



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Σημάτων, Ελέγχου και Ρομποτικής

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

Άσκηση 1: Ρομποτικό Κύτταρο

Ομάδα Α3:

Αβραμίδης Κλεάνθης	03115117
Βασιλείου Βασιλική	03115033
Κρατημένος Άγγελος	03115025
Μπαρμπέρης Αλέξανδρος	03115003
Παναγιωταράς Ηλίας	03115746

Ημερομηνία Διεξαγωγής: 20/11/2018

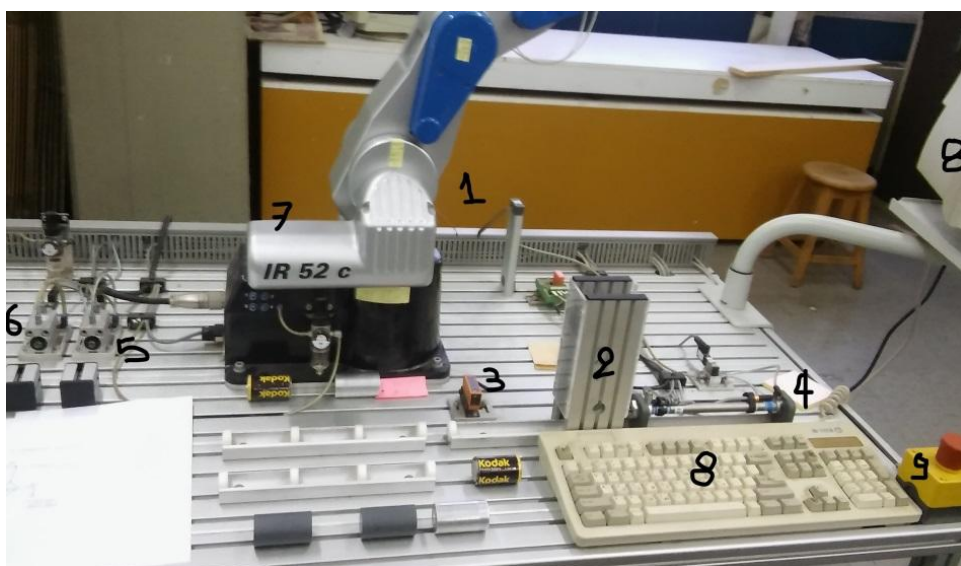
Ημερομηνία Παράδοσης: 04/12/2018

Πρώτο Μέρος: Γενική Περιγραφή Διάταξης και Πειράματος

Εισαγωγή:

Η παρούσα εργαστηριακή άσκηση εκτελείται στην εργαστηριακή διάταξη MASH (Modular Educational System for Handling Technology). Στην πραγματικότητα προσομοιάζει την προβληματική φύση της τεχνολογίας των βιομηχανικών διαδικασιών παραγωγής. Σκοπός της συγκεκριμένης διάταξης είναι η αυτόματη εκτέλεση μιας κυκλικής διαδικασίας διαλογής δοκιμίων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους (πλαστικό, μεταλλικό, μπαταρία). Μέσω της εργαστηριακής αυτής άσκησης ο φοιτητής εξοικειώνεται περισσότερο τόσο με το ρομποτικό βραχίονα και τον προγραμματισμό του, όσο και με άλλα θέματα όπως οι ηλεκτρο-πνευματικές διατάξεις και οι τεχνολογίες αισθητήρων.

Στοιχεία της εργαστηριακής διάταξης:



Όπως φαίνονται και στην παραπάνω εικόνα, τα μέρη της εργαστηριακής διάταξης είναι:

Αισθητήρες:

- ✓ Επαγωγικός αισθητήρας (No.3): Αναπτύσσεται Η/Μ πεδίο και με αυτόν τον τρόπο ο αισθητήρας μπορεί να αναγνωρίσει αν το αντικείμενο είναι μεταλλικό (μπαταρία ή άλλο μέταλλο).
- ✓ Χωρητικός αισθητήρας (No.1): Αν το αντικείμενο είναι μεταλλικό οδηγείται στον χωρητικό αισθητήρα για περεταίρω αναγνώριση. Συγκεκριμένα, αν το αντικείμενο είναι μπαταρία αναπτύσσεται τάση και ανάβει το LED.

Επισημαίνουμε ότι το LED λειτουργεί με MOSFET και θα ανάψει μόνο αν η μπαταρία είναι τοποθετημένη με τη σωστή πολικότητα. Συνεπώς, ελέγχουμε τα μεταλλικά αντικείμενα και από τις δύο πλευρές τους. Η πληροφορία που συλλέγουμε μεταφέρεται στον ελεγκτή.

- ✓ Οπτικός αισθητήρας – Φωτοκύτταρο (No.2): Το φωτοκύτταρο μπορεί μέσω της αντανάκλασης να διακρίνει δύο καταστάσεις, την ύπαρξη ή όχι αντικειμένου.

Με τη χρήση του επαγωγικού και οπτικού αισθητήρα ελαττώνουμε τις άσκοπες κινήσεις του βραχίονα.

Έμβολα:

- ✓ Ηλεκτροπνευματικό έμβολο και βαλβίδες (No.4): Στη μόνιμη κατάσταση όπου το πρώτο αντικείμενο δεν έχει ελεγχθεί και μεταφέρεται πάνω από τα υπόλοιπα αντικείμενα, το έμβολο εκτείνεται και οδηγεί το αντικείμενο μπροστά από τον οπτικό αισθητήρα και στην συνέχεια συσπειρώνεται ξανά για να ακολουθήσει την ίδια διαδικασία μετά την αναγνώριση του πρώτου αντικειμένου.
- ✓ Ηλεκτρομηχανικά έμβολα (No.5,6): Τα έμβολα αυτά δεν συνεισφέρουν στην αναγνώριση του αντικειμένου. Η λειτουργία τους είναι η επικόλληση ετικετών πριν τα αντικείμενα τοποθετηθούν στις τελικές τους θέσεις.

Αρθρωτό Ρομπότ IR52C (No.7): Εκτελεί όλες τις μετακινήσεις των αντικειμένων μεταξύ των εμβόλων, των αισθητήρων και των τελικών θέσεων τοποθέτησης των αντικειμένων. Αναλυτικότερη περιγραφή δίνεται παρακάτω στην αναφορά.

