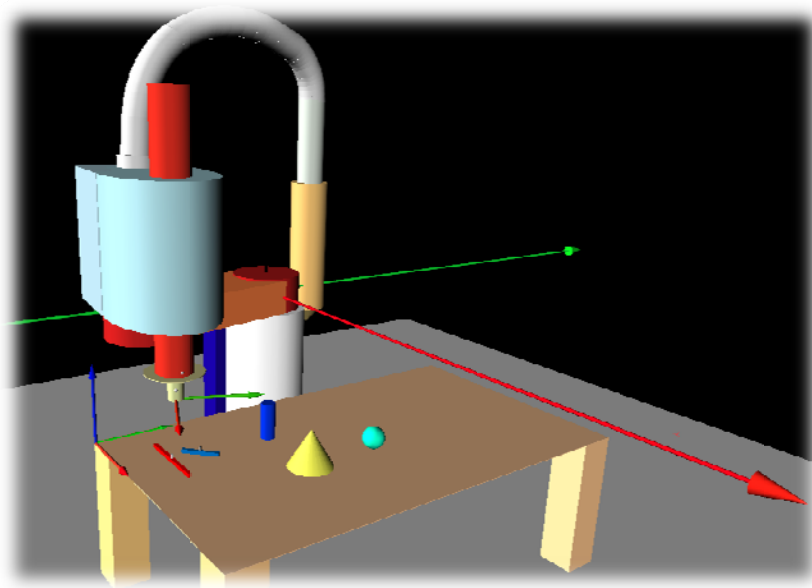


Τμήμα Πληροφορικής και Επικοινωνιών



Εικονικό Εργαστήριο Ρομποτικής

“Ο Εικονικός βραχίονας SerRobot”

Δρ. Ιωάννης Φασουλάς

Ιούλιος 2008, Σέρρες

Περιεχόμενα

1. Συνοπτική περιγραφή της εφαρμογής.....	3
2. Εγκατάσταση και απαιτήσεις συστήματος για την σωστή λειτουργία της εφαρμογής....	4
3. Ο ρομποτικός βραχίονας SCARA και το εικονικό του μοντέλο.....	5
4. Χειρισμός του βραχίονα στον εικονικό κόσμο.....	7
5. Τρόπος λειτουργίας της εφαρμογής.....	11
6. Εκπαιδευτικές ασκήσεις προγραμματισμού του εικονικού βραχίονα.....	12
7. Παράρτημα Α. Συναρτήσεις χειρισμού του εικονικού βραχίονα.....	17
8. Παράρτημα Β. Βασικές γνώσεις κινηματικής και τροχιών.....	24

1. Συνοπτική περιγραφή της εφαρμογής

Στις σύγχρονες βιομηχανικές μονάδες παραγωγής συναντάει κανείς τα πλέον εξελιγμένα ηλεκτρομηχανολογικά επιτεύγματα της ανθρωπότητας, τα οποία παράγουν και διαχειρίζονται την πλειονότητα των προϊόντων που χρησιμοποιούμε στην καθημερινή μας ζωή. Για την κατασκευή και συναρμολόγηση προϊόντων όπως το αυτοκίνητο, ο υπολογιστής, το κινητό τηλέφωνο κτλπ. χρησιμοποιούνται βιομηχανικά ρομπότ. Η χρήση και ο προγραμματισμός των βιομηχανικών ρομπότ απαιτεί την γνώση θεωρητικών εννοιών της ρομποτικής, γνώσεις προγραμματισμού όπως επίσης γνώσεις συστημάτων ελέγχου και αίσθησης.

Η εκπαίδευση φοιτητών για τον χειρισμό-προγραμματισμό τέτοιων συστημάτων επιφέρει δυσκολίες, οι οποίες σε επίπεδο θεωρίας σχετίζονται με την κατανόηση και την περιγραφή των στερεών σωμάτων στον χώρο με την βοήθεια καρτεσιανών συστημάτων συντεταγμένων. Ως γνωστόν, τα βιομηχανικά ρομπότ είναι μηχανισμοί που κινούνται και μεταφέρουν αντικείμενα στον χώρο, για το λόγο αυτό πρέπει να λαμβάνονται πάντα κατάλληλα μέτρα προστασίας. Έτσι, σε επίπεδο πρακτικής άσκησης, προβλήματα μπορούν να προκύψουν από λανθασμένο χειρισμό-προγραμματισμό του βραχίονα με αποτέλεσμα να υφίσταται κίνδυνος τραυματισμού των φοιτητών και καταστροφή μέρους του περιβάλλοντα χώρου εργασίας. Το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα αποτελεί η μη ύπαρξη των απαιτούμενων κονδυλίων για την αγορά του απαραίτητου βασικού και παρελκόμενου εξοπλισμού ενός ρομποτικού βραχίονα. Επίσης κρίνεται επιτακτική η ύπαρξη κατάλληλα εκπαιδευμένου τεχνικού προσωπικού που θα συντηρεί τον βραχίονα για την εκπαίδευση των φοιτητών.

Όλα τα παραπάνω συντελούν στην απαίτηση για ανάπτυξη ενός εικονικού εργαστηρίου με την χρήση αναδραστικών ηλεκτρονικών μέσων, όπως το εικονικό περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού VRML και του MATLAB. Έτσι το εικονικό εργαστήριο θα ξεπερνάει σε γενικές γραμμές τα προαναφερθέντα προβλήματα. Θα ενισχύεται επίσης η εκπαιδευτική διαδικασία των φοιτητών όσον αφορά τον προγραμματισμό-χειρισμό των ρομποτικών βραχιόνων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα παραγωγής. Στην παρούσα αναφορά παρουσιάζεται ένα εκπαιδευτικό λογισμικό που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για να εξυπηρετήσει τους παραπάνω σκοπούς.

