



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΤΡΟΧΙΩΝ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

Χρήστος Ντίνος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2017

Περίληψη

Η επιτυχία στην προσπάθεια του ανθρώπου να εξερευνήσει το σύμπαν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δυνατότητα του να κατασκευάσει και να συντηρήσει δομές σε τροχιά γύρω από τη Γη. Οι κατασκευές αυτές χρησιμοποιούνται στα πλαίσια επιστημονικής έρευνας και αναμένεται να αποτελέσουν το σημείο αναφοράς για την επανδρωμένη εξερεύνηση του ηλιακού μας συστήματος. Παράλληλα, πληθώρα καθημερινών δραστηριοτήτων στη Γη, όπως η πρόβλεψη του καιρού και οι τηλεπικοινωνίες συνδέονται αναπόσπαστα με την αποτελεσματική λειτουργία των δορυφόρων σε τροχιά.

Γίνεται, λοιπόν, εμφανές ότι η επιτυχής εξερεύνηση του διαστήματος συνδέεται όλο και εντονότερα με την εφαρμογή αποστολών που περιλαμβάνουν εργασίες σε τροχιά (On-Orbit Servicing). Οι αποστολές αυτές περιλαμβάνουν εργασίες όπως η τοποθέτηση δορυφόρων σε τροχιά, η απομάκρυνση διαστημικών 'απορριμάτων', η συντήρηση και η επισκευή δορυφόρων σε τροχιά κ.α. Ένας οικονομικά βιώσιμος τρόπος να εκτελεστούν αυτές οι εργασίες είναι με τη χρήση ρομποτικών διαστημικών συστημάτων, καθώς το περιβάλλον του διαστήματος είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για την ανθρώπινη ζωή.

Για να μπορέσει ένα διαστημικό ρομποτικό σύστημα να εκτελέσει τις απαραίτητες εργασίες αποτελεσματικά και με ακρίβεια, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν εξελιγμένοι νόμοι ελέγχου βασισμένοι στο δυναμικό μοντέλο. Η προσέγγιση αυτή προϋποθέτει την ακριβή γνώση των δυναμικών παραμέτρων του συστήματος, των οποίων οι τιμές είναι συνήθως άγνωστες και μεταβάλλονται καθώς ο δορυφόρος βρίσκεται σε τροχιά για πολλούς λόγους, όπως η κατανάλωση καυσίμου, η σύνδεση με άλλο διαστημόπλοιο ή η σύλληψη κάποιου αντικειμένου-στόχου.

Βασικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η εφαρμογή προτεινόμενης από τη βιβλιογραφία μεθόδου αναγνώρισης δυναμικών παραμέτρων ενός ρομποτικού διαστημικού συστήματος βασισμένη στην αρχή διατήρησης της στροφορμής. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά είδη βέλτιστων τροχιών αναγνώρισης (exciting trajectories): μία πρωτότυπη και μία ευρέως χρησιμοποιούμενη στη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης τροχιάς για ένα τριδιάστατο ρομποτικό σύστημα με ένα βραχίονα και τρεις συνδέσμους και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της αναγνώρισης παραμέτρων. Ακολουθεί η μοντελοποίηση του θορύβου του encoder, που προστίθεται στο σήμα κατά τη μέτρηση, και η παρουσίαση των αναγνωρισμένων παραμέτρων όπως προκύπτουν μετά την προσθήκη θορύβου στο σήμα.

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα διδιάστατο ρομποτικό σύστημα με ένα βραχίονα και δύο συνδέσμους. Οι παράμετροι του συστήματος επιλέγονται έτσι ώστε οι τιμές τους να ισούνται με τις αντίστοιχες παραμέτρους του ρομπότ "Cerberus" του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, όπως αυτές προκύπτουν από το CAD μοντέλο του ρομπότ.

Τέλος, γίνεται εκτενής περιγραφή του επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής αναγνώρισης των δυναμικών παραμέτρων του ρομπότ "Cerberus".

Μέρος της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκε στο *14th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation ASTRA 2017*, 20-22 Ιουνίου, στην Ολλανδία [1] .

Abstract

The success of humanity's endeavor to explore the cosmos is closely related to building and maintaining infrastructures on orbit around Earth. These infrastructures are used for scientific research and are going to be the starting point for the human exploration of the solar system. Moreover, numerous everyday activities on Earth such as weather forecast and navigation are relying on maintaining functional satellites orbiting Earth.

It becomes clear that successes in space exploration have emphasised the growing importance of On-Orbit Servicing (OOS) in space programs around the world. OOS includes missions, such as re-orbiting and de-orbiting, inspection and retrofitting of orbiting structures, satellite maintenance, satellite repair, and removal of space debris. A cost-effective and low-risk way to accomplish these is to use robots such as space manipulator systems (SMS) since space conditions are too dangerous to human life, especially during EVAs.

In order for an SMS to accomplish the necessary tasks efficiently and accurately, advanced model based control methods need to be introduced. These methods require accurate knowledge of the system's dynamic parameters, whose values are very often unknown or subject to change on orbit for a number of reasons, such as fuel consumption, deployment of payloads, docking to a spacecraft, or object capture.

The main objective of this thesis is to apply a proposed method for the identification of the dynamic parameters of a robotic space manipulator based on the conservation of the angular momentum. For that reason two different types of exciting trajectories are examined: a novel one and one widely used by other researchers. An optimization process is applied for finding optimum trajectories for a 3D robotic system with one arm and three links, and the results of the simulation of the parameter identification are presented. The measurement noise added to the signal due to the use of incremental encoders is modelled, and the identified parameters as calculated from the signal with the noise, are also presented.

Moreover, the optimized trajectories and the results with and without noise are calculated for a simulated 2D space robotic system with one arm and two links. The system's parameters are chosen to be equal to the parameters of the Control Systems Lab's planar robotic space emulator "Cepheus", and are acquired from the CAD model of the robot.

Finally, the Control Systems Lab's planar space emulator is described in detail and the results of the experimental identification of the dynamic parameters of the robot "Cepheus" are presented.

Parts of this work were presented in the *14th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation ASTRA 2017*, Leiden, 20-22 June, Scheltema, Netherlands [1].

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ε. Παπαδόπουλο για την εξαιρετική συνεργασία και τις χρήσιμες συμβουλές του σε όλα τα στάδια της εργασίας μου στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, καθώς και για την πολύτιμη βοήθειά του στην επιλογή των μελλοντικών μου βημάτων.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου και ειδικά τα μέλη της ομάδας του space για τη συνεργασία τους και το ευχάριστο κλίμα εργασίας που δημιούργησαν στο εργαστήριο. Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Όλγα Χρηστίδη, για τις συμβουλές της και τη στήριξή της σε κάθε βήμα της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξή τους, υλική και ηθική, σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

*Αφιερώνεται στους γονείς μου, στα αδέρφια μου
και στη Χριστίνα*

Πρόλογος

Ο ανθρώπινος νους πάντα γοητευόταν από το θέαμα του νυχτερινού ουρανού, που τον προκαλούσε να αποκωδικοποιήσει τη φαινομενική τυχαιότητά του και να ανακαλύψει απαντήσεις για τη ζωή και τη θέση του στο σύμπαν. Σε διάστημα πολλών αιώνων ο άνθρωπος κατάφερε με την απλή παρατήρηση και αργότερα με τα πρώτα μικρά τηλεσκόπια να θεμελιώσει κάποιες βασικές αρχές, που διέπουν την κίνηση των ουράνιων σωμάτων. Με την έλευση του 20ου αιώνα, η ανθρωπότητα κατάφερε για πρώτη φορά να ξεπεράσει τους περιορισμούς της γήινης ατμόσφαιρας και να ξεκινήσει την εξερεύνηση του διαστήματος αρχικά με αυτόνομες συσκευές και στη συνέχεια με επανδρωμένες αποστολές.

Σήμερα ζούμε σε μία εποχή που η επιστημονική και τεχνολογική πρόοδος μας έχει επιτρέψει όχι μόνο να εξερευνήσουμε τους κοντινούς και μακρινούς κόσμους του ηλιακού μας συστήματος, αλλά και να αντιληφθούμε τη μεγάλη στρατηγική και οικονομική σημασία του διαστήματος, καθώς και τη μεγάλη αλλαγή που μπορεί να φέρει η αξιοποίησή του στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η πρόβλεψη του καιρού και οι τηλεπικοινωνίες εξαρτώνται άμεσα από τη σωστή λειτουργία πλήθους δορυφόρων σε τροχιά γύρω από τη Γη, ενώ χιλιάδες προϊόντα καθημερινής χρήσης αλλά και ιατρικά εργαλεία έχουν προκύψει από τη βασική έρευνα που διεξάγεται από τις διάφορες διαστημικές υπηρεσίες.

Καθώς η χρήση του διαστήματος από τον άνθρωπο ξεπερνάει πλέον τα όρια της καθαρά επιστημονικής εξερεύνησης και αποκτά χαρακτήρα οικονομικό, προκύπτει η επιτακτική ανάγκη της οικονομικότερης και πιο αποδοτικής διαχείρισης των πόρων που χρησιμοποιούνται στις διαστημικές αποστολές. Στο πλαίσιο αυτό, εμφανίζεται ως αναγκαιότητα η εφαρμογή αποστολών On Orbit Servicing (OOS). Οι αποστολές αυτές περιλαμβάνουν την εκτέλεση εργασιών σε τροχιά, όπως η επισκευή εκτός λειτουργίας δορυφόρων, ο ανεφοδιασμός των δορυφόρων με καύσιμο (refueling), η απομάκρυνση διαστημικών 'απορριμάτων' (space debris) ακόμα και η in-situ συναρμολόγηση-κατασκευή. Η μεγάλη ακρίβεια, που απαιτείται κατά την εκτέλεση των εργασιών αυτών, καθώς και η υψηλή επικινδυνότητα του διαστημικού περιβάλλοντος για τη ζωή των αστροναυτών, επιβάλλει την επιστράτευση διαστημικών ρομποτικών συστημάτων. Τα συστήματα αυτά διαθέτουν έναν ή περισσότερους βραχίονες ή κάποιο άλλο μέσο αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον τους και αναμένεται να συμβάλλουν σημαντικά στην αξιοποίηση του διαστήματος από τον άνθρωπο τα επόμενα χρόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	6
Ευχαριστίες	8
Πρόλογος	11
Περιεχόμενα	12
Κατάλογος Σχημάτων	15
Κατάλογος Πινάκων	18
Κατάλογος Συμβόλων	20
1 Εισαγωγή.....	24
1.1 Το πρόβλημα των διαστημικών ‘απορριμάτων’	24
1.2 Επισκευή και συναρμολόγηση σε τροχιά.....	28
1.3 Δομή εργασίας	30
2 Αναγνώριση Παραμέτρων	32
2.1 Αναγνώριση παραμέτρων με χρήση των δυναμικών εξισώσεων	32
2.2 Τροχιά αναγνώρισης με γενικευμένες σειρές Fourier	34
2.3 Αναγνώριση παραμέτρων με χρήση της εξίσωσης στροφορμής	35
2.4 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης	37
2.5 Ο επιλύτης fminsearch.....	38
3 Αναγνώριση παραμέτρων για το τριδιάστατο πρόβλημα	40
3.1 Τροχιά αναγνώρισης με συναρτήσεις Gauss	40
3.2 Αναλυτική μορφή του διανύσματος των παραμέτρων για το τριδιάστατο σύστημα	42
3.3 Περιγραφή προσομοίωσης για το τριδιάστατο πρόβλημα	44
3.4 Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 1	45
3.5 Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 2.....	49
3.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης αναγνώρισης παραμέτρων	52
3.7 Μοντελοποίηση θορύβου encoder και αποτελέσματα προσομοίωσης με θόρυβο	55
4 Αναγνώριση παραμέτρων για το διδιάστατο πρόβλημα	63
4.1 Εκτίμηση παραμέτρων του ρομπότ “Cerberus” από το CAD μοντέλο.....	63
4.2 Αναλυτική μορφή του διανύσματος των παραμέτρων για το διδιάστατο σύστημα.....	65
4.3 Περιγραφή προσομοίωσης για το διδιάστατο πρόβλημα	66
4.4 Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 1	67
4.5 Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 2.....	69
4.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης αναγνώρισης παραμέτρων	71
4.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης με θόρυβο	71
4.8 Ημιτονοειδείς τροχιές για χρήση στο πείραμα αναγνώρισης	75
5 Πειραματική Διάταξη και Αποτελέσματα	77
5.1 Διαστημικοί εξομοιωτές.....	77
5.2 Ο Διαστημικός Εξομοιωτής του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου	77

5.2.1 Μηχανικό - Πνευματικό σύστημα.....	78
5.2.2 Ηλεκτρικό σύστημα.....	80
5.2.3 Υπολογιστικό σύστημα - ROS.....	80
5.2.4 Σύστημα παρακολούθησης θέσης.....	82
5.3 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.....	84
5.4 Αποτελέσματα πειράματος αναγνώρισης δυναμικών παραμέτρων.....	85
6 Συμπεράσματα & Μελλοντική Εργασία	88
6.1 Συμπεράσματα	88
6.2 Μελλοντική εργασία	88
7 Βιβλιογραφία.....	90
Παράρτημα Α: Συστήματα Συντεταγμένων	93
Παράρτημα Β: Κύριοι αδρανειακοί άξονες.....	95
Παράρτημα Γ: Είδη διαστημικών εξομοιωτών.....	97

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1.	Διαστημικό ρομποτικό σύστημα με βραχίονα.	24
Σχήμα 1-2.	Χρονική εξέλιξη του αριθμού των διαστημικών απορριμάτων.	25
Σχήμα 1-3.	Αντίγραφο ενός δορυφόρου Iridium (αριστερά) και απόψη του δορυφόρου Strela-2M (δεξιά).	26
Σχήμα 1-4.	Διασπορά των διαστημικών σκουπιδιών 180 λεπτά μετά τη σύγκρουση.	27
Σχήμα 1-5.	Μέθοδοι σύλληψης διαστημικών 'σκουπιδιών'.	28
Σχήμα 1-6.	Ρομποτικός βραχίονας Canadarm.	29
Σχήμα 1-7.	Ρομποτικό σύστημα Robonaut 2.	30
Σχήμα 2-1.	GUI του Matlab Optimization Toolbox.	38
Σχήμα 2-2.	Fminsearch simplex.	39
Σχήμα 3-1.	Σύγκριση ΤΡΟΧΙΑΣ 1 και 2 ως προς τον αριθμό των παραμέτρων.	41
Σχήμα 3-2.	Χαρακτηριστικά μεγέθη τριδιάστατου ΔΡΣ με ένα βραχίονα και τρεις συνδέσμους.	43
Σχήμα 3-3.	Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 1.	47
Σχήμα 3-4.	Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.	48
Σχήμα 3-5.	Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.	48
Σχήμα 3-6.	Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.	48
Σχήμα 3-7.	Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 2.	50
Σχήμα 3-8.	Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.	51
Σχήμα 3-9.	Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.	51
Σχήμα 3-10.	Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.	51
Σχήμα 3-11.	Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0.	53
Σχήμα 3-12.	Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0.	53
Σχήμα 3-13.	Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0.	54
Σχήμα 3-14.	Ανάλυση encoder.	55
Σχήμα 3-15.	Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.	57
Σχήμα 3-16.	Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.	58
Σχήμα 3-17.	Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.	58
Σχήμα 3-18.	Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.	59
Σχήμα 3-19.	Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.	59
Σχήμα 3-20.	Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.	60
Σχήμα 3-21.	Γωνιακή θέση των αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0 με και χωρίς θόρυβο.	61
Σχήμα 3-22.	Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0 με και χωρίς θόρυβο.	61
Σχήμα 3-23.	Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0 με και χωρίς θόρυβο.	61

Σχήμα 4-1.	Μοντέλο CAD του ρομπότ Cerpheus με το κέντρο μάζας και τους κύριους άξονες αδράνειας.....	65
Σχήμα 4-2.	Χαρακτηριστικά μεγέθη διδιάστατου ΔΡΣ με ένα βραχίονα και δύο συνδέσμους.	66
Σχήμα 4-3.	Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.	68
Σχήμα 4-4.	Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.	69
Σχήμα 4-5.	Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.	69
Σχήμα 4-6.	Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.	70
Σχήμα 4-7.	Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.	70
Σχήμα 4-8.	Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.	71
Σχήμα 4-9.	Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.	72
Σχήμα 4-10.	Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.	72
Σχήμα 4-11.	Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.	73
Σχήμα 4-12.	Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.	73
Σχήμα 4-13.	Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.	74
Σχήμα 4-14.	Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.	74
Σχήμα 4-15.	Ημιτονοειδείς τροχιές για χρήση στο πείραμα της αναγνώρισης.	75
Σχήμα 5-1.	Το ρομπότ “Cerpheus” του διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου.	78
Σχήμα 5-2.	Αντίρροπα ακροφύσια προωθητικού συστήματος.	79
Σχήμα 5-3.	Σφόνδυλος αντίδρασης του ρομπότ “Cerpheus”.....	79
Σχήμα 5-4.	Μοντέλο CAD του ρομπότ Cerpheus με τα βασικά του μέρη.	80
Σχήμα 5-5.	Σχηματική απεικόνιση της επικοινωνίας των μερών της πειραματικής εγκατάστασης. .	82
Σχήμα 5-6.	Σύγκριση των αποκρίσεων του πραγματικού συστήματος με τις αντίστοιχες αποκρίσεις της προσομοίωσης του αναγνωρισμένου πειραματικά συστήματος.	86
Σχήμα 5-7.	Απόλυτο σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας της βάσης πειράματος και προσομοίωσης. 86	
Σχήμα 5-8.	Σχετικό σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας της βάσης πειράματος και προσομοίωσης. .	87
Σχήμα Α-1.	Αρχή συστήματος συντεταγμένων βάσης (κάτοψη).....	93
Σχήμα Α-2.	Αρχή συστήματος συντεταγμένων βάσης (πρόοψη).	93
Σχήμα Α-3.	Αρχή συστήματος συντεταγμένων πρώτου συνδέσμου.	94
Σχήμα Α-4.	Αρχή συστήματος συντεταγμένων δεύτερου συνδέσμου.	94
Σχήμα Β-1.	Κύριοι αδρανειακοί άξονες βάσης.	95
Σχήμα Β-2.	Κύριοι αδρανειακοί άξονες πρώτου συνδέσμου.	95
Σχήμα Β-3.	Κύριοι αδρανειακοί άξονες δεύτερου συνδέσμου.	96
Σχήμα Γ-1.	Στάδια παραβολικής πτήσης.....	97
Σχήμα Γ-2.	Ομοίωμα του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού στον υποβρύχιο εξομοιωτή του Neutral Buoyancy Lab (NBL) της NASA.	98
Σχήμα Γ-3.	Κυκλικά (αριστερά) και ορθογωνικά (δεξιά) αεροέδρανα.....	99
Σχήμα Γ-4.	Διαστημικός εξομοιωτής ORBIT.....	99
Σχήμα Γ-5.	Δορυφόροι SPHERES στο Διεθνή Διαστημικό Σταθμό.	100

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Σύγκριση ΤΡΟΧΙΑΣ 1 και 2 ως προς τον αριθμό των παραμέτρων.	41
Πίνακας 3-2. Τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του συστήματος.	43
Πίνακας 3-3. Κέρδη προσομοίωσης συναρτήσεως της διάρκειας του πειράματος.	45
Πίνακας 3-4. Περιορισμοί αρθρώσεων για το τριδιάστατο πρόβλημα.	45
Πίνακας 3-5. Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 1.	46
Πίνακας 3-6. Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 2.	49
Πίνακας 3-7. Αποτελέσματα προσομοίωσης αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 1 & 2.	52
Πίνακας 3-8. Αποτελέσματα προσομοίωσης αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 0.	54
Πίνακας 3-9. Αποτελέσματα αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 1 με θόρυβο.	57
Πίνακας 3-10. Αποτελέσματα αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 2 με θόρυβο.	58
Πίνακας 3-11. Αποτελέσματα αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 0 με θόρυβο.	60
Πίνακας 4-1. Τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του ρομπότ από το CAD μοντέλο.	64
Πίνακας 4-2. Τιμές των δυναμικών χαρακτηριστικών του ρομπότ.	64
Πίνακας 4-3. Κέρδη προσομοίωσης συναρτήσεως της διάρκειας του πειράματος.	67
Πίνακας 4-4. Περιορισμοί αρθρώσεων για το διδιάστατο πρόβλημα.	67
Πίνακας 4-5. Αποτελέσματα διαδικασίας εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 1.	68
Πίνακας 4-6. Αποτελέσματα διαδικασίας εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 2.	69
Πίνακας 4-7. Αποτελέσματα προσομοίωσης αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 1&2.	71
Πίνακας 4-8. Αποτελέσματα αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 1 με θόρυβο.	72
Πίνακας 4-9. Αποτελέσματα αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 2 με θόρυβο.	73
Πίνακας 4-10. Χαρακτηριστικά ημιτονοειδούς τροχιάς.	76
Πίνακας 5-1. Αναγνωρισμένες πειραματικά παράμετροι του συστήματος.	85

Κατάλογος Συμβόλων

H	ο πίνακας αδράνειας
C	ο πίνακας που περιέχει τους όρους των φυγόκεντρων δυνάμεων και των δυνάμεων Coriolis
F_v	το διαγώνιο μητρώο των συντελεστών ιξώδους τριβής
F_s	το διαγώνιο μητρώο των συντελεστών τριβής Coulomb
g	το διάνυσμα των βαρυτικών όρων
τ	το διάνυσμα των ροπών των κινητήρων των αρθρώσεων
J^T	ανάστροφος της Ιακωβιανής
h_e	το διάνυσμα των δυνάμεων και ροπών στο τελικό σημείο δράσης
\ddot{q}	το διάνυσμα των γωνιακών επιταχύνσεων των αρθρώσεων
\dot{q}	το διάνυσμα των γωνιακών ταχυτήτων των αρθρώσεων
q	το διάνυσμα των γωνιακών θέσεων των αρθρώσεων
Y	το μητρώο αναδρομιστής (regressor matrix)
\bar{Y}	το μητρώο αναδρομιστής από μετρήσεις
e_i	η i στήλη του μητρώου Y
π	το διάνυσμα-στήλη που περιέχει τις δυναμικές παραμέτρους του συστήματος
π_i	το i στοιχείο του διανύσματος-στήλη π
N	ο αριθμός των μετρήσεων
k	η διάσταση του διανύσματος π
λ_j	σταθεροί συντελεστές
a_l	οι συντελεστές των όρων \sin της <i>Τροχιάς 1</i>
b_l	οι συντελεστές των όρων \cos της <i>Τροχιάς 1</i>
c_k	οι συντελεστές των πολυωνυμικών όρων της <i>Τροχιάς 1</i>
\ln	ο αριθμός των όρων \sin - \cos όρων της <i>Τροχιάς 1</i> ή των συναρτήσεων Gauss της <i>Τροχιάς 2</i>
ω_f	η κυκλική συχνότητα της σειράς Fourier
t	ο χρόνος
t_f	η χρονική διάρκεια του πειράματος
N_{dv}	ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού
0D	αδρανειακού-τύπου μητρώο
0D_q	αδρανειακού-τύπου μητρώο
${}^0D_{qq}$	αδρανειακού-τύπου μητρώο
c_1	διάνυσμα-στήλη που περιέχει τους όρους των φυγόκεντρων δυνάμεων και των δυνάμεων Coriolis

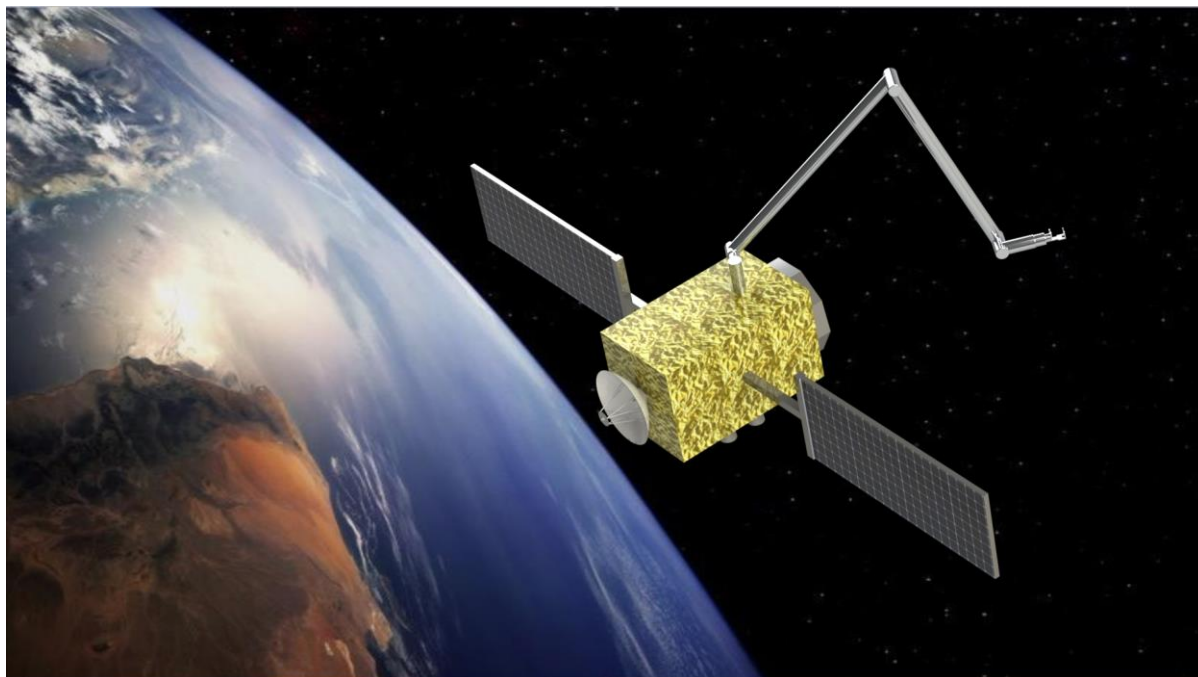
c_2	διάνυσμα-στήλη που περιέχει τους όρους των φυγόκεντρων δυνάμεων και των δυνάμεων Coriolis
${}^0\dot{\omega}_0$	η γωνιακή επιτάχυνση της βάσης
h_{CM}	η στροφορμή του συστήματος εκφρασμένη ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων
\bar{h}_{CM}	η μέτρηση της στροφορμής του συστήματος ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων
σ	η τυπική απόκλιση της συνάρτησης Gauss
α_l	συντελεστές της συνάρτησης Gauss
β_l	συντελεστές της συνάρτησης Gauss
I_{0x}	η ροπή αδράνειας της βάσης ως προς τον άξονα x
I_{0y}	η ροπή αδράνειας της βάσης ως προς τον άξονα y
I_{0z}	η ροπή αδράνειας της βάσης ως προς τον άξονα z
I_{1x}	η ροπή αδράνειας του πρώτου βραχίονα ως προς τον άξονα x
I_{1y}	η ροπή αδράνειας του πρώτου βραχίονα ως προς τον άξονα y
I_{1z}	η ροπή αδράνειας του πρώτου βραχίονα ως προς τον άξονα z
I_{2x}	η ροπή αδράνειας του δεύτερου βραχίονα ως προς τον άξονα x
I_{2y}	η ροπή αδράνειας του δεύτερου βραχίονα ως προς τον άξονα y
I_{2z}	η ροπή αδράνειας του δεύτερου βραχίονα ως προς τον άξονα z
I_{3x}	η ροπή αδράνειας του τρίτου βραχίονα ως προς τον άξονα x
I_{3y}	η ροπή αδράνειας του τρίτου βραχίονα ως προς τον άξονα y
I_{3z}	η ροπή αδράνειας του τρίτου βραχίονα ως προς τον άξονα z
r_{0x}	η κατά x απόσταση του κέντρου μάζας της βάσης από την πρώτη άρθρωση
r_{0y}	η κατά y απόσταση του κέντρου μάζας της βάσης από την πρώτη άρθρωση
r_{0z}	η κατά z απόσταση του κέντρου μάζας της βάσης από την πρώτη άρθρωση
r_1	η γραμμική απόσταση του κέντρου μάζας του πρώτου συνδέσμου από τη δεύτερη άρθρωση
r_2	η γραμμική απόσταση του κέντρου μάζας του δεύτερου συνδέσμου από την τρίτη άρθρωση
l_1	η γραμμική απόσταση του κέντρου μάζας του πρώτου συνδέσμου από την πρώτη άρθρωση
l_2	η γραμμική απόσταση του κέντρου μάζας του δεύτερου συνδέσμου από τη δεύτερη άρθρωση
l_3	η γραμμική απόσταση του κέντρου μάζας του τρίτου συνδέσμου από την τρίτη άρθρωση
m_0	η μάζα της βάσης

m_1	η μάζα του πρώτου συνδέσμου
m_2	η μάζα του δεύτερου συνδέσμου
m_3	η μάζα του τρίτου συνδέσμου
M	η συνολική μάζα του ρομπότ
A	λόγος μαζών
B	λόγος μαζών
G	λόγος μαζών
D	λόγος μαζών
E	λόγος μαζών
F	λόγος μαζών
t_s	ο χρόνος αποκατάστασης
ω_n	η κυκλική συχνότητα που αντιστοιχεί σε χρόνο αποκατάστασης t_s
K_p	το μητρώο που περιέχει τα κέρδη του P-ελέγχου
K_D	το μητρώο που περιέχει τα κέρδη του D-ελέγχου
k_{pi}	το i στοιχείο του μητρώου K_p
k_{di}	το i στοιχείο του μητρώου K_D
I_{rw}	η ροπή αδράνειας του σφονδύλου αντίδρασης
ω_{rw}	η γωνιακή ταχύτητα του σφονδύλου αντίδρασης

1 Εισαγωγή

Η εξερεύνηση και αξιοποίηση του διαστήματος προς όφελος της ανθρωπότητας έχει βρεθεί στο επίκεντρο της επιστημονικής έρευνας τις τελευταίες δεκαετίες. Εκατοντάδες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως οι τηλεπικοινωνίες, η πρόβλεψη επικίνδυνων καιρικών φαινομένων κ.λ.π. εξαρτώνται άμεσα από την κατασκευή, σωστή λειτουργία και συντήρηση υποδομών στο διάστημα σε τροχιά γύρω από τη γη.

Καθώς η χρήση του διαστήματος ξεφεύγει πλέον από τα στενά όρια των επιστημονικών δοκιμών και αποκτά χαρακτήρα μεγάλης κλίμακας, εμφανίζεται ως αναγκαιότητα η εφαρμογή On Orbit Servicing (OOS) αποστολών. Οι αποστολές αυτές περιλαμβάνουν Διαστημικά Ρομποτικά Συστήματα (ΔΡΣ) με έναν ή περισσότερους βραχίονες ή κάποιο άλλο μέσο αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον τους, τα οποία έχουν ως στόχο την εκτέλεση εργασιών όπως η επισκευή δορυφόρων, ο ανεφοδιασμός των δορυφόρων με καύσιμο (refueling), η απομάκρυνση διαστημικών 'απορριμάτων' (space debris) ακόμα και η in-situ συναρμολόγηση-κατασκευή σε τροχιά. Η εκτέλεση αυτού του είδους εργασιών στο περιβάλλον του διαστήματος είναι δύσκολο και συχνά αδύνατον να γίνει από αστροναύτες στα πλαίσια π.χ. EVA.

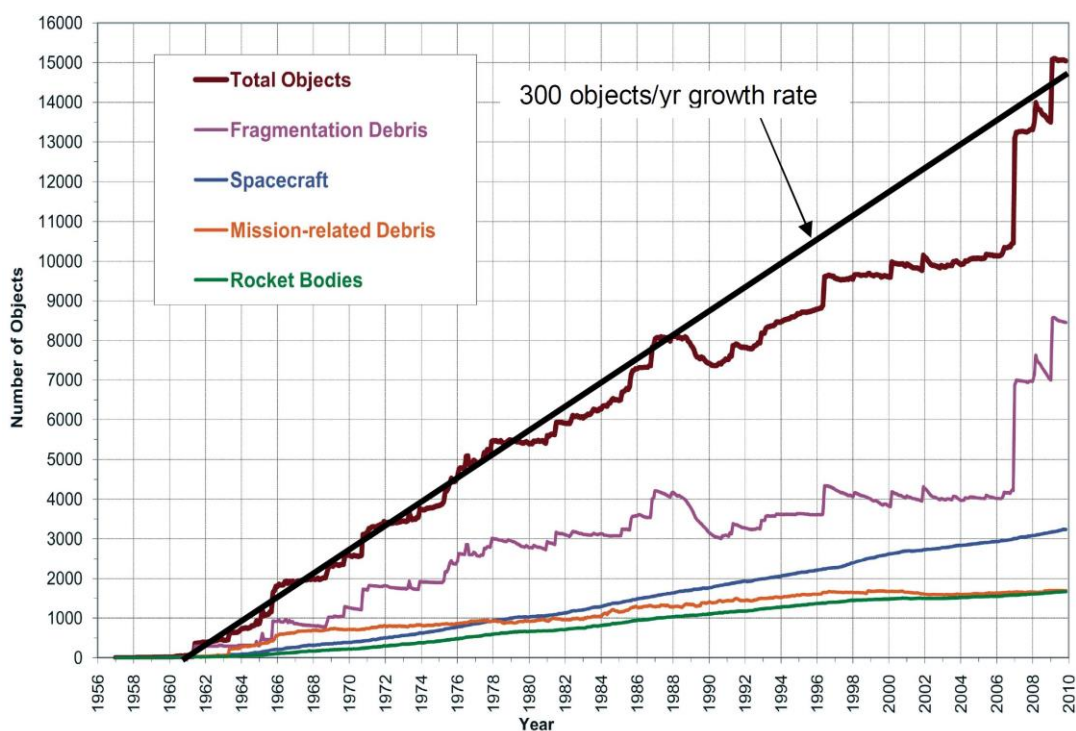


Σχήμα 1-1. Διαστημικό ρομποτικό σύστημα με βραχίονα.

1.1 Το πρόβλημα των διαστημικών 'απορριμάτων'

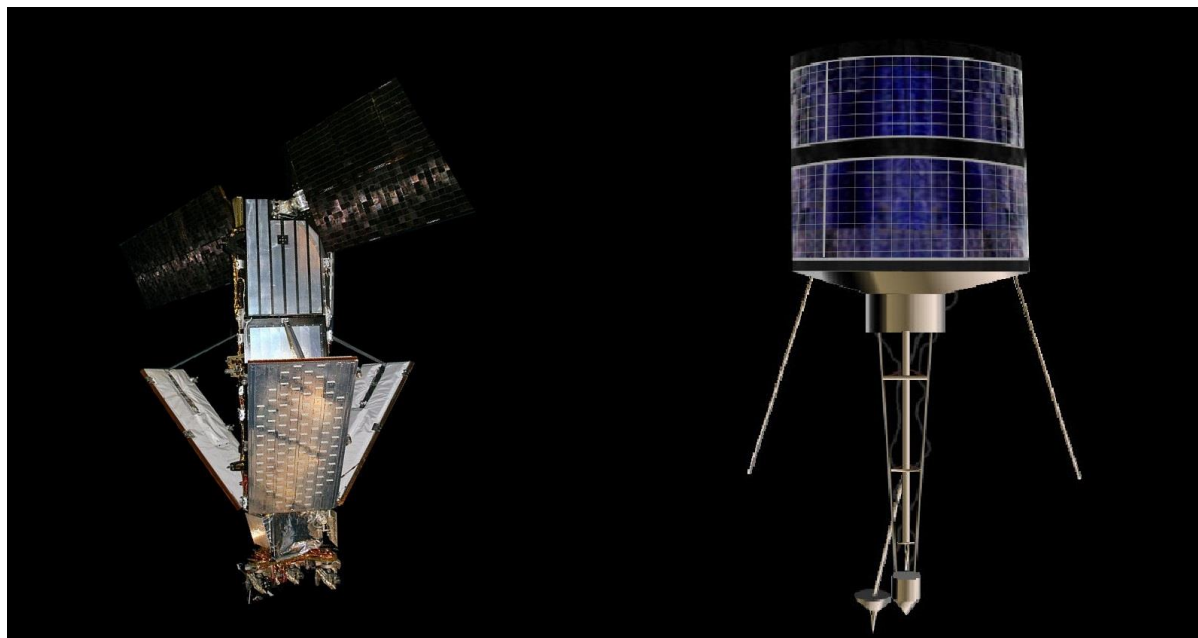
Γίνεται φανερό ότι, στα πλαίσια του On Orbit Servicing, υπάρχουν πολλές εφαρμογές κλιμακούμενης σημασίας και αναγκαιότητας ανάλογα με τα επιστημονικά, οικονομικά και στρατηγικά οφέλη που πρόκειται να προσφέρουν. Μια εργασία σε τροχιά που αναμένεται να έχει καθοριστικό ρόλο στη δυνατότητα εκτέλεσης διαστημικών αποστολών τα επόμενα χρόνια είναι η επιτυχής αντιμετώπιση του προβλήματος των διαστημικών «απορριμάτων» (space debris). Με την έναρξη της διαστημικής

εποχής, το North American Aerospace Defence Command (NORAD) ξεκίνησε την κατάρτιση καταλόγου (Space Object Catalogue) με όλα τα γνωστά αντικείμενα σε τροχιά γύρω από τη Γη. Το 1978 οι Kessler και Cour-Palais έκαναν μία δημοσίευση [2] με την οποία υποστήριζαν ότι ακόμα και αν δεν προστεθούν καινούρια αντικείμενα (φυσικά ή τεχνητά) στον υπάρχοντα πληθυσμό, που βρίσκεται σε Low Earth Orbit γύρω από τη Γη, ο αριθμός των διαστημικών απορριμάτων θα αυξηθεί εκθετικά μέσα στα επόμενα χρόνια λόγω τυχαίων συγκρούσεων μεταξύ των καταγεγραμμένων αντικειμένων. Πράγματι, μετά από 50 χρόνια ανθρώπινης δραστηριότητας στο διάστημα και περισσότερες από 4800 εκτοξεύσεις, έχουν τοποθετηθεί σε τροχιά γύρω από τη Γη περίπου 5000 δορυφόροι, από τους οποίους μόνο οι περίπου 1000 εξακολουθούν να είναι λειτουργικοί. Εκτός από τον μεγάλο αυτό αριθμό ανέπαφων δορυφόρων, με εκτιμώμενη συνολική μάζα περίπου 6000 tn, υπάρχουν πολυάριθμα άλλα καταγεγραμμένα αντικείμενα σε τροχιά. Τα αντικείμενα αυτά παρακολουθεί το αμερικάνικο Space Surveillance Network (SSN), το οποίο έχει καταγεγραμμένα περισσότερα από 1600 τέτοια αντικείμενα στους δημόσιους καταλόγους του. Πρόκειται για αντικείμενα διαστάσεων 5 έως 10 cm σε LEO και 30 cm έως 1 m σε γεωστατική τροχιά (GEO). Μόνο το 6% των καταγεγραμμένων αντικειμένων είναι λειτουργικοί δορυφόροι, ενώ το 28% μπορεί να συσχετιστεί με κατεστραμμένους δορυφόρους, χρησιμοποιημένα στάδια πυραύλων και με άλλα αναλώσιμα κομμάτια διαστημικού εξοπλισμού. Το υπόλοιπο 66% θεωρείται ότι προέρχεται από διασπάσεις και συγκρούσεις των αντικειμένων που βρίσκονται σε τροχιά. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται να έχει δημιουργήσει έναν πληθυσμό της τάξεως των 700.000 νέων αντικειμένων μεγαλύτερων από 1 cm. Τα αντικείμενα αυτά, αν και έχουν μικρό μέγεθος, κινούνται με μέγιστη ταχύτητα 17,500 mph (28.159 km/h), ταχύτητες αρκετά υψηλές για να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες σε δορυφόρους και διαστημόπλοια, όταν συγκρούονται μαζί τους. Στο Σχήμα 1-2 φαίνεται η χρονική εξέλιξη του αριθμού αυτών των αντικειμένων μέχρι το έτος 2010.



Σχήμα 1-2. Χρονική εξέλιξη του αριθμού των διαστημικών απορριμάτων.

