



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.

Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ
ΕΞΑΠΟΔΟΥ ΡΟΜΠΟΤ**

Αγγελοπούλου Ελένη

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2015

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αφορά στη μελέτη ευστάθειας ενός υποβρύχιου εξάποδου ρομπότ, που φέρει εκσκαφτικό μηχανισμό. Συγκεκριμένα δίνεται βάση στον τρόπο κίνησης του ρομπότ.

Αρχικά μελετάται η στατική ευστάθεια του ρομπότ, εισάγοντας ένα απλοποιημένο διδιάστατο μοντέλο του ρομπότ. Αναπτύσσεται ο αλγόριθμος ελέγχου των βηματισμών του, με στόχο την επιλογή της βέλτιστης αλληλουχίας ανύψωσης και τοποθέτησης των ποδιών του ρομπότ, έτσι ώστε να προσαρμόζεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στο έδαφος. Επιπλέον δίνεται λύση στον τρόπο που πρέπει να κινηθεί το ρομπότ, σε περίπτωση αστοχίας κάποιου ποδιού του, καθώς και μία πρώτη εκτίμηση στον τρόπο που το ρομπότ μπορεί να αλλάζει τον τρόπο που κινείται κατά τη διάρκεια της κίνησής του, διατηρώντας την ευστάθεια του.

Επιπλέον μελετάται η δυναμική ευστάθεια του ρομπότ. Δίνεται βάση στις δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω βυθού, αλλά και λόγω του εκσκαφτικού μηχανισμού που φέρει το ρομπότ, ενώ γίνεται η χρήση του κριτηρίου Force – Angle, με το οποίο παρουσιάζονται οι προϋποθέσεις που διασφαλίζουν την ευστάθεια του ρομπότ.

Τέλος επαληθεύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση, με τη χρήση του προγράμματος προσομοίωσης δυναμικών συστημάτων MSC ADAMS, καθώς και των προγραμμάτων MATLAB και SIMULINK. Συγκεκριμένα επιλέγεται η πιο επικίνδυνη περίπτωση κίνησης του ρομπότ και προτείνεται μια λύση, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος ανατροπής.

Abstract

This work concerns the motion and stability analysis of an underwater hexapod robot carrying a trencher mechanism.

Initially the static stability of the robot is studied, introducing a simplified two - dimensional model of the robot. Developing a Gait Selection Algorithm (GSA), optimal sequence lifting and positioning of the robot legs is obtained, so that it fits in the best possible way to the ground. Moreover a solution is given on how to move the robot in case of a leg failure. A first estimation is given in the gait transition of the robot, during locomotion in order to maintain its stability.

Furthermore the dynamic stability of the robot is studied. Forces from the bottom of the sea and trenching force / torque are taken into account, while the Force – Angle criterion is studied yielding the conditions ensuring the stability of the robot.

The results obtained from the analysis are verified using the dynamic simulation program MSC ADAMS, with MATLAB and SIMULINK co - simulation. More specifically, the most critical case of robot motion is selected and a solution is proposed in order to avoid the risk of robot tipping over.

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον καθηγητή μου, κ. Ε. Παπαδόπουλο, για την εμπιστοσύνη του να συμμετέχω σε ένα απαιτητικό project και για την προτροπή του να παίρνω πρωτοβουλίες. Με τη βοήθεια του, τις πολύτιμες συμβουλές του και την καθοδήγηση του, μου μετέδωσε μεγάλο ενθουσιασμό για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Ακόμη ευχαριστώ θερμά τα μέλη του εργαστηρίου για τη βοήθειά τους και για τις φιλικές και παραγωγικές τους συμβουλές, χάρις τις οποίες ενθαρρύνθηκα ακόμη περισσότερο για την αποπεράτωση της εργασίας. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τους Κλάιντ Λίκα, Γιώργο Ρεκλείτη και Κώστα Κουτσούκη, χωρίς τη βοήθεια των οποίων δεν θα είχαν γίνει όλα αυτά.

Τέλος, αλλά εξίσου θερμά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την ενθάρρυνση, τη στήριξη και την αγάπη που μου πρόσφεραν απλόχερα όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Ευχαριστίες.....	5
Περιεχόμενα.....	6
Κατάλογος Σχημάτων	8
Κατάλογος Πινάκων.....	11
1. Εισαγωγή.....	12
1.1. Σκοπός Εργασίας	12
1.2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	13
1.3. Δομή Εργασίας.....	15
2. Κινηματική και δυναμική ρομποτικών συστημάτων.....	17
2.1. Κινηματική ρομπότ	17
2.2. Κριτήριο Δύναμης - Γωνίας (Force - Angle criterion) [15].....	22
3. Στατική ευστάθεια.....	28
3.1. Ανάλυση ρομπότ	28
3.1.1. Workspace ποδιού	29
3.1.2. Διάσταση ρομπότ	30
3.2. Περιγραφή Hexa-Terra robot.....	30
3.3. Αλγόριθμος επιλογής βηματισμού (Gait Selection Algorithm GSA) ...	32
3.4. Κίνηση Ρομπότ (Mode)	33
3.4.1. Crab mode (fi,d)	33
3.4.2. Crab trim.....	34
3.4.3. Curve mode (fi,d).....	36
3.4.4. Curve trim.....	42
3.5. Κλίση εδάφους κατά Χ.....	45
3.6. Βηματισμοί (Gaits).....	46
3.6.1. Εισαγωγή	46
3.6.2. Tripod Gait.....	47
3.6.3. Quadruped Gait.....	56
3.6.4. Pentapod Gait	66
3.7. Αστοχία ποδιού	81

3.7.1.	Αστοχία 1 ^{ου} ποδιού.....	81
3.7.2.	Αστοχία 2 ^{ου} ποδιού.....	83
3.8.	Μετάβαση βηματισμού (Gait Transition).....	84
4.	Δυναμική Ευστάθεια.....	88
4.1.	Εξωτερικές δυνάμεις.....	88
4.2.	Force – Angle Criterion	90
4.3.	Αποτελέσματα Force – Angle Criterion	90
5.	Αποτελέσματα	93
5.1.	Προσομοίωση Tripod gait.....	93
5.2.	Μεθοδολογία αποφυγής ανατροπής ρομπότ.....	99
6.	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	101
6.1.	Συμπεράσματα	101
6.2.	Μελλοντική Εργασία	102
	Βιβλιογραφία	104

Κατάλογος Σχημάτων

1^ο Κεφάλαιο

Σχήμα 1-1. (a) η βασική αρχιτεκτονική του RHex (b) Ρομπότ LAURON V, από το FZI Research Center for Information Technology in Karlsruhe, στη Γερμανία (c) Μία διαμόρφωση του πρωτοτύπου LEMUR: το μπροστινό άκρο λειτουργεί σαν πόδι και σαν ώμο, με ενσωματωμένα εργαλεία (d) Ρομπότ ATHLETE κατά τη διάρκεια πειραματικών δοκιμών.	14
--	----

2^ο Κεφάλαιο

Σχήμα 2-1. Τα links των ποδιών σύμφωνα με την προσέγγιση Denavit-Hartenberg.	17
Σχήμα 2-2. Διανύσματα ποδιού και σώματος ρομπότ.	18
Σχήμα 2-3. Γραμμική και γωνιακή ταχύτητα σώματος και γραμμική ταχύτητα πέλματος ποδιού.	20
Σχήμα 2-4. Επιθυμητή τροχιά σώματος και ποδιού.	22
Σχήμα 2-5. 3-D μέτρο ευστάθειας με το κριτήριο Force – Angle.	23
Σχήμα 2-6. Χρήση του ισοδύναμου ζεύγους δυνάμεων για αντικατάσταση της ροπής στο CM.	25

3^ο Κεφάλαιο

Σχήμα 3-1. 2-D Μοντέλο του εξάποδου ρομπότ.	28
Σχήμα 3-2. Workspace ποδιών.	29
Σχήμα 3-3. Διαστάσεις ρομπότ.	30
Σχήμα 3-4. Ρομπότ 'Hexa-Terra'.	31
Σχήμα 3-5. 2-D Παραμετροποιημένες συντεταγμένες ποδιών.	32
Σχήμα 3-6. Crab Mode.	34
Σχήμα 3-7. Crab trim στον X άξονα.	35
Σχήμα 3-8. Crab trim στον Y άξονα.	36
Σχήμα 3-9. Crab trim στον X ή στον Y άξονα.	36
Σχήμα 3-10. Curve Mode.	37
Σχήμα 3-11. Curve mode – Ευθεία μπροστά κίνηση.	38
Σχήμα 3-12. Ευθεία μπροστά κίνηση – Πόδι 1.	38
Σχήμα 3-13. Curve mode – Περιστροφή.	39
Σχήμα 3-14. Περιστροφή – Πόδι 1.	40
Σχήμα 3-15. Ανάλυση του curve mode.	41

Σχήμα 3-16. Ανάλυση του curve mode για το πόδι 1	42
Σχήμα 3-17. Curve trim	44
Σχήμα 3-18. Κλίση εδάφους ως προς άξονα Χ.....	45
Σχήμα 3-19. Ρομπότ υπό κλίση σε κάτοψη.....	46
Σχήμα 3-20. Περιθώριο ευστάθειας για tripod gait.....	47
Σχήμα 3-21. Κίνηση ποδιού σε crab mode.....	48
Σχήμα 3-22. Tripod gait – εμπρόσθια κίνηση.....	49
Σχήμα 3-23. Διάγραμμα χρόνου για tripod gait.....	50
Σχήμα 3-24. Tripod gait – Εγκάρσια κίνηση.....	50
Σχήμα 3-25. Tripod gait – Εγκάρσια κίνηση.....	51
Σχήμα 3-26. Tripod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $b < f_i \leq 90^\circ$	51
Σχήμα 3-27. Tripod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $0 < f_i \leq b$	52
Σχήμα 3-28. Tripod gait – Περιστροφή.....	54
Σχήμα 3-29. Κίνηση CM σε curve mode με tripod gait.....	55
Σχήμα 3-30. Tripod gait – Κίνηση σε καμπύλη.....	55
Σχήμα 3-31. Tripod gait – Κίνηση σε καμπύλη.....	56
Σχήμα 3-32. Περιθώριο ευστάθειας σε quadruped gait.....	56
Σχήμα 3-33. Διάγραμμα χρόνου για ευθεία κίνηση με quadruped gait.....	57
Σχήμα 3-34. Quadruped gait – Εμπρόσθια κίνηση.....	58
Σχήμα 3-35. Quadruped gait – Εγκάρσια κίνηση.....	59
Σχήμα 3-36. Quadruped gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $b < f_i \leq 90^\circ$	60
Σχήμα 3-37. Quadruped gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $0 < f_i \leq b$	61
Σχήμα 3-38. Quadruped gait – Περιστροφή.....	63
Σχήμα 3-39. Quadruped gait – Περιστροφή.....	64
Σχήμα 3-40. Κίνηση CM σε curve mode με quadruped gait.....	65
Σχήμα 3-42. Quadruped gait – Κίνηση σε καμπύλη.....	66
Σχήμα 3-43. Περιθώριο ευστάθειας σε pentapod gait.....	67
Σχήμα 3-44. Pentapod gait – εμπρόσθια κίνηση.....	68
Σχήμα 3-45. Pentapod gait – εμπρόσθια κίνηση.....	69
Σχήμα 3-46. Διάγραμμα χρόνου για ευθεία κίνηση με pentapod gait.....	69
Σχήμα 3-47. Pentapod gait – Εγκάρσια κίνηση.....	70
Σχήμα 3-48. Pentapod gait – Εγκάρσια κίνηση.....	71
Σχήμα 3-49. Pentapod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $b < f_i \leq 90^\circ$	72
Σχήμα 3-50. Pentapod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $b < f_i \leq 90^\circ$	73
Σχήμα 3-51. Pentapod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $0 < f_i \leq b$	74

Σχήμα 3-52. Pentapod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $0 < f_i \leq b$	75
Σχήμα 3-53. Pentapod gait – Περιστροφή	77
Σχήμα 3-54. Pentapod gait – Περιστροφή	78
Σχήμα 3-55. Κίνηση CM σε curve mode με pentapod gait	79
Σχήμα 3-56. Pentapod gait – Κίνηση σε καμπύλη	80
Σχήμα 3-57. Pentapod gait – Κίνηση σε καμπύλη	81
Σχήμα 3-58. Αστοχία 1ου ποδιού.	82
Σχήμα 3-59. Αστοχία 1 ^{ου} ποδιού.	83
Σχήμα 3-60. Αστοχία 2 ^{ου} ποδιού.	83
Σχήμα 3-61. Αστοχία 2 ^{ου} ποδιού.	84
Σχήμα 3-62. Μικρό εξάποδο ρομπότ εργαστηρίου.	86

4^ο Κεφάλαιο

Σχήμα 4-1. Εξωτερικές δυνάμεις ρομπότ.	89
Σχήμα 4-2. 3 διαφορετικά είδη κίνησης, σε έδαφος με κλίση ϕ_1	91
Σχήμα 4-3. Μέγιστη κλίση γωνίας ϕ_1 για ευσταθή κίνηση των 3 gaits για κάθε mode... ..	92

5^ο Κεφάλαιο

Σχήμα 5-1. Προσομοίωση ρομπότ με τη χρήση MSC ADAMS.....	93
Σχήμα 5-2. 3-D προσομοίωση του tripod gait.....	94
Σχήμα 5-3. Κριτήριο Force – Angle κατά τη διάρκεια του κύκλου κίνησης του ρομπότ... ..	95
Σχήμα 5-4. Κριτήριο Force – Angle στις 19° όπου ανατρέπεται το ρομπότ.....	96
Σχήμα 5-5. Στιγμιότυπο ρομπότ σε γωνία εδάφους 19°	97
Σχήμα 5-6. Στιγμιότυπο ρομπότ σε γωνία εδάφους 19°	97
Σχήμα 5-7. Κίνηση CM κατά τον X – άξονα.....	98
Σχήμα 5-8. Κίνηση CM κατά τον Y – άξονα.....	98
Σχήμα 5-9. Κίνηση CM κατά τον Z – άξονα... ..	99
Σχήμα 5-10. Ρομπότ με διαμόρφωση των πίσω ποδιών σε κάτοψη.	100

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Παράμετροι Denavit-Hartenberg	18
Πίνακας 4-1. Περιθώρια ευστάθειας για όλους τους συνδυασμούς gait/mode.....	92
Πίνακας 6-1. Ιδιότητες των gaits.	101

1. Εισαγωγή

1.1. Σκοπός Εργασίας

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει ξεκινήσει η μελέτη των ρομπότ με πόδια. Όπως είναι φυσικό, αυτή η μορφή κίνησης δεν είναι εξίσου αποδοτική, όσο η κίνηση με τροχούς σε επίπεδες επιφάνειες. Όμως οι περισσότερες επιφάνειες που συναντώνται, όχι μόνο στην γη αλλά και σε άλλους πλανήτες, αποτελούνται από ανομοιομορφίες, τραχύτητες, εμπόδια αλλά και κλίσεις, γεγονός που τις καθιστά δύσβατες για τα ρομπότ με τροχούς. Για το λόγο αυτό η ρομποτική στράφηκε στην μελέτη της κίνησης με πόδια, κατά την οποία τα ρομπότ είναι ικανά να ξεπερνούν εμπόδια, αλλά και να μην ανατρέπονται σε μεγάλες κλίσεις εδάφους.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα των ρομπότ με πόδια, κυρίως από πλευράς στατικής ανάλυσης, είναι η ικανότητα τους να κινούνται, ακόμη και σε περιπτώσεις αστοχίας κάποιου ποδιού τους σε αντίθεση με τα τροχοφόρα ρομπότ. Φυσικά όσα περισσότερα πόδια διαθέτει το ρομπότ, τόσο πιο ευσταθές το καθιστά η απώλεια κάποιου ποδιού, χωρίς τη χρήση εξωτερικής παρέμβασης. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα που καθιστά τέτοιου είδους ρομπότ ιδιαίτερα επιθυμητά σε απομακρυσμένα ή επικίνδυνα για τον άνθρωπο περιβάλλοντα. Για παράδειγμα μία αστοχία ποδιού σε ένα εξάποδο ρομπότ, πιθανότατα να μην προκαλέσει καμία καταστροφική αποτυχία, ή κάποια αστάθεια στην κίνησή του.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν κατασκευαστεί ρομπότ με ένα, δύο, τέσσερα, έξι, οχτώ και δέκα πόδια. Ο λόγος που έχουν μελετηθεί ρομπότ με τόση ποικιλία ποδιών, αποδίδεται στις εφαρμογές τους. Όσο λιγότερα πόδια έχει ένα ρομπότ, τόσο πιο γρήγορα μπορεί να κινηθεί, όμως καθίσταται λιγότερο ευσταθές σε σχέση με ένα ρομπότ με περισσότερα πόδια. Συνεπώς αναλόγως το έδαφος, την εργασία που πρέπει να γίνει από ένα ρομπότ, καθώς και η ακρίβειά της, αλλά και το κατά πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος του χρόνου μέσα στον οποίο πρέπει να επιτευχθεί η εργασία αυτή, επιλέγεται και το ρομπότ με το κατάλληλο πλήθος αλλά και διαμόρφωση ποδιών.

Φαίνεται λοιπόν, ότι είναι αναγκαία η μελέτη των παραμέτρων αυτών, έτσι ώστε να επιλεγεί και η κατάλληλη διαμόρφωση των ποδιών, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η διαμόρφωση αναφέρεται στους βαθμούς ελευθερίας που διαθέτει το κάθε πόδι αλλά και στην συνολική κατασκευή του ποδιού. Όσες περισσότερες απαιτήσεις υπάρχουν στην εργασία, που πρέπει να παράγει το ρομπότ, τόσο πιο πολύπλοκη καθίσταται η κίνηση και η διαμόρφωση του ρομπότ. Βέβαια, όσα περισσότερα πόδια διαθέτει το ρομπότ, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ευελιξία του στις κινήσεις που μπορεί παράγει.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την κίνηση του εξάποδου ρομπότ. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η στατική ανάλυση εξάποδου υποβρύχιου ρομπότ που φέρει

εκσκαφτικό μηχανισμό και η ανάπτυξη αλγορίθμων ελέγχου των βηματισμών (gaits) του, με στόχο την επιλογή της βέλτιστης αλληλουχίας ανύψωσης και τοποθέτησης των ποδιών του ρομπότ, έτσι ώστε να προσαρμόζεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στο έδαφος. Επιπλέον μελετάται η αλληλουχία των ποδιών του ρομπότ σε περίπτωση πιθανής βλάβης κάποιου ποδιού, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ευστάθεια του. Τέλος μελετάται η δυναμική ευστάθεια του ρομπότ, με στόχο την επαλήθευση της στατικής με την δυναμική ανάλυση.

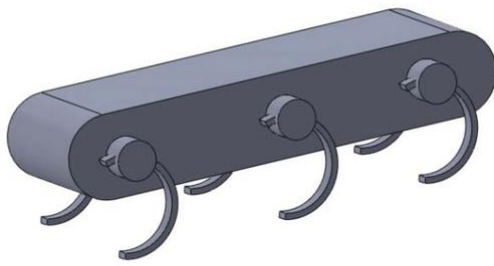
1.2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Οι δύο τελευταίες δεκαετίες χαρακτηρίζονται από ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας των εξάποδων ρομπότ. Πλέον τα ρομπότ είναι εξοπλισμένα με διάφορα συστήματα ανίχνευσης. Συστήματα τεχνητής νοημοσύνης έχουν ευρέως εφαρμοστεί για την ανάλυση του περιβάλλοντος και της κίνησης του ρομπότ σε σύνθετη επιφάνεια.

Πολλά εξάποδα ρομπότ είναι βιολογικά εμπνευσμένα, από την κίνηση εξάποδων εντόμων και κυρίως από την κίνηση της κατσαρίδας ή του φασματώδους εντόμου. Μια σειρά τέτοιων ρομπότ αναπτύχθηκε στο Case Western Reserve University (ΗΠΑ), στο τέλος της δεκαετίας του '90, όπως, για παράδειγμα, το Robot III, του οποίου η αρχιτεκτονική βασίστηκε στην δομή της κατσαρίδας [13]. Ομοίως, το Biobot ήταν ένα βιομιμητικό ρομπότ, μοντελοποιημένο όπως η αμερικανική κατσαρίδα (*Periplaneta Americana*) και τροφοδοτούμενο με πεπιεσμένο αέρα [3]. Το ρομπότ αυτό είχε μεγάλη ταχύτητα και ευελιξία. Κάθε πόδι του, είχε τρία τμήματα, που αντιστοιχούν στα τρία βασικά τμήματα των ποδιών των εντόμων: ισχίο, μηρό, και κνήμη.

Ο Hamlet ήταν ένα εξάποδο ρομπότ, που κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο του Canterbury στη Νέα Ζηλανδία [4]. Τα πόδια του ήταν όλα όμοια και το καθένα είχε τρεις περιστροφικές αρθρώσεις. Η αποστολή του Hamlet ήταν να χρησιμοποιηθεί στη μελέτη της δύναμης και του ελέγχου θέσης σε ανώμαλο έδαφος. Το 2001, σχεδιάστηκε το ρομπότ RHex [17]. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του RHex είναι ότι το κάθε πόδι του διαθέτει έναν βαθμό ελευθερίας, συνεπώς αποτελείται μόνο από έξι κινητήρες (Σχήμα 1-1a).

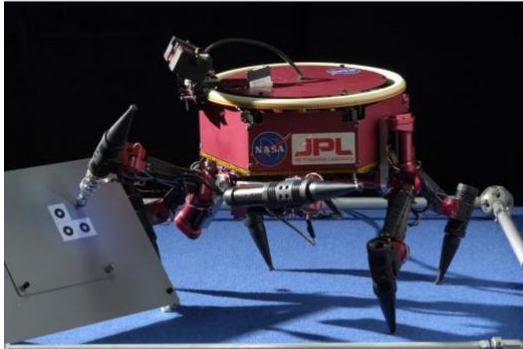
Το εξάποδο ρομπότ Lauron V (Σχήμα 1-1b) ήταν το αποτέλεσμα περίπου 10 χρόνων βελτίωσης των προηγούμενων ρομπότ Lauron I, II, III και IV. Το LAURON [16] είναι βιολογικά εμπνευσμένο από το φασματώδες έντομο. Κάθε ένα από τα έξι πόδια του αποτελείται από τέσσερις αρθρώσεις και κάθε πόδι έχει έναν αισθητήρα δύναμης τριών αξόνων, ενώ κάθε κινητήρας έχει έναν αισθητήρα που ανιχνεύει δυνάμεις που αντιτίθενται στην κίνηση του. Το έργο αυτό εξακολουθεί να είναι ενεργό ακόμα και τώρα.



(a)



(b)



(c)



(d)

Σχήμα 1-1. (a) η βασική αρχιτεκτονική του RHex (b) Ρομπότ LAURON V, από το FZI Research Center for Information Technology in Karlsruhe, στη Γερμανία (c) Μία διαμόρφωση του πρωτοτύπου LEMUR: το μπροστινό άκρο λειτουργεί σαν πόδι και σαν ώμο, με ενσωματωμένα εργαλεία (d) Ρομπότ ATHLETE κατά τη διάρκεια πειραματικών δοκιμών.

Μια σειρά από εξάποδα που ονομάζονται LEMUR (Limbed Excursion Mechanical Utility Robots) αναπτύχθηκαν από το Jet Propulsion Laboratory [11] με στόχο τη χρήση των ρομπότ για την επισκευή και συντήρηση, σε σχεδόν μηδενική βαρύτητα, διαστημικών οχημάτων (Σχήμα 1-1c).

Το 2004, ένα εξάποδο σεληνιακό ρομπότ που ονομάζεται ATHLETE (Σχήμα 1-1d), αναπτύχθηκε από το Jet Propulsion Laboratory, στο πλαίσιο του προγράμματος ανάπτυξης και τεχνολογίας της NASA [6]. Η ιδιαιτερότητα του ρομπότ αυτού έγκειται στα πέλματα των ποδιών του, όπου διαθέτει τροχούς, οι οποίοι μπορούν να "κλειδώνουν", ώστε το ρομπότ να περπατάει, είτε να ενεργοποιούνται ώστε το ρομπότ να κινείται γρήγορα σε ομαλά εδάφη [19]. Άλλο ένα σημαντικό επίτευγμα της ρομποτικής είναι το ρομπότ Mantis, το οποίο είναι ένα υδραυλικό εξάποδο ρομπότ που ζυγίζει περίπου 2 τόνους και έχει ύψος περίπου 3 m. Προς το παρόν, είναι ένα από τα μεγαλύτερα εξάποδα ρομπότ στον κόσμο [12].

Το AQUA είναι ένα αμφίβιο εξάποδο ρομπότ [5], το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του οποίου είναι, η δυνατότητα του να εναλλάζει τους βηματισμούς (gaits) του, από περπάτημα σε κολύμπι. Το υποβρύχιο ρομπότ CR200 κατασκευάστηκε βασιζόμενο στο

στην ιδέα του Crabster [10]. Το πεδίο εφαρμογής του ήταν η επιθεώρηση των ναυαγίων ή η έρευνα του βυθού σε υψηλό ρεύμα και θολό περιβάλλον.

Τις περισσότερες φορές, τα εξάποδα ρομπότ ελέγχονται από βηματισμούς (gaits), οι οποίοι επιτρέπουν στο ρομπότ να κινηθεί προς τα εμπρός, να περιστραφεί, και ίσως να κινηθεί και πλάγια. Οι βηματισμοί για τα εξάποδα ρομπότ είναι συχνά σταθεροί, ακόμη και σε ελαφρώς πετρώδες και ανώμαλο έδαφος. Η κίνηση μπορεί επίσης να είναι non-gaited, πράγμα που σημαίνει ότι η αλληλουχία των κινήσεων των ποδιών δεν είναι σταθερή, αλλά επιλέγεται από έναν υπολογιστή με στόχο το ρομπότ να ανταποκρίνεται στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Αυτό μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο σε πολύ βραχώδες έδαφος, αλλά οι υπάρχουσες τεχνικές για το σχεδιασμό της κίνησης είναι υπολογιστικά δαπανηρές. Η παρούσα εργασία αφορά στα gaits που μπορεί να χρησιμοποιήσει το εξάποδο ρομπότ [9], [14], [20], [21], καθώς επίσης και τις διαμορφώσεις που μπορεί να χρησιμοποιήσει όταν αστοχήσει κάποιο πόδι ή όταν κινδυνεύσει να ανατραπεί.

1.3. Δομή Εργασίας

Η εργασία είναι δομημένη με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να αρχίζει με μια απλούστερη αντιμετώπιση του ρομπότ, την στατική ανάλυση, και τελικά να καταλήγει στην πραγματική εικόνα του, την δυναμική ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στην εργασία. Παρουσιάζεται ο λόγος κατασκευής των ρομπότ με πόδια, καθώς και ο σκοπός της παρούσας εργασίας. Επιπλέον γίνεται μία ανασκόπηση στην εκτενή βιβλιογραφία που σχετίζεται με εξάποδα ρομπότ και με τον τρόπο κίνησής τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία θεωρίας που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται η κινηματική ρομπότ με πόδι, όπου έχει την ιδιαιτερότητα ότι ταυτόχρονα με το πόδι, κινείται και το κέντρο μάζας του ρομπότ. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το κριτήριο που χρησιμοποιείται στην εργασία για την μελέτη της δυναμικής ευστάθειας του ρομπότ.

Στο τρίτο κεφάλαιο ξεκινάει το κύριο μέρος της εργασίας, όπου και μελετάται ένα απλό διδιάστατο μοντέλο εξάποδου ρομπότ, στο πλαίσιο της στατικής ανάλυσης. Παρουσιάζεται η ανάπτυξη του αλγορίθμου, που παράγει την βέλτιστη αλληλουχία ανύψωσης και τοποθέτησης των ποδιών του ρομπότ. Επιπλέον δίνεται λύση στον τρόπο που πρέπει να κινηθεί το ρομπότ, σε περίπτωση αστοχίας κάποιου ποδιού του, καθώς και μία πρώτη εκτίμηση στον τρόπο που το ρομπότ μπορεί να αλλάζει τον τρόπο που κινείται κατά τη διάρκεια της κίνησης του, διατηρώντας την ευστάθεια του.

Στο τέταρτο κεφάλαιο μελετάται η δυναμική ευστάθεια του ρομπότ, βάση των αποτελεσμάτων του τρίτου κεφαλαίου. Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται βάση στις δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω βυθού, αλλά και λόγω του εκσκαφτικού μηχανισμού που φέρει το

ρομπότ, ενώ γίνεται η χρήση του κριτηρίου Force – Angle, με το οποίο παρουσιάζονται οι προϋποθέσεις που διασφαλίζουν την ευστάθεια του ρομπότ.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση, με τη χρήση του προγράμματος προσομοίωσης δυναμικών συστημάτων MSC ADAMS, καθώς και των προγραμμάτων MATLAB και SIMULINK. Πιο συγκεκριμένα επιλέγεται η πιο επικίνδυνη περίπτωση κίνησης του ρομπότ που προκύπτει από την δυναμική ανάλυση και επαληθεύεται το κριτήριο Force – Angle μέσω προσομοίωσης. Επιπλέον προτείνεται μία λύση ώστε με μία μικρή διαμόρφωση στα πόδια του ρομπότ, να μηδενιστεί ο κίνδυνος ανατροπής του.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την στατική και δυναμική ανάλυση των κεφαλαίων τρία και τέσσερα αντίστοιχα, σε συνδυασμό με την προσομοίωση του πέμπτου κεφαλαίου. Επιπλέον αναφέρονται οι δυνατότητες μελλοντικής εργασίας πάνω στο ίδιο αντικείμενο.

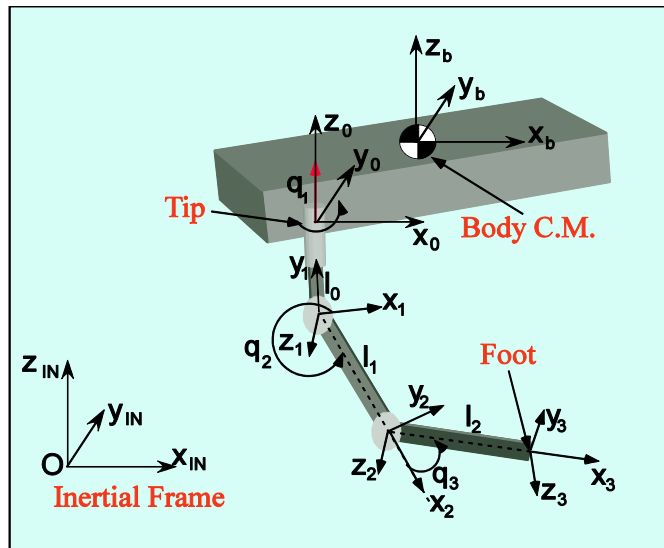
2. Κινηματική και δυναμική ρομποτικών συστημάτων

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η κινηματική και η δυναμική του ρομπότ, περιγράφοντας το κριτήριο δυναμικής ευστάθειας με βάση τη συνολική δύναμη που ασκείται στο ρομπότ, αλλά και την γωνία αυτής της δύναμης.

2.1. Κινηματική ρομπότ

Η κινηματική του ρομπότ περιλαμβάνει προβλήματα ευθείας και αντίστροφης κινηματικής. Το πρόβλημα της ευθείας κινηματικής, δίνει τη θέση του ποδιού ως προς ένα επιλεγμένο αδρανειακό σύστημα, συναρτήσει της διαμόρφωσης ποδιού, με σκοπό να εκτιμηθεί ο χώρος εργασίας (workspace) του ποδιού. Η αντίστροφη κινηματική προκύπτει από την επίλυση των εξισώσεων, που προέρχονται από το πρόβλημα της ευθείας κινηματικής, με στόχο την εύρεση των απαιτούμενων γωνιακών ταχυτήτων των αρθρώσεων κάθε ποδιού του ρομπότ, έτσι ώστε το πόδι να τοποθετείται στην επιθυμητή θέση.

Το πρόβλημα της ευθείας κινηματικής οδηγείται από τη προσέγγιση Denavit-Hartenberg (DH), [1]. Σύμφωνα με τη μέθοδο DH, στο Σχήμα 2-1 απεικονίζονται οι σύνδεσμοι των ποδιών (links). Στον Πίνακα 2-1 φαίνονται οι παράμετροι D-H.



Σχήμα 2-1. Τα links των ποδιών σύμφωνα με την προσέγγιση Denavit-Hartenberg.

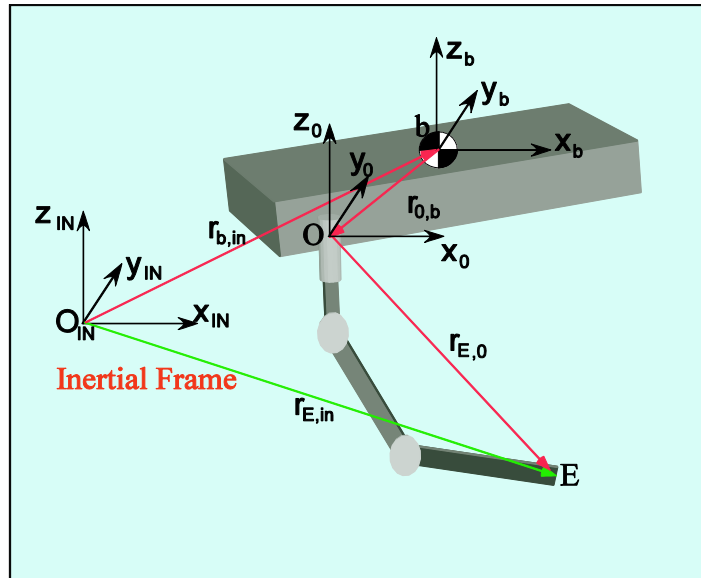
Πίνακας 2-1. Παράμετροι Denavit-Hartenberg

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	q_1
2	-90	l_0	0	q_2
3	0	l_1	0	q_3
4	0	l_2	0	0

Με τη χρήση των πινάκων ομογενούς μετασχηματισμού, οι οποίοι προκύπτουν από τις παραμέτρους DH του Πίνακας 2-1, αποδεικνύεται ότι η θέση του πέλματος του ποδιού ως προς το σύστημα συντεταγμένων (ΣΣ) $\{0\}$, εκφρασμένη στο $\{0\}$, ${}^0\mathbf{r}_{E,0}$, δίνεται από:

$${}^0\mathbf{r}_{E,0} = \begin{bmatrix} {}^0x_E \\ {}^0y_E \\ {}^0z_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(q_1)(l_0 + l_1\cos(q_2) + l_2\cos(q_2 + q_3)) \\ \sin(q_1)(l_0 + l_1\cos(q_2) + l_2\cos(q_2 + q_3)) \\ -l_1\sin(q_2) - l_2\sin(q_2 + q_3) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Η θέση του πέλματος του ποδιού ως προς το αδρανειακό ΣΣ, εκφρασμένο στο αδρανειακό σύστημα, ${}^{in}\mathbf{r}_{E,in}$, φαίνεται στο Σχήμα 2-2 (όπου in είναι η αδράνεια).



Σχήμα 2-2. Διανύσματα ποδιού και σώματος ρομπότ.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2-2, το διάνυσμα ${}^{in}\mathbf{r}_{E,in}$ δίνεται από:

$${}^{in}\mathbf{r}_{E,in} = {}^{in}\mathbf{r}_{b,in} + {}^{in}\mathbf{r}_{0,b} + {}^{in}\mathbf{r}_{E,0} = {}^{in}\mathbf{r}_{b,in} + {}^{in}\mathbf{R}_b {}^b\mathbf{r}_{0,b} + {}^{in}\mathbf{R}_b {}^b\mathbf{R}_0 {}^0\mathbf{r}_{E,0} \quad (2.2)$$

όπου ${}^{\text{in}}\mathbf{R}_b$ και ${}^b\mathbf{R}_0$ είναι οι πίνακες περιστροφής μεταξύ του αδρανειακού ΣΣ και του ΣΣ του σώματος {b}, και μεταξύ του ΣΣ του σώματος {b} και του ΣΣ {0}, αντίστοιχα. Τα διανύσματα $\mathbf{r}_{b,\text{in}}$ και $\mathbf{r}_{0,b}$ είναι τα διανύσματα θέσης του κέντρου μάζας (CM) του σώματος ως προς το αδρανειακό σύστημα και το διάνυσμα θέσης του σημείου 0 (tip) ως προς το σύστημα σώματος, αντίστοιχα. Τόσο το ΣΣ {b} όσο και το {0} είναι τοποθετημένα στο σώμα και εδώ επιλέγονται να είναι παράλληλα, έτσι:

$${}^b\mathbf{R}_0 = \mathbf{I}_3 \quad (2.3)$$

όπου \mathbf{I}_3 είναι ο 3x3 μοναδιαίος πίνακας.

Ο πίνακας ${}^{\text{in}}\mathbf{R}_b$ προσδιορίζει τον προσανατολισμό της βάσης (σώμα) ως προς το αδρανειακό σύστημα και μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση των γωνιών z-y-x Euler, α, β, γ .

$${}^{\text{in}}\mathbf{R}_b = \begin{bmatrix} c_{(\alpha)}c_{(\beta)} & -s_{(\alpha)}c_{(\gamma)} + c_{(\alpha)}s_{(\beta)}s_{(\gamma)} & s_{(\gamma)}s_{(\alpha)} + c_{(\gamma)}s_{(\beta)}c_{(\alpha)} \\ s_{(\alpha)}c_{(\beta)} & c_{(\alpha)}c_{(\gamma)} + s_{(\alpha)}s_{(\beta)}s_{(\gamma)} & -s_{(\gamma)}c_{(\alpha)} + c_{(\gamma)}s_{(\beta)}s_{(\alpha)} \\ -s_{(\beta)} & c_{(\beta)}s_{(\gamma)} & c_{(\gamma)}c_{(\beta)} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

όπου $s_{(\cdot)} = \sin(\cdot)$ και $c_{(\cdot)} = \cos(\cdot)$.

Η Εξ. (2.2) μπορεί να γραφτεί:

$$\mathbf{r}_{E,0} = {}^{\text{in}}\mathbf{R}_b^T (\text{in}\mathbf{r}_{E,\text{in}} - \text{in}\mathbf{r}_{b,\text{in}} - {}^{\text{in}}\mathbf{R}_b {}^b\mathbf{r}_{0,b}) \quad (2.5)$$

Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός του διανύσματος ${}^0\mathbf{r}_{E,0}$ απαιτεί τόσο τη θέση του σημείου E ως προς το αδρανειακό σύστημα, $\text{in}\mathbf{r}_{E,\text{in}}$, και τη θέση του CM του σώματος ως προς το αδρανειακό σύστημα, $\text{in}\mathbf{r}_{b,\text{in}}$, όσο και τον προσανατολισμό του σώματος ως προς το αδρανειακό σύστημα.

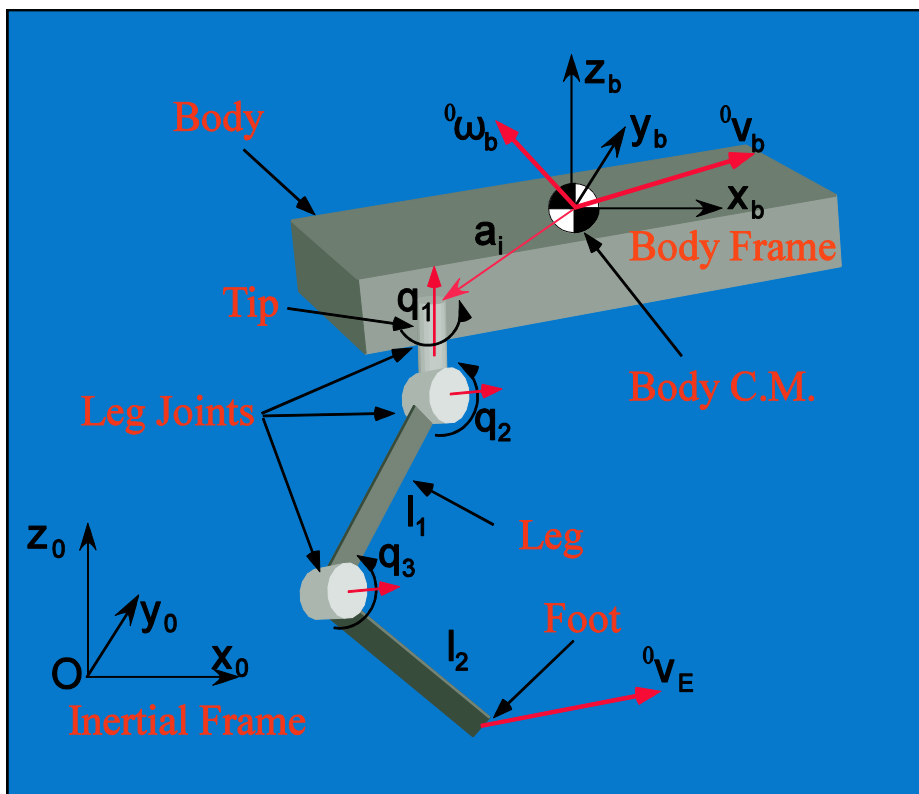
Στη συνέχεια, μελετάται το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα της εύρεσης των γωνιακών θέσεων των αρθρώσεων του ποδιού. Η λύση της Εξ. (2.1) οδηγεί στις εξής εξισώσεις:

$$\begin{aligned} q_1 &= \text{atan2}({}^0y_E, {}^0x_E) \\ q_3 &= \text{acos}\left(\frac{(\pm\sqrt{{}^0x_E^2 + {}^0y_E^2} - l_0)^2 + {}^0z_E^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \\ q_2 &= \text{atan2}\left(-(\pm\sqrt{{}^0x_E^2 + {}^0y_E^2} - l_0)A - B {}^0z_E, (\pm\sqrt{{}^0x_E^2 + {}^0y_E^2} - l_0)B - A {}^0z_E\right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

όπου

$$\begin{aligned} A &= l_2 s_{(q_3)} \\ B &= l_1 + l_2 c_{(q_3)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Ωστόσο, η κίνηση τόσο του σώματος και του πέλματος του ποδιού συνήθως ορίζεται από τις ταχύτητες τους (γραμμική και γωνιακή), (βλέπε Σχήμα 2-3). Ως εκ τούτου το επόμενο που μελετάται είναι η ταχύτητα του συστήματος ή αλλιώς τα προβλήματα ευθείας / αντίστροφης διαφορικής κινηματικής. Η μελέτη αυτή, διευκολύνει την εκτίμηση των απαιτούμενων γωνιακών ταχυτήτων των αρθρώσεων του ποδιού, έτσι ώστε το πόδι και το σώμα να μπορούν εκτελούν τις επιθυμητές κινήσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-3. Γραμμική και γωνιακή ταχύτητα σώματος και γραμμική ταχύτητα πέλματος ποδιού.

