



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
& Τεχνολογίας Υπολογιστών

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ

Χειρισμός εργαλείου ρομποτικής
χειρουργικής

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Μπεχλιούλης Χaráλαμπος

ΦΟΙΤΗΤΕΣ:

Καλακώνης Γεώργιος-1083846

Θεοδωρόπουλος Χρήστος-1089860

Δανδάκης Θεόφιλος-1083718

Περιεχόμενα

Σκοπός του προβλήματος.....	3
Μοντελοποίηση του προβλήματος.....	3
Ευθεία κινηματική.....	4
Περιορισμοί	5
Όρια αρθρώσεων.....	5
Απόσταση από την τομή.....	5
Αντίστροφη κινηματική	7
Remote Center of Motion	7
Υλοποίηση.....	9
Πειράματα	9
Μετακίνηση σε σημείο	9
Μεταφορικές κινήσεις	10
Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	16
Συμπεράσματα.....	16
Βιβλιογραφία.....	17

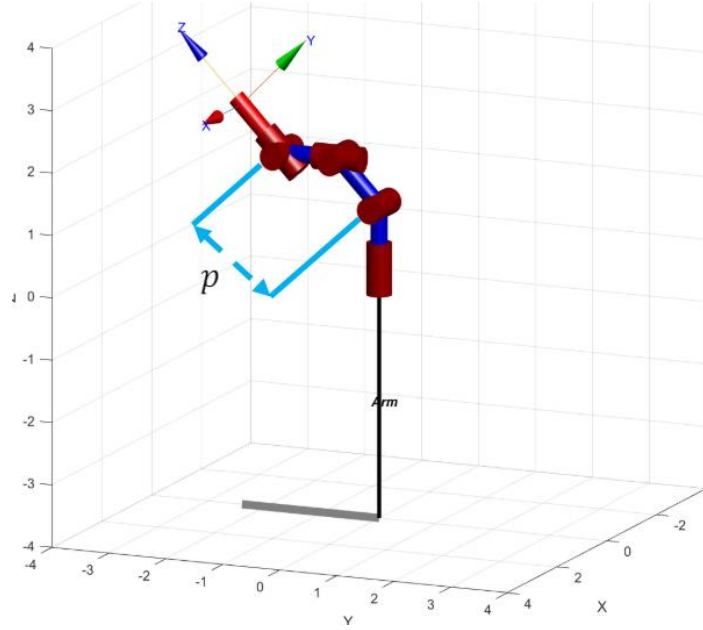
Σκοπός του προβλήματος

Ο περιορισμός των δυνατών κινήσεων ενός συνδέσμου χειριστή (*manipulator link*), ο οποίος περιορίζεται να κινείται μέσω μιας εισόδου είναι ένα κοινό πρόβλημα στις ρομποτικά υποβοηθούμενες χειρουργικές επεμβάσεις. Κατά τη διάρκεια αυτών των εργασιών, μακριά και λεπτά εργαλεία συνδέονται στο άκρο του ρομπότ. Τα εργαλεία αυτά εισέρχονται στο εσωτερικό του σώματος του ασθενούς μέσω μικροσκοπικών τομών στο δέρμα του ασθενούς μέσω *trocar*. Κάθε τομή, σταθερή ή κινούμενη λόγω της αναπνοής ή/και του καρδιακού παλμού, πρέπει να λειτουργεί ως ένα απομακρυσμένο κέντρο κίνησης (*remote center of motion (RCM)*). Εάν χρησιμοποιείται χειριστής γενικής χρήσεως το *trocar* δεν είναι γενικά άκαμπτα συνδεδεμένο με το περιβάλλον. Έτσι, σε πρακτικές εργασίες, όπου ένας άνθρωπος ασκεί δυνάμεις στο άκρο του ρομπότ για να χειριστεί το εργαλείο, είναι δύσκολο να γνωρίζουμε ποιες γενικευμένες δυνάμεις δεν θα καταπονούν το τοίχωμα της τομής. Επομένως, απαιτείται μια προσέγγιση ελέγχου για τον περιορισμό της κίνησης του εργαλείου, ώστε το τοίχωμα της τομής να μην καταπονείται από πλευρικές δυνάμεις κατά τη διάρκεια μιας φυσικής αλληλεπίδρασης του ανθρώπου με το ρομπότ. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση ενός *target dynamic model*, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα ελέγχου προσχώρησης που αποσυνδέει (*decoupling*) με κατάλληλο τρόπο τον χώρο των αρθρώσεων του ρομπότ, έτσι ώστε να ικανοποιείται ο περιορισμός RCM κατά τη διάρκεια χειρισμού του εργαλείου. Ποικίλα πειράματα και προσομοιώσεις έχουν λάβει χώρα με διάφορους ρομποτικούς χειριστές, τα οποία ωστόσο επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα του συστήματος που αναφέρθηκε παραπάνω τόσο για σταθερό όσο και για κινούμενο σημείο τομής.

Μοντελοποίηση του προβλήματος

Στα πλαίσια του προβλήματος χρησιμοποιείται ένας ανθρωπομορφικός ρομποτικός βραχίονας 6 βαθμών ελευθερίας, στον οποίο προσαρμόζεται κατάλληλα ένα εργαλείο(κυλινδρικού σχήματος, μήκους 12 cm) στην τελευταία άρθρωση. Ως τελικό στοιχείο δράσης θεωρείται η άκρη του εργαλείου, ενώ υπολογίστηκαν οι παρακάτω παράμετροι με βάση την σύμβαση Denavit-Hartenberg:

Link	r_i	a_i	d_i
1	0	$\pi/2$	13
2	0	0	0
3	0	$\pi/2$	0
4	0	$-\pi/2$	8
5	0	$\pi/2$	0
6	0	0	12



Εικόνα 1. Ανθρωπομορφικός ρομποτικός βραχίονας 6 βαθμών ελευθερίας

Επιπλέον η τομή θα προσομοιωθεί από έναν δακτύλιο εξωτερικής ακτίνας 4.5 cm αμελητέου πάχους και η θέση και ο προσανατολισμός της θα θεωρούνται δεδομένα.

