

Ρομποτική

Παναγιώτης Καρβουνάρης
ΑΕΜ 10193

3 Ιουλίου 2023

Περιεχόμενα

1	Περιγραφή Εργασίας	2
1.1	Εισαγωγή	2
1.2	Στόχος πρώτης προσομοίωσης	3
1.3	Στόχος δεύτερης προσομοίωσης	3
2	Μαθηματική ανάλυση	4
2.1	Εύρεση επιθυμητής τροχιάς και προσαντολισμού	4
2.2	Δημιουργία σφαλμάτων	5
2.3	Νόμος ελέγχου	6
3	Προσομοίωση	7
3.1	Παρακολούθηση της σφαίρας	7
3.2	Παρακολούθηση της σφαίρας	12
4	Σχόλια	18

Κεφάλαιο 1

Περιγραφή Εργασίας

1.1 Εισαγωγή

Έχουμε ένα βραχίονα *ur10e* 6 βαθμών ελευθερίας, μία κάμερα και μία μπάλα που κινείται κατά μήκος μίας καμπυλωτής τσουλήθρας. Ο βραχίονας περιγράφεται από δύο πλαίσια, ένα αδρανειακό πλαίσιο $\{O\}$ στην βάση του ρομπότ και ένα κινούμενο πλαίσιο $\{E\}$ στο άκρο του. Γνωρίζουμε τις αρχικές θέσεις των αρθρώσεων του ρομπότ:

$$q_0 = [-0.140 \quad -1.556 \quad -1.359 \quad 1.425 \quad -1.053 \quad -1.732] \text{ rad} \quad (1.1)$$

την μέγιστη επιτρεπόμενη μέγιστη ταχύτητα των αρθρώσεων:

$$\dot{q}_0 = [120 \quad 120 \quad 180 \quad 180 \quad 180 \quad 180] \text{ rad/s} \quad (1.2)$$

και την μέγιστη επιτρεπόμενη μέγιστη επιτάχυνση των αρθρώσεων:

$$\ddot{q}_0 = [250 \quad 250 \quad 250 \quad 250 \quad 250 \quad 250] \text{ rad/s}^2 \quad (1.3)$$

Η κάμερα είναι σταθερή με πλαίσιο $\{C\}$, το οποίο είναι τοποθετημένο στην θέση $p_{OC} = [0.4 \quad 0 \quad 0.2]^T$ με προσανατολισμό $R_{OC} = I_3$ όπου I_3 μοναδιαίος πίνακας διάστασης 3.

Στον χώρο εργασίας του βραχίονα, υπάρχει μία μπάλα με ακτίνα $R = 0.2 \text{ cm}$ και μία τσουλήθρα στο επίπεδο $x = 0.4$ του $\{O\}$. Η μπάλα λόγω του βάρους της κινείται πάνω στην τσουλήθρα. Έστω $\{B\}$ το σημείο επαφής της μπάλας με την τσουλήθρα, ο \bar{z} του $\{B\}$ να είναι κάθετος στην επιφάνεια επαφής και ο \bar{y} εφαπτόμενος. Την χρονική στιγμή $t = 0 \text{ s}$ ο άξονας \bar{y} του $\{B\}$ βρίσκεται στην κατεύθυνση $[0 \quad -0.9351 \quad -0.3543]$.

Η κάμερα μας δίνει κάθε χρονική στιγμή την θέση p_{CB} την μεταφορική ταχύτητα v_{CB} και την γωνιακή ταχύτητα w_{CB} του πλαισίου $\{B\}$ ως προς το πλαίσιο $\{C\}$.

1.2 Στόχος πρώτης προσομοίωσης

Στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία κύκλου ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα ώστε το άκρο του να παρακολουθεί την σφαίρα με προσανατολισμό $R_{BE} = Rot(y, 180^\circ)$ και θέση $p_{BE} = [0 \ 0 \ 0.45]^T$. Ο βραχίονας δέχεται εντολές ταχύτητας αρθρώσεων \dot{q} .

1.3 Στόχος δεύτερης προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο βραχίονας μπορεί να παρακολουθεί την σφαίρα από μία ορισμένη απόσταση και με συγκεκριμένο προσανατολισμό, οπότε αν προσθέσουμε στο άκρο του μία αρπάγη με πλαίσιο $\{T\}$ και θεωρήσουμε ότι αυτό το πλαίσιο ταυτίζεται με το πλαίσιο του άκρου του βραχίονα $\{E\}$, τότε μπορούμε με μερικές διαφοροποιήσεις στην πρώτη προσομοίωση να οδηγήσουμε την αρπάγη στην σφαίρα με αργό ρυθμό ώστε να μην έρθει σε επαφή με την τσουλήθρα και να πιάσει την μπάλα καθώς κινείται. Για να συμβεί αυτό πρέπει το άκρο να φτάσει με σχετική θέση ως προς την σφαίρα $p_{BE} = [0 \ 0 \ 0.6]^T$ και με προσανατολισμό $R_{BE} = Rot(y, 180^\circ)$. Όταν το ρομπότ φτάσει σε αυτήν την θέση και τον προσανατολισμό, τότε θα πρέπει να τα διατηρήσει για 1 sec ώστε να κλείσει η αρπάγη και να πιάσει την μπάλα.