Η σχετική γραμμική ταχύτητα του πέλματος του ποδιού (σημείο E) ως προς τη γραμμική ταχύτητα του σημείου 0 εκφρασμένη στο ΣΣ {0}, ${}^0\mathbf{v}_{E,0}$, δίνεται από:

$${}^0\mathbf{v}_{E,0} = {}^0\mathbf{J}_L \dot{\mathbf{q}} \quad (2.8)$$

όπου ${}^0\mathbf{J}_L$ είναι ο Ιακωβιανός πίνακας που αντιστοιχεί στην γραμμική ταχύτητα του πέλματος του ποδιού και δίνεται:

$$\mathbf{J}_L = \begin{bmatrix} -s_{(q_1)}(l_0 + l_1 s_{(q_2)} + l_2 s_{(q_2+q_3)}) & -c_{(q_1)}(l_1 s_{(q_2)} + l_2 s_{(q_2+q_3)}) & -l_2 c_{(q_1)} s_{(q_2+q_3)} \\ c_{(q_1)}(l_0 + l_1 s_{(q_2)} + l_2 s_{(q_2+q_3)}) & -s_{(q_1)}(l_1 s_{(q_2)} + l_2 s_{(q_2+q_3)}) & -l_2 s_{(q_1)} s_{(q_2+q_3)} \\ 0 & -(l_1 s_{(q_2)} + l_2 s_{(q_2+q_3)}) & -l_2 c_{(q_2+q_3)} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Εάν ο Ιακωβιανός πίνακας είναι αντιστρέψιμος, τότε οι γωνιακές ταχύτητες των αρθρώσεων είναι:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_L^{-1} {}^0 \mathbf{v}_{E,0} \quad (2.10)$$

Είναι γνωστό ότι:

$${}^{\text{in}} \mathbf{v}_{E,0} = {}^{\text{in}} \mathbf{R}_0 {}^0 \mathbf{v}_{E,0} = {}^{\text{in}} \mathbf{R}_b(\alpha, \beta, \gamma) {}^b \mathbf{R}_0 {}^0 \mathbf{v}_{E,0} = {}^{\text{in}} \mathbf{R}_b(\alpha, \beta, \gamma) {}^0 \mathbf{v}_{E,0} \quad (2.11)$$

όπου ${}^{\text{in}} \mathbf{v}_{E,0}$ είναι η σχετική γραμμική ταχύτητα του σημείου E ως προς τη γραμμική ταχύτητα του σημείου 0 που εκφράζεται στο αδρανειακό σύστημα.

Οι ρυθμοί μεταβολής των γωνιών z-y-x Euler α, β, γ προκύπτουν από την εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \mathbf{E}^{-1}(\alpha, \beta, \gamma) {}^{\text{in}} \boldsymbol{\omega}_b \quad (2.12)$$

όπου ${}^{\text{in}} \boldsymbol{\omega}_b$ είναι η γνωστή γωνιακή ταχύτητα της βάσης ως προς το αδρανειακό σύστημα, εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα και

$$\mathbf{E}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} 0 & -s_{(\alpha)} & c_{(\alpha)} c_{(\beta)} \\ 0 & c_{(\alpha)} & s_{(\alpha)} c_{(\beta)} \\ 1 & 0 & -s_{(\beta)} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Η Εξ. (2.10) γράφεται:

$${}^0 \mathbf{v}_{E,0} = {}^{\text{in}} \mathbf{R}_b^T(\alpha, \beta, \gamma) {}^{\text{in}} \mathbf{v}_{E,0} \quad (2.14)$$

όπου η ${}^{\text{in}} \mathbf{v}_{E,0}$ δίνεται από:

$${}^{\text{in}} \mathbf{v}_{E,0} = {}^{\text{in}} \mathbf{v}_E - {}^{\text{in}} \mathbf{v}_0 \quad (2.15)$$

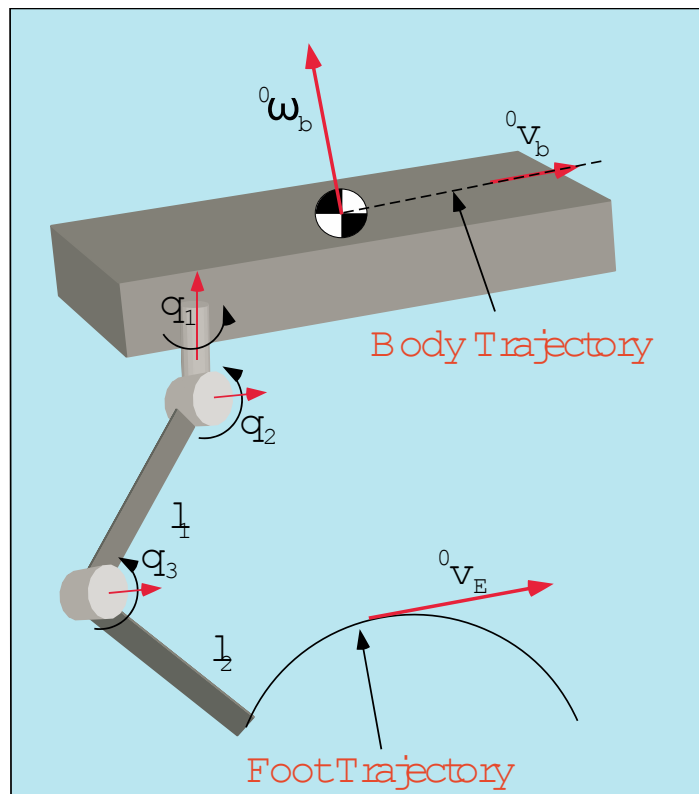
όπου ${}^{\text{in}} \mathbf{v}_E$ είναι η γραμμική ταχύτητα του σημείου E ως προς το αδρανειακό σύστημα (γνωστή) και ${}^{\text{in}} \mathbf{v}_0$ είναι η γραμμική ταχύτητα του σημείου 0 ως προς το αδρανειακό σύστημα, που δίνεται από:

$${}^{\text{in}} \mathbf{v}_0 = {}^{\text{in}} \mathbf{v}_{\text{cm}} + {}^{\text{in}} \boldsymbol{\omega}_b \times {}^{\text{in}} \mathbf{r}_{0,b} = {}^{\text{in}} \mathbf{v}_{\text{cm}} + {}^{\text{in}} \boldsymbol{\omega}_b \times {}^{\text{in}} \mathbf{R}_b {}^b \mathbf{r}_{0,b} \quad (2.16)$$

όπου ${}^{\text{in}}\mathbf{v}_{\text{cm}}$ είναι η γνωστή γραμμική ταχύτητα του CM του σώματος ως προς το αδρανειακό σύστημα, εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα και ${}^{\text{b}}\mathbf{r}_{0,\text{b}}$ είναι το σταθερό επιθυμητό διάνυσμα θέσης του σημείου E ως προς το CM του σώματος (βλέπε Σχήμα 2-2) εκφρασμένο στο $\Sigma\Sigma \{\beta\}$.

Οι γωνιακές ταχύτητες που απαιτούνται, έτσι ώστε το πόδι και το σώμα να εκτελούν μία επιθυμητή κίνηση δίνονται από:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_L^{-1}(\mathbf{q}) {}^{\text{in}}\mathbf{R}_b^T(\alpha, \beta, \gamma) ({}^{\text{in}}\mathbf{v}_E - {}^{\text{in}}\mathbf{v}_{\text{cm}} - {}^{\text{in}}\boldsymbol{\omega}_b \times {}^{\text{in}}\mathbf{R}_b(\alpha, \beta, \gamma) {}^{\text{b}}\mathbf{r}_{0,\text{b}}) \quad (2.17)$$



Σχήμα 2-4. Επιθυμητή τροχιά σώματος και ποδιού.

2.2. Κριτήριο Δύναμης - Γωνίας (Force - Angle criterion) [15]

Το κριτήριο Force - Angle είναι ένα μέτρο της δυναμικής ευστάθειας για κινούμενα συστήματα και οχήματα. Από όλα τα σημεία επαφής του οχήματος με το έδαφος, είναι απαραίτητη η εξέταση μόνο των ακραίων σημείων που σχηματίζουν ένα πολύγωνο στήριξης (convex support polygon) που προβάλλεται σε ένα οριζόντιο επίπεδο. Τα σημεία αυτά θα αναφέρονται απλά ως σημεία επαφής με το έδαφος. Έστω \mathbf{p}_i είναι η στιγμιαία αδρανειακή θέση του i -στού σημείου επαφής με το έδαφος, που ορίζεται ως:

$$\mathbf{p}_i = [p_x \ p_y \ p_z]^T, \quad i = \{1, \dots, n\} \quad (2.18)$$

και έστω \mathbf{p}_c είναι η στιγμιαία αδρανειακή θέση του κέντρου μάζας του συστήματος CM.

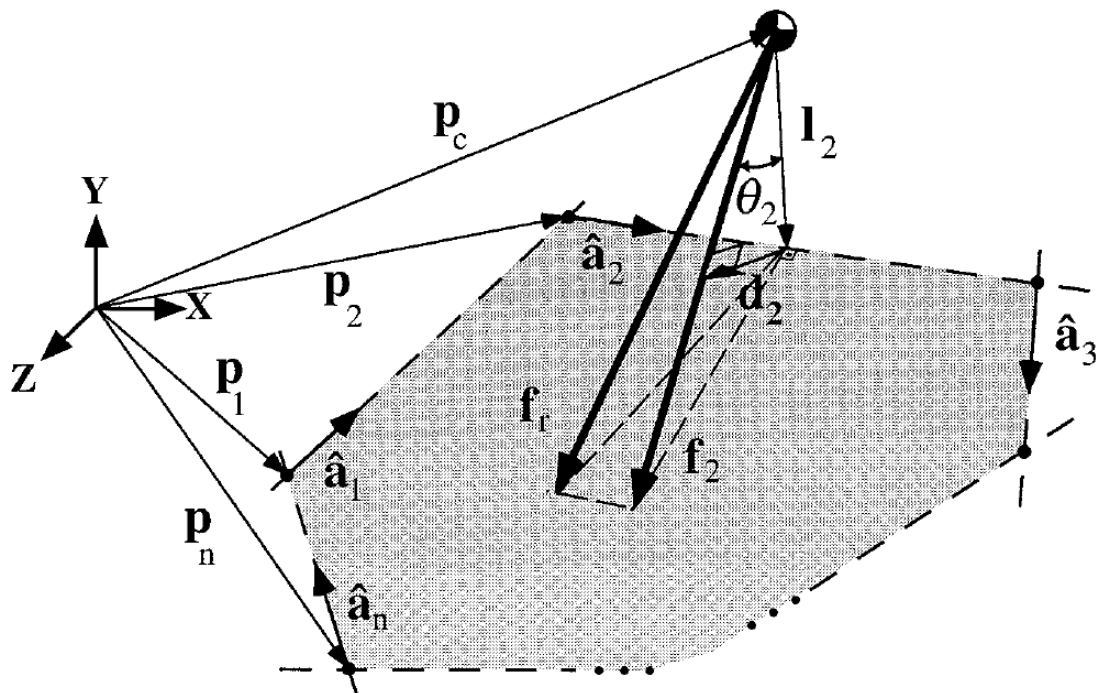
$$\mathbf{p}_c = \frac{\sum_j \mathbf{p}_{mass_j} m_j}{m_{tot}} \quad (2.19)$$

όπου \mathbf{p}_{mass} είναι η αδρανειακή θέση της j-στης συσσωρευμένης μάζας του συστήματος και m_{tot} είναι η συνολική μάζα του συστήματος. Για λόγους σαφήνειας όλα τα διανύσματα εκφράζονται σε ένα αδρανειακό πλαίσιο, καθώς αυτή η χρήση του πλαισίου αναφοράς που βρίσκεται στο σύστημα CM θα οδηγήσει σε απλουστεύσεις.

Για μια συνεπή διαμόρφωση, τα \mathbf{p}_i είναι αριθμημένα κατά αύξουσα σειρά, ακολουθώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπου ο αντίχειρας κατευθύνεται προς τα κάτω κατά μήκος του διανύσματος βαρύτητας, δηλαδή, τα σημεία επαφής με το έδαφος αριθμούνται δεξιόστροφα, όταν παρατηρούνται από πάνω. Οι γραμμές, οι οποίες ενώνουν τα σημεία επαφής με το έδαφος είναι οι υποψήφιοι άξονες ανατροπής (tipover), \mathbf{a}_i , μια και το σύνολο αυτών των γραμμών αναφέρεται ως πολύγωνο στήριξης. Ο i-στος άξονας ανατροπής δίνεται:

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{p}_{i+1} - \mathbf{p}_i, \quad i=1, \dots, n-1 \quad (2.20)$$

όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5. 3-D μέτρο ευστάθειας με το κριτήριο Force – Angle.

Θέτοντας

$$\hat{\mathbf{a}}_i = \frac{\mathbf{a}_i}{\|\mathbf{a}_i\|} \quad (2.21)$$

οι αποστάσεις του CM από τους άξονες ανατροπής \mathbf{I}_i , προκύπτουν ως:

$$\mathbf{I}_i = (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{a}}_i \hat{\mathbf{a}}_i^T)(\mathbf{p}_{i+1} - \mathbf{p}_c) \quad (2.22)$$

όπου \mathbf{I} είναι ο μοναδιαίος πίνακας.

Από τις Νευτώνειες αρχές, προκύπτει η ακόλουθη δυναμική ισορροπία δυνάμεων για το συνολικό σύστημα:

$$\sum \mathbf{F}_{inertial} = \sum \mathbf{F}_{grav} + \sum \mathbf{F}_{ee} + \sum \mathbf{F}_{support} + \sum \mathbf{F}_{dist} \quad (2.23)$$

όπου $\mathbf{F}_{inertial}$ είναι οι δυνάμεις αδράνειας, \mathbf{F}_{grav} είναι τα βαρυτικά φορτία, \mathbf{F}_{ee} τα δυναμικά φορτία που μεταδίδονται στο σύστημα (λόγω των φορτίων και των δυνάμεων αντίδρασης), $\mathbf{F}_{support}$ είναι οι δυνάμεις αντίδρασης του συστήματος στήριξης του ρομπότ, και \mathbf{F}_{dist} είναι οποιεσδήποτε άλλες εξωτερικές δυνάμεις διαταραχής που ενεργούν κατευθείαν στο σύστημα. Όταν απουσιάζουν οι ανεξάρτητες αδράνεις μεταξύ του σώματος του οχήματος και του εδάφους, η $\mathbf{F}_{support}$ είναι ίση με την δύναμη αντίδρασης του εδάφους.

Η καθαρή δύναμη που δρα στο σύστημα CM, που θα συμμετείχε σε μία αστάθεια ανατροπής, \mathbf{f}_r , δίνεται:

$$\mathbf{f}_r = \sum \mathbf{F}_{grav} + \sum \mathbf{F}_{ee} + \sum \mathbf{F}_{support} + \sum \mathbf{F}_{dist} - \sum \mathbf{F}_{inertial} = -\sum \mathbf{F}_{support} \quad (2.24)$$

Όμοια, η καθαρή ροπή \mathbf{n}_r , που ενεργεί για το σύστημα CM δίνεται:

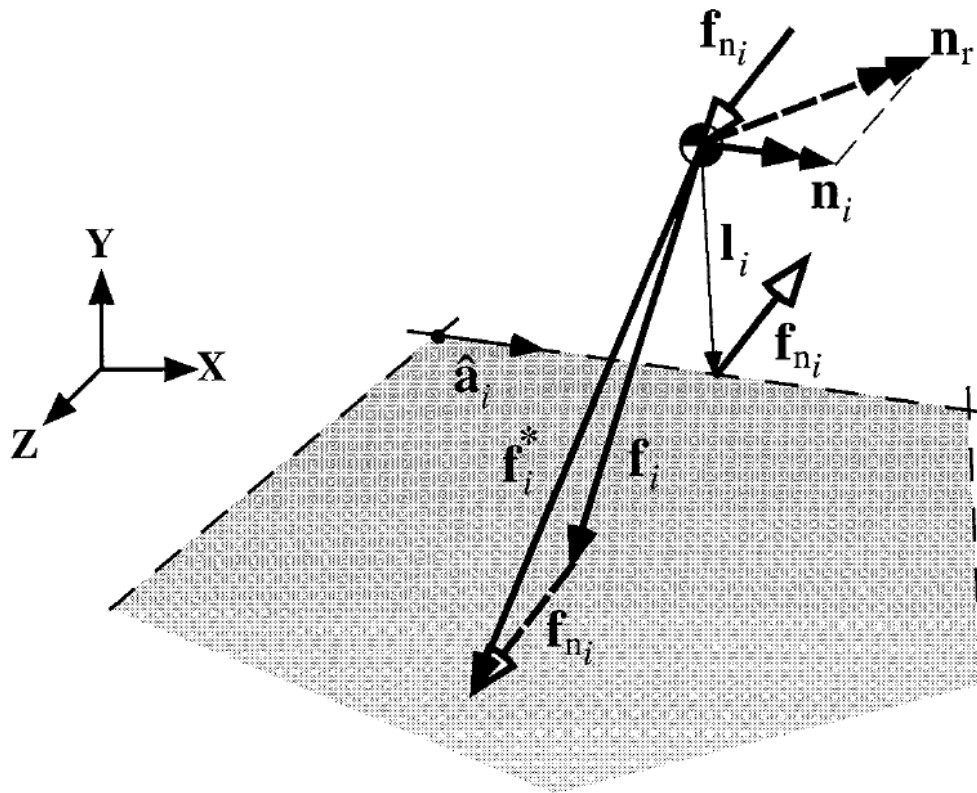
$$\mathbf{n}_r = \sum \mathbf{n}_{ee} + \sum \mathbf{n}_{dist} - \sum \mathbf{n}_{inertial} = -\sum \mathbf{n}_{support} \quad (2.25)$$

Για έναν δεδομένο άξονα ανατροπής $\hat{\mathbf{a}}_i$, αυτό που έχει σημασία είναι εκείνα τα στοιχεία της \mathbf{f}_r και \mathbf{n}_r που δρουν στον άξονα ανατροπής, γι 'αυτό ισχύουν:

$$\mathbf{f}_i = (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{a}}_i \hat{\mathbf{a}}_i^T) \mathbf{f}_r \quad (2.26)$$

και

$$\mathbf{n}_i = (\hat{\mathbf{a}}_i \hat{\mathbf{a}}_i^T) \mathbf{n}_r \quad (2.27)$$



Σχήμα 2-6. Χρήση του ισοδύναμου ζεύγους δυνάμεων για αντικατάσταση της ροπής στο CM.

Δεδομένου ότι το μέτρο ευστάθειας του κριτηρίου στηρίζεται στον υπολογισμό της γωνίας μεταξύ του διανύσματος της καθαρής δύναμης και κάθε ενός από τους κάθετους άξονες ανατροπής, είναι απαραίτητο να αντικατασταθεί η ροπή \mathbf{n}_r με ένα ισοδύναμο ζεύγος δυνάμεων για κάθε άξονα ανατροπής. Το ισοδύναμο ζεύγος δυνάμεων πρέπει να βρίσκεται απαραίτητα στο κάθετο επίπεδο της ροπής \mathbf{n}_r . Η πιο συνετή επιλογή των θέσεων του ζεύγους δυνάμεων και των κατευθύνσεων πάνω στο επίπεδο, είναι εκείνο το ζεύγος με το ελάχιστο μέγεθος όπου το ένα μέλος του ζεύγους περνά μέσα από το σύστημα CM και το άλλο μέσω της γραμμής του άξονα ανατροπής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6, το μέλος του ζεύγους δύναμης που δρα στο κέντρο μάζας δίνεται από:

$$\mathbf{f}_{n_i} = \frac{\hat{\mathbf{l}}_i \times \mathbf{n}_i}{\|\hat{\mathbf{l}}_i\|} \quad (2.28)$$

όπου

$$\hat{\mathbf{l}}_i = \frac{\mathbf{l}_i}{\|\mathbf{l}_i\|} \quad (2.29)$$

Τέλος, το διάνυσμα της καθαρής δύναμης για τον i -στο άξονα ανατροπής που αποτυπώνει την επίδραση τόσο της δύναμης όσο και των γωνιακών φορτίων, \mathbf{f}_i^* , δίνεται από:

$$\mathbf{f}_i^* = \mathbf{f}_i + \frac{\hat{\mathbf{I}}_i \times \mathbf{n}_i}{\|\mathbf{I}_i\|} \quad (2.30)$$

Λόγω του ότι τα \mathbf{I}_i και \mathbf{f}_i^* κείνται σε ένα κάθετο επίπεδο ως προς τον άξονα ανατροπής \mathbf{a}_i , το σύνολο των διανυσμάτων με το ελάχιστο μήκος από τους άξονες ανατροπής \mathbf{a}_i στους \mathbf{f}_i^* βρίσκονται απλά, προσθέτοντας την προβολή των \mathbf{I}_i πάνω στα \mathbf{f}_i^* στα αρνητικά \mathbf{I}_i , δηλαδή,

$$\mathbf{d}_i = -\mathbf{I}_i + (\mathbf{I}_i^T \cdot \hat{\mathbf{f}}_i^*) \hat{\mathbf{f}}_i^* \quad , i = \{1, \dots, n\} \quad (2.31)$$

όπου $\hat{\mathbf{f}}_i^*$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κατά μήκος της \mathbf{f}_i^* , δηλαδή:

$$\hat{\mathbf{f}}_i^* = \frac{\mathbf{f}_i^*}{\|\mathbf{f}_i^*\|} \quad (2.32)$$

Οι υποψήφιες γωνίες για το μέτρο ευστάθειας σύμφωνα με το κριτήριο Force - Angle δίνονται από:

$$\theta_i = \sigma_i \cos^{-1}(\hat{\mathbf{f}}_i^* \times \hat{\mathbf{I}}_i) \quad , i = \{1, \dots, n\} \quad (2.33)$$

όπου $0 \leq \frac{\theta_i}{\sigma_i} \leq \pi$. Το κατάλληλο πρόσημο το μέτρου της γωνίας θ_i καθορίζεται από το αν η επίδραση του διανύσματος της καθαρής δύναμης \mathbf{f}_i^* κατευθύνεται μέσα ή έξω από το πολύγωνο στήριξης. Από τη στιγμή που οι κάθετοι άξονες ανατροπής κατευθύνονται από το σύστημα CM στους άξονες ανατροπής, τότε η προβολή της εγκάρσιας δύναμης μεταξύ της επίδρασης του διανύσματος της καθαρής δύναμης \mathbf{f}_i^* και του κάθετου άξονα ανατροπής \mathbf{I}_i πάνω στον άξονα ανατροπής \mathbf{a}_i , είναι θετική όταν το διάνυσμα της καθαρής δύναμης κατευθύνεται στο εσωτερικό του πολυγώνου στήριξης, αλλιώς είναι αρνητική. Έτσι:

$$\sigma_i = \begin{cases} +1 & (\hat{\mathbf{f}}_i^* \times \hat{\mathbf{I}}_i) \cdot \hat{\mathbf{a}}_i > 0 \\ -1 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad , \text{όπου } i = \{1, \dots, n\} \quad (2.34)$$

Το μέτρο ευστάθειας του κριτηρίου Force - Angle β δίνεται:

$$\beta = \min(\theta_i \cdot \|\mathbf{d}_i\| \cdot \|\mathbf{f}_i^*\|) \quad , i = \{1, \dots, n\} \quad (2.35)$$

Το μέγεθος της θετικής γωνίας β δείχνει το περιθώριο ευστάθειας που έχει ένα ευσταθές σύστημα. Κρίσιμη ευστάθεια συμβαίνει όταν η γωνία β τείνει στο 0. Τέλος οι

αρνητικές τιμές της γωνίας β δείχνουν ότι το σύστημα είναι ασταθές και ότι ένα αναποδογύρισμα είναι σε εξέλιξη.

3. Στατική ευστάθεια

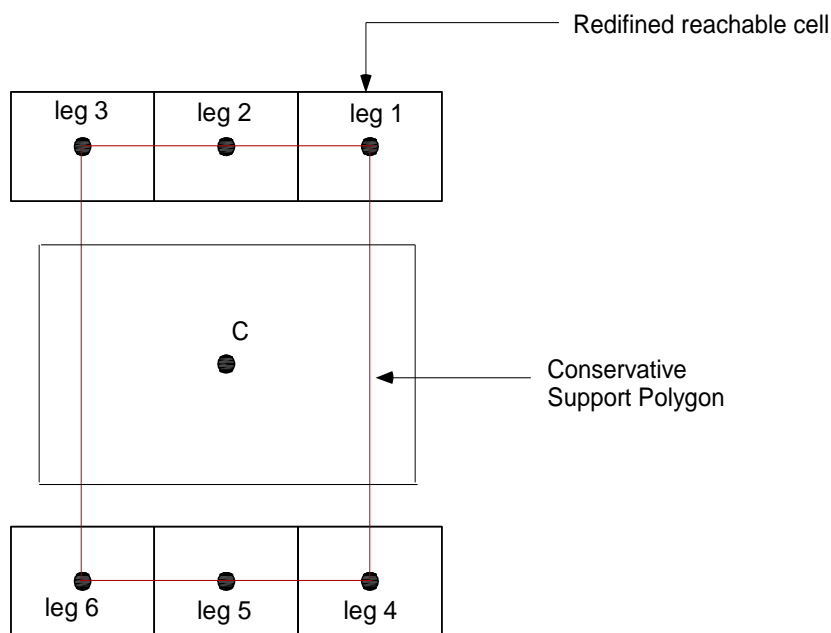
3.1. Ανάλυση ρομπότ

Η ανάλυση της στατικής ευστάθειας του εξάποδου ρομπότ μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο διδιάστατο μοντέλο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-1. Στο σχήμα απεικονίζονται τα πέλματα των ποδιών του ρομπότ, καθώς και η προσβάσιμη περιοχή τους (workspace ποδιών). Το C είναι το κέντρο βάρους του ρομπότ, ενώ τα πέλματα του ρομπότ αριθμούνται από την δεξιά πλευρά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1.

Για να εξασφαλιστεί στατική ευστάθεια καθόλη την διάρκεια κίνησης του ρομπότ θα πρέπει να επιτυγχάνεται κατά το δυνατόν μεγαλύτερο περιθώριο ευστάθειας (SM - Stability Margin) [21]. Περιθώριο ευστάθειας είναι η μικρότερη απόσταση από την κάθετη προβολή του κέντρου βάρους C (Center of Gravity - CG) του ρομπότ στο πολύγωνο στήριξης (Conservative Support Polygon – CSP). Το πολύγωνο στήριξης είναι το πολύγωνο που σχηματίζουν τα πέλματα των ποδιών, στο οριζόντιο επίπεδο, σε κατάσταση στήριξης (support phase).

Για την απλότητα της ανάλυσης έχουν ληφθεί οι ακόλουθες παραδοχές:

- 1) Το ρομπότ έχει συμμετρική δομή και το σώμα είναι ορθογώνιο.
- 2) Η επαφή ανάμεσα στο πόδι και το έδαφος είναι ένα σημείο.
- 3) Δεν υπάρχει ολίσθηση μεταξύ ποδιού και εδάφους.
- 4) Όλη η μάζα των ποδιών είναι συγκεντρωμένη στο σώμα του ρομπότ, και το κέντρο βάρους υποτίθεται ότι είναι στο κέντρο του σώματος.

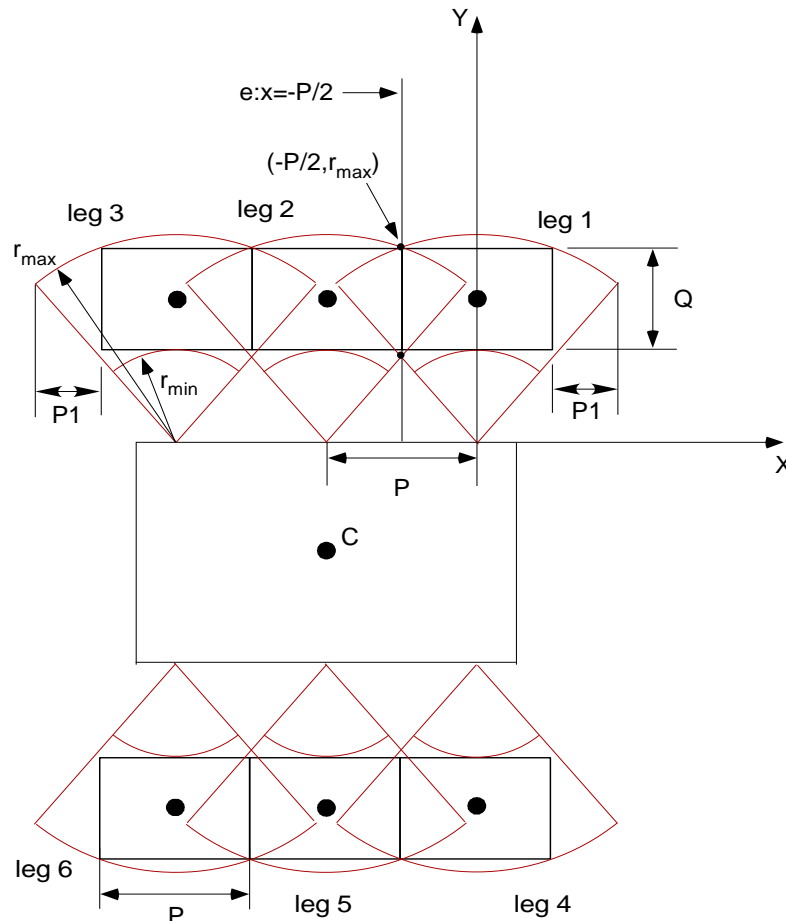


Σχήμα 3-1. 2-D Μοντέλο του εξάποδου ρομπότ.

- 5) Οι αρχικές θέσεις των ποδιών πρέπει να είναι καθορισμένες πριν την έναρξη της κίνησης.
- 6) Η ταχύτητα του σώματος του ρομπότ όταν κινείται και η μέση ταχύτητα του κάθε ποδιού κατά τη διάρκεια μεταφοράς (transfer phase) είναι σταθερές.

3.1.1. Workspace ποδιού

Κάθε πόδι έχει μία προσβάσιμη περιοχή με μορφή τμήματος δακτυλίου. Λόγω του ότι στα διαδοχικά πόδια οι περιοχές αυτές επικαλύπτονται μεταξύ τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-2, θεωρείται ότι κάθε πόδι έχει μια διακριτή περιοχή, στην οποία μπορεί να έχει πρόσβαση μόνο το ίδιο και όχι οποιοδήποτε άλλο πόδι [21]. Ως αποτέλεσμα έχει προσδιοριστεί μια ορθογώνια περιοχή ως προσβάσιμη περιοχή (reachable cell) του κάθε ποδιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1. Άρα το κάθε πόδι μπορεί να μετακινηθεί κατά $\pm P/2$. Βέβαια τα μπρος και πίσω πόδια μπορούν να μετακινηθούν περισσότερο, δηλαδή κατά $P/2 + P_1$ και $-P/2 - P_1$ αντίστοιχα, στην περίπτωση κατωφερειών ή ανωφερειών.



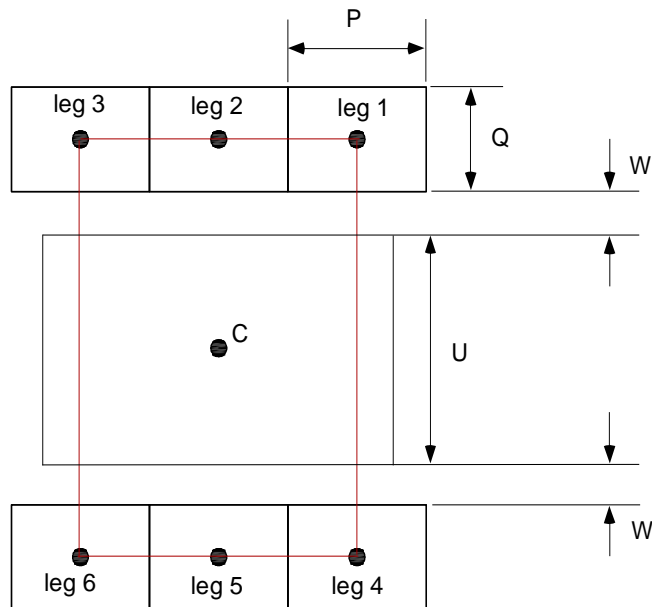
Σχήμα 3-2. Workspace ποδιών.

Σε όλα τα σχήματα που ακολουθούν, τα workspaces των ποδιών σχεδιάζονται στην αρχική θέση του ρομπότ (initial state) και μένουν σταθερά για την ευκολία της

απεικόνισης. Στην πραγματικότητα, οι πραγματικές θέσεις τους, μετακινούνται καθώς η θέση του κέντρου βάρους του σώματος αλλάζει.

3.1.2. Διάσταση ρομπότ

Στο Σχήμα 3-3 φαίνονται οι διαστάσεις του ρομπότ από κάτοψη. Οι διαστάσεις όπως φαίνεται, είναι παραμετροποιημένες έτσι ώστε να μπορούν να αλλάζουν εύκολα και να μπορεί να γίνει ανάλυση σε οποιοδήποτε όμοιο ρομπότ.



Σχήμα 3-3. Διαστάσεις ρομπότ.

Όπου

- P είναι το μήκος της προσβάσιμης περιοχής του ποδιού
- Q είναι το πλάτος της προσβάσιμης περιοχής του ποδιού
- C είναι το κέντρο βάρους του σώματος του ρομπότ
- W είναι η απόσταση μεταξύ της προσβάσιμης περιοχής του ποδιού και του σώματος του ρομπότ
- U είναι το πλάτος του σώματος του ρομπότ

3.2. Περιγραφή Hexa-Terra robot

Η μελέτη που θα ακολουθήσει αποτελεί μέρος του project: 'Hexa-Terra' of European Commission, for the development of a modular "stepping locomotion" system for installation on subsea trenching machines used for subsea energy cable burial.

Το 'Hexa-Terra', διαθέτει γραμμικούς υδραυλικούς επενεργητές και το κάθε πόδι του έχει 3 βαθμούς ελευθερίας. Οι διαστάσεις του 'Hexa-Terra' είναι:

$$P = 1.25 \text{ m}$$

$$Q = 1 \text{ m}$$

$$W = 0.433 \text{ m}$$

$$U = 1.2 \text{ m}$$

Από τις διαστάσεις που δεν φαίνονται στο Σχήμα 3-3, το ύψος h μεταξύ του κέντρου μάζας του ρομπότ και του εδάφους είναι:

$$h = 0.7 \text{ m}$$

και το πάχος s του σώματος είναι:

$$s = 0.2 \text{ m}$$

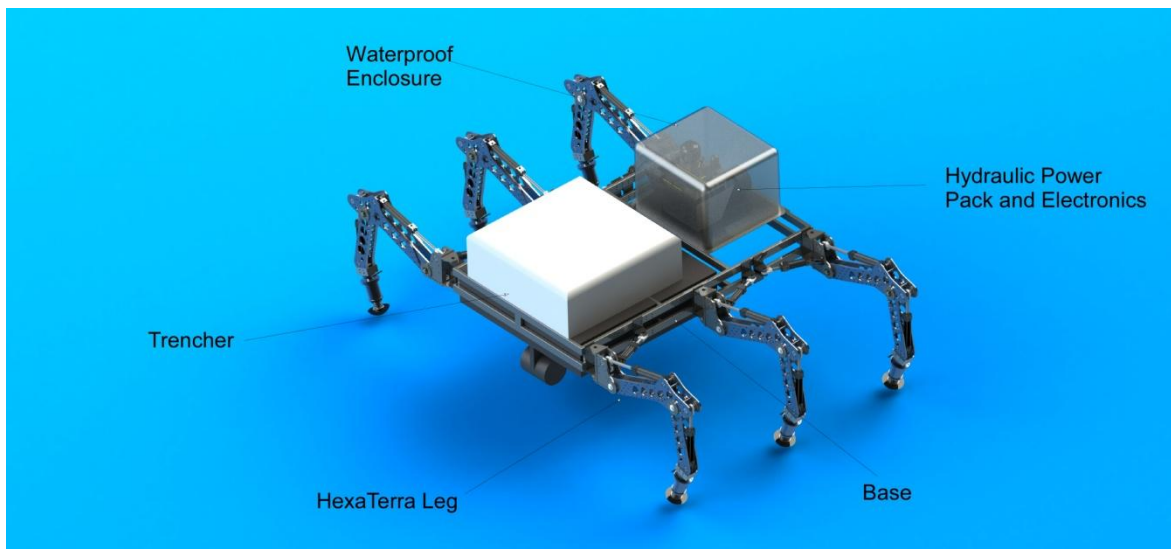
Τέλος η μάζα m του σώματος του ρομπότ είναι:

$$m = 300 \text{ kg}$$

και η μάζα m_{leg} κάθε ποδιού είναι:

$$m_{leg} = 60 \text{ kg}$$

Οι απαιτήσεις του project είναι, το ρομπότ να μπορεί να κινείται σε κεκλιμένο έδαφος μέχρι 20° ως προς τον άξονα κίνησης, και 15° κατά μήκος ενός άξονα κάθετου προς αυτόν. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-4, το ρομπότ φέρει εκσκαφτικό μηχανισμό, του οποίου η δύναμη είναι 800 N, ενώ μία δύναμη 400 N, λόγω ρευμάτων εφαρμόζεται σε κατεύθυνση, αντίθετη από εκείνη της κίνησης του ρομπότ. Η μέγιστη γραμμική ταχύτητα του ρομπότ είναι: $u = 500 \text{ m/s}$.



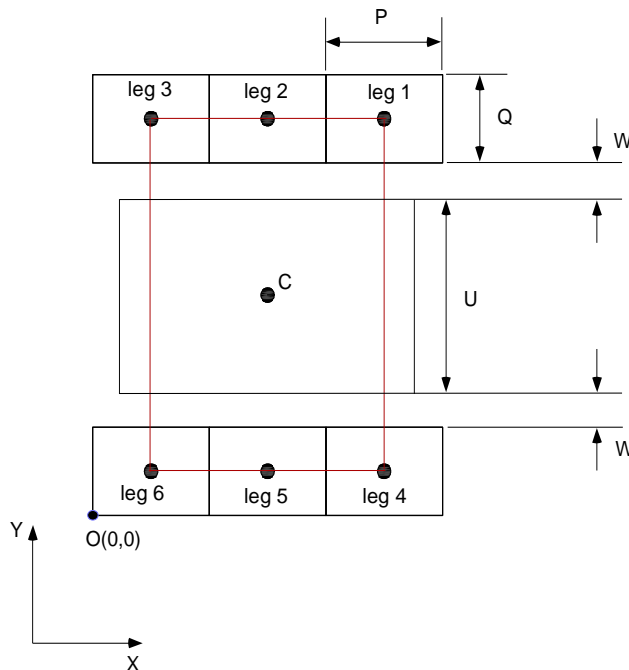
Σχήμα 3-4. Ρομπότ 'Hexa-Terra'.

3.3. Αλγόριθμος επιλογής βηματισμού (Gait Selection Algorithm GSA)

Το ποιο από τα 6 πόδια θα ανυψωθεί κάθε φορά, οδηγεί σε μεγάλη ποικιλία αλληλουχίας των ποδιών του ρομπότ. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι το ρομπότ πρέπει να έχει στατική ευστάθεια κατά τη διάρκεια της κίνησης του, γεγονός που οδηγεί σε περιορισμούς, που αφορούν στο ποιο gait είναι πιο ευσταθές, αλλά και στο ποιο πόδι πρέπει να ανυψωθεί κάθε φορά, με σκοπό να επιτυγχάνεται πάντα στατική ευστάθεια. Η ανάπτυξη του GSA έγινε με σκοπό την παραγωγή της βέλτιστης αλληλουχίας ανύψωσης και τοποθέτησης των ποδιών του ρομπότ με κριτήριο τη στατική ευστάθεια. Ο αλγόριθμος αυτός λαμβάνει εντολές από τον χειριστή του ρομπότ και ανάλογα με τους περιορισμούς που συναντά (κλίση εδάφους, ταχύτητα, workspace) με κριτήριο την μέγιστη στατική ευστάθεια του ρομπότ, παράγει τον βέλτιστο συνδυασμό ποδιών. Πιο αναλυτικά, ο GSA λαμβάνει υπόψη:

- την κίνηση (mode) που επιθυμεί ο χειριστής να εκτελέσει το ρομπότ,
- τον βηματισμό (gait) που έχει επιλέξει ο χειριστής να κινηθεί το ρομπότ, καθώς επίσης και
- την κλίση του εδάφους ως προς τον άξονα X

και εξάγει τον βέλτιστο συνδυασμό ποδιών ώστε το ρομπότ να κινηθεί με το μέγιστο δυνατό περιθώριο στατικής ευστάθειας. Πιο συγκεκριμένα ορίζονται οι συντεταγμένες των ποδιών του ρομπότ και του κέντρου βάρους στην αρχική θέση, παραμετροποιημένες ως προς τις διαστάσεις του ρομπότ.



Σχήμα 3-5. 2-D Παραμετροποιημένες συντεταγμένες ποδιών.

Η αρχή συντεταγμένων $O(0,0)$ ορίζεται ως η κάτω δεξιά γωνία του workspace του 6^{ου} ποδιού (Σχήμα 3-5), σαν συνέπεια έχουμε τις συντεταγμένες των ποδιών:

$$x(1)=5 \cdot P/2$$

$$y(1)=3 \cdot Q/2+2 \cdot W+U$$

$$x(2)=3 \cdot P/2$$

$$y(2)=3 \cdot Q/2+2 \cdot W+U$$

$$x(3)=P/2$$

$$y(3)=3 \cdot Q/2+2 \cdot W+U$$

$$x(4)=5 \cdot P/2$$

$$y(4)=Q/2$$

$$x(5)=3 \cdot P/2$$

$$y(5)=Q/2$$

$$x(6)=P/2$$

$$y(6)=Q/2$$

καθώς και του κέντρου βάρους C:

$$x_{center}=3 \cdot P/2$$

$$y_{center}=Q+W+U/2$$

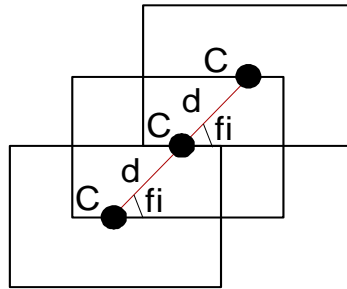
3.4. Κίνηση Ρομπότ (Mode)

Οι κινήσεις που μπορεί να εκτελέσει το ρομπότ (modes) διακρίνονται σε crab και curve mode. Ουσιαστικά όλες οι κινήσεις του ρομπότ είναι παράγωγες αυτών των δύο modes και αρκεί να γίνει κατανοητό πώς λειτουργούν, για να παραχθούν οι υπόλοιπες κινήσεις. Όπως αναφέρεται παρακάτω για συγκεκριμένες κινήσεις του ρομπότ, δεν έχει σημασία ποιο mode θα επιλεγεί.

