά την ανάπτυξη των κύριων κεφαλαίων της διπλωματικής, όπως, π.χ., του διασκελισμού, των τύπων του κ.ά. Εκεί, ορίζονται τα μεγέθη που απαρτίζουν τα διαγράμματα Hildebrand, γίνεται παρουσίαση της μορφής και των ιδιοτήτων τους καθώς και κάποιων εναλλακτικών εκδοχών αυτών (όπως το γράφημα βηματισμού – gait graph).

Το τρίτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στη δυναμική μοντελοποίηση του ρομπότ. Αρχικά γίνεται μία σύντομη αναφορά στη μέθοδο Euler – Lagrange για την εξαγωγή των κινητικών διαφορικών εξισώσεων ενός δυναμικού συστήματος. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα δύο χρησιμοποιημένα δυναμικά μοντέλα του ρομπότ, τα οποία διαφέρουν στην ύπαρξη, ή μη, μάζας στα δύο πόδια. Επίσης, γίνεται μία επιγραμματική αναφορά στην μαθηματική περιγραφή των συμβάντων μετάβασης του ρομπότ και το κομμάτι που αφορά στο δυναμικό έλεγχό του.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού των διαγραμμάτων

Hildebrand⁹, στο σύνολό της, και η σύνδεσή της με την κατηγοριοποίηση και την αναγνώριση των μοτίβων της μόνιμης κίνησης του ρομπότ. Στο κεφάλαιο αυτό, διακρίνονται τρία κύρια μέρη. Στο πρώτο, αναφέρονται τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται από το περιβάλλον προσομοιώσεων ώστε να υπολογισθούν τα διαγράμματα Hildebrand. Το δεύτερο, αφορά στον αλγόριθμο υπολογισμού των διαγραμμάτων *καθ' αυτό*, δηλ., περιλαμβάνει τον υπολογισμό της χρονικής στιγμής που δηλώνει τη μετάβαση από την «μεταβατική κατάσταση» στη «μόνιμη κατάσταση»¹⁰, τη συλλογή των χρονικών στιγμών απογείωσης και προσγείωσης για τα εμπρόσθια και οπίσθια πόδια, καθώς και τον ακριβή μαθηματικό ορισμό των μεγεθών που συνθέτουν τα διαγράμματα Hildebrand. Τέλος, στο τρίτο μέρος, συντάσσεται ένας αλγόριθμος που αναγνωρίζει το μοτίβο που περιγράφει την κίνηση του ρομπότ στη μόνιμή του κατάσταση, και, επιπρόσθετα, εισάγεται η έννοια των χαρτών Poincaré και λαμβάνει χώρα η εφαρμογή τους στην επισκόπηση των προαναφερθέντων μοτίβων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρατίθενται και αναλύονται τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν από τη χρήση της μεθόδου που αναπτύχθηκε στο Κεφ. 4, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των διάφορων παραμέτρων στο βηματισμό του ρομπότ και την αδιάστατη παράμετρο r . Παράλληλα, παρατηρείται η κατανομή των – αναφερθέντων στο Κεφ. 4 – μοτίβων που περιγράφουν την κίνησή του με βάση τη μεταβολή της εκάστοτε παραμέτρου.

⁹ Σε αυτό το σημείο, γίνεται αναφορά σε «υπολογισμό διαγράμματος». Η αναφορά αυτή είναι δόκιμη, με την έννοια ότι το διάγραμμα αυτό (ως «σχήμα», «εικόνα» ή οπτική παράσταση) είναι η απόρροια της εκτέλεσης ενός αλγορίθμου. Είναι, δηλ., το αποτέλεσμα της λειτουργίας του (output). Η χρήση της λέξης «υπολογισμός» προκαλεί συχνά σύγχυση, καθώς, στην καθομιλουμένη, ο υπολογισμός συνδέεται κυρίως με την περιγραφή διαδικασιών στις οποίες το αποτέλεσμα είναι αριθμητικής υφής. Στην Αγγλική γλώσσα, προς αποφυγή της εν λόγω σύγχυσης, χρησιμοποιούνται δύο όροι για τον «υπολογισμό», ο γενικότερος όρος “computation” και ο όρος “calculation” που αφορά κυρίως σε «αριθμητικούς αλγορίθμους».

¹⁰ Η μεταβατική κατάσταση είναι εκείνο το – απεριοδικό – κομμάτι της κίνησης του ρομπότ κατά το οποίο τα «προσωρινά» δυναμικά φαινόμενα που εκτυλίσσονται και που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της κίνησής του, δεν έχουν καταλαγιάσει ή αποσβεστεί (settle). Μόνιμη, είναι η κατάσταση στην οποία κάθε μεταβατικό φαινόμενο έχει εξαφανιστεί και η κίνηση είναι περιοδική, έτσι που, να δύναται να περιγραφεί με διαφόρων ειδών μοτίβα (patterns).

Στο έκτο κεφάλαιο, εμφανίζονται συγκεντρωμένα (σε μορφή λίστας) τα σημαντικότερα συμπεράσματα της εργασίας και γίνεται αναφορά σε ορισμένες κατευθυντήριες γραμμές που αφορούν στην επέκταση της παρούσας προσπάθειας.

Στο Παράρτημα Α, παρουσιάζονται κάποιες βασικές ιδέες που αφορούν στην επέκταση της εφαρμογής της μεθόδου υπολογισμού των διαγραμμάτων Hildebrand σε τριδιάστατες, «χωρικές», κινήσεις.

Στο Παράρτημα Β, αναλύεται μία περίπτωση χρήσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων στο θέμα που αναπτύσσεται στην εργασία, με σκοπό, την επιτάχυνση της διαδικασίας υπολογισμού των διαγραμμάτων Hildebrand.

Τέλος, στο Παράρτημα Γ, παρουσιάζονται – επιγραμματικά – τα περιεχόμενα του συνοδευτικού CD της εργασίας.

2 Διασκελισμοί και Διαγράμματα Hildebrand

Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρεται η ορολογία που θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση των βηματισμών στα επόμενα κεφάλαια και που είναι υιοθετημένη από τη Βιολογία. Θα παρουσιαστεί η μορφή των διαγραμμάτων Hildebrand, τα συστατικά τους στοιχεία καθώς και η συμπληρωματική εκδοχή τους που είναι τα γραφήματα βηματισμών (gait graphs). Στη συνέχεια, θα παρατεθούν μερικά παραδείγματα από την εφαρμογή αυτών των διαγραμμάτων στη Ζωολογία.

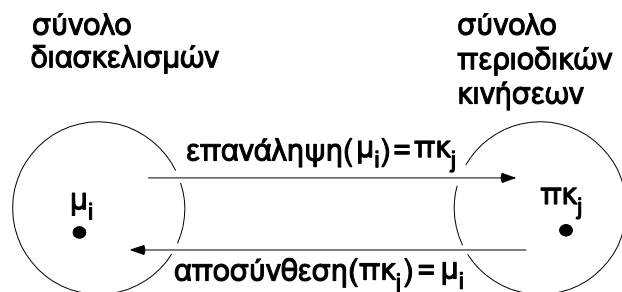
Αρχικά, ορίζεται ο διασκελισμός.

2.1 Ορισμός του Διασκελισμού (Κλασσικός Ορισμός)

Ως διασκελισμός, κατά τον Hildebrand (βλ. [7]), θεωρείται εκείνο το κομμάτι της κίνησης (του ζώου) που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές που αντιστοιχούν σε προσγείωση του οπίσθιου αριστερού ποδιού. Ο ορισμός αυτός υιοθετείται στην παρούσα εργασία για την κίνηση του τετράποδου ρομπότ.

Επιπρόσθετα, ως διασκελισμός, ορίζεται το μοτίβο που, επαναλαμβανόμενο, συνθέτει την περιοδική κίνηση του ζώου (ή του ρομπότ), και, η περιοδική κίνηση, αυτή, αν αποσυντεθεί (δηλ., αν αποδομηθεί), αντιστοιχίζεται με ένα μοναδικό διασκελισμό – μοτίβο.

Στο Σχ. 2-1, απεικονίζεται η σχέση μεταξύ διασκελισμών και περιοδικών κινήσεων με τη χρήση συνόλων και συναρτήσεων ορισμένων επί αυτών.



Σχήμα 2-1. Σχέση διασκελισμών και περιοδικών κινήσεων.

Ακολουθεί ο ορισμός των διαγραμμάτων Hildebrand.

2.2 Διαγράμματα Hildebrand (Hildebrand Diagrams) και Γραφήματα Βηματισμού (Gait Graphs)

Ένα διάγραμμα Hildebrand, αποτυπώνει το διασκελισμό που συνθέτει την περιοδική κίνηση ενός ζώου με πόδια ή ενός ρομπότ με πόδια. Είναι, δηλ., ένα μέσο επισκόπησης του διασκελισμού που επιλέγει το ρομπότ ή το ζώο προς χρήση για κάποια συγκεκριμένη κίνηση, με βάση τα κατασκευαστικά ή ανατομικά του χαρακτηριστικά, το περιβάλλον του, τις αρχικές συνθήκες της κίνησής του κ.λπ.

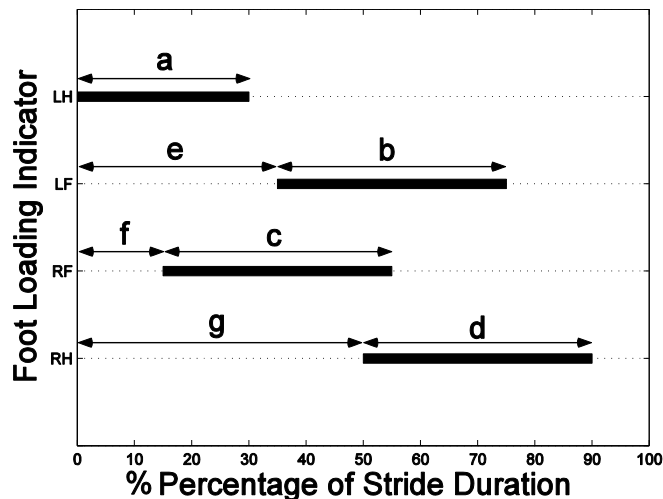
Για τη δημιουργία ενός διαγράμματος Hildebrand, απαιτείται η γνώση κάποιων βαθμωτών (μονόμετρων) μεγεθών. Αυτά, αφορούν στην χρονική διάρκεια φόρτισης¹¹ του εκάστοτε ποδιού ως ποσοστό της χρονικής διάρκειας του διασκελισμού, καθώς και τα χρονικά διαστήματα που βρίσκονται ανάμεσα στην προσγείωση του οπίσθιου αριστερού ποδιού (συμβάν «αναφοράς») και την προσγείωση καθ' ενός εκ των τριών υπόλοιπων ποδιών, πάλι, ως ποσοστά του διασκελισμού. Χρειάζονται δηλ.,

4 αριθμοί (ποσοστά φόρτισης, ένα για κάθε πόδι) + 3 αριθμοί (ποσοστά χρονικής
διαφοράς προσγειώσεων, ένα για κάθε πόδι εκτός του οπίσθιου αριστερού, γιατί,
χρησιμοποιείται ως αναφορά) = 7 αριθμοί.

Ένα παράδειγμα διαγράμματος Hildebrand παρουσιάζεται στο Σχ. 2-2. Σε αυτό, εμφανίζεται ο διαμορφωτικός ρόλος των εμπλεκόμενων μεταβλητών καθώς και η μεταξύ τους σχέση. Στον οριζόντιο άξονα λαμβάνει τιμές το μέγεθος που αφορά στο *ποσοστό επί τοις εκατό* της

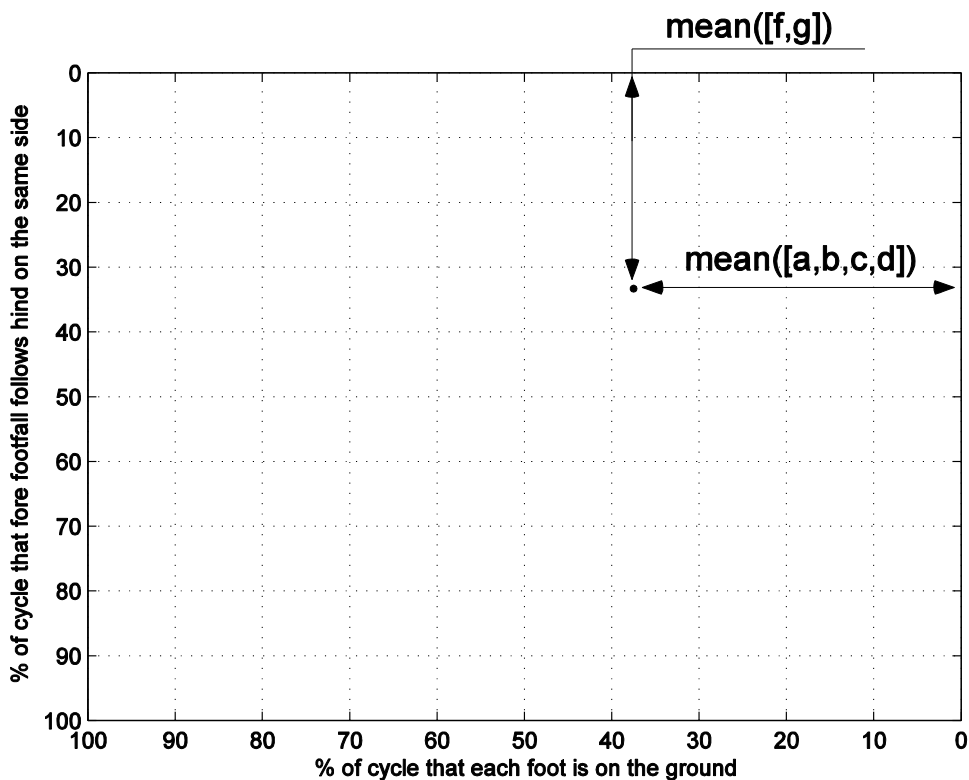
¹¹ Θεωρείται πως όταν ένα πόδι πατά στο έδαφος, βρίσκεται σε κατάσταση «μηχανικής φόρτισης».

συνολικής χρονικής διάρκειας του διασκελισμού (τιμές από 0% μέχρι και 100%). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελείται από τέσσερις οριζόντιες γραμμές – μία για κάθε πόδι – οι οποίες έχουν τη μορφή μαύρης συνεχούς γραμμής, όταν το αντίστοιχο πόδι πατά στο έδαφος, και τη μορφή μαύρης διακεκομμένης γραμμής, όταν αυτό ίπταται. Με L ή R αναφέρονται τα αριστερά (Left) ή δεξιά (Right) πόδια, και, με F ή H αναφέρονται τα εμπρός (Fore) ή οπίσθια (Hind) πόδια. Οπότε, με LH σημειώνουμε το οπίσθιο αριστερό πόδι, με RF το εμπρός δεξί κ.ο.κ.



Σχήμα 2-2. Παράδειγμα διαγράμματος Hildebrand.

Μία εναλλακτική εκδοχή του διαγράμματος Hildebrand, είναι το γράφημα βηματισμού (gait graph). Αυτό το γράφημα, είναι, ουσιαστικά, η αποτύπωση με τη μορφή κουκίδας – σημείου σε κατάλληλα βαθμονομημένο επίπεδο, του διασκελισμού που αποτυπώνεται στο διάγραμμα Hildebrand. Στον οριζόντιο άξονα, λαμβάνει τιμές ο μέσος όρος των παραγόντων φόρτισης και στον κατακόρυφο ο μέσος όρος των ποσοστών του διασκελισμού που αφορούν στη χρονική απόσταση της προσγείωσης του κάθε ποδιού – κάποιας συγκεκριμένης πλευράς (αριστερή ή δεξιά) – από την προσγείωση του οπίσθιου αριστερού ποδιού. Ένα παράδειγμα αυτού του διαγράμματος απεικονίζεται στο Σχ. 2-3.

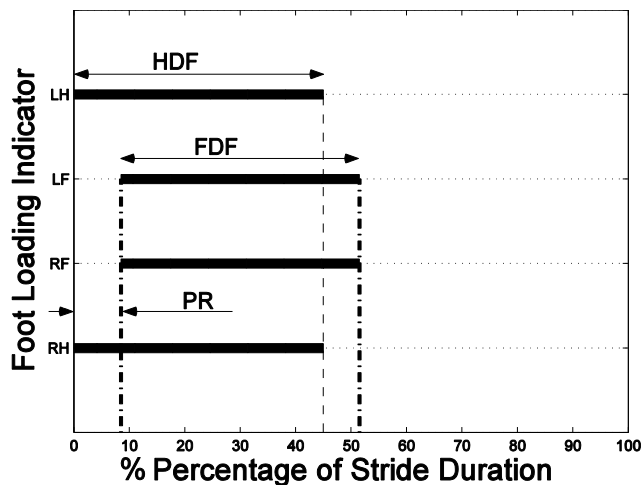


Σχήμα 2-3. Παράδειγμα γραφήματος βηματισμού (gait graph).

Στην περίπτωση των επίπεδων (δηλ. διδιάστατων) τετράποδων ρομπότ, γίνεται χρήση της αρχής του εικονικού ποδιού (όπου, δύο φυσικά πόδια αντικαθίστανται, κατά τη μοντελοποίηση, από ένα δυναμικά ισοδύναμο «εικονικό» πόδι, βλ. [10], [15] και Παρ. 3.3). Άμεση συνέπεια αυτού, είναι η κινητική σύζευξη των δύο φυσικών ποδιών με αποτέλεσμα τη μείωση του πλήθους των απαιτούμενων μεταβλητών για την δημιουργία του διαγράμματος Hildebrand, από επτά σε τρεις, καθώς οι παράγοντες φόρτισης πλέον είναι δύο (εμπρόσθια και οπίσθια πόδια, ως ζεύγη), και, υπάρχει μόνο ένα χρονικό διάστημα ανάμεσα σε προσγειώσεις ποδιών, δηλαδή αυτό που βρίσκεται ανάμεσα στην προσγείωση, π.χ., των οπίσθιων και των εμπρόσθιων ποδιών (διαφορά φάσης).

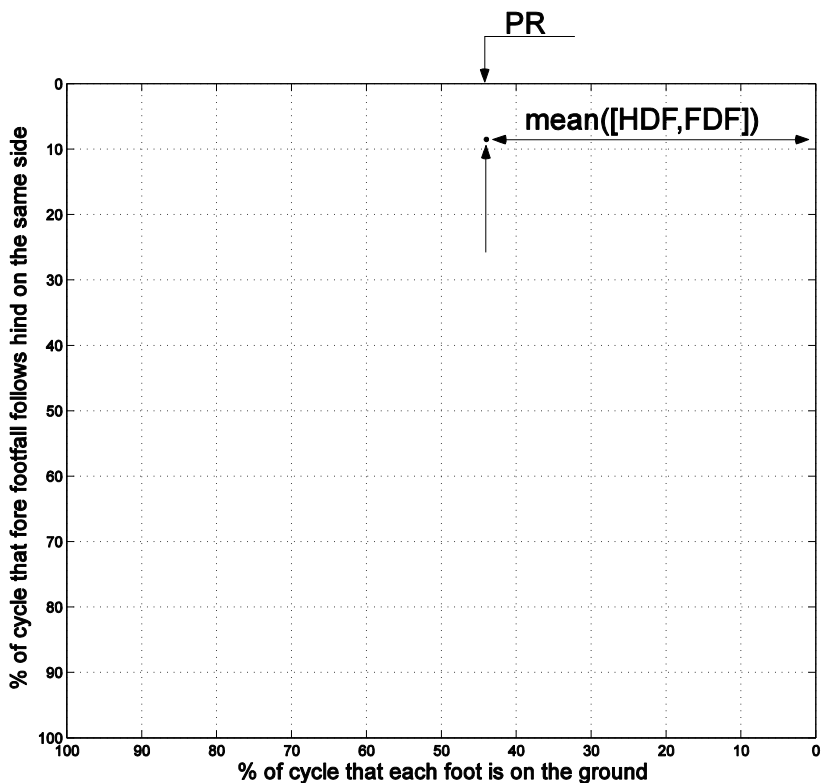
Υπό αυτές τις συνθήκες, ένα διάγραμμα Hildebrand ομοιάζει με το Σχ. 2-4, δηλ., τα «εξωτερικά» ευθύγραμμα τμήματα είναι ισομήκη και στοιχισμένα κατακορύφως, και, το ίδιο ισχύει για τα «εσωτερικά» ευθύγραμμα τμήματα. Οι μεταβλητές που συνθέτουν ένα διάγραμμα Hildebrand, και οι οποίες υπολογίζονται αργότερα στο Κεφ. 4, είναι τρεις, η διαφορά φάσης (phase relationship, PR), ο παράγοντας φόρτισης των οπίσθιων ποδιών (hind duty factor,

HDF) και ο παράγοντας φόρτισης των εμπρόσθιων ποδιών (fore duty factor, FDF).



Σχήμα 2-4. Συστατικά στοιχεία των διαγραμμάτων Hildebrand για διδιάστατους διασκελισμούς.

Αντίστοιχα διαμορφώνεται και το gait graph που αφορά στην παράσταση του διασκελισμού μίας προσομοιωμένης κίνησης του διδιάστατου, πλέον, ρομπότ.



Σχήμα 2-5. Συστατικά στοιχεία των gait graphs για διδιάστατους διασκελισμούς.

Επί τη ευκαιρία, τονίζεται πως η έννοια του gait graph είναι θεμελιώδης για την εργασία

αυτή, καθώς με τη χρήση του έρχεται εις πέρας το κύριο κομμάτι των παρατηρήσεων που πραγματοποιούνται στο Κεφ. 5. Το χαρακτηριστικό του gait graph το οποίο το καθιστά ιδανικό για τη διαδικασία παρατήρησης είναι η δυνατότητά του να «φιλοξενεί» σε κοινό, δεδομένο επίπεδο, τις κουκίδες – διασκελισμούς (σημεία) που αφορούν σε ένα πλήθος διενεργούμενων πειραμάτων. Ένα τέτοιο gait graph, δηλ., με «πολλές»¹² κουκίδες όπου η κάθε μία παριστάνει το διασκελισμό μίας προσομοιωμένης κίνησης του ρομπότ, παρατίθεται ακολούθως στο Σχ. 2-6.

Πιο συγκεκριμένα, στο Σχ. 2-6, κάθε κουκίδα αφορά σε κάποια κίνηση του ρομπότ η οποία διαφέρει από κάθε μία εκ των κινήσεων που αναπαρίστανται από τις υπόλοιπες κουκίδες, στην τιμή της σταθεράς του ελατηρίου ποδιών. Οι κουκίδες εμφανίζονται από αριστερά προς δεξιά για αύξηση της σταθεράς ελατηρίου, οπότε, για αύξηση της σταθεράς αυτής, παρατηρείται μείωση της μέσης τιμής των παραγόντων φόρτισης (για περισσότερα, τέτοιου είδους, αποτελέσματα, βλ. Παρ. 5.2).

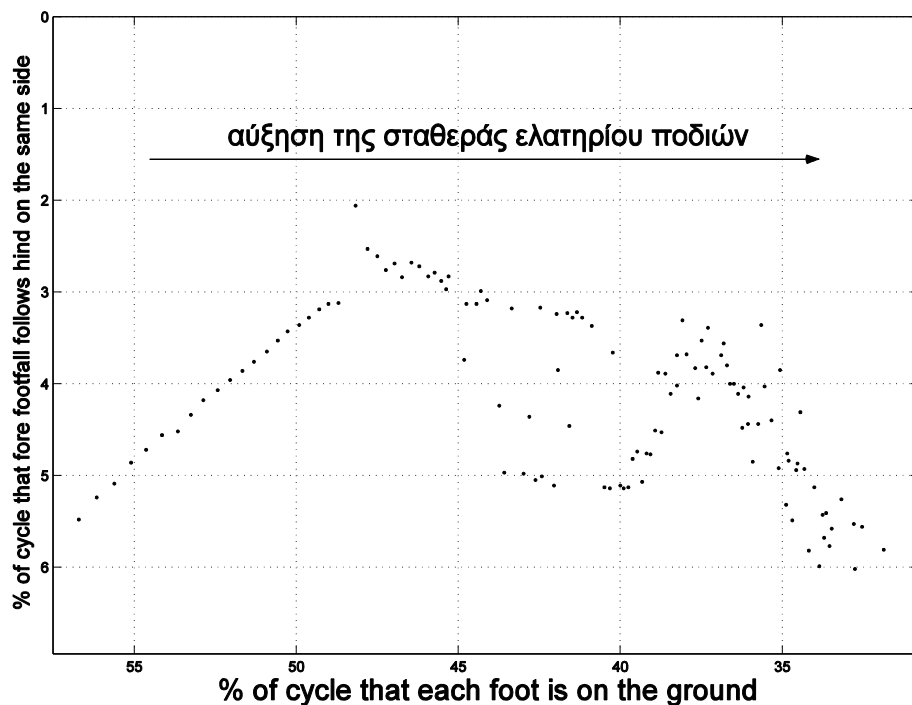
2.3 Τύποι Διασκελισμών

Σε αυτό το σημείο, θα παρατεθούν κάποια διαγράμματα Hildebrand τα οποία αντιστοιχίζονται με τους τύπους διασκελισμών που απαντώνται συχνότερα σε μελέτες βηματισμού για τετράποδα ζώα ή ρομπότ (όχι απαραίτητα δύο διαστάσεων, επιτρέπονται δηλ., «τριδιάστατοι» διασκελισμοί).

¹² Το πλήθος των κουκίδων που δύνανται να εμφανιστούν σε κοινό gait graph, που ανακύπτει στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, είναι,

$$(10^4 - 1) \cdot 10^4 = 9999 \cdot 10000 = 99\ 990\ 000.$$

Αυτό ισχύει, γιατί, στον οριζόντιο άξονα λαμβάνει τιμές το μέγεθος «μέση τιμή των παραγόντων φόρτισης» με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων στο εύρος (0.00, 100.00), άρα, οι δυνατές θέσεις επί αυτού είναι $10^4 - 1$ (από το 00.00 μέχρι το 99.99 ανακύπτουν 10^4 θέσεις, μείον τη μία θέση του ανοικτού άκρου που αντιστοιχεί στο 0.00), και, στον κατακόρυφο λαμβάνει τιμές το μέγεθος «διαφορά φάσης» με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων στο εύρος [0.00, 100.00), άρα οι δυνατές θέσεις εκεί, είναι 10^4 (10^4 θέσεις για το διάστημα από το 0.00 έως το 99.99). Το πλήθος σημείων που δύνανται να παρασταθούν σε ένα επίπεδο, ισούται με το γινόμενο του πλήθους των δυνατών θέσεων του οριζόντιου άξονα επί το πλήθος των δυνατών θέσεων του κατακόρυφου άξονα (δηλ., το πλήθος των δυνατών δυάδων που συνθέτουν οι άξονες), εδώ, αυτό είναι ίσο με 99 990 000.



Σχήμα 2-6. Gait graph για ένα πλήθος διασκελισμών όπου ο καθένας αντιστοιχεί σε διαφορετική προσομοιωμένη κίνηση (multiple gait graph ή gait cloud).

Θα παρουσιαστούν οι τύποι pronk, bound, trot, pace και gallop.

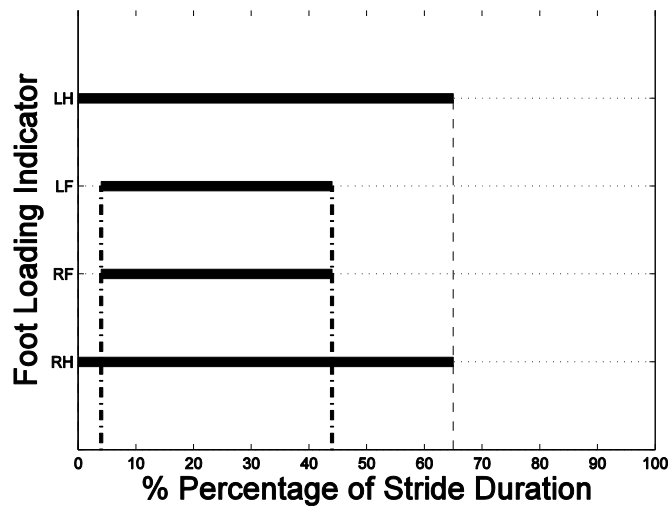
Ο τύπος pronk, γενικά, αφορά σε διασκελισμούς στους οποίους όλα τα πόδια βρίσκονται σε φάση μεταξύ τους. Δύο ή περισσότερα πόδια *βρίσκονται σε φάση* αν προσγειώνονται ή απογειώνονται μαζί, αν, δηλ., λειτουργούν ως «ομάδα».

Στο πλαίσιο της εργασίας, για την pronk κίνηση του ρομπότ, η ανάλυση εστιάζει σε αυτούς τους διασκελισμούς που έχουν μικρή (μέχρι 5%) τιμή της διαφοράς φάσης (χρονική διαφορά *χρόνων προσγείωσης ποδιών*). Επιτρέπεται, δηλαδή, σε θεωρούμενο διασκελισμό τύπου pronk, οι *χρόνοι απογείωσης* των ποδιών να είναι εκτός φάσης και, μάλιστα, η ανηγμένη χρονική τους διαφορά να είναι πάνω από 5%.

Ακολουθεί το Σχ. 2-7, το οποίο, περιγράφει γενικά (δηλ., από τη βιολογική σκοπιά) την κίνηση pronk, και, το Σχ. 2-8, στο οποίο αποτυπώνεται μία περίπτωση κίνησης του ρομπότ που είναι αποδεκτή ως pronk για την παρούσα μελέτη. Στο Σχ. 2-8, παρατηρείται το ισομήκες των οριζόντιων γραμμών, που αντιστοιχούν στα πόδια του ρομπότ, ανά ζεύγος ποδιών.

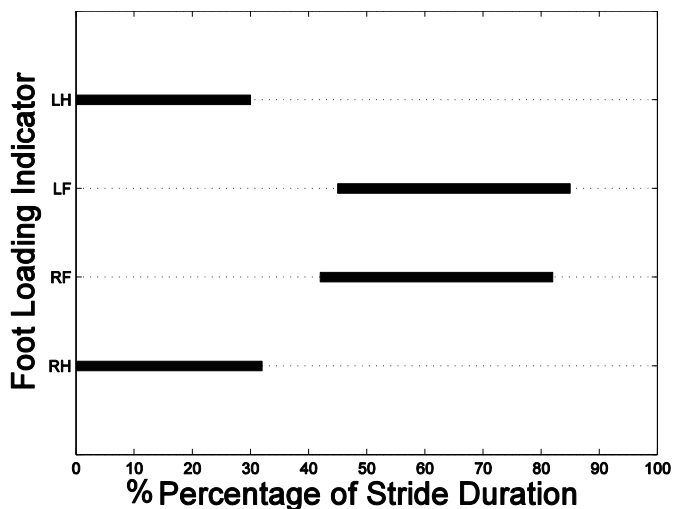


Σχήμα 2-7. Ο τύπος διασκελισμού pronk, γενικά.



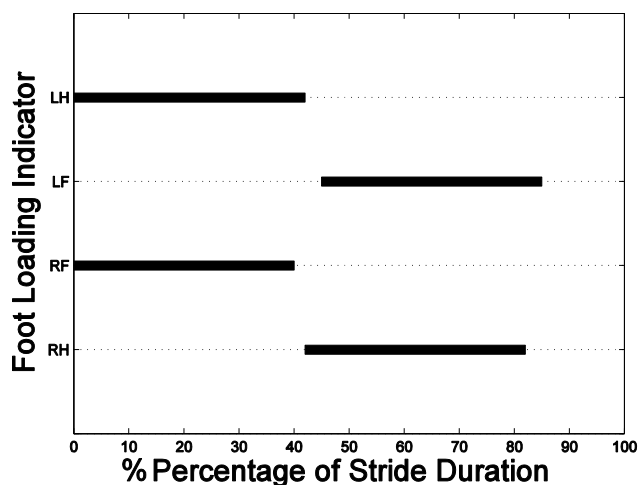
Σχήμα 2-8. Διασκελισμός, ο οποίος, στο πλαίσιο της εργασίας χαρακτηρίζεται ως τύπου pronk.

Ακολουθεί ο τύπος bound. Σε αυτό το είδος διασκελισμού τα οπίσθια πόδια βρίσκονται σε φάση μεταξύ τους, και, το ίδιο ισχύει για τα εμπρόσθια. Η ιδιότητά του αυτή, απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 2-9).



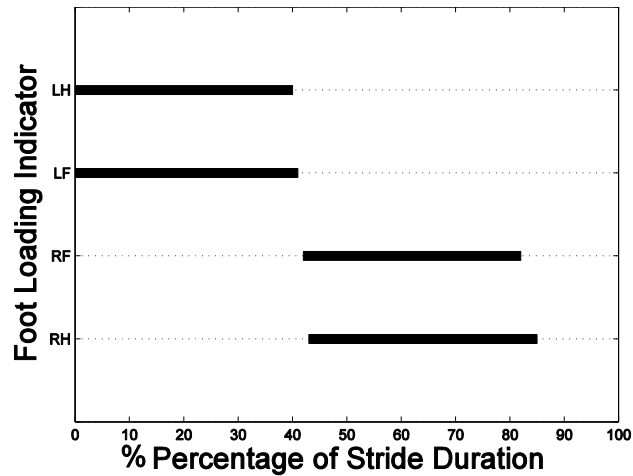
Σχήμα 2-9. Ο τύπος διασκελισμού bound.

Σειρά έχει ο τύπος trot. Εδώ, τα πόδια που βρίσκονται επί των δύο διαγωνίων του σώματος του ρομπότ, βρίσκονται σε φάση μεταξύ τους. Στο σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνεται αυτή τους η σχέση.



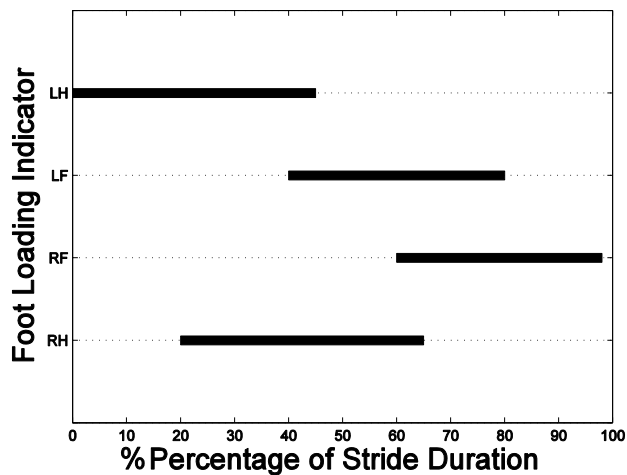
Σχήμα 2-10. Ο τύπος διασκελισμού trot.

Ο τύπος race αφορά σε διασκελισμούς στους οποίους τα πόδια ανά πλευρά (δεξιά – αριστερή) βρίσκονται σε συμφωνία φάσης μεταξύ τους. Ακολουθεί το αντίστοιχο διάγραμμα Hildebrand.



Σχήμα 2-11. Ο τύπος διασκελισμού race.

Τέλος, παρουσιάζεται ο τύπος gallop που αφορά σε διασκελισμούς στους οποίους τα πόδια, ανά ζεύγος, λειτουργούν *περίπου* ως ομάδα. Αυτό που συμβαίνει εδώ, είναι ότι το ένα από τα δύο πόδια, ανά ζεύγος, διαθέτει χρονικό προβάδισμα (στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία αναφέρεται ως “lead”, βλ. [7]) έναντι του άλλου, όσον αφορά στις χρονικές στιγμές προσγείωσής τους. Παρακάτω, φαίνεται το διάγραμμα Hildebrand για ένα διασκελισμό τύπου gallop.



Σχήμα 2-12. Ο τύπος διασκελισμού gallop.

3 Δυναμική Μοντελοποίηση του Ρομπότ

Στο παρόν κεφάλαιο, σε πρώτη φάση, γίνεται λόγος για τη μέθοδο Euler – Lagrange (βλ. [8], [18] και [23]) που σχετίζεται με τη κατάστρωση των διαφορικών εξισώσεων που χαρακτηρίζουν τη δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος. Μετά, παρουσιάζονται τα δυναμικά μοντέλα του ρομπότ που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία (βλ. Παρ. 3.4), και, τέλος, γίνεται μία σύντομη αναφορά στο δυναμικό έλεγχο του ρομπότ καθώς και στη φύση των περιβαλλόντων προσομοίωσης.

3.1 Μέθοδος Euler – Lagrange¹³

Για τη μοντελοποίηση ενός δυναμικού συστήματος, μία απλή και εύχρηστη μέθοδος είναι η μέθοδος των Euler – Lagrange. Παρακάτω, στην ίδια παράγραφο, εκτυλίσσεται μία προσπάθεια εισαγωγής του αναγνώστη σε αυτή τη μέθοδο.

Κατ' αρχάς, ο χρήστης της μεθόδου, σχεδιάζει αφαιρετικά τη μηχανική οντότητα της οποίας οι κινητικές εξισώσεις θα καταστρωθούν. Συνθέτει, δηλαδή, το σύστημά του χρησιμοποιώντας ιδανικά μηχανικά, ηλεκτρικά, ρευστομηχανικά ή ηλεκτρονικά στοιχεία όπως π.χ. ελατήρια, αποσβεστήρες, αντιστάσεις, τρανζίστορ κ.λπ. ανάλογα με τον απαιτούμενο βαθμό προσέγγισης του φυσικού συστήματος που απαιτεί η εκάστοτε εφαρμογή. Επίσης, εδώ

¹³ Η προσέγγιση που παρατίθεται στο συγκεκριμένο πόνημα, στοχεύει σε μία σύντομη και εύληπτη υπενθύμιση της μεθόδου.

αποσαφηνίζεται το πλήθος των γεωμετρικών διαστάσεων που θα ληφθούν υπόψη (π.χ. διδιάστατη μοντελοποίηση, τριδιάστατη κ.λπ.) καθώς και το σύστημα (ή τα συστήματα) συντεταγμένων στο οποίο (αντίστοιχα, στα οποία) θα εκφραστούν οι μεταβλητές που συνθέτουν τις προκύπτουσες διαφορικές εξισώσεις. Στη συνέχεια, αναγνωρίζονται το πλήθος και η ταυτότητα των βαθμών ελευθερίας του συστήματος, σε συμφωνία με τις παραδοχές και το πλαίσιο της μοντελοποίησης. Για τη μέθοδο Euler – Lagrange, οι βαθμοί ελευθερίας διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο και είναι απαραίτητη η γνώση τους.

Αν συμβολιστεί με T η συνολική κινητική ενέργεια του συστήματος και με V η συνολική δυναμική ενέργειά του, τότε, με,

$$L = T - V \quad (3.1)$$

συμβολίζεται η «Λαγκραντζιανή» (Lagrangian) του συστήματος. Χρησιμοποιώντας αυτή την ποσότητα στην παρακάτω σχέση,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) = \frac{\partial L}{\partial q_j} \quad (3.2)$$

όπου, με q_j συμβολίζεται ο εκάστοτε βαθμός ελευθερίας του συστήματος και με \dot{q}_j η πρώτη χρονική του παράγωγος, εξάγονται οι διαφορικές εξισώσεις του συστήματος. Τονίζεται, πως, στη συγκεκριμένη εμφάνιση της μεθόδου, δεν λαμβάνονται υπόψη οι είσοδοι ή έξοδοι ενέργειας από το σύστημα. Αφορά, δηλαδή, σε συντηρητικό σύστημα. Σε περίπτωση που ληφθούν υπόψη (δηλ., μοντελοποιηθούν) οι ενεργειακές είσοδοι και έξοδοι του συστήματος, η Εξ. (3.2) γίνεται,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) = \frac{\partial L}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial \Delta}{\partial q_j} \quad (3.3)$$

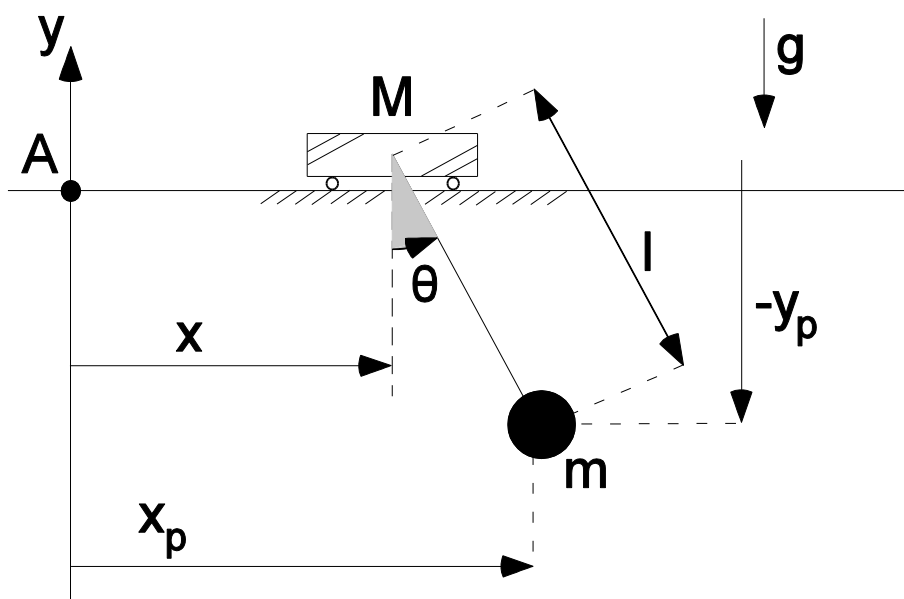
Όπου, με Π παρίσταται η μαθηματική έκφραση της προσφοράς ισχύος και με Δ η έκφραση της διάχυσης ισχύος.

Παρακάτω ακολουθεί ένα απλό παράδειγμα της μεθόδου, δανεισμένο από τη διαδικτυακή,

«ανοικτή»¹⁴ και δωρεάν εγκυκλοπαίδεια, Wikipedia (άρθρο Lagrangian Mechanics).

3.1.1 Παράδειγμα Εφαρμογής της Μεθόδου Euler – Lagrange

Το παράδειγμα, αφορά στην κατάστρωση των διαφορικών εξισώσεων ενός «επίπεδου» μηχανικού συστήματος στο οποίο ένα εκκρεμές (σημειακή μάζα) που δύναται να εκτελεί σύνθετη κίνηση (οριζόντια μεταφορική και κατακόρυφη περιστροφική κίνηση) είναι συνδεδεμένο μέσω ιδανικής στροφικής άρθρωσης και μίας αβαρούς άκαμπτης «ακίδας»¹⁵ με μία σημειακή, πάλι, μάζα («βάση» του εκκρεμούς) που δύναται να εκτελέσει μόνο οριζόντια μεταφορική κίνηση. Αρχικά, παρατίθεται το διδιάστατο σχήμα της διάταξης (βλ. Σχ. 3-1).



Σχήμα 3-1. Η πειραματική διάταξη του παραδείγματος εφαρμογής της Euler – Lagrange.

Ακολουθεί ο Πιν. 3-1, στον οποίο, επεξηγούνται τα σύμβολα του Σχ. 3-1 και αποσαφηνίζεται το περιεχόμενο νόημά τους (context).

¹⁴ Υπό την έννοια της δυνατότητας επεξεργασίας του περιεχομένου της από τον καθένα.

¹⁵ Κάποιος, εδώ, ίσως επέλεγε να παραστήσει το σύνδεσμο μεταξύ των μαζών M και m με ένα στοιχείο που χαρακτηρίζεται από μάζα, υποχωρητικότητα, μηχανική απόσβεση κ.λπ. Με κάτι περισσότερο, δηλ., από μία απλή «ακίδα».

Πίνακας 3-1. Αποσαφήνιση των συμβόλων της διάταξης του παραδείγματος εφαρμογής της Euler – Lagrange.

Σύμβολο	Μέγεθος
A	σύστημα συντεταγμένων A (ΣΣ A)
x	τετμημένη της βάσης ως προς ΣΣ A
x _p	τετμημένη εκκρεμούς ως προς ΣΣ A
y _p	τεταγμένη εκκρεμούς ως προς ΣΣ A
M	μάζα βάσης
m	μάζα εκκρεμούς
l	μήκος ακίδας
θ	γωνία εκκρεμούς ως προς την κατακόρυφη ευθεία που διέρχεται από τη μάζα M
g	βαρυτική έλξη

Οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος είναι δύο, και, αναλυτικά, είναι οι x και θ, καθώς αν είναι γνωστές οι τιμές αυτές, τότε, είναι γνωστή η θέση του συστήματος (οι θέσεις των σωμάτων, δηλαδή).

