Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ & ΜΗΧ/ΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ, ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

3η Εργαστηριακή Άσκηση: Προγραμματισμός Ρομπότ Adept

Ομάδα Γ5:
Δάσκος Ραφαήλ (03116049)
Ζάρρας Ιωάννης (03116082)
Παπαγεωργίου Νικολέττα-Ευσταθία (03116648)
Μιχαήλ Μελέτης (03116677)
Μετζάκης Ιωάννης (03116202)

Στόχος της εργασίας:

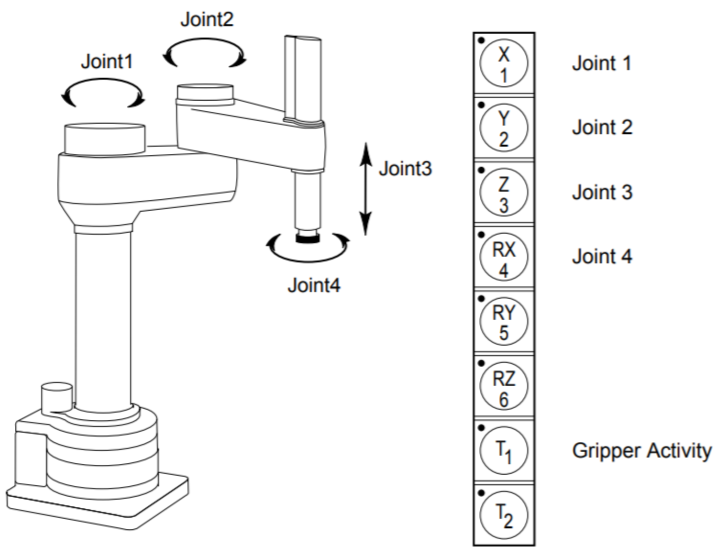
Σκοπός της εργαστηριακής αυτής άσκησης είναι η εξοικείωση των φοιτητών με τη βασική μέθοδο "εν λειτουργίας" (on-line) προγραμματισμού του ρομπότ με χρήση χειριστηρίου τύπου "Teach Pendant”. Για το σκοπό της εργαστηριακής αυτής άσκησης θα χρησιμοποιηθεί ένα ρομπότ τύπου Adept (AdeptOne). Έχει επίπεδη κινηματική δομή (τύπου Scara) η οποία είναι κατάλληλη για εργασίες τύπου "λήψη-και-εναπόθεση" (pick-and-place).

Πειραματική Διάταξη:

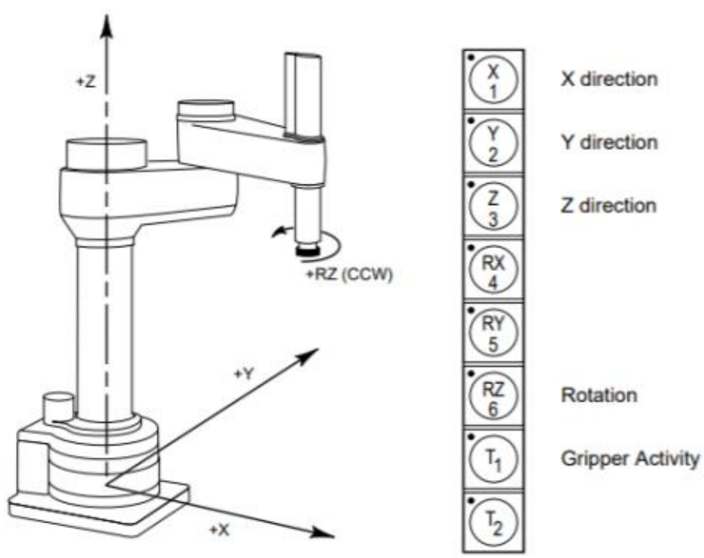
Στην πειραματική μας διάταξη χρησιμοποιήσαμε τον ρομποτικό βραχίονα τύπου AdeptOne έχει τέσσερις βαθμούς ελευθερίας μιας και μπορεί να εκτελέσει τις ακόλουθες τέσσερις κινήσεις:

- 3 στροφικές γύρω από τις αρθρώσεις 1, 2, 4. Οι πρώτες δύο βρίσκονται στις 2 πρώτες αρθρώσεις του ρομπότ και η τρίτη στο τελικό σημείο δράσης.
- Υπάρχει και μια πρισματική στην τρίτη άρθρωση που μας βοηθά να προσεγγίσουμε και να πιάσουμε ή αφήσουμε τα αντικείμενα μας.