3.4.1. Crab mode (fi,d)

Το crab mode αναφέρεται στην διαγώνια κίνηση του ρομπότ. Ουσιαστικά είναι η κίνηση του ρομπότ με παράλληλη μετατόπιση, χωρίς να αλλάζει ο προσανατολισμός του. Το ρομπότ έχει την ευελιξία για λόγους εξερεύνησης να μεταβεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, χωρίς να χρειαστεί να περιστραφεί, όπως θα έκανε ο άνθρωπος για παράδειγμα.

Στο mode αυτό, ο χειριστής δίνει σαν είσοδο την γωνία ϕ_i που επιθυμεί να κινηθεί το ρομπότ και την απόσταση d που επιθυμεί να εκτελέσει σε 1 βήμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-6. Η γωνία ϕ_i μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή $0 \leq \phi_i \leq 360^\circ$, ενώ η απόσταση d μπορεί να πάρει μόνο θετικές τιμές $d > 0$. Είναι φανερό ότι το ρομπότ μπορεί να κινηθεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση αφού η γωνία ϕ_i μπορεί να πάρει όλες τις τιμές ενός πλήρους κύκλου.



Σχήμα 3-6. Crab Mode.

Σαν συνέπεια αυτής της κίνησης προκύπτουν:

- Για $fi=0$ \Rightarrow ευθεία μπροστά κίνηση
- Για $fi=180^\circ$ \Rightarrow ευθεία πίσω κίνηση
- Για $fi=90^\circ$ \Rightarrow πάνω εγκάρσια κίνηση
- Για $fi=270^\circ$ \Rightarrow κάτω εγκάρσια κίνηση

3.4.2. Crab trim

Για να είναι λειτουργικός ο αλγόριθμος και για μικρή αλλά και για την μέγιστη κίνηση που επιτρέπεται από το workspace, θα πρέπει η απόσταση d συναρτήσει της γωνίας fi να μην βγαίνει από το επιτρεπόμενο workspace που επιβάλλουν οι διαστάσεις του ρομπότ, σε ένα πλήρη κύκλο. Για την ανάγκη αυτή δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος. Όταν ο χειριστής δώσει τη γωνία fi που επιθυμεί να κινηθεί το ρομπότ και την απόσταση d που επιθυμεί να μεταβεί σε ένα βήμα με επιλεγμένο mode: crab mode, ο αλγόριθμος αναλύει την απόσταση d στους άξονες X ($d1$) και Y ($d2$) και υπολογίζει το πολύγωνο στήριξης, τις νέες συντεταγμένες των ποδιών καθώς και του Κ.Μ.

Εάν η απόσταση που δώσει βγαίνει εκτός workspace ($P \times Q$) τότε το ρομπότ κινείται στην μέγιστη απόσταση που του επιτρέπεται, αλλά με την ίδια γωνία fi , δηλαδή προσαρμόζεται μόνο η απόσταση d .

Πιο αναλυτικά, όταν ο χειριστής δώσει μία απόσταση d , μεγαλύτερη από εκείνη που επιτρέπει το παραμετροποιημένο workspace, η υπορουτίνα ελέγχει πρώτα εάν είναι εντός ορίων κατά τον άξονα X και στη συνέχεια κατά τον άξονα Y . Αν είναι εκτός ορίων κατά οποιονδήποτε άξονα, την μειώνει κατά έναν θετικό αριθμό.

$$d1 = d \cdot \cos(fi) \quad (3.1)$$

$$d2 = d \cdot \sin(fi) \quad (3.2)$$

Εκτός ορίων κατά Χ (βλέπε Σχήμα 3-7)

Εάν

$$|d1| > P/2$$

Τότε

$$a = \left| \frac{P/2}{d1} \right| \quad (3.3)$$

Προφανώς

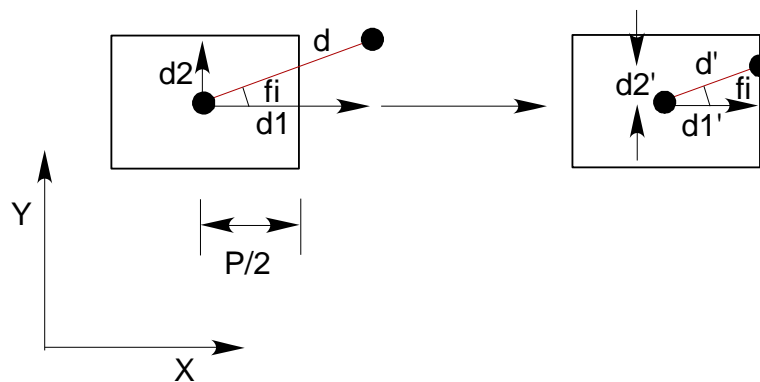
$$0 < a < 1$$

Άρα οι νέες αποστάσεις θα είναι:

$$d1' = a \cdot d1 \quad (3.4)$$

Και

$$d2' = a \cdot d2 \quad (3.5)$$



Σχήμα 3-7. Crab trim στον Χ άξονα.

Εκτός ορίων κατά Υ (βλέπε Σχήμα 3-8)

Εάν

$$|d2| > Q/2$$

Τότε

$$\beta = \left| \frac{Q/2}{d2} \right| \quad (3.6)$$

Προφανώς

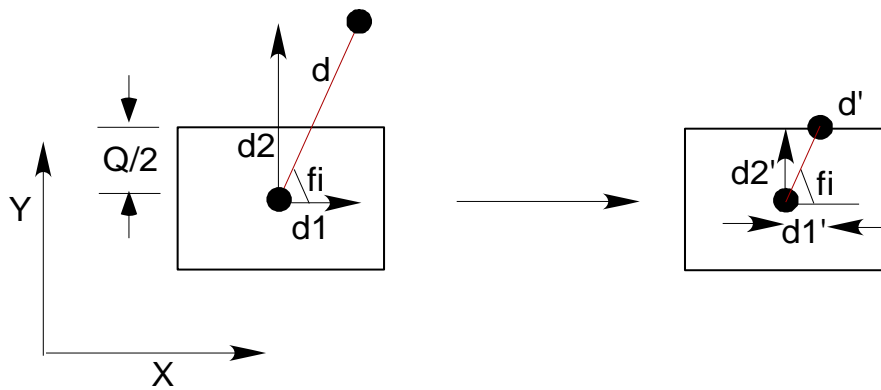
$$0 < \beta < 1$$

Άρα οι νέες αποστάσεις θα είναι:

$$d1' = \beta \cdot d1 \quad (3.7)$$

Και

$$d2' = \beta \cdot d2 \quad (3.8)$$

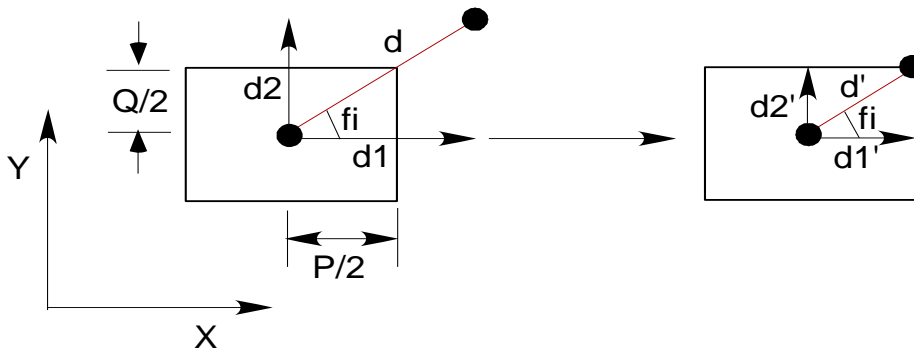


Σχήμα 3-8. Crab trim στον Y άξονα.

Τέλος αφού γίνεται έλεγχος της μίας διάστασης, είναι φανερό ότι όταν:

$$|d1| > P/2 \text{ και } |d2| > Q/2$$

αρκεί να είναι να είναι η μία από τις δύο εντός workspace για να είναι και η δεύτερη (βλέπε Σχήμα 3-9).

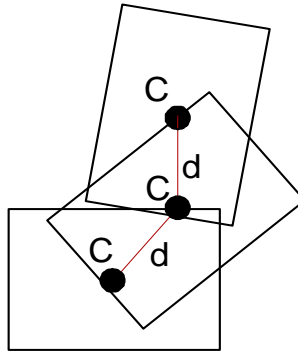


Σχήμα 3-9. Crab trim στον X ή στον Y άξονα.

3.4.3. Curve mode (fi,d)

Το curve mode αναφέρεται στην κίνηση του ρομπότ κατά μήκος μιας καμπύλης. Εδώ αλλάζει ο προσανατολισμός του ρομπότ και αυτό είναι θετικό για λόγους εκσκαφής, όπου είναι απαραίτητη η αλλαγή της κατεύθυνσης του ρομπότ. Η κίνηση αυτή είναι η συνισταμένη δύο κινήσεων, της περιστροφικής και της ευθείας κίνησης στον άξονα X.

Στο mode αυτό, ο χειριστής δίνει ως είσοδο την γωνία fi που επιθυμεί να περιστραφεί το ρομπότ και την απόσταση d που επιθυμεί να κινηθεί σε 1 βήμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-10. Η γωνία fi μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή $0 \leq fi \leq 360^\circ$ ενώ σε αυτήν την περίπτωση η απόσταση d μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές. Όπως είναι φανερό το ρομπότ μπορεί και σε αυτή την περίπτωση, να κινηθεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση αφού η γωνία fi μπορεί να πάρει όλες τις τιμές ενός πλήρους κύκλου.



Σχήμα 3-10. Curve Mode.

Σαν συνέπεια αυτής της κίνησης προκύπτουν:

- Για $f_i=0$ και $d>0 \Rightarrow$ ευθεία μπροστά κίνηση
- Για $f_i=0$ και $d<0 \Rightarrow$ ευθεία πίσω κίνηση
- Για $d=0$ και $f_i>0 \Rightarrow$ περιστροφή αντίθετα με τους δείκτες του ρολογιού ($A\Delta\Omega$)
- Για $d=0$ και $f_i<0 \Rightarrow$ περιστροφή σύμφωνα με τους δείκτες του ρολογιού ($\Sigma\Delta\Omega$)

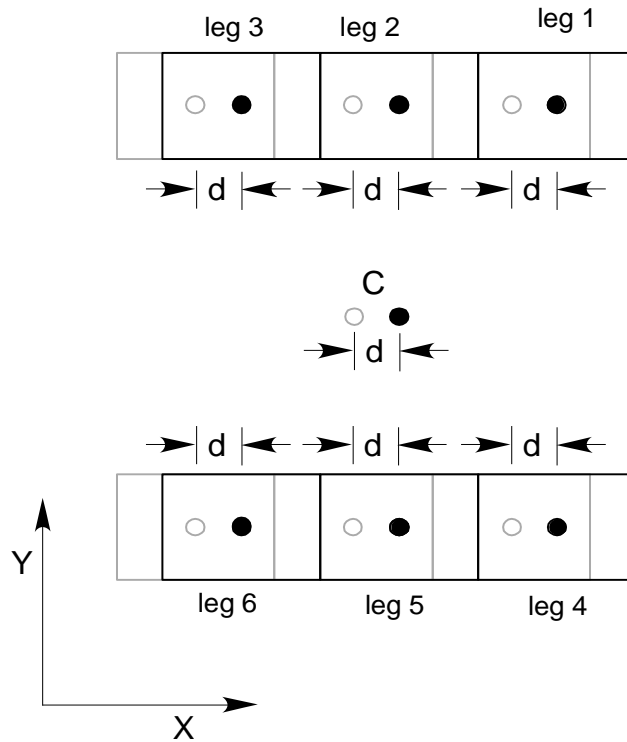
Στο σημείο αυτό παρατηρείται ότι η ευθεία κίνηση μπορεί να προκύψει και με *crab* αλλά και με *curve mode*.

Ανάλυση κίνησης

Λόγω της δυσκολίας της συγκεκριμένης κίνησης του ρομπότ, θα η προηγηθεί ανάλυσή της. Όπως αναφέρθηκε η κίνηση αυτή αποτελεί τη συνισταμένη δύο κινήσεων: της ευθείας κίνησης στον άξονα X ($f_i=0, d$) και της απλής περιστροφής του ρομπότ ($f_i, d=0$).

Ευθεία κίνηση κατά τον άξονα X του ρομπότ

Όταν το ρομπότ κινηθεί κατά απόσταση d ως προς τον άξονα X , τότε και τα πόδια αλλά και το κέντρο βάρους του ρομπότ C , κινούνται κατά απόσταση d . Στο Σχήμα 3-11 οι μαύροι κύκλοι υποδηλώνουν τις θέσεις των ποδιών μετά την κίνηση του ρομπότ, ενώ οι άσπροι τις αρχικές θέσεις των ποδιών.

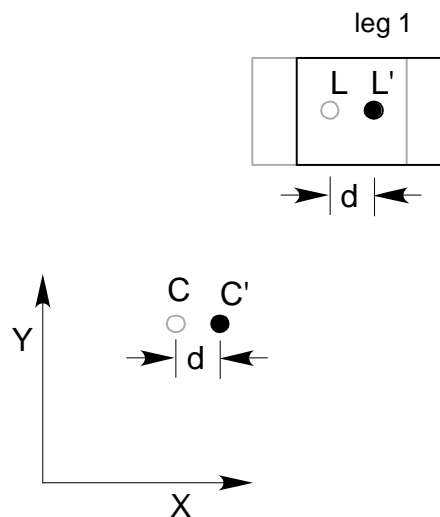


Σχήμα 3-11. Curve mode – Ευθεία μπροστά κίνηση.

Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά το πόδι 1, αλλά όμοια υπολογίζονται οι νέες θέσεις και των υπόλοιπων ποδιών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-12 είναι γνωστή η αρχική θέση του ποδιού L, αλλά και του κέντρου βάρους C.

$L(x,y)$

$C(x_c,y_c)$



Σχήμα 3-12. Ευθεία μπροστά κίνηση – Πόδι 1.

Στη συνέχεια ορίζονται οι συντεταγμένες του ποδιού μετά την κίνηση L' , καθώς και του κέντρου βάρους C' , αφού τελειώσει η κίνηση όλων των ποδιών.

$$L'(x', y')$$

$$C'(x_C, y_C)$$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-12, οι νέες συντεταγμένες του ποδιού είναι:

$$x' = x + d \quad (3.9)$$

$$y' = y \quad (3.10)$$

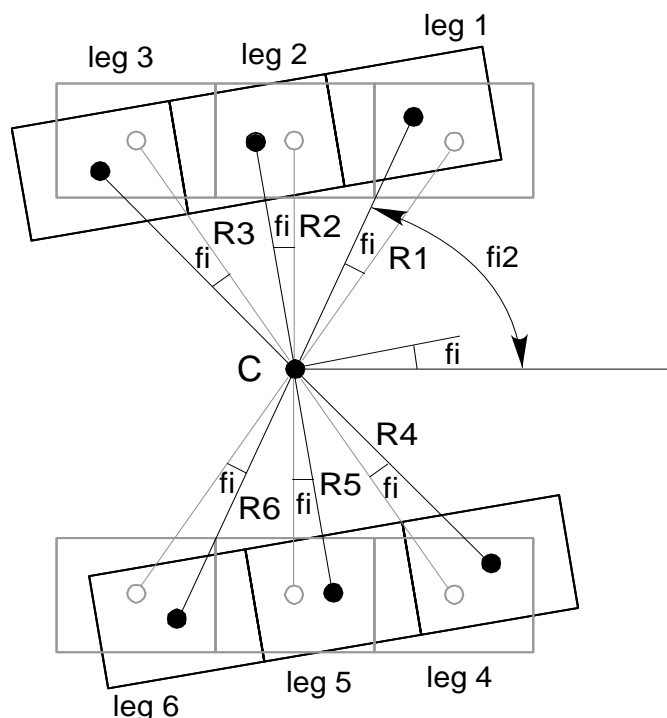
Και του κέντρου βάρους αφού τελειώσει η κίνηση όλων των ποδιών είναι:

$$x_{C'} = x_C + d \quad (3.11)$$

$$y_{C'} = y_C \quad (3.12)$$

Απλή περιστροφή του ρομπότ

Όταν το ρομπότ περιστρέφεται κατά μία γωνία ϕ_i , τα πόδια κινούνται γύρω από μια ακτίνα R . Στο Σχήμα 3-13 το ρομπότ περιστρέφεται κατά τη θετική γωνία ϕ_i , συνεπώς τα πόδια κινούνται $A\Delta\Omega$. Οι μαύροι κύκλοι υποδηλώνουν τις θέσεις των ποδιών μετά την περιστροφή, ενώ οι άσπροι τις αρχικές θέσεις των ποδιών.



Σχήμα 3-13. Curve mode – Περιστροφή.

Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά το πόδι 1, αλλά όμοια υπολογίζονται οι νέες θέσεις και των υπόλοιπων ποδιών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-14 είναι γνωστή η αρχική θέση του ποδιού L, αλλά και του κέντρου βάρους C.

$L(x,y)$

$C(x_c,y_c)$

Η ακτίνα πάνω στην οποία θα κινηθεί το πόδι είναι:

$$R1' = R1 = \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2} \quad (3.13)$$

Ενώ υπολογίζεται και η γωνία $fi2$:

$$fi2 = a \tan 2(y-y_c, x-x_c) + fi \quad (3.14)$$

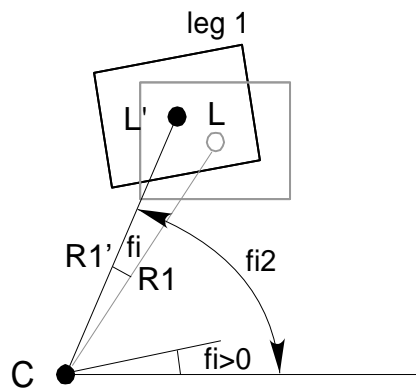
Στη συνέχεια ορίζονται οι συντεταγμένες του ποδιού μετά την περιστροφή L' . Προφανώς το κέντρο βάρους δεν αλλάζει σε μία πλήρη περιστροφή του ρομπότ.

$L'(x',y')$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-14, οι νέες συντεταγμένες του ποδιού είναι:

$$x' = x_c + R1 \cdot \cos(fi2) \quad (3.15)$$

$$y' = y_c + R1 \cdot \sin(fi2) \quad (3.16)$$

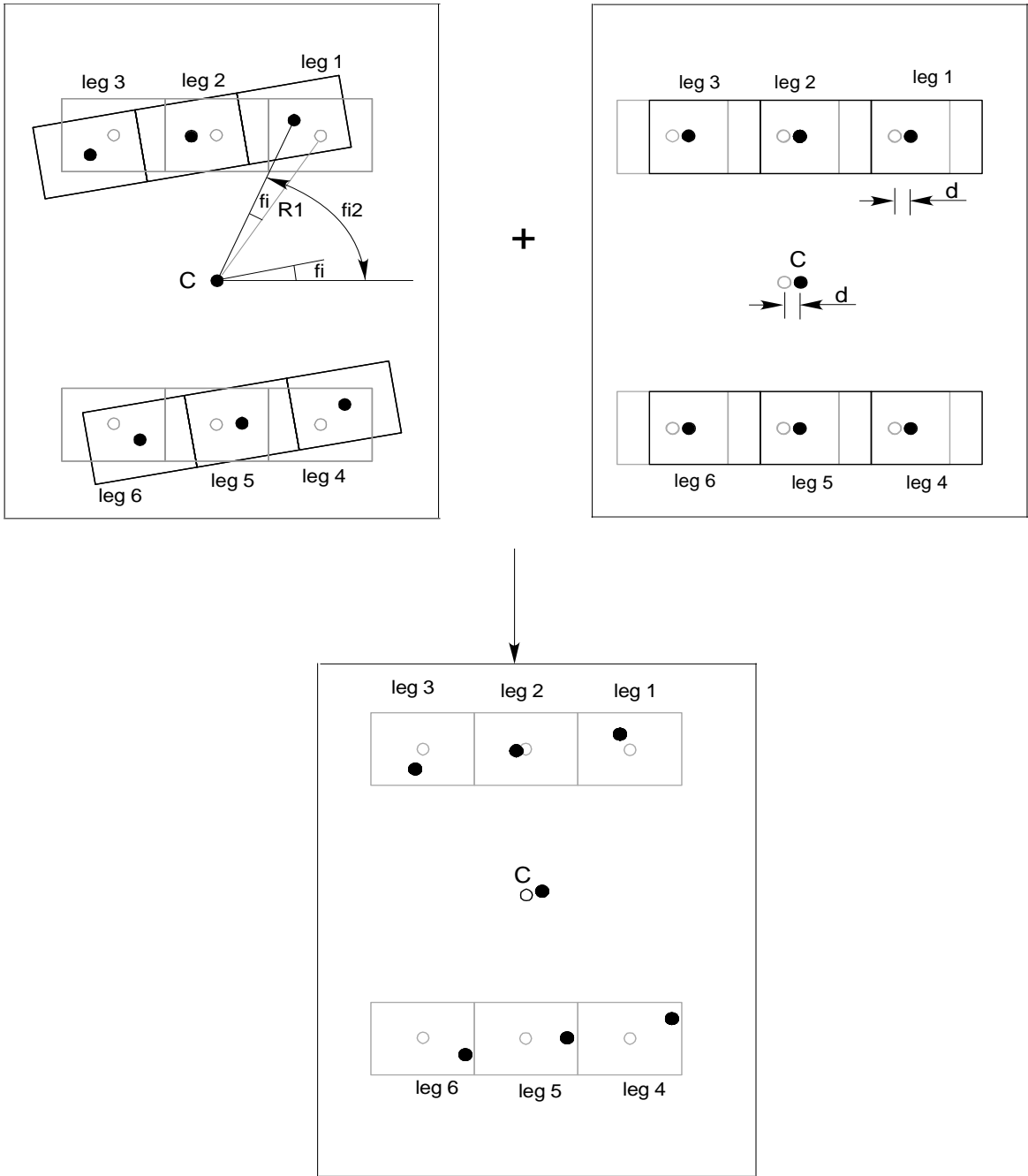


Σχήμα 3-14. Περιστροφή – Πόδι 1.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται οι συντεταγμένες των υπόλοιπων ποδιών μετά την περιστροφή. Οι ίδιες εξισώσεις ισχύουν και για $fi < 0$.

Κίνηση ρομπότ με curve mode

Αφού είναι κατανοητό πώς αναλύεται το curve mode, στο Σχήμα 3-15 φαίνεται πώς τελικά κινείται το ρομπότ. Εδώ το ρομπότ περιστρέφεται κατά τη θετική γωνία fi και κινείται κατά την θετική απόσταση d . Προφανώς και εδώ οι μαύροι κύκλοι υποδηλώνουν τις θέσεις των ποδιών μετά την κίνηση με curve mode, ενώ οι άσπροι τις αρχικές θέσεις των ποδιών. Ενώ εδώ δεν φαίνεται πως αλλάζει το καινούριο workspace για λόγους ευκρίνειας.



Σχήμα 3-15. Ανάλυση του curve mode.

Και εδώ η ανάλυση που ακολουθεί αφορά το πόδι 1, αλλά όμοια υπολογίζονται και οι νέες θέσεις και των υπόλοιπων ποδιών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-16 είναι γνωστή η αρχική θέση του ποδιού L , αλλά και του κέντρου βάρους C .

$L(x,y)$

$C(x_c,y_c)$

Στη συνέχεια ορίζονται οι συντεταγμένες του ποδιού μετά την περιστροφή L' .

$L'(x',y')$

Όπως υπολογίστηκαν προηγουμένως, οι νέες συντεταγμένες του ποδιού μετά την περιστροφή είναι:

$$x' = x_c + R1 \cdot \cos(fi2)$$

$$y' = y_c + R1 \cdot \sin(fi2)$$

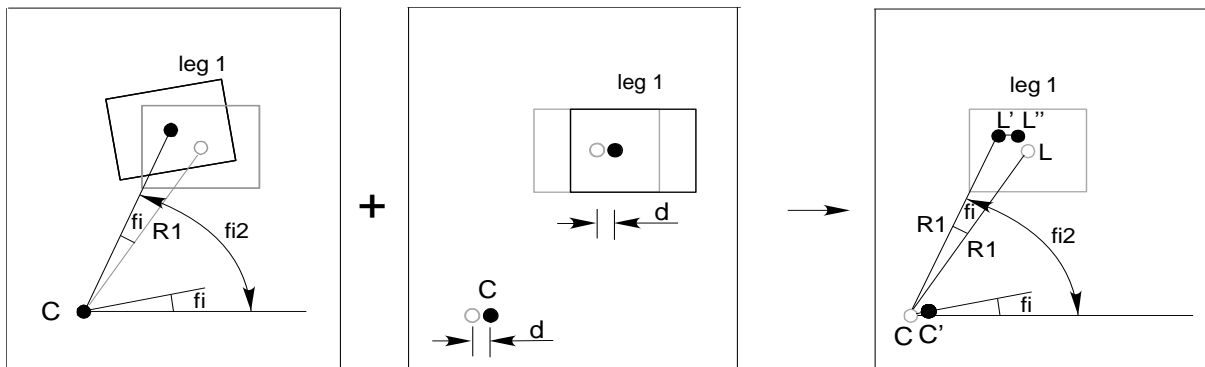
Στη συνέχεια ορίζονται οι συντεταγμένες του ποδιού μετά την συνολική κίνηση L''.

L''(x'',y'')

Με τη βοήθεια της προηγούμενης ανάλυσης οι τελικές εξισώσεις του ποδιού μετά την πλήρη κίνηση είναι:

$$x'' = x' + d \tag{3.17}$$

$$y'' = y' \tag{3.18}$$



Σχήμα 3-16. Ανάλυση του curve mode για το πόδι 1.

Οι νέες συντεταγμένες του κέντρου βάρους είναι πιο περίπλοκες και εξαρτώνται και από το gait που επιλέγεται κάθε φορά, συνεπώς θα αναφερθούν παρακάτω.

3.4.4. Curve trim

Αντίστοιχα με την περίπτωση του crab trim, δημιουργήθηκε και σε αυτή την κίνηση ένας παρόμοιος αλγόριθμος. Έτσι όταν ο χειριστής δώσει τη γωνία fi που επιθυμεί να περιστραφεί το ρομπότ και την απόσταση d που επιθυμεί να προχωρήσει σε ένα βήμα με επιλεγμένο mode: curve mode, το ρομπότ θα κινηθεί σε καμπύλη. Ο αλγόριθμος αναλύει την απόσταση d στους άξονες X ($d1=d$) και Y ($d2=0$) και υπολογίζει το πολύγωνο στήριξης, τις νέες συντεταγμένες των ποδιών καθώς και του K.M.

Η γωνία fi μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω όμως δεν μπορεί να πάρει μεγάλες απόλυτες τιμές διότι υπάρχει κίνδυνος να βγει το πόδι εκτός workspace. Έτσι το πρώτο πράγμα που κάνει η υπορουτίνα είναι να ελέγχει εάν η γωνία fi είναι εντός επιτρεπτών ορίων και να εμφανίζει μήνυμα λάθους όταν δεν είναι.

Λόγω της συνισταμένης κίνησης ακόμα και αν το πόδι δεν βγαίνει εκτός workspace εξαρτώμενο μόνο από περιστροφή ή μόνο από ευθεία κίνηση, στο άθροισμα των 2

κινήσεων ελλοχεύει ο κίνδυνος να βγει κάποιο πόδι εκτός workspace. Συνεπώς μετά τον έλεγχο της γωνίας, ελέγχεται εάν το πόδι με τη γωνία f_i και την απόσταση d που έχει δώσει ο χειριστής μπορεί να βγει εκτός workspace, άρα και το ρομπότ θα κινηθεί κατά μειωμένη απόσταση d και μειωμένη γωνία f_i .

Έλεγχος γωνίας f_i

Το πόσο μπορεί να στρίψει το κάθε πόδι σε έναν πλήρη κύκλο, υπόκειται στον εξής περιορισμό [1]:

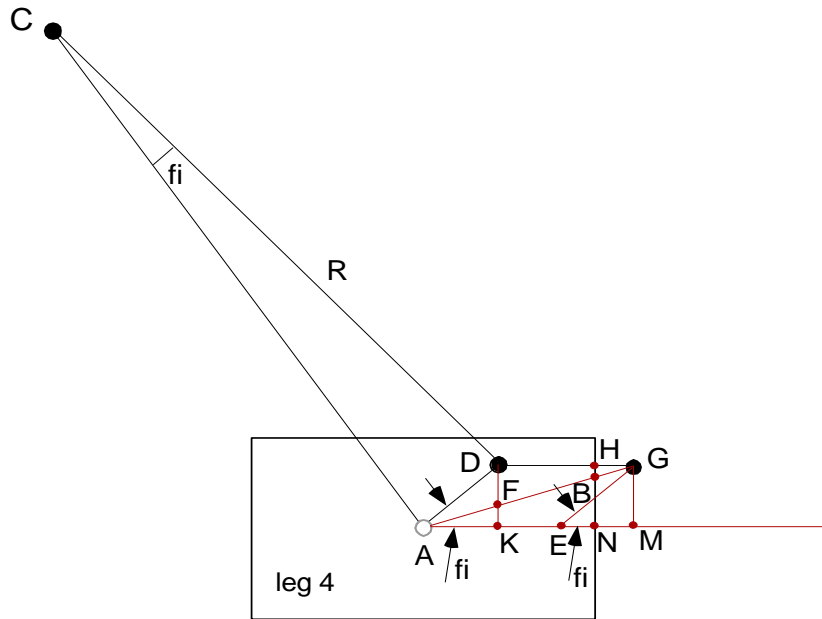
$$\frac{Q}{2\cos\left(\frac{\pi - f_i}{2} - \tan^{-1}\frac{2P}{U+Q}\right)} > 2\sqrt{P^2 + \left[\frac{1}{2}(Q+U)\right]^2} \sin\frac{f_i}{2} \quad (3.19)$$

Συνεπώς ελέγχεται αρχικά εάν η γωνία που μπορεί να περιστραφεί το ρομπότ σε έναν πλήρη κύκλο είναι στα επιτρεπτά όρια, ειδάλλως ο αλγόριθμος επιλέγει τη μέγιστη γωνία που επιτρέπεται από τις διαστάσεις του workspace.

Έλεγχος απόστασης d

Όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 3-15, σε αυτό το mode το κάθε πόδι κινείται διαφορετικά. Αυτό σημαίνει ότι αναλόγως την επιλογή της γωνίας f_i και της απόστασης d , κινδυνεύουν κάθε φορά άλλα πόδια να βγουν εκτός workspace. Συνεπώς εξετάζεται κάθε φορά ποιο είναι το πόδι που κινδυνεύει να βγει εκτός περιοχής εργασίας και με βάση αυτό μειώνεται η γωνία και η απόσταση που θα κινηθούν και τα υπόλοιπα πόδια, αλλά και το ρομπότ.

Στο Σχήμα 3-15 φαίνεται ότι κινδυνεύουν τα πόδια 4,5 και 6. Γι αυτό τον λόγο επιλέχθηκε να αναλυθεί το 4^ο πόδι, όμως ο έλεγχος αυτός γίνεται για κάθε πόδι. Στο Σχήμα 3-17 η γωνία $f_i = \angle N\hat{A}D$ που δίνει ο χειριστής είναι εντός ορίων, ενώ μαζί με την απόσταση $d = DG$ το πόδι βγαίνει εκτός workspace. Σχηματίζεται έτσι το παραλληλόγραμμο ADGE και ορίζονται τα σημεία που τέμνουν το workspace. Προφανώς αφού η απόσταση d είναι πάντα ως προς τον άξονα X, το πόδι θα κινδυνεύει να βγει εκτός workspace πάντα κατά X.



Σχήμα 3-17. Curve trim.

Σε αυτήν την περίπτωση ο αριθμός που θα μειώσει την γωνία fi και την απόσταση d είναι:

$$a = \frac{AB}{AG} \quad (3.20)$$

Από όμοια τρίγωνα $\triangle BAN \sim \triangle GAM$:

$$\frac{AB}{AG} = \frac{AN}{AM} \quad (3.21)$$

Όπου

$$AN = \frac{P}{2} \quad (3.22)$$

Και

$$AM = AK + d = AD \cdot \cos(fi) + d = 2 \cdot R \cdot \sin \frac{fi}{2} \cdot \cos fi + d \quad (3.23)$$

Άρα η (3.20) με τις (3.21), (3.22) και (3.23) γίνεται:

$$a = \frac{\frac{P}{2}}{2 \cdot R \cdot \sin \frac{fi}{2} \cdot \cos fi + d} \quad (3.24)$$

Υπολογίζοντας τα a για το κάθε πόδι, στη συνέχεια συγκρίνονται όλα τα a , και με βάση το μικρότερο μειώνονται η γωνία fi και η απόσταση d .

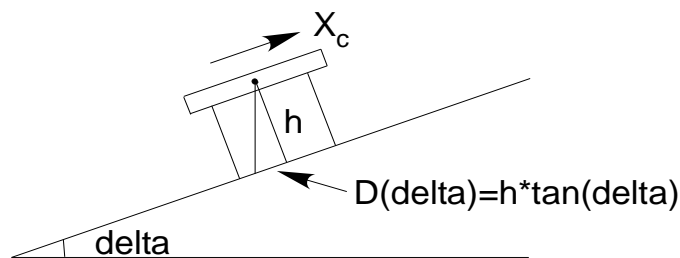
$$d' = a \cdot d \quad (3.25)$$

Και

$$f_i' = a \cdot f_i \quad (3.26)$$

3.5. Κλίση εδάφους κατά Χ

Όταν η κλίση εδάφους δεν είναι μηδενική, τότε το κέντρο βάρους βρίσκεται στην προβολή τους ύψους του πάνω στο έδαφος [18]. Για το λόγο αυτό ο αλγόριθμος υπολογίζει το πολύγωνο στήριξης, αφού πάρει σαν δεδομένο την γωνία κλίσης του εδάφους κατά Χ, δηλαδή ο χειριστής δίνει σαν είσοδο εκτός από το mode, τη γωνία κλίσης delta και το ύψος h μεταξύ του κέντρου βάρους του ρομπότ και του κεκλιμένου επιπέδου όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-18. Όπως φαίνεται και στο σχήμα η προβολή του κέντρου βάρους του ρομπότ στο πολύγωνο στήριξης μεταβάλλει σε μεγάλο βαθμό το περιθώριο ευστάθειας.

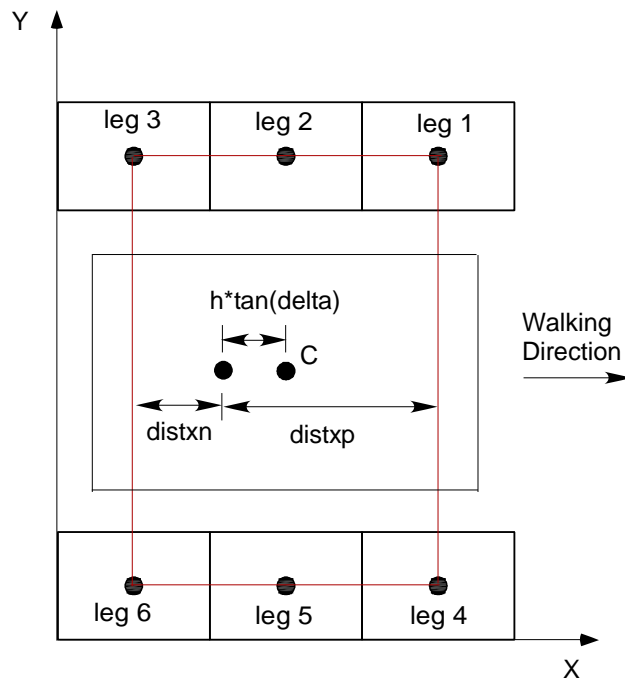


Σχήμα 3-18. Κλίση εδάφους ως προς άξονα Χ.

Η γωνία κλίσης μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή:

- ✓ $\delta > 0$ αν έχουμε θετική κλίση
- ✓ $\delta < 0$ αν έχουμε αρνητική κλίση

Στο Σχήμα 3-19 φαίνεται ένα παράδειγμα με $\delta > 0$, όπου το ρομπότ απεικονίζεται υπό κάτοψη. Παρατηρείται ότι ακόμα και όταν τοποθετούνται όλα τα πόδια σε κατάσταση στήριξης, το C δεν βρίσκεται στο κέντρο του ρομπότ, αλλά μετατοπισμένο κατά $h \cdot \tan(\delta)$, γεγονός που προσδίδει αβεβαιότητα στην μετέπειτα κίνηση του ρομπότ όπου συνοδεύεται με μείωση του πολυγώνου στήριξης.



Σχήμα 3-19. Ρομπότ υπό κλίση σε κάτοψη.

3.6. Βηματισμοί (Gaits)

3.6.1. Εισαγωγή

Αφού ο χειριστής δώσει το mode, την κλίση που επιθυμεί να κινηθεί το ρομπότ και γίνουν όλοι οι παραπάνω έλεγχοι, θα πρέπει στη συνέχεια να επιλέξει και με ποιόν τρόπο επιθυμεί να κινηθεί το ρομπότ, δηλαδή το gait. Οι πιθανές κινήσεις που μπορεί να εκτελέσει το ρομπότ είναι 3:

- ✓ Τρίποδος βηματισμός - Tripod gait (3 πόδια στον αέρα και 3 σταθερά)
- ✓ Τετράποδος βηματισμός - Quadriped gait (2 πόδια στον αέρα και 4 σταθερά)
- ✓ Πεντάποδος βηματισμός - Pentapod gait (1 πόδι στον αέρα και 5 σταθερά)

Όπως είναι φυσικό δεν έχουν όλα τα gaits τις ίδιες ιδιότητες και για συγκεκριμένες κινήσεις του ρομπότ προτιμώνται ή απορρίπτονται. Παρακάτω ακολουθεί εκτενής ανάλυση των gaits για crab και curve mode. Στον GSA ορίζεται ένας πίνακας με όλους τους συνδυασμούς ποδιών (ανάλογα ποιο gait ερευνάται κάθε φορά) και από αυτόν τον πίνακα, για κάθε διάνυσμα (κάθε γραμμή του πίνακα) με συνδυασμό ποδιών και για κάθε πόδι που ανυψώνεται, σχηματίζεται το πολύγωνο στήριξης και μετρώνται οι αποστάσεις του κέντρου βάρους από κάθε ακμή του πολυγώνου στήριξης.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι νέες συντεταγμένες του ποδιού που ανυψώθηκε αλλά και οι νέες συντεταγμένες του κέντρου βάρους. Τελικά για κάθε συνδυασμό ποδιών προκύπτουν οι αποστάσεις του κέντρου βάρους από το πολύγωνο στήριξης για κάθε πόδι. Στη συνέχεια, για κάθε συνδυασμό, ελέγχεται εάν το κέντρο βάρους του ρομπότ βρίσκεται εντός πολυγώνου στήριξης και εφόσον δεν βρίσκεται, ο συνδυασμός αυτός

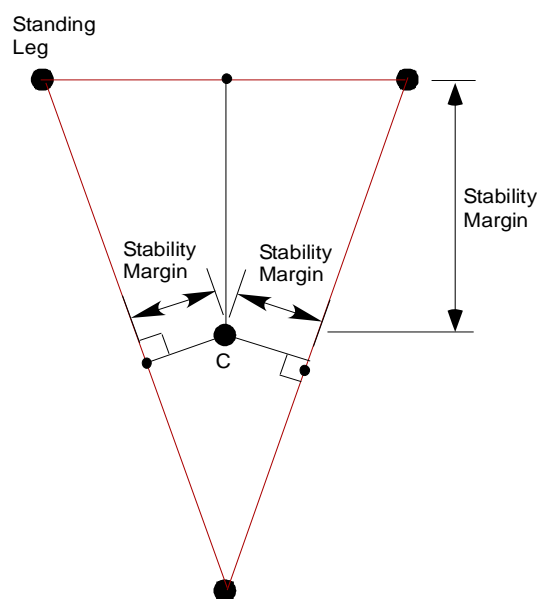
απορρίπτεται, για τις συγκεκριμένες προδιαγραφές κίνησης που έχει επιλέξει ο χειριστής. Τέλος για κάθε ευσταθή συνδυασμό υπολογίζεται η ελάχιστη απόσταση του κέντρου βάρους του ρομπότ από το πολύγωνο στήριξης και στη συνέχεια υπολογίζεται η μέγιστη απόσταση όλων αυτών των ελάχιστων αποστάσεων των συνδυασμών (Κριτήριο $\max(\min)$), με αποτέλεσμα να επιλέγεται τελικά ο βέλτιστος συνδυασμός ποδιών για κάθε gait.

Εάν ο βέλτιστος συνδυασμός δεν είναι μοναδικός, τότε υπολογίζεται η μέση απόσταση του κέντρου βάρους του ρομπότ από το πολύγωνο στήριξης και στη συνέχεια υπολογίζεται η μέγιστη απόσταση όλων αυτών των μέσων αποστάσεων των βέλτιστων συνδυασμών (Κριτήριο $\max(\text{mean})$) και τελικά επιλέγεται ο τελικός βέλτιστος συνδυασμός για κάθε gait.

3.6.2. Tripod Gait

Για το συγκεκριμένο gait, έχει μελετηθεί ότι είναι βέλτιστο να σηκώνονται τα πόδια σχηματίζοντας ισόπλευρο τρίγωνο, διότι έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτει μεγαλύτερο περιθώριο ευστάθειας. Σε αυτήν την περίπτωση ο πίνακας με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ποδιών είναι $2(=2!) \times 2$ και κάθε διάνυσμα γραμμής του πίνακα δίνει έναν συνδυασμό ποδιών. Το διάνυσμα έχει τη μορφή $[\chi_1 \chi_2]$, όπου χ_1 αναφέρεται στα πόδια 1,3 και 5 και χ_2 στα πόδια 2,4 και 6, έτσι π.χ. το διάνυσμα $[2 \ 1]$ υποδηλώνει ότι πρώτα σηκώνονται τα πόδια 2,4,6 και στη συνέχεια τα πόδια 1,3,5.