Το πρόβλημα χωρίζεται σε δύο μέρη. Αρχικά θα πρέπει το εργαλείο, από την τυχαία θέση που βρίσκεται να μεταβεί στο κέντρο του δακτυλίου που αναπαριστά την τομή του ασθενούς, με ίδιο προσανατολισμό υπό τους περιορισμούς να μην συγκρουστεί με την τομή και να διατηρούνται οι γωνίες των αρθρώσεων εντός των επιτρεπτών ορίων. Στην συνέχεια θα πρέπει το εργαλείο να εισέλθει στην τομή και να υλοποιήσει μεταφορικές κινήσεις ικανοποιώντας τον περιορισμό RCM(Remote Center of Motion), δηλαδή το σημείο εισόδου του εργαλείου να παραμένει ακίνητο.

Ευθεία κινηματική

Η ευθεία κινηματική ανάλυση αφορά τον υπολογισμό της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού στοιχείου δράσης δοθέντων των γωνιών των αρθρώσεων. Ο υπολογισμός καθίσταται δυνατός μέσω των πινάκων ομογενών μετασχηματισμών ως εξής:

$$T_{end-effector}^b = \begin{bmatrix} n_{end-effector}^b(q) & s_{end-effector}^b(q) & a_{end-effector}^b(q) & p_{end-effector}^b(q) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{end-effector}^b = A_1^0(q_1)A_2^1(q_2)A_3^2(q_3)A_4^3(q_4)A_5^4(q_5)A_6^5(q_6),$$

Όπου σύμφωνα και με τις παραμέτρους

$$A_i^{i-1}(q_i) = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Περιορισμοί

Η κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης στον χώρο εργασίας υπόκειται σε διάφορους περιορισμούς. Αρχικά θα πρέπει οι γωνίες των αρθρώσεων να βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων ενώ επιπλέον η φύση του προβλήματος επιβάλλει την εισαγωγή ενός περιορισμού που θα αποτρέπει το τελικό στοιχείο δράσης να πλησιάσει πολύ κοντά στην τομή ώστε να αποφευχθεί πιθανή σύγκρουση του με αυτήν. Στην περίπτωση ενός πλεοναστού χειριστή οι περιορισμοί αυτοί θα μπορούσαν να αφορούν δευτερεύοντες στόχους, οι οποίοι θα υλοποιούνταν στον μηδενοχώρο της Ιακωβιανής. Ωστόσο επειδή ο βραχίονας που χρησιμοποιείται διαθέτει 6 βαθμούς ελευθερίας αυτό δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί. Έτσι οι περιορισμοί θα χρησιμοποιηθούν κυρίως για την ορθή λειτουργία του προγράμματος, καθώς θα σταματούν την εκτέλεση του ακινητοποιώντας τον βραχίονα, όταν κάποιος περιορισμός δεν ικανοποιείται.

Όρια αρθρώσεων

$$L_i = \left(\frac{q_i - \tilde{q}_i}{q_{iM} - q_{im}} \right)^2, \text{όπου}$$

- \tilde{q}_i η μέση τιμή της γωνίας της i άρθρωσης
- q_{iM} η μέγιστη τιμή της γωνίας της i άρθρωσης
- q_{im} η ελάχιστη τιμή της γωνίας της i άρθρωσης

Απόσταση από την τομή

Το πρόβλημα της απόστασης της τομής ανάγεται σε ένα πρόβλημα προσδιορισμού της απόστασης μια ευθείας με έναν δακτύλιο στον τρισδιάστατο χώρο. Αρχικά θα θεωρηθεί ότι ο βραχίονας έχει αμελητέες διαστάσεις και θα οριστεί κάθε ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ των διαδοχικών αρθρώσεων, μέσω των αντίστοιχων πλαισίων (η αρχή ορισμένων πλαισίων ταυτίζεται οπότε δεν απαιτείται ο ορισμός ευθύγραμμου τμήματος).

Ας θεωρήσουμε την i άρθρωση:

Το διάνυσμα από την i άρθρωση στην $i+1$

$$p(s) = p_i + s \frac{(p_{i+1} - p_i)}{\|p_{i+1} - p_i\|} \text{όπου,}$$

- p_i, p_{i+1} , τα διανύσματα θέσης των i και $i+1$ αρθρώσεων αντίστοιχα
- Μήκος τόξου s , $0 \leq s \leq \|p_{i+1} - p_i\|$

Θεωρούμε ακόμα έναν δακτυλίου αμελητέου πάχους, με δεδομένη ακτίνα r , κέντρο C και προσανατολισμό με πίνακα περιστροφής $R = [n_c \quad s_c \quad a_c]$. Επιπλέον ο άξονας z του κύκλου θεωρείται κάθετος στο επίπεδο που ορίζει ο κύκλος. Με τον τρόπο αυτό ορίζονται παραμετρικά τα σημεία του κύκλου ως εξής:

$$c(t) = C + r(n_c \cos(t) + s_c \sin(t)), 0 \leq t \leq 2\pi$$

Τελικά αναζητούνται τα s, t που ελαχιστοποιούν την παρακάτω απόσταση και στα πλαίσια του προβλήματος μας ενδιαφέρει κυρίως η τιμή αυτής της ελάχιστης απόστασης

$$d(s, t) = \|p(s) - c(t)\|$$

Έτσι ορίζεται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης d_{min} , υπό τους παρακάτω περιορισμούς

- $0 \leq s \leq \|p_{i+1} - p_i\|$
- $0 \leq t \leq 2\pi$

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται η συνάρτηση `minimize` της `scipy.optimize` βιβλιοθήκης της `python`, η οποία χρησιμοποιεί την αλγόριθμο 'L-BFGS-B'.

