



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δ.Π.Μ.Σ. Συστήματα Αυτοματισμού

Κατεύθυνση Β:

Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου και Ρομποτικής

Μεταπτυχιακό Μάθημα:

Εργαστήριο Ρομποτικής

Ομάδα 4

Πρώτη Εργαστηριακή Άσκηση

Ρομποτικό Κύτταρο

Μέλη Ομάδας – Α.Μ.:

Ειρήνη – Μαρία Γεωργαντά – 02121201

Γεώργιος Κασσαβετάκης – 02121203

Γεώργιος Κρομμύδας – 02121208

Φραντζιέσκα Μιχαήλ – 02121216

ΑΘΗΝΑ

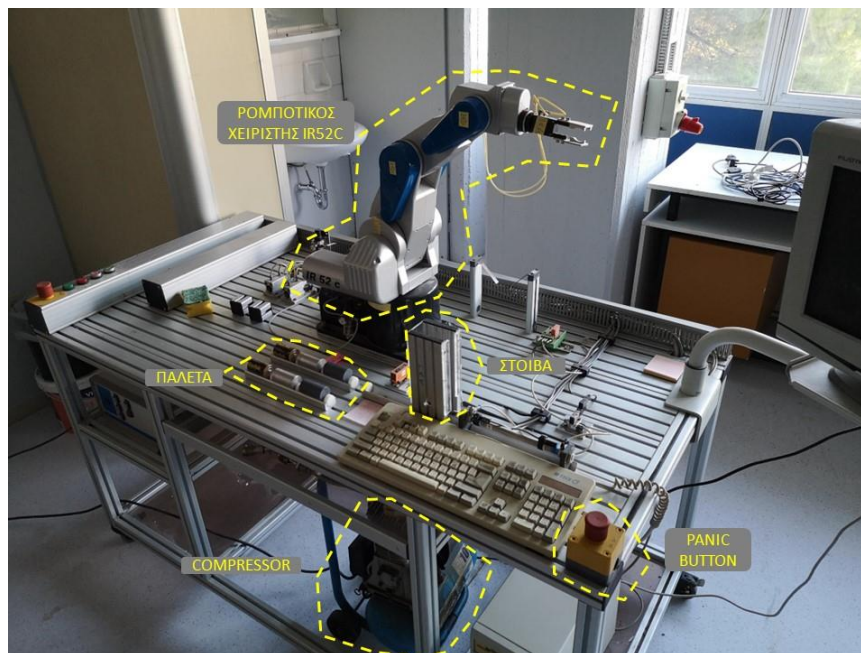
2023

Πίνακας περιεχομένων

1. Περιγραφή του Πειράματος	3
1.1 Στόχος Πειράματος	3
1.2 Επιμέρους μηχανισμοί.....	4
1.3 Περιγραφή του Βραχίονα	5
1.4 Περιγραφή Ορθής και Ανάστροφης Κινηματικής.....	7
1.5. Ευθύ Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικού Χειριστή Με D-H.....	9
2. Περιγραφή Διαδικασίας Προγραμματισμού	11
2.1. Ψευδοκώδικας Διαδικασίας.....	15
Βιβλιογραφία	19

1. Περιγραφή του Πειράματος

Στην Πρώτη Εργαστηριακή Άσκηση έγινε μελέτη της λειτουργίας και του προγραμματισμού ενός ρομποτικού κυττάρου. Στα πλαίσια του παραπάνω πειράματος, έγινε προγραμματισμός της διαδικασίας μέσω της χρήσης του περιβάλλοντος PSI και επιδείχθηκε ο τρόπος προγραμματισμού ενός ρομποτικού βραχίονα σε συνδυασμό με εισόδους και εξόδους από επιπλέον αισθητήρες και επενεργητές.



Εικόνα 1: Ρομποτικό Κύτταρο.

1.1 Στόχος Πειράματος

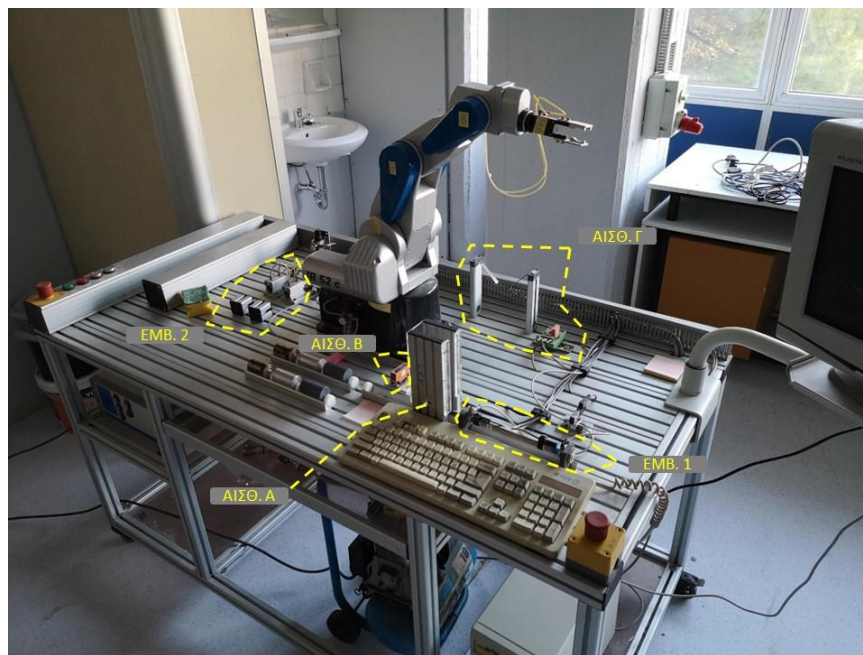
Στόχος του πειράματος αποτελεί ο προγραμματισμός της αυτοματοποιημένης διαδικασίας διαχωρισμού δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα, κατά το πείραμα θα προγραμματιστεί το ρομποτικό κύτταρο ώστε να μπορεί να ταξινομήσει 6 αντικείμενα διαφορετικών υλικών (πλαστικά, μεταλλικά αφόρτιστα, μεταλλικά φορτισμένα) με την χρήση αισθητήρων, να τους τοποθετήσει την κατάλληλη ετικέτα ανάλογα με το υλικό και να τα τοποθετήσει στις αντίστοιχες θέσεις της παλέτας του κυττάρου.

