



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ -
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ρομποτική II: Ευφυή Ρομποτικά Συστήματα

8ο εξάμηνο, Ακαδημαϊκή περίοδος 2024-2025

Εξαμηνιαία Εργασία 1

**Κινηματικός έλεγχος ρομποτικού χειριστή με πλεονάζοντες
βαθμούς ελευθερίας**
(Redundant manipulators: Path Following and Obstacle
Avoidance)

Φώτιος Κούτσικος : 03121082

Άγγελος Ευστρατίου : 03121113

1. Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία υλοποιείται κινηματικός έλεγχος ενός ρομποτικού βραχίονα με πλεονάζοντες βαθμούς ελευθερίας με στόχο την παρακολούθηση μιας προκαθορισμένης ευθύγραμμης τροχιάς από το τελικό στοιχείο δράσης του ρομπότ, σε συνδυασμό με την αποφυγή δύο στατικών εμποδίων εντός του χώρου εργασίας του.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ο συνεργατικός ρομποτικός βραχίονας (cobot) xArm 7, οποίος διαθέτει 7 βαθμούς ελευθερίας (DOFs). Το τελικό στοιχείο δράσης καλείται να εκτελεί επαναλαμβανόμενη κίνηση μεταξύ δύο σημείων P_A και P_B , διαγράφοντας ευθύγραμμη τροχιά, ενώ οι σύνδεσμοι του βραχίονα προσαρμόζονται δυναμικά ώστε να αποφεύγουν τα εμπόδια.

Η επίλυση του προβλήματος αξιοποιεί την πλεονάζουσα κινηματική ελευθερία του ρομπότ, μέσω διάσπασης της συνολικής εργασίας σε επιμέρους υποεργασίες, δίνοντας προτεραιότητα στην παρακολούθηση της επιθυμητής τροχιάς και δευτερευόντως στην αποφυγή των εμποδίων.

Η προγραμματιστική υλοποίηση πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον ROS (Robot Operating System) σε συνδυασμό με τον προσομοιωτή Gazebo, όπου δημιουργήθηκε το μοντέλο του ρομποτικού βραχίονα και υλοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι ελέγχου.

2. Θεωρητική Ανάλυση

2.1. Διάταξη του Προβλήματος

Το τελικό στοιχείο δράσης καλείται να εκτελέσει περιοδική κίνηση μεταξύ δύο σημείων P_A και P_B κατά μήκος μίας ευθύγραμμης τροχιάς. Η τροχιά βρίσκεται στο επίπεδο που ορίζεται από τις σταθερές συντεταγμένες $x = 0.617 \text{ m}$ και $z = 0.199 \text{ m}$, ενώ τα σημεία P_A και P_B απέχουν απόσταση 40 cm μεταξύ τους, κατά τη διεύθυνση του άξονα y .

Στο χώρο εργασίας έχουν τοποθετηθεί δύο στατικά εμπόδια, τα οποία είναι κατακόρυφοι κύλινδροι με διάμετρο διατομής 10 cm . Τα κέντρα των δύο κυλίνδρων βρίσκονται στο επίπεδο $x = 0.3 \text{ m}$, έχουν κοινή τιμή z -συντεταγμένης και απέχουν μεταξύ τους 40 cm κατά τον άξονα y .

Ο ρομποτικός βραχίονας, κατά την κίνησή του, πρέπει να εξασφαλίζει αποφυγή σύγκρουσης με τα εμπόδια, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι σύνδεσμοί του έχουν διάμετρο 12.6 cm . Επιπλέον, απαιτείται το τελικό στοιχείο δράσης να παραμένει όσο το δυνατόν πιο κοντά στην επιθυμητή ευθύγραμμη τροχιά, χωρίς να είναι απαραίτητο να διατηρείται σταθερός ο προσανατολισμός του εργαλείου.

2.2. Κινηματική Ανάλυση του Ρομποτικού Βραχίονα

Το cobot xArm 7, όπως προαναφέρθηκε, διαθέτει 7 βαθμούς ελευθερίας, με το διάνυσμα των μεταβλητών των αρθρώσεων να συμβολίζεται ως:

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7]^T$$

Ενώ η θέση του τελικού στοιχείου δράσης στο καρτεσιανό σύστημα ως:

$$\mathbf{p} = [x, y, z]^T$$

Η κινηματική μοντελοποίηση του ρομπότ βασίζεται στους διαδοχικούς πίνακες μετασχηματισμού $A_i^{i-1}(q_i)$, οι οποίοι δίνονται στην εκφώνηση και καθορίζουν τη σχετική θέση και τον προσανατολισμό κάθε συνδέσμου ως προς τον προηγούμενο. Έτσι, ορίζεται ο συνολικός πίνακας μετασχηματισμού ως:

$$A_7^0 = A_1^0 A_2^1 \dots A_7^6$$

Η θέση \mathbf{p} του τελικού στοιχείου δράσης προκύπτει από το διάνυσμα μετατόπισης που περιέχεται στον πίνακα $A_7^0(\mathbf{q})$. Έτσι, με παραγωγή της κινηματικής σχέσης αυτής, προκύπτει η διαφορική κινηματική εξίσωση:

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$$

Όπου:

- $\dot{\mathbf{q}}$ είναι το διάνυσμα ταχυτήτων των αρθρώσεων,
- $\dot{\mathbf{p}}$ είναι το διάνυσμα ταχυτήτων του τελικού στοιχείου δράσης στο χώρο
- Η Ιακωβιανή μήτρα $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ είναι διαστάσεων 3×7

Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία επικεντρωνόμαστε στον έλεγχο της θέσης, αγνοώντας τον προσανατολισμό του τελικού στοιχείου δράσης.