Η συνολική κινητική ενέργεια είναι ίση με,

$$T = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2) \quad (3.4)$$

ή

$$T = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left[(\dot{x} + l \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta)^2 + (l \cdot \dot{\theta} \cdot \sin\theta)^2 \right] \quad (3.5)$$

όπου, με x_p και y_p συμβολίζονται οι συντεταγμένες της μάζας του εκκρεμούς (p για pendulum) εκφρασμένες στο ΣΣ A, ενώ η δυναμική ενέργειά του είναι ίση με,

$$V = m \cdot g \cdot y_p = -m \cdot g \cdot l \cdot \cos\theta \quad (3.6)$$

Οπότε, η λαγκρανζιανή γίνεται,

$$L = T - V \quad (3.7)$$

$$\text{ή} \quad L = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left[(\dot{x} + l \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta)^2 + (l \cdot \dot{\theta} \cdot \sin \theta)^2 \right] + m \cdot g \cdot l \cdot \cos \theta \quad (3.8)$$

$$\text{ή} \quad L = \frac{1}{2} \cdot (M + m) \cdot \dot{x}^2 + m \cdot \dot{x} \cdot l \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + \frac{1}{2} \cdot m \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}^2 + m \cdot g \cdot l \cdot \cos \theta. \quad (3.9)$$

Σε αυτό το σημείο, θα εφαρμοστεί η Εξ. (3.2) για το βαθμό ελευθερίας x ,

$$\frac{d}{dt} \cdot [(M + m) \cdot \dot{x} + m \cdot l \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta] = 0 \quad (3.10)$$

$$\text{ή} \quad (M + m) \cdot \ddot{x} + m \cdot l \cdot \ddot{\theta} \cdot \cos \theta - m \cdot l \cdot \dot{\theta}^2 \sin \theta = 0. \quad (3.11)$$

Ακολουθεί η ίδια διαδικασία για τον έτερο βαθμό ελευθερίας του συστήματος, θ ,

$$\frac{d}{dt} [m \cdot (\dot{x} \cdot l \cdot \cos \theta + l^2 \cdot \dot{\theta})] + m \cdot l \cdot (\dot{x} \cdot \dot{\theta} + g) \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.12)$$

$$\text{ή} \quad l^2 \cdot \ddot{\theta} + l \cdot \ddot{x} \cdot \cos \theta + l \cdot g \cdot \sin \theta = 0. \quad (3.13)$$

Η διαδικασία εξαγωγής των κινητικών διαφορικών εξισώσεων περατώθηκε. Συγκεντρωτικά, οι διαφορικές εξισώσεις είναι οι,

$$\frac{(M + m)}{m} \cdot \ddot{x} + l \cdot \ddot{\theta} \cdot \cos \theta - l \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.14)$$

$$\text{και} \quad l^2 \cdot \ddot{\theta} + l \cdot \ddot{x} \cdot \cos \theta + l \cdot g \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.15)$$

σε μητρική μορφή, γίνονται,

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{M+m}{m} & l \cdot \cos \theta \\ l \cdot \cos \theta & l^2 \end{bmatrix}}_{\text{positive definite symmetric}} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -l \cdot \sin \theta \cdot \dot{\theta} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \cdot l \cdot \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

3.2 Το Τετράποδο Ρομπότ

Το τετράποδο ρομπότ, γίνεται αντιληπτό, στην εργασία αυτή, ως μία επίπεδη αλυσίδα τριών κινηματικών συνδέσμων που αποτελείται από το σώμα του ρομπότ και δύο πόδια που ενώνονται με αυτό μέσω δύο στροφικών αρθρώσεων. Ανάλογα με την περίπτωση της μοντελοποίησης (βλ. Παρ. 3.4.1 και Παρ. 3.4.2), τα πόδια δύνανται να έχουν μάζα ή όχι. Το ρομπότ θεωρείται ότι κινείται στο διαμήκες επίπεδο.

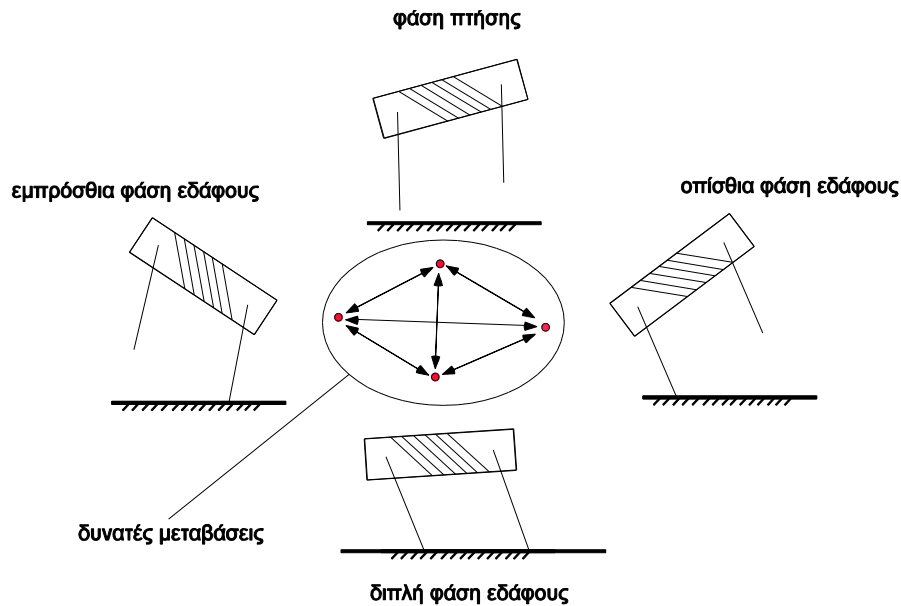
Οι στροφικές αρθρώσεις είναι επενεργούμενες, υπό την έννοια ότι ασκούνται ροπές μέσω αυτών στο σώμα και τα πόδια του ρομπότ, προκειμένου, αυτό, να «ελεγχθεί» και να κινηθεί. Εκτός αυτών, σε κάθε πόδι υπάρχει ένας παθητικός πρισματικός βαθμός ελευθερίας για την «παραλαβή» των αξονικών φορτίων των ποδιών και τη συνακόλουθη εκμετάλλευση αυτού του φαινομένου για μεταφορά ενέργειας από τους κινητήρες των αρθρώσεων στο σώμα κατά τις φάσεις εδάφους (διαδικασία *συσσώρευσης ενέργειας*).

Η κίνηση του ρομπότ, στο πλαίσιο της εργασίας, είναι αλματώδης, και μάλιστα τύπου bound ή pronk. Αυτό συμβαίνει, γιατί, οι συγκεκριμένοι τύποι διασκελισμών αφορούν σε τρόπους κίνησης όπου τα πόδια του κάθε ζεύγους κινούνται ως ομάδα, άρα, είναι συμβατοί με την αρχή του εικονικού ποδιού, που, όπως προαναφέρθηκε, αντιστοιχίζει τα δύο φυσικά πόδια κάθε ζεύγους σε ένα εικονικό.

Όσον αφορά στην κίνηση του ρομπότ, το ρομπότ αφήνεται να πέσει από ένα αρχικό ύψος ώστε να «φορτισθούν» τα ελατήριά του και να εκκινήσει η, υποβοηθούμενη και καθοριζόμενη από το σύστημα ελέγχου, μετατόπισή του.

Οι δυνατές φάσεις της, προαναφερθείσας, κίνησής του, είναι, η φάση πτήσης, η οπίσθια φάση εδάφους, η διπλή φάση εδάφους και η εμπρόσθια φάση εδάφους. Η φάση πτήσης είναι η δυναμική φάση του ρομπότ κατά την οποία κάθε πόδι βρίσκεται σε κατάσταση μη – επαφής με το έδαφος, ενώ, η διπλή φάση εδάφους είναι η φάση κατά την οποία κάθε πόδι πατά στο έδαφος. Εμπρόσθια φάση εδάφους είναι η φάση στην οποία πατούν μόνο τα εμπρόσθια πόδια, και, αντίστοιχα, ορίζεται η οπίσθια φάση εδάφους. Το μοτίβο *φάση πτήσης – κάποιες φάσεις εδάφους – φάση πτήσης*, επαναλαμβάνεται όσον αφορά στις κινήσεις που διενεργούνται στο πλαίσιο της εργασίας. Δεν έχει παρατηρηθεί κίνηση η οποία να μη διαθέτει διπλή φάση εδάφους. Στο Σχ. 3-2, που ακολουθεί, παρουσιάζονται οπτικά οι δυναμικές

φάσεις του ρομπότ.



Σχήμα 3-2. Οι δυνατές δυναμικές καταστάσεις ενός διδιάστατου τετράποδου ρομπότ, με ένα περιστροφικό βαθμό ελευθερίας ανά πόδι.

Στη συνέχεια, απαριθμούνται οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση του ρομπότ και οι οποίες παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τη φύση του και τη σύνδεσή του με τα «περιβάλλοντα προσομοιώσεων».

3.3 Παραδοχές Μοντελοποίησης

Οι παραδοχές που λήφθηκαν υπόψη κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης είναι οι εξής:

1. Η επαφή ποδιού – εδάφους μοντελοποιείται ως ιδανική άρθρωση. Επίσης, δεν χρησιμοποιείται κάποιο μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της δυναμικής του εδάφους. Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη αναγκαίας τριβής.
2. Η μάζα του ρομπότ θεωρείται εξ' ολοκλήρου κατανεμημένη στο σώμα. Άρα, για το ρομπότ ισχύει ότι,

$$j_z = \frac{J_z}{m \cdot d^2} = 1 \text{ (αδιάστατη ροπή αδράνειας ως προς τον z άξονα), δηλ.,}$$

$$J_z = m \cdot d^2 \text{ (βλ. Σχ. 3-3 και Πιν. 3-2 για την επεξήγηση των μεγεθών).}$$

3. Κάθε ζεύγος ποδιών του ρομπότ, αντικαθίσταται, κατά τη μοντελοποίηση, από ένα δυναμικά ισοδύναμο εικονικό πόδι. Ένα εικονικό πόδι έχει σταθερά ελατηρίου

διπλάσια από αυτή ενός φυσικού ποδιού, διπλάσια μάζα και ροπή αδράνειας, μήκος ίσο με το μήκος του φυσικού ποδιού, και, ασκούνται σε αυτό διπλάσιες ροπές και δυνάμεις σε σχέση με αυτές που δέχεται το φυσικό πόδι.

4. Οι στροφικές αρθρώσεις που ενώνουν το σώμα με τα πόδια θεωρούνται ιδανικές με συνέπεια να μην λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα τριβής κ.λπ. σε αυτές.
5. Κατά τη φάση πτήσης, το ρομπότ βρίσκεται μόνο υπό την επίδραση της βαρύτητας.
6. Τα πραγματικά πόδια που συνιστούν ένα εικονικό πόδι, βρίσκονται *ακριβώς* σε φάση κατά την κίνηση (δηλ., έχουν διαφορά φάσης ίση με το μηδέν).
7. Οι κινητήρες των στροφικών αρθρώσεων του ρομπότ *δεν* μοντελοποιούνται με μαθηματικό τρόπο στο πλαίσιο της εργασίας και, συνεπώς, δεν εμφανίζονται τα σύμβολα των δυναμικών περιγραφικών μεγεθών τους στις διαφορικές εξισώσεις των μοντέλων.

3.4 Δυναμικά Μοντέλα του Ρομπότ

Η Παρ. 3.4 αφορά στην παράθεση των εξισώσεων των δυναμικών μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν στο Κεφ. 5 για την προσομοίωση της κίνησης του ρομπότ.

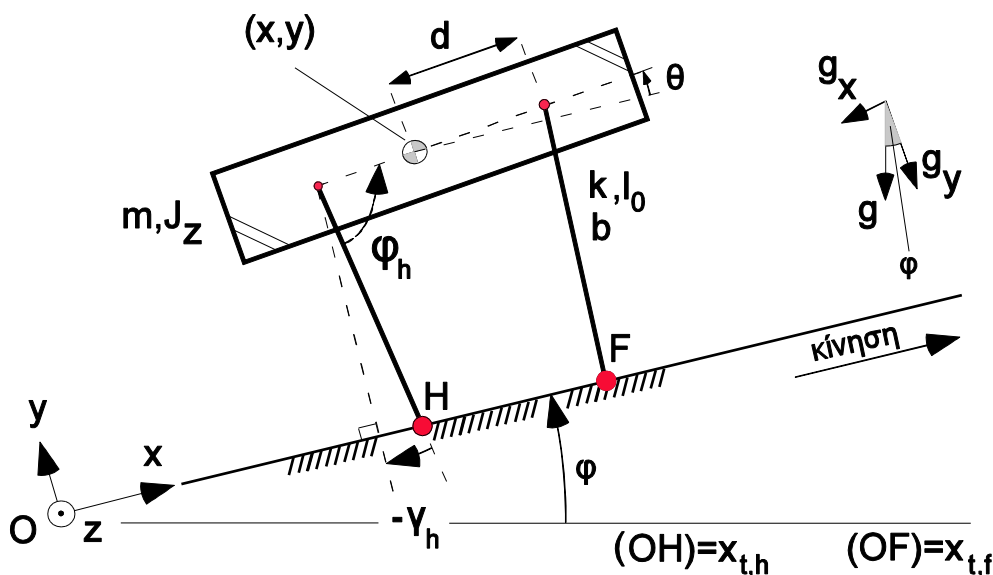
Για κάθε μοντέλο του ρομπότ θα παρουσιαστούν τα σύνολα των διαφορικών εξισώσεων που αφορούν στην περιγραφή του κατά τη «φάση πτήσης» και κατά τη «διπλή φάση εδάφους», για την περίπτωση κεκλιμένου – γενικά – ανηφορικού εδάφους, δηλ., για μη – αρνητική τιμή της κλίσης (ως κλίση λαμβάνεται η τιμή της μεταβλητής φ , σε rad).

Γνωρίζοντας τις διαφορικές εξισώσεις για τη φάση πτήσης και τη διπλή φάση εδάφους δύνανται να εξαχθούν οι διαφορικές εξισώσεις που αφορούν στις υπόλοιπες φάσεις του ρομπότ (εμπρόσθια φάση εδάφους και οπίσθια φάση εδάφους), αν απαλειφθούν οι όροι που αφορούν σε πόδια τα οποία δεν βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος.

Τονίζεται, πως, το κάθε ένα από τα μοντέλα που θα παρουσιαστούν εδώ για λόγους πληρότητας, βρίσκεται σε παρεμφερή ή πανομοιότυπη μορφή, κατά περίπτωση, σε κάποιο ή κάποια από τα [9], [10] [24] ή [25].

3.4.1 Μοντέλο του Ρομπότ Χωρίς Μάζα στα Πόδια¹⁶ (Μοντέλο Α)

Αρχικά, παρατίθεται ένα σχήμα του ρομπότ χωρίς μάζα στα πόδια για κίνηση στο διάμηκες επίπεδο¹⁷ (βλ. Σχ. 3-3). Με τη συνδρομή αυτού του σχήματος, στην πορεία, ορίζονται τα διάφορα μεγέθη που περιγράφουν τις διάφορες μηχανικές συνιστώσες του ρομπότ.



Σχήμα 3-3. Το τετράποδο ρομπότ, με πόδια χωρίς μάζα.

Ακολουθεί ο Πιν. 3-2, στον οποίο ορίζονται τα διάφορα μεγέθη που ανακύπτουν στο Σχ. 3-3.

Έπειτα, παρουσιάζονται τα σύνολα των διαφορικών εξισώσεων που αφορούν στη φάση πτήσης και τη διπλή φάση εδάφους του ρομπότ. Οι βαθμοί ελευθερίας εδώ είναι τρεις (περιγραφή της κίνησης του σώματος, τα μήκη και οι γωνίες στροφής των ποδιών υπολογίζονται έμμεσα) και συγκεκριμένα είναι οι x , y και θ .

Αρχικά, παρουσιάζεται η Λαγκραντζιανή του συστήματος,

$$L = T - V \tag{3.17}$$

¹⁶ Η μεταστοιχείωση αυτού του μοντέλου και των συμβάντων μετάβασής του σε ένα από τα περιβάλλοντα προσομοιώσεων που χρησιμοποιήθηκαν – συμπεριλαμβανομένου του δυναμικού ελέγχου, οφείλεται στον Ν. – Δ. Χερουβείμ.

¹⁷ Επίπεδο παράλληλο στην κίνηση του ρομπότ. Στον αντίποδα, βρίσκεται το εγκάρσιο επίπεδο, το οποίο, όπως φανερώνει το όνομά του, είναι κάθετο στην κίνησή του.

$$\text{ή} \quad L = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} \cdot J_z \cdot \dot{\theta}^2 - \frac{1}{2} \cdot k \cdot (l_0 - l_h)^2 - \frac{1}{2} \cdot k \cdot (l_0 - l_f)^2 - m \cdot g \cdot \cos \varphi \cdot y - m \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot x \quad (3.18)$$

$$\text{με} \quad \Delta = \frac{1}{2} \cdot b \cdot \dot{\psi}_h^2 + \frac{1}{2} \cdot b \cdot \dot{\psi}_f^2 \quad (3.19)$$

$$\text{και} \quad \Pi = \dot{\psi}_h \cdot \tau_{z,h} + \dot{\psi}_f \cdot \tau_{z,f} \quad (3.20)$$

Πίνακας 3-2. Περιγραφικά μεγέθη του ρομπότ χωρίς μάζες στα πόδια.

Σύμβολο	Μέγεθος
x	τετμημένη κέντρου μάζας (ΚΜ) σώματος
y	τεταγμένη ΚΜ σώματος
z	τιμή στον z άξονα του ΚΜ σώματος
m	μάζα σώματος
J_z	ροπή αδράνειας σώματος ως προς τον z άξονα που διέρχεται από το ΚΜ του
d	μεσοαπόσταση μηρών – αφετηριών στροφικών αρθρώσεων
l_0	ασυμπίεστο (ελεύθερο) μήκος ποδιών
k	υποχωρητικότητα ποδιών
b	συντελεστής μηχανικών απωλειών ποδιών
θ	γωνία pitch του σώματος
φ	κλίση εδάφους
$\psi_{h/f}$	σχετική γωνία οπίσθιου/ εμπρόσθιου ποδιού
$\Psi_{h/f}$	απόλυτη γωνία οπίσθιου/ εμπρόσθιου ποδιού
g	βαρυτική έλξη
g_x	x – συνιστώσα βαρυτικής έλξης
g_y	y – συνιστώσα βαρυτικής έλξης

Τώρα, με χρήση της Εξ. (3.3) εξάγονται οι διαφορικές εξισώσεις του συστήματος. Πρώτα εμφανίζονται οι εξισώσεις για τη φάση πτήσης.

3.4.1.1 Φάση Πτήσης

$$\ddot{x} = -g \cdot \sin \varphi \quad (3.21)$$

$$\ddot{y} = -g \cdot \cos \varphi \quad (3.22)$$

και
$$\ddot{\theta} = 0 \quad (3.23)$$

Ακολουθούν οι εξισώσεις της διπλής φάσης εδάφους.

3.4.1.2 Διπλή Φάση Εδάφους

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x} = & -m \cdot g \cdot \sin \varphi - \left(k \cdot (l_0 - l_h) - b \cdot \dot{l}_h \right) \cdot \sin \gamma_h - \tau_{z,h} \cdot \cos \frac{\gamma_h}{l_h} - \\ & - \left(k \cdot (l_0 - l_f) - b \cdot \dot{l}_f \right) \cdot \sin \gamma_f - \tau_{z,f} \cdot \cos \frac{\gamma_f}{l_f} \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{y} = & -m \cdot g \cdot \cos \varphi + \left(k \cdot (l_0 - l_h) - b \cdot \dot{l}_h \right) \cdot \sin \gamma_h - \tau_{z,h} \cdot \cos \frac{\gamma_h}{l_h} + \\ & + \left(k \cdot (l_0 - l_f) - b \cdot \dot{l}_f \right) \cdot \sin \gamma_f - \tau_{z,f} \cdot \cos \frac{\gamma_f}{l_f} \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} J_z \cdot \ddot{\theta} = & -d \cdot \left(k \cdot (l_0 - l_h) - b \cdot \dot{l}_h \right) \cdot \cos(\gamma_h - \theta) + \frac{\tau_{z,h}}{l_h} \cdot (-l_h + d \cdot \sin(\gamma_h - \theta)) + \\ & + d \cdot \left(k \cdot (l_0 - l_f) - b \cdot \dot{l}_f \right) \cdot \cos(\gamma_f - \theta) + \frac{\tau_{z,f}}{l_f} \cdot (l_f - d \cdot \sin(\gamma_f - \theta)) \end{aligned} \quad (3.26)$$

όπου,
$$\gamma_h = \arctan 2(y - d \cdot \sin \theta, x_{t,h} + d \cdot \cos \theta - x) \quad (3.27)$$

$$\gamma_f = \arctan 2(y + d \cdot \sin \theta, x_{t,f} - d \cdot \cos \theta - x) \quad (3.28)$$

και
$$\varphi_h = \gamma_h - \theta \quad (3.29)$$

$$\varphi_f = \gamma_f - \theta \quad (3.30)$$

$$\mu\epsilon \quad \dot{\varphi}_h = -\cos^2(\varphi_h + \theta) \cdot \left[\frac{d \cdot \dot{\theta} \cdot \sin\theta + \dot{x}}{y - d \cdot \sin\theta} + \frac{(x_{t,h} - x + d \cdot \cos\theta) \cdot (\dot{y} - d \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta)}{(y - d \cdot \sin\theta)^2} \right] - \dot{\theta} \quad (3.31)$$

$$\dot{\varphi}_f = -\cos^2(\varphi_f + \theta) \cdot \left(\frac{-d \cdot \dot{\theta} \cdot \sin\theta + \dot{x}}{y + d \cdot \sin\theta} + \frac{(x_{t,f} - x - d \cdot \cos\theta) \cdot (\dot{y} + d \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta)}{(y + d \cdot \sin\theta)^2} \right) - \dot{\theta}. \quad (3.32)$$

$$\text{Επίσης,} \quad l_h = \sqrt{(x_{t,h} - x + d \cdot \cos\theta)^2 + (y - d \cdot \sin\theta)^2} \quad (3.33)$$

$$l_f = \sqrt{(x_{t,f} - x - d \cdot \cos\theta)^2 + (y + d \cdot \sin\theta)^2} \quad (3.34)$$

$$\text{και} \quad \dot{i}_h = \frac{-(x_{t,h} - x + d \cdot \cos\theta) \cdot (d \cdot \dot{\theta} \cdot \sin\theta + \dot{x}) + (d \cdot \sin\theta - y) \cdot (d \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta - \dot{y})}{\sqrt{(x_{t,h} - x + d \cdot \cos\theta)^2 + (y - d \cdot \sin\theta)^2}} \quad (3.35)$$

$$\dot{i}_f = \frac{(x_{t,f} - x - d \cdot \cos\theta) \cdot (d \cdot \dot{\theta} \cdot \sin\theta - \dot{x}) + (d \cdot \sin\theta + y) \cdot (d \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta + \dot{y})}{\sqrt{(x_{t,f} - x - d \cdot \cos\theta)^2 + (y + d \cdot \sin\theta)^2}}. \quad (3.36)$$

Κατά την εκκίνηση της διπλής φάσης εδάφους έχουμε,

$$x_{t,h} = x - d \cdot \cos\theta + l_h \cdot \sin(\gamma_h) \quad (3.37)$$

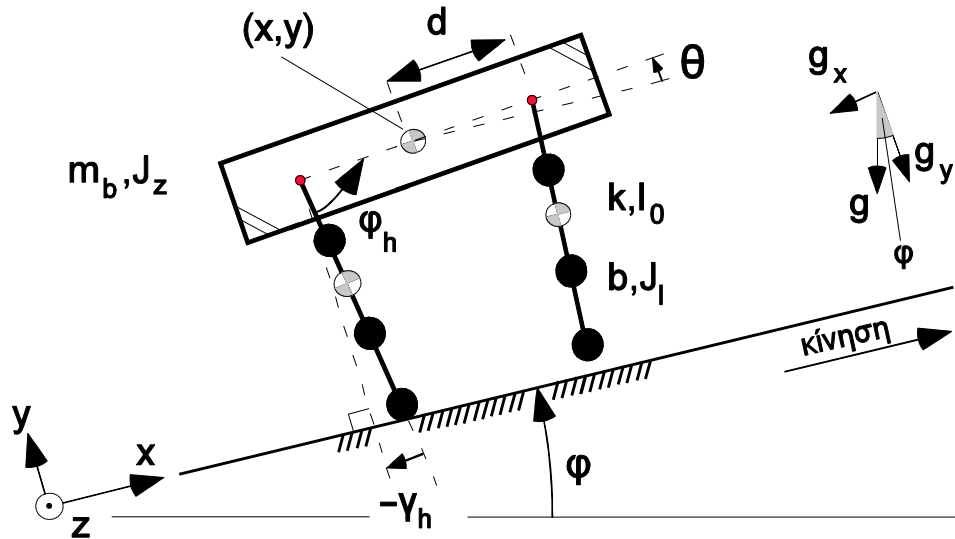
$$\text{και} \quad x_{t,f} = x + d \cdot \cos\theta + l_f \cdot \sin(\gamma_f) \quad (3.38)$$

3.4.2 Μοντέλο του Ρομπότ με Μάζα στα Πόδια¹⁸ (Μοντέλο Β)

Όπως στην περιγραφή του μοντέλου του ρομπότ χωρίς μάζα στα πόδια, έτσι και εδώ, στην

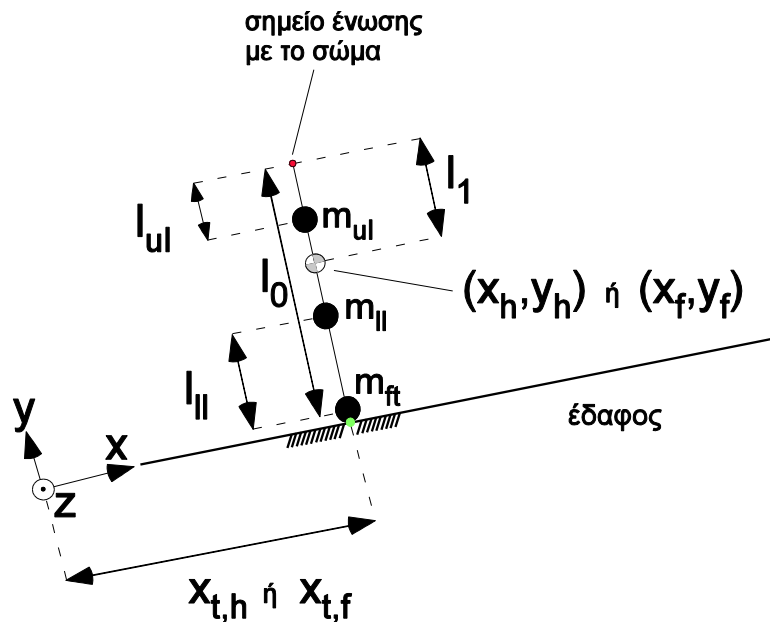
¹⁸ Η μεταφορά αυτού του μοντέλου, και των συμβάντων μετάβασής του, σε κάποια από τα περιβάλλοντα προσομοιώσεων που χρησιμοποιήθηκαν, αποδίδεται στον Ι. Κοντολάτη. Στο συγκεκριμένο περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε η υλοποίηση της συνιστώσας ελέγχου που δημιουργήθηκε από τον Ν. – Δ. Χερουβείμ.

αρχή παρουσιάζεται το Σχ. 3-4, του ρομπότ με μάζα στα πόδια, επί του οποίου σημειώνονται τα μεγέθη που απαντώνται, στη συνέχεια, στις διαφορικές εξισώσεις του αντίστοιχου δυναμικού μοντέλου. Μετά, ακολουθεί η παράθεση του Σχ. 3-5 που αφορά στη γεωμετρία των ποδιών και έπειτα παρατίθενται οι εξισώσεις του μοντέλου.



Σχήμα 3-4. Το τετράποδο ρομπότ, με πόδια με μάζα.

Το Σχ. 3-5 παρουσιάζει τη δομή των ποδιών (εμπρός – οπίσθια) του ρομπότ.



Σχήμα 3-5. Η γενική μορφή του ποδιού του ρομπότ με σημειακές μάζες επί αυτό.

Ακολουθεί ο Πιν. 3-3, στον οποίο ορίζονται τα διάφορα μεγέθη που ανακύπτουν στο Σχ. 3-4.

Πίνακας 3-3. Περιγραφικά μεγέθη του ρομπότ με μάζες στα πόδια.

Σύμβολο	Μέγεθος
x	τετμημένη κέντρου μάζας (ΚΜ) σώματος
x_h	τετμημένη ΚΜ οπίσθιου ποδιού
x_f	τετμημένη ΚΜ εμπρόσθιου ποδιού
y	τεταγμένη ΚΜ σώματος
y_h	τεταγμένη ΚΜ οπίσθιου ποδιού
y_f	τεταγμένη ΚΜ εμπρόσθιου ποδιού
z	τιμή στον z άξονα του ΚΜ σώματος
m_b	μάζα σώματος
J_z	ροπή αδράνειας σώματος ως προς τον z άξονα που διέρχεται από το ΚΜ του ρομπότ
d	μεσοαπόσταση μηρών – αφεταιριών στροφικών αρθρώσεων
l_0	ασυμπίεστο (ελεύθερο) μήκος ποδιών
k	υποχωρητικότητα ποδιών
b	συντελεστής μηχανικών απωλειών ποδιών
J_i	ροπή αδράνειας του εκάστοτε ποδιού ως προς τον άξονα z που διέρχεται από το ΚΜ του ρομπότ
θ	γωνία pitch του σώματος
φ	κλίση εδάφους
$\Phi_{h/f}$	σχετική γωνία οπίσθιου/ εμπρόσθιου ποδιού
$Y_{h/f}$	απόλυτη γωνία οπίσθιου/ εμπρόσθιου ποδιού
g	βαρυτική έλξη
g_x	x – συνιστώσα της βαρυτικής έλξης
g_y	y – συνιστώσα της βαρυτικής έλξης

Αρχικά, παραθέτουμε τις εξισώσεις που αφορούν στη φάση πτήσης.

3.4.2.1 Φάση Πτήσης

$$\ddot{x} = -g \cdot \sin \varphi \quad (3.39)$$

και
$$\ddot{y} = -g \cdot \cos \varphi \quad (3.40)$$

Από τη διατήρηση της στροφορμής, προκύπτει ο εξής περιορισμός, για τη, σχετική με το σώμα, κίνηση των ποδιών,

$$H_0 = D_1 \cdot \dot{\gamma}_h + D_2 \cdot \dot{\gamma}_f + D_3 \cdot \dot{\theta} = \text{σταθ.} \quad (3.41)$$

όπου,

$$D_1 = \frac{\left(J_1 \cdot m^2 + l_1^2 \cdot m_1 \cdot m \cdot (m - m_1) - l_1^2 \cdot m_1^2 \cdot m \cdot \cos(\gamma_h - \gamma_f) - \right)}{m^2} \quad (3.42)$$

$$D_2 = D_1 + \left(\frac{l_1^2 \cdot m_1^2 \cdot m \cdot \cos(\gamma_h - \gamma_f) + d \cdot l_1 \cdot m^2 \cdot m_1 \cdot \sin(\gamma_h - \theta)}{m^2} \right) \quad (3.43)$$

και,
$$D_3 = J_z + 2 \cdot d^2 \cdot m_1 - d \cdot l_1 \cdot m_1 \cdot \sin(\gamma_h - \theta) + d \cdot l_1 \cdot m_1 \cdot \sin(\gamma_f - \theta) \quad (3.44)$$

με
$$m_1 = m_{ul} + m_{ll} + m_{ft} \quad (3.45)$$

$$m = m_b + 2 \cdot m_1 \quad (3.46)$$

$$l_1 = \frac{m_{ul} \cdot l_{ul} + m_{ll} \cdot (l_0 - l_{ll}) + m_{ft} \cdot l_0}{m_1} \quad (3.47)$$

και
$$J_1 = m_{ul} \cdot (l_1 - l_{ul})^2 + m_{ll} \cdot (l_0 - l_1 - l_{ll})^2 + m_{ft} \cdot (l_0 - l_1)^2 \quad (3.48)$$

3.4.2.2 Διπλή Φάση Εδάφους

Όσον αφορά στο σύνολο των εξισώσεων που αφορούν στη διπλή φάση εδάφους του ρομπότ, για το συγκεκριμένο μοντέλο, δηλ. με μάζες στα πόδια, αυτό, ταυτίζεται με το σύνολο των

εξισώσεων που παρατέθηκε στην Παρ. 3.4.1 και που αφορούσε στη διπλή φάση εδάφους του μοντέλου χωρίς μάζες στα πόδια. Ο λόγος αυτής της ταύτισης είναι η «μικρή» επίδραση στη δυναμική κίνηση του ρομπότ της μάζας του εκάστοτε ποδιού κατά τις φάσεις όπου αυτό πατά στο έδαφος (βλ. [25]). Αυτό, εξηγείται με βάση ότι η τιμή της συνολικής μάζας του εκάστοτε ποδιού, υπολείπεται – τουλάχιστον κατά μία τάξη μεγέθους – της τιμής της μάζας του σώματος του ρομπότ.

Όμως, η **υλοποίηση** του συγκεκριμένου μοντέλου (δηλ., το αντίστοιχο περιβάλλον προσομοιώσεων) λαμβάνει υπόψη τις μάζες των ποδιών κατά την οποιαδήποτε φάση εδάφους (εμπρόςθια, οπίσθια, διπλή). Επειδή η επίδραση των μαζών – όπως προειπώθηκε – δεν είναι σημαντική κατά τις φάσεις εδάφους, οι μάζες των ποδιών δεν περιλαμβάνονται στα αντίστοιχα σύνολα εξισώσεων του μοντέλου που σκιαγραφήθηκε στις προηγούμενες γραμμές.

Με τα παραπάνω να ισχύουν, παρατίθεται – για λόγους πληρότητας – η Λαγκραντζιανή που αφορά στη διπλή φάση εδάφους του μοντέλου του ρομπότ, που περιλαμβάνει τις μάζες των ποδιών (Μοντέλο Β), η οποία, όμως, χαρακτηρίζεται από εμφάνιση των μαζών των ποδιών στη μαθηματική της έκφραση.

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{1}{2} \cdot m_b \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} \cdot J_z \cdot \dot{\theta}^2 - m_b \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot x - m_b \cdot g \cdot \cos \varphi \cdot y + \\
 & + \frac{1}{2} \cdot m_l \cdot (\dot{x}_h^2 + \dot{y}_h^2) + \frac{1}{2} \cdot J_l \cdot \dot{\gamma}_h^2 - \frac{1}{2} \cdot k \cdot (l_0 - l_h)^2 - m_l \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot x_h - \\
 & - m_l \cdot g \cdot \cos \varphi \cdot y_h + \frac{1}{2} \cdot m_l \cdot (\dot{x}_f^2 + \dot{y}_f^2) + \frac{1}{2} \cdot J_l \cdot \dot{\gamma}_f^2 - \frac{1}{2} \cdot k \cdot (l_0 - l_f)^2 - \\
 & - m_l \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot x_f - m_l \cdot g \cdot \cos \varphi \cdot y_f
 \end{aligned} \tag{3.49}$$

$$\text{με} \quad x_h = x - d \cdot \cos \theta + l_l \cdot \sin \gamma_h \tag{3.50}$$

$$y_h = y - d \cdot \sin \theta - l_l \cdot \cos \gamma_h \tag{3.51}$$

$$x_f = x + d \cdot \cos \theta + l_l \cdot \sin \gamma_f \tag{3.52}$$

$$\text{και} \quad y_f = y + d \cdot \sin \theta - l_l \cdot \cos \gamma_f. \tag{3.53}$$

3.5 Συμβάντα Μετάβασης Φάσεων

Για την μετάβαση από μία φάση σε κάποια άλλη, πρέπει να λάβει χώρα κάποιο γεγονός προσγείωσης ή απογείωσης που αφορά στα εμπρόσθια ή τα οπίσθια πόδια.

Σε ένα περιβάλλον προσομοιώσεων, όπως κάποιο από αυτά που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή, για να δύναται ο επιλύτης να επιλέγει το κατάλληλο κάθε φορά σύνολο διαφορικών εξισώσεων προς ολοκλήρωση, είναι αναγκαίο να ελέγχει ως προς την αλήθειά τους κάποιες συνθήκες ανά βήμα επίλυσης¹⁹, τις *συνθήκες μετάβασης*, ώστε να αναγνωρίζει τις μεταβολές στο μέγεθος «τρέχουσα δυναμική φάση». Έτσι, είναι δυνατή η επιλογή του «σωστού» συνόλου προς ολοκλήρωση. Με τον Πιν. 3-4, που παρατίθεται παρακάτω, προσφέρονται στον αναγνώστη οι συνθήκες μετάβασης για κάθε μία από τις τέσσερις φάσεις του ρομπότ. Αυτές, αποτελούν τις συνθήκες των οποίων την αλήθεια ελέγχει ο επιλύτης διαφορικών εξισώσεων σε κάθε βήμα υπολογισμού.

Πίνακας 3-4. Αντιστοίχιση συμβάντων ποδιών με τις συνθήκες τους.

Συμβάν Ποδιών	Συνθήκη
Προσγείωση Οπίσθιων Ποδιών	$y - d \cdot \sin(\theta) \leq l_0 \cdot \cos(\gamma_h)$
Απογείωση Οπίσθιων Ποδιών	$l_h = l_0$
Προσγείωση Εμπρόσθιων Ποδιών	$y + d \cdot \sin(\theta) \leq l_0 \cdot \cos(\gamma_f)$
Απογείωση Εμπρόσθιων Ποδιών	$l_f = l_0$

3.6 Έλεγχος του Τετράποδου Ρομπότ

Η φιλοσοφία ελέγχου του τετράποδου ρομπότ, που υλοποιήθηκε στα περιβάλλοντα

¹⁹ Κατά την ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων, η διαδικασία που εκτυλίσσεται αφορά στην *παραγωγή χρονικών στιγμών* και τη συνακόλουθη επέκταση των διανυσμάτων που διατηρούν τις τιμές των μεγεθών της μηχανικής περιγραφής του ρομπότ, κατά μία τιμή, ώστε, (τα μεγέθη αυτά) να αντιστοιχιστούν με τη συγκεκριμένη «νέα» χρονική στιγμή. Η επέκταση των διανυσμάτων των μεταβλητών περιγραφής λαμβάνει χώρα με βάση τις σχέσεις μεταξύ των διάφορων μεγεθών οι οποίες αποτυπώνονται στις διαφορικές εξισώσεις που συνιστούν το εκάστοτε εξεταζόμενο δυναμικό μοντέλο του ρομπότ.

προσομοιώσεων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία, οφείλεται στην εργασία του Ν. – Δ. Χερουβείμ. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο [25].

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αξίζει να σημειωθούν κάποια βασικά περιγραφικά στοιχεία για τον έλεγχο του ρομπότ, τουλάχιστον σε επίπεδο προσομοιώσεων:

1. Τα ελεγχόμενα μεγέθη είναι η πρόσθια ταχύτητα και το ύψος αναπήδησης του κέντρου μάζας (ΚΜ) του ρομπότ.
2. Ο δυναμικός έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω της λειτουργίας των κινητήρων των αρθρώσεων. Συγκεκριμένα, μέσω της ρύθμισης των γωνιών των ποδιών κατά την φάση πτήσης και μέσω της ρύθμισης της τιμής της ροπής που ασκείται από τους κινητήρες στο σώμα κατά την εκάστοτε φάση εδάφους (οπίσθια – εμπρόσθια – διπλή).

3.7 Το περιβάλλον προσομοιώσεων

Ένα «περιβάλλον προσομοιώσεων» περιλαμβάνει υλοποιήσεις της δυναμικής του ρομπότ, του δυναμικού ελέγχου του καθώς και των συμβάντων μετάβασής του από κάθε φάση προς κάθε άλλη. Το κύριο χαρακτηριστικό ενός τέτοιου περιβάλλοντος είναι η σειριακή ολοκλήρωση²⁰ των διαφορικών εξισώσεων που ανακύπτουν από τη δυναμική μοντελοποίηση του ρομπότ με βάση τις αρχικές συνθήκες της κίνησης. Οι αρχικές συνθήκες αφορούν στον ορισμό του αρχικού ύψους, της αρχικής πρόσθιας ταχύτητας και της αρχικής γωνιακής ταχύτητας.

Είναι το «εργαλείο» μέσω του οποίου εκτελούνται «εικονικά πειράματα» του ρομπότ σε ψηφιακό περιβάλλον.

Για τη διεκπεραίωση τέτοιων πειραμάτων απαιτείται ο ορισμός – από το χρήστη – των τιμών των αριθμητικών μεγεθών που αφορούν στην μηχανική περιγραφή του ρομπότ ή του περιβάλλοντός του ή στη ρύθμιση της συνιστώσας ελέγχου του. Σημειώνεται εδώ πως δεν οδηγεί κάθε συνδυασμός τιμών των προαναφερθέντων παραμέτρων σε «επιτυχούσα» προσομοίωση, δηλ., είναι δυνατό να εμφανιστεί κάποιο «σφάλμα» και η διαδικασία να

²⁰ Σειριακή (ή «σειραϊκή», σχετική δηλαδή, με τη «σειρά») ολοκλήρωση που είναι ανάλογη προς και εξαρτάται από, τη διαδοχή των δυναμικών φάσεων.

τερματιστεί χωρίς να αποδώσει κάποια μορφή περαιτέρω αξιοποιήσιμη πληροφορία²¹. Αυτό συμβαίνει λόγω της ευαισθησίας των υπολογιστικών διαδικασιών που περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, ολοκλήρωση διαφορικών εξισώσεων με αριθμητικές μεθόδους.

Ένα εικονικό πείραμα, τερματίζεται, είτε μετά από την ολοκλήρωση ενός συγκεκριμένου πλήθους διασκελισμών – περιόδων²², είτε μετά από τη διάνυση μίας συγκεκριμένης απόστασης είτε μετά από την παρέλευση ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, από την εκκίνηση του πειράματος. Στην εργασία, οι τιμές που υιοθετήθηκαν είναι, αντίστοιχα, 80 (-), 1 000 000 (m) και 1 000 000 (sec). Στην ουσία, η χρησιμοποιούμενη συνθήκη τερματισμού είναι αυτή που αφορά στο συνολικό πλήθος διασκελισμών της προσομοίωσης.

Οι παράμετροι της αριθμητικής ολοκλήρωσης των διαφορικών εξισώσεων, με χρήση μεθόδου μεταβλητού βήματος (variable step method), παρουσιάζονται στον Πιν. 3-5.

Πίνακας 3-5. Τιμές μεγεθών, τα οποία, χαρακτηρίζουν την αριθμητική ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων.

Παράμετρος	Τιμή
Απόλυτη ανοχή (absolute tolerance)	10^{-4} (μονάδα μέτρησης του εκάστοτε υπολογιζόμενου μεγέθους)
Σχετική ανοχή (relative tolerance)	10^{-6} (-)
Μέγιστο βήμα (maximum step)	10^{-4} (s)

²¹ Εκτός, ίσως, από ότι ο συγκεκριμένος συνδυασμός τιμών δεν οδηγεί σε προσομοιωμένη κίνηση ☺.

²² Για τη μόνιμη και τη μεταβατική κατάσταση.

4 Υπολογισμός Διαγραμμάτων Hildebrand

Σε αυτό το κεφάλαιο, αρχικά, παρουσιάζονται τα μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των διαγραμμάτων Hildebrand, τα οποία (μεγέθη), απορρέουν από τη διαδικασία ολοκλήρωσης των διαφορικών εξισώσεων που χαρακτηρίζουν το ρομπότ (δηλ., αφορούν σε κάποια προσομοιωμένη κίνηση).

Στη συνέχεια, τίγεται το ζήτημα του υπολογισμού της χρονικής στιγμής που αντιστοιχεί στη μετάβαση από τη μεταβατική στη μόνιμη κατάσταση της κίνησης, καθώς και της συλλογής των χρονικών στιγμών προσγείωσης και απογείωσης των εμπρόσθιων και οπίσθιων ποδιών του ρομπότ.

Ακολούθως, αποδίδεται ο ακριβής ορισμός των μεγεθών που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία των διαγραμμάτων Hildebrand χρησιμοποιώντας τις χρονικές στιγμές των συμβάντων των ποδιών (απογειώσεις – προσγειώσεις) για τη μόνιμη κατάσταση της κίνησης.

Τέλος, αναφέρονται τα δυνατά *αφαιρετικά μοτίβα*²³ που δύνανται να περιγράψουν την

²³ Εδώ, η έννοια «μοτίβο» χρησιμοποιείται με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με πριν (όπου αναφερόταν στον διασκελισμό που συνθέτει μία περιοδική κίνηση), και, αναλυτικότερα, αφορά στην αλληλουχία των διασκελισμών που ανακύπτουν στη μόνιμη κατάσταση με βάση την κατηγοριοποίησή τους σε διασκελισμούς τύπου F, για αυτούς όπου τα εμπρόσθια πόδια προσκρούουν στο έδαφος νωρίτερα από τα οπίσθια, μετά από μία «μεγάλη φάση πτήσης» και, σε διασκελισμούς τύπου H, για αυτούς που ορίζονται, αντίστοιχα, με αναφορά τα οπίσθια πόδια. Για παράδειγμα, ένα αφαιρετικό – όπως αυτά

εκάστοτε μόνιμη κίνηση του ρομπότ, περιγράφεται μία διαδικασία εύρεσής τους και εποπτεύονται κάποιες πτυχές τους με τη συνδρομή των χαρτών Poincaré (Poincaré Maps).

4.1 Στοιχεία Περιβάλλοντος Προσομοιώσεων προς Αξιοποίηση

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου υπολογισμού του διαγράμματος Hildebrand, του σχετικού με μία προσομοίωση, απαιτείται η διάθεση κάποιων πληροφοριών που αφορούν στην κίνηση του ρομπότ και που παράγονται κατά τη διάρκειά της.

Αυτές οι πληροφορίες, αφορούν στις τιμές των χρονικών στιγμών που παράγονται κατά την προσομοίωση, τις τιμές της τεταγμένης του κέντρου μάζας (ΚΜ) του ρομπότ και τις τιμές του δείκτη της *εκάστοτε τρέχουσας* δυναμικής φάσης του ρομπότ.

