ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ 1: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ
[ΡΟΗ Σ] 7^{ο} ΕΞΑΜΗΝΟ 2019-2020

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: Γ2
ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ: Τετάρτη 4/12 16.00-17.30

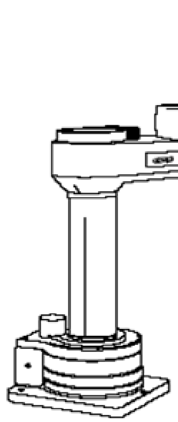
Ασημάκη Γεωργία-Γρηγορία, Α.Μ.:03116197
Γιαννιός Γεώργιος-Ταξιάρχης, Α.Μ.:03116156
Κρανιάς Δημήτριος, Α.Μ.:03116030
Ντόκου Μυρσίνη, Α.Μ.:03116179
Χατζηαντωνίου Παυλίνα Α.Μ.:03116186

3^{η} Εργαστηριακή Άσκηση

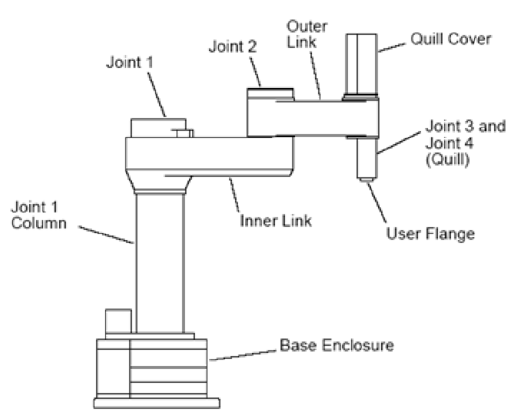
Εισαγωγή:

Σκοπός της εργαστηριακής άσκησης είναι η εξοικείωση με τη βασική μέθοδο "εν λειτουργίας" (on-line) προγραμματισμού (ή αλλιώς "διδασκαλίας") του ρομπότ με χρήση χειριστηρίου τύπου "Teach Pendant" (Manual Control Pendant – MCP). Θα χρησιμοποιηθεί ένα ρομπότ τύπου Adept (AdeptOne). Η κινηματική δομή του ρομπότ αυτού είναι επίπεδη (τύπου Scara), και είναι κατάλληλη για εργασίες τύπου "λήψη-και-εναπόθεση" (pick-and-place). Εξοικειωθήκαμε αρχικά με τις βασικές λειτουργίες του χειριστηρίου διδασκαλίας MCP και στη συνέχεια εκτελέσαμε τον προγραμματισμό μιας εργασίας τύπου pick-and-place. Τέλος, ζητήθηκε η σύνθεση όλων των βασικών λειτουργιών του χειριστηρίου, με σκοπό τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου προγράμματος ρομποτικής εργασίας χειρισμού.

Η διάταξη του ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας αρθρωτός βιομηχανικός βραχίονας (εικ. a) της Adept , τύπου Scara. Διαθέτει 4 αρθρώσεις, 3 περιστροφικές (περιστροφή γύρω απ’ τον άξονα των z) καθώς και μία πρισματική άρθρωση (εικ. b).



(a)



(b)

Ο βραχίονας κινείται με τη βοήθεια κινητήρων (περιστροφικές αρθρώσεις, πρισματική άρθρωση) και πεπιεσμένου αέρα (δαγκάνα), ελέγχεται από χειριστήριο, και μπορεί να κινηθεί σε δύο διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων: σε καρτεσιανό (xyz), του οποίου η αρχή των αξόνων βρίσκεται στη βάση του βραχίονα, καθώς και σε δικό του τοπικό σύστημα συντεταγμένων, στην περίπτωση αυτή ελέγχουμε την γωνία περιστροφής κάθε άρθρωσης. Επιπλέον, ο βραχίονας διαθέτει δυνατότητες προγραμματισμού (γλώσσα προγραμματισμού V), καθώς και παρεμβολής, ενώ δεν διαθέτει αισθητήρες (πρόκειται για σχετικά παλαιό μοντέλο).