Η διαδικασία αυτή γίνεται επαναληπτικά για τα διαδοχικά ζεύγη των αρθρώσεων και τελικά επιλέγεται η ελάχιστη απόσταση εξ αυτών των αποστάσεων που υπολογίστηκαν. Ακολουθεί ο κώδικας της υλοποίησης:

```
def mindist(self, angle_pos, obstacle, radius, R):
    obstacle = obstacle.reshape((3,1))
    distances=[]

    positions=[self.tf_A01(angle_pos)[:3, 3], self.tf_A02(angle_pos)[:3, 3],
               self.tf_A03(angle_pos)[:3, 3], self.tf_A04(angle_pos)[:3, 3],
               self.tf_A05(angle_pos)[:3, 3], self.tf_A06(angle_pos)[:3, 3]]

    initial_guess = np.array([0, np.pi])
    for i in range(len(positions)-1):
        pi=positions[i]
        pnext=positions[i+1]
        p=pnext-pi
        if np.linalg.norm(p)>1e-3:
            args=(pi,pnext,obstacle,radius,R)
            upper_limit = np.linalg.norm(pnext - pi)
            bounds = [(0, upper_limit), (0, 2*np.pi)]
            result = minimize(self.objective_function, initial_guess, args=args, bounds=bounds)
            distances.append(result.fun)

    if min(distances)<0.1:
        print("warning dist")
    return min(distances)

def objective_function(self,x,pi,pf,circle_center, radius,R):
    s=x[0]
    t=x[1]
    pi=pi.reshape((3,1))
    pf=pf.reshape((3,1))
    d=pi+s*(pf-pi)/np.linalg.norm(pf-pi) - circle_center -radius*(np.cos(t)*R[:3,0]+np.sin(t)*R[:3,1]).reshape((3,1))
```

Φυσικά θα πρέπει επιπλέον να ληφθεί υπόψιν ότι τόσο βραχίονας όσο και ο δακτύλιος έχουν υπολογίσιμες διαστάσεις.

Αντίστροφη κινηματική

Γνωρίζοντας την θέση και τον προσανατολισμό του κύκλου, θα πρέπει το τελικό στοιχείο δράσης να μετακινηθεί σε αυτήν την διαμόρφωση ώστε στην συνέχεια να πραγματοποιήσει τις επιθυμητές κινήσεις. Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος αντίστροφης κινηματικής:

$$\dot{q} = J^+ k \begin{bmatrix} p_d - p_{ee}(q) \\ \eta_{ee}(q)\epsilon_d - \eta_d \epsilon_{ee}(q) - S(\epsilon_d)\epsilon_{ee}(q) \end{bmatrix}, \text{όπου}$$

$$k = \text{diag}([1,1,1,1,0.1,0.1])$$

Remote Center of Motion

Στην περίπτωση χειρουργείων με ρομποτική υποστήριξη είναι σημαντικό το εκάστοτε εργαλείο να έχει την δυνατότητα να δημιουργεί κινήσεις στο άκρο του χωρίς να κινείται ωστόσο το σημείο της τομής, καθώς αυτό θα προκαλούσε επιπλοκές και ανεπιθύμητα αποτελέσματα στην διαδικασία. Αυτός ο περιορισμός ονομάζεται RCM(Remote Center of Motion)

Ας θεωρήσουμε $p_c \in \mathbb{R}^3$, το σημείο της τομής και $p_t \in \mathbb{R}^3$, το σημείο του τελικού στοιχείου δράσης με προσανατολισμό

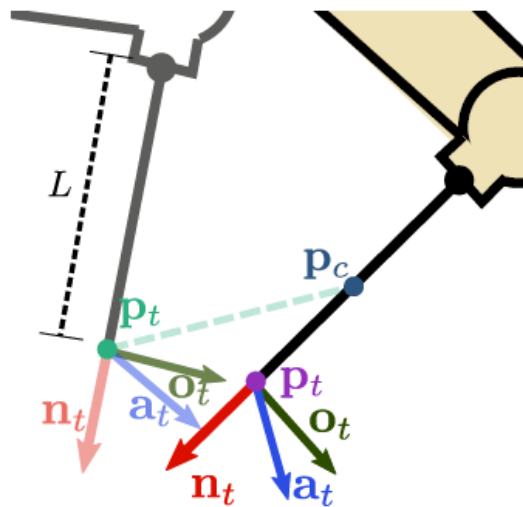
$R_t = [a_t \ o_t \ n_t]$. Στόχος είναι να διατηρείται κατά το δυνατόν στο μηδέν η προβολή $p_t - p_c$ στο επίπεδο που είναι κάθετο στο μοναδιαίο διάνυσμα n_t .

Η βάση αυτού του επιπέδου μπορεί να οριστεί ως εξής,

$$B_c = [a_t \ o_t] \in \mathbb{R}^{3 \times 2}.$$

$$x_c = B_c^T (p_t - p_c) \in \mathbb{R}^2$$

Η νόρμα $\|x_c\|$ αντιπροσωπεύει την ελάχιστη απόσταση μεταξύ του σημείου p_c και του άξονα n_t



Εικόνα 2. Shared control with haptic feedback for robotic-assisted minimally invasive surgery, Καστρίτση Θεοδώρα [1]

Η χρονική παράγωγος $\dot{x}_c = B_c^T \dot{p}_t + \dot{B}_c^T (p_t - p_c)$

Ωστόσο $R_t = [B_c \quad n_t]$ και $\dot{R}_t = \widehat{\omega}_t R_t$, όπου $\widehat{\omega}_t = \dot{R}_t R_t^T$, άρα τελικά $\dot{B}_t = \widehat{\omega}_t B_t$ και συνεπώς

$$\dot{x}_c = B_c^T \dot{p}_t + B_t^T \widehat{\omega}_t^T (p_t - p_c)$$

Η παραπάνω έκφραση αποτυπώνει τον RCM περιορισμό στον χώρο εργασίας και μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\dot{x}_c = A_x v_t, \text{ όπου}$$

$$A_x = B_c^T [I_{3 \times 3} \quad \widehat{(p_t - p_c)}] \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$$

$$v_t = [\dot{p}_t^T \quad \omega_t^T]^T \in \mathbb{R}^6$$

Έχοντας υπολογίσει τον A_x , θα υπολογιστεί ο μηδενοχώρος του ώστε οι κινήσεις του τελικού στοιχείου να γίνονται εκεί και να μην επηρεάζουν τον αρχικό RCM περιορισμό. Έτσι η βάση του μηδενοχώρου του A_x :

$$Z_x = \begin{bmatrix} n_t^T & 0_{1 \times 3} \\ R_t^T \widehat{(p_t - p_c)} & R_t^T \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 4}$$

Θα πρέπει οι περιορισμοί να εκφραστούν στον χώρο των αρθρώσεων

$$\dot{x}_c = A \dot{q}_d$$

$$A = A_x J_t(q_d) \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$$

Τελικά η ταχύτητα των αρθρώσεων εκφράζεται από ένα άθροισμα δύο κάθετων συνιστωσών που η μια αφορά τον χώρο με τους περιορισμούς και μια άλλη με τον ελεύθερο χώρο.