Τα μεγέθη αυτά, προσφέρονται από το MATLAB με τη μορφή πινάκων. Αναλυτικότερα, αυτοί οι τρεις πίνακες είναι ισοπληθικοί μεταξύ τους, και, τα στοιχεία τους αντιστοιχίζονται ένα προς ένα²⁴, δηλ., σε μία δεδομένη χρονική στιγμή της προσομοιωμένης κίνησης (τιμές σε sec) αντιστοιχεί μία τιμή της τεταγμένης του κέντρου μάζας του ρομπότ (τιμές σε m) και ένας ακέραιος στο σύνολο $\{1, 2, 3, 4\}$ που αφορά στην τιμή του δείκτη της τρέχουσας δυναμικής φάσης (βαθμωτό, μονόμετρο, μέγεθος). Αυτοί οι δείκτες αντιστοιχίζονται με τις δυναμικές φάσεις όπως φαίνεται στον Πιν. 4-1.

4.2 Υπολογισμός Διαγραμμάτων Hildebrand

Στις επόμενες παραγράφους, αναπτύσσεται και αναλύεται η μέθοδος υπολογισμού των διαγραμμάτων Hildebrand, στο σύνολό της. Αποτελείται από τρία κύρια μέρη στα οποία περιλαμβάνονται ο υπολογισμός της χρονικής στιγμής μετάβασης, η συλλογή των χρονικών

αναφέρονται εδώ – μοτίβο, είναι το HFHFF, το οποίο, αντιπροσωπεύει μία μόνιμη κίνηση κατά την οποία επαναλαμβάνεται η συγκεκριμένη πεντάδα διασκελισμών είδους bound.

²⁴ Η σχέση αντιστοιχίσης, είναι *συμμετρική*, δηλ., το α αντιστοιχίζεται με το β αν και μόνο αν το β αντιστοιχίζεται με το α, είναι *πλήρης*, δηλ., δεν υπάρχει κάποιο α ή β ή γ που δεν αντιστοιχίζεται με κάθε ένα από τα υπόλοιπα, και *μεταβατική*, δηλ., αν το α αντιστοιχίζεται με το β και το β αντιστοιχίζεται με το γ, τότε, το α αντιστοιχίζεται με το γ. Τα α, β και γ συμβολίζουν το εκάστοτε στοιχείο που ανήκει σε κάποιον από τους τρεις, διαφορετικούς μεταξύ τους, πίνακες προς αξιοποίηση. Το α αφορά στον «πρώτο», το β στον «δεύτερο» κ.ο.κ.

Πίνακας 4-1. Αντιστοίχιση δυναμικών φάσεων με τους δείκτες τους.

Δυναμική Φάση	Δείκτης
Φάση πτήσης	1
Οπίσθια φάση εδάφους	2
Διπλή φάση εδάφους	3
Εμπρόσθια φάση εδάφους	4

στιγμών απογείωσης και προσγείωσης των ποδιών και, τέλος, μία εκτενής «συνταγή υπολογισμού» των αριθμητικών συστατικών μεγεθών των διαγραμμάτων Hildebrand.

4.2.1 Υπολογισμός Χρονικής Στιγμής Μετάβασης

Η χρονική στιγμή μετάβασης – όπως ορίζεται εδώ – δηλώνει τη «μετάβαση» από τη μεταβατική κατάσταση στη μόνιμη κατάσταση. Εναλλακτικά, από την απεριοδική στην περιοδική κίνηση του ρομπότ. Ο υπολογισμός αυτής της στιγμής διενεργείται ώστε να δύναται να απομονωθεί το περιοδικό κομμάτι της κίνησης με απώτερο στόχο να εποπτεύσουμε τα χαρακτηριστικά της κίνησής του.

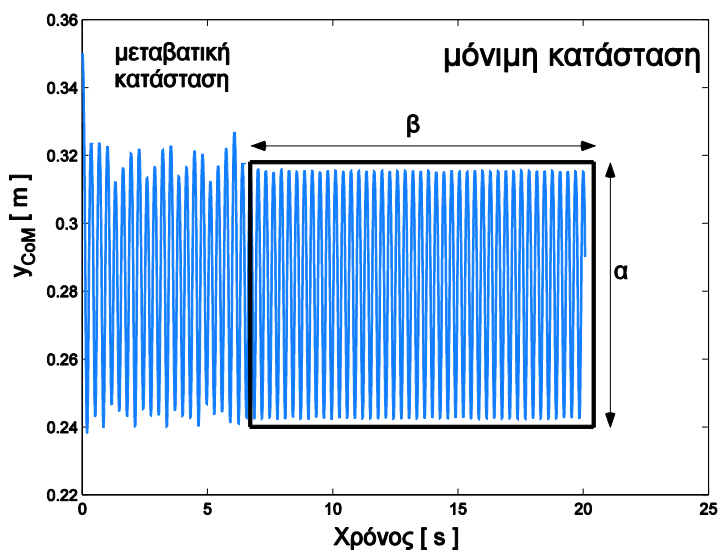
Για να υπολογιστεί, όμως, μηχανιστικά (αυτοματοποιημένα) αυτή η στιγμή πρέπει, πρώτα, να ληφθούν υπόψη συγκεκριμένοι και σαφείς ορισμοί της χρονικής στιγμής μετάβασης και της περιοδικής κίνησης του ρομπότ.

4.2.1.1 Ορισμός Περιοδικής Κίνησης του Ρομπότ

Στην παρούσα εργασία, ως περιοδική κίνηση (ή «μόνιμη κατάσταση») του ρομπότ, λαμβάνεται το κομμάτι εκείνο της κίνησης στο οποίο κάθε τοπικό μέγιστο ή ελάχιστο της τροχιάς της τεταγμένης του κέντρου μάζας (ΚΜ) του ρομπότ, ανήκει σε μία επίπεδη ορθογώνια «λωρίδα»²⁵ (επιφάνεια επί κατακόρυφου επιπέδου το οποίο έχει ως x – άξονα το χρόνο και ως y – άξονα την τεταγμένη του κέντρου μάζας) η οποία έχει μήκος κατακόρυφης

²⁵ Εάν κάθε τοπικό μέγιστο ή τοπικό ελάχιστο βρίσκεται μέσα σε μία συγκεκριμένη επίπεδη λωρίδα από «ένα σημείο και μετά», τότε, δύναται με ασφάλεια να υποθεθεί, πως, από εκεί και πέρα, κάθε σημείο της τροχιάς της y – τεταγμένης του ΚΜ του ρομπότ ανήκει μέσα σε αυτή τη διδιάστατη ορθογώνια λωρίδα.

πλευράς ίσο με την τιμή της μεταβλητής «α» και μήκος οριζόντιας πλευράς ίσο με την τιμή της μεταβλητής «β». Στο Σχ. 4-1, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα (τεταγμένη ΚΜ ως προς το χρόνο) όπου η κίνηση του ρομπότ, που απεικονίζεται, έχει μόνιμη κατάσταση (διδιάστατη λωρίδα $\alpha \times \beta$). Επί αυτού του σχήματος σημειώνονται τα μεγέθη α και β .



Σχήμα 4-1. Κίνηση του ρομπότ, με μόνιμη κατάσταση.

Οι τιμές των μεταβλητών α και β επηρεάζονται *εμμέσως* από το χρήστη. Αρχικά, επηρεάζονται από το πόσο «αυστηρό ή μη» επιθυμεί ο χρήστης να είναι το κριτήριο διαχωρισμού της μόνιμης από τη μεταβατική κατάσταση. Η έννοια του κριτηρίου διαχωρισμού, αφορά στη μέγιστη επιτρεπόμενη κατακόρυφη απόσταση που δύνανται να απέχουν τα τοπικά μέγιστα ή ελάχιστα από κάποια *συγκεκριμένα* τοπικά ακρότατα, μέγιστο και ελάχιστο, αντίστοιχα, που σηματοδοτούν, ως ζεύγος, την έναρξη της μόνιμης κατάστασης. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.005 m ή 5.000 mm για το κριτήριο αυτό.

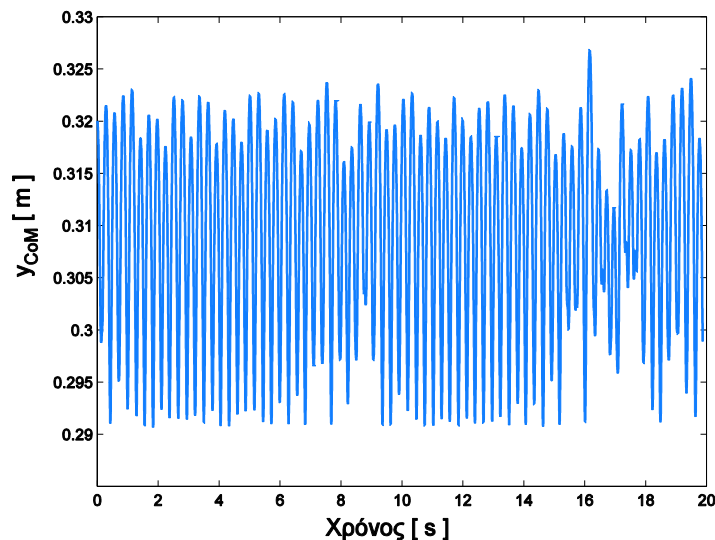
Οι μεταβλητές α και β , επηρεάζονται, επίσης, από την επιθυμητή ελάχιστη χρονική διάρκεια της μόνιμης κατάστασης. Η ρύθμιση της ελάχιστης τιμής της χρονικής διάρκειας της μόνιμης κατάστασης, γίνεται μέσω του ορισμού ενός ελάχιστου πλήθους ολόκληρων περιόδων κίνησης (δηλαδή διασκελισμών) που συνιστούν τη μόνιμη κατάσταση. Στην εργασία, χρησιμοποιήθηκε το 30 ως το ελάχιστο πλήθος ολόκληρων περιόδων της μόνιμης κίνησης.

Οι τιμές των μεγεθών που εισάγει ο χρήστης, και που παρουσιάστηκαν ανωτέρω, επιλέχθηκαν ως έχουν με βάση την προσέγγιση δοκιμής – σφάλματος, που χρησιμοποιήθηκε.

Για την επιλογή τους, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην περιοδικότητα, δηλ. την «ποιότητα», της υπολογιζόμενης μόνιμης κατάστασης, γι' αυτό, υιοθετήθηκε μία αυστηρή τιμή του κριτηρίου διαχωρισμού (0.005 m). Όσον αφορά στην τιμή αυτή σημειώνεται εδώ πως η αυστηρότητά της, ίσως, χαρακτηρίζει «αδίκως» κάποιες κινήσεις ως απεριοδικές, όμως, για τον ίδιο λόγο (δηλ., την αυστηρότητα), εξασφαλίζει ότι οι κινήσεις που τελικά θα χαρακτηριστούν περιοδικές, είναι, πολύ πιθανόν, τέτοιες. Το εύρος του κριτηρίου διαχωρισμού, για το οποίο, η ποιότητα της περιοδικότητας της κίνησης που προσομοιώνεται είναι ικανοποιητική, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και την ανάλυσή τους, αντιστοιχεί στο σύνολο [0.0035, 0.0140] (m).

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε, όπως προγράφηκε, στη χρονική διάρκεια της μόνιμης κατάστασης, για το λόγο αυτό, ως ελάχιστη τιμή για την διάρκεια της μόνιμης κατάστασης, ορίσθηκε το χρονικό διάστημα που απαιτούν για να ολοκληρωθούν 30 διαδοχικοί διασκελισμοί του ρομπότ καθώς, κρίθηκε επαρκές για την ικανοποιητική ανάλυση των χαρακτηριστικών της μόνιμης κατάστασης. Πρακτικά, κάθε χρονικό ελάχιστο της διάρκειας της μόνιμης κατάστασης που είναι μεγαλύτερο από το διάστημα 20 περιόδων λειτουργίας του ρομπότ, αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Σημειώνεται, πως κάποιες από τις δυνατές προσομοιωμένες κινήσεις δεν έχουν μόνιμη κατάσταση γιατί η φύση τους είναι απεριοδική σε υψηλό βαθμό. Παρατίθεται το Σχ. 4-2 που αντιστοιχεί σε κίνηση χωρίς μόνιμη κατάσταση.

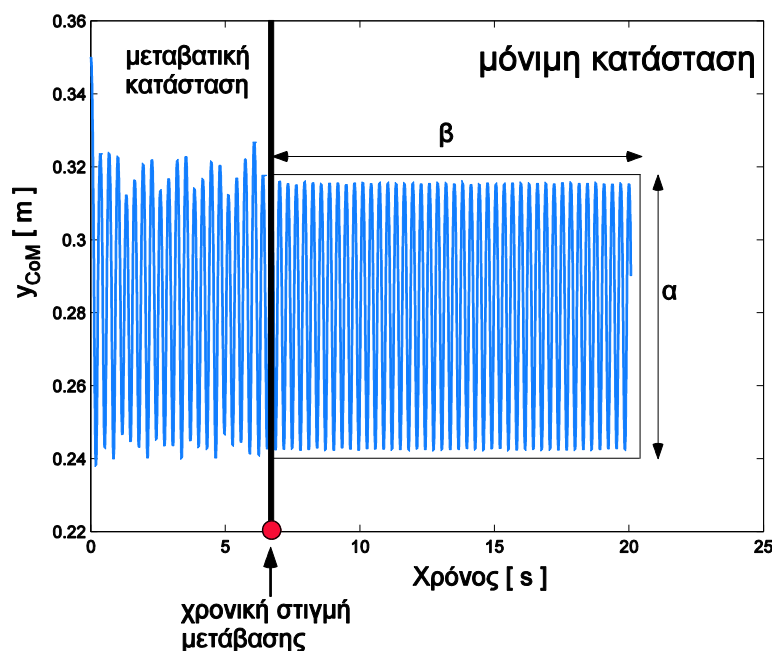


Σχήμα 4-2. Κίνηση του ρομπότ, χωρίς μόνιμη κατάσταση.

Ακολουθεί ο σαφής ορισμός της χρονικής στιγμής μετάβασης.

4.2.1.2 Ορισμός Χρονικής Στιγμής Μετάβασης

Ως χρονική στιγμή μετάβασης, ορίζεται η χρονική στιγμή (τιμή του οριζόντιου άξονα) που αντιστοιχεί στην κατακόρυφη ευθεία η οποία «φέρει» το ευθύγραμμο τμήμα με το οποίο οριοθετείται από τα αριστερά το περιοδικό κομμάτι της κίνησης του ρομπότ (διδιάστατη περιοχή σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου). Στο Σχ. 4-3 σημειώνεται η στιγμή μετάβασης του Σχ. 4-1.



Σχήμα 4-3. Κίνηση του ρομπότ, με μόνιμη κατάσταση.

Στην επόμενη παράγραφο καλύπτεται το κομμάτι του υπολογισμού των θέσεων των ακροτάτων της τεταγμένης του κέντρου μάζας του ρομπότ (εξέλιξη ως προς το χρόνο), μια και, καθίσταται αναγκαία η εύρεσή τους – όπως υποδεικνύεται από αυτά που γράφηκαν στις Παρ. 4.2.1 και 4.2.1.1.

4.2.1.3 Υπολογισμός Θέσεων Ακροτάτων της Τεταγμένης του Κέντρου Μάζας (ΚΜ) του Ρομπότ

Για τον υπολογισμό των θέσεων αυτών (δηλ., των αντίστοιχων δεικτών), θα χρησιμοποιηθούν ο πίνακας που περιλαμβάνει τις τιμές των τεταγμένων του κέντρου μάζας (Center of Mass, CoM) του ρομπότ καθώς και ο πίνακας των, αντίστοιχών τους, χρονικών στιγμών.

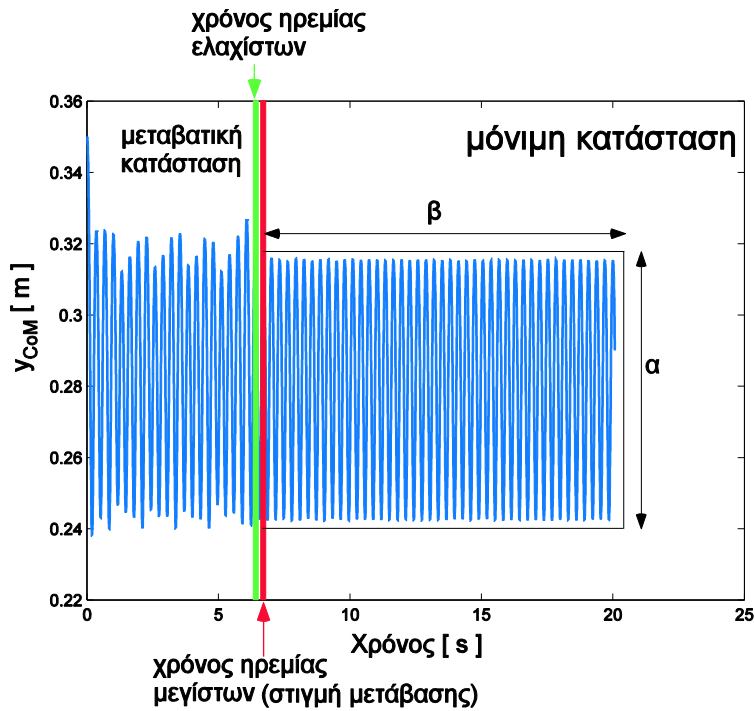
Η διαδικασία έχει ως εξής: μέσω της παρατήρησης των τιμών του μονοδιάστατου πίνακα που περιέχει τις τιμές των τεταγμένων, εντοπίζονται οι μονότονοι (αύξοντες/ φθίνοντες) υποπίνακες, που, παρατιθέμενοι σειριακά, τον συνθέτουν. Αυτοί, λόγω της φύσης της κίνησης του ρομπότ (μετακίνηση με άλματα, περίοδοι ανόδου και περίοδοι καθόδου) εμφανίζονται εναλλάξ, και, ο πρώτος εξ' αυτών των υποπινάκων είναι φθίνουσας μονοτονίας, επειδή το ρομπότ για να εκκινήσει την κίνησή του, αφήνεται από κάποιο, ορισμένο από το χρήστη, ύψος πάνω από το έδαφος. Οι τιμές των τεταγμένων που βρίσκονται ανάμεσα σε αυτούς τους υποπίνακες, που διατηρούν τη μονοτονικότητά τους, αποτελούν τα τοπικά μέγιστα και τοπικά ελάχιστα τα οποία είναι απαραίτητα (οι δείκτες αυτών) για τον υπολογισμό των διαγραμμάτων Hildebrand.

Αν η μετάβαση λαμβάνει χώρα από φθίνοντα σε αύξοντα υποπίνακα, τότε, ενημερώνεται με τον δείκτη της τελευταίας τιμής του φθίνοντα υποπίνακα ο πίνακας στον οποίο αποθηκεύουμε τους δείκτες των τοπικών ελαχίστων. Από την άλλη μεριά, αν η μετάβαση εκδηλώνεται από αύξοντα σε φθίνοντα υποπίνακα, τότε, ενημερώνεται με τον δείκτη της τελευταίας τιμής του αύξοντα υποπίνακα ο πίνακας στον οποίο αποθηκεύονται οι δείκτες των τοπικών μεγίστων.

4.2.1.4 Αλγόριθμος Υπολογισμού Χρονικής Στιγμής Μετάβασης

Στις παρακάτω γραμμές αναπτύσσεται ένας χαμηλού – επιπέδου αλγόριθμος που υπολογίζει τη χρονική στιγμή μετάβασης.

Για τον υπολογισμό αυτής της χρονικής στιγμής, αρχικά υπολογίζουμε τη «χρονική στιγμή ηρεμίας» για τα τοπικά μέγιστα και τα τοπικά ελάχιστα της τεταγμένης του KM. Με τον όρο «χρονική στιγμή ηρεμίας», π.χ. για τα τοπικά μέγιστα, εννοούμε τη χρονική στιγμή, αντίστοιχη ενός τοπικού μεγίστου, όπου κάθε τοπικό μέγιστο από αυτά που το ακολουθούν διαφέρει από αυτό, λιγότερο από το ήμισυ της τιμής του κριτηρίου διαχωρισμού (δηλ. του κριτηρίου «σύγκλισης») που έχει εισάγει ο χρήστης. Στη συνέχεια, επιστρέφουμε ως χρονική στιγμή μετάβασης τη μεγαλύτερη εκ των δύο αυτών «χρονικών στιγμών ηρεμίας» ώστε να δηλωθεί η περιοχή στην οποία έχουν ηρεμήσει η τεταγμένη των τοπικών μεγίστων και η τεταγμένη των τοπικών ελαχίστων (βλ. Σχ. 4-4).



Σχήμα 4-4. Κίνηση του ρομπότ, με μόνιμη κατάσταση.

4.2.2 Συλλογή Χρονικών Στιγμών Συμβάντων Απογείωσης – Προσγείωσης

Για τη συλλογή των χρονικών στιγμών των συμβάντων απογείωσης ή προσγείωσης των ποδιών θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας που περιέχει τους δείκτες των δυναμικών φάσεων. Επίσης, θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας που περιέχει τις χρονικές στιγμές που παράχθηκαν κατά την προσομοίωση.

Αρχικά, δημιουργούνται τέσσερις κενοί πίνακες (td_hind, lo_hind, td_fore και lo_hind) οι οποίοι στην πορεία θα χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση των τιμών των χρονικών στιγμών προσγείωσης ή απογείωσης για τα οπίσθια ή εμπρόσθια πόδια.

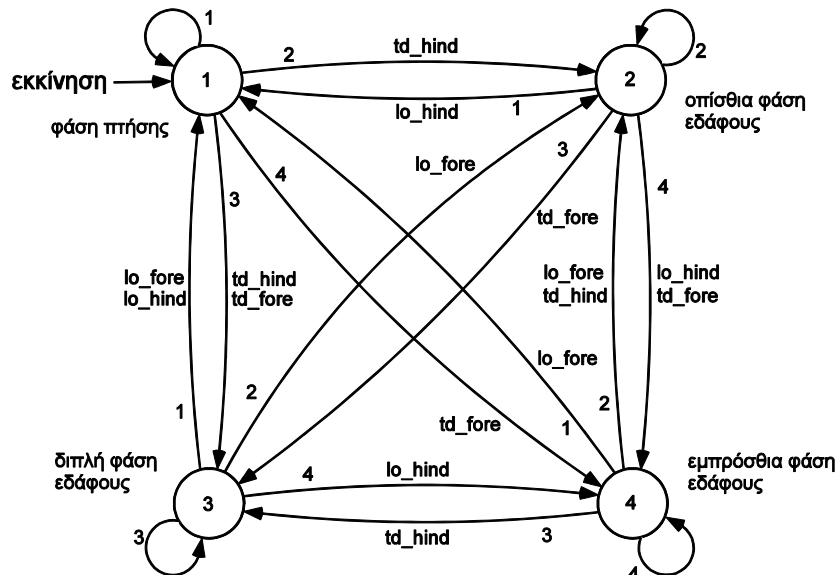
Στη συνέχεια, συγκρίνονται, με τη σειρά, τα μέλη των ζευγών διαδοχικών ακεραίων που ανήκουν στον πίνακα με τους δείκτες των φάσεων και που, στη γενική περίπτωση, είναι διαφορετικοί μεταξύ τους. Ανάλογα με το αποτέλεσμα της εκάστοτε σύγκρισης ενημερώνεται με την κατάλληλη χρονική στιγμή ο αντίστοιχος πίνακας. Π.χ. αν σε κάποιο σημείο ο πίνακας αυτός μοιάζει κάπως έτσι:

[...] 4 4 4 4 4 4 2 2 2 2 2 2 [...]

σημαίνει ότι η δυναμική κατάσταση του ρομπότ μεταβάλλεται και, υφίσταται μετάβαση από

την εμπρόσθια φάση εδάφους (ακέραιος δείκτης «4») στην οπίσθια φάση εδάφους (δείκτης «2»), άρα, τη χρονική στιγμή, που αντιστοιχεί στο πρώτο «2» που εμφανίζεται, συμβαίνουν παράλληλα η απογείωση των εμπρόσθιων ποδιών και η προσγείωση των οπίσθιων. Στην περίπτωση αυτή, ενημερώνονται με *αυτή* τη χρονική στιγμή οι πίνακες που αφορούν σε απογείωση των εμπρόσθιων ποδιών ή προσγείωση των οπίσθιων.

Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να παρασταθεί γραφικά με τη συνδρομή μίας μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων²⁶. Ακολουθεί το Σχ. 4-5 που ομοιάζει με γράφο (graph), καθώς αποτελείται από κόμβους – κύκλους που συμβολίζουν τις δυναμικές καταστάσεις του ρομπότ, και ακμές, οι οποίες, άγονται επί αυτών των κόμβων και συμβολίζουν τις δυνατές μεταβάσεις από κάθε κατάσταση προς τις υπόλοιπες.



Σχήμα 4-5. Αλγόριθμος συλλογής χρονικών στιγμών γεγονότων προσγείωσης και απογείωσης, για τα εμπρόσθια και οπίσθια πόδια.

²⁶ Οι μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων χρησιμοποιούνται συχνά στο πλαίσιο «πιο αφαιρετικών μοντελοποιήσεων» διάφορων δυναμικών συστημάτων που χαρακτηρίζονται από πεπερασμένο πλήθος καταστάσεων. Εδώ, μέσω αυτού του διαγράμματος, προσφέρεται στον αναγνώστη μία ποιοτική άποψη για το τετράποδο ρομπότ, ως οντότητα η οποία δέχεται κάποια είσοδο (αρχικές συνθήκες), την επεξεργάζεται μεταβαίνοντας σε διάφορες ενδιάμεσες καταστάσεις (μέσω του δυναμικού μοντέλου του ρομπότ καθώς και του ελεγκτή), και παράγει κάποια έξοδο (τελική κατάσταση/ φάση και περιγραφικά της μεγέθη). Μπορεί δηλαδή να ιδωθεί αφαιρετικά, ως *αιτιοκρατική υπολογιστική μηχανή* (deterministic random access machine, βλ. [22]).

4.2.3 Υπολογισμός Συστατικών Μεγεθών Διαγραμμάτων

Στην Παρ. 4.2.3, θα εισαχθούν και αναλυθούν οι μέθοδοι υπολογισμού των ποσοτήτων που συνθέτουν τα διαγράμματα Hildebrand για επίπεδα τετράποδα ρομπότ. Συγκεκριμένα, αυτά, είναι, η διαφορά φάσης (phase relationship, PR, βλ. Παρ. 4.2.3.1) και οι παράγοντες φόρτισης για τα εμπρόσθια και τα οπίσθια πόδια (hind και fore duty factors, HDF και FDF, βλ. Παρ. 4.2.3.2).

Αρχικά, εισάγεται ένας δεύτερος ορισμός του διασκελισμού που ονομάζεται «εναλλακτικός» (σε αντιδιαστολή με τον «κλασσικό»). Έπειτα, παρουσιάζονται οι δύο ορισμοί της διαφοράς φάσης όπου ο καθένας από αυτούς αφορά σε διαφορετικό ορισμό του διασκελισμού.

4.2.3.1 Εναλλακτικός Ορισμός Διασκελισμού

Σύμφωνα με τον εναλλακτικό του ορισμό (για τον κλασσικό ορισμό του διασκελισμού, βλ. Παρ. 2.1), ο διασκελισμός θεωρείται το κομμάτι εκείνο της κίνησης του ρομπότ που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο διαδοχικές προσγειώσεις των *εμπρόσθιων* ποδιών. Υπενθυμίζεται, εδώ, η υιοθέτηση της χρήσης της αρχής του εικονικού ποδιού και η συνακόλουθη διδιάστατη μοντελοποίηση του ρομπότ, με συνέπεια τη *μεταξύ σύζευξη* των ποδιών που ανήκουν σε κοινό ζεύγος (οπίσθιο ή εμπρόσθιο).

4.2.3.2 Διαφορά Φάσης

Το εύρος της τιμής της διαφοράς φάσης αντιστοιχεί στο σύνολο [0.00, 100.00]%. Λόγω ότι το μέγεθος αυτό είναι *ποσοστό επί τοις εκατό* οι τιμές που λαμβάνει δεν δύνανται να βρίσκονται εκτός του διαστήματος [0.00, 100.00]%. Επίσης, η διαφορά φάσης δεν δύναται να ισούται με 100.00% καθώς, σε αυτή την περίπτωση, για καθ' όλη τη διάρκεια κάθε πραγματοποιούμενου διασκελισμού της μόνιμης κατάστασης, κάποιο εκ των ζευγών των ποδιών δεν ακουμπά στο έδαφος.

4.2.3.2.1 Διαφορά Φάσης με Βάση τον Κλασσικό Ορισμό Διασκελισμού

Η διαφορά φάσης, με βάση τον κλασσικό ορισμό, ισούται με το λόγο του χρονικού διαστήματος που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην «πρώτη» προσγείωση των οπίσθιων ποδιών και την αμέσως επόμενη προσγείωση των εμπρόσθιων ποδιών που ακολουθεί, προς τη

συνολική χρονική διάρκεια του αντίστοιχου διασκελισμού δηλ., τη χρονική διαφορά των δύο διαδοχικών προσγειώσεων των οπίσθιων ποδιών («πρώτη» και «δεύτερη» οπίσθια προσγείωση του i – οστού διασκελισμού της μόνιμης κατάστασης). Αν συμβολίσουμε με $tdHind(i)$ και $tdHind(i+1)$ τις δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές προσγείωσης των οπίσθιων ποδιών (όπου η $tdHind(i)$ είναι η μικρότερη) και με $tdFore$ την ενδιάμεση προσγείωση των εμπρόσθιων ποδιών, τότε, η διαφορά φάσης υπό τον κλασσικό ορισμό (εκθέτης «K») του διασκελισμού δίνεται από τη σχέση,

$$PR^K = \text{mean}(\text{πίνακας-γραμμή A}) = \text{mean}([PR_1^K, PR_2^K, \dots, PR_i^K, \dots, PR_{n_1-1}^K]) \quad (4.1)$$

με

$$PR_i^K = \frac{tdFore - tdHind(i)}{tdHind(i+1) - tdHind(i)} \quad (4.2)$$

όπου n_1 είναι το πλήθος των $tdHind$ χρονικών στιγμών της μόνιμης κατάστασης της κίνησης του ρομπότ.

Ακολουθεί η σχέση υπολογισμού με βάση τον εναλλακτικό ορισμό του διασκελισμού.

4.2.3.2.2 Διαφορά Φάσης με Βάση τον Εναλλακτικό Ορισμό Διασκελισμού

Η διαδικασία υπολογισμού της διαφοράς φάσης με βάση τον εναλλακτικό ορισμό, αφορά στη θεώρηση του λόγου του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί από την «πρώτη» προσγείωση των εμπρόσθιων ποδιών και την αμέσως επόμενη προσγείωση των οπίσθιων ποδιών που ακολουθεί, προς τη συνολική χρονική διάρκεια του διασκελισμού δηλ., τη χρονική διαφορά των δύο διαδοχικών προσγειώσεων των εμπρόσθιων ποδιών («πρώτη» και «δεύτερη» προσγείωση). Αν συμβολιστούν με $tdFore(i)$ και $tdFore(i+1)$, οι δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές προσγείωσης των εμπρόσθιων ποδιών του i – οστού διασκελισμού της μόνιμης κατάστασης (όπου η $tdFore(i)$ είναι η μικρότερη), και με $tdHind$ η ενδιάμεση προσγείωση των οπίσθιων ποδιών, τότε, η διαφορά φάσης υπό τον εναλλακτικό ορισμό (εκθέτης «E») δίνεται από τη σχέση,

$$PR^E = \text{mean}(\text{πίνακας-γραμμή B}) = \text{mean}([PR_1^E, PR_2^E, \dots, PR_i^E, \dots, PR_{n_2-1}^E]) \quad (4.3)$$

με
$$PR_i^E = \frac{tdHind - tdFore(i)}{tdFore(i+1) - tdFore(i)} \quad (4.4)$$

όπου το n_2 δηλώνει το πλήθος των tdFore χρονικών στιγμών της μόνιμης κατάστασης της προσομοιωμένης κίνησης.

Ακολουθεί η ανάπτυξη των μεθόδων υπολογισμού των παραγόντων φόρτισης.

4.2.3.3 Παράγοντες Φόρτισης

Για τον υπολογισμό των παραγόντων φόρτισης, υλοποιείται ο ορισμός, σύμφωνα με τον οποίο, ο παράγοντας φόρτισης των ποδιών ενός ζεύγους ισούται με το λόγο της χρονικής διάρκειας της επαφής τους με το έδαφος προς τη συνολική χρονική διάρκεια του διασκελισμού.

Το εύρος της τιμής κάθε παράγοντα φόρτισης είναι το σύνολο (0.00, 100.00)%. Τα μεγέθη αυτά δεν δύνανται να ισούνται με 0.00% ή 100.00% καθώς σε αυτή την περίπτωση, για κάθε πραγματοποιούμενο διασκελισμό της μόνιμης κατάστασης, κάποιο από τα ζεύγη ποδιών ανά διασκελισμό είτε δεν ακουμπά στο έδαφος είτε, αντίστοιχα, πατά μόνιμως στο έδαφος. Επίσης, λόγω ότι τα μεγέθη αυτά είναι *ποσοστά επί τοις εκατό* οι τιμές που λαμβάνουν δεν δύνανται να βρίσκονται «έξω» από το διάστημα [0.00, 100.00]%.

Στις επόμενες παραγράφους (Παρ. 4.2.3.2.1 και Παρ. 4.2.3.2.2) υλοποιείται ο παραπάνω ορισμός του παράγοντα φόρτισης, για τους δύο προαναφερθέντες – διαφορετικούς μεταξύ τους – ορισμούς του διασκελισμού.

4.2.3.3.1 Παράγοντες Φόρτισης με Βάση τον Κλασικό Ορισμό Διασκελισμού

Πρώτα ορίζεται ο παράγοντας φόρτισης των οπίσθιων ποδιών.

Αν συμβολιστούν με $tdHind(i)$ και $tdHind(i+1)$ δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές προσγείωσης των οπίσθιων ποδιών (όπου η $tdHind(i)$ είναι η μικρότερη) και με $loHind$ η χρονικά ενδιάμεση στιγμή απογείωσής τους, τότε, ως παράγοντας φόρτισης των οπίσθιων ποδιών (hind duty factor, HDF) με βάση τον κλασικό ορισμό (εκθέτης «K») προκύπτει το παρακάτω κλάσμα,

$$HDF_i^K = \frac{loHind - tdHind(i)}{tdHind(i+1) - tdHind(i)} \quad (4.5)$$

Όσον αφορά στον υπολογισμό του παράγοντα φόρτισης των εμπρόσθιων ποδιών (fore duty factor, FDF), εργαζόμαστε αντίστοιχα. Αν συμβολιστούν η χρονική στιγμή προσγείωσης των εμπρόσθιων ποδιών με tdFore και με loFore η χρονική στιγμή απογείωσής τους τότε ο παράγοντας φόρτισης των εμπρόσθιων ποδιών έχει ως εξής,

$$FDF_i^K = \frac{loFore - tdFore}{tdHind(i+1) - tdHind(i)} \quad (4.6)$$

για την περίπτωση όπου,

$$tdHind(i) < tdFore < loFore < tdHind(i+1) \quad (4.7)$$

και,

$$FDF_i^K = \frac{(loFore - tdHind(i)) + (tdHind(i+1) - tdFore)}{tdHind(i+1) - tdHind(i)} \quad (4.8)$$

για την περίπτωση όπου,

$$tdHind(i) < loFore < tdFore < tdHind(i+1) \quad (4.9)$$

Τέλος, ισχύει ότι,

$$HDF^K = \text{mean}([HDF_1^K, HDF_2^K, \dots, HDF_i^K, \dots, HDF_{n_i-1}^K]) \quad (4.10)$$

και ότι,

$$FDF^K = \text{mean}([FDF_1^K, FDF_2^K, \dots, FDF_i^K, \dots, FDF_{n_i-1}^K]) \quad (4.11)$$

Οι παραπάνω ορισμοί, όπως προαναφέρθηκε, ακολουθούν τον «κλασσικό» (εκθέτης «K»), παρουσιασμένο στην Παρ. 2.1, ορισμό του διασκελισμού. Στη συνέχεια θα παρατεθούν οι

ορισμοί των FDF και HDF με βάση τον «εναλλακτικό» (εκθέτης «E») ορισμό του διασκελισμού, δηλ., οι FDF^E και HDF^E .

4.2.3.3.2 Παράγοντες Φόρτισης με Βάση τον Εναλλακτικό Ορισμό Διασκελισμού

Αποσκοπώντας στον υπολογισμό του παράγοντα φόρτισης των εμπρόσθιων ποδιών με βάση τον εναλλακτικό ορισμό, συμβολίζονται με $tdFore(i)$ και, $tdFore(i+1)$ αντίστοιχα, δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές προσγείωσης των εμπρόσθιων ποδιών (όπου $tdFore(i)$ είναι η μικρότερη εκ των δύο, χρονική στιγμή) και με $loFore$ η χρονική στιγμή απογείωσής τους που, χρονικά, τοποθετείται ανάμεσά τους. Οπότε, δύναται να γραφεί πως η σχέση υπολογισμού αυτού του μεγέθους διατυπώνεται ως,

$$FDF_i^E = \frac{loFore - tdFore(i)}{tdFore(i+1) - tdFore(i)} \quad (4.12)$$

Όσον αφορά στον υπολογισμό του παράγοντα φόρτισης των οπίσθιων ποδιών (hind duty factor, HDF), εργαζόμαστε αντίστοιχα. Αν συμβολιστούν η χρονική στιγμή προσγείωσης των εμπρόσθιων ποδιών με $tdHind$ και με $loHind$ η χρονική στιγμή απογείωσής τους τότε ο παράγοντας φόρτισης των εμπρόσθιων ποδιών έχει ως εξής,

$$HDF_i^E = \frac{loHind - tdHind}{tdFore(i+1) - tdFore(i)} \quad (4.13)$$

για την περίπτωση όπου,

$$tdFore(i) < tdHind < loHind < tdFore(i+1) \quad (4.14)$$

και,

$$HDF_i^E = \frac{(loHind - tdFore(i)) + (tdFore(i+1) - tdHind)}{tdFore(i+1) - tdFore(i)} \quad (4.15)$$

για την περίπτωση όπου,

$$tdFore(i) < loHind < tdHind < tdFore(i+1). \quad (4.16)$$

Τέλος, ισχύει ότι,

$$FDF^E = \text{mean}([FDF_1^E, FDF_2^E, \dots, FDF_i^E, \dots, FDF_{n_2-1}^E]) \quad (4.17)$$

και ότι,

$$HDF^E = \text{mean}([HDF_1^E, HDF_2^E, \dots, HDF_i^E, \dots, HDF_{n_2-1}^E]) \quad (4.18)$$

Στη συνέχεια, αποσαφηνίζεται η μέθοδος που επιλέχθηκε τελικώς για τον υπολογισμό αυτών των συστατικών μεγεθών.

4.2.3.4 Τελικός Υπολογισμός Συστατικών Μεγεθών

Για την πρακτικά εφαρμοζόμενη διαδικασία υπολογισμού της διαφοράς φάσης και των παραγόντων φόρτισης, ακολουθείται η διαδικασία που αναπτύσσεται λεπτομερώς σε αυτή την παράγραφο.

Μέχρι στιγμής, έχουν παρουσιαστεί δύο τρόποι υπολογισμού της διαφοράς φάσης και δύο τρόποι υπολογισμού του κάθε παράγοντα φόρτισης, από ένας, δηλ., ανά διαφορετικό ορισμό του διασκελισμού.

Όπως θα αναλυθεί και αιτιολογηθεί παρακάτω, στην τελικά υλοποιούμενη μέθοδο υπολογισμού της διαφοράς φάσης χρησιμοποιούνται αμφότεροι οι δύο τρόποι υπολογισμού της, και, όσον αφορά στον υπολογισμό του εκάστοτε παράγοντα φόρτισης, αξιοποιείται μόνο μία μέθοδος υπολογισμού κάθε φορά.

4.2.3.4.1 Τελικός Υπολογισμός της Διαφοράς Φάσης

Όπως αναφέρθηκε στην Παρ. 4.2.3.4, για τον υπολογισμό της τελικώς αποδιδόμενης τιμής της διαφοράς φάσης χρησιμοποιούνται και οι δύο ορισμοί της, όπου ο καθένας αντιστοιχίζεται με διαφορετικό ορισμό διασκελισμού, καθώς, αν χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της διαδικασίας οι δύο ορισμοί, αντί για έναν, τότε, τα χαρακτηριστικά του «μέσου» – επιλεγόμενου από το ρομπότ – διασκελισμού της μόνιμης κατάστασής του, υπολογίζονται με μεγαλύτερη

ακρίβεια, στη γενική περίπτωση κίνησης²⁷, σε σχέση με την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται μόνο ο ένας ορισμός εκ των δύο. Για την διευκόλυνση του αναγνώστη στην κατανόηση του γεγονότος αυτού, τα παρακάτω αφιερώνονται στην αποσαφήνιση και την επέκταση αυτής της θέσης.

Πιο συγκεκριμένα, σχετικά με τις περιπτώσεις της μόνιμης κίνησης του ρομπότ κατά τις οποίες υπάρχουν, τόσο κάποιες «μεγάλες φάσεις πτήσης» μετά τις οποίες προσγειώνονται πρώτα τα οπίσθια του πόδια, όσο και κάποιες μετά τις οποίες προσγειώνονται πρώτα τα εμπρόσθια πόδια, αν υιοθετηθεί μόνο ο ένας εκ των δύο ορισμών της διαφοράς φάσης, τότε, η τελική τιμή της είναι «ανακριβής».

Αυτό συμβαίνει, επειδή, στην περίπτωση της χρήσης μόνο ενός ορισμού του διασκελισμού (και, συνακόλουθα, της διαφοράς φάσης) οι τιμές της διαφοράς φάσης που προκύπτουν στις περιπτώσεις όπου μετά από κάποια μεγάλη φάση πτήσης προσγειώνονται τα οπίσθια πόδια πρώτα, διαφέρουν από τις τιμές που αφορούν σε περιπτώσεις όπου μετά από κάποια μεγάλη φάση πτήσης προσγειώνονται τα εμπρόσθια πόδια πρώτα, τουλάχιστον 40% – σε απόλυτη κλίμακα – γεγονός που οδηγεί σε σφάλμα τουλάχιστον 20% (πάλι, σε απόλυτη κλίμακα, όχι ως ποσοστιαία διαφορά) στην τελική τιμή της διαφοράς φάσης.

Στο αυτό το σημείο, διαχωρίζονται οι «μικρές» τιμές από τις «μεγάλες», με βάση το «θεωρητικό όριο» του 50%²⁸. Οι «μικρές» τιμές που ανακύπτουν, ανήκουν όλες στο [0.00, 30.00]%, και οι μεγάλες στο, «σχεδόν» συμμετρικό διάστημα ως προς την τιμή 50%, [70.00, 100.00)%.

Ως τιμή εξόδου λαμβάνεται ο μέσος όρος όλων των υπολογισμένων τιμών της διαφοράς

²⁷ Δηλαδή, στην περίπτωση κίνησης όπου κάποιες φορές προηγούνται τα οπίσθια πόδια (σε σχέση με τα εμπρόσθια) στην προσγείωση, μετά από κάποιες φάσεις πτήσης, και, κάποιες φορές προηγούνται τα εμπρόσθια.

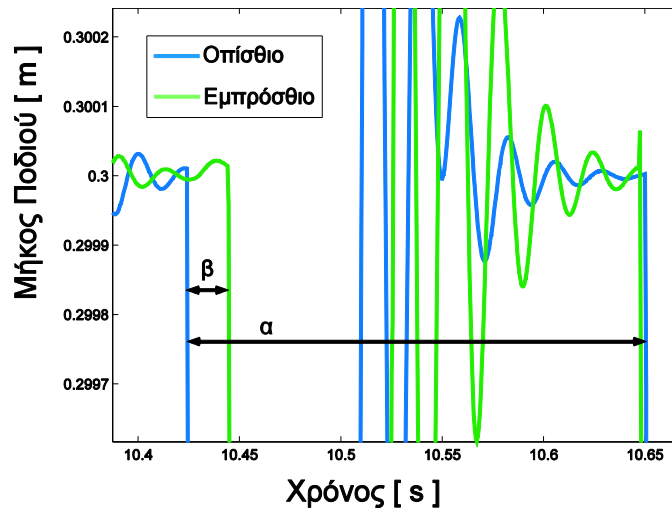
²⁸ Στο πλαίσιο της εργασίας, θεωρείται πως η διαφορά φάσης δεν δύναται να λάβει τιμή μεγαλύτερη από 50% λόγω της κατασκευής του ρομπότ (άκαμπτο σώμα και πόδια πάντα «τεντωμένα» λόγω της μοναδικής περιστροφικής άρθρωσης ανά πόδι). Πιο συγκεκριμένα αν η διαφορά φάσης, υπολογιζόμενη με δεδομένο ορισμό, λάβει τιμή μεγαλύτερη από 50%, τότε, συνεπάγεται πως για το συγκεκριμένο κομμάτι της κίνησης το ρομπότ προσγειώθηκε με το ζεύγος ποδιών που αντιστοιχεί στον «έτερο» ορισμό του διασκελισμού.

φάσης (δηλ., συνυπολογίζεται για κάθε διασκελισμό η αντίστοιχη τιμή του) για λόγους επιστροφής, προς το χρήστη, της πλέον «χαρακτηριστικότερης τιμής» της. Άρα, επειδή η διαφορά τους είναι τουλάχιστον 40%, η μέση τιμή τους απέχει τουλάχιστον 20% από το καθένα, καθότι, βρίσκεται στη μέση της απόστασής τους, εξ' ορισμού.