Η παλέτα του κυττάρου αποτελείται από 6 θέσεις, όπως αυτές φαίνονται στην Εικόνα 1. Οι δύο δεξιές θέσεις αναφέρονται σε πλαστικά αντικείμενα, ενώ οι δύο κεντρικές και οι δύο αριστερά σε μεταλλικά αφόρτιστα και φορτισμένα αντικείμενα αντίστοιχα. Το είδος των αντικειμένων διαθέτει και χρωματικό κώδικα, ώστε το αποτέλεσμα του πειράματος να μπορεί εύκολα να επιβεβαιωθεί.

Με βάση τα παραπάνω, το πείραμα ξεκινάει με τα 6 αντικείμενα τοποθετημένα στην στοίβα της *Εικόνας 1* και αποσκοπεί στην τοποθέτηση των αντικειμένων στην παλέτα του κυττάρου στην κατάλληλη θέση.

1.2 Επιμέρους μηχανισμοί

Το ρομποτικό κύτταρο αποτελείται από το ρομποτικό βραχίονα και κάποιους επιμέρους μηχανισμούς. Οι επιμέρους μηχανισμοί του εξεταζόμενου κυττάρου αποτελούνται από αισθητήρες και ηλεκτροπνευματικά έμβολα.



Εικόνα 2: Επιμέρους μηχανισμοί Κυττάρου.

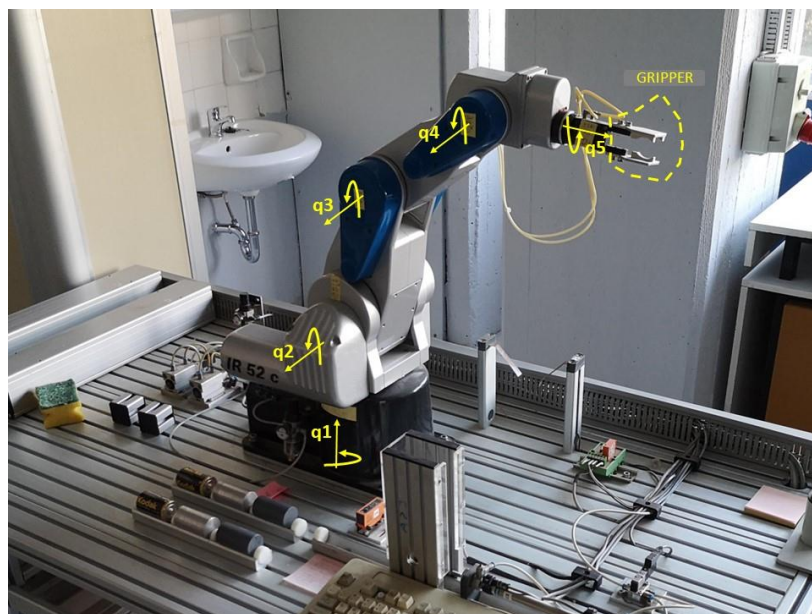
Στην κατηγορία των αισθητήρων, η διάταξη διαθέτει τρεις αισθητήρες τοποθετημένους όπως αυτού παρουσιάζονται στην *Εικόνα 2*. Ο Αισθητήρας Α είναι ένας Επαγωγικός Αισθητήρας, ο οποίος μπορεί να εντοπίσει την ύπαρξη ή όχι ενός μεταλλικού αντικείμενου, ανεξάρτητα αν αυτό είναι φορτισμένο ή όχι. Σημαντικό για την σωστή αξιοποίηση του είναι η θέση του στο δεύτερο αντικείμενο της στοίβας, κάτι το οποίο πρέπει να παρθεί υπόψιν κατά την σχεδίαση της διαδικασίας. Ο Αισθητήρας Β είναι ένας Οπτικός Αισθητήρας, ο οποίος μπορεί να ανιχνεύσει την ύπαρξη ή όχι ενός αντικείμενου στην θέση όπου αυτός είναι τοποθετημένος. Έτσι, ο αισθητήρας αυτός ανιχνεύει το τέλος της διαδικασίας και μπορεί επιπλέον να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό σφαλμάτων. Τέλος, ο Αισθητήρας Γ είναι ένας Χωρητικός Αισθητήρας, ο οποίος μπορεί να εντοπίσει αν ένα αντικείμενο είναι φορτισμένο ή όχι. Σημαντικό για την σωστή αξιοποίηση του

αισθητήρα αυτού είναι ότι ο αισθητήρας είναι μίας πολικότητας, κάτι το οποίο πρέπει να παρθεί επίσης υπόψιν κατά την σχεδίαση της διαδικασίας.

Στην κατηγορία των ηλεκτροπνευματικών εμβόλων, η διάταξη διαθέτει 2 έμβολα τοποθετημένα όπως αυτά παρουσιάζονται στην *Εικόνα 2*. Το Έμβολο 1 είναι τοποθετημένο στην βάση της στοίβας αντικειμένων και χρησιμοποιείται για την εξώθηση του αντικειμένου βάσης της στοίβας στην θέση την οποία βλέπει ο οπτικός αισθητήρας. Τα Έμβολα τύπου 2 είναι τοποθετημένο όπως αυτά εμφανίζονται στην *Εικόνα 2* και χρησιμοποιούνται για να τοποθετήσουν μία ετικέτα ανάλογα με το υλικό. Τα έμβολα αυτά είναι δύο στο πλήθος, ένα για κάθε είδος αντικειμένου.

1.3 Περιγραφή του Βραχίονα

Κέντρο του κυττάρου αποτελεί ο ρομποτικός βραχίονας *IR52C*. Ο 5 βαθμών ελευθερίας βραχίονας αυτός αποτελείται από 5 περιστροφικές αρθρώσεις οι οποίες ελέγχονται από σερβοκινητήρες υψηλής επίδοσης σε συνδυασμό με αυξητικούς κωδικοποιητές. Επιπλέον, ο βραχίονας μπορεί να χρησιμοποιήσει ως τελικό στοιχείο δράσης τα εργαλεία που αναφέρονται στο πρότυπο *standardized tool flange DIN ISO*. Στην συγκεκριμένη διάταξη, ο ρομποτικός βραχίονας έχει προσαρμοσμένη επάνω του μία πνευματική αρπάγη όπως αυτή εμφανίζεται στην *Εικόνα 3*.