$$\dot{q}_d = A^\dagger \dot{x}_c + J_t^\dagger Z_x^T v_u,$$

όπου $v_u \in \mathbb{R}^4$ η ταχύτητα χωρίς περιορισμούς και η οποία περιέχει την μεταφορική ταχύτητα στην κατεύθυνση n_t και τις γωνιακές ταχύτητες γύρω από το σημείο της τομής εκφρασμένες ως προς τους άξονες του τελικού στοιχείου δράσης

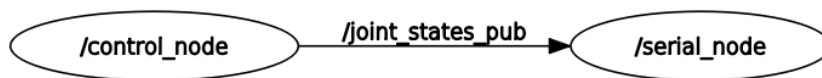
Το βασικό πλεονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι το decoupling μεταξύ της ελεύθερης και της περιορισμένης ταχύτητας

Υλοποίηση

Για την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε ο ανθρωπομορφικός ρομποτικός βραχίονας 6 βαθμών ελευθερίας του εργαστηρίου με όρια αρθρώσεων:

Link	Limits (°)
1	(-90, 90)
2	(0, 125)
3	(0, 125)
4	(-90, 90)
5	(-90, 30)
6	(0, 180)

Συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας το ROS δόθηκε η δυνατότητα οι υπολογισμοί υψηλότερου επιπέδου να γίνονται μέσω της Python και ο έλεγχος των σερβοκινητήρων μέσω του Arduino του βραχίονα. Για τον σκοπό αυτό ορίστηκαν τα παρακάτω nodes και topics



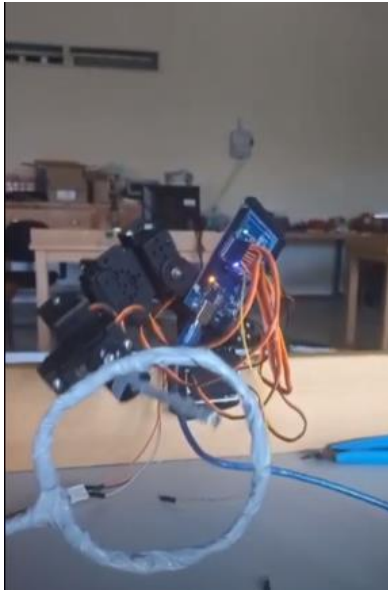
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει αρχικά την επίτευξη της επιθυμητής θέσης και προσανατολισμού και στην συνέχεια την υλοποίηση των επιθυμητών κινήσεων

Πειράματα

Μετακίνηση σε σημείο

Θεωρούμε ότι ο βραχίονας ξεκινά από την διαμόρφωση [5,75,20,45,-30,45] και επιθυμούμε να μετακινηθεί στην θέση (14.44,-10.653,15.187),με προσανατολισμό

$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ όπου και βρίσκεται ο κύκλος που προσομοιώνει την τομή



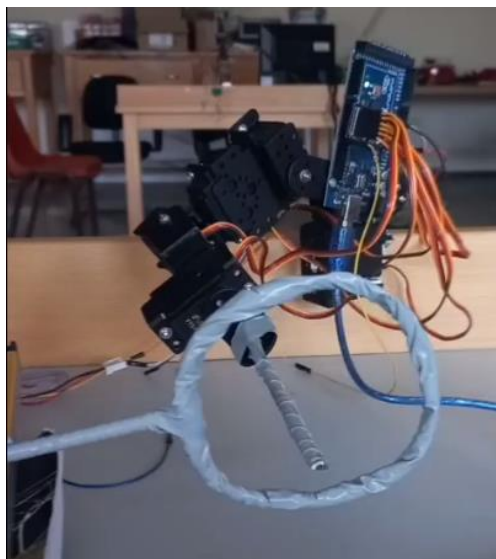
Εικόνα 3. https://drive.google.com/file/d/1zO3hW3HonFWf6hmYEBG72_4PjSIIntgi/view?usp=drive_link

Μεταφορικές κινήσεις

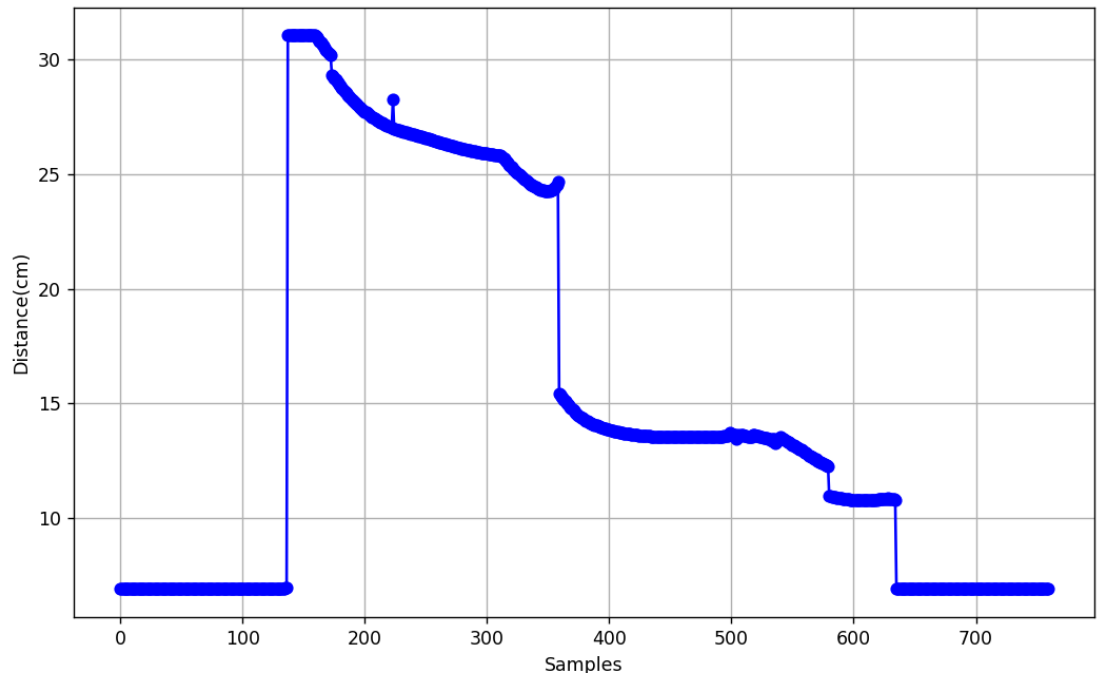
Με βάση την ανάλυση που περιεγράφηκε η ταχύτητα $v_u \in \mathbb{R}^4$ χωρίς περιορισμούς και η οποία περιέχει την μεταφορική ταχύτητα στην κατεύθυνση n_t και τις γωνιακές ταχύτητες γύρω από το σημείο της τομής εκφρασμένες ως προς τους άξονες του τελικού στοιχείου δράσης

