

Ρομποτική II - 1^η Εξαμηνιαία Εργασία

Κινηματικός Έλεγχος Ρομποτικού Χειριστή Με

Πλεονάζοντες Βαθμούς Ελευθερίας: Παρακολούθηση

Τροχιάς και Αποφυγή Εμποδίου

Αλκιβιάδης Παναγιώτης Μιχαλίτσης: 03118868

Παναγιώτης Κάπρος: 03118926

Ομάδα 50



Εισαγωγή - Στόχος

Σκοπός της 1ης εργαστηριακής εργασίας, είναι η εξοικείωση μας με το περιβάλλον του Gazebo και του Robot Operating System (ROS) καθώς και η υλοποίηση ενός συστήματος ελέγχου ενός ρομποτικού βραχίονα 7 βαθμών ελευθερίας. Συγκεκριμένα, το ρομπότ που θα μελετηθεί αποτελεί έναν ρομποτικό χειριστή xArm7 με πλεονάζοντες βαθμούς ελευθερίας. Η πρώτη δραστηριότητα την οποία καλούμαστε να μελετήσουμε αποτελεί η ευθύγραμμη περιοδική κίνηση του βραχίονα πάνω στο ευθύγραμμο τμήμα P_A και P_B το οποίο είναι συμμετρικό ως προς τον x - άξονα και βρίσκεται στην ευθεία $x = 0.6043$ και $z = 0.1508$.

Το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος είναι 40cm. Η δεύτερη δραστηριότητα η οποία μελετάται, είναι η αποφυγή δύο εμποδίων με γνωστή την θέση τους καθ' όλη την διάρκεια της κίνησης. Τα εμπόδια αποτελούν δύο κυλινδρικές συστοιχίες με απόσταση 40cm μεταξύ τους και η όλη κίνηση λαμβάνει χώρα στο επίπεδο $x = 0.3$. Η όλη διαδικασία θα προσομοιωθεί στο περιβάλλον του Gazebo και καλούμαστε να αναλύσουμε θεωρητικά και "πειραματικά" τις επιθυμητές κινήσεις του ρομπότ.

Θεωρητική Ανάλυση

Για την υλοποίηση της θεωρητικής ανάλυσης, απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο υπολογισμός της θέσης του "εργαλείου" end-effector συναρτήσει των γωνιακών μετατοπίσεων των αρθρώσεων του βραχίονα. Αυτό θα γίνει πραγματοποιώντας ανάλυση Denavit - Hartenberg (D-H). Στην εκφώνηση της άσκησης δίνονται οι μήτρες των διαδοχικών μετασχηματισμών βάσει των συμβάσεων του Denavit - Hartenberg όπου και παρατίθενται παρακάτω:

$$A_1^0(q_1) = Rot(z, q_1) \cdot Tra(z, l_1)$$

$$A_2^1(q_2) = Rot\left(x, -\frac{\pi}{2}\right) \cdot Rot(z, q_2)$$

$$A_3^2(q_3) = Rot\left(x, \frac{\pi}{2}\right) \cdot Rot(z, q_3) \cdot Tra(z, l_2)$$

$$A_4^3(q_4) = Rot\left(x, \frac{\pi}{2}\right) \cdot Tra(x, l_3) \cdot Rot(z, q_4)$$

$$A_5^4(q_5) = Rot\left(x, \frac{\pi}{2}\right) \cdot Tra(x, l_4 \sin \theta_1) \cdot Rot(z, q_5) \cdot Tra(z, l_4 \cos \theta_1)$$

$$A_6^5(q_6) = Rot\left(x, \frac{\pi}{2}\right) \cdot Rot(z, q_6)$$

$$A_7^6(q_7) = Rot\left(x, -\frac{\pi}{2}\right) \cdot Tra(x, l_5 \sin \theta_2) \cdot Rot(z, q_7) \cdot Tra(z, l_5 \cos \theta_2)$$

$$\mu\epsilon : l_1 = 26.7cm, l_2 = 29.3cm, l_3 = 5.25cm, l_4 = 35.12cm, l_5 = 12.32cm, \theta_1 = 0.2225rad, \theta_2 = 0.6646rad$$

