

Ρομποτική II

1^η εξαμηνιαία εργασία

“Κινηματικός έλεγχος ρομποτικού χειριστή με πλεονάζοντες βαθμούς ελευθερίας: Παρακολούθηση τροχιάς και αποφυγή εμποδίου”

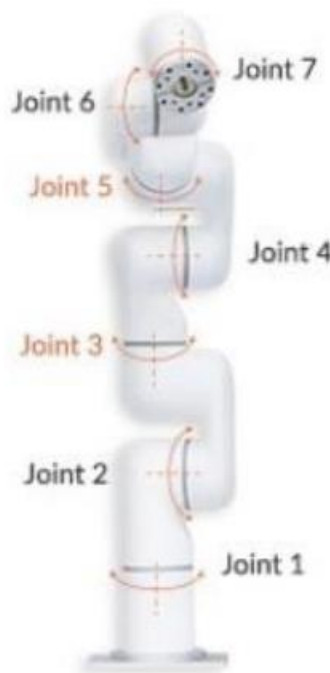


Περιγραφή Εργαστηρίου

Σε αυτή την εξαμηνιαία εργασία το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην παρακολούθηση της τροχιάς και την αποφυγή εμποδίων ενός cobot. Τα cobots, ή αλλιώς collaborative robots - συνεργαζόμενα ρομπότ, είναι ρομπότ τα οποία προορίζονται για αλληλεπίδραση με ανθρώπους, καθώς έχουν προσαρτημένους διάφορους αισθητήρες για τον έλεγχο της ταχύτητας και της θέσης κάθε συνδέσμου, ή γενικότερο για την ομαλή εκτέλεση μιας υποεργασίας του.

Το cobot, που θα χρησιμοποιηθεί, είναι το xArm 7, με τα εξής χαρακτηριστικά :

- 7 βαθμούς ελευθερίας (DOFs) δυνατότητα
- δυνατότητα 3.5 kg ωφέλιμου φορτίου
- χώρος εργασίας του εκτείνεται στα 70 cm από τη βάση του
- μέγιστη ταχύτητα στο τελικό στοιχείο δράσης 1 m/s



Το cobot xArm 7 με απαριθμημένους του συνδέσμους τους

Η εκτέλεση προγραμμάτων ελέγχου του ρομπότ γίνεται στο λογισμικό περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών ROS (Robot Operating System) , δίνοντας στην διάθεση του χρήστη χρήσιμα εργαλεία για την διευκόλυνση του προγραμματισμού του ρομπότ. Επιπλέον, χρησιμοποιείται και το περιβάλλον προσομοίωσης gazebo, το οποίο παρέχει ρεαλιστικές

υλοποιήσεις ρομποτικών διατάξεων και χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και δοκιμή των προγραμμάτων ελέγχου του ρομπότ και την ολοκλήρωση των στόχων της εργασίας.

Στόχος Εργαστηρίου

Ο στόχος αυτού του εργαστηριακού είναι η υλοποίηση ενός αλγορίθμου για την παρακολούθηση τροχιάς από το τελικό στοιχείο δράσης του xArm 7 με ταυτόχρονη αποφυγή εμποδίων, η κίνηση των οποίων ελέγχεται διαδραστικά από το χρήστη μέσω του πληκτρολογίου.

Συγκεκριμένα, το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα καλείται να εκτελέσει ευθύγραμμη περιοδική κίνηση μεταξύ των θέσεων p_A και p_B , με ταυτόχρονη αποφυγή εμποδίων, με προκαθορισμένες θέσεις στο χώρο. Τα εμπόδια βρίσκονται στις ακόλουθες θέσεις, όπως φαίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος Gazebo.

Πράσινο Εμπόδιο

Property	Value
name	Obs1
is_static	<input type="checkbox"/> False
self_coll...	<input type="checkbox"/> False
enable_...	<input type="checkbox"/> False
▼ pose	
x	0,300000
y	-0,200000
z	0,400026
roll	-0,000006
pitch	0,000526
yaw	0,00

Κόκκινο Εμπόδιο

Property	Value
name	Obs2
is_static	<input type="checkbox"/> False
self_coll...	<input type="checkbox"/> False
enable_...	<input type="checkbox"/> False
▼ pose	
x	0,300000
y	0,200000
z	0,400026
roll	-0,000006
pitch	0,000526
yaw	0,00

Για την αρχική τοποθέτηση του xArm 7 υπολογίστηκε η μήτρας μετάβασης A_7^0 , ως αποτέλεσμα διαδοχικών πολλαπλασιασμών των μητρώων μεταβάσεως, όπως δόθηκαν στην εκφώνηση.