Το λογισμικό προσομοιώνει τον τρόπο κίνησης και λειτουργίας του πραγματικού ρομποτικού βραχίονα SCARA E2C351S, σε περιβάλλον VRML και ο χειρισμός του γίνεται μέσω της πλατφόρμας του MATLAB. Στην αναφορά περιγράφονται οι δυνατότητες του λογισμικού τόσο για τον προγραμματισμό του βραχίονα αλλά και την τοποθέτηση αντικειμένων πάνω στο τραπέζι εργασίας με σκοπό την κατασκευή ασκήσεων συναρμολόγησης. Στην εργασία αναλύονται οι εντολές χειρισμού του βραχίονα και οι δυνατότητες που παρέχει το εικονικό περιβάλλον στην χρήση διαφόρων αντικειμένων που επιλέγει ο χρήστης. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα ενεργοποίησης βοηθητικών χαρακτηριστικά βαθμονόμησης του χώρου εργασίας για τον καλύτερο προσδιορισμό των αντικειμένων και της αρπάγης του ρομπότ μέσα στον χώρο εργασίας.

Κατά τη χρήση της εφαρμογής, είναι ανοιχτό το αρχείο εικονικού κόσμου στην οθόνη, έτσι ώστε να φαίνονται εκεί οι κινήσεις που κάνει το ρομπότ. Έτσι ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πάρει μια οπτική εικόνα με τη θέση του ρομπότ στο χώρο, όπως επίσης και να ενημερωθεί για τις τρέχουσες τιμές των αρθρώσεων, ή και τη θέση του άκρου ως προς κάποιο από πλαίσια αξόνων που έχουν οριστεί στον εικονικό κόσμο. Αυτό γίνεται είτε στη λειτουργία γραμμής εντολών, με τη βοήθεια συγκεκριμένων συναρτήσεων, είτε στην

περίπτωση που χειριζόμαστε το βραχίονα μέσω του παραθύρου με τα ειδικά κουμπιά (graphical user interface), όπου οι προαναφερθείσες τιμές αναγράφονται σε ειδικά πλαίσια ανά πάσα στιγμή. Επίσης μέσα από το παράθυρο απεικόνισης του βραχίονα, μπορούμε να περιηγηθούμε στον εικονικό κόσμο, με τη βοήθεια του ποντικιού, ή με τα βελάκια του πληκτρολογίου.

Για το κομμάτι των ασκήσεων, έχουν σχεδιαστεί απλά αντικείμενα στο μοντέλο του βραχίονα, τα οποία χρησιμεύουν είτε ως εμπόδια μέσα στο χώρο που εργάζεται το ρομπότ, είτε ως αντικείμενα που μπορούν να μετακινηθούν από αυτό. Ο προγραμματισμός του χώρου εργασίας για την αρχικοποίηση μιας άσκησης, μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη εντολή, μέσω της οποίας μπορούμε να τοποθετήσουμε τα αντικείμενα που υπάρχουν, σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου εργασίας. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας πλήθους διαφορετικών ειδών ασκήσεων, χρησιμοποιώντας τα ίδια αντικείμενα και αλλάζοντας το σκοπό της κάθε άσκησης. Για την επίλυση των ασκήσεων, ο χρήστης μπορεί είτε να γράψει διαδοχικά τις εντολές που επιθυμεί, στη γραμμή εντολών είτε να συγκεντρώσει όλες τις εντολές που επιθυμεί σε ένα αρχείο κειμένου, η εκτέλεση του οποίου θα αποδώσει το αποτέλεσμα ολοκληρωμένο στο αρχείο του εικονικού κόσμου. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι οι κινήσεις του εικονικού βραχίονα γίνονται σε πραγματικό χρόνο αναφορικά με τις τροχιές που σχεδιάζονται για τις αρθρώσεις. Επίσης στην εφαρμογή υπάρχει η δυνατότητα χειρισμού δύο επιπρόσθετων επίπεδων ρομποτικών βραχίονα δύο και τριών βαθμών ελευθερίας αντίστοιχα για την καλύτερη κατανόηση των κινήσεων που δύνανται να πραγματοποιήσει ένας ρομποτικός βραχίονας.

2. Εγκατάσταση και απαιτήσεις συστήματος για την σωστή λειτουργία της εφαρμογής

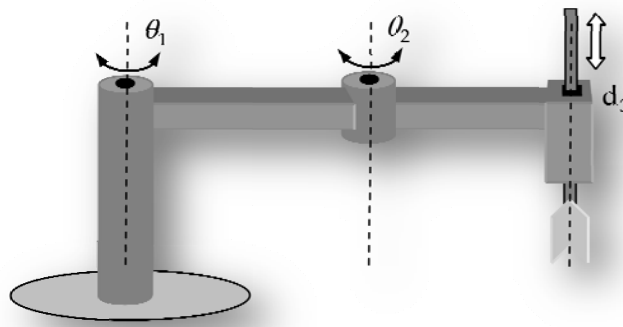
Για την εγκατάσταση της εφαρμογής αρκεί να εκτελεστεί το πρόγραμμα **SerRobot.msi** το οποίο δημιουργεί τον φάκελο VRserrobot μέσα στον C:\Program Files\TEI_SERRON. Σε αυτόν τον φάκελο υπάρχουν όλες οι απαραίτητες συναρτήσεις για να λειτουργήσει η εφαρμογή. Η εφαρμογή τρέχει πάνω στην πλατφόρμα του προγράμματος MATLAB 7. Επομένως, μετά την εκκίνηση του MATLAB πρέπει να οδηγήσουμε το MATLAB στο Current Directory: C:\Program Files\TEI_SERRON\VRserrobot. Έπειτα, για την εκκίνηση του εικονικού εργαστηρίου αρκεί να πληκτρολογήσουμε στο Command Window του MATLAB την εντολή **serrobot**.