Καταστάσεις ρομπότ

Ο βραχίονας έχει τη δυνατότητα να κινείται με βάση διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων. Για κάθε σύστημα που έχουμε επιλέξει, λέμε ότι ο βραχίονας βρίσκεται σε μία συγκεκριμένη καταστάση (state) κίνησης–χειρισμού. Όταν ο βραχίονας βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο state, κινείται με βάση το σύστημα συντεταγμένων το οποίο έχει επιλεγεί τη στιγμή εκείνη. Υπάρχουν 4 καταστάσεις, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

- **World state**
  Όταν έχει επιλεγεί η συγκεκριμένη κατάσταση, ο βραχίονας κινείται με βάση το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων, τα X, Y, Z του χειριστηρίου αναφέρονται σε αυτό το σύστημα. Το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων για ένα ρομπότ Scara έχει την αρχή των αξόνων στη βάση του βραχίονα, και οι κατευθύνσεις των αξόνων είναι όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Εάν επιλεγεί «X1», πατώντας το «+» θα μετακινήσει το ρομποτικό βραχίονα προς τη θετική κατεύθυνση του X-άξονα και προς την αρνητική αντίστοιχα αν πατήσουμε το «-» . Όμοια ισχύει και για τα υπόλοιπα κουμπιά των οποίων η λειτουργία παρουσιάζεται εν συντομία στο παρακάτω σχήμα.

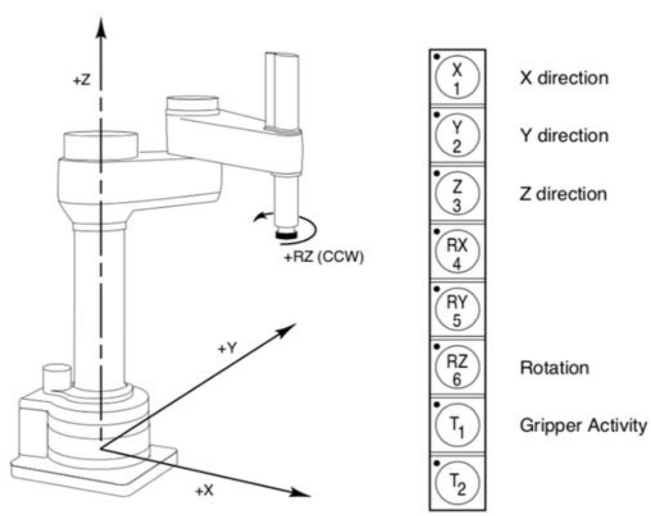


Figure 4-4. WORLD State (SCARA)

- **Tool state**
  Όταν έχει επιλεγεί η συγκεκριμένη κατάσταση, το ρομπότ κινείται με βάση ένα σύστημα συντεταγμένων, το οποίο είναι εγκατεστημένο στην δαγκάνα του, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το σύστημα αυτό είναι κεντραρισμένο στο βραχίονα του ρομπότ με τον Z-άξονα να

κατευθύνεται προς τα έξω. Περιγράφονται παρακάτω εν συντομία οι λειτουργίες των πλήκτρων στην κατάσταση αυτή. Συνήθως, η κατάσταση αυτή χρησιμοποιείται όταν για την εκτέλεση εργασιών που βασίζονται στην δαγκάνα, όπως για παράδειγμα λεπτομερή χειρισμό αντικειμένων, όπου χρειάζεται ένα σύστημα που να έχει οπτική από τη θέση της δαγκάνας.