Το περιθώριο ευστάθειας υπολογίζεται ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους του ρομπότ CG και του πολύγωνου στήριξης. Σε αυτό το gait το πολύγωνο στήριξης είναι τρίγωνο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-20.



Σχήμα 3-20. Περιθώριο ευστάθειας για tripod gait.

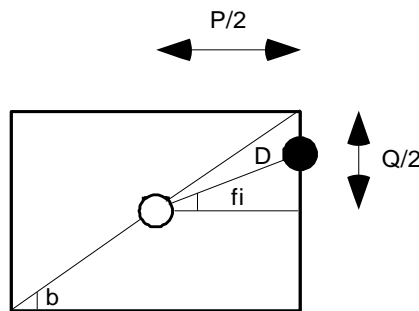
Το περιθώριο ευστάθειας μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της κίνησης. Ο κανόνας του τρίποδου βηματισμού είναι ότι δύο ομάδες ποδιών κάνουν τις ίδιες κινήσεις με διαφορά φάσης μισού κύκλου κίνησης. Ωστόσο, αυτός ο βηματισμός δεν είναι πάντοτε ο βέλτιστος για την στατική ευστάθεια του εξαπόδου ρομπότ, διότι τα μισά πόδια του ρομπότ στηρίζουν το ρομπότ. Δεν προτιμάται σε μεγάλες κλίσεις εδάφους λόγω της χαμηλής ευστάθειας του, όμως προτιμάται για μεγάλες ταχύτητες του ρομπότ.

Σε κάθε κατεύθυνση του ρομπότ η πρώτη ομάδα των ποδιών που σηκώνεται είναι τα πόδια 1,3,5, ως εκ τούτου η δεύτερη ομάδα είναι τα πόδια 2,4,6.

3.6.2.1. Crab mode

Για την ανάλυση των gaits στο mode αυτό θα απεικονίζονται οι γωνίες $0 \leq \phi_i \leq 90^\circ$, αλλά με τον ίδιο τρόπο αναλύονται και οι υπόλοιπες τιμές της ϕ_i . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-21 ο μαύρος κύκλος υποδηλώνει τη θέση του ποδιού μετά από ένα lift-place, ενώ ο άσπρος κύκλος την προηγούμενη θέση του ποδιού (αρχική θέση).

Αν η γωνία ϕ_i είναι $0 \leq \phi_i \leq 90^\circ$, τότε τα πόδια κινούνται κατά απόσταση D . Την ίδια κίνηση ακολουθεί και το σώμα του ρομπότ στο τέλος ενός πλήρους κύκλου κίνησης.



Σχήμα 3-21. Κίνηση ποδιού σε crab mode.

Πιο συγκεκριμένα:

- Εάν $0 \leq \phi_i \leq b$ $\rightarrow D = \frac{\frac{1}{2}P}{\cos(\phi_i)}$
- Εάν $b < \phi_i \leq 90^\circ$ $\rightarrow D = \frac{\frac{1}{2}Q}{\sin(\phi_i)}$

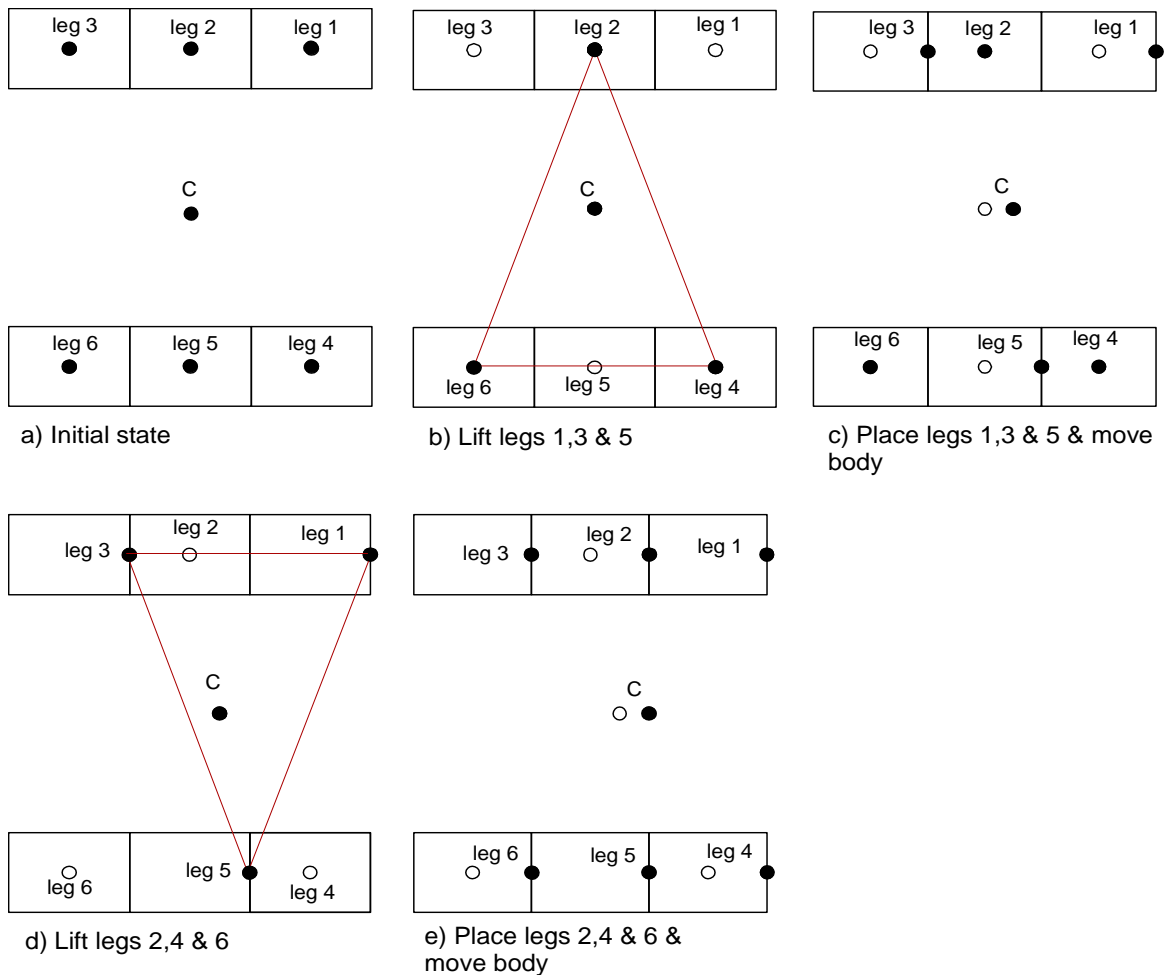
D : το μήκος της τροχιάς του ποδιού που αντιστοιχεί σε γωνία ϕ_i

b : η γωνία μεταξύ της διαγωνίου και της βάσης του workspace του ποδιού

ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ($f_i = 0$)

Στα σχήματα που ακολουθούν οι μαύροι κύκλοι υποδηλώνουν τις θέσεις των ποδιών στήριξης και οι άσπροι κύκλοι τις προηγούμενες θέσεις των ποδιών.

Στην εμπρόσθια κίνηση σηκώνονται πρώτα τα πόδια 1,3,5. Μετά από χρόνο T_t (χρόνος ανύψωσης του ποδιού), το σώμα κινείται σε μία απόσταση $P/4 - x$ (όπου x είναι η απόσταση που το σώμα κινείται στο χρόνο T_w , χρόνος στον οποίο, όλα τα πόδια βρίσκονται σε κατάσταση στήριξης). Στη συνέχεια, μετά από χρόνο T_w , το σώμα κινείται κατά απόσταση x από την προηγούμενη θέση του. Στη συνέχεια σηκώνονται τα πόδια 2,4,6. Μετά από χρόνο T_t , το σώμα κινείται σε απόσταση $P/4 - x$ από την προηγούμενη θέση του. Μετά το πέρασμα του χρόνου T_w , το σώμα κινείται κατά απόσταση x από την προηγούμενη θέση του. Συνολικά όλα τα πόδια, αλλά και το σώμα του ρομπότ κινούνται κατά $P/2$ και φτάνουν στην ίδια αρχική κατάσταση κατά τη διάρκεια ενός κύκλου κίνησης. Η διαφορά μεταξύ της απόστασης $P/4 - x$ και $P/4$ δεν απεικονίζεται στο Σχήμα 3-22 επειδή οι δύο αποστάσεις είναι σχεδόν ίδιες.



Σχήμα 3-22. Tripod gait – εμπρόσθια κίνηση.

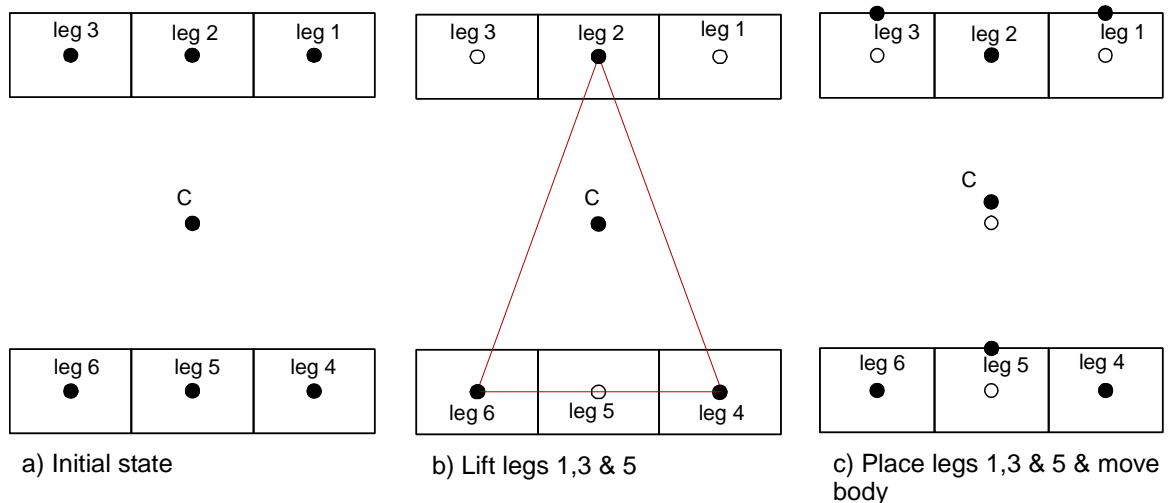
Στο Σχήμα 3-23 φαίνεται το διάγραμμα χρόνου των ποδιών για το tripod gait. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-23 με μαύρο χρώμα είναι ο χρόνος στον οποίο το πόδι βρίσκεται στο έδαφος, ενώ με λευκό όταν βρίσκεται στον αέρα.

Leg 1		■	■	■	■
Leg 2	■	■			■
Leg 3		■	■	■	
Leg 4	■	■			■
Leg 5		■	■	■	
Leg 6	■	■			■
Time		T _t	T _w	T _t	T _w

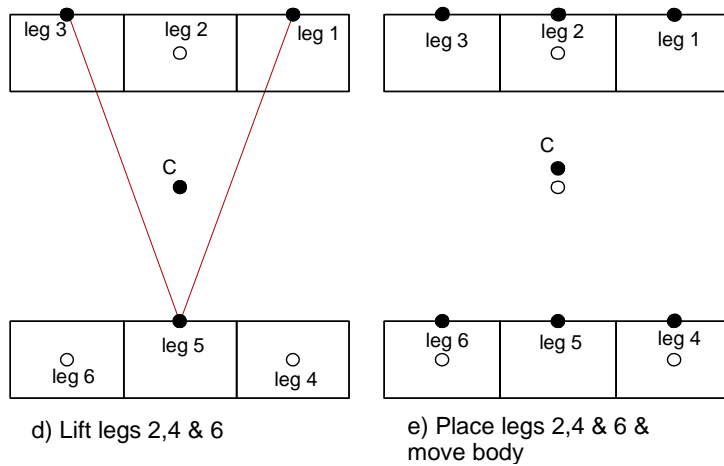
Σχήμα 3-23. Διάγραμμα χρόνου για tripod gait.

ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ($f_i = 90^\circ$)

Δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ της εγκάρσιας κίνησης και της εμπρόσθιας κίνησης. Τα πόδια σηκώνονται, στη συνέχεια τοποθετούνται σε απόσταση $Q/2$ και το σώμα κινείται κατά απόσταση $Q/2$, όπως απεικονίζεται στα Σχήμα 3-24 και Σχήμα 3-25.



Σχήμα 3-24. Tripod gait – Εγκάρσια κίνηση.

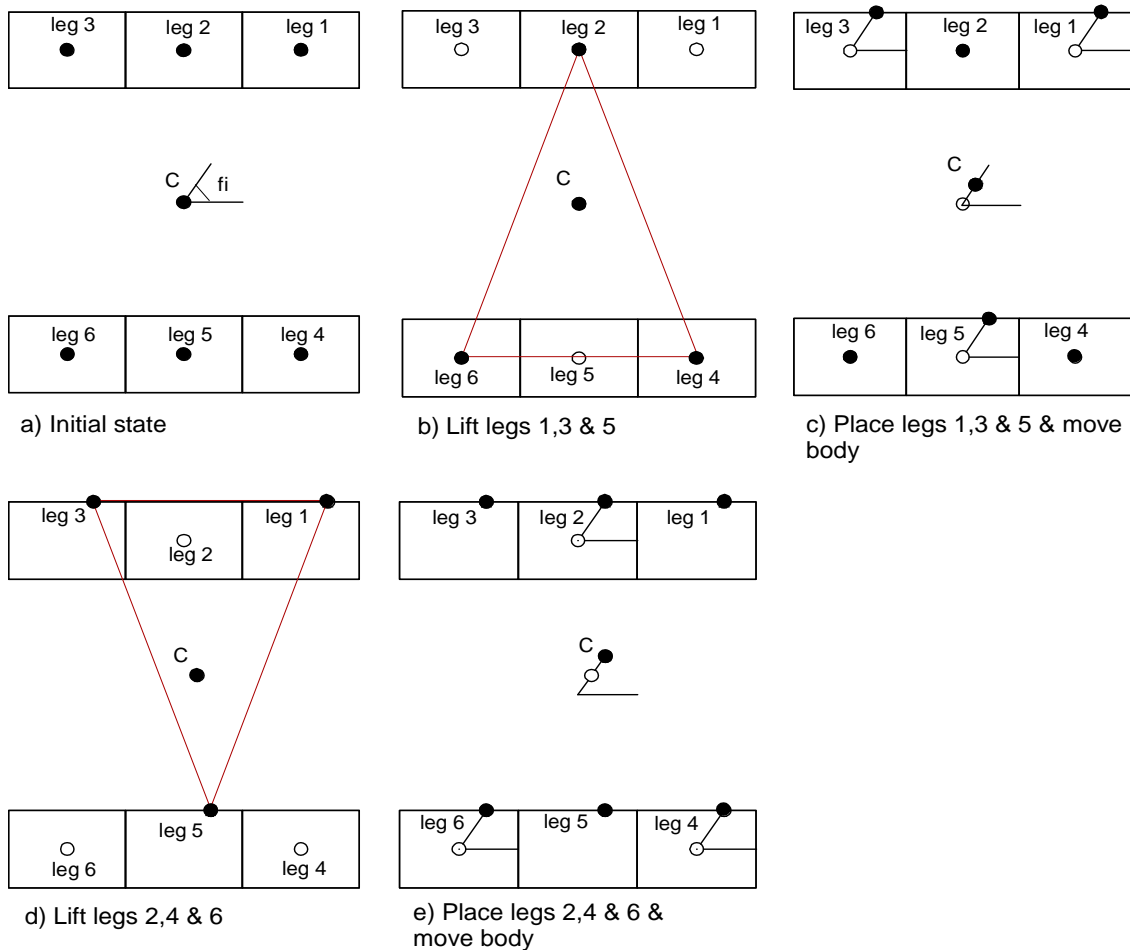


Σχήμα 3-25. Tripod gait – Εγκάρσια κίνηση.

ΔΙΑΓΩΝΙΑ ΚΙΝΗΣΗ

✓ Περίπτωση $b < \phi_i \leq 90^\circ$

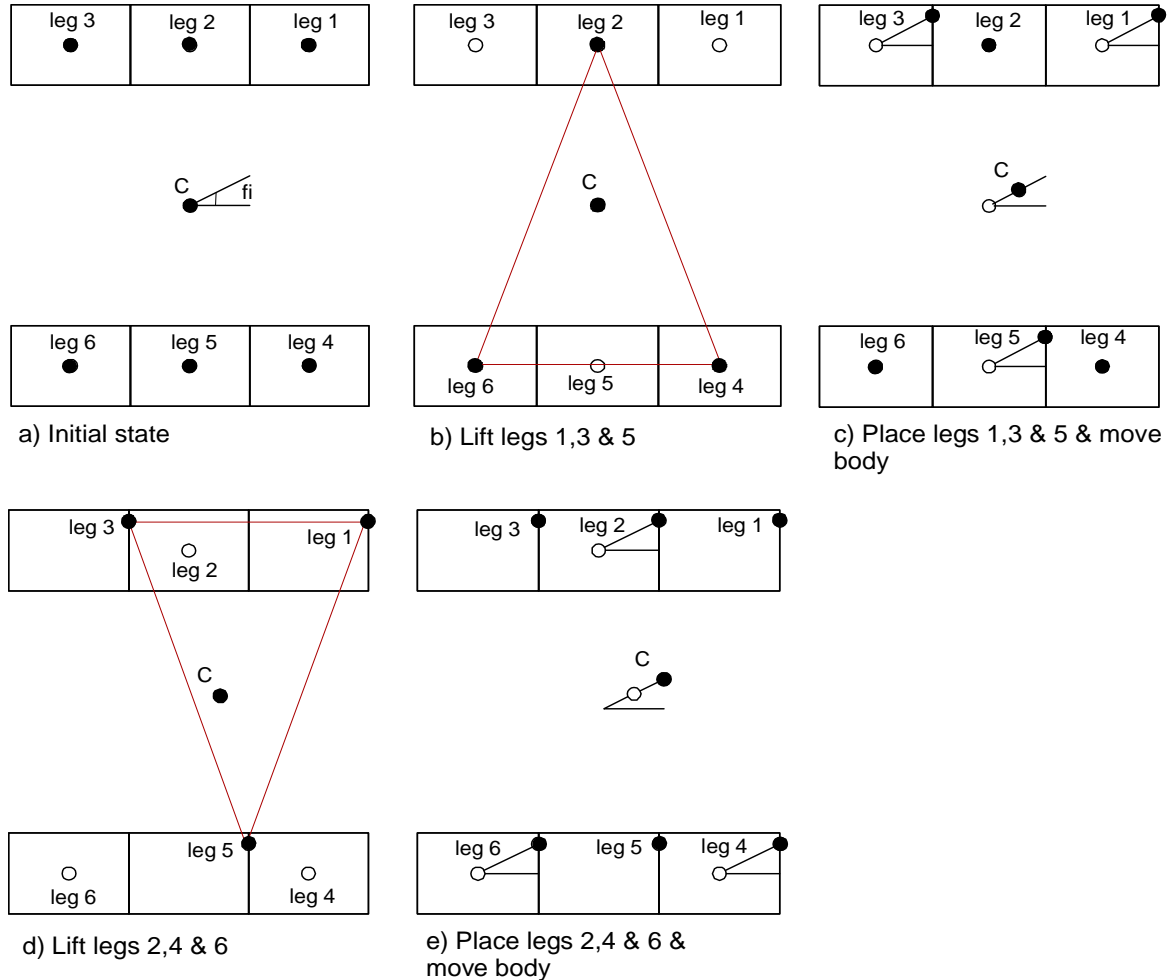
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εάν η γωνία ϕ_i είναι $b < \phi_i \leq 90^\circ$, τα πόδια τοποθετούνται σε απόσταση $0.5Q / \sin(\phi_i)$ και το σώμα κινείται στην ίδια απόσταση όπως τα πόδια (βλέπε Σχήμα 3-26).



Σχήμα 3-26. Tripod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $b < \phi_i \leq 90^\circ$.

✓ Περίπτωση $0 < \phi_i \leq b$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εάν η γωνία ϕ_i είναι $0 < \phi_i \leq b$, τα πόδια τοποθετούνται σε απόσταση $0.5P / \cos(\phi_i)$ και το σώμα κινείται στην ίδια απόσταση όπως τα πόδια (Σχήμα 3-27).



Σχήμα 3-27. Tripod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $0 < \phi_i \leq b$.

Διάγραμμα Χρόνου

T: περίοδος, ο χρόνος κίνησης του ρομπότ κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου κίνησης.

$$T = 2T_t + 2T_w \quad (3.27)$$

όπου T_t : χρόνος ανύψωσης ποδιού [20]

$$T_t = \frac{D}{u_t} \quad (3.28)$$

όπου T_w : χρόνος κατά τον οποίο όλα τα πόδια βρίσκονται σε κατάσταση στήριξης.

- Εάν $0 \leq \phi_i \leq \phi$ $\rightarrow D = \frac{\frac{1}{2}P}{\cos(\phi_i)}$

- Εάν $\phi < \phi_i \leq 90^\circ$ $\rightarrow D = \frac{\frac{1}{2}Q}{\sin(\phi_i)}$

Για την εμπρόσθια κίνηση, $\phi_i=0$ $\rightarrow D = \frac{1}{2}P$

Επίσης:

$$\frac{T_w}{T_t} = k, \quad k < 1 \quad (3.29)$$

$$x = \left(\frac{k}{1+k} \right) \frac{P}{4} \quad (3.30)$$

όπου

D: το μήκος της τροχιάς του ποδιού που αντιστοιχεί σε γωνία ϕ_i

x: η απόσταση όπου το σώμα διανύει σε χρόνο T_w

u_t : η μέση ταχύτητα ανύψωσης του ποδιού

P: το μήκος της προσβάσιμης περιοχής του ποδιού κατά τον άξονα X

Q: το μήκος της προσβάσιμης περιοχής του ποδιού κατά τον άξονα Y

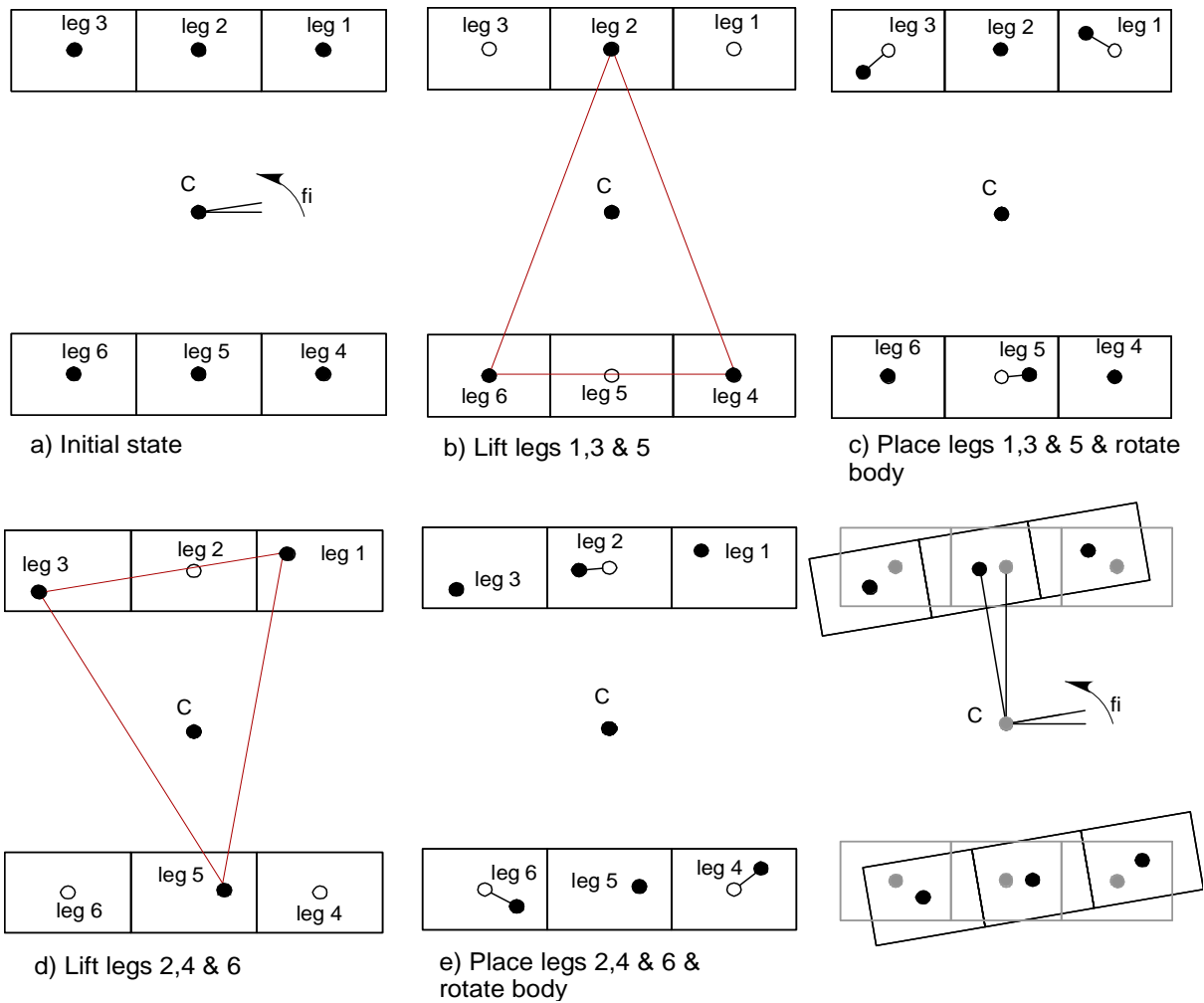
β : λόγος λειτουργίας, ο λόγος λειτουργίας (duty factor), $\beta \in [0, 1]$, για ένα πόδι αποτελεί την συχνότητα μεταξύ της κατάστασης στήριξης του ποδιού και του συνολικού χρόνου κίνησης T του ρομπότ.

$$\beta = \frac{T_t + 2T_w}{T} \quad (3.31)$$

3.6.2.2. Curve mode

ΑΠΛΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-28, τα πόδια κινούνται πάνω σε μήκος τόξου $s=R \cdot \phi_i$, όπου R είναι η απόσταση μεταξύ του ποδιού και του CG του ρομπότ. Προφανώς κατά την περιστροφή του ρομπότ, το CG μένει σταθερό. Στο Σχήμα 3-28 φαίνεται η περιστροφή του ρομπότ κατά γωνία $\phi_i > 0$.



Σχήμα 3-28. Tripod gait – Περιστροφή

ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΚΑΜΠΥΛΗ

Ακολουθεί η εύρεση του κέντρου βάρους του ρομπότ σε αυτό το gait. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-29 είναι γνωστή η αρχική θέση του κέντρου βάρους C.

$C(x_c, y_c)$

καθώς και η θέση $K(x_c + d/2, y_c)$, όπου d η συνολική απόσταση που θα εκτελέσει το ρομπότ σε έναν πλήρη κύκλο.

Μετά από ένα lift-place ποδιών το κέντρο βάρους θα βρεθεί στη θέση:

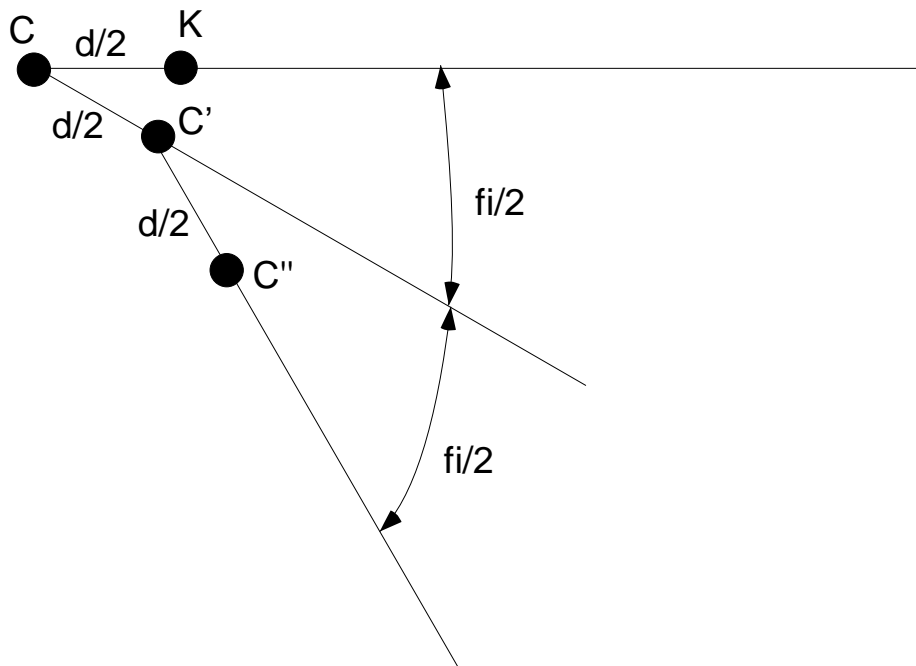
$C'(x_c', y_c')$

όπου οι νέες συντεταγμένες του C', όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-29 είναι:

$$x_{c'} = x_c + \frac{d}{2} \cdot \cos\left(\frac{f_i}{2}\right) \quad (3.32)$$

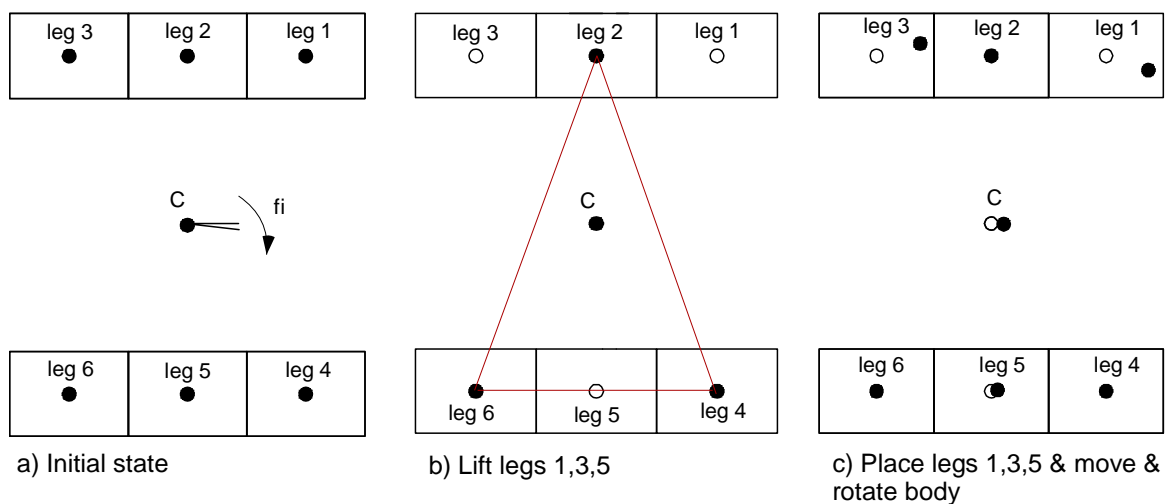
$$y_{c'} = y_c + \frac{d}{2} \cdot \sin\left(\frac{f_i}{2}\right) \quad (3.33)$$

Με τον ίδιο τρόπο βρίσκονται και οι συντεταγμένες του C'' .

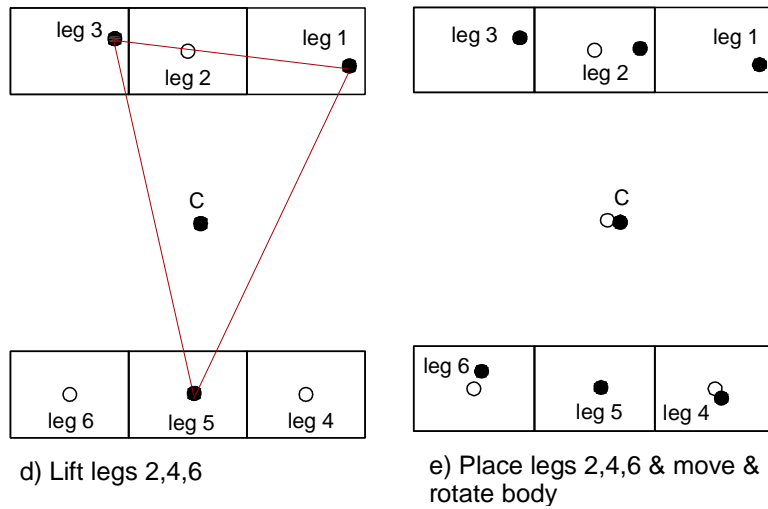


Σχήμα 3-29. Κίνηση CM σε curve mode με tripod gait.

Στα Σχήμα 3-30 και Σχήμα 3-31 φαίνεται η συνολική κίνηση του ρομπότ, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, αυτή τη φορά για την ευκολία της απεικόνισης ισχύουν: $fi < 0$ και $d > 0$.



Σχήμα 3-30. Tripod gait – Κίνηση σε καμπύλη.

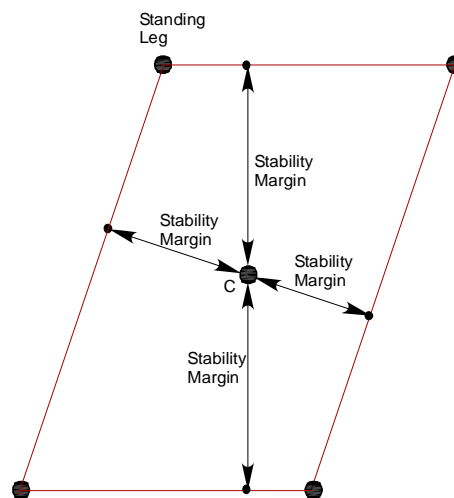


Σχήμα 3-31. Tripod gait – Κίνηση σε καμπύλη.

3.6.3. Quadruped Gait

Για το συγκεκριμένο gait έχει μελετηθεί ότι είναι βέλτιστο να σηκώνονται τα πόδια διαγώνια διότι έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτει μεγαλύτερο περιθώριο ευστάθειας. Σε αυτήν την περίπτωση ο πίνακας με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ποδιών είναι $6(=3!) \times 3$ και κάθε διάνυσμα γραμμής του πίνακα δίνει έναν συνδυασμό ποδιών. Το διάνυσμα έχει τη μορφή $[\chi_1 \chi_2 \chi_3]$, όπου χ_1 αναφέρεται στα πόδια 1,6, χ_2 στα πόδια 2,5 και χ_3 στα πόδια 3,4, έτσι π.χ. το διάνυσμα $[1 \ 3 \ 2]$ υποδηλώνει ότι πρώτα σηκώνεται το 1^ο μαζί με το 6^ο πόδι μετά το 3^ο μαζί με το 4^ο πόδι και τέλος το 2^ο μαζί με το 5^ο πόδι.

Στον τετράποδο βηματισμό, το περιθώριο ευστάθειας υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως με τον τρίποδο βηματισμό με τη διαφορά ότι σε αυτήν την περίπτωση το πολύγωνο στήριξης έχει τέσσερις ακμές (Σχήμα 3-32).



Σχήμα 3-32. Περιθώριο ευστάθειας σε quadruped gait.

Ο κανόνας του τετράποδου βηματισμού είναι ότι τρεις ομάδες ποδιών κάνουν τις ίδιες κινήσεις με διαφορά φάσης $1/3$ κύκλου κίνησης. Ο βηματισμός αυτός είναι σαφέστατα πιο ευσταθής σε σχέση με τον τρίποδο διότι κάθε χρονική στιγμή τουλάχιστον τέσσερα πόδια στηρίζουν το ρομπότ.

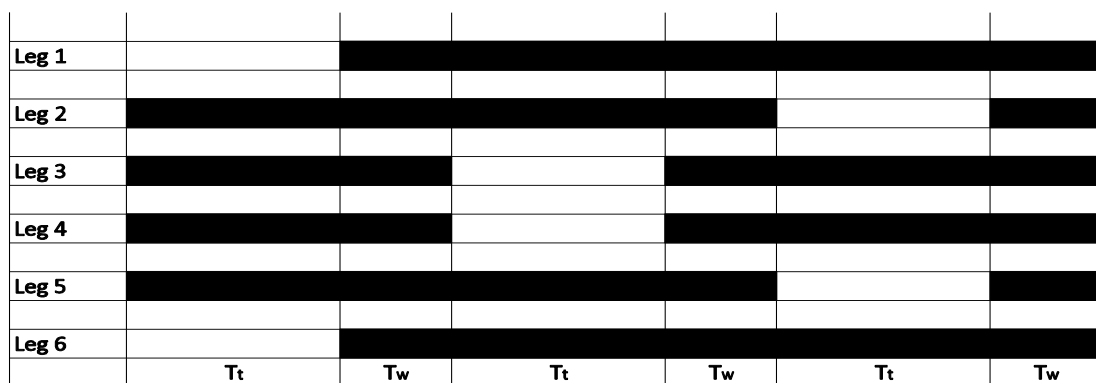
3.6.3.1. Crab mode

Σε αυτήν την κίνηση όπως έχει αναφερθεί υπάρχουν περισσότεροι συνδυασμοί ποδιών σε αντίθεση με τον τρίποδο βηματισμό. Έτσι ο GSA δίνει διαφορετικούς βέλτιστους συνδυασμούς ποδιών για κάθε κίνηση.

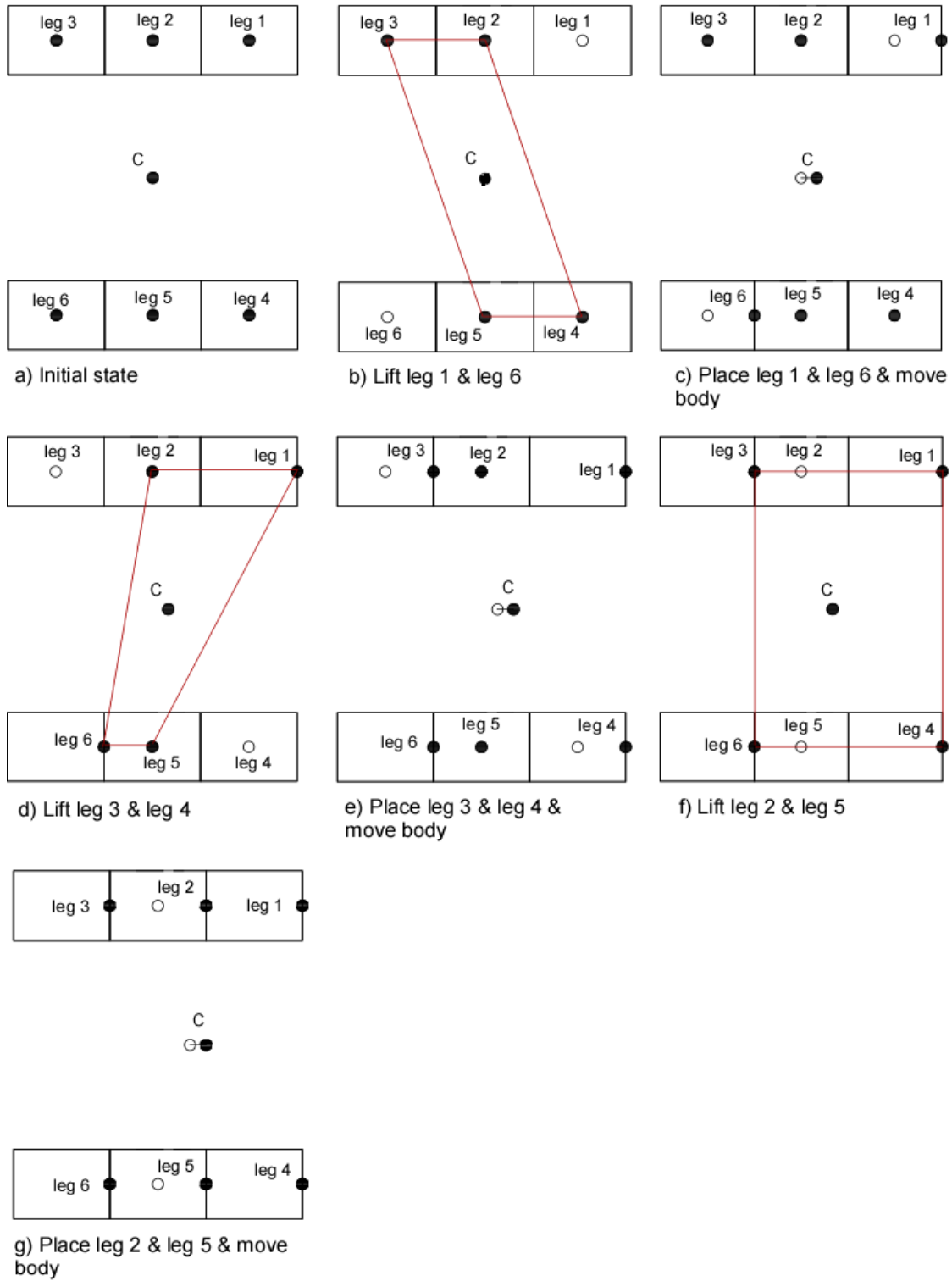
- Για εμπρόσθια κίνηση ($\theta = 0$) → (πόδι 1 & 6, πόδι 3 & 4, πόδι 2 & 5)
- Για εγκάρσια κίνηση ($\theta = 90^\circ$) → (πόδι 2 & 5, πόδι 3 & 4, πόδι 1 & 6)
- Για διαγώνια κίνηση με $\beta < \theta \leq 90^\circ$ → (πόδι 1 & 6, πόδι 3 & 4, πόδι 2 & 5)
- Για διαγώνια κίνηση με $0 \leq \theta \leq \beta$ → (πόδι 1 & 6, πόδι 3 & 4, πόδι 2 & 5)

ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ($f_i = 0$)

Στην εμπρόσθια κίνηση σηκώνονται πρώτα τα πόδια 1 και 6. Μετά από χρόνο T_t (χρόνος ανύψωσης του ποδιού), το σώμα κινείται σε μία απόσταση $P/6 - x$ (όπου x είναι η απόσταση που το σώμα κινείται στο χρόνο T_w , χρόνος στον οποίο, όλα τα πόδια βρίσκονται σε κατάσταση στήριξης). Στη συνέχεια, μετά από χρόνο T_w , το σώμα κινείται κατά απόσταση x από την προηγούμενη θέση του. Στη συνέχεια σηκώνονται τα πόδια 3 και 4. Μετά από χρόνο T_t , το σώμα κινείται σε απόσταση $P/6 - x$ από την προηγούμενη θέση του. Στη συνέχεια, μετά το πέρασμα του χρόνου T_w , το σώμα κινείται κατά απόσταση x από την προηγούμενη θέση του. Τέλος σηκώνονται τα πόδια 2 και 5 και ακολουθούν οι ίδιοι υπολογισμοί. Συνολικά όλα τα πόδια, αλλά και το σώμα του ρομπότ κινούνται κατά $P/2$ και φτάνουν στην ίδια αρχική κατάσταση κατά τη διάρκεια ενός κύκλου κίνησης. Η διαφορά μεταξύ της απόστασης $P/6 - x$ και $P/6$ δεν απεικονίζεται επειδή οι δύο αποστάσεις είναι σχεδόν ίδιες. Η διαδικασία απεικονίζεται στο Σχήμα 3-34, ενώ στο Σχήμα 3-33 φαίνεται το διάγραμμα χρόνου των ποδιών για το quadruped gait.