Μετά από πειραματισμούς και δοκιμές κρίθηκε ότι για την ομαλότερη μεταφορική κίνηση του βραχίονα θα πρέπει η ταχύτητα να περιέχει μια συνιστώσα κατά τον άξονα n_t και μια μικρότερη συνιστώσα στον αντίστοιχο άξονα που επιθυμούμε την μεταφορική κίνηση. Ακολουθούν βίντεο από την υλοποίηση καθώς και γραφικές παραστάσεις της ελάχιστης απόστασης και του RCM περιορισμού.

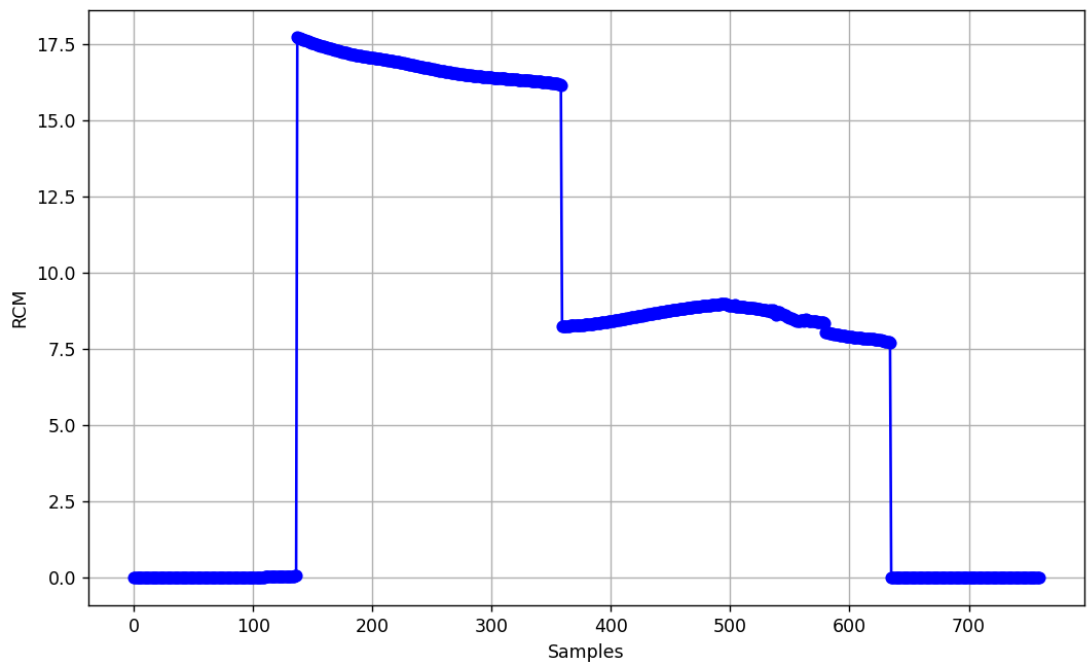
$$\triangleright v_u = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$



Εικόνα 4. https://drive.google.com/file/d/1gSmNu2s8JeWGH_sY6quhTm_oqL48JOQZ/view?usp=drive_link

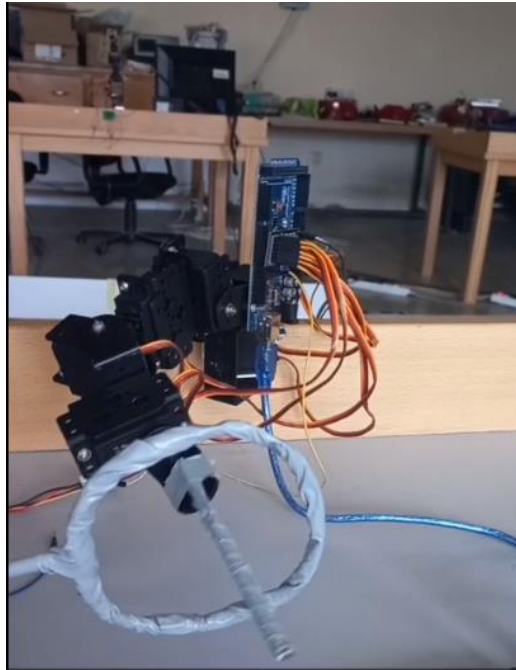


Εικόνα 5.Γραφική παράσταση της απόστασης για κίνηση κατά τον άξονα z του end-effector