Αυτές οι αρθρώσεις μπορούν να παρατηρηθούν στην παρακάτω φωτογραφία.



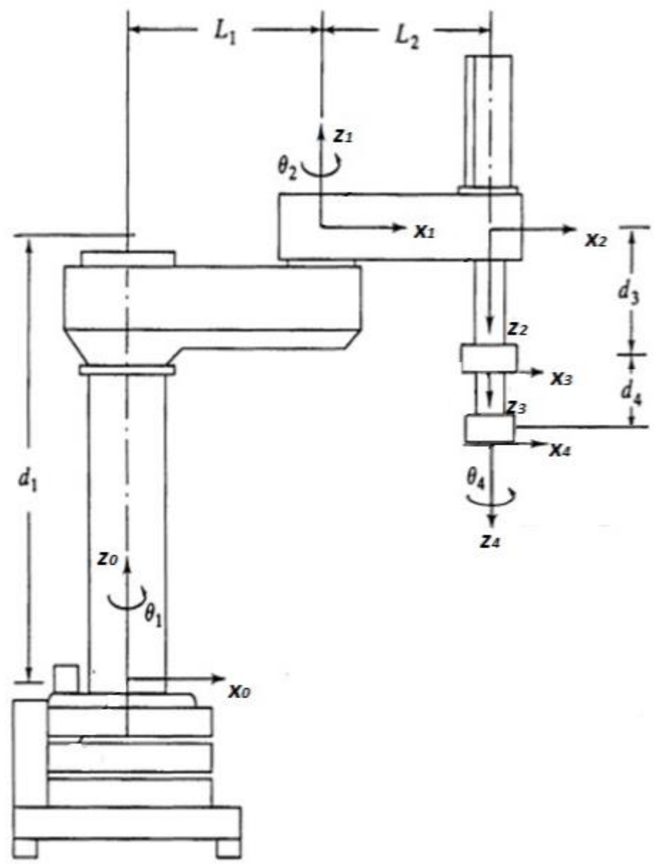
Για τον έλεγχο του ρομπότ μας σημαντικό ήταν το χειριστήριο ελέγχου μας στο οποίο χρησιμοποιούμε την κατάσταση world για να επιτύχουμε και ταυτόχρονη κίνηση όλων των αξόνων. Κάθε φορά που επιλέγεται μια μεταφορική κίνηση επιλέγουμε το αντίστοιχο κουμπί του χειριστηρίου με τα πρόσημα των κινήσεων να είναι προκαθορισμένα (θα τα δείξουμε στην επόμενη φωτογραφία). Ακόμα έχουμε και την περιστροφή του τελικού σημείου ως προς z (Rz) ώστε να μπορέσουμε να τοποθετήσουμε με την κατάλληλη γωνία το σημείο μας πάνω από το αντικείμενο που θέλουμε να πιάσουμε (ή τη θέση που θέλουμε να το αφήσουμε). Τέλος, έχουμε και την επιλογή T1 μπορούμε να κρατήσουμε ή να αφήσουμε κάποιο αντικείμενο. Όλα αυτά φαίνονται στην παρακάτω φωτογραφία:



Από την εκτέλεση της άσκησης μας παρατηρήσαμε ότι κατά την μετακίνηση του ρομπότ στο χώρο είχαμε μερικούς περιορισμούς (εξαιτίας της ύπαρξης ιδιόμορφων καταστάσεων), διατάξεις δηλαδή στις οποίες ο βραχίονας μας δεν μπορούσε να φτάσει. Για το λόγο αυτό σημαντικό είναι κατά τη μελέτη μιας pick-and-place διαδικασίας να προσέξουμε να μην φτάσουμε σε αυτές τις θέσεις αλλά και να αποφύγουμε όποια εμπόδια βρίσκονται ενδιάμεσα στον χώρο κίνησης μας. Τις θέσεις αυτές θα τις υπολογίσουμε παρακάτω στην άσκηση μας.