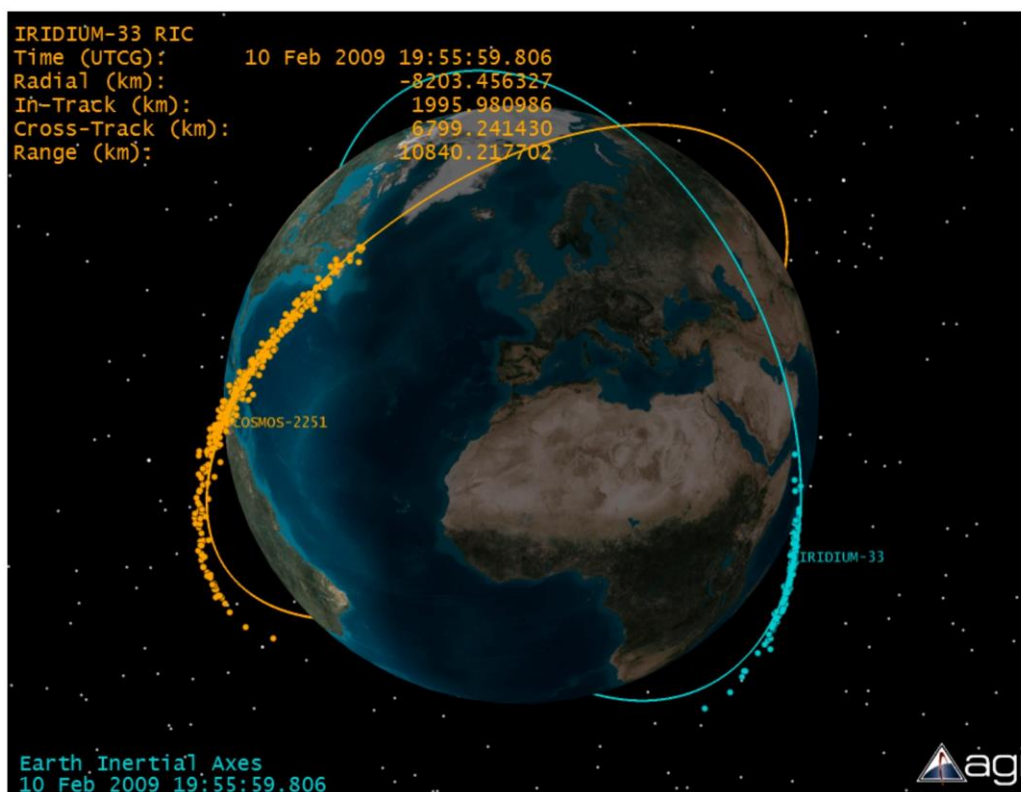
Στις 10 Φεβρουαρίου του 2009 καταγράφηκε η πρώτη τυχαία σύγκρουση ανάμεσα σε δύο ανέπαφους δορυφόρους σε Low Earth Orbit [3] . Επρόκειτο για τον λειτουργικό, μάζας 560 kg, αμερικανικής κατασκευής, εμπορικό δορυφόρο Iridium 33, ο οποίος μέχρι και τη σύγκρουση αποτελούσε μέρος σμήνους 66 τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων. Ο δορυφόρος αυτός συγκρούστηκε με τον μάζας 950 kg στρατιωτικό τηλεπικοινωνιακό δορυφόρο ρώσικης κατασκευής Cosmos 2251, μέρος του σμήνους δορυφόρων Strela, ο οποίος δεν διέθετε προωθητικό σύστημα και ήταν εκτός λειτουργίας από το 1995, δύο χρόνια μετά την εκτόξευσή του. Δύο μοντέλα των δορυφόρων αυτών φαίνονται στο Σχήμα 1-3. Η πρώτη ένδειξη της σύγκρουσης προήλθε από τη διακοπή του σήματος από τον Iridium 66, ενώ πολύ σύντομα το αμερικάνικο Space Surveillance Network (SSN) άρχισε να ανιχνεύει πολυάριθμα νέα αντικείμενα στην τροχιά των δύο δορυφόρων, επιβεβαιώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη σύγκρουση. Η σύγκρουση των δύο δορυφόρων έγινε σε υψόμετρο 790 km με ταχύτητα μεγαλύτερη των 11 km/h και είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλου αριθμού διαστημικών «σκουπιδιών», των οποίων η διασπορά, 180 λεπτά μετά τη σύγκρουση, φαίνεται στο Σχήμα 1-4.



Σχήμα 1-3. Αντίγραφο ενός δορυφόρου Iridium (αριστερά) και απόψη του δορυφόρου Strela-2M (δεξιά).

Μέχρι τις 5 Αυγούστου του 2009 το SSN είχε καταγράψει 386 διαστημικά «σκουπίδια» (16 από τα οποία είχαν ήδη απομακρυνθεί φυσικά από την τροχιά τους) από τον δορυφόρο Iridium 33 και 927 από τον Cosmos 2251 (30 από τα οποία είχαν απομακρυνθεί) [4] . Σε άλλο περιστατικό έγινε αναγκαία η προληπτική συγκέντρωση, για λόγους ασφάλειας, του πληρώματος του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού (International Space Station – ISS) στο διαστημόπλοιο Soyuz TMA-13, καθώς υπήρχε πρόβλεψη ότι ένα διαστημικό «σκουπίδι» θα διερχόταν σε πολύ κοντινή απόσταση από τον ISS. Τελικά, το αντικείμενο πέρασε τον ISS στην ασφαλή απόσταση των 4 km. Πέρα από το παραπάνω περιστατικό, έχουν καταγραφεί και άλλες περιπτώσεις κατά τις οποίες μία διαστημική αποστολή επηρεάζεται σημαντικά από διαστημικά σκουπίδια, κάποιες από τις οποίες αφορούν και σε βλάβες όπως στην περίπτωση δημιουργίας κρατήρα λόγω πρόσκρουσης διαστημικού σκουπιδιού μικρού μεγέθους στο παράθυρο διαστημοπλοίου της αποστολής STS-126 προς το Διεθνή Διαστημικό

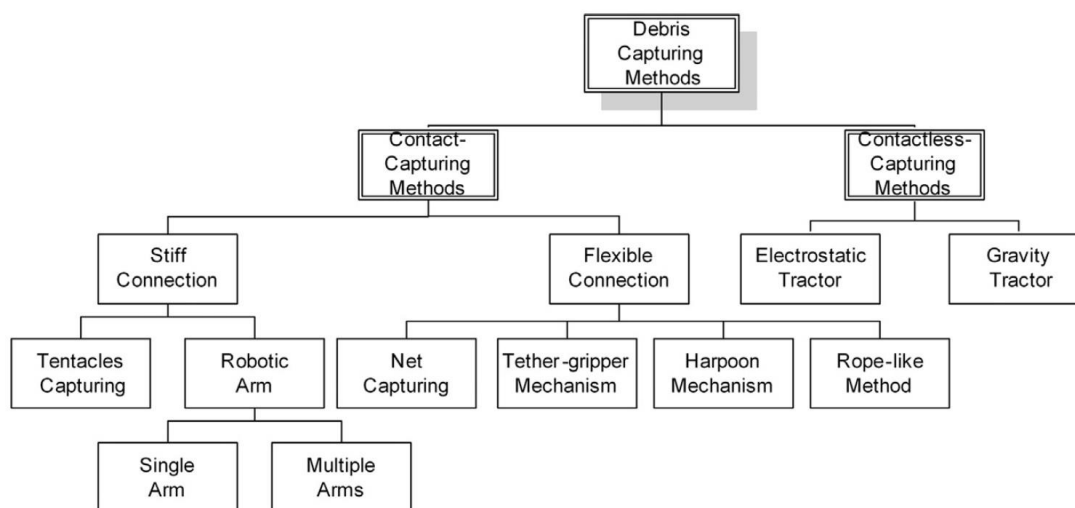
Σταθμό. Αν και υπάρχουν διαθέσιμα συστήματα τα οποία καταγράφουν και παρακολουθούν τα διαστημικά σκουπίδια σε τροχιά γύρω από τη Γη, δεν είναι δυνατόν να προβλέψουν πάντα με ακρίβεια την πιθανότητα μίας σύγκρουσης.



Σχήμα 1-4. Διασπορά των διαστημικών σκουπιδιών 180 λεπτά μετά τη σύγκρουση.

Η σύγκρουση μεταξύ των δορυφόρων Iridium33 και Cosmos 2251 αποτελεί την τέταρτη γνωστή τυχαία σύγκρουση δύο καταγεγραμμένων σωμάτων σε τροχιά γύρω από τη Γη. Οι προηγούμενες συγκρούσεις περιελάμβαναν έναν ανέπαφο δορυφόρο ή χρησιμοποιημένο στάδιο πυραύλου με κάποιο μικρότερο διαστημικό «σκουπίδι» και είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία το πολύ τεσσάρων νέων διαστημικών «σκουπιδιών» ανά συμβάν. Τα περιστατικά αυτά, ωστόσο, είναι ενδεικτικά της ανάγκης διαμόρφωσης στρατηγικής αντιμετώπισης του προβλήματος. Προς αυτή την κατεύθυνση πρωτοστάτης είναι η European Space Agency (ESA) με το πρόγραμμα Clean Space Initiative, το οποίο έχει ως στόχο την ανάπτυξη και εφαρμογή πολιτικών, που θα εξασφαλίζουν τη βιωσιμότητα της ανθρώπινης δραστηριότητας στο διάστημα. Στα πλαίσια του προγράμματος αυτού και με σκοπό τη διαχείριση του αυξανόμενου αριθμού διαστημικών απορριμάτων έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις [5]. Μία από αυτές είναι η χρήση διαστημικών συστημάτων (chaser), τα οποία έχουν τη δυνατότητα να προσεγγίσουν και να συλλάβουν το διαστημικό σκουπίδι-στόχο (target) και στη συνέχεια να το οδηγήσουν σε χαμηλότερη τροχιά όπου θα καταστρέφεται με την είσοδό του στην ατμόσφαιρα. Μεγάλο μέρος της έρευνας που διεξάγεται στον τομέα αυτό, σχετίζεται με το σχεδιασμό του κατάλληλου μέσου αλληλεπίδρασης μεταξύ chaser και target, με κάποιες από τις επικρατέστερες λύσεις να είναι το δίχτυ (net capturing), τα πλοκάμια (tentacles), οι ρομποτικοί βραχίονες και η δέσμη ιόντων (ion beam), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-5. Επιπρόσθετα, έχει προταθεί και η διαχείριση των διαστημικών σκουπιδιών, χωρίς τη χρήση διαστημικών συστημάτων, από επίγειες εγκαταστάσεις,

όπως στην περίπτωση της δημιουργίας τεχνητών ατμοσφαιρικών διαταραχών (Artificial Atmosphere Influence) και συστημάτων Laser [6] . Τέλος, αναφέρεται ότι στα πλαίσια του προγράμματος e.Deorbit του European Space Agency (ESA), προγραμματίζεται η πρώτη σύλληψη και η ελεγχόμενη καταστροφή στην ατμόσφαιρα ενός εκτός λειτουργίας δορυφόρου, με βασικό υποψήφιο τον ανενεργό από το 2012 μετεωρολογικό δορυφόρο Envisat.



Σχήμα 1-5. Μέθοδοι σύλληψης διαστημικών ‘σκουπιδιών’.

1.2 Επισκευή και συναρμολόγηση σε τροχιά

Οι εργασίες σε τροχιά, εκτός από τη διαχείριση των διαστημικών σκουπιδιών, παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον και στα πλαίσια της επισκευής εξοπλισμού, που βρίσκεται ήδη σε τροχιά. Τα τελευταία χρόνια διαστημικός εξοπλισμός αξίας άνω των δύο δισεκατομμυρίων δολαρίων έχει αχρηστευτεί πριν την ολοκλήρωση των προγραμματισμένων του εργασιών λόγω βλαβών κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης ή όσο ο δορυφόρος βρίσκεται σε τροχιά. Οι βλάβες αυτές θα ήταν σχετικά εύκολο να επισκευαστούν στη Γη, αλλά οι αντίστοιχες εργασίες στο διάστημα, αν και δεν έχουν επιχειρηθεί σχεδόν ποτέ έως τώρα, αποτελούν ένα ιδιαίτερα απαιτητικό τόσο τεχνικά όσο και οικονομικά πρόβλημα. Η βασική δυσκολία σχετίζεται με το γεγονός ότι οι περισσότεροι δορυφόροι δεν έχουν σχεδιαστεί με την προοπτική να μπορούν να συνεργαστούν με κάποιο ρομποτικό σύστημα που θα κληθεί να τους επισκευάσει. Ωστόσο, σκοπός μία τέτοιας αποστολής θα ήταν η προσέγγιση του πιθανά μη συνεργάσιμου δορυφόρου που έχει υποστεί τη βλάβη (client satellite) από το ρομποτικό σύστημα που θα τον επισκευάσει (servicing satellite) και η πρόσδεση των δύο έτσι ώστε να κλείσει βρόχος ελέγχου. Ελάχιστες τέτοιες αποστολές έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα και αφορούν κυρίως τη συναρμολόγηση και την επισκευή του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού με τη συμμετοχή πάντα αστροναυτών στα πλαίσια Extravehicular Activity (EVA). Η πιο γνωστή βιβλιογραφικά επισκευή εξοπλισμού σε τροχιά είναι αυτή του διαστημικού τηλεσκοπίου Hubble το 1993. Στη συγκεκριμένη αποστολή αστροναύτες από το Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, σε χρονικό διάστημα 5 διαδοχικών ημερών και με συνολικά 35 ώρες και 28 λεπτά EVA, εγκατέστησαν με επιτυχία διορθωτικό οπτικό σύστημα στο εκ κατασκευής προβληματικό πρωτεύον κάτοπτρο του τηλεσκοπίου. Ακολούθησαν

άλλες 4 αποστολές επισκευής και συντήρησης του τηλεσκοπίου Hubble: το 1997, το 1999, το 2002 και το 2009 [6] [7] . Καθώς προβλέπεται ότι οι εργασίες σε τροχιά θα γίνονται όλο και πιο συχνά και θα απαιτούν την εκτέλεση πολύπλοκων εργασιών με μεγάλη ακρίβεια, γίνεται απαραίτητος ο σχεδιασμός και η χρήση ρομποτικών συστημάτων, που θα εκτελούν αποτελεσματικά τις αναγκαίες εργασίες χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος απώλειας ανθρώπινων ζωών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά μερικά ρομποτικά συστήματα, που χρησιμοποιούνται ήδη για την εκτέλεση εργασιών σε τροχιά.



Σχήμα 1-6. Ρομποτικός βραχίονας Canadarm.

Canadarm

Ίσως το πιο γνωστό ρομποτικό σύστημα που έχει χρησιμοποιηθεί για εργασίες σε τροχιά φαίνεται στο Σχήμα 1-6 και είναι το Shuttle Remote Manipulator System (SRMS), γνωστό και ως “Canadarm” (Canadarm1). Πρόκειται για ένα βραχίονα με δύο κύριους συνδέσμους, έναν επενεργητή στο τελικό σημείο δράσης και έναν σταθμό εργασίας και ελέγχου πάνω στο διαστημικό λεωφορείο (Space Shuttle Orbiter). Διαθέτει 6 βαθμούς ελευθερίας και είναι σχεδιασμένο τόσο για τηλεχείριση όσο και για αυτόματη λειτουργία με χρήση εκ των προτέρων προγραμματισμένων τροχιών, αν και η προσέγγιση αυτή δεν έχει υλοποιηθεί συχνά. Μετά την πρώτη του πτήση το 1981 με το διαστημικό λεωφορείο Columbia (Space Shuttle mission STS-2) αποτέλεσε αναπόσπαστο μέρος του προγράμματος “Space Shuttle” της NASA συμμετέχοντας σε 50 αποστολές πάνω σε 5 διαφορετικά διαστημικά λεωφορεία. Το σύστημα αυτό έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εργασίες σε τροχιά με πιο αξιοσημείωτες τη διάσωση των δορυφόρων Westar και Palapa, την επισκευή του διαστημικού τηλεσκοπίου Hubble και τη συναρμολόγηση του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού. Μετά την καταστροφή του διαστημικού λεωφορείου Columbia το ρομποτικό σύστημα Canadarm συνδυαζόταν σε κάθε πτήση με το Orbiter Boom Sensor System (OBSS) για την επιθεώρηση της θερμικής προστασίας του διαστημικού λεωφορείου [8] . Στα πρότυπα του Canadarm1 σχεδιάστηκε και το

Space Station Remote Manipulator System (SSRMS) γνωστό και ως Canadarm2, με βελτιωμένα όμως χαρακτηριστικά έτσι ώστε να μπορεί να αντεπεξέλθει στις εργασίες που απαιτούνται για τη συντήρηση και συναρμολόγηση του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού. Διαθέτει 7 βαθμούς ελευθερίας και είναι ένα από τα τρία μέρη του Mobile Servicing System (MSS) του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού, μαζί με το Mobile Base System (MBS) και το Special Purpose Dexterous Manipulator (SPDM) ή αλλιώς Dextre [9]. Αυτή τη στιγμή βρίσκονται σε λειτουργία 4 βραχίονες τύπου Canadarm.

Robonaut 2

Η NASA σε συνεργασία με την General Motors έχουν κατασκευάσει το ανθρωπομορφικό ρομπότ Robonaut 2 (R2), με σκοπό την υποβοήθηση αλλά και την αυτόνομη εκτέλεση εργασιών στο διάστημα. Το Robonaut 2, όπως και ο προκάτοχός του Robonaut 1 (R1), είναι σχεδιασμένο για να μπορεί να συνεργαστεί με τον άνθρωπο και είναι ικανό να χειριστεί ένα μεγάλο εύρος εργαλείων που χρησιμοποιούνται από τους αστροναύτες στα πλαίσια μιας EVA. Διαθέτει 350 αισθητήρες, 42 ανεξάρτητους βαθμούς ελευθερίας και 50 επενεργητές. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στη μείωση του αριθμού των καλωδίων, ειδικά αυτών που διέρχονται δια μέσου βαθμών ελευθερίας, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του συστήματος. Το Robonaut 2, που φαίνεται στο Σχήμα 1-7, βρίσκεται από το 2012 στο Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, όπου χρησιμοποιείται σε διάφορες ερευνητικές εργασίες. Πρόσφατα το σύστημα αναβαθμίστηκε με την προσθήκη στον κορμό του ρομπότ δύο βραχιόνων-ποδιών, καλύτερων επεξεργαστών και καινούριων αισθητήρων [10].



Σχήμα 1-7. Ρομποτικό σύστημα Robonaut 2.

1.3 Δομή εργασίας

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στα διάφορα είδη εργασιών σε τροχιά (OOS) με ιδιαίτερη έμφαση στη διαχείριση των διαστημικών απορριμάτων και στην επισκευή-συναρμολόγηση σε τροχιά. Στο **δεύτερο κεφάλαιο** εισάγεται η θεωρία αναγνώρισης δυναμικών παραμέτρων για ρομποτικό βραχίονα με σταθερή βάση και το βασικό είδος τροχιάς που χρησιμοποιείται. Η θεωρία αναγνώρισης επεκτείνεται στην περίπτωση των διαστημικών συστημάτων όπου γίνεται χρήση της εξίσωσης διατήρησης της στροφορμής και στη συνέχεια περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία εύρεσης βέλτιστης τροχιάς και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** εισάγεται μία νέα μορφή βέλτιστης τροχιάς και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης για ένα τριδιάστατο ρομποτικό σύστημα. Ακολουθεί περιγραφή του αισθητήρα καταγραφής της γωνιακής θέσης (encoder) και του τρόπου που μοντελοποιείται ο θόρυβος που εισάγει στη μέτρηση. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θεωρητικής αναγνώρισης παραμέτρων με και χωρίς θόρυβο.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, όπως προκύπτουν από το CAD μοντέλο. Με βάση αυτά τα μεγέθη γίνεται, στη συνέχεια, εύρεση βέλτιστων τροχιών αναγνώρισης. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θεωρητικής αναγνώρισης παραμέτρων με και χωρίς θόρυβο.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στους διαστημικούς εξομοιωτές. Ακολουθεί εκτενής περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πειραματικής αναγνώρισης δυναμικών παραμέτρων.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 Αναγνώριση Παραμέτρων

Η γνώση των δυναμικών παραμέτρων ενός ρομποτικού συστήματος είναι πολύ σημαντική τόσο για την καλύτερη προσομοίωση και θεωρητική μελέτη του όσο και για τον έλεγχο του. Τέτοια μεγέθη είναι συνήθως η μάζα, η ροπή αδράνειας, η θέση του κέντρου μάζας κ.λ.π. των σωμάτων που απαρτίζουν το σύστημα.

Μια πρώτη προσέγγιση των μεγεθών αυτών μπορεί να προέλθει από τη μοντελοποίηση του συστήματος με τη βοήθεια κάποιου λογισμικού Computer Aided Design (CAD), στο οποίο εισάγονται οι διάφορες γεωμετρίες και τα υλικά που απαρτίζουν το σύστημα. Σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο, είναι πιθανόν να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις των παραμέτρων του μοντέλου από τις πραγματικές λόγω απλοποιημένου ή ελλιπούς σχεδιασμού.

Εναλλακτικά, το υπό μελέτη σύστημα είναι δυνατόν να αποσυναρμολογηθεί και στη συνέχεια να μετρηθούν πειραματικά τα αδρανειακά χαρακτηριστικά των διάφορων μερών του. Η ευριστική (heuristic) προσέγγιση αυτή πέρα από την δυσκολία στην υλοποίησή της, εισάγει επίσης αβεβαιότητα στις τιμές των παραμέτρων που θα μετρηθούν λόγω των σφαλμάτων των μετρητικών οργάνων. Επιπρόσθετα, και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις, δεν μπορούν να ληφθούν υπόψιν περίπλοκα δυναμικά φαινόμενα, όπως η τριβή των αρθρώσεων.

2.1 Αναγνώριση παραμέτρων με χρήση των δυναμικών εξισώσεων

Για να μπορέσουμε να προσεγγίσουμε με ακρίβεια τις τιμές των δυναμικών παραμέτρων του συστήματος πρέπει να καταφύγουμε σε μεθόδους αναγνώρισης των δυναμικών παραμέτρων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη δυνατότητα του δυναμικού μοντέλου να εκφραστεί γραμμικά ως προς ένα κατάλληλο σύνολο των δυναμικών του παραμέτρων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η μέθοδος της αναγνώρισης δεν καθιστά απαραίτητα γνωστά ένα προς ένα τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος, αλλά προσδιορίζει τις τιμές κατάλληλου συνδυασμού αυτών, καθιστώντας έτσι τη δυναμική του συστήματος πλήρως προσδιορισμένη (μητρώα αδράνειας κ.λ.π.).

Στη γενική περίπτωση [11], η δυναμική εξίσωση που περιγράφει ένα μη γραμμικό μοντέλο στο χώρο των αρθρώσεων (συναρτήσει της γωνιακής θέσης (\mathbf{q}), ταχύτητας ($\dot{\mathbf{q}}$) και επιτάχυνσης ($\ddot{\mathbf{q}}$) των αρθρώσεων) είναι:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_v\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_s \operatorname{sgn}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{h}_e \quad (2-1)$$

όπου \mathbf{H} είναι το μητρώο αδράνειας, \mathbf{C} το μητρώο που περιέχει τους όρους των φυγόκεντρων δυνάμεων και των δυνάμεων Coriolis, \mathbf{F}_v το διαγώνιο μητρώο των συντελεστών ιξώδους τριβής, \mathbf{F}_s το διαγώνιο μητρώο των συντελεστών τριβής Coulomb, $\operatorname{sgn}(\dot{\mathbf{q}})$ διάνυσμα του οποίου οι συντεταγμένες δίνονται από τις συναρτήσεις προσήμου των ταχυτήτων των αρθρώσεων, \mathbf{g} το διάνυσμα των βαρυτικών όρων, $\boldsymbol{\tau}$ το διάνυσμα των ροπών των κινητήρων των αρθρώσεων και $\mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{h}_e$ η επίδραση στο σύστημα των δυνάμεων και ροπών \mathbf{h}_e , που ασκούνται στο τελικό σημείο δράσης.

Η παραπάνω εξίσωση, στην απλή περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δυνάμεις επαφής ($\mathbf{h}_e = \mathbf{0}$) και οι συντελεστές ιξώδους τριβής και τριβής Coulomb συμπεριληφθούν στις παραμέτρους του διανύσματος $\boldsymbol{\pi}$, μπορεί να γραφτεί με τη συμπαγή μορφή

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\pi} \quad (2-2)$$

όπου $\boldsymbol{\pi}$ το διάνυσμα-στήλη, που περιέχει τις δυναμικές παραμέτρους του συστήματος σε κατάλληλους συνδυασμούς, και \mathbf{Y} μητρώο, το οποίο ονομάζεται αναδρομιστής (regressor matrix) και μπορεί να προσδιοριστεί από μετρήσεις των θέσεων των αρθρώσεων \mathbf{q} , των ταχυτήτων $\dot{\mathbf{q}}$ και των επιταχύνσεων $\ddot{\mathbf{q}}$. Οι θέσεις των αρθρώσεων μπορούν να μετρηθούν, ενώ απαιτείται αριθμητική παραγωγή για τον προσδιορισμό της ταχύτητας και της επιτάχυνσης. Επιπλέον απαιτείται μέτρηση των ροπών $\boldsymbol{\tau}$ των αρθρώσεων, κάτι το οποίο μπορεί να γίνει είτε με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων ροπής είτε από τη μέτρηση του ρεύματος του κινητήρα. Αν οι μετρήσεις των ροπών, των θέσεων, των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων των αρθρώσεων έχουν προκύψει κατά τις χρονικές στιγμές t_1, \dots, t_N πάνω σε μία δεδομένη τροχιά, μπορούμε να γράψουμε

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}(t_1) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\tau}(t_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}(t_1) \\ \vdots \\ \mathbf{Y}(t_N) \end{bmatrix} \boldsymbol{\pi} = \bar{\mathbf{Y}}\boldsymbol{\pi} \quad (2-3)$$

Το πλήθος των χρονικών στιγμών καθορίζει τον αριθμό των μετρήσεων N που πρέπει να γίνουν κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της τροχιάς από τις αρθρώσεις του ρομπότ. Ο αριθμός αυτός πρέπει να είναι τέτοιος, ώστε ο αριθμός των γραμμών n του μητρώου $\bar{\mathbf{Y}}$ να είναι τουλάχιστον ίσος με τη διάσταση k του διανύσματος $\boldsymbol{\pi}$. Στη γενική περίπτωση ο αριθμός των μετρήσεων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος, ώστε το μητρώο $\bar{\mathbf{Y}}$ να μην είναι ιδιόμορφο.

$$n \cdot N \geq k \quad (2-4)$$

Τότε, αν επιλύσουμε την Εξ. (2-3), με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει λύση της μορφής

$$\boldsymbol{\pi} = (\bar{\mathbf{Y}}^T \bar{\mathbf{Y}})^{-1} \bar{\mathbf{Y}}^T \bar{\boldsymbol{\tau}} \quad (2-5)$$

όπου $(\bar{\mathbf{Y}}^T \bar{\mathbf{Y}})^{-1} \bar{\mathbf{Y}}^T$ είναι το εξ αριστερών ψευδο-αντίστροφο μητρώο του $\bar{\mathbf{Y}}$.

Σημειώνεται ότι το διάνυσμα $\boldsymbol{\pi}$ θα πρέπει να περιέχει τον ελάχιστο δυνατό αριθμό παραμέτρων προς αναγνώριση, έτσι ώστε το μητρώο \mathbf{Y} να έχει μέγιστη τάξη (full rank). Υποθέτουμε ότι τα $\boldsymbol{\pi}$ και \mathbf{Y} έχουν αρχικά τη μορφή

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{e}_1 \dots \mathbf{e}_i \dots \mathbf{e}_k] \quad (2-6)$$

και

$$\boldsymbol{\pi} = [\pi_1 \dots \pi_i \dots \pi_k] \quad (2-7)$$

όπου \mathbf{e}_i είναι η i στήλη του μητρώου \mathbf{Y} και π_i το i στοιχείο του διανύσματος-στήλη $\boldsymbol{\pi}$. Για να προσδιορίσουμε τον ελάχιστο αριθμό παραμέτρων, πρέπει να εξετάσουμε αν η στήλη \mathbf{e}_i μπορεί να γραφτεί ως γραμμικός συνδυασμός των υπολοίπων στηλών του μητρώου \mathbf{Y} .

$$\mathbf{e}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^k \lambda_j \mathbf{e}_j \quad (2-8)$$

όπου λ_j σταθερές. Αυτό ελέγχεται αναζητώντας εάν υπάρχει $\lambda_j \neq 0$, τέτοιο ώστε $\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_j = \lambda_j$. Στην περίπτωση που κάτι τέτοιο είναι εφικτό, η στήλη \mathbf{e}_i και το στοιχείο π_i αφαιρούνται από τα \mathbf{Y} και $\boldsymbol{\pi}$ αντίστοιχα, οπότε προκύπτει το καινούριο διάνυσμα $\boldsymbol{\pi}$:

$$\boldsymbol{\pi} = \left[\pi_1 (1 + \lambda_1) \dots \pi_{i-1} (1 + \lambda_{i-1}) \quad \pi_{i+1} (1 + \lambda_{i+1}) \dots \pi_k (1 + \lambda_k) \right]^T \quad (2-9)$$

Η επαναληπτική αυτή διαδικασία ολοκληρώνεται όταν καμία στήλη \mathbf{e}_i του μητρώου \mathbf{Y} δεν μπορεί να γραφτεί στη μορφή της Εξ. (2-8). Τότε, το τελικό διάνυσμα $\boldsymbol{\pi}$ περιέχει τον ελάχιστο αριθμό παραμέτρων για αναγνώριση.

Όταν σχεδιάζεται ένα πείραμα αναγνώρισης, εκτός από τον προσδιορισμό της μορφής του ελάχιστου διανύσματος των παραμέτρων $\boldsymbol{\pi}$, είναι απαραίτητο να γίνει και η επιλογή της κατάλληλης τροχιάς, που θα εκτελέσει κάθε άρθρωση του ρομποτικού βραχίονα [12]. Οι τροχιές αυτές προκύπτουν από μία διαδικασία βελτιστοποίησης, η οποία έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση κάποιου μεγέθους, όπως ο αριθμός ευαισθησίας (condition number) του μητρώου \mathbf{Y} , έτσι ώστε να βελτιώνεται ο ρυθμός σύγκλισης της εφαρμοζόμενης μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων και το τελικό αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται σημαντικά από την πιθανή ύπαρξη θορύβου στις μετρήσεις. Ανακεφαλαιώνοντας, στόχος της διαδικασίας εύρεσης βέλτιστων τροχιών αναγνώρισης είναι να σχεδιαστούν κατάλληλες τροχιές (exciting trajectories), έτσι ώστε το μητρώο \mathbf{Y} να έχει μέγιστη τάξη (full rank) και επιπλέον να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο condition number. Η διαδικασία σχεδιασμού της κατάλληλης τροχιάς ξεκινάει με την επιλογή της βασικής αναλυτικής μορφής που θα έχει.

2.2 Τροχιά αναγνώρισης με γενικευμένες σειρές Fourier

Μια αναλυτική μορφή τροχιάς, που προτείνεται από τη βιβλιογραφία, με σκοπό την κατασκευή βέλτιστων τροχιών αναγνώρισης (exciting trajectories), είναι η χρήση γενικευμένων εξισώσεων Fourier [13]. Η τροχιά αυτή θα αναφέρεται στη συνέχεια ως ΤΡΟΧΙΑ 1. Στη συνέχεια φαίνεται η αναλυτική μορφή της επιθυμητής απόκρισης στο χρόνο της γωνιακής θέσης (\mathbf{q}), γωνιακής ταχύτητας ($\dot{\mathbf{q}}$) και γωνιακής επιτάχυνσης ($\ddot{\mathbf{q}}$).

$$q(t) = \sum_{l=1}^m \left(\frac{a_l}{\omega_f l} \sin(\omega_f l t) - \frac{b_l}{\omega_f l} \cos(\omega_f l t) \right) + \sum_{k=0}^5 c_k t^k \quad (2-10)$$

$$\dot{q}(t) = \sum_{l=1}^m (a_l \cos(\omega_f l t) + b_l \sin(\omega_f l t)) + \sum_{k=1}^5 c_k k t^{k-1} \quad (2-11)$$

$$\ddot{q}(t) = \sum_{l=1}^m (-a_l \omega_f l \sin(\omega_f l t) + b_l \omega_f l \cos(\omega_f l t)) + \sum_{k=2}^5 c_k k(k-1) t^{k-2} \quad (2-12)$$

όπου

$$\omega_f = \frac{2\pi}{t_f} \quad (2-13)$$

και a_l οι συντελεστές των όρων \sin , b_l οι συντελεστές των όρων \cos , c_k οι συντελεστές των πολυωνυμικών όρων, l και k οι μετρητές των ημιτονοειδών και πολυωνυμικών αθροισμάτων

αντίστοιχα, t ο χρόνος, t_f η χρονική διάρκεια της τροχιάς και m ο αριθμός των όρων \sin ή \cos , που χρησιμοποιήθηκαν.

Η τροχιά αυτή είναι βασισμένη στις σειρές Fourier, στις οποίες με την προσθήκη ενός πολυωνύμου 5ου βαθμού εξασφαλίζεται ο καθορισμός των αρχικών και τελικών συνθηκών για γωνιακή θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση. Εφαρμόζοντας τις 6 οριακές συνθήκες προκύπτουν οι τιμές των συντελεστών του πολυωνύμου c_k συναρτήσει των a_l και b_l . Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγονται μηδενικές τιμές για τις αρχικές γωνιακές θέσεις, ταχύτητες και επιταχύνσεις.

$$\left\{ \begin{array}{l} q(0)=0 \\ \dot{q}(0)=0 \\ \ddot{q}(0)=0 \\ q(t_f)=0 \\ \dot{q}(t_f)=0 \\ \ddot{q}(t_f)=0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} c_0 = \sum_{l=1}^m \frac{b_l}{\omega_f l} \\ c_1 = -\sum_{l=1}^m a_l \\ c_2 = -\frac{1}{2} \sum_{l=1}^m b_l \omega_f l \\ c_5 = \frac{6}{t_f^5} \sum_{l=1}^m \frac{b_l}{\omega_f l} - \frac{1}{2t_f^3} \sum_{l=1}^m b_l \omega_f l + \frac{3}{t_f^4} \sum_{l=1}^m a_l - \frac{6}{t_f^5} c_0 - \frac{3}{t_f^4} c_1 - \frac{1}{t_f^3} c_2 \\ c_6 = -\frac{1}{t_f^3} \sum_{l=1}^m a_l - \frac{3}{t_f^4} \sum_{l=1}^m \frac{b_l}{\omega_f l} + \frac{3}{t_f^4} c_0 + \frac{2}{t_f^3} c_1 + \frac{1}{t_f^2} c_2 - 2t_f c_5 \\ c_6 = \frac{1}{t_f^3} \sum_{l=1}^m \frac{b_l}{\omega_f l} - \frac{1}{t_f^3} c_0 - \frac{1}{t_f^2} c_1 - \frac{1}{t_f} c_2 - t_f c_4 - t_f^2 c_5 \end{array} \right. \quad (2-14)$$

Οι παράμετροι a_l και b_l αποτελούν τις μεταβλητές σχεδιασμού της τροχιάς και επομένως η εύρεση των τιμών τους που εξασφαλίζουν βέλτιστη τροχιά είναι αντικείμενο της διαδικασίας βελτιστοποίησης που εφαρμόζεται τη συνέχεια. Για αυτή τη μορφή τροχιάς ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού είναι $N_{dv} = 2m$ ανά άρθρωση, ενώ ο αριθμός μεταβλητών σχεδιασμού για ΔΡΣ με ένα βραχίονα με τρεις συνδέσμους (3 βαθμοί ελευθερίας στο βραχίονα) είναι $N_{dv} = 6m$.

2.3 Αναγνώριση παραμέτρων με χρήση της εξίσωσης στροφορμής

Η μέθοδος της αναγνώρισης των δυναμικών παραμέτρων, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.1, έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στην αναγνώριση των χαρακτηριστικών επίγειων ρομποτικών συστημάτων σταθερής βάσης (fixed base) ανοικτής αλυσίδας, όπως στην περίπτωση του ρομποτικού βραχίονα Mitsubishi PA10 [13] [13], αλλά και στην περίπτωση παράλληλων ρομποτικών συστημάτων [14], [15]. Η ίδια μέθοδος έχει εφαρμοστεί και στην αναγνώριση των χαρακτηριστικών ανθρωπομορφικών ρομπότ, όπως στην περίπτωση των HRP-2 και HRP-4 της KAWADA INDUSTRIES με συνολικά 30 βαθμούς ελευθερίας [16]. Όσον αφορά τα διαστημικά ρομποτικά συστήματα, έχουν προταθεί αντίστοιχες μέθοδοι βασισμένοι στις εξισώσεις κίνησης για την αναγνώριση των δυναμικών χαρακτηριστικών [17]. Το βασικό πρόβλημα, σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, είναι ότι η εφαρμοζόμενη μέθοδος αναγνώρισης απαιτεί τη μέτρηση όχι μόνο της γωνιακής θέσης και ταχύτητας των αρθρώσεων (και της γωνιακής ταχύτητας της βάσης αν πρόκειται για σύστημα στο διάστημα) αλλά και των επιταχύνσεων και των ροπών. Το γεγονός αυτό, πέρα από τις επιπλέον πρακτικές δυσκολίες που εισάγει κατά την πειραματική διαδικασία, καθιστά τη μέθοδο

ιδιαίτερα ευαίσθητη στην παρουσία έντονου θορύβου από τις μετρήσεις των επιταχύνσεων και των ροπών.

Για να παρακαμφθεί το παραπάνω ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό της μεθόδου, έχει προταθεί από κάποιους ερευνητές η χρήση της εξίσωσης διατήρησης της στροφορμής έναντι των δυναμικών εξισώσεων για τη δυναμική αναγνώριση μέρους των παραμέτρων ενός ρομποτικού διαστημικού συστήματος. Η προσέγγιση αυτή αφορά, φυσικά, διαστημικά συστήματα σε ελεύθερα αιωρούμενη κατάσταση, καθώς η χρήση του προωθητικού συστήματος έχει ως αποτέλεσμα την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων και επομένως την μη ισχύ της διατήρησης της στροφορμής.

Όπως έχει αποδειχθεί [18] η δυναμική ενός ελεύθερα αιωρούμενου διαστημικού ρομποτικού συστήματος με m βραχίονες, με N_m συνδέσμους ο κάθε ένας, περιγράφεται στο χώρο από τις εξισώσεις:

$${}^0\mathbf{D}(\mathbf{q}){}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 + {}^0\mathbf{D}_q(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}_1({}^0\boldsymbol{\omega}_0, \boldsymbol{\varepsilon}, \eta, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = 0 \quad (2-15)$$

$${}^0\mathbf{D}_q^T(\mathbf{q}){}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 + {}^0\mathbf{D}_{qq}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}_2({}^0\boldsymbol{\omega}_0, \boldsymbol{\varepsilon}, \eta, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2-16)$$

όπου ${}^0\mathbf{D}$, ${}^0\mathbf{D}_q$ και ${}^0\mathbf{D}_{qq}$ μητρώα αδρανειακού τύπου, \mathbf{c}_1 και \mathbf{c}_2 μητρώα που περιέχουν τους όρους των φυγόκεντρων δυνάμεων και των δυνάμεων Coriolis, \mathbf{q} , $\dot{\mathbf{q}}$ και $\ddot{\mathbf{q}}$ η γωνιακή θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση των αρθρώσεων αντίστοιχα, ${}^0\boldsymbol{\omega}_0$ και ${}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}_0$ η γωνιακή ταχύτητα και επιτάχυνση της βάσης αντίστοιχα, $\boldsymbol{\varepsilon}$ και η οι παράμετροι Euler που περιγράφουν τον προσανατολισμό της βάσης και $\boldsymbol{\tau}$ το διάνυσμα των ροπών των κινητήρων των αρθρώσεων.