Έχοντας τις παραπάνω σχέσεις, είναι εύκολη η μετατροπή τους σε πίνακες. Το γινόμενο των επιμέρους πινάκων προσδίδει την μήτρα ομογενούς μετασχηματισμού A^7_0 με την οποία είναι δυνατός ο υπολογισμός της θέσης του end - effector συναρτήσει των γωνιακών μετατοπίσεων των αρθρώσεων. Οι πίνακες που προκύπτουν έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned}
 A^0_1(q_1) &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A^1_2(q_2) &= \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A^2_3(q_3) &= \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -l_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A^3_4(q_4) &= \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A^4_5(q_5) &= \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & l_4 \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & -1 & -l_4 \sin(\theta_1) \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A^5_6(q_6) &= \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A^6_7(q_7) &= \begin{bmatrix} c_7 & -s_7 & 0 & l_5 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & -1 & -l_5 \sin(\theta_2) \\ s_7 & c_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Υπολογίζοντας την μήτρα ομογενούς μετασχηματισμού βρίσκουμε την Ιακωβιανή Μήτρα J. Στην συνέχεια διαχωρίζεται η συνολική κίνηση σε δύο “υπο-δραστηριότητες” ούτως ώστε να ληφθούν υπόψη τα εμπόδια που βρίσκονται στο workspace του ρομπότ και να πραγματοποιηθεί η κίνηση χωρίς πιθανές προσκρούσεις. Οι δύο δραστηριότητες έχουν ως εξής:

- Ο end effector να οδηγηθεί σε σωστή τροχιά.
- Να πραγματοποιηθεί αποφυγή εμποδίων.

Έτσι λοιπόν βάσει και της θεωρίας προκύπτει το εξής: εάν θεωρήσουμε την συνάρτηση που περιγράφει το γεωμετρικό μοντέλο της πρώτης δραστηριότητας $p_1 = f_1(q)$ και $\dot{p}_1 = J_1(q)\dot{q}$ με \dot{q} να αναπαριστά την παράγωγο του q . Εάν θεωρηθεί p_{1d} και \dot{p}_{1d} η θέση και ταχύτητα που περιγράφει την δραστηριότητα του ρομπότ τότε η εξίσωση του κινηματικού ελέγχου προκύπτει ως εξής:

$$\dot{q}_d = J_1^+ \dot{p}_{1d} + K_2(I_n - J_1^+ J_1) \dot{q}_r.$$

Η περίοδος που επιλέχθηκε για την περιοδική ευθύγραμμη κίνηση είναι $T = 5\text{sec}$ ενώ το “αρνητικό” και “θετικό” όριο της κίνησης επιλέχθηκε να είναι από τα -20cm έως τα 20cm αντίστοιχα. Για την εύρεση της επιθυμητής τροχιάς του end effector χρησιμοποιήθηκε ένα πολυώνυμο παρεμβολής πέμπτου βαθμού ούτως ώστε να εξασφαλιστεί τόσο η συνέχεια της θέσης όσο και της ταχύτητας και επιτάχυνσης του τελικού στοιχείου. Αξίζει να σημειωθεί πως το πολυώνυμο υπολογίζει την τροχιά μόνο για την μισή περίοδο (από το σημείο A προς το B). Με τον υπολογισμό του πολυωνύμου, βρίσκοντας την παράγωγο, αυτό που προκύπτει είναι το διάνυσμα \dot{p}_{1d} το οποίο ελέγχει την περιοδική κίνηση. Ωστόσο, το πρόβλημα που προκύπτει στην πραγματικότητα, αν και θεωρητικά θα έπρεπε η όλη σκέψη να είναι σωστή, είναι πως το τελικό εργαλείο αδυνατεί να διατηρήσει την σωστή κίνηση στους άξονες x, z . Για αυτόν τον λόγο εισάγουμε έναν p -ελεγκτή όπου σε περίπτωση όπου έχουμε απόκλιση κατά ένα δέκατο του χιλιοστού (0.0001) από την επιθυμητή θέση του end effector στους x και z άξονες, τότε ο ελεγκτής εξασφαλίζει την κατάλληλη ταχύτητα προς αποφυγή τέτοιων σφαλμάτων. Έτσι η εξίσωση του κινηματικού ελέγχου συμπεριλαμβανομένου και του p -ελεγκτή έχει ως εξής:

$$\dot{q} = [\dot{q}^{(1)}] + [\dot{q}^{(2)}] = [J_1^+(q) * \dot{p}_{1d} + K_1(p_{1d} - f_1(q))] + [K_2(I_n - J_1^+ J_1) \dot{q}_r^{(2)}]$$