Διασύνδεση της κάρτας ελέγχου του ρομποτικού χειριστή με τα ηλεκτρικά σήματα των αισθητήρων και τα ηλεκτρικά σήματα οδήγησης των εμβόλων (No.8): Για τον προγραμματισμό του ρομποτικού βραχίονα χρησιμοποιείται ένας σταθερός υπολογιστής που διαθέτει το περιβάλλον προγραμματισμού PSI (Programming System for Industrial Robots). Στον υπολογιστή αυτό έχει προστεθεί ως εξωτερικό περιφερειακό μια κάρτα ISA για επέκταση του επεξεργαστή στο χώρο διευθυνσιοδότησης. Υπάρχουν δύο είδη καταχωρητών: οι καταχωρητές κάρτας (εγγραφή) και οι καταχωρητές ελέγχου (σύνδεση με τον ελεγκτή).

Ελεγκτής: Βρίσκεται κάτω από τον πάγκο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα και διαθέτει 8 ψηφιακές εισόδους και 8 ψηφιακές εξόδους. Επίσης υπάρχει ένας καταχωρητής για κάθε θέση και ένας επιπλέον καταχωρητής για την ανάδραση.

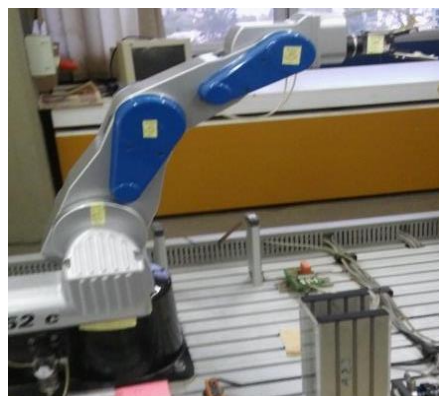
Συμπιεστής αέρα: Βρίσκεται κάτω από τον πάγκο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα και συσσωρεύει αέρα που στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την ώθηση των δοκιμών από τα έμβολα.

Κουμπιά κινδύνου (No.9): Υπάρχουν πάνω στο τραπέζι για την άμεση διακοπή κίνησης του βραχίονα όταν αυτός εκτρέπεται από τις επιτρεπόμενες κινήσεις.

Περιγραφή του ρομποτικού βραχίονα:

Ρομποτικός χειριστής IR52C:

Το ρομπότ είναι ειδικά κατασκευασμένο για εφαρμογές που απαιτούν ένα συμπαγές και ευέλικτο σύστημα χειρισμού. Αποτελείται από 5 στροφικούς άξονες και μια αρπάγη ως τελικό σημείο δράσης. Ο ελεγκτής του ρομπότ είναι προσαρμοσμένος στη βάση του. Κάθε ένας από τους 5 ανεξάρτητους άξονες περιστροφής οδηγείται από ένα servo-set point υψηλής απόδοσης και μπορεί να επιτευχθεί ανάλυση ακριβείας 415.000 βημάτων ανά άξονα περιστροφής. Ο χειριστής διαθέτει μεγάλη ελευθερία κινήσεων: το εύρος κίνησης για κάθε άξονα είναι:



- i) Άξονας 1 $\rightarrow A_1 \pm 140^\circ$
- ii) Άξονας 2 $\rightarrow A_2 \pm 86^\circ$
- iii) Άξονας 3 $\rightarrow A_3 \pm 105^\circ$
- iv) Άξονας 4 $\rightarrow A_4 \pm 100^\circ$
- v) Άξονας 5 $\rightarrow A_5 \pm 180^\circ$

Συστήματα συντεταγμένων:

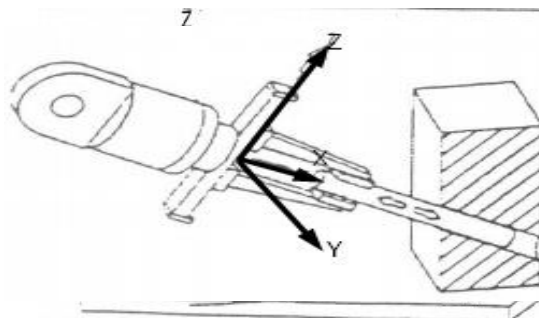
Το ρομπότ μπορεί να κινηθεί σε τρία διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων, καθένα από τα οποία έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα. Συνεπώς, με βάση την

κίνηση που θέλουμε να κάνει το ρομπότ επιλέγουμε το κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα τρία αυτά συστήματα:

✓ Σύστημα παγκόσμιων συντεταγμένων:

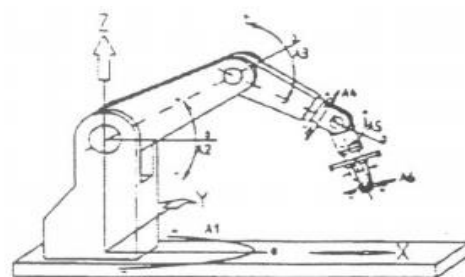
Όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα, το σύστημα παγκόσμιων συντεταγμένων ακολουθεί τα σημεία του χώρου τα οποία προσδιορίζονται από τρεις συντεταγμένες (x, y, z) . Οι συντεταγμένες βρίσκονται σε κάθετους ανά δύο άξονες οι οποίοι ορίζουν ένα ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων.

Η αρχή του συστήματος βρίσκεται στη βάση του ρομπότ, στο κέντρο του πρώτου άξονα περιστροφής A_1 . Οι αποστάσεις μετρούνται σε mm και η θετική κατεύθυνση φαίνεται στο σχήμα.



✓ Σύστημα συντεταγμένων end-effector:

Το σύστημα αυτό λειτουργεί με παρόμοια λογική με το προηγούμενο. Η μόνη διαφορά είναι ότι η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο κέντρο του εργαλείου. Έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα κατά την εκπαίδευση του ρομπότ σε κινήσεις που θα ήταν αδύνατες ή δύσκολα εκπαιδευσιμες με τη χρήση άλλων συστημάτων συντεταγμένων.



✓ Σύστημα αξονικών συντεταγμένων: Σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιούμε πρακτικά όλους τους άξονες κίνησης του ρομπότ με σκοπό να προσδιορίσουμε τη θέση του αλλά και τα σημεία του χώρου. Στο διπλανό σχήμα φαίνεται ο τρόπος αναφοράς στους άξονες καθώς και η θετική φορά κίνησης. Οι γωνίες μετρούνται σε μοίρες.