Λύνοντας την Εξ. (2-15) ως προς ${}^0\dot{\boldsymbol{\omega}}_0$ και αντικαθιστώντας στην Εξ. (2-16) προκύπτει

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}({}^0\boldsymbol{\omega}_0, \boldsymbol{\varepsilon}, \eta, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2-17)$$

όπου

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = {}^0\mathbf{D}_{qq} - {}^0\mathbf{D}_q^T {}^0\mathbf{D}^{-1} {}^0\mathbf{D}_q \quad (2-18)$$

$$\mathbf{c}({}^0\boldsymbol{\omega}_0, \boldsymbol{\varepsilon}, \eta, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{c}_2 - {}^0\mathbf{D}_q^T {}^0\mathbf{D}^{-1} \mathbf{c}_1 \quad (2-19)$$

Για το ίδιο σύστημα η στροφορμή εκφρασμένη ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων είναι

$$\mathbf{h}_{CM} = \mathbf{R}_0(\boldsymbol{\varepsilon}, \eta)({}^0\mathbf{D}^0\boldsymbol{\omega}_0 + {}^0\mathbf{D}_q\dot{\mathbf{q}}) \quad (2-20)$$

όπου \mathbf{h}_{CM} το διάνυσμα της στροφορμής ως προς το κέντρο μάζας του συστήματος και \mathbf{R}_0 το μητρώο στροφής μεταξύ του συστήματος συντεταγμένων της βάσης και του αδρανειακού.

Η Εξ. (2-20) μπορεί να γραφτεί σε μορφή αντίστοιχη της Εξ. (2-2) για τις εξισώσεις κίνησης:

$$\mathbf{h}_{CM} = \mathbf{Y}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}, {}^0\boldsymbol{\omega}_0, \boldsymbol{\varepsilon}, \eta)\boldsymbol{\pi} \quad (2-21)$$

όπου και σε αυτή την περίπτωση $\boldsymbol{\pi}$ είναι το διάνυσμα-στήλη, που περιέχει τις δυναμικές παραμέτρους του συστήματος σε κατάλληλους συνδυασμούς, και \mathbf{Y} μητρώο, που ονομάζεται αναδρομιστής, και μπορεί να προκύψει από μετρήσεις. Θεωρώντας σταθερή στροφορμή $\mathbf{h}_{CM,0}$ και N μετρήσεις των μεταβλητών $\dot{\mathbf{q}}$, \mathbf{q} , ${}^0\boldsymbol{\omega}_0$, $\boldsymbol{\varepsilon}$ και η τις χρονικές στιγμές t_1, \dots, t_N κατά μήκος κατάλληλης τροχιάς, προκύπτει

$$\bar{\mathbf{h}}_{\text{CM}} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{\text{CM},0} \\ \vdots \\ \mathbf{h}_{\text{CM},0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}(t_1) \\ \vdots \\ \mathbf{Y}(t_N) \end{bmatrix} \boldsymbol{\pi} = \bar{\mathbf{Y}}\boldsymbol{\pi} \quad (2-22)$$

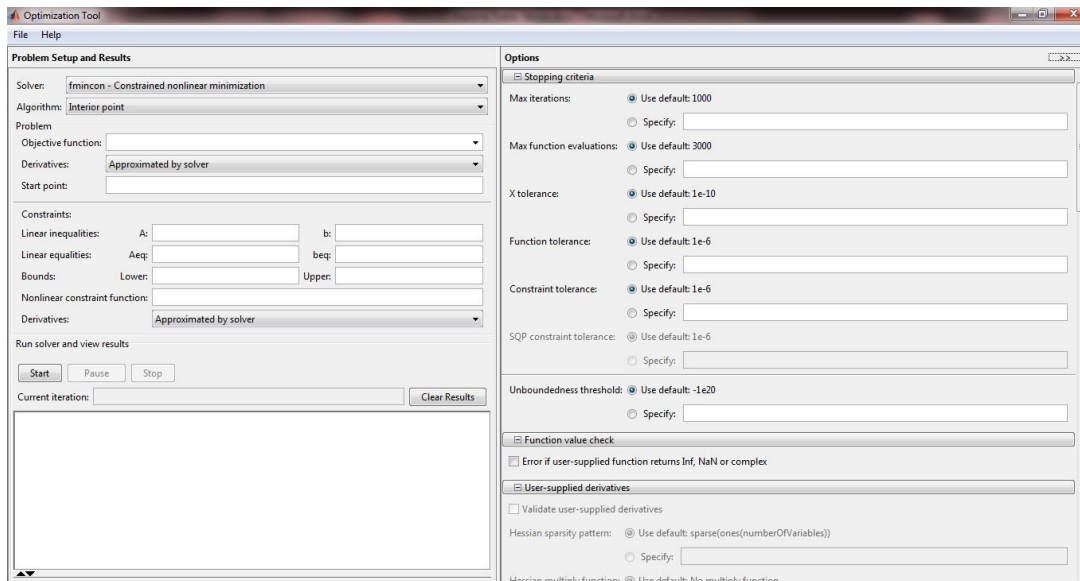
Όπως και στην περίπτωση των εξισώσεων κίνησης, το διάνυσμα $\boldsymbol{\pi}$ μπορεί να υπολογιστεί με χρήση του εξ αριστερών ψευδο-αντίστροφου μητρώου του $\bar{\mathbf{Y}}$.

$$\boldsymbol{\pi} = (\bar{\mathbf{Y}}^T \bar{\mathbf{Y}})^{-1} \bar{\mathbf{Y}}^T \bar{\mathbf{h}}_{\text{CM}} \quad (2-23)$$

Η αναγνώριση δυναμικών παραμέτρων με χρήση της εξίσωσης διατήρησης της στροφορμής έχει βρει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις. Οι Yoshida και Abiko χρησιμοποίησαν το σφάλμα της μετρούμενης τιμής της στροφορμής του σφονδύλου αντίδρασης από την εκτιμώμενη για να υπολογίσουν την απόκλιση των τιμών των πραγματικών παραμέτρων από τις ονομαστικές [19]. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν κατορθώνει να προσδιορίσει το σύνολο των δυναμικών παραμέτρων του συστήματος, αλλά μόνο τις μάζες του βραχίονα και τις ροπές αδράνειας βραχίονα και βάσης. Οι Ma και Dang χρησιμοποίησαν την εξίσωση διατήρησης της στροφορμής για την αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων μόνο της βάσης θεωρώντας γνωστά τα μεγέθη του ρομποτικού βραχίονα και του ωφέλιμου φορτίου [20]. Ο Murotsu και οι συνεργάτες του εφάρμοσαν μέθοδο που αναγνωρίζει μόνο τα χαρακτηριστικά του ωφέλιμου φορτίου γνωρίζοντας τις παραμέτρους της βάσης και του βραχίονα [21], ενώ ο Xu και οι συνεργάτες του συνδύασαν την εξίσωση διατήρησης της στροφορμής με τη δυναμική εξίσωση επιτυγχάνοντας πλήρη δυναμική αναγνώριση επαναφέροντας ωστόσο το πρόβλημα του αυξημένου θορύβου από τις μετρήσεις ροπών και επιταχύνσεων [17]. Τέλος, οι Χρηστίδη, Νάνος και Παπαδόπουλος προτείνουν μία πρωτότυπη μέθοδο αναγνώρισης των δυναμικών παραμέτρων ελεύθερα αιωρούμενου ρομποτικού διαστημικού συστήματος βασισμένη στην εξίσωση διατήρησης της στροφορμής, η οποία καθιστά το σύστημα πλήρως αναγνωρισμένο και δεν απαιτεί την εκ των προτέρων γνώση μέρους των δυναμικών παραμέτρων [22]. Η μέθοδος αυτή θα εφαρμοστεί στη συνέχεια τόσο σε επίπεδο προσομοίωσης όσο και για τον πειραματικό προσδιορισμό των δυναμικών παραμέτρων του ρομπότ του διδιάστατου διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου.

2.4 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης των τροχιών γίνεται με χρήση του Optimization Toolbox του Matlab, το οποίο χρησιμοποιώντας τον επιλύτη που θα υποδείξει ο χρήστης, υπολογίζει το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού που ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν τη δεδομένη αντικειμενική συνάρτηση ικανοποιώντας ταυτόχρονα συγκεκριμένους περιορισμούς. Το γραφικό περιβάλλον (GUI) του Optimization Toolbox, που φαίνεται στο Σχήμα 2-1, επιτρέπει τον έλεγχο πολλών χαρακτηριστικών της διαδικασίας επίλυσης όπως το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων (Max iterations), μέγιστο αριθμό αξιολογήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης (Max function evaluations) και το ελάχιστο σφάλμα-ευαισθησία στον υπολογισμό του διανύσματος των μεταβλητών σχεδιασμού (X tolerance), της αντικειμενικής συνάρτησης (Function tolerance) και των περιορισμών (Constraint tolerance).



Σχήμα 2-1. GUI του Matlab Optimization Toolbox.

Εναλλακτικά του Optimization Toolbox μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εντολή του επιλεγμένου επιλύτη απευθείας από το τερματικό του Matlab, ορίζοντας πάλι τα δεδομένα και τις επιθυμητές παραμέτρους της διαδικασίας επίλυσης. Το Matlab δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε ανάμεσα σε πολλούς διαφορετικούς αλγόριθμους-επιλύτες ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος.

2.5 Ο επιλύτης fminsearch

Μετά από δοκιμές όλων των δυνατών επιλογών, που ανταποκρίνονται στις ανάγκες του προβλήματος εύρεσης βέλτιστων τροχιών για την αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων, επιλέχθηκε ο επιλύτης fminsearch ως ο πιο γρήγορος και αποτελεσματικός, καθώς προέκυψε από δοκιμές ότι εγκλωβίζεται πιο δύσκολα σε τοπικά ελάχιστα. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της επιλογής είναι ότι δεν δίνει τη δυνατότητα ορισμού περιορισμών κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, κάτι το οποίο στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι απαραίτητο αφού πρέπει να τεθούν άνω και κάτω όρια για τις τιμές της γωνιακής θέσης ($q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$), ταχύτητας ($\dot{q}_{\min} \leq \dot{q} \leq \dot{q}_{\max}$) και επιτάχυνσης ($\ddot{q}_{\min} \leq \ddot{q} \leq \ddot{q}_{\max}$) των αρθρώσεων. Το πρόβλημα αυτό παρακάμπτεται εισάγοντας έναν βρόχο *if* στον κώδικα υπολογισμού της αντικειμενικής συνάρτησης, έτσι ώστε κάθε λύση που δεν ικανοποιεί το σύνολο των περιορισμών δίνει τεχνητά μία πολύ μεγάλη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση (penalty value) $f = 10^9$ και επομένως απορρίπτεται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης κατά τη διαδικασία εύρεσης ελάχιστης τιμής της f .

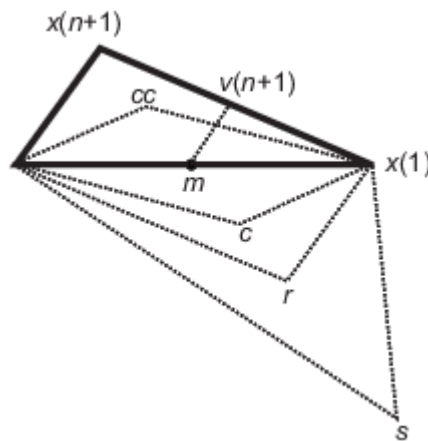
```
elseif max(q1) >= maxq || max(q2) >= maxq || max(q3) >= maxq || min(q1) <= minq || ...
    min(q2) <= minq || min(q3) <= minq || max(q1dot) >= maxqdot || ...
    max(q2dot) >= maxqdot || max(q3dot) >= maxqdot || min(q1dot) <= minqdot...
    || min(q2dot) <= minqdot || min(q3dot) <= minqdot || max(q1dot2) >= ...
    maxqdot2 || max(q2dot2) >= maxqdot2 || max(q3dot2) >= maxqdot2 || ...
    min(q1dot2) <= minqdot2 || min(q2dot2) <= minqdot2 || ...
```

```
min(q3dot2)<=minqdot2
```

```
f=1.e9;
```

```
else
```

Αντίστοιχο κομμάτι κώδικα εισάγεται και στον κώδικα της αντικειμενικής συνάρτησης για το διδιάστατο πρόβλημα με δύο βαθμούς ελευθερίας. Ως αρχικό σημείο (start point) \mathbf{x}_0 χρησιμοποιείται το τυχαίο διάνυσμα $\text{rand}(1,n)$, με τον κατάλληλο αριθμό στηλών n για κάθε περίπτωση, πολλαπλασιαζόμενο με κατάλληλο συντελεστή, ο οποίος προσδιορίζεται με δοκιμές, έτσι ώστε η αρχική λύση να βρίσκεται εντός των περιορισμών που έχουν τεθεί ($f \neq 10^9$). Σε αντίθετη περίπτωση ο αλγόριθμος εγκλωβίζεται στην τιμή $f = 10^9$ και τερματίζει μετά από λίγες επαναλήψεις, χωρίς να έχει προκύψει ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.



Σχήμα 2-2. Fminsearch simplex.

Η συνάρτηση `fminsearch` χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Nelder-Mead simplex. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί ένα simplex $n+1$ σημείων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2, για ένα n -διάστατο διάνυσμα \mathbf{x} . Αρχικά, ο αλγόριθμος φτιάχνει ένα simplex γύρω από την αρχική εκτίμηση, δηλαδή το διάνυσμα \mathbf{x}_0 , προσθέτοντας το 5% κάθε στοιχείου $\mathbf{x}_0(i)$ στο \mathbf{x}_0 , και στη συνέχεια χρησιμοποιεί αυτά τα διανύσματα ως στοιχεία του simplex μαζί με το αρχικό διάνυσμα \mathbf{x}_0 . Στην περίπτωση που $\mathbf{x}_0(i) = 0$ ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί την τιμή 0,00025 ως το i -στοιχείο. Έπειτα, ο αλγόριθμος τροποποιεί επαναληπτικά το simplex ακολουθώντας κατάλληλα βήματα μέχρι τον τερματισμό της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

3 Αναγνώριση παραμέτρων για το τριδιάστατο πρόβλημα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται θεωρητικά η αναγνώριση δυναμικών παραμέτρων ενός τριδιάστατου διαστημικού ρομποτικού συστήματος με ένα βραχίονα και τρεις συνδέσμους με βάση την αρχή διατήρησης της στροφορμής. Εισάγονται δύο νέες μορφές τροχιών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησής τους. Επιπλέον, εισάγεται και μία τρίτη τροχιά, η οποία δεν απαιτεί διαδικασία βελτιστοποίησης, για σύγκριση με τις άλλες δύο. Γίνεται αναφορά στη μοντελοποίηση του θορύβου από την παλμογεννήτρια (encoder) κάθε κινητήρα και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της αναγνώρισης με και χωρίς θόρυβο μέτρησης.

3.1 Τροχιά αναγνώρισης με συναρτήσεις Gauss

Παρατηρώντας τη μορφή των βέλτιστων τροχιών όπως προκύπτουν από τη διαδικασία εύρεσης των συντελεστών της ΤΡΟΧΙΑΣ 1 που ελαχιστοποιούν το condition number, προτείνεται μία εναλλακτική τροχιά βασισμένη στη συνάρτηση Gauss, η οποία στη συνέχεια θα αναφέρεται ως ΤΡΟΧΙΑ 2.

$$q(t) = \sum_{l=1}^m 4\sigma^4 \alpha_l e^{-\frac{(t-\beta_l)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-1)$$

$$\dot{q}(t) = -\sum_{l=1}^m 4\sigma^2 (t-\beta_l) \alpha_l e^{-\frac{(t-\beta_l)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-2)$$

$$\ddot{q}(t) = -\sum_{l=1}^m 4\sigma^2 \alpha_l e^{-\frac{(t-\beta_l)^2}{2\sigma^2}} + \sum_{l=1}^m 4(t-\beta_l)^2 \alpha_l e^{-\frac{(t-\beta_l)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-3)$$

όπου α_l και β_l οι συντελεστές της συνάρτησης Gauss, σ η τυπική απόκλιση της συνάρτησης Gauss, l ο μετρητής του αθροίσματος, t ο χρόνος και m ο αριθμός των συναρτήσεων Gauss, που χρησιμοποιήθηκαν.

Με σκοπό να αποφευχθεί η συγκέντρωση όλων των κορυφών την ίδια χρονική στιγμή και επομένως για να υφίστανται έντονες μεταβολές σε όλη τη διάρκεια του πειράματος ορίζουμε ως μεταβλητή σχεδιασμού τον χρόνο της πρώτης κορυφής και για τις υπόλοιπες μεταβλητές ισχύει

$$\beta_l = \beta_1 + 6(l-1)\sigma \quad \text{για } l \geq 2 \quad (3-4)$$

με

$$\sigma = \frac{t_f - 3}{6(m-1)} \quad (3-5)$$

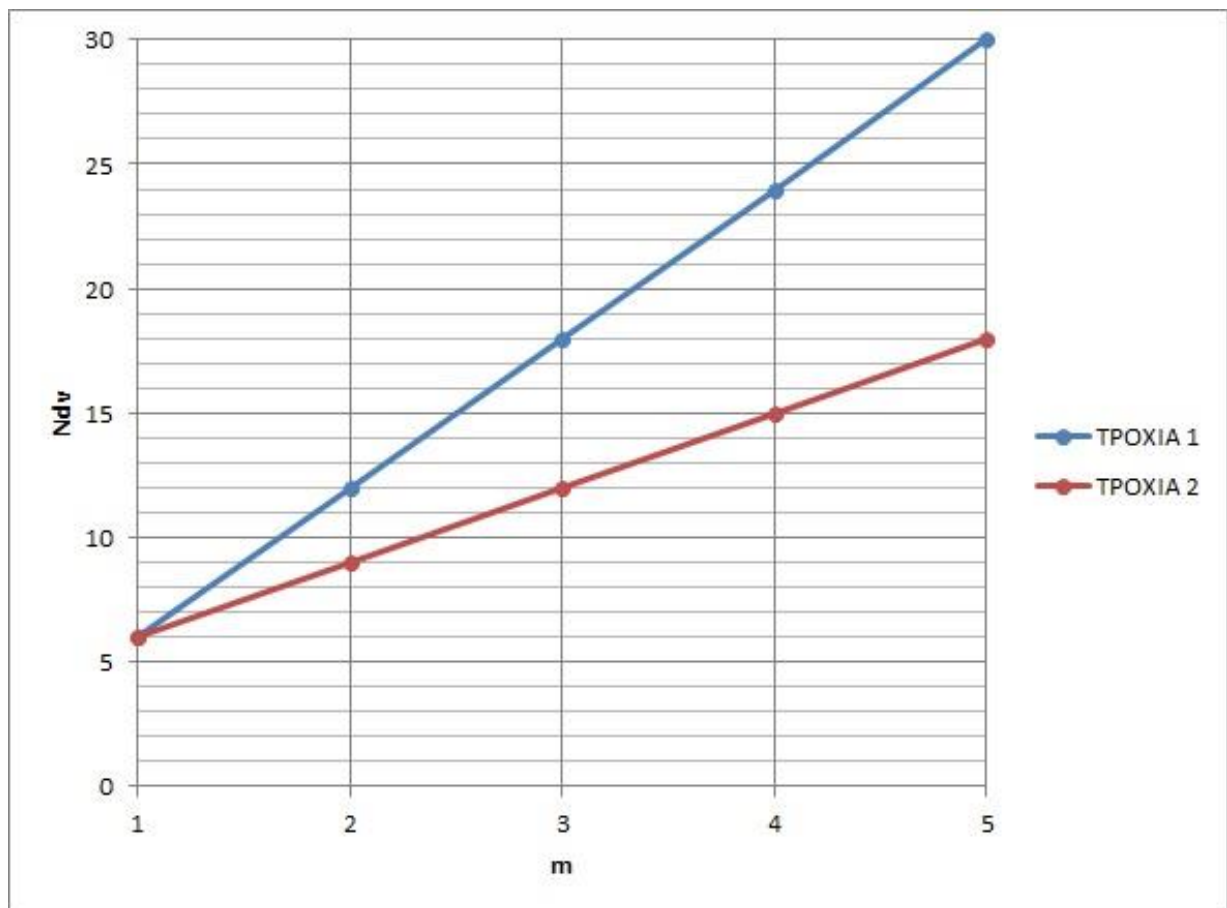
όπου t_f η χρονική διάρκεια του πειράματος.

Οι παράμετροι α_l και β_l αποτελούν τις μεταβλητές σχεδιασμού της τροχιάς και επομένως η εύρεση των τιμών τους που εξασφαλίζουν βέλτιστη τροχιά είναι αντικείμενο της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ο αριθμός μεταβλητών σχεδιασμού για μία τροχιά είναι $N_{dv} = m + 1$, ενώ ο αριθμός μεταβλητών σχεδιασμού για ΔΡΣ με ένα βραχίονα με τρεις συνδέσμους (3 βαθμοί ελευθερίας στο

βραχίονα) είναι $N_{dv} = 3(m+1)$. Το βασικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης τροχιάς (ΤΡΟΧΙΑ 2) σε σχέση με την υπάρχουσα στη βιβλιογραφία τροχιά (ΤΡΟΧΙΑ 1) είναι ότι εξασφαλίζει εξίσου χαμηλό condition number, που είναι και ο στόχος της διαδικασίας εύρεσης βέλτιστης τροχιάς, χρησιμοποιώντας σημαντικά μικρότερο αριθμό μεταβλητών σχεδιασμού και επομένως μειώνοντας σημαντικά το υπολογιστικό κόστος και τη χρονική διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού (N_{dv}) συναρτήσει των όρων του αθροίσματος (m) για τις δύο τροχιές φαίνεται στον Πίνακα 3-1 και στο Σχήμα 3-1.

Πίνακας 3-1. Σύγκριση ΤΡΟΧΙΑΣ 1 και 2 ως προς τον αριθμό των παραμέτρων.

m	N_{dv} ΤΡΟΧΙΑ 1	N_{dv} ΤΡΟΧΙΑ 2
1	6	6
2	12	9
3	18	12
4	24	15
5	30	18



Σχήμα 3-1. Σύγκριση ΤΡΟΧΙΑΣ 1 και 2 ως προς τον αριθμό των παραμέτρων.

3.2 Αναλυτική μορφή του διανύσματος των παραμέτρων για το τριδιάστατο σύστημα

Αποδεικνύεται [22] ότι η αναλυτική μορφή των στοιχείων του διανύσματος των παραμέτρων π για διαστημικό ρομποτικό σύστημα με ένα βραχίονα και τρεις συνδέσμους στο χώρο συναρτήσε των παραμέτρων του ρομπότ είναι:

$$\pi_1 = I_{0x} + I_{1y} + A(r_{0y}^2 + r_{0z}^2 + 2r_{0z}l_1 + l_1^2)(2Br_1(r_{0z} + l_1) + Gr_1^2) \quad (3-6)$$

$$\pi_2 = -Ar_{0x}r_{0y} \quad (3-7)$$

$$\pi_3 = -(Ar_{0x}(r_{0z} + l_1) + Br_{0x}r_1) \quad (3-8)$$

$$\pi_4 = I_{0y} + I_{1y} + A(r_{0x}^2 + r_{0z}^2 + 2r_{0z}l_1 + l_1^2)(2Br_1(r_{0z} + l_1) + Gr_1^2) \quad (3-9)$$

$$\pi_5 = -(Ar_{0y}(r_{0z} + l_1) + Br_{0y}r_1) \quad (3-10)$$

$$\pi_6 = I_{0z} + A(r_{0x}^2 + r_{0y}^2) \quad (3-11)$$

$$\pi_7 = I_{1x} - I_{1y} + I_{2y} + I_{3y} + Gl_2^2 + D(l_3^2 + r_2^2) + 2El_2r_2 \quad (3-12)$$

$$\pi_8 = I_{1z} + I_{2y} + I_{3y} + Gl_2^2 + D(l_3^2 + r_2^2) + 2El_2r_2 \quad (3-13)$$

$$\pi_9 = I_{2x} - I_{2y} - (Gl_2^2 + Dr_2^2 + 2El_2r_2) \quad (3-14)$$

$$\pi_{10} = I_{2z} + Gl_2^2 + Dr_2^2 + 2El_2r_2 \quad (3-15)$$

$$\pi_{11} = I_{3x} - I_{3y} - Dl_3^2 \quad (3-16)$$

$$\pi_{12} = I_{3z} + Dl_3^2 \quad (3-17)$$

$$\pi_{13} = r_{0y}(Bl_2 + Fr_2) \quad (3-18)$$

$$\pi_{14} = Bl_2(r_{0z} + l_1) + Gl_2r_1 + Er_1r_2 + Fr_2(r_{0z} + l_1) \quad (3-19)$$

$$\pi_{15} = r_{0x}(Bl_2 + Fr_2) \quad (3-20)$$

$$\pi_{16} = Fl_3r_{0y} \quad (3-21)$$

$$\pi_{17} = El_3r_1 + Fl_3(r_{0z} + l_1) \quad (3-22)$$

$$\pi_{18} = Fl_3r_{0x} \quad (3-23)$$

$$\pi_{19} = Dl_3r_2 + El_2l_3 \quad (3-24)$$

όπου

$$A = \frac{m_0(m_1 + m_2 + m_3)}{M} \quad (3-25)$$

$$B = \frac{m_0(m_2 + m_3)}{M} \quad (3-26)$$

$$G = \frac{(m_0 + m_1)(m_2 + m_3)}{M} \quad (3-27)$$

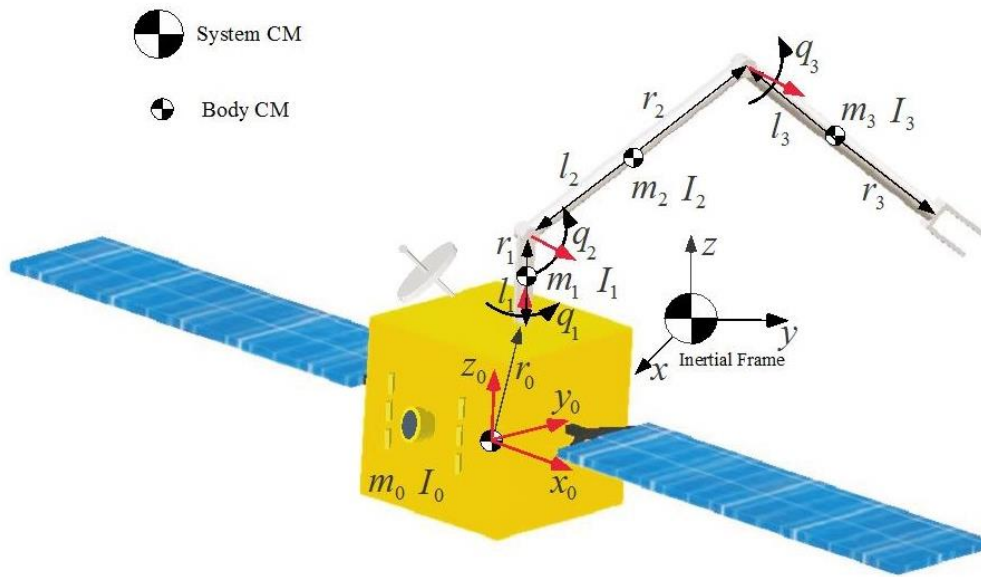
$$D = \frac{m_3(m_0 + m_1 + m_2)}{M} \quad (3-28)$$

$$E = \frac{m_3(m_0 + m_1)}{M} \quad (3-29)$$

$$F = \frac{m_0 m_3}{M} \quad (3-30)$$

$$M = m_0 + m_1 + m_2 + m_3 \quad (3-31)$$

Στο Σχήμα 3-2, που ακολουθεί, φαίνεται ένα τριδιάστατο ΔΡΣ με ένα βραχίονα και τρεις συνδέσμους με τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος.



Σχήμα 3-2. Χαρακτηριστικά μεγέθη τριδιάστατου ΔΡΣ με ένα βραχίονα και τρεις συνδέσμους.

Οι τιμές των στοιχείων του διανύσματος π προκύπτουν θεωρώντας ένα ιδεατό τριδιάστατο ρομπότ, του οποίου τα χαρακτηριστικά μεγέθη φαίνονται στον Πίνακα 3-2. Οι τιμές αυτές θα πρέπει να προσδιοριστούν κατά την προσομοίωση του πειράματος της αναγνώρισης των παραμέτρων του συστήματος.

Πίνακας 3-2. Τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του συστήματος.

m_0 (kg)	2.000
m_1 (kg)	10
m_2 (kg)	50
m_3 (kg)	50
I_{x0} (kg m ²)	1.500
I_{x1} (kg m ²)	0,21
I_{x2} (kg m ²)	0,05
I_{x3} (kg m ²)	0,05
I_{y0} (kg m ²)	1.500
I_{y1} (kg m ²)	0,21
I_{y2} (kg m ²)	16,69

I_{y3} (kg m ²)	16,69
I_{z0} (kg m ²)	1.500
I_{z1} (kg m ²)	0,01
I_{z2} (kg m ²)	16,69
I_{z3} (kg m ²)	16,69
r_{0x} (m)	0,1
r_{0y} (m)	0,2
r_{0z} (m)	1
r_1 (m)	0,25
r_2 (m)	1
l_1 (m)	0,25
l_2 (m)	1
l_3 (m)	1

3.3 Περιγραφή προσομοίωσης για το τριδιάστατο πρόβλημα

Η αναζήτηση της βέλτιστης τροχιάς για την αναγνώριση παραμέτρων και για τα δύο είδη τροχιών (TPOXIA 1 και 2) γίνεται για χρόνο πειράματος $t_f = 5, 10, \dots, 60$ s και για αριθμό όρων (ζευγάρια όρων \cos και \sin για την TPOXIA 1 και συναρτήσεων Gauss για την TPOXIA 2) στην τροχιά κάθε άρθρωσης $l_n = 1, 2, \dots, 5$. Στην προσομοίωση του πειράματος εφαρμόζεται ένας απλός ελεγκτής θέσης PD σε κάθε μία από τις αρθρώσεις του βραχίονα. Οι τιμές των κερδών \mathbf{K}_p και \mathbf{K}_d προκύπτουν βάσει των επιθυμητών χαρακτηριστικών που ορίζονται για την απόκριση του συστήματος, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια [23].

Αρχικά ορίζεται ο χρόνος αποκατάστασης t_s ως κάποιο ποσοστό του χρόνου πειράματος t_f

$$t_s = 0.2t_f \quad (3-32)$$

οπότε

$$\omega_n = \frac{6}{t_s} \quad (3-33)$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το μητρώο αδράνειας \mathbf{H} του ρομπότ και μία αντιπροσωπευτική θέση του βραχίονα (normal configuration) υπολογίζονται τα στοιχεία των μητρώων των κερδών k_{pi} και k_{di}

$$k_{pi} = \mathbf{H}(i, i)\omega_n^2 \quad (3-34)$$

$$k_{di} = 2\omega_n\mathbf{H}(i, i) \quad (3-35)$$

Τελικά τα μητρώα των κερδών για διαστημικό ρομποτικό σύστημα με ένα βραχίονα και τρεις συνδέσμους είναι:

$$\mathbf{K}_p = \begin{bmatrix} k_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{p2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{p3} \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

και

$$\mathbf{K}_D = \begin{bmatrix} k_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{d3} \end{bmatrix} \quad (3-37)$$

Για το τριδιάστατο πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης τροχιάς τα κέρδη που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση για κάθε χρόνο πειράματος φαίνονται στον Πίνακα 3-3.

Πίνακας 3-3. Κέρδη προσομοίωσης συναρτήσει της διάρκειας του πειράματος.

t_f (s)	k_{p1}	k_{p2}	k_{p3}	k_{d1}	k_{d2}	k_{d3}
5	12.629,795	14.013,498	1.918,878	4.209,932	4.671,166	639,626
10	3.157,449	3.503,375	479,719	2.104,966	2.335,583	319,813
15	1.403,311	1.557,055	213,209	1.403,311	1.557,055	213,209
20	789,362	875,844	119,930	1.052,483	1.167,792	159,906
25	505,192	560,540	76,755	841,986	934,233	127,925
30	350,828	389,264	53,302	701,655	778,528	106,604
40	197,341	218,961	29,982	526,241	583,896	79,953
50	126,298	140,135	19,189	420,993	467,117	63,963
60	87,707	97,316	13,326	350,828	389,264	53,302

Τέλος, τίθενται τα άνω και κάτω όρια στις τιμές των γωνιακών θέσεων ($\max q$, $\min q$), ταχυτήτων ($\max \dot{q}$, $\min \dot{q}$) και επιταχύνσεων ($\max \ddot{q}$, $\min \ddot{q}$) των αρθρώσεων του βραχίονα, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3-4.

Πίνακας 3-4. Περιορισμοί αρθρώσεων για το τριδιάστατο πρόβλημα.

$\max q$	$\min q$	$\max \dot{q}$	$\min \dot{q}$	$\max \ddot{q}$	$\min \ddot{q}$
2 rad	-2 rad	1,5 rad/s	-1,5 rad/s	10 rad/s ²	-10 rad/s ²
114,6 deg	-114,6 deg	85,9 deg/s	-85,9 deg/s	573,0 deg/s ²	-573,0 deg/s ²

3.4 Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 1

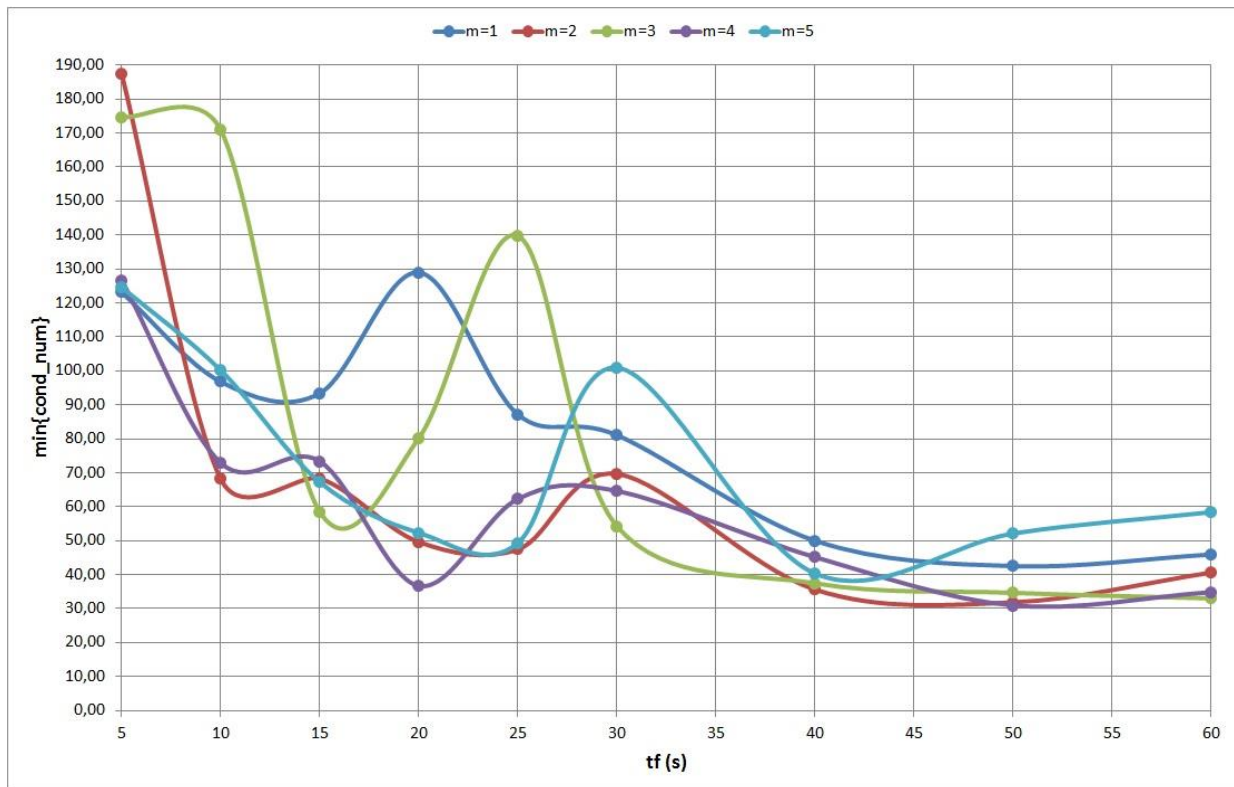
Αρχικά, εφαρμόζεται η διαδικασία εύρεσης βέλτιστης τροχιάς αναγνώρισης στην περίπτωση που η αναλυτική μορφή της τροχιάς βασίζεται σε γενικευμένες σειρές Fourier (ΤΡΟΧΙΑ 1). Εκτός από την εύρεση των συντελεστών εκείνης της τροχιάς που ελαχιστοποιεί το βαθμό ευαισθησίας (condition number) του μητρώου \mathbf{Y} ($\min\{\text{cond_num}\}$), μας ενδιαφέρει να συγκρίνουμε τα δύο είδη τροχιών που εξετάζονται και ως προς τον χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Για το λόγο αυτό, καταγράφεται για κάθε περίπτωση, δηλαδή για κάθε διαφορετικό συνδυασμό αριθμού όρων αθροίσματος της τροχιάς (m) και χρόνου πειράματος (t_f), ο αριθμός των φορών που κλήθηκε η αντικειμενική συνάρτηση από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης (F-count) και ο φυσικός χρόνος σε δευτερόλεπτα, που απαιτείται για μία επανάληψη (Time). Πολλαπλασιάζοντας τα δύο αυτά μεγέθη προκύπτει ο συνολικός χρόνος (Total Time), που χρειάστηκε για την εύρεση της βέλτιστης τροχιάς σε κάθε περίπτωση, και από εκεί αθροίζοντας προκύπτει ο συνολικός χρόνος για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Στον Πίνακα 3-5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης για την ΤΡΟΧΙΑ 1, τα οποία φαίνονται και γραφικά στο Σχήμα 3-2.

Πίνακας 3-5. Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 1.

m	t_i (s)	min{cond_num}	F-count	Time (s)	Total Time (s)
1	5	123,13	458	1,598	731,889
1	10	96,80	549	1,439	790,055
1	15	93,40	716	1,520	1088,586
1	20	128,97	1237	1,944	2404,159
1	25	87,16	1326	1,691	2241,773
1	30	81,07	627	1,293	810,983
1	40	49,99	1337	1,521	2033,973
1	50	42,51	523	1,198	626,534
1	60	45,96	386	1,404	542,129
2	5	187,50	786	1,478	1161,449
2	10	68,16	665	1,533	1019,582
2	15	68,30	915	1,581	1446,555
2	20	49,64	883	1,728	1526,256
2	25	47,43	895	1,618	1447,826
2	30	69,65	850	1,459	1239,996
2	40	35,60	1051	1,490	1565,579
2	50	31,86	662	1,597	1057,531
2	60	40,64	1806	1,705	3078,695
3	5	174,74	610	1,482	904,186
3	10	170,91	563	1,392	783,682
3	15	58,48	581	1,570	911,980
3	20	80,19	523	1,601	837,260
3	25	139,75	1197	1,558	1864,786
3	30	54,22	1006	1,426	1434,456
3	40	37,45	1571	1,749	2747,307
3	50	34,64	408	1,588	647,903
3	60	33,01	367	1,557	571,284
4	5	126,64	1528	1,388	2121,494
4	10	72,92	792	1,646	1303,412
4	15	73,38	905	1,652	1494,980
4	20	36,71	920	1,568	1442,690
4	25	62,30	626	1,405	879,284
4	30	64,63	1810	1,500	2715,303
4	40	45,17	1486	1,849	2747,103
4	50	30,95	979	1,612	1578,396
4	60	34,86	1145	1,526	1747,545
5	5	124,65	780	1,691	1319,192
5	10	100,18	862	1,555	1340,379
5	15	67,24	612	1,722	1053,817
5	20	52,33	1153	1,689	1947,403
5	25	49,34	2073	1,571	3257,719
5	30	100,95	1349	1,496	2017,899

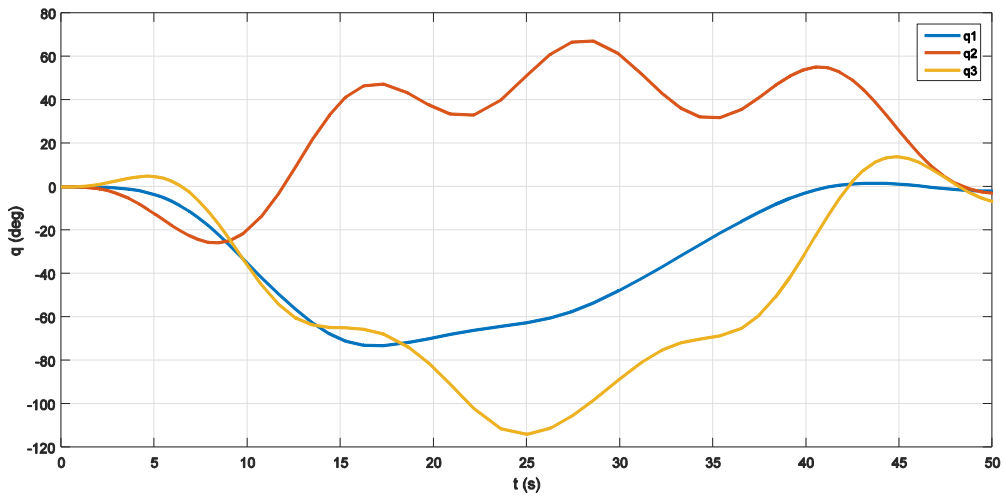
5	40	40,34	1515	1,405	2129,129
5	50	52,12	635	1,504	955,333
5	60	58,40	915	1,643	1503,117

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω δεδομένα η βέλτιστη τροχιά προκύπτει για $m=4$, χρόνο πειράματος $t_f = 50s$ και έχει ελάχιστο αριθμό ευαισθησίας $\min\{cond_num\} = 30,95$. Ο συνολικός χρόνος για την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης για την ΤΡΟΧΙΑ 1 είναι 67070,6 s ή 18,631 hours, ενώ ο μέσος όρος ελάχιστου βαθμού ευαισθησίας ($AVERAGE(\min\{cond_num\})$) όλων των περιπτώσεων είναι 73,87.

