

# Σχεδιασμός Δρόμου και Έλεγχος Μικρορομποτικού Μηχανισμού με Φυγοκεντρικούς Επενεργητές

Η Μεταπτυχιακή Εργασία Εξειδίκευσης

υποβάλλεται στην ορισθείσα  
από τη Συνέλευση  
του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής  
Εξεταστική Επιτροπή

από τον

Δημητριάδη Σωκράτη

ως μέρος των υποχρεώσεων για την απόκτηση του

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ  
ΣΤΗΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

ΜΕ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ  
ΣΤΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ-ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Μάρτιος 2019

Εξεταστική Επιτροπή:

- **Κώστας Βλάχος**, Επικ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων
- **Αριστείδης Λύκας**, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων
- **Κωνσταντίνος Μπλέκας**, Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

## ΑΦΙΕΡΩΣΗ

---

Στον πατέρα μου, στη μητέρα μου και στον αδερφό μου

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής διατριβής Επικ. Καθ. Κ. Βλάχο, για την πολύτιμη βοήθειά του δια την εκπόνηση της εργασίας μου και για τις γνώσεις που μου προσέφερε.

Ευχαριστώ θερμά, τα άλλα δύο μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής Καθ. Α. Λύκα και Αναπλ. Καθ. Κ. Μπλέκα για τις παρατηρήσεις τους στη συγγραφή της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τους Καθ. Γ. Ακρίβη, Επικ. Καθ. Χ. Νομικό, Καθ. Α. Π. Κόντη, Αναπλ. Καθ. Γ. Μανή, Καθ. Σ. Νικολόπουλο, Καθ. Α. Παλή και Επικ. Καθ. Α. Ευθυμίου, για την καθοδήγησή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και που υπήρξαν υπόδειγμα είτε επιστήμονα, είτε διδάσκοντα, είτε ανθρώπου.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους και την οικογένειά μου για τις συμβουλές τους, την οικονομική και ψυχολογική υποστήριξη.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

Κατάλογος Σχημάτων	iii
Κατάλογος Πινάκων	v
Περίληψη	vi
Extended Abstract	vii
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>9</b>
1.1 Κίνητρα.....	9
1.2 Στόχοι.....	11
1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	12
1.4 Συνεισφορά της εργασίας.....	13
1.5 Δομή της Διατριβής.....	14
<b>2 Ρομποτική Πλατφόρμα με Φυγοκεντρικούς Επενεργητές</b>	<b>16</b>
2.1 Φυγοκεντρικοί επενεργητές.....	16
2.2 Περιγραφή μοντέλων ρομποτικής πλατφόρμας.....	17
2.2.1 Πλατφόρμα ενός βαθμού ελευθερίας.....	17
2.2.2 Μοντέλο με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές.....	25
2.2.3 Μοντέλο παραμορφώσιμου σώματος.....	35
<b>3 Περιγραφή Αλγορίθμων Προσομοίωσης</b>	<b>40</b>
3.1 Αλγόριθμοι προσομοίωσης κίνησης της ρομποτικής πλατφόρμας.....	40
3.1.1 Μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας.....	40
3.1.2 Μοντέλο δύο βαθμών ελευθερίας.....	45

3.1.3 Μοντέλο παραμορφώσιμου σώματος.....	49
<b>4 Περιγραφή Αλγορίθμων Σχεδιασμού Τροχιών και Ελέγχου</b>	<b>56</b>
4.1 Αλγόριθμοι σχεδιασμού τροχιάς.....	56
4.1.1 Σχεδιασμός τροχιάς με τετραγωνικά πολυώνυμα.....	56
4.1.2 Σχεδιασμός τροχιάς με κυβικά πολυώνυμα.....	58
4.1.3 Άλλες μέθοδοι σχεδιασμού τροχιάς.....	58
4.2 Αλγόριθμος ελέγχου θέσης της ρομποτικής πλατφόρμας.....	60
<b>5 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Ελέγχου στο Robot Operating System</b>	<b>67</b>
5.1 Λίγα λόγια για το ROS.....	67
5.2 Περιγραφή συνεργασίας αλγορίθμων.....	70
5.3 Προσομοίωση κίνησης και έλεγχος μικρορομποτικής πλατφόρμας .....	71
5.3.1 Ασύγχρονη επενέργηση.....	72
5.3.2 Σύγχρονη επενέργηση.....	84
5.4 Σύγκριση μοντέλων.....	88
<b>6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία</b>	<b>90</b>
6.1 Συμπεράσματα.....	90
6.2 Μελλοντική εργασία.....	92
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>93</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

1.1.1 Έγχυση κυττάρου με χρήση πιπέτας.....	10
1.1.2 Ανάλυση κλίμακας μεγέθους σε τυπική έγχυση κυττάρου.....	10
2.2.1.1 Πλατφόρμα ενός βαθμού ελευθερίας.....	17
2.2.1.2 Δυνάμεις που ασκούνται στην έκκεντρη μάζα κατά την περιστροφή....	19
2.2.1.3 Οριζόντια δύναμη επενέργησης και κατακόρυφη αντίδραση.....	21
2.2.1.4 Τιμή Coulomb και τριβή.....	21
2.2.1.5 Μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση της πλατφόρμας συναρτήσει της γωνίας $\theta$ .....	22
2.2.1.6 Μοντέλο επενεργητή με διακριτά στοιχεία.....	24
2.2.1.7 Φάσεις κινητικής κατάστασης πλατφόρμας βάσει της γωνίας $\theta$ .....	24
2.2.2.1 Μηχανικά μέρη πλατφόρμας με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές.....	25
2.2.2.2 Πλάγια όψη της πλατφόρμας.....	26
2.2.2.3 Κάτω όψη της πλατφόρμας.....	26
2.2.2.4 Τριδιάστατο μοντέλο και κάτοψη της πλατφόρμας δύο βαθμών ελευθερίας.....	27
2.2.2.5 Δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα.....	27
2.2.2.6 Δυνάμεις επενέργησης ως προς τους άξονες των x και των z.....	30
2.2.2.7 Μεγέθυνση δυνάμεων επενέργησης ως προς τους άξονες $x'x$ και $z'z$ .....	31
2.2.2.8 Ροπές επενέργησης ως προς τους άξονες $Ox$ και $Oz$ .....	31
2.2.2.9 Ροπές επενέργησης ως προς τους άξονες $x'x$ και $z'z$ σε μεγέθυνση.....	32
2.2.2.10 Ταχύτητα και μετατόπιση στους άξονες $x'x$ και $y'y$ .....	33
2.2.2.11 Ταχύτητα και μετατόπιση στους άξονες $x'x$ και $y'y$ σε μεγέθυνση.....	33
2.2.2.12 Μετατόπιση πλατφόρμας στο επίπεδο με $\omega_D=1050$ rad/s και $\omega_E=-950$ rad/s, σε χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου.....	34

2.2.2.13 Περιστροφή πλατφόρμας στο επίπεδο με $\omega_D=1050$ rad/s και $\omega_E=-950$ rad/s, σε χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου.....	35
2.2.3.1 Δυνάμεις σημειακών μαζών μοντέλου παραμορφώσιμου σώματος.....	36
2.2.3.2 Μετατόπιση πλατφόρμας στο επίπεδο Oxy.....	37
2.2.3.3 Γραμμικές ταχύτητες πλατφόρμας στον άξονα Ox και στον άξονα Oy και περιστροφική ταχύτητα ως προς τον κατακόρυφο άξονα Oz.....	38
2.2.3.4 Μετατόπιση πλατφόρμας στον άξονα Ox και στον άξονα Oy και περιστροφή ως προς τον κατακόρυφο άξονα Oz.....	39
3.1.1.1 Μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση πλατφόρμας στον άξονα Ox.....	43
3.1.1.2 Μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση πλατφόρμας σε έναν κύκλο λειτουργίας.....	44
4.2.1 Γωνίες ενδιαφέροντος στον μοναδιαίο κύκλο.....	62
4.2.2 Καμπύλη συσχέτισης γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών και γραμμικής ταχύτητας της πλατφόρμας.....	64
4.2.3 Καμπύλη συσχέτισης γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών και περιστροφικής ταχύτητας της πλατφόρμας.....	64
4.2.4 Καμπύλη συσχέτισης γραμμικής ταχύτητας της πλατφόρμας και γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών.....	65
4.2.5 Καμπύλη συσχέτισης περιστροφικής ταχύτητας της πλατφόρμας και γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών.....	65
5.1.1 Αναπαράσταση επικοινωνίας μεταξύ κόμβων με χρήση του rqt_graph του ROS.....	69
5.1.2 Στιγμιότυπο χρήσης του εργαλείου rviz του ROS.....	69
5.3.1.1 Επιθυμητή τροχιά προς παρακολούθηση.....	73
5.3.1.2 Κυβική καμπύλη τετμημένων συναρτήσεων του χρόνου.....	74
5.3.1.3 Κυβική καμπύλη τεταγμένων συναρτήσεων του χρόνου.....	74
5.3.1.4 Πραγματική πορεία της πλατφόρμας στο επίπεδο.....	75
5.3.1.5 Πραγματική μετατόπιση της πλατφόρμας στον άξονα των x.....	76
5.3.1.6 Πραγματική μετατόπιση της πλατφόρμας στον άξονα των y.....	76
5.3.1.7 Γωνία της πλατφόρμας συναρτήσεων του χρόνου.....	77
5.3.1.8 Σχεδιασμένη και πραγματική τροχιά μετατόπισης στο επίπεδο.....	78



5.3.1.9 Επιθυμητή τροχιά προς παρακολούθηση.....	79
5.3.1.10 Κυβική καμπύλη τετμημένων συναρτήσεων του χρόνου.....	80
5.3.1.11 Κυβική καμπύλη τεταγμένων συναρτήσεων του χρόνου.....	80
5.3.1.12 Πραγματική πορεία της πλατφόρμας στο επίπεδο με προς-τα-πίσω κίνηση.....	81
5.3.1.13 Πραγματική μετατόπιση της πλατφόρμας στον άξονα των $x$ .....	82
5.3.1.14 Πραγματική μετατόπιση της πλατφόρμας στον άξονα των $y$ .....	82
5.3.1.15 Γωνία της πλατφόρμας σε σχέση με το χρόνο.....	83
5.3.1.16 Σχεδιασμένη και πραγματική τροχιά μετατόπισης στο επίπεδο.....	83
5.3.2.1 Μετατόπιση πλατφόρμας στο επίπεδο με σύγχρονη επενέργεια.....	85
5.3.2.2 Μετατόπιση πλατφόρμας στον άξονα $Ox$ με σύγχρονη επενέργεια.....	86
5.3.2.3 Μετατόπιση πλατφόρμας στον άξονα $Oy$ με σύγχρονη επενέργεια.....	86
5.3.2.4 Γωνία $\theta$ της πλατφόρμας σε σχέση με τον χρόνο, κατά τη σύγχρονη επενέργεια.....	87
5.3.2.5 Σχεδιασμένη (πράσινη γραμμή) και πραγματική (κόκκινη) τροχιά μετατόπισης στο επίπεδο.....	87

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

2.2.1.1 Τιμές παραμέτρων.....	23
3.1.3.1 Τιμές παραμέτρων.....	43

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Τα μικρορομποτικά συστήματα, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν γίνει αρκετά δημοφιλή στις ρομποτικές εφαρμογές και στη διεθνή έρευνα στον τομέα της Ρομποτικής. Σε περιπτώσεις όπως πρόσβαση/εργασία σε μικρομετρικές διαστάσεις ή άλλες που απαιτούν κινήσεις ακριβείας, συνήθως οι μικρορομποτικοί μηχανισμοί αποτελούν μονόδρομο επιλογής. Με βάση την αναγκαιότητα των μικρορομποτικών μηχανισμών και την εκ-φύσεως δυσκολία στις εφαρμογές των, μοντελοποιήθηκε πριν μερικά χρόνια, ένας προτότυπος μικρορομποτικός μηχανισμός με φυγοκεντρικούς επενεργητές, με σκοπό να επηρεάσει την τάση που υπήρχε προς τους πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. Στην παρούσα εργασία, έχει γίνει μία προσέγγιση μελέτης της φύσης και της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου μικρορομποτικού μηχανισμού κατά τη λειτουργία του, σχεδιασμού τροχιών για την οδήγησή του προς οποιοδήποτε σημείο του επιπέδου και ελέγχου της θέσης του για να επιτύχουν την παρακολούθηση αυτών των τροχιών.

Ο προσομοιωτής κίνησης του εν λόγω μικρορομποτικού μηχανισμού, σχεδιάστηκε με βάση το δυναμικό και το κινηματικό του μοντέλο, λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά που τον διέπουν. Οι τροχιές παράγονται με χρήση τετραγωνικών/κυβικών πολυωνύμων του χρόνου, με σκοπό να δημιουργηθεί μία τροχιά μεταξύ αρχικής και επιθυμητής διάταξης. Ο αλγόριθμος ελέγχου βασίζεται σε συγκεκριμένες γωνίες ενδιαφέροντος, για να βρεθεί ο συντομότερος τρόπος μετάβασης στην επιθυμητή διάταξη και επιλέγοντας αν θα κινηθεί προς τα εμπρός ή προς τα πίσω. Ο νόμος ελέγχου της θέσης του μικρορομποτικού μηχανισμού, εξαρτάται από την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ τρέχουσας και επιθυμητής διάταξης. Το όλο εγχείρημα έχει υλοποιηθεί σε MATLAB και στο περιβάλλον του Robot Operating System, όπου έγιναν και οι δοκιμές των παραπάνω αλγορίθμων.

## EXTENDED ABSTRACT

---

During the last decades, mini/micro-robotic systems have become very popular in robotic applications and international research in Robotics. Micro or mini-robotic mechanisms are sometimes the only available mean, in cases like reaching/working in micrometric dimensions or ones that demand extremely accurate movements. This necessity of mini/micro-robotic mechanisms and the difficulty in their applications led, a few years ago, to designing a mini-robotic mechanism with centrifugal actuators, in order to affect the trend towards piezoelectric ones. In this work, we tried to study and thoroughly understand the nature and the behavior of the specific mini-robotic mechanism during operation, used some methods for trajectory planning to guide it to a desired point on the plane and controlling its position to track these trajectories. A simulator of this mechanism was designed, using the dynamic and kinetic model of the platform and taking all its technical features into consideration. The trajectory is being generated using square/cubic polynomials of time, in order to create a trajectory between the initial and the desired configuration. The control algorithm uses specific angles of interest, so to find the shortest way of reaching the desired configuration, moving either forwards or backwards. The control law depends on the vertical difference between the current configuration and the desired one. The whole project was developed in MATLAB and in Robot Operating System (ROS) and the simulation trials were executed there as well.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

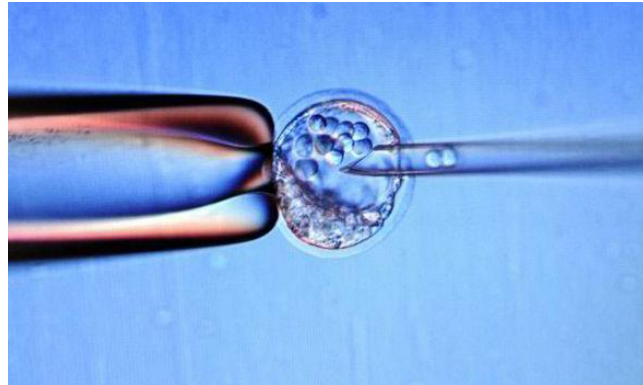
---

- 1.1 Κίνητρα
  - 1.2 Στόχοι
  - 1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση
  - 1.4 Συνεισφορά της εργασίας
  - 1.5 Δομή της διατριβής
- 

### 1.1 Κίνητρα

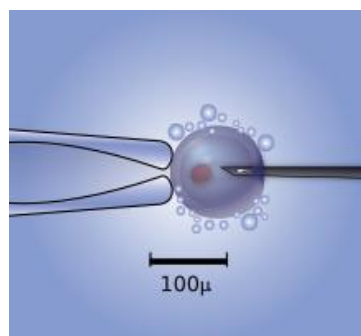
Η σημασία της μικρορομποτικής στα αναρίθμητα προβλήματα και στις ποικίλες δυσκολίες που υπάρχουν ή/και συνεχώς προκύπτουν, είναι εμφανής στις μέρες μας. Η αναγκαιότητα έξυπνων μηχανισμών με δυνατότητα πρόσβασης και κίνησης σε δύσβατους/δυσπρόσιτους χώρους ή σε περιβάλλον μεγάλης επικινδυνότητας, έχει οδηγήσει στη ραγδαία ανάπτυξη του συγκεκριμένου τομέα της ρομποτικής. Μία υποκατηγορία προβλημάτων που υπάγονται στις προαναφερθείσες κατηγορίες, αποτελούν οι μικροχειρισμοί σε βιολογικές επεμβάσεις. Χάρην παραδείγματος, μπορούμε να αναφέρουμε ορισμένες επεξεργασίες ιστών και πρωτεϊνών και εγχύσεις σε κύτταρο, όπου κάνουμε λόγο για περιοχές της κλίμακας μικρομέτρων/νανομέτρων (βλ. Σχήμα 1.1). Η χρήση μικρορομποτικών μηχανισμών στις εν λόγω επεμβάσεις, έχει αυξήσει δραματικά το ποσοστό επιτυχίας τους, σε σύγκριση με τις χειρονακτικές. Με γνώμονα όλα τα παραπάνω, κατασκευάστηκε πρωτότυπη ρομποτική πλατφόρμα

με φυγοκεντρικούς επενεργητές, η οποία δύναται να πραγματοποιεί κινήσεις με ανάλυση μερικών μικρομέτρων (βλ. Σχήμα 1.2). Έτσι, τοποθετώντας μία πιπέτα στο εμπρόσθιο μέρος της ρομποτικής πλατφόρμας, μπορεί να γίνει έγχυση κυττάρου το οποίο έχει αγκιστρωθεί από κάποιο μηχανισμό σταθεροποίησης. Η πιπέτα οδηγείται από ρομποτικό βραχίονα ενός βαθμού ελευθερίας, προσαρτημένο στο σώμα της ρομποτικής πλατφόρμας.



Σχήμα 1.1.1 Έγχυση κυττάρου με χρήση πιπέτας

Πέρα από τα πλεονεκτήματα, τις δυνατότητες και τις εφαρμογές αυτής της ρομποτικής πλατφόρμας, υπάρχει το ζήτημα του ελέγχου ενός τέτοιου μηχανισμού. Το πρόβλημα πηγάζει από την ίδια τη φύση της ρομποτικής πλατφόρμας και τους νόμους που διέπουν την κίνησή της. Βάσει των δυνάμεων επενέργειας και ροπών που ασκούνται σε αυτή κατά τη λειτουργία της, αναπτύσσονται ταχύτητες και κατά επέκταση μετατοπίσεις της πλατφόρμας, που χρειάζονται μελέτη και ανάλυση για να μπορέσει να σχεδιαστεί ένας κατάλληλος αλγόριθμος ελέγχου των γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών.



Σχήμα 1.1.2 Ανάλυση κλίμακας μεγέθους σε τυπική έγχυση κυττάρου

## 1.2 Στόχοι

Στόχος της διατριβής είναι να μελετηθεί σε βάθος η συμπεριφορά της ρομποτικής πλατφόρμας με φυγοκεντρικούς επενεργητές, έτσι ώστε να υλοποιηθεί αποδοτικός αλγόριθμος ελέγχου της ταχύτητας των επενεργητών, ο οποίος να οδηγεί την πλατφόρμα από οποιαδήποτε αρχική διάταξη του επιπέδου  $(x,y,\theta)$  σε οποιαδήποτε επιθυμητή τελική διάταξη-στόχο  $(x,y,\theta)_{des}$ . Για την μελέτη της κίνησης της πλατφόρμας, απαιτείται η μοντελοποίησή της, λαμβάνοντας υπόψη τα διάφορα μεγέθη και τις παραμέτρους που την χαρακτηρίζουν, σχεδιάζοντας ένα τυπικό περιβάλλον προσομοίωσης. Επιπλέον, χρειάζονται αλγόριθμοι σχεδιασμού τροχιάς, η οποία θα συνδέει με μία ακολουθία σημείων τις δύο παραπάνω διατάξεις μεταξύ τους. Ρόλος του αλγορίθμου ελέγχου είναι να διατηρεί την πορεία της ρομποτικής πλατφόρμας επί της προκύπτουσας τροχιάς. Η προβολή της διάταξης της πλατφόρμας γίνεται από τον προσομοιωτή της κίνησής της. Όστε λοιπόν, είναι απαραίτητη η υλοποίηση συνεργατικών αλγορίθμων προσομοίωσης της κίνησης της μικρορομποτικής πλατφόρμας, σχεδιασμού τροχιών για την οδήγηση προς κάποια επιθυμητή διάταξη στο επίπεδο και ελέγχου των ταχυτήτων των φυγοκεντρικών επενεργητών της πλατφόρμας, για παρακολούθηση των ανωτέρω τροχιών. Για την υλοποίηση των αλγορίθμων που αναφέρθηκαν, θα χρησιμοποιηθεί το περιβάλλον του Matlab και του Robot Operating System (ROS) για την υλοποίηση και εποπτεία της εν λόγω συνεργασίας μεταξύ όλων των αλγορίθμων.

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις του προβλήματος, οι στόχοι μπορούν να επιμερισθούν ως εξής:

- Να υλοποιηθεί αλγόριθμος προσομοίωσης της κίνησης της ρομποτικής πλατφόρμας με φυγοκεντρικούς επενεργητές (σε Matlab και ROS).
- Να αναπτυχθεί αλγόριθμος σχεδιασμού τροχιάς από μία διάταξη σε άλλη (σε ROS).
- Να σχεδιαστεί αλγόριθμος ελέγχου των ταχυτήτων των φυγοκεντρικών επενεργητών, για παρακολούθηση οποιασδήποτε τροχιάς (σε ROS).

### 1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το 2006 σχεδιάστηκε και προτάθηκε μικρορομποτική πλατφόρμα με φυγοκεντρικούς επενεργητές, η οποία μοντελοποιήθηκε και μελετήθηκε εκτενώς από τον Π. Βαρθολομαίο στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής [12]. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα, είναι ικανή να πραγματοποιεί κίνηση με ανάλυση καλύτερη από  $1\mu\text{m}$  και προσαρτώντας έναν βραχίονα ενός βαθμού ελευθερίας, δύναται να χρησιμοποιηθεί για βιολογικές ή ιατρικές επεμβάσεις (όπως έγχυση κυττάρου και άλλες). Επίσης, τα άλλα δύο μοντέλα μικρορομποτικής πλατφόρμας, ενός βαθμού ελευθερίας και κεντρομόλων δυνάμεων, σχεδιάστηκαν και μοντελοποιήθηκαν από τον ίδιο [6, 7]. Αυτές, μεταξύ άλλων, είναι οι δημοφιλέστερες και σημαντικότερες έρευνες του ιδίου, στο καινοτόμο αυτό πεδίο της μικρορομποτικής και οι εν λόγω πλατφόρμες εισήγαγαν έναν πρωτότυπο, για την εποχή εκείνη, τρόπο επενέργειας. Ανάλογες έρευνες έγιναν νωρίτερα, στα πλαίσια του έργου MiCRoN, από τον W. Driesen και τους συνεργάτες του, για αυτοματοποιημένη σύνθεση διεργασιών από ομάδες μικρορομποτικών συστημάτων, με εφαρμογές στην έγχυση κυττάρου [5]. Λοιποί μικρορομποτικοί μηχανισμοί σχεδιάστηκαν αργότερα, εφοδιασμένοι με άλλου είδους κινητήρων δονήσεων, νόμους κίνησης και εφαρμογές, όπως το Kilobot και το Khepera. Το πρώτο σχεδιάστηκε και μοντελοποιήθηκε το 2012, από τους M. Rubenstein, C. Ahler και R. Nagpal, ως ένα χαμηλού κόστους και κλιμακώσιμο μοντέλο για μαζική παραγωγή και εκτέλεση συνεργατικών διεργασιών [11]. Το δεύτερο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε το 1996 στο EPFL (Λωζάνη,Ελβετία), από τον E. Franzl και τους συνεργάτες του και μέχρι σήμερα έχει απασχολήσει χιλιάδες ερευνητές παγκοσμίως [1]. Μοντελοποίηση κίνησης αντίστοιχων ρομποτικών μηχανισμών, έγινε το 2009 από τους S. Jatsun, V. Dyshenko, A. Yatsun και A. Malchikov, τα αποκαλούμενα τα Sliding/Hopping Robot και αποτελούν δυναμικά μοντέλα αναπήδησης και ολίσθησης [9].

Σε ότι αφορά τον σχεδιασμό τροχιών και τον έλεγχο τροχοφόρων μηχανικών συστημάτων με μη-ολόνομους περιορισμούς, αξίζει να αναφερθούν οι A. De Luca και G. Oriolo, που ασχολήθηκαν με την σταθερότητα και την ελεξιμότητα



τέτοιων συστημάτων με καινοτόμες ιδέες και μεθόδους (όπως για παράδειγμα τα Lie brackets) [2, 3]. Στον έλεγχο μικρορομποτικών μηχανισμών με φυγοκεντρικούς επενεργητές, είναι αξιοσημείωτο το ερευνητικό έργο των Π. Βαρθολομαίου, Ε. Παπαδόπουλου και Κ. Βλάχου, όπου πέραν της σχεδίασης πρωτότυπης μικρορομποτικής πλατφόρμας αυτού του τύπου, ασχολήθηκαν και μελέτησαν την κίνηση και τον έλεγχο της και πραγματοποίησαν πειραματικές δοκιμές με τη χρήση μικροσκοπίου [12]. Επίσης, αλγόριθμοι ελέγχου ανοικτού και κλειστού βρόχου για την ίδια μικρορομποτική πλατφόρμα, υλοποιήθηκαν και δοκιμάστηκαν από τους Κ. Βλάχο, Δ. Παπαδημητρίου και Ε. Παπαδόπουλο το 2015 [14]. Στο πεδίο των μικροχειρισμών κυττάτου, με υποκείμενο το MiCRoN, έγινε ακόμη μία αξιολογη έρευνα από τον Π. Βαρθολομαίο και άλλους το 2006 [8].

Εφαρμογές της άλγεβρας Lie στον έλεγχο τροχοφόρων ρομπότ, πραγματοποιήθηκαν από τους P. Coelho και U. Nunes το 2003, με σχεδιασμό και δοκιμές του αλγορίθμου ελέγχου σε διάφορα σενάρια παρακολούθησης δρόμου [4]. Ανάλογου ενδιαφέροντος έρευνα, πραγματοποίησαν οι F. Demirbas και M. Kalyoncu για παρακολούθηση τροχιάς από τροχοφόρο διαφορικού τύπου, χρησιμοποιώντας έναν PID ελεγκτή κατά τις προσομοιώσεις και κάνοντας μία μελέτη ευστάθειας Lyapunov [16]. Παρόμοια, είναι και η συμβολή των J.V. Mendez Bethencourt, Q. Ling, A. Valera Fernandez, με τον σχεδιασμό αλγορίθμου ελέγχου και μία τακτική για παρακολούθηση τροχιάς, χρησιμοποιώντας την καμπυλότητα μεταξύ της τρέχουσας διάταξης και της επιθυμητής και με την διεξαγωγή δοκιμών προς επαλήθευση της ορθότητάς του [10].

#### 1.4 Συνεισφορά της εργασίας

Η παρούσα εργασία, μεταξύ άλλων, έχει τα εξής σημεία συνεισφοράς:

Υλοποιήθηκαν για πρώτη φορά, συνεργατικοί αλγόριθμοι στο περιβάλλον του Robot Operating System, οι οποίοι εκμεταλλεύονται του τρόπου λειτουργίας και των εργαλείων που προσφέρει, είναι ικανοί να σχεδιάσουν δρόμους, να καθοδηγήσουν συγκεκριμένη μικρορομποτική πλατφόρμα φυγοκεντρικών

επενεργητών βάσει αυτών και να προσομοιώσουν το δυναμικό και κινηματικό μοντέλο της σε πραγματικό χρόνο, και κατά επέκταση την κίνησή της στο επίπεδο.

Σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε αλγόριθμος ελέγχου των γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών της πλατφόρμας, εξαρτώμενος μόνο από την διαφορά των τεταγμένων μεταξύ τρέχουσας και επιθυμητής διάταξης, αξιοποιώντας ορισμένες γωνίες ενδιαφέροντος και την προς τα πίσω κίνηση. Επίσης, για πρώτη φορά υπολογίστηκαν και βρέθηκαν σχέσεις εξάρτησης των γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών και της γραμμικής και περιστροφικής ταχύτητας της πλατφόρμας, μέσα από αναρίθμητες δοκιμές και χρονοβόρες διαδικασίες. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν για πρώτη φορά, δοκιμές προσομοίωσης στο περιβάλλον του ROS, με σύγχρονη και ασύγχρονη επενέργηση της πλατφόρμας και πραγματοποιήθηκε σύγκριση των δύο ειδών επενέργησης με αποτελέσματα που επιβεβαίωσαν την θεωρία περί αυτών.

## 1.5 Δομή της διατριβής

Η διατριβή αποτελείται από έξι κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας, όπου περιγράφεται η δομή της, οι γενικοί στόχοι της, σχετική έρευνα στο αντικείμενο από τρίτους και η συνεισφορά της διατριβής. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται το υποκείμενο της έρευνας, δηλαδή η ρομποτική πλατφόρμα με τους φυγοκεντρικούς επενεργητές, το δυναμικό και το κινηματικό της μοντέλο. Το θεωρητικό υπόβαθρο για να επιτευχθούν οι στόχοι της εργασίας, αναλύεται στο τρίτο και στο τέταρτο κεφάλαιο. Δηλαδή παρατίθενται, οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν, τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και οι υπολογισμοί που έγιναν, για να υλοποιηθούν οι αλγόριθμοι προσομοίωσης στο τρίτο κεφάλαιο και οι αλγόριθμοι οδήγησης και ελέγχου στο τέταρτο. Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μία εισαγωγή στο περιβάλλον του Robot Operating System (ROS), για να γίνουν αντιληπτά τα κίνητρα που οδήγησαν στην επιλογή του, για την υλοποίηση των αλγορίθμων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος συνεργασίας μεταξύ των αλγορίθμων σχεδιασμού τροχιών, ελέγχου και

προσομοίωσης για την οδήγηση της ρομποτικής πλατφόρμας, με χρήση εργαλείων του ROS. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ακόμη, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις στο ROS. Τέλος, το έκτο κεφάλαιο αποτελείται από τα συμπεράσματα της έρευνας, συμπεριλαμβανομένης της μελλοντικής εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΜΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥΣ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΕΣ

---

2.1 Φυγοκεντρικοί επενεργητές

2.2 Περιγραφή μοντέλων ρομποτικής πλατφόρμας

---

#### 2.1 Φυγοκεντρικοί επενεργητές

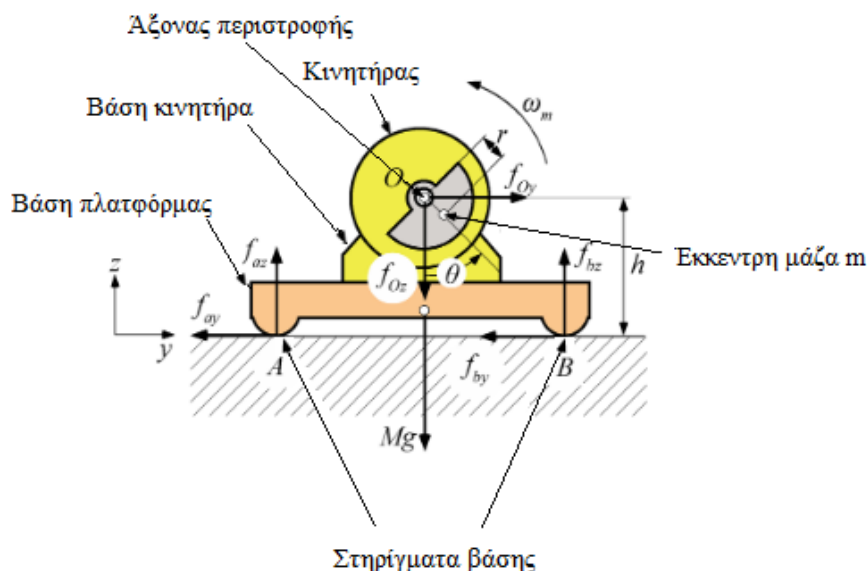
Έως τη δεκαετία κατασκευής της ρομποτικής πλατφόρμας, που αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διατριβής, οι επενεργητές που υπήρχαν είχαν αρκετές δυσλειτουργίες και ήταν χρηματικά δαπανηροί. Αναζητώντας κάτι που θα επέλυε τέτοιου είδους προβλήματα, επιλέχθηκαν οι φυγοκεντρικοί επενεργητές, δηλαδή συγκεκριμένοι μηχανισμοί επενέργειας των οποίων η κίνηση οφείλεται σε φυγοκεντρικές δυνάμεις. Οι εν λόγω δυνάμεις πηγάζουν από την περιστροφή της έκκεντρης μάζας, η οποία είναι τοποθετημένη σε ελάχιστη απόσταση από τον άξονα περιστροφής. Παρά τις καινοτομίες και τα πλεονεκτήματα που φέρει αυτή η επιλογή, έναντι των συνήθων συστημάτων επενέργειας, επιφέρει και ανεπιθύμητες μεταβολές στην κίνηση. Η πολυπλοκότητα αυτών των κινήσεων, που οφείλονται στις φυγοκεντρικές δυνάμεις του αδρανειακού μηχανισμού, κάνει απαραίτητη την αναλυτικότερη μελέτη του.

## 2.2 Περιγραφή μοντέλων ρομποτικής πλατφόρμας

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η δομή του μηχανισμού κίνησης και οι φυσικοί νόμοι που τον διέπουν, έχει γίνει ένας διαχωρισμός με βάση το πλήθος των επενεργητών που χρησιμοποιεί και το σώμα που έχει η εκάστοτε ρομποτική πλατφόρμα. Έτσι, θα περιγραφούν η ρομποτική πλατφόρμα με έναν βαθμό ελευθερίας, η πλατφόρμα στερεού σώματος με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές και η αντίστοιχη εκδοχή παραμορφώσιμου σώματος.