όπου: $\dot{q}^{(1)}, \dot{q}^{(2)}$ αποτελούν τις γενικευμένες ταχύτητες των αρθρώσεων που αντιστοιχούν στις δύο δραστηριότητες αντίστοιχα, τα κέρδη K_1 και K_2 όπου ουσιαστικά είναι το κέρδος ενίσχυσης του p -ελεγκτή σχετικά με το πόσο γρήγορα ο βραχίονας επανέρχεται στην επιθυμητή τροχιά του και το κέρδος ενίσχυσης του ελεγκτή σχετικά με το πόσο θα επηρεάσει η δεύτερη δραστηριότητα (αυτή της αποφυγής του εμποδίου) την όλη διαδικασία. Πειραματικά, οι τιμές

που δόθηκαν επιλέχθηκαν να είναι 0.5 και 5 αντίστοιχα. Οι ποσότητες $q_r^{(2)}$ και J_1^+ αποτελούν την ταχύτητα αναφοράς για την υλοποίηση της δεύτερης δραστηριότητας και την ψευδοαντίστροφη μήτρα της πρώτης δραστηριότητας αντίστοιχα.

Η περιγραφή της δεύτερης δραστηριότητας γίνεται μέσω μιας συνάρτησης κριτηρίου, η οποία επιλέγεται ως η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ ενός τυχαίου σημείου του βραχίονα και της περιφέρειας του εμποδίου που απέχει την ελάχιστη απόσταση από το σημείο αυτό.

Αυτό το σημείο δεν είναι σταθερό στον χρόνο αλλά μεταβάλλεται συναρτήσει της θέσης των εμποδίων και των γωνιών που σχηματίζουν οι αρθρώσεις του βραχίονα. Έτσι για την βέλτιστη λύση - βέλτιστη τιμή που μπορεί να πάρει αυτή η συνάρτηση, προστέθηκαν (μέσω πειραματικής διαδικασίας) επιπλέον σημεία όπου ο βραχίονας κινδυνεύει περισσότερο να συγκρουστεί. Αυτά τα σημεία προσδιορίζονται από τις παρακάτω μήτρες ομογενών μετασχηματισμών:

$$A_{4A}^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -0.073 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{4B}^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1070 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{4C}^0 = \begin{bmatrix} \cos(-\pi/4) & -\sin(-\pi/4) & 0 & \cos(-\pi/4) \cdot 0.131/2 \\ \sin(-\pi/4) & \cos(-\pi/4) & 0 & \sin(-\pi/4) \cdot 0.131/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1070 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{4D}^0 = \begin{bmatrix} \cos(-\pi/4) & -\sin(-\pi/4) & 0 & \cos(-\pi/4) \cdot 0.131 \\ \sin(-\pi/4) & \cos(-\pi/4) & 0 & \sin(-\pi/4) \cdot 0.131 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1070 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