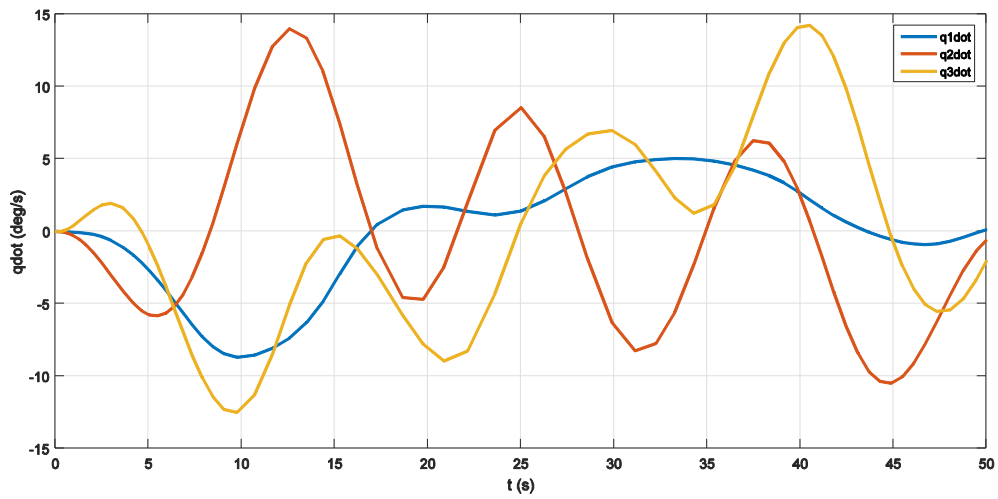


Σχήμα 3-3. Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 1.

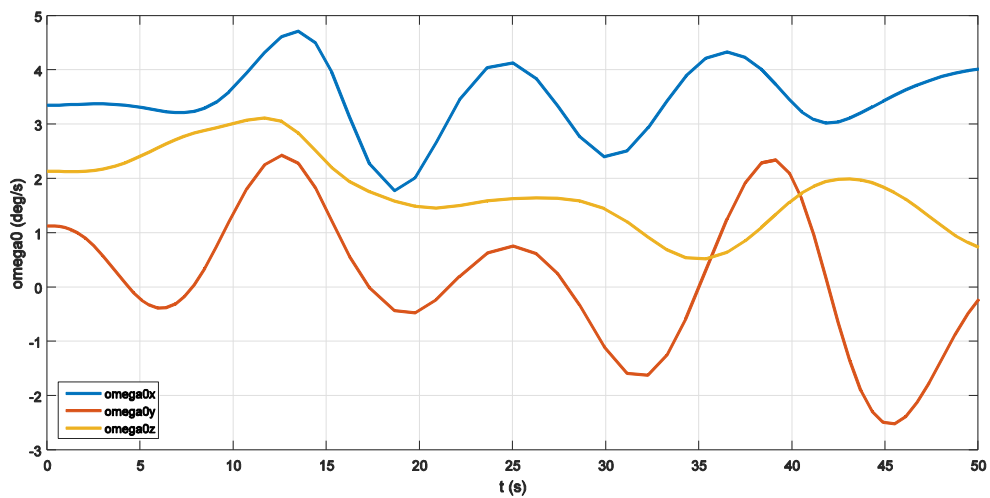
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται γραφικά οι χρονικές αποκρίσεις των γωνιακών θέσεων (Σχήμα 3-3) και ταχυτήτων (Σχήμα 3-4) των αρθρώσεων και οι τρεις συνιστώσες της γωνιακής ταχύτητας της βάσης του ρομπότ (Σχήμα 3-5) για τη βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.



Σχήμα 3-4. Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.



Σχήμα 3-5. Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.



Σχήμα 3-6. Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.

3.5 Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 2

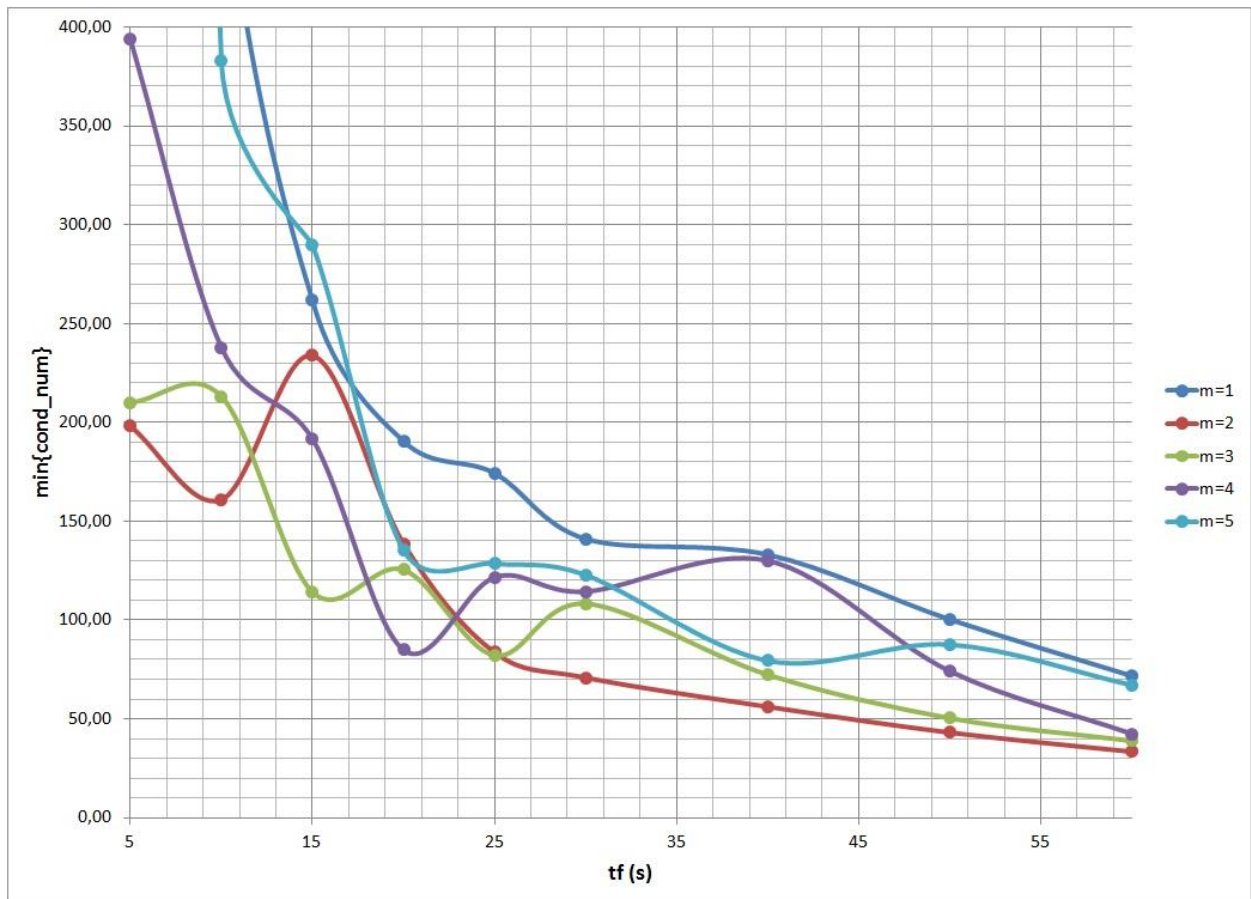
Η ίδια διαδικασία βελτιστοποίησης, που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 1, επαναλαμβάνεται και για την ΤΡΟΧΙΑ 2. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής φαίνονται στον Πίνακα 3-6 και παρουσιάζονται και γραφικά στο Σχήμα 3-6.

Πίνακας 3-6. Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 2.

m	t _f (s)	min{cond_num}	F-count	Time (s)	Total Time (s)
1	5	5.137,91	1095	1,270	1390,812
1	10	530,69	812	1,071	869,370
1	15	261,71	496	1,003	497,734
1	20	190,51	540	1,025	553,633
1	25	174,27	248	1,157	286,891
1	30	141,05	642	1,206	773,973
1	40	133,10	267	1,267	338,208
1	50	100,30	255	1,259	321,005
1	60	71,71	368	0,852	313,381
2	5	198,06	1030	1,079	1111,437
2	10	160,89	935	1,375	1285,343
2	15	233,79	343	0,958	328,510
2	20	138,63	375	1,440	540,134
2	25	83,63	304	1,564	475,410
2	30	70,84	437	1,367	597,491
2	40	56,13	497	1,364	677,873
2	50	43,08	332	1,438	477,405
2	60	33,38	207	1,424	294,728
3	5	210,10	794	1,410	1119,411
3	10	213,09	1184	1,395	1651,538
3	15	114,17	348	0,925	321,729
3	20	125,40	824	1,471	1212,218
3	25	82,08	543	1,365	741,199
3	30	108,29	1349	1,228	1655,934
3	40	72,35	531	1,394	740,293
3	50	50,35	699	1,607	1123,507
3	60	38,88	405	1,242	503,120
4	5	393,67	1746	1,254	2190,353
4	10	237,87	462	1,275	589,023
4	15	191,59	732	1,338	979,077
4	20	84,84	1361	1,392	1894,649
4	25	121,63	579	1,440	833,673
4	30	114,38	604	1,436	867,413
4	40	130,04	199	1,398	278,148
4	50	74,15	931	1,583	1473,922
4	60	42,43	521	1,288	670,966
5	5	2525,70	1370	1,295	1773,879

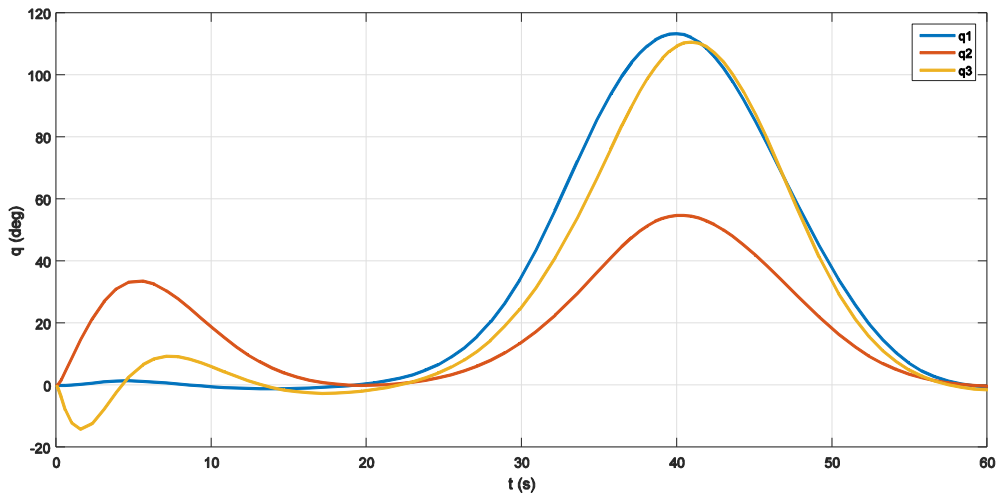
5	10	382,93	321	1,275	409,256
5	15	289,79	249	1,009	251,231
5	20	135,22	778	1,405	1093,441
5	25	128,65	1198	1,497	1793,853
5	30	122,78	1039	1,514	1573,563
5	40	79,41	670	1,409	943,722
5	50	87,57	306	1,517	464,079
5	60	67,05	446	0,992	442,249

Από τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται ότι η βέλτιστη τροχιά προκύπτει για $m=2$, χρόνο πειράματος $t_f = 60s$ και έχει ελάχιστο αριθμό ευαισθησίας $\min\{cond_num\} = 33,38$. Ο συνολικός χρόνος για την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης για την ΤΡΟΧΙΑ 2 είναι 38724,8 s ή 10,757 hours, ενώ ο μέσος όρος ελάχιστου βαθμού ευαισθησίας (AVERAGE($\min\{cond_num\}$)) όλων των περιπτώσεων είναι 310,76.

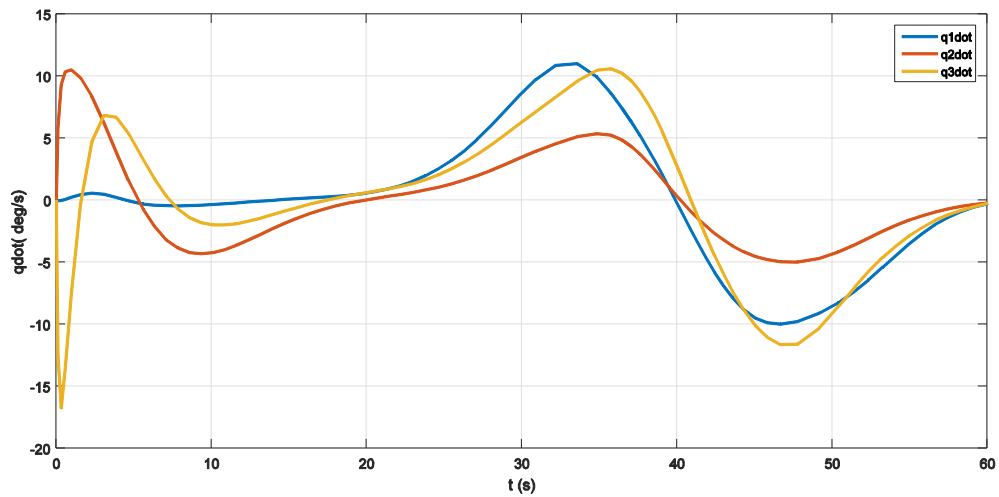


Σχήμα 3-7. Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 2.

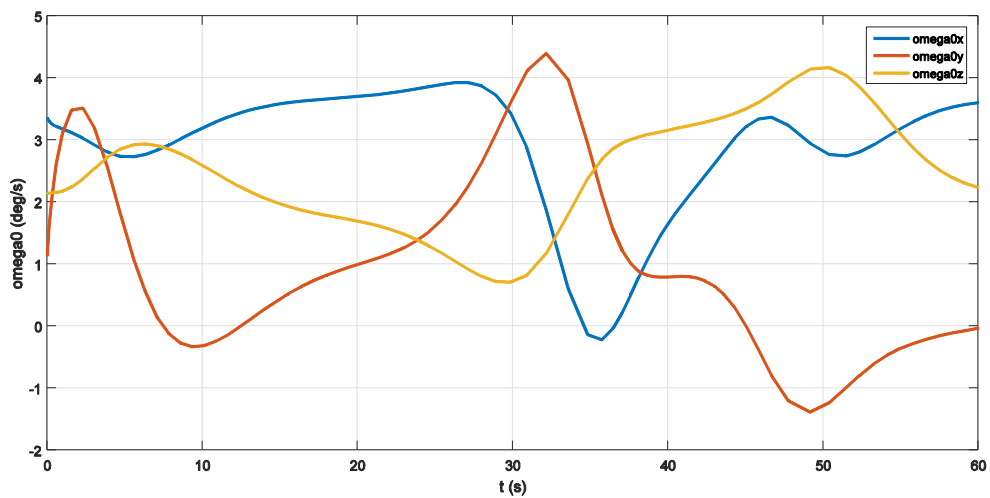
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται γραφικά οι χρονικές αποκρίσεις των γωνιακών θέσεων (Σχήμα 3-7) και ταχυτήτων (Σχήμα 3-8) των αρθρώσεων και οι τρεις συνιστώσες της γωνιακής ταχύτητας της βάσης του ρομπότ (Σχήμα 3-9) για τη βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.



Σχήμα 3-8. Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.



Σχήμα 3-9. Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.



Σχήμα 3-10. Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.

3.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης αναγνώρισης παραμέτρων

Έχοντας επιλέξει τις δύο βέλτιστες τροχιές, δηλαδή εκείνες τις τροχιές που έχουν τον ελάχιστο αριθμό ευαισθησίας για κάθε είδος τροχιάς, θα ελέγξουμε στη συνέχεια κατά πόσο μπορούν να αναγνωρίσουν το υπό μελέτη σύστημα ικανοποιητικά. Για το λόγο αυτό, συγκρίνονται οι τιμές των στοιχείων του διανύσματος των παραμέτρων (π) όπως προκύπτουν από την προσομοίωση του πειράματος της αναγνώρισης με τις αντίστοιχες θεωρητικές, όπως ορίστηκαν στη μοντελοποίηση του συστήματος. Για τη σύγκριση αυτή υπολογίζονται το σχετικό σφάλμα

$$error_rel = \frac{|\pi_{i,αναγνώριση} - \pi_{i,θεωρητικό}|}{\pi_{i,αναγνώριση}} \quad (3-38)$$

και το απόλυτο σφάλμα

$$error_abs = |\pi_{i,αναγνώριση} - \pi_{i,θεωρητικό}| \quad (3-39)$$

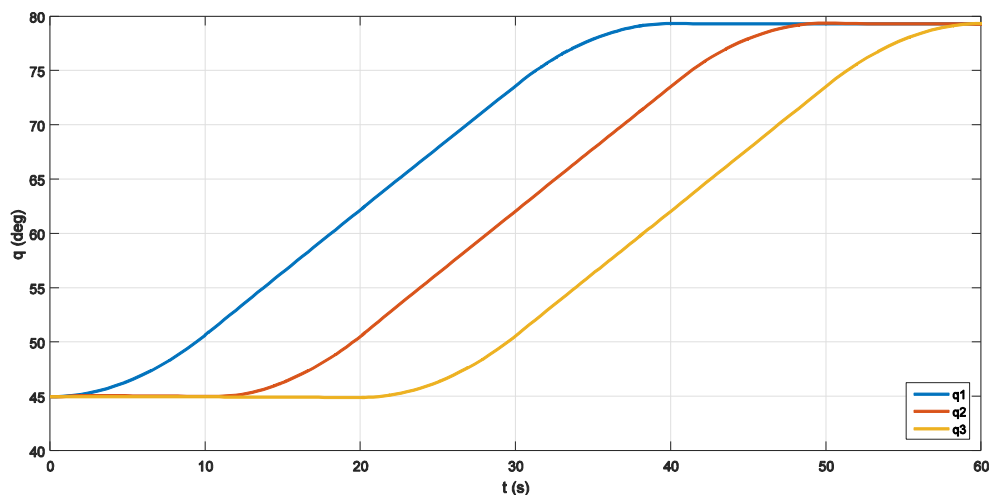
για κάθε στοιχείο του διανύσματος των παραμέτρων, καθώς και η μέση τετραγωνική ρίζα (rms) των σφαλμάτων αυτών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-7.

Πίνακας 3-7. Αποτελέσματα προσομοίωσης αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 1 & 2.

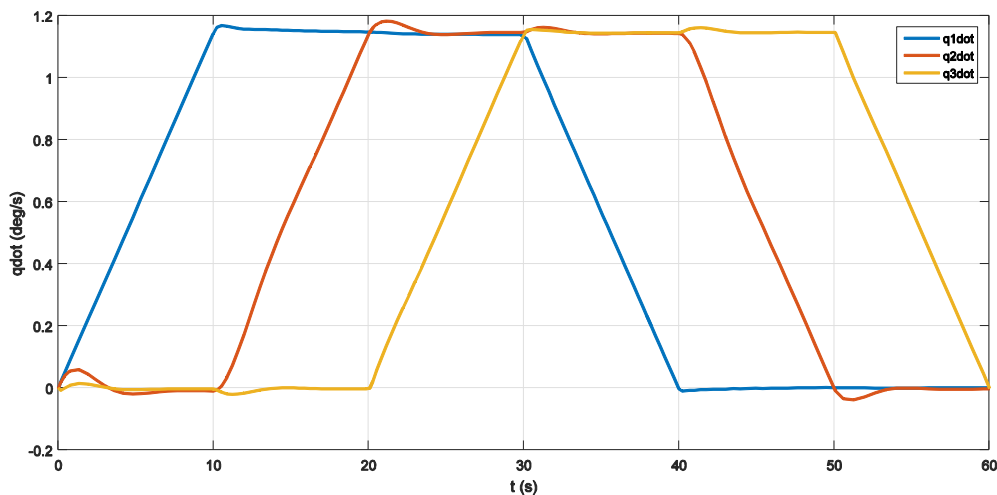
	θεωρητικό	ΤΡΟΧΙΑ 1			ΤΡΟΧΙΑ 2		
		αναγνώριση	error_rel	error_abs	αναγνώριση	error_rel	error_abs
π1	1732,49	1.732,49	3,82E-07	6,62E-04	1732,49	1,71E-07	2,96E-04
π2	-2,09	-2,09	-2,18E-04	4,55E-04	-2,09	-2,67E-05	5,56E-05
π3	-15,40	-15,40	-2,48E-05	3,83E-04	-15,40	-1,07E-05	1,64E-04
π4	1729,36	1.729,36	9,73E-07	1,68E-03	1729,36	2,39E-07	4,13E-04
π5	-30,81	-30,81	-2,60E-06	8,01E-05	-30,81	-5,58E-06	1,72E-04
π6	1505,21	1.505,21	4,15E-07	6,24E-04	1505,21	1,89E-07	2,85E-04
π7	321,53	321,53	8,94E-08	2,87E-05	321,53	1,43E-07	4,61E-05
π8	321,54	321,54	1,26E-07	4,05E-05	321,54	1,84E-07	5,92E-05
π9	-255,98	-255,98	-1,70E-07	4,35E-05	-255,98	-5,02E-08	1,28E-05
π10	256,03	256,03	5,88E-07	1,51E-04	256,03	4,72E-09	1,21E-06
π11	-65,46	-65,46	-1,03E-07	6,71E-06	-65,46	-8,07E-07	5,28E-05
π12	65,51	65,51	1,57E-06	1,03E-04	65,51	4,50E-07	2,95E-05
π13	28,44	28,44	4,61E-06	1,31E-04	28,44	1,10E-06	3,13E-05
π14	213,45	213,45	3,32E-07	7,09E-05	213,45	3,42E-07	7,30E-05
π15	14,22	14,218057	3,33E-06	4,74E-05	14,22	6,47E-06	9,20E-05
π16	9,48	9,48	8,40E-06	7,96E-05	9,48	1,14E-06	1,08E-05
π17	71,15	71,15	1,27E-06	9,04E-05	71,15	1,79E-07	1,28E-05
π18	4,74	4,74	2,37E-06	1,12E-05	4,74	2,12E-06	1,01E-05
π19	96,45	96,45	6,32E-07	6,09E-05	96,45	2,46E-07	2,37E-05
rms	—	—	5,04E-05	4,64E-04	—	6,91E-06	1,49E-04

Παρατηρούμε ότι τα δύο είδη βέλτιστων τροχιών επιτυγχάνουν το ίδιο χαμηλό βαθμό ευαισθησίας και εξίσου χαμηλά σφάλματα αναγνώρισης των παραμέτρων, με την ΤΡΟΧΙΑ 2 να εμφανίζει μία ελαφρώς πιο γρήγορη διαδικασία βελτιστοποίησης, αλλά με χαμηλότερο μέσο όρο σε σχέση με την ΤΡΟΧΙΑ 1. Με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο βέλτιστων τροχιών με

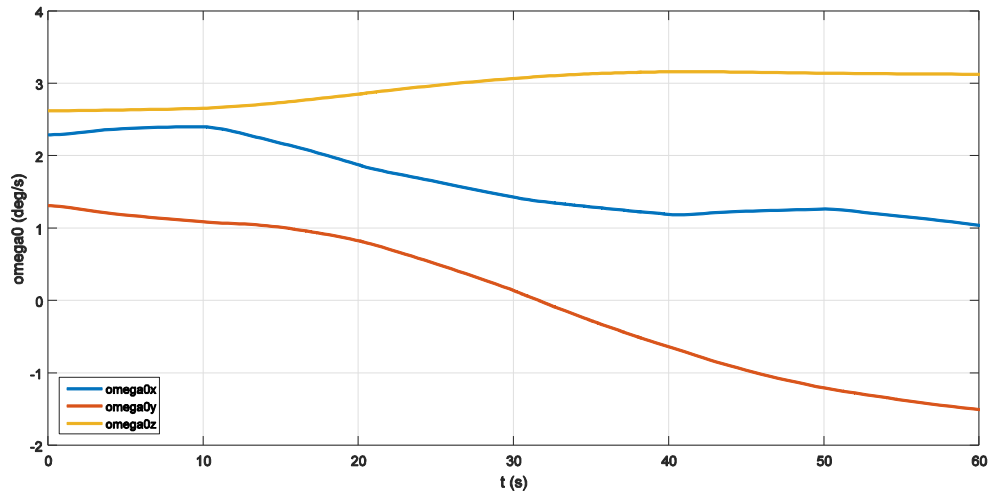
μία απλή τροχιά, που δεν απαιτεί διαδικασία βελτιστοποίησης, ελέγχεται και μία τρίτη τροχιά, η οποία θα αναφέρεται ως ΤΡΟΧΙΑ 0. Η τροχιά αυτή περιλαμβάνει τη χρήση τραπεζοειδών προφίλ γωνιακών ταχυτήτων των αρθρώσεων και έχει διάρκεια $t_f = 60s$. Για να αποφύγουμε την περίπτωση το μητρώο \mathbf{Y} να μην είναι μέγιστης τάξης, οι τροχιές αυτές σχεδιάζονται με μία διαφορά φάσης, έτσι ώστε να μην ταυτίζονται σε κάθε χρονική στιγμή. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι γωνιακές θέσεις (Σχήμα 3-10) και ταχύτητες (Σχήμα 3-11) των αρθρώσεων και η γωνιακή ταχύτητα της βάσης (Σχήμα 3-12) για την ΤΡΟΧΙΑ 0. Στον Πίνακα 3-8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της αναγνώρισης με χρήση της ΤΡΟΧΙΑΣ 0.



Σχήμα 3-11. Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0.



Σχήμα 3-12. Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0.



Σχήμα 3-13. Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0.

Πίνακας 3-8. Αποτελέσματα προσομοίωσης αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 0.

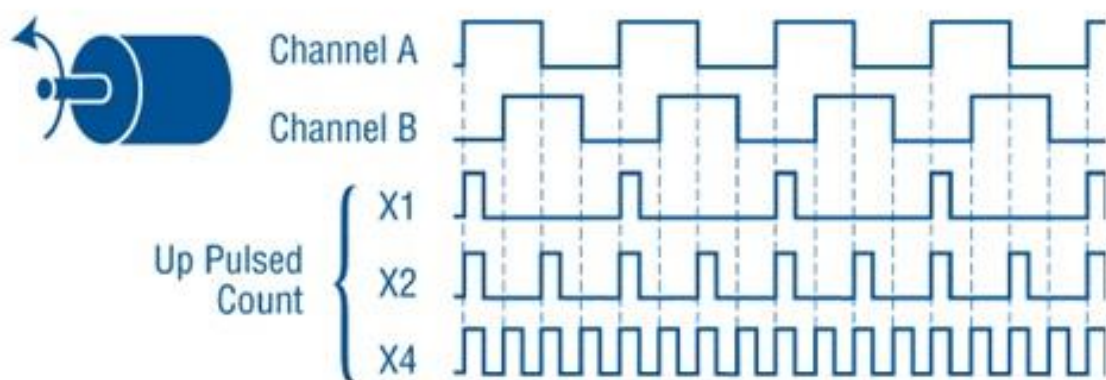
	θεωρητικό	ΤΡΟΧΙΑ 0		
		αναγνώριση	error_rel	error_abs
π1	1732,49	1732,49	3,84E-11	6,66E-08
π2	-2,09	-2,09	-2,13E-08	4,44E-08
π3	-15,40	-15,40	-8,98E-10	1,38E-08
π4	1729,36	1729,36	4,32E-11	7,47E-08
π5	-30,81	-30,81	-1,14E-09	3,53E-08
π6	1505,21	1505,21	1,08E-11	1,62E-08
π7	321,53	321,53	4,54E-11	1,46E-08
π8	321,54	321,54	4,66E-11	1,50E-08
π9	-255,98	-255,98	-1,09E-10	2,79E-08
π10	256,03	256,03	1,28E-10	3,28E-08
π11	-65,46	-65,46	-5,95E-10	3,90E-08
π12	65,51	65,51	7,25E-10	4,75E-08
π13	28,44	28,44	1,18E-09	3,36E-08
π14	213,45	213,45	3,59E-10	7,67E-08
π15	14,22	14,22	8,84E-10	1,26E-08
π16	9,48	9,48	1,65E-09	1,56E-08
π17	71,15	71,15	4,41E-10	3,14E-08
π18	4,74	4,74	5,31E-09	2,52E-08
π19	96,45	96,45	9,42E-10	9,08E-08
rms	—	—	5,08E-09	4,41E-08

Για να ολοκληρώσουμε την αξιολόγηση των βέλτιστων τροχιών αναγνώρισης θα εξεταστεί και η συμπεριφορά τους, στην περίπτωση που οι μετρήσεις που προέρχονται από τους encoders των κινητήρων των αρθρώσεων περιέχουν θόρυβο.

3.7 Μοντελοποίηση θορύβου encoder και αποτελέσματα προσομοίωσης με θόρυβο

Όπως συμβαίνει με τις περισσότερες ρομποτικές εφαρμογές, έτσι και στην περίπτωση του ρομπότ “Cepheus” του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, χρησιμοποιούνται incremental encoders. Πρόκειται για αισθητήρες, οι οποίοι μετράνε τη γωνιακή θέση της εκάστοτε άρθρωσης και χρησιμοποιούνται τόσο στην περίπτωση περιστροφικών όσο και πρισματικών αρθρώσεων, καθώς οι κινητήρες και στις δύο περιπτώσεις είναι συνήθως περιστροφικού τύπου. Η κατασκευή τους είναι απλή και φθηνή και περιλαμβάνει ένα οπτικό δίσκο, που περιστρέφεται μαζί με τον άξονα της άρθρωσης, με διαδοχικούς διαφανείς και αδιαφανείς τομείς (sectors). Δέσμη φωτός, που εκπέμπεται σε κάθε ίχνος κατά την περιστροφή του δίσκου, κατευθύνεται σε μία φωτοδιόδο που βρίσκεται τοποθετημένη στην πίσω πλευρά του οπτικού δίσκου. Ένας incremental encoder μπορεί να μετρήσει μόνο σχετική γωνιακή μετατόπιση, με κάθε μετάβαση από αδιαφανή σε διαφανή τομέα να μεταφράζεται σε γωνιακή μετατόπιση κατά ένα βήμα. Οι μετρήσεις θέσης των encoders χρησιμοποιούνται για τον έμμεσο καθορισμό της γωνιακής ταχύτητας της άρθρωσης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν δύο σειρές διαφανών-αδιαφανών τομέων (quadrature encoder) με διαφορά φάσης 90 μοίρες προκύπτουν δύο σήματα A και B από τα οποία μπορεί να προσδιοριστεί εκτός από τη γωνιακή θέση και η φορά περιστροφής του κινητήρα. Στην παρούσα προσομοίωση, αυτό που μας απασχολεί, είναι η ποσοτικοποίηση του θορύβου, που εισάγει στο σήμα η χρήση ενός encoder ως μετρητικό όργανο. Το βασικό στοιχείο του θορύβου αυτού προκύπτει από την πεπερασμένη διακριτική ικανότητα του encoder (resolution). Η διακριτική ικανότητα υπολογίζεται διαιρώντας τη γωνιακή μετατόπιση μίας πλήρους περιστροφής με τον αριθμό των παλμών που μπορεί να παράξει ο encoder μέσα σε μία περιστροφή (Counts Per Turn – CPT). Στην περίπτωση quadrature encoder μπορεί να μετρηθεί, αντί για ολόκληρο τον παλμό, η άνοδος (leading edge) και πτώση (trailing edge) κάθε παλμού και στα δύο κανάλια A και B, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-14, υποτετραπλασιάζοντας τελικώς το ελάχιστο γωνιακό βήμα που μπορεί να μετρήσει ο encoder.

$$resolution = \frac{2 \cdot \pi}{4 \cdot CPT} \quad (3-40)$$



Σχήμα 3-14. Ανάλυση encoder.

Οι κινητήρες του ρομποτ “Cepheus” είναι της εταιρείας Maxon με ενσωματωμένους incremental encoder, τριών καναλιών (A, B και Index) με δυνατότητα παραγωγής 1000 παλμών ανά περιστροφή (CPT=1000). Επομένως, βάσει της Εξ. (3-40), η ανάλυση του encoder είναι

$$\begin{aligned} \text{resolution} &= 0,0016 \text{ rad} \\ &\text{ή} \\ \text{resolution} &= 0,09 \text{ deg} \end{aligned} \quad (3-41)$$

Με σκοπό την εισαγωγή της επίδρασης του θορύβου στο δυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση, προστίθεται στο αντίστοιχο αρχείο του Simulink ένα Function block. Το block αυτό, λαμβάνει ως είσοδο το διάνυσμα της γωνιακής θέσης, όπως αυτό προκύπτει από το δυναμικό μοντέλο, και στρογγυλοποιεί κάθε τιμή στο πλησιέστερο ακέραιο παράγωγο της διακριτικής ικανότητας του encoder (resolution), όπως υπολογίστηκε παραπάνω. Αφού γίνει αυτή η διαδικασία, το σήμα που προκύπτει παραγωγίζεται αριθμητικά έτσι ώστε να προκύψει σήμα με θόρυβο και για τη γωνιακή ταχύτητα. Τονίζεται, ότι ο θόρυβος μέτρησης αφορά μόνο την ανάδραση και επομένως το σήμα με θόρυβο χρησιμοποιείται μόνο από τον ελεγκτή, ενώ το δυναμικό μοντέλο του ρομπότ τροφοδοτείται με το σήμα χωρίς την προσθήκη θορύβου. Στη συνέχεια φαίνεται ο σύντομος κώδικας, που χρησιμοποιεί το block, που εισάγει τον θόρυβο του encoder στο σήμα (για τους τρεις βαθμούς ελευθερίας του τριδιάστατου προβλήματος).

```
function qnoise = fcn(q)

resolution=0.0016;
r=rem(q,resolution);

qnoise=zeros(3,1);

if r(1,1)>resolution/2;
    qnoise(1,1)=q(1,1)+(resolution-r(1,1));
else
    qnoise(1,1)=q(1,1)-r(1,1);
end

if r(2,1)>resolution/2;
    qnoise(2,1)=q(2,1)+(resolution-r(2,1));
else
    qnoise(2,1)=q(2,1)-r(2,1);
end

if r(3,1)>resolution/2;
    qnoise(3,1)=q(3,1)+(resolution-r(3,1));
else
    qnoise(3,1)=q(3,1)-r(3,1);
end

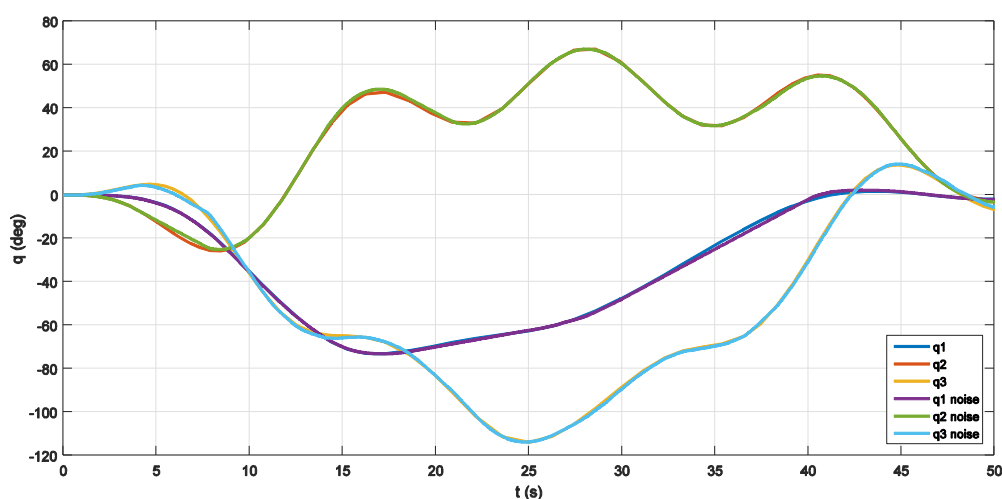
end
```

Η εντολή *rem*, που χρησιμοποιήθηκε, υπολογίζει το υπόλοιπο της τέλειαις διαίρεσης της τιμής της μέτρησης με την ανάλυση του encoder.

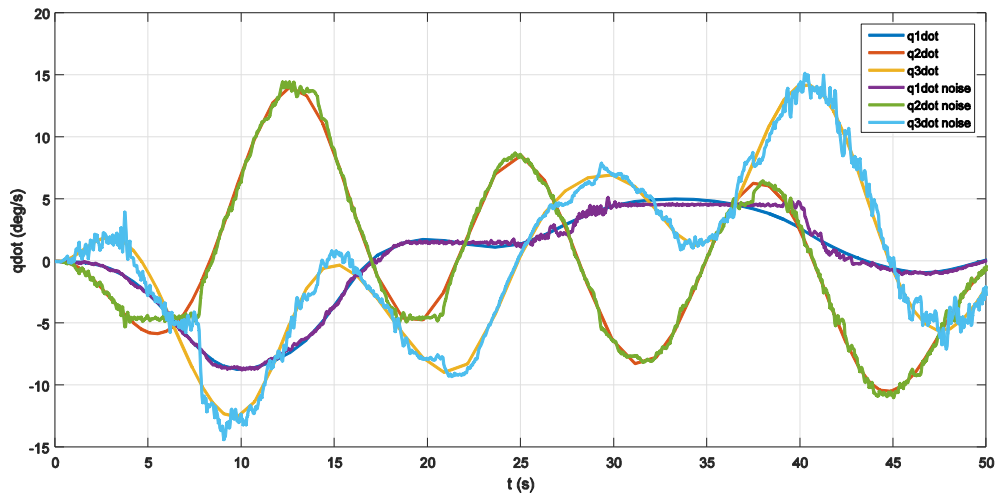
Ακολουθούν τα αποτελέσματα της αναγνώρισης παραμέτρων με θόρυβο για την ΤΡΟΧΙΑ 1 (Πίνακας 3-9), ΤΡΟΧΙΑ 2 (Πίνακας 3-10) και ΤΡΟΧΙΑ 0 (Πίνακας 3-11), καθώς και οι αντίστοιχες χρονικές αποκρίσεις με και χωρίς θόρυβο.

Πίνακας 3-9. Αποτελέσματα αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 1 με θόρυβο.