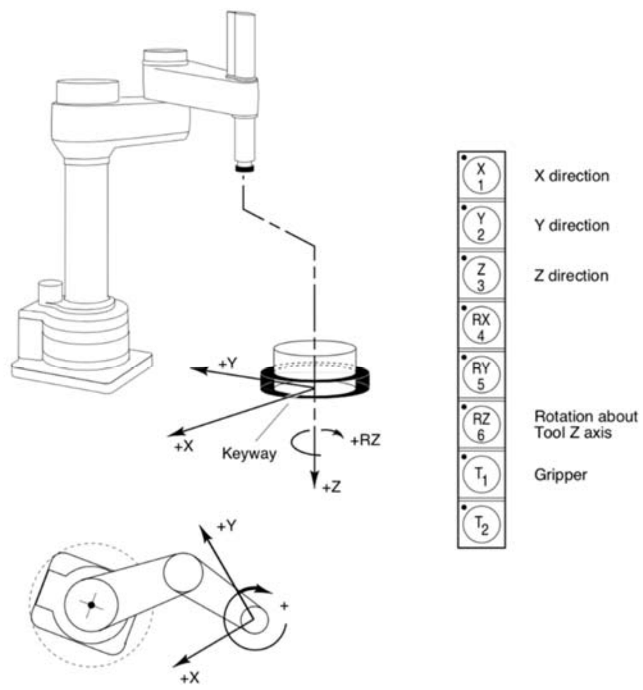


Figure 4-6. TOOL State

- **Joint state**
  Όταν έχει επιλεγεί η συγκεκριμένη κατάσταση, ο βραχίονας ελέγχεται με βάση τις αρθρώσεις του. Συγκεκριμένα, ο χειριστής επιλέγει κάποια απ’ τις αρθρώσεις που είδαμε παραπάνω, δηλαδή στο συγκεκριμένο μοντέλο 3 περιστροφικές και μία πρισματική, και την κινεί. Οι αρθρώσεις και η λειτουργία των πλήκτρων στην κατάσταση αυτή φαίνονται αναλυτικότερα στο παρακάτω σχήμα. Καθώς διαφορετικοί τύποι κινηματικών συσκευών έχουν διαφορετικούς αριθμούς για τις αρθρώσεις τους, όταν χρησιμοποιεί κάποιος για πρώτη φορά ένα άγνωστο ρομπότ είναι αρκετά προσεκτικός όσον αφορά την ταχύτητα των κινήσεων που θα ορίσει, τη τοποθεσία του ρομπότ κλπ. . Η κατάσταση αυτή χρησιμοποιείται συνήθως σε περιπτώσεις όπου ο χρήστης έχει εμπειρία του ρομπότ, και θέλει να χειριστεί απευθείας τις αρθρώσεις για εξοικονόμηση χρόνου, συντόμευση και ελαχιστοποίηση εργασιών, ή για εκτέλεση πολύπλοκων λειτουργιών, που πρέπει να γίνουν με συγκεκριμένο τρόπο.

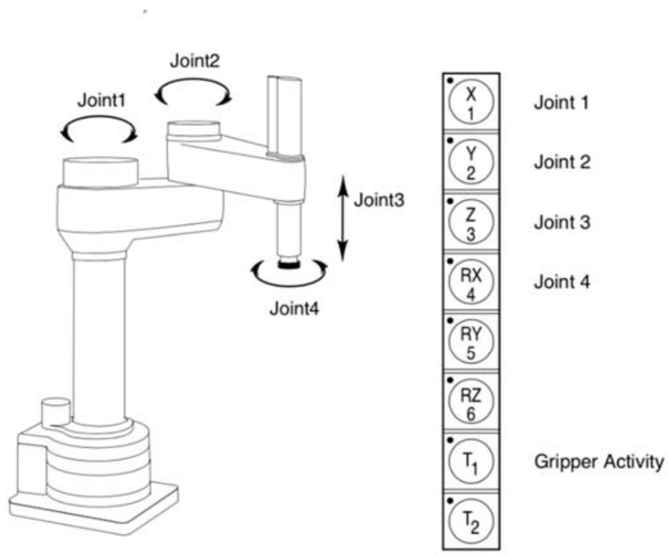


Figure 4-8. JOINT State (SCARA)