Παρακάτω, στα Σχ. 4-6 και 4-7, παρουσιάζεται η – παραπάνω αναφερθείσα – απόκλιση στις υπολογιζόμενες τιμές της διαφοράς φάσης, με βάση τον κλασσικό ορισμό του διασκελισμού (αντίστοιχα ισχύουν για τον εναλλακτικό) για τη γενικότερη περίπτωση κίνησης, δηλ., για κίνηση, στην οποία, κάποιες φορές προσγειώνονται τα οπίσθια πόδια μετά από μεγάλη φάση πτήσης²⁹ και, κάποιες φορές τα εμπρόσθια. Σημειώνεται, πως, το ασυμπιεστο (δηλ., ελεύθερο) μήκος του κάθε ποδιού στα σχήματα αυτά είναι 0.30 m.

Αρχικά, από το Σχ. 4-6, παρατηρείται ότι,

$$\text{διαφορά φάσης}^{\text{Κλασσικός Ορισμός}} = PR^K = \frac{\beta}{\alpha} \leq 30\% \quad (4.19)$$



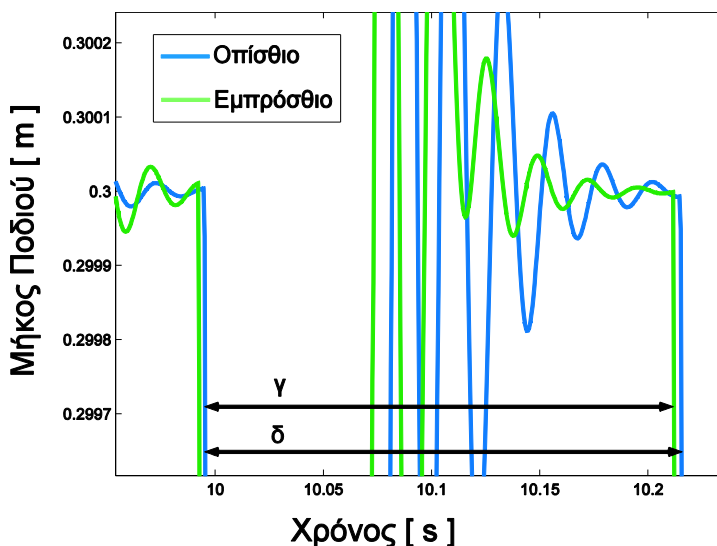
Σχήμα 4-6. Μικρή τιμή της διαφοράς φάσης, με βάση τον κλασσικό ορισμό.

και έπειτα, από το Σχ. 4-7, παρατηρείται ότι,

$$\text{διαφορά φάσης}^{\text{Κλασσικός Ορισμός}} = PR^K = \frac{\gamma}{\delta} \geq 70\% \quad (4.20)$$

²⁹ Δεν έχει παρατηρηθεί κίνηση που περιέχει μικρή φάση πτήσης.

Για τη βελτίωση της ακρίβειας της υπολογιζόμενης τιμής της διαφοράς φάσης χρησιμοποιούνται οι δύο ορισμοί του διασκελισμού στον υπολογισμό της. Πιο συγκεκριμένα, ως τιμή της διαφοράς φάσης λαμβάνεται η μέση τιμή, της μέσης τιμής των τιμών διαφοράς φάσης που υπολογίζονται με βάση τον κλασσικό ορισμό και που συνδέονται με περιπτώσεις κίνησης της μόνιμης κατάστασης όπου τα οπίσθια πόδια προσγειώνονται πρώτα, και, της



Σχήμα 4-7. Μεγάλη τιμή της διαφοράς φάσης, με βάση τον κλασσικό ορισμό.

μέσης τιμής των τιμών της διαφοράς φάσης που υπολογίζονται με βάση τον εναλλακτικό ορισμό και αφορούν σε περιπτώσεις κίνησης της μόνιμης κατάστασης όπου τα εμπρόσθια πόδια προσγειώνονται πρώτα.

Αυτό που επιλέγεται, δηλ., είναι η χρήση του κλασσικού ορισμού για τις περιπτώσεις όπου τα οπίσθια πόδια προσγειώνονται πρώτα, και, η χρήση του εναλλακτικού ορισμού για τις περιπτώσεις όπου τα εμπρόσθια πόδια προσγειώνονται πρώτα. Αυτή επιλογή οφείλεται στο ότι οι τιμές αυτές δεν διαφέρουν πάνω από 10.00% μεταξύ τους (σε απόλυτη κλίμακα), και έτσι, η επιστρεφόμενη τιμή διαφέρει από αυτές τις τιμές της διαφοράς φάσης που υπολογίζονται, το πολύ 5.00%. Η μέθοδος αυτή, είναι τουλάχιστον τέσσερις φορές πιο ακριβής από την προηγούμενη, καθώς,

$$\frac{20\%}{5\%} = 4. \quad (4.21)$$

Χρησιμοποιώντας ένα κάπως πιο φορμαλιστικό (τυπικό) τρόπο γραφής, ο υπολογισμός της διαφοράς φάσης συμπληρώνεται παρακάτω. Αν συμβολιστεί με PR_{μ}^E ο μέσος όρος των μικρών τιμών της διαφοράς φάσης, με βάση τον κλασσικό ορισμό του διασκελισμού και, με PR_{μ}^K ο μέσος όρος των μικρών τιμών της, με βάση τον εναλλακτικό ορισμό, τότε, αυτή δίνεται, τελικώς, από τη σχέση,

$$PR = \text{mean}([PR_{\mu}^K, PR_{\mu}^E]) \quad (4.22)$$

με $PR_{\mu}^K = [PR_{a_1}^K, PR_{a_2}^K, \dots, PR_{a_i}^K, \dots, PR_{a_{n_3}}^K]$, όπου $PR_{a_i}^K \leq 50.00\%, \forall i$ (4.23)

και $PR_{\mu}^E = [PR_{b_1}^E, PR_{b_2}^E, \dots, PR_{b_j}^E, \dots, PR_{b_{n_4}}^E]$, όπου $PR_{b_j}^E \leq 50.00\%, \forall j$ (4.24)

όπου n_3 είναι το πλήθος των διαφορών φάσης του πίνακα A, που είναι μικρότερες από ή ίσες προς, το 50.00%. Αντίστοιχα ορίζεται το n_4 . Ισχύει πως,

$$n_3 \neq n_4 \quad (4.25)$$

γενικά. Επίσης, $n_3 \leq n_1 - 1$ (4.26)

και, $n_4 \leq n_2 - 1$. (4.27)

Τέλος, όπως προγράφηκε περιφραστικά παραπάνω,

$$|PR_{\mu}^K - PR_{\mu}^E| < 10\% \quad (4.28)$$

και, $|PR_{\mu}^p - PR_M^p| > 40\%, \forall p, p \in \{K, E\}$. (4.29)

4.2.3.4.2 Τελικός Υπολογισμός των Παραγόντων Φόρτισης

Για τον υπολογισμό του παράγοντα φόρτισης των οπίσθιων ποδιών ακολουθείται ο τρόπος υπολογισμού που βασίζεται στον κλασσικό ορισμό του διασκελισμού, ενώ για τον υπολογισμό του παράγοντα φόρτισης των εμπρόσθιων ποδιών ακολουθείται αυτός που βασίζεται στον

εναλλακτικό ορισμό.

Ο λόγος που επιλέγονται για χρήση, με αυτό τον τρόπο, οι ορισμοί των διασκελισμών του ρομπότ είναι ότι, για δεδομένο παράγοντα φόρτισης, είτε εφαρμοσθεί η μέθοδος υπολογισμού, που αφορά στον κλασσικό ορισμό του διασκελισμού, είτε αυτή που αφορά στον εναλλακτικό, η τιμή που προκύπτει είναι *περίπου* η ίδια. Αναλυτικότερα, η διαφορά των δύο αυτών τιμών για ένα διασκελισμό, είναι μικρότερη από 5% με βάση την ανάλυση των πειραμάτων που, μέχρι στιγμής, έχουν διεξαχθεί. Οπότε, ανά παράγοντα φόρτισης επιλέγεται μοναδικός ορισμός του με βάση κάποιο, μοναδικό, ορισμό του διασκελισμού, ακριβώς γιατί η διαφορά αυτή θεωρείται μη σημαντική.

Η επιλογή του κατάλληλου ορισμού διασκελισμού, με βάση τον οποίο θα υπολογιστεί ο εκάστοτε παράγοντας φόρτισης, γίνεται έχοντας ως στόχο την απλότητα του υπολογισμού, μια και, οι δύο ορισμοί είναι ισοδύναμοι. Οι ορισμοί που επιλέγονται, τελικά, είναι ο κλασσικός για τον υπολογισμό του οπίσθιου παράγοντα φόρτισης και, ο εναλλακτικός για τον υπολογισμό του εμπρόςθιου παράγοντα φόρτισης. Σε κάθε μία από τις χρήσεις των ορισμών αυτών, αυτοί, αποτελούσαν την βέλτιστη επιλογή, καθώς στις περιπτώσεις αυτές χρειάζονται τρεις χρονικές στιγμές για την ολοκλήρωση του υπολογισμού, και, σε κάθε περίπτωση απόκλισης από αυτή τη διεύθυνση, οι απαιτούμενες χρονικές τιμές είναι τέσσερις (βλ. Παρ. 4.2.3.3.1 και 4.2.3.3.2).

Σημειώνεται εδώ, πως, ανά ορισμό του εκάστοτε παράγοντα φόρτισης – σε αντίθεση με τη διαφορά φάσης όπου, οι τιμές ανά μέθοδο που εφαρμόζεται διαχωρίζονται σε μικρές και μεγάλες – κάθε τιμή που ανακύπτει, δεν διαφέρει *αισθητά*³⁰ από κάθε μία εκ των υπολοίπων τιμών. Ισχύει ότι,

$$|q^K - q^E| < 5\%, \forall q, q \in \{HDF, FDF\} \quad (4.30)$$

Οπότε, η τελικώς επιστρεφόμενη τιμή είναι η μέση τιμή των «πολλών» τιμών των παραγόντων φόρτισης, όπου, κάθε ένας από αυτούς αντιστοιχίζεται με κάποιο διασκελισμό της μόνιμης

³⁰ Και εδώ, ως αισθητή διαφορά, θεωρείται κάθε διαφορά μεγαλύτερη του 5% σε απόλυτη κλίμακα (όχι σε σχετική, όπως είναι, π.χ., η ποσοστιαία διαφορά κ.λπ.).

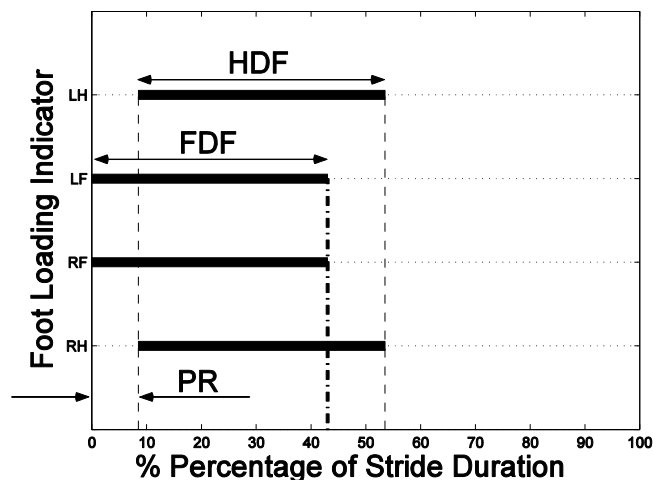
κατάστασης. Για λόγους πληρότητας παρατίθενται παρακάτω οι μαθηματικές σχέσεις που αφορούν στις μεθόδους υπολογισμού των παραγόντων φόρτισης. Συμβολίζοντας με HDF^K το μέσο όρο των τιμών των παραγόντων φόρτισης που έχουν υπολογισθεί με βάση τον κλασσικό ορισμό του διασκελισμού και με HDF^E , αντίστοιχα, το μέσο όρο των τιμών που υπολογίσθηκαν με βάση τον εναλλακτικό ορισμό, έχουμε,

$$HDF = HDF^K \cong HDF^E \quad (4.31)$$

και
$$FDF = FDF^E \cong FDF^K \quad (4.32)$$

4.2.3.4.3 Κριτική επί της Μεθόδου του Τελικού Υπολογισμού

Εκτός από τη μορφή των διαγραμμάτων Hildebrand για επίπεδα τετράποδα ρομπότ, που εισάχθηκε στην Παρ. 2.2 (Σχ. 2-4), δύναται να χρησιμοποιηθεί και η παρακάτω εκδοχή τους (Σχ. 4-8), στην οποία, όμως, χρησιμοποιείται ο εναλλακτικός ορισμός του διασκελισμού (εκκίνηση του διασκελισμού με προσγείωση των εμπρόσθιων ποδιών).



Σχήμα 4-8. Διάγραμμα Hildebrand για επίπεδο τετράποδο ρομπότ, με βάση τον εναλλακτικό ορισμό του διασκελισμού.

Στο σημείο αυτό, ίσως κάποιος προτείνει τη χρήση δύο διαγραμμάτων Hildebrand, ένα για τους διασκελισμούς που αντιστοιχίζονται με τον κλασσικό ορισμό του διασκελισμού (όπου δηλ., μετά από μεγάλη φάση πτήσης προσγειώνονται τα οπίσθια πόδια πρώτα, σε σχέση με τα εμπρόσθια) και ένα για αυτούς που αντιστοιχίζονται με τον εναλλακτικό. Μία τέτοια επιλογή, θα οδηγούσε στη δημιουργία δύο gait graphs.

Σε αυτή την περίπτωση, η θεώρηση του μέσου όρου των χαρακτηριστικών μεγεθών (μέση τιμή παραγόντων φόρτισης και διαφορά φάσης) των δύο gait graphs, αποδίδει ένα gait graph τα μεγέθη του οποίου, διαφέρουν λιγότερο από 5% από τα αντίστοιχα αυτών που το συνθέτουν (η διαφορά των παραγόντων φόρτισης, για διαφορετικούς ορισμούς αυτών, είναι μικρότερη από 5%, και, η διαφορά μεταξύ των μικρών τιμών της διαφοράς φάσης, για δύο διαφορετικούς ορισμούς, είναι μικρότερη από 10%³¹). Το gait graph αυτό, είναι το gait graph που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία.

Για λόγους πρακτικότητας και ευκολίας στην παρατήρηση της επίδρασης των παραμέτρων, στα χαρακτηριστικά του εκάστοτε διασκελισμού, δεν χρησιμοποιούνται δύο gait graphs για μία προσομοιωμένη κίνηση αλλά ένα, με βάση τον παραπάνω κανόνα.

4.3 Μοτίβα Μόνιμης Κατάστασης

Σε αυτή την παράγραφο εισάγονται και αναλύονται τα μοτίβα που περιγράφουν αφαιρετικά τη μόνιμη κατάσταση της κίνησης του ρομπότ. Ο χαρακτηρισμός «αφαιρετικά» δικαιολογείται με την έννοια ότι παρέχουν μία ποιοτική, παρά ποσοτική, οπτική γωνία για την επόπτευση της πραγματοποιούμενης κίνησης.

Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμος ο τονισμός της εννοιολογικής διαφοράς των μοτίβων που θα αναφερθούν εδώ από τους διασκελισμούς και τα είδη τους που έχουν μελετηθεί στα προηγούμενα κεφάλαια και που έχουν αναφερθεί, και αυτά, ως «μοτίβα». Πιο συγκεκριμένα ένας διασκελισμός (περίοδος κίνησης), αφορά στις *καθ' αυτές* σχέσεις μεταξύ των ποδιών του ρομπότ κατά την κίνηση³², κάτι το οποίο γίνεται εμφανές μέσω των διαγραμματικών του απεικονίσεων, είναι δηλ., ένα λεπτομερές και πλήρες εργαλείο παρατήρησης της φύσης της κίνησης του ρομπότ.

Στον αντίποδα, βρίσκονται τα μοτίβα που εισάγονται στην τρέχουσα παράγραφο, καθώς

³¹ Με βάση τον *επιλεγμένο* ορισμό της διαφοράς φάσης, στο πλαίσιο της εργασίας, αυτή, ισούται με τη μέση τιμή των μέσων τιμών των «μικρών» τιμών που υπολογίζονται με βάση τον κλασικό και τον εναλλακτικό ορισμό του διασκελισμού.

³² Π.χ. *τώρα* συμβαίνει η προσγείωση του οπίσθιου δεξιού ποδιού και μετά από ένα χρονικό διάστημα αντίστοιχο του 15% της διάρκειας του διασκελισμού, λαμβάνει χώρα η προσγείωση του εμπρόσθιου αριστερού ποδιού κ.λπ.

αποτελούν κάπως πιο χονδροειδείς εκτιμήσεις της κίνησης του ρομπότ γιατί δεν συνοδεύονται από ποσοτικές παραμέτρους (αριθμητικές μεταβλητές). Προσφέρουν όμως έναν «οικονομικό»³³, συμπαγή και ευκατανόητο τρόπο περιγραφής της «διασκελισματικής» συμπεριφοράς του ρομπότ.

4.3.1 Ορισμός Μοτίβων

Κατ' αρχάς, όσον αφορά στην κίνηση bound οι δυνατοί διασκελισμοί του ρομπότ διαχωρίζονται σε είδους H ή F ανάλογα με το αν προσγειώνονται πρώτα τα οπίσθια (Hind) ή τα εμπρόσθια (Fore), αντίστοιχα, πόδια του ρομπότ, μετά από μία συγκεκριμένη «μεγάλη φάση πτήσης»³⁴. Επισημαίνεται, ότι ο διαχωρισμός αυτός έχει νόημα μόνο για τις τύπου bound κινήσεις καθώς στον τύπο pronk³⁵ δεν υπάρχει διαφορά φάσης ανάμεσα στις προσγειώσεις των ποδιών με το έδαφος. Συνακόλουθα, μπορούμε να ονομάσουμε ως τύπου P τους διασκελισμούς στους οποίους μετά από κάποια μεγάλη φάση πτήσης προσγειώνονται ταυτόχρονα τα εμπρόσθια με τα οπίσθια πόδια του ρομπότ (από το pronk).

Ένα παράδειγμα τέτοιου μοτίβου θα μπορούσε να αποτελέσει οποιαδήποτε ακολουθία από F ή H γράμματα, π.χ. η ακολουθία HHFFHF αναφέρεται σε μία περιοδική κίνηση η οποία συντίθεται από την επανάληψη μίας επτάδας διασκελισμών, όπου, ανάλογα με αν το αντίστοιχο γράμμα κάθε διασκελισμού είναι H ή F, ο διασκελισμός εκκινεί με τον αντίστοιχο τρόπο.

Στη συνέχεια, αφού κατηγοριοποιηθούν τα μοτίβα που προαναφέρθηκαν, αναπτύσσεται μία μέθοδος με την οποία αυτά υπολογίζονται με μηχανιστικό τρόπο για κάθε προσομοιωμένη κίνηση.

³³ Ως προς την έκταση της πληροφορίας που προσφέρεται στον αναγνώστη.

³⁴ Στον διασκελισμό bound, όταν απουσιάζει η διπλή φάση εδάφους από την ακολουθία των δυναμικών φάσεων της κίνησης, υπάρχουν δύο «φάσεις πτήσης». Μία, η οποία είναι μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας και ονοματίζεται «μεγάλη» και, μία, της οποίας η διάρκεια υπολείπεται, προδήλως σημαντικά, σε σχέση με αυτή της «μεγάλης», οπότε καλείται, εδώ, «μικρή».

³⁵ Στον τύπο pronk η διαφορά φάσης είναι ίση με μηδέν. Στην «πιο πρακτική» του εκδοχή, στο πλαίσιο της εργασίας, η διαφορά φάσης δύναται να λάβει τιμές μέχρι 5%.

4.3.2 Κατηγοριοποίηση Μοτίβων

Για την κατηγοριοποίηση των μοτίβων θα χρησιμοποιηθούν οι δύο πίνακες που περιέχουν τις τιμές των διαφορών φάσης για τους διασκελισμούς της μόνιμης κατάστασης για καθένα εκ των ορισμών του διασκελισμού. Ο πίνακας που αφορά στον κλασσικό ορισμό, αναφέρεται ως **πίνακας (– γραμμή) A** (βλ. Παρ. 4.2.3.2.1) και, ο πίνακας που αφορά στον εναλλακτικό ορισμό, αναφέρεται ως **πίνακας (– γραμμή) B** (βλ. Παρ. 4.2.3.2.2).

Οι εκάστοτε καταστάσεις αυτών των πινάκων, αν συνδυαστούν μεταξύ τους, δύνανται να προσδιορίσουν αμφιμονοσήμαντα τον επιλεγόμενο διασκελισμό, π.χ., αν κάθε τιμή του πίνακα A είναι «μικρή» και κάθε τιμή του πίνακα B είναι «μεγάλη» τότε το μοτίβο παριστάνεται με H καθώς κάθε διασκελισμός ξεκινά με προσγείωση των οπίσθιων (Hind) ποδιών. Αυτό οφείλεται στο ότι η εμφάνιση μικρής τιμής σε ένα πίνακα συνδέεται με προσγείωση του αντίστοιχου ζεύγους ποδιών, μετά από κάποια φάση πτήσης, πριν προσγειωθεί το άλλο.

Επειδή όμως, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην εξαντλητική απαρίθμηση των μοτίβων ενδείκνυται ο έλεγχος κάθε δυνατού συνδυασμού των καταστάσεων των πινάκων A και B ως προς το μοτίβο κίνησης που αποδίδουν.

Αρχικά, είναι αναγκαίο να διακριτοποιηθούν οι καταστάσεις των πινάκων A και B. Μέσω της παρατήρησης των κινήσεων που έχουν προσομοιωθεί μέχρι στιγμής, έχει ευρεθεί ότι οι δυνατές καταστάσεις³⁶ είναι τέσσερις, και, ότι είναι οι εξής:

μ, M, μM και μMδ

με το «μ» να σημαίνει «μόνο μικρές τιμές», το «M» «μόνο μεγάλες τιμές», το «μM» «μικρές και μεγάλες τιμές σε μη κανονική διάταξη³⁷» και το «μMδ» «μικρές και μεγάλες τιμές σε διάταξη εναλλασσόμενης εμφάνισης μεγάλης – μικρής τιμής ή το αντίστροφο».

Τώρα, επειδή είναι γνωστές οι δυνατές καταστάσεις των πινάκων που περιέχουν τις διαφορές φάσης, είναι εφικτή η ανάλυση των μοτίβων της κίνησης του ρομπότ. Αυτά είναι 16

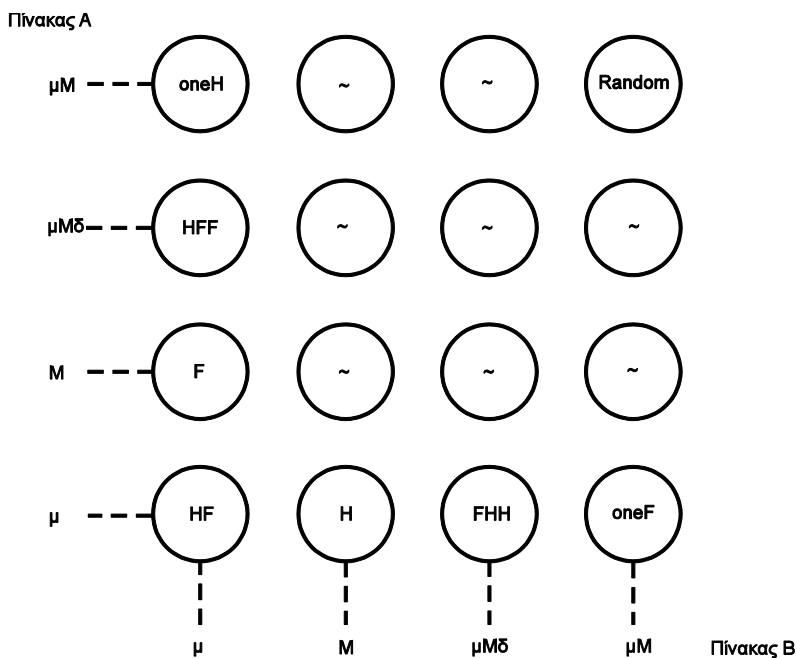
³⁶ Τονίζεται πως οι δυνατές καταστάσεις των πινάκων των τιμών των διαφορών φάσης ευρέθηκαν μέσω παρατήρησης των προσομοιωμένων κινήσεων που έχουν διεξαχθεί μέχρι στιγμής, και όχι μέσω της εφαρμογής κάποιας αναλυτικής μαθηματικής μεθόδου.

³⁷ Διάταξη απεριοδική.

καθώς,

$$4 \text{ (πλήθος δυνατών καταστάσεων πίνακα A)} \times 4 \text{ (πλήθος δυνατών καταστάσεων πίνακα B)} = 16 \text{ (εκ «πρώτης όψεως» δυνατά μοτίβα της μόνιμης κίνησης του ρομπότ).}$$

Παρακάτω παρουσιάζεται το Σχ. 4-9 στο οποίο απεικονίζεται ένα βαθμονομημένο επίπεδο όπου στον κάθε άξονα λαμβάνει τιμές το μέγεθος «τρέχουσα κατάσταση πίνακα». Ο οριζόντιος άξονας αφορά στον πίνακα A και ο κατακόρυφος αφορά στον πίνακα B. Σημειώνεται, εδώ, ότι δεν είναι εφικτοί όλοι οι συνδυασμοί των καταστάσεων των πινάκων A και B, δηλ., δεν είναι παρατηρήσιμα όλα τα μοτίβα. Στο Σχ. 4-9, οι αδύνατοι συνδυασμοί δηλώνονται με “~”.



Σχήμα 4-9. Εξάρτηση μοτίβων από τον εκάστοτε συνδυασμό καταστάσεων των πινάκων A και B.

Αποσκοπώντας στην ανάλυση του Σχ. 4-9, εισάγεται ο παρακάτω πίνακας, Πιν. 4-2, που περιλαμβάνει τις τιμές των πινάκων A και B για τον πρώτο διασκελισμό κάθε μίας εκ των δυνατών *δυσάδων διασκελισμών* με βάση την P – H – F κατηγοριοποίησή τους.

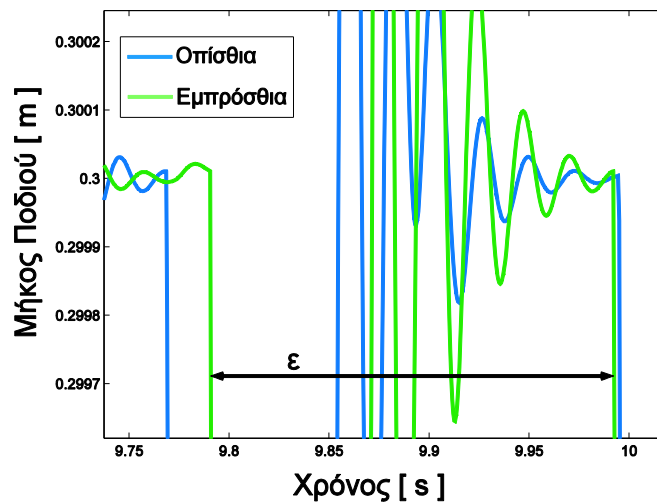
Σχετικά με τις μικρές και μεγάλες τιμές του Πίνακα A, που εμφανίζονται στον Πιν. 4-2, αυτές, αιτιολογούνται με βάση τα Σχ. 4-6 και Σχ. 4-7. Με αντίστοιχο τρόπο, εξηγούνται οι μικρές και μεγάλες τιμές του Πίνακα B. Όσον αφορά στην αδύνατη τιμή του Πίνακα B, αυτή

αποσαφηνίζεται με βάση το, επόμενο, Σχ. 4-10.

Πίνακας 4-2. Αντιστοίχιση των δυνατών δυάδων τύπων διασκελισμού, με τις τιμές των πινάκων A και B για τον πρώτο, εκ των δύο, αντίστοιχων διαδοχικών διασκελισμών.

Δυάδα	Τιμή Πίνακα A	Τιμή Πίνακα B
ΗΗ	Μικρή τιμή	Μεγάλη τιμή
ΗF	Μικρή τιμή	Αδύνατη τιμή
ΕF	Μεγάλη τιμή	Μικρή τιμή
ΕΗ	Αδύνατη τιμή	Μικρή τιμή

Εκεί, καταδεικνύεται η αδυναμία υπολογισμού της διαφοράς φάσης για τον πρώτο εκ των δύο διασκελισμών με βάση τον εναλλακτικό ορισμό, καθώς ανάμεσα σε αυτές τις δύο χρονικές στιγμές προσγείωσης των εμπρόσθιων ποδιών, δεν υπάρχει συμβάν προσγείωσης των οπίσθιων (δηλ., κατά το ευθύγραμμο τμήμα μήκους ϵ).



Σχήμα 4-10. Αδύνατη τιμή της διαφοράς φάσης με βάση τον εναλλακτικό ορισμό για τον πρώτο εκ των δύο διαδοχικών διασκελισμών, Η και F, αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον Πιν. 4-2 είναι δυνατή η ανάλυση των μοτίβων και η αιτιολόγηση του Σχ. 4-9, στο οποίο συνδέονται τα δυνατά μοτίβα με τους δυνατούς συνδυασμούς των τιμών των διαφορών φάσης των πινάκων A (υπολογισμός διαφοράς φάσης με βάση τον κλασσικό ορισμό του διασκελισμού) και B (υπολογισμός διαφοράς φάσης με βάση τον εναλλακτικό ορισμό του διασκελισμού).

Ακολουθεί η ανάλυση κάποιων χαρακτηριστικών μοτίβων. Σε κάθε κίνηση με μοτίβο **H** ανακύπτει μόνο η δυάδα HH, οπότε, όταν αυτό εμφανίζεται, κάθε τιμή του πίνακα A είναι μικρή και κάθε τιμή του πίνακα B είναι μεγάλη. Αντίστροφα, αν κάθε τιμή του πίνακα A είναι μικρή και κάθε τιμή του πίνακα B μεγάλη, τότε, από τον ορισμό των μεγεθών, σε κάθε διασκελισμό τα οπίσθια πόδια προσκρούουν στο έδαφος πρώτα σε σχέση με τα οπίσθια, συνεπώς, το μοτίβο της κίνησης είναι το H.

Με παρόμοιο τρόπο αναλύεται το μοτίβο **F**. Στην εκάστοτε κίνηση μοτίβου **HF** ανακύπτουν οι δυάδες HF και FH, οπότε, οι τιμές του πίνακα A, με βάση τον Πιν. 4-2, είναι μικρές (κάθε μία από αυτές) και το ίδιο ισχύει για τις τιμές του πίνακα B. Αν επιχειρηθεί η αντίστροφη πορεία ευρίσκεται πως αν κάθε τιμή κάθε πίνακα είναι μικρή, τότε, βρίσκεται πως τα ζεύγη των ποδιών προηγούνται εναλλάξ στις προσγειώσεις και συνεπώς το μοτίβο της κίνησης είναι το HF.

Σε κάθε κίνηση με μοτίβο **HFF** ανακύπτουν οι δυάδες HF, FF και FH με *αυτή* τη διάταξη, και επαναλαμβανόμενα. Επομένως, στον πίνακα A εμφανίζονται μικρές και μεγάλες τιμές με εναλλασσόμενο τρόπο και στον πίνακα B μόνο μικρές τιμές. Κατά την αντίστροφη διαδρομή, αν δηλ. οι τιμές του διανύσματος A είναι μικρές και μεγάλες σε διάταξη «μικρή τιμή» - «μεγάλη τιμή», ή το αντίστροφο, και του B είναι όλες μικρές, τότε, από τους ορισμούς των μεγεθών, μετά από ένα διασκελισμό στον οποίο προσγειώνονται πρώτα τα οπίσθια πόδια ακολουθούν δύο διαδοχικοί διασκελισμοί στους οποίους τα εμπρόσθια πόδια προσγειώνονται πρώτα, και, ανά δεύτερο συνεχόμενο διασκελισμό στον οποίο τα εμπρόσθια πόδια προσγειώνονται πρώτα, ακολουθεί διασκελισμός στον οποίο τα οπίσθια πόδια προσγειώνονται πρώτα.

Με αντίστοιχο τρόπο αναλύεται το μοτίβο **FHH**. Σε κάθε κίνηση μοτίβου **one H** ανακύπτουν οι δυάδες HF, FF και FH χωρίς να χαρακτηρίζονται από διατήρηση αυτής της διάταξης ή επαναληψιμότητα όπως π.χ., στο μοτίβο HFF. Άρα, στον πίνακα A εμφανίζονται μικρές ή μεγάλες τιμές σε διάταξη τέτοια ώστε αυτή να μην δύναται να αποσυντεθεί σε μοτίβα που την περιγράφουν και, στον πίνακα B εμφανίζονται μόνο μικρές τιμές. Αν ακολουθηθεί η αντίστροφη πορεία δηλ., από την κατάσταση των πινάκων A και B προς την εύρεση του μοτίβου, τότε, με βάση τους ορισμούς των μεγεθών, θα ευρεθεί πως το μοτίβο της κίνησης είναι το one H.

Με παρεμφερή τρόπο αναλύεται το μοτίβο **one F**. Σε κάθε μόνιμη κίνηση μοτίβου **Random** δεν υπάρχει κάποιο σύνολο δυνάδων οι οποίες να είναι τέτοιες ώστε, επαναλαμβανόμενες, να συνθέτουν την ακολουθία των τύπων διασκελισμών που παρατηρούνται κατά την κίνηση του ρομπότ. Σε αυτή την εργασία, καλείται «μοτίβο» για λόγους ομοιομορφίας στην παρουσίαση των δυνατών καταστάσεων κίνησης. Ίσως να επιδέχεται επιπλέον ανάλυσης, μέσω της διενέργησης ενός *αρκούντως μεγάλου* πλήθους πειραμάτων και της παρατήρησης αυτών, με απώτερο στόχο τον κατακερματισμό (τη διακλάδωσή του) σε δύο ή περισσότερα μοτίβα.

Οι συνδυασμοί που συμβολίζονται με “~”, στο Σχ. 4-9, είναι αδύνατοι. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός (M, μM), είναι αδύνατος, γιατί, από τη στιγμή που υπάρχουν μεγάλες τιμές στο διάνυσμα – πίνακα B, τότε, *θα έπρεπε* να υπάρχουν μικρές τιμές στο διάνυσμα – πίνακα A. Αυτό συμβαίνει, επειδή, κάθε μεγάλη τιμή σε κάποιο πίνακα, αντιστοιχίζεται με δύο μικρές τιμές στον έτερο πίνακα. Με παρόμοιο τρόπο αιτιολογείται η *αδυναμία εμφάνισης* των υπόλοιπων μοτίβων.

Μετά την ανάλυση των μοτίβων κίνησης του ρομπότ, σειρά έχει η αναλυτική έκθεση της μεθόδου υπολογισμού τους.

4.3.3 Υπολογισμός Μοτίβων

Για την επιβεβαίωση της εμφάνισης του εκάστοτε μοτίβου στη μόνιμη κατάσταση μίας προσομοιωμένης κίνησης, αρκεί να ελεγχθεί η κατάλληλη λογική συνθήκη, διαφορετική για κάθε μοτίβο. Παρακάτω, ακολουθεί ο Πιν. 4-3 στον οποίο αντιστοιχίζεται κάθε μοτίβο με την «ιδιοσυνθήκη» του.

Στον Πιν. 4-3, με $\min(A)$ συμβολίζεται το ελάχιστο στοιχείο ενός πίνακα A, με $\max(A)$ το μέγιστό του και με $\mu(p)$ συμβολίζεται η τιμή αληθείας – δηλ., *αληθής* ή *ψευδής* – της δήλωσης «το μοτίβο p χαρακτηρίζει την, υπό εξέταση, προσομοιωμένη μόνιμη κίνηση». Με “ $\neg\mu(p)$ ” σημειώνεται η λογική άρνηση³⁸ της πρότασης $\mu(p)$ και με “ \wedge ” δηλώνεται η λογική πράξη “και”³⁹.

Με “ $|A|$ ” συμβολίζεται το πλήθος των στοιχείων του πίνακα A, και με “ $\text{εν}(A)$ ” συμβολίζεται το πλήθος των εναλλαγών μικρής – μεγάλης τιμής (ή το αντίστροφο), με βάση τη σχέση των

³⁸ $\neg\text{αληθής} = \text{ψευδής}$ και $\neg\text{ψευδής} = \text{αληθής}$.

³⁹ Το αποτέλεσμα της πράξης “και”, είναι *αληθές* αν και μόνο αν, τα δύο ορίσματά της είναι αληθή. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το αποτέλεσμα είναι *ψευδές*.

εκάστοτε διαδοχικών στοιχείων του A^{40} . Το “sth” συμβολίζει μία ποσότητα «αρκούντως μεγάλη»⁴¹ ώστε να διασφαλίζεται η ορθή αναγνώριση των μοτίβων. Τα μοτίβα παρατίθενται με τη σειρά ελέγχου των αντίστοιχων συνθηκών τους.

Πίνακας 4-3. Αντιστοίχιση των μοτίβων με τις συνθήκες υπολογισμού τους.

Μοτίβο	Συνθήκη
H	$\min(B) > \max(A) + sth$
F	$\min(A) > \max(B) + sth$
HF	$(\epsilon v(A) = 0) \wedge (\epsilon v(B) = 0) \wedge (\neg \mu(H)) \wedge (\neg \mu(F))$
One H	$\max(A) > \max(B) + sth$
One F	$\max(B) > \max(A) + sth$
HFF	$(\epsilon v(A) = A - 1) \wedge (\epsilon v(B) = 0)$
FHH	$(\epsilon v(B) = B - 1) \wedge (\epsilon v(A) = 0)$
Random	$(\neg \mu(H)) \wedge (\neg \mu(F)) \wedge (\neg \mu(HF)) \wedge (\neg \mu(OneF)) \wedge$ $\wedge (\neg \mu(OneH)) \wedge (\neg \mu(HFF)) \wedge (\neg \mu(FHH))$

⁴⁰ Π.χ. $\epsilon v([\mu, M, M, M, \mu, M, M, M, \mu, M]) = 5$, $\epsilon v([M, M, \dots, M]) = 0$, $\epsilon v([\mu, \mu, \dots, \mu]) = 0$, $\epsilon v([\mu, M, \mu, M, \dots, \mu, M]) = \epsilon v([M, \mu, M, \mu, M, \dots, M, \mu]) = (\text{πλήθος στοιχείων του πίνακα εισόδου}) - 1$ κ.λπ., όπου, το μ αντιστοιχεί σε «μικρή» τιμή και το M σε «μεγάλη» τιμή. Γενικά,

$\epsilon v(A(1)) = 0$, και, $\epsilon v(A(1..n)) = \epsilon v(A(1..n-1)) + 1$ αν $\{T(A(n-1)) \neq T(A(n))\}$, αλλιώς, $\epsilon v(A(1..n-1))$, με $n = |A|$ και,

$T(\text{num}) = \mu$ αν {η τιμή num είναι «μικρή»}, αλλιώς, M .

Με $A(1..a)$ συμβολίζεται ο πίνακας που περιέχει τα πρώτα a , το πλήθος, διαδοχικά στοιχεία του πίνακα A (δηλ., τα $A(1), A(2), \dots, A(a)$, με $A = [A(1), A(2), \dots, A(n)]$). Οι τιμές « μ » και « M » εξαντλούν το σύνολο τιμών της $T(\cdot)$, δηλ., $\text{Target}(T) = \{\mu, M\}$. Επίσης, $A(1) = A(1..1)$.

⁴¹ Στο πλαίσιο της εργασίας, χρησιμοποιείται ο αριθμός 35 ως τιμή της μεταβλητής sth. Αν και, οποιοσδήποτε αριθμός που ανήκει στο $[15, 40)$ είναι αποτελεσματικός λόγω ότι το 40 είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ μικρών και μεγάλων τιμών, και, το 15, είναι η μέγιστη απόσταση, που έχει παρατηρηθεί, ανάμεσα σε τιμές «ίδιου» τύπου.

Στην επόμενη παράγραφο, προκειμένου να διευρυνθεί η γνώση περί της φύσης των μοτίβων, εισάγεται η έννοια των χαρτών Poincaré και πραγματοποιείται η χρήση αυτής.

4.3.4 Χάρτες Poincaré

Ένας χάρτης Poincaré (βλ. [8]), αποτελεί μέσο παρατήρησης της συμπεριφοράς του δυναμικού συστήματος για το οποίο συντάσσεται. Μέσω αυτού γίνεται επισκόπηση του σχήματος της «επιλογής δυναμικών καταστάσεων», από το υπό εξέταση σύστημα.

Ως δυναμική κατάσταση, στο σύγγραμμα αυτό, θεωρείται η διατεταγμένη n – άδα των (n το πλήθος) μεταβλητών που περιγράφουν το ρομπότ «μαθηματικά» και που ανακύπτουν κατά τη μοντελοποίησή του για κάποιο συγκεκριμένο, «συμφωνημένο», σταθερό σημείο της περιοδικής του τροχιάς.

Στην μελέτη για τετράποδα ρομπότ που ακολουθεί ως μεταβλητές για χρήση στα διαγράμματα Poincaré επιλέγονται η τιμή της γωνίας pitch⁴² του σώματος και της πρώτης της χρονικής παραγώγου όταν το ρομπότ βρίσκεται στο μέγιστο ύψος αναπήδησής του (σημείο όπου μεγιστοποιείται η τιμή της τεταγμένης του ΚΜ του, ανά διασκελισμό). Σημειώνεται εδώ πως είναι δυνατή η επιλογή διαφορετικών μεταβλητών για χρήση στα διαγράμματα Poincaré, όπως π.χ. η τεταγμένη κέντρου μάζας και η πρόσθια ταχύτητα, καθώς και η επιλογή διαφορετικών σημείων παρατήρησης της τροχιάς του ρομπότ, όπως το σημείο της τροχιάς όπου η τεταγμένη του ΚΜ του ρομπότ ελαχιστοποιείται κ.λπ.

Ακολουθούν δύο παράγραφοι, η πρώτη σχετίζεται με μία κάπως «μαθηματικοποιημένη» περιγραφή των χαρτών Poincaré και η δεύτερη με τη χρήση τους.

4.3.4.1 Ορισμός Χάρτη Poincaré

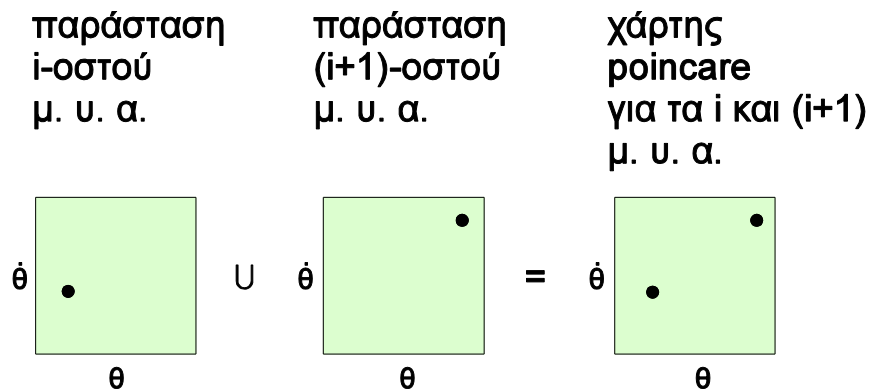
Ακολουθεί ο ορισμός του χάρτη Poincaré στο πλαίσιο – τουλάχιστον – αυτής της εργασίας.

Ο χάρτης Poincaré, για δεδομένη προσομοιωμένη κίνηση του ρομπότ, είναι ένα βαθμονομημένο επίπεδο (οριζόντιος άξονας – γωνία pitch του σώματος, κατακόρυφος άξονας

⁴² Γωνία pitch: Στο πλαίσιο της εργασίας συμβολίζεται με θ και αποτελεί τη γωνία που ανακύπτει κατά την ανάλυση του ρομπότ στο διάμηκες επίπεδο η οποία αφορά στην «προς τα πάνω» ή «προς τα κάτω» στροφή του σώματός του, για σταθερή θέση αυτού (ώστε η κίνηση που σκιαγραφείται στην υποσημείωση αυτή να αποτελεί «καθαρή στροφή»).

– πρώτη χρονική παράγωγος της γωνίας pitch του σώματος) που έχει προκύψει από την ένωση⁴³ ενός πλήθους στοιχειωδών βαθμονομημένων επιπέδων όπου το καθένα από αυτά αφορά σε κάποιο μέγιστο ύψος αναπήδησης (μ.υ.α.) του ρομπότ. Πάλι, στον οριζόντιο άξονα κάθε τέτοιου στοιχειώδους επιπέδου λαμβάνει τιμές η γωνία pitch και στον κατακόρυφο η πρώτη χρονική παράγωγός της. Ακολουθεί το Σχ. 4-11, στο οποίο αποσαφηνίζεται η κατασκευή των χαρτών Poincaré, και το Σχ. 4-12, το οποίο, αποτελεί παράδειγμα ενός χάρτη Poincaré.