Σημείωση:

Στα παρακάτω πλαίσια παραλείπεται η τελευταία γραμμή ως γνωστή και κοινή σε όλα τα πλαίσια $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$.

$$\mathbf{A}_1^0(\mathbf{q1}) = Rot(z, q1) \cdot Tra(z, 0.267)$$



$$\mathbf{A}_1^0(\mathbf{q1}) = \begin{bmatrix} c1 & -s1 & 0 & 0 \\ s1 & c1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 26.7 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2^1(\mathbf{q2}) = Rot(x, -\pi/2) \cdot Rot(z, q2)$$



$$\mathbf{A}_2^1(\mathbf{q2}) = \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s2 & -c2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_3^2(\mathbf{q3}) = Rot(x, +\pi/2) \cdot Rot(z, q3) \cdot Tra(z, 0.293)$$



$$\mathbf{A}_3^2(\mathbf{q3}) = \begin{bmatrix} c3 & -s3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 29.3 \\ s3 & c3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_4^3(\mathbf{q4}) = Rot(x, +\pi/2) \cdot Tra(x, 0.0525) \cdot Rot(z, q4)$$



$$\mathbf{A}_4^3(\mathbf{q4}) = \begin{bmatrix} c4 & -s4 & 0 & 5.25 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s4 & c4 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_5^4(q5) = Rot(x, +\pi/2) \cdot Tra(x, 0.3512 \cdot \sin(0.2225)) \cdot Rot(z, q5) \cdot Tra(z, 0.3512 \cdot \cos(0.2225))$$



$$A_5^4(q5) = \begin{bmatrix} c5 & -s5 & 0 & 7.75 \\ 0 & 0 & -1 & -34.2543 \\ s5 & c5 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_6^5(q6) = Rot(x, +\pi/2) \cdot Rot(z, q6)$$



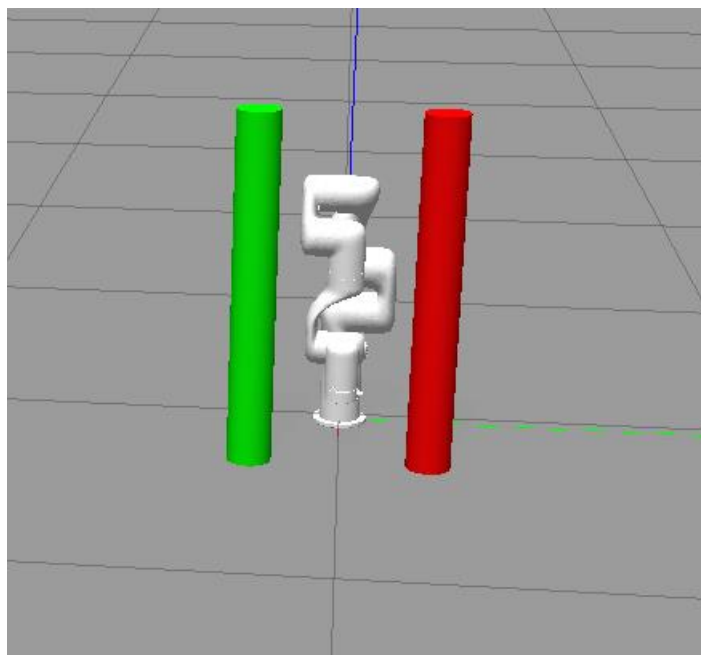
$$A_6^5(q6) = \begin{bmatrix} c6 & -s6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s6 & c6 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_7^6(q7) = Rot(x, -\pi/2) \cdot Tra(x, 0.1232 \cdot \sin(0.6646)) \cdot Rot(z, q7) \cdot Tra(z, 0.1232 \cdot \cos(0.6646))$$