Χώρος εργασίας και Βαθμοί ελευθερίας: Το ρομπότ έχει 5 περιστροφικές αρθρώσεις και συνεπώς 5 βαθμούς ελευθερίας. Ο χώρος εργασίας του είναι το σύνολο των σημείων που μπορούν να προσεγγιστούν από το end-effector, τηρουμένων των μηχανικών και κινηματικών περιορισμών (singularities). Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει εκτός του σημείου εναπόθεσης δοκιμών στη στοίβα, άλλα 10 κρίσιμα σημεία αναφοράς, μαζί με την προβολή τους σε ένα υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας, επί παραδείγματι ίσο με το ύψος της στοίβας:

✓ Το σημείο παραλαβής δοκιμών.

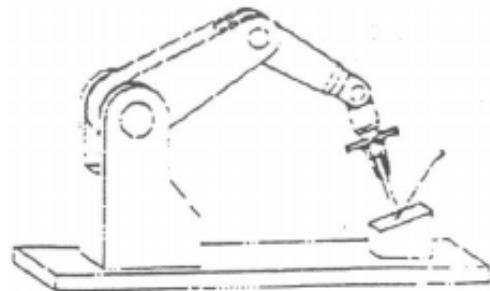
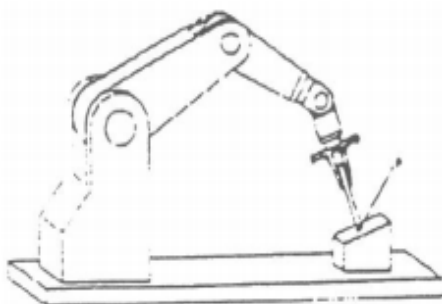
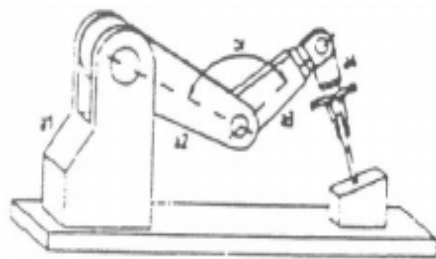
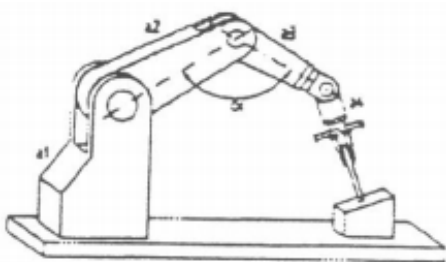
- ✓ Το σημείο ελέγχου τάσης.
- ✓ Τα 2 σημεία παραλαβής ετικέτας.
- ✓ Τα 6 σημεία της παλέτας.

Για να εκτελέσει το ρομπότ μια κίνηση είναι απαραίτητο να του δοθεί το σημείο στο οποίο πρέπει να φτάσει καθώς και το είδος κίνησης που θα εκτελέσει (π.χ. ευθύγραμμη, σε τόξο). Σημείο εκκίνησης θεωρείται το σημείο στο οποίο βρίσκεται ήδη το ρομπότ. Κατά την πρώτη κίνηση του χρειάζεται calibration για να γνωρίζει τη θέση του στον χώρο. Υπάρχουν δύο τρόποι προσδιορισμού της θέσης: Ο πρώτος είναι ο προσδιορισμός των συντεταγμένων (x, y, z) του end-effector και ο δεύτερος είναι ο προσανατολισμός του εργαλείου με βάση τις γωνίες (a, b, c). Όπως γνωρίζουμε, με επίλυση του αντίστροφου κινηματικού μοντέλου, το ρομπότ μπορεί να προσεγγίσει την ίδια θέση με διαφορετική διάταξη των αρθρώσεών του (Roll-Pitch-Yaw). Έχοντας τρεις επιλογές σε κάθε άξονα προκύπτουν $5^3 - 1$ (αφαιρούμε την περίπτωση να μένουν όλα ακίνητα) = 242 επιλογές συνολικά.

Για το ρομπότ που εξετάζουμε υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τρόποι διάταξης:

- i) ELBOW UP
- ii) ELBOW DOWN
- iii) FRONT
- iv) BACK

οι οποίοι φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα αντίστοιχα



Τροχιές κίνησης ρομποτικού βραχίονα: Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι κίνησης κατά τη διάρκεια μετάβασης του από ένα σημείο σε ένα άλλο:

- ✓ Synchro-PTP: Όλοι οι άξονες το ρομπότ κινούνται συγχρόνως προς το σημείο προορισμού και τερματίζουν ταυτόχρονα την κίνησή τους. Η κίνηση αυτή είναι βέλτιστη ως προς τον χρόνο, μεταβαίνουμε δηλαδή γρήγορα στο επιθυμητό τελικό σημείο.
- ✓ Γραμμική κίνηση: Το τελικό στοιχείο δράσης ακολουθεί μία ευθεία προς το σημείο προορισμού. Αν ο προσανατολισμός του εργαλείου διαφέρει από την αρχική προς την τελική θέση, οι παράγοντες a , b , c μεταβάλλονται γραμμικά κατά τη διάρκεια της μετακίνησης. Επιλέγουμε αυτόν τον τύπο κίνησης όταν θέλουμε ακρίβεια στη μετατόπιση.
- ✓ Κίνηση σε κύκλο: Απαιτείται ο προσδιορισμός ακόμα ενός σημείου, το οποίο μπορεί να είναι σημείο της περιφέρειας του κύκλου ή το κέντρο του κύκλου στον οποίο στον οποίο θα διαγραφεί το τόξο. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, αν ο προσανατολισμός του εργαλείου διαφέρει από την αρχική προς την τελική θέση οι παράγοντες a , b , c μεταβάλλονται γραμμικά κατά τη διάρκεια της μετακίνησης. Στην περίπτωση όμως αυτή, πρέπει να γνωρίζουμε ότι το ρομπότ θα εκτελέσει το μικρότερο τόξο και η τροχιά θα είναι τμήμα έλλειψης. Η κίνηση μεταξύ των σημείων πάνω από το επίπεδο αναφοράς γίνεται με PTP ενώ η μετάβαση στα σημεία κάτω από το επίπεδο ασφάλειας γίνεται γραμμικά.