Αφού γίνει η επιλογή του βραχίονα, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει, μέσω του γραφικού περιβάλλοντος, το βήμα με το οποίο θα κινείται κάθε άρθρωση, το είδος τροχιάς, και την ταχύτητα του ρομπότ (π.χ. τυπικές τιμές: Frame=Joints, Trajectory=3rd Order Trajectory, Rotational Step=45, Prismatic step=0.2 και ολίσθηση της μπάρας Velocity σε μια ενδιαμέση τιμή). Στην συνέχεια μπορεί να λειτουργήσει την εφαρμογή με την βοήθεια του γραφικού περιβάλλοντος λειτουργίας είτε με την χρήση των κατάλληλων συναρτήσεων που περιγράφονται στο παράρτημα Α.

3. Ο ρομποτικός βραχίονας SCARA και το εικονικό του μοντέλο

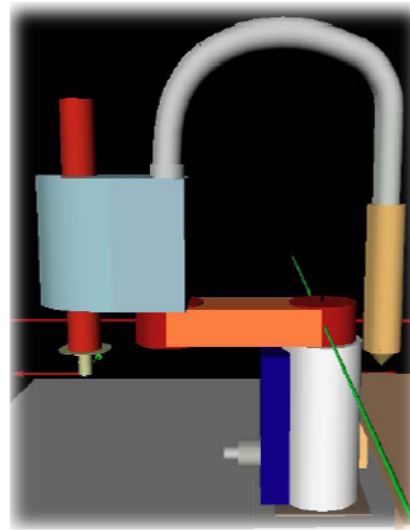
Το λογισμικό που αναπτύχθηκε προσομοιώνει, σε περιβάλλον VRML, τον τρόπο κίνησης και λειτουργίας ενός πραγματικού ρομποτικού βραχίονα SCARA ενώ, ο χειρισμός του γίνεται μέσω της πλατφόρμας του MATLAB.

Το πρωτότυπο του βραχίονα SCARA (ακρωνύμιο Selective Compliant Assembly Robot) εμφανίστηκε το 1978 από τον καθηγητή Hiroshi Makino, στο πανεπιστήμιο Yamanashi στην Ιαπωνία. Η εκπληκτική του απλότητα ήταν ευφυής (παρατηρώντας τον να λειτουργεί, θυμίζει ένα ανθρώπινο βραχίονα), καθώς με λιγότερες κινήσεις μπορούσε να κάνει αποτελεσματικότερα εργασίες συναρμολόγησης, με μεγαλύτερη ταχύτητα και περισσότερη ακρίβεια. Χρησιμοποιήθηκε για εμπορική συναρμολόγηση για πρώτη φορά το 1981, και από τότε συνεχίζει να κατέχει τον καλύτερο συνδυασμό τιμής – απόδοσης, όσον αφορά τη συναρμολόγηση με υψηλές ταχύτητες, καθώς έκτοτε η εξέλιξη στην παραγωγή των μικρών ηλεκτρονικών προϊόντων ήταν αλματώδης. Η γεωμετρία του πρωτότυπου βραχίονα SCARA περιλαμβάνει δύο περιστροφικές αρθρώσεις (θ_1 , θ_2) και μια πρισματική άρθρωση (d_3), τοποθετημένες έτσι ώστε οι άξονες των αρθρώσεων να είναι παράλληλοι μεταξύ τους (Εικόνα 1). Οι βραχίονες SCARA έχουν μεγάλη δυσκαμψία σε κατακόρυφη φόρτιση και ελαστικότητα σε οριζόντια, κάτι όμως που τους δίνει μεγάλο πλεονέκτημα σε κινήσεις συναρμολόγησης και πακεταρίσματος (pick-and-place).



Εικόνα 1: πρότυπος βραχίονας SCARA

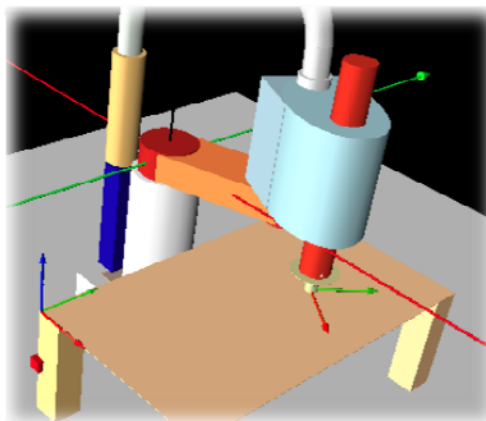
Η οικογένεια ρομποτικών βραχιόνων SCARA περιλαμβάνει διάφορες παραλλαγές του πρότυπου βραχίονα, αναλόγως με τις εργασίες που καλείται να επιτελέσει. Έτσι υπάρχουν βραχίονες SCARA για βαριά φορτία, για εξαιρετικά γρήγορες κινήσεις ή για μακρινές αποστάσεις. Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του βραχίονα SCARA E2C351S της εταιρίας Epson (Εικόνα 2.α). Η διαφορά του προαναφερθέν βραχίονα σε σχέση με τον πρότυπο βραχίονα SCARA της εικόνας 1, είναι η ύπαρξη μιας επιπρόσθετης περιστροφικής άρθρωσης (θ_4) στον κατακόρυφο άξονα κίνησης της αρπάγης, η οποία προσδίδει μεγαλύτερη ευελιξία στον προσανατολισμό του άκρου του βραχίονα. Έτσι, οι πρώτες δύο αρθρώσεις είναι περιστροφικές και συνδέονται από έναν σύνδεσμο μήκους $L_1 = 2.25\text{dm}$. Ο δεύτερος σύνδεσμος έχει μήκος $L_2 = 1.25\text{dm}$ και ενώνει τον άξονα της δεύτερης περιστροφικής με αυτόν της τρίτης (πρισματικής) και της τέταρτης (περιστροφικής) άρθρωσης.