- **Free state**
  Όταν έχει επιλεγεί η συγκεκριμένη κατάσταση, μεμονωμένες αρθρώσεις απελευθερώνονται από τους σερβοκινητήρες και αν η ρομποτική διάταξη έχει φρένα, απελευθερώνονται επίσης. Σε αντίθεση με άλλες καταστάσεις, υπάρχει η δυνατότητα να απελευθερώσουμε όσες αρθρώσεις χρειάζεται. Οι λεπτομέρειες χειρισμού φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Η κατάσταση αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για εξειδικευμένες λειτουργίες, ενώ χρειάζεται αρκετή προσοχή, καθώς λάθος χειρισμοί μπορεί να αποδειχθούν ζημιογόνοι για τον ρομποτικό βραχίονα.

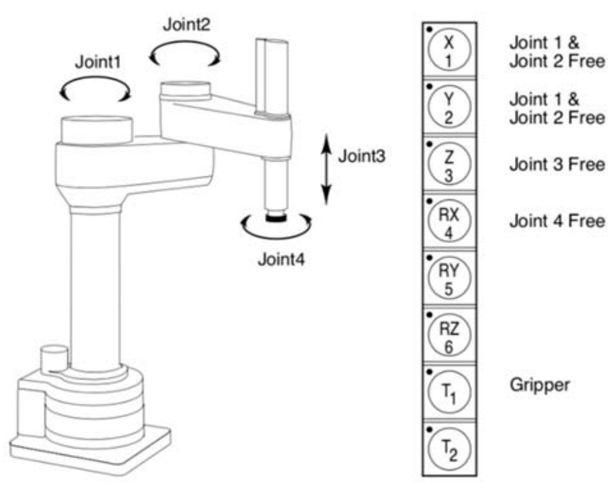
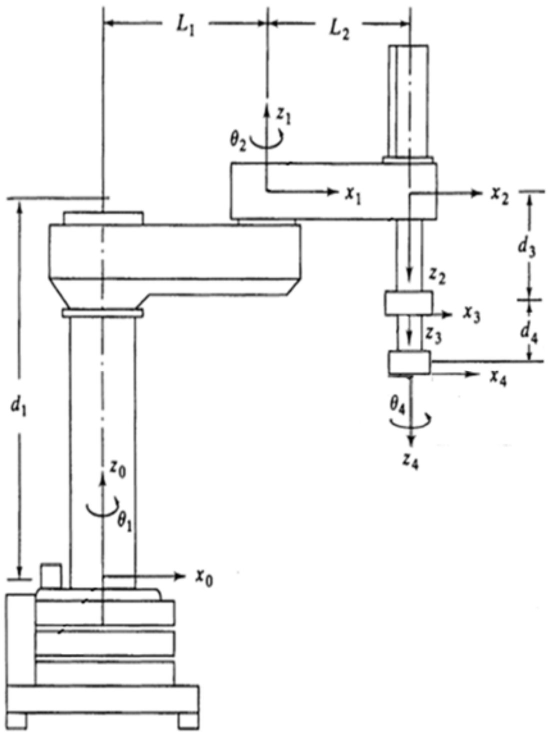


Figure 4-11. FREE State (Four-Axis SCARA)

Κινηματική Ανάλυση:

Επεξεργαστήκαμε τα πλαίσια, σύμφωνα με τη σύμβαση για την τοποθέτηση πλαισίων αναφοράς, στην παρακάτω εικόνα.



Ο πίνακας Denavit-Hartenberg προκύπτει ως εξής:

Σύνδεσμος i	θ_i	d_i	a_i	α_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

Υπολογίζουμε τους παρακάτω διαδοχικούς μετασχηματισμούς συντεταγμένων με βάση τον τύπο A_i^{i-1}=*Rot* (*z* , θ_i)·*Tra*(*z* , d_i) ·*Tra*(*x* , a_i)· *Rot* (*x* , α_i). Από Matlab θα έχουμε:

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

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

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

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

Για το ευθύ κινηματικό μοντέλο από Matlab θα έχουμε:

$$T = A_1^0\, A_2^1\, A_3^2\, A_4^3 = \begin{bmatrix} c_{124} & s_{124} & 0 & l1c1 + l2c12 \\ s_{124} & -c_{124} & 0 & l1s1 + l2s12 \\ 0 & 0 & -1 & d1 - d3 - d4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Όπου: $c_{124} \coloneqq \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)$, $s_{124} \coloneqq \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)$, ομοίως και για τα υπόλοιπα.