Μπορούμε τέλος να ελέγξουμε περεταίρω τον τρόπο διάσχισης ενός μονοπατιού μέσω των ακόλουθων παραμέτρων στο PSI:

- ✓ Ταχύτητα διάσχισης
- ✓ Ταχύτητα αξόνων
- ✓ Επιτάχυνση
- ✓ Ακρίβεια μονοπατιού (καθορισμός μέγιστης απόκλισης)
- ✓ Επικαλύψεις (παράμετρος ανοχής σε παρεκκλίσεις)

Σφάλματα: Μικρά σφάλματα μπορεί να προκληθούν και οφείλονται σε:

- ✓ Σφάλματα οδήγησης PID
- ✓ Οδόντωση μειωτήρα

- ✓ Ρουλεμάν
- ✓ Μοτέρ σε κάθε άξονα
- ✓ Γήρανση μηχανημάτων

Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας:

Στόχος του πειράματος είναι όπως είπαμε η αυτόματη εκτέλεση μιας κυκλικής διαδικασίας διαλογής δοκιμίων, στα οποία περιλαμβάνονται πλαστικά και μεταλλικά δοκίμια, όπως επίσης και μπαταρίες. Η αρχική θέση των δοκιμίων είναι σε ένα δοχείο, το οποίο χρησιμοποιούμε ως στοίβα, με τις λειτουργίες μίας δομής FIFO. Υποθέτουμε πως αρχικά υπάρχουν τουλάχιστον 2 δοκίμια στο δοχείο. Στο ύψος του δεύτερου από το τέλος δοκιμίου βρίσκεται ο επαγωγικός αισθητήρας, από τον οποίο θα συλλέξουμε την πληροφορία για το αν το δοκίμιο είναι μέταλλο ή πλαστικό (προφανώς δεν μπορεί να διαχωρίσει μπαταρίες από απλά μεταλλικά δοκίμια). Το πνευματικό έμβολο στη συνέχεια εξάγει από την στοίβα το πιο χαμηλό δοκίμιο, το οποίο, αν υποθέσουμε πως είναι το πρώτο του πειράματος, θα πρέπει να ξανατοποθετηθεί στο δοχείο αφού δεν έχουμε καμία πληροφορία σχετικά με αυτό.

Το αμέσως επόμενο δοκίμιο (έχει ήδη περάσει από τον αισθητήρα) εξάγεται με τη σειρά του από τη στοίβα και παραλαμβάνεται από τον βραχίονα (αφού ο οπτικός αισθητήρας εξετάσει αν όντως υπάρχει κάποιο αντικείμενο). Αν είναι πλαστικό, ο βραχίονας το πηγαίνει για επικόλληση ετικέτας, διαφορετικά το μετακινεί προς τον έλεγχο τάσης/φορτίου. Στην 2^η περίπτωση, αν βρεθεί στα άκρα του δοκιμίου διαφορά δυναμικού είμαστε σίγουροι πως είναι μπαταρία, διαφορετικά πρέπει ο βραχίονας να περιστρέψει το δοκίμιο κατά 180° και να το επανεξετάσει. Αν τελικά δεν έχουμε μπαταρία, θα έχουμε απλό μεταλλικό δοκίμιο.

Σε κάθε περίπτωση ο βραχίονας δίνει στο δοκίμιο τη σωστή ετικέτα. Το επόμενο βήμα είναι να τοποθετήσουμε το δοκίμιο στη σωστή θέση στην παλέτα (πίνακας 2x3). Πρέπει να εξετάσουμε αν η θέση j (ανάλογα με ποιο από τα 3 πιθανά είδη δοκιμίου έχει ανιχνευθεί) της γραμμής 1 είναι κενή. Αν είναι, τότε αφήνουμε το δοκίμιο εκεί, διαφορετικά στη ίδια θέση της γραμμής 2. Τέλος, ο βραχίονας επιστρέφει στη θέση παραλαβής δοκιμίου.

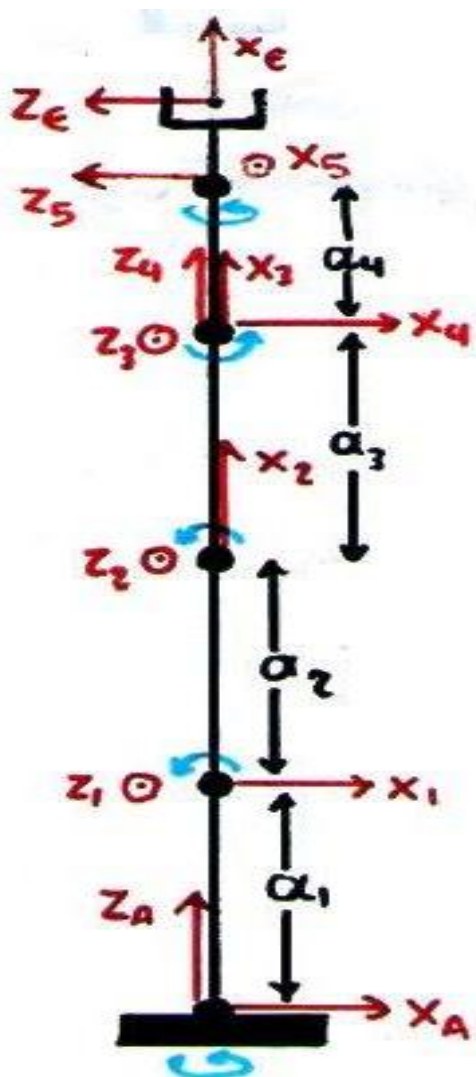
Η διαδικασία περιγράφεται διεξοδικά στη συνέχεια της αναφοράς, με διάγραμμα ροής και αντίστοιχο ψευδοκώδικα.

Δεύτερο Μέρος: Ευθεία και Αντίστροφη Κινηματική Ανάλυση

Η κινηματική ανάλυση έγκειται στην εύρεση ενός πίνακα μετάβασης από το επιλεγμένο σύστημα βάσης στο σύστημα του τελικού εργαλείου συναρτήσεων των μεταβλητών των αρθρώσεων. Στη συγκεκριμένη διάταξη, μεταβλητές είναι οι πέντε γωνίες στρέψης των αρθρώσεων.

Με βάση το παρακάτω σχήμα εξηγούμε τους επιλεγθέντες άξονες καθώς και τις τιμές που φαίνονται στον πίνακα παραμέτρων $D - H$.