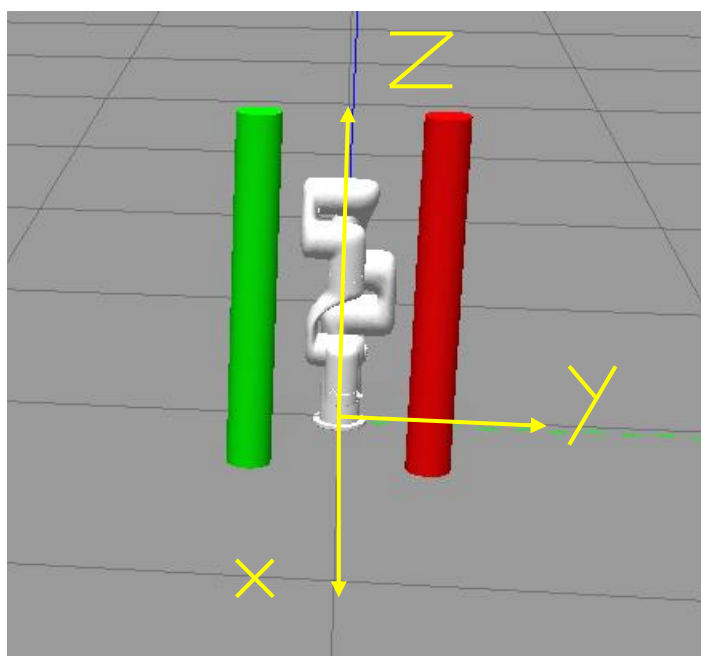


$$A_7^6(q7) = \begin{bmatrix} c7 & -s7 & 0 & 7.5983 \\ 0 & 0 & 1 & 9.6978 \\ -s7 & -c7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Επομένως, με τη βοήθεια υπολογιστικής αριθμομηχανής ([symbolab](https://www.symbolab.com/)) υπολογίστηκε το μητρώο μετάβασης από τη βάση των αξόνων στο τελικό στοιχείο δράσης. Με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης Gazebo, προέκυψαν τα ακόλουθα δεδομένα αρχικοποίησης του cobot xArm 7.



Οι άξονες του πλαισίου αναφοράς φαίνονται ξεκάθαρα στο ακόλουθο σχήμα.



Θεωρητική Ανάλυση

Για την περιγραφή της ελεγχόμενης κίνησης του cobot θα γίνει η διάσπαση σύνθετων ρομποτικών εργασιών ρομποτικές υποεργασίες με σειρά προτεραιότητας. Συγκεκριμένα, ακολουθήθηκε η παρακάτω διάσπαση σε δύο υποεργασίες:

1η υποεργασία: (Καθορισμός επιθυμητής τροχιάς του cobot στο χώρο εργασίας)

Σε αυτή την υποεργασία επιλέγεται η επιθυμητή τροχιά που θα εκτελέσει το cobot. Σε αυτή την εξαμηνιαία άσκηση είναι επιθυμητό το cobot να εκτελέσει μια ευθύγραμμη περιοδική κίνηση ανάμεσα στα σημεία p_A , p_B που απέχουν 40cm στον άξονα y .

Για τον καθορισμό της υποεργασίας αυτής χρειάστηκε να εκφραστούν οι επιθυμητές διαδρομές σε επιμέρους εξισώσεις τροχιών. Για τον σχεδιασμό αυτό της τροχιάς χρησιμοποιήθηκε μια πολυωνυμική συνάρτηση παρεμβολής 3^{ου} βαθμού και 4^{ων} παραμέτρων, όπως περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση.

$$\xi(t) = \alpha_0 + \alpha_1 * t + \alpha_2 * t^2 + \alpha_3 * t^3 \quad 1$$

Όπου α_0 : αρχική θέση

α_1 : τελική θέση

α_2 : αρχική ταχύτητα

α_3 : τελική ταχύτητα

Η διάσπαση σε 3 επιμέρους εξισώσεις τροχιών, οι οποίες επαναλαμβάνονται κυκλικά για να εκτελέσει την επιθυμητή περιοδική κίνηση ο βραχίονας, προκύπτουν με βάση τη σχέση (1) με αναδρομική ανανέωση της, αναλόγως με τη θέση του βραχίονα.

1η εξίσωση τροχιάς:

Η επιθυμητή διαδρομή σε αυτή την περίπτωση είναι το τελικό στοιχείο δράσης να ξεκινάει από την θέση αρχικοποίησης και να φτάνει στο επιθυμητό σημείο, που βρίσκεται μπροστά από το κόκκινο εμπόδιο.

2η εξίσωση τροχιάς:

Η επιθυμητή διαδρομή σε αυτή την περίπτωση είναι το τελικό στοιχείο δράσης να ξεκινάει από το επιθυμητό σημείο, που βρίσκεται μπροστά από το κόκκινο εμπόδιο, και να φτάνει στο επιθυμητό σημείο, που βρίσκεται μπροστά από το πράσινο εμπόδιο.

3η εξίσωση τροχιάς:

Η επιθυμητή διαδρομή σε αυτή την περίπτωση είναι το τελικό στοιχείο δράσης να ξεκινάει από το επιθυμητό σημείο, που βρίσκεται μπροστά από το πράσινο εμπόδιο, και να φτάνει στο επιθυμητό σημείο, που βρίσκεται μπροστά από το κόκκινο εμπόδιο.