2.3. Σχεδιασμός Επιθυμητής Τροχιάς

Το τελικό σημείο δράσης θα ακολουθεί ευθύγραμμη διαδρομή μεταξύ των σημείων P_A και P_B , επομένως η επιθυμητή τροχιά $\mathbf{p}_{1d}(\mathbf{t})$:

$$\mathbf{p}_{1d}(t) = \mathbf{P}_A + (\mathbf{P}_B - \mathbf{P}_A)s(t)$$

Που ορίζει το ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ των δύο σημείων και $\mathbf{s}(t)$:
 περιοδική συνάρτηση η οποία περιγράφεται από πολώνυμο 5^{ου} βαθμού σε
 κάθε ημιπερίοδο της μορφής:

$$s(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 + \alpha_4 t^4 + \alpha_5 t^5, \quad t \in [0, T]$$

Με πρώτη και δεύτερη παράγωγο:

$$\dot{s}(t) = \alpha_1 + 2\alpha_2 t + 3\alpha_3 t^2 + 4\alpha_4 t^3 + 5\alpha_5 t^4,$$

$$\ddot{s}(t) = 2\alpha_2 + 6\alpha_3 t + 12\alpha_4 t^2 + 20\alpha_5 t^3$$

Η επιλογή πολωνύμου πέμπτου βαθμού επιτρέπει την ικανοποίηση
 συνοριακών συνθηκών όχι μόνο στη θέση αλλά και στην ταχύτητα και
 επιτάχυνση, προσφέροντας ομαλή κίνηση χωρίς απότομες μεταβολές.

Συνοριακές Συνθήκες:

$$p_{1d}(0) = P_A, \quad \dot{p}_{1d}(0) = 0, \quad \ddot{p}_{1d}(0) = 0,$$

$$p_{1d}(T) = P_B, \quad \dot{p}_{1d}(T) = 0, \quad \ddot{p}_{1d}(T) = 0$$

Δηλαδή, επιθυμούμε να ξεκινάει για $t = 0$ από το σημείο P_A , να πηγαίνει στο
 σημείο P_B και όλη η κίνηση να έχει διάρκεια T , ακινητοποιώντας πλήρως τον
 βραχίονα στα άκρα.

Από τις συνθήκες αυτές προκύπτουν τα εξής:

$$s(0) = 0, \quad \dot{s}(0) = 0, \quad \ddot{s}(0) = 0,$$

$$s(T) = 1, \quad \dot{s}(T) = 0, \quad \ddot{s}(T) = 0$$

Και ύστερα από αντικατάσταση και λύση του συστήματος:

$$s(t) = 10 \left(\frac{t}{T} \right)^3 - 15 \left(\frac{t}{T} \right)^4 + 6 \left(\frac{t}{T} \right)^5, \quad t \in [0, T]$$

$$s(t + T) = 1 - s(t), \quad t \in [0, T]$$

Έτσι, σε κάθε δεύτερη ημιπερίοδο η κίνηση αντιστρέφεται.

Για $t \notin [0, T]$: $s(t + 2T) = s(t)$, λόγω περιοδικότητας.

Στην προσομοίωση είναι $\mathbf{P}_A = \begin{bmatrix} 0.617 \\ -0.2 \\ 0.199 \end{bmatrix}$, $\mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} 0.617 \\ 0.2 \\ 0.199 \end{bmatrix}$

2.4. Διάσπαση Ρομποτικής Εργασίας

Ο πλεονασμός του ρομποτικού βραχίονα xArm 7 σε βαθμούς ελευθερίας (DOFs) επιτρέπει στο σύστημα εκτελεί «εσωτερικές» κινήσεις, οι οποίες δεν επηρεάζουν την κίνηση του τελικού σημείου δράσης αλλά ικανοποιούν επιπρόσθετους κινηματικούς περιορισμούς (στην προκειμένη περίπτωση την αποφυγή εμποδίων). Τέτοιου είδους κινήσεις ανήκουν στο *null space* (μηδενοχώρο) $N(J)$ του task space και περιγράφονται ως εξής:

$$\dot{q} \in N(J) \Rightarrow J(q)\dot{q} = 0$$

Αξιοποιώντας αυτό, γίνεται η διάσπαση της ρομποτικής εργασίας σε δύο υποεργασίες:

- 1^η Υποεργασία: Επιθυμητή Τροχιά του Ρομπότ στο Χώρο Εργασίας

Η πρώτη και κύρια εργασία αφορά την παρακολούθηση της προκαθορισμένης κίνησης του τελικού στοιχείου δράσης στο χώρο εργασίας. Ορίζουμε το σφάλμα στο χώρο λειτουργίας ως εξής:

$$e = p_{1d} - p$$

Όπου p_{1d} είναι η επιθυμητή τροχιά που υπολογίσαμε, και η ψευδοαντίστροφη της Ιακωβιανής μήτρας ορίζεται ως εξής:

$$J^+ = J^T (J \cdot J^T)^{-1}$$

Καταλήγουμε στην εξίσωση *κινηματικού ελέγχου*:

$$\boxed{\dot{q} = J^+(p_{1d} + Ke) + (I - J^+J)\dot{q}_0}$$

Με K : θετικά ορισμένο (διαγώνιο) μητρώο για το κέρδος από την απορρόφηση του σφάλματος και q_0 : το σήμα που χρησιμοποιείται στο null space της Ιακωβιανής.