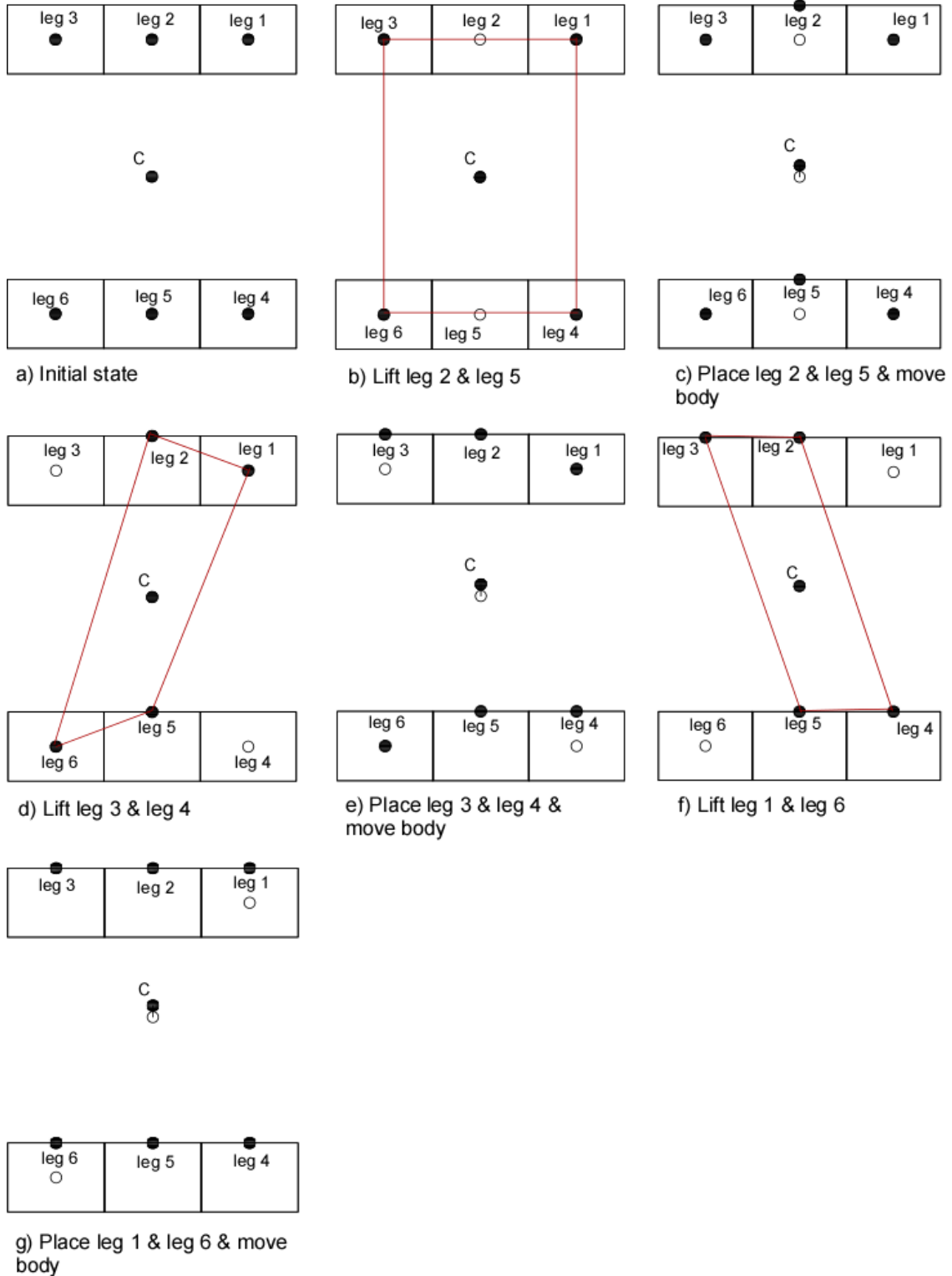
Σχήμα 3-33. Διάγραμμα χρόνου για ευθεία κίνηση με quadruped gait.



Σχήμα 3-34. Quadruped gait – Εμπρόσθια κίνηση.

ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ($\phi_i = 90^\circ$)

Δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ της εγκάρσιας κίνησης και της εμπρόσθιας κίνησης. Τα πόδια σηκώνονται, στη συνέχεια τοποθετούνται σε απόσταση $Q/2$ και το σώμα κινείται κατά απόσταση $Q/2$ όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-35.

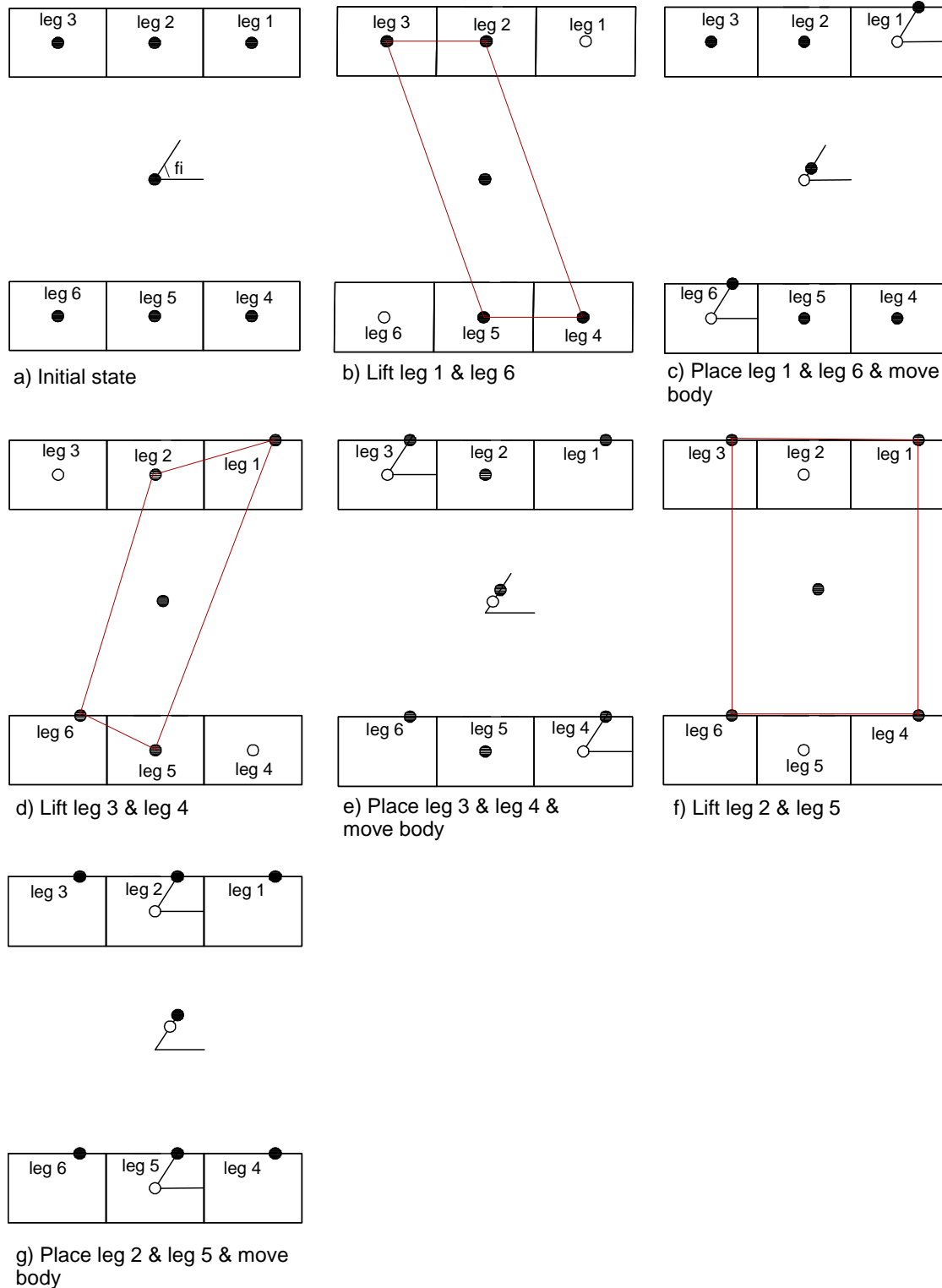


Σχήμα 3-35. Quadruped gait – Εγκάρσια κίνηση.

ΔΙΑΓΩΝΙΑ ΚΙΝΗΣΗ

✓ Περίπτωση $b < \phi_i \leq 90^\circ$

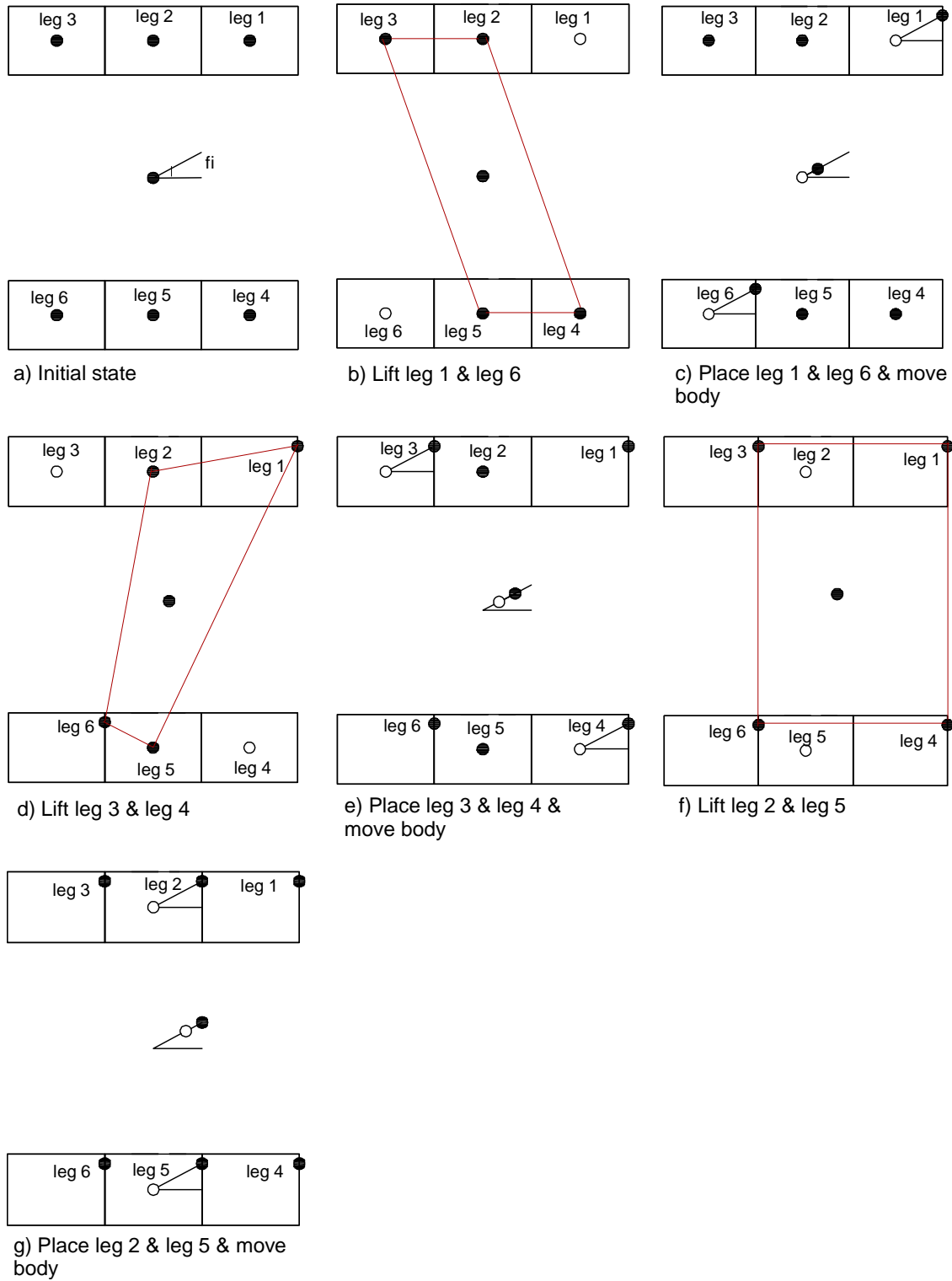
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εάν η γωνία ϕ_i είναι $b < \phi_i \leq 90^\circ$, τα πόδια τοποθετούνται σε απόσταση $0.5Q / \sin(\phi_i)$ και το σώμα κινείται στην ίδια απόσταση όπως τα πόδια.



Σχήμα 3-36. Quadruped gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $b < \phi_i \leq 90^\circ$.

✓ Περίπτωση $0 < \phi_i \leq b$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εάν η γωνία ϕ_i είναι $0 < \phi_i \leq b$, τα πόδια τοποθετούνται σε απόσταση $0.5P / \cos(\phi_i)$ και το σώμα κινείται στην ίδια απόσταση όπως τα πόδια.



Σχήμα 3-37. Quadruped gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $0 < \phi_i \leq b$.

Διάγραμμα Χρόνου

T: περίοδος, ο χρόνος κίνησης του ρομπότ κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου κίνησης.

$$T = 3T_t + 3T_w \quad (3.34)$$

όπου T_t : χρόνος ανύψωσης ποδιού

$$T_t = \frac{D}{u_t} \quad (3.35)$$

όπου T_w : χρόνος κατά τον οποίο όλα τα πόδια βρίσκονται σε κατάσταση στήριξης.

- Εάν $0 \leq \phi_i \leq b$ $\rightarrow D = \frac{\frac{1}{2}P}{\cos(\phi_i)}$

- Εάν $b < \phi_i \leq 90^\circ$ $\rightarrow D = \frac{\frac{1}{2}Q}{\sin(\phi_i)}$

Για την εμπρόσθια κίνηση, $\phi_i=0$ $\rightarrow D = \frac{1}{2}P$

Επίσης:

$$\frac{T_w}{T_t} = k, \quad k < 1 \quad (3.36)$$

$$x = \left(\frac{k}{1+k} \right) \frac{P}{6} \quad (3.37)$$

όπου:

D: το μήκος της τροχιάς του ποδιού που αντιστοιχεί σε γωνία ϕ_i

x: η απόσταση όπου το σώμα διανύει σε χρόνο T_w

u_t : η μέση ταχύτητα ανύψωσης του ποδιού

P: το μήκος της προσβάσιμης περιοχής του ποδιού κατά τον άξονα X

Q: το μήκος της προσβάσιμης περιοχής του ποδιού κατά τον άξονα Y

β : λόγος λειτουργίας, ο λόγος λειτουργίας (duty factor), $\beta \in [0, 1]$, για ένα πόδι αποτελεί την συχνότητα μεταξύ της κατάστασης στήριξης του ποδιού και του συνολικού χρόνου κίνησης T του ρομπότ.

$$\beta = \frac{2T_t + 3T_w}{T} \quad (3.38)$$

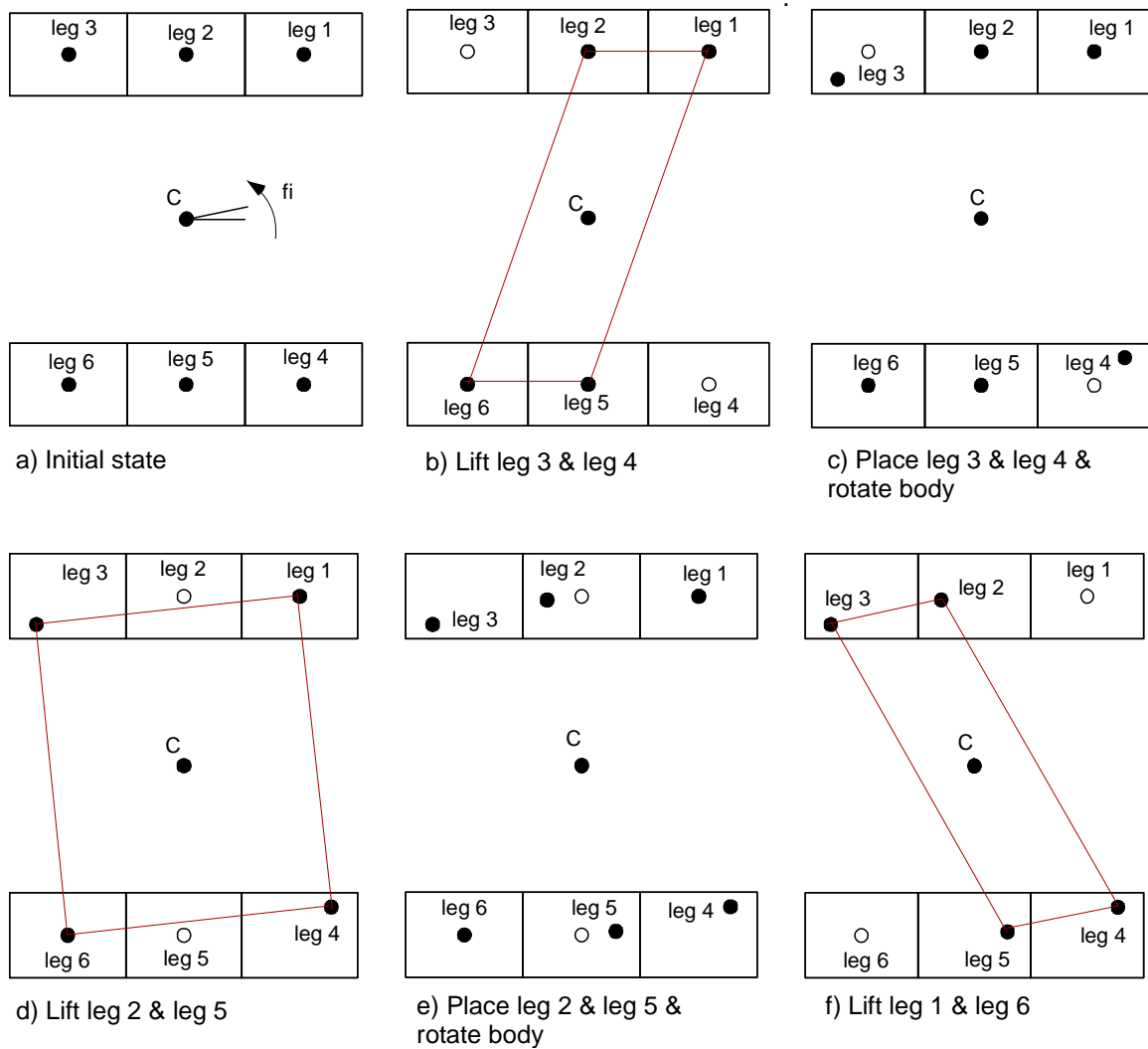
3.6.3.2. Curve mode

Σε αυτήν την κίνηση ο GSA δίνει τους εξής συνδυασμούς:

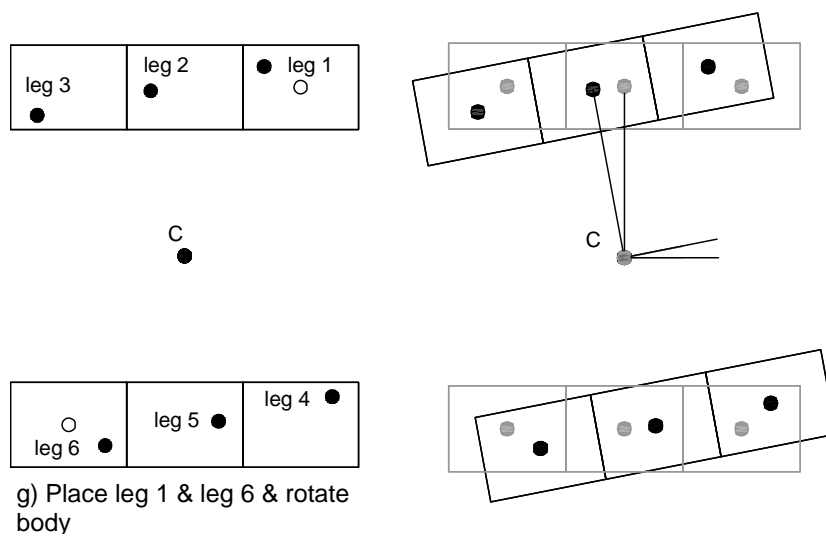
- Για απλή περιστροφή ($f_i > 0$) → (πόδι 3 & 4, πόδι 2 & 5, πόδι 1 & 6)
- Για $f_i < 0$ και $d > 0$ → (πόδι 3 & 4, πόδι 1 & 6, πόδι 2 & 5)

ΑΠΛΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-38 και Σχήμα 3-39, τα πόδια κινούνται πάνω σε μήκος τόξου $s = R \cdot f_i$, όπου R είναι η απόσταση μεταξύ του ποδιού και του CG του ρομπότ. Προφανώς κατά την περιστροφή του ρομπότ, το CG μένει σταθερό.



Σχήμα 3-38. Quadruped gait – Περιστροφή.



Σχήμα 3-39. Quadruped gait – Περιστροφή.

ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΚΑΜΠΥΛΗ

Ακολουθεί η εύρεση του κέντρου βάρους του ρομπότ σε αυτό το gait, με $d > 0$ και $f_i < 0$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-40 είναι γνωστή η αρχική θέση του κέντρου βάρους C.

$C(x_C, y_C)$

καθώς και η θέση $K(x_C + d/3, y_C)$, όπου d η συνολική απόσταση που θα εκτελέσει το ρομπότ σε έναν πλήρη κύκλο.

Μετά από ένα lift-place ποδιών το κέντρο βάρους θα βρεθεί στη θέση

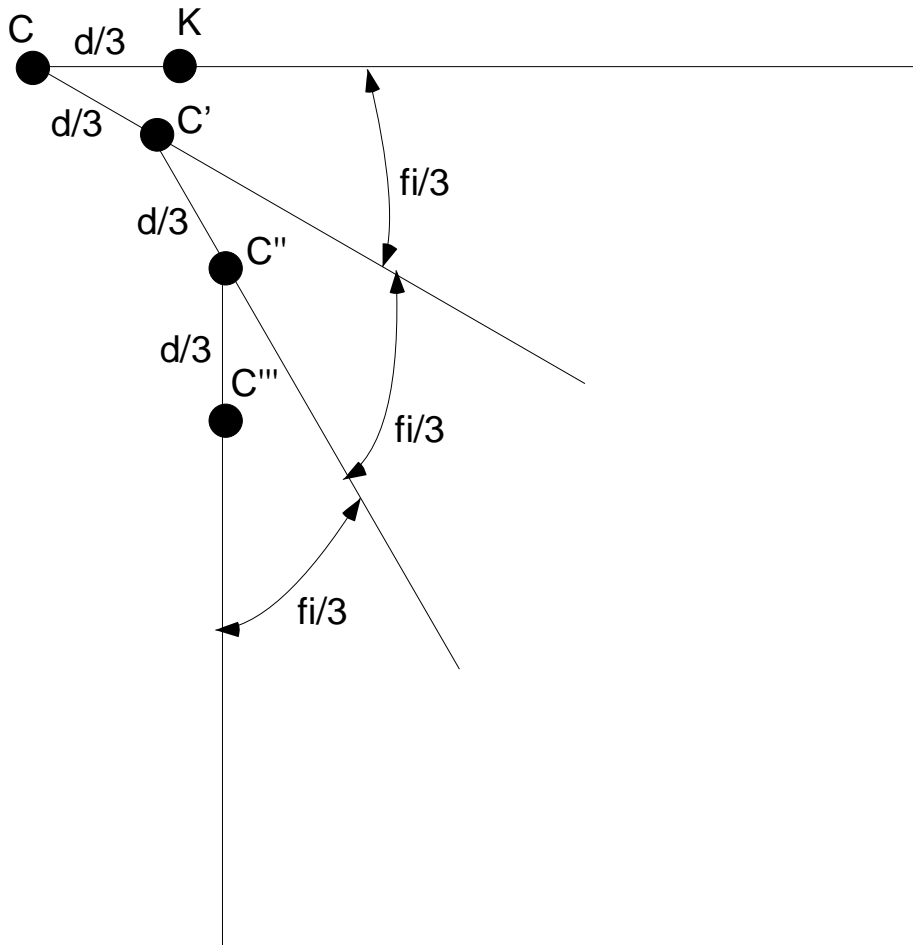
$C'(x_{C'}, y_{C'})$

όπου οι νέες συντεταγμένες του C', όπως φαίνεται στο σχήμα είναι:

$$x_{C'} = x_C + \frac{d}{3} \cdot \cos\left(\frac{f_i}{3}\right) \quad (3.39)$$

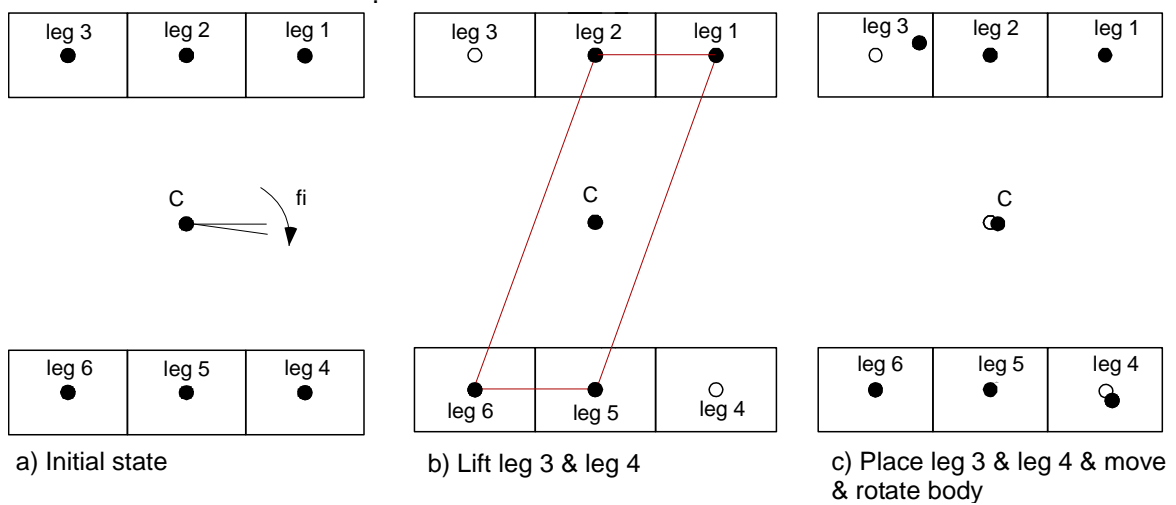
$$y_{C'} = y_C + \frac{d}{3} \cdot \sin\left(\frac{f_i}{3}\right) \quad (3.40)$$

Με τον ίδιο τρόπο βρίσκονται και οι συντεταγμένες των C'' και C'''.

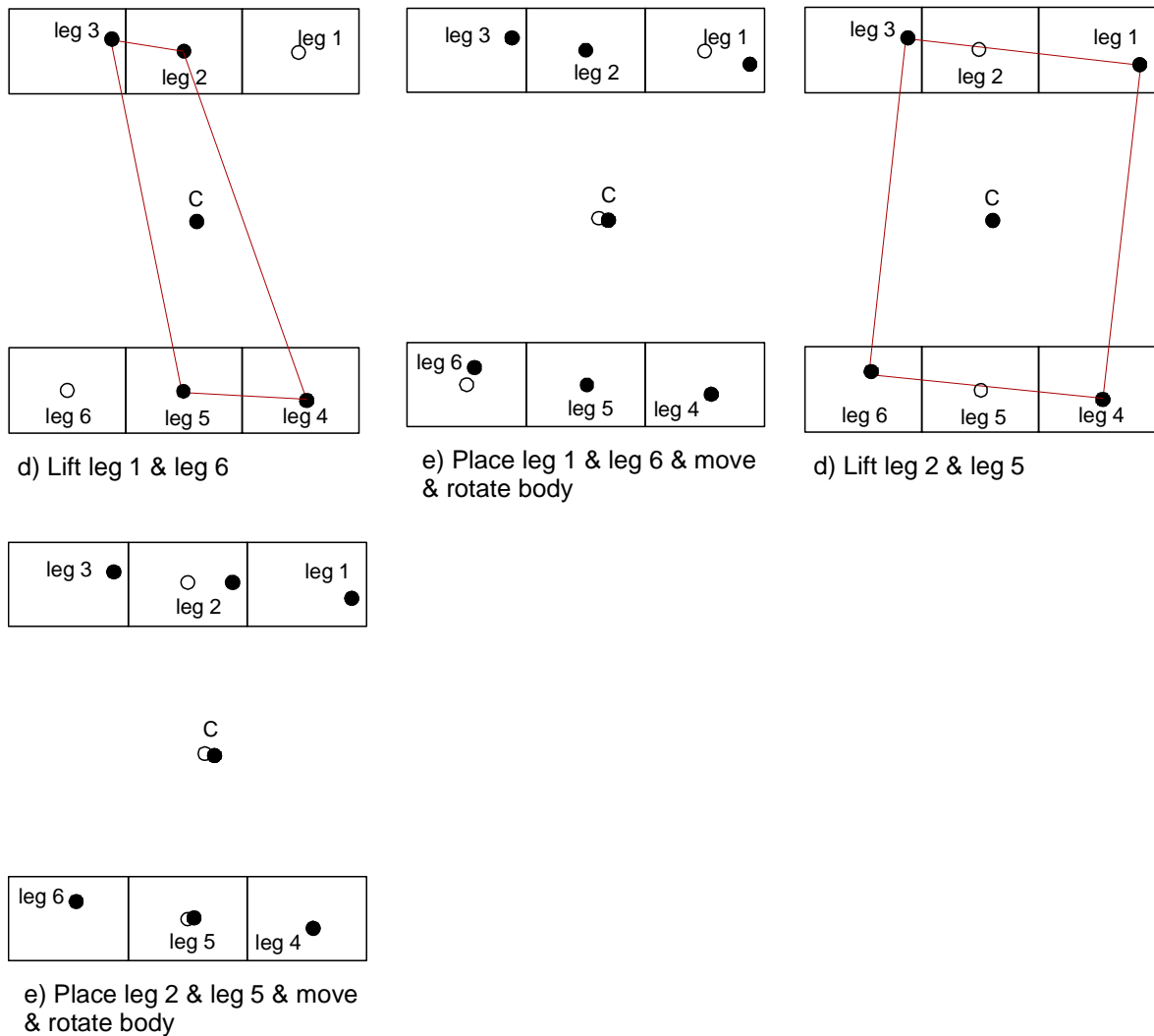


Σχήμα 3-40. Κίνηση CM σε curve mode με quadruped gait.

Στα Σχήμα 3-41 και Σχήμα 3-42 απεικονίζεται η συνολική κίνηση του ρομπότ.



Σχήμα 3-41. Quadruped gait – Κίνηση σε καμπύλη.

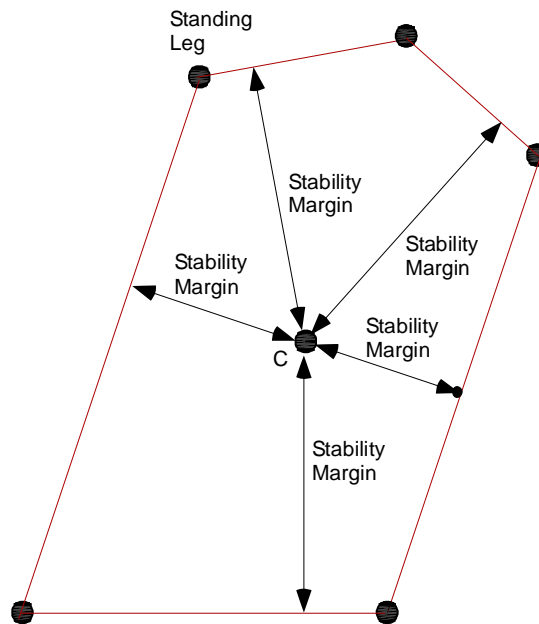


Σχήμα 3-42. Quadruped gait – Κίνηση σε καμπύλη.

3.6.4. Pentapod Gait

Ο πίνακας με όλους του πιθανούς συνδυασμούς ποδιών είναι $720(=6!) \times 6$ και κάθε διάνυσμα γραμμής του πίνακα δίνει έναν συνδυασμό ποδιών. Το διάνυσμα έχει τη μορφή $[\chi_1 \chi_2 \chi_3 \chi_4 \chi_5 \chi_6]$, όπου χ_1 αναφέρεται στο 1^ο πόδι, χ_2 στο 2^ο, χ_3 στο 3^ο, χ_4 στο 4^ο, χ_5 στο 5^ο και χ_6 στο 6^ο, έτσι π.χ. το διάνυσμα $[1 \ 3 \ 4 \ 2 \ 6 \ 5]$ υποδηλώνει ότι πρώτα σηκώνεται το 1^ο πόδι μετά το 4^ο, στη συνέχεια το 2^ο, το 3^ο, το 6^ο και τέλος το 5^ο. Για το συγκεκριμένο gait ο βέλτιστος συνδυασμός ποδιών είναι πιο περίπλοκος διότι για ένα δεδομένο αρχικό πόδι, υπάρχουν $(6-1)! = 120$ διαφορετικοί συνδυασμοί ποδιών, χωρίς αισθητή διαφορά στην απόδοση τους [7].

Στον πεντάποδο βηματισμό, το περιθώριο ευστάθειας υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως πριν με τη διαφορά ότι σε αυτήν την περίπτωση το πολύγωνο στήριξης είναι ή παραλληλόγραμμο ή πεντάγωνο.



Σχήμα 3-43. Περιθώριο ευστάθειας σε pentapod gait.

Ο κανόνας του πεντάποδου βηματισμού είναι ότι τα 6 πόδια κάνουν τις ίδιες κινήσεις με διαφορά φάσης $1/6$ κύκλου κίνησης. Ο βηματισμός αυτός είναι σαφέστατα ο πιο ευσταθής σε σχέση με τους υπόλοιπους δύο, διότι κάθε χρονική στιγμή τουλάχιστον πέντε πόδια στηρίζουν το ρομπότ.

3.6.4.1. Crab mode

Σε αυτήν την κίνηση ο GSA δίνει τους εξής συνδυασμούς:

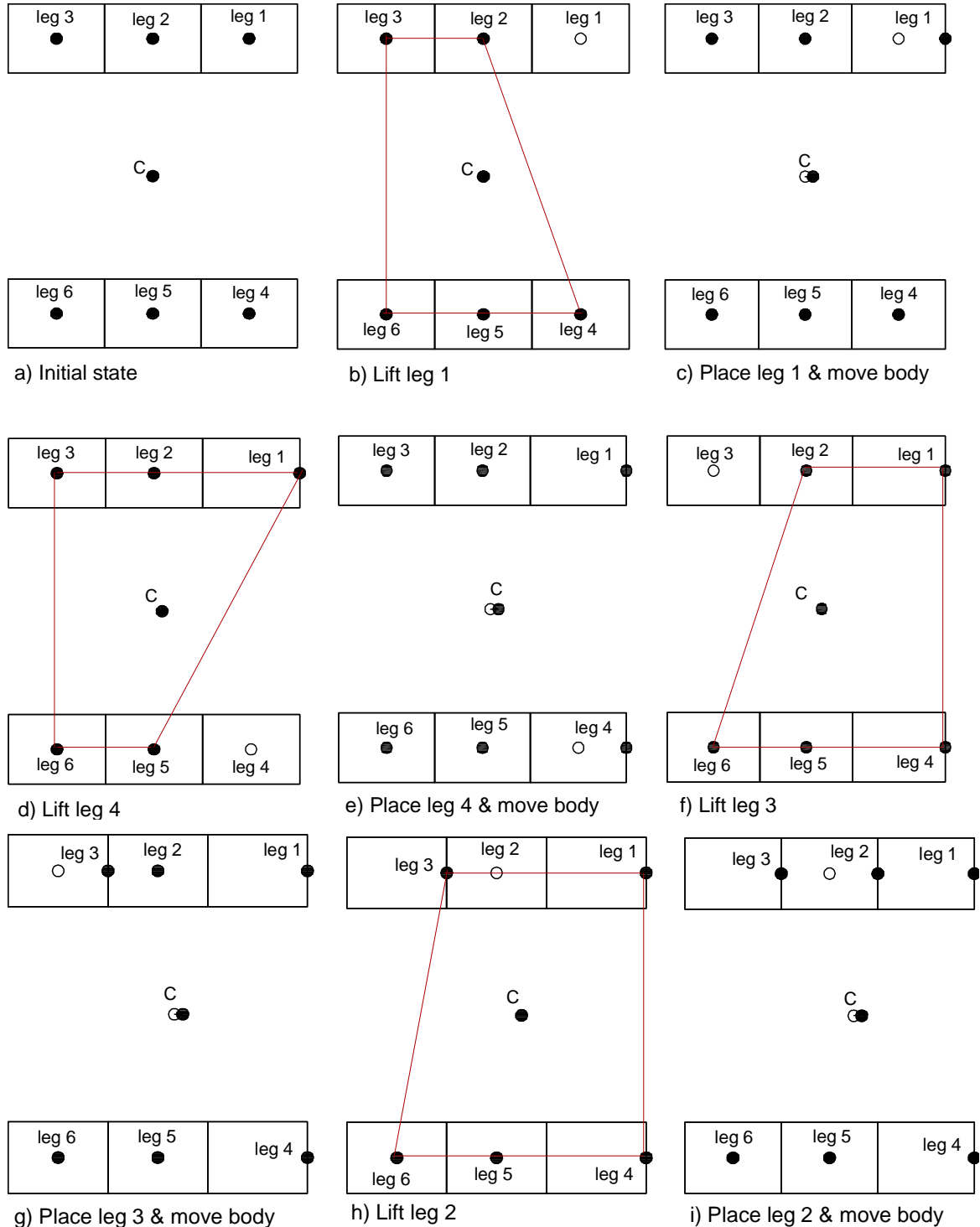
- Για εμπρόσθια κίνηση ($\theta = 0$) → (πόδι 1,4,3,2,6 και τέλος το πόδι 5)
- Για εγκάρσια κίνηση ($\theta = 90^\circ$) → (πόδι 2,1,6,3,4 και τέλος το πόδι 5)
- Για διαγώνια κίνηση με $\beta < \theta \leq 90^\circ$ → (πόδι 3,2,1,6,5 και τέλος το πόδι 4)
- Για διαγώνια κίνηση με $0 \leq \theta \leq \beta$ → (πόδι 3,2,1,6,5 και τέλος το πόδι 4)

Στην πραγματικότητα, για την διαγώνια κίνηση (και για τις δύο περιπτώσεις θ), ο προηγούμενος συνδυασμός δεν είναι μοναδικός, αλλά εμφανίζεται στις περισσότερες γωνίες θ .

ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ($f_i = 0$)

Στην κίνηση προς τα εμπρός πρώτα σηκώνεται το 1^ο πόδι. Μετά από χρόνο T_t (χρόνος ανύψωσης του ποδιού), το σώμα κινείται σε μία απόσταση $P/12 - x$ (όπου x είναι η απόσταση που το σώμα κινείται στο χρόνο T_w , χρόνος στον οποίο, όλα τα πόδια βρίσκονται σε κατάσταση στήριξης). Στη συνέχεια, μετά από χρόνο T_w , το σώμα κινείται κατά απόσταση x από την προηγούμενη θέση του. Στη συνέχεια σηκώνονται διαδοχικά τα πόδια 2,3,4,5, και 6 με τη σειρά που περιγράφηκε παραπάνω. Συνολικά όλα τα πόδια,

αλλά και το σώμα του ρομπότ κινούνται κατά $P/2$ και φτάνουν στην ίδια αρχική κατάσταση κατά τη διάρκεια ενός κύκλου κίνησης. Η διαφορά μεταξύ της απόστασης $P/12 - x$ και $P/12$ δεν απεικονίζεται στο Σχήμα 3-44 και Σχήμα 3-45 επειδή οι δύο αποστάσεις είναι σχεδόν ίδιες.

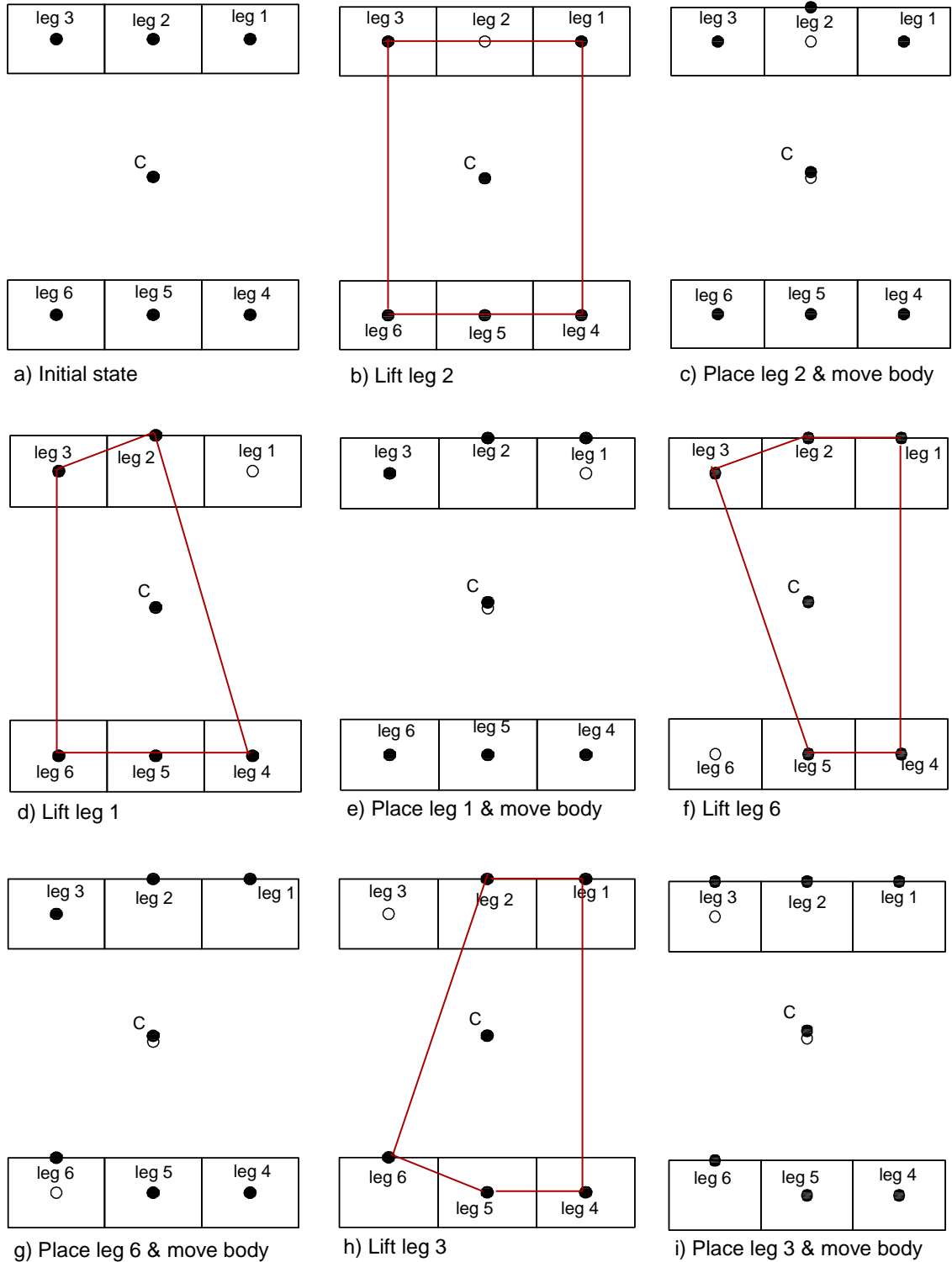


Σχήμα 3-44. Pentapod gait – εμπρόσθια κίνηση.