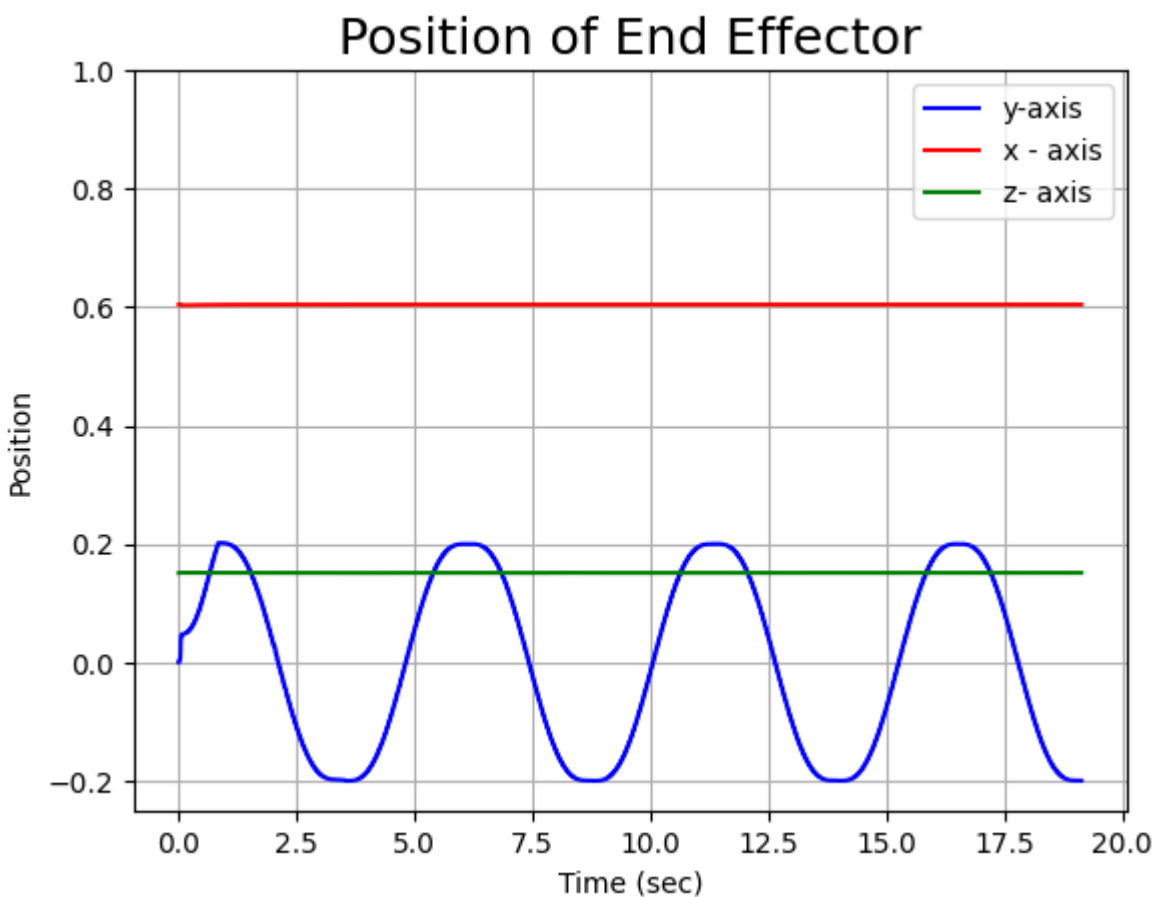
$$A_{4E}^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -0.1070 - 0.0420 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{4F}^0 = \begin{bmatrix} \cos(-\pi/4) & -\sin(-\pi/4) & 0 & \cos(-\pi/4) \cdot 0.131 \\ \sin(-\pi/4) & \cos(-\pi/4) & 0 & \sin(-\pi/4) \cdot 0.131 \\ 0 & 0 & 1 & -0.069/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Έχοντας αυτά τα σημεία, είναι εύκολο μετά να αποφευχθεί η σύγκρουση διαλέγοντας το βέλτιστο αποτέλεσμα που προκύπτει από την συνάρτηση κριτηρίου. Στην συνέχεια υλοποιούμε μερική παραγωγή του παραπάνω κριτηρίου ως προς τις μεταβλητές q_1, q_2, \dots, q_7 για τα σημεία που βρέθηκαν έχοντας ως αποτέλεσμα το διάνυσμα q_r όπου αναφέρθηκε παραπάνω.