Η εξίσωση αυτή ορίζεται σε δύο σκέλη, το πρώτο αφορά την «εξωτερική» κίνηση, εξασφαλίζει δηλαδή την παρακολούθηση της τροχιάς και τη σταθεροποίηση του σφάλματος, ενώ το δεύτερο σκέλος καθοδηγεί τους επιπλέον βαθμούς ελευθερίας, χωρίς να επηρεάζεται η κύρια εργασία.

- 2^η Υποεργασία: Αποφυγή Εμποδίων

Για τη δευτερεύουσα εργασία της αποφυγής εμποδίων, υπολογίζεται ένα διανυσματικό πεδίο \dot{q}_0 το οποίο κατευθύνεται προς τη μεγιστοποίηση της ελάχιστης απόστασης του ρομποτικού βραχίονα από τα εμπόδια. Η ταχύτητα \dot{q}_0 προβάλλεται στο μηδενικό χώρο της Ιακωβιανής, ώστε να μη διαταράσσεται η κύρια εργασία παρακολούθησης τροχιάς.

Ορίζεται κατάλληλη συνάρτηση κριτηρίου:

$$V(\mathbf{q}) = \min_i \{d_i(\mathbf{q})\}$$

Η οποία παίρνει το ελάχιστο της απόστασης κάθε συνδέσμου από τα εμπόδια, με d_i να είναι η ελάχιστη απόσταση του i -οστού συνδέσμου του ρομπότ από τα εμπόδια και εφόσον τόσο οι σύνδεσμοι όσο και τα εμπόδια είναι κυλινδρικά, θα είναι:

$$d_{ij}(\mathbf{q}) = \text{distance}(l_i, \varepsilon_j) - r_i - r_j$$

$$d_i(\mathbf{q}) = \min(d_{i1}(\mathbf{q}), d_{i2}(\mathbf{q}))$$

Όπου με $\text{distance}(l_i, \varepsilon_j)$ συμβολίζουμε την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τμημάτων του i -οστού συνδέσμου και του j -οστού εμποδίου. Ακόμη, r_i, r_j είναι οι ακτίνες των αντίστοιχων κυλίνδρων.

Επομένως, έχοντας τώρα τη συνάρτηση κριτηρίου, το $\dot{\mathbf{q}}_0$ θα ορίζεται με τον εξής τρόπο:

$$\dot{\mathbf{q}}_0 = k_0 \nabla_{\mathbf{q}}(V(\mathbf{q}))$$

Όπου $k_0 > 0$ σταθερά κέρδους.

Το gradient $\nabla_{\mathbf{q}}(V(\mathbf{q}))$ υποδεικνύει την κατεύθυνση της μέγιστης αύξησης του $V(\mathbf{q})$ και συνεπώς οδηγεί το ρομπότ να απομακρύνεται από περιοχές κοντά στα εμπόδια, διατηρώντας παράλληλα την κύρια εργασία ανεπηρέαστη μέσω της προβολής στο μηδενόχωρο.

Συνολικά λοιπόν, η κινηματική εξίσωση ελέγχου που ικανοποιεί την παρακολούθηση της τροχιάς και τη σταθεροποίηση του σφάλματος αποφεύγοντας παράλληλα τα εμπόδια είναι:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^+(\mathbf{p}_{id} + \mathbf{K}\mathbf{e}) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+\mathbf{J})k_0 \nabla_{\mathbf{q}}(V(\mathbf{q}))$$