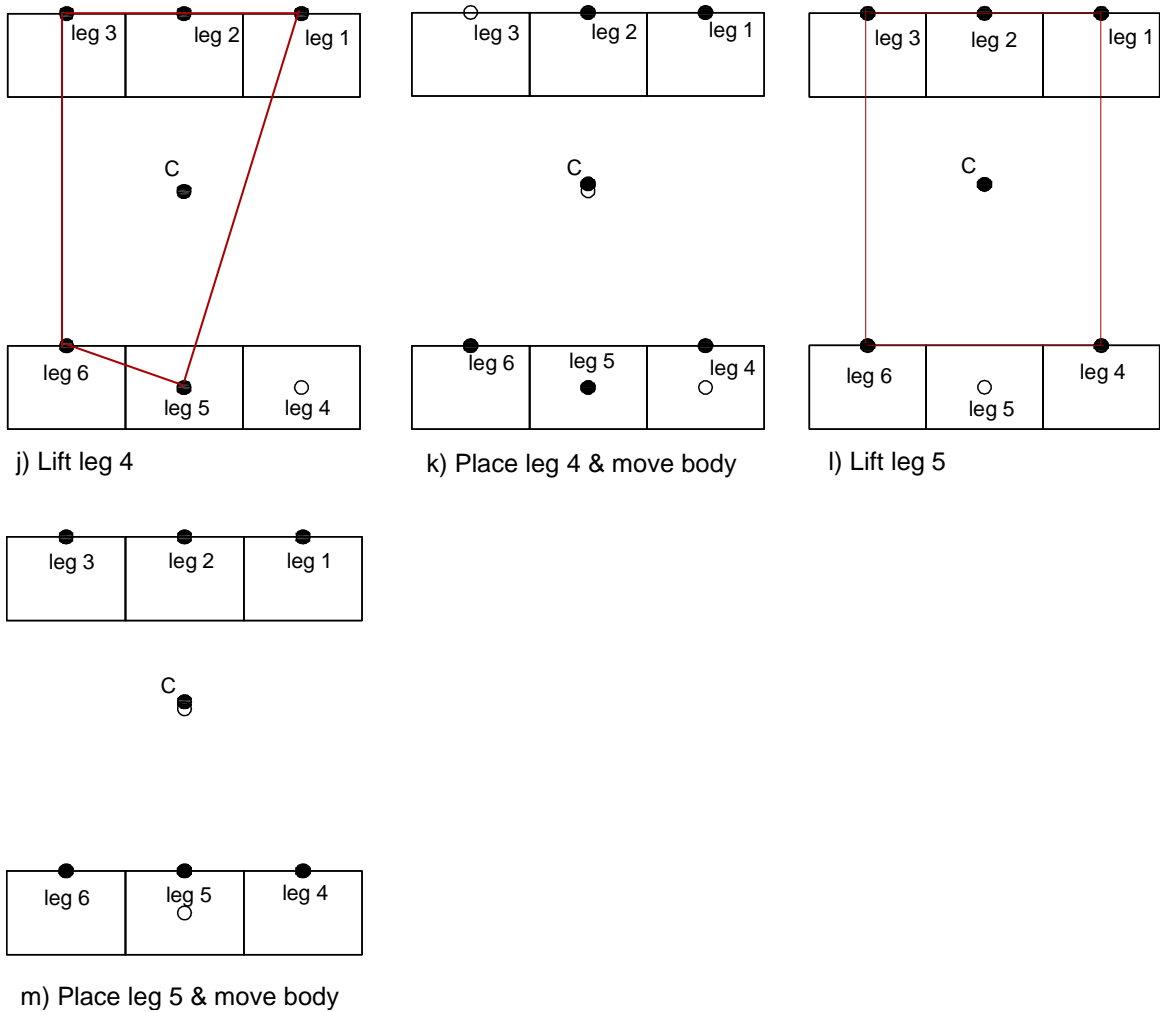
ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ($\phi_i = 90^\circ$)

Δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ της εγκάρσιας κίνησης και της εμπρόσθιας κίνησης. Τα πόδια σηκώνονται, στη συνέχεια τοποθετούνται σε απόσταση $Q/2$ και το σώμα κινείται κατά απόσταση $Q/2$ όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-47 και

Σχήμα 3-48.



Σχήμα 3-47. Pentapod gait – Εγκάρσια κίνηση.

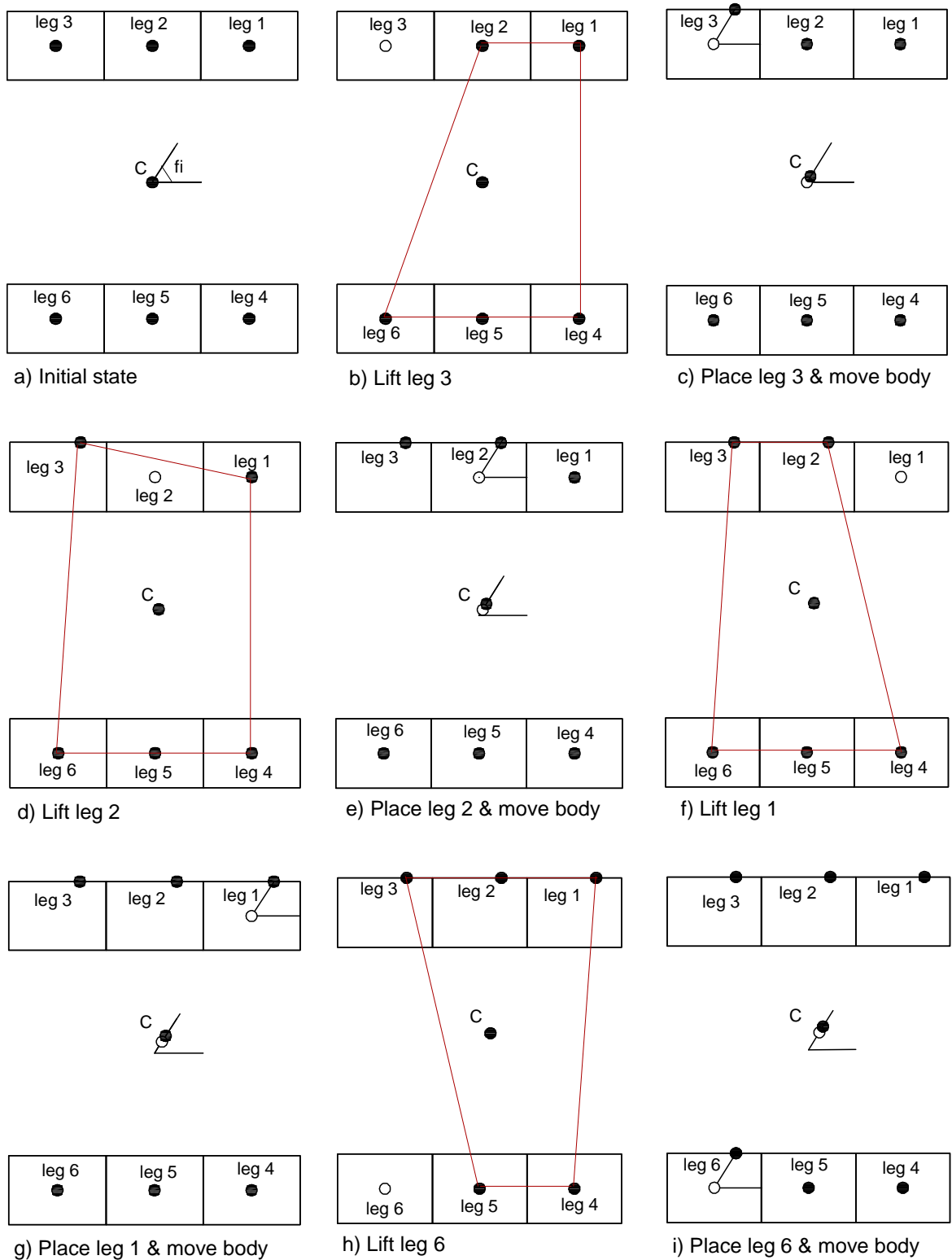


Σχήμα 3-48. Pentapod gait – Εγκάρσια κίνηση.

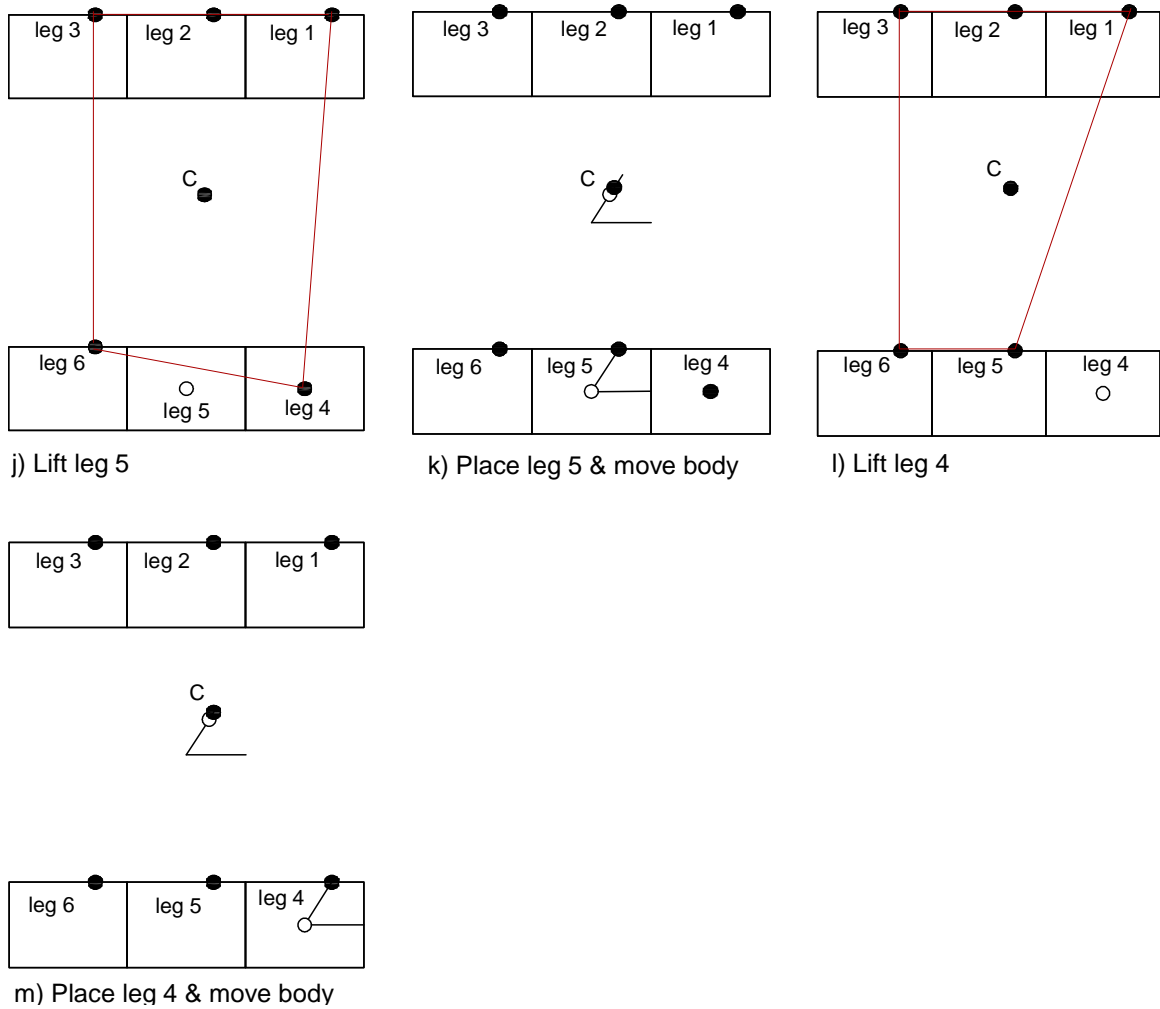
ΔΙΑΓΩΝΙΑ ΚΙΝΗΣΗ

✓ Περίπτωση $b < \phi_i \leq 90^\circ$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εάν η γωνία ϕ_i είναι $b < \phi_i \leq 90^\circ$, τα πόδια τοποθετούνται σε απόσταση $0.5Q / \sin(\phi_i)$ και το σώμα κινείται στην ίδια απόσταση όπως τα πόδια.



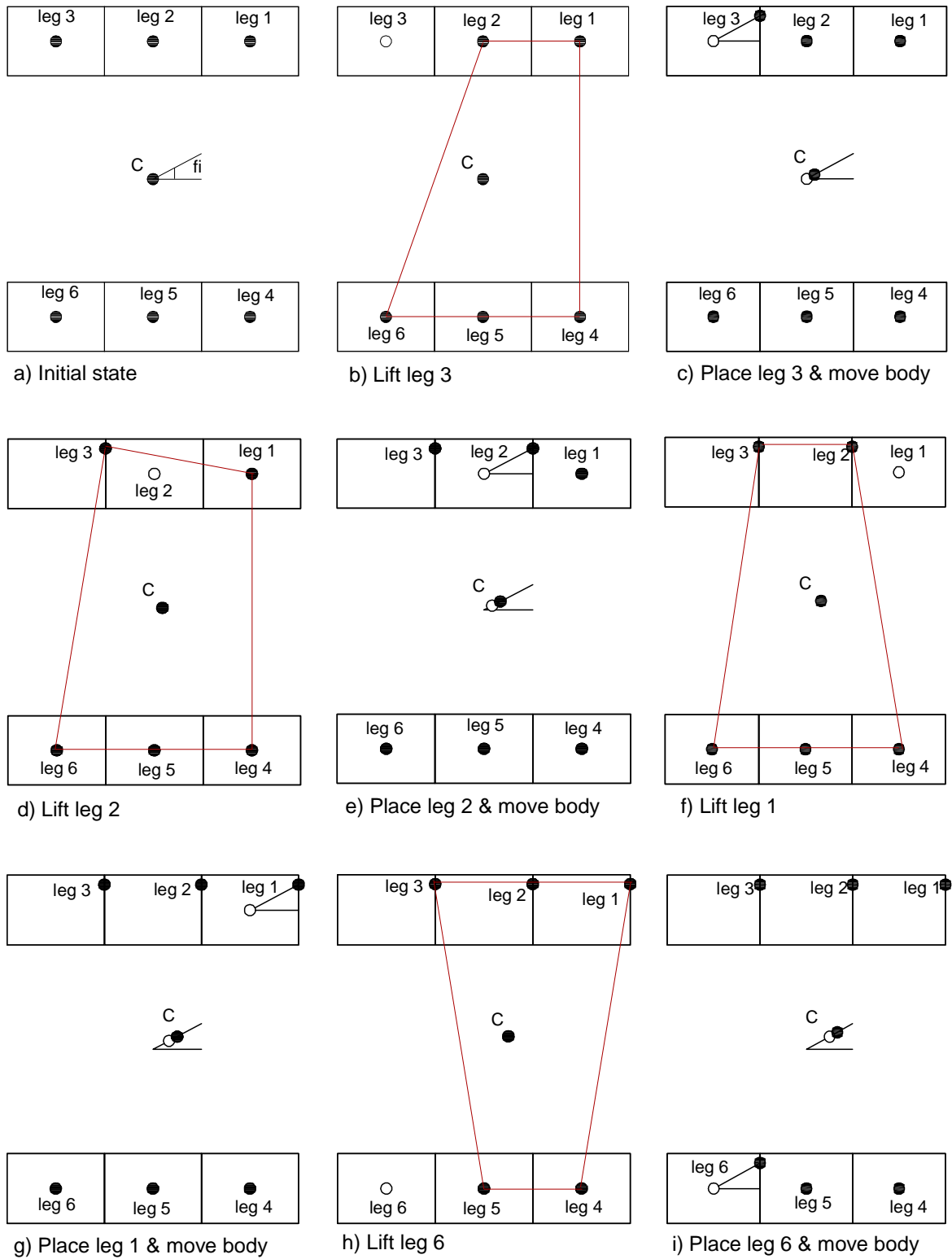
Σχήμα 3-49. Pentapod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $b < f_i \leq 90^\circ$.



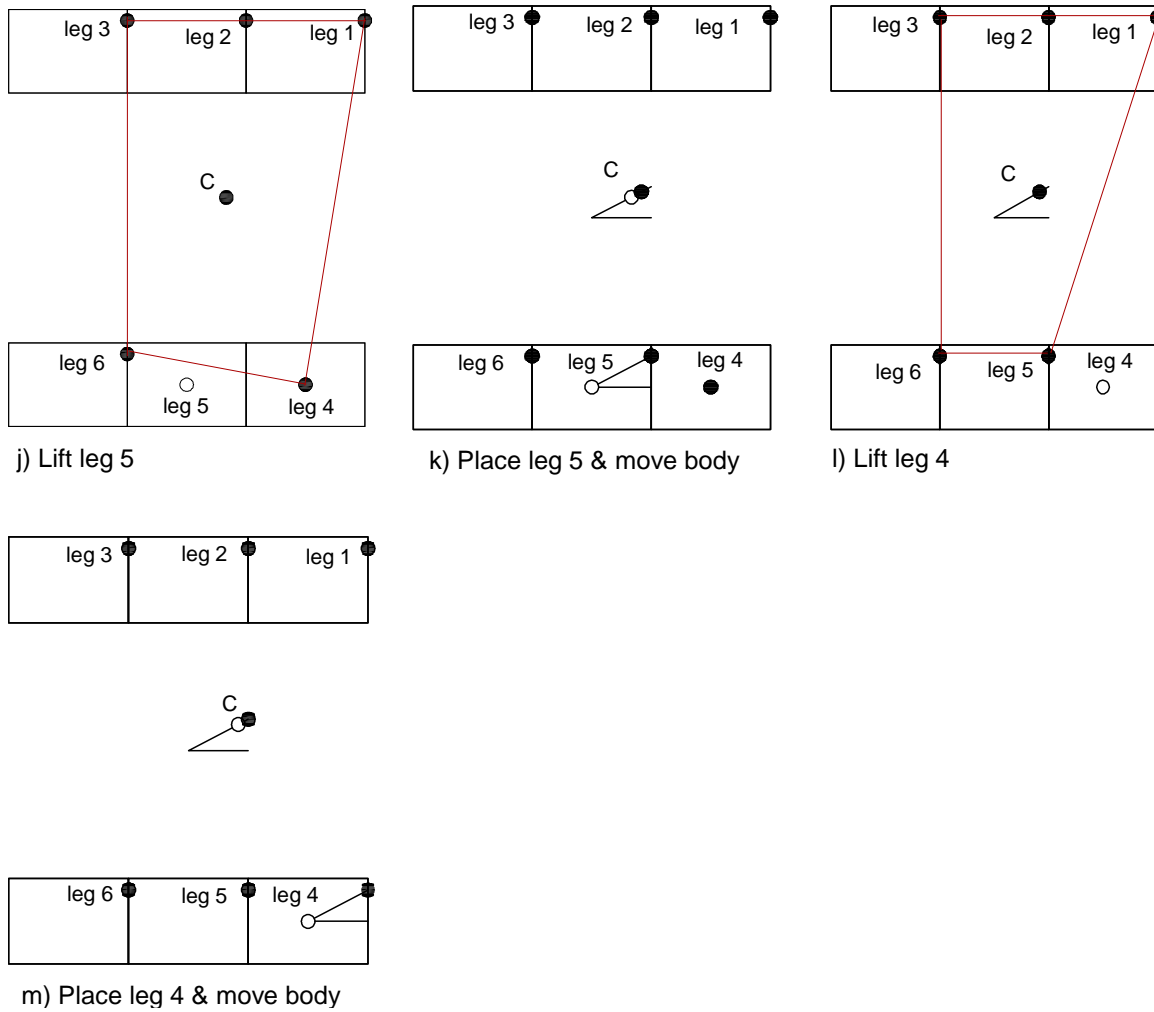
Σχήμα 3-50. Pentapod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $b < f_i \leq 90^\circ$.

✓ Περίπτωση $0 < f_i \leq b$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εάν η γωνία f_i είναι $0 < f_i \leq b$, τα πόδια τοποθετούνται σε απόσταση $0.5P / \cos(f_i)$ και το σώμα κινείται στην ίδια απόσταση όπως τα πόδια.



Σχήμα 3-51. Pentapod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $0 < f_i \leq b$.



Σχήμα 3-52. Pentapod gait – Διαγώνια κίνηση – Περίπτωση $0 < f_i \leq b$.

Διάγραμμα Χρόνου

T: *περίοδος*, ο χρόνος κίνησης του ρομπότ κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου κίνησης.

$$T = 6T_t + 6T_w \quad (3.41)$$

όπου T_t : χρόνος ανύψωσης ποδιού

$$T_t = \frac{D}{u_t} \quad (3.42)$$

όπου T_w : χρόνος κατά τον οποίο όλα τα πόδια βρίσκονται σε κατάσταση στήριξης.

- Εάν $0 \leq f_i \leq b$ $\rightarrow D = \frac{\frac{1}{2}P}{\cos(fi)}$

- Εάν $b < \phi_i \leq 90^\circ$ $\rightarrow D = \frac{\frac{1}{2}Q}{\sin(\phi_i)}$

Για την εμπρόσθια κίνηση, $\phi_i=0$ $\rightarrow D = \frac{1}{2}P$

Επίσης:

$$\frac{T_w}{T_t} = k, \quad k < 1 \quad (3.43)$$

$$x = \left(\frac{k}{1+k} \right) \frac{P}{12} \quad (3.44)$$

όπου:

D: το μήκος της τροχιάς του ποδιού που αντιστοιχεί σε γωνία ϕ_i

x: η απόσταση όπου το σώμα διανύει σε χρόνο T_w

u_t : η μέση ταχύτητα ανύψωσης του ποδιού

P: το μήκος της προσβάσιμης περιοχής του ποδιού κατά τον άξονα X

Q: το μήκος της προσβάσιμης περιοχής του ποδιού κατά τον άξονα Y

β : λόγος λειτουργίας, ο λόγος λειτουργίας (duty factor), $\beta \in [0, 1]$, για ένα πόδι αποτελεί την συχνότητα μεταξύ της κατάστασης στήριξης του ποδιού και του συνολικού χρόνου κίνησης T του ρομπότ.

$$\beta = \frac{5T_t + 6T_w}{T} \quad (3.45)$$

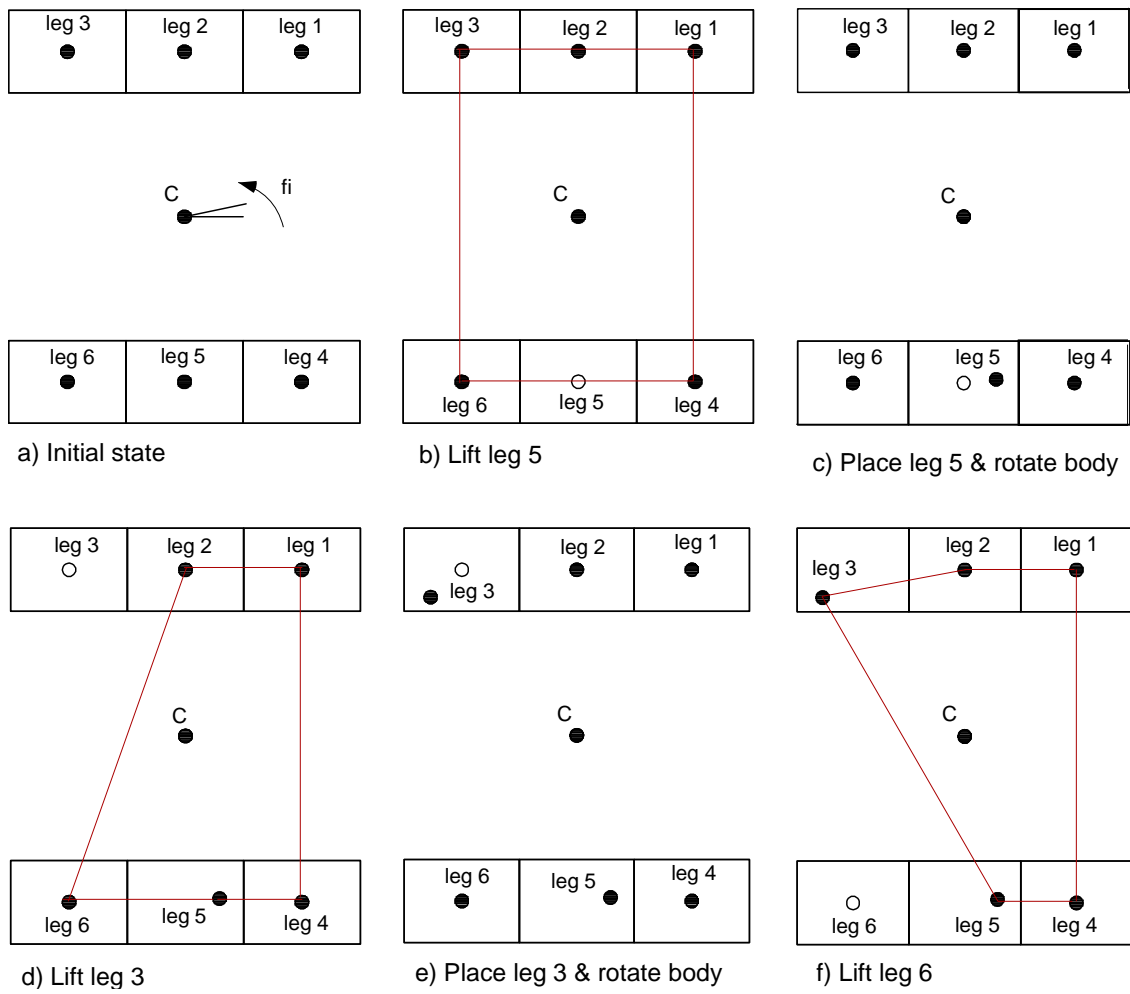
3.6.4.2. Curve mode

Σε αυτήν την κίνηση ο GSA δίνει τους εξής συνδυασμούς:

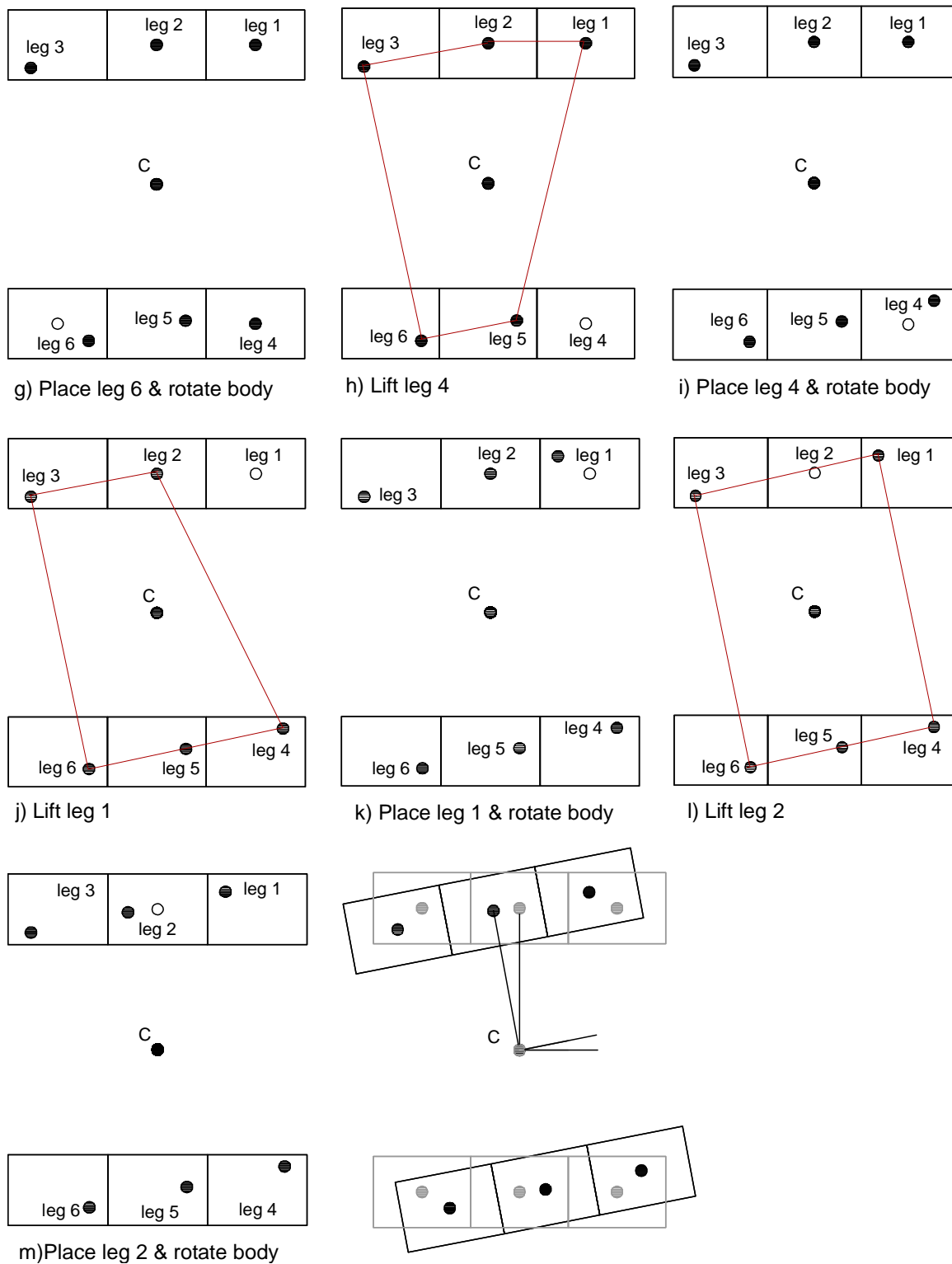
- Για απλή περιστροφή ($\phi_i > 0$) \rightarrow (πόδι 5,3,6,4,1 και τέλος το πόδι 2)
- Για $\phi_i < 0$ και $d > 0$ \rightarrow (πόδι 1,3,2,6,5 και τέλος το πόδι 4)

ΑΠΛΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ

Όπως φαίνεται στο σχήμα, τα πόδια κινούνται πάνω σε μήκος τόξου $s=R \cdot \phi_i$, όπου R είναι η απόσταση μεταξύ του ποδιού και του CG του ρομπότ. Προφανώς κατά την περιστροφή του ρομπότ, το CG μένει σταθερό.



Σχήμα 3-53. Pentapod gait – Περιστροφή.



Σχήμα 3-54. Pentapod gait – Περιστροφή.

ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΚΑΜΠΥΛΗ

Ακολουθεί η εύρεση του κέντρου βάρους του ρομπότ σε αυτό το gait. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-55 είναι γνωστή οι αρχική θέση του κέντρου βάρους C.

$C(x_c, y_c)$

καθώς και η θέση $K(x_c + d/6, y_c)$, όπου d η συνολική απόσταση που θα εκτελέσει το ρομπότ σε έναν πλήρη κύκλο.

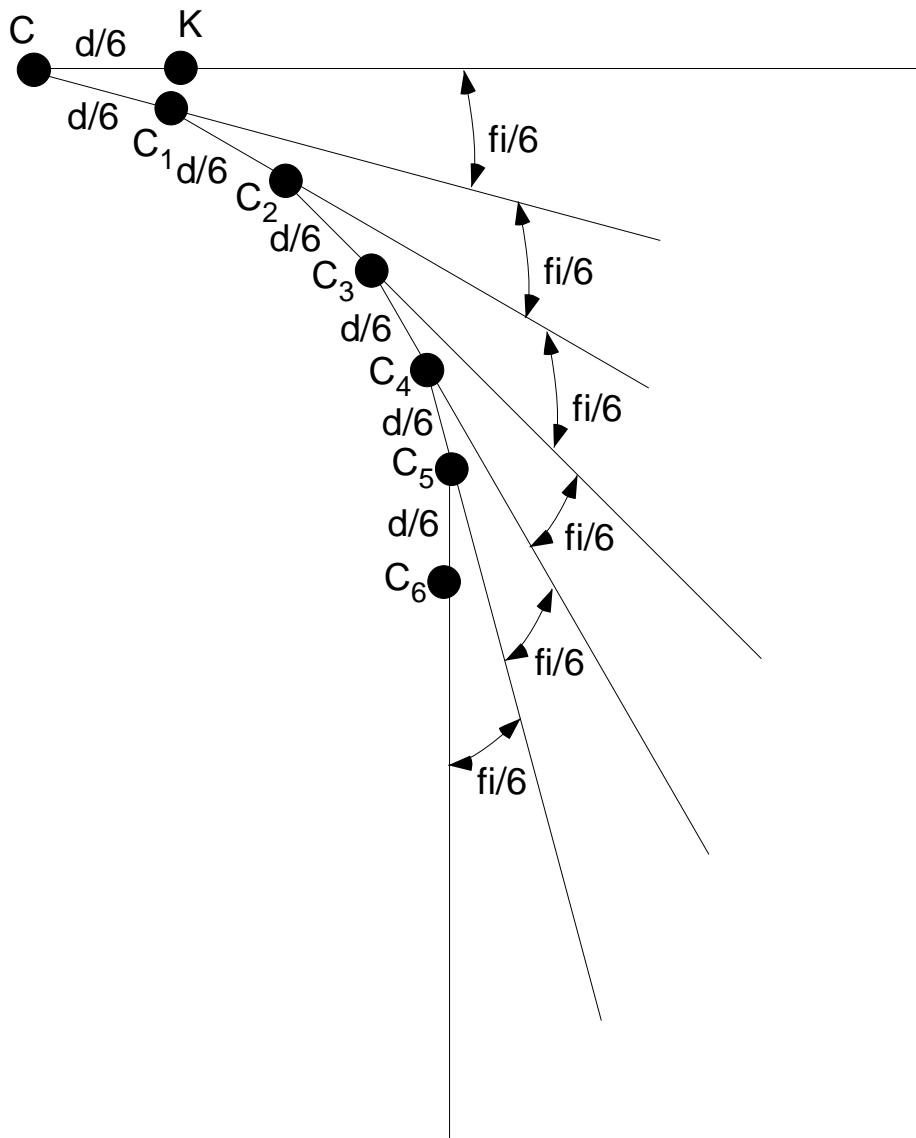
Μετά από ένα lift-place ποδιών το κέντρο βάρους θα βρεθεί στη θέση

$C_1(x_{c_1}, y_{c_1})$ όπου οι νέες συντεταγμένες του C_1 , όπως φαίνεται στο σχήμα είναι:

$$x_{c_1} = x_c + \frac{d}{6} \cdot \cos\left(\frac{f_i}{6}\right) \quad (3.46)$$

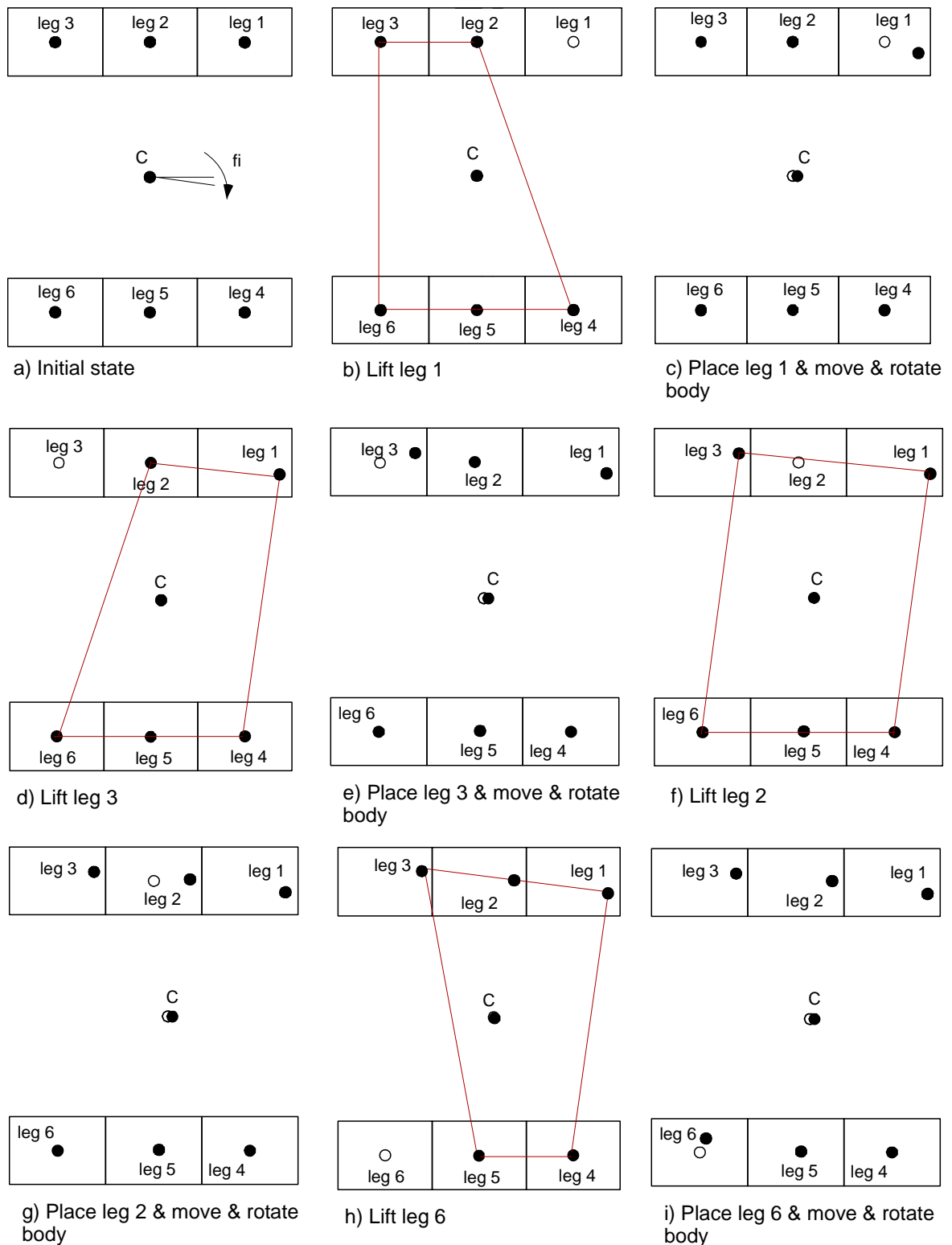
$$y_{c_1} = y_c + \frac{d}{6} \cdot \sin\left(\frac{f_i}{6}\right) \quad (3.47)$$

Με τον ίδιο τρόπο βρίσκονται και οι συντεταγμένες των C_2, C_3, C_4, C_5, C_6 .

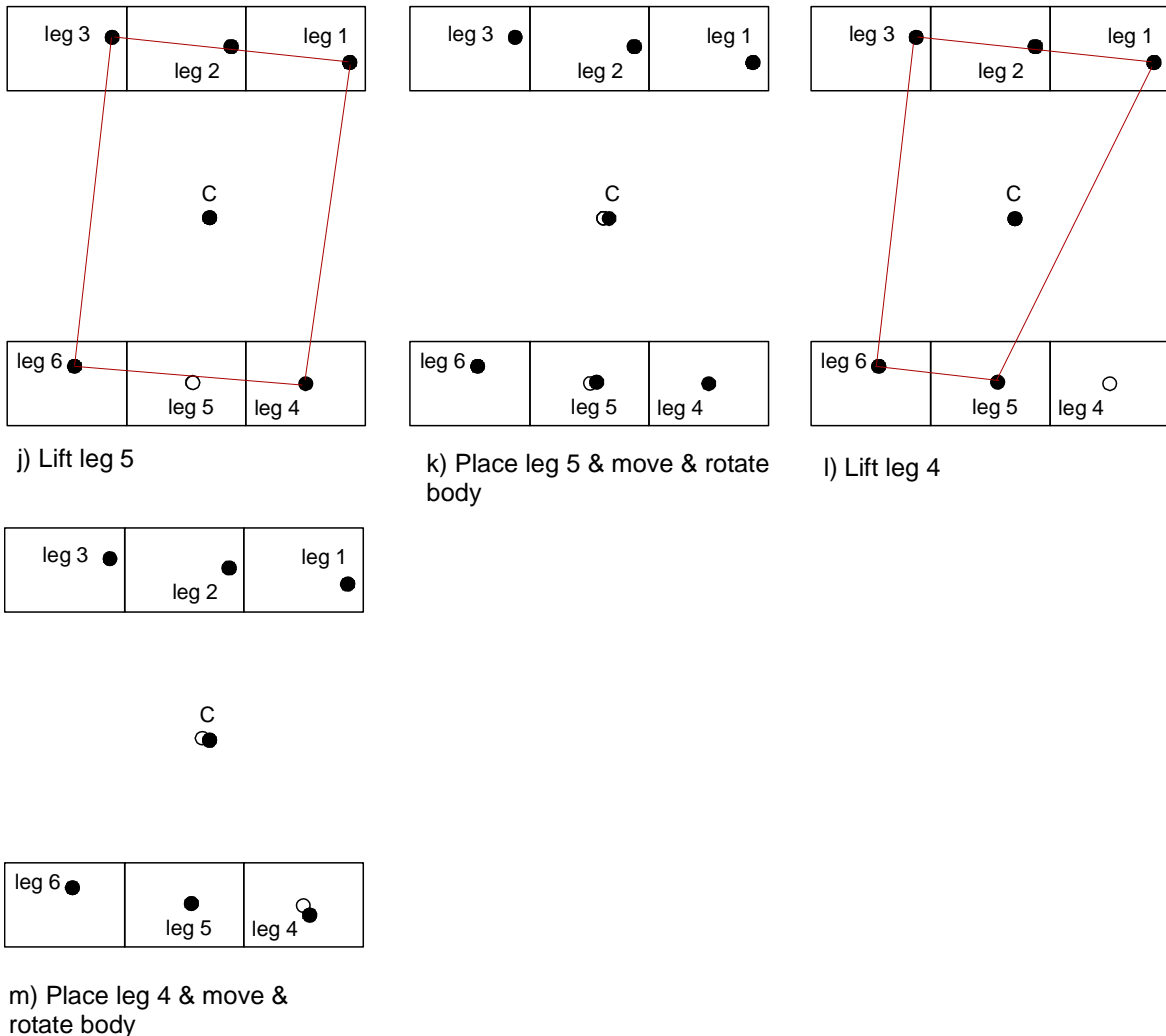


Σχήμα 3-55. Κίνηση CM σε curve mode με pentapod gait.