Κεφάλαιο 2

Μαθηματική ανάλυση

2.1 Εύρεση επιθυμητής τροχιάς και προσανατολισμού

Πριν ασχοληθούμε με το κομμάτι του ελέγχου του βραχίονα πρέπει να καθορίσουμε την τροχιά τον προσανατολισμού που πρέπει να ακολουθεί. Πρώτη βήμα αποτελεί ο προσδιορισμός του p_d και το Q_d που είναι η επιθυμητή θέση και προσανατολισμός του άκρου αντίστοιχα, ως προς την βάση του $\{O\}$. Γνωρίζοντας τις πληροφορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι φανερό ότι για την εύρεση τους πρέπει να βρούμε τον ομογενή μετασχηματισμό g_d . Επομένως έχουμε ότι $g_d = g_{OC}g_{CB}g_{BE}$

$$g_d = \begin{bmatrix} R_{OC} & p_{OC} \\ O_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{CB} & p_{CB} \\ O_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{BE} & p_{BE} \\ O_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

έπειτα από πράξεις καταλήγουμε

$$g_d = \begin{bmatrix} R_{OC}R_{CB}R_{BE} & R_{OC}R_{CB}p_{BE} + R_{OC}p_{CB} + p_{OC} \\ O_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} R_d & p_d \\ O_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Από τα παραπάνω όλα είναι γνωστά εκτός από το R_{CB} , το οποίο όμως μπορούμε να υπολογίσουμε. Παρατηρούμε ότι το R_{CB} είναι μία στροφή κατά θ γύρω από τον άξονα x , άρα μας αρκεί να υπολογίσουμε την γωνία θ . Γνωρίζουμε

ότι $w_{CB} = \dot{\theta}$. Ολοκληρώνοντας την παραπάνω σχέση καταλήγουμε σε μία εξίσωση της μορφής $\theta_i = \theta_{i-1} + w_{CB}dt$. Για να λειτουργήσει όμως πρέπει να βρούμε μία αρχική τιμή για το θ . Επομένως, από τα δεδομένα μπορούμε έχουμε $\tan(\theta_0) = \frac{y_b z}{y_b y} = \frac{-0.3543}{0.9351} = 0.3788 \Rightarrow \theta_0 = -0.362rad$. Το μείον σχετίζεται με την αρνητική φορά περιστροφής γύρω από τον άξονα x , $R_{CB} = Rot(x, \theta_i)$.

Γνωρίζοντας πλέον το g_d μπορούμε να προσδιορίσουμε τα p_d και Q_d . Για να πετύχει ο νόμος ελέγχου που θα περιγραφεί στην συνέχεια, πρέπει να προσδιορίσουμε και τα \dot{p}_d και w_d . Αφού η κάμερα μας δίνει τα v_{CB} και w_{CB} και χρησιμοποιούμε μετασχηματισμό συστροφών για να βρούμε τα \dot{p}_d και w_d ως προς το $\{O\}$. Γνωρίζουμε ότι:

$$p\hat{OC} = \begin{bmatrix} 0 & -p_{OC}(3) & p_{OC}(2) \\ p_{OC}(3) & 0 & -p_{OC}(1) \\ -p_{OC}(2) & p_{OC}(1) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

οπότε μπορούμε να βρούμε το μετασχηματισμό συστροφών Γ_{OC} :

$$\Gamma_{OC} = \begin{bmatrix} R_{OC} & p\hat{OC}R_{OC} \\ 0_{3 \times 3} & R_{OC} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

άρα η επιθυμητή υβριδική ταχύτητα του άκρου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_d = \Gamma_{OC} V_{CB} \quad (2.6)$$

$$\text{όπου } v_d = \begin{bmatrix} [V_d(1)] \\ V_d(2) \\ V_d(3)] \end{bmatrix} \text{ και } w_d = \begin{bmatrix} [V_d(4)] \\ V_d(5) \\ V_d(6)] \end{bmatrix}$$

2.2 Δημιουργία σφαλμάτων

Αφού γνωρίζουμε τις θέσεις των αρθρώσεων στην αρχή κάθε κύκλου ελέγχου λύνουμε το ευθύ κινηματικό του βραχίονα και βρίσκουμε την θέση και τον προσανατολισμό του. Για την αρχική θέση των αρθρώσεων έχουμε ότι η θέση του άκρου είναι $p_{OE} = [0.4 \quad -0.2905 \quad 0.8111]^T$ και ο προσανατολισμός του

$$\text{είναι } p_{oe} = \begin{bmatrix} -1 & 3.0541 \cdot 10^{-4} & 3.7323 \cdot 10^{-4} \\ 7.7927 \cdot 10^{-5} & 0.8661 & -0.4999 \\ -4.7592 \cdot 10^{-4} & -0.4999 & 0.8661 \end{bmatrix}$$

Τώρα πρέπει να ορίσουμε τα σφάλματα θέσης και προσανατολισμού. Ως σφάλμα θέσης ορίζω $e_p = p - p_d$. Για να ορίσουμε το σφάλμα προσανατολισμού

σε μορφή ισοδύναμου άξονα γωνία. Η γωνία θ υπολογίζεται με βάση τον τύπο

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{Tr(R) - 1}{2}\right) \quad (2.7)$$