### 2.2.1 Πλατφόρμα ενός βαθμού ελευθερίας

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η απλούστερη μορφή που μπορεί να έχει η ρομποτική πλατφόρμα, δηλαδή με έναν φυγοκεντρικό επενεργητή. Τα μέρη που την απαρτίζουν είναι η βάση της, στηριζόμενη σε τέσσερα στηρίγματα A, A', B και B', ο κινητήρας που είναι προσαρτημένος επάνω σε μία δοκό στήριξης, στερεωμένη στη βάση της και η έκκεντρη μάζα που φέρει ο άξονας περιστροφής του κινητήρα. Θεωρούμε την απλοποιημένη μορφή στις δύο διαστάσεις, λόγω γεωμετρικών συμμετριών της πλατφόρμας και του επιπέδου κίνησης του έκκεντρου (βλ. Σχήμα 2.2.1).



Σχήμα 2.2.1.1 Πλατφόρμα ενός βαθμού ελευθερίας

Η έκκεντρη μάζα περιστρέφεται γύρω από τον άξονα περιστροφής του κινητήρα, στο επίπεδο  $Oyz$  και αυτός είναι ο βαθμός ελευθερίας της πλατφόρμας. Η ταχύτητα περιστροφής της μάζας  $m$ , συμβολίζεται με  $\omega$  και αν είναι σταθερή ή όχι, δεν υπάρχει ή υπάρχει επιτόχια επιτάχυνση, κατά αντιστοιχία.

Στην πρώτη περίπτωση, το έκκεντρο κινείται κυκλικά και ομαλά. Τότε, το άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτή κατά την ακινησία, δηλαδή του βάρους και της αντίστασης της ράβδου (ή του δίσκου), ισούται με την κεντρομόλο. Όστε, όταν η έκκεντρη μάζα εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση, ισχύει:

$$f_c = T + mg \quad (2.2.1.1),$$

όπου  $f_c$  η κεντρομόλος δύναμη,  $T$  η αντίσταση της ράβδου (ή του δίσκου) και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας. Αναλύοντας τις δυνάμεις, στις αντίστοιχες συνιστώσες των, στους άξονες  $y$  και  $z$  και συμβολίζοντας με  $\theta$ , τη γωνία που σχηματίζει η έκκεντρη μάζα με τον κατακόρυφο άξονα  $z$ , έχουμε ότι:

$$f_c = [-m\omega^2 \sin\theta \quad m\omega^2 \cos\theta]$$

$$T = [T_y \quad T_z]$$

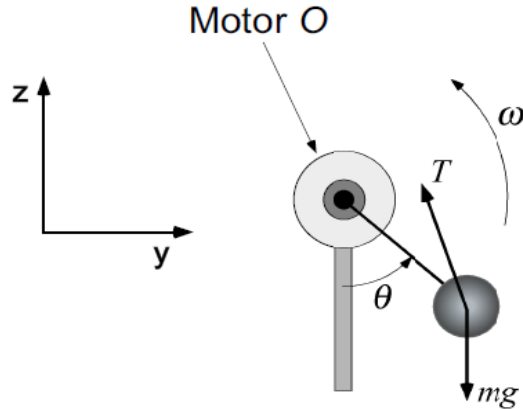
$$mg = [0 \quad -mg]$$

Άρα, λόγω της σχέσης (2.2.1.1), λαμβάνουμε:

$$T_y = -m\omega^2 \sin\theta$$

$$T_z = mg + m\omega^2 \cos\theta,$$

όπου  $r$  η απόσταση του έκκεντρου από το κέντρο,  $O$ , του κινητήρα. Οι ανωτέρω δυνάμεις μεταφέρονται στην πλατφόρμα στο σημείο  $O$ . Σημειώνεται ότι τα πρόσημα σε κάθε συνιστώσα προκύπτουν με βάση τον προσανατολισμό που έχουμε ορίσει ως θετικό (βλ. Σχήμα 2.2.1.1 ή Σχήμα 2.2.1.2).



Σχήμα 2.2.1.2 Δυνάμεις που ασκούνται στην έκκεντρη μάζα κατά την περιστροφή

Συνεπώς, η δύναμη που ασκείται στον κινητήρα είναι  $-T$  και αναλύεται επίσης σε δύο συνιστώσες, τις:

$$F_{Oy} = m\omega^2 \sin\theta \quad (2.2.1.2)$$

$$F_{Oz} = -mg - m\omega^2 \cos\theta \quad (2.2.1.3)$$

Οι δυνάμεις αυτές είναι οι λεγόμενες φυγοκεντρικές δυνάμεις επενέργησης.

Η γωνία επενέργησης  $\theta$  ορίζει τη γωνιακή θέση της μάζας του έκκεντρου, ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Θεωρούμε ότι όταν το έκκεντρο διαγράψει γωνία  $360^\circ$ , έχει πραγματοποιήσει έναν κύκλο λειτουργίας.

Η ροπή λόγω της  $m$  θεωρείται αμελητέα. Η κίνηση της πλατφόρμας κατά μήκος των αξόνων  $y'y$  και  $z'z$ , περιγράφεται κατά αντιστοιχία από τις εξισώσεις:

$$M \ddot{y} = F_{Oy} - F_{fr} \quad (2.2.1.4)$$

$$F_{Az} + F_{Bz} - Mg + F_{Oz} = 0 \quad (2.2.1.5),$$

όπου  $M$  η μάζα της πλατφόρμας,  $F_{fr}$  είναι η δύναμη της τριβής από την πρόσφυση στην επιφάνεια,  $\ddot{y}$  η επιτάχυνση της πλατφόρμας και  $F_{Az}$ ,  $F_{Bz}$ , οι κατακόρυφες δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα από τα στηρίγματα. Απαλείφοντας τη δύναμη ιξώδους, η  $F_{fr}$  προκύπτει κατά περίπτωση με βάση την παρακάτω κλαδική συνάρτηση:

$$F_{fr} := \begin{cases} F_C \operatorname{sgn}(\dot{y}), & \dot{y} \neq 0 \\ F_{Oy}, & \|F_{Oy}\| < F_C, \dot{y} = 0, \ddot{y} = 0 \\ F_C \operatorname{sgn}(F_{Oy}), & \|F_{Oy}\| > F_C, \dot{y} = 0, \ddot{y} \neq 0 \end{cases} \quad (2.2.1.6),$$

όπου  $\operatorname{sgn}(x)$  η συνάρτηση προσήμου της  $x$ ,  $\dot{y}$  η ταχύτητα της πλατφόρμας και  $F_C$  η μέγιστη δυνατή τριβή, που μπορεί να υπάρξει για δεδομένη κατακόρυφη αντίδραση (μέγεθος τριβής Coulomb), η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$F_C = \mu (F_{Az} + F_{Bz}) = \mu (Mg - F_{Oz}) \quad (2.2.1.7),$$

Με  $\mu$  στην παραπάνω εξίσωση, συμβολίζουμε τον συντελεστή τριβής. Δε θα πρέπει να γίνεται σύγχυση της κεντρομόλου  $f_c$  με την  $F_C$ . Με βάση τα παραπάνω, οι δυνάμεις τριβής στα στηρίγματα A και B, ικανοποιούν τις σχέσεις(βλ. Σχήμα 2.2.1.1):

$$F_{Ay} \leq \mu F_{Az}$$

$$F_{By} \leq \mu F_{Bz}$$

Η κατακόρυφη αντίδραση δίνεται από τη σχέση:

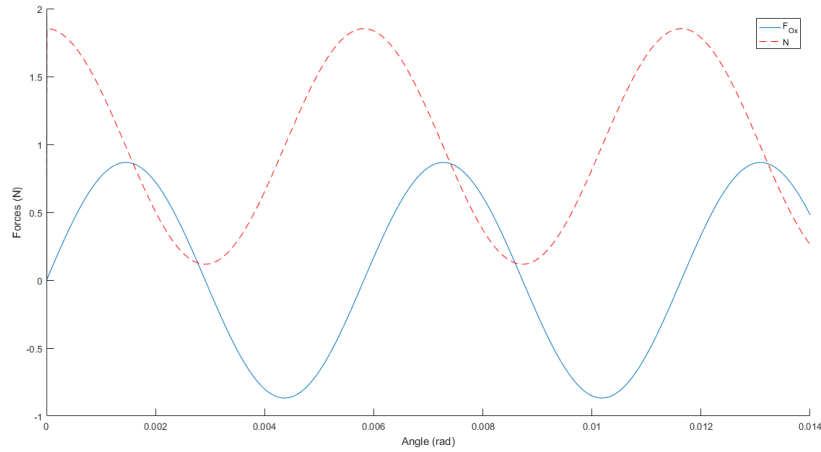
$$N = Mg - F_{Oz} \quad (2.2.1.8)$$

Όστε, η σχέση (2.2.1.7), γράφεται ως:

$$F_C = \mu N \quad (2.2.1.9)$$

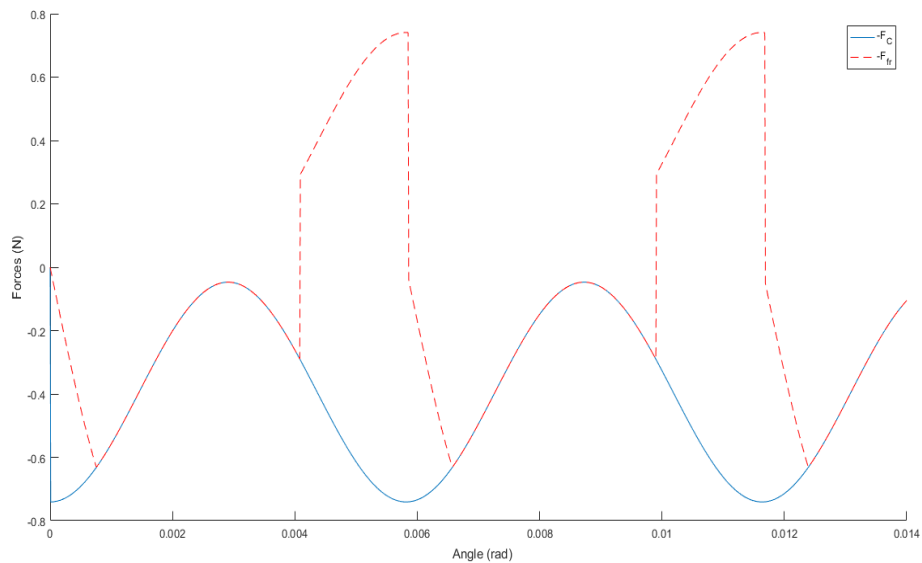
Στην περίπτωση που το έκκεντρο εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση, η οριζόντια δύναμη επενέργειας και η κατακόρυφη αντίδραση σε σχέση με τη γωνία  $\theta$  που διαγράφει το έκκεντρο, περιγράφονται από το Σχήμα 2.2.1.3.





Σχήμα 2.2.1.3 Οριζόντια δύναμη επενέργησης (συνεχής) και κατακόρυφη αντίδραση (διακεκομμένη)

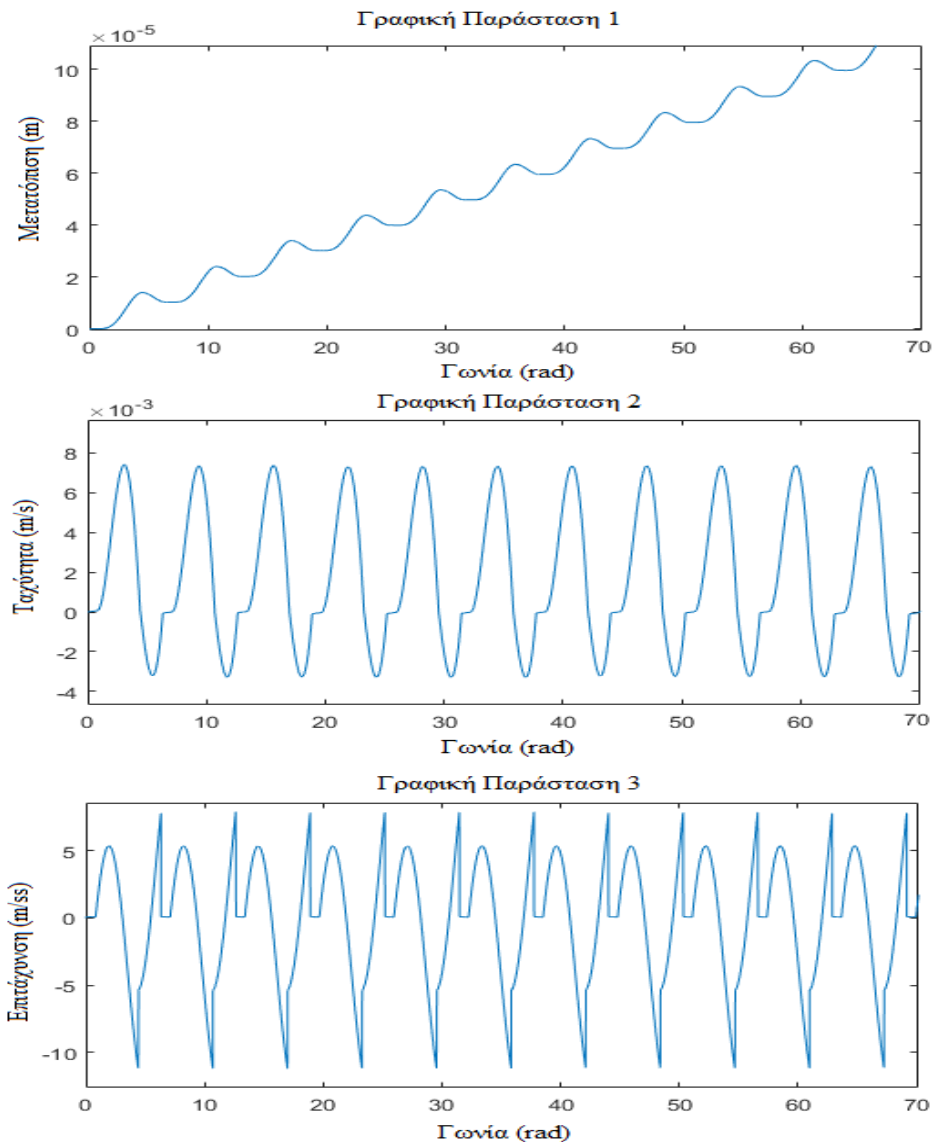
Στην ίδια περίπτωση, η τιμή Coulomb και η τριβή σε σχέση με τη γωνία  $\theta$  που διαγράφει το έκκεντρο, φαίνονται στο Σχήμα 2.2.1.4.



Σχήμα 2.2.1.4 Τιμή Coulomb (συνεχής) και τριβή (διακεκομμένη)

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο προσομοίωσης για την πλατφόρμα ενός βαθμού ελευθερίας, για ορισμένο πλήθος κύκλων λειτουργίας (όπως αυτοί ορίστηκαν) λαμβάνουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις του

Σχήματος 2.2.1.5. Η Γραφική Παράσταση 1, περιγράφει τη μετατόπιση της πλατφόρμας σε σχέση με τη γωνία  $\theta$ , που έχει διαγράψει το έκκεντρο. Στη Γραφική Παράσταση 2, παριστάνεται η ταχύτητα της πλατφόρμας σε σχέση με τη γωνία  $\theta$ . Τέλος, στη Γραφική Παράσταση 3, απεικονίζεται η επιτάχυνση της πλατφόρμας σε σχέση με τη γωνία  $\theta$ .



Σχήμα 2.2.1.5 Μετατόπιση (Γραφική Παράσταση 1), ταχύτητα (Γραφική Παράσταση 2) και επιτάχυνση (Γραφική Παράσταση 3) πλατφόρμας συναρτήσει της γωνίας  $\theta$

Το δυναμικό μοντέλο του συστήματος επενέργησης, στο οποίο οφείλονται και οι δυνάμεις επενέργησης, περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση κίνησης:

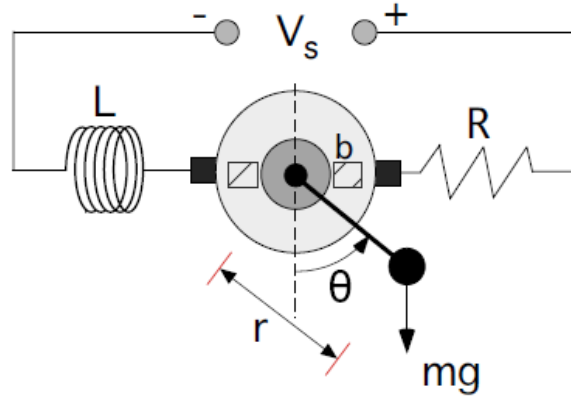
$$\ddot{\theta} = -\frac{bR+k_t^2}{JR}\dot{\theta} - \frac{c\operatorname{sgn}(\dot{\theta})}{J} - \frac{mgr\sin(\theta)}{J} + \frac{k_t}{JR}V_s \quad (2.2.1.10),$$

όπου  $b$  η ιξώδης τριβή,  $R$  η αντίσταση στα τυλίγματα του δρομέα του κινητήρα,  $k_t$  η σταθερά ροπής,  $J$  η μαζική ροπή αδράνειας του δρομέα και του έκκεντρου,  $c$  η τριβή Coulomb και  $V_s$  η τάση του ρεύματος, που δίνεται ως είσοδος στον επενεργητή. Η αυτεπαγωγή  $L$  στην παραπάνω εξίσωση, θεωρείται αμελητέα. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων, έχουν βρεθεί με εκτενή πειραματική διαδικασία και απεικονίζονται στον Πίνακα 2.2.1.1.

Πίνακας 2.2.1.1 Τιμές παραμέτρων

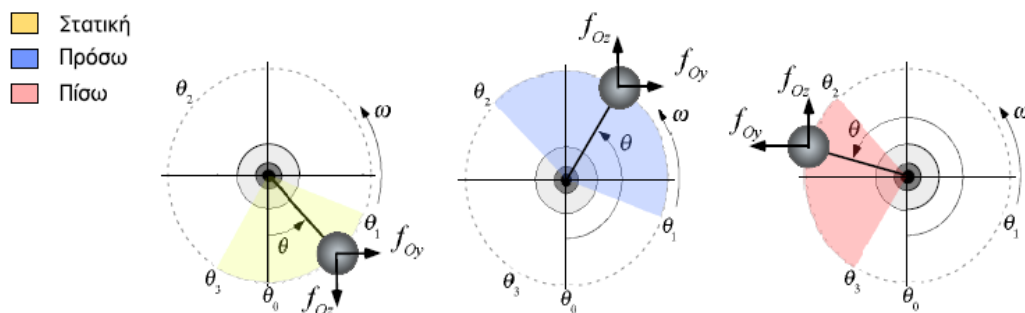
Παράμετρος	Τιμές
$b$	$3.65 \cdot 10^{-9}$ Ns/m
$R$	10 Ω
$k_t$	$1.91 \cdot 10^{-4}$ N/A
$J$	$7.6 \cdot 10^{-4}$ Kgm <sup>2</sup> /rad
$c$	$17.2 \cdot 10^{-6}$
$V_s$	1 V
$m$	0.00021 Kg
$r$	0.00177 m

Το μοντέλο του επενεργητή, φαίνεται με διακριτά στοιχεία στο Σχήμα 2.2.1.6.



Σχήμα 2.2.1.6 Μοντέλο επενεργητή με διακριτά στοιχεία

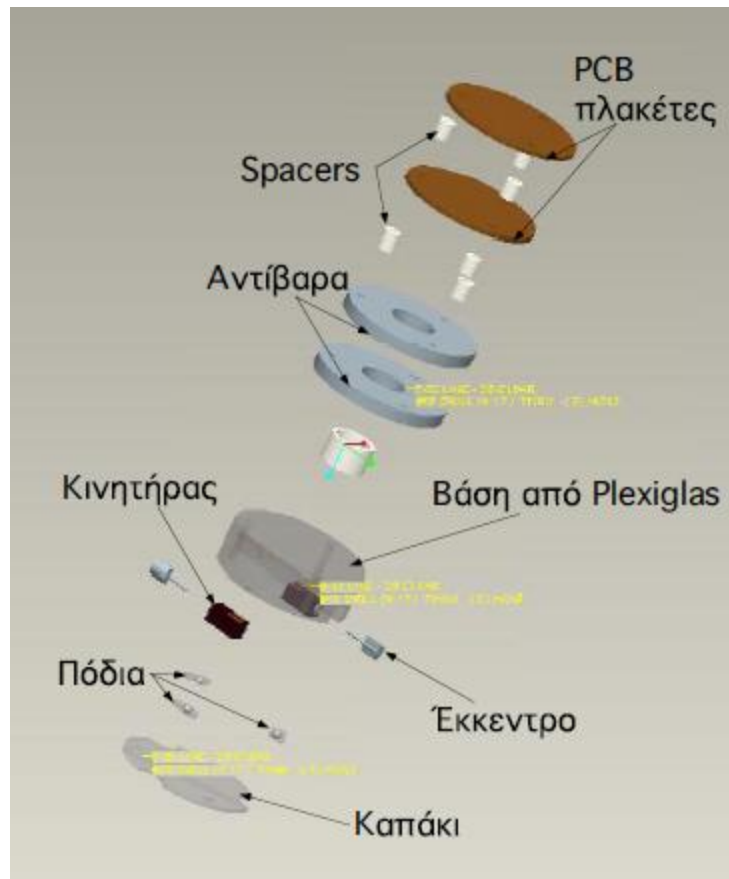
Επιπλέον, το Σχήμα 2.2.1.7 παρουσιάζει σαφέστερα τη λειτουργία του κινητήρα ανάλογα με τη γωνία που έχει διαγράψει το έκκεντρο. Η πρώτη από τις εικονιζόμενες φάσεις αποτελεί τη φάση της ακινησίας, κατά την οποία η πλατφόρμα δεν έχει αρχίσει ακόμη να κινείται. Η δεύτερη εικονιζόμενη φάση αφορά την προς τα εμπρός κίνηση της πλατφόρμας, ενώ η τρίτη την προς τα πίσω.



Σχήμα 2.2.1.7 Φάσεις κινητικής κατάστασης πλατφόρμας βάσει της γωνίας  $\theta$

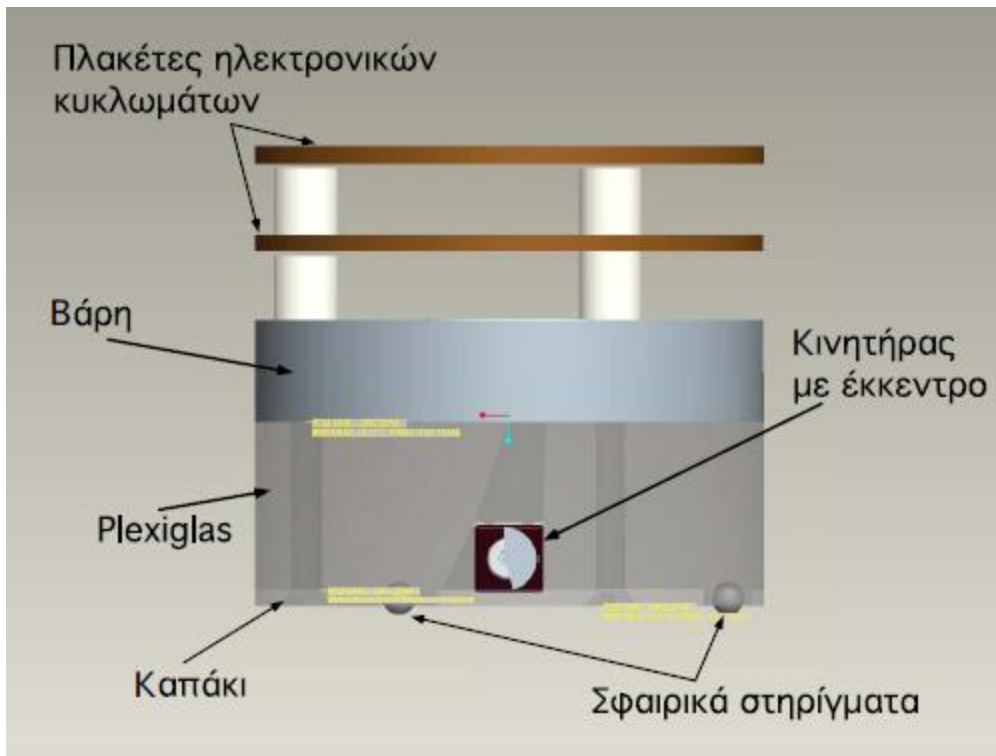
### 2.2.2 Μοντέλο με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές

Με βάση όσα διατυπώσαμε για το μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας, είμαστε σε θέση να περιγράψουμε με σαφήνεια, το αντίστοιχο μοντέλο πλατφόρμας με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές. Τα μηχανικά μέρη που απαρτίζουν την πλατφόρμα φαίνονται στο Σχήμα 2.2.2.1. Η πλαϊνή και η κάτω πλευρές της πλατφόρμας, απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2.2.2 και στο Σχήμα 2.2.2.3, αντίστοιχα.

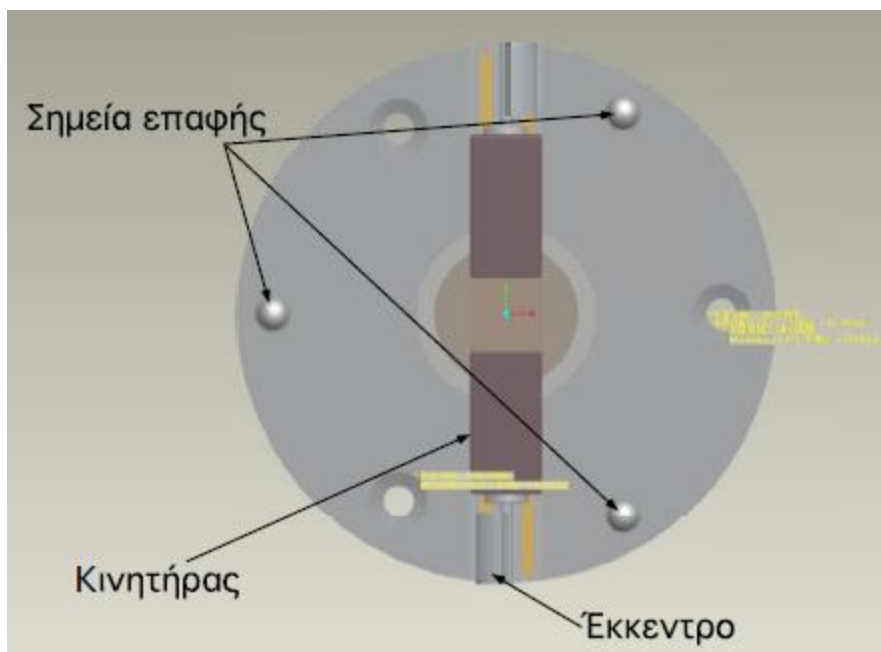


Σχήμα 2.2.2.1 Μηχανικά μέρη πλατφόρμας με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές

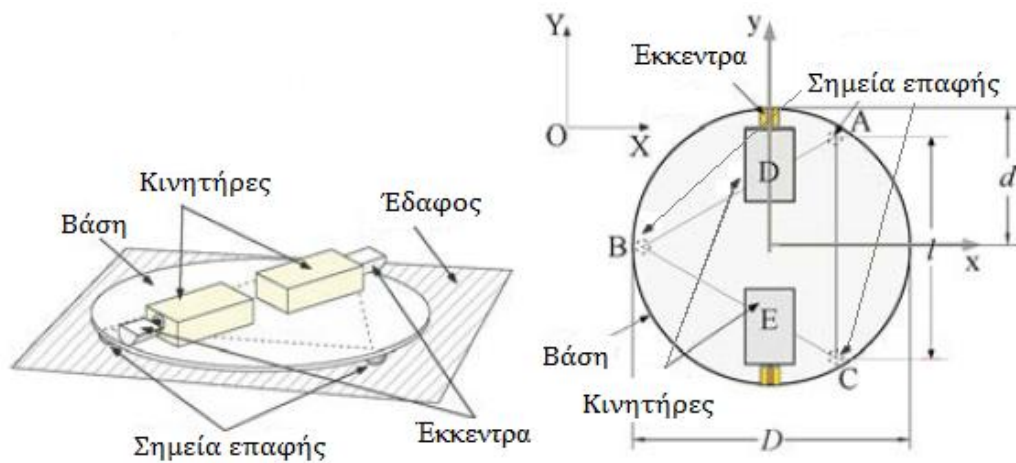
Για όσα αναλυθούν παρακάτω, θα χρησιμοποιηθεί η απλούστερη μορφή του μοντέλου σε κάτοψη, όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.2.2.4. Επιλέγεται αυτή η προσέγγιση για να γίνουν καλύτερα αντιληπτές από τον αναγνώστη, η επενέργεια των δυνάμεων στην πλατφόρμα και κατά επέκταση η κίνησή της στο επίπεδο  $Oxy$  (βλ. Σχήμα 2.2.2.5). Άλλωστε, η μελέτη, ο σχεδιασμός και ο έλεγχος αυτής της κίνησης, αποτελούν επιμέρους στόχους της παρούσας εργασίας.



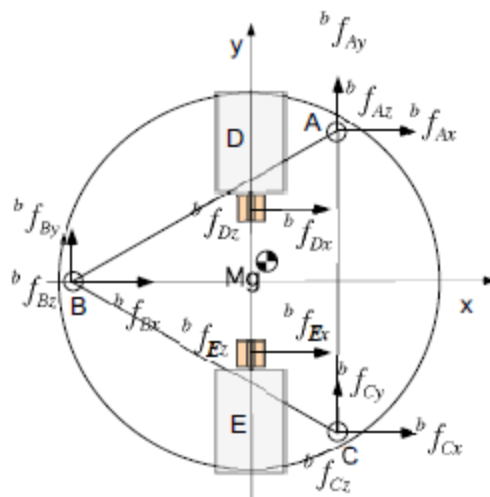
Σχήμα 2.2.2.2 Πλάγια όψη της πλατφόρμας



Σχήμα 2.2.2.3 Κάτω όψη της πλατφόρμας



Σχήμα 2.2.2.4 Τριδιάστατο μοντέλο και κάτοψη της πλατφόρμας δύο βαθμών ελευθερίας



Σχήμα 2.2.2.5 Δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα

Αρχικά, ας παρατηρηθεί η σύμβαση που έχει γίνει για τη θετική φορά των αξόνων και η διαφοροποίηση στο συμβολισμό, για να αποφευχθεί οποιαδήποτε σύγχυση με όσα αναφέρθηκαν στην πλατφόρμα ενός βαθμού ελευθερίας. Στο Σχήμα 2.2.2.5 φαίνεται η κάτοψη της πλατφόρμας δύο φυγοκεντρικών επενεργητών, όπου απεικονίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα. Οι δυνάμεις επενέργειας αναλύονται στους άξονες  $x'$  και  $z'$ , με βάση όσα είπαμε στην ενότητα 2.2.1, ως εξής:

$$F_{Dx} = m_D r_D \omega_D^2 \sin \theta_D \quad (2.2.2.1)$$

$$F_{Ex} = -m_E r_E \omega_E^2 \sin \theta_E \quad (2.2.2.2)$$

$$F_{Dz} = -m_D g - m_D r_D \omega_D^2 \cos \theta_D \quad (2.2.2.3)$$

$$F_{Ez} = -m_E g - m_E r_E \omega_E^2 \cos \theta_E \quad (2.2.2.4)$$

Το αρνητικό πρόσημο στην εξίσωση (2.2.2.2), οφείλεται στο ότι ο κινητήρας είναι τοποθετημένος ανάποδα από ότι στην πλατφόρμα ενός βαθμού ελευθερίας (βλ. κινητήρα E στο Σχήμα 2.2.2.5 σε σχέση με αυτόν στο Σχήμα 2.2.1.1). Οι αντίστοιχες ροπές στον άξονα  $y'y$  είναι:

$$M_{Dy} = -m_D g r_D \omega_D^2 \sin \theta_D \quad (2.2.2.5)$$

$$M_{Ey} = m_E g r_E \omega_E^2 \sin \theta_E \quad (2.2.2.6)$$

Δεδομένου ότι η μάζα του έκκεντρου είναι ίδια και στους δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές και σε ίση απόσταση από τον άξονα, έχουμε ότι  $m_D = m_E$  και  $r_D = r_E$ . Συνεπώς οι παραπάνω σχέσεις, μπορούν να γραφούν και απλούστερα, χωρίς τους δείκτες στις ποσότητες αυτές.

Η κίνηση της πλατφόρμας χωρίζεται σε απλή μεταφορική, απλή περιστροφική και σύνθετη. Οι πρώτες δύο περιπτώσεις κίνησης, συναντώνται όταν η πλατφόρμα λειτουργεί υπό τη λεγόμενη σύγχρονη επενέργηση. Κατά τη σύγχρονη επενέργηση, οι γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών D και E είναι ίσες ή αντίθετες και σταθερές και τα έκκεντρά τους βρίσκονται σε φάση. Η απλή μεταφορική κίνηση επιτυγχάνεται με  $\omega_D = -\omega_E$ , ενώ η απλή περιστροφική με  $\omega_D = \omega_E$ . Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, κάνουμε λόγο για ασύγχρονη επενέργηση και η πλατφόρμα εκτελεί σύνθετη κίνηση στο επίπεδο Oxy. Κατά την ασύγχρονη επενέργηση οι γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών D και E διαφέρουν, δηλαδή  $\omega_D \neq \omega_E$ . Τότε, είναι δυνατή η μετατόπιση της πλατφόρμας σε οποιαδήποτε διάταξη  $(x, y, \theta)_d$ , αποφεύγοντας την ακολουθία κινήσεων υπό σύγχρονη επενέργηση:

(α) Απλή περιστροφική έως ότου η πλατφόρμα "βλέπει" το σημείο  $(x_d, y_d)$

(β) Απλή μεταφορική έως ότου η πλατφόρμα φθάσει στο σημείο  $(x_d, y_d)$



(γ) Απλή περιστροφική έως ότου η πλατφόρμα λάβει τον επιθυμητό προσανατολισμό  $\theta_d$  και κατά επέκταση την επιθυμητή διάταξη  $(x,y,\theta)_d$ .

Όστε η πλατφόρμα δύναται να διαγράψει μία καμπύλη μετατόπισης στο επίπεδο  $Oxy$ , έναντι δύο περιστροφών ως προς τον κατακόρυφο άξονα  $z'z$  και μίας ευθείας πορείας, η οποία την οδηγεί στην επιθυμητή διάταξη. Βασικό πλεονέκτημα της ασύγχρονης επενέργησης, είναι η αποφυγή διαρκών διορθώσεων λόγω παρασιτικών μετατοπίσεων που απαιτούνται, για την προαναφερθείσα ακολουθία κινήσεων της σύγχρονης και κατά επέκταση η εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας. Επιπλέον, η κίνηση δύο βαθμών ελευθερίας, έναντι της μονοδιάστατης της σύγχρονης επενέργησης, προσφέρει πληθώρα δυνατοτήτων και ελευθερία κίνησης στην πλατφόρμα, εφόσον τα παρέχει ο χώρος εργασίας της. Εν τούτοις, η ασύγχρονη επενέργηση εγκυμονεί προβλήματα και δυσκολίες, που οφείλονται στην πολυπλοκότητα της φύσης της πλατφόρμας και της κίνησής της. Τα σοβαρότερα εξ αυτών είναι η μικρότερη ακρίβεια μεν, σε σχέση με την σύγχρονη επενέργηση, η οποία είναι ανεκτή δε, για μικροεφαρμογές απαιτήσεων της τάξης των 50-100  $\mu m$  και οι παρασιτικές μετατοπίσεις και περιστροφές στον άξονα  $y'y$  και περί του άξονα  $z'z$ , αντίστοιχα.