Στο Σχήμα 3-56 και Σχήμα 3-57 φαίνεται η συνολική κίνηση του ρομπότ.



Σχήμα 3-56. Pentapod gait – Κίνηση σε καμπύλη.



Σχήμα 3-57. Pentapod gait – Κίνηση σε καμπύλη.

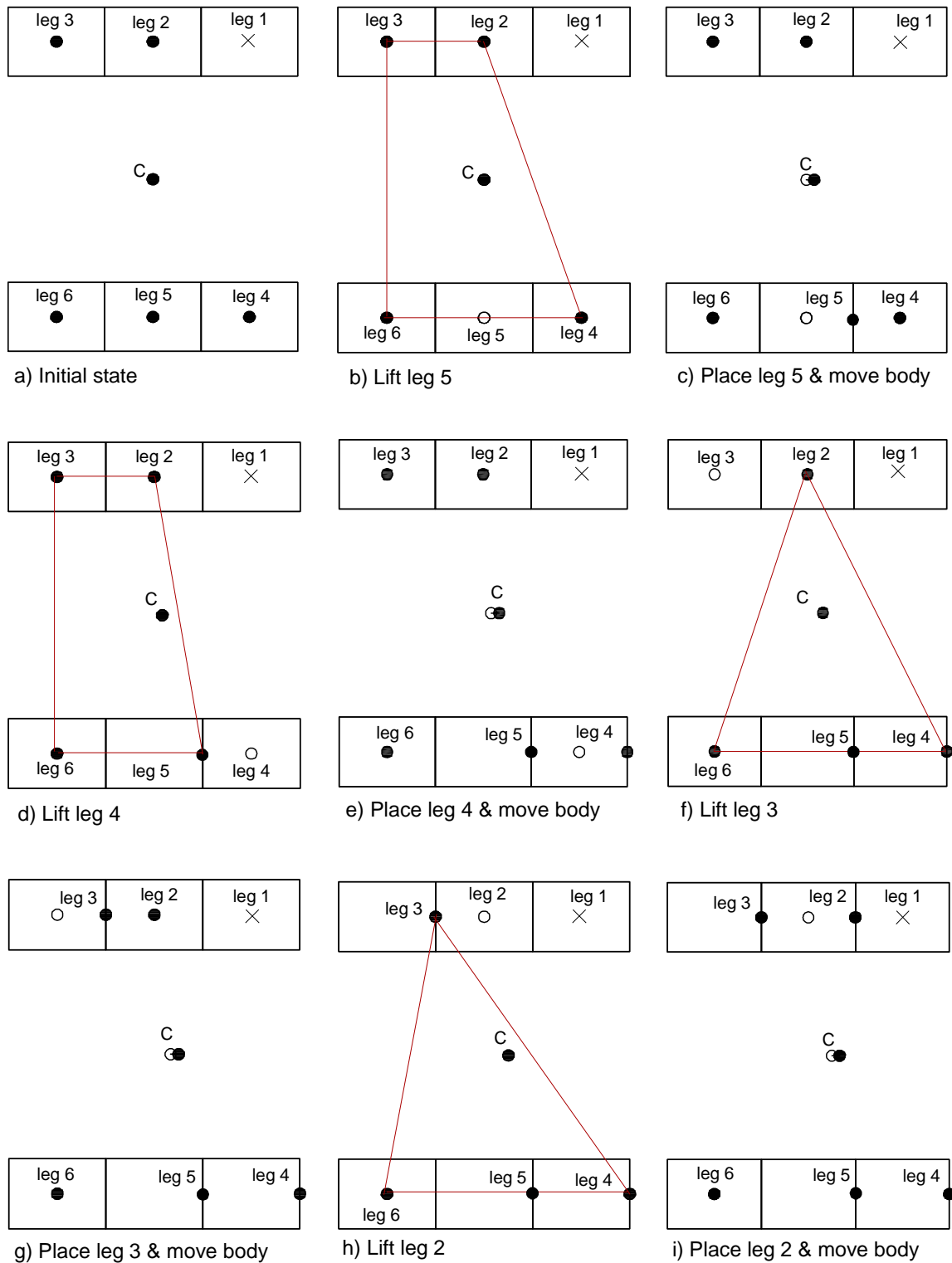
3.7. Αστοχία ποδιού

Σε περίπτωση αστοχίας ενός ποδιού, προφανώς σε οποιοδήποτε gait και αν βρίσκεται το ρομπότ, θα πρέπει να γυρίσει στο pentapod gait που εγγυάται την μέγιστη στατική ευστάθεια. Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί αλγόριθμος που επιβάλλει την αλληλουχία ποδιών που πρέπει να σηκωθούν για να μην υπάρξει κίνδυνος ανατροπής του ρομπότ. Λόγω συμμετρίας του ρομπότ, αναπτύχθηκαν 2 αλγόριθμοι για την αστοχία των ποδιών 1 (το οποίο είναι συμμετρικό με τα πόδια 3,4 και 6) και 2 (το οποίο είναι συμμετρικό με το 5^ο πόδι). Παρακάτω φαίνεται η ανάλυση για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις αστοχίας, με συνθήκες επίπεδου εδάφους, με επιλεγμένο mode crab και εμπρόσθια κίνηση.

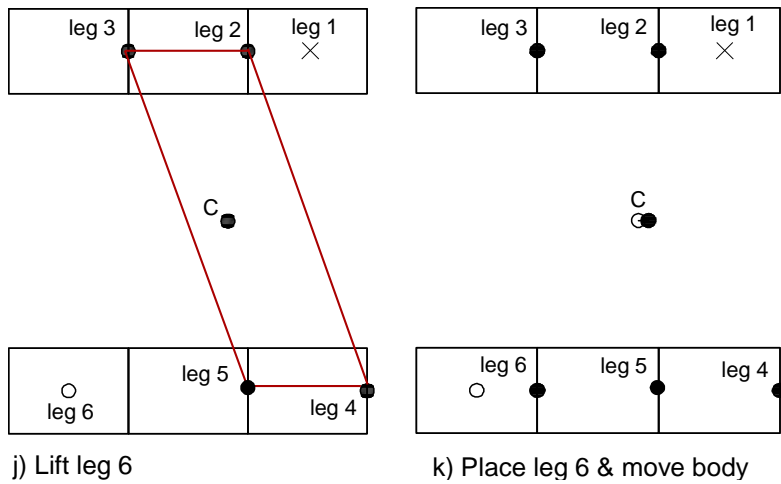
3.7.1. Αστοχία 1^{ου} ποδιού

Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος επιλέγει την εξής αλληλουχία ποδιών: πρώτα το 5^ο πόδι και στη συνέχεια διαδοχικά τα πόδια 4, 3, 2 και 6. Φυσικά αυτός ο συνδυασμός ποδιών εξασφαλίζει το μέγιστο περιθώριο ευστάθειας για τις συνθήκες κίνησης που

περιγράφηκαν παραπάνω. Η ανάλυση της κίνησης δεν διαφέρει από την ανάλυση του pentarod gait με εμπρόσθια κίνηση, γι αυτό και η μόνη ιδιαιτερότητα της απεικονίζεται στο Σχήμα 3-58 και Σχήμα 3-59.



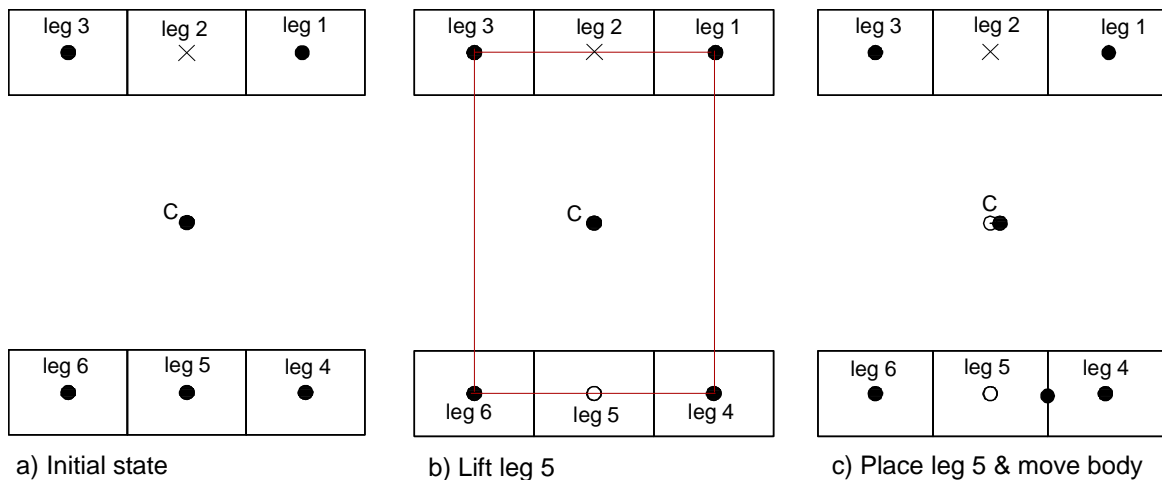
Σχήμα 3-58. Αστοχία 1^{ου} ποδιού.



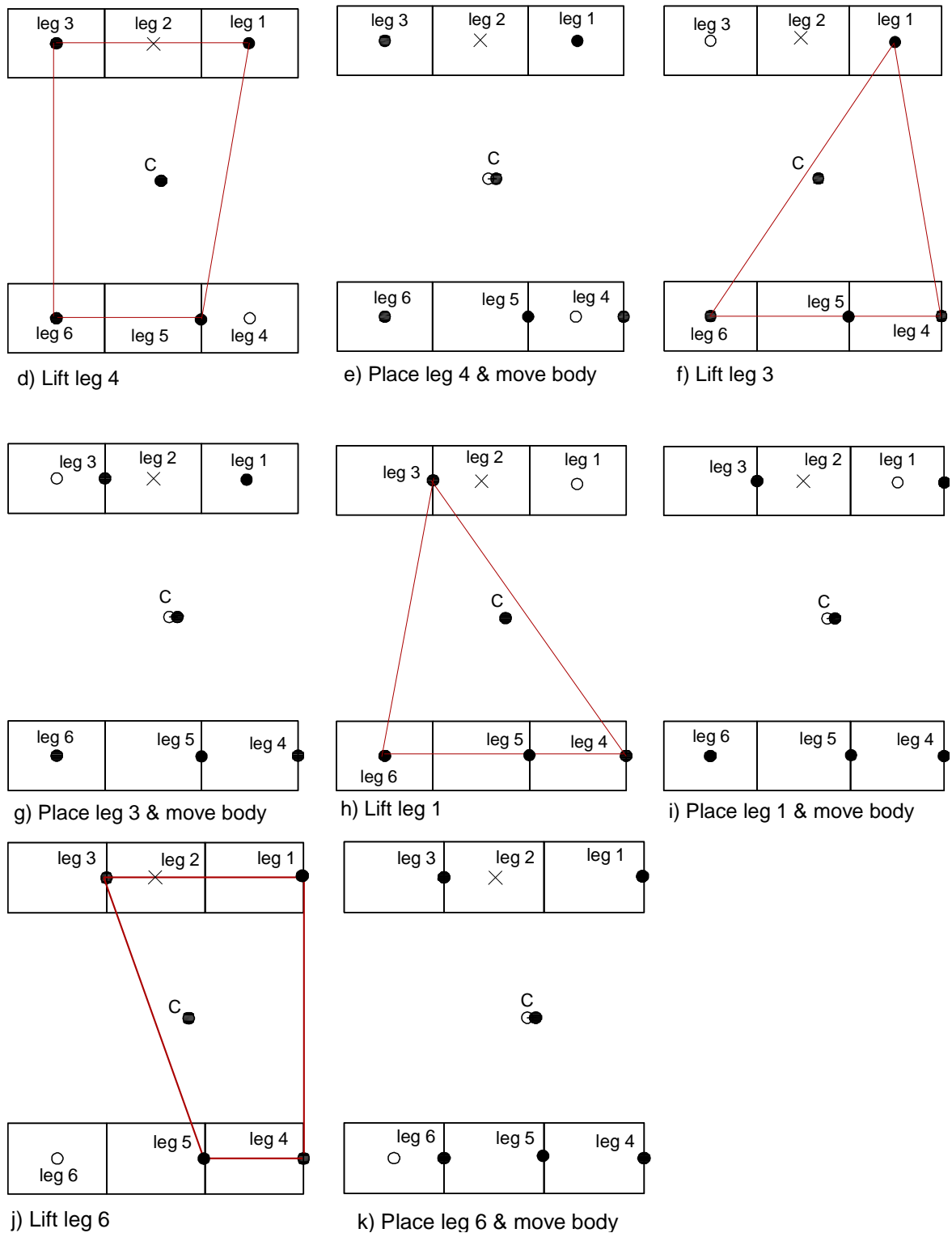
Σχήμα 3-59. Αστοχία 1^{ου} ποδιού.

3.7.2. Αστοχία 2^{ου} ποδιού

Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος επιλέγει την εξής αλληλουχία ποδιών: πρώτα το 5ο πόδι και στη συνέχεια διαδοχικά τα πόδια 4, 3, 1 και 6. Αυτός ο συνδυασμός ποδιών εξασφαλίζει το μέγιστο περιθώριο ευστάθειας για τις συνθήκες κίνησης που περιγράφηκαν παραπάνω και η διαδικασία είναι παρόμοια με εκείνη της προηγούμενης περίπτωσης.



Σχήμα 3-60. Αστοχία 2^{ου} ποδιού.



Σχήμα 3-61. Αστοχία 2^{ου} ποδιού.

3.8. Μετάβαση βηματισμού (Gait Transition)

Gait transition είναι η μετάβαση από το ένα gait στο άλλο κατά τη διάρκεια της κίνησης. Προφανώς ο πιο ευσταθής και ομαλός τρόπος να μεταβεί το ρομπότ από το ένα gait στο άλλο είναι αφού ολοκληρώσει την κίνηση, όπου τα πόδια επανέρχονται στις ίδιες αρχικές

θέσεις. Παρόλα αυτά η έρευνα για το gait transition έγινε επιτακτική στα πλαίσια ενός ολοκληρωμένου σχεδιασμού του ρομπότ, που λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμέτρους που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια κίνησης του ρομπότ στον βυθό της θάλασσας. Το κύριο πρόβλημα που μπορεί να συναντήσει το ρομπότ στον βυθό είναι εμπόδια (βράχια) είτε αλλαγή της κλίσης του εδάφους (βουναλάκι ή λακκούβα). Τότε για να μην κινδυνέψει να ανατραπεί το ρομπότ θα πρέπει πριν ολοκληρώσει το gait να μεταβεί σε ένα πιο ευσταθές. Αντίστοιχα ένα άλλο πρόβλημα αποτελεί η αλλαγή του gait για μεγαλύτερη ταχύτητα του ρομπότ. Σε αυτή την περίπτωση δεν κινδυνεύει το ρομπότ να ανατραπεί, όμως μπορεί να κινηθεί πιο γρήγορα αλλάζοντας gait, παρά να πρέπει να ολοκληρωθεί το ήδη υπάρχον.

Με σκοπό την επίτευξη ομαλής μετάβασης από το ένα gait στο άλλο, το gait transition θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μεταξύ δύο διαδοχικών gaits:

- ✓ Tripod → Quadruped
- ✓ Quadruped → Pentapod
- ✓ Quadruped → Tripod
- ✓ Pentapod → Quadruped

Ο GSA έχει αναπτυχθεί προκειμένου να ορίζει ποιά είναι η καλύτερη διαδοχή των ποδιών που παρέχει το μέγιστο περιθώριο ευστάθειας, δεδομένων των συνθηκών κίνησης. Αυτό εξ' ορισμού συνεπάγεται ότι κάθε φορά που αλλάζουν οι συνθήκες κίνησης (mode, κλίση εδάφους), το κάθε gait παράγει διαφορετικούς συνδυασμούς. Γι' αυτό τον λόγο δεν ερευνηθήκε για κάθε είδος κίνησης (ευθεία μπροστά, ευθεία πίσω, εγκάρσια πάνω, εγκάρσια κάτω, διαγώνια, περιστροφή κ.τ.λ.), για κάθε γωνία κλίσης εδάφους, αλλά και για κάθε στιγμή που ο χειριστής αποφασίσει ότι πρέπει να αλλάξει το gait, πώς θα γίνει το gait transition. Παρόλα αυτά, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος ο οποίος ερευνά τους συνδυασμούς ποδιών που εμφανίζονται σε κάθε gait, για τις περισσότερες των περιπτώσεων.

Ο υπολογισμός έγινε για την μετάβαση από το quadruped gait στο pentapod, για crab mode. Το εύρος των γωνιών κλίσης (σε rad) που διερευνήθηκε ήταν το εξής:

$$\text{delta} = [0 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.642 \ -0.2 \ -0.4 \ -0.5 \ -0.642]$$

Οι γωνίες ϕ_i (σε rad) ήταν:

$$\phi_i = [0 \ 0.12 \ 0.3 \ 0.5 \ 0.7 \ 0.9 \ -0.12 \ -0.3 \ -0.5 \ -0.6];$$

Ενώ τέλος οι αποστάσεις d (σε m) ήταν:

$$d = [0 \ 0.5 \ 1 \ 1.5 \ 2 \ 2.5 \ 3 \ 3.5 \ 4 \ 5];$$

Το αποτέλεσμα αυτού του αλγορίθμου έδειξε ότι για το 65,5% των περιπτώσεων ο βέλτιστος συνδυασμός ποδιών για το pentapod gait ήταν μεταξύ άλλων ο εξής:

$$[2^\circ \text{ πόδι}, 1^\circ \text{ πόδι}, 6^\circ \text{ πόδι}, 5^\circ \text{ πόδι}, 4^\circ \text{ πόδι και τέλος το } 3^\circ \text{ πόδι}]$$

Ενώ αντίστοιχα για το quadruped gait, για το 60% των περιπτώσεων ο βέλτιστος συνδυασμός ποδιών ήταν:

[2° με 5° πόδι, 1° με 6° πόδι και τέλος 3° με 4° πόδι]

Όπως παρατηρείται δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στην αλληλουχία ποδιών, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για το 60% των συγκεκριμένων συνθηκών εργασίας, η αλληλουχία αυτή είναι αποδεκτή.

Το πρόβλημα του gait transition είναι ακόμα υπό έρευνα, διότι ακόμα και για έναν δεδομένο συνδυασμό ποδιών, δεν είναι εύκολο να βρεθεί εκ των προτέρων εάν η απότομη έναρξη του διαδοχικού gait θα παρέχει ευστάθεια και δεν θα κινδυνεύσει να ανατραπεί το ρομπότ, ακόμα και αν γίνεται για αυτόν ακριβώς τον λόγο. Πριν την ανάπτυξη αυτού του αλγορίθμου, μελετήθηκε ένα εξάποδο μοντέλο που παρείχε γι αυτόν τον λόγο το εργαστήριο.

Το μοντέλο είναι το PhantomX AX Hexarod Mark II Kit και διαθέτει 3 βαθμούς ελευθερίας στα πόδια όπως το 'Hexa-Terra'. Διαθέτει 18 σερβοκινητήρες για τις αρθρώσεις των ποδιών και έχει μάζα 2,095 kg, ενώ το μήκος του είναι 27 cm και τα πλάτη του 11,7 cm το μεγάλο και 8,7 cm το μικρό όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-62.



Σχήμα 3-62. Μικρό εξάποδο ρομπότ εργαστηρίου.

Το μοντέλο αυτό διαθέτει 6 gaits με προγραμματισμένους συνδυασμούς ποδιών σε κάθε gait και ένα χειριστήριο, με το οποίο λαμβάνει τις εντολές του χρήστη. Σε αυτό το μοντέλο, παρατηρήθηκε ότι όταν ο χειριστής μεταβάλλει το tripod gait σε quadruped, τότε το ρομπότ 'τραντάζεται', ενώ παρατηρήθηκε ακόμα ότι όταν περιστρέφεται με δεδομένο

συνδυασμό ποδιών, τα πόδια ακουμπούν το ένα το άλλο, με αποτέλεσμα να λυγίζει και να ακουμπάει το σώμα του ρομπότ στο έδαφος.

Φαίνεται λοιπόν, επιτακτική η περαιτέρω έρευνα πάνω στο πρόβλημα αυτό, διότι για μεγάλα και πολυδάπανα ρομπότ, δεν θα πρέπει να υπάρχει αβεβαιότητα πάνω στο θέμα αυτό.

4. Δυναμική Ευστάθεια

Στην ανάλυση της στατικής ευστάθειας, χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο διδιάστατο μοντέλο και όλοι οι υπολογισμοί διεξήχθησαν χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ούτε το ύψος του ρομπότ, παρά μόνο όταν υπάρχει κλίση εδάφους, αλλά ούτε οι δυνάμεις του. Για τον αρχικό σχεδιασμό ενός ρομπότ είναι μια καλή ένδειξη ευστάθειας αλλά, δεν δίνει την απαραίτητη βεβαιότητα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται ένα υποβρύχιο εξάποδο ρομπότ, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την μελέτη των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό, για να διασφαλιστεί με βεβαιότητα η μη ανατροπή του. Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναλυθεί η δυναμική ευστάθεια του ρομπότ, με τη χρήση του Force – Angle criterion. Οι απαιτήσεις για το ρομπότ είναι να ανεβαίνει σε κλίση εδάφους μέχρι 20°.

4.1. Εξωτερικές δυνάμεις

Οι εξωτερικές δυνάμεις που δρουν στο ρομπότ 'Hexa-Terra' είναι:

1. Η αντίδραση από το έδαφος F_{fi} , σε κάθε πόδι. Κάθε μία από αυτές τις δυνάμεις μπορεί να αναλυθεί σε μία δύναμη F_{ni} , κάθετα προς την επιφάνεια του εδάφους και μία δύναμη τριβής T_i , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-1a.

2. Το βάρος (W) και η άνωση (A). Στην ανάλυση αυτή, η A υποτίθεται ότι αποτελεί το 75% του συνολικού βάρους W του ρομπότ. Τα W και A δεν μπορούν να εφαρμοστούν στο ίδιο σημείο του ρομπότ, δεδομένου ότι το A εφαρμόζεται στο γεωμετρικό κέντρο του ρομπότ, ενώ το W εφαρμόζεται στο κέντρο μάζας του. Αυτά τα δύο σημεία μπορούν να σχεδιαστούν πολύ κοντά (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-1b) για απλότητα, ή τουλάχιστον το ένα κατά προσέγγιση πάνω από το άλλο. Σε αυτή την περίπτωση, το ζεύγος των δυνάμεων δεν προκαλεί κάποια σημαντική ροπή στο σώμα του ρομπότ. Παρ'όλα αυτά, όταν το ρομπότ βρίσκεται υπό κλίση (ή γενικά αν το τελικό σχέδιο δεν έχει ως αποτέλεσμα να είναι τα δύο σημεία περίπου στην ίδια κάθετη γραμμή), πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ροπή του ζεύγους δυνάμεων.

3. Η δύναμη του εκσκαφτικού μηχανήματος (F_t στο Σχήμα 4-1b). Αυτή μπορεί να μοντελοποιηθεί ως δύναμη ανάλογη της ταχύτητας, με τη μέγιστη δύναμη που εμφανίζεται κατά τη μέγιστη ταχύτητα του συστήματος. Παρόλα αυτά μπορεί να προστεθεί μια σταθερή δύναμη (όπως η Τριβή Coulomb) και ένας λευκός θόρυβος (white noise) μηδενικής μέσης τιμής (wn_f):

$$F_t = b_1 u + F_{t0} \text{sign}(u) + wn_f \quad (4.1)$$

όπου u είναι η ταχύτητα του ρομπότ στην κατεύθυνση κίνησης. Όμοια η ροπή του εκσκαφτικού μηχανήματος (Σχήμα 4-1b) μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$\mathbf{n}_t = b_2 \mathbf{u}_t + \mathbf{n}_{t0} \text{sign}(u_t) + w \mathbf{n}_t \quad (4.2)$$

όπου \mathbf{u}_t είναι η ταχύτητα του εκσκαφτικού και b_1 και b_2 είναι οι συντελεστές απόσβεσης. Παρόλα αυτά, σε αυτή την ανάλυση ευστάθειας, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η χειρότερη περίπτωση, οδηγώντας έτσι σε μια σταθερή μέγιστη δύναμη εκσκαφτικού καθώς και την ισοδύναμη ροπή:

$$\mathbf{F}_t = [-800N \quad 0 \quad 0]^T \quad (4.3)$$

$$\mathbf{n}_t = [0 \quad -800 * h Nm \quad 0]^T \quad (4.4)$$

όπου h είναι η απόσταση από το κέντρο μάζας του ρομπότ στο έδαφος.

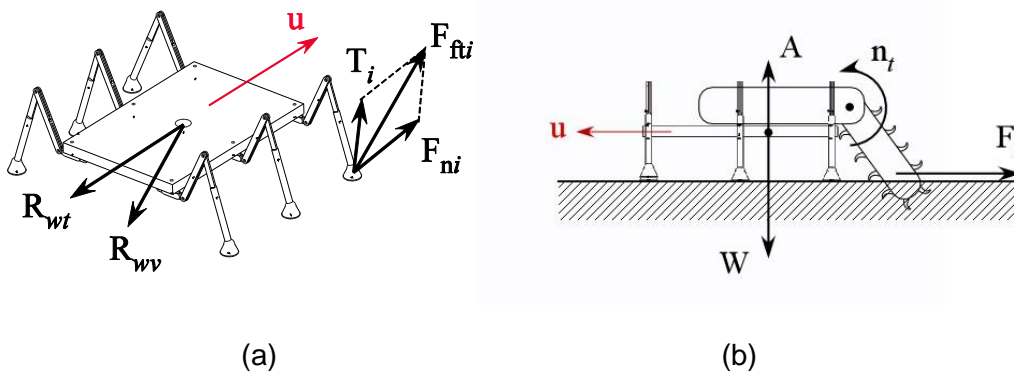
4. Η αντίσταση στο νερό λόγω της κίνησης του ρομπότ \mathbf{R}_{wt} και λόγω θαλάσσιων ρευμάτων / κυμάτων \mathbf{R}_{wv} , (Σχήμα 4-1). Και οι δύο δυνάμεις είναι αποτέλεσμα της σχετικής ταχύτητας μεταξύ του ρομπότ και του περιβάλλοντος νερού. Έτσι, μπορούν και οι δύο να μοντελοποιηθούν ως μία δύναμη \mathbf{R}_w :

$$\mathbf{R}_w = \frac{1}{2} C_D \rho A \mathbf{u}_{r_max}^2 \quad (4.5)$$

όπου C_D είναι ο συντελεστής ολίσθησης, ρ είναι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού, \mathbf{u}_{r_max} είναι η μέγιστη σχετική ταχύτητα μεταξύ του ρομπότ και του θαλασσινού νερού (χειρότερο σενάριο) και A είναι η κάθετη επιφάνεια του ρομπότ ως προς την \mathbf{u}_{r_max} . Ισχύει ότι:

$$\mathbf{u}_{r_max} = \mathbf{u}_{max} + \mathbf{u}_{wv_max} \quad (4.6)$$

όπου \mathbf{u}_{max} είναι η μέγιστη ταχύτητα του ρομπότ και η \mathbf{u}_{wv_max} είναι η μέγιστη ταχύτητα θαλάσσιου ρεύματος / κύματος. Η τελευταία θεωρείται ότι είναι ίση με 8/5 kn.



Σχήμα 4-1. Εξωτερικές δυνάμεις ρομπότ.

4.2. Force – Angle Criterion

Κατά την κίνηση του ρομπότ στο βυθό της θάλασσας, από τις Νευτώνειες αρχές προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

$$\mathbf{F}_{inertial} = \mathbf{W} + \mathbf{A} + \mathbf{F}_t + \mathbf{R}_w + \mathbf{F}_{fii} \quad (4.7)$$

όπου $\mathbf{F}_{inertial}$ είναι η αδρανειακή δύναμη. Η δύναμη \mathbf{F}_t είναι η δύναμη του εκσκαφτικού μηχανήματος και η \mathbf{R}_w είναι η αντίσταση στο νερό που προκαλείται κυρίως από την κίνηση των κυμάτων. Τέλος, \mathbf{F}_{fii} είναι οι αντιδράσεις εδάφους.

Η καθαρή δύναμη, \mathbf{f}_r που δρα στο σύστημα CM, που θα συμμετείχε σε μία αστάθεια ανατροπής, δίνεται:

$$\mathbf{f}_r = \mathbf{W} + \mathbf{A} + \mathbf{F}_t + \mathbf{R}_w - \mathbf{F}_{inertial} = -\mathbf{F}_{fii} \quad (4.8)$$

Όμοια, η καθαρή ροπή \mathbf{n}_r , που ενεργεί για το σύστημα CM δίνεται:

$$\mathbf{n}_r = \mathbf{n}_t + \mathbf{n}_w - \mathbf{n}_{inertial} = -\mathbf{n}_{fii} \quad (4.9)$$

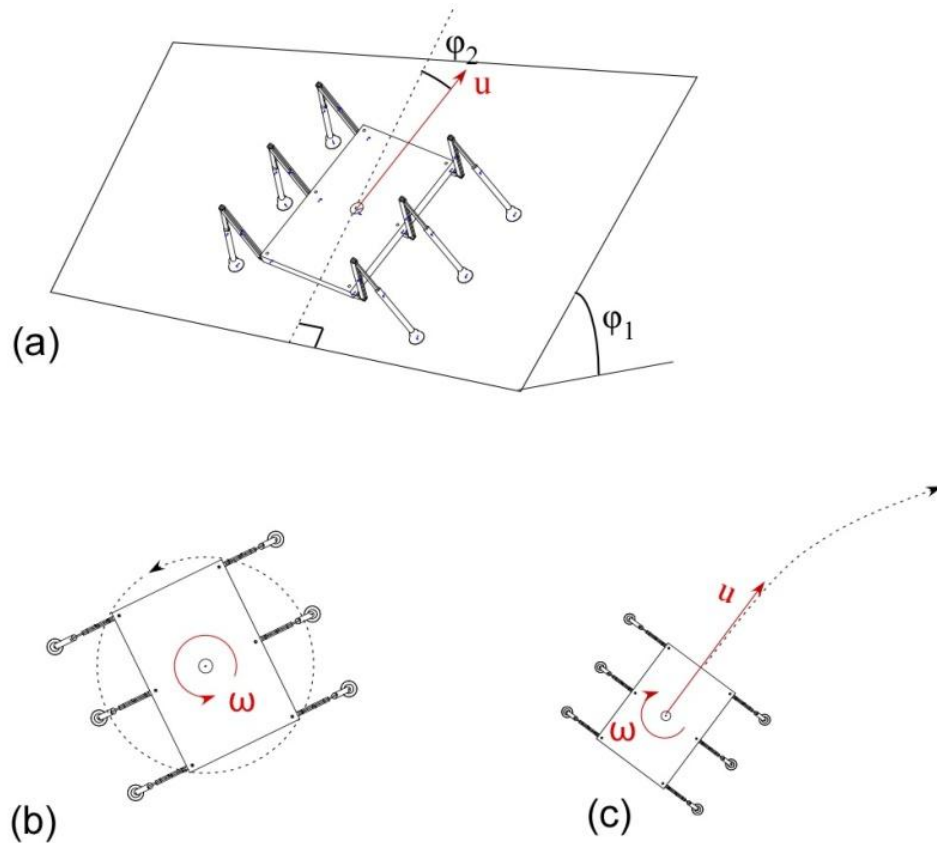
Με την παραδοχή ότι η αντίσταση του νερού ενεργεί στο CM του ρομπότ, οι αντίστοιχες ροπές είναι 0. Έτσι η Εξ. (4.9) γίνεται:

$$\mathbf{n}_r = \mathbf{n}_t - \mathbf{n}_{inertial} = -\mathbf{n}_{fii} \quad (4.10)$$

Από τις εξισώσεις Εξ. (2.26) - (2.35), προκύπτει το μέτρο ευστάθειας του κριτηρίου Force - Angle β .

4.3. Αποτελέσματα Force – Angle Criterion

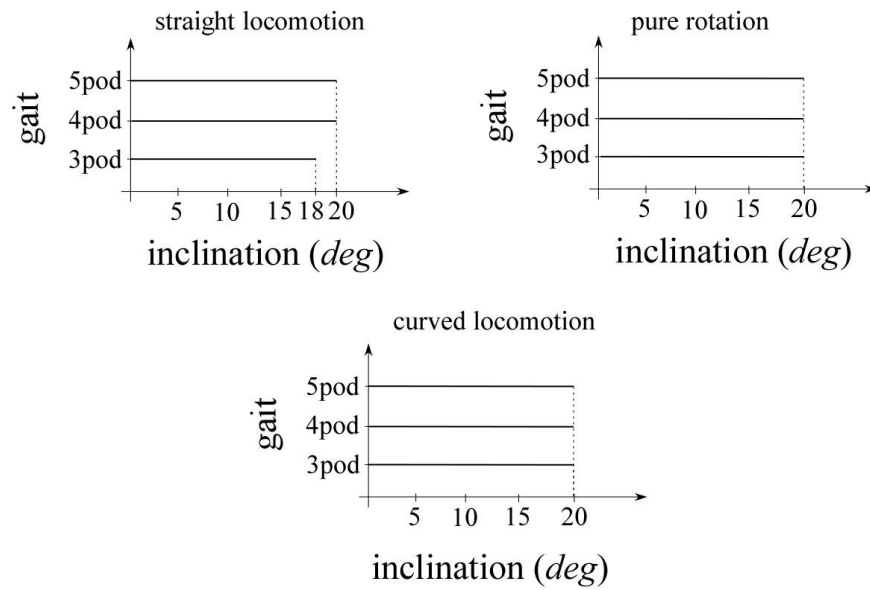
Για να ελεγχθεί η ευστάθεια του κάθε συνδυασμού βηματισμού (gait) και είδους κίνησης (mode), το κριτήριο Force – Angle χρησιμοποιείται, όπως φαίνεται στην Εξ. (2.35) για τη μέγιστη ταχύτητα του ρομπότ και τις μέγιστες εξωτερικές δυνάμεις. Επιπλέον, οι δοκιμές έγιναν υποθέτοντας έδαφος με κλίση γωνίας φ_1 και με αρχικό προσανατολισμό ρομπότ όχι μόνο ευθυγραμμισμένο, αλλά και σε διάφορες γωνίες φ_2 , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-2. Για κάθε συνδυασμό gait – mode, ελέγχθηκαν επτά διαφορετικές γωνίες φ_2 , από 0 έως 90°, για κάθε 15°. Επίσης, ο προσανατολισμός της δύναμης ρεύματος / κύματος σε σχέση με το σώμα του ρομπότ εξετάστηκε σε διαφορετικές γωνίες από 0 έως 180° για κάθε 15°, σε σχέση με τους άξονες συμμετρίας του ρομπότ, παρέχοντας έτσι δεκατρείς διαφορετικές περιπτώσεις. Με αυτόν τον τρόπο, για κάθε συνδυασμό gait - mode, $7 \times 13 = 91$ διαφορετικές δοκιμές διεξήχθησαν και η χειρότερη περίπτωση (όπου παρέχεται η χαμηλότερη τιμή της γωνίας β της Εξ. (2.35)) καθορίζει το περιθώριο ευστάθειας του συγκεκριμένου συνδυασμού. Οι δοκιμές των γωνιών και η ανάλυση δυνάμεων έγιναν από τον Γεώργιο Ρεκλείτη.



Σχήμα 4-2. 3 διαφορετικά είδη κίνησης, σε έδαφος με κλίση ϕ_1 .

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-2, όταν το ρομπότ κινείται σε κλίση, η διαμόρφωση των ποδιών δεν αλλάζει (π.χ. το ρομπότ δεν "λυγίζει προς τα εμπρός", ανάλογα με την κλίση εδάφους). Αυτό γίνεται προκειμένου να κρατηθούν τα gaits όσο το δυνατόν απλούστερα, αν και είναι μια πιο συντηρητική προσέγγιση που μειώνει το περιθώριο ευστάθειας της κίνησης. Όπως φαίνεται παρακάτω, η κίνηση του ρομπότ σε κλίση εδάφους είναι ευσταθής, ακόμη και για το χειρότερο σενάριο.

Το Σχήμα 4-3 δείχνει ότι με τη μέγιστη κλίση του εδάφους (μέχρι τις απαιτούμενες 20° του project), κάθε συνδυασμός gait – mode μπορεί να προχωρήσει χωρίς να παραβιάζεται το κριτήριο Force – Angle της Εξ. (2.35). Όπως μπορεί να φανεί, όλοι οι συνδυασμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην απαιτούμενη κλίση, εκτός από το tripod gait σε ευθεία κίνηση, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κλίση μέχρι 18° . Τα περιθώρια ευστάθειας για κάθε συνδυασμό gait – mode φαίνονται στον Πίνακας 4-1.



Σχήμα 4-3. Μέγιστη κλίση γωνίας ϕ_1 για ευσταθή κίνηση των 3 gaits για κάθε mode.

Παρατηρείται ότι ενώ όλα τα gaits για όλες τις βασικές κινήσεις είναι ευσταθείς, το Pentapod gait παρέχει το μεγαλύτερο μέτρο β στις περισσότερες των περιπτώσεων, ως εκ τούτου τον καθιστά και στην πράξη τον πιο ευσταθή βηματισμό.

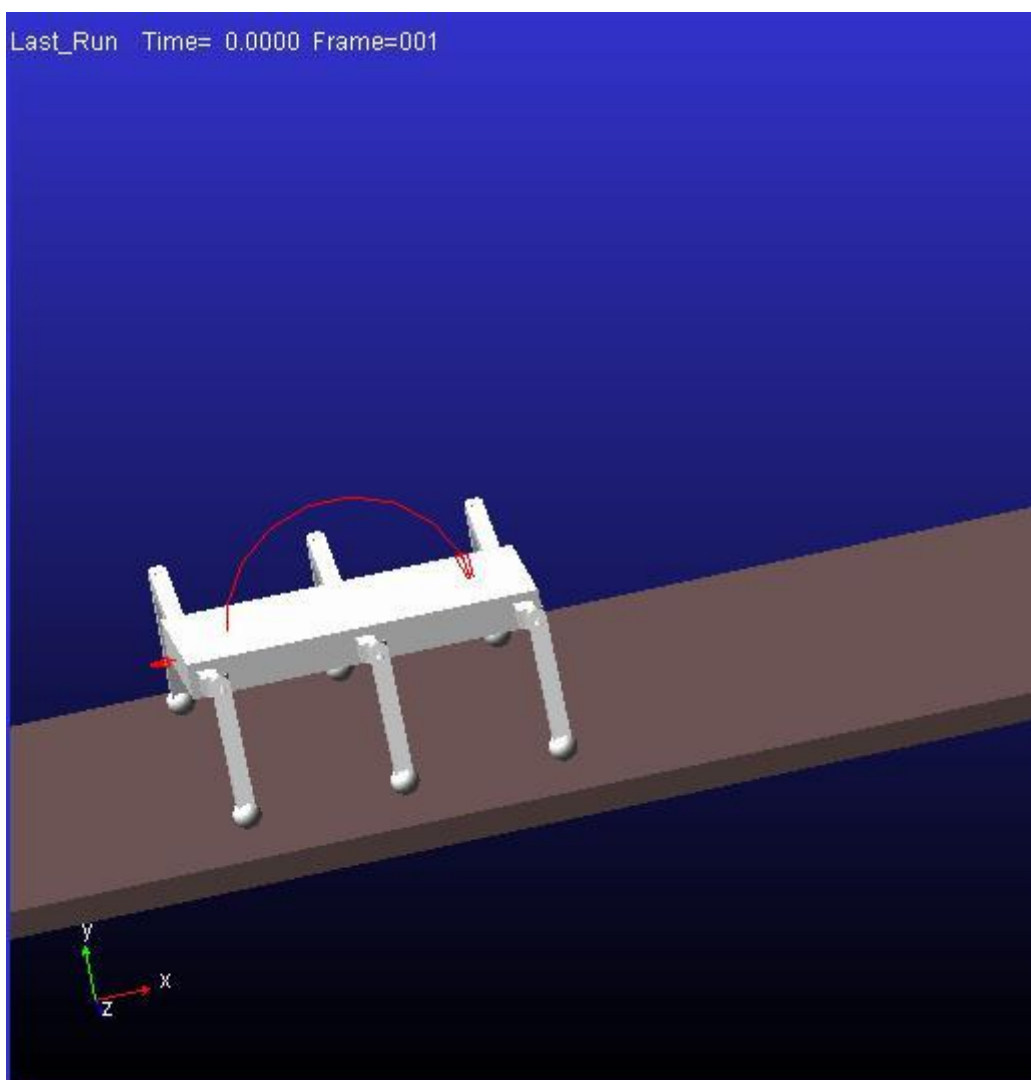
Πίνακας 4-1. Περιθώρια ευστάθειας για όλους τους συνδυασμούς gait/mode.