και ο άξονας με βάση τον τύπο:

$$k = \frac{1}{2\sin\theta} \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

όπου $Tr(R)$ το ίχνος του πίνακα R δηλαδή

$$Tr(R) = r_{11} + r_{22} + r_{33} \quad (2.9)$$

Τελικά ορίζουμε ως σφάλμα προσανατολισμού το

$$e_o = \begin{bmatrix} \theta k_x \\ \theta k_y \\ \theta k_z \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

2.3 Νόμος ελέγχου

Ο νόμος ελέγχου είναι

$$u = \begin{bmatrix} \dot{p}_d \\ w_d \end{bmatrix} - K \begin{bmatrix} e_p \\ e_o \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

έπειτα αφού γνωρίζουμε τις θέσεις των αρθρώσεων βρίσκουμε την αντίστροφη ιακωβιανή του βραχίονα $J^{-1}(q)$ και υπολογίζουμε τις ταχύτητες που πρέπει να δώσουμε στις αρθρώσεις ώστε να επιτευχθεί ο έλεγχος

$$\dot{q} = J^{-1}(q)u \quad (2.12)$$

Τέλος ελέγχου να ελέγχουμε τα όρια της επιτάχυνσης και της ταχύτητας να μην έχουν ξεπεράσει τα επιτρεπόμενα όρια και υπολογίζουμε τις καινούργιες θέσεις των αρθρώσεων.

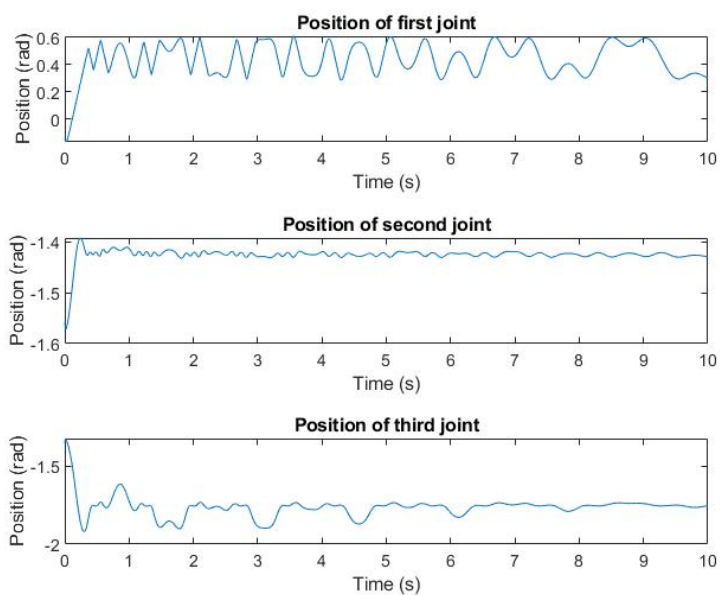
Κεφάλαιο 3

Προσομοίωση

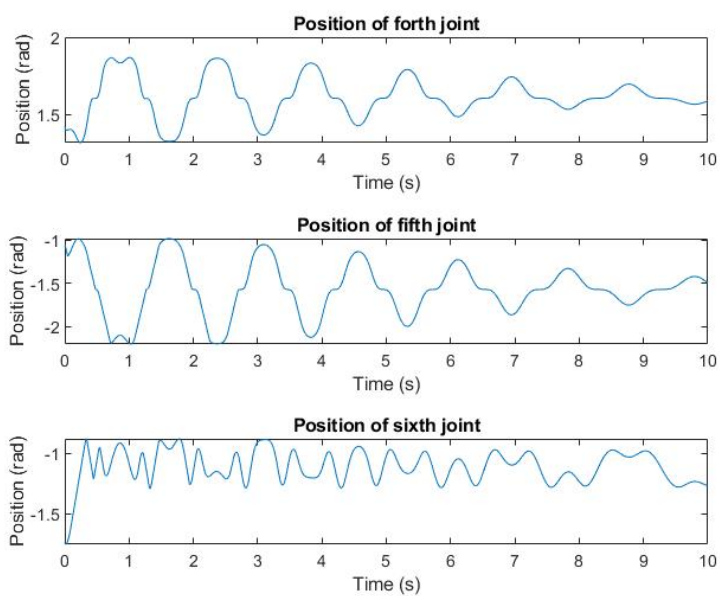
3.1 Παρακολούθηση της σφαίρας

Η προσομοίωση έγινε στο *MatLab* με χρήση του *Robotics Toolbox*. Η προσομοίωση τρέχει συνολικά για 10 *sec* και κάθε κύκλος ελέγχου έχει διάρκεια 2 *ms*. Στόχος της προσομοίωσης είναι ο έλεγχος του βραχίονα με σκοπό το άκρο του να παρακολουθεί όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια την σφαίρα καθώς αυτή κινείται επάνω στην τσουλήθρα.