Θα μελετήσουμε την κίνηση της πλατφόρμας κατά τις δύο αυτές περιπτώσεις επενέργησης, για να συγκρίνουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχει η καθεμιά τους.

Αρχικά, ως προσαρμόσουμε κατάλληλα τις σχέσεις που έχουμε έως τώρα, για τις δυνάμεις και ροπές επενέργησης. Γνωρίζουμε ότι στην κυκλική κίνηση ισχύει η σχέση:

$$\omega = \frac{\theta}{t} \Leftrightarrow \theta = \omega t$$

Όστε, σύμφωνα με όσα είπαμε παραπάνω και αντικαθιστώντας την γωνία  $\theta$ , οι εξισώσεις (2.2.2.1)-(2.2.2.4) γράφονται ισοδύναμα ως:

$$F_{Dx}(t) = m r \omega_D^2 \sin(\omega_D t) \quad (2.2.2.1)'$$

$$F_{Ex}(t) = -m r \omega_E^2 \sin(\omega_E t) \quad (2.2.2.2)'$$

$$F_{Dz}(t) = -m g - m r \omega_D^2 \cos(\omega_D t) \quad (2.2.2.3)'$$

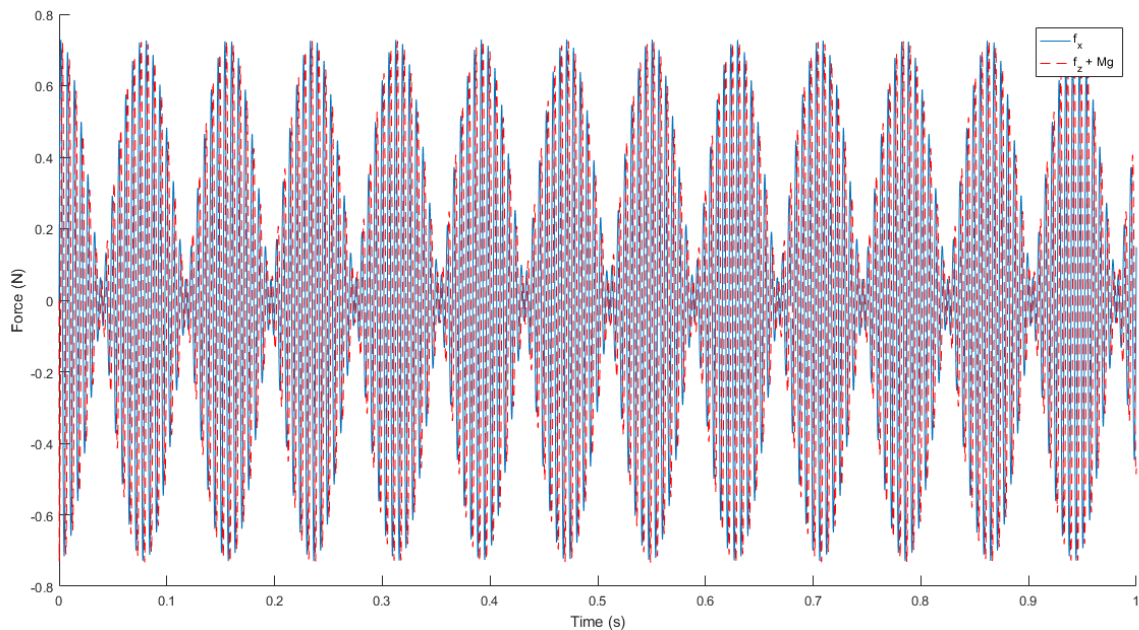
$$F_{Ez}(t) = -m g - m r \omega_E^2 \cos(\omega_E t) \quad (2.2.2.4)'$$

Επομένως, κατά την επενέργηση η συνολική δύναμη επενέργησης σε κάθε άξονα, δίνεται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

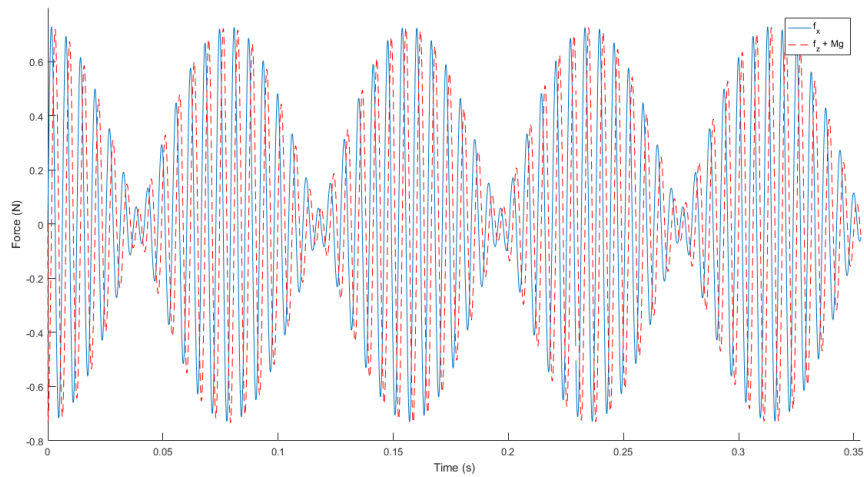
$$F_x(t) = m\omega_D^2 \sin(\omega_D t) - m\omega_E^2 \sin(\omega_E t) \quad (2.2.2.7)$$

$$F_z(t) = -2mg - m\omega_D^2 \cos(\omega_D t) - m\omega_E^2 \cos(\omega_E t) \quad (2.2.2.8)$$

Σημειώνεται ότι οι σχέσεις αφορούν την ασύγχρονη επενέργηση, όμως μπορεί κανείς εύκολα να διαπιστώσει ότι περιγράφουν και την περίπτωση της σύγχρονης κίνησης, αρκεί να επιλεχθούν ίσες ή αντίθετες γωνιακές ταχύτητες  $\omega_D$  και  $\omega_E$  στους κινητήρες. Στο Σχήμα 2.2.2.6 (και σε μεγέθυνση στο Σχήμα 2.2.2.7) φαίνονται ενδεικτικά, οι δυνάμεις επενέργησης κατά την ασύγχρονη επενέργηση με  $\omega_D = 1050 \text{ rad/s}$  και  $\omega_E = -950 \text{ rad/s}$ , σε χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου.



Σχήμα 2.2.2.6 Δυνάμεις επενέργησης ως προς τους άξονες των x και των z



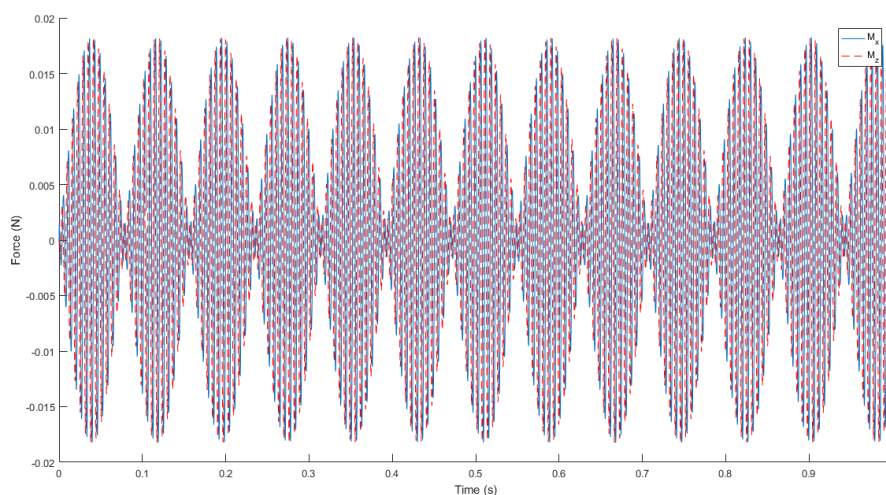
Σχήμα 2.2.2.7 Μεγέθυνση δυνάμεων επενέργησης ως προς τους άξονες  $x'$  και  $z'$

Οι ροπές που παράγονται γύρω από τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα  $x'$  και  $z'$  αντίστοιχα, είναι:

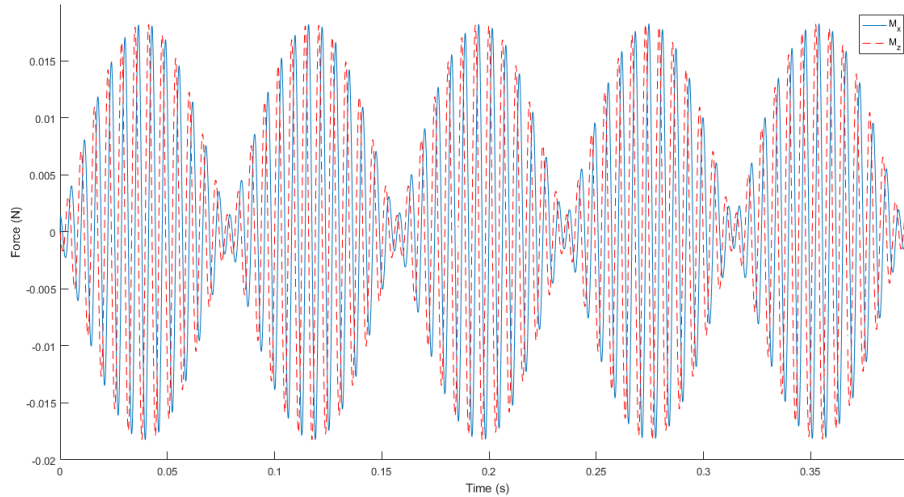
$$M_x(t) = d(mr\omega_D^2 \cos(\omega_D t) - mr\omega_E^2 \cos(\omega_E t)) \quad (2.2.2.9)$$

$$M_z(t) = -d(mr\omega_D^2 \sin(\omega_D t) + mr\omega_E^2 \sin(\omega_E t)) \quad (2.2.2.10),$$

όπου  $d$  η απόσταση του έκκεντρου από το κέντρο μάζας της πλατφόρμας. Σημειώνεται ότι έχει γίνει η παραδοχή ότι το κέντρο μάζας της πλατφόρμας συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο της. Στο Σχήμα 2.2.2.8 (και σε μεγέθυνση στο Σχήμα 2.2.2.9) παρουσιάζονται οι ροπές που παράγονται κατά την ίδια περίπτωση ασύγχρονης επενέργησης με πριν.



Σχήμα 2.2.2.8 Ροπές επενέργησης ως προς τους άξονες  $Ox$  και  $Oz$



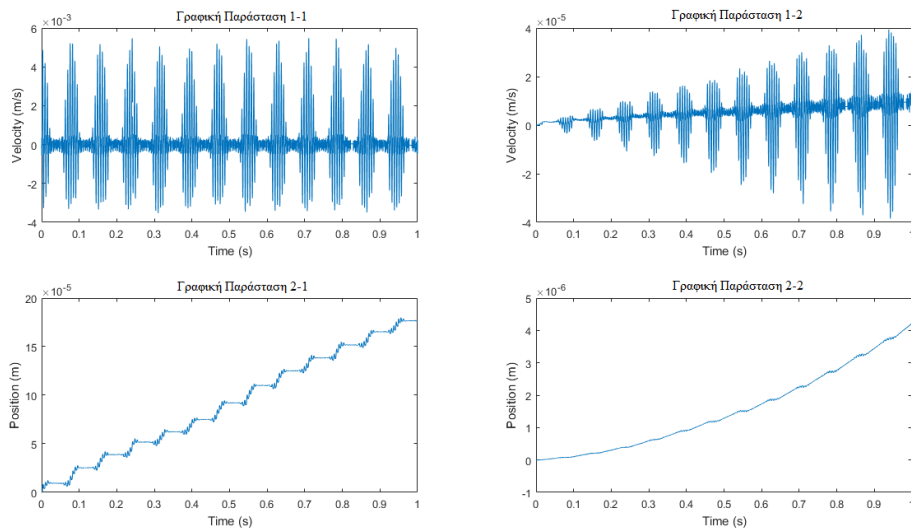
Σχήμα 2.2.2.9 Ροπές επενέργησης ως προς τους άξονες  $x'$  και  $z'$  σε μεγέθυνση

Είμαστε σε θέση πλέον, να περιγράψουμε το δυναμικό μοντέλο της πλατφόρμας με χρήση των εξισώσεων Newton-Euler. Έχουμε λοιπόν τις εξής σχέσεις:

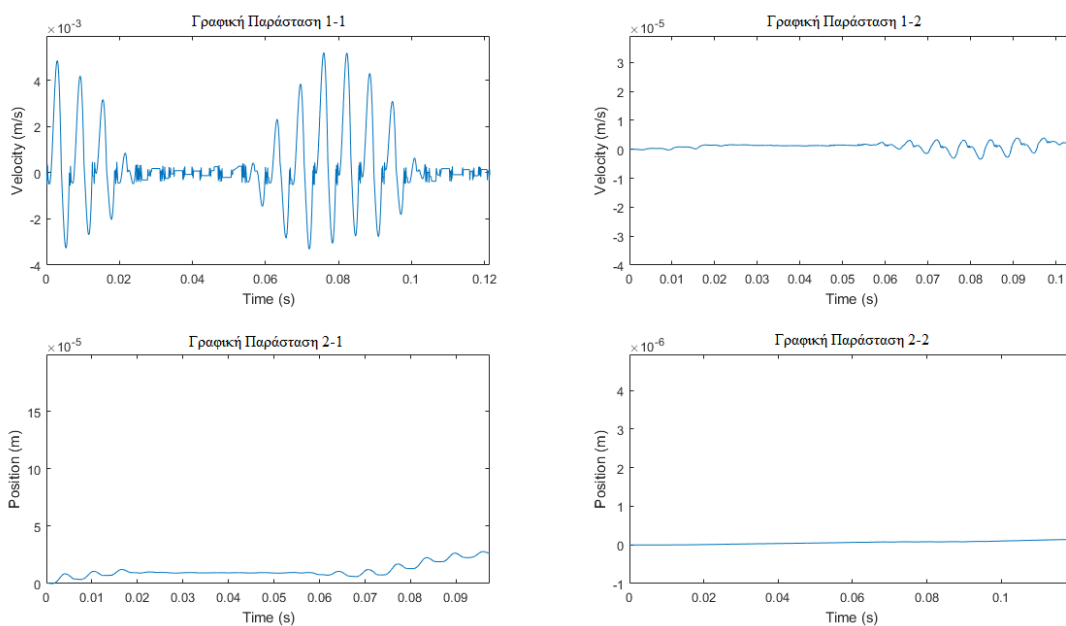
$$M\dot{v}=R\sum_i {}^b F_i, i \in \{A,B,C,D,E\} \quad (2.2.2.11)$$

$$I_{zz}\ddot{\psi}=\hat{z}\sum_i {}^b r_i \times {}^b F_i, i \in \{A,B,C,D,E\} \quad (2.2.2.12)$$

όπου  $v$  είναι το διάνυσμα ταχύτητας της πλατφόρμας,  $R$  ο πίνακας περιστροφής ως προς τον κατακόρυφο άξονα,  ${}^b F_i$  οι δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα στα σημεία  $i$  ως προς το σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων,  $b$ . Σε ό,τι αφορά τη δεύτερη εξίσωση, με  $I_{zz}$  συμβολίζουμε τη ροπή αδράνειας, με  $\psi$  τη γωνία της πλατφόρμας ως προς τον κατακόρυφο άξονα, με  $\hat{z}$  το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα του  $z'$  και με  ${}^b r_i$  τα διανύσματα θέσης των σημείων  $i$ , ως προς το σύστημα συντεταγμένων  $b$ . Σημειώνεται ότι η πράξη  $\times$ , συμβολίζει την πράξη του εξωτερικού γινομένου δύο διανυσμάτων. Ο υπολογισμός των ανωτέρω ποσοτήτων, εξηγείται αναλυτικότερα στο τρίτο κεφάλαιο, διότι το παρόν στοχεύει κυρίως στην περιγραφή και κατανόηση της εν λόγω πλατφόρμας. Στο Σχήμα 2.2.2.10 παρουσιάζονται οι συνιστώσες των ταχυτήτων και μετατοπίσεων στους άξονες  $x'$  και  $y'$ , στο χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου και στο Σχήμα 2.2.2.11 μια μεγέθυνση των ίδιων ποσοτήτων για καλύτερη εποπτεία της φύσης της κίνησης.



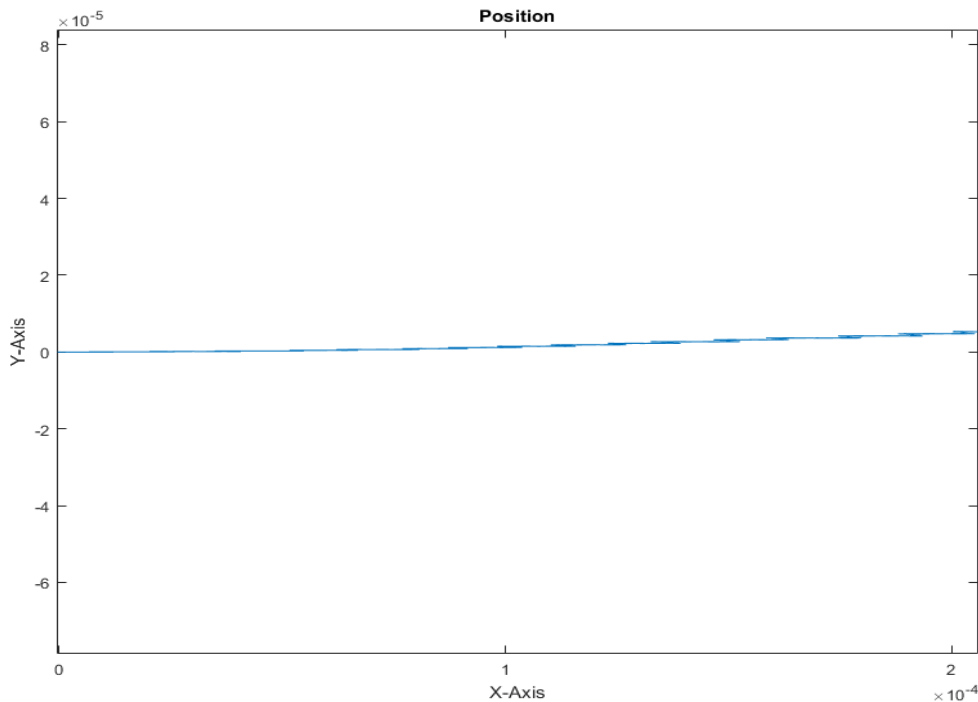
Σχήμα 2.2.2.10 Ταχύτητα και μετατόπιση στους άξονες  $x'x$  (Γραφική Παράσταση 1-1 και 2-1, αντίστοιχα) και  $y'y$  (Γραφική Παράσταση 1-2 και 2-2, αντίστοιχα)



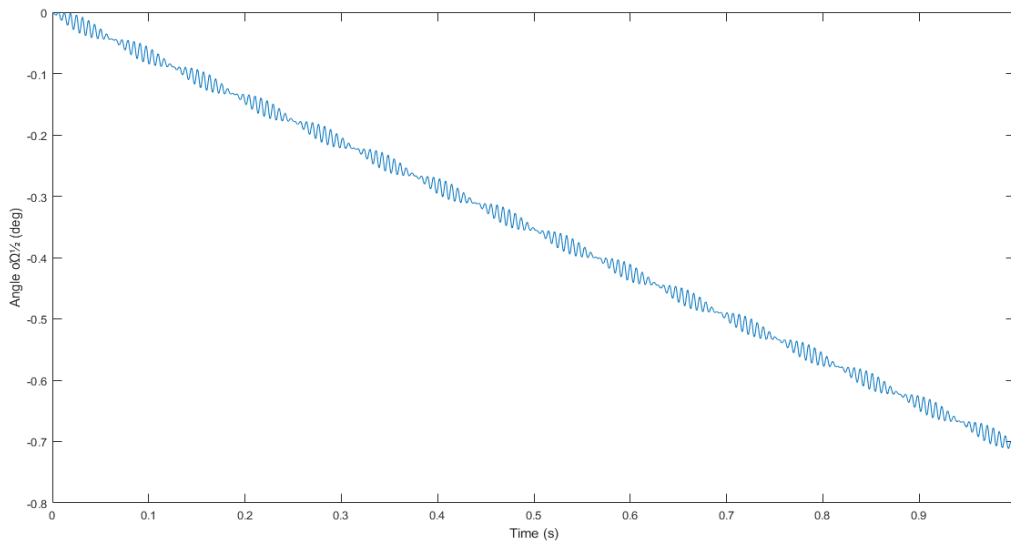
Σχήμα 2.2.2.11 Ταχύτητα και μετατόπιση στους άξονες  $x'x$  (Γραφική Παράσταση 1-1 και 2-1, αντίστοιχα) και  $y'y$  (Γραφική Παράσταση 1-2 και 2-2, αντίστοιχα) σε μεγέθυνση

Τέλος, η μετατόπιση της πλατφόρμας στο επίπεδο και η περιστροφή της, για το ίδιο χρονικό διάστημα, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.2.12 και Σχήμα 2.2.2.13,

αντίστοιχα. Στα δύο τελευταία διαγράμματα, παρατηρείται και το πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε με την κίνηση της συγκεκριμένης μικρορομποτικής πλατφόρμας. Δηλαδή, το γεγονός ότι η πορεία της δεν μοιάζει να ακολουθεί την αναμενόμενη κατεύθυνση ενός τροχοφόρου οχήματος διαφορικού τύπου, του οποίου ο τροχός με τη μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα το ωθεί προς την αντίθετη πλευρά. Αντιθέτως, ενώ η πλατφόρμα φαίνεται να στρέφεται προς την αναμενόμενη κατεύθυνση (βλ. Σχήμα 2.2.2.13), η μετατόπισή της γίνεται προς τη μεριά του κινητήρα με τη μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα (βλ. Σχήμα 2.2.2.12). Ο λόγος στον οποίο εκτιμάται να οφείλεται αυτή η συμπεριφορά είναι η ανομοιογενής κατανομή της μάζας της πλατφόρμας και ότι το κέντρο μάζας της δεν συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο της. Αυτή η φύση της κίνησης οδήγησε και στο σχεδιασμό του συγκεκριμένου αλγορίθμου ελέγχου θέσης, που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 2.2.2.12 Μετατόπιση πλατφόρμας στο επίπεδο με  $\omega_D=1050$  rad/s και  $\omega_E=-950$  rad/s, σε χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου

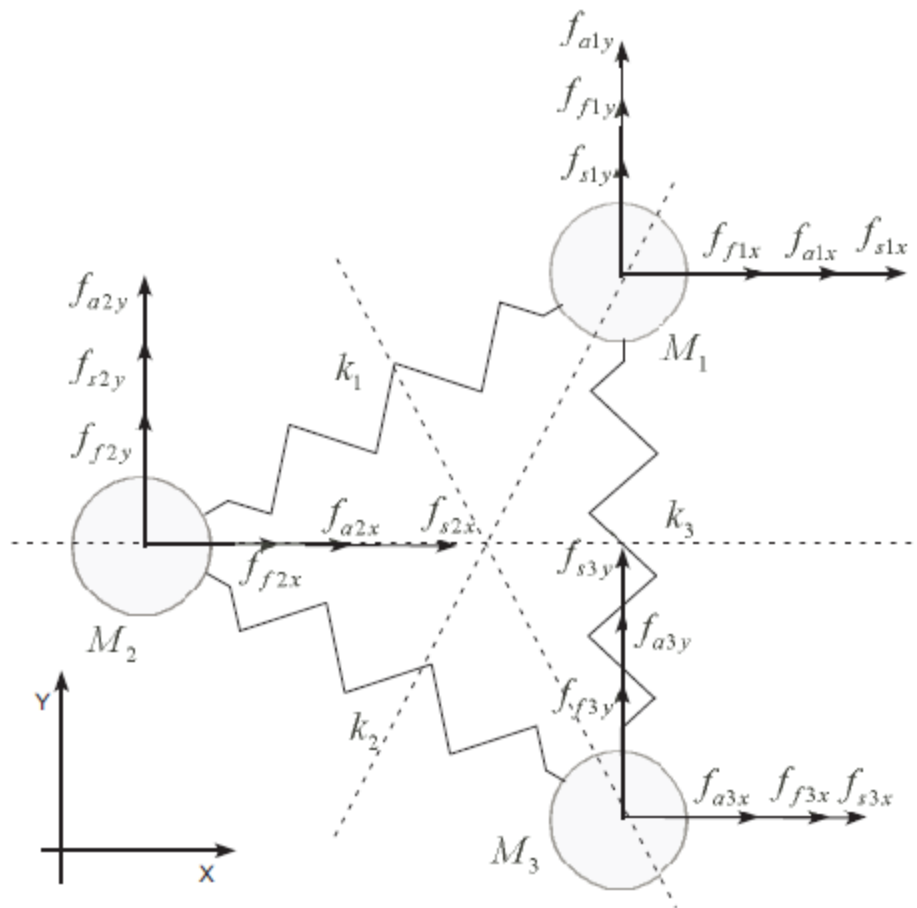


Σχήμα 2.2.2.13 Περιστροφή πλατφόρμας στο επίπεδο με  $\omega_D=1050$  rad/s και  $\omega_E=-950$  rad/s, σε χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου

### 2.2.3 Μοντέλο παραμορφώσιμου σώματος

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται το μοντέλο δύο βαθμών ελευθερίας που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα (2.2.2), με τη διαφορά ότι το σώμα της πλατφόρμας, αυτή τη φορά, θεωρείται παραμορφώσιμο. Το εν λόγω μοντέλο, υιοθετείται για να επιλυθούν ορισμένα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, που οφείλονται στις φάσεις της κίνησης της πλατφόρμας. Εν τούτοις, οι λόγοι για τους οποίους έγινε η παραπάνω θεώρηση και οι λεπτομέρειες που αφορούν την κίνηση αυτού το μοντέλου, αντίστοιχα, επεξηγούνται αναλυτικά και παρατίθενται στο τρίτο κεφάλαιο.

Σε αυτή την εκδοχή της πλατφόρμας, θεωρούμε ότι το σώμα της αποτελείται από σημειακές μάζες που συνδέονται μεταξύ τους με ελατήρια όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.3.1.



Σχήμα 2.2.3.1 Δυνάμεις σημειακών μαζών μοντέλου παραμορφώσιμου σώματος

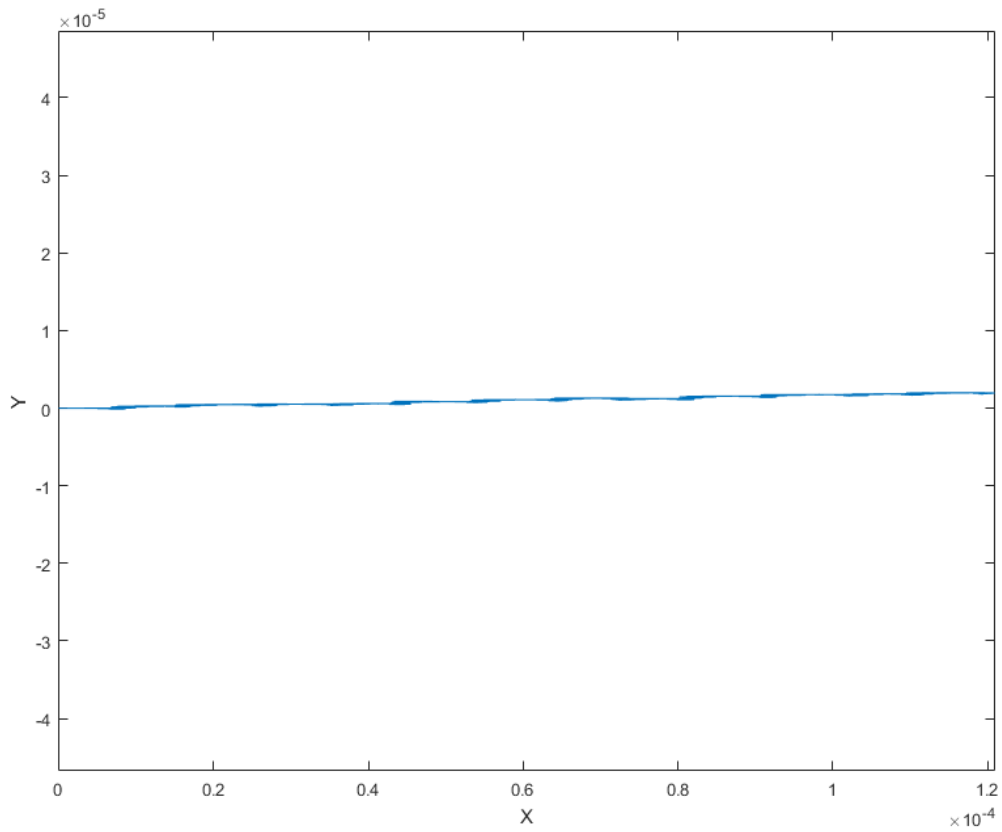
Οι δυνάμεις επενέργησης που εφαρμόζονται στις σημειακές μάζες  $M_1$ ,  $M_2$  και  $M_3$  συμβολίζονται με  $f_{ai}$ , οι δυνάμεις τριβής με  $f_{fi}$  και οι δυνάμεις ελατηρίων με  $f_{si}$ , όπου  $i=\{1,2,3\}$  κατά αντιστοιχία με τις μάζες. Οι δυναμικές εξισώσεις του παραπάνω συστήματος ελατηρίων-μαζών περιγράφεται μέσω της εξίσωσης:

$$M\ddot{x}=F_s+F_a+F_f \Leftrightarrow M\ddot{x}=Kx+F_a+F_f \quad (2.2.3.1),$$

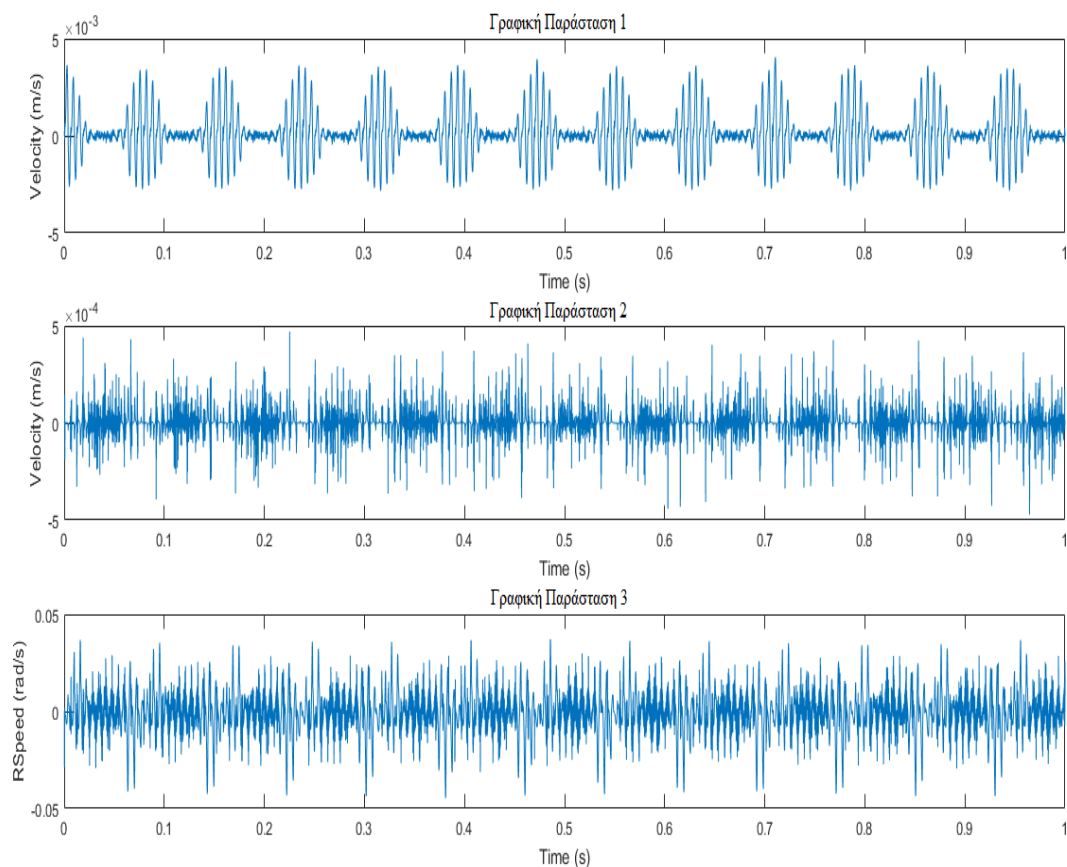
όπου  $M$ , ο πίνακας των σημειακών μαζών και  $K$ , ο πίνακας σταθερών δυσκαμψίας των ελατηρίων  $k_1$ ,  $k_2$  και  $k_3$  (βλ. ενότητα 3.1.3). Σημειώνεται ότι με  $x$  παριστάνουμε το διάνυσμα μετατόπισης των σημειακών μαζών στο επίπεδο, δηλαδή  $x=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ y_1 \ y_2 \ y_3]^T$ . Στο Σχήμα 2.2.3.2, φαίνεται η κίνηση της πλατφόρμας παραμορφώσιμου σώματος στο επίπεδο κατά την ασύγχρονη επενέργηση, με  $\omega_D=1050 \text{ rad/s}$  και  $\omega_E=-950 \text{ rad/s}$ , σε ένα δευτερόλεπτο. Οι



γραφικές παραστάσεις των/της γραμμικών/περιστροφικής ταχυτήτων/ας και των/της μετατοπίσεων/περιστροφής, που αφορούν την ίδια περίπτωση, φαίνονται στο Σχήμα 2.2.3.3 και στο Σχήμα 2.2.3.4, αντίστοιχα.