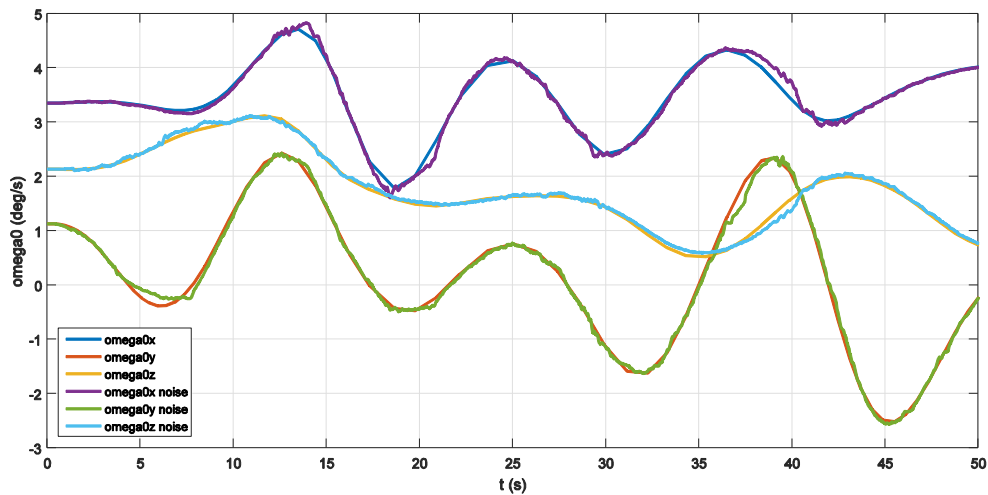
	θεωρητικό	ΤΡΟΧΙΑ 1		
		αναγνώριση	error_rel	error_abs
π1	1732,49	1.541,95	0,11	190,53
π2	-2,09	-47,43	-21,75	45,35
π3	-15,40	66,80	-5,34	82,20
π4	1729,36	909,36	0,47	820,01
π5	-30,81	238,71	-8,75	269,51
π6	1505,21	1.087,60	0,28	417,61
π7	321,53	200,25	0,38	121,28
π8	321,54	177,64	0,45	143,90
π9	-255,98	-219,20	-0,14	36,78
π10	256,03	148,93	0,42	107,10
π11	-65,46	112,54	-2,72	178,00
π12	65,51	2,43	0,96	63,08
π13	28,44	-27,21	1,96	55,64
π14	213,45	137,04	0,36	76,41
π15	14,22	-73,79	6,19	88,01
π16	9,48	-20,56	3,17	30,04
π17	71,15	-21,50	1,30	92,65
π18	4,74	51,02	9,77	46,29
π19	96,45	53,40	0,45	43,04
rms	—	—	6,23	238,26



Σχήμα 3-15. Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.



Σχήμα 3-16. Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.

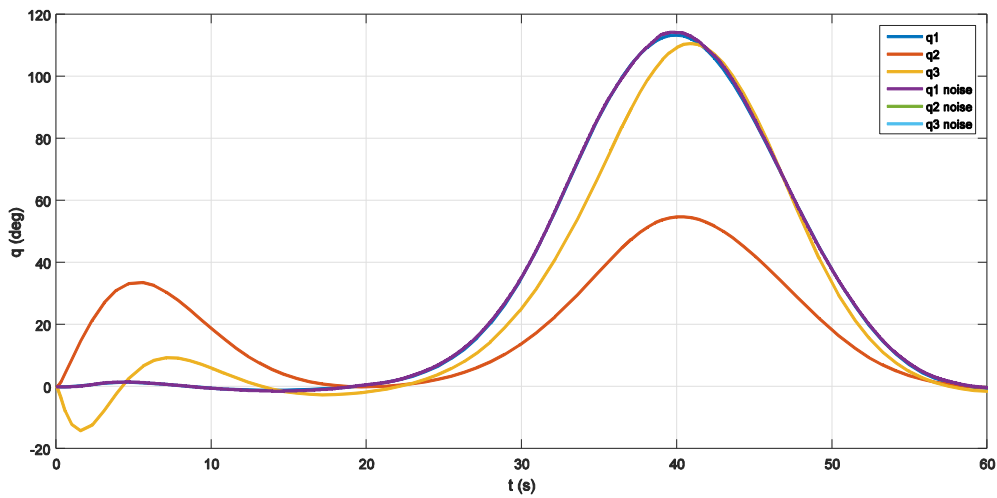


Σχήμα 3-17. Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.

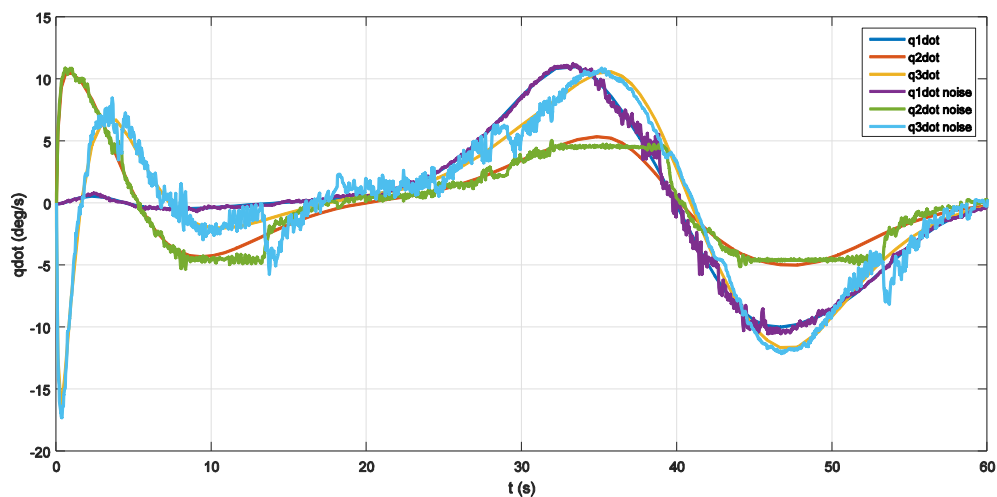
Πίνακας 3-10. Αποτελέσματα αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 2 με θόρυβο.

	θεωρητικό	ΤΡΟΧΙΑ 2		
		αναγνώριση	error_rel	error_abs
π1	1732,49	1605,57	0,07	126,92
π2	-2,09	90,90	-44,59	92,98
π3	-15,40	283,41	-19,40	298,81
π4	1729,36	986,66	0,43	742,70
π5	-30,81	219,10	-8,11	249,91
π6	1505,21	1077,74	0,28	427,47
π7	321,53	-36,65	1,11	358,19
π8	321,54	110,32	0,66	211,22
π9	-255,98	-190,31	-0,26	65,66
π10	256,03	181,06	0,29	74,97

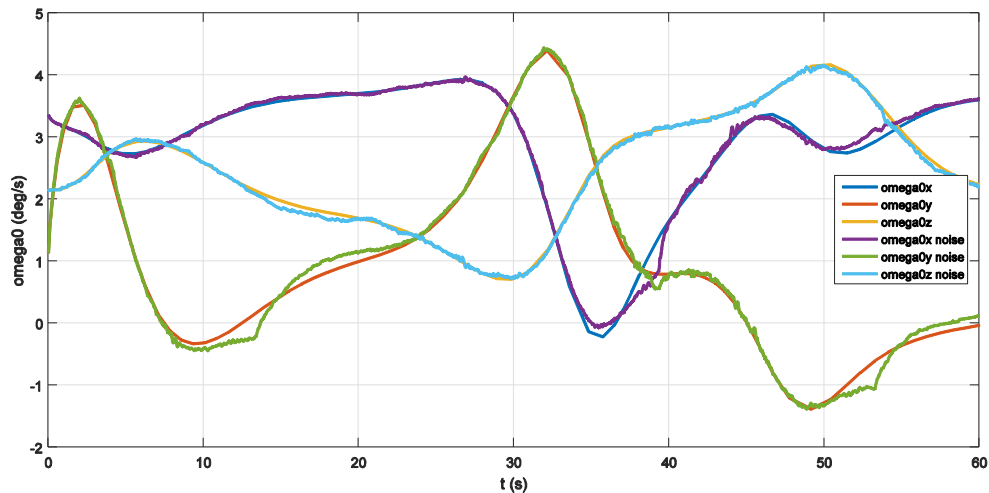
$\pi 11$	-65,46	1,71	-1,03	67,16
$\pi 12$	65,51	43,58	0,33	21,93
$\pi 13$	28,44	19,01	0,33	9,43
$\pi 14$	213,45	-51,50	1,24	264,95
$\pi 15$	14,22	-76,18	6,36	90,40
$\pi 16$	9,48	-39,10	5,12	48,57
$\pi 17$	71,15	74,54	0,05	3,39
$\pi 18$	4,74	-43,80	10,24	48,54
$\pi 19$	96,45	41,34	0,57	55,11
rms	—	—	11,71	249,73



Σχήμα 3-18. Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.



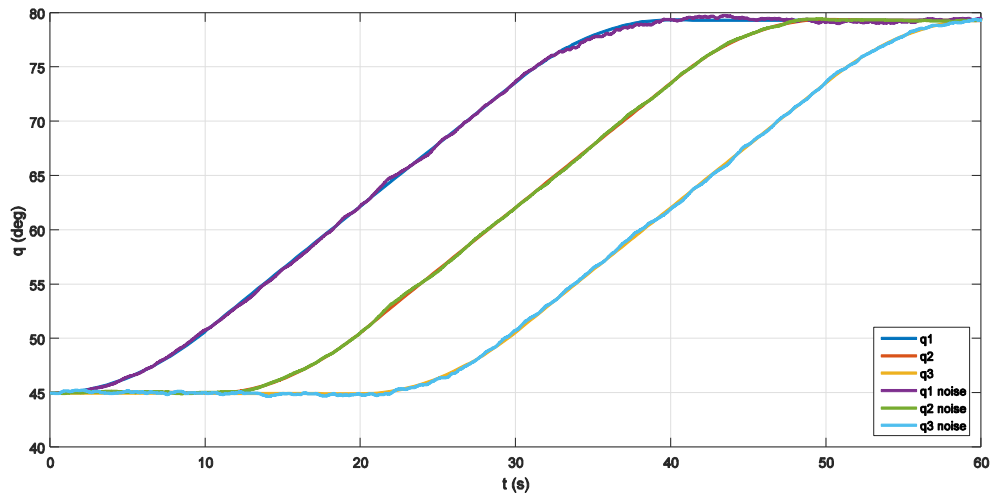
Σχήμα 3-19. Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.



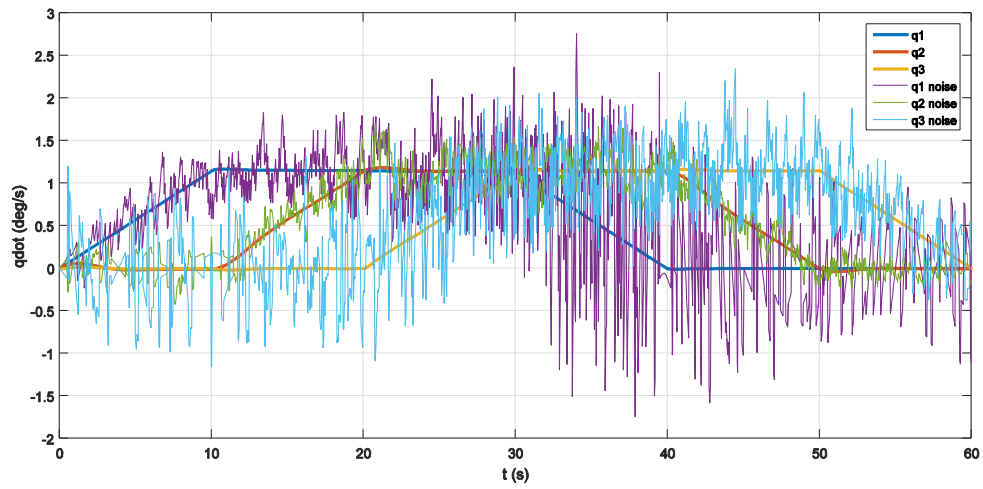
Σχήμα 3-20. Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.

Πίνακας 3-11. Αποτελέσματα αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 0 με θόρυβο.

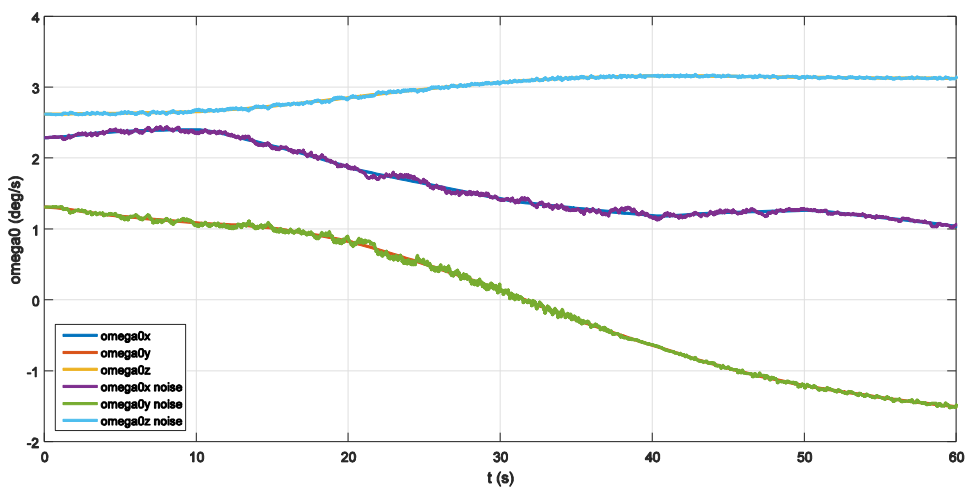
	θεωρητικό	ΤΡΟΧΙΑ 0		
		αναγνώριση	error_rel	error_abs
π1	1732,49	1781,94	0,03	49,45
π2	-2,09	728,73	-350,46	730,81
π3	-15,40	412,72	-27,80	428,12
π4	1729,36	2563,76	0,48	834,40
π5	-30,81	-397,63	-11,91	366,82
π6	1505,21	1269,89	0,16	235,32
π7	321,53	-1572,84	5,89	1894,37
π8	321,54	-299,98	1,93	621,52
π9	-255,98	189,42	-1,74	445,40
π10	256,03	-243,76	1,95	499,78
π11	-65,46	173,92	-3,66	239,38
π12	65,51	-61,81	1,94	127,31
π13	28,44	34,63	0,22	6,20
π14	213,45	344,45	0,61	131,00
π15	14,22	-3,68	1,26	17,90
π16	9,48	23,03	1,43	13,55
π17	71,15	208,05	1,92	136,91
π18	4,74	9,05	0,91	4,31
π19	96,45	-113,65	2,18	210,09
rms	—	—	80,72	570,46



Σχήμα 3-21. Γωνιακή θέση των αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0 με και χωρίς θόρυβο.



Σχήμα 3-22. Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0 με και χωρίς θόρυβο.



Σχήμα 3-23. Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για ΤΡΟΧΙΑ 0 με και χωρίς θόρυβο.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η ΤΡΟΧΙΑ 0, που δεν έχει προκύψει από διαδικασία βελτιστοποίησης, αν και αναγνωρίζει με πολύ μικρό σφάλμα ($rms(error_rel) = 5,08 \cdot 10^{-9}$) τις παραμέτρους του συστήματος όταν δεν υπάρχει θόρυβος, εντούτοις όταν το σήμα της μέτρησης περιέχει θόρυβο, το σφάλμα αυξάνεται σημαντικά ($rms(error_rel) = 80,72$). Αντιθέτως, οι βέλτιστες τροχιές καταφέρνουν να αναγνωρίσουν τις παραμέτρους του συστήματος με ικανοποιητική ακρίβεια τόσο στην περίπτωση της ΤΡΟΧΙΑΣ 1 ($rms(error_rel) = 6,23$) όσο και της ΤΡΟΧΙΑΣ 2 ($rms(error_rel) = 11,71$). Ανάμεσα στις δύο βέλτιστες τροχιές το συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι ότι η ΤΡΟΧΙΑ 1 αναγνωρίζει τις παραμέτρους με ελαφρώς μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ η ΤΡΟΧΙΑ 2 έχει το πλεονέκτημα της ολοκλήρωσης της διαδικασίας της βελτιστοποίησης σε μικρότερο χρόνο.

4 Αναγνώριση παραμέτρων για το διδιάστατο πρόβλημα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται θεωρητικά η αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων ενός διδιάστατου διαστημικού ρομποτικού συστήματος με ένα βραχίονα και δύο συνδέσμους με βάση την αρχή διατήρησης της στροφορμής. Αρχικά, παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του ρομπότ του επιπέδου διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, όπως προκύπτουν από το μοντέλο CAD. Οι τιμές αυτές θα χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση του πειράματος της αναγνώρισης παραμέτρων. Όπως και στο τριδιάστατο πρόβλημα προσδιορίζονται οι βέλτιστες τροχιές για κάθε ένα από τα δύο διαφορετικά είδη (ΤΡΟΧΙΑ 1 και ΤΡΟΧΙΑ 2) και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της αναγνώρισης με και χωρίς θόρυβο μέτρησης.

4.1 Εκτίμηση παραμέτρων του ρομπότ “Cerberus” από το CAD μοντέλο

Οι τιμές των δυναμικών χαρακτηριστικών, που χρησιμοποιήθηκαν στο θεωρητικό υπολογισμό των βέλτιστων τροχιών για την αναγνώριση διδιάστατου διαστημικού ρομποτικού συστήματος, αποτελούν προσεγγίσεις των μεγεθών του πραγματικού ρομπότ “Cerberus” του διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από την μοντελοποίηση CAD του συστήματος. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βελτιώθηκε το υπάρχον μοντέλο CAD του ρομπότ “Cerberus”, με γνώμονα να αντικατοπτρίζει όσο το δυνατόν ακριβέστερα την παρούσα κατάσταση του ρομπότ. Για το λόγο αυτό αφαιρέθηκαν τμήματα παλαιότερου σχεδιασμού και προστέθηκαν νέα χαρακτηριστικά, ενώ σχεδιάστηκε και η αρπάγη του ρομποτικού βραχίονα. Καθώς στόχος της όλης διαδικασίας είναι να προσδιοριστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, δόθηκε μεγάλη σημασία στον ακριβή καθορισμό της μάζας των διάφορων εξαρτημάτων του συστήματος. Για όσα εξαρτήματα δεν είχαν ήδη καθορισμένο υλικό και άρα και συνολική μάζα, εκτιμήθηκε το υλικό ή όπου ήταν αυτό εφικτό, ζυγίστηκε το αντίστοιχο πραγματικό εξάρτημα του ρομπότ και εισήχθη η τιμή που μετρήθηκε στο μοντέλο (Overridden Mass). Τέλος, για τα εξαρτήματα για τα οποία δεν ήταν εφικτή καμία από της παραπάνω προσεγγίσεις (π.χ. σωληνώσεις του πνευματικού υποσυστήματος) ορίστηκε μηδενική μάζα, έτσι ώστε να μην επιβαρυνθεί το τελικό αποτέλεσμα με λάθος στοιχεία. Στον Πίνακα 4-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα μεγέθη του ρομπότ, όπως υπολογίστηκαν από το CAD μοντέλο. Τα μεγέθη που αναφέρονται είναι:

- Μάζα (m)
- Όγκος (V)
- Θέση κέντρου μάζας ως προς το Σύστημα Συντεταγμένων (ΣΣ) (X, Y, Z)
- Διευθύνσεις των κύριων αξόνων (I_x, I_y, I_z)
- Κύριες κεντροβαρικές ροπές αδράνειας (P_x, P_y, P_z)
- Κεντροβαρικές ροπές αδράνειας ευθυγραμμισμένες με το ΣΣ

$$(L_{xx}, L_{yy}, L_{zz}, L_{xy} = L_{yx}, L_{yz} = L_{zy}, L_{xz} = L_{zx})$$

και αφορούν το σφόνδυλο αντίδρασης μαζί με τη βάση (base+rw), τη βάση (base), το σφόνδυλο αντίδρασης (rw), τον πρώτο σύνδεσμο του βραχίονα (link 1) και το δεύτερο (link 2). Τα συστήματα

συντεταγμένων για κάθε περίπτωση έχουν κατάλληλη αρχή αξόνων και προσανατολισμό, όπως φαίνεται στο Παράρτημα Α. Στο Παράρτημα Β φαίνονται οι κύριοι αδρανειακοί άξονες για κάθε μέρος του συστήματος.

Πίνακας 4-1. Τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του ρομπότ από το CAD μοντέλο.

	base+rw	base	rw	link1	link2
m (gr)	9,951	8,359	1,595	0,083	0,187
V (m³)	0,004540	0,004178	0,000362	0,000028	0,000113
X (m)	-0,0205	-0,0244	0,0001	0,0362	0,1124
Y (m)	0,1035	0,1243	-0,0054	0,1137	0,0932
Z (m)	-0,0102	0,0002	-0,0650	0,0119	0,0025
lx	[-0,22481372; 0,91497467; 0,33508229]	[-0,27871482; 0,93021158; 0,23879796]	[0,02; 1,00; 0,00]	[0,36; 0,93; 0,03]	[0,793; 0,597; -0,120]
ly	[0,55182927; -0,16387065; 0,81769852]	[0,53303033; -0,05700158; 0,84417385]	[0,00; 0,00; 1,00]	[0,17; -0,10; 0,98]	[0,262; -0,513; -0,817]
lz	[0,80308359; 0,36873806; -0,46806944]	[0,79887215; 0,36257032; -0,47994380]	[1,00; -0,02; 0,00]	[0,92; -0,35; -0,20]	[-0,549; 0,617; -0,564]
Px (kg*m²)	0,110115	0,107039	0,002150	0,000010	0,000599
Py (kg*m²)	0,170157	0,139475	0,002500	0,000346	0,000724
Pz (kg*m²)	0,180989	0,149496	0,002517	0,000349	0,000731
Lxx (kg*m²)	0,174108	0,143351	0,002517	0,000304	0,000308
Lyy (kg*m²)	0,121364	0,112725	0,002150	0,000054	0,000490
Lzz (kg*m²)	0,165789	0,139934	0,002500	0,000346	0,000717
Lxy=Lyx (kg*m²)	-0,015558	-0,011312	0,000006	0,000114	0,002275
Lyz=Lzy (kg*m²)	0,020278	0,008949	0,0000001	0,000010	-0,000001
Lxz=Lzx (kg*m²)	-0,000451	0,001683	-0,000005	0,000004	-0,000013

Από τον Πίνακα 4-1 επιλέγουμε τα μεγέθη που χρειαζόμαστε με βάση τη μαθηματική μοντελοποίηση για την προσομοίωση του ρομπότ. Τα μεγέθη αυτά μαζί με τους συμβολισμούς που χρησιμοποιήθηκαν στη θεωρητική ανάλυση φαίνονται στον Πίνακα 4-2.

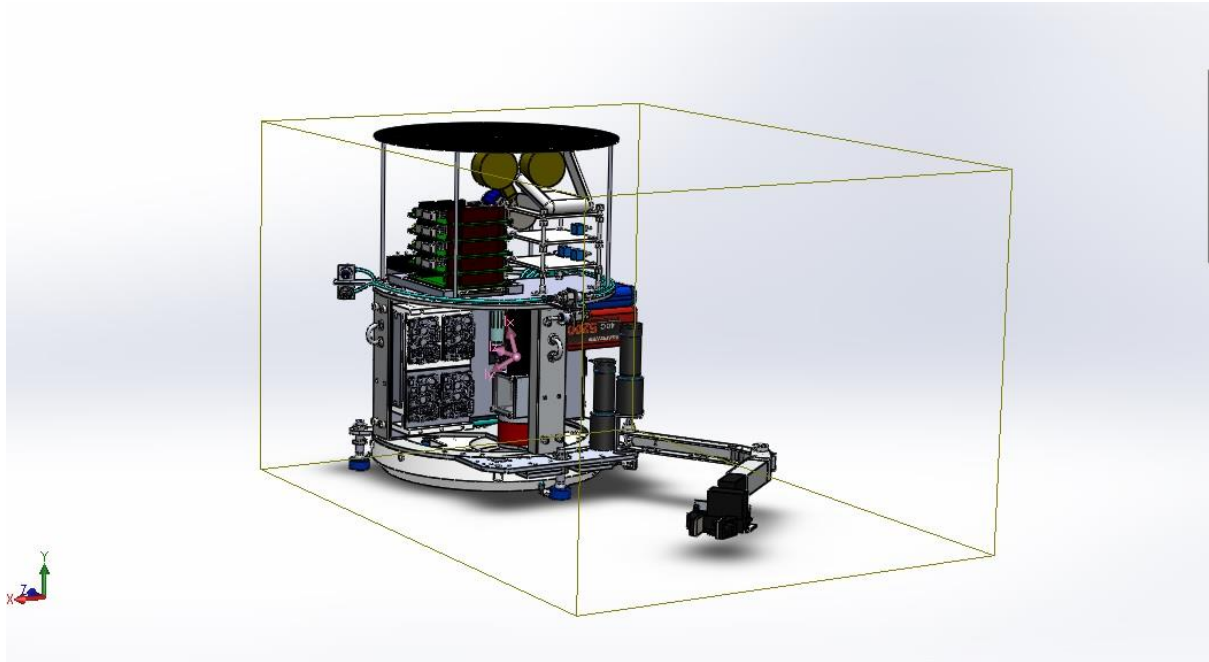
Πίνακας 4-2. Τιμές των δυναμικών χαρακτηριστικών του ρομπότ.

m_0 (kg)	9,951
m_1 (kg)	0,083
m_2 (kg)	0,187
M (kg)	10,222
l_1 (m)	0,119
l_2 (m)	0,146
r_{0x} (m)	0,172688
r_{0y} (m)	0,091433
r_1 (m)	0,062
I_0 (kg*m ²)	0,121364
I_1 (kg*m ²)	0,000346

I_2 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0,000717
--	----------

Η τιμή της στροφορμής, που έχει αρχικά το σύστημα, προσδιορίζεται από τη ροπή αδράνειας του σφονδύλου αντίδρασης, η οποία είναι γνωστή από τη νέα μοντελοποίηση CAD ($I_{rw} = 0,0021 \text{kg} \cdot \text{m}^2$), και τη σταθερή γωνιακή ταχύτητα με την οποία κινείται (η οποία επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας έλεγχο ταχύτητας στον κινητήρα του) και έχει τιμή 250rad/s . Τελικά, η τιμή της αρχικής στροφορμής του συστήματος είναι:

$$h_{cm} = I_{rw} \omega_{rw} \Rightarrow h_{cm} = 0,525 \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s} \quad (4-1)$$



Σχήμα 4-1. Μοντέλο CAD του ρομπότ Cerheus με το κέντρο μάζας και τους κύριους άξονες αδράνειας.

4.2 Αναλυτική μορφή του διανύσματος των παραμέτρων για το διδιάστατο σύστημα

Η αναλυτική μορφή των στοιχείων του διανύσματος των παραμέτρων π για επίπεδο διαστημικό ρομποτικό σύστημα με ένα βραχίονα και δύο συνδέσμους είναι [22] :

$$\pi_1 = \frac{m_0}{m_0 + m_1 + m_2} r_{0,x} (l_1 (m_1 + m_2) + m_2 r_1) \quad (4-2)$$

$$\pi_2 = \frac{l_2 m_0 m_2}{m_0 + m_1 + m_2} r_{0,x} \quad (4-3)$$

$$\pi_3 = \frac{m_0}{m_0 + m_1 + m_2} r_{0,y} (l_1 (m_1 + m_2) + m_2 r_1) \quad (4-4)$$

$$\pi_4 = \frac{l_2 m_0 m_2}{m_0 + m_1 + m_2} r_{0,y} \quad (4-5)$$

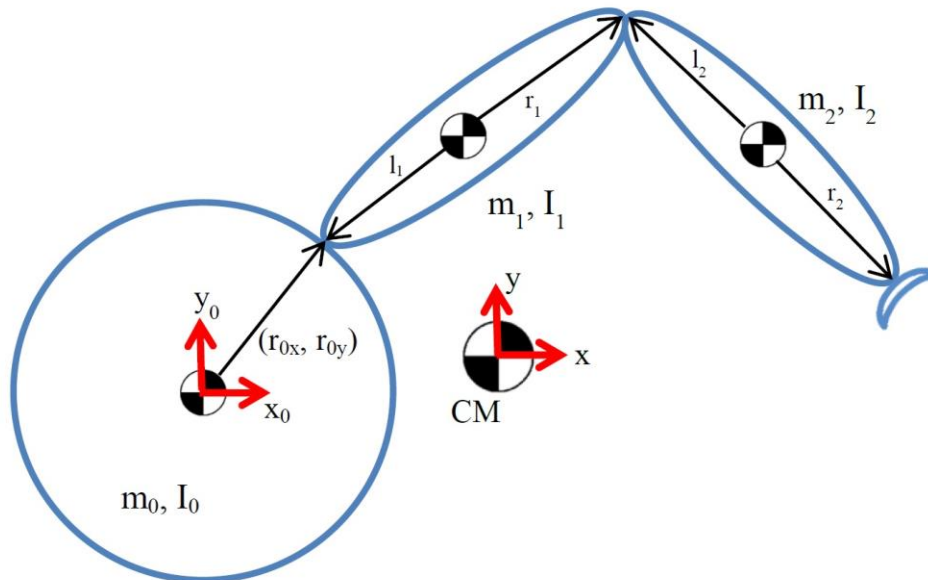
$$\pi_5 = I_0 + \frac{m_0 (m_1 + m_2)}{m_0 + m_1 + m_2} (r_{0,x}^2 + r_{0,y}^2) \quad (4-6)$$

$$\pi_6 = \frac{l_2 m_2}{m_0 + m_1 + m_2} (l_1 m_0 + (m_0 + m_1) r_1) \quad (4-7)$$

$$\pi_7 = I_1 + \frac{l_1^2 m_0 (m_1 + m_2) + 2l_1 m_0 m_2 r_1 + (m_0 + m_1) m_2 r_1^2}{m_0 + m_1 + m_2} \quad (4-8)$$

$$\pi_8 = I_2 + \frac{l_2^2 (m_0 + m_1) m_2}{m_0 + m_1 + m_2} \quad (4-9)$$

Στο Σχήμα 4-2, που ακολουθεί, φαίνεται ένα διδιάστατο ΔΡΣ με ένα βραχίονα και δύο συνδέσμους με τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος.



Σχήμα 4-2. Χαρακτηριστικά μεγέθη διδιάστατου ΔΡΣ με ένα βραχίονα και δύο συνδέσμους.

4.3 Περιγραφή προσομοίωσης για το διδιάστατο πρόβλημα

Έχοντας αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου αναγνώρισης παραμέτρων για το τριδιάστατο πρόβλημα, ακολουθεί η εφαρμογή της και στην περίπτωση επίπεδου διαστημικού ρομποτικού συστήματος. Η αναζήτηση της βέλτιστης τροχιάς για την αναγνώριση παραμέτρων και για τα δύο είδη τροχιών (ΤΡΟΧΙΑ 1 και 2) γίνεται για χρόνο $t_f = 5, 10, \dots, 20s$, δηλαδή για μικρότερο χρονικό διάστημα από το τριδιάστατο πρόβλημα, καθώς η εμφάνιση μη μοντελοποιημένων τριβών μας αναγκάζει να περιορίσουμε το χρόνο του πειράματος. Ο αριθμός όρων (ζευγάρια όρων cos και sin για την ΤΡΟΧΙΑ 1 και συναρτήσεων Gauss για την ΤΡΟΧΙΑ 2) στην τροχιά κάθε άρθρωσης είναι $m = 2, \dots, 5$, καθώς για ($m = 1$) δεν μπορεί να προκύψει βέλτιστη τροχιά. Όπως και στην περίπτωση του τριδιάστατου προβλήματος, εφαρμόζεται κατά την προσομοίωση του πειράματος ένας απλός ελεγκτής θέσης PD σε κάθε μία από τις αρθρώσεις του βραχίονα. Χρησιμοποιώντας το μητρώο

αδράνειας \mathbf{H} του ρομπότ και μία αντιπροσωπευτική θέση του βραχίονα (normal configuration) υπολογίζονται τα στοιχεία των μητρώων των κερδών k_{pi} και k_{di} [23] .

$$k_{pi} = \mathbf{H}(i, i)\omega_n^2 \quad (4-10)$$

$$k_{di} = 2\omega_n \mathbf{H}(i, i) \quad (4-11)$$

Τελικά τα μητρώα των κερδών για διαστημικό ρομποτικό σύστημα με ένα βραχίονα και τρεις συνδέσμους είναι:

$$\mathbf{K}_P = \begin{bmatrix} k_{p1} & 0 \\ 0 & k_{p2} \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

και

$$\mathbf{K}_D = \begin{bmatrix} k_{d1} & 0 \\ 0 & k_{d2} \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

Για το διδιάστατο πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης τροχιάς τα κέρδη που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση για κάθε χρόνο πειράματος φαίνονται στον Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3. Κέρδη προσομοίωσης συναρτήσει της διάρκειας του πειράματος.

t_i (s)	k_{p1}	k_{p2}	k_{d1}	k_{d2}
5	6,3729	0,7827	2,1243	0,2609
10	1,5932	0,1957	1,0621	0,1304
15	0,7081	0,0870	0,7081	0,0870
20	0,3983	0,0489	0,5311	0,0652

Τέλος, τίθενται τα άνω και κάτω όρια στις τιμές των γωνιακών θέσεων ($maxq$, $minq$), ταχυτήτων ($maxqdot$, $minqdot$) και επιταχύνσεων ($maxqdo2$, $minqdo2$) των αρθρώσεων του βραχίονα, όπως φαίνονται στον Πίνακα 4-4.

Πίνακας 4-4. Περιορισμοί αρθρώσεων για το διδιάστατο πρόβλημα.

$maxq1$	$minq1$	$maxq2$	$minq2$	$maxqdot$	$minqdot$	$maxqdo2$	$minqdo2$
2,1909 rad	-0,5109 rad	1,1509 rad	-2,7909 rad	2 rad/s	-2 rad/s	7 rad/s ²	-7 rad/s ²
125,5 deg	-29,3 deg	65,9 deg	-159,9 deg	114,6 deg/s	-114,6 deg/s	401,1 deg/s ²	-401,1 deg/s ²

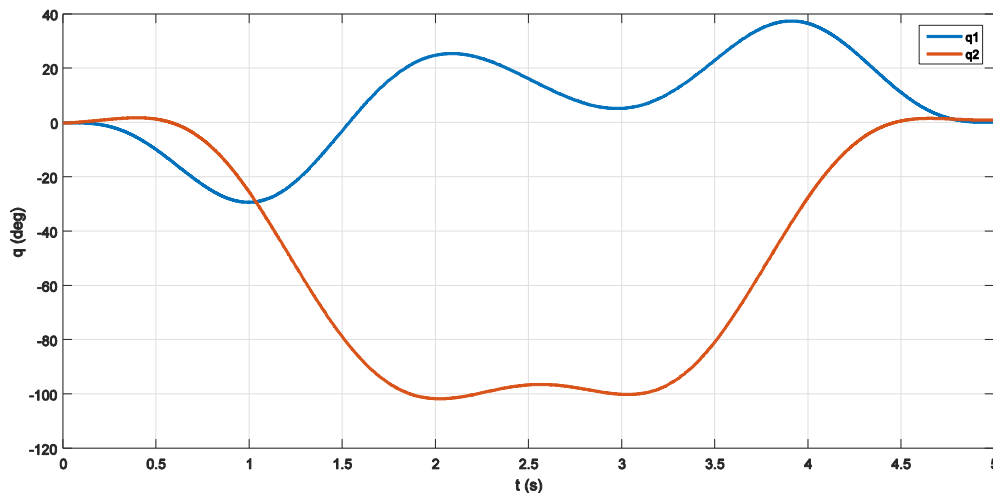
4.4 Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 1

Στον Πίνακα 4-5, που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης της ΤΡΟΧΙΑΣ 1 (τροχιά βασισμένη στις σειρές Fourier) για το διδιάστατο πρόβλημα. Όπως και για το τριδιάστατο πρόβλημα, εκτός από τον ελάχιστο βαθμό ευαισθησίας κάθε περίπτωσης παρουσιάζονται επιπλέον ο αριθμός των φορών που κλήθηκε η αντικειμενική συνάρτηση από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης (F-count), ο φυσικός χρόνος σε δευτερόλεπτα που απαιτείται για μία επανάληψη (Time) και ο συνολικός χρόνος (Total Time) που χρειάστηκε για την εύρεση της βέλτιστης τροχιάς.

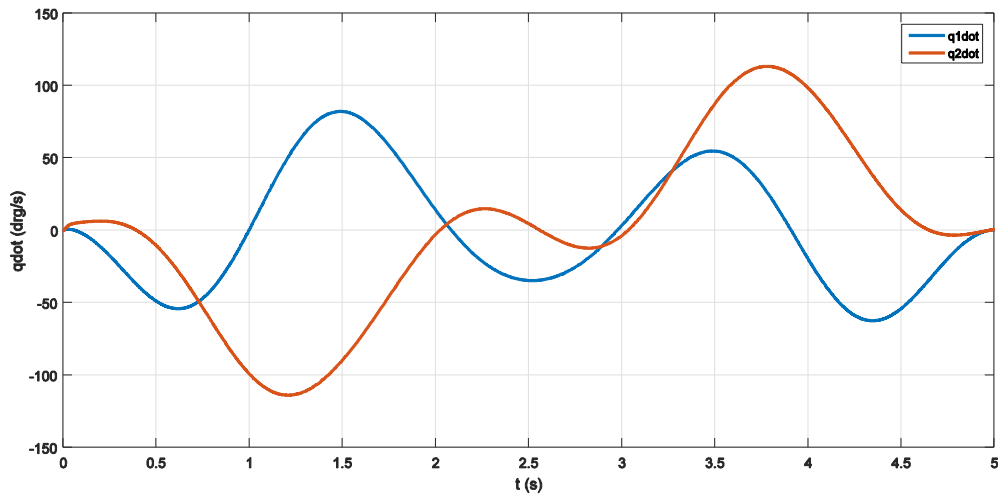
Πίνακας 4-5. Αποτελέσματα διαδικασίας εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 1.

m	t _{final}	min{cond_num}	F-count	Time (s)	Total Time (s)
2	5	193,89	459	3,068082	1.408,249519
2	10	205,44	332	2,788366	925,737435
2	15	392,98	485	2,663787	1.291,936903
2	20	222,63	609	2,587012	1.575,490036
3	5	115,66	332	2,551030	846,941908
3	10	367,53	409	2,513971	1.028,214129
3	15	261,72	182	2,614606	475,858331
3	20	178,86	551	2,549633	1.404,847983
4	5	110,36	419	2,716580	1.138,246861
4	10	653,17	562	2,200183	1.236,502806
4	15	298,37	551	2,777184	1.530,228454
4	20	294,57	459	2,628683	1.206,565489
5	5	273,08	598	2,434212	1.455,658659
5	10	520,55	1395	2,611457	3.642,982298
5	15	247,91	925	2,733891	2.528,849510
5	20	173,16	672	2,564070	1.723,055222

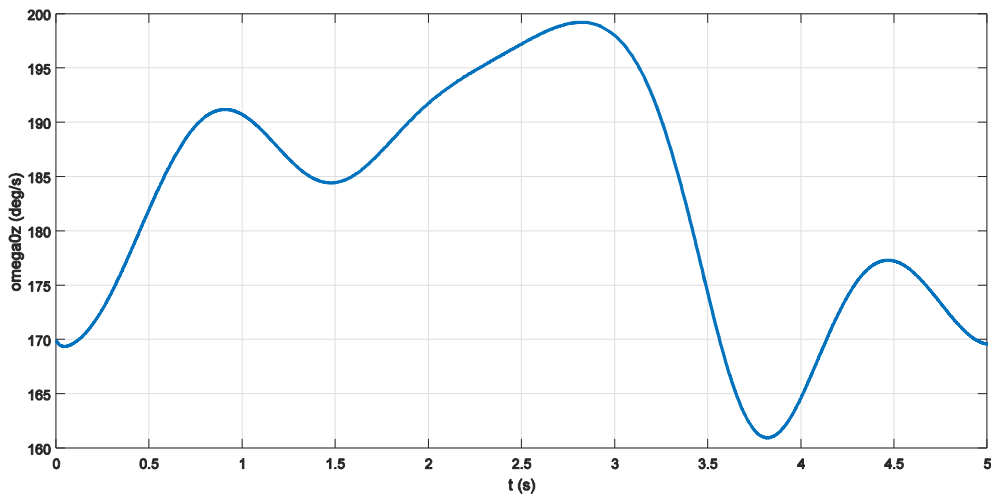
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω δεδομένα η βέλτιστη τροχιά προκύπτει για $m=4$, χρόνο πειράματος $t_f=5s$ και έχει ελάχιστο αριθμό ευαισθησίας $\min\{cond_num\}=110,36$. Ο συνολικός χρόνος για την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης για την ΤΡΟΧΙΑ 1 είναι 23419,4 s ή 6,505 hours, ενώ ο μέσος όρος ελάχιστου βαθμού ευαισθησίας ($AVERAGE(\min\{cond_num\})$) όλων των περιπτώσεων είναι 281,87. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται γραφικά οι χρονικές αποκρίσεις των γωνιακών θέσεων (Σχήμα 4-2) και ταχυτήτων (Σχήμα 4-3) των αρθρώσεων και της γωνιακής ταχύτητας της βάσης του ρομπότ (Σχήμα 4-4) για τη βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.