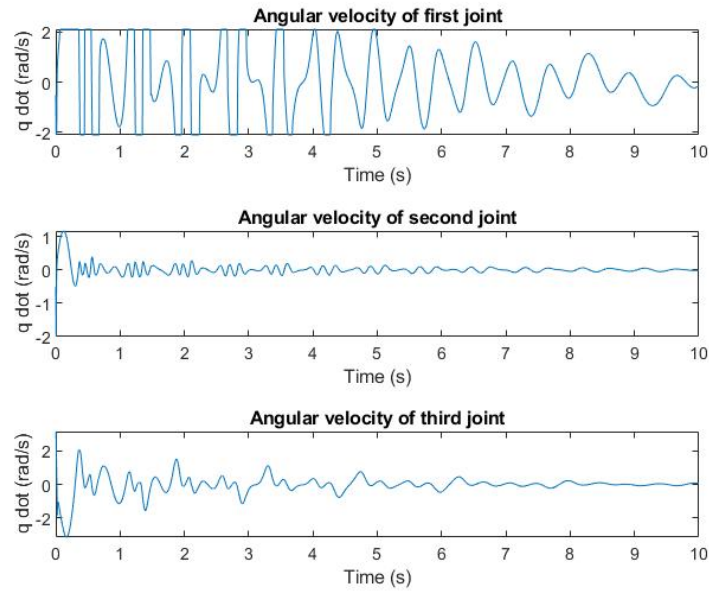
Παρακάτω βλέπουμε τα διαγράμματα της θέσης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης των 6 αρθρώσεων του βραχίονα.



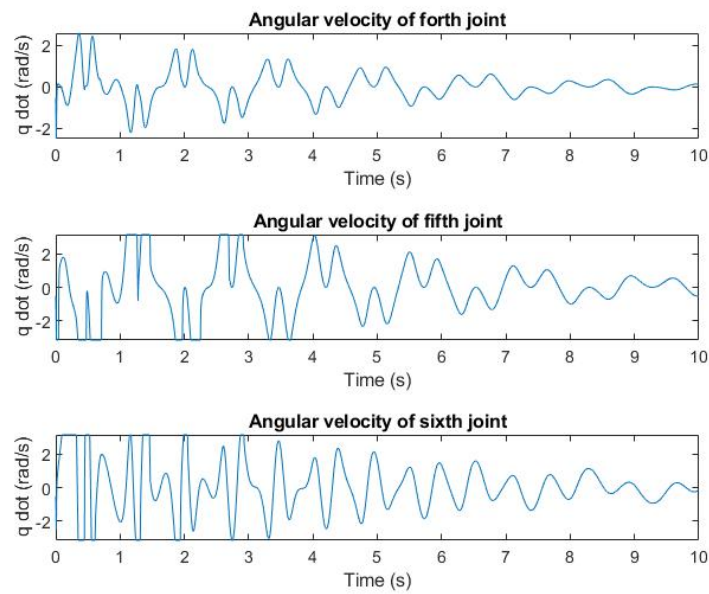
Σχήμα 3.1: Γωνία αρθρώσεων 1 – 3 σε (rad)



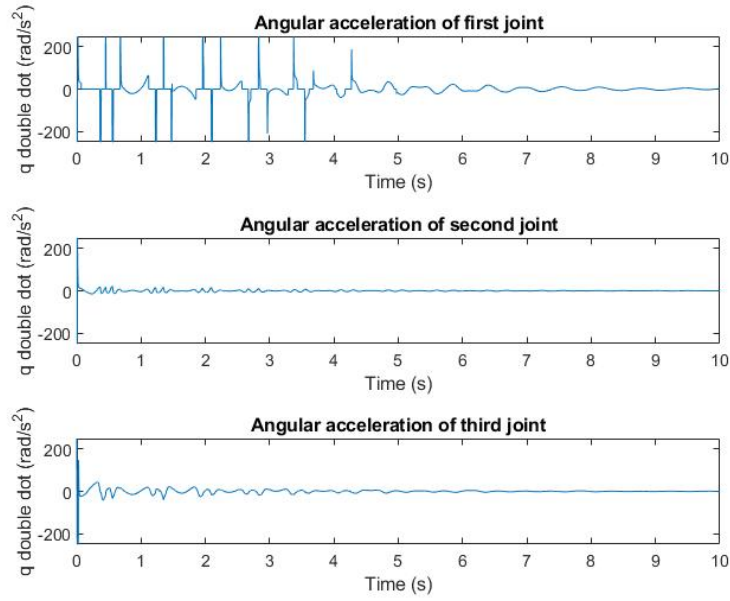
Σχήμα 3.2: Γωνία αρθρώσεων 4 – 6 σε (rad)