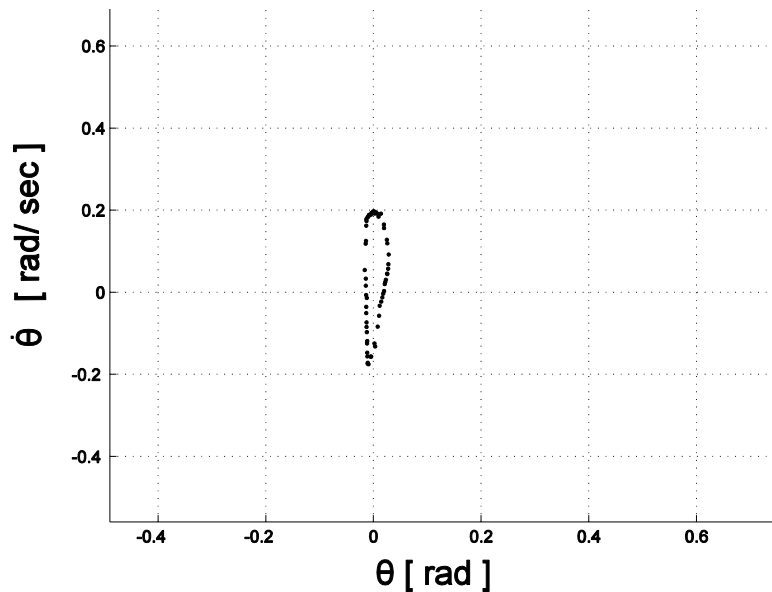
Στο Σχ. 4-11 παρατηρούνται δύο στοιχειώδεις χάρτες Poincaré, οι οποίοι, συντιθέμενοι, δημιουργούν ένα «μίνι» χάρτη Poincaré για δύο διαδοχικά μέγιστα ύψη αναπήδησης. Στην παρούσα εργασία, ως χάρτης Poincaré, θεωρείται ο χάρτης που «λαμβάνει υπόψη του κάθε μέγιστο ύψος αναπήδησης» της μόνιμης κατάστασης.



Σχήμα 4-11. Χάρτης Poincaré για τα μέγιστα ύψη αναπήδησης δύο διαδοχικών διασκελισμών.

Τώρα, παρατίθεται ένας χάρτης Poincaré που αφορά στη μόνιμη κατάσταση κάποιας προσομοιωμένης κίνησης του ρομπότ (κίνηση με μοτίβο Random). Κάθε μία εκ των μαύρων κουκίδων, που εμφανίζονται, αφορά σε κάποιο μέγιστο ύψος αναπήδησης.

⁴³ Με την αφηρημένη – συνολοθεωρητική – έννοια, δηλαδή, δεν επιτρέπονται πολλαπλές εμφανίσεις στοιχείων κ.λπ.



Σχήμα 4-12. Παράδειγμα χάρτη Poincaré.

4.3.4.2 Χρήση Χαρτών Poincaré στην Εποπτεία Μοτίβων

Σε αυτή την παράγραφο εφαρμόζεται η αρχή των χαρτών Poincaré στην επισκόπηση των μοτίβων. Παρακάτω θα παρουσιαστούν ορισμένοι χάρτες Poincaré με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της φύσης τους.

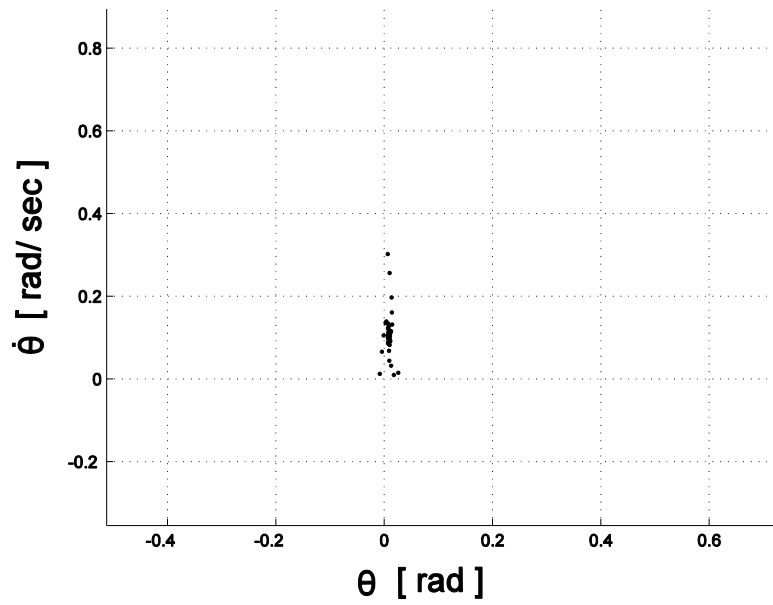
Σχετικά με την παρουσίαση αυτών των χαρτών στη συνέχεια, το βάθος ανάλυσης:

βήμα⁴⁴ του οριζώντιου άξονα × βήμα του κατακόρυφου άξονα = 0.20 rad × 0.20 rad/ sec,

είναι σταθερό και ίδιο για όλα τα διαγράμματα για λόγους συγκρισιμότητας κάθε διαγράμματος με κάθε ένα εκ των υπολοίπων.

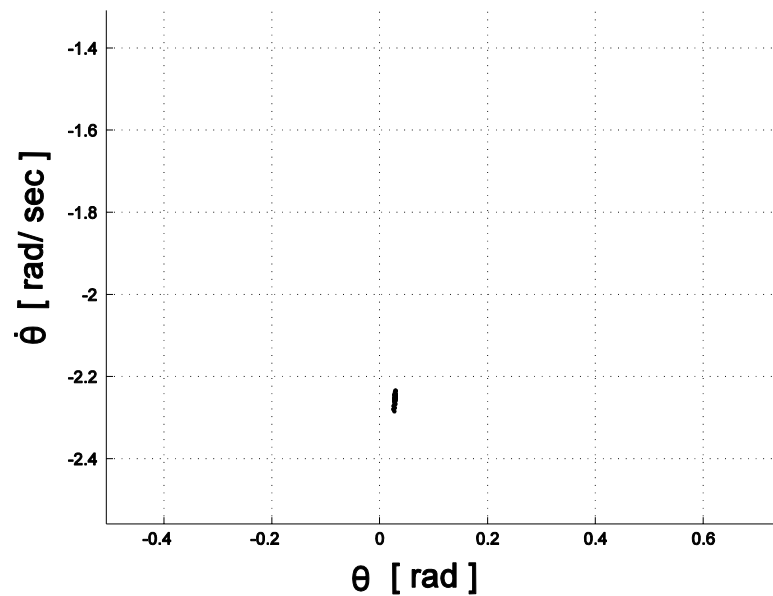
Αρχικά παρουσιάζεται ένα διάγραμμα Poincaré για μία περίπτωση μόνιμης κίνησης με μοτίβο H. Όπως παρατηρείται, κάθε κουκίδα – αντίστοιχη κάποιας δυναμικής κατάστασης, δηλ., κάποιου μέγιστου ύψους αναπήδησης – βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε να σχηματίζεται ένας «πόλος έλξης» (ή «έλκτης», attractor) των δυναμικών καταστάσεων. Αυτός είναι ένας διαφορετικός τρόπος επόπτευσης μίας κίνησης με μοτίβο H και το αποτέλεσμα του είναι διαισθητικά «λογικό» (ένας τύπος διασκελισμού → ένας πόλος έλξης).

⁴⁴ Με το «βήμα», εννοείται, εδώ, η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές σημειωμένες θέσεις του εκάστοτε άξονα.



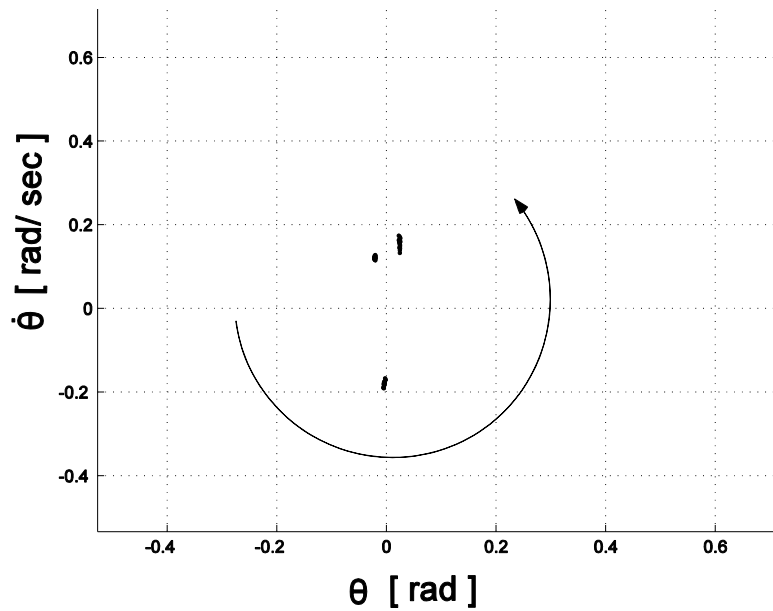
Σχήμα 4-13. Χάρτης Poincaré για το μοτίβο H.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε ένα αντίστοιχο διάγραμμα για το μοτίβο F.



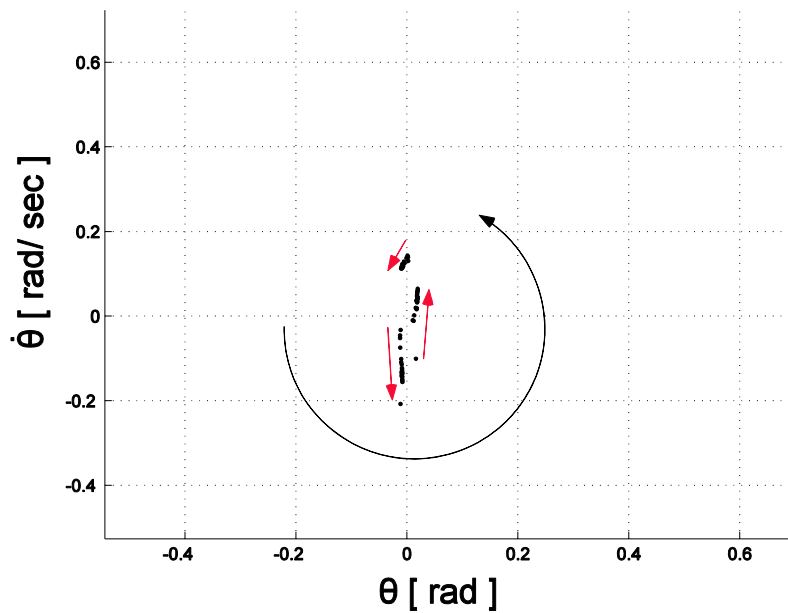
Σχήμα 4-14. Χάρτης Poincaré για το μοτίβο F.

Ακολουθούν τα μοτίβα HFF και FHH. Πρώτα θα παρουσιαστεί το διάγραμμα για το μοτίβο HFF.



Σχήμα 4-15. Χάρτης Poincaré για το μοτίβο HFF.

Ακολουθεί το σχήμα του διαγράμματος Poincaré για το μοτίβο FHH.



Σχήμα 4-16. Χάρτης Poincaré για το μοτίβο FHH.

Παρατηρείται σε αυτό το σημείο, ότι η αξιοποίηση των διαγραμμάτων Poincaré στην επισκόπηση των μοτίβων έχει εξαντληθεί, καθώς, τα υπόλοιπα δυνατά μοτίβα που έχουν

παρατηρηθεί⁴⁵, χαρακτηρίζονται από κάποιο βαθμό απροσδιοριστίας ή ασάφειας στην αναπαράστασή τους (π.χ. στο μοτίβο one F, το πλήθος των διασκελισμών τύπου H που βρίσκονται ανάμεσα στα ζεύγη διασκελισμών τύπου F δεν είναι σταθερό ανά περίπτωση εμφάνισής του).

4.3.5 Κριτική επί των Μοτίβων

Τέλος, ως «κριτική» επί των μοτίβων της Παρ. 4.3 και των χαρακτηριστικών τους, γράφονται τα εξής:

1. Τα μοτίβα που αναλύονται εδώ, υπολογίζονται από διαδικασίες που περιλαμβάνουν ολοκλήρωση διαφορικών εξισώσεων με αριθμητικές μεθόδους οι οποίες είναι ευαίσθητες στην μεταβολή των παραμέτρων που τις ρυθμίζουν, όπως π.χ. το μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης, για κάποια μέθοδο μεταβλητού βήματος κ.λπ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, αρκετά συχνά, την μεταβολή του μοτίβου (συνήθως προς το μοτίβο Random, το «συνηθέστερο μοτίβο») που χαρακτηρίζει την κίνηση.
2. Αν για οποιοδήποτε εξ' αυτών των μοτίβων, ο αναγνώστης επιθυμήσει να εποπτεύσει την συνέπειά τους, με τη χρήση κάποιου περιβάλλοντος οπτικής αναπαράστασης της μόνιμης κίνησης του ρομπότ, θα διαπιστώσει πως αυτό είναι αδύνατο στις περισσότερες περιπτώσεις, γιατί, συνήθως, η χρονική απόσταση μεταξύ της προσγείωσης ενός ζεύγους ποδιών του ρομπότ και του άλλου, είναι αρκετά μικρή ώστε να μην είναι αντιληπτή μέσω οπτικής παρατήρησης με γυμνό μάτι. Για παράδειγμα, για κάποια περίπτωση κίνησης με μοτίβο HFF, δύναται να μην είναι οπτικά αντιληπτές οι περιπτώσεις της κίνησης όπου τα εμπρόσθια πόδια προσκρούουν πρώτα στο έδαφος (γράμματα F) σε σχέση με τα οπίσθια, μετά από κάποια μεγάλη φάση πτήσης, και αντ' αυτού, να φαίνεται ότι προσγειώνονται μαζί τα εμπρόσθια και τα οπίσθια πόδια για δύο συνεχόμενους διασκελισμούς μετά από ένα διασκελισμό όπου τα οπίσθια πόδια προσγειώνονται πρώτα. Από την άλλη μεριά, αυτό το φαινόμενο ίσως εμφανιστεί για τον διασκελισμό τύπου H, που ανήκει

⁴⁵ Υπενθύμιση: Το μοτίβο HF δεν έχει παρατηρηθεί σε κάποια προσομοιωμένη κίνηση του ρομπότ, μέχρι τη στιγμή που γράφονται αυτές οι γραμμές.

στην προαναφερόμενη τριάδα HFF. Η συμπεριφορά αυτή, εξηγείται αν ληφθεί υπόψη η γεωμετρία του ρομπότ, η οποία, αφορά σε άκαμπτο, ευθυτενές, σώμα και πόδια τα οποία δεν είναι δυνατό να αναδιπλώνονται κατά την κίνησή του καθώς διαθέτουν μόνο ένα περιστροφικό βαθμό ελευθερίας ανά πόδι.

3. Τα δυνατά μοτίβα, όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 4, δεν περιλαμβάνουν και δεν καλύπτουν τις περιπτώσεις μόνιμης κίνησης όπου τα ζεύγη ποδιών προσγειώνονται ταυτόχρονα (περίπτωση *καθαρού pronk*, διαφορά φάσης ίση με το μηδέν), για οποιοδήποτε πλήθος διασκελισμών – περιόδων που συμμετέχουν στη σύσταση του μοτίβου που περιγράφει την εκάστοτε από αυτές.
4. Τα μοτίβα που έχουν παρατηρηθεί – μέχρι στιγμής – στις προσομοιωμένες κινήσεις του ρομπότ με βάση το μοντέλο A (μοντέλο με πόδια χωρίς μάζα), είναι τα H και One F. Όσον αφορά στις προσομοιωμένες κινήσεις του ρομπότ με βάση το μοντέλο B (μοντέλο με πόδια με μάζα), είναι δυνατή η επισκόπηση των μοτίβων H, F, One F, One H, HFF, FHH και Random. Τα παραπάνω επαληθεύονται, μερικώς, μέσω διαγραμμάτων που αφορούν σε διασκελισμούς προσομοιωμένων κινήσεων του ρομπότ, στο Κεφ. 5.

5 Πειραματικά Αποτελέσματα και Ανάλυση

Στο Κεφ. 5, χρησιμοποιείται η διαδικασία υπολογισμού των διαγραμμάτων Hildebrand, που εισάχθηκε στο Κεφ. 4, για την παραγωγή των κατάλληλων, κάθε φορά, γραφημάτων βηματισμού (gait graphs), με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της εκάστοτε παραμέτρου στα ποσοτικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τους βηματισμούς του ρομπότ (βλ. Παρ. 5.2). Η διαδικασία εκτελείται για κάθε ένα από τα μοντέλα του ρομπότ που αναπτύχθηκαν στο Κεφ. 3. Υπενθυμίζεται, πως,

Μοντέλο Α: Το μοντέλο του ρομπότ με πόδια **χωρίς** μάζα (βλ. Παρ. 3.4.1), και,

Μοντέλο Β: Το μοντέλο του ρομπότ με πόδια **με** μάζα (βλ. Παρ. 3.4.2).

Τέλος, μελετάται η επίδραση κάποιων εκ των παραμέτρων του ρομπότ ή του περιβάλλοντός του στην αδιάστατη σχετική δυσκαμψία των ποδιών (βλ. Παρ. 5.4).

5.1 Παρουσίαση Μοτίβων, Ονομαστικές Τιμές Παραμέτρων και Μέθοδος Ανάλυσης

Στην Παρ. 5.1 παρουσιάζονται οι ονομαστικές τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται από το περιβάλλον προσομοιώσεων, κάποιες πληροφορίες σχετικές με την *σημείωση* των μοτίβων στα παραγόμενα gait graphs, καθώς και η μέθοδος ανάλυσης των αποτελεσμάτων που θα αποκτηθούν σε αυτό το κεφάλαιο.

5.1.1 Οπτική Παρουσίαση Μοτίβων

Στα gait graphs που θα παραχθούν εδώ, παρουσιάζεται, εκτός των άλλων⁴⁶, το *σχήμα κατανομής* των διάφορων μοτίβων σε σχέση με τη μεταβολή της εκάστοτε παραμέτρου, με την αρωγή διάφορων χρωμάτων – ένα για κάθε μοτίβο. Στον Πιν. 5-1, που παρατίθεται, αντιστοιχίζεται κάθε μοτίβο με το «χρώμα του».

5.1.2 Ονομαστικές Τιμές Παραμέτρων

Επιπλέον, εισάγεται παρακάτω, με τη μορφή πίνακα (Πιν. 5-2), μία *αποτίμηση των παραμέτρων*⁴⁷ που χρησιμοποιούνται – γενικά – στις προσομοιώσεις.

5.1.3 Μέθοδος Ανάλυσης

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων, θεωρείται πως μόνο οι μεταβολές άνω του 5% είναι αξιοσημείωτες και, άρα, παρουσιάζονται εδώ ως τέτοιες. Το 5%, θεωρείται πως είναι «μικρό

Πίνακας 5-1. Αντιστοίχιση μοτίβων με τα χρώματα παρουσιάσής τους.

Μοτίβο	Χρώμα (RGB τριάδα⁴⁸)
H	Φούξια (1 1 0)
F	Καφέ (0.7 0.5 0.2)
One H	Κυανό (0 1 1)
One F	Πράσινο (0 1 0)
HFF	Μπλε (0 0 1)
FHH	Κόκκινο (1 0 0)
HF	Πορτοκαλί (1 0.5 0.2)
Random	Μαύρο (0 0 0)

⁴⁶ Εκτός, δηλαδή, της έκθεσης της επίδρασης της εκάστοτε παραμέτρου στους επιλεγόμενους, από το ρομπότ, διασκελισμούς.

⁴⁷ Αποτίμηση των παραμέτρων, με την έννοια της αντιστοίχισής τους με τιμές.

⁴⁸ *Μέρη* συμμετοχής του κάθε χρώματος εκ των τριών βασικών, δηλ., το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε (**R**ed, **G**reen, **B**lue), π.χ.: «αραιώνουμε ένα μέρος πράσινου σε ένα μέρος μπλε, ώστε, να δημιουργήσουμε δύο μέρη κυανού».

Πίνακας 5-2. Ονομαστικές τιμές των παραμέτρων του ρομπότ, του περιβάλλοντός του, των συνθηκών της κίνησής του και του δυναμικού ελέγχου του.

Παράμετρος	Τιμή (Μονάδα Μέτρησης)
Μάζα σώματος	8.00 (kg)
Μεσοαπόσταση μηρών	0.25 (m)
Ασυμπίεστο μήκος ποδιού	0.30 (m)
Σταθερά ελατηρίου ποδιού	6800.00 (N/ m)
Συντελεστής απωλειών ποδιών	10.00 (N· s/ m)
Βαρυτική Έλξη	Γη ⁴⁹ : 9.81, Άρης: 3.77, Σελήνη: 1.61, Δίας: 24.79 (m/ s ²)
Κλίση εδάφους	0.00 (rad)
Αρχικό ύψους αναπήδησης ΚΜ σώματος	Γη/ Δίας: 0.35, Άρης/ Σελήνη: 0.32 (m)
Αρχική πρόσθια ταχύτητα ΚΜ σώματος	Γη/ Δίας: 0.60, Άρης: 0.50, Σελήνη: 0.30 (m/ s)
Αρχική γωνιακή ταχύτητα σώματος	0.50 (rad/ s)
Αρχική κατακόρυφη ταχύτητα ΚΜ σώματος	0.00 (m/ s)
Αρχική γωνία pitch σώματος	0.00 (rad)
Επιθυμητή τιμή πρόσθιας ταχύτητας	Γη/ Δίας: 1.00, Άρης: 0.50, Σελήνη: 0.30 (m/ s)
Επιθυμητή τιμή ύψους αναπήδησης	0.32 (m)
Άνω μάζα ποδιού (αν υπάρχει)	0.50 (kg)
Κάτω μάζα ποδιού (αν υπάρχει)	0.06 (kg)
Μάζα πέλματος ποδιού (αν υπάρχει)	0.05 (kg)
Απόσταση μεταξύ άνω μάζας και μηρού	0.283 · l ₀ ⁵⁰ (m)
Απόσταση μεταξύ κάτω μάζας και πέλματος	0.350 · l ₀ (m)

⁴⁹ Ο ονομαστικός πλανήτης είναι η Γη.

⁵⁰ Με l₀, συμβολίζεται το ελεύθερο, ασυμπίεστο, μήκος του ποδιού.

ποσοστό» στο πλαίσιο της εργασίας, επειδή έχει παρατηρηθεί ότι διαφορές μέχρι 5% στα μεγέθη που περιγράφουν τον διασκελισμό αντιστοιχούν σε διασκελισμούς που ελεγχόμενοι με οπτικό τρόπο⁵¹ ομοιάζουν «αρκετά».

5.2 Μελέτη Βηματισμών

Σε αυτή την παράγραφο, θα μελετηθεί εκτενώς η επίδραση των διάφορων παραμέτρων του ρομπότ, του περιβάλλοντός του κ.λπ., στην κίνηση που αυτό εκτελεί, για κάθε ένα από τα μοντέλα της δυναμικής περιγραφής του.

Θα μελετηθεί η επίδραση των κατασκευαστικών παραμέτρων του ρομπότ, η επίδραση των επιθυμητών τιμών των ελεγχόμενων μεγεθών, η επίδραση των αρχικών συνθηκών της κίνησής του και, τελικώς, η επίδραση των χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος στο οποίο κινείται.

Σε κάθε παράγραφο στην οποία ελέγχεται η επίδραση κάποιας μεταβλητής, μεταβάλλεται μόνο αυτή η μεταβλητή. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές και είναι ίσες προς τις αντίστοιχες ονομαστικές τους τιμές.

Τονίζεται, πως, δεν επιτυγχάνει κάθε επιχειρούμενη προσομοιωμένη κίνηση και, από αυτές που επιτυγχάνουν, δεν χαρακτηρίζονται όλες από την *ύπαρξη* μόνιμης – περιοδικής κατάστασης. Τα εύρη μεταβολής των παραμέτρων, που αναφέρονται παρακάτω, αφορούν στις *επιχειρούμενες προσομοιώσεις*. Επίσης, επί καθενός εκ των γραφημάτων βηματισμού (δηλ., των gait graphs), που ακολουθούν, το οποίο αφορά σε συγκεκριμένο μοντέλο του ρομπότ, σημειώνονται η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της αντίστοιχης μεταβαλλόμενης παραμέτρου οι οποίες «επιτυγχάνουν» με τον εξής συμβολισμό,

Min: ένδειξη ελάχιστης επιτυχούσας τιμής, και,

Max: ένδειξη μέγιστης επιτυχούσας τιμής.

5.2.1 Επίδραση Κατασκευαστικών Παραμέτρων

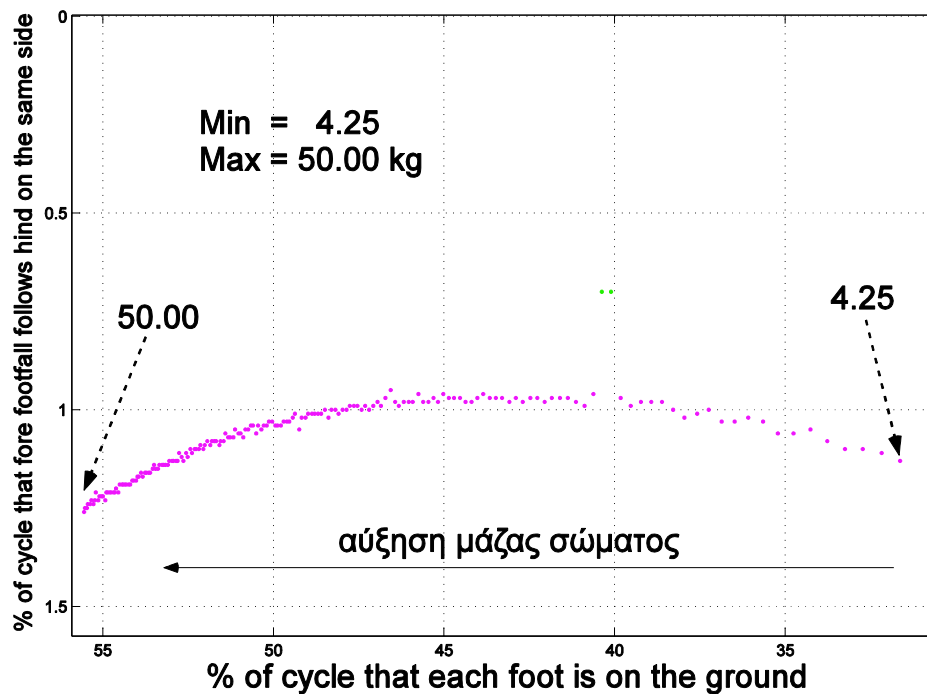
Οι κατασκευαστικές παράμετροι που θα μελετηθούν είναι η μάζα του σώματος, η

⁵¹ Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μέσω ενός περιβάλλοντος οπτικής εποπτείας προσομοιωμένων κινήσεων, υλοποιημένο σε γλώσσα VRML από τον Ι. Κοντολάτη.

μεσοαπόσταση των μηρών, το ασυμπίεστο μήκος των ποδιών και η υποχωρητικότητα τους. Επίσης, θα μελετηθεί ο συντελεστής απωλειών των ποδιών.

5.2.1.1 Επίδραση Μάζας Σώματος

Αρχικά, παρατίθεται το διάγραμμα που παριστάνει το gait graph που δημιουργείται, για το μοντέλο A (Σχ. 5-1), αν μεταβληθεί η τιμή της μάζας σώματος του ρομπότ από 0.00 kg μέχρι 50.00 kg με βήμα 0.25 kg.

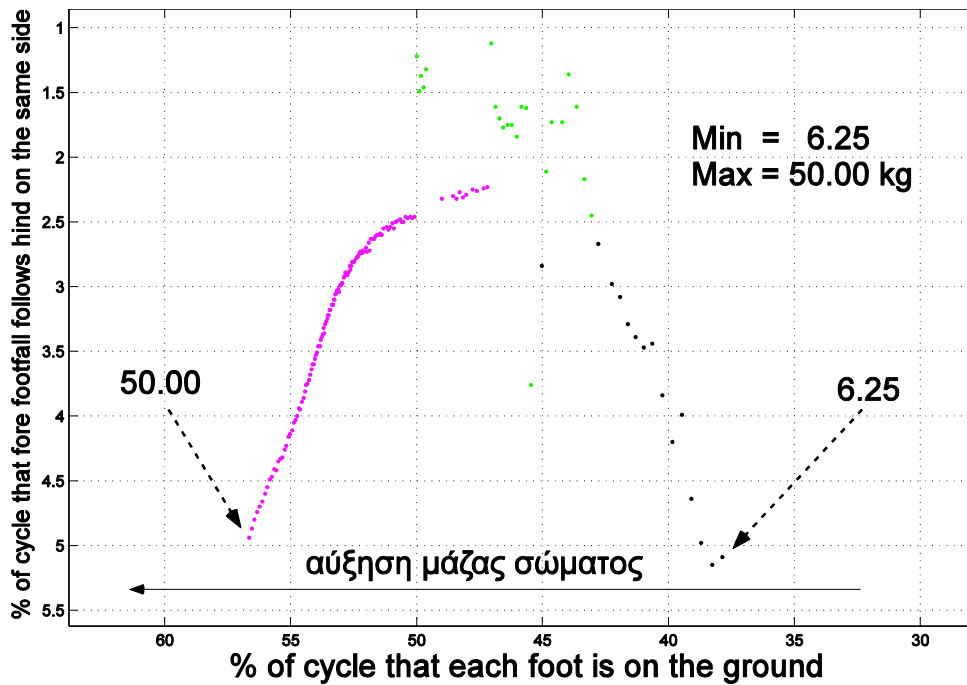


Σχήμα 5-1. Επίδραση μάζας σώματος για το μοντέλο A.

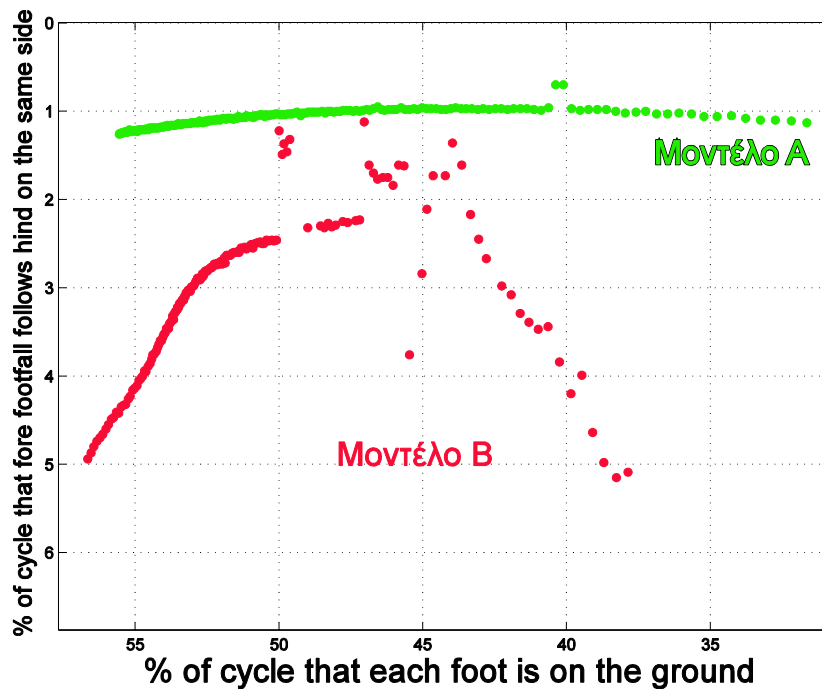
Έπειτα, στο Σχ. 5-2, παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για το μοντέλο B (για το ίδιο εύρος μεταβολής της μάζας σώματος).

Όπως παρατηρείται, ανεξάρτητα του χρησιμοποιούμενου μοντέλου, η αύξηση της μάζας του σώματος οδηγεί σε αύξηση της μέσης τιμής των παραγόντων φόρτισης. Η επίδραση της μάζας στη διαφορά φάσης, για το μοντέλο B, είναι σημαντική. Όσον αφορά στο μοντέλο A, η συνολική μεταβολή της διαφοράς φάσης είναι μικρότερη από 5% και, συνεπώς, η μεταβολή της θεωρείται αμελητέα.

Στο Σχ. 5-3, εμφανίζονται – σε κοινό επίπεδο – τα διαγράμματα των Σχ. 5-1 και Σχ. 5-2, ώστε, να γίνει εμφανής η επίδραση του μοντέλου χρησιμοποιείται.



Σχήμα 5-2. Επίδραση μάζας σώματος για το μοντέλο B.

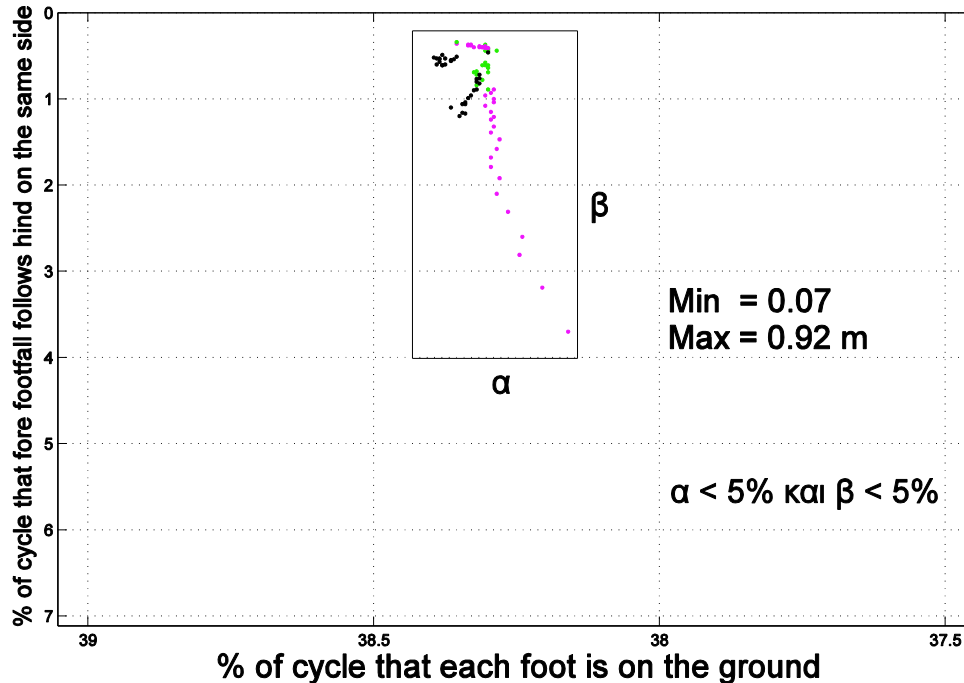


Σχήμα 5-3. Επίδραση μάζας ανά μοντέλο του ρομπότ.

5.2.1.2 Επίδραση Μεσοαπόστασης Μηρών

Για τη μελέτη της μεσοαπόστασης των μηρών, για το μοντέλο A, παρουσιάζεται το gait graph

για μεταβολή της από 0.00 m μέχρι 4.00 m με βήμα 0.01 m (Σχ. 5-4).



Σχήμα 5-4. Επίδραση μεσοαπόστασης μηρών για το μοντέλο A.

Το gait graph που αφορά στο μοντέλο B, εμφανίζεται στο Σχ. 5-5. Όπως παρατηρείται, η επίδραση της μεσοαπόστασης των μηρών δεν είναι σημαντική (για το εκάστοτε μοντέλο του ρομπότ) ούτε για τους παράγοντες φόρτισης ούτε για τη διαφορά φάσης, καθώς, κάθε κουκίδα – πείραμα ανήκει σε κοινό, δεδομένο, ορθογώνιο με μήκος κάθε πλευράς μικρότερο από 5%.

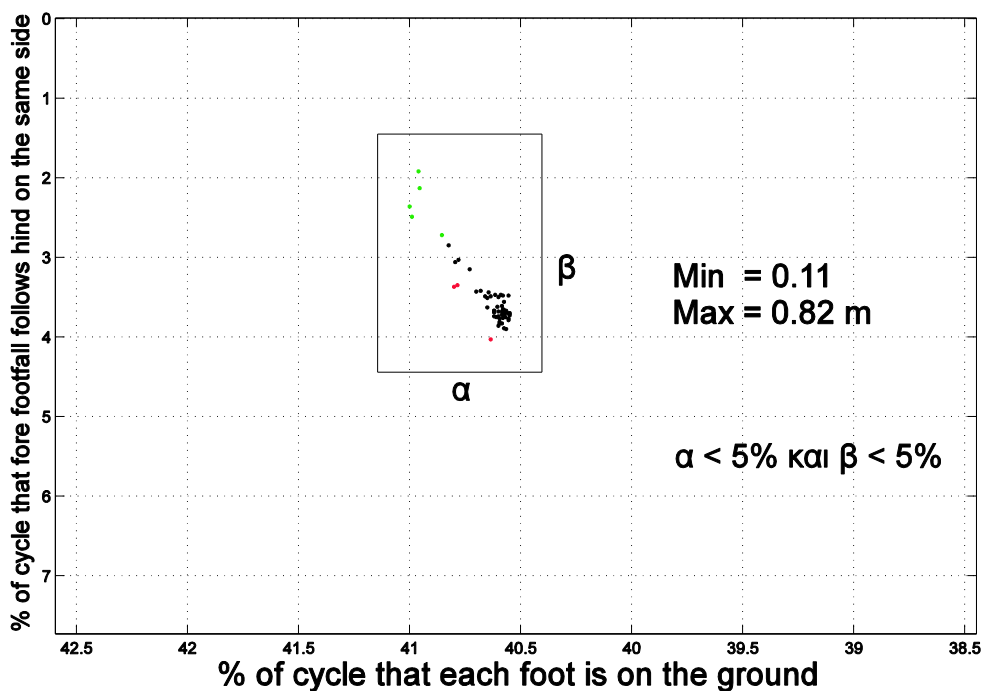
5.2.1.3 Επίδραση Ελεύθερου Μήκους Ποδιών

Αρχικά, παρουσιάζεται το gait graph για το μοντέλο A στο Σχ. 5-7. Το ασυμπίεστο μήκος ποδιού μεταβάλλεται από 0.00 m μέχρι 4.00 m με βήμα 0.01 m. Ακολουθεί το γράφημα για το μοντέλο B στο Σχ. 5-8.

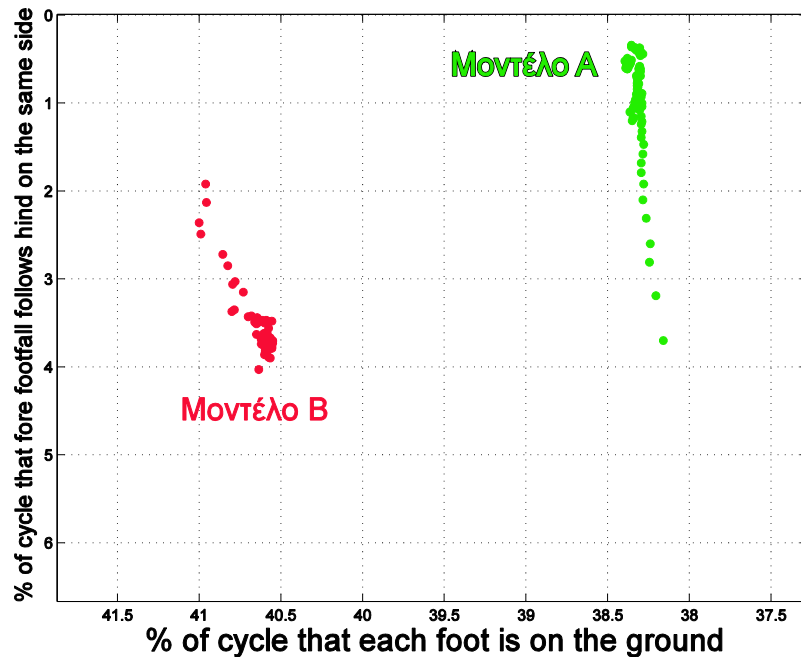
Όπως παρατηρείται, μέσω των βελών, η αύξηση του ελεύθερου μήκους των ποδιών οδηγεί σε αύξηση των παραγόντων φόρτισης⁵². Δεν παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή στη διαφορά φάσης.

⁵² Το αποτέλεσμα αυτό, έρχεται σε συμφωνία με την παρατήρηση της κίνησης των *ξυλοπόδαρων*. Αυτή, είναι τέτοια ώστε τα πόδια τους να βρίσκονται «αρκετά συχνά» – σε σχέση με την εκάστοτε χρονική διάρκεια του μέσου παρατηρούμενου διασκελισμού τους – σε επαφή με το έδαφος.

Για την μελέτη του ελεύθερου μήκους ποδιών, λόγω της υψηλής παρατηρούμενης



Σχήμα 5-5. Επίδραση μεσοαπόστασης μηρών για το μοντέλο B.



Σχήμα 5-6. Επίδραση μεσοαπόστασης μηρών ανά μοντέλο του ρομπότ.

απεριοδικότητας των προσομοιωμένων κινήσεων, το κριτήριο διαχωρισμού είναι ίσο με 0.019 m (βλ. Παρ. 4.2.1) και η μόνιμη κατάσταση αποτελείται τουλάχιστον από 20 διασκελισμούς

(βλ. Παρ. 4.2.1). Οι απαιτήσεις για τον υπολογισμό της μόνιμης κατάστασης είναι, δηλ., « πιο χαλαρές».

5.2.1.4 Επίδραση Υποχωρητικότητας Ποδιών

Για την μελέτη της επίδρασης της υποχωρητικότητας του ποδιού, εισάγεται σε πρώτη φάση το gait graph για το μοντέλο A (Σχ. 5-10). Η υποχωρητικότητα μεταβάλλεται από 0 N/ m μέχρι 20000 N/ m με βήμα 100 N/ m.

Η ανάλυση συνεχίζεται με το gait graph του μοντέλου B (Σχ. 5-11). Όπως παρατηρεί κάποιος, η αύξηση της υποχωρητικότητας των ποδιών οδηγεί σε μείωση των παραγόντων φόρτισης. Η επίδραση της υποχωρητικότητας των ποδιών στη διαφορά φάσης θεωρείται, και εδώ, αμελητέα, επειδή, η συνολική της μεταβολή είναι μικρότερη του 5%.

5.2.1.5 Επίδραση Συντελεστή Απωλειών Ποδιών

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η επίδραση, στα χαρακτηριστικά του εκάστοτε επιλεγόμενου διασκελισμού, του συντελεστή απωλειών των ποδιών. Για το μοντέλο A, το Σχ. 5-13 περιγράφει τη φύση της επίδρασης αυτής για μεταβολή του συντελεστή απωλειών από 0.00 N·s/m μέχρι 50.00 N·s/m με βήμα 0.25 N·s/m. Το Σχ. 5-14 αφορά στο μοντέλο B, για τη μεταβολή του ίδιου μεγέθους.

Παρατηρείται, για κάθε μοντέλο, πως, αν αυξηθεί ο συντελεστής απωλειών των ποδιών, τότε, αυξάνεται η διαφορά φάσης. Όσον αφορά στο μοντέλο A η μεταβολή του συντελεστή απωλειών των ποδιών οδηγεί και σε μείωση των παραγόντων φόρτισης.

5.2.2 Επίδραση Επιθυμητών Τιμών των Ελεγχόμενων Μεγεθών

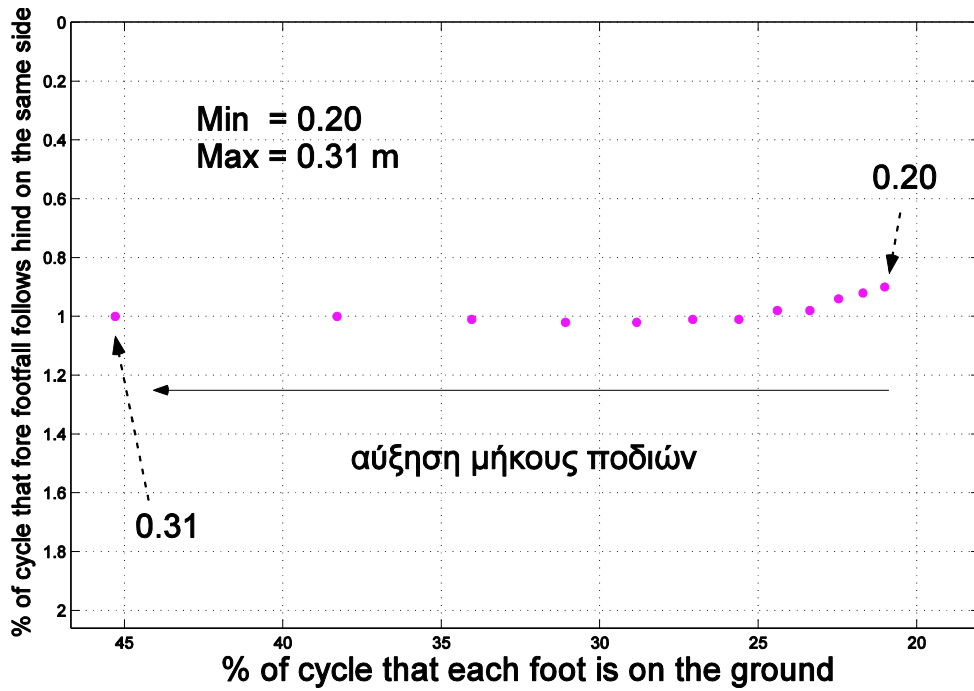
Εδώ, αναλύεται η επίδραση των επιθυμητών τιμών των ελεγχόμενων μεγεθών στο βηματισμό του ρομπότ. Τα ελεγχόμενα μεγέθη είναι το ύψος αναπήδησης και η πρόσθια ταχύτητα του ΚΜ του.