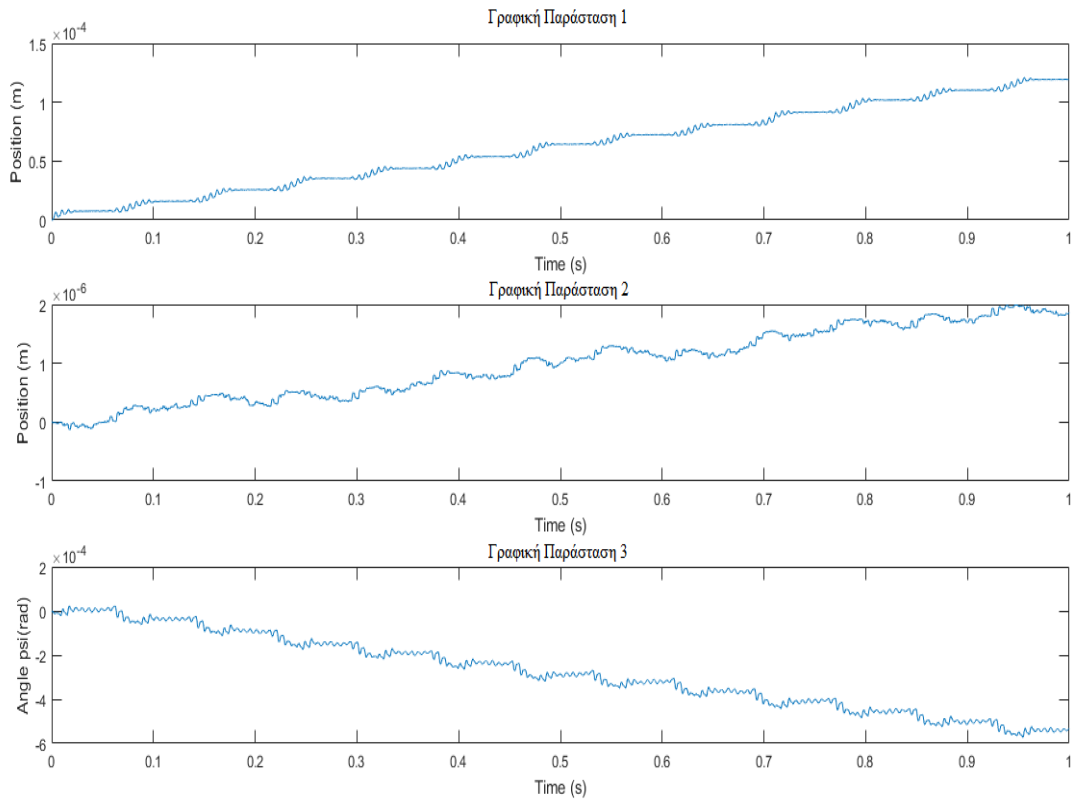


Σχήμα 2.2.3.2 Μετατόπιση πλατφόρμας στο επίπεδο Oxy



Σχήμα 2.2.3.3 Γραμμικές ταχύτητες πλατφόρμας στον άξονα  $Ox$  (Γραφική Παράσταση 1) και στον άξονα  $Oy$  (Γραφική Παράσταση 2) και περιστροφική ταχύτητα ως προς τον κατακόρυφο άξονα  $Oz$  (Γραφική Παράσταση 3)

Αξίζει να παρατηρηθεί, ότι το παραλλαγμένο αυτό μοντέλο μικρορομποτικής πλατφόρμας, δεν απαλλάσσεται από τα προβλήματα που ανέκυπταν στην περίπτωση του σταθερού σώματος. Έτσι, ενώ ο κινητήρας με τις περισσότερες στροφές περιστρέφει την πλατφόρμα προς την αντίθετη κατεύθυνση, εξακολουθεί να την μετατοπίζει προς το δικό του ημιπίπεδο.



Σχήμα 2.2.3.4 Μετατόπιση πλατφόρμας στον άξονα  $Ox$  (Γραφική Παράσταση 1) και στον άξονα  $Oy$  (Γραφική Παράσταση 2) και περιστροφή ως προς τον κατακόρυφο άξονα  $Oz$  (Γραφική Παράσταση 3)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

---

#### 3.1 Αλγόριθμοι προσομοίωσης κίνησης της ρομποτικής πλατφόρμας

---

#### **3.1 Αλγόριθμοι προσομοίωσης κίνησης της ρομποτικής πλατφόρμας**

Στην παρούσα ενότητα αναλύονται οι εξισώσεις που διέπουν τη δυναμική των μοντέλων της ρομποτικής πλατφόρμας που περιγράψαμε στο δεύτερο κεφάλαιο και επεξηγείται ο υπολογισμός βασικών ποσοτήτων, με ιδιαίτερη έμφαση στα σημεία ενδιαφέροντος. Ο διαχωρισμός των μοντέλων έχει διατηρηθεί από το προηγούμενο κεφάλαιο για λόγους αντιστοιχίας μεταξύ των εκδοχών της πλατφόρμας. Προτείνεται (χωρίς να είναι απαραίτητη) η μελέτη των κάτωθι υπολογισμών με παράλληλη εποπτεία του εκάστοτε μοντέλου, για βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας του. Η υλοποίηση των αλγορίθμων προσομοίωσης έχει γίνει στη γλώσσα προγραμματισμού C++ για το περιβάλλον του Robot Operating System και στην πλατφόρμα του Matlab.

##### **3.1.1 Μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας**

Σε ό,τι αφορά την πλατφόρμα με έναν φυγοκεντρικό επενεργητή, ο αλγόριθμος επιδιώκει να προσομοιώσει την κίνησή της, δεδομένων των φυσικών μεγεθών και παραμέτρων που διέπουν αυτήν και το δυναμικό μοντέλο της. Για να επιτευχθεί

αυτό, ακολουθείται επαναληπτικά η παρακάτω διαδικασία υπολογισμών, έτσι ώστε να βρεθεί η επιτάχυνση και κατά επέκταση η ταχύτητα και η μετατόπισή της στο επίπεδο Oxy.

Αρχικά, η αριθμητική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (2.2.1.10), με αρχικές συνθήκες  $\dot{\theta}_0 = \theta_0 = 0$ , μας δίνει τη γωνία  $\theta$  σε κάθε χρονική στιγμή  $t$ . Η αριθμητική ολοκλήρωση γίνεται με τη μονοβηματική μέθοδο του Euler. Αναλυτικότερα έχουμε:

$$\dot{\theta}_{k+1} = \dot{\theta}_k + h\ddot{\theta}_k, k \geq 0$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + h\dot{\theta}_k, k \geq 0,$$

όπου  $h$  το βήμα ολοκλήρωσης της μεθόδου,  $\dot{\theta}$  ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας  $\theta$  και  $\ddot{\theta}$  η παράγωγός του (δηλαδή η γωνιακή ταχύτητα και η επιτάχυνση του έκκεντρου κατά αντιστοιχία). Σημειώνεται ότι κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών, ως βήμα ολοκλήρωσης επιλέχθηκε η τιμή  $10^{-5}$ . Έτσι, για κάθε χρονική στιγμή  $t$ , την αντίστοιχη γωνία  $\theta(t)$ , από τη σχέση  $\omega = \dot{\theta}/t$ , μπορούμε να υπολογίσουμε τη γωνιακή ταχύτητα του έκκεντρου  $\omega(t)$ .

Στη συνέχεια, με βάση το  $\omega(t)$  υπολογίζουμε τις δυνάμεις επενέργειας στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα,  $F_{Oy}$  και  $F_{Oz}$  αντίστοιχα από τις σχέσεις (2.2.1.2) και (2.2.1.3). Οι κατακόρυφες δυνάμεις που ασκούνται στα στηρίγματα δίνονται από τη σχέση (2.2.1.5) και είναι αθροιστικά ίσες με  $Mg - F_{Oz}$ . Επιπλέον, πολλαπλασιάζοντας με τον συντελεστή τριβής  $\mu = 0.4$  το ίδιο άθροισμα, λαμβάνουμε το μέγεθος τριβής Coulomb,  $F_C$ . Τότε, η δύναμη τριβής από την πρόσφυση στην επιφάνεια του επιπέδου, υπολογίζεται κατά περίπτωση από τη σχέση (2.2.1.6) και είναι:

$$F_{fr} := \begin{cases} F_C \operatorname{sgn}(\dot{y}), & \dot{y} \neq 0 \\ F_{Oy}, & \|F_{Oy}\| < F_C, \dot{y} = 0, \ddot{y} = 0 \\ F_C \operatorname{sgn}(F_{Oy}), & \|F_{Oy}\| > F_C, \dot{y} = 0, \ddot{y} \neq 0 \end{cases},$$

όπου  $\ddot{y}$  η επιτάχυνση και  $\dot{y}$  η ταχύτητα της πλατφόρμας και  $\operatorname{sgn}(x)$  η κλαδική συνάρτηση που δίνεται από τη σχέση:

$$\text{sgn}(x) := \begin{cases} -1, & \text{αν } x < 0 \\ 0, & \text{αν } x = 0 \\ 1, & \text{αν } x > 0 \end{cases}$$

Έχοντας υπολογίσει τις παραπάνω ποσότητες, διαιρώντας την εξίσωση (2.2.1.4) με  $M$ , έχουμε την επιτάχυνση της πλατφόρμας,  $\ddot{y}$ . Ολοκληρώνοντας αριθμητικά με τη μονοβηματική μέθοδο του Euler μία φορά, όπως πριν, βρίσκουμε την ταχύτητα της πλατφόρμας  $\dot{y}$ . Τέλος, μία ακόμη αριθμητική ολοκλήρωση της ταχύτητας  $\dot{y}$ , θα μας δώσει την μετατόπιση της πλατφόρμας  $y$ . Αναλυτικότερα, τα δύο τελευταία βήματα προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$\dot{y}_{k+1} = \dot{y}_k + h\ddot{y}_k, \text{ για } k \geq 0$$

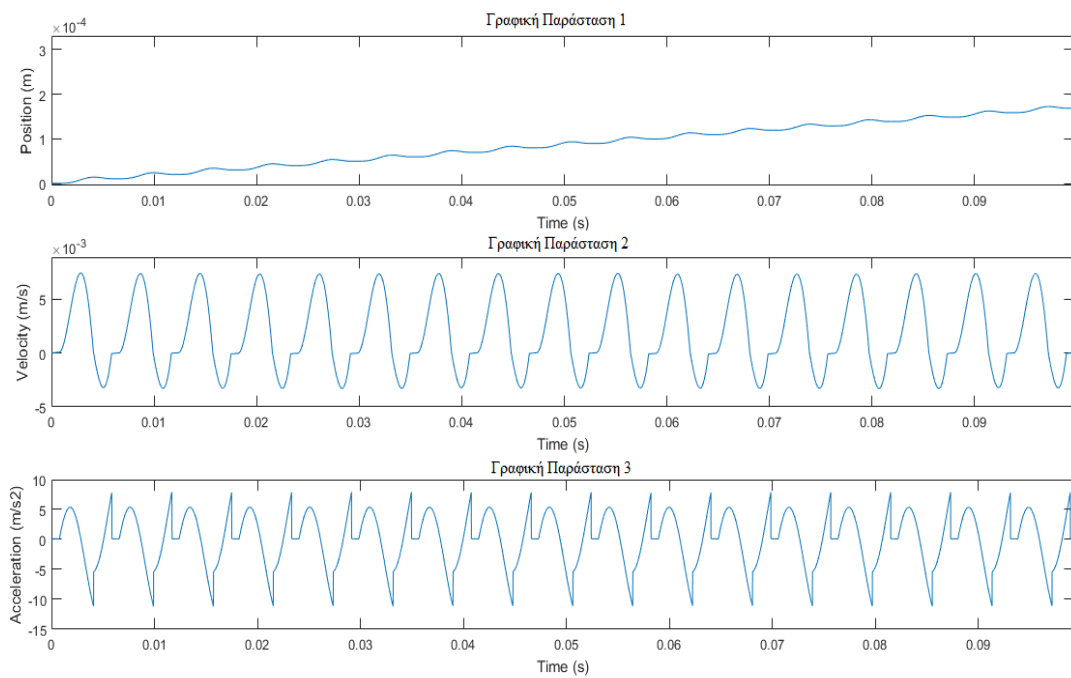
$$y_{k+1} = y_k + h\dot{y}_k, \text{ για } k \geq 0,$$

υπό τις αρχικές συνθήκες  $\dot{y}_0 = y_0 = 0$ .

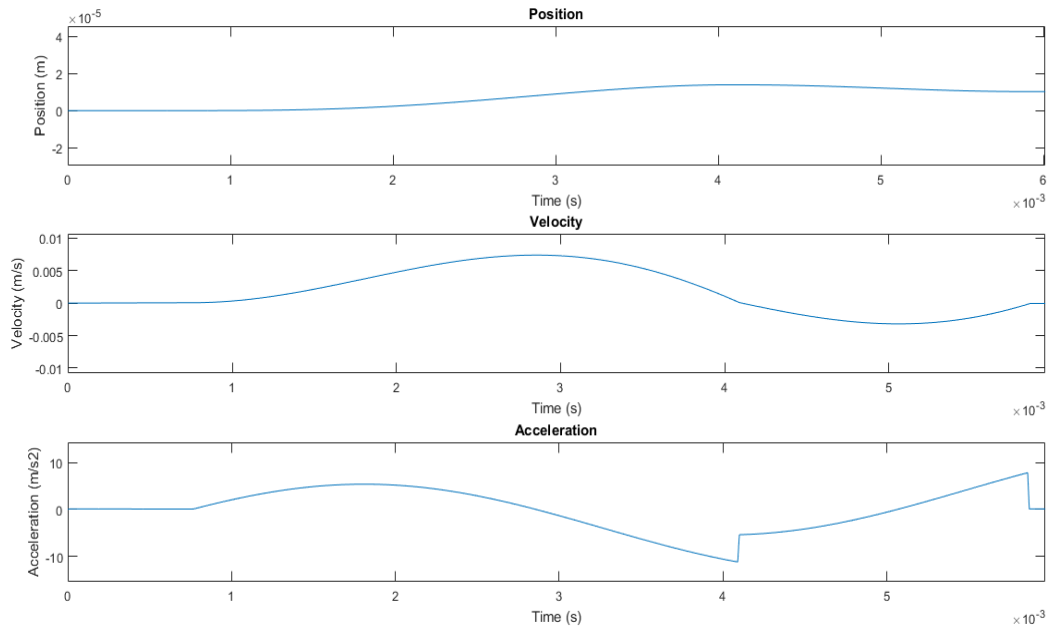
Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία ακολουθείται επαναληπτικά κι έτσι οι νέες τιμές χρησιμοποιούνται στην επόμενη επανάληψη (στον υπολογισμό της δύναμης της τριβής, της ταχύτητας και της μετατόπισης). Ο Πίνακας 3.1.2.1 περιέχει τις τιμές ορισμένων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις που παραθέσαμε, για τον υπολογισμό των ποσοτήτων ενδιαφέροντος. Η επιτάχυνση, η ταχύτητα και η μετατόπιση της πλατφόρμας συναρτήσει του χρόνου, απεικονίζονται σε μεγέθυνση στο Σχήμα 3.1.1.1. Αξίζει να παρατηρηθούν τα μεγέθη αυτά σε έναν κύκλο λειτουργίας του έκκεντρου, δηλαδή όταν έχει διαγράψει  $360^\circ$  κατά την περιστροφή του γύρω από τον άξονα του κινητήρα, όπως αυτά φαίνονται στο Σχήμα 3.1.1.2.

Πίνακας 3.1.3.1 Τιμές παραμέτρων

Παράμετρος	Τιμές
$\mu$	0.4
M	0.1 Kg
r	0.00177 m
g	9.81 m/s <sup>2</sup>
m	0.00021 Kg



Σχήμα 3.1.1.1 Μετατόπιση (Γραφική Παράσταση 1), ταχύτητα (Γραφική Παράσταση 2) και επιτάχυνση (Γραφική Παράσταση 3) πλατφόρμας στον άξονα Ox



Σχήμα 3.1.1.2 Μετατόπιση (Γραφική Παράσταση 1), ταχύτητα (Γραφική Παράσταση 2) και επιτάχυνση (Γραφική Παράσταση 3) πλατφόρμας σε έναν κύκλο λειτουργίας

Η μορφή της καμπύλης της επιτάχυνσης αλλά και της ταχύτητας, δικαιολογούν την εμπρόσθια κίνηση της πλατφόρμας κατά την επενέργηση. Αρχικά, η πλατφόρμα βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας (όταν το έκκεντρο έχει διαγράψει γωνία  $\theta < 1$  rad). Όμως, στην συνέχεια παρατηρείται μια φάση επιτάχυνσης του έκκεντρου (όταν  $\pi/2 > \theta > 1$  rad), που έχει ως αποτέλεσμα η πλατφόρμα να αναπτύξει ταχύτητα και έτσι να πορευθεί προς τα εμπρός. Ακολουθεί μια μικρή φάση επιβράδυνσης έως το μηδενισμό της ταχύτητας (όταν η γωνία  $\theta$  ξεπεράσει για λίγο τα 4 rad). Έπειτα, η πλατφόρμα επιταχύνει προς την αντίθετη κατεύθυνση (έως ότου  $\theta > 5$  rad) και επιβραδύνει κατά ανάλογο τρόπο μέχρι να ολοκληρωθεί ένας κύκλος λειτουργίας (δηλαδή  $\theta > 2\pi$ ). Η δεύτερη και η τρίτη φάση από αυτές που περιγράψαμε, αφορούν την προς τα εμπρός, ενώ η τέταρτη την προς τα πίσω κίνηση της πλατφόρμας. Αυτή η διαδικασία κατά επανάληψη μας δίνει την θετική (προς τα εμπρός) μετατόπιση της πλατφόρμας. Ο λόγος για τον οποίο η πλατφόρμα μετακινείται προς τα εμπρός,



είναι ότι το μέτρο της επιτάχυνσης κατά την φάση της προς τα εμπρός κίνησης είναι μεγαλύτερο από αυτό που αναπτύσσεται κατά τη φάση της προς τα πίσω, καθώς και η διάρκεια των φάσεων (σχεδόν 3 rad προς τα εμπρός, ενώ 2 rad προς τα πίσω).

### 3.1.2 Μοντέλο δύο βαθμών ελευθερίας

Έχοντας κατά νου όσα είπαμε για την πλατφόρμα ενός φυγοκεντρικού επενεργητή, θα περιγράψουμε με σαφήνεια το έργο του προσομοιωτή ρομποτικής πλατφόρμας εφοδιασμένης με δύο. Σε αντιδιαστολή με το πρώτο μοντέλο, η συνισταμένη των δυνάμεων επενέργησης για τον εκάστοτε άξονα, δίνεται από τις σχέσεις (2.2.2.7) και (2.2.2.8) (στον  $Ox$  και στον  $Oz$ , αντίστοιχα). Για λόγους πληρότητας και κατανόησης, συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα ενότητα:

$$F_x(t) = m r \omega_D^2 \sin(\omega_D t) - m r \omega_E^2 \sin(\omega_E t) \quad (2.2.2.7)$$

$$F_z(t) = -2mg - m r \omega_D^2 \cos(\omega_D t) - m r \omega_E^2 \cos(\omega_E t) \quad (2.2.2.8)$$

Όστε η συνολική δύναμη επενέργησης που ασκείται στην πλατφόρμα στον άξονα  $Ox$  υπολογίζεται άμεσα. Το μέγεθος τριβής Coulomb δίνεται από τη σχέση:

$$F_c(t) = \mu(Mg - F_z(t))$$

Ως γνωστόν από την πλατφόρμα ενός βαθμού ελευθερίας, η δύναμη τριβής από την πρόσφυση στην επιφάνεια του επιπέδου, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{fr} := \begin{cases} F_c \operatorname{sgn}(\dot{y}), & \text{αν } \dot{y} \neq 0 \\ F_{Oy}, & \text{αν } \|F_{Oy}\| < F_c, \dot{y}=0, \ddot{y}=0 \\ F_c \operatorname{sgn}(F_{Oy}), & \text{αν } \|F_{Oy}\| > F_c, \dot{y}=0, \ddot{y} \neq 0 \end{cases}$$

με αρχικές συνθήκες  $y_0 = \dot{y}_0 = \ddot{y}_0 = 0$  κατά την κατάσταση ακινησίας. Επίσης, στο δεύτερο κεφάλαιο έχει διατυπωθεί, ότι το διάνυσμα επιτάχυνσης της πλατφόρμας δίνεται από τη σχέση (βλ. σχέση (2.2.2.11)):

$$M\dot{v} = R \sum_i^b F_i, \quad i \in \{A, B, C, D, E\},$$

όπου με  $v = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}]$  συμβολίζουμε το διάνυσμα ταχύτητας της πλατφόρμας και

$R = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  είναι ο πίνακας περιστροφής της ως προς τον

κατακόρυφο άξονα Oz κατά γωνία  $\psi$ . Δηλαδή,  $\dot{v} = [\ddot{x} \quad \ddot{y} \quad \ddot{z}]$  και το διάνυσμα δυνάμεων  ${}^b F_i$ , συνυπολογίζοντας τις δυνάμεις επενέργειας από πριν με τις δυνάμεις τριβής που ασκούνται στα στηρίγματα, είναι:

$${}^b F_i = [F_x - F_{fr} \quad 0 \quad F_z]$$

Τότε, εκτελώντας τον πολλαπλασιασμό τον παραπάνω πινάκων έχουμε αναλυτικά τις εξισώσεις:

$$M\ddot{x}(t) = \cos(\psi(t))(F_x(t) - F_{fr}(t)) - \sin(\psi(t)) \cdot 0 + 0 \cdot F_z(t) \Leftrightarrow \ddot{x}(t) = \frac{\cos(\psi(t))(F_x(t) - F_{fr}(t))}{M}$$

$$M\ddot{y}(t) = \sin(\psi(t))(F_x(t) - F_{fr}(t)) + \cos(\psi(t)) \cdot 0 + 0 \cdot F_z(t) \Leftrightarrow \ddot{y}(t) = \frac{\sin(\psi(t))(F_x(t) - F_{fr}(t))}{M}$$

$$M\ddot{z}(t) = 0 \cdot (F_x(t) - F_{fr}(t)) + 0 \cdot \cos(\psi(t)) + 1 \cdot F_z(t) \Leftrightarrow \ddot{z}(t) = \frac{F_z(t)}{M}$$

Ολοκληρώνοντας όπως και σε αντίστοιχες περιπτώσεις με την μονοβηματική μέθοδο του Euler, έχουμε:

$$\dot{x}_{k+1} = \dot{x}_k + h\ddot{x}_k, \text{ για } k \geq 0$$

$$\dot{y}_{k+1} = \dot{y}_k + h\ddot{y}_k, \text{ για } k \geq 0$$

$$\dot{z}_{k+1} = \dot{z}_k + h\ddot{z}_k, \text{ για } k \geq 0,$$

με αρχικές συνθήκες τις  $\dot{x}_0 = \dot{y}_0 = \dot{z}_0 = 0$ . Έτσι έχουμε το διάνυσμα της ταχύτητας της πλατφόρμας  $v = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}]$ . Πραγματοποιώντας ακόμη μία ολοκλήρωση με αρχικές τιμές  $x_0 = y_0 = z_0 = 0$ , λαμβάνουμε το διάνυσμα θέσεως της πλατφόρμας  $p = [x \quad y \quad z]$  σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$x_{k+1} = x_k + h\dot{x}_k, \text{ για } k \geq 0$$

$$y_{k+1} = y_k + h\dot{y}_k, \text{ για } k \geq 0$$

$$z_{k+1} = z_k + h\dot{z}_k, \text{ για } k \geq 0.$$

Για να ληφθεί η τελική διάταξη  $q=[x \ y \ \psi]$  της πλατφόρμας την επόμενη χρονική στιγμή, μένει να υπολογιστεί η γωνία  $\psi$ . Για το σκοπό αυτό ακολουθείται παρόμοια διαδικασία. Αναλυτικότερα, η περιστροφική επιτάχυνση της πλατφόρμας δίνεται από τη σχέση (2.2.2.12), την οποία επίσης θα συμπεριλάβουμε εδώ:

$$I_{zz}\ddot{\psi}=\hat{z}\sum_i^b r_i \times {}^b F_i, \quad i \in \{A,B,C,D,E\},$$

όπου  $\hat{z}=[0 \ 0 \ 1]$  το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο Oxy και

$$\begin{aligned} {}^b r_A &= \left[ d \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad d \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad 0 \right] = \left[ \frac{d}{2} \quad \frac{d\sqrt{3}}{2} \quad 0 \right] \\ {}^b r_B &= \left[ d \cos(\pi) \quad d \sin(\pi) \quad 0 \right] = [-d \quad 0 \quad 0] \\ {}^b r_C &= \left[ d \cos\left(-\frac{\pi}{3}\right) \quad d \sin\left(-\frac{\pi}{3}\right) \quad 0 \right] = \left[ \frac{d}{2} \quad -\frac{d\sqrt{3}}{2} \quad 0 \right] \\ {}^b r_D &= \left[ d \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad d \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad 0 \right] = [0 \quad d \quad 0] \\ {}^b r_E &= \left[ d \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) \quad d \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \quad 0 \right] = [0 \quad -d \quad 0], \end{aligned}$$

τα διανύσματα θέσεως των στηριγμάτων A,B και C και των επενεργητών D και E.

Τότε,  $\ddot{\psi}(t)=\hat{z} \cdot \frac{\left( {}^b r_A \times \frac{{}^b F_{fr}}{3} + {}^b r_B \times \frac{{}^b F_{fr}}{3} + {}^b r_C \times \frac{{}^b F_{fr}}{3} + M_z(t) \right)}{I_{zz}}$ , όπου  $M_z(t)$  η συνολική ροπή

επενέργειας ως προς τον κατακόρυφο άξονα Oz, η οποία έχει υπολογιστεί με χρήση της σχέσης:

$$M_z(t) = -d(mr\omega_D^2 \sin(\omega_D t) + mr\omega_E^2 \sin(\omega_E t))$$

που από τη μεριά της προκύπτει από τα παρακάτω διανύσματα:

$${}^b r_D \times \frac{{}^b F_{Dx}}{3} = \begin{vmatrix} \bar{e}_1 & \bar{e}_2 & \bar{e}_3 \\ 0 & d & 0 \\ F_{Dx} & 0 & 0 \end{vmatrix} = [0 \quad 0 \quad -dF_{Dx}(t)] = [0 \quad 0 \quad -dmr\omega_D^2 \sin(\omega_D t)]$$

$${}^b r_E \times \frac{{}^b F_{Ex}}{3} = \begin{vmatrix} \bar{e}_1 & \bar{e}_2 & \bar{e}_3 \\ 0 & -d & 0 \\ F_{Ex} & 0 & 0 \end{vmatrix} = [0 \ 0 \ dF_{Ex}(t)] = [0 \ 0 \ -dmr\omega_E^2 \sin(\omega_E t)]$$

Για τους όρους του αριθμητή ισχύει ότι:

$${}^b r_A \times \frac{{}^b F_{fr}}{3} = \begin{vmatrix} \bar{e}_1 & \bar{e}_2 & \bar{e}_3 \\ \frac{d}{2} & \frac{d\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{F_{fr}}{3} & 0 & 0 \end{vmatrix} = [0 \ 0 \ -\frac{d\sqrt{3}F_{fr}}{6}]$$

$${}^b r_B \times \frac{{}^b F_{fr}}{3} = \begin{vmatrix} \bar{e}_1 & \bar{e}_2 & \bar{e}_3 \\ -d & 0 & 0 \\ \frac{F_{fr}}{3} & 0 & 0 \end{vmatrix} = [0 \ 0 \ 0]$$

$${}^b r_C \times \frac{{}^b F_{fr}}{3} = \begin{vmatrix} \bar{e}_1 & \bar{e}_2 & \bar{e}_3 \\ \frac{d}{2} & -\frac{d\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{F_{fr}}{3} & 0 & 0 \end{vmatrix} = [0 \ 0 \ \frac{d\sqrt{3}F_{fr}}{6}]$$

Άρα για την περιστροφική επιτάχυνση, μπορούμε ισοδύναμα να συμπεράνουμε ότι:

$$\ddot{\psi}(t) = [0 \ 0 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{M_z(t)}{I_{zz}} \end{bmatrix} = \frac{M_z(t)}{I_{zz}}$$

ή διαφορετικά:

$$\ddot{\psi}(t) = \frac{-dmr}{I_{zz}} (\omega_D^2 \sin(\omega_D t) + \omega_E^2 \sin(\omega_E t))$$

Ολοκληρώνοντας αριθμητικά όπως και τις προηγούμενες φορές, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\dot{\psi}_{\kappa+1} = \dot{\psi}_{\kappa} + h\ddot{\psi}_{\kappa}, \text{ για } \kappa \geq 0$$

$$\psi_{\kappa+1} = \psi_{\kappa} + h\dot{\psi}_{\kappa}, \text{ για } \kappa \geq 0,$$

και αρχικές τιμές  $\dot{\psi}_0 = \psi_0 = 0$ , παίρνουμε την περιστροφική ταχύτητα και τη γωνία της πλατφόρμας, αντίστοιχα.

### 3.1.3 Μοντέλο παραμορφώσιμου σώματος

Με βάση όσα ειπώθηκαν για την πλατφόρμα στερεού σώματος, για να μπορέσει να περιγραφεί η κίνηση της πλατφόρμας, απαιτείται η ολοκλήρωση των σχέσεων (2.2.2.11) και (2.2.2.12) ως προς την παράμετρο του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι το πρόβλημα ανάγεται στην εύρεση όλων των δυνάμεων που ασκούνται στην πλατφόρμα (αδρανειακές, αντίδρασης και επενέργησης). Το εμπόδιο σε αυτή τη διαδικασία είναι ότι οι μόνες δυνάμεις, που είναι γνωστές στις προαναφερθείσες εξισώσεις, είναι οι δυνάμεις επενέργησης. Όστε, παραμένουν άγνωστες οι δυνάμεις αδράνειας και αντίδρασης, γεγονός που καθιστά αδύνατους περαιτέρω υπολογισμούς.

Το προαναφερθέν σύστημα, αποτελείται από έξι εξισώσεις με πλήθος αγνώστων εξαρτώμενο από την κινητική κατάσταση της πλατφόρμας. Δηλαδή, διαχωρίζοντας τις καταστάσεις κίνησης της πλατφόρμας, είναι δυνατό να λύσουμε το σύστημα, κατά περίπτωση. Ο διαχωρισμός γίνεται με κριτήριο το αν η πλατφόρμα κινείται στο επίπεδο ή περιστρέφεται γύρω από κάποιο στήριγμά της ή είναι ακίνητη.

Η τελευταία εκ των περιπτώσεων, περιγράφει τη λεγόμενη στατική φάση (ή περιοχή) και αφορά την κινητική κατάσταση, κατά την οποία οι δυνάμεις επενέργησης δεν είναι αρκετά μεγάλες έτσι ώστε να υπερνικήσουν τις τριβές. Κατά την διάρκεια που η πλατφόρμα βρίσκεται σε αυτή τη φάση, παραμένει ακίνητη και οι εξισώσεις (2.2.2.11) και (2.2.2.12) γράφονται στη μορφή  $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$ , στατικής ισορροπίας. Δηλαδή, ζητείται να βρεθούν το μέτρο και η διεύθυνση των δυνάμεων τριβής στα στήριγματα. Σημειώνεται ότι το διάνυσμα  $\mathbf{b}=[F_{Ax} \ F_{Ay} \ F_{Bx} \ F_{By} \ F_{Cx} \ F_{Cy}]^T$  περιέχει τις δυνάμεις επενέργησης, ενώ το διάνυσμα των αγνώστων του συστήματος είναι  $\mathbf{x}=[F_{Ax} \ F_{Ay} \ F_{Az} \ F_{Bx} \ F_{By} \ F_{Bz} \ F_{Cx} \ F_{Cy} \ F_{Cz}]^T$  και  $\mathbf{A}$  είναι ο πίνακας των συντελεστών του συστήματος. Όστε, έχουμε ένα σύστημα έξι εξισώσεων με εννέα άγνωστους, δηλαδή αόριστο. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούμε την

πλατφόρμα παραμορφώσιμου σώματος λοιπόν, είναι για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα.

Στη συγκεκριμένη κατάσταση κίνησης (στατική), όπως είδαμε στην ενότητα 2.2.3, το δυναμικό μοντέλο περιγράφεται από τη σχέση (2.2.3.1), δηλαδή από ένα σύστημα έξι εξισώσεων με έξι αγνώστους. Αναλυτικότερα, η σχέση αυτή γράφεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{Ax} \\ F_{Ay} \\ F_{Bx} \\ F_{By} \\ F_{Cx} \\ F_{Cy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{fAx} \\ F_{fAy} \\ F_{fBx} \\ F_{fBy} \\ F_{fCx} \\ F_{fCy} \end{bmatrix},$$

όπου με  $F_{f_{ix}}$  και  $F_{f_{iy}}$ ,  $i=\{A,B,C\}$  συμβολίζουμε τις δυνάμεις τριβής στις αντίστοιχες συντεταγμένες του κάθε στηρίγματος. Υπενθυμίζουμε ότι  $M$ , είναι ο πίνακας των σημειακών μαζών  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  και  $K$ , ο πίνακας των σταθερών δυσκαμψίας των ελατηρίων  $k_1$ ,  $k_2$  και  $k_3$  για τα αντίστοιχα ελατήρια, όπως αυτά φαίνονται στο Σχήμα 2.2.3.1. Ο πίνακας  $x=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ y_1 \ y_2 \ y_3]^T$  είναι το διάνυσμα θέσεως των στηριγμάτων A,B και C, ενώ το αντίστοιχο διάνυσμα με παράγωγο δεύτερης τάξης, είναι το διάνυσμα επιταχύνσεως αυτών. Τώρα, το παραπάνω σύστημα δύναται να επιλυθεί ως προς τις δυνάμεις τριβής και έτσι, για δεδομένες αρχικές τιμές, επιδέχεται μοναδική λύση.