Οι συντεταγμένες της τελικής θέσης θα είναι:
$P_X = l_1 c_1 + l_2 c_{12}$
$P_Y = l_1\, s_1 + l_2\, s_{12}$
$P_Z = d_1 - d_3 - d_4$

Διαφορική Ανάλυση:

Για να βρούμε την Ιακωβιανή μήτρα, χρησιμοποιούμε την εντολή της Matlab
```
J=Jacobian([T(1,4),T(2,4),T(3,4)], [u1 u2 u3 d4]);
```
Όπου $u_i = \theta_i$ i=1,2,3.

Τελικά, λαμβάνουμε:

$$J = \begin{bmatrix} -(l2s12 + l1s1) & -l2s12 \\ l2c12 + l1c1 & l2c12 \end{bmatrix}$$

Για τις ιδιόμορφες διατάξεις έχουμε:
$\det(J \cdot J^T) = 0 \rightarrow (l1 \cdot l2 \cdot \sin(\theta_2))^2 = 0 \rightarrow \theta_2 = 0$ ή $\theta_2 = \pi$, όπου η λύση $\theta_2 = \pi$ είναι πρακτικά αδύνατη λόγω κατασκευής.

Σχεδιασμός κίνησης και τροχιάς:

Για τον σχεδιασμό κίνησης, θέτουμε ενδιάμεσους στόχους μέχρι να ολοκληρωθεί η πορεία από το σημείο Α έως το σημείο Β. Προγραμματίζοντας όμως μόνο την κίνηση, θα είχαμε συγκεκριμένες επιθυμητές θέσεις q_{1d}, q_{2d},… και οι controllers του ρομπότ θα προσπαθούσαν να κλείσουν την ενδιάμεση γωνία μεταξύ τους όσο πιο γρήγορα γίνεται, με αποτέλεσμα το ρομπότ να κάνει απότομες και γρήγορες κινήσεις. Αυτό προκαλεί καταπόνηση στους κινητήρες, οι οποίοι αναπτύσσουν συνεχώς μέγιστες ροπές ενώ υπάρχει και η πιθανότητα να πραγματοποιηθούν επιπλέον αναπάντεχες κινήσεις (κινήσεις σε χώρο εκτός ορίων, κινήσεις που δεν επιτρέπονται κατασκευαστικά, ιδιόμορφες διατάξεις κοκ). Για να έχουμε λοιπόν πιο λεπτομερές path planning, εισάγουμε την έννοια του χρόνου μέσω του σχεδιασμού τροχιάς με πολυωνυμική παρεμβολή. Συγκεκριμένα, εκφράζουμε τις μεταβλητές κίνησης ως συνάρτηση του χρόνου, έτσι ώστε το μηχάνημα να γνωρίζει ακριβή χρονική στιγμή που θα περάσει από το κάθε σημείο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνονται οι επιθυμητοί περιορισμοί ταχύτητας και επιτάχυνσης στις αρθρώσεις που επιφέρουν καλύτερο έλεγχο του ρομποτικού συστήματος.

Διάγραμμα Ροής:

Στο συγκεκριμένο πείραμα, σκοπός ήταν το pick-and-place ενός κύβου από μία θέση Α σε μία θέση Β. Χρησιμοποιώντας το controller του ρομπότ, επιχειρήσαμε χειροκίνητα να κατευθύνουμε τον βραχίονα έτσι ώστε να τον φέρουμε στην επιθυμητή θέση. Παρακάτω, ακολουθεί το διάγραμμα ροής της διαδικασίας.