Κινηματική Ανάλυση του ρομπότ:

Σημαντικό είναι να επιλέξουμε τους άξονές μας για τον υπολογισμό των D-H παραμέτρων και του αντίστοιχου πίνακα. Για το σκοπό αυτό τοποθετούμε τα πλαίσια όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα και με τη λογική που θα αναλύσουμε μετά τη φωτογραφία.



- *Πλαίσιο 1:* Για την τοποθέτηση αυτού του πλαισίου μπορούμε να πούμε ότι εφόσον οι άξονες 1, 2 είναι παράλληλοι θα τοποθετηθεί πάνω στη $2^η$ άρθρωση. Ο άξονας z1 θα ευθυγραμμιστεί με τον άξονα 1 με φορά ώστε το q1 να είναι θετικό και ο x1 θα είναι στην κοινή κάθετη των 1, 2.
- *Πλαίσιο 2:* Για την τοποθέτηση αυτού του πλαισίου μπορούμε να πούμε ότι εφόσον οι άξονες 2 και 3 ταυτίζονται θα το τοποθετήσουμε πάνω στην άρθρωση 3, με τον z2 να ταυτίζεται με τον άξονα 2 και τον x2 να είναι κάθετος σε αυτόν (ταυτίζεται με την κοινή κάθετη των 2 αξόνων).
- *Πλαίσιο 3:* Για την τοποθέτηση αυτού του πλαισίου μπορούμε να πούμε ότι θα το βάλουμε στο σύνδεσμο 4. Ο z3 θα είναι ευθυγραμμισμένος με τον 3 άξονα και ο x3 κάθετος σε αυτόν.

- *Πλαίσιο 4:* Το πλαίσιο αυτό θα το τοποθετήσουμε στο τελικό σημείο δράσης και το O z2 θα είναι ευθυγραμμισμένος με τον 4 άξονα και ο x4 κάθετος σε αυτόν.

Για όλα τα πλαίσια παίρνουμε τη φορά του z άξονα τέτοια ώστε να έχουμε θετική την γωνία περιστροφής, όπως φαίνεται και στο σχήμα, και τον y άξονα τέτοιον ώστε να μην αντιβαίνει στο δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω θα προκύψει ο παρακάτω πίνακας παραμέτρων D-H:

	θ_i	d_i	α_i	a_i
1	θ_1	d_1	l_1	0
2	θ_2	0	l_2	π
3	0	d_3	0	0
4	$-\theta_4$	d_4	0	0

Μέσω του πίνακα αυτού μπορούμε να υπολογίσουμε τους πίνακες:

$$A_i^{i-1} = rot(z,\theta_i) * tra(z,d_i) * tra(x,\alpha_i) * rot(x,a_i)$$

Με αυτόν τον τύπο μας προκύπτουν οι πίνακες:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} c1 & -s1 & 0 & 0 \\ s1 & c1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c1 & -s1 & 0 & l1c1 \\ s1 & c1 & 0 & l1s1 \\ 0 & 0 & 1 & d1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 & 0 \\ s2 & c2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c2 & s2 & 0 & l2c2 \\ s2 & -c2 & 0 & l2s2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} c4 & s4 & 0 & 0 \\ -s4 & c4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c4 & s4 & 0 & 0 \\ -s4 & c4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Και έτσι συνολικά θα είναι:

$$T=\begin{bmatrix} \cos(\theta 1+\theta 2+\theta 4) & \sin(\theta 1+\theta 2+\theta 4) & 0 & l1\cos(\theta 1)+l2\cos(\theta 1+\theta 2) \\ \sin(\theta 1+\theta 2+\theta 4) & -\cos(\theta 1+\theta 2+\theta 4) & 0 & l1\sin(\theta 1)+l2\sin(\theta 1+\theta 2) \\ 0 & 0 & -1 & d1-d3-d4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Για να φτιάξουμε την Ιακωβιανή ορίζουσα χρειαζόμαστε να υπολογίσουμε τα J_L και J_A που προκύπτουν. Γι' αυτό θέλουμε και τα b_{i-1}. Επειδή για όλες τις αρθρώσεις μας έχουμε κίνηση ως προς z ισχύει πως το καθένα από τα b_{i-1} θα είναι τα 3 πρώτα στοιχεία της 3ης στήλης του πίνακα A_{i-1}^{0}, τα οποία και υπολογίσαμε μέσω του matlab:

b_0 = [0 0 1]^T, b_1 = [0 0 1]^T, b_2 = [0 0 1-]^T και b_3 = [0 0 -1]^T

Στη συνέχεια για τις στροφικές αρθρώσεις χρειάζεται να υπολογίσουμε τα P_{i-1} που θα τα χρειαστούμε στο εξωτερικό γινόμενο, έτσι:

$P_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $P_1 = \begin{bmatrix} l_1 * c_1 \\ l_1 * s_1 \\ d_1 \end{bmatrix}$, $P_2 = \begin{bmatrix} l_1 * c_1 + l_2 * c_{12} \\ l_1 * s_1 + l_2 * s_{12} \\ d_1 \end{bmatrix}$, $P_3 = \begin{bmatrix} l_1 * c_1 + l_2 * c_{12} \\ l_1 * s_1 + l_2 * s_{12} \\ d_1 - d_3 \end{bmatrix}$ και $P_4 = \begin{bmatrix} l_1 * c_1 + l_2 * c_{12} \\ l_1 * s_1 + l_2 * s_{12} \\ d_1 - d_3 - d_4 \end{bmatrix}$

Και μετά τα εξωτερικά γινόμενα θα πάρουμε:

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 * s_1 - l_2 * s_{12} & -l_2 * s_{12} & 0 & 0 \\ l_1 * c_1 + l_2 * c_{12} & l_2 * c_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Εφόσον δε μας ενδιαφέρει η γωνιακή ταχύτητα του τελικού σημείου (εκτελεί ανεμπόδιστη κίνηση θα χρειαστεί να βρούμε την ορίζουσα των 3 πρώτων γραμμών ώστε να βρούμε τις ιδιόμορφες διατάξεις. Έτσι θα πάρουμε το J_L:

$$J_L = \begin{bmatrix} -l_1 * s_1 - l_2 * s_{12} & -l_2 * s_{12} & 0 & 0 \\ l_1 * c_1 + l_2 * c_{12} & l_2 * c_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Για να βρούμε την ορίζουσα δε μας ενδιαφέρει η τελευταία στήλη του πίνακα και έτσι βγαίνει:

$$\det(J_L) = -\begin{vmatrix} -l_1 * s_1 - l_2 * s_{12} & -l_2 * s_{12} \\ l_1 * c_1 + l_2 * c_{12} & l_2 * c_{12} \end{vmatrix}$$

που μέσω του Matlab μας βγαίνει η ορίζουσα:

$$\det(J_L) = -l_1^2 l_2^2 sin(\theta_2)^2$$

και άρα οι ιδιάζουσες καταστάσεις είναι για $\theta_2 = 0$ και $\theta_2 = \pi$ (σε rad). Αυτό συμβαίνει γιατί στην πρώτη περίπτωση είναι όταν ο βραχίονας βρίσκεται σε πλήρη έκταση ενώ το δεύτερο είναι όταν βρίσκεται σε πλήρη συσπείρωση. Και στις δύο περιπτώσεις το end effector δεν μπορεί να εκτελέσει μία από τις ακτινικές κινήσεις. Στην πραγματική διάταξη που έχουμε και το d_3 και d_4 το ρομπότ μας δεν μπορεί να φτάσει ούτε μερικές ακόμα μοίρες κοντά στο π καθώς εμποδίζεται από την ίδια του τη διάταξη.