Πιο συγκεκριμένα, οι εξισώσεις που δίνουν τις σημειακές μάζες και τις κατακόρυφες αντιδράσεις στα στηρίγματα, είναι αντίστοιχα οι εξής:

$$M_1 = \frac{2Hl(M+m_d+m_e)-3Mlx_{CM}-6H(My_{CM}-(m_d-m_e)d)}{6Hl}$$

$$M_2 = \frac{1}{3}(M+m_d+m_e) + \frac{Mx_{CM}}{H}$$

$$M_3 = \frac{2Hl(M+m_d+m_e)-3Mlx_{CM}+6H(My_{CM}-(m_d-m_e)d)}{6Hl}$$

$$f_{Az} = \frac{-2Hl(F_{Az}+F_{Cz})+Mg(-3lx_{CM}+2H(1-3y_{CM})) + 6Hd(F_{Cz}-F_{Az}) + 0 \cdot 3l(F_{Az}+F_{Cz})h_0}{6Hl}$$

$$f_{Bz} = \frac{-H(F_{Az}+F_{Cz})+Mg(H+3x_{CM})-0 \cdot 3(F_{Az}+F_{Cz})h_0}{3H}$$

$$f_{Cz} = \frac{-2Hl(F_{Az} + F_{Cz}) + Mg(-3lx_{CM} + 2H(1+3y_{CM})) + 6Hd(F_{Az} - F_{Cz}) + 0 \cdot 3l(F_{Az} + F_{Cz})h_0}{6HI}, \quad \text{όπου}$$

συμβολίζουμε με  $H$  το ύψος του ισόπλευρου τριγώνου  $\triangle ABC$ , στις κορυφές του οποίου είναι τοποθετημένες οι σημειακές μάζες, με  $l$  την απόσταση μεταξύ των μαζών (το μήκος κάθε πλευράς του τριγώνου), με  $d$  την απόσταση των επενεργητών από το κέντρο μάζας της πλατφόρμας και με  $h_0$  την απόσταση του έγκεντρου από το έδαφος. Οι ποσότητες  $x_{CM}$  και  $y_{CM}$  είναι οι συντεταγμένες του κέντρου μάζας με σημείο αναφοράς την αρχή των αξόνων  $O$  και  $F_{Az}$  και  $F_{Cz}$  είναι οι δυνάμεις επενέργησης που ασκούνται στα σημεία  $A$  και  $C$  ως προς τον κατακόρυφο άξονα, όπως αυτές δίνονται από τις σχέσεις (2.2.2.3) και (2.2.2.4), κατά αντιστοιχία. Τότε οι συνθήκες τριβής ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} N_{Ax} &= F_{Ax} + \frac{\sqrt{3}k_1(x_2 - x_1)}{2} \\ N_{Ay} &= \frac{k_1(y_2 - y_1)}{2} + k_3(y_3 - y_1) \\ N_{Bx} &= \frac{\sqrt{3}k_1(x_1 - x_2)}{2} + \frac{\sqrt{3}k_2(x_3 - x_2)}{2} \\ N_{By} &= \frac{k_1(y_1 - y_2)}{2} + \frac{k_2(y_3 - y_2)}{2} \\ N_{Cx} &= F_{Cx} + \frac{\sqrt{3}k_2(x_2 - x_3)}{2} \\ N_{Cy} &= \frac{k_2(y_2 - y_3)}{2} + k_3(y_1 - y_3) \end{aligned}$$

Με χρήση των παραπάνω σχέσεων, οι δυνάμεις τριβής στα αντίστοιχα σημεία και ως προς τους αντίστοιχους άξονες, προκύπτουν κατά περίπτωση από τις εξισώσεις:

$$F_{f_{ix}} = \begin{cases} -N_{ix}, & \text{αν } \|\dot{y}\| = 0, \sqrt{N_{ix}^2 + N_{iy}^2} < \mu |f_{iz}| \\ -\mu |f_{iz}| \frac{N_{ix}}{\sqrt{N_{ix}^2 + N_{iy}^2}}, & \text{αν } \|\dot{y}\| = 0, \sqrt{N_{ix}^2 + N_{iy}^2} \geq \mu |f_{iz}| \\ -\mu |f_{iz}| \frac{v_{ix}}{\sqrt{v_{ix}^2 + v_{iy}^2}}, & \text{αν } \|\dot{y}\| \neq 0 \end{cases}$$

$$F_{f_{iy}} = \begin{cases} -N_{iy}, & \text{αν } \|\dot{y}\|=0, \sqrt{N_{ix}^2+N_{iy}^2} < \mu|f_{iz}| \\ -\mu|f_{iz}| \frac{N_{iy}}{\sqrt{N_{ix}^2+N_{iy}^2}}, & \text{αν } \|\dot{y}\|=0, \sqrt{N_{ix}^2+N_{iy}^2} \geq \mu|f_{iz}|, \\ -\mu|f_{iz}| \frac{v_{iy}}{\sqrt{v_{ix}^2+v_{iy}^2}}, & \text{αν } \|\dot{y}\| \neq 0 \end{cases}$$

όπου  $\|\dot{y}\| = \sqrt{v_{ix}^2 + v_{iy}^2}$  το μέτρο του διανύσματος γραμμικής ταχύτητας της πλατφόρμας για κάθε σημείο  $i \in \{A, B, C\}$ .

Τότε, οι επιταχύνσεις στα σημεία, προκύπτουν λύνοντας το σύστημα έξι εξισώσεων με έξι αγνώστους, που περιείχε τα μητρώα μαζών, δυσκαμψίας των ελατηρίων και τις δυνάμεις επενέργησης και τριβής, ως εξής:

$$\ddot{x}_1 = \frac{F_{Ax} + F_{fAx} + \frac{\sqrt{3}k_1(x_2 - x_1)}{2}}{M_1}$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{F_{fBx} + \frac{\sqrt{3}k_1(x_1 - x_2)}{2} + \frac{\sqrt{3}k_2(x_3 - x_2)}{2}}{M_2}$$

$$\ddot{x}_3 = \frac{F_{Cx} + F_{fCx} + \frac{\sqrt{3}k_2(x_2 - x_3)}{2}}{M_3}$$

$$\ddot{y}_1 = \frac{F_{fAy} + \frac{k_1(y_2 - y_1)}{2} + k_3(y_3 - y_1)}{M_1}$$

$$\ddot{y}_2 = \frac{F_{fBy} + \frac{k_1(y_1 - y_2)}{2} + \frac{k_2(y_3 - y_2)}{2}}{M_2}$$

$$\ddot{y}_3 = \frac{F_{fCy} + \frac{k_2(y_2 - y_3)}{2} + k_3(y_1 - y_3)}{M_3}$$

Ολοκληρώνοντας μία φορά, τις παραπάνω σχέσεις ως προς τον χρόνο, λαμβάνουμε τις ταχύτητες των σημείων. Μία επιπλέον ολοκλήρωση αρκεί, για να λάβουμε την μετατόπιση των σημείων στο επίπεδο. Η ολοκλήρωση γίνεται επαναληπτικά με την μονοβηματική μέθοδο του Euler:



$$\dot{x}_{\kappa+1} = \dot{x}_{\kappa} + h\ddot{x}_{\kappa}, \text{ για } \kappa \geq 0$$

$$x_{\kappa+1} = x_{\kappa} + h\dot{x}_{\kappa}, \text{ για } \kappa \geq 0$$

με τις αρχικές συνθήκες  $x_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ,  $\dot{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$  και  $\ddot{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ .

Έχουμε δει ότι το διάνυσμα επιτάχυνσης της πλατφόρμας, δίνεται από τη σχέση (βλ. σχέση (2.2.2.11)) :

$$M\dot{v} = R \sum_i^b F_i, \quad i \in \{A, B, C, D, E\}.$$

Επαναδιατυπώνουμε την παραπάνω σχέση με βάση όσα είπαμε σε αυτή την ενότητα ως εξής:

$$\begin{aligned} M\ddot{x}(t) &= (F_{Ax}(t) + F_{Cx}(t) + F_{fAx} + F_{fBx} + F_{fCx})\cos(\psi(t)) - \sin(\psi(t))(F_{Ay}(t) + F_{Cy}(t) + F_{fAy} + F_{fBy} + F_{fCy}) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \ddot{x}(t) = \frac{(F_{Ax}(t) + F_{Cx}(t) + F_{fAx} + F_{fBx} + F_{fCx})\cos(\psi(t)) - \sin(\psi(t))(F_{fAy} + F_{fBy} + F_{fCy})}{M} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M\ddot{y}(t) &= (F_{Ay}(t) + F_{Cy}(t) + F_{fAy} + F_{fBy} + F_{fCy})\cos(\psi(t)) + \sin(\psi(t))(F_{Ax}(t) + F_{Cx}(t) + F_{fAx} + F_{fBx} + F_{fCx}) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \ddot{y}(t) = \frac{(F_{fAy} + F_{fBy} + F_{fCy})\cos(\psi(t)) + (F_{Ax}(t) + F_{Cx}(t) + F_{fAx} + F_{fBx} + F_{fCx})\sin(\psi(t))}{M} \end{aligned}$$

Ολοκληρώνοντας όπως σε αντίστοιχες περιπτώσεις, με την μονοβηματική μέθοδο του Euler, έχουμε:

$$\dot{x}_{\kappa+1} = \dot{x}_{\kappa} + h\ddot{x}_{\kappa}, \text{ για } \kappa \geq 0$$

$$\dot{y}_{\kappa+1} = \dot{y}_{\kappa} + h\ddot{y}_{\kappa}, \text{ για } \kappa \geq 0,$$

με αρχικές συνθήκες τις  $\dot{x}_0 = \dot{y}_0 = \dot{z}_0 = 0$ . Έτσι έχουμε το διάνυσμα της ταχύτητας της πλατφόρμας  $v = [\dot{x} \ \dot{y}]$ . Πραγματοποιώντας ακόμη μία ολοκλήρωση με αρχικές τιμές  $x_0 = y_0 = z_0 = 0$ , λαμβάνουμε το διάνυσμα θέσεως της πλατφόρμας  $p = [x \ y]$  σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$x_{\kappa+1} = x_{\kappa} + h\dot{x}_{\kappa}, \text{ για } \kappa \geq 0$$

$$y_{\kappa+1} = y_{\kappa} + h\dot{y}_{\kappa}, \text{ για } \kappa \geq 0$$

Έχουμε δει επίσης, ότι η περιστροφική επιτάχυνση της πλατφόρμας δίνεται από τη σχέση (βλ. σχέση (2.2.2.12)):

$$I_{zz}\ddot{\psi} = \hat{z} \sum_i^b r_i \times^b F_i, \quad i \in \{A, B, C, D, E\}$$

Επαναδιατυπώνουμε τη σχέση αυτή με βάση αυτά που έχουμε πει για το συγκεκριμένο μοντέλο, ως εξής:

$$I_{zz}\ddot{\psi} = \frac{H}{3}(F_{fAy} - 2F_{fBy} + F_{fCy}) - \frac{1}{2}(F_{fAx} - F_{fCx}) - d(F_{Ax} - F_{Cx}),$$

ή ισοδύναμα ως:

$$\ddot{\psi} = \frac{2H(F_{fAy} - 2F_{fBy} + F_{fCy}) - 3l(F_{fAx} - F_{fCx}) - 6d(F_{Ax} - F_{Cx})}{6I_{zz}}$$

Ως γνωστόν, ολοκληρώνουμε αριθμητικά την παραπάνω σχέση, σύμφωνα με τη μέθοδο του Euler:

$$\dot{\psi}_{k+1} = \dot{\psi}_k + h\ddot{\psi}_k, \text{ για } k \geq 0$$

$$\psi_{k+1} = \psi_k + h\dot{\psi}_k, \text{ για } k \geq 0,$$

και αρχικές τιμές  $\dot{\psi}_0 = \psi_0 = 0$ , έτσι ώστε να λάβουμε την περιστροφική ταχύτητα και τη γωνία της πλατφόρμας, αντίστοιχα.

Στην περίπτωση που η πλατφόρμα κινείται στο επίπεδο, το αρχικό σύστημα για το οποίο αναζητούμε λύση κάθε φορά, αποτελείται από δώδεκα εξισώσεις με δώδεκα αγνώστους. Συνεπώς, επιδέχεται μοναδική λύση και δύναται να βρεθεί. Αναλυτικότερα, οι εξισώσεις που δίνουν τις σημειακές μάζες και τις κατακόρυφες αντιδράσεις στα στηρίγματα, παραμένουν ίδιες, ενώ από την κίνηση της πλατφόρμας έχουμε τις σχέσεις που δίνουν τις δυνάμεις τριβής:

$$F_{f_{ix}} = -\mu |f_{iz}| \frac{v_{ix}}{\sqrt{v_{ix}^2 + v_{iy}^2}}$$

$$F_{f_{iy}} = -\mu |f_{iz}| \frac{v_{iy}}{\sqrt{v_{ix}^2 + v_{iy}^2}},$$

όπου  $i \in \{A, B, C\}$ .

Τα διανύσματα ταχύτητας  $v = [\dot{x} \ \dot{y}]$  και θέσεως  $p = [x \ y]$  και η περιστροφική ταχύτητα  $\dot{\psi}$  και η γωνία  $\psi$ , της πλατφόρμας προκύπτουν όπως περιγράψαμε στην πρώτη περίπτωση, χωρίς να αλλάζουν οι σχέσεις των επιταχύνσεων από όπου προκύπτουν.

Τέλος, όταν η πλατφόρμα περιστρέφεται γύρω από κάποιο στήριγμά της, τότε το σύστημα αποτελείται από δέκα εξισώσεις με δέκα αγνώστους. Η συγκεκριμένη φάση, αποτελεί ειδική περίπτωση γενικευμένης κίνησης στο επίπεδο, με το διάνυσμα επιταχύνσεως της πλατφόρμας  $\dot{v} = [\dot{v}_x \quad \dot{v}_y]$ , να γράφεται ως γραμμικός συνδυασμός της περιστροφικής ταχύτητας  $\dot{\psi}$  και της γωνίας  $\psi$  αυτής. Συγκεκριμένα, η σχέση που συνδέει τις παραπάνω ποσότητες είναι η εξής:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \frac{2H}{3} \\ \psi^2 \frac{2H}{3} \end{bmatrix}.$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΟΧΙΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

---

4.1 Αλγόριθμοι σχεδιασμού τροχιάς

4.2 Αλγόριθμος ελέγχου θέσης της ρομποτικής πλατφόρμας

---

#### 4.1 Αλγόριθμοι σχεδιασμού τροχιάς

Στην ενότητα αυτή, περιγράφονται ορισμένες από τις δημοφιλέστερες μεθόδους σχεδιασμού τροχιών. Ειδικότερα, θα αναλύσουμε τη θεωρία συγκεκριμένων πολυωνυμικών συναρτήσεων του χρόνου και θα αναφερθούμε απλώς στις κυβικές splines και στα Lie brackets ως εναλλακτικές. Οι πρώτες δύο μέθοδοι είναι αυτές που υλοποιήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν, για να δοκιμαστεί η μικρορομποτική πλατφόρμα, κατά τις προσομοιώσεις. Οι αλγόριθμοι έχουν υλοποιηθεί στη γλώσσα προγραμματισμού C++ αποκλειστικά για το περιβάλλον του Robot Operating System.

##### 4.1.1 Σχεδιασμός τροχιάς με τετραγωνικά πολυώνυμα

Η συγκεκριμένη μέθοδος αποσκοπεί στο σχεδιασμό μίας ακολουθίας σημείων/διατάξεων στο επίπεδο, κάνοντας χρήση μίας πολυωνυμικής συνάρτησης 2<sup>ου</sup> βαθμού ως προς τον χρόνο. Δηλαδή, επιδιώκεται η εύρεση των συντελεστών του πολυωνύμου

$$q(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2,$$

όπου  $q = [x \ y \ \theta]$  η διάταξη της πλατφόρμας, συναρτήσει του χρόνου  $t > 0$ .

Αναλυτικότερα, η παραπάνω σχέση δίνει σε κάθε χρονική στιγμή  $t > 0$ , την τριάδα

$$x(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2$$

$$y(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2$$

$$\theta(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2$$

Οι συντελεστές  $\alpha_i$  υπολογίζονται χρησιμοποιώντας ορισμένες αρχικές συνθήκες, που προκύπτουν είτε από το πρόβλημα που επιδιώκεται να αντιμετωπίσει ο παραπάνω σχεδιασμός, είτε από άλλους περιορισμούς που οφείλονται στο υποκείμενο χρήσης, στον χώρο εργασίας ή λοιπές προτιμήσεις. Η περίπτωση που εξετάζουμε στην παρούσα εργασία αφορά σχεδιασμό τροχιάς για κίνηση από-σημείο-σε-σημείο, έχοντας την αρχική και την τελική διάταξη στο επίπεδο. Επίσης, δεν ενδιαφερόμαστε για κάποια επιθυμητή μη-μηδενική ταχύτητα στις διατάξεις αυτές. Σημειώνεται ότι το πλήθος των αρχικών συνθηκών, πρέπει να ισούται με το πλήθος των αγνώστων συντελεστών. Οπότε, οι συνθήκες διαμορφώνονται ως εξής:

$$q(t_0) = q_0, q(t_f) = q_f \text{ και } \dot{q}(t_0) = 0,$$

όπου  $q_0$  και  $q_f$  η αρχική και τελική διάταξη της μικρορομποτικής πλατφόρμας,  $\dot{q}$  η πρώτη παράγωγος αυτής, δηλαδή το διάνυσμα ταχύτητάς της και  $t_f$  η χρονική διάρκεια (σε s). Τότε οι συντελεστές υπολογίζονται εύκολα όπως περιγράψαμε παραπάνω και δίνονται από τις σχέσεις:

$$\alpha_0 = q_0, \alpha_1 = 0 \text{ και } \alpha_2 = \frac{(q_f - q_0)}{t_f^2}$$

Έτσι το πολυώνυμο δευτέρου βαθμού γράφεται στη μορφή:

$$q(t) = q_0 + \frac{(q_f - q_0)}{t_f^2} t^2$$

ή ισοδύναμα ως:

$$q(t) = q_0 + (q_f - q_0) \left( \frac{t}{t_f} \right)^2$$

Έτσι, για κάθε χρονική στιγμή  $t$ , λαμβάνουμε μία επιθυμητή διάταξη που ζητείται να λάβει η πλατφόρμα και κατά επέκταση, μία επιθυμητή τροχιά για να ακολουθήσει, έως ότου φτάσει στην τελική διάταξη.

#### 4.1.2 Σχεδιασμός τροχιάς με κυβικά πολυώνυμα

Η διαδικασία που περιγράφεται σε αυτή τη μέθοδο ακολουθεί το ίδιο σκεπτικό με την περίπτωση των τετραγωνικών πολυωνύμων, με μόνες διαφορές την τάξη του πολυωνύμου και ό,τι επακόλουθο έχει αυτό στους συντελεστές του. Συνεπώς, θα παραθέσουμε συνοπτικά τις αναλυτικές σχέσεις που δίνουν τα κυβικά πολυώνυμα κάθε φορά, έχοντας υπόψιν όσα ειπώθηκαν στην περίπτωση των τετραγωνικών. Όστε, ζητείται ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού της μορφής:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

Για να υπολογιστεί ο συντελεστής  $a_3$  είναι απαραίτητη ακόμη μία αρχική συνθήκη. Σκεπτόμενοι όπως πριν, έχουμε τις τέσσερις συνθήκες:

$$q(t_0) = q_0, q(t_f) = q_f, \dot{q}(t_0) = 0 \text{ και } \dot{q}(t_f) = 0$$

Υπολογίζοντας τους συντελεστές παρομοίως, έχουμε τις σχέσεις που τους περιγράφουν:

$$a_0 = q_0, a_1 = 0, a_2 = \frac{3(q_f - q_0)}{t_f^2} \text{ και } a_3 = -\frac{2(q_f - q_0)}{t_f^3}$$

Όστε το πολυώνυμο δευτέρου βαθμού γράφεται στη μορφή:

$$q(t) = q_0 + \frac{3(q_f - q_0)}{t_f^2} t^2 - \frac{2(q_f - q_0)}{t_f^3} t^3$$

ή ισοδύναμα ως:

$$q(t) = q_0 + 3(q_f - q_0) \left( \frac{t}{t_f} \right)^2 - 2(q_f - q_0) \left( \frac{t}{t_f} \right)^3.$$

#### 4.1.3 Άλλες μέθοδοι σχεδιασμού τροχιάς

Σε αυτή την ενότητα, παραθέτουμε ενδεικτικά δύο μεθόδους σχεδιασμού τροχιάς, οι οποίες μελετήθηκαν και αξίζει να αναφερθούν, χωρίς να έχει γίνει σχετική υλοποίηση.

Αρχικά, θα αναφερθούμε στη μέθοδο των κυβικών splines ως επέκταση των κυβικών πολυωνύμων, στην περίπτωση με περισσότερες επιθυμητές διατάξεις. Η συγκεκριμένη μέθοδος, χρησιμοποιώντας μια ακολουθία κυβικών πολυωνύμων, επιδιώκει να σχεδιάσει μία τροχιά μεταξύ αρχικής και τελικής διάταξης, με  $n-2$  ενδιάμεσους κόμβους-διατάξεις. Στην ουσία είναι σαν μία επαναλαμβανόμενη χρήση  $n-1$  κυβικών πολυωνύμων με κάθε ζεύγος διαδοχικών σταθμών, να αποτελεί την αφετηρία και τον στόχο. Η απαίτηση στην συγκεκριμένη μέθοδο είναι η συνέχεια των ταχυτήτων και επιταχύνσεων στις ενδιάμεσες διατάξεις. Το πλήθος των συντελεστών που πρέπει να βρεθούν, είναι πλέον  $4n-4$  και προκύπτουν από τις συνθήκες που ζητείται να ικανοποιούν στις εκάστοτε διατάξεις.

Η άλλη μέθοδος που συναντάται στη βιβλιογραφία είναι αυτή των Lie brackets και αφορά ρομποτικούς μηχανισμούς, που υπόκεινται σε μη-ολόνομους περιορισμούς και με συνηθέστερες εφαρμογές στην παράλληλη στάθμευση. Στην εν λόγω μέθοδο χρησιμοποιούνται τα διανύσματα κίνησης στο επίπεδο,  $f = [\cos\theta \ \sin\theta \ 0]$  και  $g = [0 \ 0 \ 1]$ , ως διανύσματα βάσης αυτού και κάθε διάταξη επί αυτού, προκύπτει ως γραμμικός συνδυασμός αυτών. Ο σχεδιασμός γίνεται μέσω του υπολογισμού του Lie bracket κάθε περίπτωσης, που προκύπτει από τα διανύσματα που παράγουν τον χώρο και ορίζεται ως εξής:

$$[f, g] := \frac{\partial g}{\partial q} f - \frac{\partial f}{\partial q} g, \quad \text{όπου } q = [x \ y \ \theta] \text{ το διάνυσμα διάταξης στο επίπεδο.}$$

Εκτελώντας τους υπολογισμούς προκύπτει το διάνυσμα  $[-\sin\theta \ \cos\theta \ 0]$ , δηλαδή το διάνυσμα που είναι κάθετο στο διάνυσμα της ταχύτητας του υποκειμένου. Επομένως, δείχνει προς τη μεριά του επιπέδου που δε μπορεί να αναπτύξει ταχύτητα λόγω περιορισμών. Το Lie bracket παράγει μία ακολουθία τεσσάρων διανυσμάτων κίνησης για να επιτευχθεί το συγκεκριμένο διάνυσμα. Αυτή η ακολουθία είναι της μορφής:  $\epsilon f + \epsilon g - \epsilon f - \epsilon g$ , όπου  $\epsilon$  πολύ μικρός θετικός πραγματικός αριθμός. Αθροιστικά, η ποσότητα φαίνεται να ‘‘ισούται με το 0’’, αλλά ως ακολουθία κινήσεων στο επίπεδο, είναι ‘‘διάφορη του 0’’.

## 4.2 Αλγόριθμος ελέγχου θέσης της ρομποτικής πλατφόρμας

Στην παρούσα ενότητα θα περιγράψουμε τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου ελέγχου της πλατφόρμας. Ο έλεγχος εκτελείται για να διατηρηθεί η πλατφόρμα επί (ή σε χειρότερη περίπτωση επαρκώς κοντά) της επιθυμητής γραμμής, που σχεδιάστηκε από τον αλγόριθμο σχεδιασμού τροχιών. Η ιδέα είναι να γίνει χρήση της ασύγχρονης επενέργειας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της πλατφόρμας, ώστε να εκμεταλλευτεί την μετατόπιση, που πραγματοποιεί προς τη μεριά του επενεργητή με τη μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα και το φάσμα γωνιών που μπορεί να προσεγγίσει. Δηλαδή, κινούμενη η πλατφόρμα με γωνιακές ταχύτητες εντός του διαστήματος  $[900, 1080]$  rad/s, η μέγιστη δυνατή διαφορά ταχυτήτων (1080 rad/s ο ένας επενεργητής και 900 rad/s με αντίθετη φορά, ο άλλος) επιτυγχάνει τη μέγιστη καμπυλότητα που μπορεί να έχει η καμπύλη μετατόπισης της πλατφόρμας στο επίπεδο. Υπολογίζουμε έτσι, τη μέγιστη δυνατή γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα, που έχει ως πέρας το τελικό σημείο και αρχή το αρχικό με τον άξονα των  $x$ , και φτιάχνουμε ένα πεδίο ‘‘ορατότητάς’’ της πλατφόρμας. Με λίγα λόγια, βρίσκουμε έτσι τα σημεία εκείνα που είναι προσβάσιμα από την πλατφόρμα με οποιαδήποτε διαφορά γωνιακών ταχυτήτων, εκμεταλλευόμενοι την ασύγχρονη επενέργεια. Η μέγιστη αυτή γωνία είναι περίπου ίση με 0.03 rad, πράγμα που σημαίνει ότι η πλατφόρμα έχει ένα φάσμα προσβάσιμων σημείων εντός του διαστήματος  $[\theta - 0.03, \theta + 0.03]$ , όπου  $\theta$  η γωνία της πλατφόρμας στην τρέχουσα διάταξη. Επίσης, ακόμη κι αν το σημείο βρίσκεται εντός του διαστήματος αυτού αλλά από την πίσω μεριά της πλατφόρμας, δηλαδή αν  $[\theta \pm \pi - 0.03, \theta \pm \pi + 0.03]$ , η πλατφόρμα μπορεί να μετακινηθεί σε αυτό με προς τα πίσω πορεία, απλώς εφαρμόζοντας γωνιακές ταχύτητες με αντίθετη φορά.

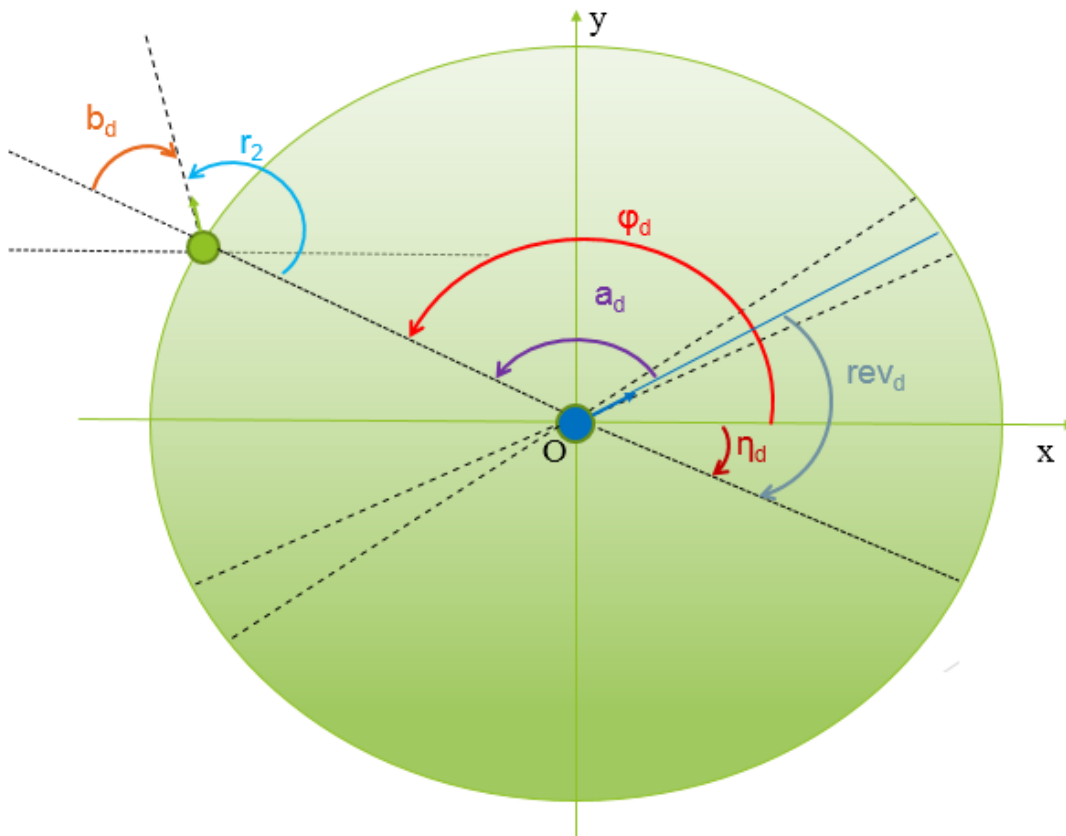
Σε περίπτωση που η πλατφόρμα ζητείται να κινηθεί προς κάποιο σημείο εκτός αυτών των ορίων, η πλατφόρμα δε μπορεί να φτάσει με ασύγχρονη επενέργεια εκεί, όσος κι αν είναι ο χρόνος που διαθέτει, καθώς πάντα θα βρίσκεται εκτός της προσβάσιμης ζώνης και το πιθανότερο είναι να το προσπεράσει. Αυτό που κάνει στη συγκεκριμένη περίπτωση ο αλγόριθμος ελέγχου της πλατφόρμας, είναι να την στρέψει προς τη μεριά που θα μπορέσει να εντάξει γρηγορότερα το



σημείο στο πεδίο ‘‘ορατότητάς’’ της. Επιπλέον, ο αλγόριθμος συγκρίνει τα αθροίσματα ορισμένων γωνιών ενδιαφέροντος σε περίπτωση που είναι λιγότερο δαπανηρό να μετακινηθεί με προς τα πίσω κίνηση.

Ορίζουμε παρακάτω κάποιες γωνίες με βάση τις διατάξεις στο επίπεδο, για να μπορέσει να γίνει σαφές ποιες από αυτές, χαρακτηρίζονται ως γωνίες ενδιαφέροντος. Συμβολίζουμε με  $\varphi_d$  την γωνία που σχηματίζει η τρέχουσα θέση της πλατφόρμας στο επίπεδο με την επιθυμητή. Αυτή προκύπτει εύκολα υπολογίζοντας το τόξο εφαιπτομένης του ηλίικου διαφορών τεταγμένων και τετμημένων, της αρχικής και της τελικής διάταξης. Με  $a_d$  συμβολίζουμε τη διαφορά της τρέχουσας γωνίας  $\theta$  της πλατφόρμας από την  $\varphi_d$ . Αν  $\theta_d$  είναι η επιθυμητή διάταξη της πλατφόρμας στο επίπεδο, τότε συμβολίζουμε με  $b_d$  τη διαφορά γωνιών  $\varphi_d$  και  $\theta_d$ . Σημειώνεται ότι αυτές είναι γωνίες εκφρασμένες στο  $[0,2\pi)$  και όχι στο  $[-\pi,\pi)$ . Από την άλλη για την ενδεχόμενη προς τα πίσω κίνηση, συμβολίζουμε με  $\eta_d$  τη γωνία που ισούται με  $\varphi_d \pm \pi$  rad, δηλαδή τη γωνία του συμμετρικού σημείου του επιθυμητού, ως προς το αρχικό σημείο. Με βάση αυτήν, προκύπτει η γωνία  $\text{rev}_d$  ως διαφορά της τρέχουσας γωνίας  $\theta$  από την  $\eta_d$ . Τέλος, συμβολίζουμε με  $r_2$  τη διαφορά της επιθυμητής γωνίας  $\theta_d$  από την  $\eta_d$ . Στο Σχήμα 4.2.1 φαίνονται οι γωνίες όπως τις έχουμε ορίσει με τις  $\text{rev}_d$ ,  $r_2$ ,  $a_d$ , και  $b_d$  να είναι οι γωνίες ενδιαφέροντος.

Υπολογίζοντας τα αθροίσματα των ζευγών γωνιών  $\text{rev}_d$ ,  $r_2$  και  $a_d$ ,  $b_d$  και βρίσκοντας το ελάχιστο εκ των δύο, ο αλγόριθμος ελέγχου επιλέγει προς τα πού θα περιστρέψει την πλατφόρμα, για να φτάσει ταχύτερα στην επιθυμητή διάταξη. Αυτό συμβαίνει, για να αποφευχθούν άσκοπες περιστροφές της πλατφόρμας που ενδέχεται να δημιουργήσουν παρασιτικές μετατοπίσεις στο επίπεδο, αλλά και για να επιλεχθεί η βέλτιστη, ως προς τον χρόνο, δυνατή διαδρομή.



Σχήμα 4.2.1 Γωνίες ενδιαφέροντος στον μοναδιαίο κύκλο

Όταν η πλατφόρμα έχει τον κατάλληλο προσανατολισμό που της επιτρέπει να έχει το επιθυμητό σημείο εντός του φάσματος γωνιών που αναφέραμε, τότε δύναται να μετακινηθεί προς αυτό με ασύγχρονη επενέργηση. Ο νόμος ελέγχου του εν λόγω αλγορίθμου, στην περίπτωση αυτή, είναι ο εξής:

$$\dot{v}_D = k_y (y_d - y)$$

$$\dot{v}_E = -k_y (y_d - y)$$

στην περίπτωση της προς τα εμπρός κίνησης, ενώ είναι:

$$\dot{v}_D = -k_y (y_d - y)$$

$$\dot{v}_E = k_y (y_d - y)$$

στην περίπτωση της προς τα πίσω κίνησης, όπου συμβολίζουμε με  $k_y$  την παράμετρο κέρδους του αλγορίθμου ελέγχου, με  $y_d$  και  $y$  την επιθυμητή και τρέχουσα τεταγμένη των αντίστοιχων διατάξεων και τέλος με  $\dot{v}_D$  και  $\dot{v}_E$  συμβολίζουμε τις γραμμικές επιταχύνσεις των επενεργητών. Μία αριθμητική

ολοκλήρωση με την μονοβηματική μέθοδο του Euler, δίνει τις γραμμικές ταχύτητες των επενεργητών.