3. Προσομοίωση

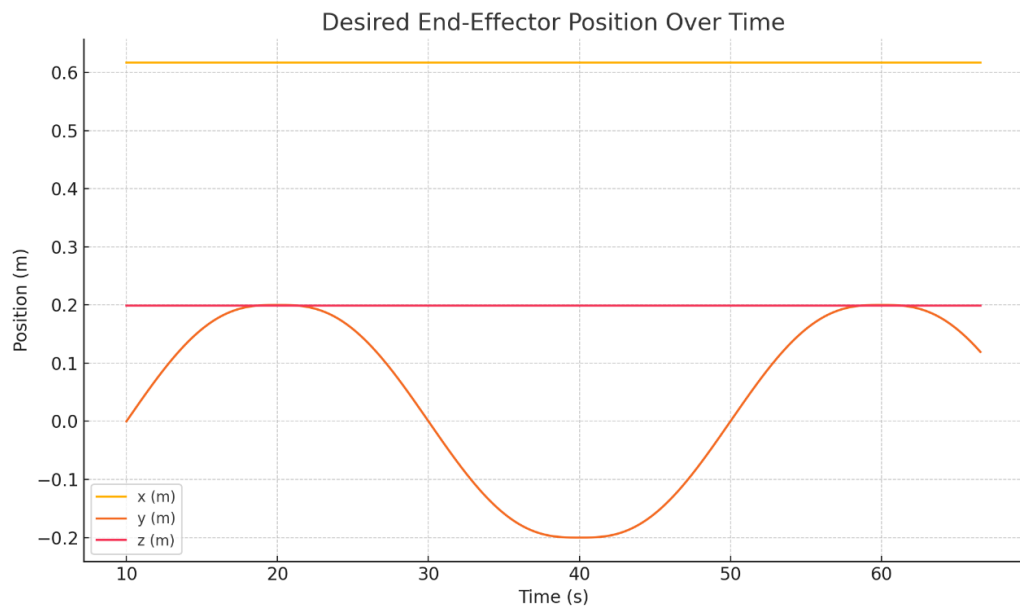
Στα αρχεία κώδικα που παρατίθενται στον φάκελο, έχουν υλοποιηθεί όλοι οι αλγόριθμοι για την πραγματοποίηση της απαιτούμενης εργασίας και η καταγραφή τιμών για διάφορα πειράματα. Συγκεκριμένα, στο αρχείο *kinematics.py* έχει γίνει η κινηματική ανάλυση του ρομποτικού βραχίονα, με υπολογισμό των μητρώων μετασχηματισμού και της συνολικής Ιακωβιανής μήτρας, ενώ στο αρχείο *controller.py* έχει υλοποιηθεί ο αλγόριθμος αποφυγής των εμποδίων, με τη μεθοδολογία που περιγράψαμε στο θεωρητικό μέρος της αναφοράς. Χρήσιμες συναρτήσεις για την εκτέλεση της εργασίας βρίσκονται στο αρχείο *utils.py*, ενώ υλοποιήσεις των logs και των plots στα *logger.py* και *plotter.py*.

Η εκτέλεση των προγραμμάτων ελέγχου του ρομπότ έγινε στο περιβάλλον ROS (Robot Operating System) σε συνεργασία με το περιβάλλον προσομοίωσης Gazebo.

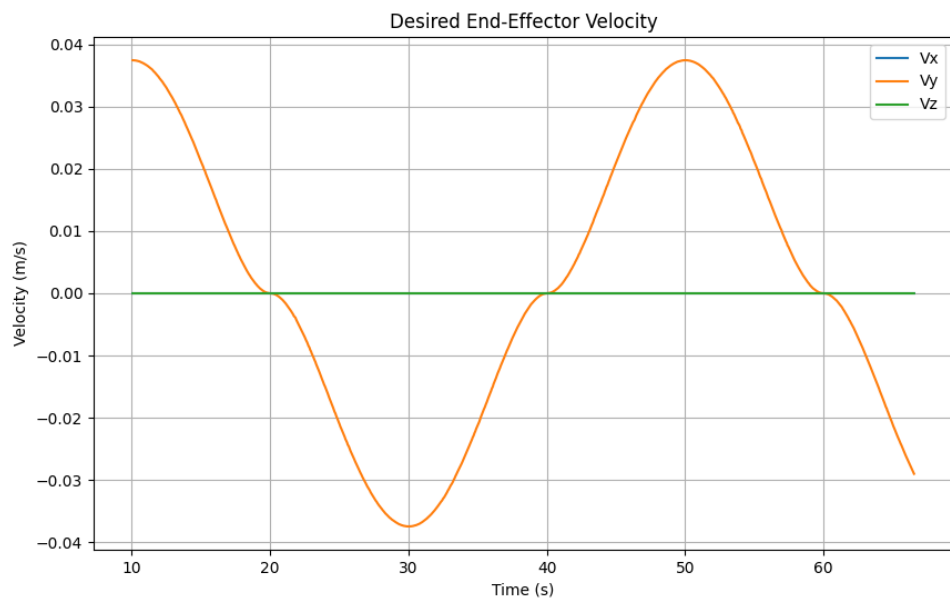
Στο συγκεκριμένο πείραμα που θα σχολιάσουμε, χρησιμοποιήσαμε τις εξής παραμέτρους:

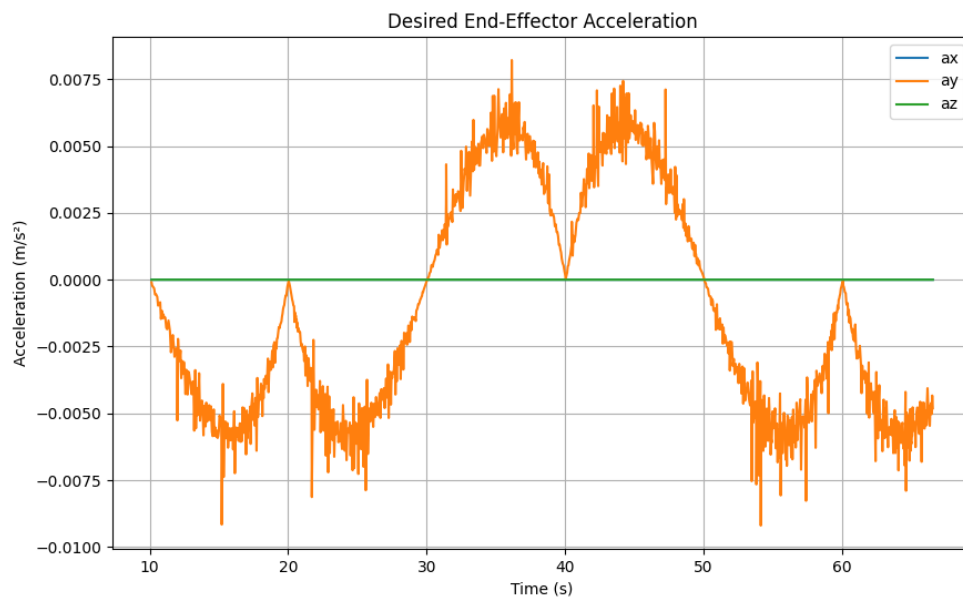
| Παράμετρος | Τιμή |
|--------------------------------|--------------------------|
| T (ημιπερίοδος τροχιάς) | 20 s |
| K (gain ελέγχου σφάλματος) | 0.1 |
| k_0 (gain αποφυγής εμποδίου) | 1 |
| r (ακτίνα εμποδίων) | 0.05 m |
| h (ύψος εμποδίων) | 0.8 m |
| Θέση Εμποδίου 1 | (0.2885, -0.2, 0.4000) m |
| Θέση Εμποδίου 2 | (0.3000, +0.2, 0.3999) m |