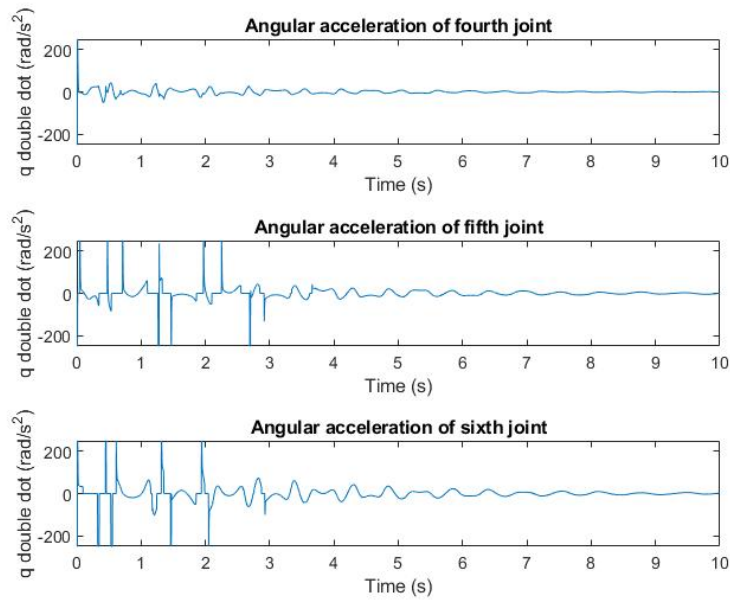
Σχήμα 3.3: Ταχύτητα αρθρώσεων 1 – 3 σε (rad)



Σχήμα 3.4: Ταχύτητα αρθρώσεων 4 – 6 σε (rad)



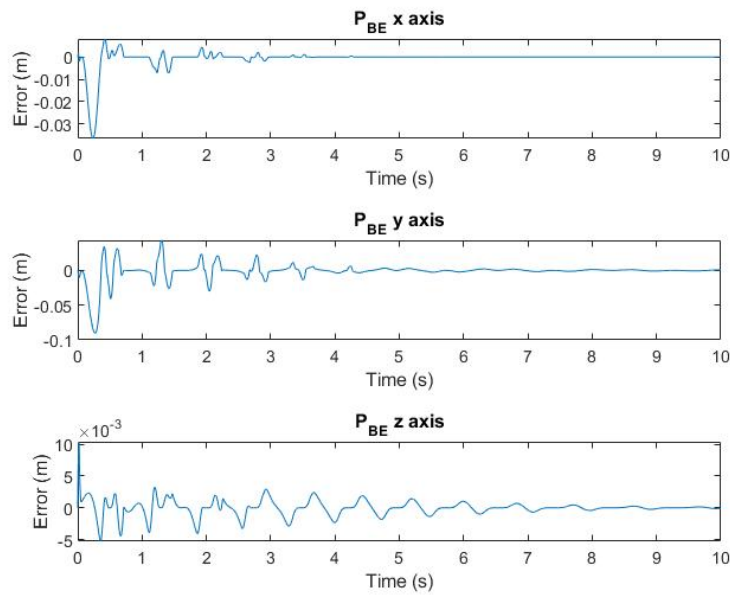
Σχήμα 3.5: Επιτάχυνση αρθρώσεων 1 – 3 σε (rad)



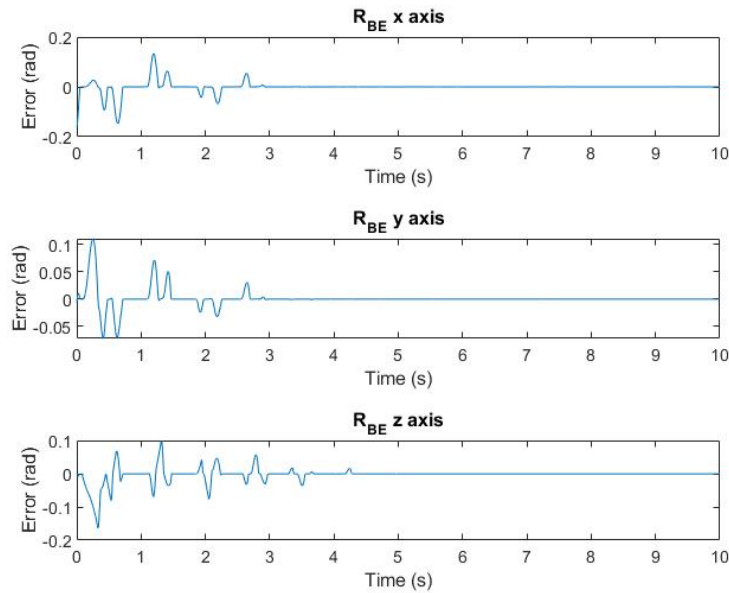
Σχήμα 3.6: Επιτάχυνση αρθρώσεων 4 – 6 σε (rad)

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η σταθεροποίηση όλων των ανθρώσεων με το πέρασμα του χρόνου, γεγονός αναμενόμενο αφού η μπάλα κινείται πιο αργά και το κέρδος στον ελεγκτή είναι μεγάλο γι' αυτόν τον σκοπό. Επίσης, παρατηρούμε ότι τόσο η ταχύτητα όσο και η επιτάχυνση στην αρχή φτάνουν την μέγιστη απόλυτη τιμή τους αρκετές φορές, λόγω των ορίων που θέτει ο συγκεκριμένος βραχίονας.

Ακολουθούν τα διαγράμματα σφάλματος θέσης και προσανατολισμού που επιβεβαιώνουν ότι μετά από κάποιο χρονικό διάστημα η παρακολούθηση της σφαίρας από τον βραχίονα είναι ακριβής.