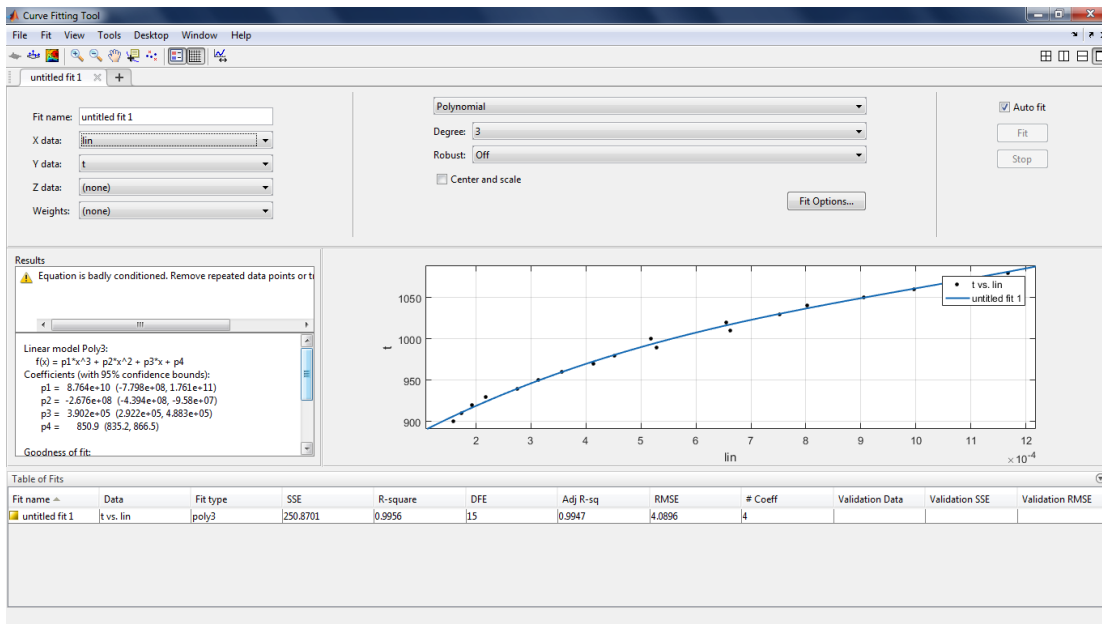
Το πρόβλημα που γεννάται εδώ είναι ότι η σχέσεις που συνδέουν τη γραμμική και την περιστροφική ταχύτητα της πλατφόρμας με τις γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών, δεν είναι οι ίδιες με την περίπτωση τροχοφόρου διαφορικού τύπου. Συνεπώς, δεν υπάρχουν κλειστοί τύποι που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βρεθούν οι αντίστοιχες γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών. Αυτό που έγινε για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα ήταν να γίνουν δοκιμές και μετρήσεις των γραμμικών και περιστροφικών ταχυτήτων, για κάθε σύγχρονη επενέργεια από 900 rad/s έως 1080 rad/s και με βήμα 10 rad/s. Συλλέχθηκαν όλες οι μετρήσεις και έγινε μία προσέγγιση των σχέσεων που συνδέουν τα μεγέθη αυτά μεταξύ τους και των αντιστρόφων αυτών. Η προσέγγιση έγινε με χρήση του εργαλείου Curve Fitting του Matlab και οι αντίστοιχες σχέσεις που προέκυψαν φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 4.2.2 φαίνεται η σχέση των γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών και της γραμμικής ταχύτητας της πλατφόρμας. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση που παράγει τις γωνιακές ταχύτητες είναι πολυώνυμο παρεμβολής κυβικής τάξης με συντελεστές των αντίστοιχων όρων τους εξής:

$$a_3 = 8.764e+10, a_2 = -2.676e+08, a_1 = 3.902e+05 \text{ και } a_0 = 850.9$$

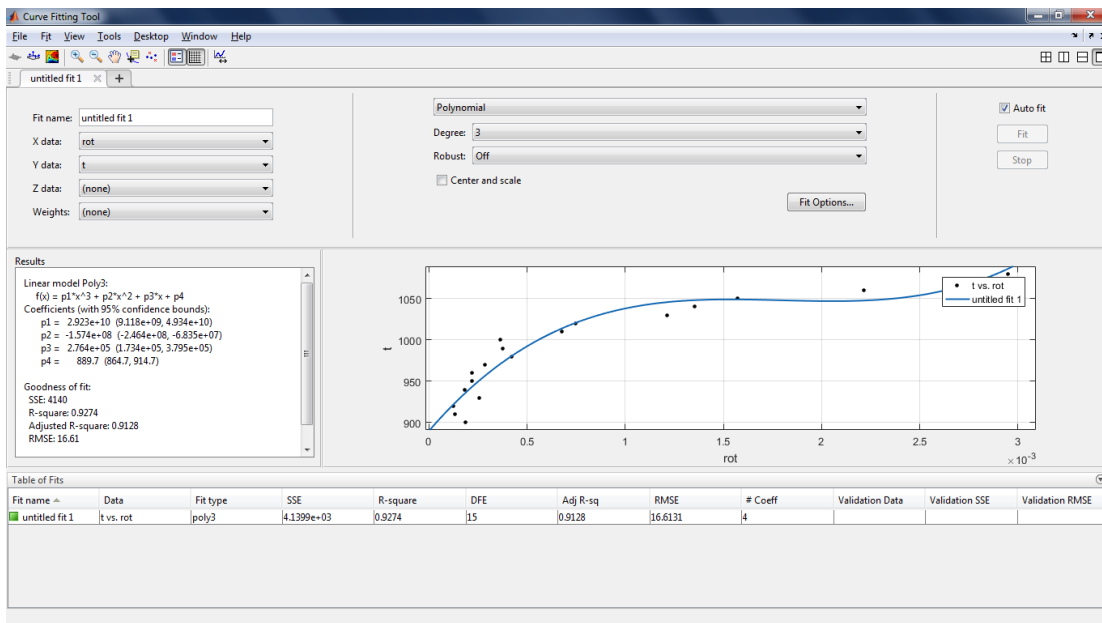
Αντίστοιχα, η συνάρτηση που δίνει τις γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών σε σχέση με την περιστροφική ταχύτητα της πλατφόρμας, είναι επίσης πολυώνυμο παρεμβολής τρίτου βαθμού με συντελεστές των αντίστοιχων όρων, τους:

$$b_3 = 2.923e+10, b_2 = -1.574e+08, b_1 = 2.764e+05 \text{ και } b_0 = 889.7.$$

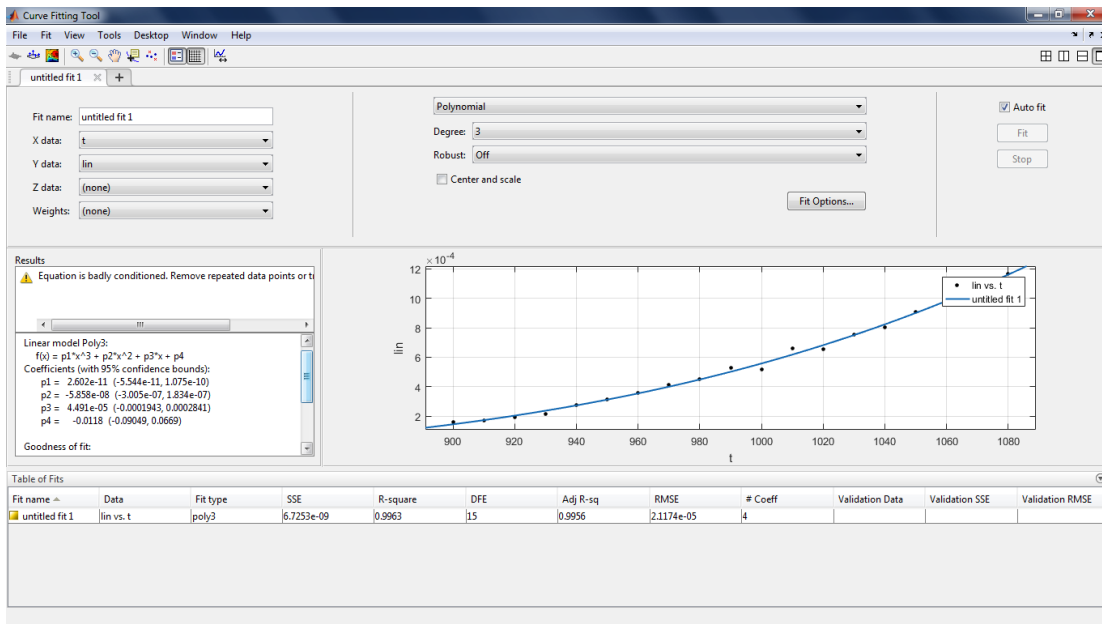
Η αντίστοιχη καμπύλη φαίνεται στο Σχήμα 4.2.3, ενώ οι καμπύλες των αντιστρόφων συναρτήσεων αυτών, φαίνονται στο Σχήμα 4.2.4 και στο Σχήμα 4.2.5, κατά αντιστοιχία.



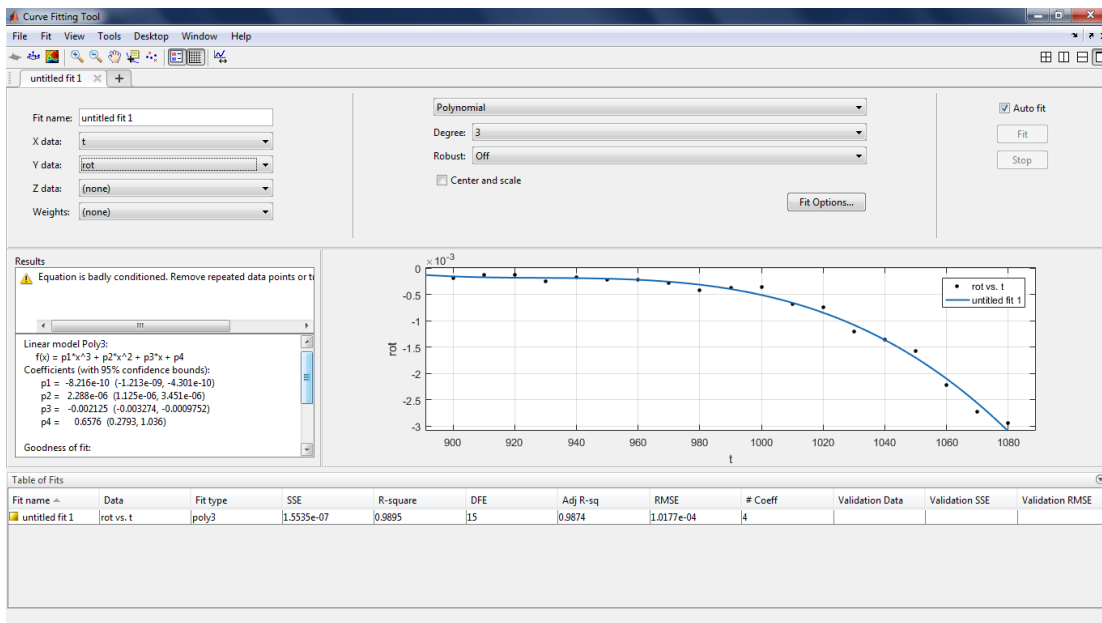
Σχήμα 4.2.2 Καμπύλη συσχέτισης γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών και γραμμικής ταχύτητας της πλατφόρμας



Σχήμα 4.2.3 Καμπύλη συσχέτισης γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών και περιστροφικής ταχύτητας της πλατφόρμας



Σχήμα 4.2.4 Καμπύλη συσχέτισης γραμμικής ταχύτητας της πλατφόρμας και γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών



Σχήμα 4.2.5 Καμπύλη συσχέτισης περιστροφικής ταχύτητας της πλατφόρμας και γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών

Έχοντας πλέον τη σχέση, που συνδέει τις γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών με τις γραμμικές αυτών, μπορούμε να υπολογίζουμε την γωνιακή ταχύτητα του εκάστοτε τροχού, για κάθε επιθυμητή γραμμική ταχύτητα αυτού.

Τέλος, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που συνδέουν τις γωνιακές ταχύτητες των τροχών με την περιστροφική ταχύτητα της πλατφόρμας, είναι δυνατός ο υπολογισμός των απαραίτητων γωνιακών ταχυτήτων για την περιστροφή της πλατφόρμας, έτσι ώστε να λάβει τον επιθυμητό προσανατολισμό στον διαθέσιμο χρόνο. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ελέγχου χρησιμοποιεί τις μέγιστες δυνατές γωνιακές ταχύτητες, αγνοώντας την ενεργειακή κατανάλωση. Με αυτά ολοκληρώνεται και ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου ελέγχου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ROBOT OPERATING SYSTEM (ROS)

- 
- 5.1 Λίγα λόγια για το ROS
  - 5.2 Περιγραφή συνεργασίας αλγορίθμων
  - 5.3 Προσομοίωση κίνησης και έλεγχος μικρορομποτικής πλατφόρμας
  - 5.4 Σύγκριση μοντέλων
- 

#### 5.1 Λίγα λόγια για το ROS

Το Robot Operating System (συντ. ROS) δεν είναι, όπως δηλώνει το όνομά του, ένα λειτουργικό σύστημα για ρομπότ, αλλά ένα είδος λογισμικού εργασίας για να ενισχύσει/λειτουργήσει κάποιο ρομποτικό μηχανισμό/σύστημα. Δηλαδή κάνουμε λόγο, για ένα περιβάλλον εργασίας ανοικτού κώδικα, όπου μπορούμε να συντάξουμε αλγορίθμους οι οποίοι εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο από ρομπότ [13]. Οι αλγόριθμοι συνήθως δρουν συνεργατικά, δηλαδή σαν υπορουτίνες ενός μεγαλύτερου προγράμματος/σχεδίου. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει, μεταξύ άλλων, είναι το ότι υπάρχουν έτοιμες βιβλιοθήκες εργαλείων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα από τον χρήστη ή/και τους ρομποτικούς μηχανισμούς που επιθυμεί να ελέγξει (έως πολύ χαμηλό επίπεδο), διαχείριση διαθέσιμων (ή μη) είτε πακέτων, είτε μηνυμάτων, είτε υπηρεσιών. Υπάρχουν

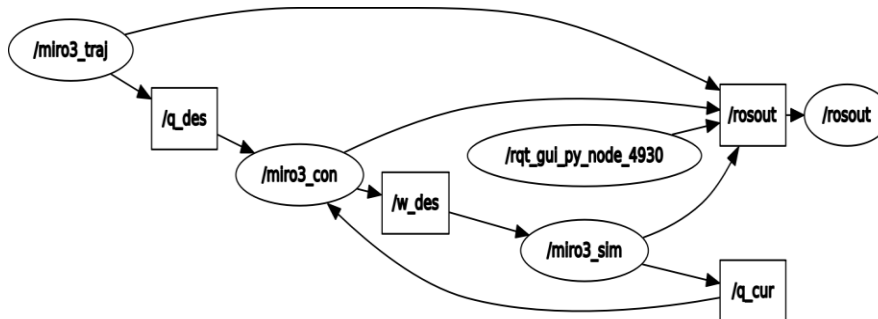
μηνύματα επικοινωνίας μεταξύ των αλγορίθμων, αλλά και η δυνατότητα να σχεδιαστούν νέα, που εξυπηρετούν άλλους σκοπούς [15]. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη, να απλουστεύσει το δύσκολο έργο του χειρισμού ενός ρομποτικού μηχανισμού και της υλοποίησης των αντίστοιχων αλγορίθμων ελέγχου αυτών. Το ROS έχει γίνει αρκετά δημοφιλές την τελευταία δεκαετία, λόγω αυτών αλλά και πολλών άλλων δυνατοτήτων που προσφέρει και αυτό ενισχύει ακόμα περισσότερο την επέκταση αυτών των δυνατοτήτων.

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη λειτουργία του ROS, μπορούμε να το φανταστούμε σαν έναν “χώρο εργασίας”, όπου υπάρχουν κατανεμημένες ομάδες ειδικών σε διάφορα γραφεία, όπου κάνουν κάποια συγκεκριμένη διεργασία. Τα αποτελέσματα της διεργασίας σε κάθε γραφείο, γνωστοποιείται σε όποιο άλλο γραφείο έχει την ανάγκη να κάνει χρήση αυτής της πληροφορίας που έχει εξαχθεί. Αυτού του είδους η συνεργασία επιτυγχάνεται μέσω του ROS και όλων αυτών των βιβλιοθηκών μηνυμάτων, υπηρεσιών και εργαλείων που περιλαμβάνει. Η γενική ιδέα λειτουργίας του είναι ότι υπάρχουν ορισμένοι κόμβοι (nodes) και ορισμένα θέματα (topics) και το ROS ρυθμίζει την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων με χρήση των θεμάτων. Οι κόμβοι παίζουν τον ρόλο των ομάδων εργασίας σε ένα γραφείο και τα θέματα, τον χώρο όπου κοινοποιείται η πληροφορία/αποτέλεσμα της διεργασίας της κάθε ομάδας και όπου η ομάδα που την χρειάζεται, μπορεί να ανατρέξει για να την χρησιμοποιήσει.

Σε ό,τι αφορά το λειτουργικό κομμάτι, αρχικά εκτελείται ο πυρήνας λειτουργιών του ROS, ο οποίος είναι και ο κυρίαρχος κόμβος του συστήματος. Η αρμοδιότητα του πυρήνα του ROS είναι η διαχείριση των μηνυμάτων που μεταφέρονται στα θέματα και η ορθή επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Καμία υπορουτίνα δε μπορεί να λειτουργήσει στην περίπτωση που πάψει η λειτουργία του πυρήνα. Αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν εργαλεία του ROS ή είναι σχεδιασμένοι για να λειτουργούν σε ROS, εκτελούνται μετά την εκκίνησή του. Σε ό,τι αφορά την υλοποίηση που έγινε για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, έπειτα από την εκκίνηση λειτουργίας του πυρήνα εκτελούνται κατά σειρά, οι αλγόριθμοι που αφορούν τον σχεδιασμό της τροχιάς που θα ακολουθήσει η ρομποτική πλατφόρμα, τον έλεγχο των γωνιακών ταχυτήτων των

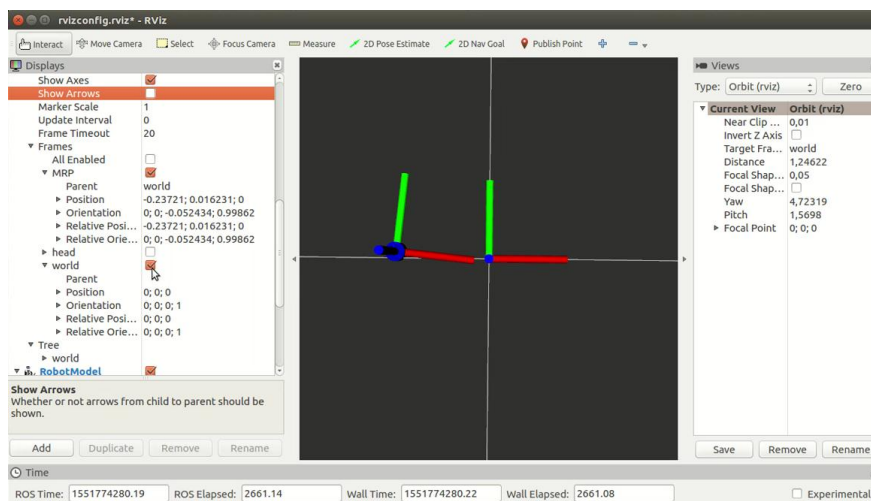


επενεργητών και την προσομοίωση της κίνησης της πλατφόρμας. Στο Σχήμα 5.1.1 φαίνεται η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων κατά τη λειτουργία του πυρήνα και των αλγορίθμων που αναφέρθηκαν, με χρήση του εργαλείου rqt\_graph του ROS.



Σχήμα 5.1.1 Αναπαράσταση επικοινωνίας μεταξύ κόμβων με χρήση του rqt\_graph του ROS

Επίσης, ένα άλλο από τα πολλά εργαλεία που προσφέρει το ROS είναι το rviz, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της κίνησης της μικρορομποτικής πλατφόρμας. Στο Σχήμα 5.1.2 φαίνεται στιγμιότυπο της χρήσης του εν λόγω εργαλείου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης ενός σεναρίου κίνησης. Σημειώνεται ότι για να φανεί η συγκεκριμένη πορεία της πλατφόρμας, έχει γίνει μία κλιμάκωση της τάξης του  $10^3$  στις μετατοπίσεις και του 10 στην περιστροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Σε διαφορετική περίπτωση, η μετατόπιση είναι τόσο μικρή που δε γίνεται εύκολα αντιληπτή με γυμνό μάτι.



Σχήμα 5.1.2 Στιγμιότυπο χρήσης του εργαλείου rviz του ROS

Κάποια άλλα εργαλεία του ROS για απεικόνιση γραφικών παραστάσεων ή σημείων ή για προσομοίωση κινήσεων, ρομποτικών συστημάτων και άλλα, είναι το `rqt_plot`, το `Gazebo` και πολλά ακόμη, που ίσως δεν χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία.

## 5.2 Περιγραφή συνεργασίας αλγορίθμων

Ο τρόπος λειτουργίας του ROS και η όλη επικοινωνία μεταξύ κόμβων-θεμάτων, δίνει τη δυνατότητα να επιμερισθεί το πρόβλημα σε μικρότερα και μία δύσκολη διεργασία, μπορεί να αντιμετωπισθεί με ταυτόχρονη συνεργασία αλγορίθμων. Ο κάθε αλγόριθμος αναλαμβάνει το δικό του έργο, το αποτέλεσμα του οποίου είναι απαραίτητο για κάποιον άλλον. Εκείνος με τη σειρά του θα διεκπεραιώσει μία άλλη εργασία για κάποιον άλλον και ούτω καθεξής. Η παρούσα εργασία, τους αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, είχε ως επιμέρους στόχους να υλοποιηθούν συνεργατικοί αλγόριθμοι σχεδιασμού τροχιών, ελέγχου και προσομοίωσης τους μικρορομποτικής πλατφόρμας δύο βαθμών ελευθερίας. Έτσι, σχεδιάστηκαν τρεις αλγόριθμοι που ο καθένας αναλαμβάνει τη συγκεκριμένη διεργασία και ως συνολικό έργο έχουν την οδήγηση τους πλατφόρμας τους την επιθυμητή διάταξη.

Αρχικά, ο αλγόριθμος σχεδιασμού τροχιών, δεδομένων τους αρχικής και τελικής διάταξης, βρίσκει με χρήση τετραγωνικών/κυβικών πολυωνύμων μία επιθυμητή γραμμή που τους συνδέει. Τα διακριτά σημεία που την απαρτίζουν, κοινοποιούνται στο θέμα που διατηρεί τέτοιου είδους μηνύματα (2Δ διατάξεις). Στη συνέχεια ο αλγόριθμος ελέγχου, με βάση τον νόμο ελέγχου με τον οποίο είναι εφοδιασμένος, αναλαμβάνει το έργο του υπολογισμού των γωνιακών ταχυτήτων των επενεργητών, που απαιτούνται για να κινηθεί η πλατφόρμα τους το επιθυμητό σημείο. Το επιθυμητό σημείο βρίσκεται στο θέμα όπου κοινοποιούσε ο αλγόριθμος σχεδιασμού τροχιών. Έχοντας κάνει εγγραφή στο ίδιο θέμα, ο αλγόριθμος ελέγχου μπορεί να ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο για οποιαδήποτε αλλαγή στην επιθυμητή διάταξη. Ο αλγόριθμος ελέγχου, κοινοποιεί τους γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών που έχει υπολογίσει, σε

ένα άλλο θέμα που διατηρεί αντίστοιχα μηνύματα (γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών D και E). Δουλειά του αλγορίθμου προσομοίωσης, είναι να κάνει εγγραφή στο συγκεκριμένο θέμα και με βάση τους γωνιακές ταχύτητες αυτές, να υπολογίσει τη νέα διάταξη που λαμβάνει η πλατφόρμα στο επίπεδο. Η διάταξη αυτή κοινοποιείται σε ένα τρίτο θέμα, που διατηρεί τους τρέχουσες διατάξεις τους πλατφόρμας. Τέλος, τους ολοκλήρωση του κύκλου συνεργασίας, ο αλγόριθμος ελέγχου έχοντας κάνει εγγραφή στο τελευταίο θέμα, υπολογίζει εκ νέου τους απαραίτητες γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών, για να διατηρήσει την πορεία τους πλατφόρμας επάνω (ή επαρκώς κοντά) στην επιθυμητή τροχιά. Στο Σχήμα 5.1.1 είναι φανερό η συνεργασία που μόλις περιγράψαμε, μαζί με την πληροφορία του ποιος κόμβος κοινοποιεί κάτι ή έχει κάνει εγγραφή και σε ποιο θέμα. Τα θέματα είναι με τη σειρά που αναφέρθηκαν τα εξής: /q\_des, /w\_des και /q\_cur και φαίνονται ως ορθογώνια σε διαγώνια διάταξη στο Σχήμα 5.1.1. Οι κόμβοι με τη σειρά τους είναι: /miro3\_traj, /miro3\_con και /miro3\_sim και φαίνονται κατά παρόμοιο τρόπο στο ίδιο σχήμα.

### 5.3 Προσομοίωση κίνησης και έλεγχος μικρορομποτικής πλατφόρμας

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών του όλου εγχειρήματος και γίνεται μια προσπάθεια να αποσαφηνιστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της σύγχρονης και της ασύγχρονης επενέργειας, που αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.2.2 και σε ποιες περιπτώσεις χρειάζεται η επιλογή της καθεμιάς. Υπενθυμίζεται ότι κατά την σύγχρονη επενέργεια, οι γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών είναι ίσες ή αντίθετες, σταθερές και σε φάση, με αποτέλεσμα η πλατφόρμα είτε να περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό της κατά την ωρολογιακή ή ανθρωπολογιακή φορά, είτε να κινείται προς τα εμπρός ή προς τα πίσω, αντίστοιχα. Διαφορετικά, κατά την ασύγχρονη επενέργεια οι γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών διαφέρουν και ως εκ τούτου, η πλατφόρμα εκτελεί γενικευμένη κίνηση στο επίπεδο. Γίνεται ο διαχωρισμός στο είδος της

επενέργειας που χρησιμοποιείται κάθε φορά, για να γίνουν αισθητές οι διαφορές μεταξύ σύγχρονης και ασύγχρονης.

Επιπλέον, θα γίνουν αντιληπτά τα σημεία στα οποία υπερτερεί η μία επενέργεια, έναντι της άλλης. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε κατά τις δοκιμές, για τις προσομοιώσεις και τους ελέγχους, είναι αυτό του παραμορφώσιμου σώματος, καθώς θεωρείται ως πιο αντιπροσωπευτικό και πλησιέστερο του πραγματικού. Όλες οι δοκιμές των αλγορίθμων και η μεταξύ τους συνεργασία-επικοινωνία, έχουν γίνει στο περιβάλλον του ROS. Η εποπτεία των αποτελεσμάτων (γραφικών παραστάσεων, κτλ) έχει γίνει με το εργαλείο `gnuplot`. Η οπτικοποίηση των δοκιμών έγινε με το εργαλείο προσομοίωσης `rviz`, του ROS, με ταυτόχρονη επικοινωνία του κόμβου `rviz` με τον κόμβο προσομοίωσης. Επιπρόσθετες δοκιμές και έλεγχοι ορθότητας των προσομοιωτών έγιναν με χρήση της πλατφόρμας του Matlab.

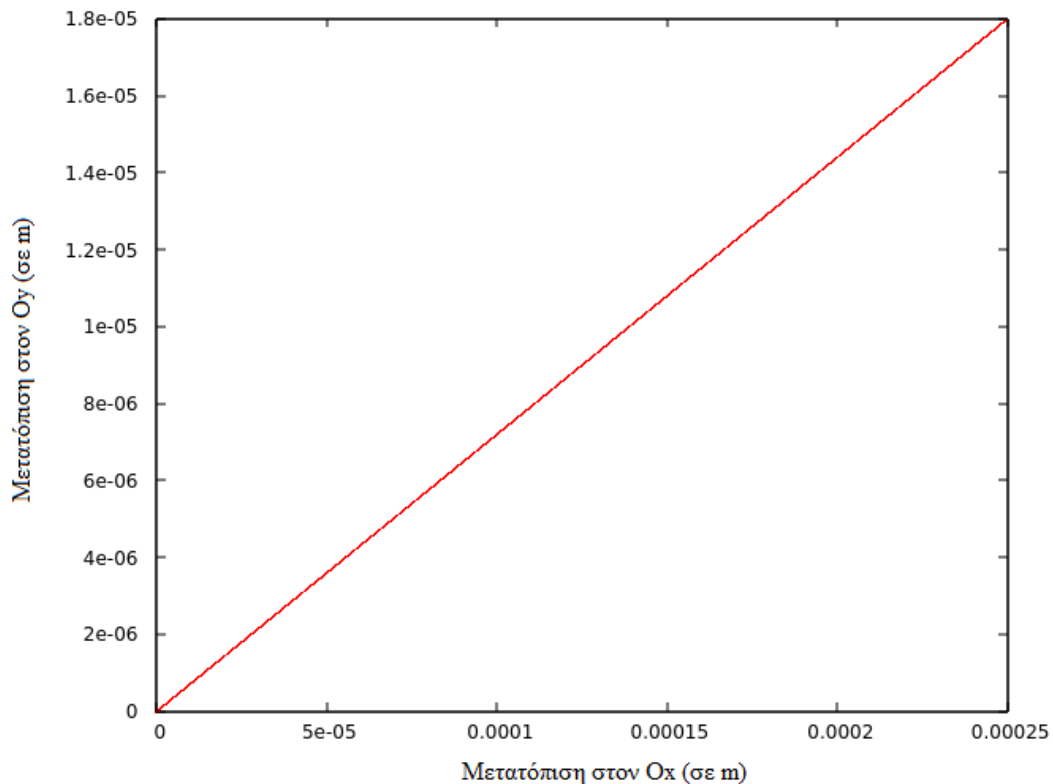
### 5.3.1 Ασύγχρονη επενέργεια

Στο συγκεκριμένο εδάφιο, παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις μετατόπισης και περιστροφής στο επίπεδο, που προέκυψαν κατά την οδήγηση της μικρορομποτικής πλατφόρμας της επιθυμητές διατάξεις στο επίπεδο. Θα παρουσιαστούν δύο σενάρια οδήγησης της πλατφόρμας που αξίζει να ασχοληθούμε, διότι καθιστούν αρκετά σαφή την κίνησή της στο επίπεδο και έχουν αρκετό ενδιαφέρον σε ότι αφορά της νόμους ελέγχου. Σημειώνεται ότι δεν ενδιαφερόμαστε για την παρακολούθηση της τροχιάς περιστροφής ή αλλιώς της γωνίας  $\theta$ , της πλατφόρμας, παρά μόνο για της συντεταγμένες των σημείων στο επίπεδο. Αυτό, διότι ο νόμος ελέγχου δρα σε δύο φάσεις και της τέτοιος σχεδιασμός, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διευκολύνει το δύσκολο έργο του ελέγχου.