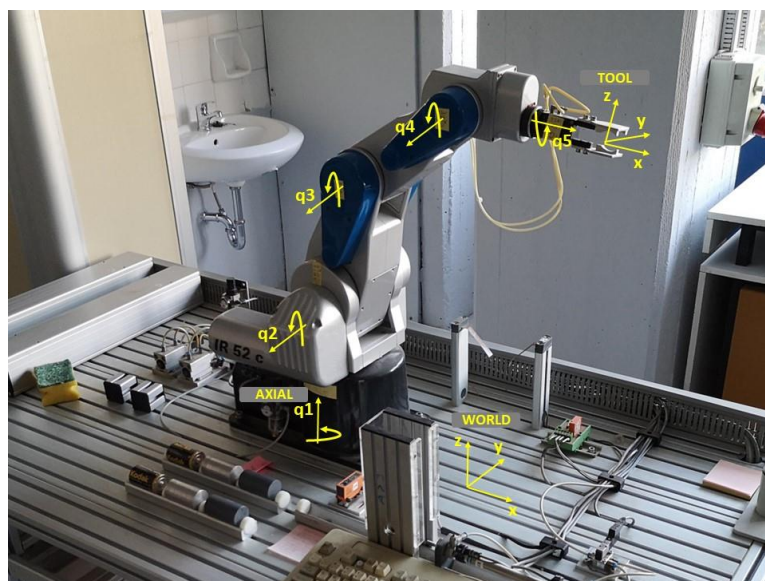


Εικόνα 3: Ρομποτικός Βραχίονας IR52C και κατευθύνσεις περιστροφής.

Ο ρομποτικός χειριστής της διάταξης χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευελιξία και κινητικότητα. Οι σερβοκινητήρες που διαθέτει συνδυαζόμενοι με του κωδικοποιητές του επιτυγχάνουν ακρίβεια ανάλυσης των 415.000 βημάτων ανά περιστροφή, ενώ οι

τερματικοί διακόπτες του επιτρέπουν την κίνηση από 200 έως 400 μοίρες. Επιπλέον, ο ελεγκτής PID ο οποίος βρίσκεται στην βάση του χειριστή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε αποκλειστικά για τον έλεγχο των 5 αξόνων του ρομπότ είτε για τον συνδυαστικό έλεγχο και των αρθρώσεων και 2 εξωτερικών αξόνων (όπως γραμμικό σιδηρόδρομο επέκτασης χώρου εργασίας).

Για τον προγραμματισμό του βραχίονα χρησιμοποιούνται τρία συστήματα συντεταγμένων όπως αυτά εμφανίζονται στην *Εικόνα 4*, το παγκόσμιο (*world*), το αξονικό (*axial*) και αυτό του εργαλείου (*tool*). Πιο συγκεκριμένα, με την χρήση του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων, μπορεί να προσδιοριστεί η αρχή του πλαισίου του εργαλείου ως σημείο (x,y,z) . Επιπλέον, είναι εφικτή η μετακίνηση του εργαλείου κατά τους άξονες αυτού του συστήματος, το οποίο κάνει ιδιαίτερα εύκολη την εκμάθηση θέσεων που είναι παράλληλες ή κάθετες στον χώρο εργασίας. Σε όμοια φιλοσοφία, με την χρήση του συστήματος συντεταγμένων του εργαλείου μπορεί να προσδιοριστεί μία μετακίνηση του πλαισίου του εργαλείου σε μία κατεύθυνση του πλαισίου του εργαλείου. Το σύστημα συντεταγμένων αυτό επιτρέπει την εύκολη εκμάθηση θέσεων και μετακινήσεων οι οποίες θα δυσκόλευαν ιδιαίτερα σε άλλα συστήματα, όπως την περίπτωση που ο άξονας x του εργαλείου κατευθύνεται υπό γωνία στον χώρο εργασίας. Στην περίπτωση του εργαστηρίου δεν μπορεί να επιτευχθεί η κίνηση κατά τον άξονα y του εργαλείου. Τέλος, με την χρήση του συστήματος αξονικών συντεταγμένων μπορεί να γίνει εκμάθηση και ρύθμιση κάθε γωνίας άρθρωσης μεμονωμένα. Η έκφραση κινήσεων στο σύστημα αυτό επιτρέπει την ρύθμιση θέσεων με τρόπο ανεξάρτητο από τον χώρο εργασίας και την παρούσα θέση εργαλείου.



Εικόνα 4: Άξονες Συντεταγμένων.

Πέρα από τα παραπάνω συστήματα μπορεί να γίνει ρύθμιση του προσανατολισμού του εργαλείου. Η ρύθμιση αυτή γίνεται ορίζοντας τις γωνίες *roll*, *pitch*, *yaw* εκφρασμένες σε μοίρες.