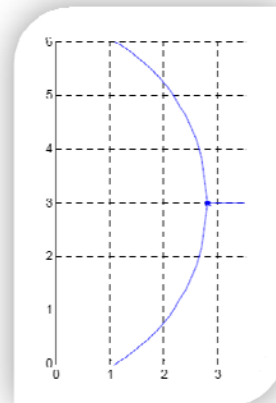
Εικόνα 2.α:ο Ο βραχίονας SCARA E2C351S

Εικόνα 2.β:Ο Εικονικός βραχίονας SCARA E2C351S

Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του βραχίονα SCARA E2C351S κατασκευάστηκε σε περιβάλλον VRML ένα αντίγραφο του βραχίονα, όπως παρουσιάζεται στην παραπάνω εικόνα 2.β. Στον εικονικό κόσμο προστέθηκε ένας πάγκος εργασίας πάνω στον οποίο είναι δυνατόν να τοποθετηθούν εικονικά αντικείμενα τα οποία είναι δυνατόν να χειριστεί ο βραχίονας. Οι δυνατές τιμές των αρθρώσεων καθώς, το είδος τους, και το μέγεθος των συνδέσμων, είναι τα στοιχεία που καθορίζουν το χώρο εργασίας του ρομπότ, στον οποίο ανήκουν όλα τα σημεία στα οποία μπορεί να φτάσει το άκρο του ρομπότ. Στην εικόνα 3.β παρουσιάζεται ο χώρος εργασίας του βραχίονα όπως αυτός είναι βαθμονομημένος με βάση ένα πλαίσιο συντεταγμένων που υπάρχει στην μία άκρη του τραπεζιού. Οι άξονες x-y-z. του πλαισίου συντεταγμένων του τραπεζιού αντιστοιχούν στον χρωματικό κώδικα RGB (Red-Green-Blue). Η ίδια ακριβώς σύμβαση χρησιμοποιείται για το πλαίσιο συντεταγμένων της αρπάγης και της βάσης του βραχίονα (Εικόνα 3.α). Τέλος, μέσα από το παράθυρο απεικόνισης του βραχίονα, μπορούμε να περιηγηθούμε στον εικονικό κόσμο, με τη βοήθεια του ποντικιού.



Εικόνα 3.α



Εικόνα 3.β

Πλαίσια συντεταγμένων του τραπεζιού, της αρπάγης και της βάσης του βραχίονα, όπως επίσης και ο χώρος εργασίας του βραχίονα στο βαθμονομημένο πλαίσιο του τραπεζιού (η βαθμονόμηση είναι σε dm).

4. Χειρισμός του βραχίονα στον εικονικό κόσμο

Ο έλεγχος του βραχίονα μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω του παραθυρικού περιβάλλοντος, πάνω στο οποίο υπάρχουν ειδικά κουμπιά που αναλαμβάνουν διάφορες κινήσεις του βραχίονα, είτε απευθείας από τη γραμμή εντολών του MATLAB. Σε κάθε περίπτωση, η ενέργεια του χρήστη μεταφράζεται σε κλήση μιας αλληλουχίας συναρτήσεων, οι οποίες αναλαμβάνουν να υπολογίσουν τη σωστή τροχιά των μεταβλητών των αρθρώσεων ώστε να τροφοδοτηθεί το εικονικό μοντέλο με τα κατάλληλα δεδομένα, και τελικά να απεικονιστεί η κίνηση από τον βραχίονα.

Οι κινήσεις του βραχίονα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν αναφορικά με τα τρία πλαίσια συντεταγμένων όπως απεικονίζονται στην εικόνα 3.α. Ποιο συγκεκριμένα οι κινήσεις του βραχίονα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν με βάση: α) το world-frame που είναι τοποθετημένο στο ύψος των 2 βασικών περιστροφικών αρθρώσεων του βραχίονα, β) το tool-frame που είναι τοποθετημένο στο άκρο του βραχίονα (αρπάγη), γ) το table-frame το οποίο βρίσκεται στην αρχή του πάγκου εργασίας και τέλος δ) με βάση τους άξονες κίνησης των αρθρώσεων.

Για την υλοποίηση των παραπάνω κινήσεων σχεδιάστηκαν κατάλληλες συναρτήσεις οι οποίες είναι δυνατόν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες με βάση το πλαίσιο στο οποίο αναφέρονται. Έτσι έχουμε συναρτήσεις που σχετίζονται με το world-frame, το table-frame, το tool-frame και με την ανεξάρτητη κίνηση των αρθρώσεων. Επίσης υπάρχουν συναρτήσεις γενικής χρήσης που σχετίζονται με την λαβή του αντικειμένου και τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του εικονικού κόσμου. Στον πίνακα I παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι συναρτήσεις που σχετίζονται με την κίνηση του βραχίονα. Σε γενικές γραμμές κάθε συνάρτηση λαμβάνει σαν είσοδο της κατάλληλο αριθμό παραμέτρων οι οποίες αφορούν την επιθυμητή θέση-προσανατολισμό του ρομπότ μέσα στο χώρο εργασίας.