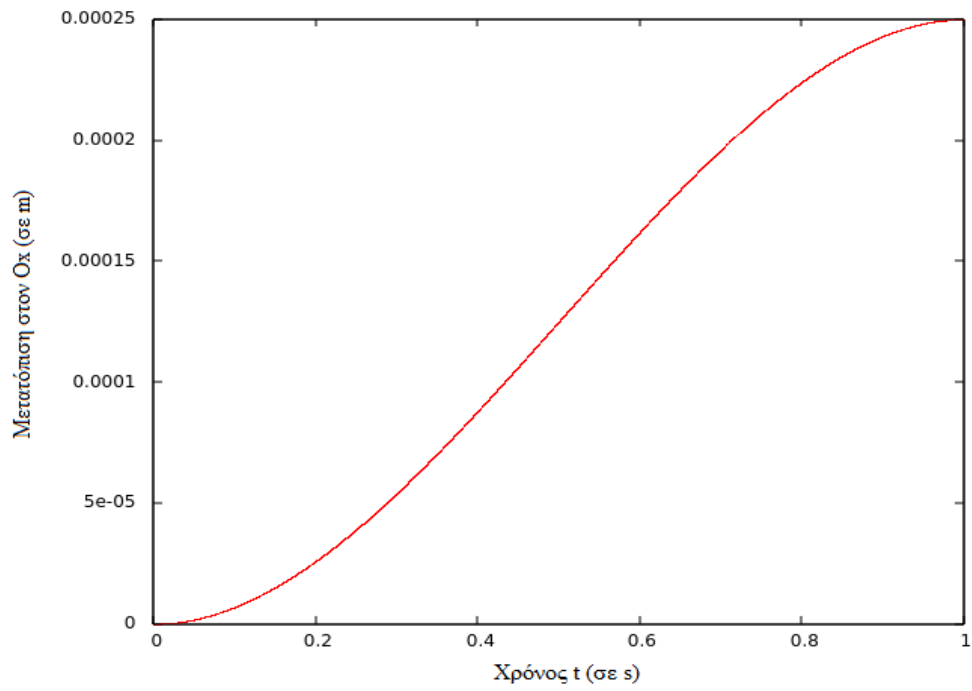
Αρχικά, της υποθέσουμε ότι έχουμε το εξής σενάριο:

Η μικρορομποτική πλατφόρμα βρίσκεται στην αρχική διάταξη  $[0 \ 0 \ 0]$  και ζητείται να μεταβεί στην τελική διάταξη  $[0.00025 \ 0.000018 \ 0.035]$  (για παράδειγμα, δια να πραγματοποιήσει κάποια έγχυση κυττάρου), ακολουθώντας την ευθεία γραμμή που ενώνει τα δύο σημεία. Ο αλγόριθμος σχεδιασμού

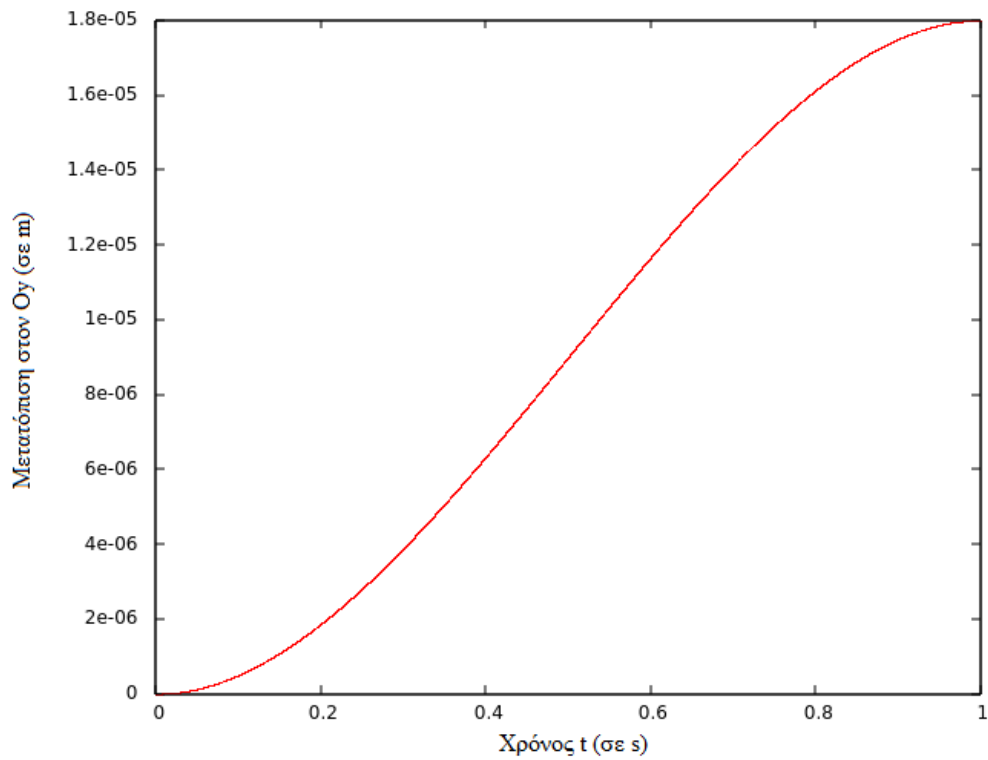
δρόμου, χρησιμοποιεί κυβικά (ή τετραγωνικά) πολυώνυμα του χρόνου, για να κατασκευάσει την ακολουθία σημείων που θα χρειαστεί να ακολουθήσει η πλατφόρμα. Έργο του ελεγκτή είναι να καθοδηγήσει την πλατφόρμα της τον στόχο, διατηρώντας την πορεία της επάνω (ή επαρκώς κοντά) στη γραμμή. Στο Σχήμα 5.3.1.1 φαίνεται η ευθεία γραμμή που παράγει ο αλγόριθμος σχεδιασμού τροχιάς, ενώ οι επιμέρους καμπύλες των συντεταγμένων των σημείων της, φαίνονται στο Σχήμα 5.3.1.2 και στο Σχήμα 5.3.1.3, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.1.1 Επιθυμητή τροχιά της παρακολούθησης

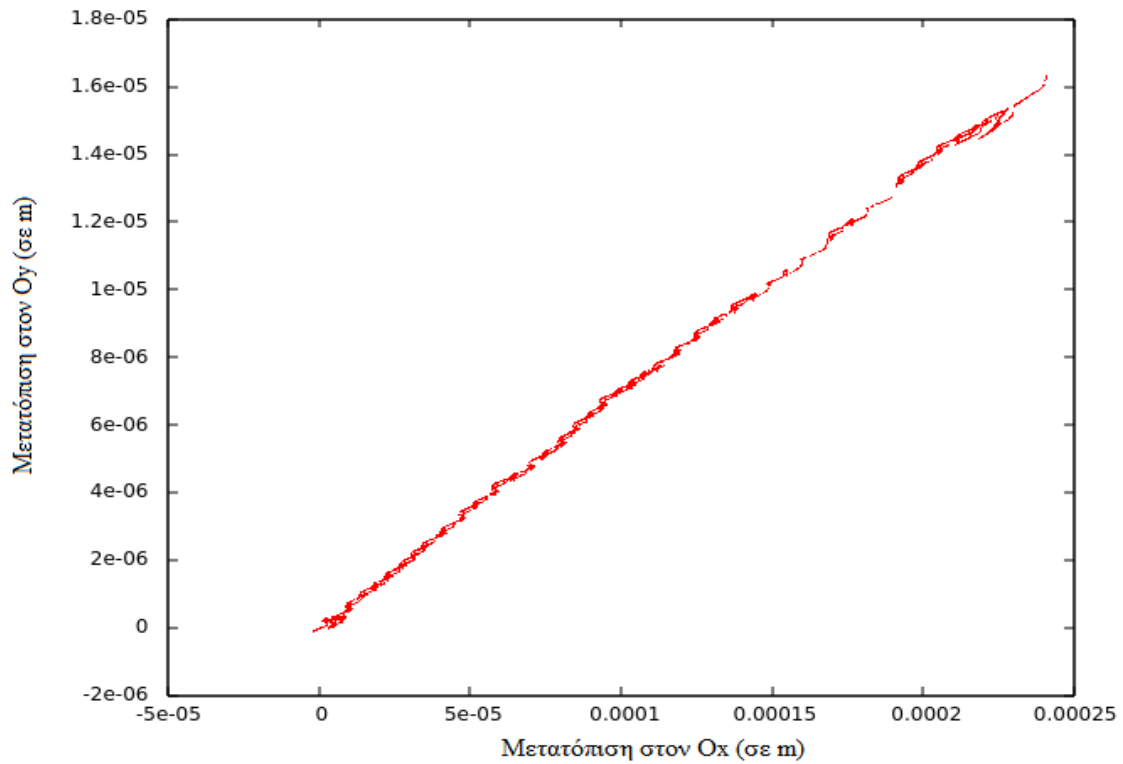


Σχήμα 5.3.1.2 Κυβική καμπύλη τετμημένων συναρτήσεϊ του χρόνου

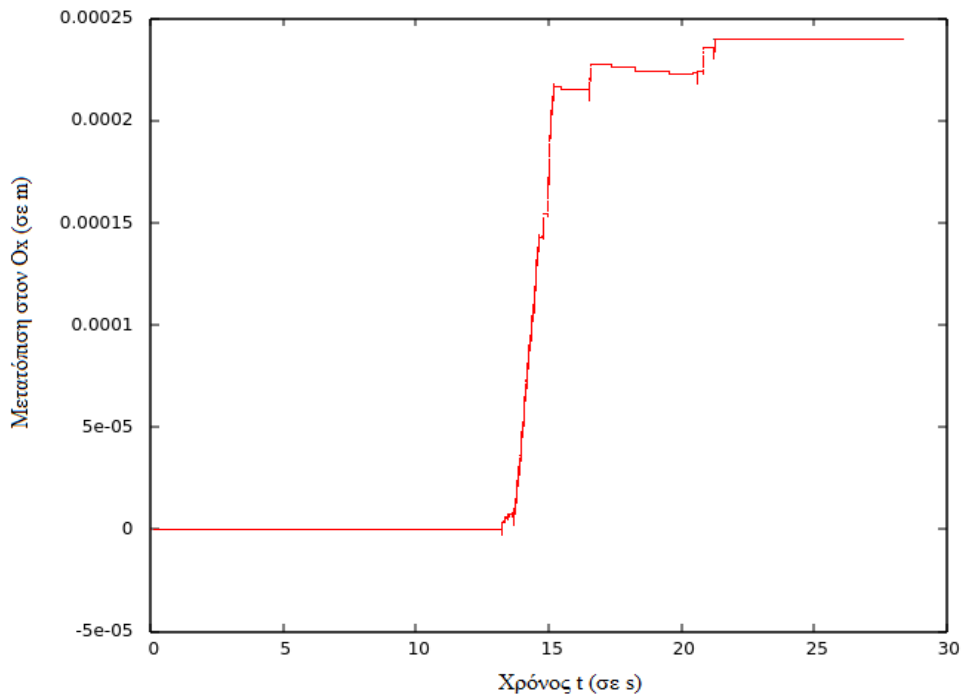


Σχήμα 5.3.1.3 Κυβική καμπύλη τεταγμένων συναρτήσεϊ του χρόνου

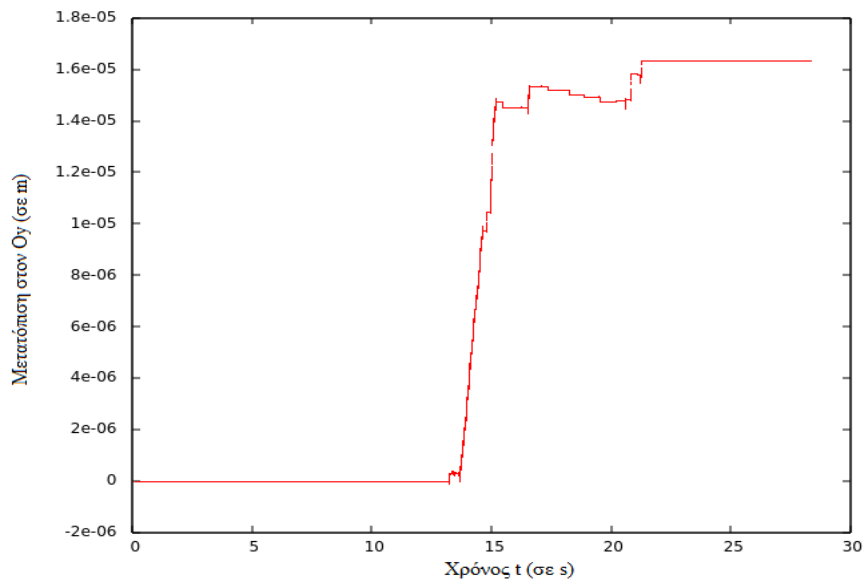
Η πραγματική πορεία της πλατφόρμας κατά την οδήγηση της την επιθυμητή διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 5.3.1.4, ενώ οι επιμέρους καμπύλες των συντεταγμένων στα Σχήματα 5.3.1.5 και 5.3.1.6, κατά αντιστοιχία με τα επιθυμητά.



Σχήμα 5.3.1.4 Πραγματική πορεία της πλατφόρμας στο επίπεδο



Σχήμα 5.3.1.5 Πραγματική μετατόπιση της πλατφόρμας στον άξονα των  $x$

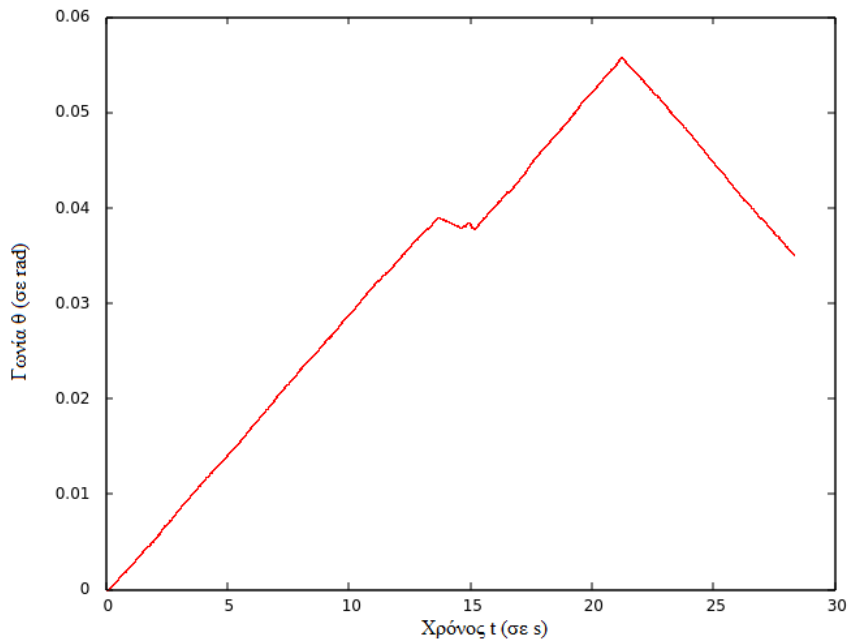


Σχήμα 5.3.1.6 Πραγματική μετατόπιση της πλατφόρμας στον άξονα των  $y$

Τα σταθερά τμήματα πριν ξεκινήσει η μετατόπιση της αντίστοιχους άξονες, οφείλεται στην απλή περιστροφική κίνηση της πλατφόρμας, μέχρι να λάβει τον προσανατολισμό που της επιτρέπει να έχει το επιθυμητό σημείο στο πεδίο



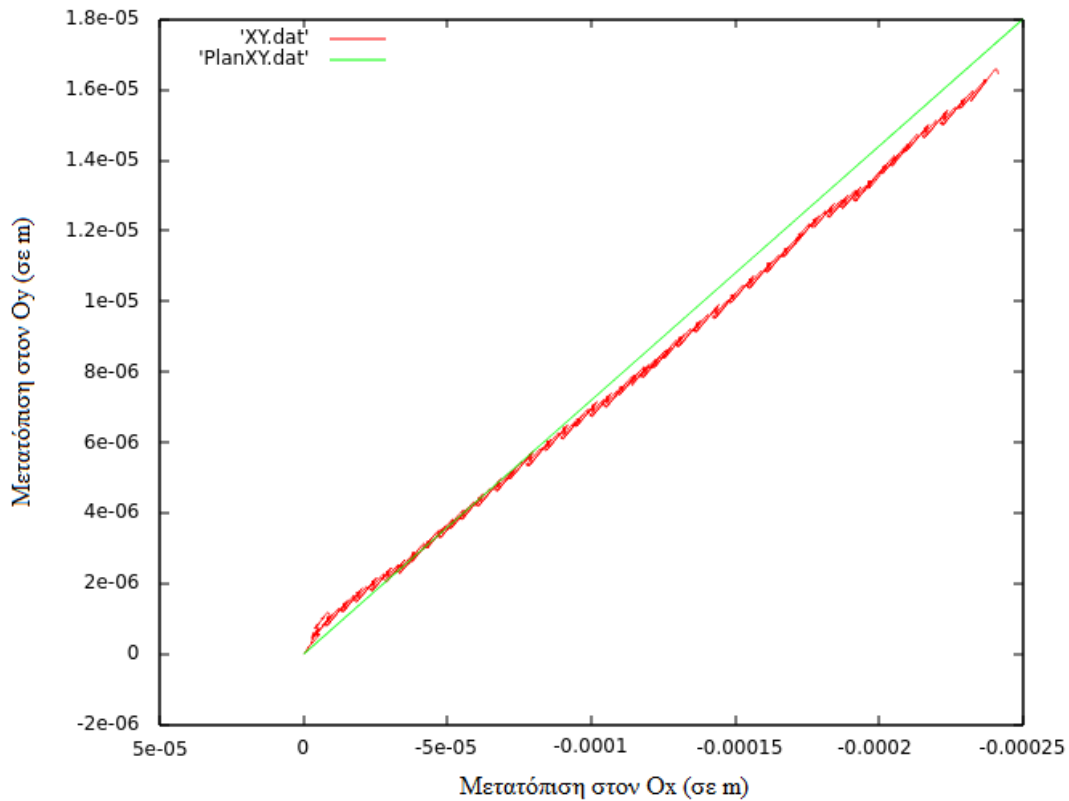
‘‘ορατότητάς’’ της. Η περιστροφή της πλατφόρμας φαίνεται από τη γωνία της σε σχέση με τον χρόνο στο Σχήμα 5.3.1.7.



Σχήμα 5.3.1.7 Γωνία της πλατφόρμας συναρτήσει του χρόνου

Πλέον, γίνεται σαφές το γιατί δεν υπάρχει μετατόπιση της άξονες  $Ox$  και  $Oy$  έως ότου η πλατφόρμα λάβει τον απαραίτητο προσανατολισμό. Επιπλέον, η παρασιτική περιστροφή φαίνεται κατά τη διάρκεια που ξεκινάει η ασύγχρονη επενέργεια και μετατόπιση της πλατφόρμας της τον στόχο (περίπου από το  $14^\circ$  μέχρι το  $16^\circ$  δευτερόλεπτο). Η περιστροφή αυτή, είναι της την αντίθετη φορά με αποτέλεσμα να βγάζει την πλατφόρμα εκτός επιθυμητού προσανατολισμού και αναγκάζοντάς την να περιστραφεί ξανά για να επανέλθει σε αυτόν. Τέλος, η πλατφόρμα περιστρέφεται ‘‘συνειδητά’’ κατά την ωρολογιακή φορά για να λάβει τον επιθυμητό προσανατολισμό και κατά επέκταση την επιθυμητή διάταξη. Στο Σχήμα 5.3.1.8 φαίνεται η απόκλιση της πλατφόρμας από την επιθυμητή τροχιά. Υπενθυμίζουμε ότι η τροχιά που αφορά τον προσανατολισμό της πλατφόρμας δε της απασχολεί. Ειδικά, θα χρειαζόταν κατά τμήματα σχεδιασμός τροχιάς για τα χρονικά διαστήματα περιστροφής της πλατφόρμας, πράγμα που δεν κάνουν τα κυβικά (ή τετραγωνικά) πολυώνυμα, διότι

εξαρτώνται αποκλειστικά από την αρχική και τελική διάταξη και τον χρόνο κίνησης.



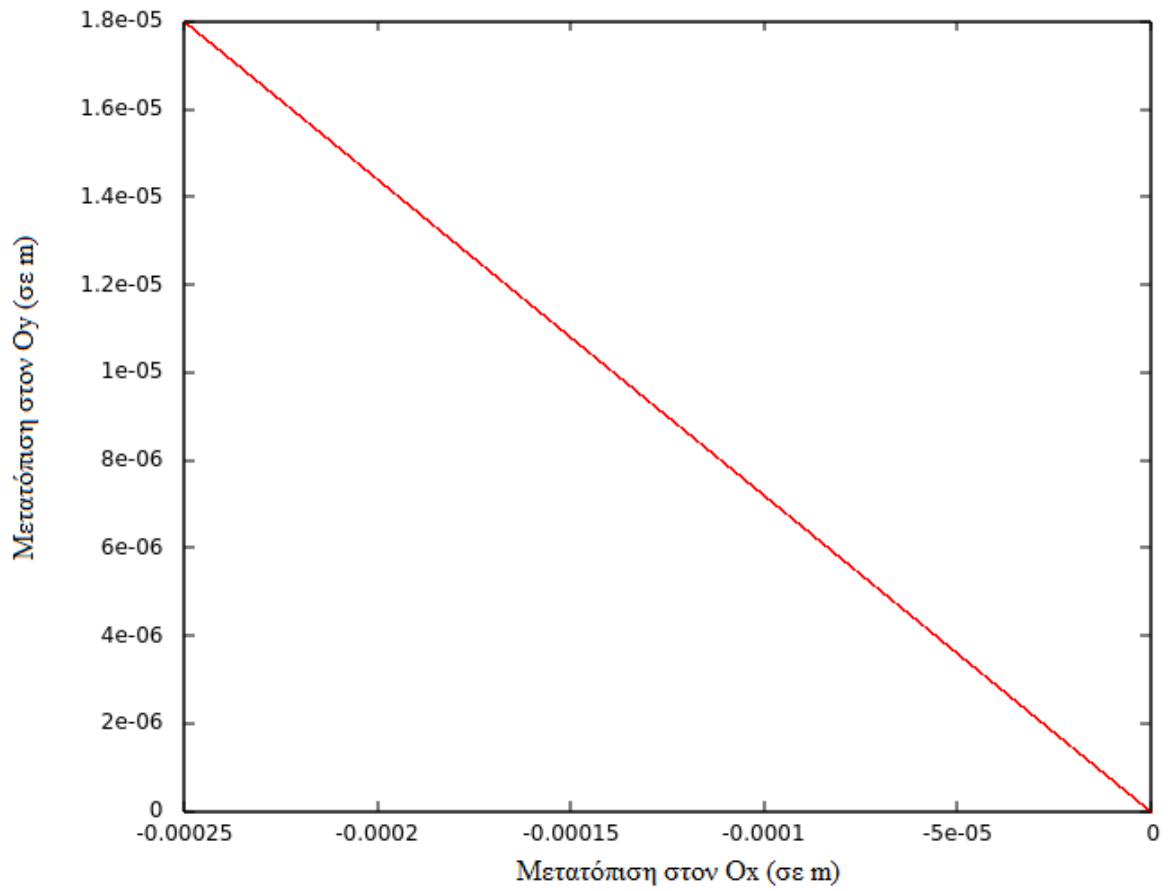
Σχήμα 5.3.1.8 Σχεδιασμένη (πράσινη γραμμή) και πραγματική (κόκκινη) τροχιά μετατόπισης στο επίπεδο

Παρατηρείται ότι η πορεία της πλατφόρμας είναι ανεκτικά κοντά στην επιθυμητή και η τελική θέση της στο επίπεδο, έχει μία επιτρεπτή απόκλιση μερικών δεκάδων μικρομέτρων.

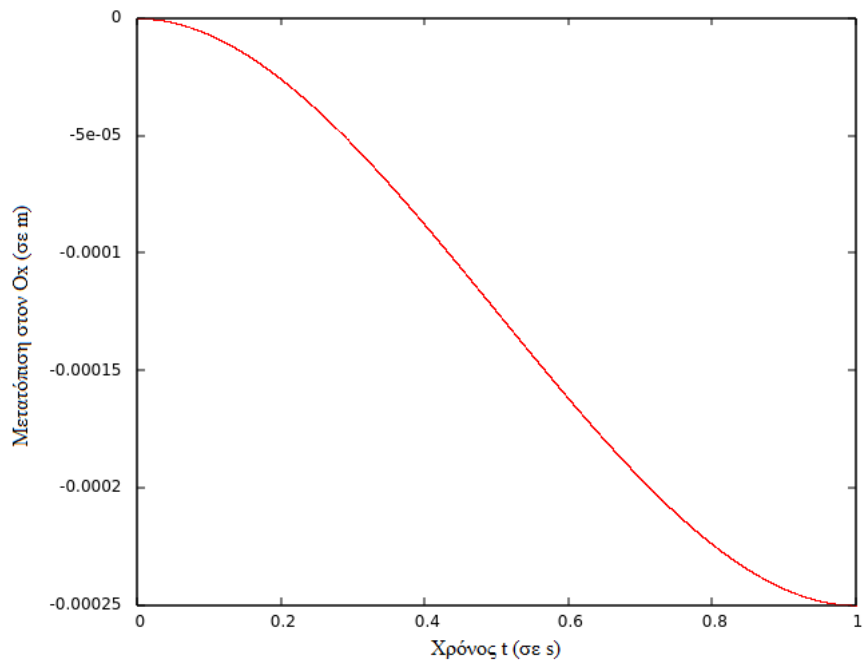
Εναλλακτικά, της υποθέσουμε ότι έχουμε το αντίστοιχο σενάριο, που απαιτεί της τα πίσω κίνηση:

Η μικρορομποτική πλατφόρμα βρίσκεται στην αρχική διάταξη  $[0 \ 0 \ -0.13]$  και ζητείται να μεταβεί στην τελική διάταξη  $[-0.00025 \ 0.000018 \ -0.11]$  ακολουθώντας την ευθεία γραμμή που ενώνει τα δύο σημεία. Αυτή τη φορά, έχοντας υπολογίσει της γωνίες ενδιαφέροντος και βρίσκοντας την βέλτιστη φορά περιστροφής, ο ελεγκτής επιλέγει να πορευθεί με την όπισθεν της το επιθυμητό σημείο. Οι διαφορές στο σχεδιασμό τροχιάς είναι ορατές στο Σχήμα 5.3.1.9 και

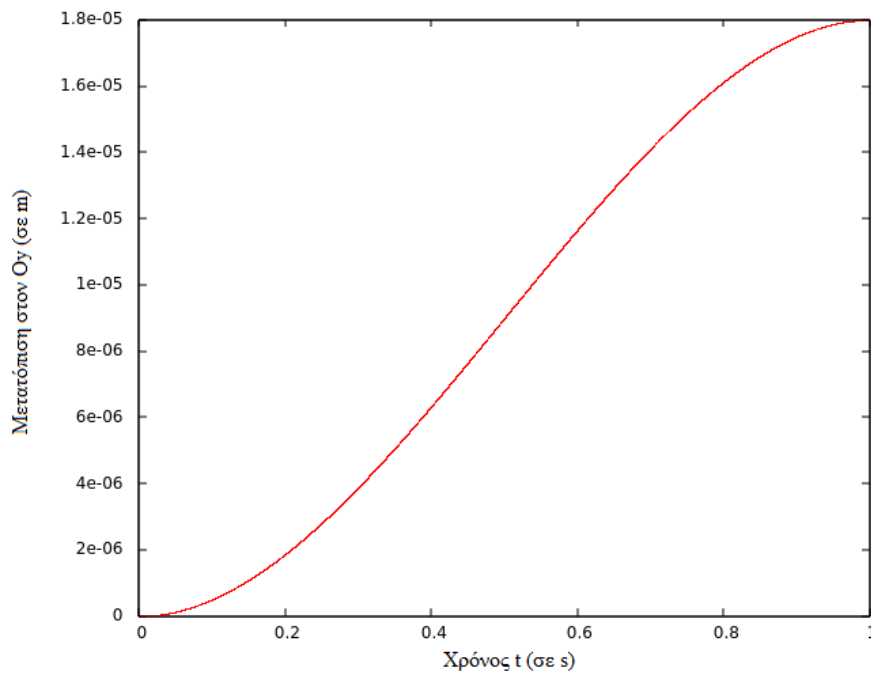
κατά αντιστοιχία με τα προηγούμενα, στο Σχήμα 5.3.1.10 και στο Σχήμα 5.3.1.11, της επιμέρους συντεταγμένες, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.1.9 Επιθυμητή τροχιά της παρακολούθησης



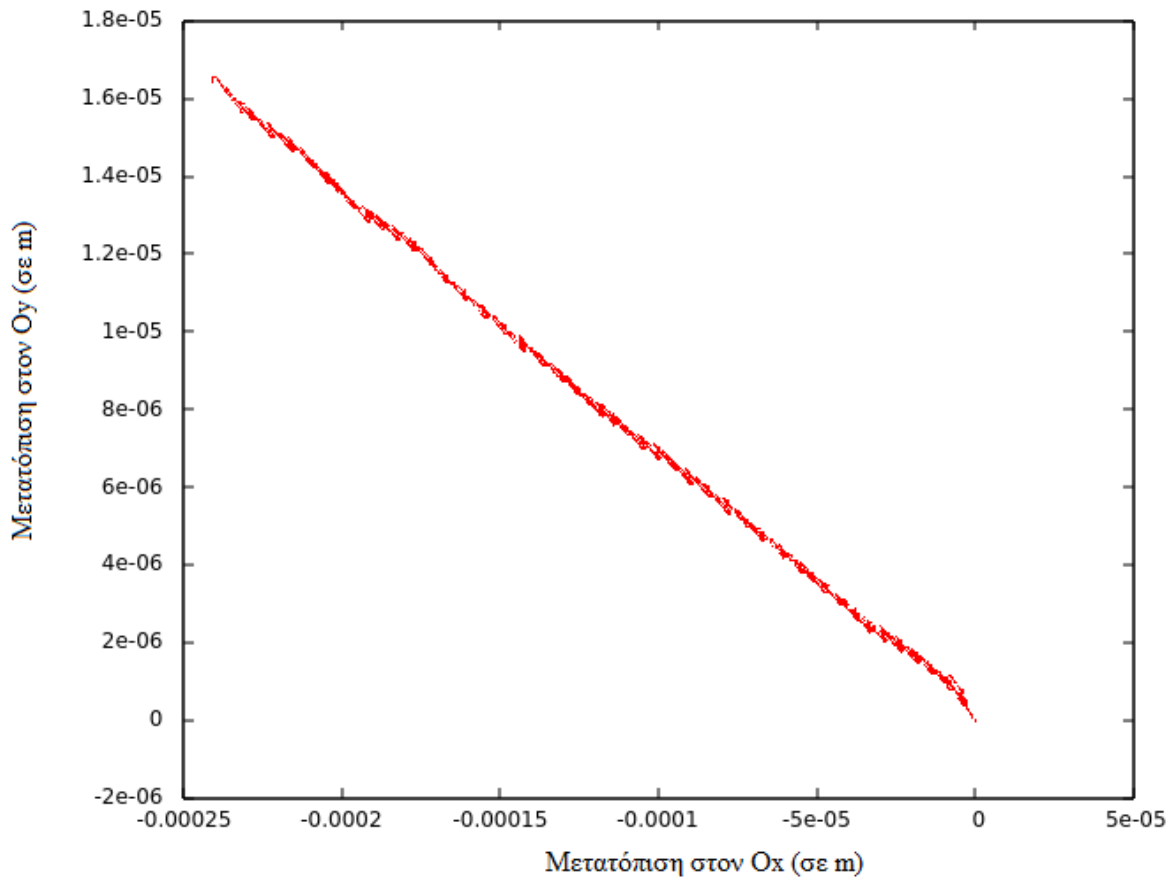
Σχήμα 5.3.1.10 Κυβική καμπύλη τετμημένων συναρτήσεϊ του χρόνου



Σχήμα 5.3.1.11 Κυβική καμπύλη τεταγμένων συναρτήσεϊ του χρόνου

Η πραγματική πορεία της πλατφόρμας, κατά την οδήγησή της προς την επιθυμητή διάταξη με προς-τα-πίσω κίνηση, φαίνεται στο Σχήμα 5.3.1.12, ενώ οι

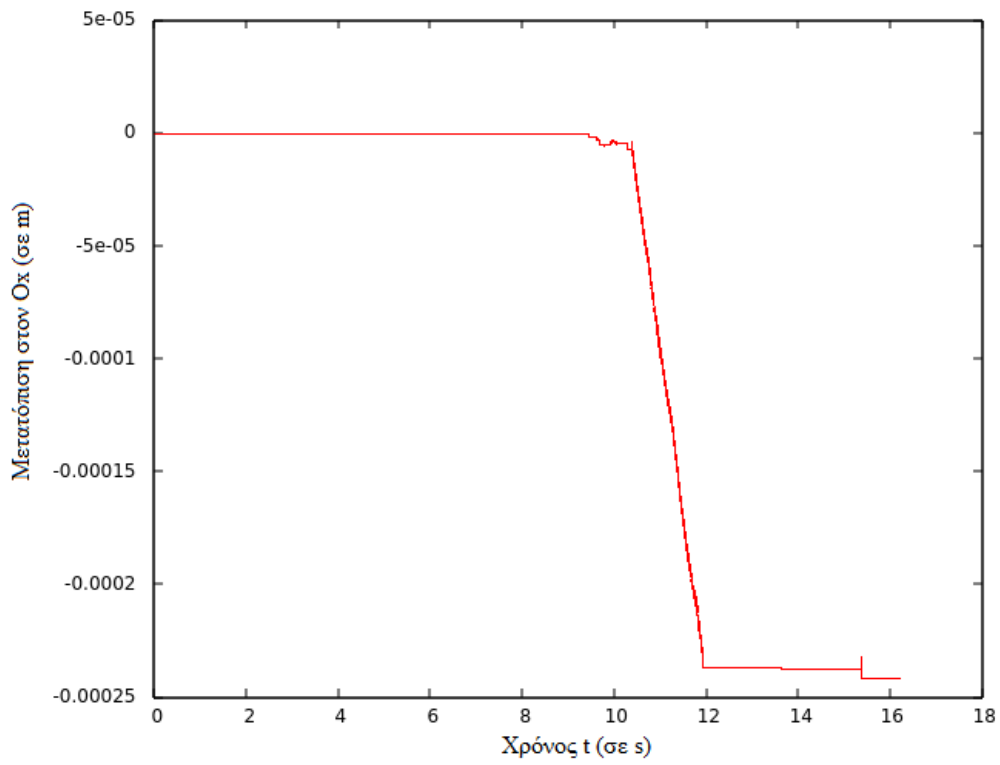
επιμέρους καμπύλες των συντεταγμένων στα Σχήματα 5.3.1.13 και 5.3.1.14, κατά αντιστοιχία με τα επιθυμητά.



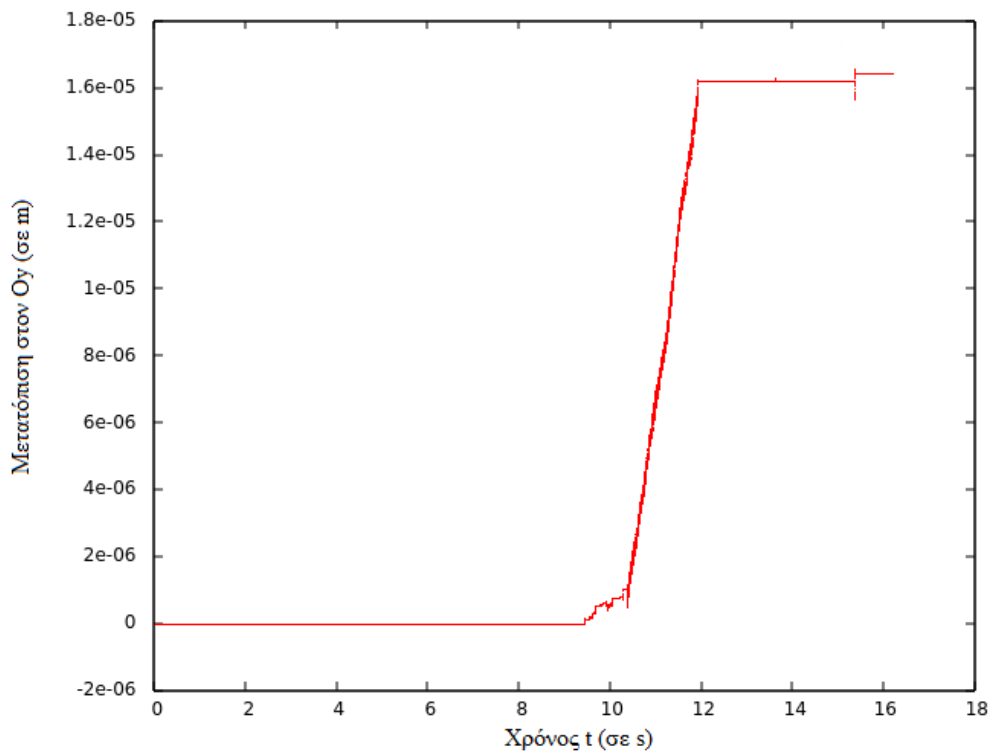
Σχήμα 5.3.1.12 Πραγματική πορεία της πλατφόρμας στο επίπεδο με της-τα-πίσω κίνηση.

Αξίζει να παρατηρηθεί η αρνητική μετατόπιση στον άξονα των x σε αυτά τα σχήματα, αλλά και η περιστροφή της πλατφόρμας, έως ότου λάβει την αρνητική γωνία, που θα της επιτρέψει να έχει εντός του πεδίου “ορατότητάς” από τα οπίσω, το επιθυμητό σημείο, στο Σχήμα 5.3.1.15.

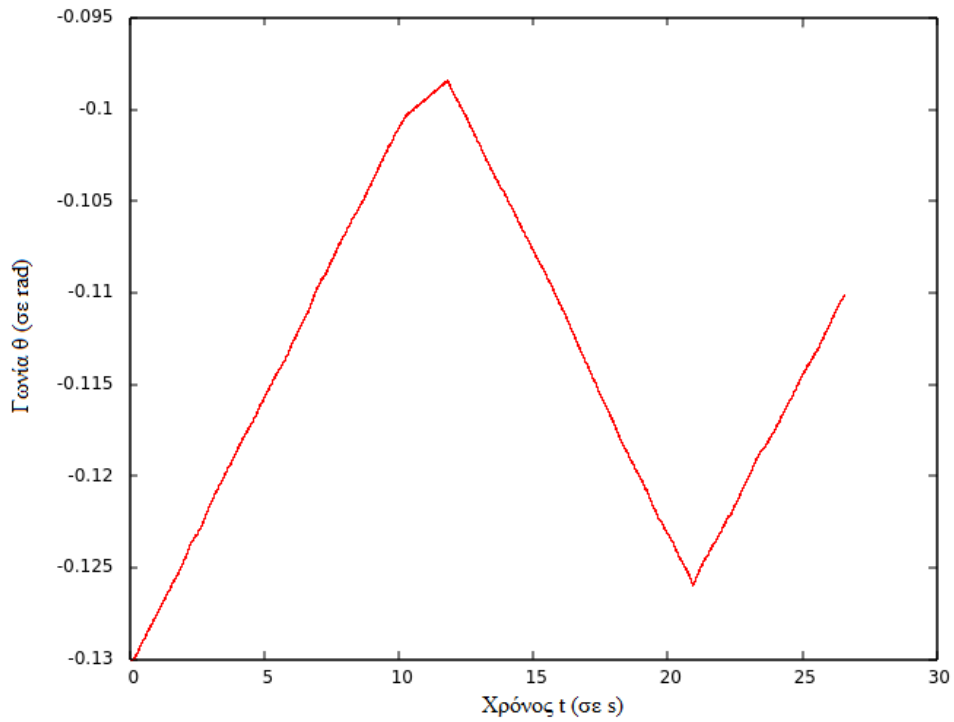
Στο Σχήμα 5.3.1.16 φαίνεται η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής τροχιάς και της πραγματικής πορείας που διέγραψε η πλατφόρμα. Της και πριν, η απόκλιση αυτή εντάσσεται στα επιτρεπτά όρια για τέτοιου είδους μικρομετατοπίσεις.