$D - H$	d	θ	α	A
$A \rightarrow 1$	α_1	q_1	90°	0
$1 \rightarrow 2$	0	$q_2 + 90^\circ$	0	α_2
$2 \rightarrow 3$	0	q_3	0	α_3
$3 \rightarrow 4$	0	$q_4 - 90^\circ$	-90°	0
$4 \rightarrow 5$	α_4	$q_5 - 90^\circ$	90°	0
$5 \rightarrow E$	0	90°	0	0



Το σύστημα συντεταγμένων της βάσης (O_A) επιλέχθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα. Ο άξονας z ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής της πρώτης άρθρωσης ενώ η επιλογή του άξονα x είναι αυθαίρετη.

Η δεύτερη άρθρωση στρέφεται όπως φαίνεται στο σχήμα επομένως ο άξονας z_1 του δεύτερου πλαισίου (O_1) τοποθετείται προς τα έξω. Ο άξονας x_1 τοποθετείται στην κοινή κάθετη των αξόνων των δύο πρώτων αρθρώσεων. Για την μετάβαση από το πρώτο σύστημα στο δεύτερο απαιτείται μια μετατόπιση κατά a_1 ως προς z , μια στροφή κατά την μεταβολή της πρώτης άρθρωσης q_1 ως προς z και μια στροφή κατά 90° ως προς x .

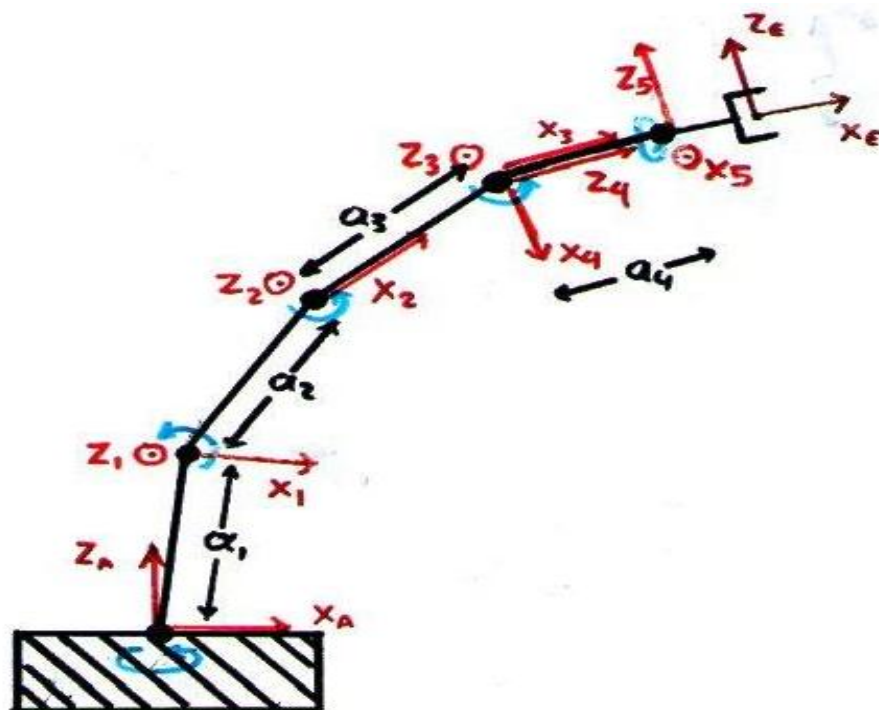
Στο επόμενο πλαίσιο ο άξονας z τοποθετείται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο ενώ ο άξονας x προς τα πάνω μιας και η κοινή κάθετη της δεύτερης και της τρίτης άρθρωσης είναι η ευθεία που τις ενώνει. Έτσι η μετάβαση από το δεύτερο σύστημα στο τρίτο απαιτεί μια στροφή κατά $q_2 + 90^\circ$ και μια μετατόπιση κατά a_2 ως προς το x .

Το τέταρτο σύστημα (O_3) ταυτίζεται με το προηγούμενο και βρίσκεται πάνω στην τέταρτη άρθρωση. Η τοποθέτηση των αξόνων είναι ακριβώς

ίδιας λογικής με την προηγούμενη τοποθέτηση ενώ η μετάβαση από το τρίτο στο τέταρτο ακολουθεί ακριβώς τα ίδια βήματα εκτός της στροφής κατά 90° ως προς z , αφού ο άξονας x βρίσκεται ήδη στη σωστή διεύθυνση.

Το επόμενο σύστημα αξόνων (O_4) συμπίπτει στο προηγούμενο μιας και η κοινή κάθετη περνάει από την τέταρτη άρθρωση. Ο άξονας z έχει κατεύθυνση προς τα πάνω αφού έτσι στρέφεται η πέμπτη άρθρωση. Για την μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο απαιτούνται δύο στροφές -90° και ως προς τους δύο άξονες z και x καθώς και στροφή κατά q_4 ως προς z για να συμπεριληφθεί η στροφή της τέταρτης άρθρωσης.

Για να μεταβούμε στο εργαλείο του οποίου το τελικό σύστημα (O_E) φαίνεται στο σχήμα δεν αρκούν δύο στροφές και δύο μετατοπίσεις. Έτσι δημιουργούμε ένα ακόμη πλαίσιο (O_5) όπως φαίνεται στο σχήμα το οποίο έχει τον άξονα του z στην ίδια κατεύθυνση με το τελικό στοιχείο και τον άξονα x όπως επιτάσσει ο κανόνας του DH στην κοινή κάθετη μεταξύ του άξονα της πέμπτης άρθρωσης και του τελικού z . Να αναφέρουμε εδώ ότι η αρχή των πλαισίων O_5 και O_E ταυτίζεται (όπως και η τελευταία άρθρωση με το end-effector) αλλά σχεδιάστηκαν ξεχωριστά για οπτικούς λόγους. Τέλος, από το πέμπτο στο τελευταίο πλαίσιο το z παραμένει ίδιο, ενώ το x μπορεί να τοποθετηθεί ελεύθερα προς τα έξω ή ομόρροπα της σύνδεσης οπότε και επιλέγεται όπως επιβάλλει το end-effector.