Ο κώδικας της Matlab για να μας δώσει τους παραπάνω πίνακες είναι ο εξής:

```
close all; clear all;
syms u1 u2 u4 l1 d1 l2 d4 d3
c1=cos(u1; s1=sin(u1; c2=cos(u2; s2=sin(u2); c4=cos(u4); s4=sin(u4);
A01= [c1 -s1 0 l1*c1;s1 c1 0 l1*s1;0 0 1 d1;0 0 0 1];
A12= [c2 s2 0 l2*c2;s2 -c2 0 l2*s2;0 0 -1 0;0 0 0 1];
A23= [1 0 0 0;0 1 0 0; 0 0 1 d3; 0 0 0 1];
A34= [c4 s4 0 0;-s4 c4 0 0;0 0 1 d4; 0 0 0 1];
A02 = A01*A12; A03 = A02*A23; T=A01*A12*A23*A34;
b0 = [0; 0; 1]; b1 = A01(1:3, 3); b2 = A02(1:3, 3); b3 = A03(1:3, 3);
P0=[0 0 0]';P1=A01(1:3,4); P2=A02(1:3,4); P3=A03(1:3,4); P4=T(1:3,4);
T=simplify(T);
J=[cross(b0,(P4-P0)) cross(b1,(P4-P1)) b2 cross(b3,(P4-P3)); b0 b1 0
b3];
J = simplify(J);
d=-det(J(1:2, 1:2)*J(1:2, 1:2).');
d=simplify(d);
```

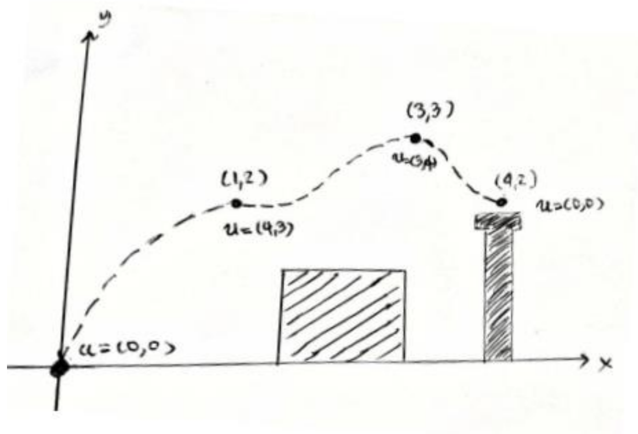
Σχεδιασμός τροχιάς με πολυωνυμική παρεμβολή

Πολύ σημαντικό για οποιονδήποτε ρομποτικό χειριστή, όπως και σε μας, είναι να μπορεί να μετακινηθεί από μια αρχική σε μια τελική θέση. Χρειάζεται να ακολουθήσουμε τους νόμους κινηματικής αλλά και δυνάμεις στις αρθρώσεις του ρομπότ ώστε να μπορεί το ρομπότ να κινηθεί εντός των ορίων/δυνατοτήτων κίνησης (για να αποφυγούν και οι ιδιόμορφες καταστάσεις). Για να τα επιτύχουμε αυτά μας είναι απαραίτητο να έχουμε έναν αποδοτικό αλγόριθμο για να καθορίσουμε την τροχιά.

Θέλουμε λοιπόν να ξεκινήσουμε από μια αρχική θέση και να καταλήξουμε σε μια επιθυμητή. Επιλέγουμε έτσι N σημεία τα οποία στο τέλος θα είναι η διαδρομή του ρομπότ μας. Φτιάχνουμε έτσι ένα πολυώνυμο N-1 βαθμού εξαιτίας των N περιορισμών. Αυτό, όμως, έχει μεγάλο κόστος για να υπολογιστεί, αστάθεια, μειωμένη ακρίβεια αλλά και μεγάλη πολυπλοκότητα για να βρεθεί η λύση που θα προκύψει μέσω των περιορισμών.