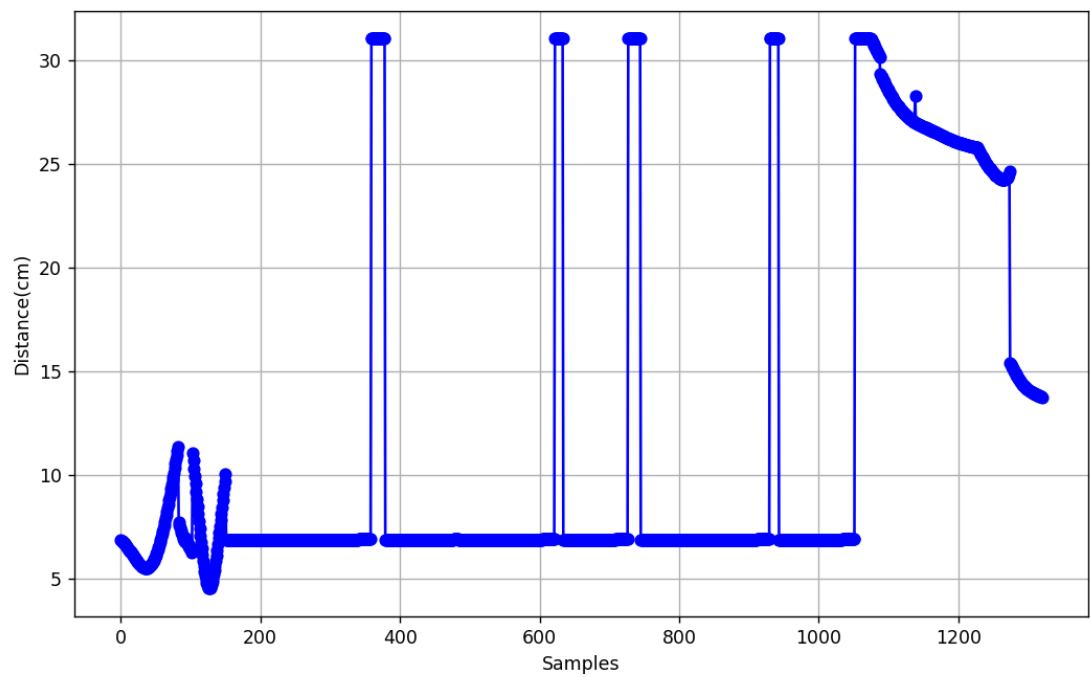


Εικόνα 6.Γραφική παράσταση του RCM για κίνηση κατά τον άξονα z του end-effector

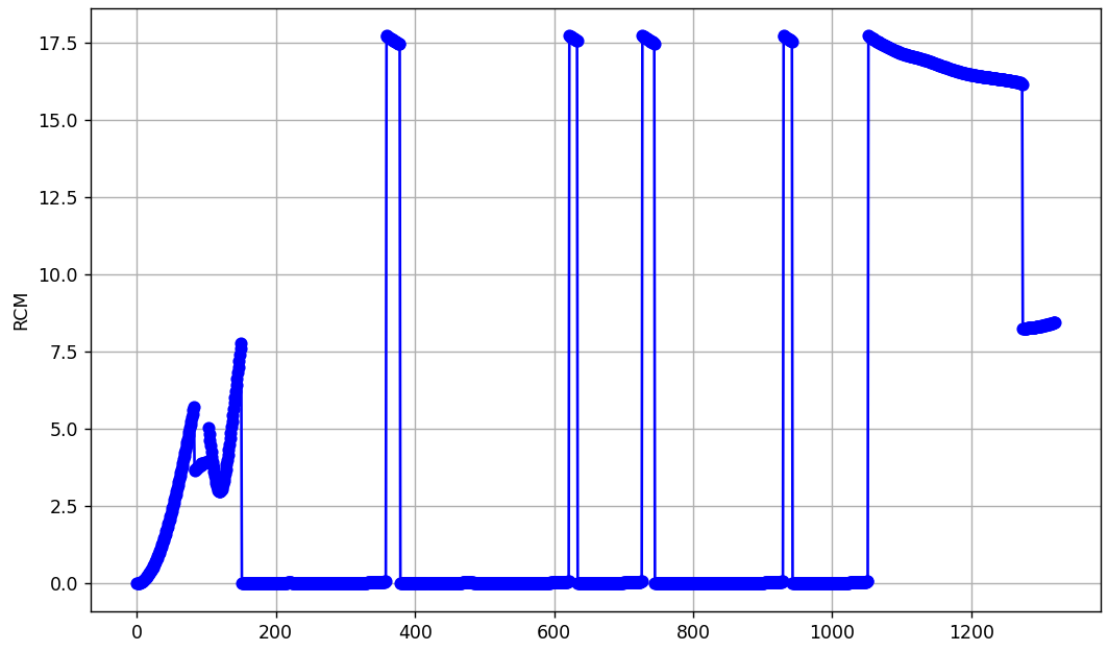
➤ $v_u = [1 \quad 0.1 \quad 0 \quad 0]$



Εικόνα 7. https://drive.google.com/file/d/1JX92oNhtCla9Q7lkoL6yoh1vbaD5aNxp/view?usp=drive_link

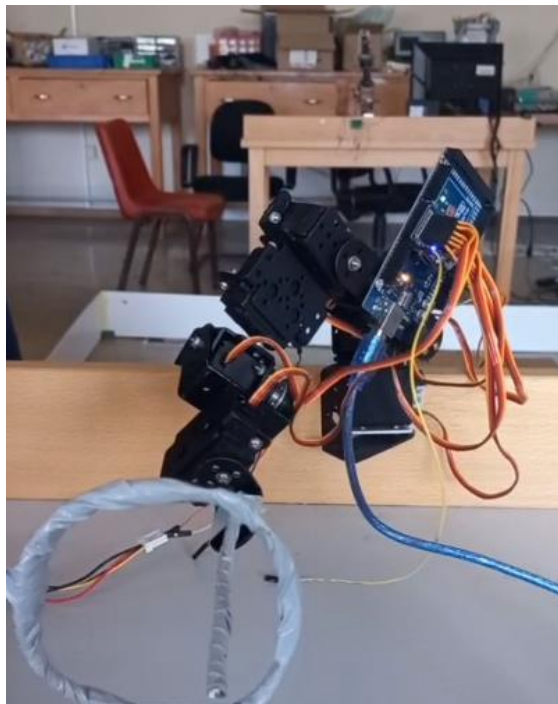


Εικόνα 8. Γραφική παράσταση της απόστασης για κίνηση κατά τον άξονα x του end-effector