5.2.2.1 Επίδραση Επιθυμητού Ύψους

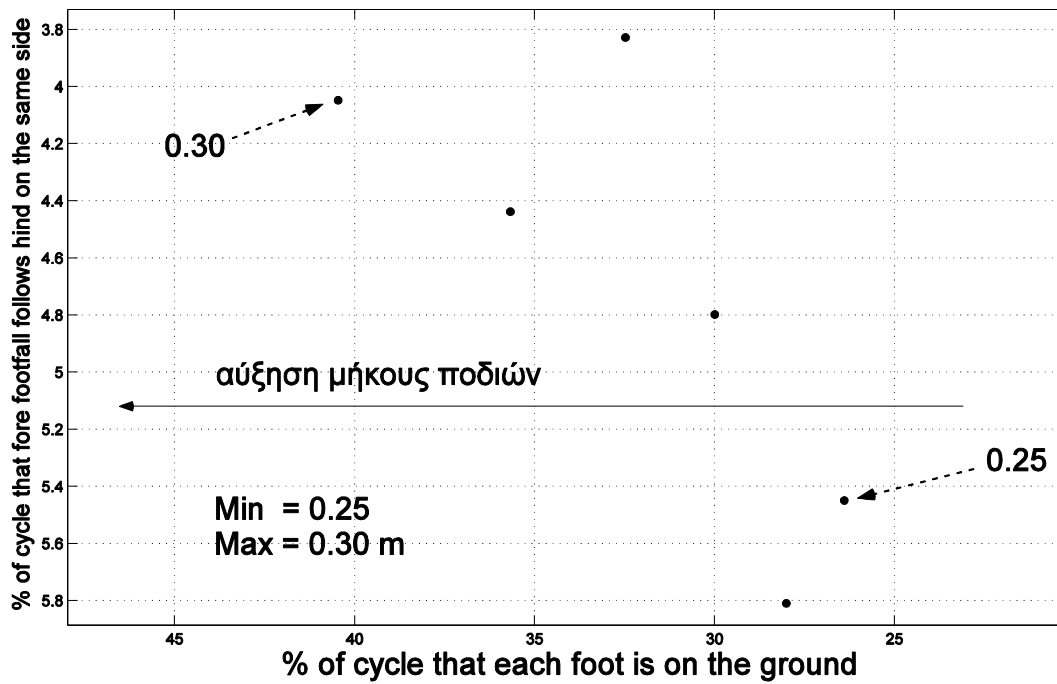
Στην αρχή, αναλύεται η επίδραση του επιθυμητού ύψους για το μοντέλο A (Σχ. 5-16) μέσω ενός gait graph για μεταβολή του επιθυμητού ύψους από 0.00 m μέχρι 4.00 m με βήμα 0.01 m. Έπειτα αναλύεται η επίδραση αυτού για το μοντέλο B (Σχ. 5-17).

Φαίνεται, πως, η αύξηση του επιθυμητού ύψους του ΚΜ του σώματος του ρομπότ, οδηγεί

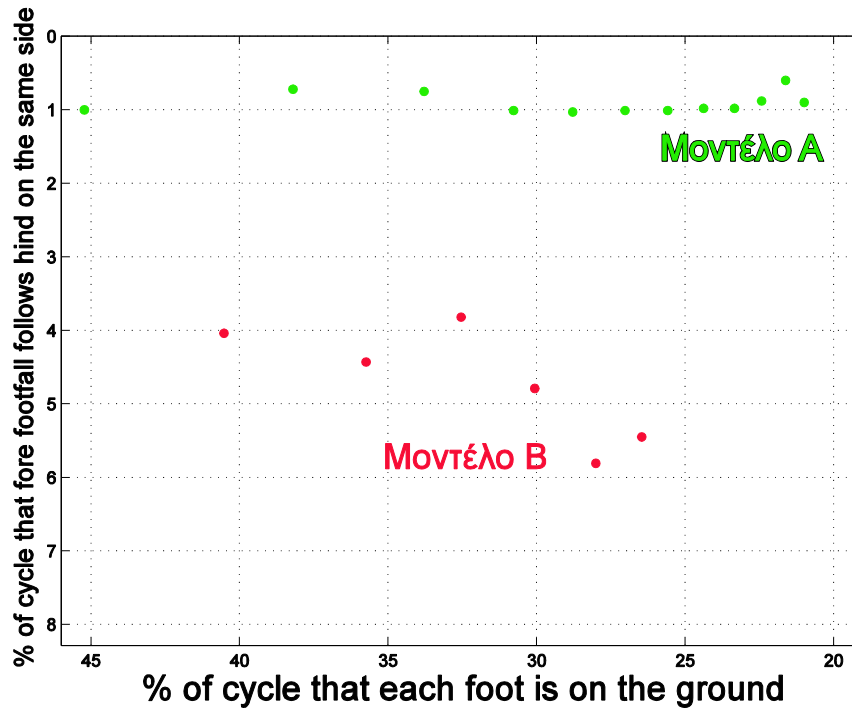
σε μείωση των παραγόντων φόρτισης, ανεξάρτητα από το μοντέλο που χρησιμοποιείται. Δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες διακυμάνσεις στην τιμή της διαφοράς φάσης.



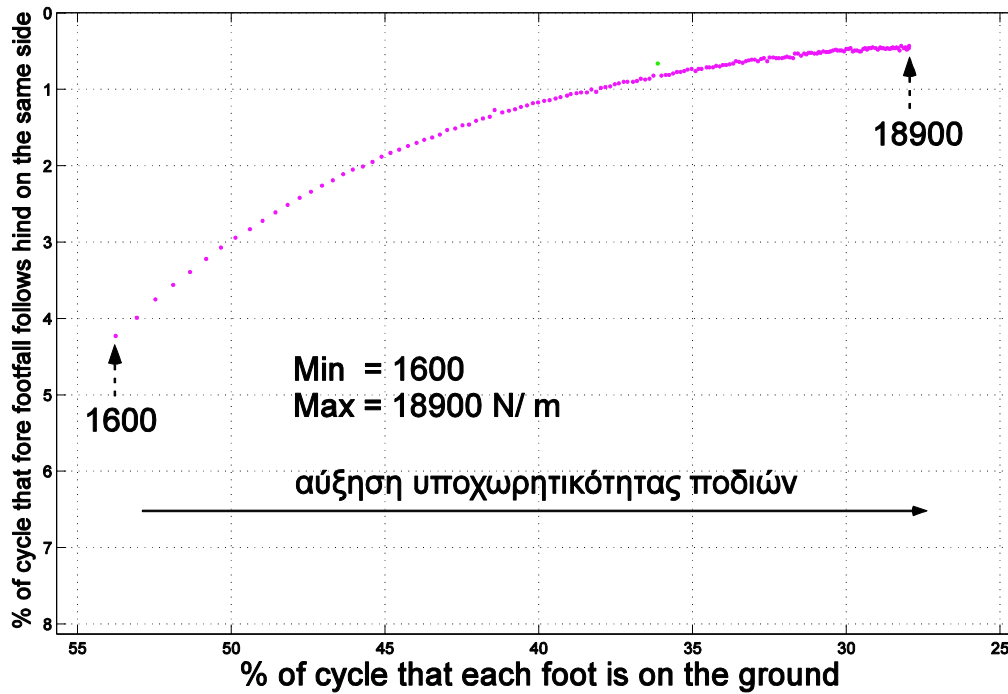
Σχήμα 5-7. Επίδραση ελεύθερου μήκους ποδιών για το μοντέλο Α.



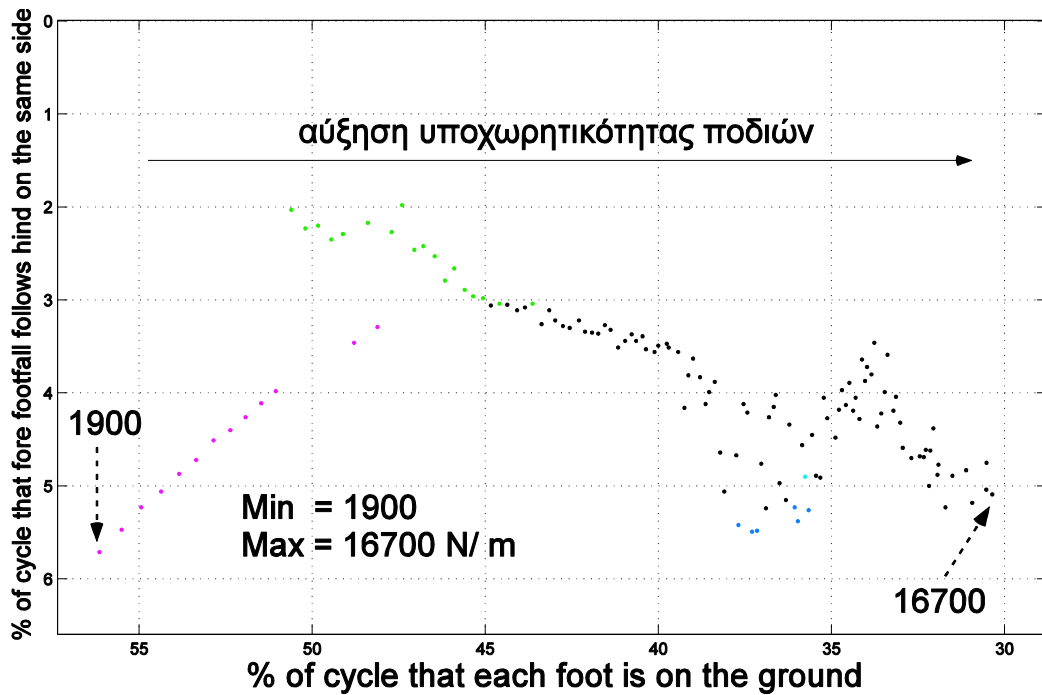
Σχήμα 5-8. Επίδραση ελεύθερου μήκους ποδιών για το μοντέλο Β.



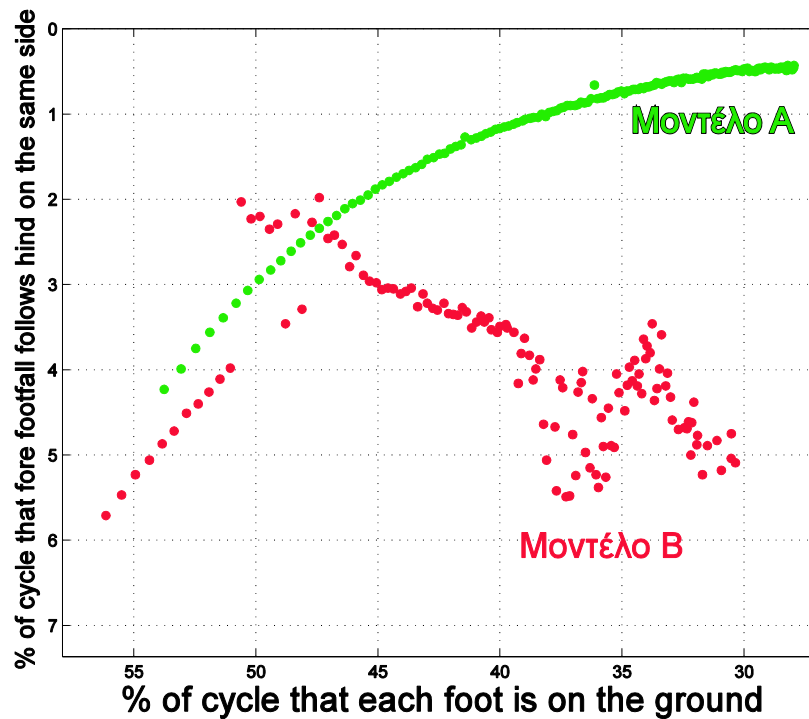
Σχήμα 5-9. Επίδραση ελεύθερου μήκους ποδιών ανά μοντέλο του ρομπότ.



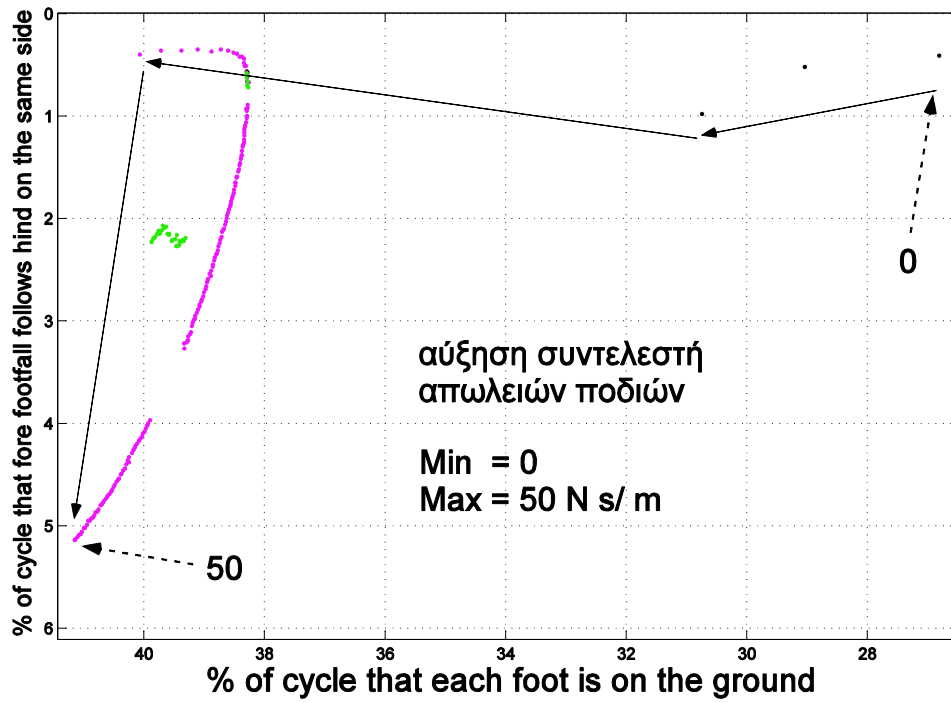
Σχήμα 5-10. Επίδραση υποχωρητικότητας ποδιών για το μοντέλο A.



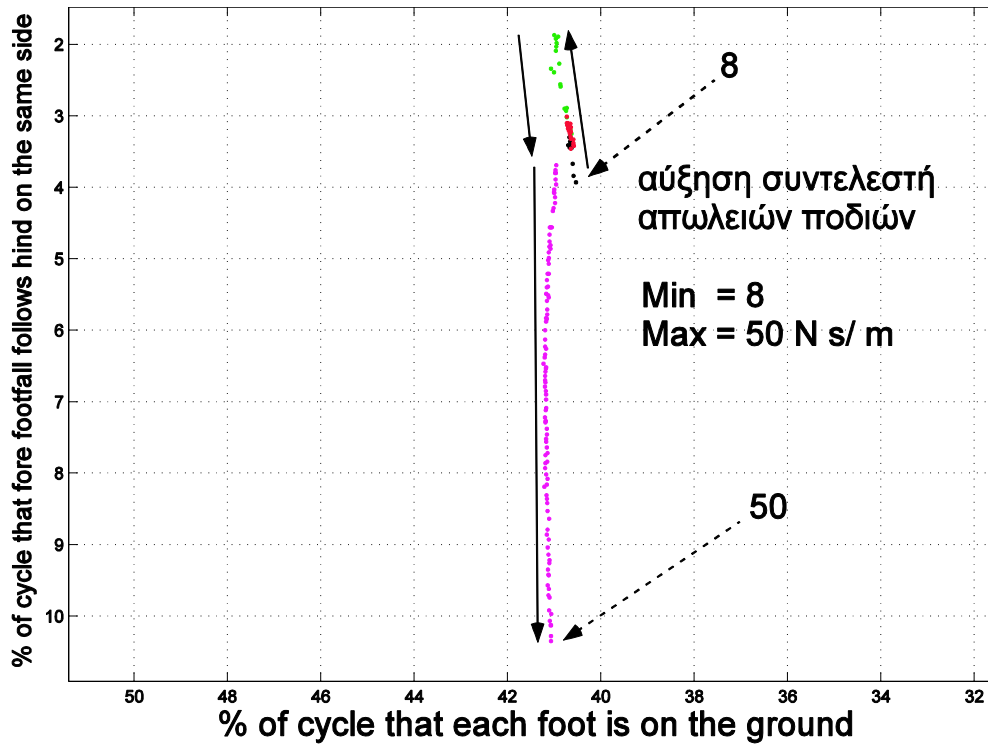
Σχήμα 5-11. Επίδραση υποχωρητικότητας ποδιών για το μοντέλο Β.



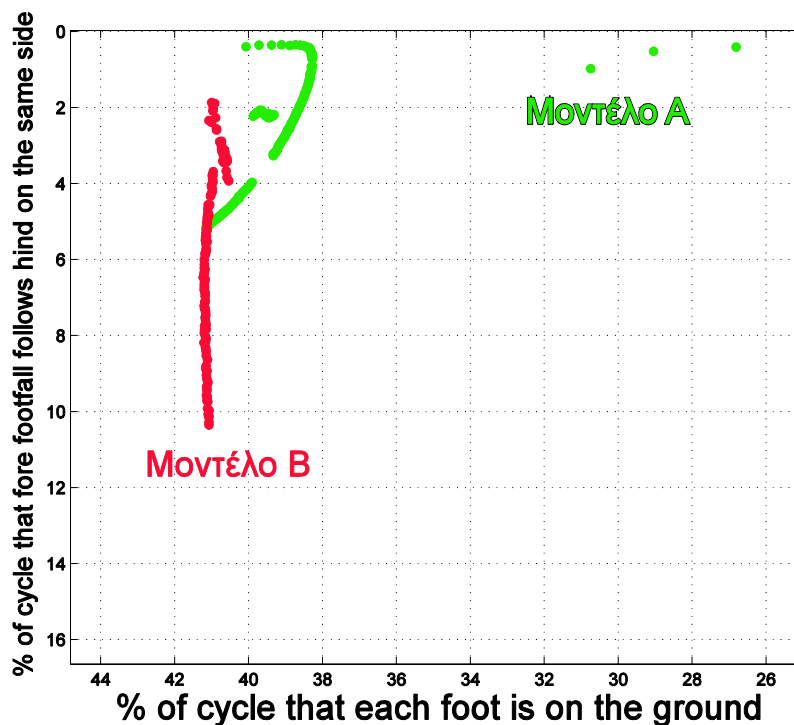
Σχήμα 5-12. Επίδραση υποχωρητικότητας ποδιών ανά μοντέλο του ρομπότ.



Σχήμα 5-13. Επίδραση συντελεστή απωλειών ποδιών, για το μοντέλο Α.



Σχήμα 5-14. Επίδραση συντελεστή απωλειών ποδιών, για το μοντέλο Β.



Σχήμα 5-15. Επίδραση συντελεστή απωλειών ποδιών ανά μοντέλο του ρομπότ.

Για την μελέτη του επιθυμητού ύψους, λόγω της υψηλής παρατηρούμενης απεριοδικότητας των προσομοιωμένων κινήσεων, το κριτήριο διαχωρισμού είναι ίσο με 0.019 m (βλ. Παρ. 4.2.1) και η μόνιμη κατάσταση αποτελείται, τουλάχιστον, από 20 διασκελισμούς – περιόδους (βλ. Παρ. 4.2.1).

5.2.2.2 Επίδραση Επιθυμητής Πρόσθιας Ταχύτητας

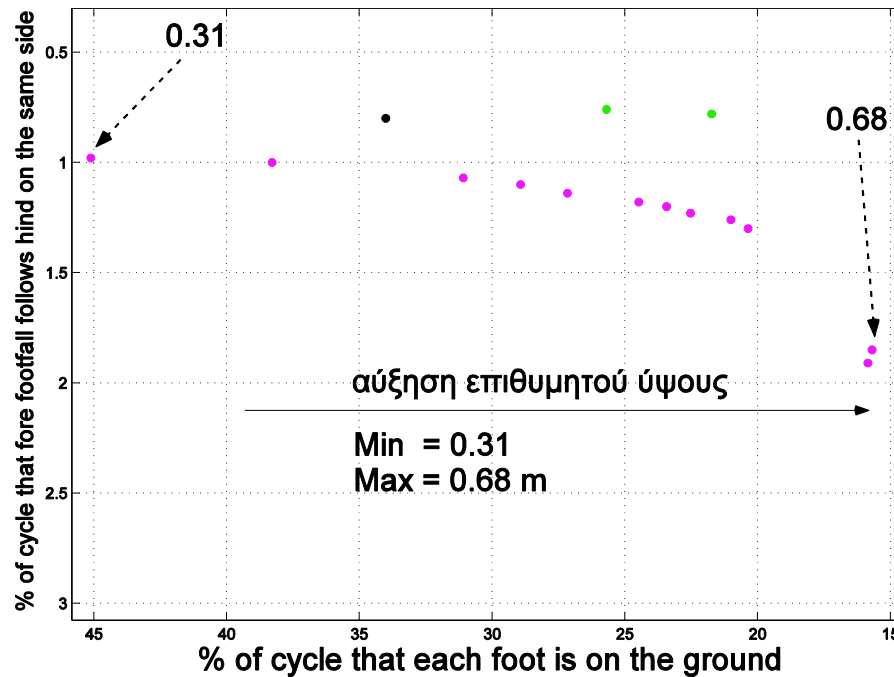
Η επίδραση της επιθυμητής ταχύτητας εποπτεύεται, για το μοντέλο B, στο γράφημα βηματισμού του Σχ. 5-19 για μεταβολή της από 0.00 m/ s μέχρι 4.00 m/ s με βήμα 0.01 m/ s. Μετά, ακολουθεί το γράφημα βηματισμού που αφορά στο μοντέλο B (Σχ. 5-20).

Το αποτέλεσμα της μεταβολής είναι η αύξηση της διαφοράς φάσης για το μοντέλο B, και η μείωση των παραγόντων φόρτισης για το μοντέλο A. Δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη μεταβολή στη διαφορά φάσης για το μοντέλο A ή στους παράγοντες φόρτισης για το μοντέλο B.

5.2.3 Επίδραση Αρχικών Συνθηκών

Όπως θα παρατηρηθεί παρακάτω (βλ. Παρ. 5.2.3.1, Παρ. 5.2.3.2 και Παρ. 5.2.3.3), η

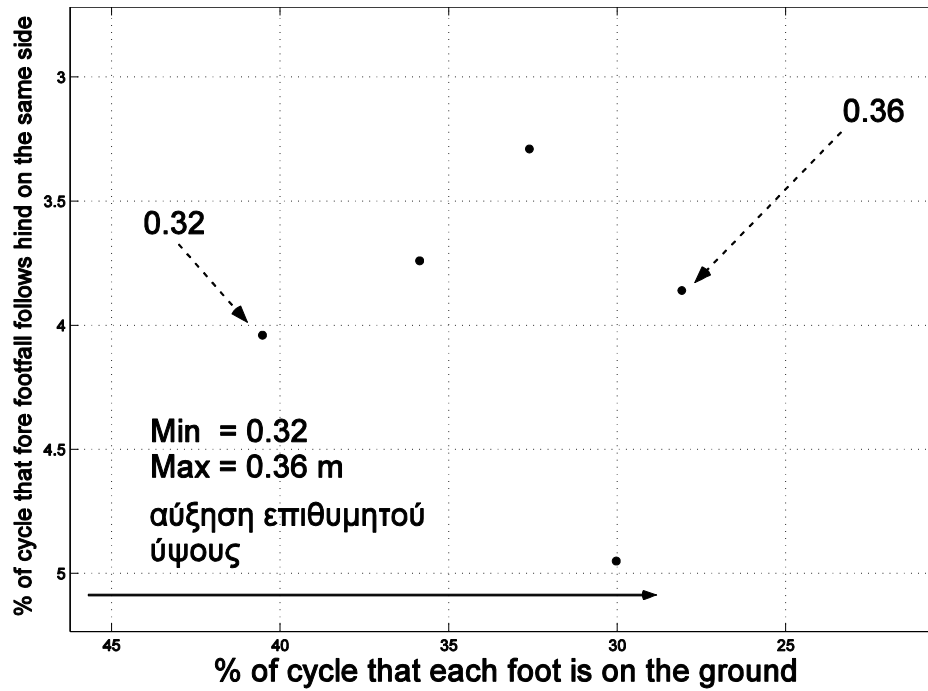
επίδραση των αρχικών συνθηκών της κίνησης στον *τελικώς επιλεγόμενο διασκελισμό* δεν είναι σημαντική, ανεξάρτητα από το μοντέλο που χρησιμοποιείται. Αυτό, απορρέει από ότι για μεταβολή οποιουδήποτε εξ' αυτών των μεγεθών, κάθε κουκίδα που είναι αντίστοιχη κάποιου διασκελισμού και που εμφανίζεται στο αντίστοιχο gait graph, ανήκει στην εσωτερική επιφάνεια ενός ορθογωνίου του οποίου κάθε πλευρά δεν υπερβαίνει το 5%.



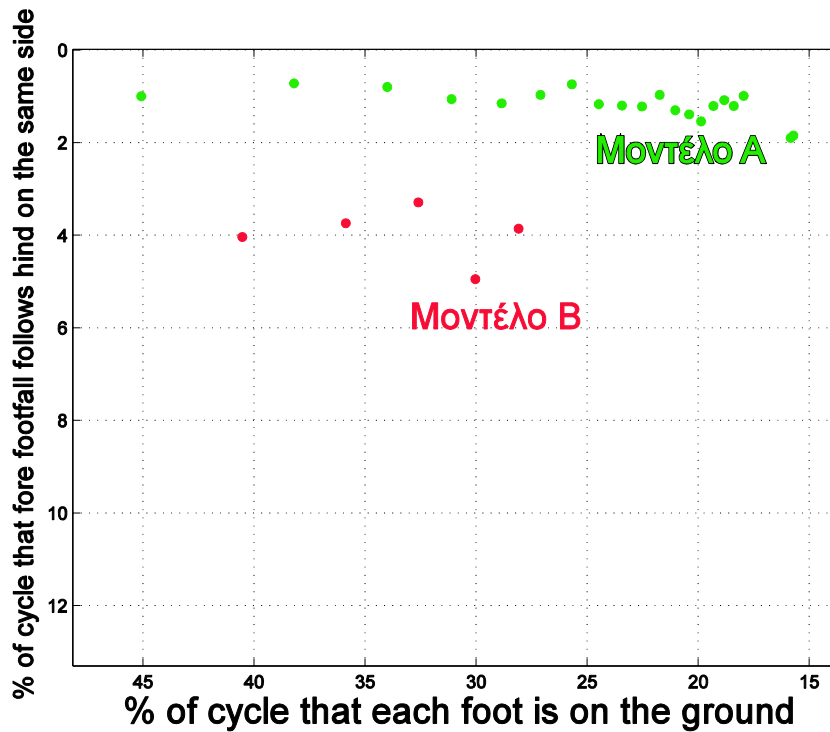
Σχήμα 5-16. Επίδραση επιθυμητού ύψους ΚΜ σώματος για το μοντέλο Α.

Η κύρια αιτία στην οποία οφείλεται αυτή η συμπεριφορά, είναι η «καλή λειτουργία» του συστήματος ελέγχου του ρομπότ, το οποίο, αποσβένει την επίδραση των αρχικών συνθηκών και οδηγεί σε παρεμφερείς, κινητικά, δυναμικές καταστάσεις. Ισοδύναμα, το σύστημα ελέγχου προσπαθεί να οδηγήσει το ρομπότ στην υιοθέτηση ενός passive gait ανεξάρτητα από τις αρχικές συνθήκες.

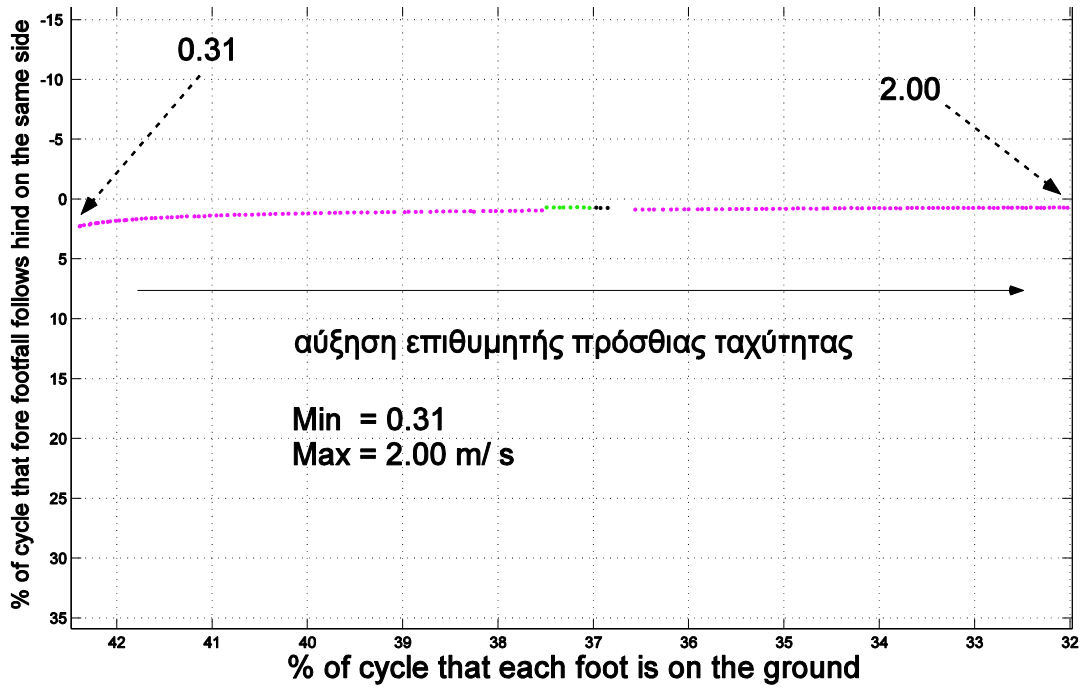
Οι αρχικές συνθήκες που μελετούνται παρακάτω, είναι η αρχική πρόσθια ταχύτητα, η αρχική γωνιακή ταχύτητα και το αρχικό ύψος του ΚΜ.



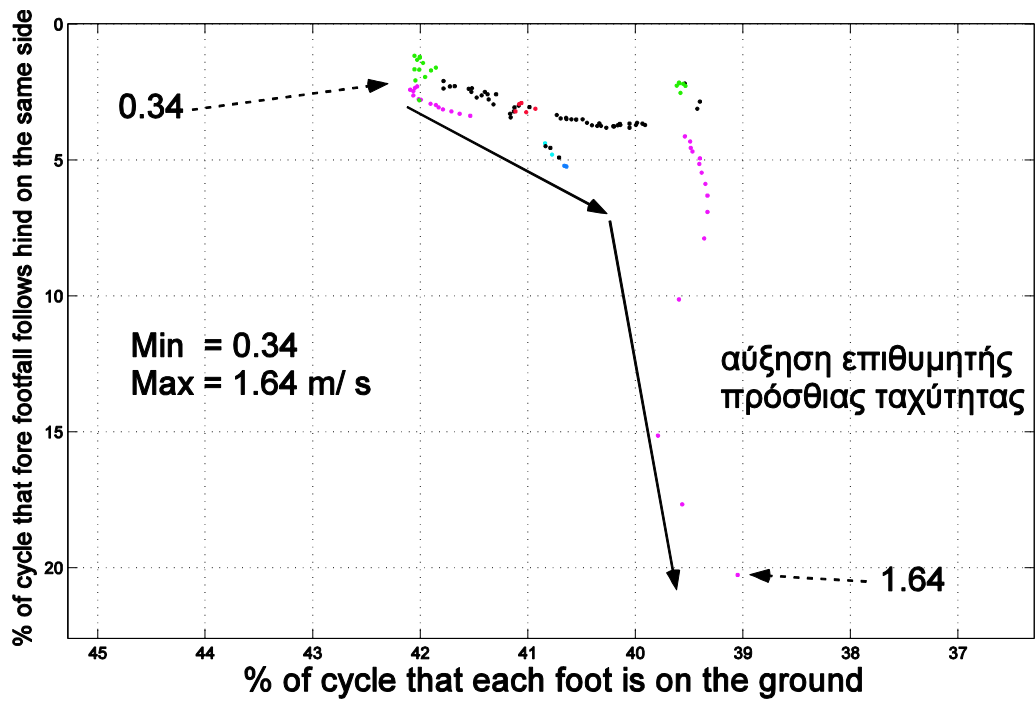
Σχήμα 5-17. Επίδραση επιθυμητού ύψους ΚΜ σώματος για το μοντέλο Β.



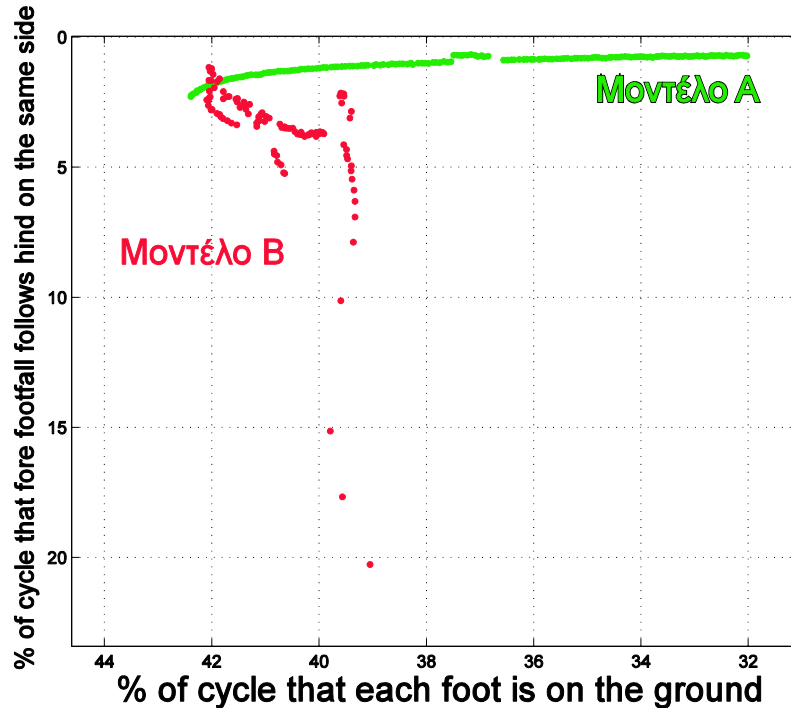
Σχήμα 5-18. Επίδραση επιθυμητού ύψους ΚΜ σώματος ανά μοντέλο του ρομπότ.



Σχήμα 5-19. Επίδραση επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας για το μοντέλο A.



Σχήμα 5-20. Επίδραση επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας για το μοντέλο B.



Σχήμα 5-21. Επίδραση επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας ανά μοντέλο του ρομπότ.

5.2.3.1 Επίδραση Αρχικής Πρόσθιας Ταχύτητας

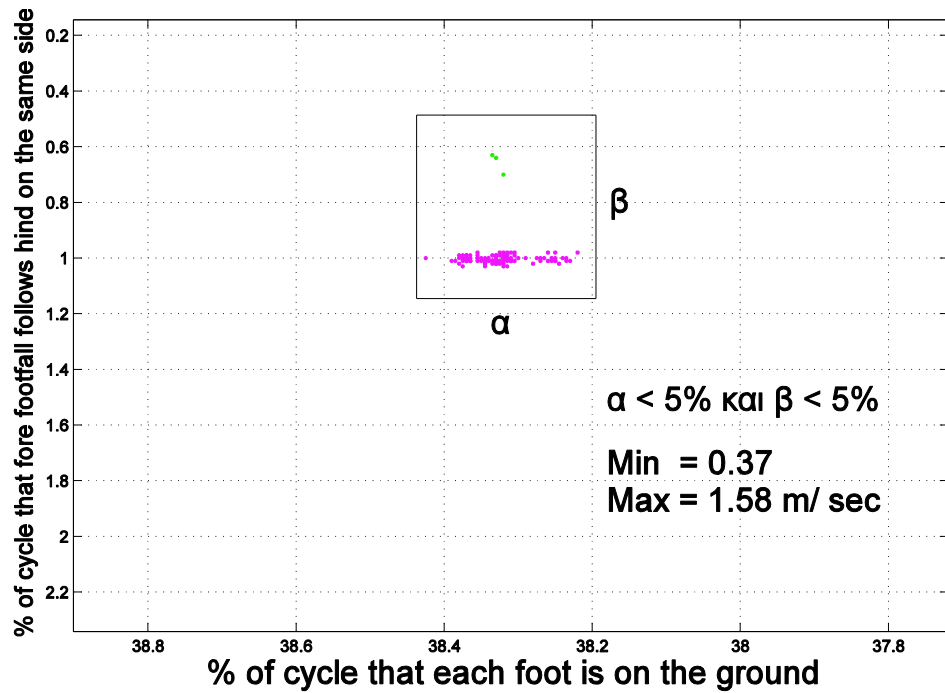
Η τιμή της επιθυμητής τιμής της πρόσθιας ταχύτητας στην παρακάτω ανάλυση μεταβάλλεται από 0.00 m/ s μέχρι 4.00 m/ s με βήμα 0.01 m/ s. Ακολουθεί το gait graph για το μοντέλο A (Σχ. 5-22). Σειρά έχει το gait graph για το μοντέλο B (Σχ. 5-23).

5.2.3.2 Επίδραση Αρχικής Γωνιακής Ταχύτητας

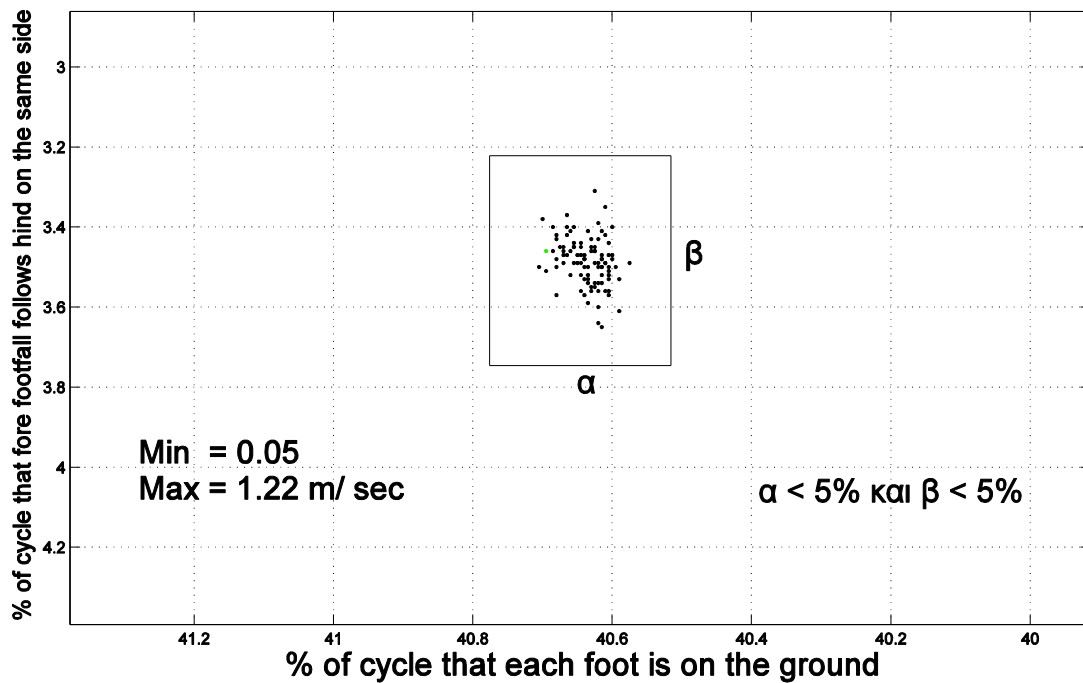
Το gait graph που αφορά στο μοντέλο A παρουσιάζεται στο Σχ. 5-25. Η τιμή της αρχικής γωνιακής ταχύτητας, ανεξάρτητα από το εκάστοτε μοντέλο του ρομπότ, μεταβάλλεται από - 1.50 μέχρι 1.50 με βήμα 0.01 (τιμές σε rad/ s). Το gait graph για το μοντέλο B παρατίθεται στο Σχ. 5-26.

5.2.3.3 Επίδραση Αρχικού Ύψους Κέντρου Μάζας

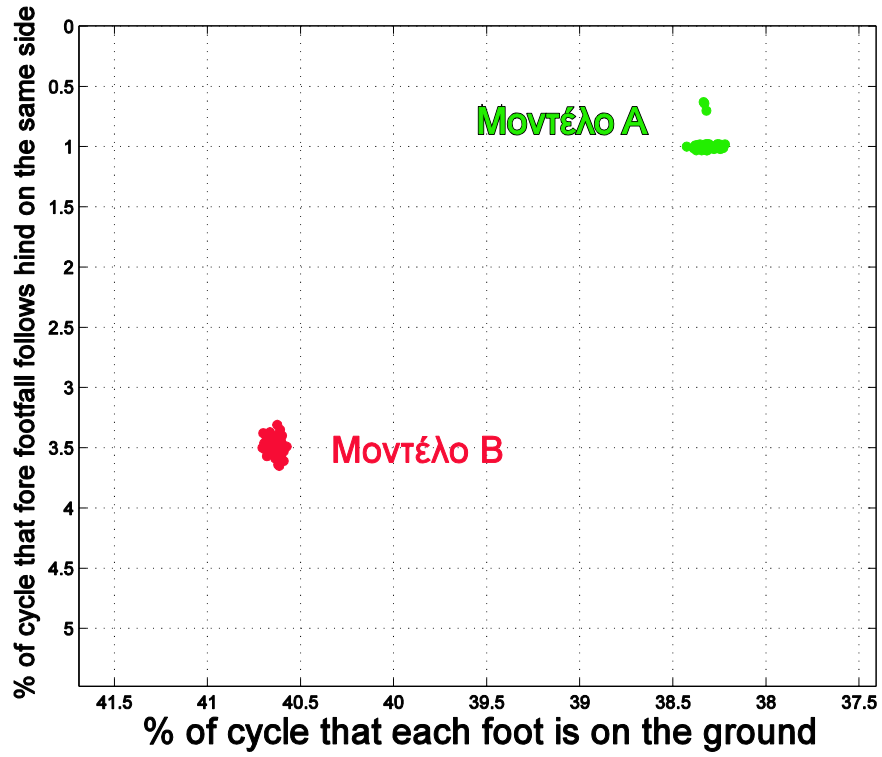
Το αρχικό ύψος αναπήδησης μεταβάλλεται από 0.00 m μέχρι 4.00 m με βήμα 0.01 m. Εισάγεται το gait graph στο οποίο εικονίζονται οι επιπτώσεις αυτής της μεταβολής για το μοντέλο A (Σχ. 5-28). Μετά, απεικονίζεται το gait graph για το μοντέλο B (Σχ. 5-29).



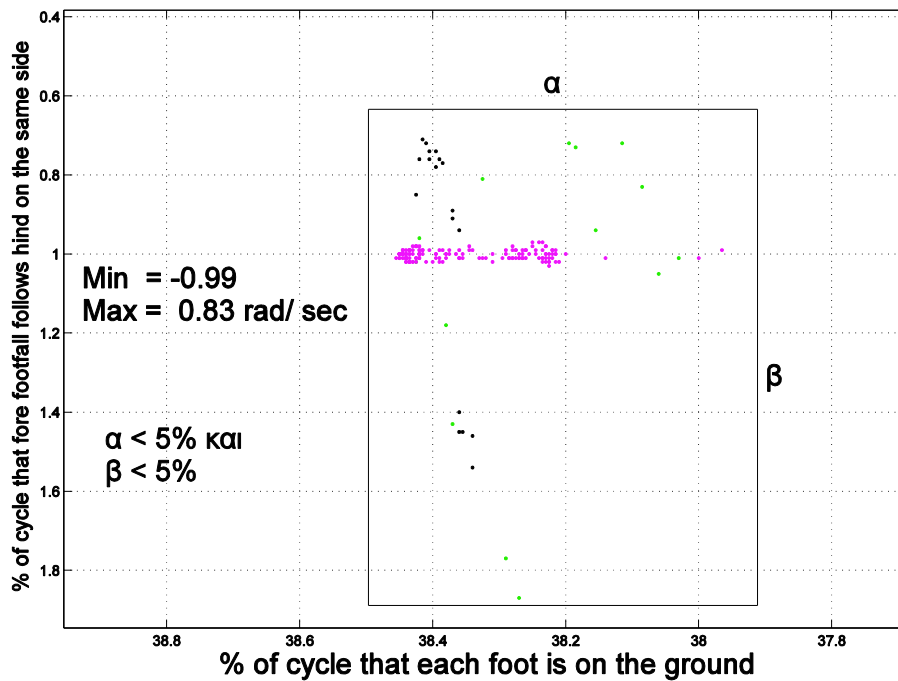
Σχήμα 5-22. Επίδραση αρχικής πρόσθιας ταχύτητας για το μοντέλο Α.



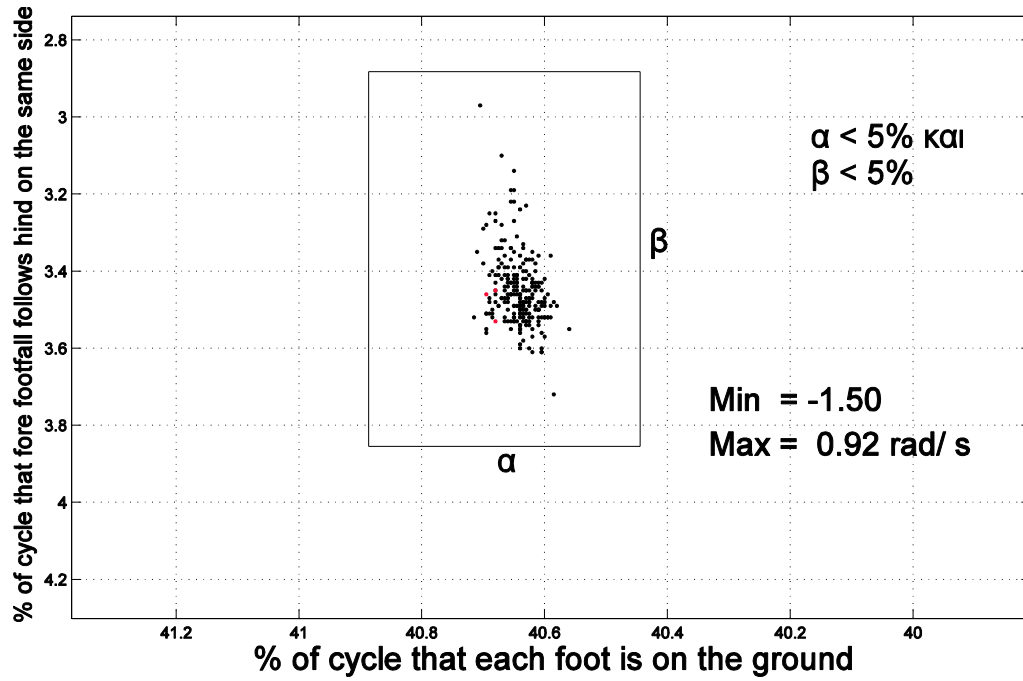
Σχήμα 5-23. Επίδραση αρχικής πρόσθιας ταχύτητας για το μοντέλο Β.