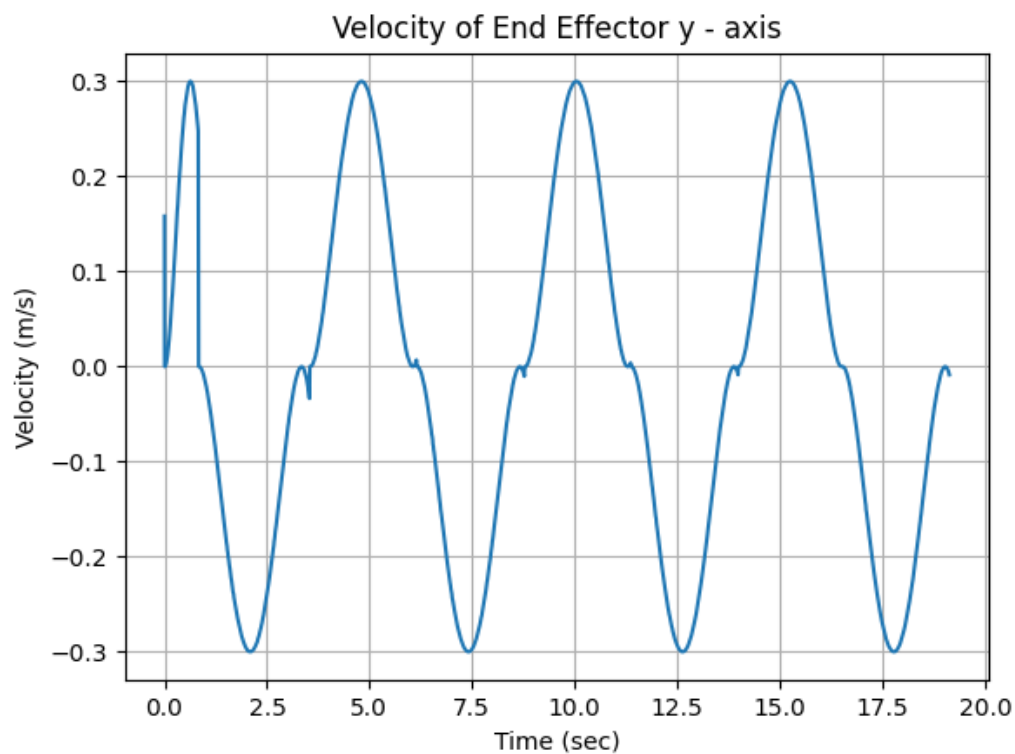
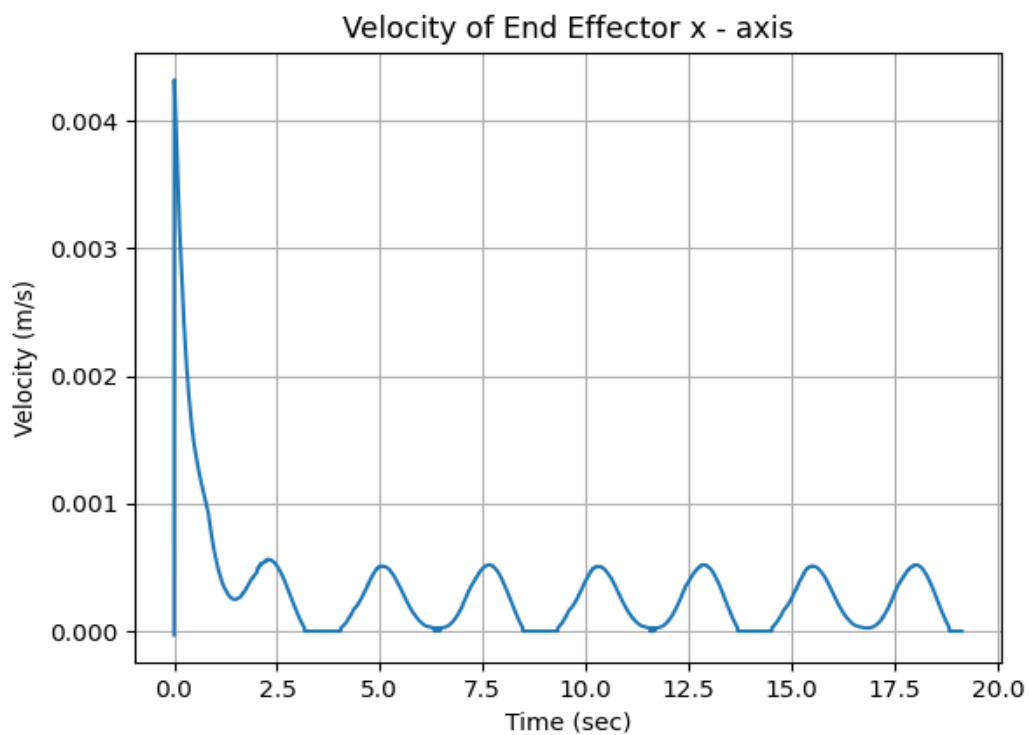
Προσομοίωση