Επομένως, με συνεχή αναδρομική ανανέωση της εξίσωσης τροχιάς του cobot προκύπτει ότι η επιθυμητή κίνησή του, χωρίς κάποιο περιορισμό στο χώρο λόγω ύπαρξης εμποδίων.

2η υποεργασία: (Καθορισμός κριτηρίων στο χώρο διάταξης των αρθρώσεων)

Σε αυτή την υποεργασία επιλέγεται το κριτήριο ελέγχου του cobot, δηλαδή θα οριστεί μια συνάρτηση κριτηρίου $V(q)$, η βελτιστοποίηση της οποίας θα περιγράφει τη δεύτερη ρομποτική υποεργασία. Συγκεκριμένα, επιλέγεται μια παραβολική συνάρτηση της απόστασης του ρομποτικού χειριστή από το εμπόδιο όπως περιγράφεται στην παρακάτω σχέση.

$$V(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} * Kc * (d - d_0)^2, & \text{αν } d < d_0 \\ 0 & \text{αν } d \geq d_0 \end{cases} \quad 2$$

Όπου d_0 : το κατώφλι απόστασης από το εμπόδιο

Kc : η σταθερά ενίσχυσης (επιλέγεται τέτοια ώστε να εξασφαλίζει ταχεία αύξηση της συνάρτησης κριτηρίου όταν η απόσταση d είναι μικρότερη της δεδομένης τιμής κατωφλίου d_0)

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, η δεύτερη ρομποτική υποεργασία μπορεί να εκφρασθεί ως ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης της συνάρτησης κριτηρίου $V(q)$, όταν $d < d_0$, που σημαίνει ότι η ταχύτητα αναφοράς $\dot{q}^{(2)}$ για την επίτευξη της δεύτερης υποεργασίας μπορεί να εκφρασθεί από την παρακάτω σχέση.

$$\dot{q}_r^{(2)} = \begin{bmatrix} Kc * (d - do) \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3$$

Επομένως, με τη βοήθεια των σχέσεων (3) , (4) προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για τη γενικευμένη ταχύτητα των αρθρώσεων, που αντιστοιχεί στη δεύτερη ρομποτική υποεργασία .

$$\dot{q}^{(2)} = K_2 * [I_{n \times n} - J_1^+(q) * J_1(q)] * \dot{q}_r^{(2)} \quad 4$$

Παρατηρήθηκε από τη γεωμετρία του cobot και των εμποδίων ότι αν υπάρχει κάποια σύγκρουση μεταξύ cobot και εμποδίου αυτή θα γίνει στους συνδέσμους 3 ή 4. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από το γεγονός ότι το cobot θα εκτελέσει ευθύγραμμη περιοδική κίνηση μεταξύ σημείων ίδιας θέσεως σε άξονες x, z και διαφορετικής ως προς y.

Άρα, με αυτή την παρατήρηση αρκεί να εφαρμοστεί ένα κριτήριο ελέγχου μόνο για τις αρθρώσεις – βάσεις αυτών των συνδέσμων.