Σχήμα 4-3. Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.



Σχήμα 4-4. Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.



Σχήμα 4-5. Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1.

4.5 Αποτελέσματα εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 2

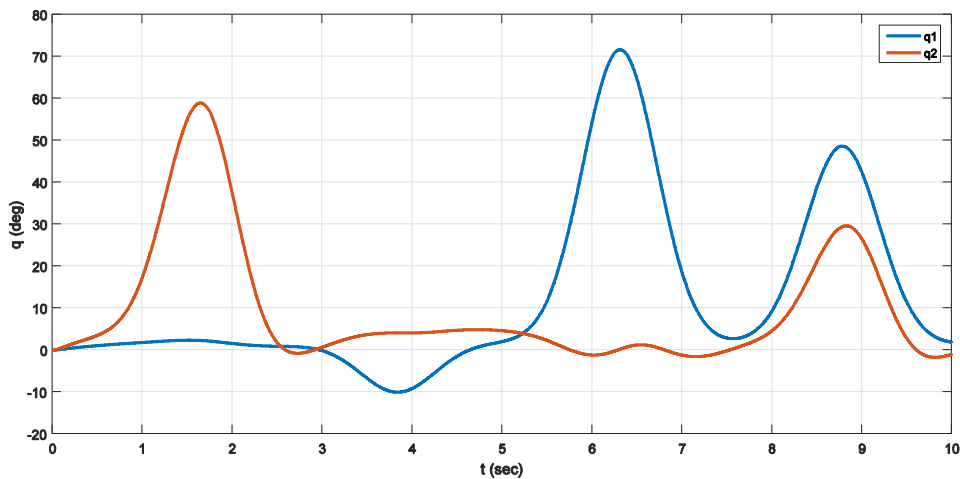
Όπως και στην περίπτωση της ΤΡΟΧΙΑΣ 1 στον Πίνακα 4-6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 2 για το διάστημα πρόβλημα.

Πίνακας 4-6. Αποτελέσματα διαδικασίας εύρεσης βέλτιστης ΤΡΟΧΙΑΣ 2.

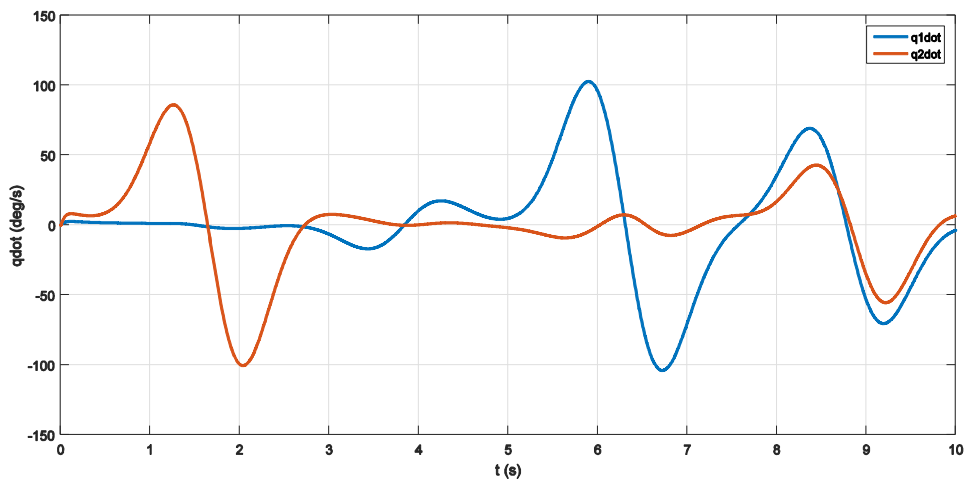
m	tfinal	min{cond_num}	F-count	Time (s)	Total Time (s)
2	5	984,02	1670	2,872407	4796,919
2	10	720,36	875	2,185424	1912,246
2	15	3.115,58	500	2,325950	1162,975
2	20	3.831,80	607	2,050735	1244,796
3	5	1.967,96	1213	1,941095	2354,548
3	10	688,54	475	2,702189	1283,540
3	15	474,45	1058	2,320870	2455,480
3	20	327,60	648	2,217465	1436,917

4	5	2.308,58	1161	2,132816	2476,200
4	10	434,07	570	1,962286	1118,503
4	15	835,03	401	2,418302	969,739
4	20	545,42	637	2,059432	1311,858
5	5	10.807,60	1087	3,094149	3363,340
5	10	113,32	1078	2,909912	3136,885
5	15	3.877,97	666	2,592985	1726,928
5	20	1.777,22	461	2,113446	974,299

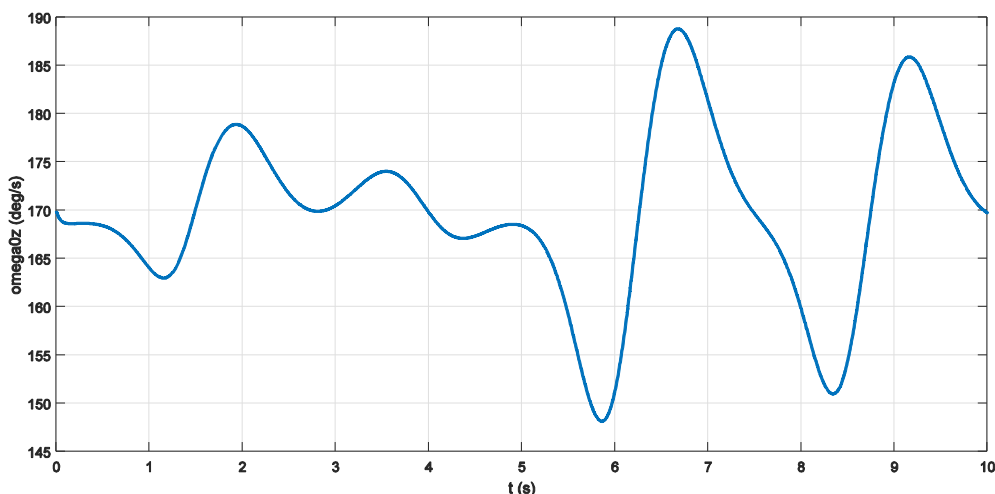
Η βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 προκύπτει για $m=5$, χρόνο πειράματος $t_f=10s$ και έχει ελάχιστο αριθμό ευαισθησίας $\min\{\text{cond_num}\}=113,32$. Ο συνολικός χρόνος για την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι 31725,2 s ή 8,813 hours, ενώ ο μέσος όρος ελάχιστου βαθμού ευαισθησίας ($\text{AVERAGE}(\min\{\text{cond_num}\})$) όλων των περιπτώσεων είναι 2050,59. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται γραφικά οι χρονικές αποκρίσεις των γωνιακών θέσεων (Σχήμα 4-5) και ταχυτήτων (Σχήμα 4-6) των αρθρώσεων και της γωνιακής ταχύτητας της βάσης του ρομπότ (Σχήμα 4-7) για τη βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.



Σχήμα 4-6. Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.



Σχήμα 4-7. Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.



Σχήμα 4-8. Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2.

4.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης αναγνώρισης παραμέτρων

Έχοντας προσδιορίσει τις δύο υποψήφιες τροχιές, δηλαδή εκείνες τις τροχιές που έχουν τον ελάχιστο αριθμό ευαισθησίας για κάθε είδος τροχιάς, ελέγχεται η αποτελεσματικότητά τους στην αναγνώριση του υπό μελέτη συστήματος. Όπως και στο τριδιάστατο πρόβλημα, συγκρίνονται οι τιμές των στοιχείων του διανύσματος των παραμέτρων (π) όπως προκύπτουν από την προσομοίωση του πειράματος της αναγνώρισης με τις αντίστοιχες θεωρητικές, μέσω των σχετικών και απόλυτων σφαλμάτων (Πίνακας 4-7). Όπως και στο τριδιάστατο πρόβλημα, οι παράμετροι του συστήματος αναγνωρίζονται σε θεωρητικό επίπεδο με πολύ μικρό σφάλμα.

Πίνακας 4-7. Αποτελέσματα προσομοίωσης αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 1&2.

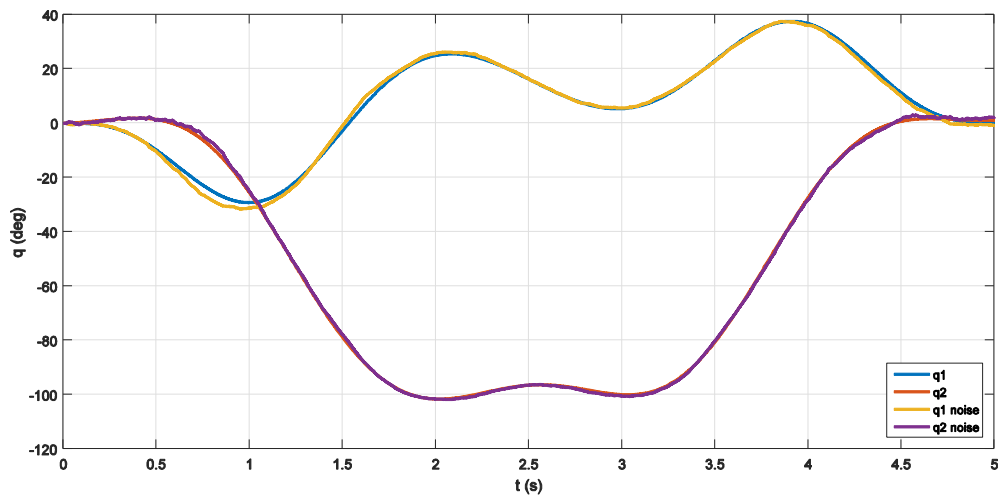
	θεωρητικό	ΤΡΟΧΙΑ 1			ΤΡΟΧΙΑ 2		
		αναγνώριση	error_rel	h_error_abs	αναγνώριση	error_rel	error_abs
$\pi 1$	0,0074	0,0074	3,22E-07	2,37E-09	0,0074	5,26E-07	3,87E-09
$\pi 2$	0,0046	0,0046	3,17E-07	1,46E-09	0,0046	1,05E-06	4,83E-09
$\pi 3$	0,0039	0,0039	6,15E-07	2,39E-09	0,0039	3,74E-08	1,46E-10
$\pi 4$	0,0024	0,0024	4,18E-07	1,02E-09	0,0024	5,75E-07	1,40E-09
$\pi 5$	0,1314	0,1314	4,22E-08	5,54E-09	0,1314	1,60E-08	2,11E-09
$\pi 6$	0,0048	0,0048	8,67E-08	4,18E-10	0,0048	6,37E-07	3,08E-09
$\pi 7$	0,0075	0,0075	1,01E-06	7,52E-09	0,0075	4,45E-07	3,32E-09
$\pi 8$	0,0046	0,0046	1,98E-06	9,16E-09	0,0046	3,59E-07	1,66E-09
rms	—	—	8,44E-07	4,82E-09	—	5,53E-07	2,91E-09

4.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης με θόρυβο

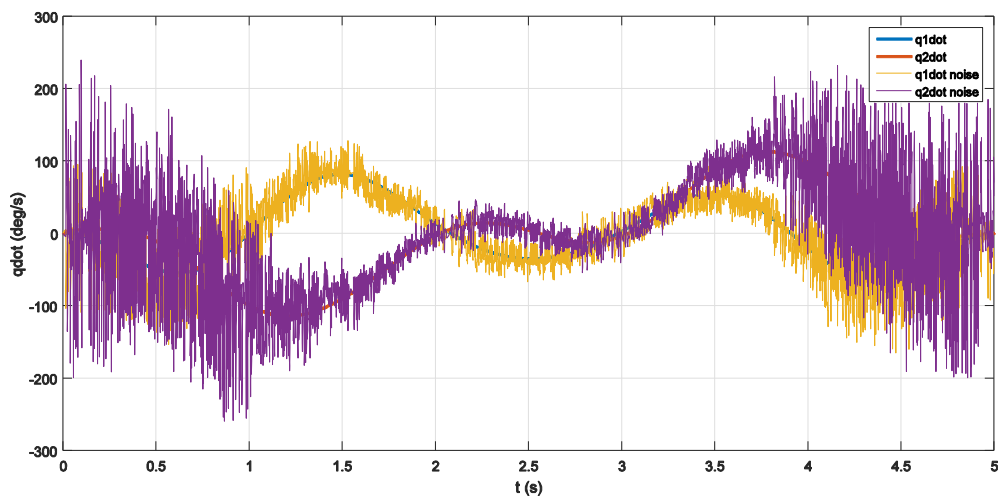
Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αναγνώρισης παραμέτρων με θόρυβο για την ΤΡΟΧΙΑ 1 (Πίνακας 4-8) και την ΤΡΟΧΙΑ 2 (Πίνακας 4-9), καθώς και οι αντίστοιχες χρονικές αποκρίσεις με και χωρίς θόρυβο.

Πίνακας 4-8. Αποτελέσματα αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 1 με θόρυβο.

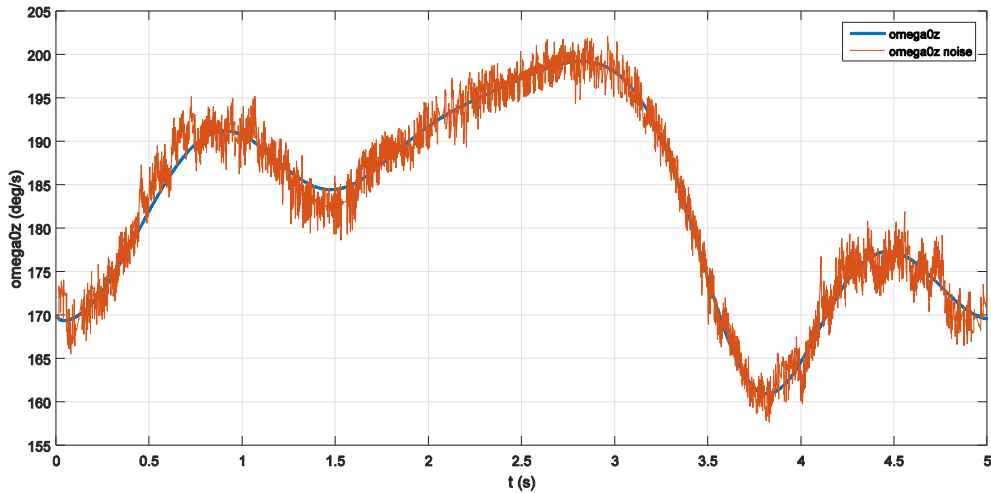
	θεωρητικό	ΤΡΟΧΙΑ 1		
		αναγνώριση	error_rel	error_abs
π1	0,0074	0,0027	1,72E+00	4,65E-03
π2	0,0046	0,0076	3,99E-01	3,04E-03
π3	0,0039	0,0066	4,12E-01	2,73E-03
π4	0,0024	0,0019	2,61E-01	5,02E-04
π5	0,1314	0,1468	1,05E-01	1,54E-02
π6	0,0048	0,0021	1,35E+00	2,77E-03
π7	0,0075	0,0094	2,06E-01	1,94E-03
π8	0,0046	-0,0057	-1,81E+00	1,03E-02
rms	—	—	1,03E+00	7,02E-03



Σχήμα 4-9. Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.



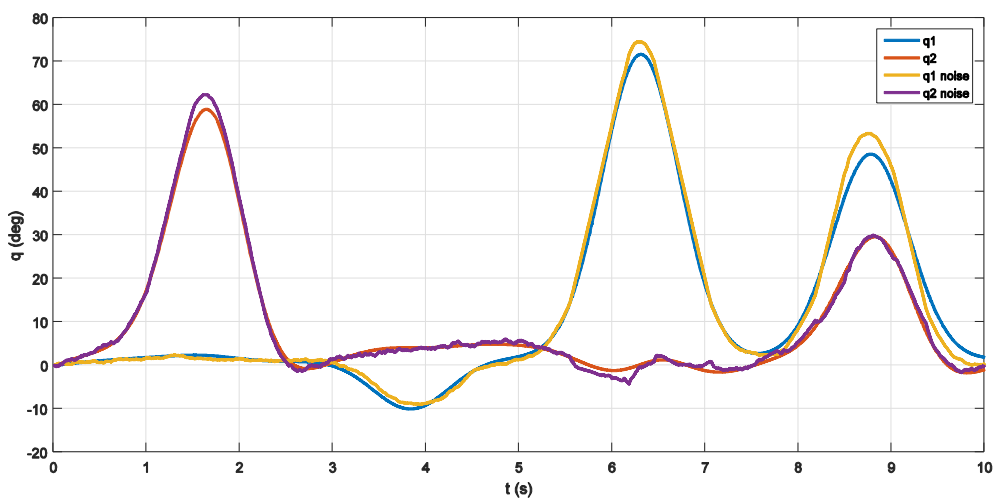
Σχήμα 4-10. Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.



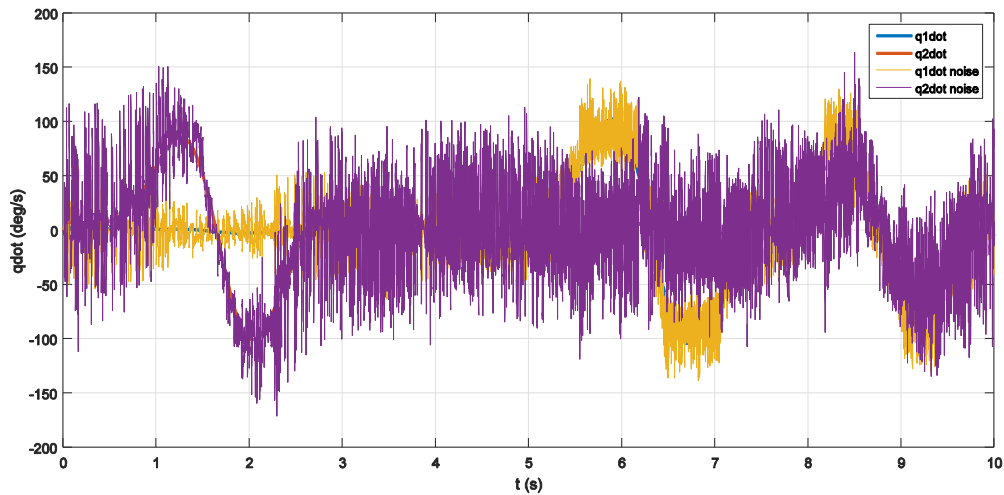
Σχήμα 4-11. Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 1 με και χωρίς θόρυβο.

Πίνακας 4-9. Αποτελέσματα αναγνώρισης παραμέτρων ΤΡΟΧΙΑΣ 2 με θόρυβο.

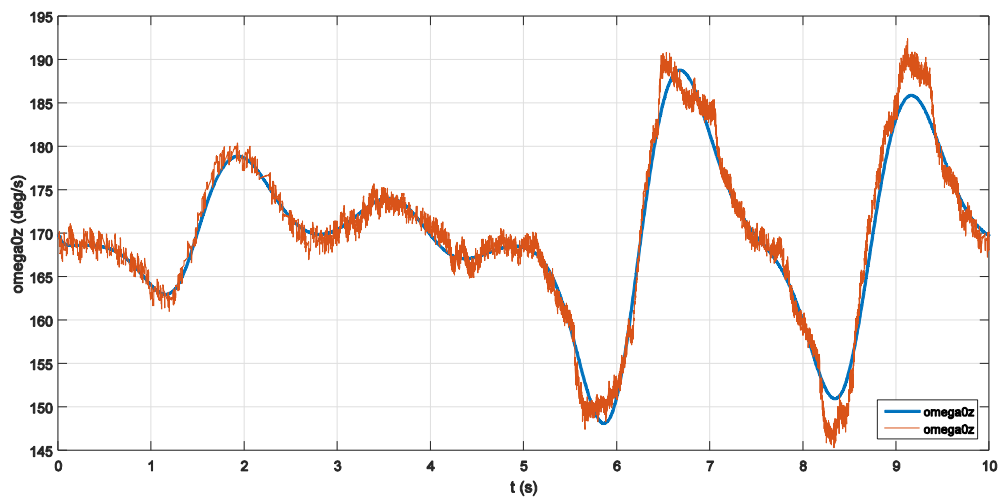
	θεωρητικό	ΤΡΟΧΙΑ 2		
		αναγνώριση	error_rel	error_abs
π1	0,0074	0,0166	0,56	9,25E-03
π2	0,0046	-0,0012	-4,93	5,76E-03
π3	0,0039	0,0126	0,69	8,69E-03
π4	0,0024	-0,0034	-1,72	5,80E-03
π5	0,1314	0,1358	0,03	4,41E-03
π6	0,0048	0,0041	0,18	7,51E-04
π7	0,0075	0,0001	56,93	7,33E-03
π8	0,0046	0,0025	0,86	2,14E-03
rms	—	—	20,22	6,19E-03



Σχήμα 4-12. Γωνιακή θέση αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.



Σχήμα 4-13. Γωνιακή ταχύτητα αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.



Σχήμα 4-14. Γωνιακή ταχύτητα βάσης συναρτήσει του χρόνου για βέλτιστη ΤΡΟΧΙΑ 2 με και χωρίς θόρυβο.

Από την ανάλυση, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέθοδος της αναγνώρισης παραμέτρων μπορεί να εφαρμοστεί και για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του επίπεδου προβλήματος. Τα δύο είδη τροχιών που προκύπτουν από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης επιτυγχάνουν περίπου ίδιο αριθμό ευαισθησίας του μητρώου \mathbf{Y} σε περίπου ίδιο συνολικό χρόνο με την ΤΡΟΧΙΑ 1 να έχει και πάλι χαμηλότερο μέσο όρο. Ωστόσο, καμία από τις δύο τροχιές δεν επιτυγχάνει πολύ χαμηλό αριθμό ευαισθησίας (μικρότερο από 10). Το γεγονός αυτό πιθανόν οφείλεται στα χαρακτηριστικά μεγέθη του ρομπότ και πιο συγκεκριμένα στο λόγο μάζας βάσης-βραχίονα. Η επίδραση της κίνησης του βραχίονα στην κίνηση της βάσης είναι τόσο εντονότερη όσο μικρότερος είναι ο λόγος μαζών τους. Στην περίπτωση του διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, η επίδραση αυτή είναι πολύ μικρή, καθώς ο βραχίονας που διαθέτει είχε σχεδιαστεί για τη μελέτη εργασιών ακριβείας και όχι για την εκτέλεση πειραμάτων

αναγνώρισης. Σε κάθε περίπτωση, οι δύο βέλτιστες τροχιές επιτυγχάνουν ικανοποιητική αναγνώριση των παραμέτρων του συστήματος, όταν το σήμα περιέχει θόρυβο από τον encoder, με την ΤΡΟΧΙΑ 1 να έχει σχετικό σφάλμα 1,03 και την ΤΡΟΧΙΑ 2 να έχει 20,22, δηλαδή περίπου 20 φορές μεγαλύτερο από την ΤΡΟΧΙΑ 1 (η αυξημένη τιμή του οποίου οφείλεται στο σφάλμα μόνο του στοιχείου π_7).

4.8 Ημιτονοειδείς τροχιές για χρήση στο πείραμα αναγνώρισης.

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκε η διαδικασία εύρεσης βέλτιστων τροχιών για την αναγνώριση δυναμικών παραμέτρων, με σκοπό τη χρήση τους στο πείραμα αναγνώρισης του επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου. Ωστόσο, φαίνεται στην πράξη ότι οι τροχιές αυτές δεν μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα καθώς ο χρόνος του πειράματος πρέπει να είναι πολύ μικρός, ώστε να μπορέσει να αγνοηθεί η επίδραση των μη μοντελοποιημένων τριβών. Επιπλέον η μικρή επίδραση που έχει η κίνηση του βραχίονα στην κίνηση της βάσης οδηγεί στη χρήση μη-βέλτιστων τροχιών, που όμως εκμεταλλεύονται όλο το διαθέσιμο εύρος γωνιακών θέσεων και ταχυτήτων, διεγείροντας με αυτό τον τρόπο έντονα τη δυναμική του συστήματος. Η αναλυτική μορφή των ημιτονοειδών τροχιών αυτών, που θα χρησιμοποιηθούν και στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας, είναι:

$$q_1(t) = 0,84 + 0,8723 \sin(1,5\omega_f t) \quad (4-14)$$

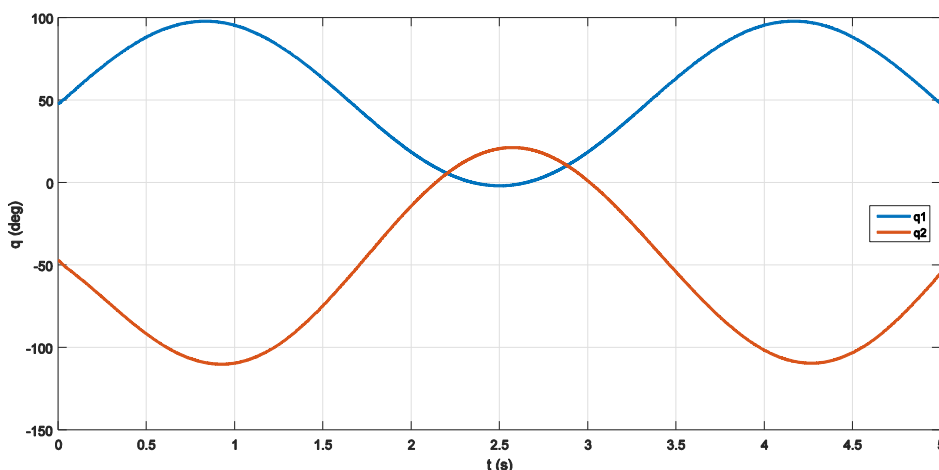
$$q_2(t) = -0,82 - 1,2992 \sin(1,5\omega_f t) \quad (4-15)$$

όπου q_1 και q_2 είναι η χρονική απόκριση της γωνιακής θέσης της πρώτης και της δεύτερης άρθρωσης του βραχίονα αντίστοιχα, ενώ

$$\omega_f = \frac{2\pi}{t_f} \quad (4-16)$$

όπου t_f ο χρόνος του πειράματος. Οι τιμές των συντελεστών επιλέγονται έτσι ώστε η κάθε άρθρωση να κινείται μέσα στα επιτρεπτά όρια, εκμεταλλευόμενη πλήρως όλο το διαθέσιμο εύρος κίνησης.

Στο Σχήμα 4-14 φαίνεται η χρονική απόκριση των γωνιακών θέσεων των δύο αρθρώσεων, όταν ο βραχίονας εκτελεί τις ημιτονοειδείς τροχιές αναγνώρισης που περιγράφηκαν παραπάνω.



Σχήμα 4-15. Ημιτονοειδείς τροχιές για χρήση στο πείραμα της αναγνώρισης.

Στον Πίνακα 4-10, που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της ημιτονοειδούς τροχιάς, όπως ο χρόνος πειράματος (t_f), τα σχετικά ($rms(error_rel)$) και απόλυτα σφάλματα ($rms(error_abs)$) της αναγνώρισης των παραμέτρων με και χωρίς θόρυβο, όταν γίνεται χρήση των τροχιών αυτών στην προσομοίωση.

Πίνακας 4-10. Χαρακτηριστικά ημιτονοειδούς τροχιάς.

tf (s)	5
cond_num	526,526
cond_num με θόρυβο	243,996
rms(error_rel)	0,011656
rms(error_abs)	0,000551
rms(error_rel) με θόρυβο	1,245784
rms(error_abs) με θόρυβο	0,031408

5 Πειραματική Διάταξη και Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στη χρήση διαστημικών εξομοιωτών για τον πειραματικό έλεγχο των διάφορων θεωριών που αναπτύσσονται σε ερευνητικό επίπεδο και αφορούν διαστημικά ρομποτικά συστήματα. Γίνεται εκτενής περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης και του ρομπότ “Cerberus” του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου και της διαδικασίας του πειράματος με σκοπό την αναγνώριση του δυναμικού του μοντέλου. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πείραμα αναγνώρισης του δυναμικού μοντέλου του συστήματος.

5.1 Διαστημικοί εξομοιωτές

Για την επιτυχία κάθε διαστημικής αποστολής μεγάλη σημασία έχει ο εκ των προτέρων σχεδιασμός και έλεγχος των διάφορων σταδίων της αποστολής. Ειδικά στην περίπτωση των πολύπλοκων εργασιών που περιλαμβάνονται σε μία ΟΟΣ αποστολή, είναι επιτακτική η ανάγκη ελέγχου των εφαρμοζόμενων μεθόδων και αλγορίθμων ελέγχου on-ground. Καθώς το κόστος για την εκτόξευση πραγματικών δορυφόρων σε τροχιά είναι πολύ μεγάλο, καθίσταται απαγορευτική η υλοποίηση πειραμάτων σε πραγματικές συνθήκες διαστήματος.

Η βασική προσέγγιση που έχει εφαρμοστεί και παρακάμπτει την παραπάνω τεχνική δυσκολία είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή εργαστηριακών εγκαταστάσεων που προσομοιώνουν τα βασικά χαρακτηριστικά του διαστημικού περιβάλλοντος (Space Emulators) [24]. Δύο είναι τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτουν οι διαστημικοί εξομοιωτές για την καλύτερη μοντελοποίηση ενός ελεύθερα αιωρούμενου (Free-Floating) ή ελεύθερα ιπτάμενου (Free-Flying) ΔΡΣ:

- 1) αντιστάθμιση της βαρύτητας σε ένα ή περισσότερα επίπεδα
- 2) ελευθερία κίνησης του ΔΡΣ σε όλες ή κάποιες διευθύνσεις χωρίς την εμφάνιση αντιστάσεων και τριβών

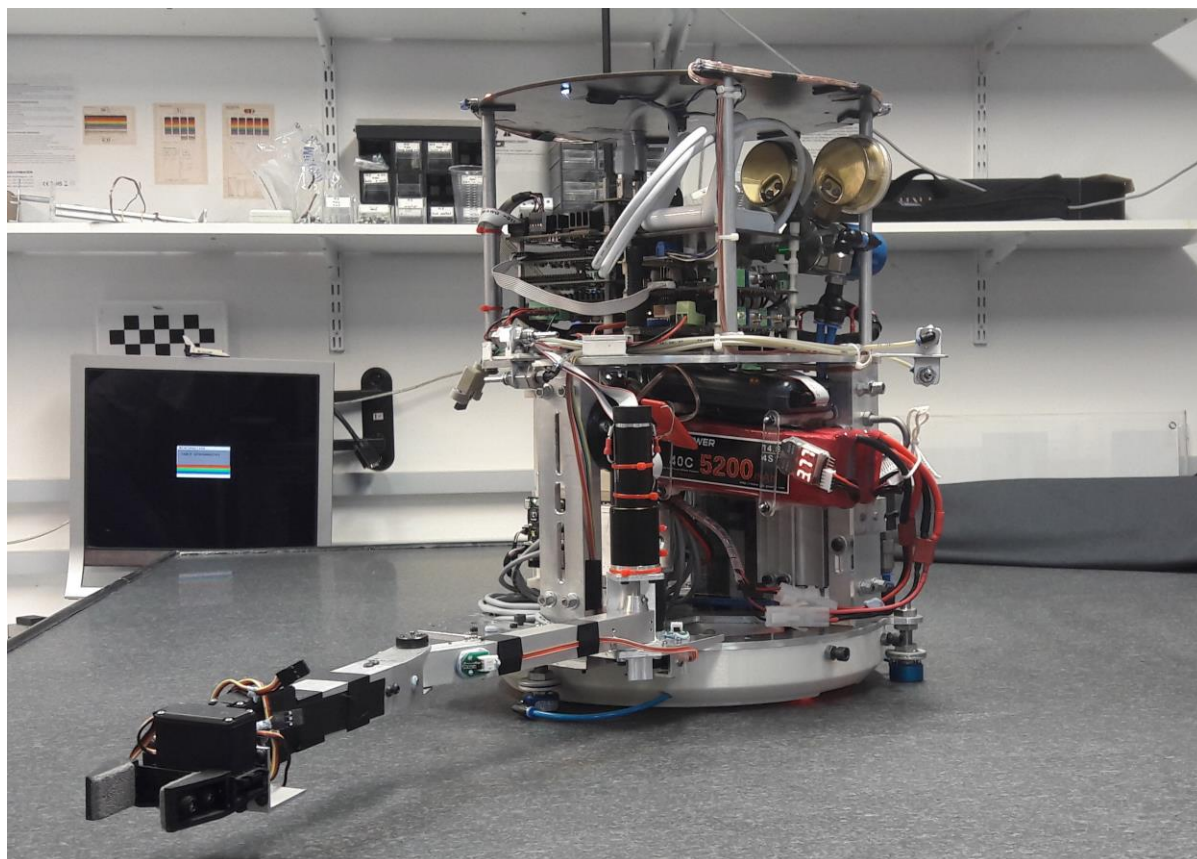
Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν σχεδιαστεί και υλοποιηθεί διάφορα είδη διαστημικών εξομοιωτών όπως συστήματα αιώρησης (Suspension Systems), παραβολική πτήση (Parabolic Flight), υποβρύχιες εγκαταστάσεις (Underwater facilities) και εγκαταστάσεις που αξιοποιούν αερόεδρανα (Air-Bearings Test Bed), όπως παρουσιάζονται συνοπτικά στο Παράρτημα Γ..

5.2 Ο Διαστημικός Εξομοιωτής του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου

Ο επίπεδος διαστημικός εξομοιωτής του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου αποτελείται από δύο αυτόνομα ρομπότ, τα οποία αιωρούνται με τη βοήθεια αεροεδράνων πάνω σε μία τράπεζα από γρανίτη. Η τράπεζα του γρανίτη στηρίζεται πάνω σε πόδια ρυθμιζόμενου ύψους, έχει βάρος περίπου 3.5tn και διαστάσεις 2.2m x 1.8m x 0.3m. Η πολύ μικρή τραχύτητα (μικρότερη των 5μm) επιτρέπει την κίνηση του ρομπότ χωρίς την εμφάνιση τριβών, ενώ η μεγάλη επιπεδότητα (κλίση μικρότερη από 0.01°) δίνει τη δυνατότητα εξομοίωσης της κίνησης ΔΡΣ στις δύο διαστάσεις χωρίς την επενέργεια του βάρους. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά συνδυαζόμενα επιτρέπουν την εξομοίωση της κίνησης ενός ελεύθερα αιωρούμενου ή ελεύθερα ιπτάμενου ΔΡΣ στις δύο διαστάσεις.

Ο διαστημικός εξομοιωτής του εργαστηρίου περιλαμβάνει δύο ρομπότ ένα παλαιότερης (“Cassiopeia”) και ένα νεότερης κατασκευής (“Cerberus”). Η πρωτοτυπία του διαστημικού εξομοιωτή

του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου έγκειται στο ότι τα ρομπότ είναι μικρής μάζας, χαμηλού κόστους, αλλά ταυτόχρονα πλήρως αυτόνομα και με υποσυστήματα αντίστοιχα ενός πραγματικού διαστημικού ρομποτικού συστήματος. Η περιγραφή που ακολουθεί αφορά, κυρίως, το καινούριο ρομπότ “Cerberus”, του οποίου η αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική.

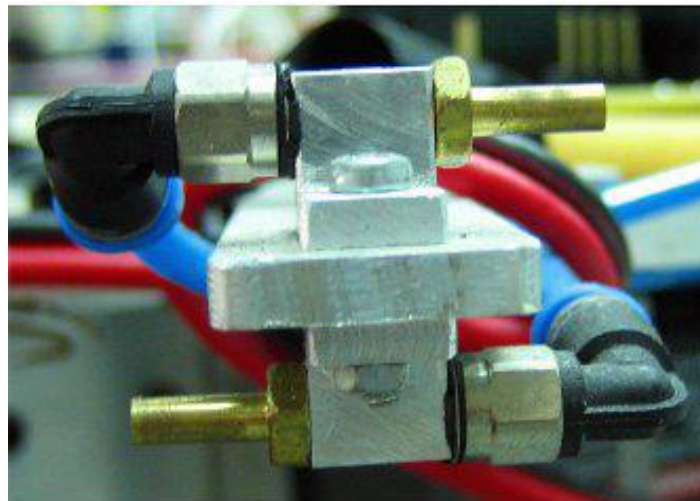


Σχήμα 5-1. Το ρομπότ “Cerberus” του διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου.

5.2.1 Μηχανικό - Πνευματικό σύστημα

Λαμβάνοντας υπόψιν τις ανάγκες αντοχής, στιβαρότητας και κατεργασιμότητας, το πλαίσιο του ρομπότ είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο, πάνω στο οποίο εδράζονται τα διάφορα υποσυστήματα του ρομπότ. Η αιώρηση του ρομπότ πάνω στην τράπεζα του γρανίτη επιτυγχάνεται με τρία αεροστατικά αεροέδρανα τα οποία είναι περιφερειακά τοποθετημένα ανά 120° στο κάτω μέρος της βάσης. Τα αεροέδρανα είναι κατασκευασμένα από πορώδη γραφίτη, έχουν διάμετρο 25mm και με το CO_2 που διοχετεύεται μέσω αυτών επιτυγχάνεται η δημιουργία στρώματος αέρα μεταξύ ρομπότ και τράπεζας πάχους 10 μm . Η τροφοδοσία των αεροεδράνων γίνεται μέσω φιάλης CO_2 η οποία είναι κεντρικά τοποθετημένη στη βάση του ρομπότ, ζυγίζει γεμάτη 1500gr και βρίσκεται υπό πίεση 60bar (στους 20°C). Η ίδια φιάλη τροφοδοτεί με CO_2 και τα τρία ζεύγη προωθητήρων (thrusters), τα οποία είναι επίσης περιφερειακά τοποθετημένα στο πλαίσιο του ρομπότ ανά 120° . Κάθε ζεύγος αποτελείται από δύο αντίρροπα τοποθετημένα ακροφύσια και η εκροή τους ελέγχεται από ηλεκτροβαλβίδες επιτρέποντας έτσι την επενέργεια στη θέση και το προσανατολισμό του ρομπότ. Η κατανάλωση του

CO₂ καθορίζει και την αυτονομία του ρομπότ και επομένως και το μέγιστο χρόνο συνεχόμενων πειραμάτων.



Σχήμα 5-2. Αντίρροπα ακροφύσια προωθητικού συστήματος.

Με σκοπό την εξοικονόμηση αερίου και επομένως την αύξηση της αυτονομίας του ρομπότ, η βάση διαθέτει επιπλέον έναν σφόνδυλο αντίδρασης (reaction wheel), ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του προσανατολισμού της βάσης του ρομπότ (attitude control) [28]. Λόγω της έλλειψης τριβής μεταξύ του ρομπότ και της τράπεζας του γρανίτη, η περιστροφή του σφονδύλου αντίδρασης μέσω του ηλεκτροκινητήρα του έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφή της βάσης με αντίθετη φορά κάθετα στο επίπεδο κίνησης.

Οι σφόνδυλοι αντίδρασης αποτελούν μεθόδους ελέγχου του προσανατολισμού και η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή διατήρησης της στροφορμής. Όταν παρουσιαστεί η ανάγκη αλλαγής της στροφορμής του ρομπότ, η στροφορμή του σφονδύλου (H_{rw}) μεταβάλλεται και προκειμένου η στροφορμή του συστήματος ρομπότ-σφονδύλου να διατηρηθεί στην αρχική της τιμή (H_r), το ρομπότ μεταβάλλει κατάλληλα τη στροφορμή του.