Πίνακας I: Γενικές συναρτήσεις κίνησης του βραχίονα

Χώρος των αρθρώσεων	World Frame	Tool Frame	Table Frame	Γενικής χρήσης
moveq	movew	movetool	movetable	grasp
moveq1	moveworldx	movetoolx	movetablex	leave
moveq2	moveworldy	movetooly	movetabley	ready
moveq3	movews	movetools	movetablexs	
moveq4	moveworldxs	movetoolxs	movetableys	
	moveworldys	movetoolys	movetablezs	
	moveworldzs	movetoolzs		

Έστω για παράδειγμα ότι ο βραχίονας πρέπει να πιάσει ένα κύβο, με ακμή 0.5dm, που βρίσκεται ως προς το τραπέζι σε συντεταγμένες (1, 1, 0.25) (οι συντεταγμένες αναφέρονται στο κέντρο συμμετρίας του κύβου) και να τον τοποθετήσει σε μία διαφορετική θέση π.χ. την (2, 2, 0.25) με προσανατολισμό 45° (ο προσανατολισμός αναφέρεται ως προς το πλαίσιο του τραπεζιού). Μια αλληλουχία εντολών που θα επιτελέσουν την παραπάνω απαίτηση χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις **movetable**, **grasp**, **leave** και **ready** είναι:

<code>movetable(1,1,1,0);</code>	→ Μετακίνηση της αρπάγης πάνω από το αντικείμενο
<code>movetable(1,1,0.5,0);</code>	→ Η αρπάγη έρχεται σε επαφή με την επάνω επιφάνεια του αντικειμένου
<code>grasp;</code>	→ Γίνεται λαβή του αντικειμένου από την αρπάγη
<code>movetable(1,1,1,0);</code>	→ Ανύψωση του αντικειμένου από το τραπέζι
<code>movetable(2,2,1,0);</code>	→ Μετακίνηση πάνω από την επιθυμητή θέση
<code>movetable(2,2,0.5,45);</code>	→ Τοποθέτηση του αντικειμένου πάνω στο τραπέζι
<code>leave</code>	→ Απόθεση αντικειμένου
<code>movetable(2,2,1,0);</code>	→ Κατακόρυφη απομάκρυνση της αρπάγης
<code>ready;</code>	→ Μετακίνηση του βραχίονα στην θέση παρκάρισματος

Έστω τώρα ότι ο βραχίονας είναι σταματημένος σε μια συγκεκριμένη θέση, ενώ θέλουμε να τοποθετήσουμε το άκρο του σε μια άλλη. Οι τρόποι για να επιτευχθεί αυτό είναι δύο. Είτε μας ενδιαφέρει απλώς η τελική θέση του άκρου, οπότε η τροχιά των αρθρώσεων του βραχίονα υπολογίζονται μέσω ενός αλγορίθμου π.χ. παραβολικής μίξης, είτε πέραν του τελικού σημείου, μας ενδιαφέρει η τροχιά του άκρου να είναι ευθεία. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο τρόπων, είναι ότι με τον πρώτο τρόπο δεν μπορούμε να γνωρίζουμε από ποια ακριβώς σημεία θα περάσει το άκρο μέχρι να φτάσει στο τελικό σημείο, οπότε στην περίπτωση ύπαρξης εμποδίων στο χώρο εργασίας είναι πιθανή μια σύγκρουση του βραχίονα με κάποιο από τα εμποδία. Έτσι για την αποφυγή των εμποδίων θα βόλευε η κίνηση σε ευθεία τροχιά. Το μειονέκτημα της κίνησης σε ευθεία τροχιά, είναι ότι πρέπει να συγκριθεί κάθε ενδιαμέσο σημείο με το χώρο εργασίας του ρομπότ, ώστε να αποφευχθεί η περίπτωση να περάσει ο βραχίονας από ιδιόζοντα σημεία στα οποία χάνονται βαθμοί ελευθερίας. Η ευθεία στην οποία πρόκειται να κινηθεί το άκρο του βραχίονα προσεγγίζεται από μια πλειάδα σημείων για τα οποία υπολογίζεται το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα ώστε να προσδιοριστούν οι απαιτούμενες τιμές των αρθρώσεων που θα δώσουν την επιθυμητή κίνηση του άκρου. Αυτή η διαδικασία κάνει τη συγκεκριμένη κίνηση πιο απαιτητική σε χρόνο και υπολογιστική ισχύ. Προκειμένου η κίνηση να γίνει σε ευθεία τροχιά, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η αντίστοιχη συνάρτηση της οποίας το τελευταίο γράμμα είναι “s” (straight). (Για παράδειγμα η `movew` θα κινηθεί βάση του πλαισίου αξόνων του ρομπότ με τον πρώτο τρόπο, όχι δηλαδή σε ευθεία, ενώ η `movews` θα τοποθετήσει το άκρο του ρομπότ στην ίδια θέση με πριν, αλλά η τροχιά που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι ευθεία.)

Βλέπουμε ότι με την χρήση απλών και ευκολομνημόνευτων εντολών είναι δυνατόν να προγραμματίσουμε διάφορες κινήσεις του εικονικού βραχίονα. Επιπρόσθετα με τις παραπάνω συναρτήσεις μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την συνάρτηση `obj_coords` η οποία έχει σχεδιαστεί για την τοποθέτηση διάφορων αντικείμενων πάνω στο τραπέζι. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει από μια πλειάδα αντικειμένων και να καθορίσει την θέση και τον προσανατολισμό τους σε σχέση με το πλαίσιο συντεταγμένων του τραπεζιού.

Τα αντικείμενα που μπορεί να χρησιμοποιηθούν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η μία περιλαμβάνει αντικείμενα που χρησιμοποιούνται ως εμπόδια πάνω στο τραπέζι και σκοπός τους είναι να περιορίσουν τον τρόπο κίνησης του βραχίονα. Απαιτείται έτσι προσεκτικότερη σχεδίαση των κινήσεων του βραχίονα ώστε να αποφύγει πιθανές συγκρούσεις με τα εμπόδια. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει αντικείμενα τα οποία μπορούν να μετακινηθούν μετά από κατάλληλη δέσμευση τους από την αρπάγη του βραχίονα. Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να τοποθετηθούν πάνω στο τραπέζι εργασίας με σκοπό την κατασκευή ασκήσεων συναρμολόγησης για το ρομπότ. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας II με ενδεικτικά ονόματα εμποδίων και αντικειμένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την εφαρμογή.