	Tripod	Quadruped	Pentapod
Ευθεία κίνηση	305.6 (στις 18°)	915.9	1861.6
Περιστροφή	1310	1608.7	1884.2
Κίνηση σε καμπύλη	364.3	1310	804.1

5. Αποτελέσματα

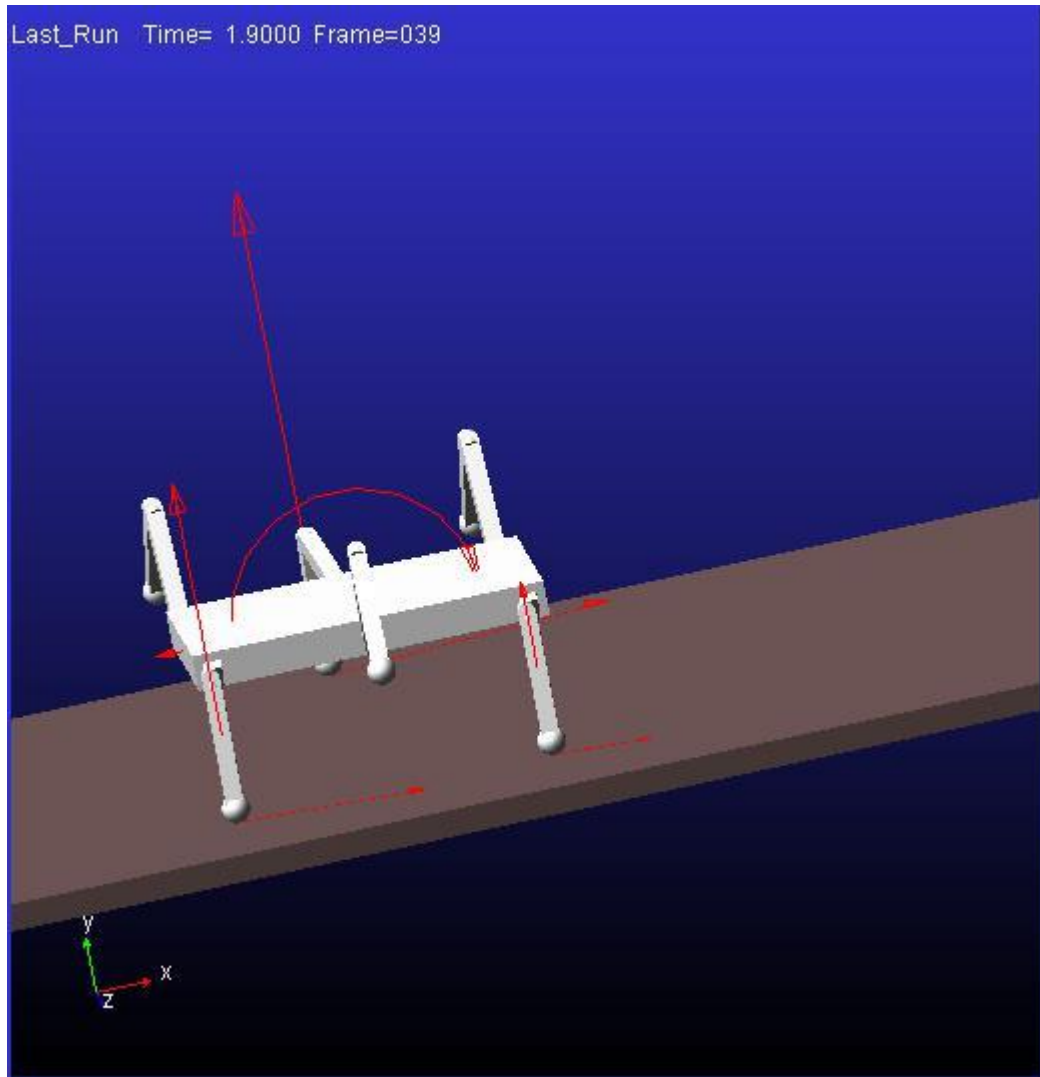
5.1. Προσομοίωση Tripod gait

Η δυναμική ανάλυση ευστάθειας έγινε με τη βοήθεια του MATLAB. Πριν κριθεί η ευστάθεια του ρομπότ, καθίσταται απαραίτητη, η προσομοίωσή του, με τη χρήση του προγράμματος προσομοίωσης δυναμικών συστημάτων MSC ADAMS. Με το πρόγραμμα αυτό, έγινε ο σχεδιασμός του ρομπότ χρησιμοποιώντας τις διαστάσεις, τις μάζες και τις συνθήκες κίνησης (χρόνος, δυνάμεις) που απαιτούσε το project. Στο Σχήμα 5-1 φαίνεται το τρισδιάστατο μοντέλο του ρομπότ στην αρχική κατάσταση. Το μοντέλο του ρομπότ είναι απλοποιημένο και ο εκσκαφτικός μηχανισμός απεικονίζεται με μία δύναμη και μία ροπή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-1. Παρατηρείται επίσης ότι το ρομπότ βρίσκεται σε έδαφος υπό κλίση.



Σχήμα 5-1. Προσομοίωση ρομπότ με τη χρήση MSC ADAMS.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην ενότητα 4.3, το tripod gait, χρήζει την ανάγκη περαιτέρω μελέτης, διότι κατέχει το μικρότερο μέτρο ευστάθειας κατά το κριτήριο Force – Angle. Έτσι η μελέτη που θα ακολουθήσει με το πρόγραμμα προσομοίωσης MSC ADAMS, αφορά το tripod gait με ευθεία κίνηση και γωνία κλίσης εδάφους 18° , όπου σύμφωνα με την ενότητα 4.3, είναι ευσταθές.

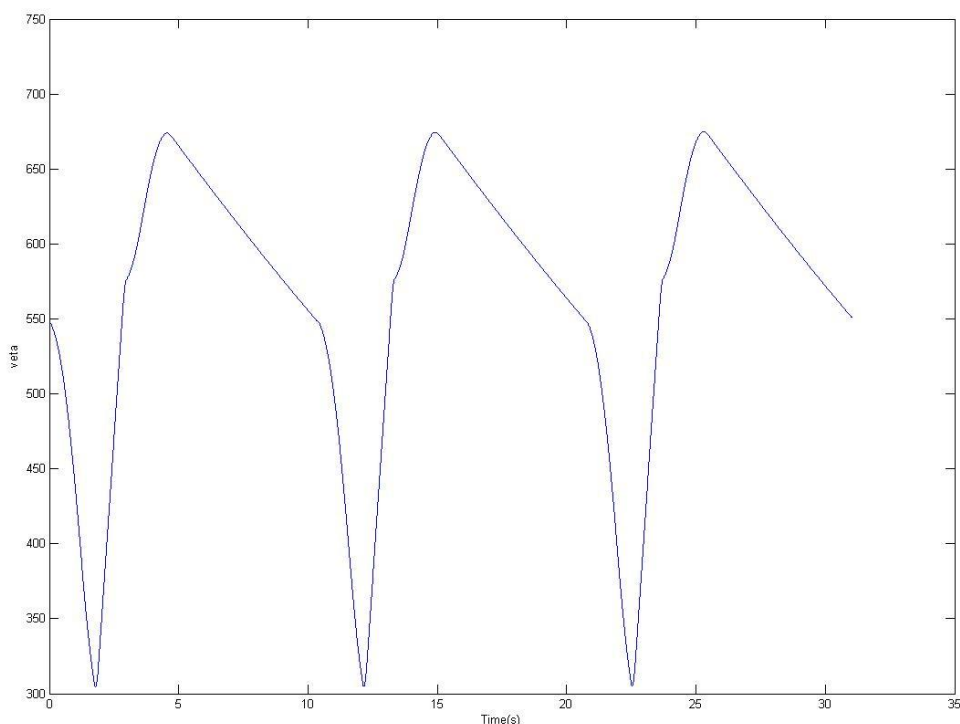


Σχήμα 5-2. 3-D προσομοίωση του tripod gait.

Στο Σχήμα 5-2, φαίνεται η κίνηση του ρομπότ με tripod gait σε ευθεία κίνηση και κλίση εδάφους 18° . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-2, όταν σηκώνονται τρία πόδια, στα υπόλοιπα τρία ασκούνται μεγάλες δυνάμεις αντίδρασης με το έδαφος. Η διαδικασία της προσομοίωσης παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.

Αρχικά εκτελείται το πρόγραμμα που δίνει την κινηματική των ποδιών (γωνίες αρθρώσεων q). Στη συνέχεια μέσω της χρήσης του προγράμματος SIMULINK, “φορτώνονται” οι γωνίες, συναρτήσεσι του χρόνου, στο μοντέλο του προγράμματος MSC ADAMS, όπου δίνει σαν αποτέλεσμα τις ακριβείς συντεταγμένες των πελμάτων των

ποδιών. Έπεται, η αναλυτική μελέτη του Force – Angle criterion σε όλη την διάρκεια κύκλου κίνησης. Από την ενότητα 4.3, είναι γνωστή η τιμή τις γωνίας φ_2 , όπου σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό της δύναμης ρεύματος / κύματος σε σχέση με το σώμα του ρομπότ, δίνει τη χαμηλότερη τιμή της γωνίας β της Εξ. (2.35). Συνεπώς για αυτές τις συνθήκες υπολογίζεται το κριτήριο Force – Angle, για ένα πλήρη κύκλο. Στο Σχήμα 5-3, απεικονίζεται η γωνία β (veta) σε τρεις πλήρεις κύκλους κίνησης του ρομπότ, για την ευκολία της απεικόνισης.

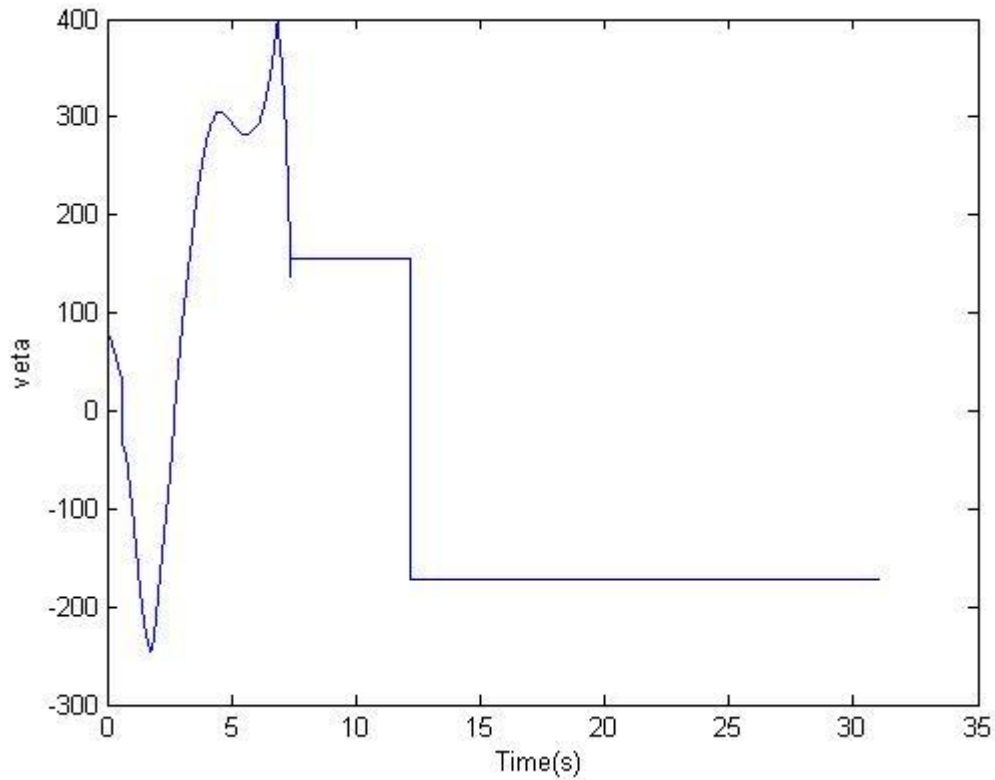


Σχήμα 5-3. Κριτήριο Force – Angle κατά τη διάρκεια του κύκλου κίνησης του ρομπότ.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-3, η γωνία β αποκτά τη μέγιστη τιμή της, όταν όλα τα πόδια πατούν στο έδαφος, ενώ την ελάχιστη τιμή της όταν τα πέλματα της πρώτης τριάδας ποδιών, βρίσκονται στο μέγιστο ύψος ανύψωσης. Παρατηρείται επίσης ότι η ελάχιστη γωνία β του Σχήμα 5-3 είναι 304.81, τιμή πολύ κοντά στην τιμή 305.6 που προέκυψε από την ανάλυση της ενότητας 4.3.

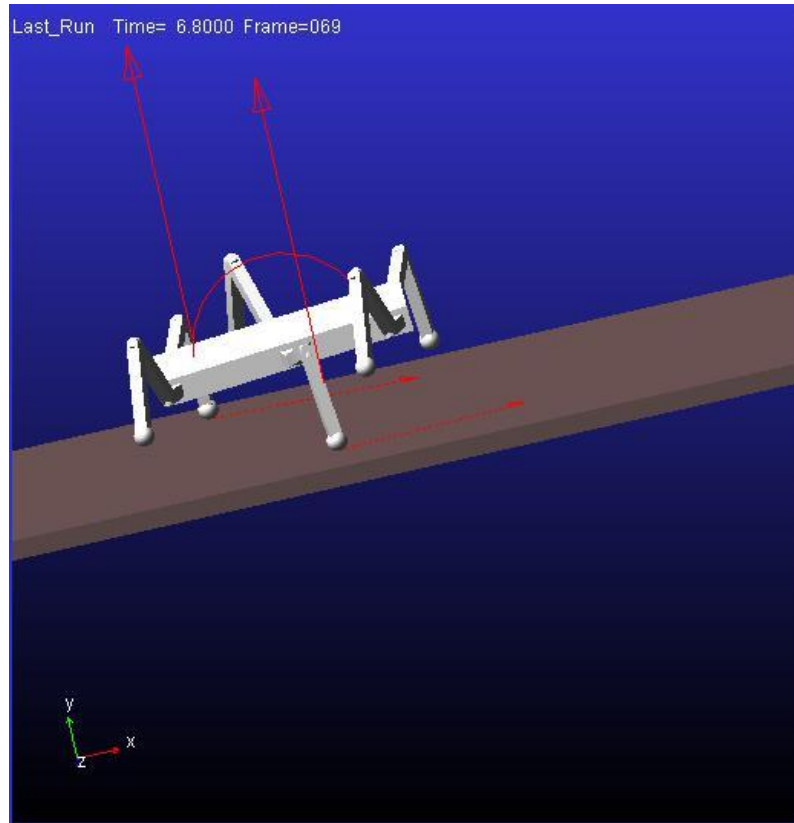
Στο Σχήμα 5-4, φαίνεται η γωνία β στις 19° όπου το ρομπότ ανατρέπεται. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5-4, αρχικά η γωνία β είναι θετική, αλλά σε λίγα δευτερόλεπτα, όπου και σηκώνεται η πρώτη τριάδα ποδιών, γίνεται αρνητική και στη συνέχεια αφού

ανατρέπεται το ρομπότ σταματάει η προσομοίωση και αυτό φαίνεται από τις ευθείες γραμμές.

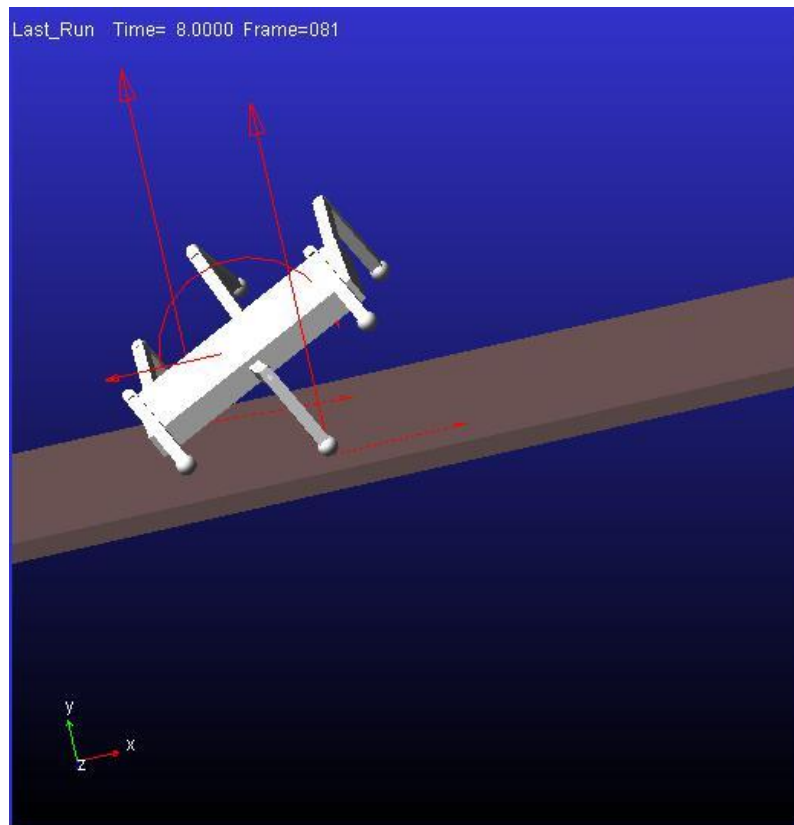


Σχήμα 5-4. Κριτήριο Force – Angle στις 19° όπου ανατρέπεται το ρομπότ.

Στα Σχήμα 5-5 και Σχήμα 5-6 φαίνονται δύο στιγμιότυπα κατά τη φάση της κίνησης του ρομπότ στις 19°. Οι δυνάμεις στήριξης που αναπτύσσονται είναι ιδιαίτερα μεγάλες και λόγω της κλίσης του εδάφους, το ρομπότ χάνει την ισορροπία του και ανατρέπεται. Στο Σχήμα 5-5 φαίνεται ότι από τα πρώτα δευτερόλεπτα, το πόδι 1 χάνει την επαφή με το έδαφος.

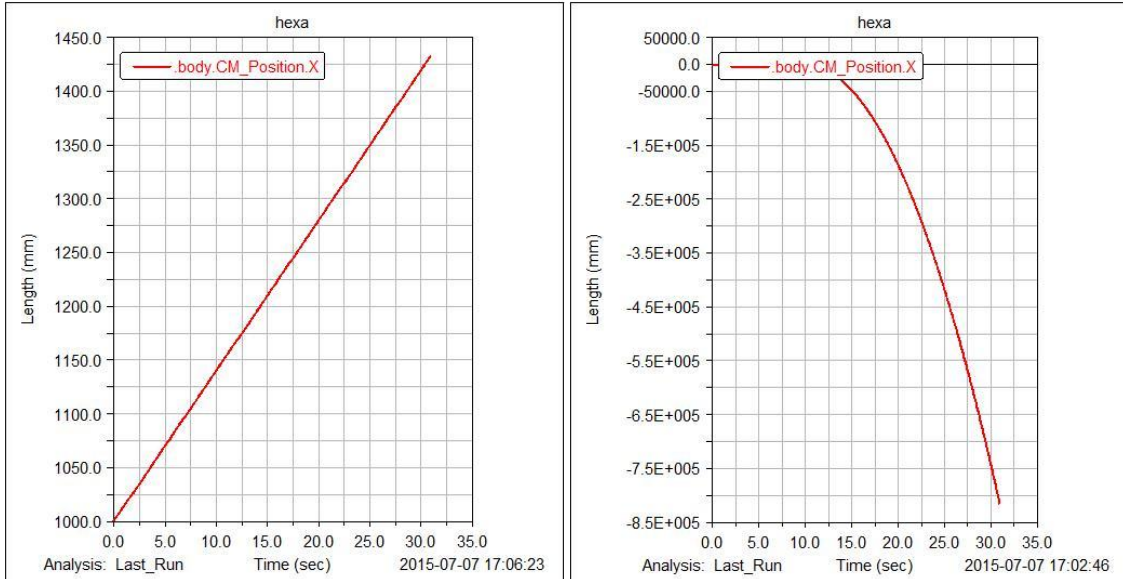


Σχήμα 5-5. Στιγμιότυπο ρομπότ σε γωνία εδάφους 19° .

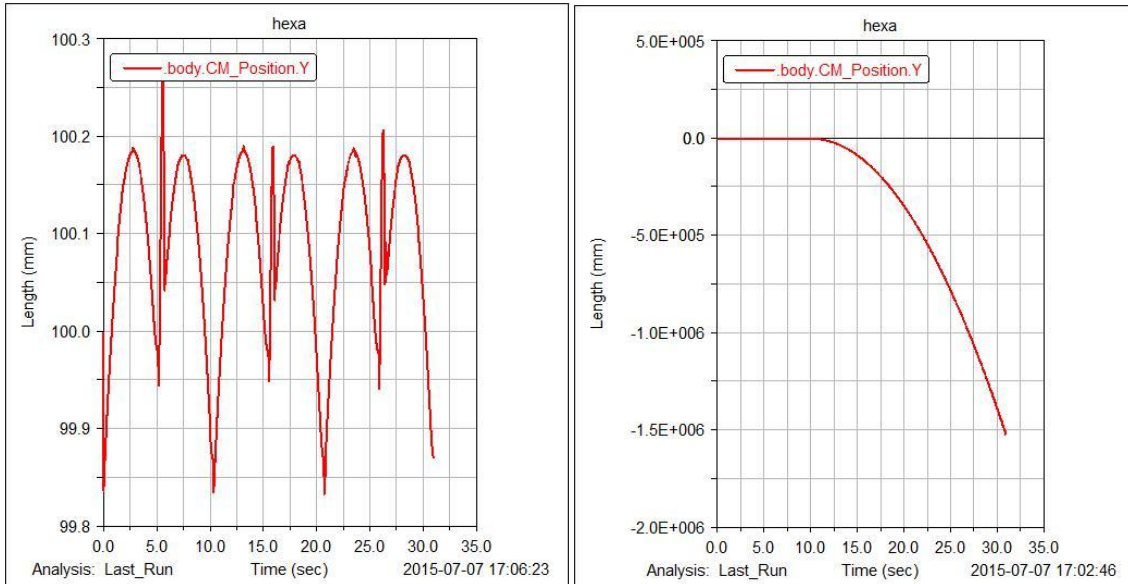


Σχήμα 5-6. Στιγμιότυπο ρομπότ σε γωνία εδάφους 19° .

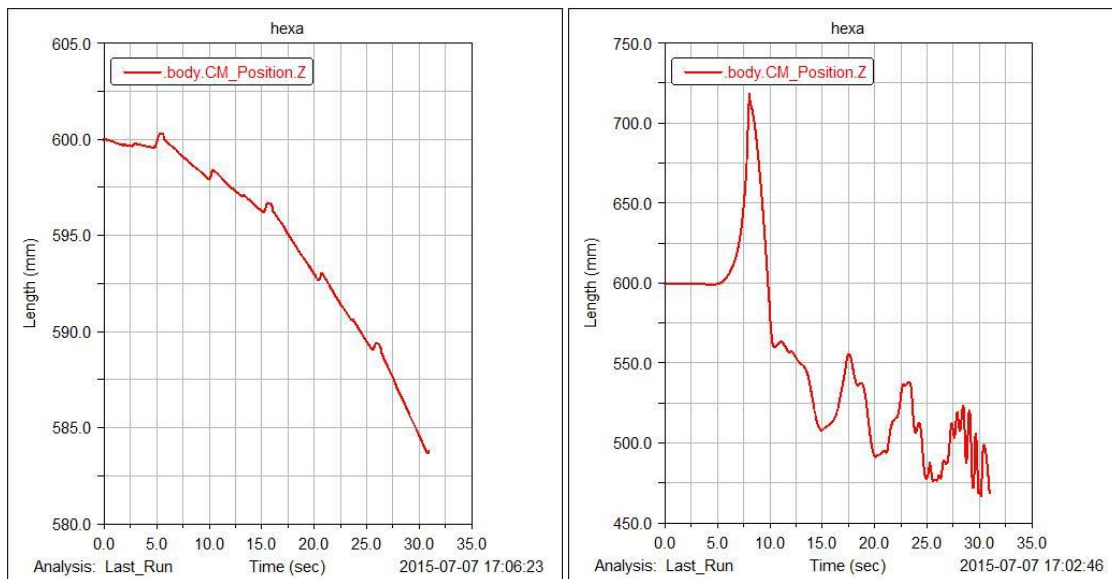
Στα Σχήμα 5-7 - Σχήμα 5-9 παρατίθενται οι συντεταγμένες του κέντρου μάζας CM του ρομπότ σε γωνία κλίσης 18° (αριστερά), όπου το ρομπότ είναι ευσταθές και σε 19° , όπου το ρομπότ ανατρέπεται (δεξιά).



Σχήμα 5-7. Κίνηση CM κατά τον X – άξονα.



Σχήμα 5-8. Κίνηση CM κατά τον Y – άξονα.



Σχήμα 5-9. Κίνηση CM κατά τον Z – άξονα.

Παρατηρείται ότι στις 18° , στον άξονα X το CM του ρομπότ κινείται αρμονικά, ενώ στον άξονα Y ακολουθεί μία πολύ μικρή ταλάντωση, που δεν είναι αισθητή με γυμνό μάτι. Τέλος στον άξονα Z το ρομπότ εμφανίζει μία πολύ μικρή απόκλιση από την επιθυμητή τροχιά, γεγονός που οφείλεται στην κλίση εδάφους και στις δυνάμεις και ροπή που ασκούνται στο σώμα του ρομπότ.

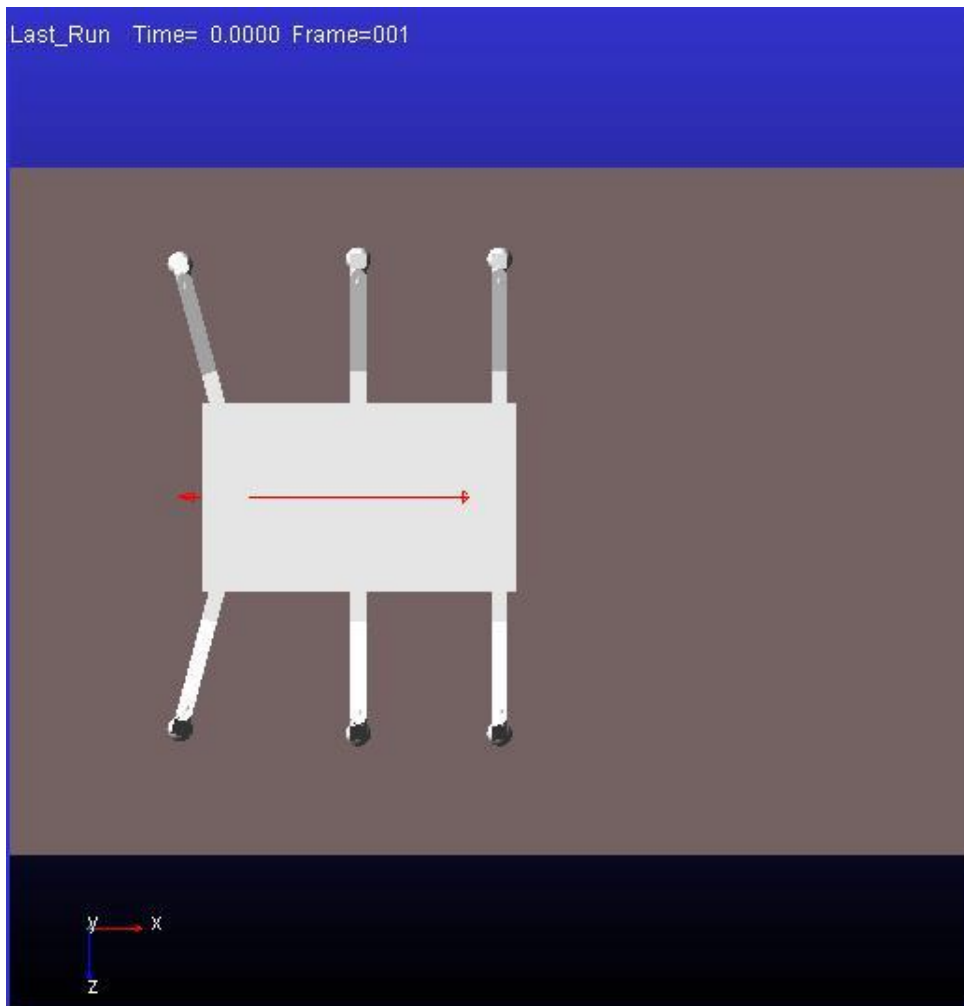
Στις 19° , παρατηρείται ότι μέχρι περίπου $t=5$ s, το ρομπότ κινείται αρμονικά αλλά σταδιακά χάνει την ισορροπία του και πέφτει προς τα πίσω, λόγω συνδυασμού κλίσης εδάφους, tripod gait και δυνάμεων. Παρακάτω δίνεται μία λύση στην περίπτωση που ανατρέπεται το ρομπότ, έτσι ώστε να είναι ικανό να ανεβαίνει μεγαλύτερο εύρος γωνιών.

5.2. Μεθοδολογία αποφυγής ανατροπής ρομπότ

Όπως αναφέρθηκε, το ρομπότ στο tripod gait με ευθεία κίνηση μπορεί να ανέβει σε έδαφος με κλίση έως 18° . Για να μπορεί να ανεβαίνει σε μεγαλύτερη κλίση εδάφους, έχουν αναπτυχθεί δύο λύσεις.

Η πρώτη είναι η αύξηση των διαστάσεων του ρομπότ. Προφανώς όσο μεγαλύτερες διαστάσεις έχει το ρομπότ, τόσο μεγαλύτερο θα είναι το πολύγωνο στήριξης που σχηματίζεται, ως εκ τούτου θα καθίσταται πιο ευσταθές. Η λύση αυτή, βέβαια, καθιστά το ρομπότ πιο βαρύ και σαφώς πιο δαπανηρό.

Η δεύτερη και πιο απλή λύση για να μπορεί να ρομπότ να ανεβαίνει σε μεγαλύτερες κλίσεις εδάφους είναι η διαμόρφωση των πίσω ποδιών του. Στο Σχήμα 5-10 φαίνεται το ρομπότ σε κάτοψη, όπου και παρατηρείται η διαμόρφωση αυτή. Το μόνο που αλλάζει, σε αυτή τη λύση ουσιαστικά, είναι η αρχική κατάσταση του ρομπότ. Τα πόδια 3 και 6 βρίσκονται σε γωνία ω σε σχέση με τα υπόλοιπα πόδια.



Σχήμα 5-10. Ρομπότ με διαμόρφωση των πίσω ποδιών σε κάτοψη.

Με δοκιμές παρατηρήθηκε ότι για το 'Hexa-Terra', αρκεί $\omega=2^\circ$ για να ανέβει τις 19° εδάφους, ενώ αν $\omega=4^\circ$ ανεβαίνει και τις 20° εδάφους. Παρατηρείται λοιπόν, ότι μια μικρή γωνία στα πίσω πόδια του ρομπότ μπορεί να μεταβάλλει τις δυνατότητές του χωρίς να μεταβάλλει καθόλου τον τρόπο κίνησής του.

6. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

6.1. Συμπεράσματα

Από τα προηγούμενα κεφάλαια έγινε αντιληπτό ότι για την κατασκευή του ρομπότ απαιτείται η στατική και δυναμική ανάλυσή του, ώστε με δεδομένες τις διαστάσεις αλλά και τις συνθήκες πάνω στις οποίες εργάζεται το ρομπότ, να υπάρχει βεβαιότητα ότι δεν θα ανατραπεί κατά τη διάρκεια της κίνησής του.

Η στατική ανάλυση αποτελεί έναν πρώτο έλεγχο για την ευσταθή κίνηση του ρομπότ. Με την ανάπτυξη του GSA καθίσταται εφικτός ο έλεγχος της κίνησης του ρομπότ, έτσι ώστε να μην ανατραπεί, ακόμη και αν αστοχήσει κάποιο πόδι, με δεδομένα μόνο τις διαστάσεις του ρομπότ, και την κλίση εδάφους. Ο αλγόριθμος αυτός είναι χρήσιμος για την αρχική μελέτη οποιουδήποτε εξάποδου ρομπότ, διότι είναι παραμετροποιημένος ως προς τις διαστάσεις του, με αποτέλεσμα μία μεταβολή των διαστάσεων, να επιφέρει μεταβολή στη βέλτιστη αλληλουχία ανύψωσης και τοποθέτησης των ποδιών. Στον Πίνακα 6-1 παρουσιάζονται, με τη βοήθεια αναφορών, μερικές χρήσεις που προσφέρει κάθε gait, καθώς επίσης και ποσοτικά η ευστάθεια και η ταχύτητά τους.

Το αρνητικό του GSA είναι ότι λαμβάνει υπόψη μόνο τη στατική ευστάθεια, με αποτέλεσμα όταν το ρομπότ δεχτεί κάποια εξωτερική δύναμη και το κέντρο βάρους του δεν βρεθεί στο κέντρο, ο αλγόριθμος πιθανόν να αστοχήσει. Για παράδειγμα, μία δύναμη μπορεί να “βοηθάει” την ευστάθεια του ρομπότ, ενώ ο GSA πιθανόν να δείχνει ότι το ρομπότ ανατρέπεται, ενώ αντίθετα μία δύναμη μπορεί να “αποσταθεροποιεί” το ρομπότ, ενώ ο GSA να δείχνει ότι το ρομπότ είναι ευσταθές. Για το λόγο αυτό, καθίσταται απαραίτητη η μελέτη της δυναμικής ανάλυσης του ρομπότ, όπου θα περιλαμβάνει όλες τις δυνάμεις και τις ροπές που μπορεί να δεχτεί το ρομπότ.

Πίνακας 6-1. Ιδιότητες των gaits.

Gait	Ευστάθεια	β λόγος λειτουργίας	Ταχύτητα	Χρήσεις
Tripod	Ελάχιστη [20]	1/2	γρηγορότερο gait [20]	Ομαλό έδαφος, χωρίς εμπόδια
Quadruped	καλή	2/3	γρήγορο	Ανεβαίνει σκάλες [8]
Pentapod	εξαιρετική	5/6	αργό	Σκαρφαλώνει κάθετες επιφάνειες [7] Περιστροφή σώματος αποφυγή μεγάλων εμποδίων Περπάτημα σε εξαιρετικά ανώμαλο έδαφος [18]

Η δυναμική ανάλυση έγινε με τους συνδυασμούς ποδιών που προέκυψαν, από την στατική ανάλυση του ρομπότ. Με τη χρήση του κριτηρίου Force – Angle, εξάχθηκαν συμπεράσματα για την δυναμική ευστάθεια του ρομπότ. Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, εισήχθησαν οι δυνάμεις και η ροπή του υποβρύχιου εξάποδου ρομπότ του project, το οποίο φέρει εκσκαφτικό μηχανισμό. Ως εκ τούτου προέκυψε ότι το ρομπότ μπορεί να κινηθεί για κλίση εδάφους μέχρι 20° , όπου απαιτούνταν από το project, με μεγάλο περιθώριο ευστάθειας, για κάθε gait και mode κίνησης, με εξαίρεση το tripod gait και την ευθεία κίνηση που μπορεί να κινηθεί μέχρι 18° .

Για την επαλήθευση της προηγούμενης μελέτης, ήταν αναγκαία η προσομοίωση, με τη χρήση του προγράμματος MSC ADAMS. Η ανάγκη της προσομοίωσης έγινε επιτακτική για το tripod gait με ευθεία κίνηση, όπου καθίσταται και η μικρότερη γωνία β του κριτηρίου Force – Angle. Τα συμπεράσματα της προσομοίωσης ήταν ότι από το κριτήριο Force – Angle, ορθά προέκυψε ότι το ρομπότ μπορούσε να κινηθεί μέχρι 18° κλίσης εδάφους. Συνεπώς το κριτήριο αυτό αποτελεί ένα φερέγγυο μέτρο δυναμικής ευστάθειας.

Τέλος δόθηκε λύση στο πρόβλημα της ανατροπής του ρομπότ και με μια μικρή γωνία στα πίσω πόδια, κατά την αρχική κατάσταση του ρομπότ, επιτεύχθηκε η ευσταθή κίνησή του ακόμα και σε μεγαλύτερες γωνίες κλίσης εδάφους.

6.2. Μελλοντική Εργασία

Υπάρχουν πολλές διορθώσεις που μπορούν να γίνουν στο μοντέλο και στην διδιάστατη δομή του, αλλά και στην τρισδιάστατη, όπου θα επιφέρουν καλύτερα αποτελέσματα και ίσως και μεγαλύτερο περιθώριο ευστάθειας με τις υπάρχουσες διαστάσεις του ρομπότ.

Μία σημαντική παράμετρος που θα μπορούσε να μελετηθεί πιο αναλυτικά είναι η επιφάνεια εργασίας (workspace) του ποδιού. Ως workspace στο απλοποιημένο διδιάστατο μοντέλο επιλέχθηκε μία ορθογώνια περιοχή, με στόχο την μη επικάλυψη των περιοχών εργασίας των ποδιών. Μπορεί να γίνει περαιτέρω ανάλυση με στόχο την χρήση ολόκληρης της επιφάνειας εργασίας των ποδιών, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο πολύγωνο στήριξης, συνεπώς και σε μεγαλύτερο περιθώριο ευστάθειας.

Μία ακόμη παράμετρος που πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω είναι το gait transition. Όπως αναφέρθηκε ο σκοπός της εργασίας ήταν η παραγωγή της βέλτιστης αλληλουχίας ποδιών ανάλογα με τις επιλεγόμενες κινήσεις. Παρόλα αυτά για την κατασκευή ενός ρομπότ με gaits, όπου διαθέτουν καθορισμένους συνδυασμούς ποδιών, θα πρέπει να γίνει εκτενής ανάλυση, όσον αφορά την

μετάβαση από το ένα gait στο άλλο, ώστε να αποφευχθεί κάποια ανατροπή του ρομπότ.

Ως προς την προσομοίωση, πιθανότατα μια διαφορετική διαμόρφωση του ποδιού ή / και του σώματος του ρομπότ, να οδηγούσε σε καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά το θέμα της ευστάθειας. Όμως το θέμα της παρούσας εργασίας ήταν η απλοποιημένη μελέτη ευστάθειας του ρομπότ, και όχι η κατασκευή του, ώστε να δοθεί βάση στην διαμόρφωση του ρομπότ.

Τέλος, η δυναμική ευστάθεια και η επαλήθευση μέσω της προσομοίωσης θα μπορούσε να γίνει, κάνοντας χρήση ενός επιπλέον κριτηρίου, με στόχο τον μηδενισμό του κινδύνου της ανατροπής του ρομπότ, όσον αφορά το κομμάτι του software, βέβαια.

Βιβλιογραφία

- [1] Chu S. K. K., Pang G. K. H., " Comparison Between Different Model of Hexapod Robot in Fault-Tolerant Gait ", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems And Humans*, Vol. 32, 2002, pp. 752-756.
- [2] Craig, J., "*Introduction to Robotics, Mechanics and Control*", 3rd ed., Pearson Prentice Hall, 2005.
- [3] Delcomyn F., Nelson M. E., " Architectures for a biomimetic hexapod robot ", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 30, January 2000, pp. 5-15.
- [4] Fielding M. R., Dunlop R., Damaren C. J., " Hamlet: Force/Position controlled hexapod walker—Design and systems", *Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications*, Mexico City, Mexico, September 2001, pp. 984-989.
- [5] Georgiadis C., German A., Hogue A., Liu H., Prahacs C., Ripsman A., Sim R., Torres L. A., Zhang P., Buehler M., Dudek G., Jenkin M., Milios E., " AQUA: An aquatic walking robot ", *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sendai, Japan, 28 September-2 October, 2004.
- [6] Hauser T., Bretl K., Latombe J. C., Harada W., " Motion planning for legged robots on varied terrain ", *International Journal of Robotics Research 2008*, Vol. 27, pp. 1325-1349.
- [7] Haynes G. C., Alfred A. R., " Gait Regulation and Feedback on a Robotic Climbing Hexapod ", *Robotics: Science and Systems*, 2006.
- [8] Haynes G. C., Alfred A. R., " Gaits and Gait Transitions for Legged Robots ", *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, May 2006, pp. 1117-1122.
- [9] Inagaki K., Kobayashi H., " Adaptive Wave Gait for Hexapod Synchronized Walking", *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation IEEE*, San Diego, California, Vol. 2, May 1994, pp. 1326-1331.
- [10] Kang H., Shim H., Jun B. H., Lee P. M., " Design of underwater link and joint for the development of multi-legged underwater robot CR200 ", *Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2012*, Yeosu, Korea, May 2012, pp. 1-6.
- [11] Kennedy B., Okon A., Aghazarian H., Garrett M., Huntsberger T., Magnone L., Robinson M., Townsend J., "The lemur II-Class robots for inspection and maintenance of orbital structures: A system description ", *Proceedings of the 8th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR' 2005)*, London, UK, September 2005, pp. 1069-1076.
- [12] Mantis homepage. Available online: <http://www.mantisrobot.com>.
- [13] Nelson G. M., Quinn R. D., Bachmann R. J., Flannigan W. C., Ritzmann R. E., Watson J. T., " Design and Simulation of a Cockroach-like Hexapod Robot", *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Albuquerque*, New Mexico, April 1997, pp.1106-1111.
- [14] Pana C. F., Resceanu I. C., Patrascu D. M., " Fault-Tolerant Gaits of Quadruped Robot on a Constant-Slope Terrain " *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR 2008)*, Cluj-Napoca, pp. 22-226, May 2008.

- [15] Papadopoulos E., Rey D., " The Force - Angle Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators ", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 33, No. 1, 2000.
- [16] Roennau A., Heppner G., Pfozter L., Dillman R. Lauron V, " Optimized leg configuration for the design of a bio-inspired walking robot ", *Proceedings of the 16th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Sydney, Australia, July 2013, pp. 563–571.
- [17] Saranli U., Buehler M., Koditschek D. E., " RHex - A simple and highly mobile hexapod robot ", *International Journal of Robotics Research*, Vol 20, July 2001, pp. 616–631.
- [18] Wang Z.-Y., Ding X.-L. and Rovetta A., " Analysis of typical locomotion of a symmetric hexapod robot ", *Robotica*, Vol. 28, 2010, pp. 893–907.
- [19] Wilcox B. H., " ATHLETE: A cargo and habitat transporter for the moon ", *Aerospace conference*, 2009 IEEE, Big Sky, MT, March 2009, pp. 1-7.
- [20] Yang J. M. " Omnidirectional walking of legged robots with a failed leg ", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 47, Issues 11–12, June 2008, pp. 1372–1388.
- [21] Yang J. M, Kim J. H., " Optimal fault tolerant gait sequence of the hexapod robot with overlapping reachable areas and crab walking ", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A*, Vol. 29, March 1999, pp. 224-235.