Η σχεδίαση τροχιάς του ρομποτικού βραχίονα μπορεί να γίνει μέσω τριών διαφορετικών τρόπων, *Point-to-Point*, *Line* και *Arc*. Κάθε μέθοδος διαθέτει προτερήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τις ανάγκες της κίνησης. Η σχεδίαση τροχιάς μέσω *Point-to-Point* δέχεται δύο σημεία (x,y,z) και εκτελεί την αντίστροφη κινηματική για το αρχικό και το τελικό σημείο που δίνεται. Έτσι, γίνεται ταυτόχρονη μετάβαση των γωνιών των αξόνων q_1 έως q_5 από το αποτέλεσμα του αντίστροφου κινηματικού για το αρχικό σημείο μέχρι το αποτέλεσμα του αντίστροφου κινηματικού για το τελικό σημείο. Η μέθοδος σχεδίασης τροχιάς αυτή είναι χαμηλού υπολογιστικού κόστους. Όμως, η μέθοδος αυτή είναι απρόβλεπτη ως προς την κίνηση του άκρου και όλου του βραχίονα στον χώρο εργασίας κάνοντας την ακατάλληλη σε περίπτωση που υπάρχει κάποιο εμπόδιο κοντά στα αρχικά και τελικά σημεία. Η σχεδίαση τροχιάς μέσω *Line* δέχεται δύο σημεία (x,y,z) , εντοπίζει το ευθύγραμμο τμήμα που τα ενώνει. Στην συνέχεια διαχωρίζει το ευθύγραμμο τμήμα αυτό σε πολλά μικρά τμήματα και εκτελεί το αντίστροφο κινηματικό σε κάθε άκρο αυτών των τμημάτων. Με τον τρόπο αυτόν, το τελικό στοιχείο δράσης εκτελεί μία ευθεία γραμμή στον χώρο εργασίας. Η μέθοδος σχεδίασης τροχιάς αυτή έχει υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα και κόστος ως μειονέκτημα. Όμως, το γεγονός ότι η κίνηση στον χώρο εργασίας είναι εύκολα αντιληπτή κάνει την μέθοδο σχεδίασης αυτή ιδιαίτερα χρήσιμη στην κίνηση όταν υπάρχουν εμπόδια που θα μπορούσαν να αποτελέσουν πρόβλημα στην κίνηση *Point-to-Point*. Τέλος, η σχεδίαση τροχιάς τύπου *Arc* επιτρέπει την κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης σε μία τροχιά κυκλικού τόξου. Η κίνηση αυτή δεν χρησιμοποιείται στο πείραμα και παρουσιάζεται για λόγους πληρότητας.

1.4 Περιγραφή Ορθής και Ανάστροφης Κινηματικής

Το πρόβλημα της ορθής κινηματικής ενός ρομποτικού βραχίονα είναι ο καθορισμός της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού στοιχείου δράσης δεδομένων των γωνιών των περιστροφικών και των μηκών των πρισματικών αρθρώσεων. Το πρόβλημα αυτό συνήθως επιλύεται με την τοποθέτηση των κατάλληλων πλαισίων και της εύρεσης των ομογενών μετασχηματισμών ανάμεσα σε δύο διαδοχικά πλαίσια. Η τοποθέτηση αυτή συνήθως ακολουθεί μία σύμβαση τοποθέτησης, όπως αυτή των Denavit-Hartenberg (DH).

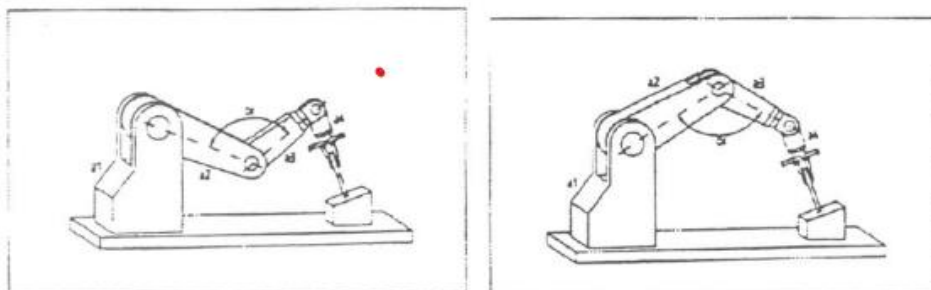
Το πρόβλημα της ευθείας κινηματικής προσφέρει μία απεικόνιση του χώρου των αρθρώσεων στην θέση και τον προσανατολισμό του πλαισίου του εργαλείου. Λόγω της μορφής αυτής του προβλήματος, η διαδικασία εύρεσης αυτής της θέσης και του προσανατολισμού για δοσμένες γωνίες αρθρώσεων προσφέρει μοναδική λύση.

Αντίθετα, το πρόβλημα της ανάστροφης κινηματικής είναι ο καθορισμός των γωνιών των περιστροφικών αρθρώσεων και των μηκών των πρισματικών αρθρώσεων που απαιτούνται για την επίτευξη μιας επιθυμητής θέσης και προσανατολισμού του τελικού στοιχείου δράσης. Το παραπάνω πρόβλημα ανάγεται όμοια με την ορθή κινηματική στην εύρεση μίας απεικόνισης της θέσης και του προσανατολισμού του πλαισίου του εργαλείου στον χώρο των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα.

Το πρόβλημα της ανάστροφης κινηματικής μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές όπως γεωμετρικές μεθόδους, αλγεβρικές μεθόδους ή αριθμητικές μεθόδους όπως η μέθοδος Jacobian ή η μέθοδος Newton-Raphson. Αυτές οι μέθοδοι λύνουν επαναληπτικά τις γωνίες άρθρωσης που απαιτούνται για την επίτευξη της επιθυμητής θέσης και προσανατολισμού του τελικού στοιχείου δράσης.

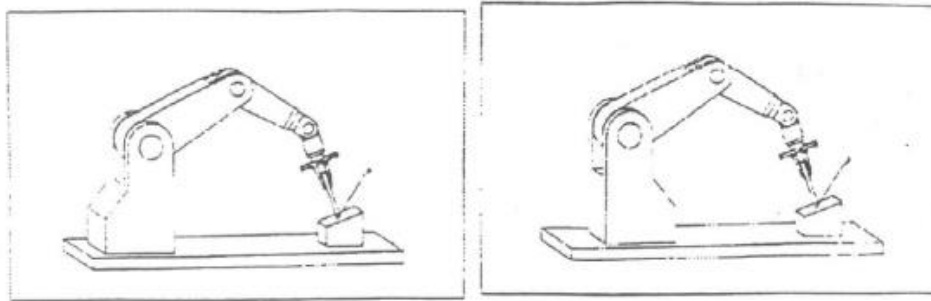
Κατά την επίλυση του ανάστροφου κινηματικού προβλήματος είναι πιθανό να βρεθούν περισσότερες από μια αποδεκτές λύσεις ή να μην βρεθούν καθόλου λύσεις. Στην περίπτωση του ρομποτικού χειριστή IR52C, οι λύσεις στο εσωτερικό του χώρου εργασίας μπορούν να διαθέτουν τέσσερις λύσεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την θέση του 'αγκώνα' (*Elbow Up* και *Elbow Down*) και την θέση του 'ώμου' (*Front* και *Back*).