Σχήμα 3.7: Σφάλμα θέσης

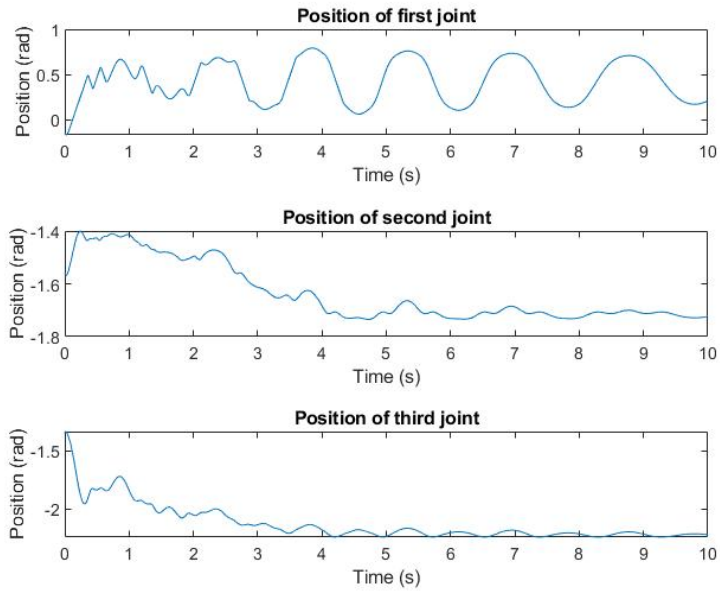


Σχήμα 3.8: Σφάλμα προσανατολισμού

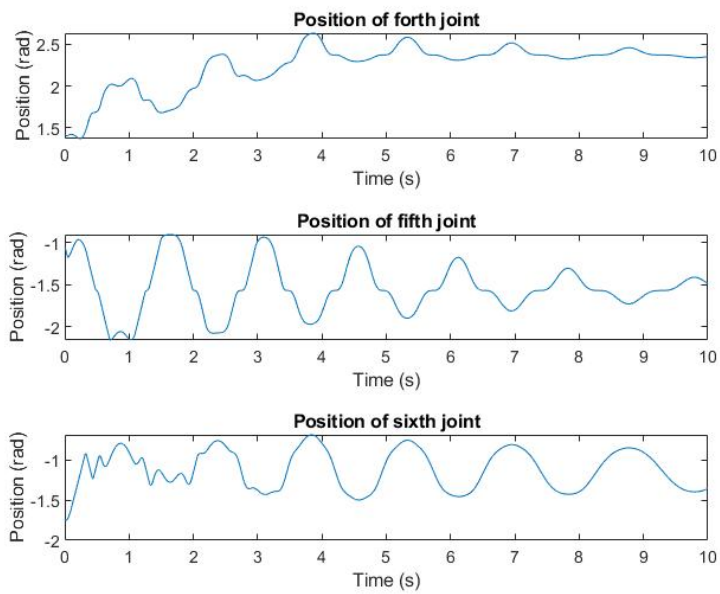
3.2 Παρακολούθηση της σφαίρας

Η προσομοίωση έγινε στο *MatLab* με χρήση του *Robotics Toolbox*. Η προσομοίωση τρέχει συνολικά για 10 *sec* και κάθε κύκλος ελέγχου έχει διάρκεια 2 *ms*. Στόχος της προσομοίωσης είναι ο έλεγχος του βραχίονα με σκοπό το άκρο του όχι μόνο να παρακολουθεί την σφαίρα, αλλά να την πλησιάζει και όταν φτάσει πολύ κοντά να διατηρήσει αυτήν την θέση για ένα δευτερόλεπτο ώστε να κλείσουν τα δάχτυλα της αρπάγης και να πιάσει την μπάλα.

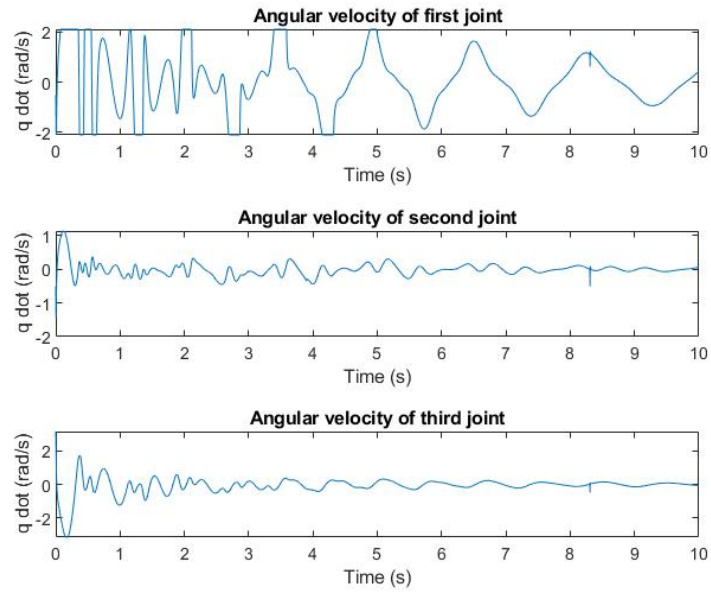
Παρακάτω βλέπουμε τα διαγράμματα της θέσης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης των 6 αρθρώσεων του βραχίονα.