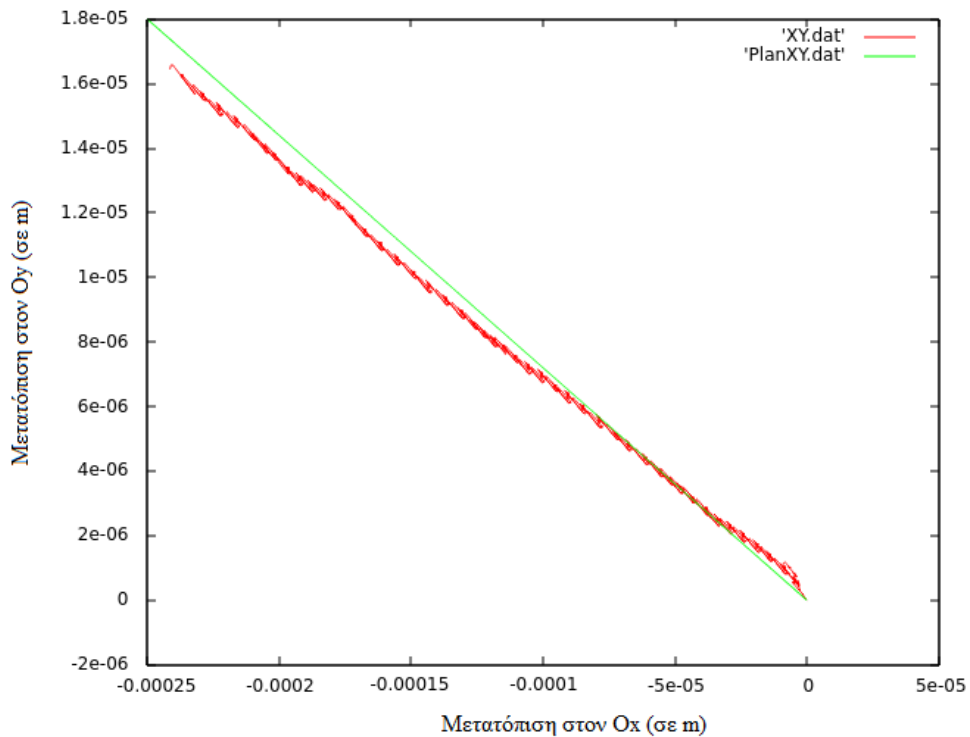
Σχήμα 5.3.1.13 Πραγματική μετατόπιση της πλατφόρμας στον άξονα των x



Σχήμα 5.3.1.14 Πραγματική μετατόπιση της πλατφόρμας στον άξονα των y



Σχήμα 5.3.1.15 Γωνία της πλατφόρμας σε σχέση με το χρόνο



Σχήμα 5.3.1.16 Σχεδιασμένη (πράσινη γραμμή) και πραγματική (κόκκινη) τροχιά μετατόπισης στο επίπεδο

Στο σημείο αυτό, οφείλουμε να σημειώσουμε ότι ο χρόνος που δίνεται στην πλατφόρμα για να φτάσει στο επιθυμητό σημείο, κατά τον σχεδιασμό της τροχιάς είναι 1 δευτερόλεπτο. Το ιδανικό θα ήταν να έκανε έναν σχεδιασμό για 2 δευτερόλεπτα, δεδομένης της μέγιστης απόστασης που μπορεί να διανύσει η πλατφόρμα σε 1 δευτερόλεπτο κατά τη σύγχρονη επενέργηση. Εν τούτοις, δεν επιλέχθηκε κάτι τέτοιο, καθώς ενδιαφερόμαστε κυρίως για την κίνηση της πλατφόρμας και όχι τόσο για τον σχεδιασμό της τροχιάς. Παρόλα αυτά, αξίζει να παρατηρηθεί ότι πλατφόρμα, αν εξαιρέσουμε της φάσεις περιστροφής της και επικεντρωθούμε της φάσεις αποκλειστικής μετατόπισης κατά την ασύγχρονη επενέργηση, φαίνεται ότι ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει από την αρχική διάταξη στην επιθυμητή, είναι 2 δευτερόλεπτα. Επιπλέον, μία σμίκρυνση οποιασδήποτε κυβικής καμπύλης που παράγει ο αλγόριθμος σχεδιασμού τροχιών, έτσι ώστε να συμπίπτει σε μήκος 2 δευτερολέπτων της πραγματικής μετατόπισης, δείχνει ότι υπάρχει ελάχιστη απόκλιση από αυτήν. Γεγονός το οποίο επαληθεύει τα αποτελέσματα που περιγράψαμε στο Σχήμα 5.3.1.8 (της και στο Σχήμα 5.3.1.16) και εξασφαλίζει την επιμέρους παρακολούθηση των τετμημένων και τεταγμένων των σημείων της πορείας, από την πλατφόρμα.

### 5.3.2 Σύγχρονη επενέργηση

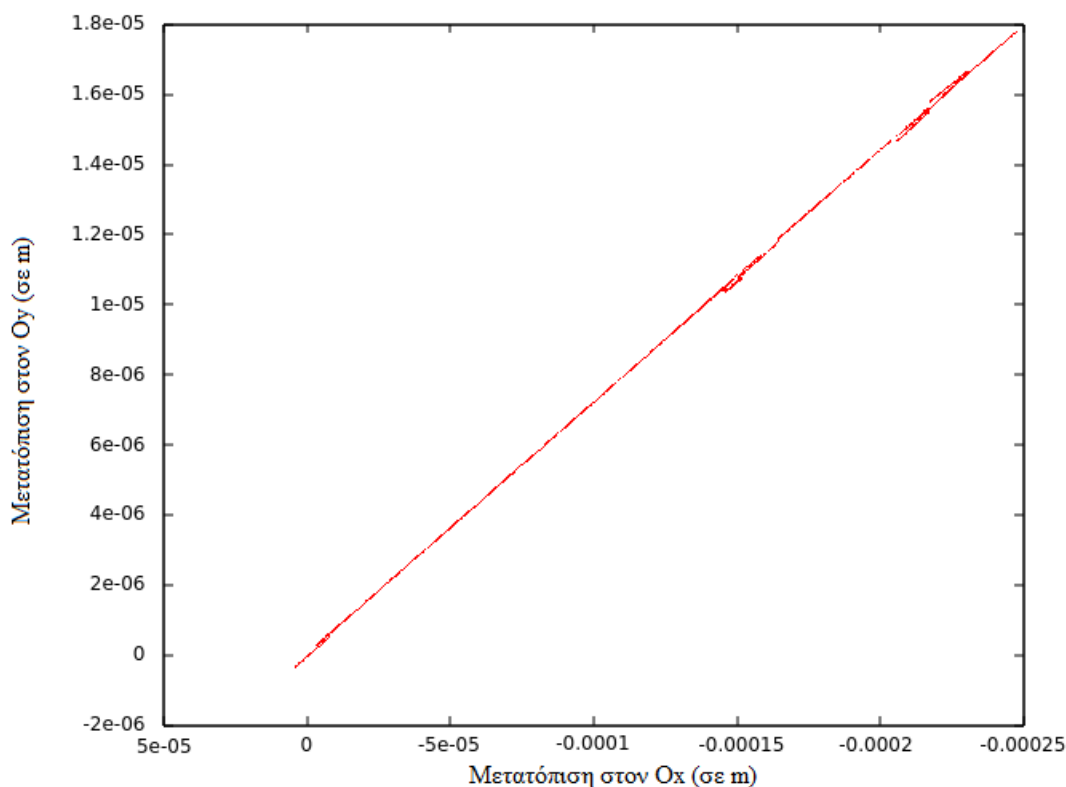
Κατά αντιστοιχία με την ασύγχρονη επενέργηση, στο παρόν εδάφιο, θα παραθέσουμε της γραφικές παραστάσεις μετατόπισης και περιστροφής στο επίπεδο, που προέκυψαν κατά την οδήγηση της μικρορομποτικής πλατφόρμας της επιθυμητές διατάξεις στο επίπεδο, κάνοντας αποκλειστική χρήση σύγχρονης επενέργησης. Θα εξετάσουμε τα αντίστοιχα σενάρια με αυτά της ασύγχρονης επενέργησης, έτσι ώστε να δούμε σε τι υστερεί ή υπερτερεί η συγκεκριμένη περίπτωση επενέργησης, σε σχέση με την πρώτη.

Αρχικά, της και πριν, της υποθέσουμε ότι έχουμε το εξής σενάριο:

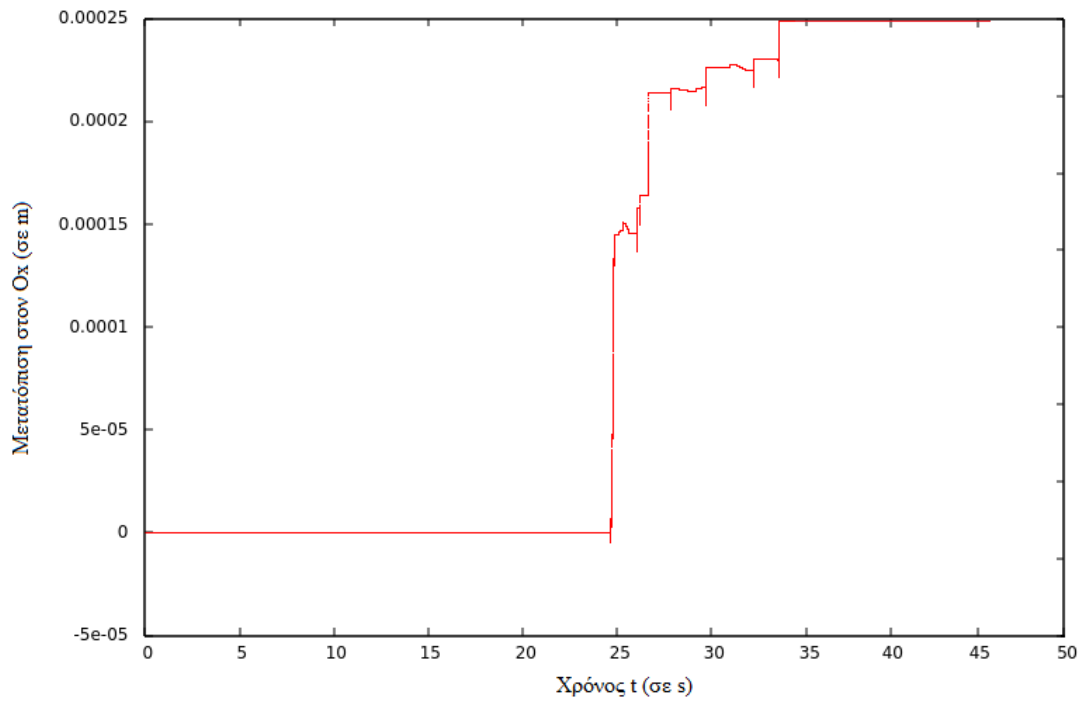
Η μικρορομποτική πλατφόρμα βρίσκεται στην αρχική διάταξη  $[0 \ 0 \ 0]$  και ζητείται να μεταβεί στην τελική διάταξη  $[0.00025 \ 0.000018 \ 0.035]$ . Ο σχεδιασμός τροχιάς γίνεται κατά τον ίδιο τρόπο και η μόνη αλλαγή είναι στον



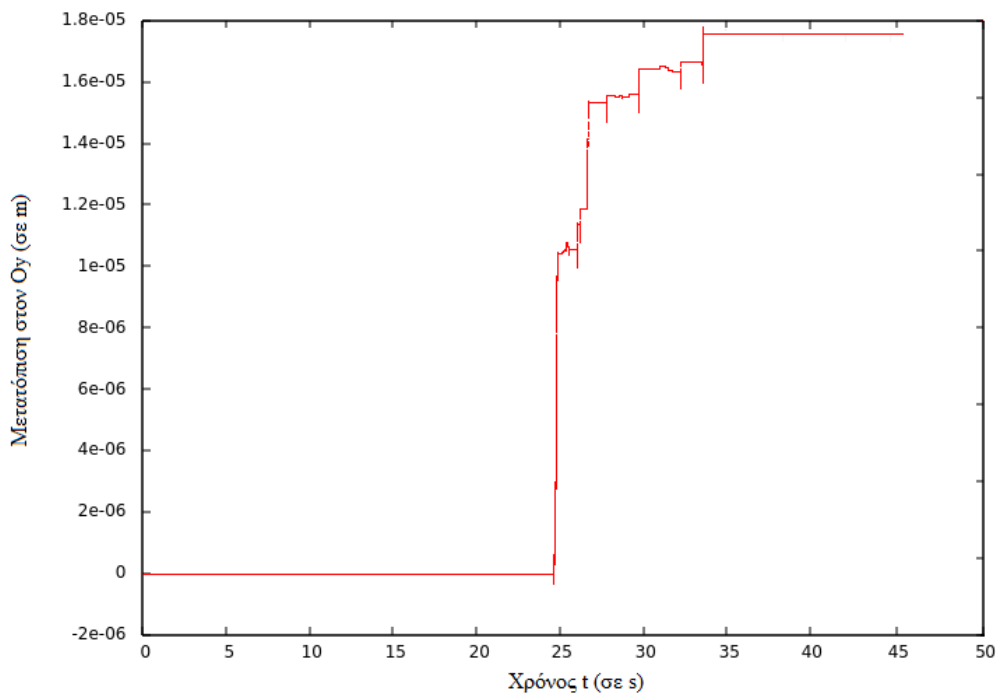
νόμο ελέγχου, συνεπώς παραλείπουμε της γραφικές παραστάσεις επιθυμητών τροχιών, αφού υπάρχουν στο προηγούμενο εδάφιο. Σε αντιδιαστολή με πριν, η πλατφόρμα περιστρέφεται μέχρι να λάβει τον προσανατολισμό που να βρίσκεται στην ευθεία με την τελική διάταξη, δηλαδή μέχρι η γωνία  $\theta$  να ισούται με το τόξο εφαπτομένης του πηλίκου διαφορών τεταγμένων και τετμημένων, της αρχικής και της τελικής διάταξης. Δηλαδή, η πλατφόρμα περιστρέφεται έως ότου η διαφορά  $|\theta - a_d|$  να είναι αρκετά μικρή, με ένα σφάλμα ανοχής της τάξης του  $10^{-4}$ , όπου  $a_d = \arctan(\Delta y / \Delta x)$ , όπου με  $\Delta$  συμβολίζουμε τον τελεστή διαφοράς της τρέχουσας συντεταγμένης από την επιθυμητή. Στο Σχήμα 5.3.2.1 φαίνεται η μετατόπιση της πλατφόρμας στο επίπεδο οδηγούμενη με σύγχρονη επενέργηση, ενώ στο Σχήμα 5.3.2.2 και στο Σχήμα 5.3.2.3 οι επιμέρους μετατοπίσεις της άξονες των  $x$  και των  $y$ , αντίστοιχα. Η περιστροφή της πλατφόρμας απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3.2.4, όπου δίνεται η γωνία της σε σχέση με τον χρόνο.



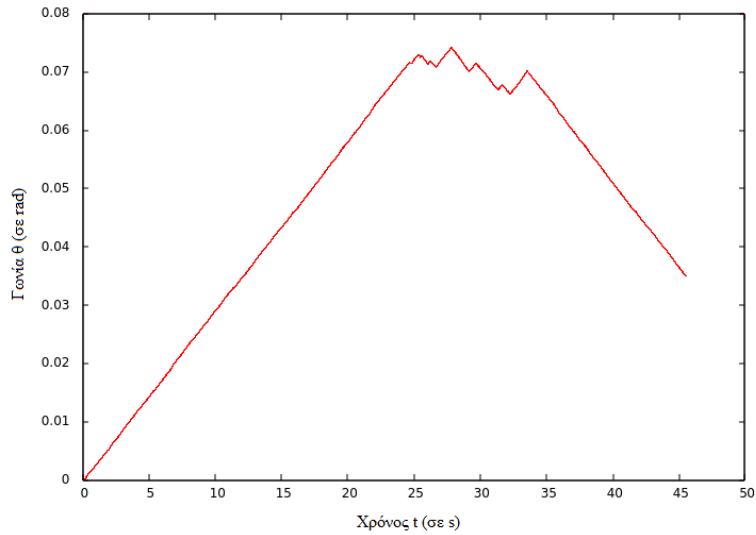
Σχήμα 5.3.2.1 Μετατοπιση πλατφόρμας στο επίπεδο με σύγχρονη επενέργηση



Σχήμα 5.3.2.2 Μετατόπιση πλατφόρμας στον άξονα O<sub>x</sub> με σύγχρονη επενέργηση

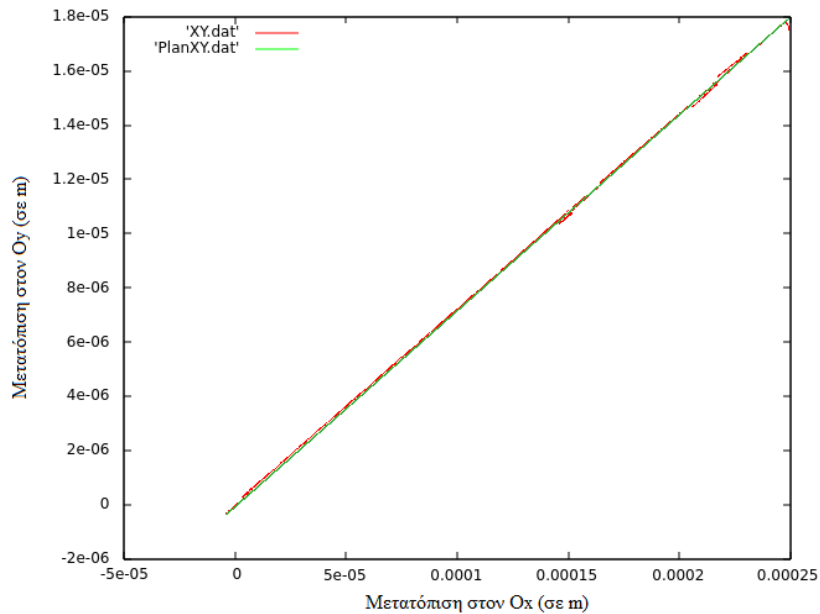


Σχήμα 5.3.2.3 Μετατόπιση πλατφόρμας στον άξονα O<sub>y</sub> με σύγχρονη επενέργηση



Σχήμα 5.3.2.4 Γωνία  $\theta$  της πλατφόρμας σε σχέση με τον χρόνο, κατά τη σύγχρονη επενέργηση

Φαίνεται στα παραπάνω σχήματα, ο χρόνος τον οποίο χρειάζεται η μικρορομποτική πλατφόρμα για να μετατοπιστεί από μία αρχική διάταξη στην επιθυμητή, εκτελώντας σύγχρονη επενέργηση. Στο Σχήμα 5.3.2.5 φαίνεται η απόκλιση της πλατφόρμας από την επιθυμητή τροχιά και η μεγάλη ανάλυση που προσφέρει η σύγχρονη επενέργηση, έναντι της ασύγχρονης.



Σχήμα 5.3.2.5 Σχεδιασμένη (πράσινη γραμμή) και πραγματική (κόκκινη) τροχιά μετατόπισης στο επίπεδο

#### 5.4 Σύγκριση μοντέλων

Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, είναι φανερό ότι η ασύγχρονη επενέργηση εγγυάται εξοικονόμηση χρόνου και ηλεκτρικής ενέργειας, για να μετακινηθεί η πλατφόρμα από οποιαδήποτε αρχική διάταξη, προς οποιαδήποτε επιθυμητή διάταξη.

Στα διαγράμματα της πρώτης περίπτωσης ασύγχρονης επενέργησης, βλέπουμε ότι απαιτούνται περίπου 28 δευτερόλεπτα για να εκτελέσει η πλατφόρμα τη διεργασία που της έχει ανατεθεί. Επίσης, οι διορθώσεις που έχει κάνει στον προσανατολισμό της, πέραν της αρχικής και της τελικής, είναι δύο και αυτές μοιραίες αφού περιστρέφεται παρασιτικά προς την αντίθετη πλευρά με αποτέλεσμα να βγαίνει ο στόχος από το πεδίο ‘‘ορατότητάς’’ της. Από την άλλη, στο ίδιο ακριβώς σενάριο, κινούμενη με σύγχρονη επενέργηση, η πλατφόρμα χρειάζεται περίπου 45 δευτερόλεπτα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περιστροφές και μετατοπίσεις της πλατφόρμας κατά τη σύγχρονη επενέργηση έχουν γίνει με τις μέγιστες δυνατές γωνιακές ταχύτητες των επενεργητών, χωρίς να υπάρχει αναπήδηση. Δηλαδή οι γωνιακές ταχύτητες δεν ξεπερνούν τα 1080 rad/s. Παρόλα αυτά, κάτι τέτοιο δεν αρκεί για να ξεπεράσει τα πλεονεκτήματα της ασύγχρονης επενέργησης, κατά την οποία οι γωνιακές ταχύτητες μεταβάλλονται εντός του εύρους του διαστήματος [900, 1080] rad/s (και κατά αντιστοιχία με αρνητική φορά). Όστε με γωνιακές ταχύτητες μικρότερες της μέγιστης δυνατής, αλλά με μία διαφορά στον κάθε επενεργητή, είναι δυνατό να επιτευχθούν ταχύτερες μετατοπίσεις με λιγότερη κατανάλωση ρεύματος συσσωρευτή.

Εν τούτοις, η σύγχρονη επενέργηση υπερτερεί της ασύγχρονης στο σημείο της ακρίβειας στη μικρομετρική ανάλυση. Αρκεί να παρατηρήσουμε ότι κατά την ασύγχρονη επενέργηση η πλατφόρμα μετατοπίστηκε κατά 0.00024 m στον άξονα  $Ox$ , αντί του επιθυμητού 0.00025 και κατά 0.000016 m στον  $Oy$ , αντί για 0.000018. Δηλαδή υπάρχει μία απόκλιση, το πολύ, της τάξης των δεκάδων μικρομέτρων σε σχέση με το επιθυμητό, πράγμα που δε συμβαίνει στην περίπτωση της σύγχρονης επενέργησης, όπου δε φαίνεται κάποια απόκλιση στον άξονα  $Ox$  και μία ελάχιστη της τάξης μερικών μικρών στον άξονα  $Oy$ .

Και στις δύο περιπτώσεις, οι αποκλίσεις είναι εντός των επιτρεπτών οριών για κινήσεις μικρομετρικής κλίμακας, οπότε μπορούμε να επιλέξουμε την καταλληλότερη επένεργηση κατά περίπτωση προβλήματος, είτε μεγαλύτερης ακρίβειας, είτε λιγότερου χρόνου εκτέλεσης, είτε λιγότερης ενεργειακής κατανάλωσης, είτε κάποιου άλλου προβλήματος βελτιστοποίησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

#### 6.1 Συμπεράσματα

#### 6.2 Μελλοντική εργασία

---

#### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν και σχεδιάστηκαν τρία μοντέλα μικρορομποτικής πλατφόρμας με φυγοκεντρικούς επενεργητές. Το πεδίο που ερευνήθηκε καθ' όλη την έκταση και τη διάρκειά τους, αφορά τον σχεδιασμό δρόμου και τον έλεγχο του μοντέλου δύο βαθμών ελευθερίας παραμορφώσιμου σώματος τους εν λόγω πλατφόρμας. Ο σχεδιασμός δρόμου επικεντρώνεται σε κίνηση από αρχική διάταξη σε τελική-επιθυμητή, ενώ ο έλεγχος στην παρακολούθηση του προκύπτοντος δρόμου από την πλατφόρμα.

Στα πλαίσια τους διατριβής τους πραγματοποιήθηκαν τα εξής:

Μελετήθηκε σε βάθος η φύση των τριών μοντέλων μικρορομποτικής πλατφόρμας, το δυναμικό και το κινητικό μοντέλο αυτών, ώστε να γίνει σαφής η κίνηση που προκύπτει κατά τη λειτουργία τους. Τους, έγινε μια προσπάθεια να επεξηγηθεί με φυσικούς νόμους, η περίεργη συμπεριφορά που φαινόταν να έχει η πλατφόρμα στα διαγράμματα μετατόπισης και περιστροφής κατά τους δοκιμές.

Πραγματοποιήθηκε γνωριμία και εξοικείωση με το περιβάλλον του Robot Operating System και τα εργαλεία που προσφέρει. Υλοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι που τέθηκαν ως επιμέρους στόχοι της εργασίας, δηλαδή οι προσομοιωτές κίνησης των τριών μοντέλων, ο αλγόριθμος σχεδιασμού τροχιών με τετραγωνικά/κυβικά πολυώνυμα και οι αλγόριθμοι ελέγχου αυτών για σύγχρονη και ασύγχρονη επενέργηση. Σημειώνεται ότι οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι προσομοίωσης σχεδιάστηκαν και σε Matlab.

Μελετήθηκαν και υλοποιήθηκαν τους, διάφοροι αλγόριθμοι σχεδιασμού τροχιών που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, με εστίαση στα κυβικά και τετραγωνικά πολυώνυμα του χρόνου.

Επιπλέον, μελετήθηκαν αλγόριθμοι ελέγχου για τροχοφόρα διαφορικού τύπου, καθώς η μικρορομποτική πλατφόρμα κινούταν με μη-ολόνομους περιορισμούς στο επίπεδο, τους κι αυτά. Παρόλα αυτά, η φύση τους κίνησης της συγκεκριμένης πλατφόρμας, δεν έδωσε τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί κάτι αντίστοιχο. Έτσι, σχεδιάστηκε αλγόριθμος ελέγχου θέσης της μικρορομποτικής πλατφόρμας, βασισμένος σε κάποιες γωνίες ενδιαφέροντος και στην κατακόρυφη διαφορά μεταξύ τρέχουσας και επιθυμητής διάταξης. Η σχέση μεταξύ γωνιακών ταχυτήτων και γραμμικής και περιστροφικής ταχύτητας της πλατφόρμας βρέθηκε με τους μετρήσεις, δοκιμές και χρήση ορισμένων βιβλιοθηκών/εργαλείων του Matlab.

Τους, πέραν των προσομοιώσεων στο Matlab, πραγματοποιήθηκαν οι αντίστοιχες δοκιμές στη συνεργασία των αλγορίθμων στο περιβάλλον του ROS με χρήση του εργαλείου οπτικοποίησης rviz. Καταγράφηκε πληθώρα τέτοιων δοκιμών για τον έλεγχο της ορθότητας των αλγορίθμων, χωρίς αυτό να αποτελεί απόδειξη, αλλά και για περισσότερη εξοικείωση με τα εργαλεία και τους δυνατοτήτες του ROS. Τέλος, συγκρίθηκαν μεταξύ τους κατά τους δοκιμές, η σύγχρονη και η ασύγχρονη επενέργηση της πλατφόρμας και έγινε φανερό ποια από τους δύο υπερτερεί τους και σε ποιον τομέα, αλλά και πότε πρέπει ή χρειάζεται να προτιμάται η μία έναντι της άλλης. Τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών δεν έχουν συμπεριληφθεί, λόγω του μεγάλου όγκου τους. Επιλέχθηκαν, αντί αυτού, εκείνα με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και την περισσότερη σαφήνεια.

## 6.2 Μελλοντική εργασία

Τα περισσότερα ζητήματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία αφορούν σε προσπάθεια διόρθωσης των προσομοιωτών κίνησης ή σε επινόηση και σχεδιασμό έξυπνων και καινοτόμων αλγορίθμων σχεδιασμού τροχιών. Έτσι, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε αναλυτικότερα τα πιο σημαντικά εξ αυτών:

- Η διόρθωση του προσομοιωτή κίνησης των μοντέλων παραμορφώσιμου και σταθερού σώματος της μικρορομποτικής πλατφόρμας δύο βαθμών ελευθερίας, έτσι ώστε να εξαλειφθεί η εσφαλμένη και ανεξήγητη μετατόπιση της πλατφόρμας προς την πλευρά του επενεργητή με τη μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα. Ο κυριότερος και πιθανότερος παράγων αυτού του προβλήματος εικάζεται να είναι η ανομοιογενής κατανομή της μάζας και άρα το γεγονός ότι το κέντρο μάζας της πλατφόρμας δε συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο της. Προσεκτικές μετατοπίσεις του και αρκετοί υπολογισμοί γωνιών, ίσως μπορέσουν να διορθώσουν το πρόβλημα.
- Ο σχεδιασμός αλγορίθμου προσομοίωσης του ίδιου μοντέλου δύο βαθμών ελευθερίας, εφοδιασμένο με βραχίονα ενός βαθμού ελευθερίας και με νέα τεχνικά χαρακτηριστικά, που επηρεάζουν τα ήδη υπάρχοντα και με δυνατότητα πραγματοποίησης νέων δοκιμών, οι οποίες πλησιάζουν περισσότερο στις πραγματικές εφαρμογές.
- Ο σχεδιασμός και υλοποίηση καινοτόμων μεθόδων σχεδιασμού τροχιάς, βασισμένων στη θεωρία των Lie brackets για παράλληλη στάθμευση, αλλά και γενικευμένη κίνηση στο επίπεδο. Επίσης, η υλοποίηση ενός αλγορίθμου σχεδιασμού τροχιών με κυβικές splines, για περιπτώσεις που επιθυμούμε να γενικεύσουμε τον πρόβλημα της μετακίνησης από σημείο σε σημείο, χρησιμοποιώντας μια τροχιά που διέρχεται από ολόκληρη ακολουθία διατάξεων.
- Η χρήση του μοντέλου στερεού σώματος κατά τις δοκιμές και η σύγκριση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις ασύγχρονης και σύγχρονης επενέργειας του μοντέλου παραμορφώσιμου σώματος. Επίσης, η εξαγωγή συμπερασμάτων για την κίνηση του συγκεκριμένου μοντέλου και της λειτουργίας του αλγορίθμου ελέγχου επί αυτού.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] F. Mondada, E. Franzi, P. Ienne, “Mobile robot miniaturisation: A tool for investigation in control algorithms”, *Experimental Robotics III. Lecture Notes in Control and Information Sciences*, vol 200. Springer, Berlin, Heidelberg, 1994.
- [2] A. De Luca, G. Oriolo, “Local Incremental Planning for Nonholonomic Mobile Robots“, *IEEE Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, pp. 104-110, Springer, 1994.
- [3] A. De Luca, G. Oriolo, “Modelling and control of nonholonomic mechanical systems“, *Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems*, CISM Courses and Lectures, vol. 360, pp. 277-342, Springer, 1995.
- [4] P. Coelho, U. Nunes, “Lie algebra application to mobile robot control: a tutorial”, *Robotica Volume 21*, pp 483-493, Cambridge University Press, March 2003.
- [5] W. Driesen et al., “MICRON: Small Autonomous Robot for Cell Manipulation Applications”, *IEEE Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, pp 844 - 849, 2005.
- [6] P. Vartholomeos, E. Papadopoulos, “Dynamics, design and simulation of a novel microrobotic platform employing vibration microactuators“, *Journal of dynamic systems, measurement, and control* 128 (1), pp 122-133, March 2006.
- [7] P. Vartholomeos, E. Papadopoulos, “Analysis, design and control of a planar micro-robot driven by two centripetal-force actuators“, *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006)*, pp 649-654, May 2006.
- [8] P. Vartholomeos, S. Loizou, M. Thiel, K. Kyriakopoulos, E. Papadopoulos, “Control of the multi agent micro-robotic platform MiCRoN”, *Proceedings of the 2006 IEEE, International Conference on Control Applications*, pp 1414 - 1419, 2006
- [9] S. Jatsun, V. Dyshenko, A. Yatsun, A. Malchikov, “Modelling of Robot’s Motion by Use of Vibration of Internal Masses“, *Proceedings of EUROMES 08*. Springer, Dordrecht, 2009.

- [10] J.V. Mendez Bethencourt, Q. Ling, A. Valera, “Controller design and implementation for a differential drive wheeled mobile robot”, *Proceedings of the 2011 Chinese Control and Decision Conference*, 2011.
- [11] M. Rubenstein, C. Ahler και R. Nagpal, “Kilobot: A Low Cost Scalable Robot System for Collective Behaviors”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 3293-3298, 2012.
- [12] P. Vartholomeos, E. Papadopoulos, K. Vlachos, “Analysis and Motion Control of a Centrifugal-Force Microrobotic Platform”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, pp 545 - 553, March 2013.
- [13] J. M. O’Kane, *A Gentle Introduction to ROS*, CreateSpace Independent Publishing Platform, October 2013.
- [14] K. Vlachos, D. Papadimitriou, E. Papadopoulos, “Vibration-Driven Microrobot Positioning Methodologies for Nonholonomic Constraint Compensation”, *Engineering Volume 1 Issue 1*, pp. 066-072, March 2015.
- [15] A. Mahtani, L. Sanchez, E. Fernandez, A. Martinez, *Effective Robotics Programming with ROS - Third Edition*, Packt Publishing, 2016.
- [16] M. Kalyoncu, F. Demirbaş, “Differential Drive Mobile Robot Trajectory Tracking Using PID and Kinematic-based Backstepping Controller”, *Selcuk University Journal of Engineering, Science and Technology*, 2017.

## ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ

---

Ο Σωκράτης Δημητριάδης γεννήθηκε στο Κιλκίς το 1989, όπου ολοκλήρωσε την δευτεροβάθμια εκπαίδευσή του στο 2<sup>ο</sup> Γενικό Λύκειο Κιλκίς. Εισήχθη το 2007 στο Τμήμα Μαθηματικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, από όπου και αποφοίτησε το 2014 με βαθμό 6.25. Το 2016 εισήχθη στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Πληροφορική του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής της Πολυτεχνικής Σχολής Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, με εξειδίκευση στον τομέα Τεχνολογίες-Εφαρμογές. Με την παρούσα εργασία ολοκληρώνει τις μεταπτυχιακές σπουδές του.