Όπως υποδηλώνει και το όνομα τους οι θέσεις του αγκώνα είναι αμοιβαία αποκλειόμενες και προσδιορίζουν αν η προσέγγιση που θα επιχειρήσει ο ρομποτικός βραχίονας προς το σημείο προορισμού θα γίνει με τον αγκώνα να κοιτάει προς τα κάτω ή προς τα πάνω. Η κίνηση αυτή εμφανίζεται στην *Εικόνα 5*.



Εικόνα 5: Κίνηση αγκώνας προς τα κάτω και αγκώνας προς τα πάνω.

Αντίστοιχα, οι θέσεις του ώμου είναι αμοιβαία αποκλειόμενες και προσδιορίζουν αν η προσέγγιση που θα επιχειρήσει ο ρομποτικός βραχίονας προς το σημείο προορισμού θα γίνει βλέποντας τον χώρο εργασίας μπροστά ή πίσω του σε σχέση με την αρχική του κατάσταση. Η κίνηση αυτή εμφανίζεται στην *Εικόνα 6*.



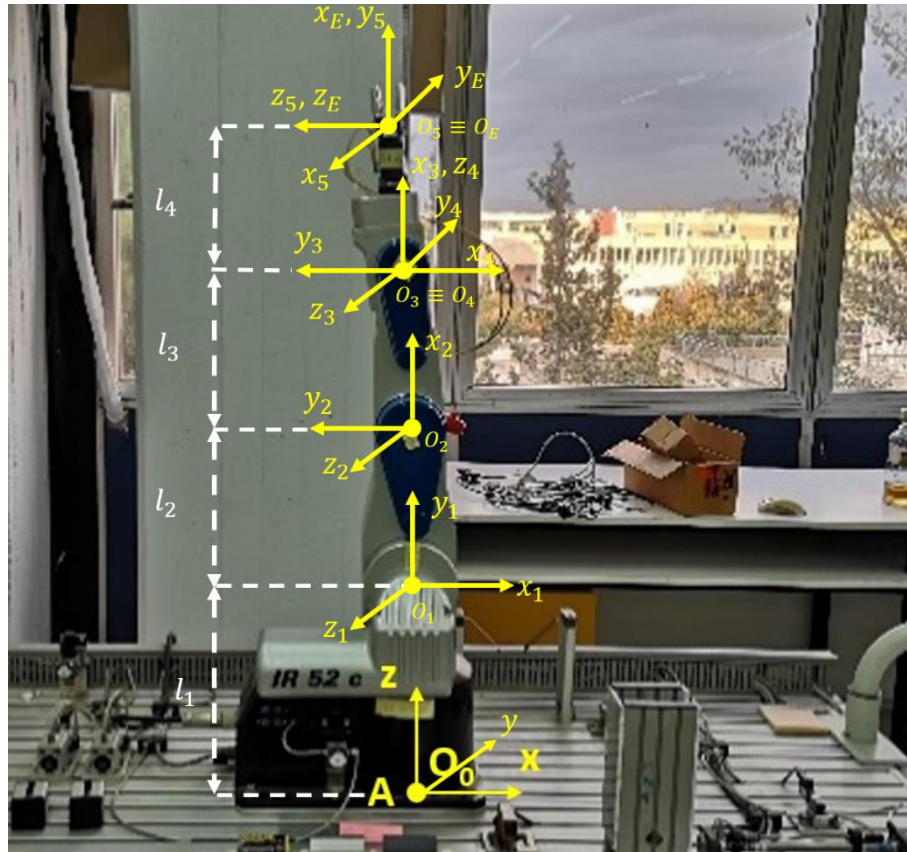
Εικόνα 6: Κίνηση προς τα εμπρός και προς τα πίσω.

1.5. Ευθύ Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικού Χειριστή Με D-H

Για την λύση του ευθύ κινηματικού μοντέλου θα χρησιμοποιηθεί η σύμβαση των Denavit-Hartenberg (DH). Η τοποθέτηση των πλαισίων σύμφωνα με την σύμβαση εμφανίζεται στην *Εικόνα 7*, ενώ οι παράμετροι εμφανίζονται στην *Πίνακα 1* που ακολουθεί. Τα αναφερόμενα στον Πίνακα μήκη και γωνίες παρουσιάζονται στην *Εικόνα 7*.

Πίνακας Παραμέτρων D-H Ρομποτικού Χειριστή IR52C				
Σύνδεσμος i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$+90^\circ$	l_1	q_1
2	l_2	0	0	$q_2 + 90^\circ$
3	l_3	0	0	q_3
4	0	-90°	0	$q_4 - 90^\circ$
5	0	90°	l_4	$q_5 - 90^\circ$
E	0	0	0	$+90^\circ$

Πίνακας 1: Παράμετροι D-H.



Εικόνα 7: Πλαίσια Ευθείας Κινηματική Ανάλυσης Ρομποτικού Βραχίονα.

Με βάση τον πίνακα των παραμέτρων D-H προκύπτουν οι διαδοχικοί μετασχηματισμοί του κάθε πλαισίου με το επόμενο, οι οποίοι ακολουθούν τις σχέσεις:

$$1) A_1^0 = Rot(z, q_1) * Tra(z, l_1) * Rot(x, 90^\circ) = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$2) A_2^1 = Rot(z, q_2 + 90^\circ) * Tra(x, l_2) = \begin{bmatrix} -s_2 & -c_2 & 0 & -l_2 s_2 \\ c_2 & -s_2 & 0 & l_2 c_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$3) A_3^2 = Rot(z, q_3) * Tra(x, l_3) = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_3 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & l_3 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$4) A_4^3 = Rot(z, q_4 - 90^\circ) * Rot(x, -90^\circ) = \begin{bmatrix} s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ -c_4 & 0 & s_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$5) A_5^4 = Rot(z, q_5 - 90^\circ) * Tra(z, l_4) * Rot(x, 90^\circ) = \begin{bmatrix} s_5 & 0 & -c_5 & 0 \\ -c_5 & 0 & -s_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$6) A_E^5 = Rot(z, 90^\circ) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση ανάμεσα στους παραπάνω διαδοχικούς μετασχηματισμούς $A_E^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 A_E^4$ προκύπτει ο ομογενής μετασχηματισμός του πλαισίου του εργαλείου Ε συναρτήσει του πλαισίου 0 (βλ. Εικόνα 7) ως:

$$A_E^0 = \begin{bmatrix} -c_1 s_{234} & -s_1 c_5 - c_1 s_5 c_{234} & s_1 s_5 - c_1 c_5 c_{234} & -c_1 (l_2 s_2 + l_3 s_{23} + l_4 s_{234}) \\ -s_1 s_{234} & c_1 c_5 - s_1 s_5 c_{234} & -c_1 s_5 - s_1 c_5 c_{234} & -s_1 (l_2 s_2 + l_3 s_{23} + l_4 s_{234}) \\ c_{234} & -s_5 s_{234} & -c_5 s_{234} & l_1 + l_2 c_2 + l_3 c_{23} + l_4 c_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ο μετασχηματισμός αυτός μας προσφέρει τον πίνακα στροφής R_E^0 και την θέση p_E^0 , ο τα οποία εκφράζουν τον προσανατολισμό και την θέση του εργαλείου αντίστοιχα ως προς το πλαίσιο της βάσης. Πιο συγκεκριμένα, προκύπτουν ως λύση της ευθείας κινηματικής ανάλυσης ο πίνακας στροφής και το διάνυσμα θέσης που εκφράζονται παρακάτω:

$$R_E^0 = \begin{bmatrix} -c_1 s_{234} & -s_1 c_5 - c_1 s_5 c_{234} & s_1 s_5 - c_1 c_5 c_{234} \\ -s_1 s_{234} & c_1 c_5 - s_1 s_5 c_{234} & -c_1 s_5 - s_1 c_5 c_{234} \\ c_{234} & -s_5 s_{234} & -c_5 s_{234} \end{bmatrix}$$

$$p_E^0 = \begin{bmatrix} -c_1 (l_2 s_2 + l_3 s_{23} + l_4 s_{234}) \\ -s_1 (l_2 s_2 + l_3 s_{23} + l_4 s_{234}) \\ l_1 + l_2 c_2 + l_3 c_{23} + l_4 c_{234} \end{bmatrix}$$

2. Περιγραφή Διαδικασίας Προγραμματισμού

Ο προγραμματισμός της διαδικασίας γίνεται με βάση τα παραπάνω στοιχεία του ρομποτικού κυττάρου. Πρώτο βήμα για τον προγραμματισμό της διεργασίας είναι ο προσδιορισμός των χρήσιμων του θέσεων του ρομποτικού βραχίονα για την αποθήκευσή τους. Μετά τον προσδιορισμό των βασικών θέσεων, ως δεύτερο βήμα είναι απαραίτητη η επέκτασή τους για την αντιμετώπιση προβλημάτων του κυττάρου που αφορούν τους αισθητήρες. Τέλος, με γνωστές θέσεις πλέον χρειάζεται το βήμα της σχεδίασης τροχιάς ανάμεσα στις θέσεις και ο ορισμός της ενεργοποίησης των επενεργητών. Η επιλογή ανάμεσα σε *Line* και *Point-to-Point* γίνεται ανάλογα με τα εμπόδια που βρίσκονται κοντά στον βραχίονα.

Για τον προσδιορισμό των θέσεων, αρχικά αναγνωρίζονται τα σημεία παραλαβής αντικειμένου από την στοίβα . Πιο συγκεκριμένα, γίνεται ο προσδιορισμός μίας θέσης Σ01 ως η θέση αναφοράς. Στην συνέχεια, καθώς ο ρομποτικός βραχίονας πρέπει να μπορεί να πιάνει το αντικείμενο που βγαίνει από την στοίβα αποθηκεύονται δύο θέσεις, η μία ακριβώς μπροστά στην θέση του οπτικού αισθητήρα και το αντικείμενου που ωθεί το έμβολο στην βάση της στοίβας και μία επάνω από αυτήν σε μεγαλύτερο ύψος. Έπειτα, αποθηκεύονται δύο θέσεις Σ2 και Σ3, με την Σ3 ακριβώς μπροστά στην θέση του οπτικού αισθητήρα και το αντικείμενου που ωθεί το έμβολο στην βάση της στοίβας και την Σ2 επάνω από αυτήν σε μεγαλύτερο ύψος. Για την αποθήκευση της Σ2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύστημα αναφοράς των αρθρώσεων ενώ για την αποθήκευση της Σ3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων ή αυτό του εργαλείου καθώς η Σ2 και η Σ3 βρίσκονται επάνω σε μία ευθεία κάθετη στο επίπεδο της βάσης.

Η δεύτερη φάση αναγνώρισης σημείων αφορά τα σημεία ελέγχου στον χωρητικό αισθητήρα. Έτσι, με την χρήση του συστήματος αναφοράς των αρθρώσεων γίνεται ο προσδιορισμός της θέσης Σ5, η οποία βρίσκεται επάνω από τον χωρητικό αισθητήρα. Στην συνέχεια, γίνεται ο προσδιορισμός της θέσης Σ6α η οποία αφορά το εσωτερικό του αισθητήρα. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με την χρήση του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων ή του εργαλείου.

Η τρίτη φάση αναγνώρισης σημείων αφορά τα σημεία τοποθέτησης ετικέτας. Έτσι, με την χρήση του συστήματος αναφοράς των αρθρώσεων γίνεται ο προσδιορισμός της θέσης Σ7, η οποία βρίσκεται επάνω από τα δύο έμβολα. Στην συνέχεια, γίνεται ο προσδιορισμός της θέσης Σ8α η οποία αφορά το έμβολο που αντιστοιχεί στα πλαστικά δοκίμια και της θέσης Σ8β η οποία αφορά το έμβολο που αντιστοιχεί στα μεταλλικά δοκίμια. Ο προσδιορισμός των Σ8α και Σ8β γίνεται με την χρήση του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων ή του εργαλείου.

Η τέταρτη και τελευταία φάση αναγνώρισης σημείων αφορά τα σημεία εναπόθεσης δοκιμίων στην παλέτα. Με την χρήση του συστήματος αναφοράς των αρθρώσεων γίνεται ο προσδιορισμός της θέσης Σ9, Σ11 και Σ13, οι οποίες βρίσκεται επάνω από τις 3 θέσεις της παλέτας για πλαστικά, αφόρτιστα μεταλλικά και φορτισμένα μεταλλικά δοκίμια. Στην συνέχεια, γίνεται ο προσδιορισμός της κάθε θέσης της παλέτας ξεχωριστά, με την χρήση του παγκόσμιου συστήματος ή του συστήματος αναφοράς του εργαλείου.