Εν συνεχεία, μπορούμε από τον παραπάνω πίνακα παραμέτρων να μεταβούμε στις μήτρες μετασχηματισμών ώστε να πάρουμε την τελική κινηματική σχέση. Οι πίνακες αυτοί, σύμφωνα με την θεωρία, θα είναι:

$$A_1^A = Tra(z, \alpha_1) \cdot Rot(z, q_1) \cdot Rot(x, 90^\circ) \cdot Tra(x, l_1)$$

$$A_2^1 = Rot(z, q_2 + 90^\circ) \cdot Tra(x, a_2)$$

$$A_3^2 = Rot(z, q_3) \cdot Tra(x, a_3)$$

$$A_4^3 = Rot(z, q_4 - 90^\circ) \cdot Rot(x, -90^\circ)$$

$$A_5^4 = Tra(z, \alpha_4) \cdot Rot(z, q_5 - 90^\circ) \cdot Rot(x, 90^\circ)$$

$$A_\varepsilon^5 = Rot(z, 90^\circ)$$

Εφαρμόζοντας το τυπολόγιο προκύπτουν οι τελικοί πίνακες:

$$A_1^A = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} -\sin q_2 & -\cos q_2 & 0 & -a_2 \sin q_2 \\ \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & a_2 \cos q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & a_3 \cos q_3 \\ \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & a_3 \sin q_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} \sin q_4 & 0 & \cos q_4 & 0 \\ -\cos q_4 & 0 & \sin q_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \sin q_5 & 0 & -\cos q_5 & 0 \\ -\cos q_5 & 0 & -\sin q_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_E^5 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Η εκτέλεση του παραπάνω πολλαπλασιασμού μητρών μετασχηματισμού πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του Matlab. Ο αντίστοιχος κώδικας παρατίθεται στο τέλος της αναφοράς. Ο τελικός πίνακας για την κινηματική ανάλυση θα είναι:

$$A_1^A \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \cdot A_4^3 \cdot A_5^4 \cdot A_E^5 = A_E^A =$$

$$= \begin{bmatrix} -c_1 s_{234} & -c_5 s_1 - c_1 s_5 c_{234} & s_1 s_5 - c_5 c_1 c_{234} & -c_1(a_2 s_2 + a_3 s_{23} + a_4 s_{234}) \\ -s_1 s_{234} & c_1 c_5 - s_1 s_5 c_{234} & -c_1 s_5 - c_5 s_1 c_{234} & -s_1(a_2 s_2 + a_3 s_{23} + a_4 s_{234}) \\ c_{234} & -s_5 s_{234} & -c_5 s_{234} & a_1 + a_2 c_2 + a_3 c_{23} + a_4 c_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Όπου χρησιμοποιήθηκαν οι συντμήσεις: $c_i = \cos q_i, s_i = \sin q_i, c_{ij} = \cos(q_i + q_j), s_{ij} = \sin(q_i + q_j)$ και $c_{ijk} = \cos(q_i + q_j + q_k), s_{ijk} = \sin(q_i + q_j + q_k)$.

Αντίστροφη Κινηματική Περιγραφή και Ανάλυση

Από τον τελικό πίνακα της κινηματικής ανάλυσης συνάγουμε ότι η θέση στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων προκύπτει από τη σχέση:

$$p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_1(a_2 s_2 + a_3 s_{23} + a_4 s_{234}) \\ -s_1(a_2 s_2 + a_3 s_{23} + a_4 s_{234}) \\ a_1 + a_2 c_2 + a_3 c_{23} + a_4 c_{234} \end{bmatrix}$$

Παρατηρήσεις:

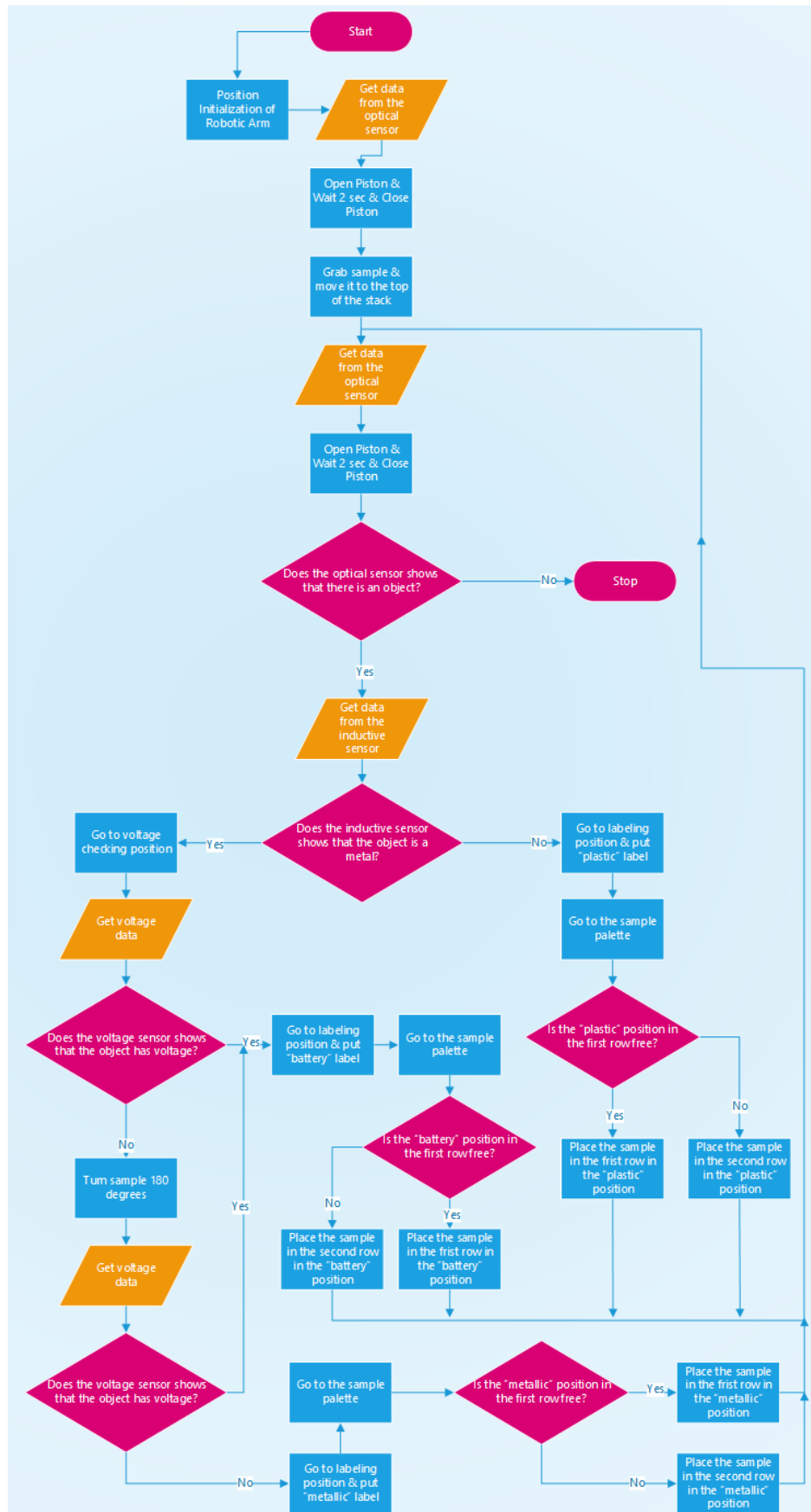
- ✓ Μόνο το x και το y έχουν εξάρτηση από την γωνία q_1 της πρώτης άρθρωσης. Αυτό είναι λογικό μιας και η άρθρωση αυτή στρέφεται κατά τον άξονα z οπότε δε προκαλεί μεταβολή στο ύψος του εργαλείου.
- ✓ Παρατηρούμε ότι μια άρθρωση επηρεάζει κάθε επόμενη της. Αυτό σημαίνει ότι μια αλλαγή στη γωνία της δεύτερης άρθρωσης θα επιφέρει αλλαγές στη γωνία τόσο της τρίτης όσο και της τέταρτης άρθρωσης (αναφορικά με το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων).
- ✓ Η πέμπτη άρθρωση δεν επηρεάζει τη θέση στο παγκόσμιο σύστημα. Πράγματι, η τελευταία άρθρωση περιστρέφεται αλλάζοντας μόνο τον προσανατολισμό του εργαλείου και όχι τη θέση του στο χώρο.