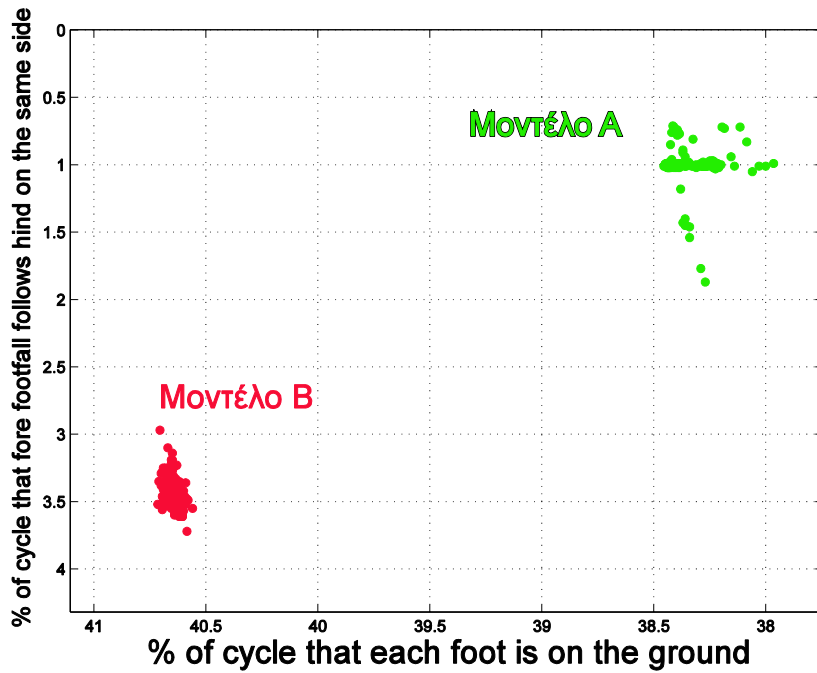
Σχήμα 5-24. Επίδραση αρχικής πρόσθιας ταχύτητας ανά μοντέλο του ρομπότ.



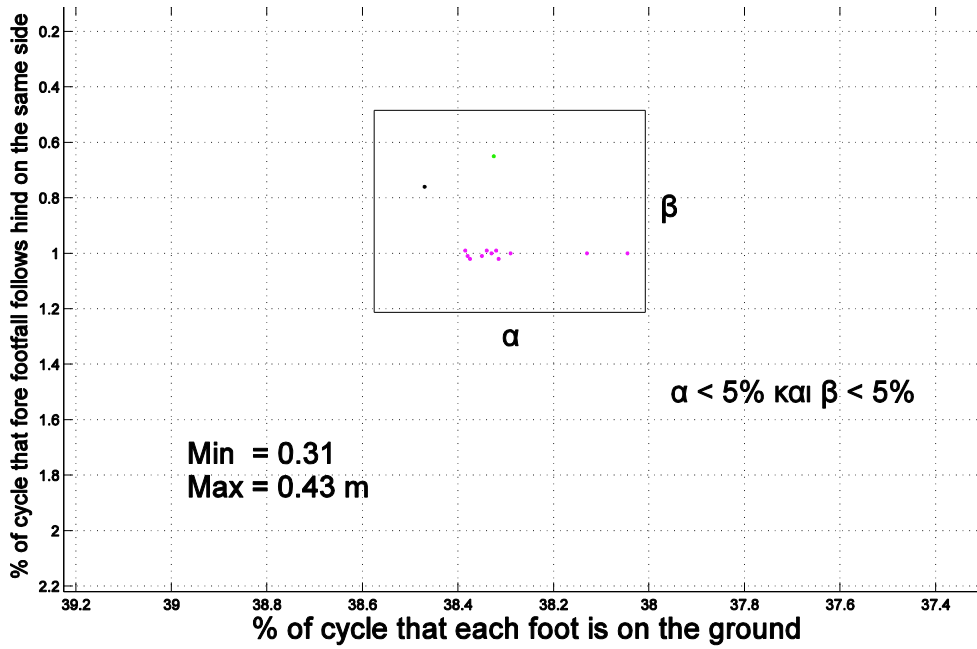
Σχήμα 5-25. Επίδραση αρχικής γωνιακής ταχύτητας για το μοντέλο A.



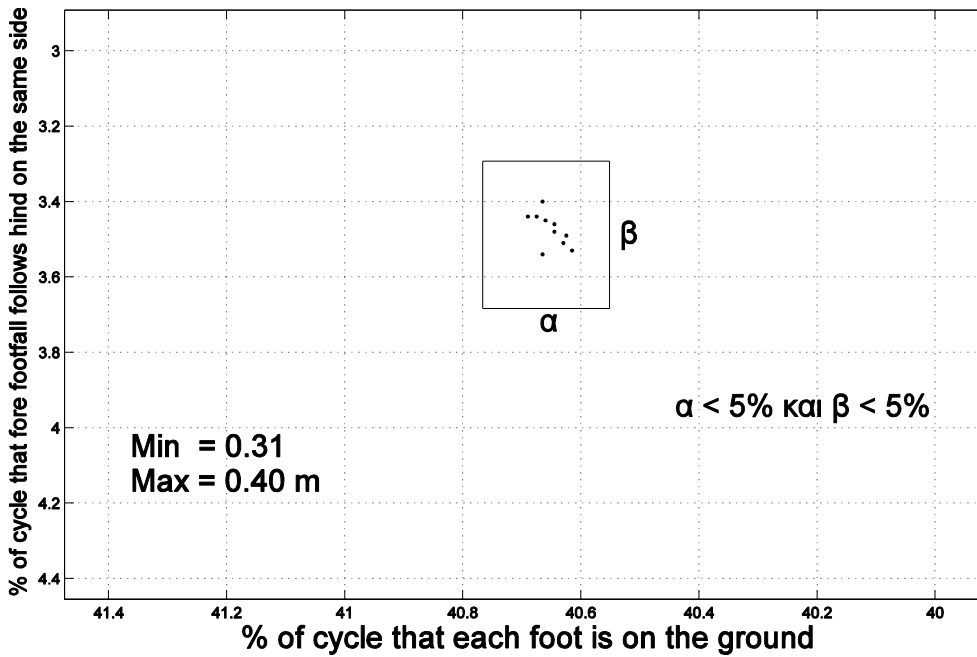
Σχήμα 5-26. Επίδραση αρχικής γωνιακής ταχύτητας για το μοντέλο Β.



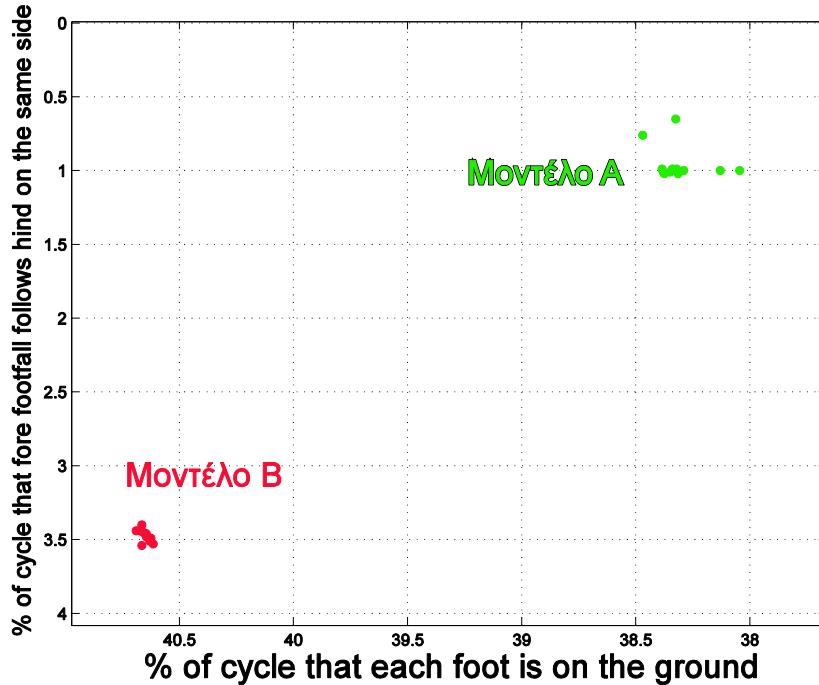
Σχήμα 5-27. Επίδραση αρχικής γωνιακής ταχύτητας ανά μοντέλο του ρομπότ.



Σχήμα 5-28. Επίδραση αρχικού ύψους ΚΜ σώματος για το μοντέλο Α.



Σχήμα 5-29. Επίδραση αρχικού ύψους ΚΜ σώματος για το μοντέλο Β.



Σχήμα 5-30. Επίδραση αρχικού ύψους ΚΜ σώματος ανά μοντέλο του ρομπότ.

5.2.4 Επίδραση Χαρακτηριστικών Περιβάλλοντος

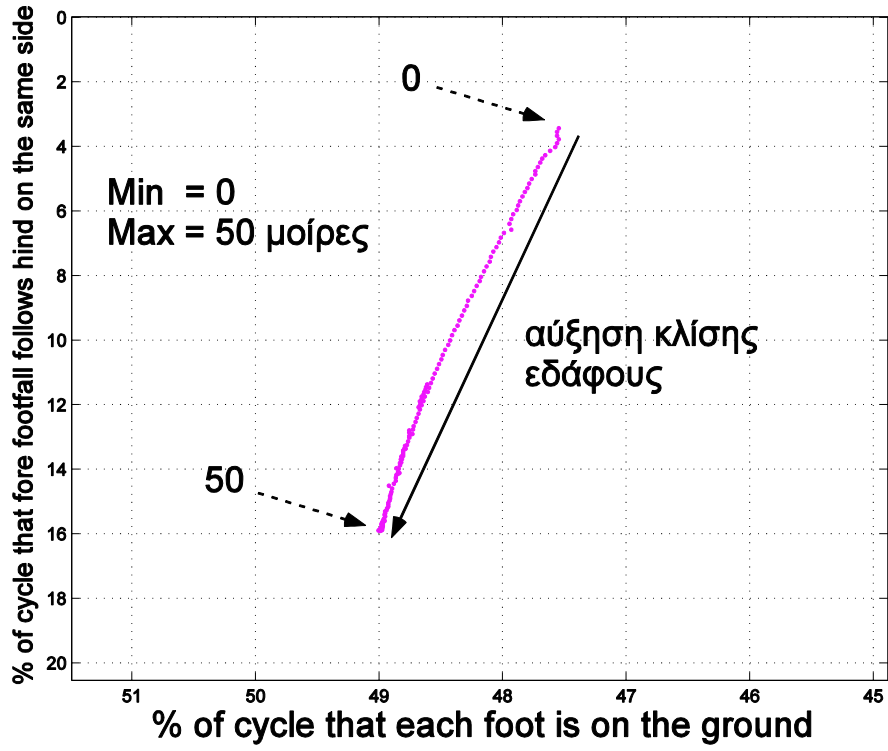
Τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος που θα μελετηθούν είναι η κλίση του εδάφους και η βαρυτική έλξη.

5.2.4.1 Επίδραση Κλίσης Εδάφους

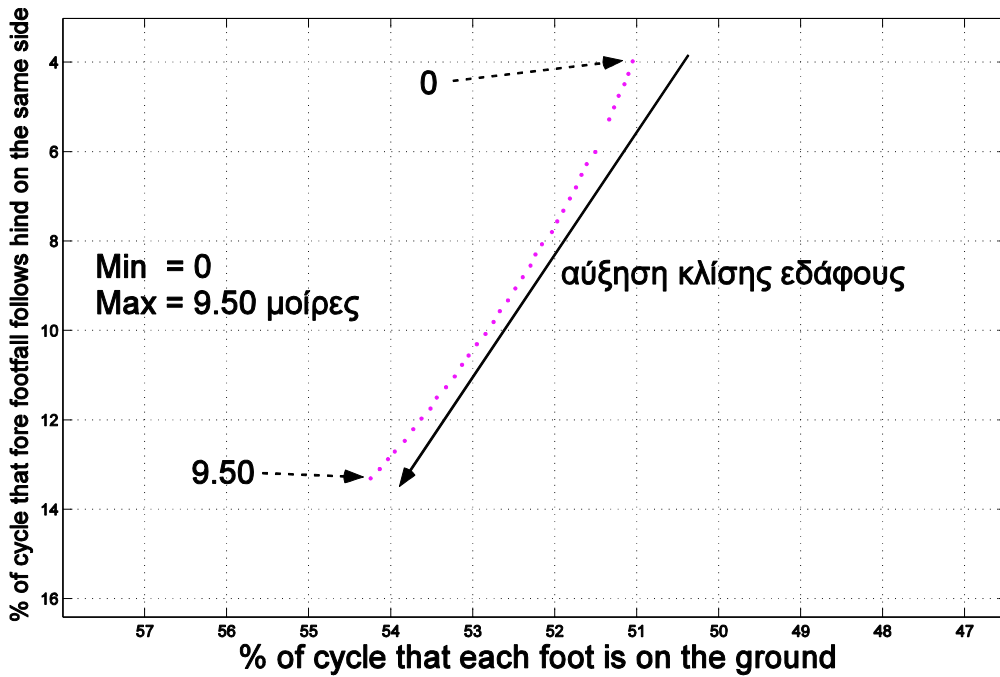
Μεταβάλλοντας την τιμή της κλίσης του εδάφους από 0.00 μέχρι 50.00 με βήμα 0.25 (τιμές σε μοίρες) και υπολογίζοντας τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε επιλεγόμενου διασκελισμού, λαμβάνεται το gait graph για το μοντέλο A (Σχ. 5-31). Όσον αφορά στο μοντέλο B, η επίδραση της μεταβολής της κλίσης του εδάφους εποπτεύεται στο Σχ. 5-32.

Το αποτέλεσμα της μεταβολής της κλίσης, ανεξάρτητα του χρησιμοποιούμενου μοντέλου, είναι η αύξηση της διαφοράς φάσης. Δεν επηρεάζονται σημαντικά οι παράγοντες φόρτισης.

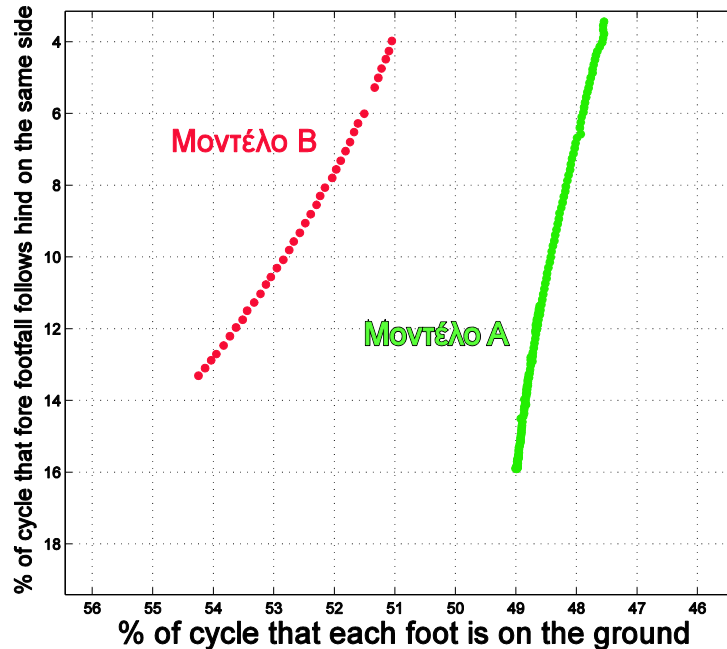
Τονίζεται, πως, για αυτή την οικογένεια προσομοιώσεων, η τιμή της υποχωρητικότητας των ποδιών ισούται με **2900 N/ m**.



Σχήμα 5-31. Επίδραση κλίσης εδάφους για το μοντέλο Α.



Σχήμα 5-32. Επίδραση κλίσης εδάφους για το μοντέλο Β.



Σχήμα 5-33. Επίδραση κλίσης εδάφους ανά μοντέλο του ρομπότ.

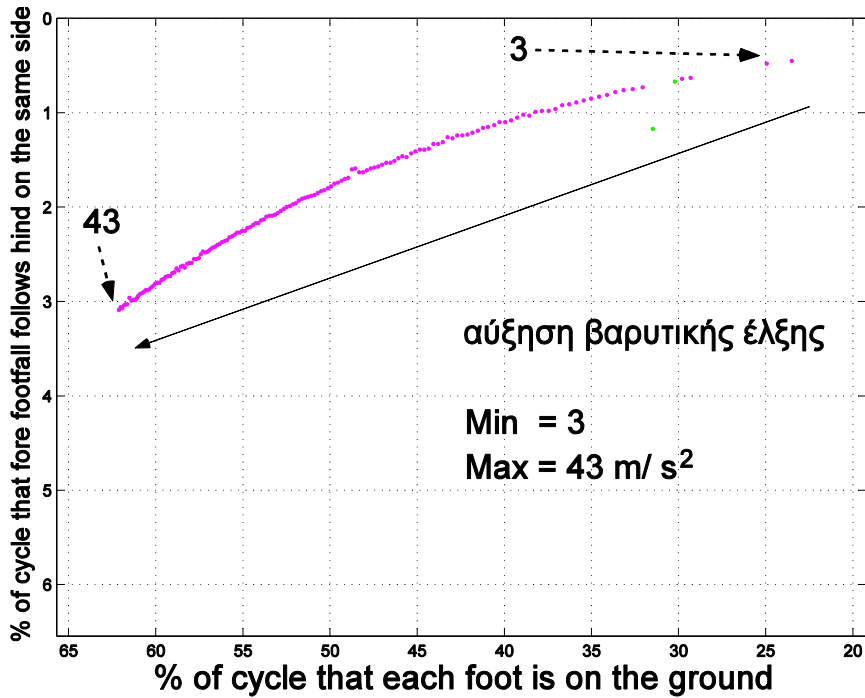
5.2.4.2 Επίδραση Βαρυτικής Έλξης

Για την ανάλυση της επίδρασης της βαρυτικής έλξης, στον εκάστοτε διασκελισμό που επιλέγεται από το ρομπότ, θα χρησιμοποιηθεί το Σχ. 5-34 για το μοντέλο A και το Σχ. 5-35 για το μοντέλο B. Σε καθένα από τα δύο αυτά γραφήματα η βαρυτική έλξη μεταβάλλεται από 0.00 m/s^2 μέχρι 50.00 m/s^2 με βήμα 0.25 m/s^2 .

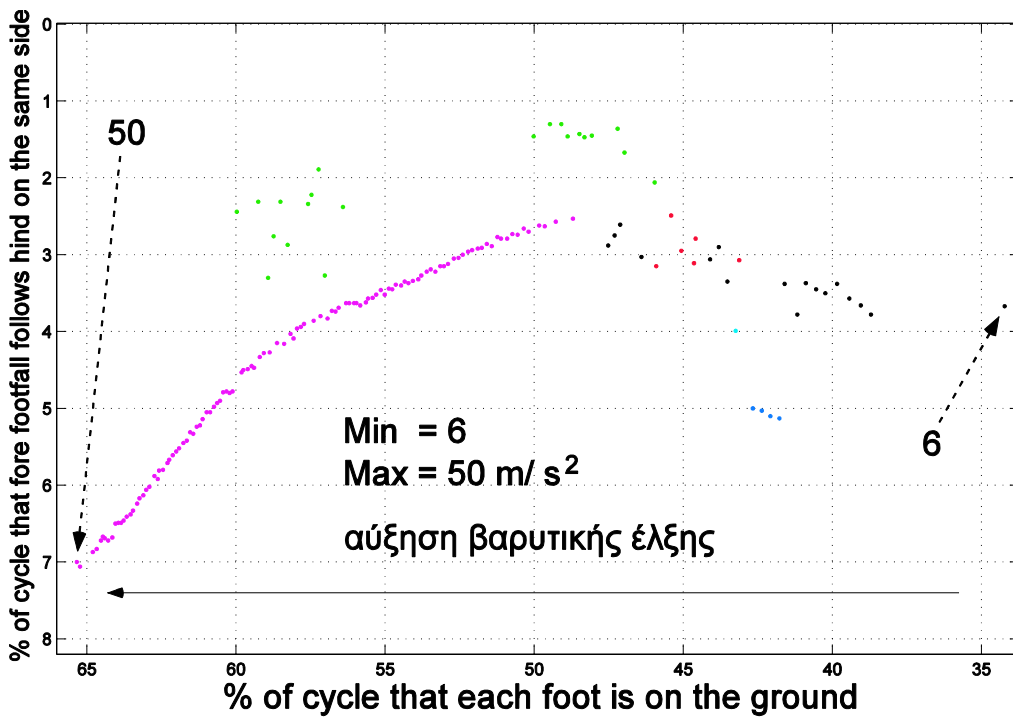
Όπως παρατηρείται, η αύξηση της βαρυτικής έλξης οδηγεί σε αύξηση της μέσης τιμής των παραγόντων φόρτισης. Δεν επηρεάζεται σημαντικά η διαφορά φάσης.

5.3 Χάρτες Poincaré ανά Πλανήτη για Μεταβολή της Υποχωρητικότητας Ποδιών

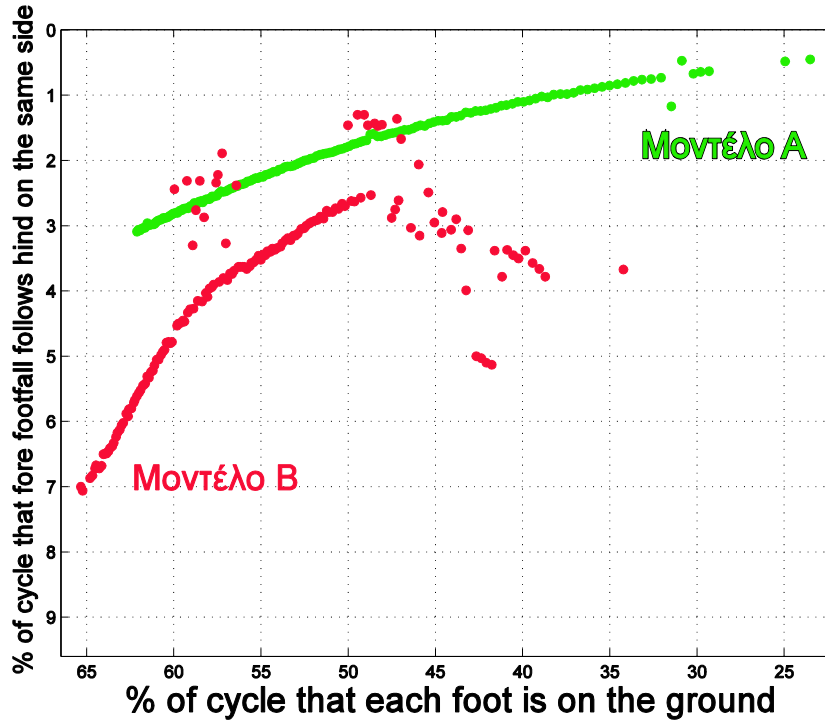
Στην Παρ. 5.3 θα παρατεθούν και σχολιαστούν οι χάρτες Poincaré για κάθε πλανήτη, δηλ., θα περιέχουν τόσες κουκίδες όσα και τα μέγιστα ύψη αναπήδησης που αφορούν σε *κάποια* μόνιμη κατάσταση προσομοιωμένης κίνησης του ρομπότ (για τον τρέχοντα πλανήτη), η οποία προσομοιωμένη κίνηση, έχει διενεργηθεί στο πλαίσιο μίας *σειράς προσομοιώσεων*, κατά την οποία, μεταβάλλεται μόνο η τιμή της υποχωρητικότητας των ποδιών.



Σχήμα 5-34. Επίδραση βαρυτικής έλξης για το μοντέλο Α.



Σχήμα 5-35. Επίδραση βαρυτικής έλξης για το μοντέλο Β.



Σχήμα 5-36. Επίδραση κλίσης εδάφους ανά μοντέλο του ρομπότ.

Στους χάρτες Poinscaré που ακολουθούν για κάθε πλανήτη, με διαφορετικό χρώμα σημειώνονται οι κουκίδες που αφορούν σε μέγιστα ύψη αναπήδησης τα οποία ανήκουν σε προσομοιωμένες κινήσεις του ρομπότ οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικό μοτίβο στη μόνιμή τους κατάσταση.

Ο λόγος της παράθεσης αυτών των χαρτών σχετίζεται με την σύνδεση των μοτίβων της εκάστοτε μόνιμης κατάστασης, με τις τιμές της γωνίας pitch και της πρώτης χρονικής της παραγώγου (κατανομή μοτίβων). Για την διευκόλυνση των παρατηρήσεων, σε κάθε χάρτη Poinscaré εμφανίζεται και το αντίστοιχο του περίγραμμα.

5.3.1 Χάρτες για το Μοντέλο A

Ακολουθούν τα διαγράμματα των γενικών χαρτών Poinscaré για τους πλανήτες Γη, Σελήνη, Άρη και Δία, για το μοντέλο A του ρομπότ. Πρώτα, παρουσιάζεται το Σχ. 5-37 που εκθέτει την υπέρθεση των περιγραμμάτων των πλανητικών χαρτών Poinscaré, σε κοινό επίπεδο.

Χάρτης για τη Γη

Ο χάρτης της Γης, προβάλλεται στο Σχ. 5-38.

Χάρτης για τη Σελήνη

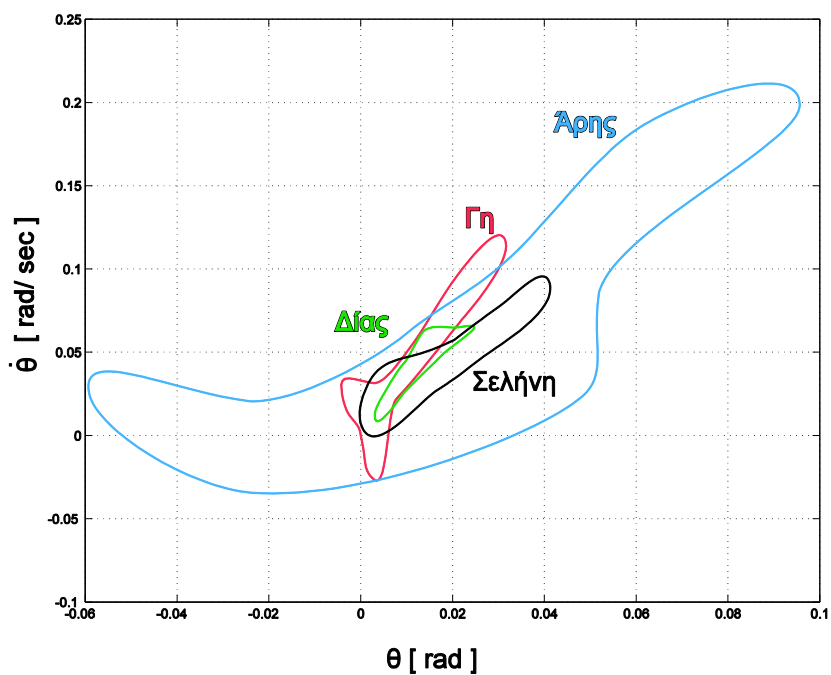
Ο χάρτης της Σελήνης, προβάλλεται στο Σχ. 5-39.

Χάρτης για τον Άρη

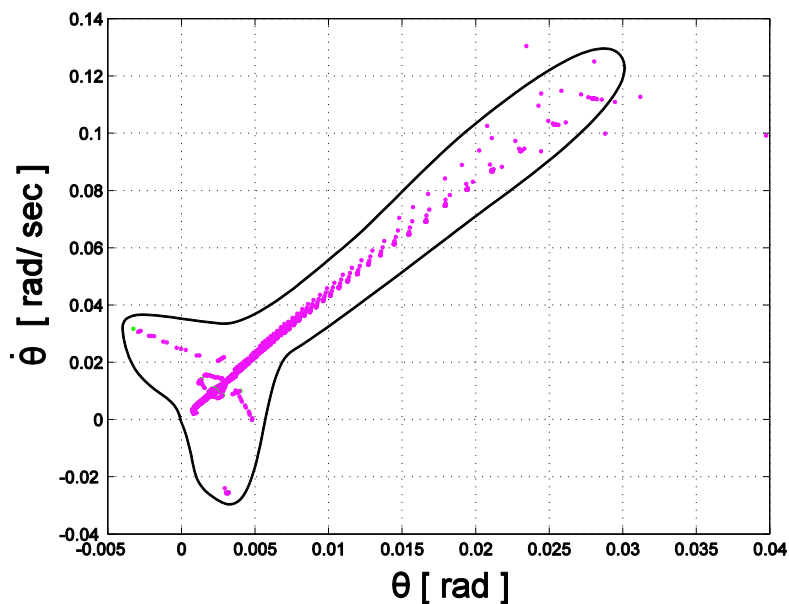
Ο χάρτης του Άρη, προβάλλεται στο Σχ. 5-40.

Χάρτης για το Δία

Ο χάρτης του Δία, προβάλλεται στο Σχ. 5-41.



Σχήμα 5-37. Υπέρθεση περιγραμμάτων πλανητικών χαρτών Poincaré για το μοντέλο A.



Σχήμα 5-38. Συνολικός χάρτης Poincaré για τη Γη (Μοντ. A).

5.3.2 Χάρτες για το Μοντέλο Β

Στην Παρ. 5.3.2, παρουσιάζονται οι χάρτες Poincaré για το μοντέλο Β, για τους πλανήτες Γη, Σελήνη, Άρη και Δία. Πρώτα, στο Σχήμα 5-42, παρουσιάζεται η υπέρθεση των περιγραμμάτων των χαρτών Poincaré που προαναφέρθηκαν.

Χάρτης για τη Γη

Όσον αφορά στη Γη, ο «γενικός χάρτης Poincaré της» φαίνεται στο Σχ. 5-43 που προβάλλεται παρακάτω.

Χάρτης για τη Σελήνη

Ο χάρτης της Σελήνης, ακολουθεί στο Σχ. 5-44.

Χάρτης για τον Άρη

Παρουσιάζεται ο χάρτης Poincaré για τον Άρη, στο Σχ. 5-45.

Χάρτης για το Δία

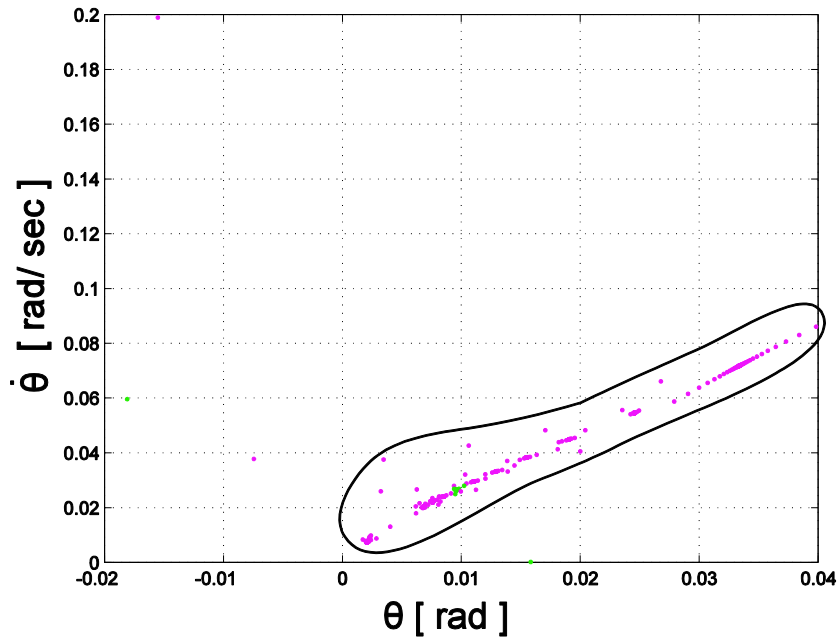
Ο χάρτης του Δία, ακολουθεί στο Σχ. 5-46.

5.4 Μελέτη της Αδιάστατης Παραμέτρου r

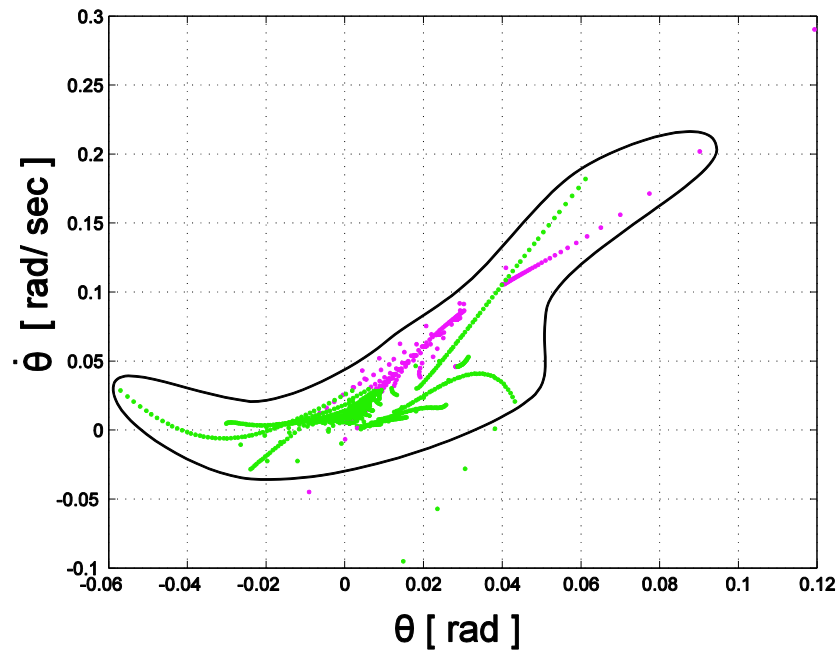
Στην Παρ. 5.4 μελετάται η αδιάστατη αδράνεια ποδιού r , η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση,

$$r = \frac{k \cdot I_0}{m \cdot g} \quad (5.1)$$

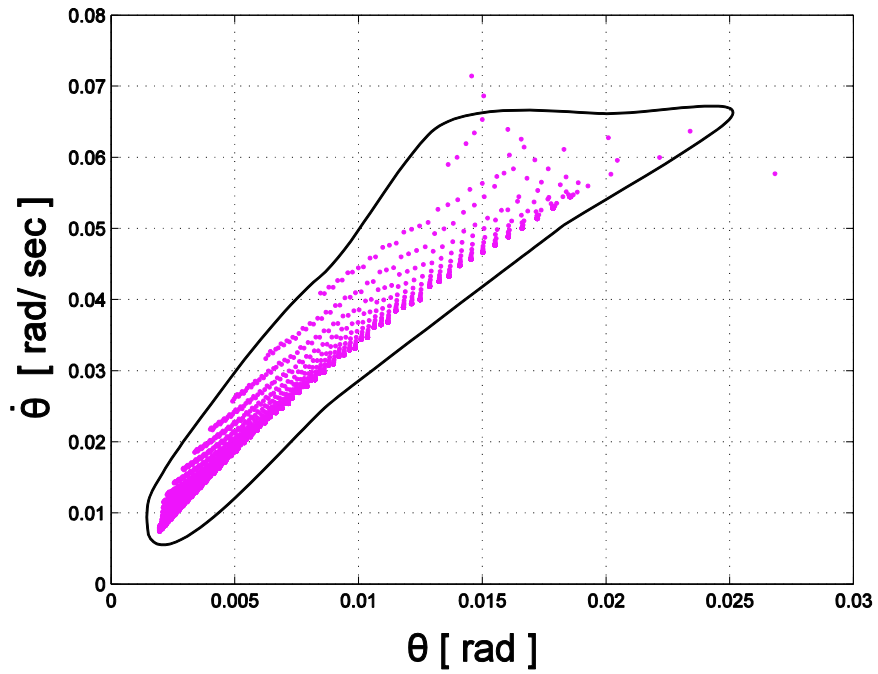
για καθένα από τα δύο μοντέλα του ρομπότ που ορίζονται στην Παρ. 3.4. Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται η επίδραση της υποχωρητικότητας των ποδιών και της βαρυτικής έλξης στην τιμή της παραμέτρου αυτής.



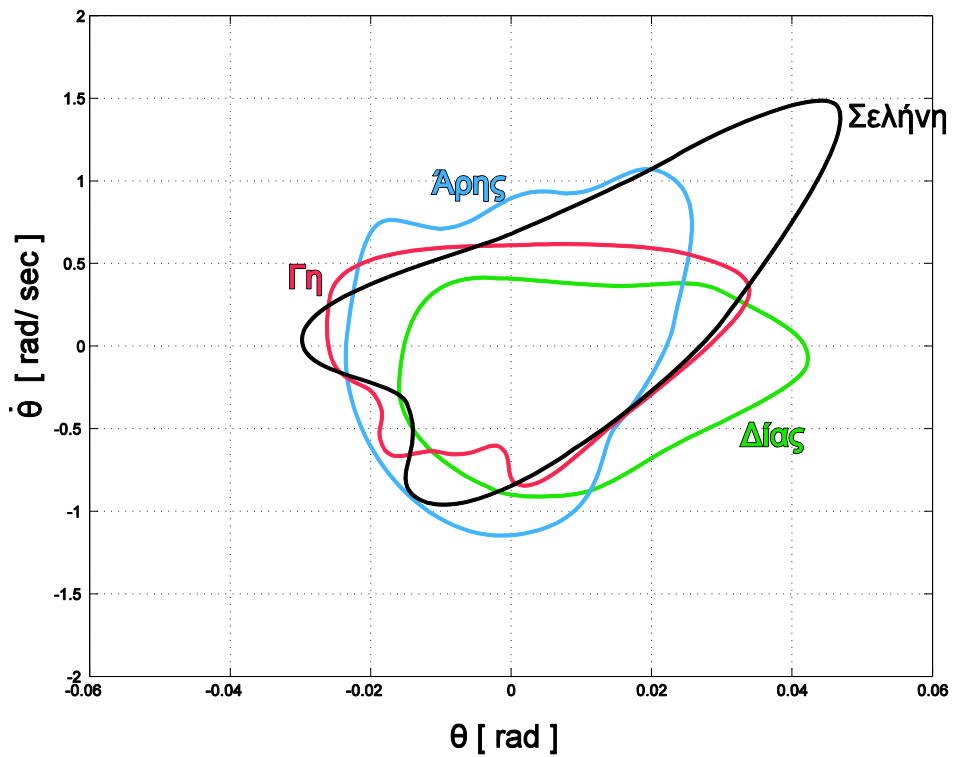
Σχήμα 5-39. Συνολικός χάρτης Poincaré για τη Σελήνη (Μοντ. Α).



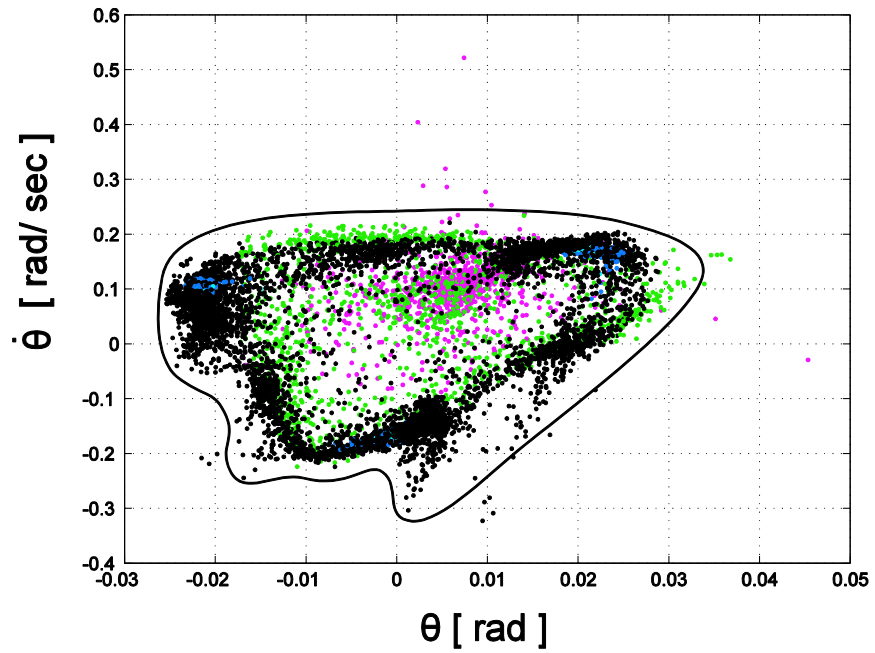
Σχήμα 5-40. Συνολικός χάρτης Poincaré για τον Άρη (Μοντ. Α).



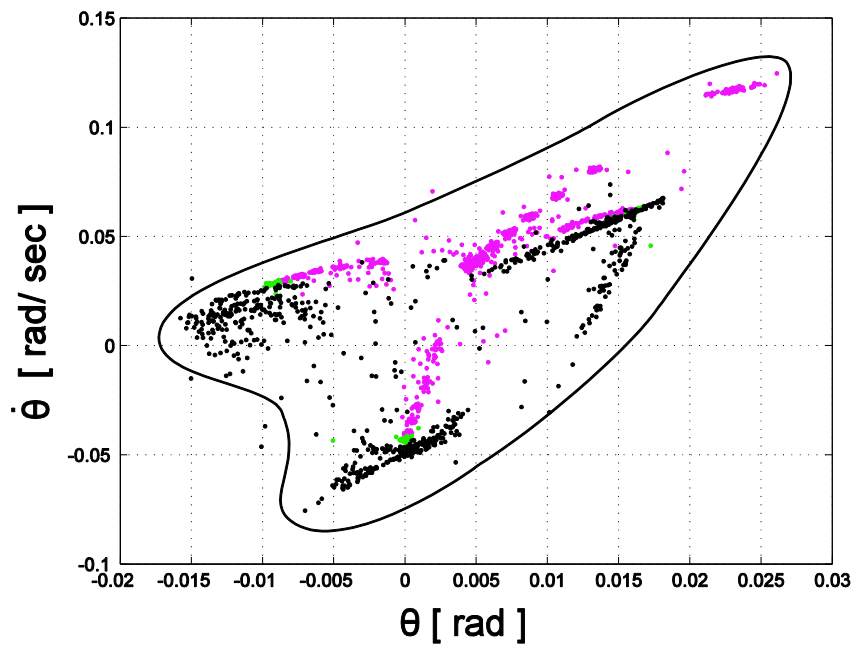
Σχήμα 5-41. Συνολικός χάρτης Poincaré για το Δία (Μοντ. Α).



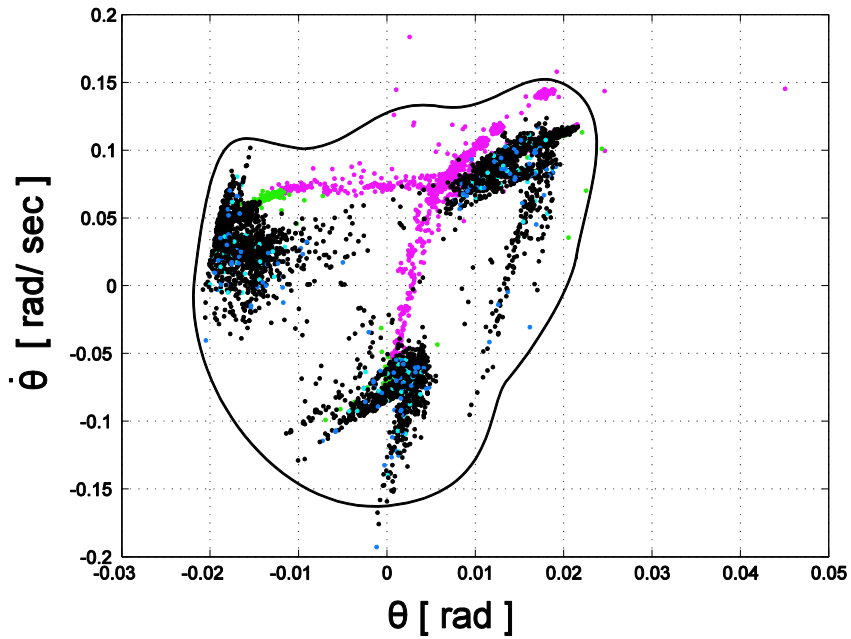
Σχήμα 5-42. Υπέρθεση περιγραμμάτων πλανητικών χαρτών Poincaré για το μοντέλο Β.