Ο προσδιορισμός των παραπάνω σημείων όμως δεν επαρκεί για την επίτευξη του στόχου. Κάτι τέτοιο συμβαίνει λόγω των προβλημάτων που αφορούν την θέση του επαγωγικού αισθητήρα, την μονή πολικότητα του χωρητικού αισθητήρα. Πιο συγκεκριμένα, ο

επαγωγικός αισθητήρας είναι τοποθετημένος σε σημείο όπου ανιχνεύει το δεύτερο δοκίμιο της στοίβας, κάτι που σημαίνει ότι το σύστημα δεν διαθέτει όλη την απαραίτητη πληροφορία για το πρώτο δοκίμιο που εξωθείται από την στοίβα. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εισαγωγή ενός σημείου Σ4 ακριβώς επάνω από την στοίβα. Έτσι, στην αρχή της διαδικασίας ο βραχίονας εναποθέτει ξανά το πρώτο δοκίμιο στην στοίβα και συνεχίζει με το αρχικά δεύτερο δοκίμιο, για το οποίο έχει όμως πληροφορία από τον επαγωγικό αισθητήρα. Αντίστοιχο πρόβλημα προκύπτει από την μονή πολικότητα του χωρητικού αισθητήρα, καθώς μπορεί ένα φορτισμένο δοκίμιο να τοποθετηθεί με την ανάστροφη πολικότητα στον αισθητήρα και αυτός να μην αναγνωρίσει την ύπαρξη φορτίου. Και αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί εισάγοντας ένα σημείο Σ6β, το οποίο είναι όμοιο με το Σ6α με την διαφορά ότι το πλαίσιο του εργαλείου έχει περιστρέφει κατά 180° , τοποθετώντας το δοκίμιο και με την αντίθετη πολικότητα στον αισθητήρα.

Τελευταίο βήμα για τον προγραμματισμό της διαδικασίας είναι η επιλογή τύπου τροχιάς σε κάθε επιμέρους μετακίνηση. Πιο αναλυτικά, η επιλογή αυτή πρέπει να γίνει με γνώμονα το υπολογιστικό κόστος και την μετακίνηση στον χώρο εργασίας. Έτσι, σε κάθε μετακίνηση η οποία μπορεί να γίνει με *Point-to-Point* θα επιλεγεί αυτή η μέθοδος. Η επιλογή *Line* θα γίνεται στα σημεία στα οποία ο βραχίονας βρίσκεται κοντά σε εμπόδιο που η κίνηση *Line* μπορεί να αποφύγει.

Οι παραπάνω θέσεις συνοψίζονται στον *Πίνακα 1*, ενώ τα χρησιμοποιούμενα σήματα εισόδου από αισθητήρες και σήματα εξόδου προς επενεργητές παρουσιάζονται στον *Πίνακα 2*.

Σημεία	Επεξήγηση
Σ01	Αρχική θέση Ρομπότ
Σ02	Θέση <u>Επάνω</u> από τον Οπτικό Αισθητήρα
Σ03	Θέση <u>Μπροστά</u> από τον Οπτικό Αισθητήρα
Σ04	Θέση <u>Επάνω</u> από την Στοίβα
Σ05	Θέση <u>Επάνω</u> από τον Χωρητικό Αισθητήρα
Σ06α	Θέση <u>Εντός</u> Χωρητικού Αισθητήρα
Σ06β	(α) με ορθός (β) με ανάστροφος προσανατολισμό
Σ07	Θέση <u>Επάνω</u> από Έμβολα Ετικετών
Σ08α	Θέση <u>Εντός</u> Εμβόλων Ετικέτας
Σ08β	(α) για πλαστικά (β) για μεταλλικά δοκίμια

Σ09	Θέση <u>Επάνω</u> από Παλέτα Πλαστικών δοκιμίων
Σ10α Σ01β	Θέση <u>Εντός</u> Παλέτα Πλαστικών (α) θέση Α (β) Θέση Β
Σ11	Θέση <u>Επάνω</u> από Παλέτα Μεταλλικών Αφόρτιστων δοκιμίων
Σ12α Σ12β	Θέση <u>Εντός</u> Παλέτα Μεταλλικών Αφόρτιστων (α) θέση Α (β) Θέση Β
Σ13	Θέση <u>Επάνω</u> από Παλέτα Μεταλλικών Φορτισμένων δοκιμίων
Σ14α Σ14β	Θέση <u>Εντός</u> Παλέτα Μεταλλικών Φορτισμένων (α) θέση Α (β) Θέση Β

Πίνακας 2: Χρησιμοποιούμενες Θέσεις Ρομποτικού Χειριστή.

Σήματα Εισόδου/Εξόδου	Επεξήγηση
I01	Σήμα <u>Εισόδου</u> από τον Οπτικό Αισθητήρα
I02	Σήμα <u>Εισόδου</u> από τον Επαγωγικό Αισθητήρα
I03	Σήμα <u>Εισόδου</u> από τον Χωρητικό Αισθητήρα
Q01	Σήμα <u>Εξόδου</u> στο Έμβολο της Στοιβάς
Q02α Q02β	Σήμα <u>Εξόδου</u> στα Έμβολα ετικέτας (α) για πλαστικά (β) για μεταλλικά δοκίμια
Q03	Σήμα <u>Εξόδου</u> προς το Τελικό Στοιχείο Δράσης (Gripper)

Πίνακας 3: Σήματα Εισόδου και εξόδου Κυττάρου.

2.1. Ψευδοκώδικας Διαδικασίας

Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία σε ψευδοκώδικα στα Αγγλικά. Για παρουσίαση της μεθόδου θα χρησιμοποιηθούν οι εντολές *Move Line Pi* και *Move Point-to-Point Pi*, οι οποίες παρουσιάζουν την εντολή κίνησης τροχιάς τύπου *Line* ή *Point-to-Point* με αρχικό σημείο αυτό που βρίσκεται ο βραχίονας και τελικό σημείο το *Pi*. Επιπλέον, για μία ενιαία και κατανοητή παρουσίαση ορίζονται οι συναρτήσεις *place_object()* και *Label()*.