Ξεκινάμε με την αναπαράσταση της επιθυμητής τροχιάς, η οποία περιγράφεται από την περιοδική συνάρτηση $s(t)$.



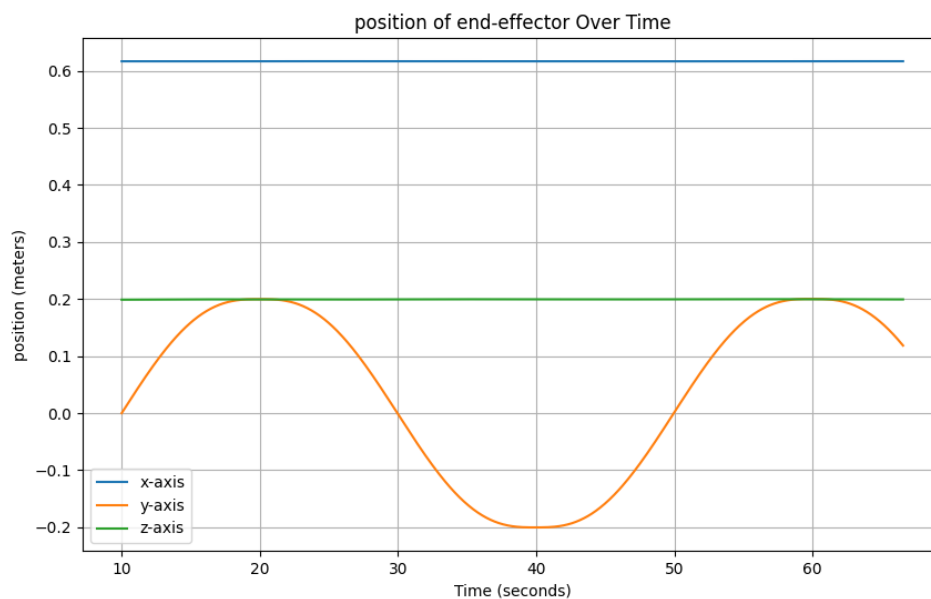
Με επιθυμητή ταχύτητα και επιτάχυνση ως εξής:

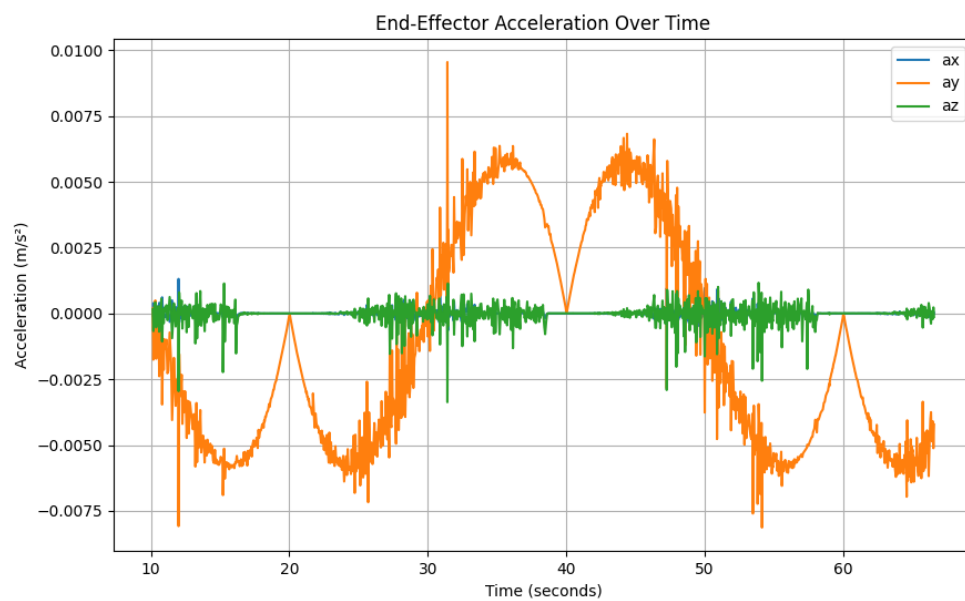
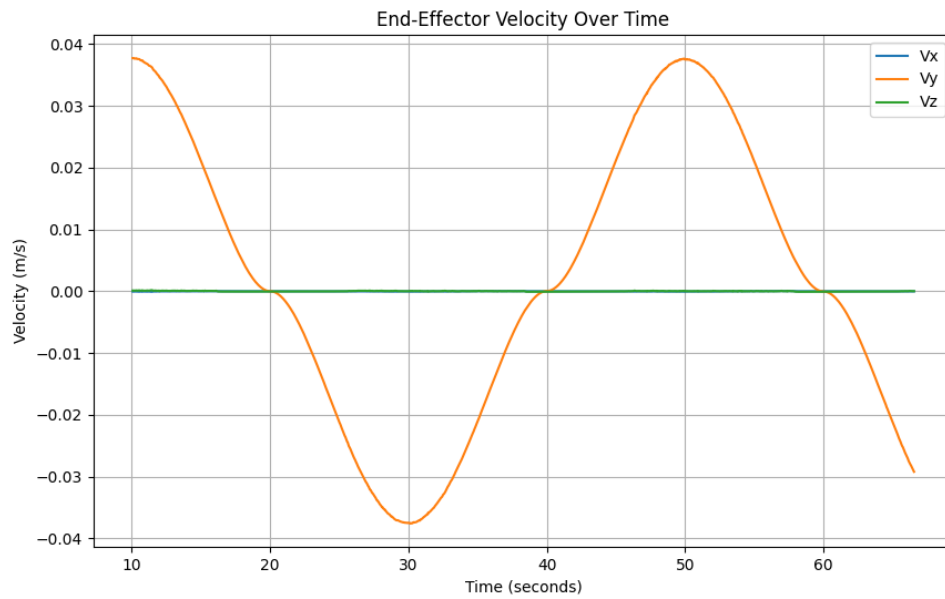




Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό της επιθυμητής ταχύτητας και επιτάχυνσης πραγματοποιήθηκε παραγωγή χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πρώτων διαφορών. Τα χρονικά διαστήματα ανάμεσα σε δείγματα (dt_i) δεν είναι σταθερά. Αυτό οδηγεί σε παραμόρφωση του σήματος και είναι κάτι που παρατηρούμε και σε άλλα διαγράμματα. Θα μπορούσαν επίσης να είχαν υπολογιστεί και αναπαρασταθεί απευθείας από τους αναλυτικούς τύπους του θεωρητικού μέρους, εξασφαλίζοντας καθαρότητα και ομαλότητα στο σήμα μας.

Οι πραγματικές αποκρίσεις είναι οι εξής:

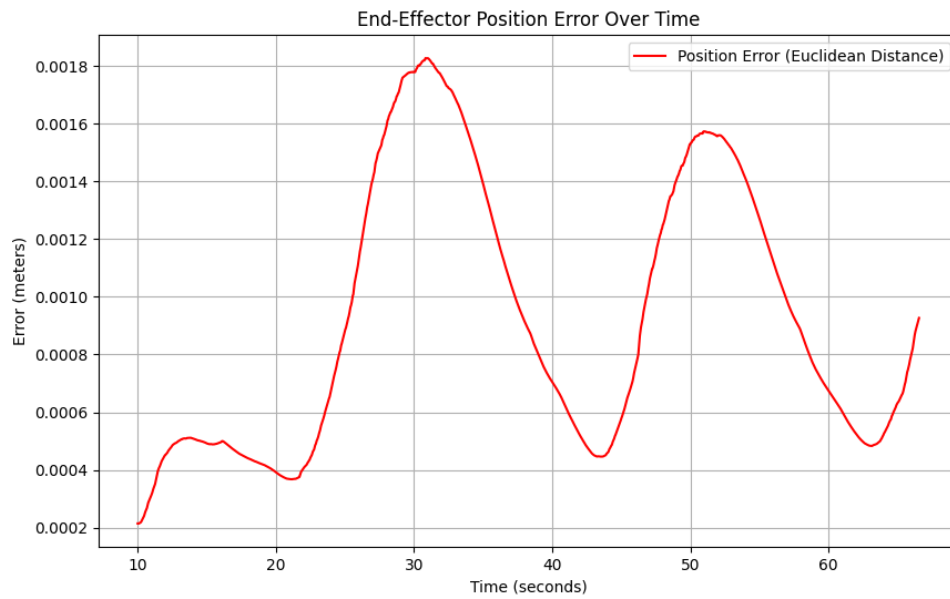




Σύγκριση επιθυμητού – πραγματικού προφίλ

Όπως γίνεται αντιληπτό, οι καμπύλες θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης του end-effector ακολουθούν πιστά τις αντίστοιχες επιθυμητές (desired), με μέγιστες αποκλίσεις της τάξης των 1–2 mm (δηλαδή $<1\%$ επί του συνολικού εύρους 0.20 m) και χωρίς ασυνέχειες, επιβεβαιώνοντας την ομαλή και ακριβή απόδοση του ελεγκτή.