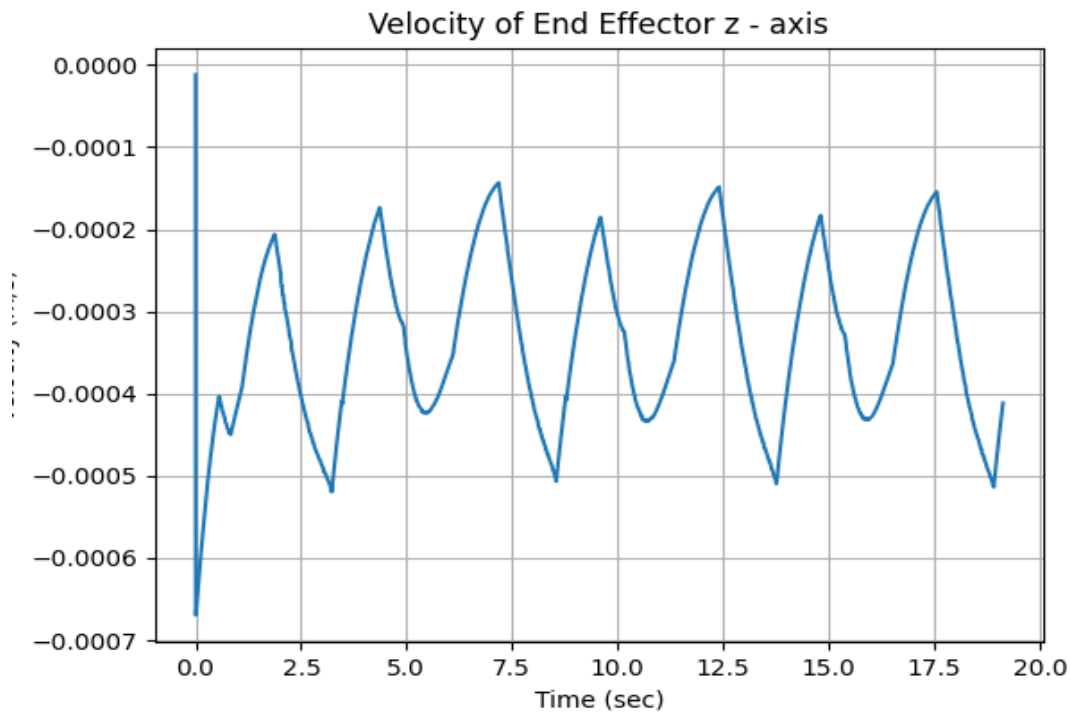
Έχοντας υλοποιήσει την θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος και έχοντας μετατρέψει την θεωρία - ανάλυση σε μορφή κώδικα, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση για τρεις περιόδους κίνησης του end effector με τα παρακάτω αποτελέσματα:



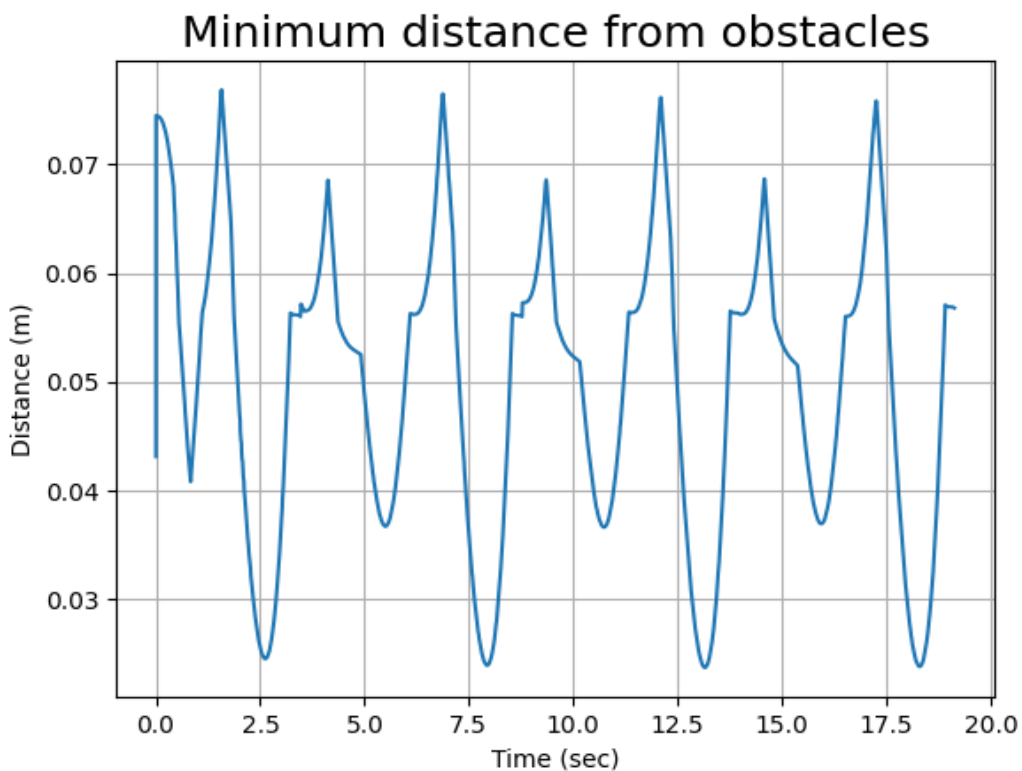
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κίνηση του βραχίονα και όπως είναι αναμενόμενο η θέση στους άξονες x και z είναι σταθερή όπως ζητήθηκε, ενώ στον άξονα y φαίνεται η περιοδική (περίοδος 5sec) κίνηση μεταξύ [-20cm, +20cm].