Πίνακας II.α: Αντικείμενα και εμπόδια του εικονικού κόσμου

Αντικείμενα	Ποσότητα	Ονομασία	Διαστάσεις (table-frame)
Κώνοι	5	co1, co2, co3, co4, co5	Ύψος: 0.5 Ακτίνα βάσης: 0.3
Σφαίρες	5	sp1, sp2, sp3, sp4, sp5	Ακτίνα: 0.15
Κύβοι	4	qb1, qg1, qw1, qr1	Ακμή: 0.2
Plate	1	pla	1x1x0.2 (ύψος) ύψος βίδας: 0.1
Κύλινδροι (children του plate)	4	cy1, cb1, cg1, cr1	Ύψος: 0.5 Ακτίνα: 0.2
Κύλινδροι (Ανεξάρτητοι)	4	cy2, cb2, cg2, cr2	Ύψος: 0.5 Ακτίνα: 0.2
Κόκκινες ράβδοι	8	b01..b08	Ύψος: 0.05 – μήκος: 1
Μπλε ράβδοι	19	s01..s19	Ύψος: 0.05 – μήκος: 0.5
Πράσινες ράβδοι	4	b09..b12	Ύψος: 0.05 – μήκος: 0.7
Διάφορα αντικείμενα συναρμολόγησης	7	A01..A07	Ύψος: 0.25, όχι στάνταρ σχήματα

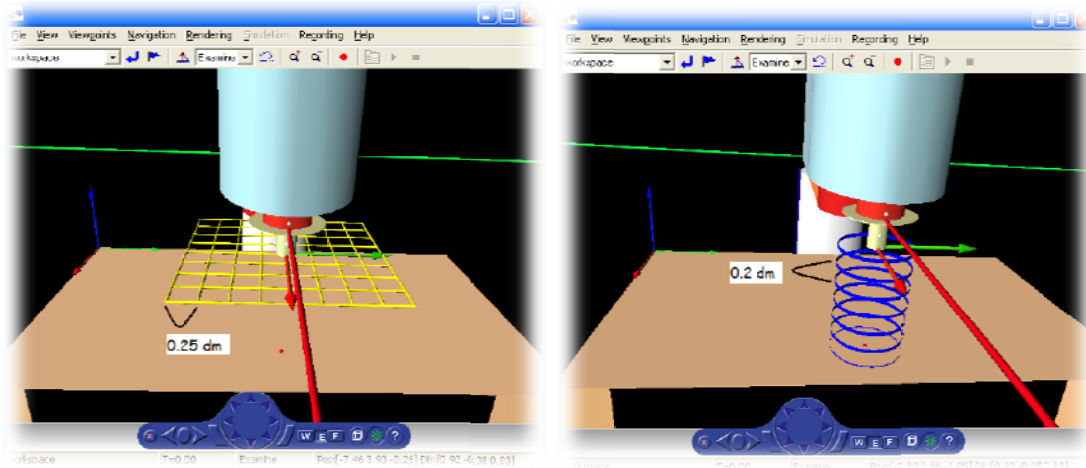
Πίνακας II.β: Τα παρακάτω αντικείμενα δεν συλλαμβάνονται από την αρπάγη.

Εμπόδιο 1	1	ob1	1 x 0.5 x 1
Εμπόδιο 2	1	ob2	1.5 x 0.5 x 1
Επιπρόσθετα πλαίσια	8	fr1..fr8	0.5 (Μήκος κάθε άξονα)

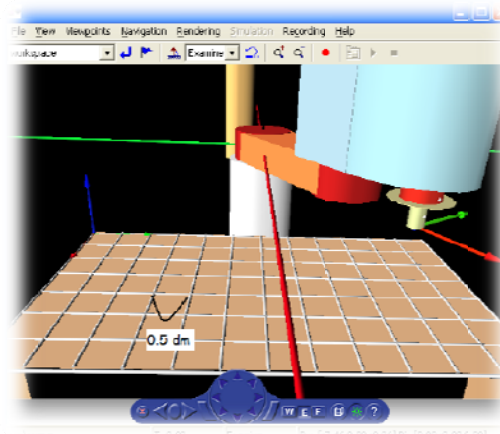
Για την τοποθέτηση αντικειμένων πάνω στο τραπέζι χρησιμοποιούμε την συνάρτηση `clear_obj`, ένα παράδειγμα δίνεται παρακάτω:

```
clear_obj → καθαρίζει τα αντικείμενα από το τραπέζι
obj_coords('co1', 2, 1.5, 0.25, 0) → Τοποθέτηση του κώνου co1 στον πάγκο εργασίας
```

Επίσης υπάρχουν συναρτήσεις όπως οι `grid_world`, `grid_z`, `grid_table`, `grid_tool` οι οποίες ενεργοποιούν βοηθητικά χαρακτηριστικά βαθμονόμησης του χώρου εργασίας για τον οπτικό προσδιορισμό της θέσης των αντικειμένων και της αρπάγης του ρομπότ. Στις παρακάτω εικόνες 4.α.β.γ παρουσιάζονται το πλέγμα βαθμονόμησης της αρπάγης, οι δακτύλιοι βαθμονόμησης του ύψους και το πλέγμα βαθμονόμησης του πάγκου εργασίας.