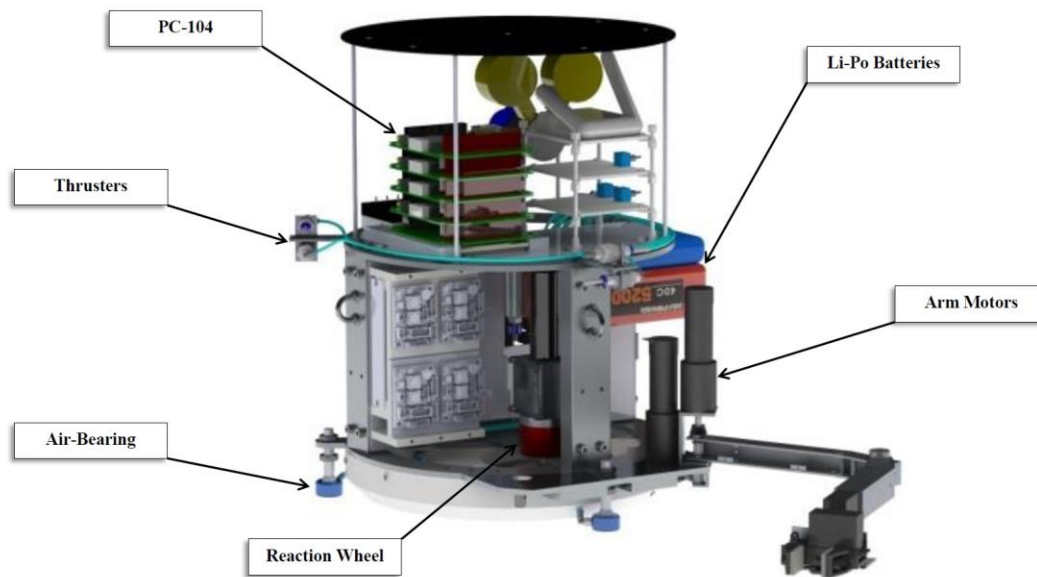
$$H_1 = H_2 \Rightarrow H_r = H_r + \Delta H_{rw} + H_{rw} \quad (5-1)$$



Σχήμα 5-3. Σφόνδυλος αντίδρασης του ρομπότ “Cepheus”.

5.2.2 Ηλεκτρικό σύστημα

Η αυτονομία που προσφέρει στην πειραματική διάταξη η χρήση του σφονδύλου αντίδρασης εξαρτάται μόνο από την αυτονομία των μπαταριών, σε αντίθεση με την πραγματική περίπτωση όπου ο σφόνδυλος αντίδρασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς περιορισμούς αξιοποιώντας την θεωρητικά απεριόριστη ενέργεια που παρέχεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα του διαστημικού συστήματος.



Σχήμα 5-4. Μοντέλο CAD του ρομπότ Cerpheus με τα βασικά του μέρη.

Η ηλεκτρική ενέργεια απαραίτητη για τη λειτουργία των διάφορων υποσυστημάτων του ρομπότ παρέχεται από δύο επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου-πολυμερούς (LiPo) με 4 κυψέλες η κάθε μία, οι οποίες εξασφαλίζουν και την επιθυμητή ενεργειακή αυτονομία του ρομπότ. Ο διαμοιρασμός της ηλεκτρικής ισχύος γίνεται σε δύο επίπεδα με την ύπαρξη δύο ανεξάρτητων κυκλωμάτων: ένα υψηλής τάσης, που τροφοδοτεί τις ηλεκτροβαλβίδες και τους ηλεκτροκινητήρες και ένα χαμηλής, το οποίο καλύπτει τις ανάγκες του υπολογιστικού συστήματος. Η μεταβίβαση της ηλεκτρικής ενέργειας από της μπαταρίες στα υποσυστήματα του ρομπότ γίνεται με δύο dc-dc converters, έναν για το κύκλωμα υψηλής και ένα για το κύκλωμα χαμηλής τάσης.

5.2.3 Υπολογιστικό σύστημα - ROS

Το υπολογιστικό σύστημα του ρομπότ δομείται γύρω από μία κεντρική υπολογιστική μονάδα PC-104. Πρόκειται για ένα Single Board Computer (SBC), δηλαδή μία υλοποίηση υπολογιστικού συστήματος που περιλαμβάνει έναν επεξεργαστή, μνήμη, αναλογικές και ψηφιακές εισόδους/εξόδους που υποστηρίζουν διάφορους τρόπους επικοινωνίας (π.χ. μέσω δικτύου) ενώ έχει τη δυνατότητα σύνδεσης στις κλασικές περιφερειακές μονάδες ενός Η/Υ (π.χ. οθόνη). Το βασικό πλεονέκτημα αυτή της προσέγγισης στην ανάπτυξη ρομποτικών εφαρμογών είναι η αξιοπιστία και η ευκολία στη χρήση

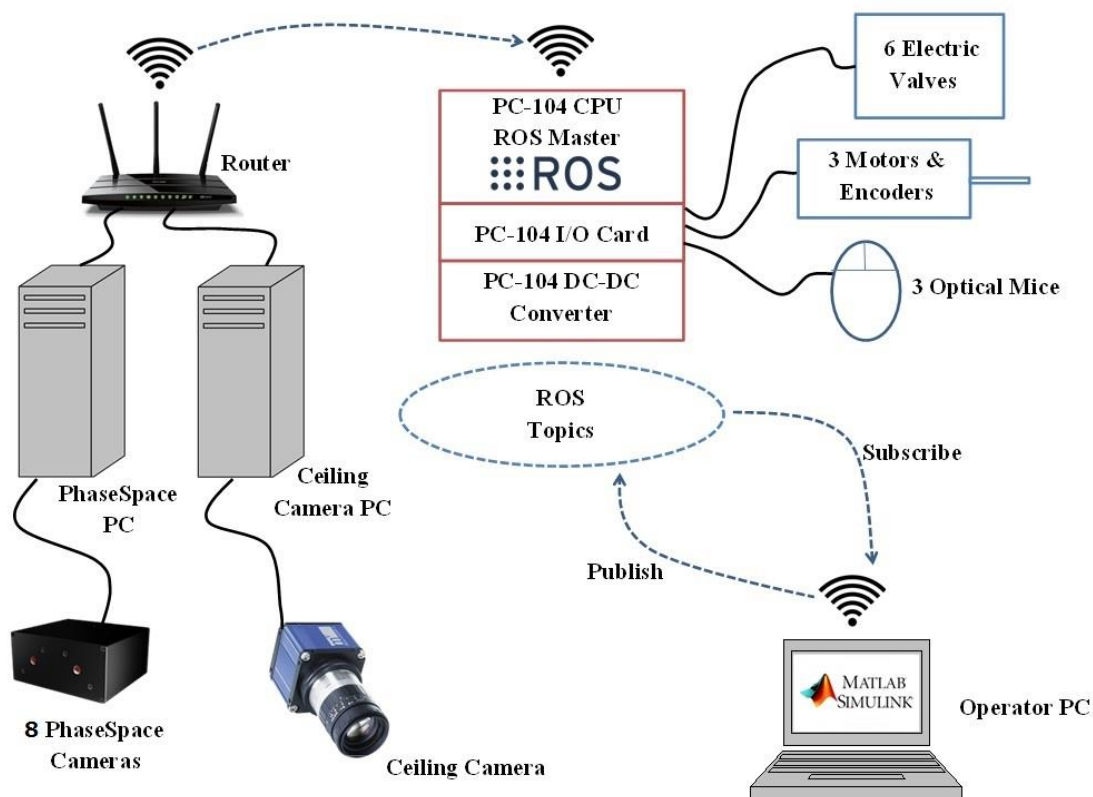
που παρέχει ένα υπολογιστής με εγκατεστημένο λειτουργικό σύστημα (π.χ. Linux). Στην κεντρική μονάδα του PC-104 προστίθενται η κάρτα ψηφιακών εισόδων/εξόδων, οι κάρτες παροχής ισχύος και όλα τα υπόλοιπα απαραίτητα ηλεκτρονικά.

Στο PC-104 είναι εγκατεστημένο το λειτουργικό περιβάλλον Ubuntu στο οποίο είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Robotic Operating System (ROS), το οποίο αποτελεί open-source λογισμικό με έτοιμες βιβλιοθήκες και εργαλεία απαραίτητα για την ανάπτυξη και υλοποίηση ρομποτικών εφαρμογών. Στο PC-104 του «Κηφέα» είναι εγκατεστημένη η 8η έκδοση ROS Indigo, ενώ πλέον υπάρχει διαθέσιμη η 11η έκδοση ROS Lunar Loggerhead για Ubuntu Xenial, Yakkety and Zesty. Όλο το λογισμικό που παρέχεται και λειτουργεί στα πλαίσια του ROS οργανώνεται σε πακέτα (packages), τα οποία αποτελούν ολοκληρωμένες συλλογές αρχείων που εξυπηρετούν έναν συγκεκριμένο σκοπό και γενικά περιλαμβάνουν τόσο εκτελέσιμα όσο και υποστηρικτικά αρχεία. Η λειτουργία κάθε ROS package στηρίζεται στην έννοια των κόμβων (nodes), καθένας από τους οποίους εκτελεί ανεξάρτητα κάποια υποεργασία του συνολικού προγράμματος και περιλαμβάνει κώδικα γραμμένο σε C++, και των θεμάτων (topics) στα οποία δημοσιεύουν (publish) μηνύματα (messages) κάποιοι κόμβοι και άλλοι διαβάζουν δεδομένα (subscribe). Το κομμάτι του ROS, που επιτρέπει τον συγχρονισμό και την επικοινωνία των διάφορων κόμβων ενός πακέτου, ονομάζεται ROS Master. Η βασική ιδέα είναι ότι ο node που θέλει να μοιραστεί κάποια πληροφορία θα κάνει publish ένα μήνυμα στο κατάλληλο ή στα κατάλληλα topic, ενώ ο node που θέλει να λάβει κάποια πληροφορία θα κάνει subscribe στα topic που τον αφορούν. Με αυτόν τον τρόπο η λειτουργία ενός κόμβου είναι πλήρως αποσυσζευγμένη από τη λειτουργία των υπολοίπων. Σε αυτό το πλαίσιο, ο ROS Master φροντίζει ώστε οι publishers και οι subscribers να μπορούν να βρουν ο ένας τον άλλον. Ένα άλλο πολύ σημαντικό στοιχείο της χρήσης πακέτων του ROS είναι τα λεγόμενα launch files. Ένα launch file είναι υπεύθυνο για την εκκίνηση του ROS Master και όλων των κόμβων, που χρειάζονται κατά τη λειτουργία του προγράμματος. Τέλος, αναφέρεται το εργαλείο rosbag, το οποίο δίνει τη δυνατότητα καταγραφής και αναπαραγωγής μηνυμάτων που έχουν γίνει publish στα διάφορα topic του προγράμματος. Τα μηνύματα αυτά αποθηκεύονται συναρτήσει του χρόνου του πειράματος σε ειδικής μορφής αρχεία τα bag files, από τα οποία μπορούμε να ανακτήσουμε δεδομένα του πειράματος που μας ενδιαφέρουν, με σκοπό την παρουσίαση ή την περαιτέρω off-line επεξεργασία τους.

Συνήθως η ανάπτυξη και αξιολόγηση των αλγορίθμων που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα πείραμα καθώς και η προσομοίωσή του γίνονται με τη χρήση Matlab και Simulink (Mathworks). Πολύ πρόσφατα και δεδομένης της ευρείας χρήσης του ROS για την ανάπτυξη ρομποτικών εφαρμογών, έγινε δυνατή η συνεργασία των πακέτων Mathworks με το ROS. Γίνεται με αυτόν, τον τρόπο, εφικτή η επικοινωνία του Matlab και του Simulink με το ROS και επομένως η ανάγνωση και αποστολή μηνυμάτων ROS. Η αρχιτεκτονική αυτή δίνει τη δυνατότητα να δώσουμε εντολές στο πραγματικό ρομπότ μέσω εξωτερικού υπολογιστή, μέσω ασύρματης σύνδεσης wifi με το ρομπότ, χρησιμοποιώντας κατάλληλα publish/subscribe-blocks στο Simulink. Παράλληλα, διευκολύνεται η απευθείας επεξεργασία και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων με χρήση των εργαλείων του Matlab, καθώς υπάρχει η δυνατότητα τα δεδομένα να αποθηκεύονται σε m files αντί για bag files.

Μέσω της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας γίνεται ο έλεγχος των κινητήρων των τριών επενεργητών με τη βοήθεια τριών servoamplifiers. Η ανάδραση των κινητήρων επιτυγχάνεται με έναν

incremental encoder σε κάθε κινητήρα, από όπου προκύπτουν οι τιμές της θέσης και της γωνιακής ταχύτητας. Τέλος, η αρχικοποίηση της θέσης του βραχίονα επιτυγχάνεται με δύο hall sensors τοποθετημένους σε κατάλληλα σημεία.



Σχήμα 5-5. Σχηματική απεικόνιση της επικοινωνίας των μερών της πειραματικής εγκατάστασης.

5.2.4 Σύστημα παρακολούθησης θέσης

Ο ρομποτικός διαστημικός εξομοιωτής του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου ολοκληρώνεται με το σύστημα παρακολούθησης της θέσης και του προσανατολισμού του ρομπότ. Η γνώση της θέσης και του προσανατολισμού του ρομπότ είναι απαραίτητα για να μπορέσουμε να επενεργήσουμε πάνω στο σύστημά μας και επομένως να κλείσουμε το βρόχο ελέγχου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- 1) Με χρήση ψηφιακής κάμερας τοποθετημένης στην οροφή πάνω από την επιφάνεια του γρανίτη (ceiling camera), όπου κινείται ο διαστημικός εξομοιωτής. Πρόκειται για την κάμερα mVBlueFOX-124G της MATRIX VISION με αισθητήρα τύπου CCD, απεικόνιση στην κλίμακα του γκρι με μέγεθος στοιχείου 8 bits, ανάλυσης 1600x1200 εικονοστοιχείων και ρυθμού λήψης 8 fps. Η κάμερα αυτή λαμβάνει διαδοχικά στιγμιότυπα κατά την κίνηση του ρομπότ πάνω στο γρανίτη και με κατάλληλη επεξεργασία αυτών των στιγμιότυπων είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης και του προσανατολισμού του διαστημικού εξομοιωτή. Η αναγνώριση της θέσης του ρομπότ γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλης διάταξης διόδων εκπομπής φωτός (LED) τοποθετημένων στο πάνω μέρος του ρομπότ. Η μέθοδος αυτή είναι

γνωστή ως οπτική οδήγηση κλειστού βρόχου μέσω οπτικής ανάδρασης θέσης (visual servoing) και προσδιορίζει τη θέση του ρομπότ στο απόλυτο σύστημα συντεταγμένων. Η λειτουργία της είναι ανάλογη με τον υπολογισμό της θέσης των πραγματικών δορυφόρων με σύστημα οπτικής αναγνώρισης αστερισμών. Η κάμερα είναι συνδεδεμένη (πρωτόκολλο επικοινωνίας USB 1.1/2.0) με υπολογιστή (Ceiling Camera PC), ο οποίος διαθέτει το κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας εικόνας και είναι συνδεδεμένος με router, επιτρέποντας έτσι την ασύρματη επικοινωνία με το PC-104 του ρομπότ [29].

- 2) Με χρήση οπτικών αισθητήρων ποντικιών. Πρόκειται για τρία ποντίκια τοποθετημένα σε γνωστές θέσεις κάτω από το ρομπότ, χωρίς φυσικά να έρχονται σε επαφή με την τράπεζα του γρανίτη. Τα ποντίκια αυτά δεν ελέγχονται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του PC-104, αλλά λειτουργούν αυτόνομα με έναν μικροελεγκτή για το κάθε ένα (πλατφόρμα Arduino UNO), με τον οποίο επικοινωνούν με πρωτόκολλο PS/2. Οι μικροελεγκτές Arduino είναι υπεύθυνοι για τη σύνδεση, τη συλλογή και τελικά τη μεταφορά των δεδομένων από τους οπτικούς αισθητήρες απευθείας στο PC-104 του ρομπότ και δίνουν, με αυτόν τον τρόπο, τη σχετική κίνηση του ρομπότ (κίνηση στο σχετικό σύστημα αναφοράς). Το βασικό μειονέκτημα των οπτικών αισθητήρων είναι ότι το σφάλμα τους συσσωρεύεται και επομένως η λειτουργία τους πρέπει να συνδυαστεί με αυτό του εξωτερικού συστήματος υπολογισμού θέσης.
- 3) Με χρήση συστήματος καταγραφής κίνησης (motion capturing) PhaseSpace. Η υλοποίηση αυτού του συστήματος επιτυγχάνεται με 8 κάμερες (PhaseSpace Cameras) τοποθετημένες περιφερειακά της τράπεζας του γρανίτη, οι οποίες καταγράφουν τη θέση στο χώρο των δεικτών (markers) που είναι τοποθετημένοι πάνω στο ρομπότ. Ως δείκτες χρησιμοποιούνται LED, που εκπέμπουν σε μία διαφορετική συχνότητα το κάθε ένα, σε μία καλώς ορισμένη διάταξη πάνω στο ρομπότ. Οι κάμερες συνδέονται με υπολογιστή (PhaseSpace PC), ο οποίος διαθέτει το κατάλληλο λογισμικό τεχνητής όρασης και οπτικής ανάδρασης και συνδέεται με το Router της εγκατάστασης επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την ασύρματη επικοινωνία με το PC-104 του "Cepheus". Πριν την έναρξη κάθε πειραματικής διαδικασίας είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση (calibration) του χώρου διεξαγωγής του πειράματος και ο ορισμός της αρχής του συστήματος αναφοράς και των αξόνων πάνω στην τράπεζα του γρανίτη. Το σύστημα αυτό έχει σχεδιαστεί με σκοπό τη βαθμονόμηση και τον έλεγχο της ακρίβειας του αρχικού συστήματος οπτικής ανάδρασης αποτελούμενου από την Ceiling Camera και τους οπτικούς αισθητήρες των ποντικιών. Τελικός στόχος είναι να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες δραστηριότητες του εργαστηρίου, αν και στις τρέχουσες πειραματικές εργασίες αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του διαστημικού εξομοιωτή, λόγω της ευκολίας χρήσης και της υψηλής ακρίβειας που παρέχει.

5.3 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Για να πραγματοποιηθεί το πείραμα της αναγνώρισης του δυναμικού μοντέλου του διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, πρέπει πρώτα να εισαχθεί στροφορμή στο σύστημα και στη συνέχεια να εκτελέσουν οι αρθρώσεις του βραχίονα κατάλληλες τροχιές αναγνώρισης. Κατά τη διάρκεια της κίνησης των αρθρώσεων οι γωνιακές τους θέσεις καθώς και ο προσανατολισμός της βάσης καταγράφονται από τους encoder των κινητήρων και το σύστημα PhaseSpace αντίστοιχα. Διαφορίζοντας, στη συνέχεια, ως προς το χρόνο προκύπτουν οι γωνιακές ταχύτητες των αρθρώσεων και της βάσης. Στη συνέχεια, επιλέγονται N μετρήσεις από τα σήματα των γωνιακών θέσεων και ταχυτήτων των αρθρώσεων και από τη γωνιακή ταχύτητα της βάσης, οι οποίες εισάγονται off-line στον κώδικα αναγνώρισης προσδιορίζοντας με αυτό τον τρόπο τις τιμές του διανύσματος των παραμέτρων π . Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα έχει, πλέον, αναγνωριστεί και τα μητρώα του δυναμικού του μοντέλου μπορούν να ανακατασκευαστούν βάσει των γνωστών πλέον παραμέτρων.

Ο έλεγχος του σφονδύλου αντίδρασης και των κινητήρων των αρθρώσεων πραγματοποιείται με το έτοιμο πακέτο του ROS, το οποίο ονομάζεται `ros_control`. Το πακέτο αυτό παίρνει ως είσοδο τα δεδομένα για τη γωνιακή θέση της άρθρωσης από τον encoder του επενεργητή. Στη συνέχεια χρησιμοποιεί έναν γενικό νόμο ελέγχου με ανάδραση, συνήθως έλεγχο PID, για να καθορίσει την έξοδό του, που στη γενική περίπτωση είναι ροπή κινητήρα (effort). Το πακέτο `ros_control` παρέχει διάφορα `control plugins`, όπως `velocity_controllers`, `effort_controllers` κ.ά. Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας για την αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν `effort_controllers`.

Κατά την έναρξη του πειράματος, επιβάλλεται σταθερή ταχύτητα περιστροφής του συστήματος μέσω του σφονδύλου αντίδρασης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός PI ελεγκτή ταχύτητας (velocity controller) στη γωνιακή ταχύτητα του σφονδύλου, επιτυγχάνοντας έτσι την επιθυμητή σταθερή σχετική ταχύτητα περιστροφής του ως προς τη βάση του ρομπότ. Η γωνιακή ταχύτητα του συστήματος όταν ο σφόνδυλος αντίδρασης φτάσει την επιθυμητή σχετική ταχύτητα είναι

$$h_{CM} = I_{rw} \omega_{rw/des} \quad (5-2)$$

όπου I_{rw} είναι η ροπή αδράνειας του σφονδύλου αντίδρασης ως προς τον άξονα συμμετρίας του, η τιμή του οποίου είναι γνωστή από παλαιότερη μοντελοποίηση και λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη της θεωρητικής μελέτης ($I_{rw} = 0,00197372 \text{kg} \cdot \text{m}^2$). Λαμβάνοντας υπόψιν τις δυνατότητες της πειραματικής μας διάταξης η επιθυμητή σχετική γωνιακή ταχύτητα του σφονδύλου αντίδρασης είναι $\omega_{rw/des} = 170 \text{rad} / \text{s}$. Επομένως, η στροφορμή του συστήματος θα είναι $h_{cm} = 0,3355 \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}$.

Μόλις το ρομπότ έχει αποκτήσει σταθερή στροφορμή, οι δύο αρθρώσεις του βραχίονα αρχίζουν την εκτέλεση των τροχιών τους. Για το σκοπό αυτό φορτώνεται στο ROS ένας ελεγκτής θέσης PD για κάθε μία από τις δύο αρθρώσεις (`effort_controllers/joint_position_controllers`) και η επιθυμητή γωνιακή θέση για κάθε άρθρωση δημοσιεύεται (`publish`) συναρτήσει του χρόνου από το Simulink του Operator PC στο κατάλληλο `topic` του ROS.

Μία σημαντική διαφοροποίηση της πειραματικής διαδικασίας σε σχέση με τη θεωρητική προσέγγιση είναι η ύπαρξη μη μοντελοποιημένων στα πλαίσια της προσομοίωσης τριβών, τόσο μεταξύ του σφονδύλου αντίδρασης και των εδράνων του αλλά κυρίως μεταξύ της βάσης του ρομπότ και του γρανίτη. Οι τριβές από την επιφάνεια του γρανίτη είναι αεροδυναμικής φύσεως, καθώς δεν

υπάρχει επαφή μεταξύ των δύο επιφανειών, και η επίδρασή τους ενισχύεται από την αύξηση της τραχύτητας του γρανίτη με την πάροδο του χρόνου λόγω των πολλών πειραμάτων που έχουν εκτελεστεί στον διαστημικό εξομοιωτή. Με γνώμονα την απόκτηση όσο το δυνατόν καλύτερων αποτελεσμάτων από την πειραματική αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων στα πλαίσια της παρούσας μοντελοποίησης, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία βέλτιστη τροχιά. Αντιθέτως, η τροχιά αναγνώρισης θα πρέπει να εκτελεστεί σε μεγάλη ταχύτητα περιστροφής του ρομπότ και σε σημαντικά μικρό χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να μπορεί να αμεληθεί η επίδραση της τριβής από την επιφάνεια του γρανίτη. Για το λόγο αυτό οι τροχιές αναγνώρισης, που εκτελούνται ως μέρος του πειράματος, είναι ημιτονοειδείς, διάρκειας $t_f = 5s$. Ο αριθμός των μετρήσεων επιλέγεται ίσος με $N = 29$.

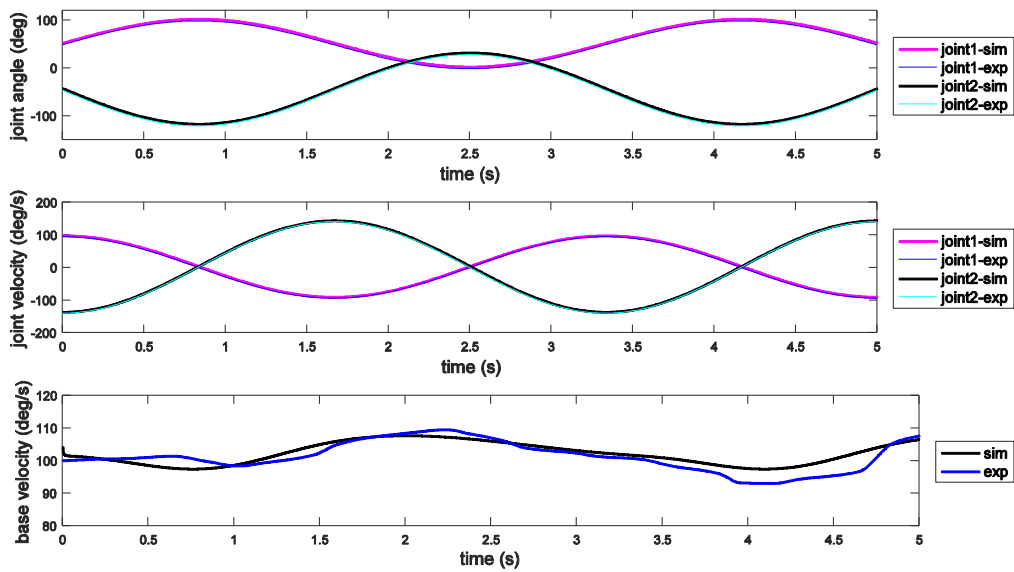
5.4 Αποτελέσματα πειράματος αναγνώρισης δυναμικών παραμέτρων

Οι πειραματικά προσδιορισμένες παράμετροι του επίπεδου διαστημικού εξομοιωτή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, αρκούν για την πλήρη ανακατασκευή του δυναμικού μοντέλου του συστήματος. Στον Πίνακα 5-1, που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι τιμές των στοιχείων του διανύσματος π , όπως προκύπτουν από την πειραματική αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων. Η γνώση του διανύσματος αυτού, ισοδυναμεί με πλήρη γνώση των μητρών της δυναμικής εξίσωσης του συστήματος.

Πίνακας 5-1. Αναγνωρισμένες πειραματικά παράμετροι του συστήματος

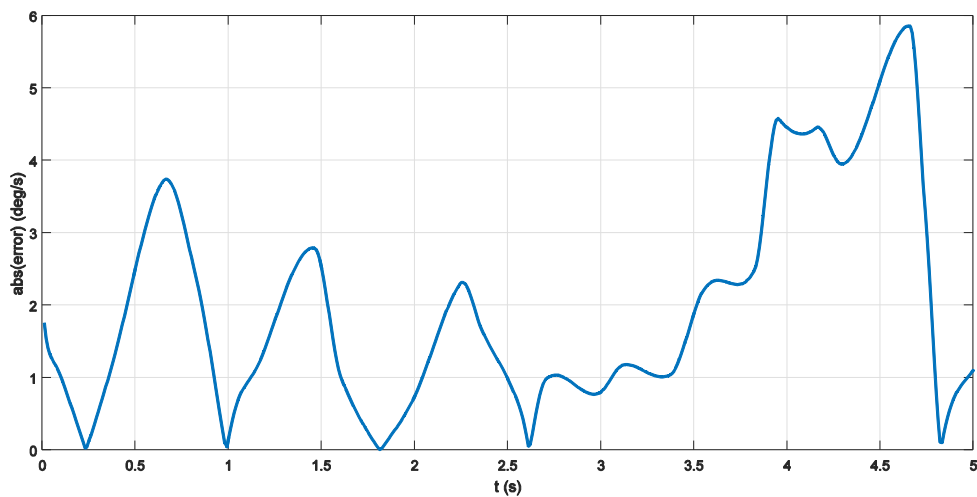
π_1	-0,0125
π_2	-0,0357
π_3	-0,0035
π_4	-0,0135
π_5	0,2268
π_6	0,0096
π_7	0,0092
π_8	0,0288

Καθώς δεν γνωρίζουμε τις πραγματικές τιμές των παραμέτρων του συστήματος (ο προσδιορισμός τους άλλωστε είναι ο σκοπός της πειραματικής αναγνώρισης παραμέτρων), ένας τρόπος για να επαληθεύσουμε τα πειραματικά αποτελέσματα και επομένως και την επιτυχία της μεθόδου αναγνώρισης είναι να συγκρίνουμε την απόκριση στην ίδια είσοδο (ίδια στροφορμή και ίδιες τροχιές) της προσομοίωσης του συστήματος, το οποίο περιέχει πλέον τις τιμές των αναγνωρισμένων παραμέτρων, με αυτή του πραγματικού συστήματος. Η χρονική εξέλιξη των γωνιακών θέσεων και ταχυτήτων των αρθρώσεων και η γωνιακή ταχύτητα της βάσης, τόσο για το πραγματικό σύστημα όσο και για το αναγνωρισμένο φαίνονται στο Σχήμα 5-11, που ακολουθεί [1]. Όπως είναι φανερό, οι αποκρίσεις των γωνιακών θέσεων και ταχυτήτων του εξομοιωτή και της προσομοίωσης ταυτίζονται. Οι χρονικές αποκρίσεις της γωνιακής ταχύτητας της βάσης είναι αρκετά κοντά, παρουσιάζοντας ωστόσο μία μικρή απόκλιση μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης του αναγνωρισμένου μοντέλου. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην επίδραση των τριβών μεταξύ της βάσης του ρομπότ και του φιλμ αερίου και σε άλλες διαταραχές από το περιβάλλον.

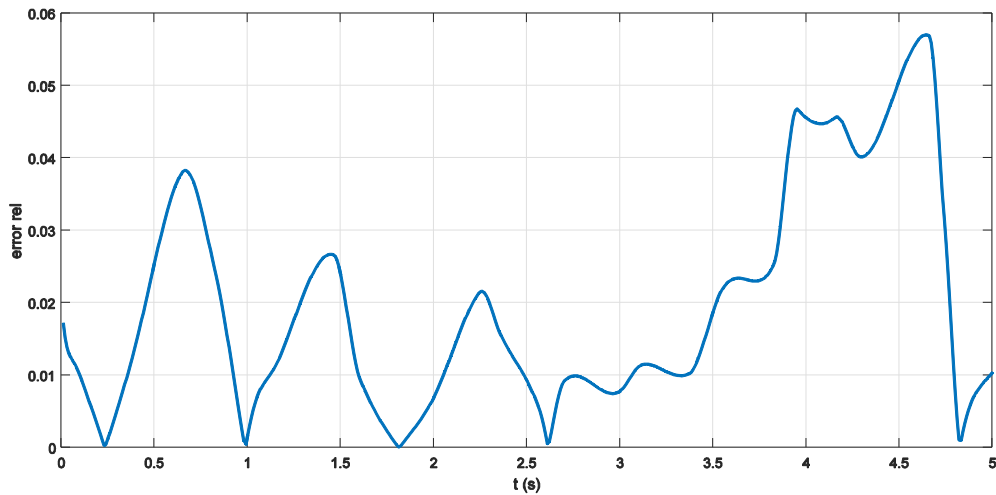


Σχήμα 5-6. Σύγκριση των αποκρίσεων του πραγματικού συστήματος με τις αντίστοιχες αποκρίσεις της προσομοίωσης του αναγνωρισμένου πειραματικά συστήματος.

Τέλος, στο Σχήμα 5-12, παρουσιάζεται η απόλυτη τιμή της διαφοράς της γωνιακής ταχύτητας της βάση του πειράματος από τη γωνιακή ταχύτητα της βάσης στην προσομοίωσης συναρτήσει του χρόνου, ενώ στο Σχήμα 5-13 φαίνεται το σχετικό σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας της βάση του πειράματος από τη γωνιακή ταχύτητα της βάσης στην προσομοίωσης συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 5-7. Απόλυτο σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας της βάσης πειράματος και προσομοίωσης.



Σχήμα 5-8. Σχετικό σφάλμα της γωνιακής ταχύτητας της βάσης πειράματος και προσομοίωσης.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, υπάρχει κάποια απόκλιση της γωνιακής ταχύτητας της βάσης μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος. Πιθανολογείται ότι το σφάλμα αυτό θα ήταν μικρότερο αν χρησιμοποιήσουμε τις βέλτιστες τροχιές σε ένα σύστημα που λαμβάνει υπόψιν του την επίδραση των τριβών και όπου ο βραχίονας έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει πιο έντονα την κίνηση της βάσης.

6 Συμπεράσματα & Μελλοντική Εργασία

Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνοψίζονται, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διαδικασία εύρεσης βέλτιστων τροχιών αναγνώρισης δυναμικών παραμέτρων για διαστημικά ρομποτικά συστήματα. Τέλος, γίνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική εργασία.

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε η εύρεση βέλτιστων τροχιών για την αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων διαστημικού ρομποτικού συστήματος με εφαρμογή της διατήρησης της στροφορμής. Για την εύρεση των βέλτιστων τροχιών αναγνώρισης χρησιμοποιήθηκαν δύο εναλλακτικές αναλυτικές μορφές τροχιών: μία βασισμένη στις γενικευμένες σειρές Fourier (ΤΡΟΧΙΑ 1) και μία στην συνάρτηση Gauss (ΤΡΟΧΙΑ 2). Οι τροχιές αυτές αξιολογήθηκαν στα πλαίσια προσομοίωσης του πειράματος αναγνώρισης για το τριδιάστατο πρόβλημα και συγκρίθηκαν με μη βέλτιστη τροχιά (ΤΡΟΧΙΑ 0) για μετρήσεις με και χωρίς θόρυβο από τους encoder των κινητήρων. Αποδείχθηκε έτσι ότι και τα δύο είδη τροχιών επιτυγχάνουν την επιθυμητή αναγνώριση παραμέτρων και υπερτερούν σημαντικά έναντι μία τροχιάς που δεν έχει προκύψει από διαδικασία βελτιστοποίησης, στην περίπτωση που οι μετρήσεις περιέχουν θόρυβο. Επιπλέον, η ΤΡΟΧΙΑ 1 προσδιορίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις παραμέτρους του συστήματος σε σχέση με την ΤΡΟΧΙΑ 2, ειδικά στην περίπτωση του διδιάστατου προβλήματος, ενώ η ΤΡΟΧΙΑ 2 απαιτεί μικρότερο χρόνο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η διαδικασία εύρεσης βέλτιστων τροχιών εφαρμόστηκε και στην περίπτωση του επίπεδου προβλήματος, όπου οι παράμετροι του συστήματος επιλέχθηκαν ίσες με τις αντίστοιχες παραμέτρους του ρομπότ “Cerberus” του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου. Οι βέλτιστες τροχιές επιτυγχάνουν και σε αυτή την περίπτωση ικανοποιητική αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων του συστήματος με και χωρίς θόρυβο. Ο σχετικά υψηλός αριθμός ευαισθησίας των βέλτιστων τροχιών στο επίπεδο πρόβλημα, πιθανόν ανάγεται στο μεγάλο λόγο αναλογίας μάζας βραχίονα-βάσης, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατόν η κίνηση του βραχίονα να επηρεάσει σημαντικά την κίνηση της βάσης και επομένως να φανεί εντονότερη η δυναμική σύζευξη μεταξύ βραχίονα και βάσης. Τέλος, στην παρούσα διπλωματική παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα του πειράματος αναγνώρισης των παραμέτρων του ρομπότ “Cerberus”, όπως πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου. Στη διαδικασία αυτή δεν μπόρεσαν να εφαρμοστούν οι θεωρητικά βέλτιστες τροχιές, αλλά χρησιμοποιήθηκαν απλές ημιτονοειδείς τροχιές.

6.2 Μελλοντική εργασία

Η προτεινόμενη μελλοντική εργασία αφορά κυρίως την αντιμετώπιση των δύο βασικών προβλημάτων, που προέκυψαν κατά τη θεωρητική και πειραματική αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων, με σκοπό την εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων. Το πρώτο πρόβλημα σχετίζεται με την καταλληλότητα του διαθέσιμου βραχίονα για την εκτέλεση πειραμάτων αναγνώρισης. Αυτό που προτείνεται είναι ο σχεδιασμός και η ενσωμάτωση ενός μεγαλύτερου βραχίονα, έτσι ώστε η εκτέλεση της τροχιάς αναγνώρισης να έχει μεγαλύτερη επίδραση στη βάση και να μπορούν να εξαχθούν καλύτερα συμπεράσματα. Το δεύτερο πρόβλημα αφορά στην εμφάνιση τριβών κατά την κίνηση του

ρομπότ πάνω στην τράπεζα του γρανίτη, κάτι που μειώνει σημαντικά τον μέγιστο δυνατό χρόνο πειράματος και αποκλείει την εφαρμογή στο πείραμα των θεωρητικά βέλτιστων τροχιών. Το πρόβλημα αυτό πιθανόν να μπορεί να αντιμετωπιστεί με κάποια μοντελοποίηση των τριβών στα πλαίσια του δυναμικού μοντέλου, καθώς και με την εφαρμογή κατάλληλων εργασιών συντήρησης της επιφάνειας του γρανίτη, έτσι ώστε να επανέλθει στα αρχικά βέλτιστα επίπεδα επιφανειακής τραχύτητας.