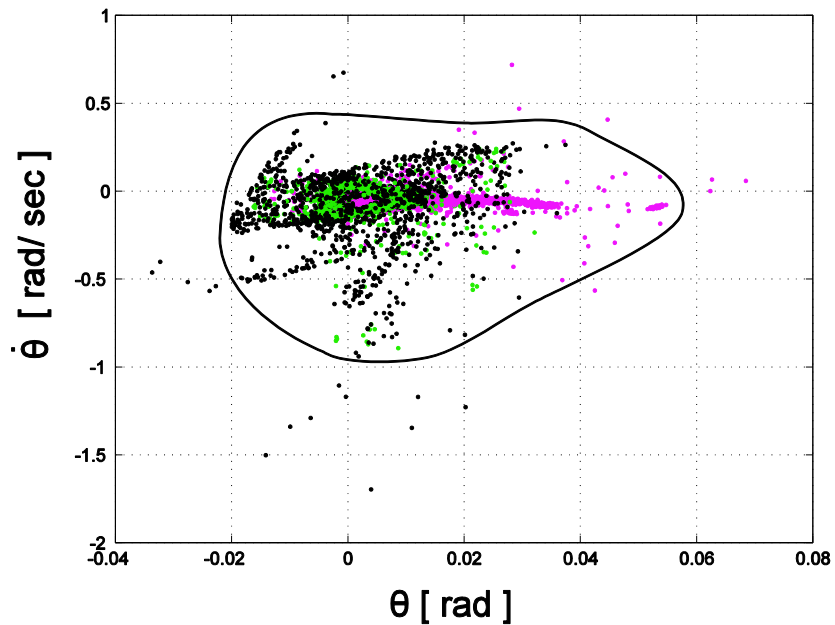
Σχήμα 5-43. Συνολικός χάρτης Poincaré για τη Γη (Μοντ. Β).



Σχήμα 5-44. Συνολικός χάρτης Poincaré για τη Σελήνη (Μοντ. Β).



Σχήμα 5-45. Συνολικός χάρτης Poincaré για τον Άρη (Μοντ. Β).



Σχήμα 5-46. Συνολικός χάρτης Poincaré για το Δία (Μοντ. Β).

5.4.1 Επίδραση Σταθεράς Ελατηρίου Ποδιών και Βαρυτικής Έλξης

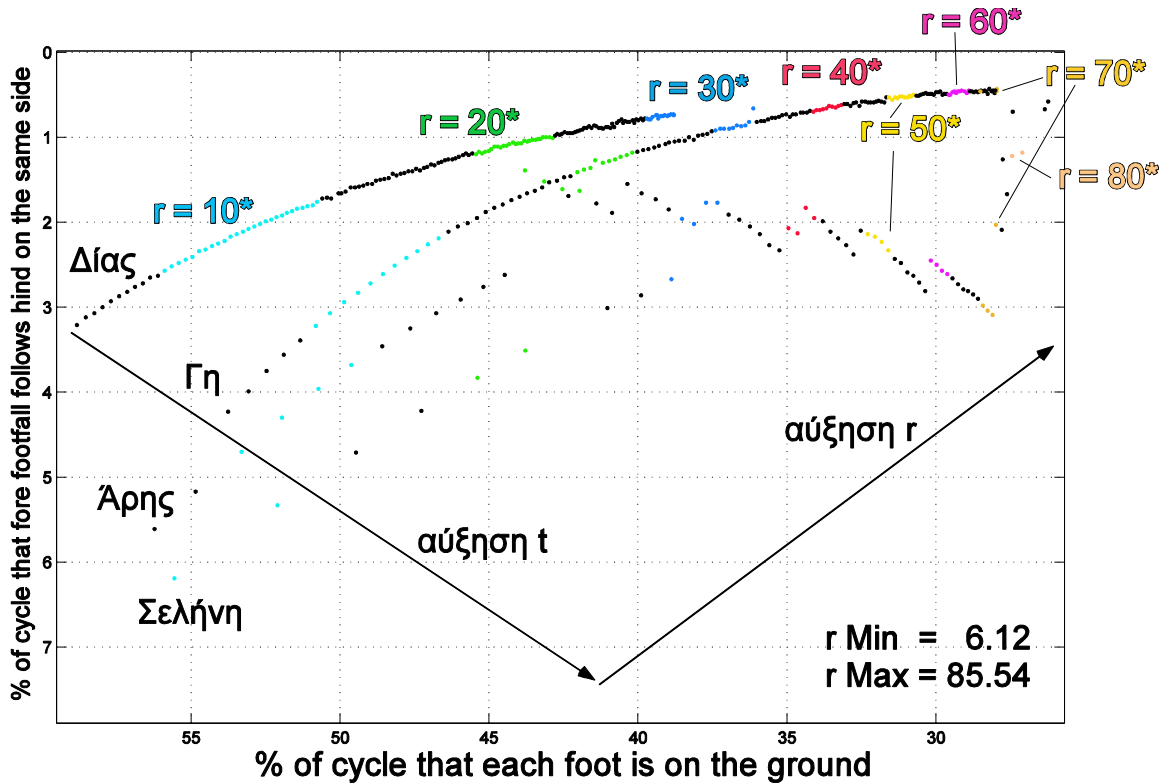
Αρχικά, παρατίθεται το Σχ. 5-47 στο οποίο αποτυπώνεται η επίδραση της σταθεράς ελατηρίου και της βαρυτικής έλξης για το μοντέλο Α του ρομπότ. Η παράμετρος t , που εμφανίζεται στα επόμενα σχήματα ορίζεται ως,

$$t = \sqrt{\frac{l_0}{g}} \quad (5.2)$$

Επίσης, ισχύει, στο πλαίσιο της εργασίας, πως,

$$n^* = \text{κάποιος αριθμός που ανήκει στο σύνολο } [n-2, n+2) \quad (5.3)$$

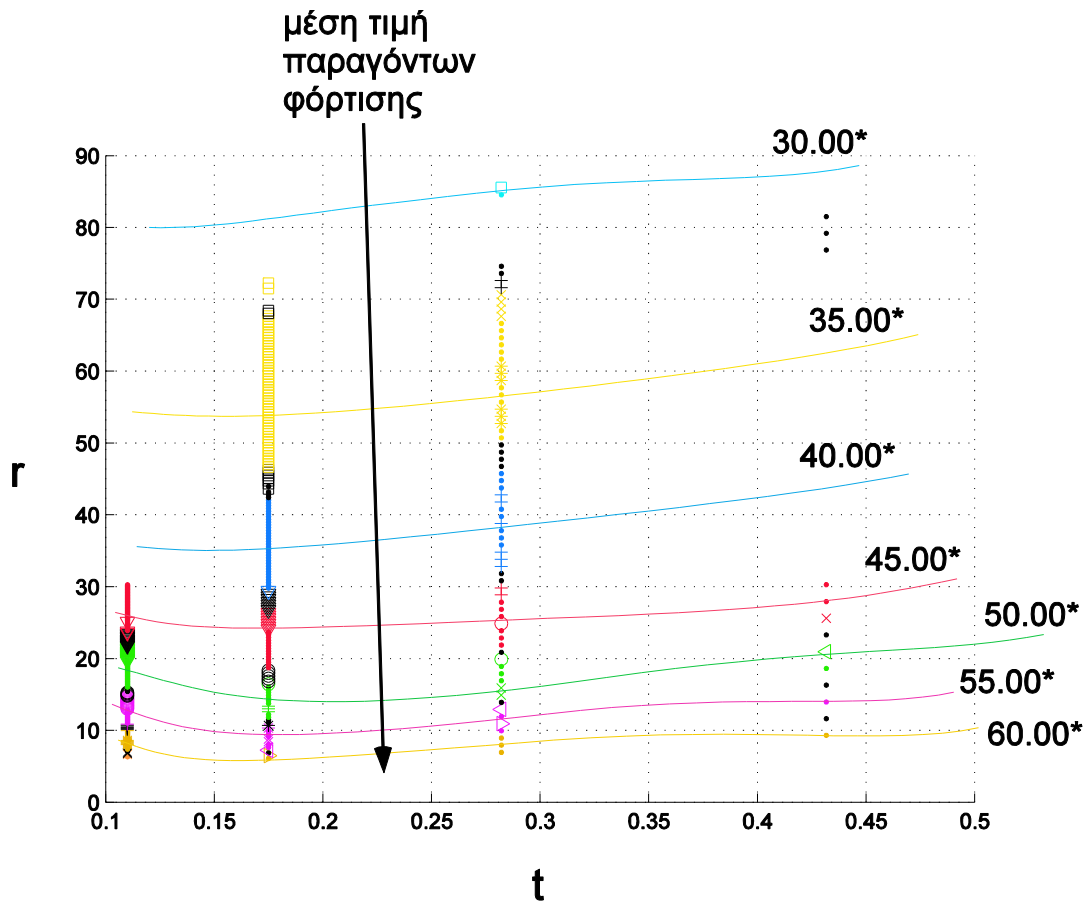
και $n^{**} = \text{κάποιος αριθμός που ανήκει στο σύνολο } [n-0.1, n+0.1). \quad (5.4)$



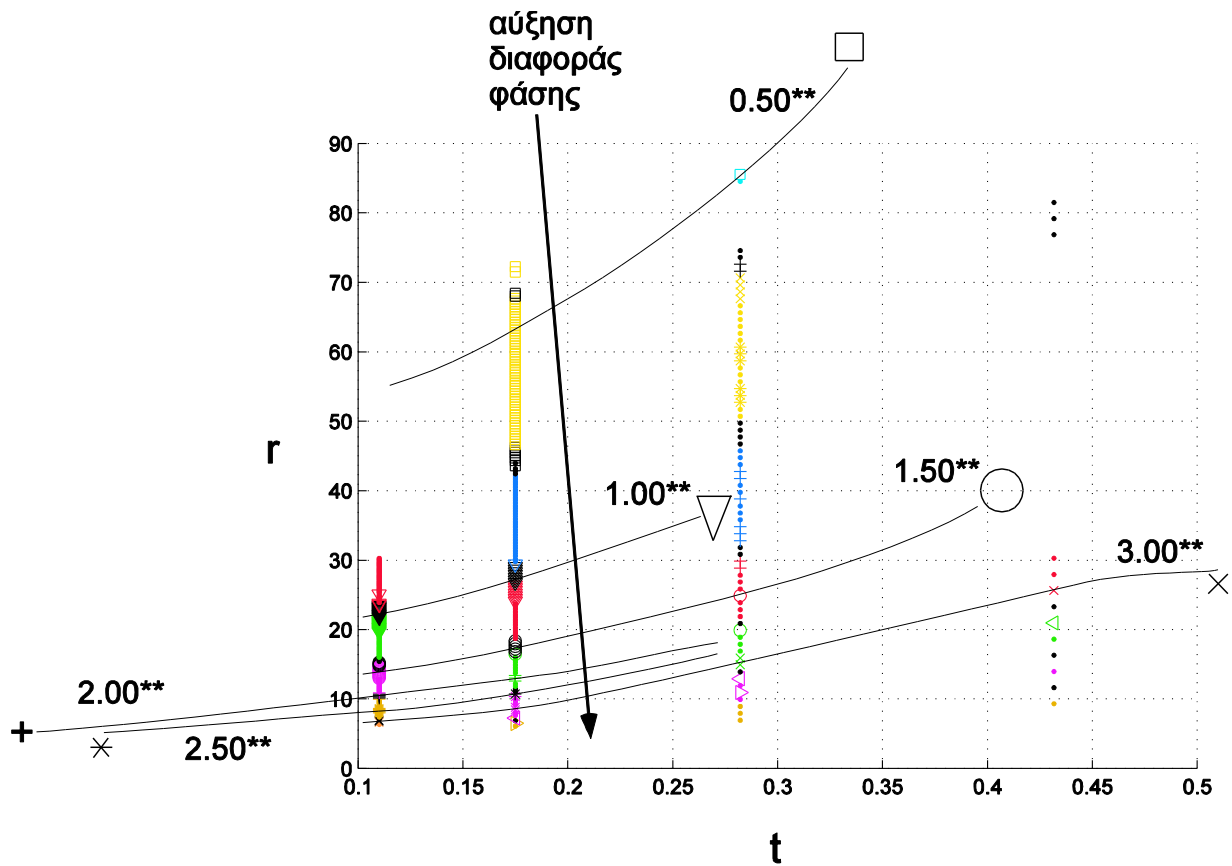
Σχήμα 5-47. Επίδραση της σταθεράς ελατηρίου και της βαρυτικής έλξης στις παραμέτρους r και t για το μοντέλο A.

Στα Σχ. 5-48 και Σχ. 5-49, οι αδιάστατες παράμετροι βρίσκονται στους άξονες, και, στο «εσωτερικό» λαμβάνουν τιμές τα χαρακτηριστικά των διασκελισμών (παράγοντες φόρτισης και διαφορά φάσης). Άρα, για γνωστές τιμές των r και t , υπολογίζονται μέσω του αυτού του σχήματος τα χαρακτηριστικά του επιλεγόμενου διασκελισμού της μόνιμης κατάστασης (όσον αφορά στους παράγοντες φόρτισης, λαμβάνεται από το Σχ. 5-48, η μέση τιμή τους, και, για την εύρεση του καθενός εξ' αυτών, θεωρείται πως είναι ίσοι μεταξύ τους κ.λπ.).

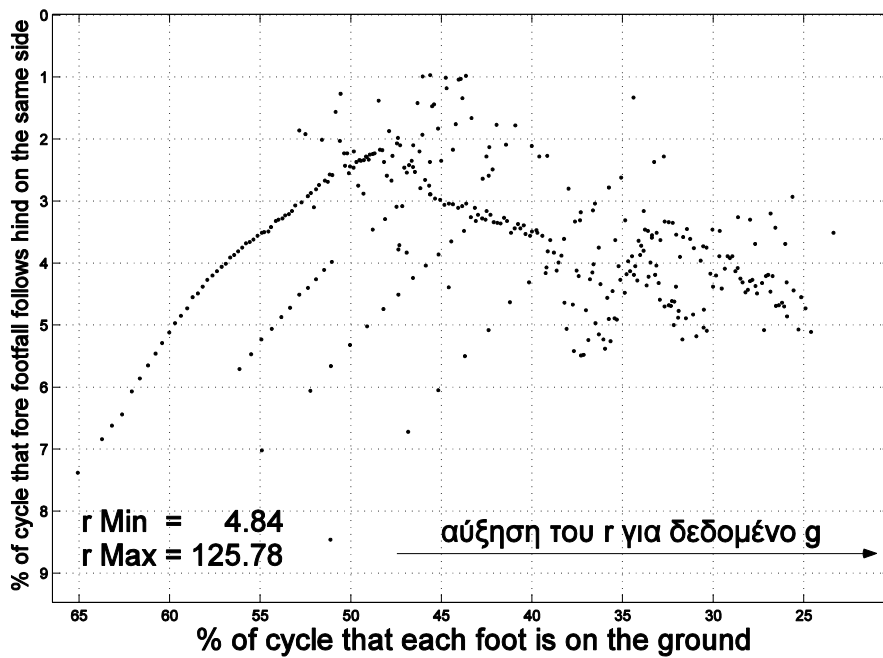
Για το μοντέλο Β, η επίδραση της σταθεράς ελατηρίου και της βαρυτικής έλξης φαίνεται στα παρακάτω σχήματα, Σχ. 5-50, 5-51 και 5-52. Οι μεταξύ τους διαφορές, αφορούν στο βάθος ανάλυσης (depth of resolution), και, την ύπαρξη ή μη χρώματος για την ομαδοποίηση των τιμών της παραμέτρου r . Το Σχ. 5-51, αποτελεί το Σχ. 5-50, εμπλουτισμένο με χρώμα στις γειτονιές των r τιμών. Από το Σχ. 5-51, αν αυτό μεγεθυνθεί, λαμβάνεται το Σχ. 5-52.



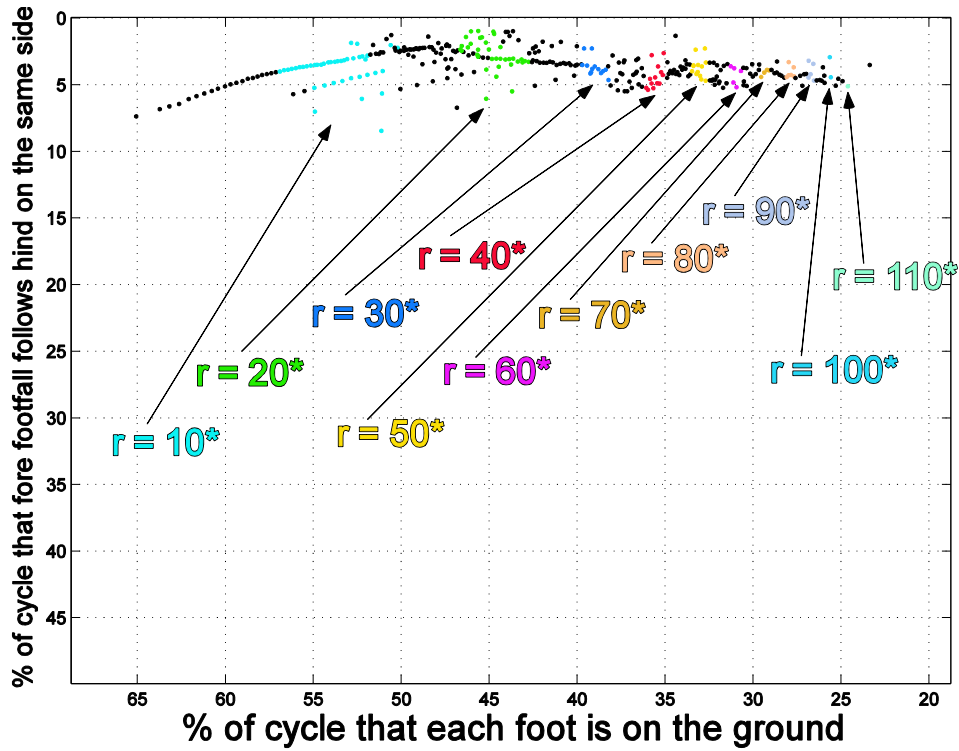
Σχήμα 5-48. Σύνδεση οικογενειών τιμών της μέσης τιμής των παραγόντων φόρτισης με τις παραμέτρους r και t για το μοντέλο Α.



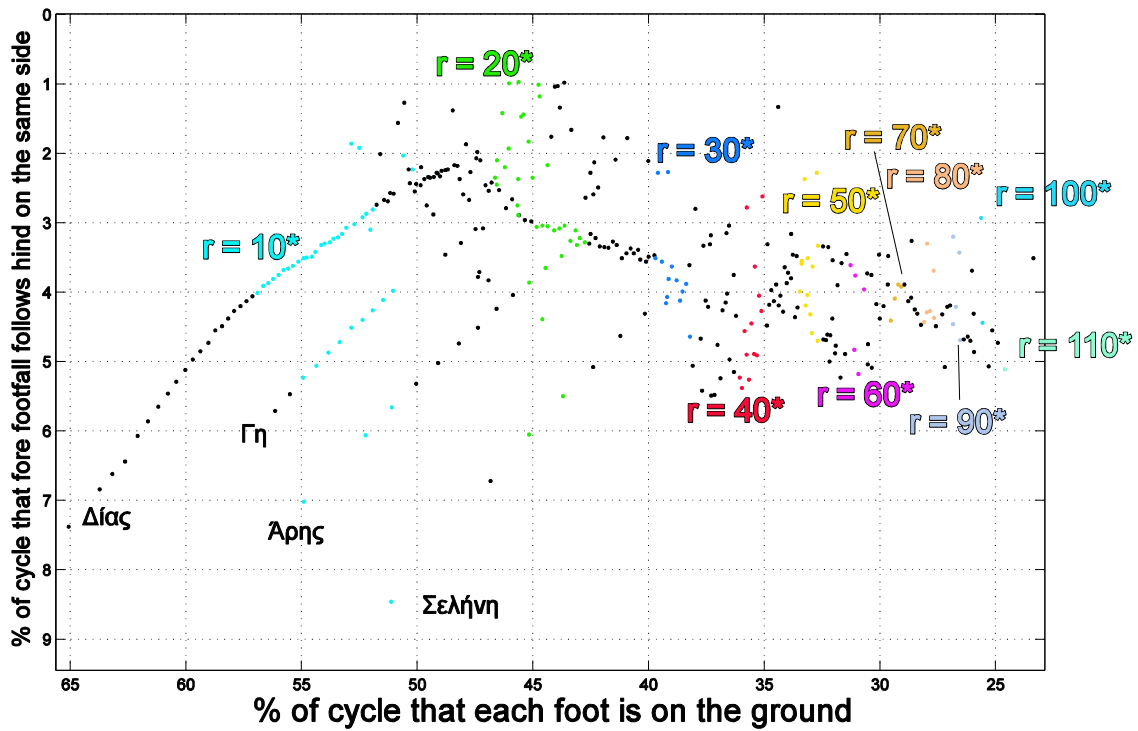
Σχήμα 5-49. Σύνδεση οικογενειών τιμών της διαφοράς φάσης με τις παραμέτρους r και t για το μοντέλο A.



Σχήμα 5-50. Επίδραση της σταθεράς ελατηρίου και της βαρυτικής έλξης στην παράμετρο r για το μοντέλο B.



Σχήμα 5-51. Επίδραση της σταθεράς ελατηρίου και της βαρυτικής έλξης στην παράμετρο r για το μοντέλο B, με χρήση χρωμάτων για τη δήλωση των οικογενειών των τιμών του r .



Σχήμα 5-52. Επίδραση της σταθεράς ελατηρίου και της βαρυτικής έλξης στην παράμετρο r για το μοντέλο B, με χρήση χρωμάτων για τη δήλωση των οικογενειών των τιμών του r .

6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Στο Κεφ. 6, το τελευταίο της εργασίας, παρουσιάζονται – συγκεντρωμένα – τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του Κεφ. 5. Συμπληρωματικά, προσφέρεται «μία ματιά» στις δυνητικές προεκτάσεις αυτής της εργασίας, μέσω της καταγραφής κάποιων βασικών ιδεών.

Αρχικά, αναφέρονται τα συμπεράσματα.

6.1 Συμπεράσματα

Τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας είναι τα εξής:

1. Η αύξηση της τιμής της μάζας του σώματος του ρομπότ, οδηγεί σε αύξηση της μέσης τιμής των παραγόντων φόρτισης.
2. Η αύξηση της τιμής της μεσοαπόστασης των μηρών του σώματος, δεν οδηγεί σε αξιοσημείωτη μεταβολή της μέσης τιμής των παραγόντων φόρτισης ή της διαφοράς φάσης.
3. Η αύξηση της τιμής της υποχωρητικότητας των ποδιών οδηγεί σε μείωση της μέσης τιμής των παραγόντων φόρτισης.
4. Η αύξηση της τιμής του ελεύθερου μήκους των ποδιών, οδηγεί σε αύξηση της μέσης τιμής των παραγόντων φόρτισης.
5. Η αύξηση της τιμής του συντελεστή απωλειών των ποδιών, οδηγεί σε αύξηση

της διαφοράς φάσης.

6. Η αύξηση της τιμής του επιθυμητού ύψους αναπήδησης του ΚΜ του σώματος του ρομπότ οδηγεί σε μείωση της μέσης τιμής των παραγόντων φόρτισης.
7. Η αύξηση της τιμής της επιθυμητής πρόσθιας ταχύτητας του ΚΜ του σώματος του ρομπότ οδηγεί σε αύξηση της διαφοράς φάσης, για το μοντέλο Β, και σε μείωση των παραγόντων φόρτισης για το μοντέλο Α.
8. Η αύξηση της τιμής της αρχικής πρόσθιας ταχύτητας του ΚΜ του σώματος του ρομπότ, δεν οδηγεί σε κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του επιλεγόμενου διασκελισμού για κάθε ένα από τα μοντέλα του ρομπότ. Τα ίδιο ισχύει για την τιμή της αρχικής γωνιακής ταχύτητας του σώματος του ρομπότ και το αρχικό ύψος του ΚΜ του.
9. Η αύξηση της τιμής της κλίσης του εδάφους, οδηγεί σε αύξηση της διαφοράς φάσης.
10. Η αύξηση της τιμής της βαρυτικής έλξης, οδηγεί σε αύξηση της μέσης τιμής των παραγόντων φόρτισης.
11. Η αύξηση του εκάστοτε παράγοντα φόρτισης ή της διαφοράς φάσης, οδηγεί σε μείωση της τιμής της παραμέτρου r και σε μείωση της τιμής της παραμέτρου t . Ισχύει και το αντίστροφο.

6.2 Μελλοντική Εργασία

Παρακάτω, απαριθμούνται κάποιες βασικές κατευθύνσεις που αφορούν στη θεματική επέκταση της παρούσας εργασίας.

1. Μελέτη της επίδρασης – στα χαρακτηριστικά του μέσου επιλεγόμενου διασκελισμού της μόνιμης κατάστασης – των παραμέτρων που δεν συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα εργασία, όπως, για παράδειγμα, των χαρακτηριστικών μεγεθών του *εδάφους* (υποχωρητικότητα, απόσβεση, τριβή στην επαφή ποδιού – εδάφους κ.ά.), αφότου αυτό μοντελοποιηθεί και ενσωματωθεί σε κάποιο από τα υπάρχοντα περιβάλλοντα προσομοιώσεων.
2. Επέκταση της μεθόδου υπολογισμού των διαγραμμάτων Hildebrand στον *τριδιάστατο χώρο*. Μεταγραφή δηλ., των αλγορίθμων που αφορούν στη μέθοδο

υπολογισμού της χρονικής στιγμής μετάβασης, τη συλλογή των χρονικών στιγμών των συμβάντων των ποδιών, τον υπολογισμό των μεγεθών που συνθέτουν και χαρακτηρίζουν τα διαγράμματα Hildebrand κ.λπ. (βλ. Παράρτημα Α). Εδώ, είναι απαραίτητη η δυνατότητα εκτέλεσης προσομοιώσεων που αφορούν σε τριδιάστατη κίνηση του ρομπότ, είτε μέσω ολοκλήρωσης των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων (π.χ. στο MATLAB ή το SIMULINK), είτε με τη χρήση κάποιων πακέτων που, με αριθμητικό τρόπο, «κατανοούν» τις σχέσεις μεταξύ των συνιστωσών του ρομπότ, όπως, το ADAMS, το WEBOTS κ.ά.

3. Μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων του ρομπότ, του περιβάλλοντός του κ.λπ. – οι οποίες, είτε εξετάστηκαν εδώ, είτε όχι – στα χαρακτηριστικά των τριδιάστατων διασκελισμών (αξιοποιώντας δηλ., το «2»).
4. Περαιτέρω ανάλυση του μοτίβου Random ώστε, αν είναι δυνατόν, να κατακερματιστεί σε δύο ή περισσότερα μοτίβα.
5. Διεύρυνση της μεθόδου υπολογισμού των μοτίβων ώστε, να περιλαμβάνει μοτίβα τα οποία συνίστανται, πέραν των υπολοίπων, και από διασκελισμούς τύπου P (δηλ., *pronk* με διαφορά φάσης *ακριβώς* ίση με μηδέν).
6. Χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την επιτάχυνση της διαδικασίας υπολογισμού των διαγραμμάτων Hildebrand, παρακάμπτοντας την ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων που ανακύπτουν κατά τη μοντελοποίηση του ρομπότ. Μία «εκκίνηση» της προσπάθειας για την επιτυχημένη εφαρμογή αυτών των δικτύων, στο πεδίο της εργασίας αυτής, επιχειρείται στο Παράρτημα Β.

Στη συνέχεια, ακολουθούν η Βιβλιογραφία και, τα Παραρτήματα Α, Β και Γ.

Βιβλιογραφία

- [1] Abourachid, A., “A New Way of Analysing Symmetrical and Asymmetrical Gaits in Quadrupeds”, *Comptes Rendus Biologies*, Vol. 326, 2003, pp. 625 – 630.
- [2] Alexander, R. – M., *Principles of Animal Locomotion*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 2006.
- [3] Cartmill, M., Lemelin, P. and Schmitt, D., “Support Polygons and Symmetrical Gaits in Mammals”, *Zoological Journal of the Linnean Society*, Vol. 136, 2002, pp. 401 – 420.
- [4] Chatzakos, P. and Papadopoulos, E., “Bio – Inspired Design of Electrically – Driven Bounding Quadrupeds via Parametric Analysis”, *Mechanisms and Machine Theory*, Vol. 44, No. 3, 2009, pp. 559 – 579.
- [5] Collins, J. J. and Stewart, I. N., “Coupled Nonlinear Oscillators and the Symmetries of Animal Gaits”, *Journal of Nonlinear Science*, Vol. 3, 1993, pp. 349 – 392.
- [6] Hildebrand, M., “Symmetrical Gaits of Primates”, *American Journal of Physical Anthropology*, Vol. 26, No. 2, 1967, pp. 119 – 130.
- [7] Hildebrand, M., “The Quadrupedal Gaits of Vertebrates”, *BioScience*, Vol. 39, No. 11, Animals in Motion, 1989, pp. 766 – 775.
- [8] Khalil, H. K., *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, 2001.
- [9] Kontolatis, I., Myrasiotis, D., Paraskevas, I., Papadopoulos, E., de Croon, G. and Izzo, D., “Quadruped Optimum Gaits Analysis for Planetary Exploration”, *12th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation*, (ASTRA ‘13), Noordwijk, The Netherlands, May 2013.
- [10] Kontolatis, I. and Papadopoulos, E., “Gravity and Inclination Effects on the Design of Quadruped Robots for Space Exploration”, *21st Mediterranean Conference on Control and Automation*, (MED ‘13), Chania, Greece, June 2013.

- [11] Lipschutz, S. and Lipson, M., *Discrete Mathematics*, Third Edition, Schaum's Outline Series, McGraw – Hill, 2007.
- [12] Magrab, E. B., Azarm, S., Balachandran, B., Duncan, J., Herold, K. and Walsh G., *An Engineer's Guide to MATLAB*, Prentice Hall, 2010.
- [13] Muybridge, E., *Animals in Motion*, Chapman and Hall, London, 1899.
- [14] Poulakakis, I., Papadopoulos, E. and Buehler, M., "On the Stability of the Passive Dynamics of Quadrupedal Running with a Bounding Gait", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 25, No. 7, July 2006, pp. 669 – 687.
- [15] Raibert, M., *Legged Robots that Balance*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [16] Renous, S., Herbin, M. and Gasc, J. – P., "Contribution to the Analysis of Gaits: Practical Elements to Complement the Hildebrand Method", *Comptes Rendus Biologies*, Vol. 327, 2004, pp. 99 – 103.
- [17] Rosen, K. H., *Discrete Mathematics and Its Applications*, Seventh Edition, McGraw – Hill, 2012.
- [18] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L. and Oriolo, G., *Robotics: Modeling, Planning and Control*, Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer, 2010.
- [19] Von Wachenfelt, H., Pinzke, S. and Nilsson, C., "Gait and Force Analysis of Provoked Pig Gait on Clean and Fouled Concrete Surfaces", *Biosystems Engineering*, Vol. 104, 2009, pp. 534 – 544.
- [20] Zug, G. R., "A Critique of the Walk Pattern Analysis of Symmetrical Quadrupedal Gaits", *Animal Behavior*, Vol. 20, 1972, pp. 436 – 438.
- [21] Ζάχος, Ε. και Φωτάκης, Δ., *Αλγόριθμοι και Πολυπλοκότητα*, Αθήνα, 2012.
- [22] Μοσχοβάκης, Ι. Ν., *Αναδρομή και Υπολογισιμότητα*, Αθήνα, 2008.
- [23] Παπαδόπουλος, Ε. και Κυριακόπουλος, Κ., *Σημειώσεις Ρομποτικής*, Αθήνα, 2004.
- [24] Χατζάκος, Π., «Παραμετρική Ανάλυση και Συστηματικός Σχεδιασμός Ρομπότ με

Πόδια», *Διδακτορική Διατριβή*, ΕΜΠ, Αθήνα, 2009.

- [25] Χερουβείμ, Ν. – Δ., «Δυναμική και Έλεγχος Ρομποτικών Συστημάτων με Πόδια», *Διδακτορική Διατριβή*, ΕΜΠ, Αθήνα, 2009.

Παράρτημα Α

Στο Παράρτημα Α, γίνεται μία σύντομη αναφορά στην επέκταση της μεθόδου υπολογισμού των διαγραμμάτων Hildebrand στις τρεις διαστάσεις (δυνατότητα εμποπτείας τριδιάστατων διασκελισμών).

Υπολογισμός των Διαγραμμάτων Hildebrand για Τριδιάστατη Κίνηση

Θα αναφερθούν συντόμως, ο υπολογισμός της χρονικής στιγμής μετάβασης από τη μεταβατική στη μόνιμη κατάσταση, η συλλογή των χρονικών στιγμών απογείωσης – προσγείωσης των ποδιών, και, ο υπολογισμός των συστατικών μεγεθών των διαγραμμάτων.

Υπολογισμός Χρονικής Στιγμής Μετάβασης

Για τον υπολογισμό της χρονικής στιγμής μετάβασης, υιοθετείται η χωρική, τριδιάστατη, επέκταση της βασικής ιδέας της αντίστοιχης μεθόδου που αφορά σε διδιάστατους διασκελισμούς.

Στην περίπτωση των τριδιάστατων ρομπότ, αφού υπολογισθούν τα τοπικά μέγιστα και τοπικά ελάχιστα της τροχιάς του ΚΜ του ρομπότ, όπως στην περίπτωση των δύο διαστάσεων, ελέγχεται η είσοδος και η παραμονή του ΚΜ τού, σε ένα τριδιάστατο κύλινδρο με διάμετρο όση η τιμή του *κριτηρίου διαχωρισμού*, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση υπολογισμού του περιοδικού μέρους της διδιάστατης κίνησης του ρομπότ (εδώ, 0.0050 m).

Η απαίτηση για *ελάχιστη χρονική διάρκεια* της μόνιμης κατάστασης του ρομπότ (μήκος

κυλίνδρου) παραμένει ως έχει, σε σχέση με την περίπτωση διδιάστατης κίνησης, και, η απαίτηση για διάρκεια αντίστοιχη των 30, τουλάχιστον, ολόκληρων διασκελισμών, δύναται να χρησιμοποιηθεί και εδώ.

Συλλογή Χρονικών Στιγμών Απογείωσης – Προσγείωσης

Για τη συλλογή των χρονικών στιγμών απογείωσης και προσγείωσης των ποδιών, μπορεί να επεκταθεί η ιδέα της χρήσης μίας μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων που απαντήθηκε στην Παρ. 4.2.2. Εδώ, υπάρχουν 16 δυνατές καταστάσεις του ρομπότ, και, συνακόλουθα, 16 διαφορετικοί δυναμικοί δείκτες, που ελέγχονται κατά τη σειριακή εξέταση του μονοδιάστατου πίνακα που τους περιέχει, με σκοπό την εύρεση των χρόνων απογείωσης και προσγείωσης των ποδιών όπως στην Παρ. 4.2.2.

Οι καταστάσεις του ρομπότ είναι 16, ως προς το πλήθος τους, καθώς,

$$\sum_{i=0}^{i=4} \binom{4}{i} = \binom{4}{0} + \binom{4}{1} + \binom{4}{2} + \binom{4}{3} + \binom{4}{4} = 1 + 4 + 6 + 4 + 1 = 16 \quad (7.1)$$

όπου με,

$$\binom{a}{b} = \frac{a!}{b! \cdot (a-b)!} \quad (7.2)$$

συμβολίζεται το πλήθος των δυνατών καταστάσεων στις οποίες πατούν στο έδαφος b , το πλήθος, πόδια, από τα συνολικά a , το πλήθος, πόδια. Ισχύει πως,

$$n! = n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \cdot \dots \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1, \text{ για } n \geq 1 \quad (7.3)$$

και,

$$0! = 1. \quad (7.4)$$

Επίσης,

$$b \leq a. \quad (7.5)$$

Άρα, η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων, εδώ, έχει 16 κόμβους – καταστάσεις, και,

$$\begin{array}{ccc} & \text{τρόποι για να επιλεγεί ο κόμβος - πέρας} & \\ 16 & \cdot & 16 \\ \text{τρόποι για να επιλεγεί ο κόμβος - αρχή} & & = 256 \end{array} \quad (7.6)$$

ακμές – μεταβάσεις που άγονται επί αυτών των κόμβων.

Υπολογισμός Συστατικών Μεγεθών Διαγραμμάτων

Για να συσταθεί ένα διάγραμμα Hildebrand, που αφορά σε τριδιάστατη κίνηση του ρομπότ, απαιτούνται επτά αριθμοί (βλ. Παρ. 2.2). Αυτοί, είναι, τέσσερις παράγοντες φόρτισης και τρεις διαφορές φάσης (μία για κάθε πόδι, πλην του οπίσθιου αριστερού ποδιού, το οποίο χρησιμοποιείται ως αναφορά) με βάση την χρονική στιγμή προσγείωσης του οπίσθιου αριστερού ποδιού.

Εδώ, ίσως χρειαστεί να εισαχθούν και άλλοι ορισμοί του διασκελισμού για τον υπολογισμό των επτά προαναφερθέντων μεγεθών. Είναι πιθανόν, να απαιτηθούν τέσσερις ορισμοί, δηλ., όσοι το πλήθος των δυνατών τρόπων για να συνεχιστεί η κίνηση του ρομπότ, μετά από κάποια *μεγάλη φάση πτήσης*, και οι οποίοι, τρόποι, να αφορούν σε μοναδικό συμβάν προσγείωσης ποδιού μετά από *αυτή* τη μεγάλη φάση πτήσης. Κάθε ένας ορισμός διασκελισμού, εκ των τεσσάρων, θα ταυτίζεται με εκείνο το κομμάτι της κίνησης του ρομπότ το οποίο βρίσκεται ανάμεσα σε ζεύγος διαδοχικών προσγειώσεων του αντίστοιχού του ποδιού (κάθε ορισμός αντιστοιχεί σε ένα πόδι).

Παράρτημα Β

Στο Παράρτημα Β, παρουσιάζεται η απόπειρα χρήσης ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου στο πλαίσιο της εργασίας.

Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Τ.Ν.Δ.)

Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (βλ. το αντίστοιχο άρθρο στην *ιστοσελίδα βοήθειας του MATLAB*, εισάγοντας “Neural Network”), αφαιρετικά, ορίζεται ως ένα *μαύρο κουτί* (black box) που συνδέει κάποιες «εισόδους» με τις αντίστοιχες «εξόδους» τους. Οι «εξοδοί», αποκτούνται από την εφαρμογή μίας διαδικασίας, π.χ. της δ , στις «εισόδους». Ισχύει,

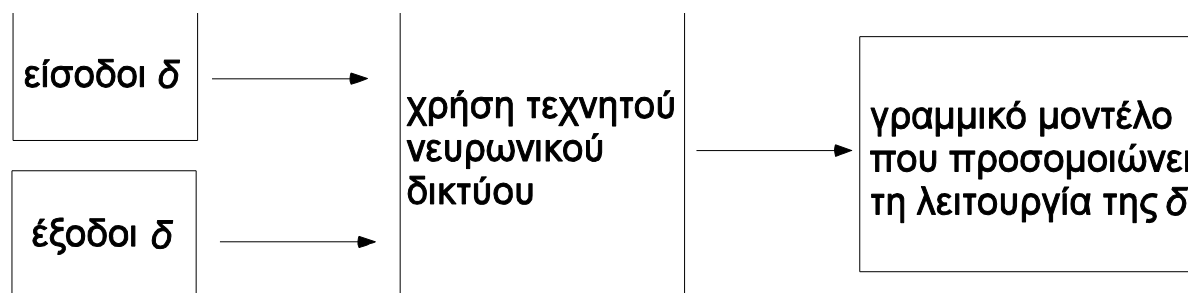
$$\delta(\text{είσοδοι}) = \text{εξοδοί.}$$

Ο απώτερος στόχος αυτής της προαναφερόμενης σύνδεσης, είναι η «εκμάθηση» του τρόπου λειτουργίας της δ και η μίμησή της, ώστε, στο μέλλον, να είναι δυνατή η προσομοίωση της λειτουργίας δ χωρίς αυτή να «συμμετέχει».

Τα οφέλη που προσκομίζονται, γενικά, από την εφαρμογή ενός τέτοιου δικτύου, απορρέουν ακριβώς από ότι δεν χρειάζεται να γίνει χρήση της δ . Αυτή, δύναται σε κάποιες περιπτώσεις, να είναι μία ασύμφορη ή απροσπέλαστη διαδικασία, λόγω υψηλού χρηματικού, χρονικού ή αποθηκευτικού (όπως π.χ., μνήμη Η/ Υ) κόστους.

Στο Σχ. ΠΒ-1, παρουσιάζεται οπτικά η χαρακτηριστική ιδιότητα ενός νευρωνικού δικτύου

που αφορά στη γραμμική συσχέτιση των εισόδων – εξόδων μίας διαδικασίας δ (linear regression).



Σχήμα ΠΒ-1. Η λειτουργία *linear regression* με χρήση ενός Τ.Ν.Δ.

Στην επόμενη παράγραφο, παρουσιάζονται τα, όχι και τόσο επιτυχημένα – ομολογουμένως, αποτελέσματα από την εφαρμογή ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

Αποτελέσματα από τη Χρήση του Τ.Ν.Δ.

Στην παρούσα εργασία, έλαβε χώρα η «εκπαίδευση» ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου με βάση ένα σύνολο πειραματικών δεδομένων τα οποία παράχθηκαν χρησιμοποιώντας το περιβάλλον προσομοιώσεων που αφορά στο μοντέλο Β του ρομπότ.

Ως εισοδοί, λήφθηκαν οι ονομαστικές τιμές της Παρ. 5.1.1, σε συνδυασμό με τη μεταβολή της σταθεράς ελατηρίου του ρομπότ, k , της κλίσης του εδάφους, φ και της βαρυτικής έλξης, g . Ως έξοδοι, λήφθηκαν τα αποτελέσματα από την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή της διαδικασίας που υπολογίζει τα ποσοτικά χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων Hildebrand, για την εκάστοτε προσομοιωμένη κίνηση, δηλ., τα PR , HDF και FDF .

Η σύγκριση που ακολουθεί, αφορά σε έλεγχο της αξιοπιστίας του δικτύου όταν δέχεται ως είσοδο κάποιους συνδυασμούς παραμέτρων, οι οποίοι, όμως, δεν ανήκουν στο σύνολο των δεδομένων βάσει του οποίου εκπαιδεύτηκε το δίκτυο. Ένα δίκτυο κρίνεται ως «αξιόπιστο», όταν, οι τιμές των PR , HDF και FDF που επιστρέφει (υπολογισμός που περιέχει σφάλμα, λόγω της *προσπάθειας γραμμικοποίησης της υποβόσκουσας σχέσης* μεταξύ των μεγεθών, από πλευράς δικτύου), για κάθε συνδυασμό παραμέτρων εισόδου, βρίσκονται «αρκετά κοντά»⁵³ στις τιμές που λαμβάνει κάποιος, αν πραγματοποιήσει τα αντίστοιχα πειράματα (δηλ., τις προσομοιώσεις) και μετά εκτελέσει το πρόγραμμα που επιστρέφει τις τρεις αυτές

⁵³ Διαφορά μικρότερη από 5%, για την εργασία αυτή.

τιμές για μία προσομοιωμένη κίνηση.

Στο, παρακάτω παρατιθέμενο, Σχ. ΠΒ-2, έρχεται εις πέρας η προαναφερόμενη σύγκριση.

		Sim	Net	
A	1.61 m/ sec ²	43.57	46.23	HDF
	5.00 μίρες	33.27	27.23	FDF
	1500 N/ m	6.95	12.57	PR
B	1.61 m/ sec ²	35.03	38.60	HDF
	5.00 μίρες	28.19	23.06	FDF
	2500 N/ m	3.99	10.59	PR
C	5.00 m/ sec ²	52.68	50.86	HDF
	5.00 μίρες	37.25	39.23	FDF
	2500 N/ m	7.32	9.67	PR
D	5.00 m/ sec ²	54.89	52.93	HDF
	7.50 μίρες	35.45	38.12	FDF
	2500 N/ m	8.43	12.13	PR

Σχήμα ΠΒ-2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων του νευρωνικού δικτύου με τιμές υπολογισμένες από διεξαγωγή προσομοιώσεων και συνακόλουθο υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών του επιλεγόμενου διασκελισμού.

Παράρτημα Γ

Στο Παράρτημα Γ, λαμβάνει χώρα μία σύντομη αναφορά στα περιεχόμενα του συνοδευτικού CD της εργασίας.

Περιεχόμενα του Συνοδευτικού CD της Εργασίας

Στο συνοδευτικό CD, περιέχονται όλα τα σχετικά με την εργασία αρχεία. Αναλυτικότερα, περιέχονται τα αρχεία του κειμένου της (.doc και .pdf), της παρουσίασής της (.ppt), των διάφορων εικόνων που περιέχονται σε αυτή (.eps, .jpeg κ.λπ.), του κώδικα MATLAB που αφορά στο υπολογιστικό κομμάτι της (.m) και κάποιων εκ των αναφορών της βιβλιογραφίας της (.pdf ή .djvu).

Παρακάτω, αναλύονται τα περιεχόμενα αρχεία που αφορούν στο πακέτο MATLAB (.m).

Αρχεία MATLAB

Τα αρχεία που είναι σχετικά με την υλοποίηση των αλγορίθμων της εργασίας στο υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB, αφορούν στα δύο περιβάλλοντα προσομοιώσεων του τετράποδου ρομπότ, στη μέθοδο υπολογισμού του διαγράμματος Hildebrand για μία δεδομένη προσομοιωμένη κίνησή του καθώς και στους αλγορίθμους υπολογισμού των διαγραμμάτων που ανακύπτουν στο πλαίσιό της (χάρτες Poincaré του Κεφ. 4, πειραματικά διαγράμματα του Κεφ. 5 κ.λπ.).