Συνάρτηση Διαδικασίας *place_object*

```
function place_object(item, counter)
  if (counter is 0) then //Plastic Item
    index = α
  elseif (counter is 1) ) then //Metal Item
    index = β
  else
    Move Point-to-Point Σ02
    Move Line Σ04
    Open_Gripper()
    Close_Gripper()
    Move Line Σ02
    return //Ends the function
  end_if
  if (item is 'Metal_Charged') then
    Move Point-to-Point Σ13
    Move Line Σ14[index]
    Open_Gripper()
    Move Line Σ13
  elseif (item is 'Metal_Not_Charged') then
    Move Point-to-Point Σ11
    Move Line Σ12[index]
    Open_Gripper()
    Move Line Σ11
  elseif (item is 'Plastic') then
    Move Point-to-Point Σ09
    Move Line Σ10[index]
    Open_Gripper()
    Move Line Σ09
  end_if
  Close_Gripper()
  Move Point-to-Point Σ02
  counter = counter + 1
end_function
```

Τόσο στις συναρτήσεις που παρουσιάζονται όσο και στον κεντρικό αλγόριθμο, στην περίπτωση θέσεων βραχίονα που αλλάζουν με τον δείκτη α και β (θέσεις Σ06, Σ08, Σ10, Σ12, Σ14), γίνεται χρήση του συμβολισμού Σi[index], όπου το index παίρνει τις τιμές α και β , δίνοντας την δυνατότητα εναλλαγής των σημείων με επαναληπτικό τρόπο.

Σημαντικό για την κατανόηση του ψευδοκώδικα είναι και η χρήση σχόλιων, τα οποία ακολουθούν την σύνταξη που χρησιμοποιείται και στην γλώσσα C.

Συνάρτηση Διαδικασίας Label
<pre> function Label(item_type) Move Point-to-Point Σ01 if (item_type is FALSE) then //Plastic Item index = α elseif (item_type is TRUE)) then //Metal Item index = β end_if Move Point-to-Point Σ07 Move Line Σ08[index] if (item_type is FALSE) then //Plastic Item Plastic_Piston_Actuation(1sec)//Make TRUE for 1 Seconds and then FALSE elseif (item_type is TRUE)) then //Metal Item Metal_Piston_Actuation(1sec)//Make TRUE for 1 Seconds and then FALSE end_if Move Line Σ07 end_function </pre>

Για παρόμοιο λόγο χρησιμοποιούνται και οι συναρτήσεις *Open_Gripper()*, *Close_Gripper()*, *Plastic_Piston_Actuation(t)*, *Metal_Piston_Actuation(t)* και *Stack_Piston_Actuation(t)*. Πιο αναλυτικά, οι συναρτήσεις *Open_Gripper()*, *Close_Gripper()* αντιστοιχούν στην μεταβολή της εξόδου Q03 (έξοδος προς βαλβίδα αρπάγης) σε *TRUE* και *FALSE* αντίστοιχα, ενώ οι τρεις τελευταίες συναρτήσεις (*Plastic_Piston_Actuation(t)*, *Metal_Piston_Actuation(t)* και *Stack_Piston_Actuation(t)*) αναφέρονται στην μεταβολή σε *TRUE* των εξόδων Q02a, Q02b, Q01, την αναμονή χρόνου t δευτερολέπτων και την επιστροφή των εξόδων αυτών στην τιμή *FALSE*.

Παρακάτω ακολουθεί ο αλγόριθμος της διαδικασίας, στον οποίον αξιοποιούνται όλες οι παραπάνω συναρτήσεις.

Αλγόριθμος Διαδικασίας

Initial Conditions:

1. Robot's Position is Σ01

2. Q01 = FALSE, Q02 α = FALSE, Q02 β = FALSE, Q03 = FALSE

3. Counter_1 = 0, Counter_2 = 0, Counter_3 = 0

/**** /**

/* START OF PROCESS */

Move Point-to-Point Σ02

Variable_1 = I02 //Read The Sensor on I02 and store it's value

Open_Gripper()

Stack_Piston_Actuation(3sec)//Make TRUE for 3 Seconds and then FALSE

if (I01 is TRUE) then

/*The Stack gave the first item*/

Variable_2 = I02 //Read The Sensor on I02 and store it's value

Move Line Σ03

Close_Gripper()

Move Line Σ02

Move Line Σ04

Open_Gripper()

Move Line Σ02

Stack_Piston_Actuation(3sec)//Make TRUE for 3 Seconds and then FALSE

end_if

/* The Robot's Position is Σ02*/

do

Move Line Σ03

Close_Gripper()

Move Line Σ02

if (Variable_1 is TRUE) then

/*The Item is a Metallic Item*/

m_item = 0

Move Point-to-Point Σ05

for i in { α , β } do

Move Line Σ06[i]

Variable_3 = I03 //Read The Sensor on I03 and store it's value

Move Line Σ05

if (Variable_3 is TRUE) then

m_item = 1

Label(Variable_1)

place_object('Metal_Charged',Counter_1)

break // The process goes out of the for loop

end_if

end_for

```
        if (m_item is 0) then
            Label(Variable_1)
            place_object('Metal_Not_Charged',Counter_2)
        end_if
    else
        Label(Variable_1)
        place_object('Plastic',Counter_3)
    end_if
    Move Point-to-Point Σ02
    Variable_1 = Variable_2 // Load on Variable_1 the past measurement of I02
    Variable_2 = I02 //Read The Sensor on I02 and store it's value
    Open_Gripper()
    Stack_Piston_Actuation(3sec)//Make TRUE for 3 Seconds and then FALSE
    while (I01 is TRUE) //If the Optic Sensor Sees object Repeat the do-while statement

/* EMPTY STACK */
Close_Gripper()
Move Point-to-Point Σ01
/* END OF PROCESS */
```

Βιβλιογραφία

- [1] PSI Programming system for industrial robots – Software Manual, EurobTec.
- [2] IR52C Robot manual, EurobTec.
- [3] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, *Robotics: Modeling, Planning and Control*, Springer, 2009.