Εικόνα 4.α: Το πλέγμα βαθμονόμησης της αρπάγης Εικόνα 4.β: Οι δακτύλιοι βαθμονόμησης του

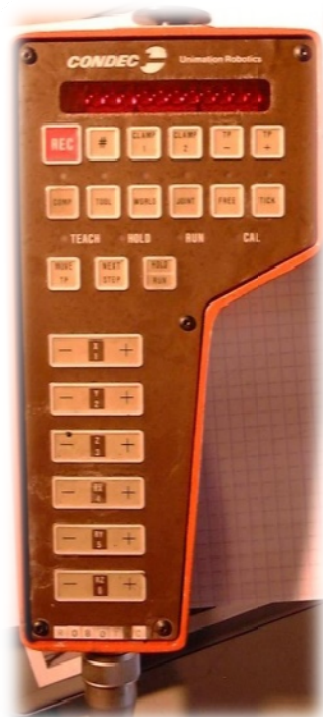


Εικόνα 4.γ: Το πλέγμα βαθμονόμησης του πάγκου εργασίας

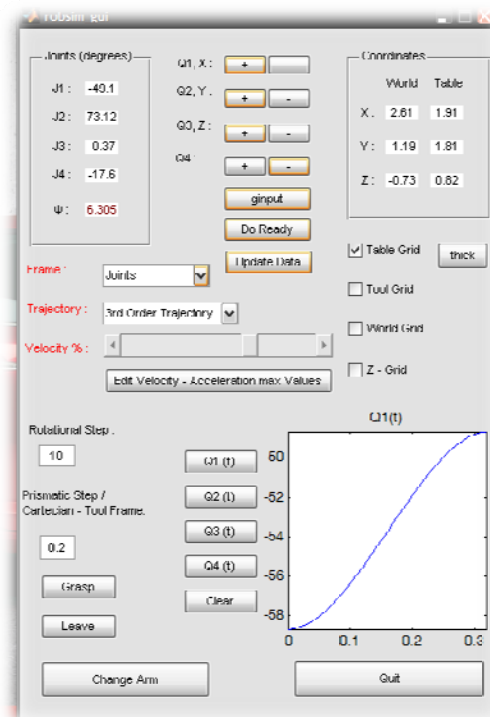
Επίσης, κατά τον προγραμματισμό του βραχίονα, πολλές φορές, απαιτείται η επανατοποθέτηση της αρπάγης σε συγκεκριμένες θέσεις που εξαρτώνται από την ελάχιστη εργασία. Η αποθήκευση αυτών των θέσεων είναι δυνατή με την χρήση της συνάρτησης `here` σε συνδυασμό με κάποια από τις συναρτήσεις `move` για την κίνηση του βραχίονα στις αποθηκευμένες θέσεις.

Για την ευκολότερη καθοδήγηση του βραχίονα αναπτύχθηκε ένα γραφικό εργαλείο χειρισμού του ρομπότ με την χρήση κουμπιών και εργαλείων επιλογής που παρέχει το MATLAB. Το γραφικό εργαλείο χειρισμού μπορεί να αντιστοιχηθεί στο χειριστήριο εκμάθησης (Teach pendant) που συνοδεύει κάθε βιομηχανικό βραχίονα (Εικόνα 5.α.β). Τα κουμπιά και οι επιλογές που υπάρχουν χρησιμοποιούν τις συναρτήσεις που αναφέρθηκαν

μέχρι τώρα καθώς και άλλες που σχετίζονται με επιμέρους λειτουργίες του βραχίονα όπως ο καθορισμός της ποσοστιαίας ταχύτητας του ρομπότ και ο μαθηματικός τρόπος υπολογισμού των τροχιών τους (π.χ τροχιές παραβολικής μίξης, 3^{ης} και 5^{ης} τάξης πολυώνυμα). Κατά τη χρήση της εφαρμογής, είναι ανοιχτό το αρχείο εικονικού κόσμου μαζί με το χειριστήριο εκμάθησης στην οθόνη, έτσι ώστε να φαίνονται εκεί οι κινήσεις που κάνει το ρομπότ. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πάρει μια οπτική εικόνα με τη θέση του ρομπότ στο χώρο, όπως επίσης και να ενημερωθεί για τις τρέχουσες τιμές των αρθρώσεων, ή και τη θέση του άκρου ως προς κάποιο από πλαίσια αξόνων που έχουν οριστεί στον εικονικό κόσμο.



Εικόνα 5.α: Πραγματικό χειριστήριο εκμάθησης



Εικόνα 5.β: Εικονικό χειριστήριο εκμάθησης

5. Τρόπος λειτουργίας της εφαρμογής

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια κίνηση από τον βραχίονα, ακολουθείται μια συγκεκριμένη ακολουθία ελέγχων και μαθηματικών υπολογισμών. Αρχικά δίνεται η εντολή από το χρήστη. Η εντολή αυτή μπορεί να είναι είτε εντολή μορφοποίησης του εικονικού κόσμου, είτε εντολή κίνησης. Στην πρώτη περίπτωση το αποτέλεσμα της εντολής μεταβιβάζεται απευθείας στον εικονικό κόσμο.

Στη δεύτερη περίπτωση δηλώνεται στην συνάρτηση κίνησης του βραχίονα, το επιθυμητό σημείο που θέλουμε να τοποθετήσουμε την αρπάγη του. Αρχικά πραγματοποιείται συντακτικός έλεγχος της εντολής και στη συνέχεια συγκρίνεται αν το επιθυμητό σημείο είναι μέσα στον εφικτό χώρο εργασίας του βραχίονα. Εφόσον πληρείται ο παραπάνω περιορισμός, υπολογίζεται το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα για να υπολογιστούν οι κατάλληλες τιμές των αρθρώσεων που θα προσδώσουν στην αρπάγη του βραχίονα την

επιθυμητή θέση και προσανατολισμό. Επειδή είναι δυνατόν να υπάρξουν πολλαπλές λύσεις, που αντιστοιχούν σε διαφορετική μορφολογική τοποθέτηση του βραχίονα στο χώρο ο αλγόριθμός υπολογισμού της τροχιάς των αρθρώσεων χρησιμοποιεί ως κριτήριο αξιολόγησης, των πολλαπλών λύσεων, την αθροιστικά μικρότερη διαγραφόμενη περιστροφή όλων των περιστροφικών αρθρώσεων. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο χρόνος στον οποίο θα ολοκληρωθεί η κίνηση του βραχίονα με βάση την ποσοστιαία τιμή της ταχύτητας που έχει οριστεί για το βραχίονα και το μέγεθος της γωνίας/μετατόπισης που έχει να διαγράψει η κάθε άρθρωση. Ακολουθεί ο υπολογισμός των τροχιών των αρθρώσεων με βάση την επιλογή του χρήστη (π.χ τροχιές παραβολικής μίξης, 3^{ης} και 5^{ης} τάξης πολυώνυμα) και τέλος εισάγονται στο VRML αρχείο του βραχίονα, για να αναπαρασταθεί η επιλεγμένη κίνηση σε πραγματικό χρόνο.