Το ζητούμενο της αντίστροφης κινηματικής ανάλυσης είναι η εύρεση κάθε μεταβλητής μιας άρθρωσης ως συνάρτηση των θέσεων p_x, p_y, p_z έτσι ώστε αν ζητηθεί μια επιθυμητή θέση στο χώρο να γνωρίζουμε επακριβώς τις τιμές των μεταβλητών που πρέπει να δοθούν στις αρθρώσεις για να καταλήξουμε εκεί.

Ένα τέτοιο πρόβλημα έχει συχνά περισσότερες από μια λύσεις. Στη συγκεκριμένη διάταξη, ο βραχίονας δύναται να μεταβεί σε επιθυμητή θέση με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή, οι τρόποι αυτοί είναι οι Front – ElbowUp, Front – ElbowDown, Back – ElbowUp, Back – ElbowDown, όπου το ElbowDown επιτυγχάνεται για $q_3 > 0$ και το ElbowUp για $q_3 < 0$. Η ακριβής και αναλυτική επίλυση του συστήματος είναι σε κάθε περίπτωση πολύπλοκη και παραλείπεται.

Τρίτο Μέρος: Διάγραμμα Ροής

Η πειραματική διαδικασία, όπως περιγράφηκε στην εισαγωγή, μοντελοποιείται από το παρακάτω διάγραμμα:



Τέταρτο Μέρος: Ψευδοκώδικας Πειραματικής Διαδικασίας

Θα επιχειρήσουμε να περιγράψουμε λεπτομερώς τη λειτουργία του ρομπότ με το σύνολο των παραμέτρων της μέσω ψευδοκώδικα. Για τον ορισμό του ψευδοκώδικα απαιτείται πρώτα ο ορισμός ορισμένων σημείων του end-effector στο workspace του βραχίονα. Επίσης είναι χρήσιμος ο ορισμός μεταβλητών και εντολών για την κίνησή του. Έχουμε λοιπόν:

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΘΕΣΕΙΣ:

- **NullPosition:** Η θέση του end-effector (ED) μετά το καλιμπράρισμα.
- **StackPos:** Η θέση του ED ακριβώς πάνω από την στοίβα των αντικειμένων.
- **NewObjPos_U:** Η θέση του ED πάνω από το σημείο παραλαβής νέου αντικειμένου από την στοίβα. Η θέση αυτή βρίσκεται σε ένα ύψος ασφαλείας, λίγο μεγαλύτερο από το ύψος της στοίβας.
- **NewObjPos_D:** Η θέση ακριβώς πάνω από το νέο αντικείμενο. Με το κλείσιμο της αρπάγης παραλαμβάνεται το αντικείμενο.

Στις επόμενες σταθερές που ορίζονται θα ακολουθήσουμε την εξής σύμβαση: Για τις μεταβλητές τύπου **X_U** θα ορίζουμε τη θέση σε ένα z ύψος, ούτως ώστε να είναι ψηλότερη από το πιο ψηλό εμπόδιο της περιοχής. Για τις μεταβλητές τύπου **X_D** η θέση θα προκύπτει από την **X_U** με μια line μετατόπιση του ED κατά τον z άξονα προς το τραπέζι:

- **Voltage_U:** Θέση για τον έλεγχο τάσης αντικειμένων πάνω.
- **Voltage_D:** Θέση για τον έλεγχο τάσης αντικειμένων κάτω.
- **Voltage180_D:** Ομοίως για 180 μοίρες περιστροφή (αντίθετη πολικότητα).
- **LabelM_U:** Θέση για τοποθέτηση ταμπέλας μεταλλικού αντικειμένου πάνω.
- **LabelM_D:** Αντίστοιχα για κάτω.
- **LabelP_U:** Θέση για τοποθέτηση ταμπέλας πλαστικού αντικειμένου πάνω.
- **LabelP_D:** Αντίστοιχα για κάτω.

Ορίζουμε τέλος τις 2x3 θέσεις της παλέτας ως:

Pos_D(1,1) / Pos_U(1,1)	Pos_D(1,2) / Pos_U(1,2)	Pos_D(1,3) / Pos_U(1,3)
Pos_D(2,1) / Pos_U(2,1)	Pos_D(2,2) / Pos_U(2,2)	Pos_D(2,3) / Pos_U(2,3)

Συμβατικά θεωρούμε ότι στην πρώτη στήλη τοποθετούμε τις μπαταρίες, στην δεύτερη τα μέταλλα χωρίς τάση και στην τρίτη τα πλαστικά. Επίσης θεωρούμε ότι όλες οι θέσεις στην αρχή είναι αρχικοποιημένες στο 0 (άδειες).