Αντίστοιχα με την θέση παρακάτω παρατίθενται και τα διαγράμματα ταχύτητας για τους τρεις άξονες:

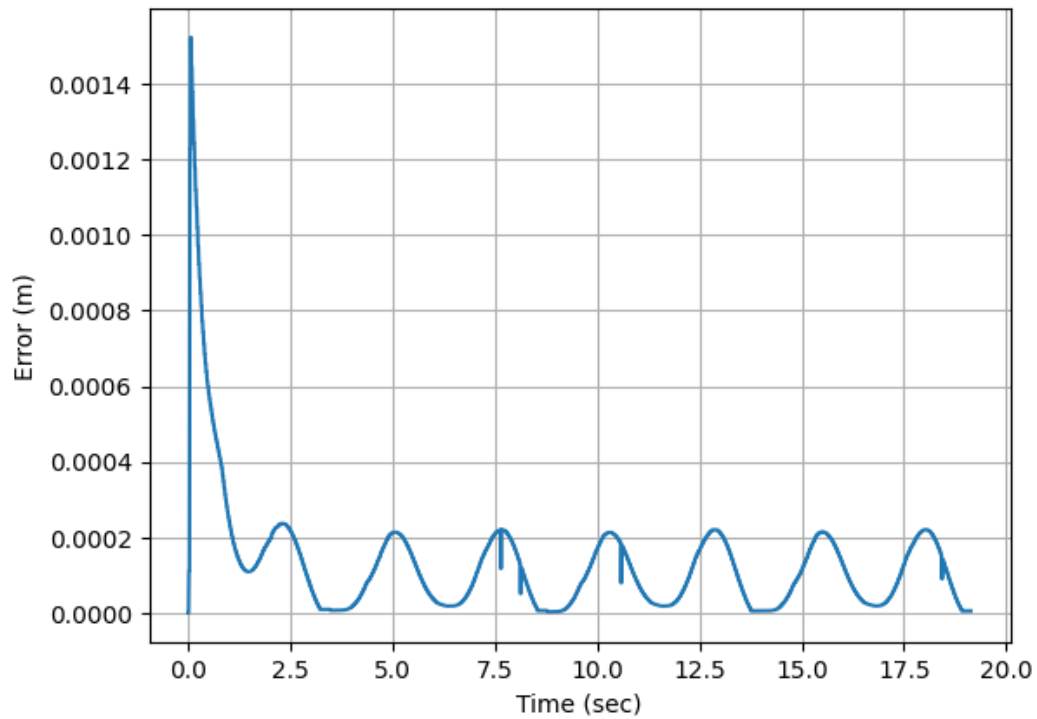




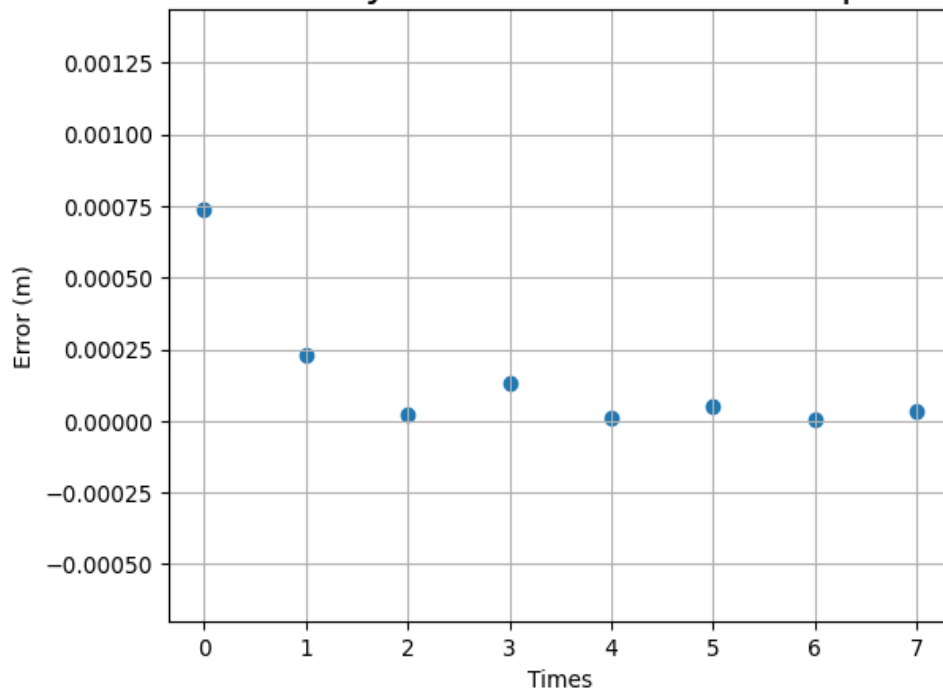
Έχοντας και αυτά τα στοιχεία, θα εξετάσουμε τώρα ποιες είναι η ελάχιστες αποστάσεις από τα εμπόδια κατά την διάρκεια της κίνησης τους βραχίονα και πόσο βέλτιστα δούλεψε η βοηθητική συνάρτηση που εξηγήθηκε παραπάνω μέσω του διαγράμματος σφάλματος:

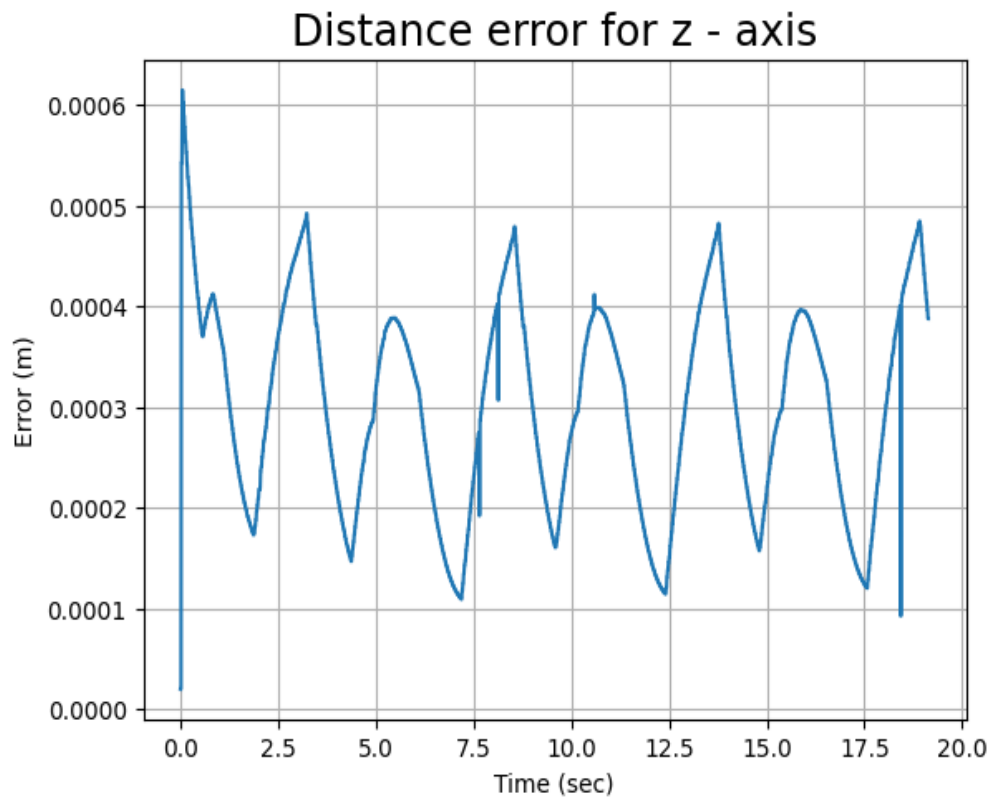


Distance error for x - axis



Distance error y - axis at maximum displacement





Αυτό που παρατηρούμε είναι πως το σφάλμα που προκύπτει είναι στα επιτρεπτά όρια (μικρότερα του 0.00005 εκτός της περιόδου της αρχικής κίνησης όπου ξεκινά η όλη διαδικασία τοποθέτησης του βραχίονα στην επιθυμητή ευθεία).

Τέλος, εξετάζουμε πως το Gazebo μαζί με το ROS και τον κώδικα που συντάχθηκε, επικοινωνούν μεταξύ τους ούτως ώστε να έχουμε την σωστή προσομοίωση. Μέσω του γραφήματος που παρατίθεται παρακάτω, είναι δυνατό να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο λειτουργίας των nodes και την αξία αυτής της μεθόδου επικοινωνίας με κύριο πλεονέκτημα την ανεξαρτησία των κόμβων κατά την διάρκεια της κίνησης:

