



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δ.Π.Μ.Σ. Συστήματα Αυτοματισμού

Κατεύθυνση Β:

Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου και Ρομποτικής

Μεταπτυχιακό Μάθημα:

Εργαστήριο Ρομποτικής

Ομάδα 4

Τρίτη Εργαστηριακή Άσκηση

Προγραμματισμός Ρομπότ Adept τύπου SCARA

Μέλη Ομάδας – Α.Μ.:

Ειρήνη – Μαρία Γεωργαντά – 02121201

Γεώργιος Κασσαβετάκης – 02121203

Γεώργιος Κρομμύδας – 02121208

Φραντζιέσκα Μιχαήλ – 02121216

ΑΘΗΝΑ

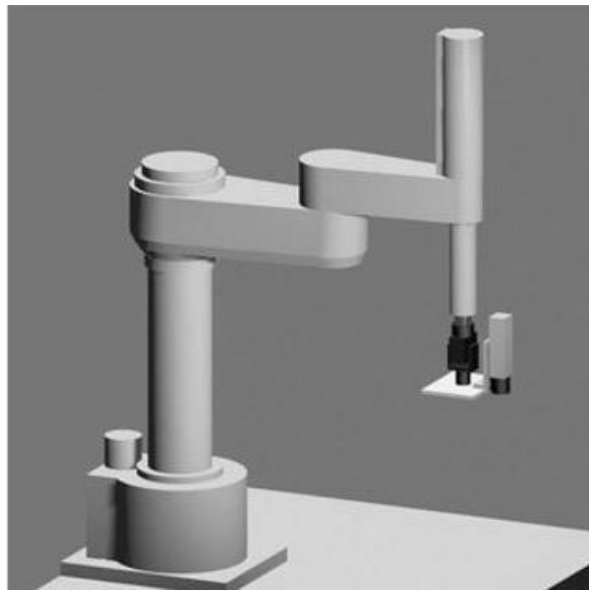
2023

Πίνακας περιεχομένων

1. Περιγραφή του Πειράματος	3
1.1. Περιγραφή Ρομποτικής Διάταξης.....	3
1.2. Κινηματική Ανάλυση Ρομποτικής Διάταξης	4
1.2.1 Μεθοδολογία Denavit - Hartenberg.....	5
1.2.2 Ευθύ Κινηματικό Μοντέλο	5
1.3. Διαφορική Ανάλυση Ρομποτικής Διάταξης	6
1.3.1 Ιακωβιανή Μήτρα Ρομποτικού Χειριστή.....	6
1.3.2 Ιδιόμορφες Διατάξεις Ρομποτικού Χειριστή.....	7
1.4. Σχεδιασμός Τροχιάς με Πολυωνυμική Παρεμβολή	8
2. Διάγραμμα Ροής Προγραμματιστικής Διαδικασίας	10
Βιβλιογραφία	13

1. Περιγραφή του Πειράματος

Στόχος του παρόντος εργαστηρίου αποτελεί την κατανόηση της κίνησης και της on-line εκπαίδευσης του ρομπότ Adept (βλ. σχήμα 1). Το ρομπότ αυτό έχει κινηματική δομή τύπου SCARA και χρησιμοποιείται για Pick and Place διεργασίες. Το συγκεκριμένο ρομπότ εκπαιδεύεται με την χρήση ενός χειριστηρίου Teach Pendant, με το οποίο εισάγονται εντολές στην διάταξη με σκοπό να εκτελεί διάφορες διεργασίες.



Σχήμα 1. Ρομπότ Adept Τύπου SCARA.

1.1. Περιγραφή Ρομποτικής Διάταξης

Η παρούσα ρομποτική διάταξη αποτελείται από τέσσερις αρθρώσεις, τρεις στρωφικές και μία πρισματική. Από αυτές, οι πρώτες δύο αρθρώσεις είναι περιστροφικές με παράλληλο άξονα περιστροφής, με την κινηματική τους δομή να αποτελεί έναν επίπεδο βραχίονα δύο βαθμών ελευθερίας. Η τρίτη άρθρωση είναι πρισματική, με την κίνηση να την εκτελεί στον κατακόρυφο άξονα Z, ενώ η τέταρτη άρθρωση βρίσκεται πάνω στον end effector και είναι περιστροφική.

Η κινηματική ενός Adept, οφείλεται στον άξονα μεταφορικής κίνησης για την κατακόρυφη κίνηση όπου πριν από αυτό υπάρχουν δυο στρεφόμενοι άξονες και ονομάζεται κινηματική PRT. Ο χώρος εργασίας είναι κυλινδρικός. Αυτή η κατασκευαστική μορφή επιτρέπει μεγάλες δυνάμεις συναρμογής κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, διότι αυτές οι δυνάμεις δεν παραλαμβάνονται από τα συστήματα κινήσεως

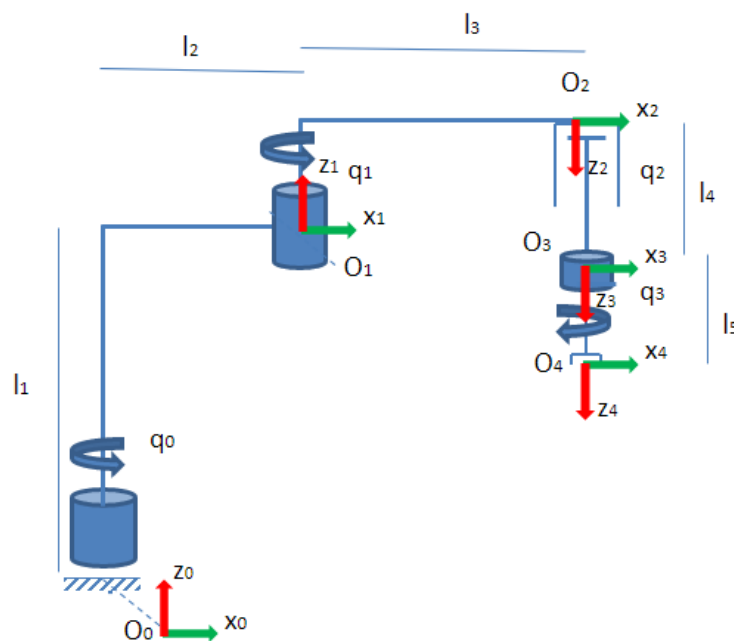
των αρθρώσεων. Συνήθως αυτά τα ρομπότ Adept έχουν μόνο έναν άξονα για την περιστροφή των τεμαχίων, δηλαδή συνολικά 4 άξονες όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Οι αρθρώσεις του «ώμου» και του «αγκώνα» περιστρέφονται γύρω από ένα κατακόρυφο άξονα. Ο σχηματισμός τους εξασφαλίζει μεγάλο ποσοστό ακαμψίας στο ρομπότ κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση, αλλά ευκαμψία στο οριζόντιο επίπεδο. Οι αρθρώσεις του ρομπότ είναι ικανές για περιστροφή και μπορούν να εγγυηθούν την ασφάλεια που είναι απαραίτητη ώστε το ρομπότ να «επιβιώσει» σε κακής ποιότητας περιβάλλον, ή ακόμα σε εφαρμογές κάτω από το νερό.

Όλες οι αρθρώσεις του Adept βρίσκονται στο τέλος του κάθε βραχίονα με αποτέλεσμα να το καθιστά εύκολο στις παρεκτροπές. Εκτελεί μόνο λειτουργίες που βρίσκονται σε ένα επίπεδο, οπότε σε μια διαδικασία όπου η συναρμολόγηση είναι σε παραπάνω από ένα επίπεδο είναι άχρηστο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχει περιορισμένες εφαρμογές κατά την χρήση του.

1.2. Κινηματική Ανάλυση Ρομποτικής Διάταξης

Ο συγκεκριμένος ρομποτικός μηχανισμός αποτελείται από 4 αρθρώσεις, τις οποίες τις αντικρίζουμε και στο σχήμα 2.



Σχήμα 2. Πλαίσια κατά την σύμβαση D-H

1.2.1 Μεθοδολογία Denavit - Hartenberg

Αναλυτικότερα, ο πίνακας 1 αποτελεί την σύμβαση D-H του ρομποτικού βραχίονα. Με βάσει τις παραμέτρους του βραχίονα θα καθοριστούν τα πλαίσια αναφοράς της κάθε άρθρωσης και θα παραχθεί η ευθεία κινηματική δομή του βραχίονα.

Πίνακας 1: Κατάσταση Denavit-Hartenberg (D-H) του ρομπότ Adept				
$link\ i$	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_2	0	l_1	q_0
2	l_3	π	0	q_1
3	0	0	$l_4 + q_2$	0
4	0	0	l_5	q_3

Πίνακας 1. Πίνακας Παραμέτρων D-H για τον ρομποτικό χειριστή.

1.2.2 Ευθύ Κινηματικό Μοντέλο

Έχει βρεθεί ο πίνακας παραμέτρων του ρομποτικού χειριστή. Το επόμενο βήμα είναι να βρούμε τους ομογενείς μετασχηματισμούς της κάθε άρθρωσης και να υπολογίσουμε τις κινηματικές εξισώσεις του ρομποτικού χειριστή. Αρχικά βρίσκουμε τους πίνακες μετασχηματισμού της κάθε άρθρωσης σύμφωνα με την σύμβαση *Denavit – Hartenberg*.

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} c_0 & -s_0 & 0 & l_2 c_0 \\ s_0 & c_0 & 0 & l_2 s_0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & l_3 c_1 \\ s_1 & -c_1 & 0 & l_3 s_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 + q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Στη συνέχεια θα βρούμε τον συνολικό πίνακα μετασχηματισμού, ο οποίος είναι:

$$A_4^0 = A_1^0 * A_2^1 * A_3^2 * A_4^3 = \begin{bmatrix} s_3 s_{01} + c_3 c_{01} & -s_3 c_{01} + c_3 s_{01} & 0 & l_3 c_{01} + l_2 c_0 \\ -s_3 c_{01} + c_3 s_{01} & -s_3 s_{01} - c_3 c_{01} & 0 & l_3 s_{01} + l_2 s_0 \\ 0 & 0 & -1 & l_1 - (l_4 + l_5 + q_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

1.3. Διαφορική Ανάλυση Ρομποτικής Διάταξης

Έχοντας καταστρώσει τις εξισώσεις που προσδιορίζουν τη θέση και τον προσανατολισμό του τελικού στοιχείου δράσης, το επόμενο βήμα είναι να καταστρώσουμε και τις εξισώσεις που προσδιορίζουν τη γραμμική και περιστροφική ταχύτητα του τελικού στοιχείου δράσης. Για τον προσδιορισμό των σχέσεων αυτών θα υπολογιστεί η ιακωβιανή μήτρα του συστήματος. Η μήτρα αυτή θα μεταφράζει τις ταχύτητες των μεταβλητών των αρθρώσεων στις ταχύτητες του τελικού στοιχείου δράσης.

1.3.1 Ιακωβιανή Μήτρα Ρομποτικού Χειριστή

Το ρομπότ Adept τύπου Scara όπως αναφέρθηκε παραπάνω έχει 4 βαθμούς ελευθερίας. Καθώς γνωρίζουμε τις εξισώσεις του τελικού στοιχείου δράσης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την γεωμετρική μέθοδο εύρεσης της ιακωβιανής μήτρας. Το ΤΣΔ έχει τις εξής σχέσεις:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} l_3 c_{01} + l_2 c_0 \\ l_3 s_{01} + l_2 s_0 \\ l_1 - (l_4 + l_5 + q_2) \end{bmatrix}$$

Δεύτερο βήμα είναι ο διαχωρισμός των στρωφικών αρθρώσεων με των πρισματικών αρθρώσεων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το ρομπότ τύπου Scara έχει τρεις περιστροφικές αρθρώσεις την 1,2,4 και μια πρισματική την 3. Για τον υπολογισμό των στρωφικών αρθρώσεων χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$\begin{bmatrix} J_{Li} \\ J_{Ai} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{i-1} * r_{i-1,E} \\ b_{i-1} \end{bmatrix}$$

Όπου b_{i-1} : είναι ο άξονας της άρθρωσης i και $r_{i-1,E}$ είναι το διάνυσμα $O_{i-1} \rightarrow O_E$

Όσο αφορά για την πρισματική άρθρωση ο τύπος είναι ο ακόλουθος:

$$\begin{bmatrix} J_{Li} \\ J_{Ai} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα έχουμε:

- i=1: στροφική άρθρωση $\rightarrow J_{L1} = b_0 \times r_{0E} = \begin{bmatrix} -l_2 s_0 - l_3 s_{01} \\ l_2 c_0 + l_3 c_{01} \\ 0 \end{bmatrix}$, $J_{A1} = b_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
- i=2: στροφική άρθρωση $\rightarrow J_{L2} = b_1 \times r_{1E} = \begin{bmatrix} -l_3 s_{01} \\ l_3 c_{01} \\ 0 \end{bmatrix}$, $J_{A2} = b_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
- i=3: πρισματική άρθρωση $\rightarrow J_{L3} = b_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$, $J_{A3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
- i=4: στροφική άρθρωση $\rightarrow J_{L4} = b_3 \times r_{3E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $J_{A4} = b_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η Ιακωβιανή μήτρα του ρομπότ Adept:

$$J(q) = \begin{bmatrix} -l_2 s_0 - l_3 s_{01} & -l_3 s_{01} & 0 & 0 \\ l_2 c_0 + l_3 c_{01} & l_3 c_{01} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

1.3.2 Ιδιόμορφες Διατάξεις Ρομποτικού Χειριστή

Η ιδιόμορφη διάταξη καθορίζεται η διεύθυνση όπου το ρομπότ χάνει έναν βαθμό ελευθερίας ($\det(J(q))=0$). Λόγω της μορφής της Ιακωβιανής μήτρας και της δομής του βραχίονα, μπορούν να παραλειφθούν οι δύο πρώτες γραμμές του J_A τμήματος, επιτρέποντας να υπολογιστεί η ιδιόμορφη διάταξη από την στην Ιακωβιανή μήτρα:

$$J(q) = \begin{bmatrix} -l_2 s_0 - l_3 s_{01} & -l_3 s_{01} & 0 & 0 \\ l_2 c_0 + l_3 c_{01} & l_3 c_{01} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Υπολογίζοντας την διακρίνουσα του παραπάνω πίνακα έχουμε:

$$\begin{aligned} \det(J) &= -[-((-l_2 s_0 - l_3 s_{01})l_3 c_{01} + l_3 s_{01}(l_2 c_0 + l_3 c_{01}))] \\ &= l_2 l_3 (c_0 s_{01} - s_0 c_{01}) \\ \det(J(q)) &= l_3 l_2 s_1 \end{aligned}$$

Επομένως ιδιόμορφες διατάξεις έχουμε όταν:

$$\det(J(q)) = 0 \Leftrightarrow l_3 l_2 s_1 = 0 \xrightarrow{l_3, l_2 \neq 0} s_1 = 0 \Rightarrow \begin{cases} q_1 = 0 \\ \text{ή} \\ q_1 = \pi \end{cases}$$

Η παραπάνω ιδιόμορφη διάταξη αποτελεί την ίδια με ένα επίπεδο 2R βραχίονα, κάτι το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ιδιομορφία αυτή οφείλεται στις πρώτες δύο αρθρώσεις. Πιο αναλυτικά, η διάταξη αυτή μπορεί να γίνει αντιληπτή για την πρώτη περίπτωση ($q_1 = 0$) ως το πλήρες "τέντωμα" του δεύτερου συνδέσμου, φτάνοντας στα όρια του χώρου εργασίας ή για την δεύτερη περίπτωση ($q_1 = \pi$) ως το πλήρες "λύγισμα" του δεύτερου συνδέσμου, φτάνοντας σε μία εσωτερική ιδιομορφία. Και οι δύο περιπτώσεις αποτελούν ιδιόμορφες διατάξεις οι οποίες επηρεάζουν και περιορίζουν την κίνηση σε κατευθύνσεις του διανύσματος της γραμμικής ταχύτητας v_E και όχι της περιστροφικής ταχύτητας ω_E .

1.4. Σχεδιασμός Τροχιάς με Πολυωνυμική Παρεμβολή

Για να πραγματοποιηθεί η κίνηση του άκρου του ρομπότ μεταξύ δύο ακραίων σημείων (αρχή - στόχος) χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος σχεδιασμού τροχιάς. Ο αλγόριθμος αυτός κατασκευάζει συναρτήσεις του χρόνου προκειμένου να οδηγήσει το ρομπότ σε μία συνεχή ομαλή κίνηση μεταξύ των δύο αυτών ακραίων σημείων, δημιουργώντας ουσιαστικά μία χρονική ακολουθία ενδιάμεσων θέσεων.

Ο σχεδιασμός τροχιάς μπορεί να γίνει είτε στον χώρο εργασίας είτε στον χώρο των αρθρώσεων. Για το συγκεκριμένο τύπου ρομπότ (τύπου Scara) και καθώς δεν υπάρχουν εμπόδια στον χώρο εργασίας, επιλέγεται ο σχεδιασμός τροχιάς στον χώρο των αρθρώσεων, ακόμα και όταν τα σημεία ορίζοντας στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Επίσης επειδή η τρίτη άρθρωση είναι πρισματική, η διαδικασία pick and place μπορεί εύκολα να επιτευχθεί θεωρώντας ότι το αρχικό και το τελικό σημείο τροχιάς βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και η κίνηση στην τρίτη διάσταση πραγματοποιείται μέσω της πρισματικής άρθρωσης.

Υπό αυτό τον σχεδιασμό, διακρίνουμε δύο περιπτώσεις ανάλογα με τον τρόπο εκμάθησης και ορισμού των σημείων, την περίπτωση εκμάθησης μέσω του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων (*world*) και την περίπτωση εκμάθησης μέσω του συστήματος των αρθρώσεων (*joint*). Στην πρώτη περίπτωση, ορίζονται αρχικά τα δύο σημεία (αρχή - στόχος) ως δεδομένα για την θέση του τελικού στοιχείου δράσης του ρομπότ. Τότε, υπολογίζουμε μέσω της αντίστροφης κινηματικής τις γωνίες των επιμέρους αρθρώσεων για κάθε μία από τις δύο αυτές θέσεις. Στην δεύτερη περίπτωση, η εφαρμογή του αντίστροφου κινηματικού δεν χρειάζεται, καθώς διαθέτουμε τις γωνίες των αρθρώσεων για αρχική και τελική θέση. Από αυτό το σημείο, η σχεδίαση τροχιάς και των δύο περιπτώσεων εξελίσσεται με τον ίδιο τρόπο. Πιο αναλυτικά, δημιουργούμε

πολυώνυμο $\xi(t)$, το οποίο περιγράφει την γωνία κάθε άρθρωσης για κάθε χρονική στιγμή t εκτέλεσης της εργασίας ($t \in [0, t_f]$). Η πρώτη παράγωγος $\dot{\xi}(t)$ μας δίνει την ταχύτητα της κάθε άρθρωσης για τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές. Για να έχουμε τροχιά συνεχή αλλά και συνέχεια ως προς την ταχύτητα, θέλουμε συνεχή πρώτη παράγωγο. Επομένως χρησιμοποιούμε *Πολυωνυμική Συνάρτηση Παρεμβολής* 3ου βαθμού (4 παράμετροι), όπου:

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

$$\dot{\xi}(t) = \alpha_1 + 2\alpha_2 t + 3\alpha_3 t^2$$

Επειδή όπως αναφέραμε η συνάρτηση της παρεμβολής περιγράφει την γωνία κάθε άρθρωσης q_i , $i=0,\dots,3$, οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να γραφτούν:

$$q_i(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3$$

$$\dot{q}_i(t) = \alpha_1 + 2\alpha_2 t + 3\alpha_3 t^2$$

Επίσης θεωρούμε:

$$q_i(0) = q_{i_0}, \text{ δηλαδή η γωνία της άρθρωσης } i \text{ στην αρχική θέση}$$

$$q_i(t_f) = q_{i_f}, \text{ δηλαδή η γωνία της άρθρωσης } i \text{ στην τελική θέση}$$

$$\dot{q}_i(0) = \dot{q}_{i_0}, \text{ δηλαδή η ταχύτητα της άρθρωσης } i \text{ στην αρχική θέση}$$

$$\dot{q}_i(t_f) = \dot{q}_{i_f}, \text{ δηλαδή η ταχύτητα της άρθρωσης } i \text{ στην τελική θέση}$$

Άρα για $t = 0$:

$$q_i(0) = \alpha_0 \Leftrightarrow \alpha_0 = q_{i_0}$$

$$\dot{q}_i(0) = \alpha_1 \Leftrightarrow \alpha_1 = \dot{q}_{i_0}$$

Επομένως προκύπτει το σύστημα:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_0 = q_{i_0} \\ \alpha_1 = \dot{q}_{i_0} \\ \xi(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 \\ \dot{\xi}(t) = \alpha_1 + 2\alpha_2 t + 3\alpha_3 t^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \alpha_0 = q_{i_0} \\ \alpha_1 = \dot{q}_{i_0} \\ \alpha_2 = \frac{3(q_{i_f} - q_{i_0}) - (2q_{i_0} + q_{i_f})t_f}{t_f^2} \\ \alpha_3 = \frac{2(q_{i_0} - q_{i_f}) + (q_{i_0} + q_{i_f})t_f}{t_f^3} \end{array} \right.$$

Έχουμε αρχική και τελική θέση «εν στάσει», άρα:

$$\dot{q}_i(0) = \dot{q}_{i0} = 0, \quad \dot{q}_i(t_f) = \dot{q}_{if} = 0$$

Άρα η πολυωνυμική συνάρτηση παρεμβολής της θέσης και της ταχύτητας των αρθρώσεων q_i , $i=0,\dots,3$ του ρομπότ τη χρονική στιγμή t , γράφονται:

$$q_i(t) = q_{i0} + 3(q_{if} - q_{i0})\left(\frac{t}{t_f}\right)^2 - 2(q_{if} - q_{i0})\left(\frac{t}{t_f}\right)^3$$

$$\dot{q}_i(t) = 6(q_{if} - q_{i0})\frac{1}{t_f^2}\left(t - \frac{t^2}{t_f}\right), \quad i = 0, \dots, 3$$

Επομένως, οι εξισώσεις τροχιάς στον χώρο των αρθρώσεων εξαρτώνται από την αρχική γωνία (q_{i0}) της κάθε άρθρωσης i τη στιγμή t_0 και την τελική γωνία αυτών (q_{if}) τη στιγμή t_f .

2. Διάγραμμα Ροής Προγραμματιστικής Διαδικασίας

Στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί περιγράφεται μία εργασία του ρομπότ pick & place από ένα σημείο «αρχή» σε ένα σημείο «στόχος» ανάμεσα στα οποία παρεμβάλλονται N ενδιάμεσα σημεία. Συνεπώς σχεδιάζουμε τροχιές μεταξύ των σημείων αυτών, δηλαδή αρχικά μεταξύ του αρχικού σημείου Σ_0 και του πρώτου ενδιάμεσου σημείου Σ_{k+1} , $k = 0$ και ύστερα μεταξύ των σημείων Σ_k και Σ_{k+1} , $k = 1, \dots, N$. Για κάθε ένα από αυτά τα σημεία, μέσω του αντίστροφου κινηματικού μοντέλου, υπολογίζουμε τις γωνίες κάθε άρθρωσης q_i , $i = 0, \dots, 3$. Έτσι μέσα από την σχέση

$$q_i(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3$$

που αναφέραμε παραπάνω και με τα $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ που ορίσαμε συναρτήσει των γωνιών q_{ik} και $q_{i,k+1}$ στα σημεία Σ_k και Σ_{k+1} αντίστοιχα, σχεδιάζουμε την τροχιά κάθε άρθρωσης μεταξύ δύο οποιοδήποτε σημείων Σ_k και Σ_{k+1} .

Οι τιμές γωνιών που παίρνουν τα q_i κάθε χρονική στιγμή ελέγχονται προκειμένου να αποφευχθεί η εμφάνιση ιδιόμορφων διατάξεων. Συγκεκριμένα, ιδιόμορφη διάταξη όπως υπολογίσαμε, έχουμε όταν $q_1 = 0$ ή $q_1 = \pi$. Έτσι σε περίπτωση που το q_1 πάρει μία από αυτές τις τιμές, γνωρίζοντας τις γωνίες και των υπόλοιπων αρθρώσεων τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, μέσα από ευθύ κινηματικό μοντέλο υπολογίζουμε την θέση που θα είχε το end effector και παίρνουμε μία νέα θέση κοντινή σε αυτή, την οποία θεωρούμε σαν νέο ενδιάμεσο σημείο. Το σημείο αυτό ορίζεται πλέον ως τελικό σημείο της τροχιάς (Σ_{k+1}),

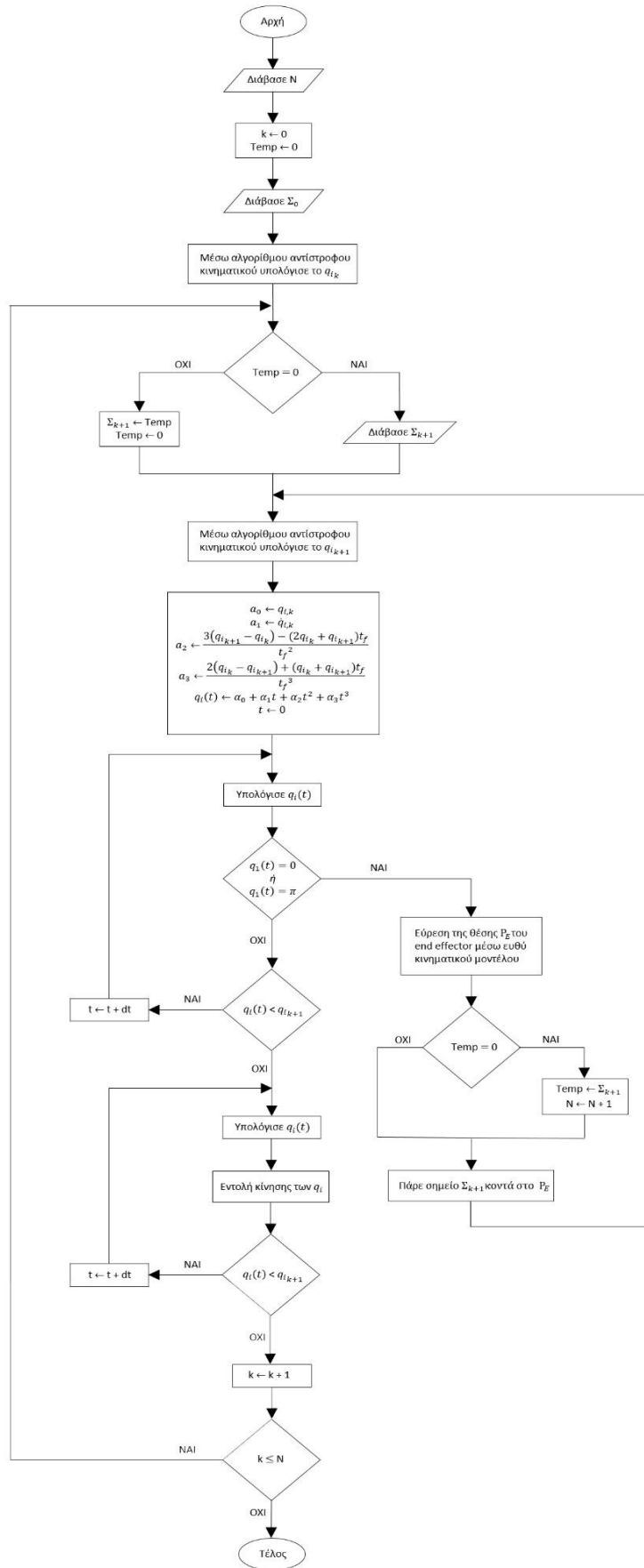
ενώ το αρχικό σημείο-στόχος αποθηκεύεται στην μεταβλητή Temp (η οποία αρχικά έχει τιμή 0) και ο αριθμός των ενδιάμεσων σημείων N αυξάνεται κατά ένα.