METABΛΗΤΕΣ:

- **MetalNext**: ουρά 2 στοιχείων για αποθήκευση των τιμών του επαγωγικού αισθητήρα
- **Pallet[2,3]**: πίνακας αρχικοποιημένος σε 0. Αν $Pallet[y,x] = 1$ τότε η θέση (x,y) είναι κατειλημμένη.
- **IsBattery**: 1είναι μπαταρία, 0 είναι απλό μέταλλο

ΕΝΤΟΛΕΣ:

- **Status(Front/Back, ElbowUp/ElbowDown)**: για την περιγραφή του βραχίονα
 - **Wait(time)**: χρόνος αναμονής σε sec
 - **Read(InductionSensor/OpticalSensor/VoltageSensor)** Συνάρτηση που επιστρέφει 1 για θετική ανάγνωση και 0 αλλιώς
 - **Label(M/P)**: Ανάθεση ετικέτας για μεταλλικό ή πλαστικό
 - **MetalNext.Push(x)**: Ωθεί στην ουρά την τιμή x
 - **MetalNext.Pop()**: Βγάζει από την ουρά
 - **PTP(dest)**: Point-to-Point κίνηση προς dest
 - **LINE(dest)**: Γραμμική κίνηση προς dest
- Παρακάτω παρουσιάζεται ο ψευδοκώδικας:

```
Function Bring_Next() {  
    Piston_Push  
    Wait(1)  
    Piston_Pull  
}
```

```
Function Fetch_New_Obj() {  
    PTP(NewObjPos_U)  
    Status(Front,ElbowUp)    // Status after movement  
    Open grip                // If opened do nothing  
    LINE(NewObjPos_D)  
    Close grip  
    LINE(NewObjPos_U)  
}
```

```
Function Plastic() {  
    PTP(LabelP_U)  
    Status(Back,ElbowDown)  
    LINE(LabelP_D)  
    Label(p)  
    LINE(LabelP_U)
```

```

if (Pallet[1,3] == 0) {
    PTP(Pos_U(1,3))
    LINE(Pos_D(1,3))
    Open Grip
    LINE(Pos_U(1,3))
}
else if (Pallet[2,3] == 0) {
    PTP(Pos_U(2,3))
    LINE(Pos_D(2,3))
    Open Grip
    LINE(Pos_U(2,3))
}
else END
}

Function Metal() {
    PTP(Voltage_U)
    Status(Front,ElbowUp)
    LINE(Voltage_D)
    if (Read(VoltageSensor) == 1) {
        IsBattery=1
    }
    else {
        LINE(Voltage_U)
        LINE(Voltage180_D)
        if (Read(VoltageSensor) == 1) {
            IsBattery=1
        } else {
            IsBattery=0
        }
    }
}

// Continue as generic metal
LINE(Voltage_U)
PTP(LabelM_U)
LINE(LabelM_D)
Label(m)
LINE(LabelM_U)

// Place to pallet

```



```

if (IsBattery == 1) {
    if (Pallet[1,1] == 0) {
        PTP(Pos_U(1,1))
        LINE(Pos_D(1,1))
        Open Grip
        LINE(Pos_U(1,1))
    }
    else if (Pallet[2,1] == 0) {
        PTP(Pos_U(2,1))
        LINE(Pos_D(2,1))
        Open Grip
        LINE(Pos_U(2,1))
    }
    else END
} else {
    if (Pallet[1,2] == 0) {
        PTP(Pos_U(1,2))
        LINE(Pos_D(1,2))
        Open Grip
        LINE(Pos_U(1,2))
    }
    else if (Pallet[2,2] == 0) {
        PTP(Pos_U(2,2))
        LINE(Pos_D(2,2))
        Open Grip
        LINE(Pos_U(2,2))
    }
    else END
}
}

```

```

Main_Program {
    PTP(NullPosition)
    MetalNext.Push(Read(InductionSensor))
    Bring_Next()
    if (Read(OpticalSensor) == 0) end

    Fetch_New_Obj() // gets a new object

    PTP(StackPos)
    Open grip

```

```
//The first object just entered back in the stack.
```

```
MetalNext.Push(Read(InductionSensor))
```

```
Bring_Next()
```

```
while (Read(OpticalSensor) == 1) {
```

```
    Fetch_New_Obj()
```

```
    if (MetalNext.Pop() == 0) Plastic()
```

```
    else Metal()
```

```
    PTP(NullPosition)
```

```
    Bring_Next()
```

```
}
```

```
}
```

Παράρτημα: Κώδικας Matlab για υπολογισμό τελικού πίνακα κινηματικής

```
% We initialize the tranformation matrices

theta = sym('q1');
a1 = sym('a1');

AA1 = [cos(theta), 0, sin(theta), 0
       sin(theta), 0, -cos(theta), 0
       0,          1,          0, a1
       0,          0,          0, 1 ]

theta = sym('q2');
a2 = sym('a2');

A12 = [-sin(theta), -cos(theta), 0, -a2.*sin(theta)
       cos(theta),  -sin(theta), 0,  a2.*cos(theta)
       0,          0, 1, 0
       0,          0, 0, 1 ]

theta = sym('q3');
a3 = sym('a3');

A23 = [cos(theta), -sin(theta), 0, a3.*cos(theta)
       sin(theta), cos(theta), 0, a3.*sin(theta)
       0,          0, 1, 0
       0,          0, 0, 1 ]

theta = sym('q4');

A34 = [sin(theta), 0, cos(theta), 0
       -cos(theta), 0, sin(theta), 0
       0,          -1, 0, 0
       0,          0, 0, 1 ]

theta = sym('q5');
a4 = sym('a4');

A45 = [sin(theta), 0, -cos(theta), 0
       -cos(theta), 0, -sin(theta), 0
       0,          1, 0, a4
       0,          0, 0, 1 ]

A5E = [0, -1, 0, 0
       1, 0, 0, 0
       0, 0, 1, 0
       0, 0, 0, 1 ]

% The final tranformation matrix is the result of the
multiplication of the above matrices

Afinal = A01*A12*A23*A34*A45*A5E;
Afinal = simplify(Afinal);
```