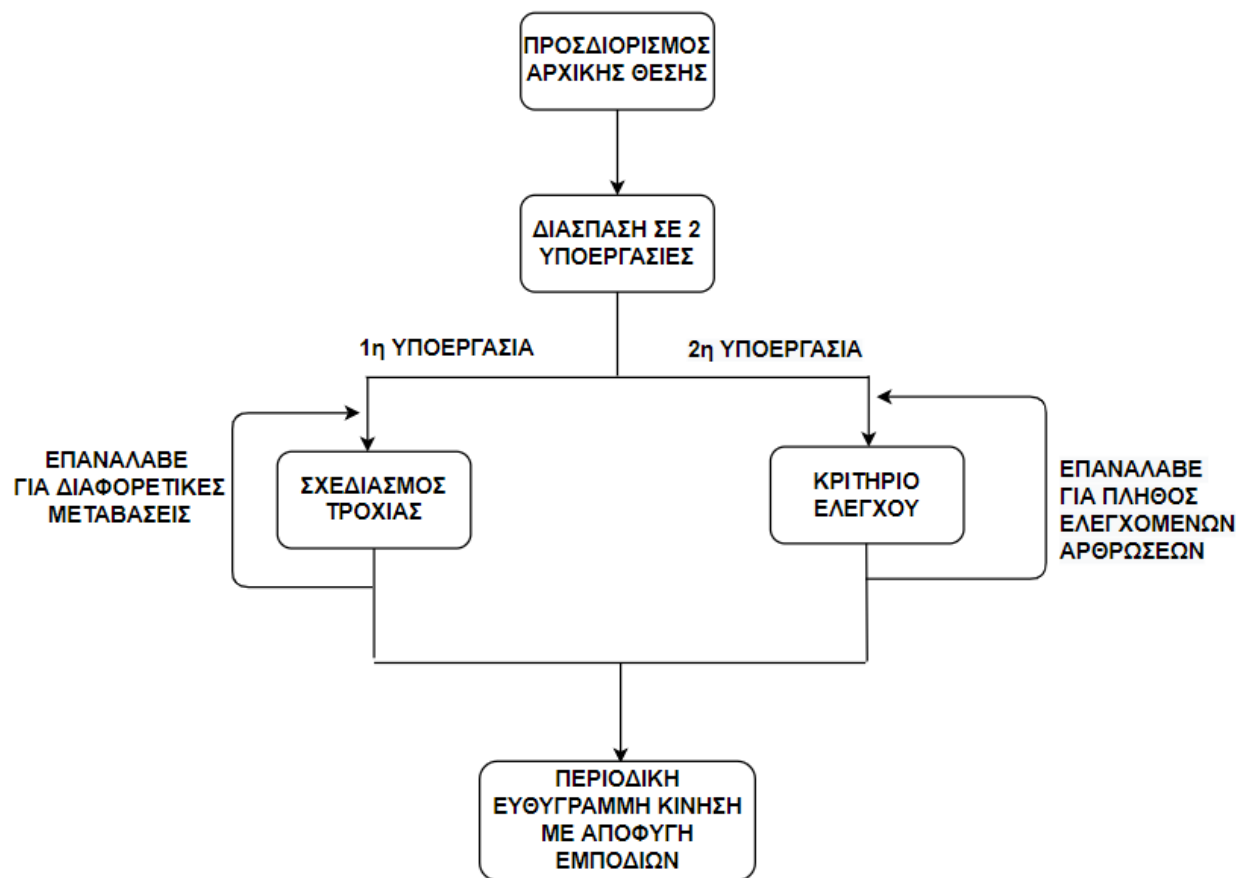
Συγκεκριμένα, ο 3^{ος} σύνδεσμος πρέπει να υπακούει στην ακόλουθη εξίσωση.

$$\dot{q}^{(2)} = \quad 5$$

Σε αντιστοιχία, ο 4^{ος} σύνδεσμος πρέπει να υπακούει στην ακόλουθη εξίσωση.

$$\dot{q}^{(2)} = \quad 6$$

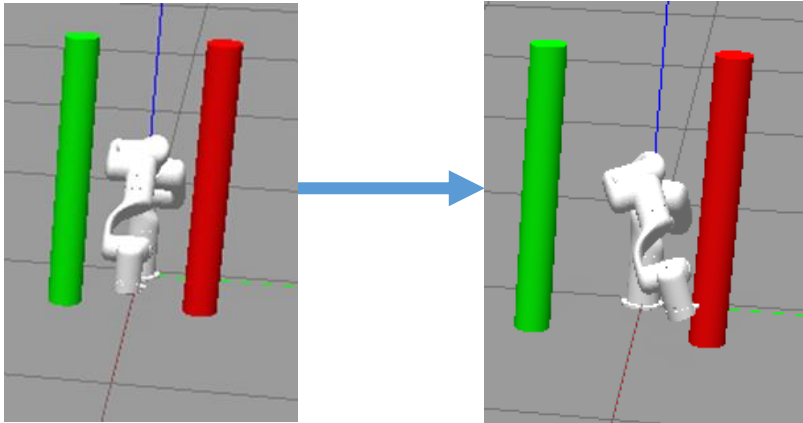
Συνεπώς, η λειτουργία του cobot μπορεί να συνοψιστεί στο ακόλουθο σχεδιάγραμμα αναδρομικής λειτουργίας του.



Προσομοίωση

Σύμφωνα με τα δεδομένα που προέκυψαν από την θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας του cobot, προκύπτει η κινηματική του προσομοίωση. Το cobot, όπως έχει εξηγηθεί, καλείται να εκτελέσει μια περιοδική ευθύγραμμη κίνηση μεταξύ των σημείων p_A και p_B .

Συγκεκριμένα, ξεκινώντας από τη θέση αρχικοποίησης πρέπει να εκτελέσει την παρακάτω μετάβαση από το αρχικό σημείο του τελικού εργαλείου δράσης στο ακραίο επιθυμητό σημείο, μπροστά από το κόκκινο εμπόδιο.



Ύστερα, το cobot εκτελεί την περιοδική ευθύγραμμη κίνηση κατά τον άξονα y , που φαίνεται ακολούθως.