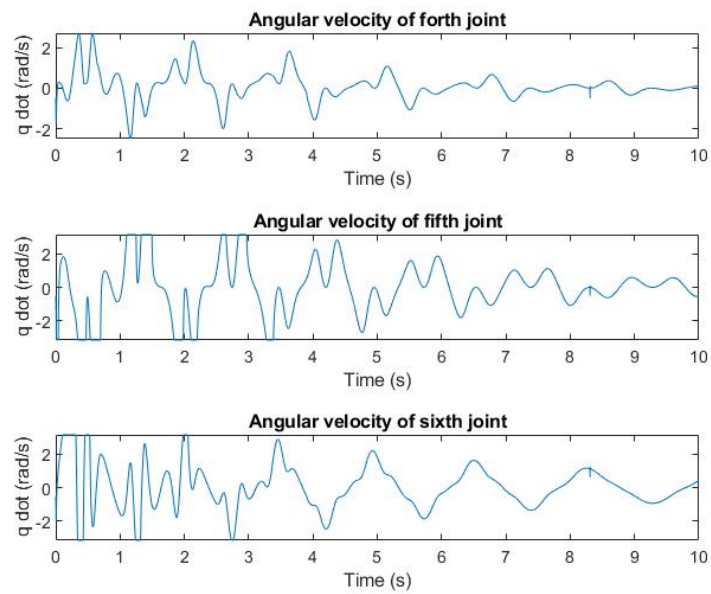
Σχήμα 3.9: Γωνία αρθρώσεων 1 – 3 σε (rad)



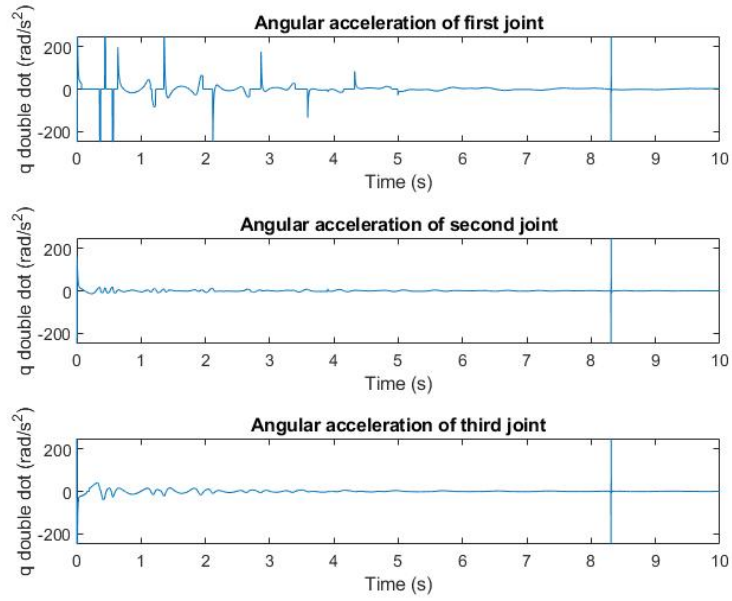
Σχήμα 3.10: Γωνία αρθρώσεων 4 – 6 σε (rad)



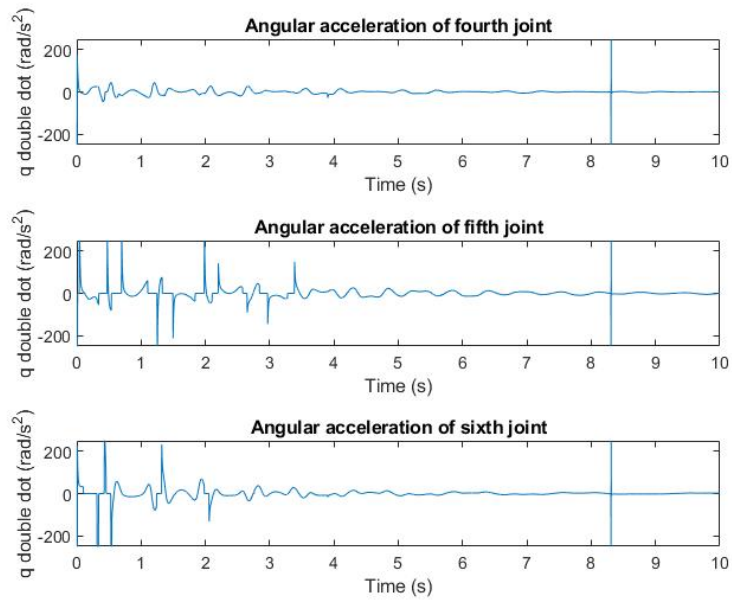
Σχήμα 3.11: Ταχύτητα αρθρώσεων 1 – 3 σε (rad)



Σχήμα 3.12: Ταχύτητα αρθρώσεων 4 – 6 σε (rad)