Με νέο σημείο-στόχο πλέον το επιπλέον ενδιάμεσο σημείο επανασχεδιάζεται η τροχιά και ξαναελέγχεται η εμφάνιση ιδιομορφιών. Αν προκύψουν και πάλι ιδιόμορφες διατάξεις ενεργοποιείται ξανά ο βρόχος επιλογής ενός νέου κοντινού σημείου. Αυτή τη φορά όμως η μεταβλητή Temp έχει τιμή διαφορετική του μηδενός, φανερώνοντας ότι έχει επιλεγεί ήδη επιπλέον ενδιάμεσο σημείο το οποίο όμως δεν ήταν αποδεκτό. Επομένως αρκεί να αντικατασταθεί το σημείο αυτό με ένα νέο κοντινό του, χωρίς όμως να επιθυμούμε αλλαγή στην τιμή της μεταβλητής Temp που μας δείχνει το σημείο-στόχο που είχαμε πριν την επιλογή του νέου ενδιάμεσου σημείου, αλλά ούτε και αλλαγή στο πλήθος των ενδιάμεσων σημείων (τα οποία έχουν ήδη αυξηθεί κατά ένα). Έτσι σε κάθε δεύτερη και πλέον συνεχόμενη ενεργοποίηση του βρόχου των ιδιομορφιών μέσα από μία συνθήκη ελέγχου της τιμής της μεταβλητής Temp εξασφαλίζουμε ότι θα επιλέγονται μόνο επαναληπτικά νέα ενδιάμεσα σημεία κοντινά στα προηγούμενα μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη μη εμφάνισης ιδιομορφιών.

Αν δεν προκύψει ιδιομορφία τότε τα q_i συνεχίζουν να παίρνουν τιμές ανά χρονικά διαστήματα dt μέχρι την τιμή $q_{i_{k+1}}$, όπου θα έχουν ελεγχθεί όλες οι τιμές των q_i για την τροχιά μεταξύ του σημείου Σ_k και του κατάλληλα επιλεγμένου σημείου Σ_{k+1} . Τότε ενεργοποιείται η κίνηση των q_i για την τροχιά αυτή. Στη συνέχεια ο σχεδιασμός τροχιάς επαναλαμβάνεται για τα επόμενα σημεία και συγκεκριμένα θεωρώντας σαν σημείο-αρχή το σημείο-στόχο της προηγούμενης τροχιάς και σαν σημείο-στόχο το επόμενο ενδιάμεσο σημείο. Σε περίπτωση που το σημείο-στόχος της προηγούμενης τροχιάς ήταν ένα επιπλέον ενδιάμεσο σημείο που προστέθηκε για την αποφυγή ιδιομορφίας (οπότε $Temp \neq 0$), τότε το σημείο-στόχος Σ_{k+1} της τροχιάς αυτής θα είναι το σημείο που έχει αποθηκευτεί στην μεταβλητή Temp. Τότε η μεταβλητή Temp θα πάρει ξανά την τιμή 0, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο σε νέα πιθανή εμφάνιση ιδιομορφίας διάταξης. Εάν δεν έχει υπάρξει στην προηγούμενη τροχιά ιδιομορφία και συνεπώς δεν έχει επιλεγεί επιπλέον ενδιάμεσο σημείο (οπότε $Temp=0$) τότε ως σημείο-στόχος επιλέγεται το επόμενο ενδιάμεσο σημείο Σ_{k+1} που είναι στην λίστα των N.

Όλη η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι ο μετρητής k των ενδιάμεσων σημείων N να δείξει ότι δεν έχουμε άλλα ενδιάμεσα σημεία.

Συνολικά, όλη η εργασία που περιεγράφηκε παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3. Διάγραμμα ροής εκτέλεσης διεργασίας Pick and Place.

Βιβλιογραφία

- [1] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, *Robotics: Modeling, Planning and Control*, Springer, 2009.
- [2] Manual Control Pendant, User's Guide