Δεδομένου αυτού θα θέλουμε να παρεμβάλουμε μικρότερου βαθμού πολυώνυμα μεταξύ των σημείων που έχουμε για να αποφύγουμε όλα τα αρνητικά που είπαμε προηγουμένως. Θα χρησιμοποιήσουμε ως το απλούστερο πολυώνυμο ένα τρίτου βαθμού για να μπορέσουμε να εξασφαλίσουμε τη συνέχεια τη θέσης και της ταχύτητας καθόλη τη διαδρομή των N σημείων. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με αυθαίρετες τιμές των ταχυτήτων, καθορισμένες βέβαια με κάποιο κριτήριο, είτε με κριτήριο να είναι η επιτάχυνση συνεχείς σε όλα τα σημεία της διαδρομής μας.

Θα δείξουμε παρακάτω ένα παράδειγμα εφαρμογής των αυθαίρετων τιμών ταχυτήτων για μια απλή μετακίνηση ενός σημείου (π.χ. Pick-and-place) που θέλουμε να σχεδιάσουμε μια τροχιά:



Θα θεωρήσουμε ότι είμαστε σε ένα επίπεδο z για απλοποίηση σε δισδιάστατο χώρο. Επιθυμούμε όπως βλέπουμε να πάμε από το (0,0) στο (4,2). Θα χρησιμοποιήσουμε άλλα 2 ενδιάμεσα σημεία. Για καθένα από αυτά έχουμε το διάνυσμα της ταχύτητας και άρα λαμβάνουμε 8 περιορισμούς στην είσοδο. Και θέλουμε μέσω αυτών να υπολογίσουμε τους 3 συντελεστές του πολυωνύμου.

Έχουμε: $\Pi_i(t) = a_{3i}t^3 + a_{2i}t^2 + a_{1i}t + a_{0i}$ με i = 0,1,2,3

Με πράξεις και τις αρχικές συνθήκες για τον χρόνο, τη θέση και την ταχύτητα μπορούμε με πράξεις να βρούμε τις μεταβλητές μας.

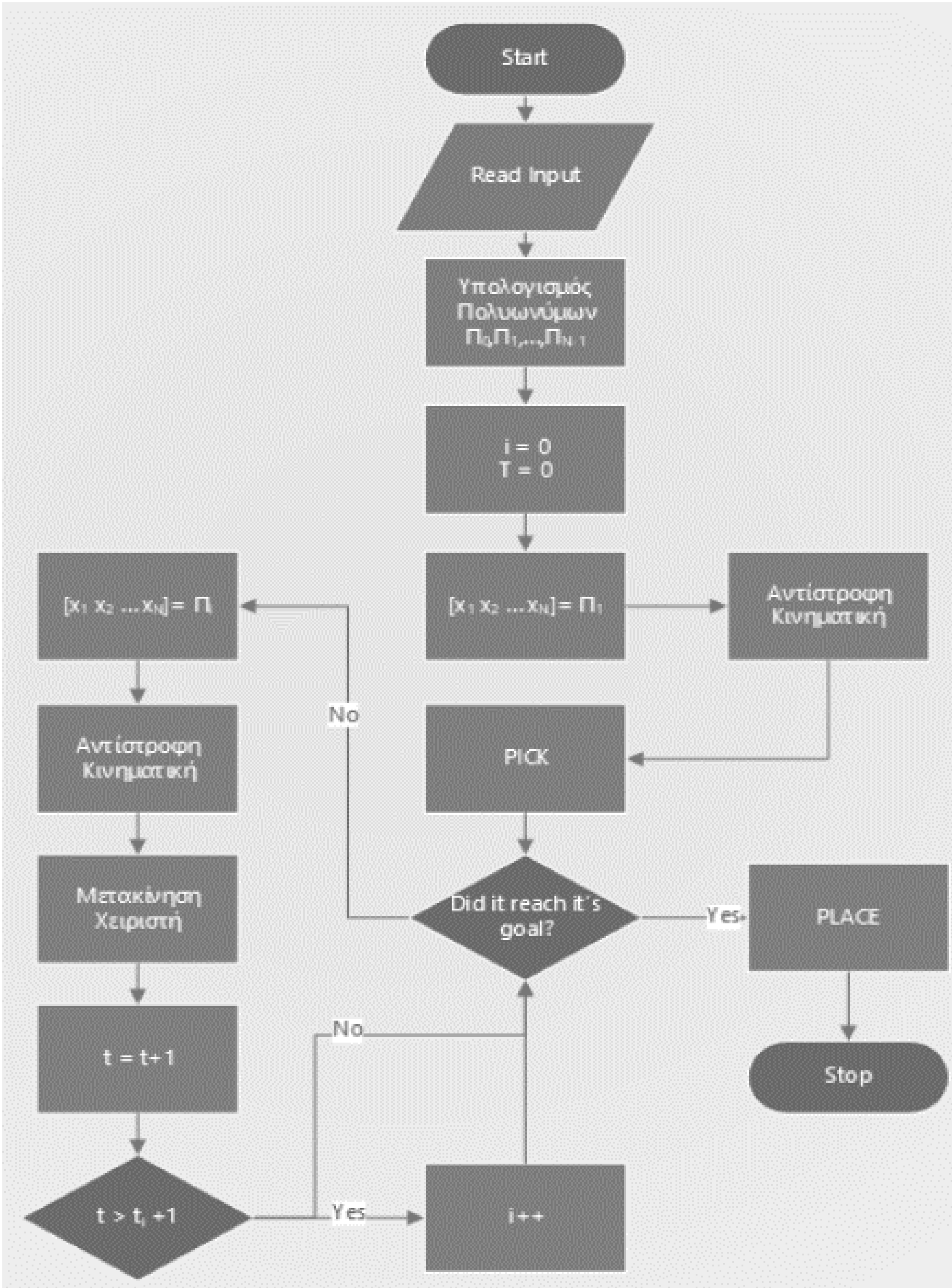
Έτσι για το συνολικό χρόνο της κίνησης μπορούμε, μέσω δειγματοληψίας της συνάρτησης που βρίσκουμε και τις αντίστροφης κινηματικής, να υπολογίσουμε τις εκάστοτε κινήσεις των αρθρώσεων προκειμένου να εκτελεστεί η επιθυμητή διαδικασία. Αυτό γίνεται μέσω της αντίστροφης κινηματικής του ρομπότ. Όμως, θα πρέπει πάντα να προσέχουμε αν μέσω αυτής βρισκόμαστε σε ιδιόμορφη κατάσταση για να την αποφύγουμε.

Περιγραφή διαδικασίας pick-and-place

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε τη διαδικασία pick-and-place μέσω ενός διαγράμματος ροής. Θα θεωρήσουμε ότι το ρομπότ μας φτάνει τις χρονικές στιγμές που χωρίζουμε την κίνηση στις απαιτούμενες θέσεις που έχουμε ορίσει.

Θα θεωρήσουμε επίσης δεδομένες τις θέσεις των προηγούμενων σημείων αλλά και τις ταχύτητες με τις οποίες καταφέρνει το ρομπότ να βρίσκεται σε αυτές.

Με όλα αυτά μπορούμε να υπολογίσουμε και τα πολυώνυμα παρεμβολής όπως αναφέραμε και προηγουμένως.



Το μόνο που δεν έχουμε εξηγήσει είναι η αύξηση του t που σημαίνει ότι πηγαίνουμε στην επόμενη θέση που έχουμε υπολογίσει και άρα κοιτάμε το επόμενο μας σημείο. Αν είναι το τελικό τελειώνει και η προσομοίωσή μας, αλλιώς συνεχίζουμε να κοιτάμε το επόμενο πολυώνυμο που υπολογίζουμε μέσω της ανάλυσης τροχιάς και του διαχωρισμού του προβλήματός μας σε μικρότερους στόχους. Με την αντίστροφη κινηματική επίσης θα πρέπει να προσέχουμε αν περνάμε μέσω από ιδιόμορφη διάταξη. Βέβαια αν είναι σωστός ο τρόπος υπολογισμού του πολυωνύμου Π, τότε δε θα έχουμε κάποιο πρόβλημα.