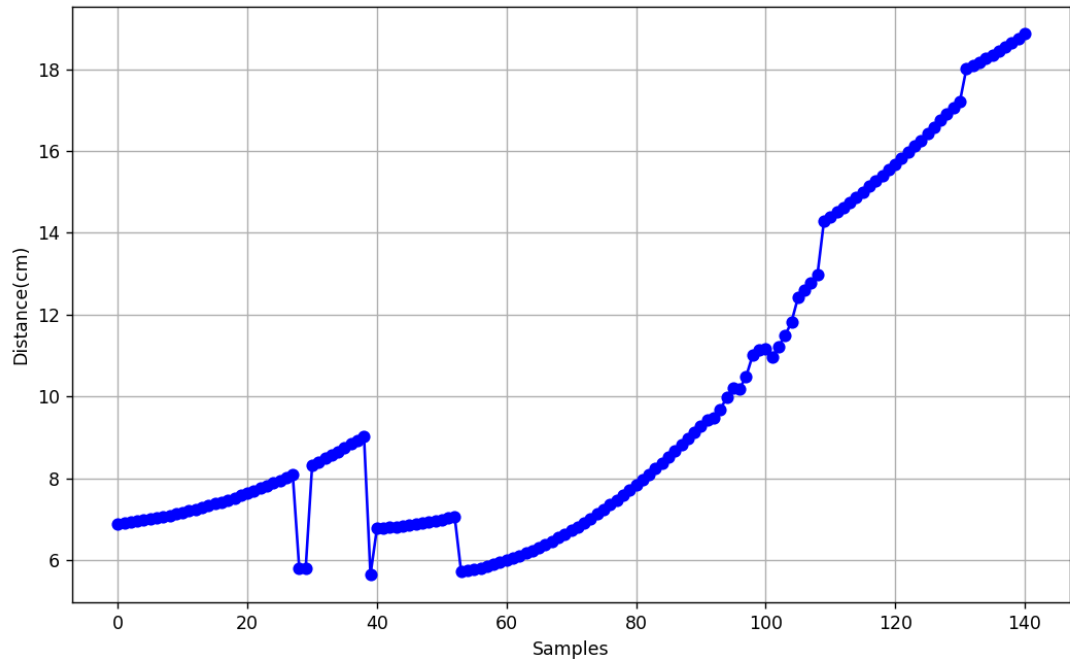


Εικόνα 9. Γραφική παράσταση του RCM για κίνηση κατά τον άξονα x του end-effector

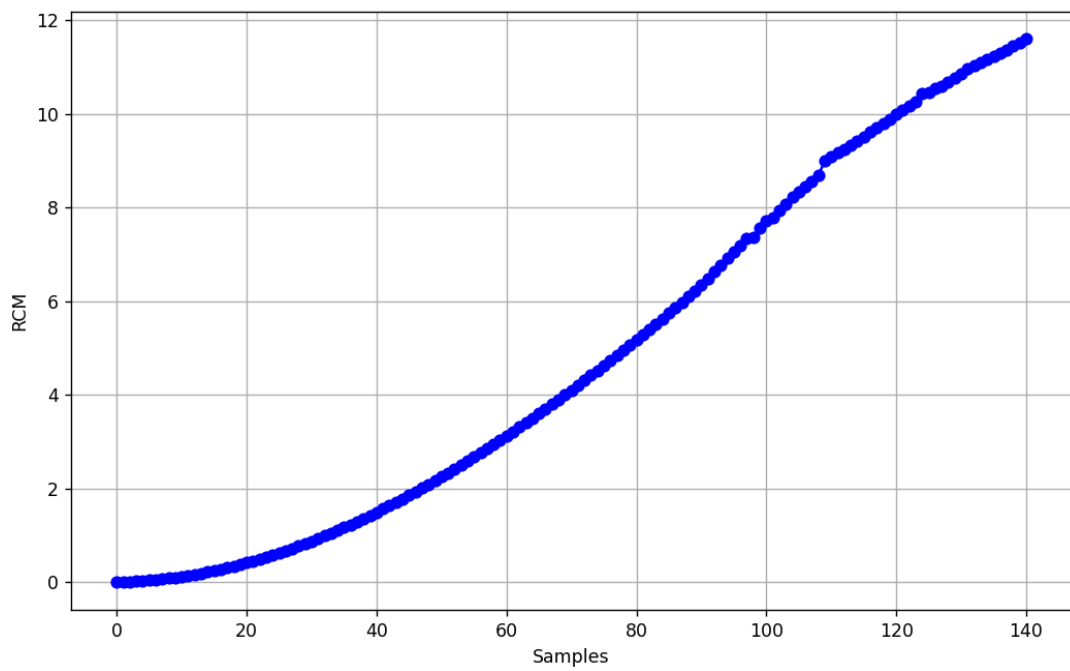
➤ $v_u = [1 \quad 0 \quad 0.1 \quad 0]$



Εικόνα 10. https://drive.google.com/file/d/1jXcaAgvUnLZAA3kiqUbjZM-8d5N84kM2/view?usp=drive_link

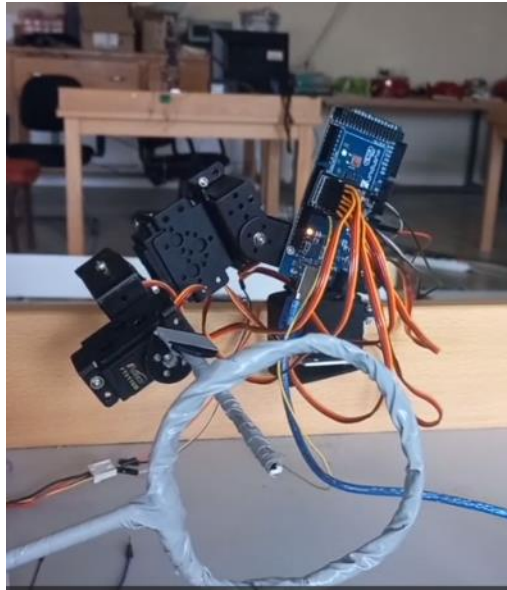


Εικόνα 11.Γραφική παράσταση της απόστασης για κίνηση κατά τον άξονα y του end-effector

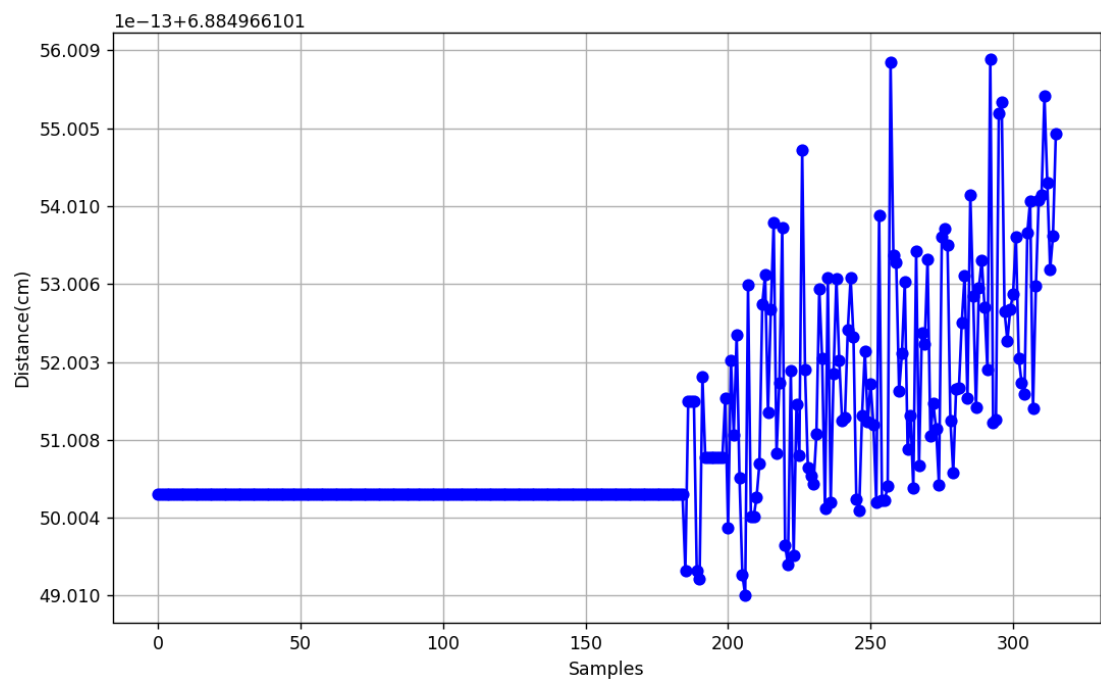


Εικόνα 12.Γραφική παράσταση του RCM για κίνηση κατά τον άξονα y του end-effector

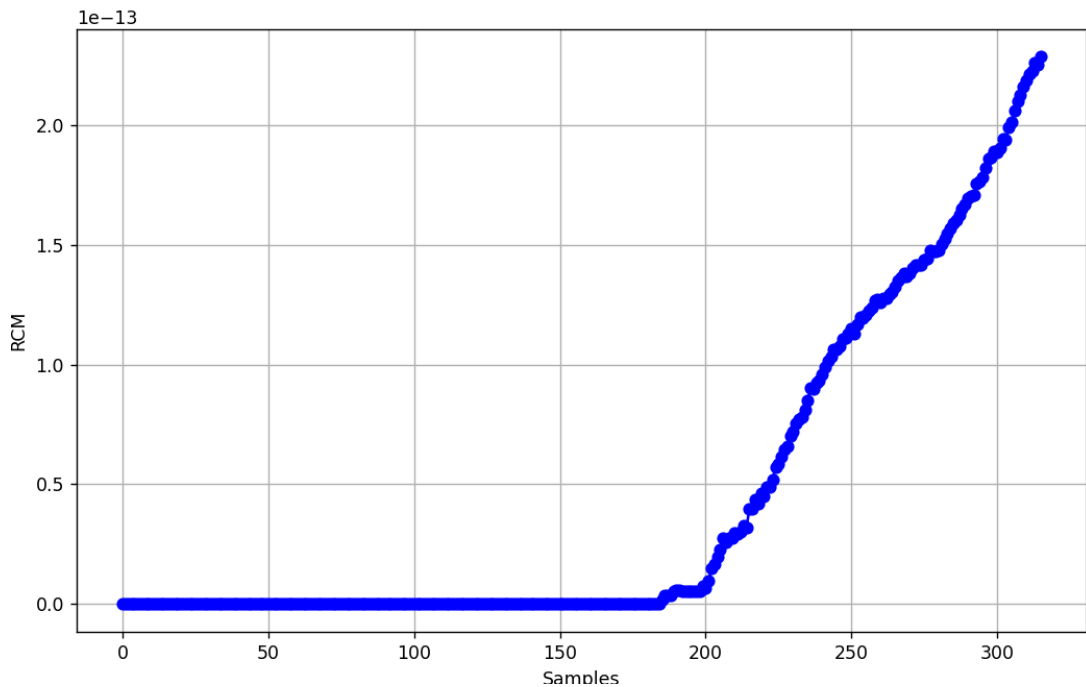
➤ $v_u = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0.1]$



Εικόνα 13. https://drive.google.com/file/d/1vCVQbL3FVVxK6vZqA2vmXiKenmQoqqRs/view?usp=drive_link



Εικόνα 14. Γραφική παράσταση της απόστασης για περιστροφική κίνηση κατά τον άξονα z του end-effector



Εικόνα 15.Γραφική παράσταση του RCM για περιστροφική κίνηση κατά τον άξονα z του end-effector

Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Όπως είναι αναμενόμενο τα αποτελέσματα έχουν απόκλιση από την πραγματικότητα, ειδικά η απόσταση, λόγω του ότι υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στις ακριβείς διαστάσεις της κάθε άρθρωσης η οποία δεν λήφθηκε υπόψιν, παρότι υπήρξαν περιπτώσεις που ο βραχίονας συγκρούστηκε με την τομή αυτό δεν αποτυπώνεται στις γραφικές παραστάσεις. Ωστόσο αποτυπώνουν ορθά την τάση του αποτελέσματος.

Από την άλλη πλευρά οι γραφικές παραστάσεις του RCM περιορισμού είναι πιο ορθές και αποτυπώνουν σαφώς την τάση που έχει η γραφική παράσταση ακόμα και όταν αποκλίνει για λίγο να επιστρέφει στο μηδέν καθώς άλλωστε αυτός είναι ο πρωτεύων στόχος.

Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την θεωρητική βάση της υλοποίησης, παρά το γεγονός ότι δεν συμφωνούν απόλυτα λόγω φαινομένων που δεν λήφθηκαν υπόψιν όπως της δυναμικής του βραχίονα καθώς και λόγω ατελειών του. Για την βελτίωση της απόκρισης κρίνεται χρήσιμη η υλοποίηση του μηχανισμού σε έναν βραχίονα με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, γεγονός που αφενός θα έδινε περισσότερες εναλλακτικές λύσεις για την επίτευξη του πρωτεύοντος στόχου και αφετέρου θα επέτρεπε την επίτευξη δευτερευόντων στόχων(αποφυγή ιδιομορφιών) που θα συνέβαλαν στην ακριβέστερη και ομαλότερη κίνηση του ρομποτικού βραχίονα.

Βιβλιογραφία

[1]. Shared control with haptic feedback for robotic-assisted minimally invasive surgery, Καστρίτση Θεοδώρα

[2]. Robotics Modelling, Planning and Control, Bruno Siciliano , Lorenzo Sciavicco , Luigi Villani , Giuseppe Oriolo