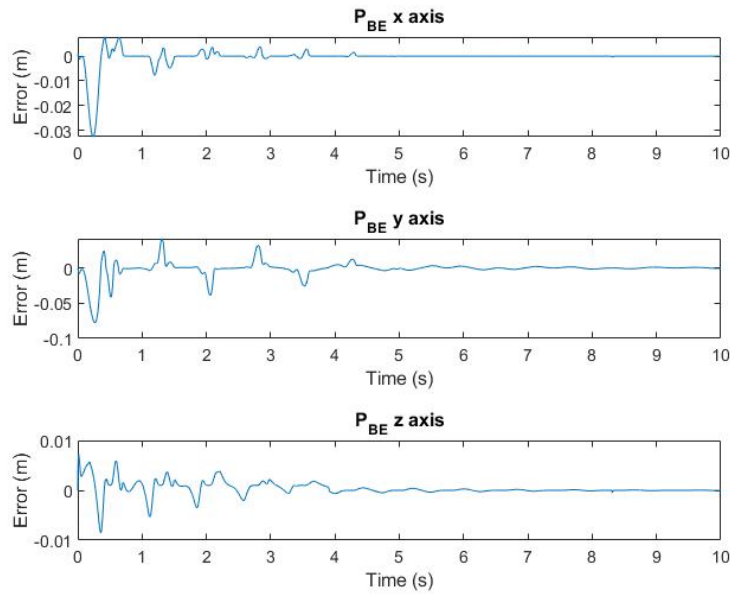
Σχήμα 3.13: Επιτάχυνση αρθρώσεων 1 – 3 σε (rad)



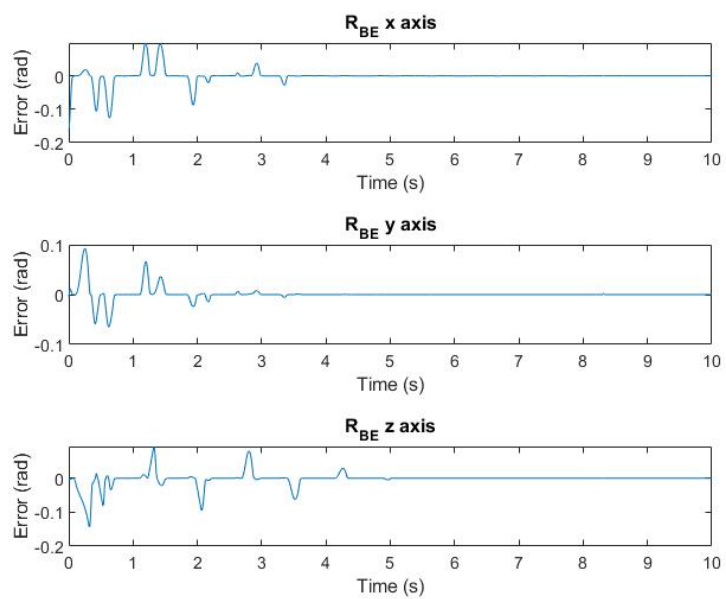
Σχήμα 3.14: Επιτάχυνση αρθρώσεων 4 – 6 σε (rad)

Τα συμπεράσματα είναι αντίστοιχα με αυτά της πρώτης προσομοίωσης.

Ακολουθούν τα διαγράμματα σφάλματος θέσης και προσανατολισμού που επιβεβαιώνουν ότι μετά από κάποιο χρονικό διάστημα η παρακολούθηση της σφαίρας από τον βραχίονα είναι ακριβής, ακόμα και όταν η αρπάγη πλησιάζει την σφαίρα, ο βραχίονας είναι ικανός να την προσεγγίσει και να την ακολουθήσει για αρκετό χρόνο ώστε να την πιάσει.



Σχήμα 3.15: Σφάλμα θέσης



Σχήμα 3.16: Σφάλμα προσανατολισμού

Κεφάλαιο 4

Σχόλια

Τα παρακάτω σχόλια προέκυψαν από διάφορες δοκιμές στην προσομοίωση και την μαθηματική ανάλυση.

Ο μετασχηματισμός συστροφών δεν είναι απαραίτητος όμως βελτιώνει τον έλεγχο του βραχίονα.

Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί και με χρήση *quaternion* για τον προσδιορισμό του σφάλματος προσανατολισμού.

Στο δεύτερο κομμάτι της εργασίας υπάρχουν δύο υλοποιήσεις, μια που περιλαμβάνει όλα τα 10 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης και μία που σταματάει ένα δευτερόλεπτο από την εύρεση του άκρου με την αρπάγη σε επιθυμητή θέση και προσανατολισμό.

Για τον περιορισμό της επιτάχυνσης μέσα στα επιτρεπτά όρια χρησιμοποιήθηκε συνάρτηση κορεσμού και όχι χαμηλοπερατό φίλτρο στην ταχύτητα, αλλά το αποτέλεσμα είναι πολύ καλό.

Η εύρεση της γωνίας θ μεταξύ των πλαισίων $\{B\}$ και $\{C\}$ γίνεται με την ολοκλήρωση του w_{BC} που μας δίνει η κάμερα.

Μπορούμε να ελέγξουμε τον βραχίονα ώστε να προσεγγίσει ταχύτερα την σφαίρα ανάλογα με το βήμα μείωσης της απόστασης που έχουμε ορίσει. Δεν επιθυμούμε μεγάλη ταχύτητα προσέγγισης λόγω κινδύνου βίαιης επαφής με την επιφάνεια της τσουλήθρας.

Πολύ ενδιαφέρουσα εργασία, αποτελεί πολύ καλή εισαγωγή στον τρόπο ελέγχου ενός ρομποτικού βραχίονα και στο τι δυνατότητες υπάρχουν σε αυτόν τον τομέα.