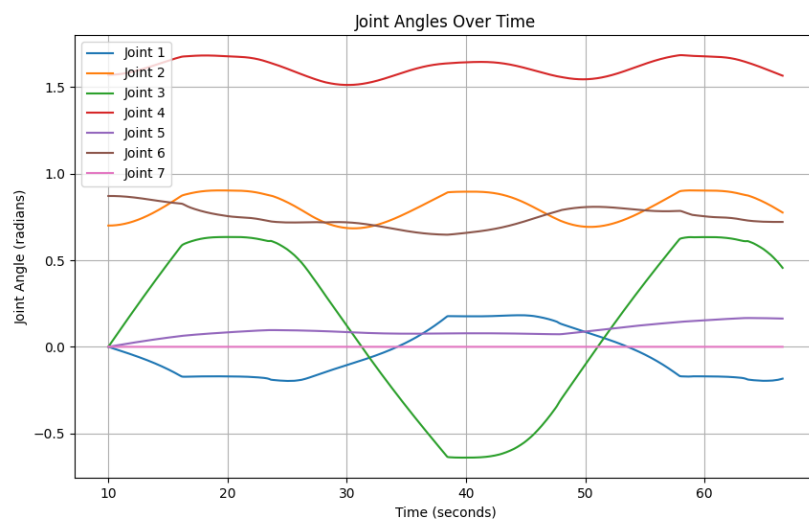
Μάλιστα, η απόκλιση μεταξύ desired position και actual position, φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα, προκειμένου να γίνει περεταίρω αισθητή η ακρίβεια του μοντέλου μας,



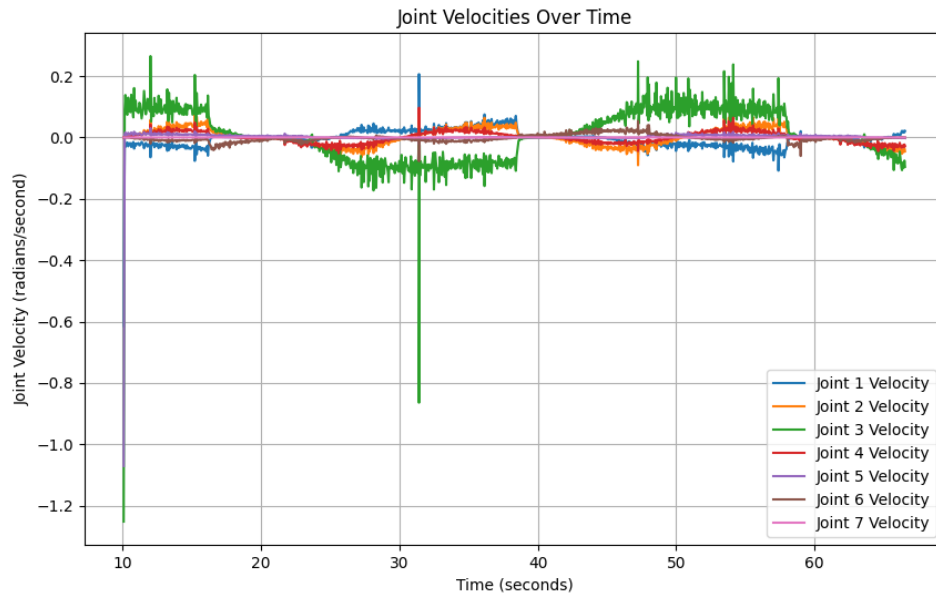
Όπως φαίνεται, το τελικό σημείο δράσης του ρομποτικού βραχίονά μας, κινείται με ακρίβεια του 1 mm κατά μέσο όρο, με μέγιστη απόκλιση τα 1.8 mm, επιβεβαιώνοντας την καλή απόδοση στον έλεγχο τροχιάς.

Παρατηρούμε επίσης ότι η συνάρτηση σφάλματος παρουσιάζει δύο παρόμοια κύματα με κορυφές στα ~30 s και ~50s, δηλαδή όταν μεγιστοποιείται (κατά απόλυτη τιμή) η ταχύτητα και μηδενίζεται η επιτάχυνση. Αυτό μπορεί να οφείλεται τόσο στον αυξημένο θόρυβο που παρατηρείται εκείνη την περίοδο στο σήμα επιτάχυνσης, όσο και στη μεγαλύτερη δυναμική απαίτηση του συστήματος κατά τις φάσεις υψηλής ταχύτητας.

Οι γωνίες των αρθρώσεων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης:



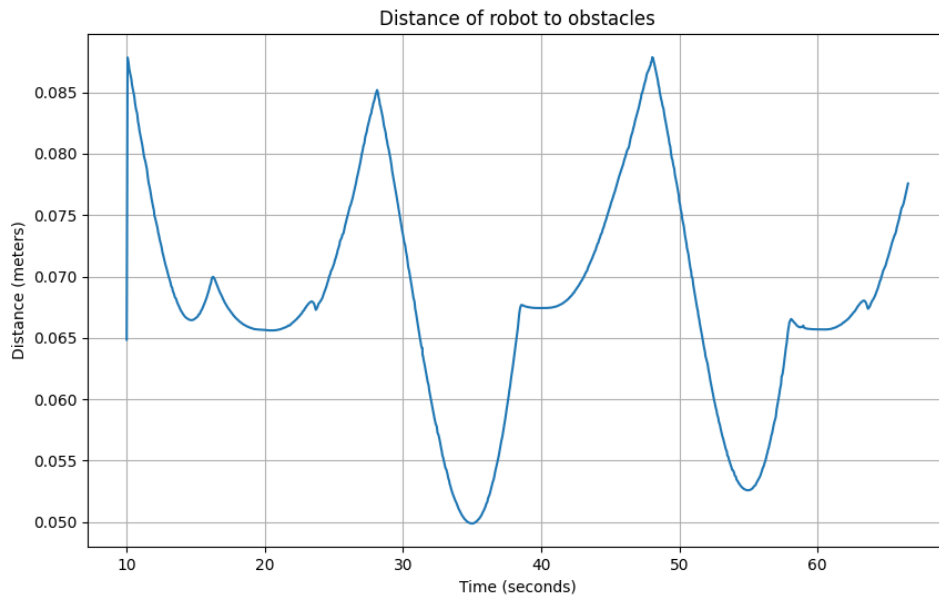
Και οι αντίστοιχες γωνιακές ταχύτητες:



Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, οι μεταβολές των γωνιών των αρθρώσεων είναι συνεχείς και χωρίς απότομα άλματα, επιβεβαιώνοντας την ομαλή λειτουργία του ελεγκτή. Οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις σε τιμές παρουσιάζονται από την joint 3, η οποία, στο xArm 7, είναι υπεύθυνη για την κίνηση του βραχίονα δεξιά και αριστερά, φέροντας το κύριο βάρος της κίνησης του end-effector. Οι υπόλοιπες αρθρώσεις παρουσιάζουν μικρότερες διακυμάνσεις, συμβάλλοντας κυρίως στη διατήρηση της συνολικής στάσης του βραχίονα και στην ικανοποίηση περιορισμών απόστασης από τα εμπόδια. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι περισσότερες αρθρώσεις εμφανίζουν περιοδική συμπεριφορά, αλλά με διαφορετική περίοδο: κάποιες, όπως οι Joint 1 και 2, έχουν περίοδο T , ενώ άλλες, όπως η Joint 3, έχουν περίοδο $2T$. Αντίθετα, οι Joint 6 και 7 εμφανίζουν σχεδόν αμελητέα ή απεριοδική συμπεριφορά. Αυτό το φαινόμενο σχετίζεται με τη γεωμετρία και τη λειτουργία κάθε άρθρωσης στο βραχίονα: οι αρθρώσεις κοντά στη βάση επηρεάζουν έντονα τον συνολικό προσανατολισμό του βραχίονα και συνεπώς αλλάζουν ταχύτερα (μικρότερη περίοδος), ενώ οι αρθρώσεις κοντά στο άκρο λειτουργούν διορθωτικά ή σταθεροποιητικά, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν είτε πολύ ομαλές είτε αμελητέες διακυμάνσεις.

Οι γωνιακές ταχύτητες των αρθρώσεων παρουσιάζουν γενικά ομαλή συμπεριφορά, χωρίς απότομες μεταβολές ή ασυνέχειες, γεγονός που επιβεβαιώνει περαιτέρω την καλή λειτουργία του ελεγκτή. Ο θόρυβος που παρατηρείται σε ορισμένα σημεία μπορεί να αποδοθεί κυρίως στους αισθητήρες μέτρησης του ρομπότ και στον numerical υπολογισμό μέσω παραγωγίσις προς τον χρόνο διακριτών δειγμάτων των γωνιών των αρθρώσεων.

Τέλος, προχωράμε στο διάγραμμα ελάχιστης απόστασης του ρομποτικού βραχίονα από τα εμπόδια κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.



Παρατηρείται περιοδική συμπεριφορά, η οποία ακολουθεί τη δομή των δύο ημιπεριόδων της τροχιάς.

Η απόσταση κυμαίνεται μεταξύ ~ 0.050 m και ~ 0.087 m, χωρίς ποτέ να παραβιάζεται το όριο ασφαλείας των 5 cm. Πιο συγκεκριμένα:

- Τα ολικά μέγιστα (~ 8.7 cm) σημειώνονται γύρω στα 28–29 s και 48–49 s, δηλαδή όταν ο end-effector πλησιάζει το μέσο του ευθύγραμμου τμήματος.
- Τα ολικά ελάχιστα (~ 5.0 cm) παρατηρούνται περίπου στο τέλος της κάθε ημιπεριόδου, περίπου στα 34–35 s και 54–55 s, όταν ο end-effector πλησιάζει τα άκρα του ευθύγραμμου τμήματος (P_A , P_B).

Η μορφή αυτή μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: ο βραχίονας ξεκινάει την κάθε ημιπερίοδο από μια ακραία θέση, με απόσταση ~ 6.5 cm από τα εμπόδια. Καθώς κατευθύνεται προς το ένα άκρο της τροχιάς (P_A ή P_B), η απόσταση αυξάνεται φτάνοντας σε ολικό μέγιστο τη χρονική στιγμή που ο end-effector είναι ακριβώς ανάμεσα από τα δύο εμπόδια. Στη συνέχεια, πλησιάζει το ένα εμπόδιο περισσότερο για να πάει στο άκρο του ευθύγραμμου τμήματος, με αποτέλεσμα να έχουμε την ελάχιστη απόσταση από τα εμπόδια. Προς το τέλος της ημιπεριόδου η ρομποτική διάταξη αναπροσαρμόζεται έτσι ώστε στο τέλος κάθε ημιπεριόδου να επιστρέψει στην αρχική και ασφαλή τιμή των ~ 6.5 cm.

Η ομαλότητα του διαγράμματος χωρίς απότομες αιχμές δείχνει ότι η αποφυγή εμποδίων πραγματοποιείται μέσω συνεχούς αναπροσαρμογής της τροχιάς στο null-space του Jacobian και όχι με απότομες αποκλίσεις.