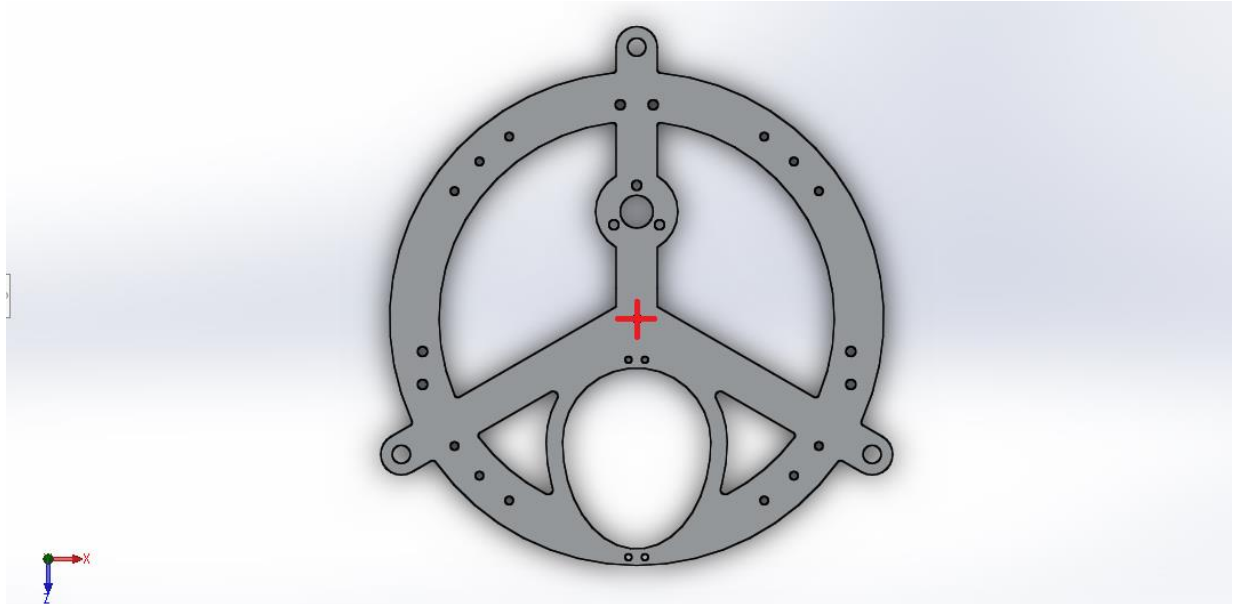
7 Βιβλιογραφία

- [1] Christidi-Loumpasefski, O. O., Ntinou, C., Papadopoulos, E., (2017), "Analytical and Experimental Parameter Estimation for Free-Floating Space Manipulator Systems", *14th Symp. on Adv. Space Tech. in R&A, (ASTRA '17)*, Scheltema, Leiden, the Netherlands, (pp.1-8).
- [2] Kessler, D.J., Cour-Palais, B.G., (1978), "Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt", *Journal of Geophysical Research*, VOL. 83, NO A6, (pp. 2637-2646).
- [3] Kelso, T. S., (2009), "Analysis of the Iridium 33 – Cosmos 2251 Collision", *American Astronautical Society*, Paper AAS 09-368, (pp. 1-14).
- [4] National Aeronautical and Space Administration, (NASA), (2009), "Satellite Collision Leaves Significant Debris Cloud", *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 13, Issue 2, (pp. 1-10).
- [5] Wormnes, K., Letty, R. Le, Summerer, L., Schonenborg, R., Luraschi, E., Cropp, A., Krag, H., and Delaval, J., (2013), "ESA Technologies for Space Debris Remediation", *Proceedings of the 6th IAASS Conference: Safety is Not an Option*, (pp. 3-4).
- [6] Shan, M., Guo, J., and Gill, E., (2015), "Progress in Aerospace Sciences Review and comparison of active space debris capturing and removal methods", *Prog. Aerosp. Sci.*, (pp. 1–15).
- [7] Malaviarachchi, P., Reedman, T. J., Allen, A. C. M., and Sinclair, D., "A Small Satellite Concept for On-Orbit Servicing of Spacecraft", *17th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, (pp. 1–15).
- [8] King, D., (2001). "Space servicing: past, present and future", *Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS*, (pp. 18-22).
- [9] Nokleby, Scott B., (2007), "Singularity analysis of the Canadarm2", *Mechanism and Machine Theory* 42.4, (pp. 442-454).
- [10] Diftler, Myron A., et al., (2011), "Robonaut 2-the first humanoid robot in space", *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference*, Shanghai, China, (pp. 2178-2183).
- [11] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., Oriolo, G., "Ρομποτική: Μοντελοποίησης, Σχεδιασμός και Έλεγχος", Εκδόσεις Φούντας.
- [12] Wu, J., Wang, J., & You, Z., (2010). "An overview of dynamic parameter identification of robots", *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 26(5), (pp. 414-419).
- [13] Wu, W., Zhu, S., Wang, X., and Liu, H., (2012), "Closed-loop dynamic parameter identification of robot manipulators using modified Fourier series", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Volume 9, (pp. 1-9).
- [14] Shang, W. W., & Cong, S., (2011), "Exciting trajectories design for the dynamic identification of parallel manipulators", *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), (pp. 10287-10292).

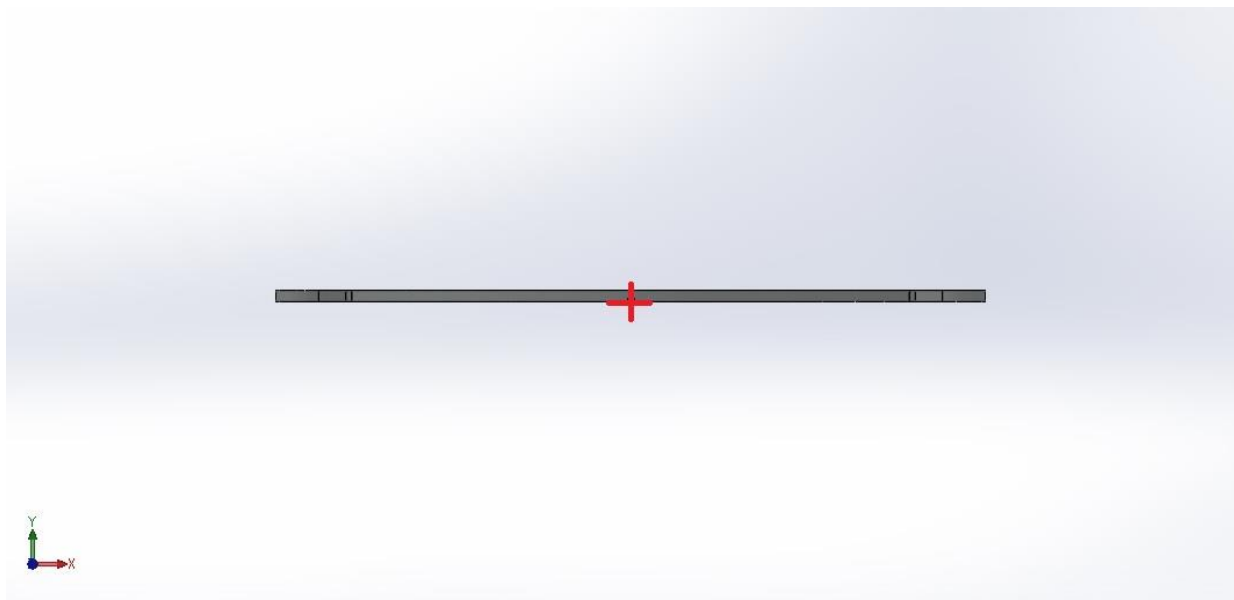
- [15] Renaud, P., Vivas, A., Andreff, N., Poignet, P., Martinet, P., Pierrot, F., & Company, O., (2006), "Kinematic and dynamic identification of parallel mechanisms", *Control engineering practice*, 14(9), (pp. 1099-1109).
- [16] Jovic, J., Philipp, F., Escande, A., Ayusawa, K., Yoshida, E., Kheddar, A., & Venture, G., (2015), "Identification of dynamics of humanoids: Systematic exciting motion generation", *In Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ International Conference*, (pp. 2173-2179).
- [17] Xu, W., Hu, Z., Zhang, Y., Wang, Z., & Wu, X., (2015), "A practical and effective method for identifying the complete inertia parameters of space robots", *In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference*, (pp. 5435-5440).
- [18] Papadopoulos, E. and Dubowsky, S., (1991), "On the Nature of Control Algorithms for Free-floating Space Manipulators," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 6, (pp. 750-758).
- [19] Yoshida, K., & Abiko, S., (2002), "Inertia parameter identification for a free-flying space robot", *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, (pp. 1-8).
- [20] Ma, O., Dang, H., & Pham, K., (2008), "On-orbit identification of inertia properties of spacecraft using a robotic arm", *Journal of guidance, control, and dynamics*, 31(6), (pp. 1761-1771).
- [21] Murotsu, Y., Senda, K., Ozaki, M., & Tsujio, S., (1994), "Parameter identification of unknown object handled by free-flying space robot", *Journal of guidance, control, and dynamics*, 17(3), (pp. 488-494).
- [22] Christidi-Loumpasefski, O., Nanos, K., and Papadopoulos, E., (2017), "On Parameter Estimation of Space Manipulator Systems Using the Angular Momentum Conservation", *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '17)*, (pp. 1-6).
- [23] Minor, Mark A., Kent Jensen, and Youngshik Kim., (2002), "Design and control of a three-link serial manipulator for lessons in particle dynamics." *Robotics and Automation, Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*. Vol. 4, (pp. 1-7).
- [24] Menon, C., Busolo, S., Cocuzza, S., Aboudan, A., Bulgarelli, A., Bettanini, C., & Angrilli, F., (2007), "Issues and solutions for testing free-flying robots", *Acta Astronautica*, 60(12), (pp. 957-965).
- [25] Von Kampen, P., Kaczmarczik, U., & Rath, H. J., (2006), "The new Drop Tower catapult system", *Acta Astronautica*, 59(1), (pp. 278-283).
- [26] Kolvenbach, H., & Wormnes, K., (2016), "Recent developments on ORBIT, a 3-DoF Free Floating Contact Dynamics Testbed", *In 13th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2016)*, (pp.1-7).
- [27] Miller, D., Saenz-Otero, A., Wertz, J., Chen, A., Berkowski, G., Brodel, C., & Feller, D., (2000), "SPHERES: a testbed for long duration satellite formation flying in micro-gravity conditions", *Proceedings of the AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, Clearwater, FL, Paper No. AAS 00-110, (pp. 1-13).
- [28] Μήτρος, Ζ., (2016), "Ανάλυση, δυναμική και έλεγχος ρομποτικού συστήματος για πρόσδεση σε διαστημικά ρομποτικά συστήματα", *Διπλωματική Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- [29] Πατσιαούρας, Η., (2015), “Σχεδιασμός λογισμικού οπτικής ανάδρασης θέσης με εφαρμογή στον έλεγχο διαστημικού εξομοιωτή”, *Διπλωματική Εργασία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

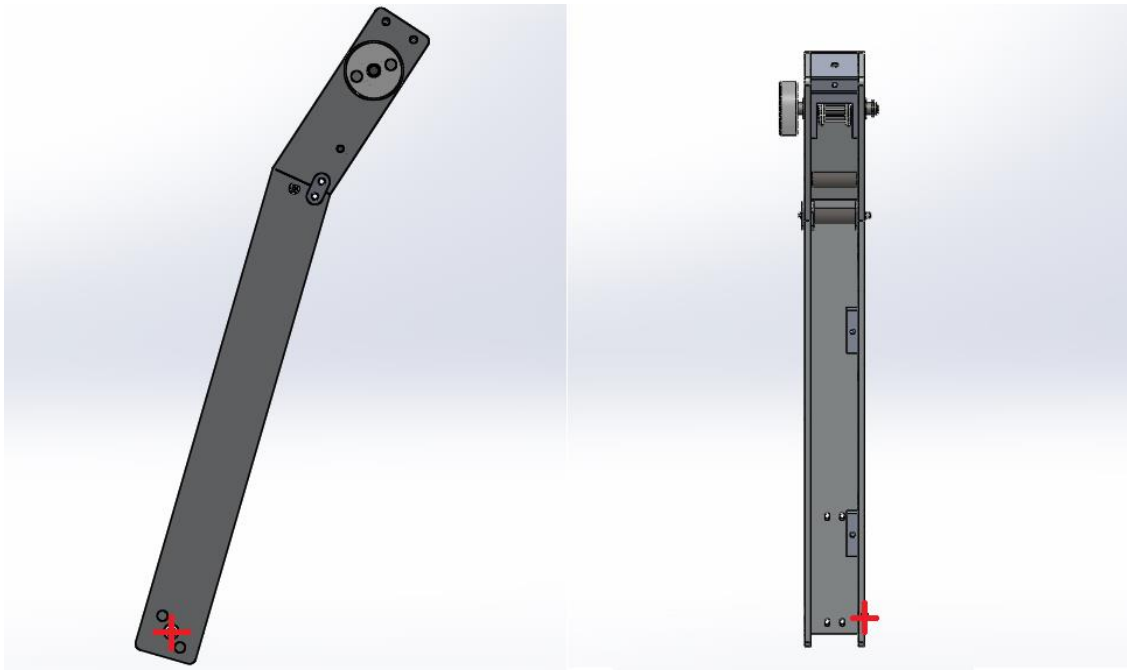
Παράρτημα Α: Συστήματα Συντεταγμένων



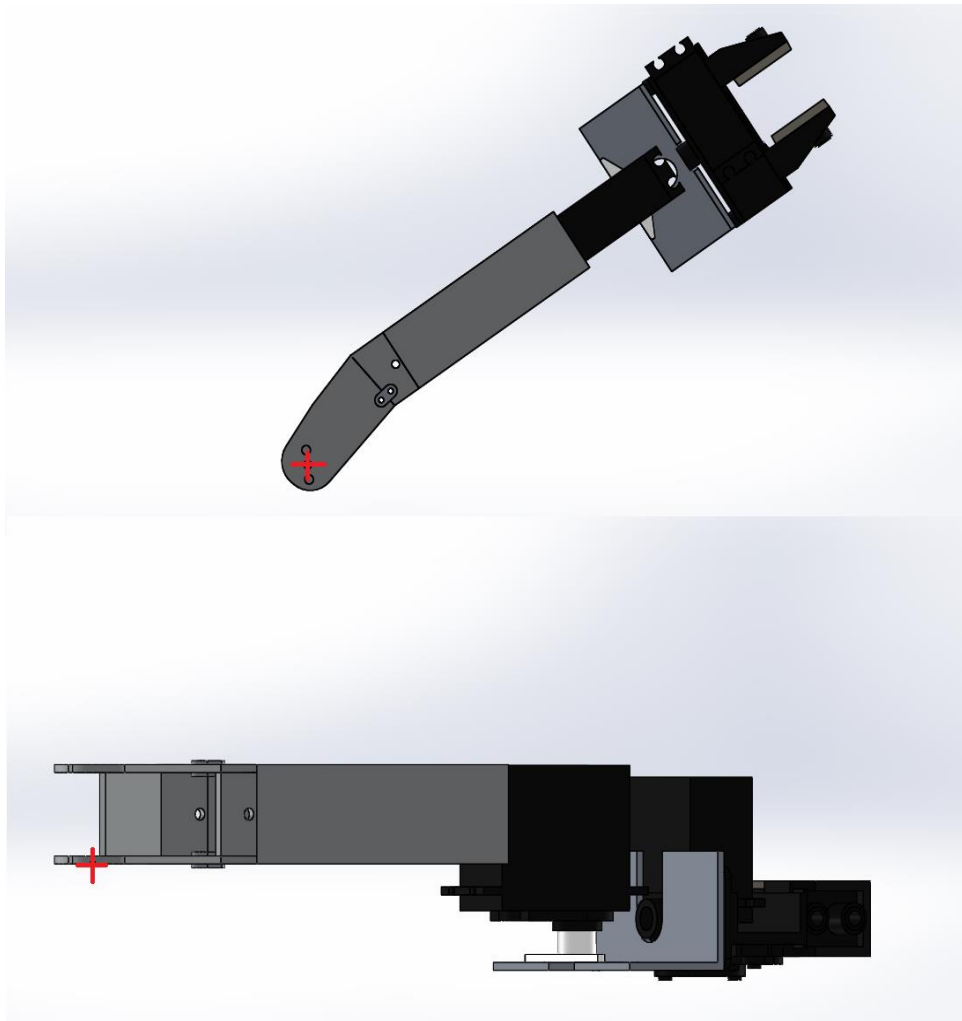
Σχήμα Α-1. Αρχή συστήματος συντεταγμένων βάσης (κάτοψη).



Σχήμα Α-2. Αρχή συστήματος συντεταγμένων βάσης (πρόοψη).

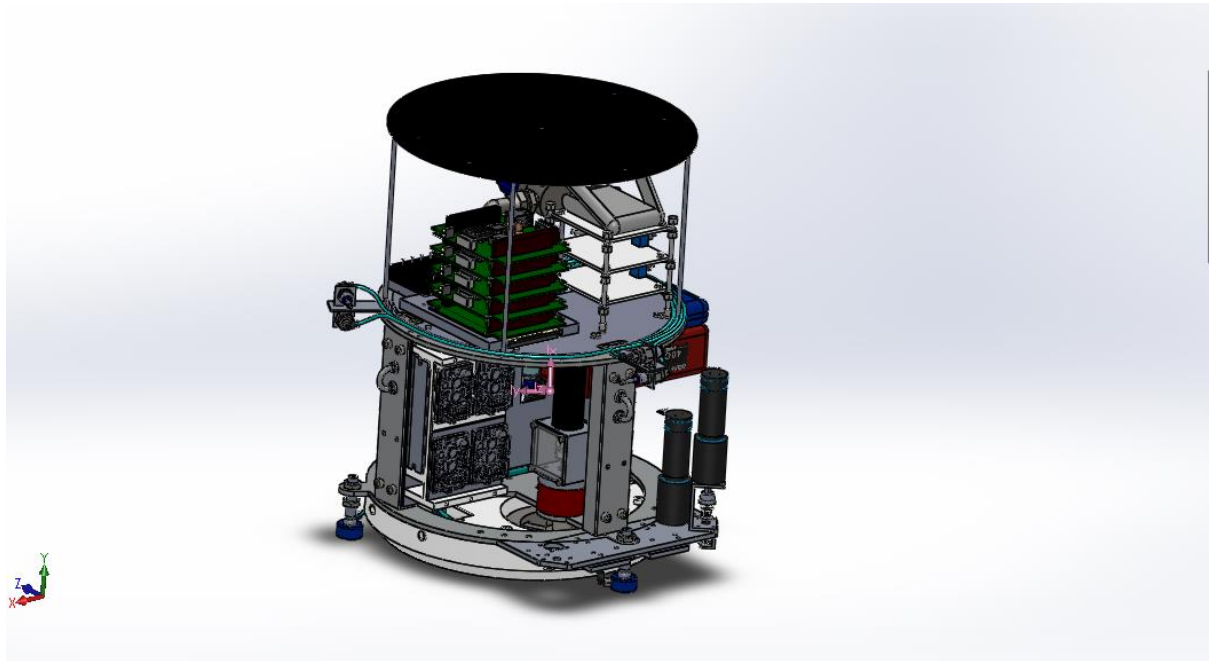


Σχήμα A-3. Αρχή συστήματος συντεταγμένων πρώτου συνδέσμου.

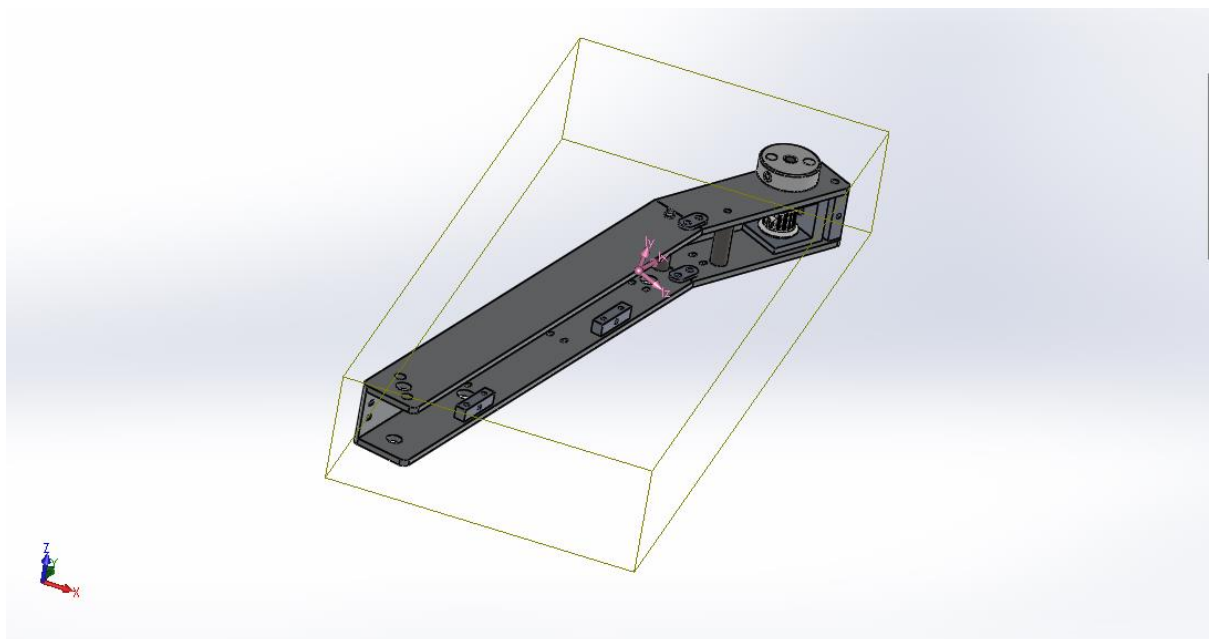


Σχήμα A-4. Αρχή συστήματος συντεταγμένων δεύτερου συνδέσμου.

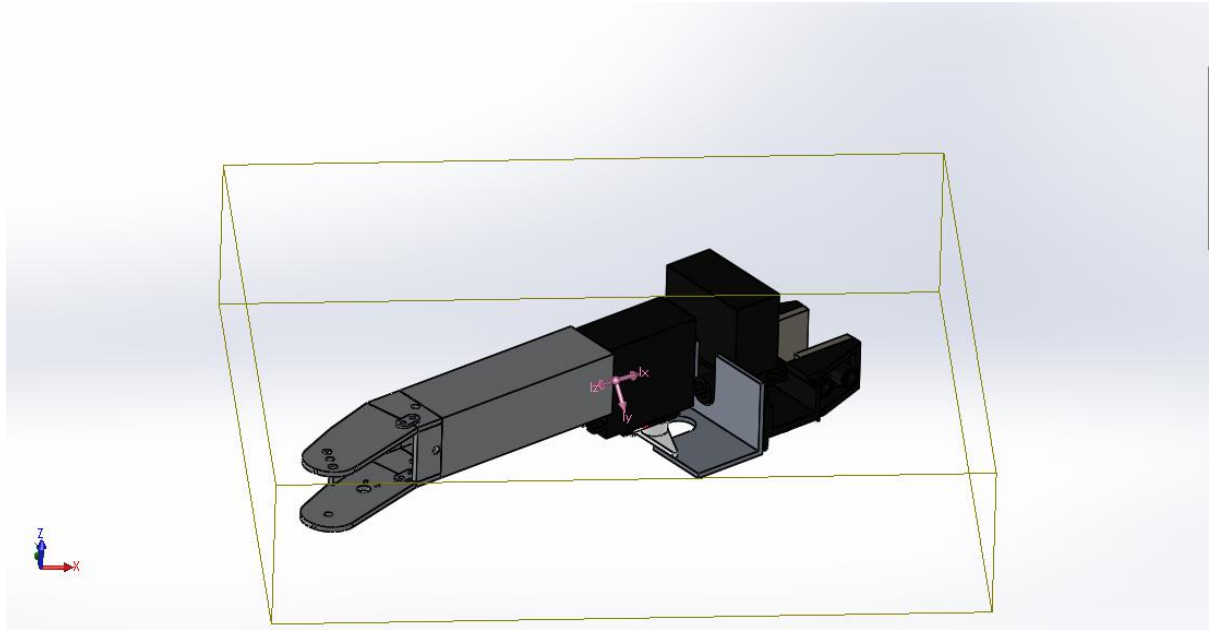
Παράρτημα Β: Κύριοι αδρανειακοί άξονες



Σχήμα Β-1. Κύριοι αδρανειακοί άξονες βάσης.



Σχήμα Β-2. Κύριοι αδρανειακοί άξονες πρώτου συνδέσμου.



Σχήμα Β-3. Κύριοι αδρανειακοί άξονες δεύτερου συνδέσμου.

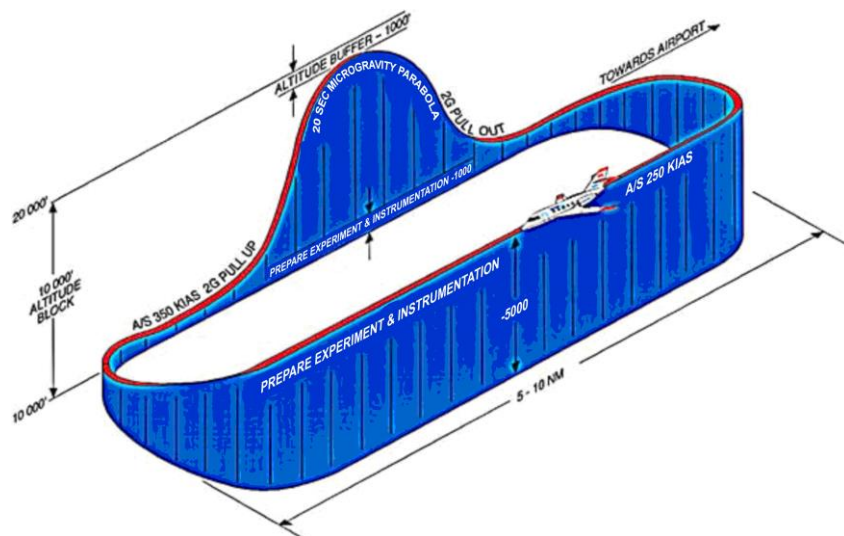
Παράρτημα Γ: Είδη διαστημικών εξομοιωτών

Συστήματα αιώρησης

Η χρήση συστημάτων αιώρησης για την προσομοίωση της κίνησης στο διάστημα δίνει τη δυνατότητα πειραματικού ελέγχου του ΔΡΣ στις τρεις διαστάσεις δημιουργώντας αντισταθμιστικές δυνάμεις ίσου μέτρου και αντίθετης κατεύθυνσης του βάρους κάθε υποσυστήματος (βάση και σύνδεσμοι του βραχίονα). Οι δυνάμεις αυτές εφαρμόζονται στο κέντρο μάζας του κάθε σώματος και έχουν σταθερή τιμή κατά τη διάρκεια κίνησης του ρομποτικού βραχίονα εξομοιώνοντας με αυτόν τον τρόπο συνθήκες 0g. Η υλοποίηση τέτοιων συστημάτων εμφανίζει δύο βασικά προβλήματα. Πρώτον πρέπει να ληφθούν υπόψιν δυνάμεις αντίστασης και τριβές από το σύστημα αιώρησης. Δεύτερον υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστεί ταλαντωτική συμπεριφορά και δυναμική αστάθεια στο σύστημα λόγω της δυναμικής σύζευξης του ΔΡΣ και του συστήματος αιώρησης. Η υλοποίηση τέτοιων συστημάτων μπορεί να είναι ενεργητική ή παθητική.

Παραβολική πτήση

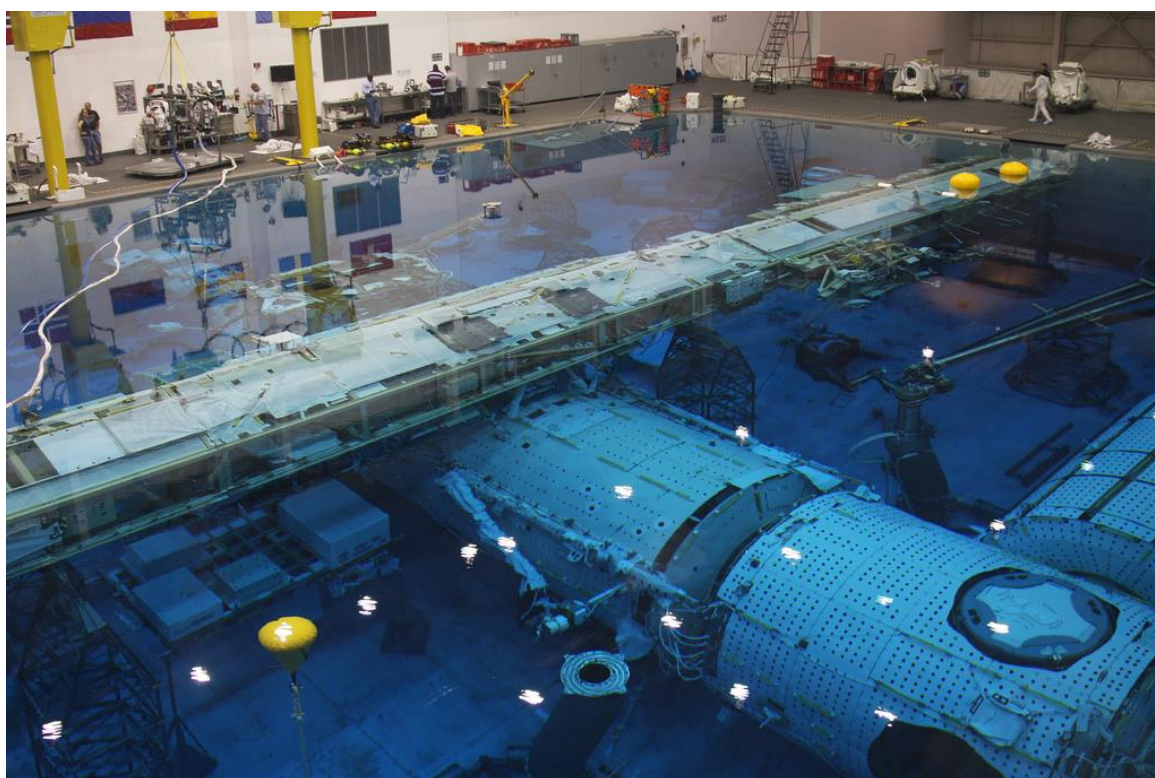
Μία εναλλακτική προσέγγιση στην εργαστηριακή προσομοίωση των συνθηκών του διαστήματος είναι η εκτέλεση πειραμάτων κατά τη διάρκεια παραβολικής πτήσης. Η εκτέλεση πειραμάτων σε παραβολική τροχιά δίνει τη δυνατότητα πιστοποίησης των εφαρμοζόμενων τεχνικών ελέγχου στις τρεις διαστάσεις σε πραγματικές συνθήκες έλλειψης βαρύτητας. Βασικά μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι ο περιορισμένος διαθέσιμος χρόνος για την εκτέλεση του πειράματος (μερικά δευτερόλεπτα), ο περιορισμένος όγκος/μάζα του εξοπλισμού και το υψηλό κόστος. Σε κάθε περίπτωση, η καλύτερη αξιοποίηση του περιορισμένου χρόνου πειράματος επιβάλλει on-ground δοκιμές πριν την παραβολική πτήση δημιουργώντας την ανάγκη για επιπλέον πειραματικές διατάξεις. Αντίστοιχης λογικής πειραματική διάταξη είναι ο πύργος ελεύθερης πτώσης στη Βρέμη (Bremen Drop Tower). Αποτελεί τη βασική εργαστηριακή εγκατάσταση του Centre of Applied Space Technology and Microgravity (ZARM) και με ύψος 146 m δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης χαμηλού κόστους πειραμάτων σε συνθήκες μικροβαρύτητας (10^{-6} g) με μέγιστο χρόνο πειράματος τα 9,3 sec [25].



Σχήμα Γ-1. Στάδια παραβολικής πτήσης.

Υποβρύχιες εγκαταστάσεις

Η χρήση υποβρύχιων εγκαταστάσεων αποτελεί επίσης μία λύση στο πρόβλημα της εκτέλεσης πειραμάτων με ΔΡΣ on-ground. Σε ένα τέτοιο πείραμα δεν χρησιμοποιείται ο πραγματικός εξοπλισμός καθώς υπάρχει ο κίνδυνος να καταστραφεί από το υδάτινο περιβάλλον. Αντί αυτού σχεδιάζονται κατάλληλα ομοιώματα του πραγματικού εξοπλισμού ουδέτερης άνωσης, στα οποία το βάρος αντισταθμίζεται από την άνωση του νερού εξομοιώνοντας συνθήκες έλλειψης βαρύτητας. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου έγκειται στην εκτέλεση πειραμάτων χωρίς περιορισμό χρόνου, με περιορισμό όμως και σε αυτή την περίπτωση στον όγκο του ΔΡΣ που εξετάζεται. Ένα άλλο μειονέκτημα τέτοιων εγκαταστάσεων είναι η εμφάνιση υδροδυναμικής τριβής, η οποία αν και για αργές κινήσεις του ΔΡΣ μπορεί να αμεληθεί, αποτελεί σημαντική απόκλιση από τη δυναμική ενός ελεύθερα αιωρούμενου ή ιπτάμενου ΔΡΣ.



Σχήμα Γ-2. Ομοίωμα του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού στον υποβρύχιο εξομοιωτή του Neutral Buoyancy Lab (NBL) της NASA.

Αεροέδρανα

Τέλος, μία ιδιαίτερα δημοφιλής, λόγω της αποτελεσματικότητάς της, προσέγγιση στην προσπάθεια εξομοίωσης συνθηκών διαστήματος στη γη, είναι η χρήση πειραματικών εγκαταστάσεων με αεροέδρανα (air-bearing test beds). Τα αεροέδρανα διοχετεύουν συμπιεσμένο αέριο δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ένα λεπτό στρώμα αερίου μεταξύ δύο επιφανειών ελαχιστοποιώντας την αναπτυσσόμενη κατά τη σχετική τους κίνηση τριβή. Οι επίπεδοι διαστημικοί εξομοιωτές με αεροέδρανα αποτελούνται από μία επιφάνεια υψηλής επιπεδότητας και μικρής τραχύτητας, πάνω στην οποία κινούνται οι πλατφόρμες/ρομπότ που φέρουν τα αεροέδρανα. Ένας επίπεδος διαστημικός εξομοιωτής με αεροέδρανα επιτρέπει τη μελέτη συστημάτων με τρεις βαθμούς ελευθερίας της βάσης: δύο μεταφορικούς και έναν περιστροφικό.

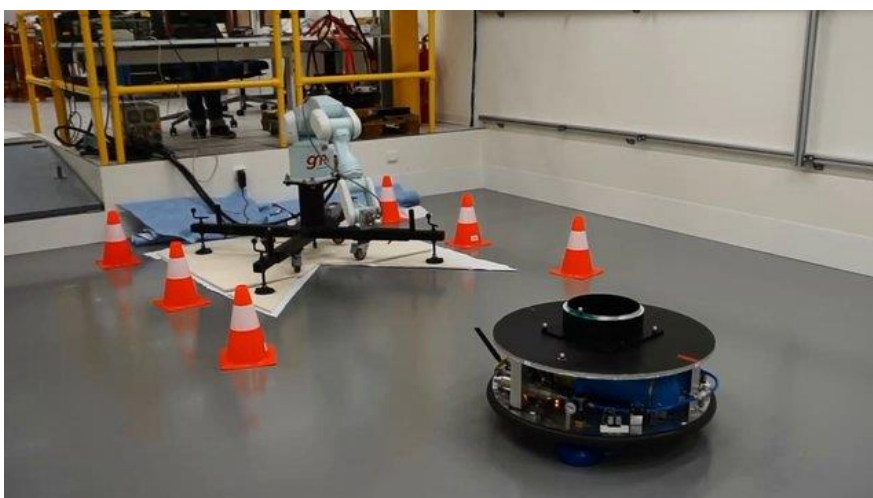
Όπως και σε άλλες περιπτώσεις, έτσι και στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών (Control Systems Lab – CSL) έχει κατασκευαστεί επίπεδος διαστημικός εξομοιωτής με αεροέδρανα, με σκοπό τη μελέτη και τον έλεγχο των στρατηγικών ελέγχου που αναπτύσσονται σε θεωρητικό επίπεδο για ρομποτικά διαστημικά συστήματα. Πριν την εκτενή παρουσίαση της παρούσας εγκατάστασης του εργαστηρίου κρίνεται σκόπιμη η σύντομη αναφορά σε κάποιες από τις πειραματικές εγκαταστάσεις με αεροέδρανα, που υπάρχουν σε διάφορα εργαστήρια ανά τον κόσμο.



Σχήμα Γ-3. Κυκλικά (αριστερά) και ορθογωνικά (δεξιά) αεροέδρανα.

1. ORBIT (Orbital Robotic test Bench for Integrated Technologies)

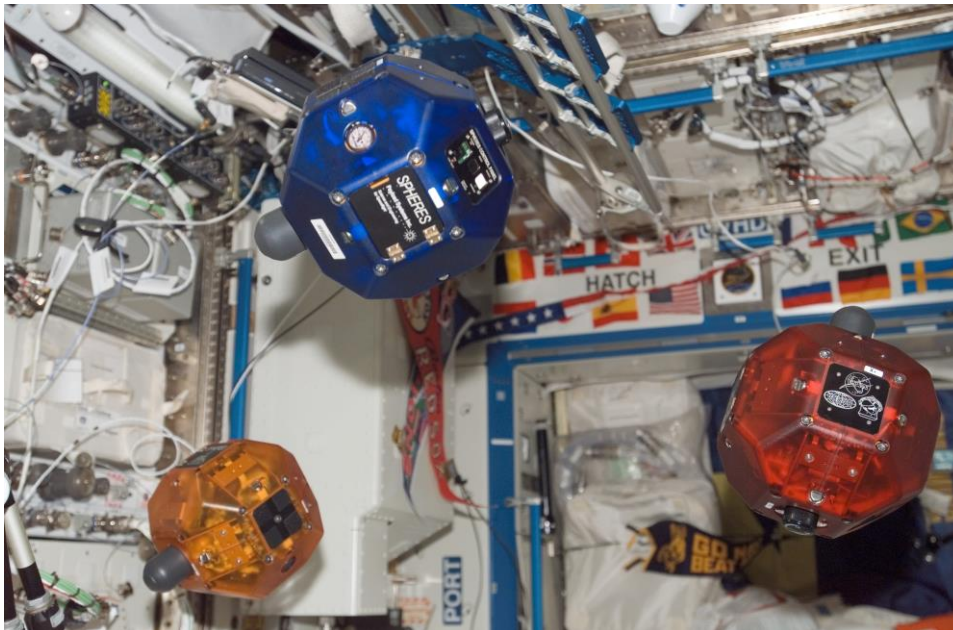
Πρόκειται για πειραματική εγκατάσταση που βρίσκεται στο European Space Research and Technology Center (ESTEC) του European Space Agency (ESA), στην Ολλανδία. Περιλαμβάνει ένα δωμάτιο επιφάνειας 45 m², το δάπεδο του οποίου είναι κατάλληλα διαμορφωμένο και επιστρωμένο με ρητίνη, έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαραίτητες προδιαγραφές τραχύτητας και επιπεδότητας. Η θέση και ο προσανατολισμός των διάφορων κινούμενων διατάξεων της πειραματικής εγκατάστασης καταγράφονται με 14 κάμερες VICON (motion tracking) και επιπλέον ο χώρος είναι εξοπλισμένος με σύστημα ρύθμισης και διανομής συμπιεσμένου αέρα. Διαφορετικές πλατφόρμες με αεροέδρανα έχουν αναπτυχθεί για τη μελέτη διαφορετικών παραμέτρων της κάθε διαστημικής αποστολής όπως το ROOTLESS (Robotic Testbed for Floating Dynamics Simulation), το MANTIS (Maneuverable Testbed for In-orbit Simulation) και το ACROBAT (Air Cushion Robotic Platform). Η κατασκευή της πειραματικής εγκατάστασης ORBIT έγινε για την υποστήριξη υπάρχουσών και μελλοντικών αποστολών, όπως η αποστολή e.Deorbit [26].



Σχήμα Γ-4. Διαστημικός εξομοιωτής ORBIT.

2. SPHERES (Synchronized Position Hold Engage Re-orient Experimental Satellites)

Κατασκευάστηκαν στο Space Systems Laboratory (SSL) του τμήματος Aeronautics and Astronautics του MIT, με σκοπό τον έλεγχο και τη συγχρονισμένη κίνηση σε σχηματισμό δορυφόρων σε συνθήκες έλλειψης βαρύτητας. Η εγκατάσταση περιλαμβάνει τη λεία επιφάνεια κίνησης, βάσεις που φέρουν αεροέδρανα και τρεις πλήρως αυτόνομους δορυφόρους σφαιρικού σχήματος. Οι δορυφόροι διαθέτουν σύστημα προώθησης διοξειδίου του άνθρακα, RF (Radio Frequency) επικοινωνία, ενσωματωμένες κάμερες και συστήματα πρόσδεσης. Το 2006 οι τρεις αρχικοί δορυφόροι SPHERES εκτοξεύτηκαν στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ISS), όπου έχουν χρησιμοποιηθεί σε περισσότερες από 60 δοκιμές, καθιστώντας τη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη τη μοναδική που έχει χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες έλλειψης βαρύτητας [27].



Σχήμα Γ-5. Δορυφόροι SPHERES στο Διεθνή Διαστημικό Σταθμό.

3. Free Flyers

Το εργαστήριο Aerospace Robotics Laboratory (ARL) του πανεπιστημίου του Stanford έχει αναπτύξει ένα state-of-art πρόγραμμα μελέτης ελεύθερα αιωρούμενων διαστημικών ρομποτικών συστημάτων. Η έρευνα που πραγματοποιείται στο ARL έχει επιτρέψει την ανάπτυξη τεχνολογιών για τη σύλληψη και το χειρισμό αντικειμένων με γνωστά ή άγνωστα χαρακτηριστικά, την εφαρμογή adaptive τεχνικών ελέγχου και τη συναρμολόγηση κατασκευών στο διάστημα. Ο εξομοιωτής περιλαμβάνει τρία αυτόνομα ρομπότ με αεροέδρανα τα οποία κινούνται πάνω σε μία τράπεζα γρανίτη. Η παρακολούθηση της κίνησης των ρομπότ γίνεται με εξωτερικό σύστημα τεχνητής όρασης και με σύστημα GPS (indoor pseudolite-based GPS system).

ΤΕΛΟΣ ΚΕΙΜΕΝΟΥ