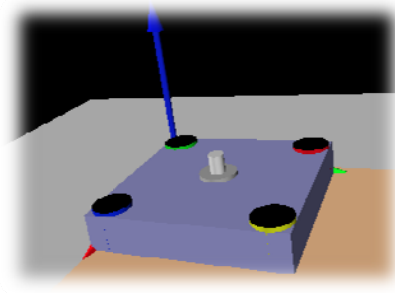
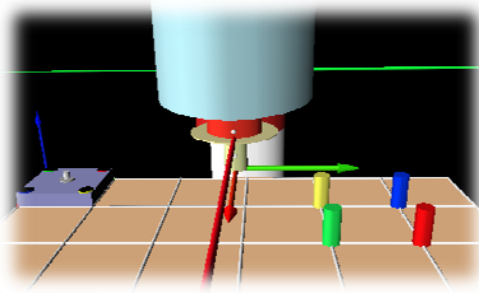
6. Εκπαιδευτικές ασκήσεις προγραμματισμού του εικονικού βραχίονα.

Για την εκπαίδευση και εξοικείωση των φοιτητών με τον εικονικό βραχίονα scara αναπτύχθηκαν ορισμένες ασκήσεις. Το σκηνικό των ασκήσεων αποτελείται από ορισμένα αντικείμενα των οποίων οι θέσεις αρχικοποιούνται κατά την εκκίνηση της κάθε άσκησης. Σκοπός κάθε άσκησης είναι η μετακίνηση από το ρομπότ, ενός ή περισσότερων αντικειμένων προς ένα συγκεκριμένο σημείο ή με έναν συγκεκριμένο τρόπο αποφεύγοντας κάποια εμπόδια. Το βασικό πλεονέκτημα των ασκήσεων είναι ότι υπάρχουν πολλοί τρόποι επίλυσης της καθεμιάς, με διάφορων ειδών κινήσεις για το ρομπότ.

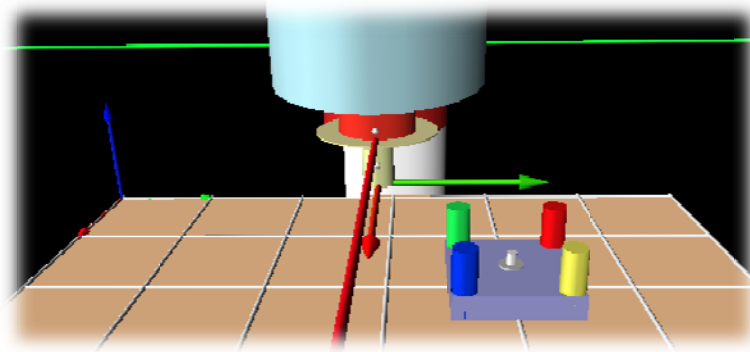
Ο σκοπός είναι η επίλυση των ασκήσεων γράφοντας τον κατάλληλο ψευδοκώδικα, και όχι με την χρήση του χειριστηρίου εκμάθησης. Οι ασκήσεις που έχουν δημιουργηθεί είναι ενδεικτικές, οπότε αφήνεται στη διάθεση του χρήστη η δημιουργία νέων ασκήσεων βασισμένες στα αντικείμενα του πίνακα II και την συνάρτηση `obj_coords`. Στην συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά πέντε εργαστηριακές ασκήσεις που αναπτύχθηκαν για την εκπαίδευση των φοιτητών.

Η άσκηση «cylinders¹» ζητά την τοποθέτηση τεσσάρων χρωματιστών κυλίνδρων πάνω σε ένα πινάκιο, στην επιφάνεια του οποίου υπάρχουν ειδικοί δακτύλιοι, χρωματισμένοι αντίστοιχα με τον κάθε κύλινδρο (βλ. Εικόνα 6). Στην συνέχεια απαιτείται η μετακίνηση του πινακίου σε συγκεκριμένη θέση πάνω στο τραπέζι εργασίας. Για την σωστή λαβή του πινακίου από το βραχίονα πρέπει η αρπάγη να κατέβει στο ύψος της βίδας του πινακίου, να ολοκληρώσει μια στροφή 360 μοιρών κατεβαίνοντας, για να βιδωθεί, και στη συνέχεια να συλλάβει το πινάκιο. Μετά αρκεί απλώς να μετακινηθεί το πινάκιο σε κάποια άλλη θέση στο τραπέζι (βλ. Εικόνα 7). Η τελευταία κίνηση μπορεί να γίνει είτε διατηρώντας σταθερό τον προσανατολισμό της αρπάγης είτε περιστρέφοντάς την. Η άσκηση επιλύεται από απλές εντολές, οι οποίες όμως βοηθούν την κατανόηση της σχετικής απόστασης των αντικειμένων που υπάρχουν στο τραπέζι αλλά και στον τρόπο προγραμματισμού της κίνησης του ρομπότ.

¹ Για να αρχικοποιηθούν τα αντικείμενα στον πάγκο εργασίας του ρομπότ πρέπει να δώσουμε στο MATLAB την εντολή **spread_cylinders**. Ένα ενδεικτικό αρχείο εντολών που λύνει την παραπάνω άσκηση είναι το αρχείο **ask_cylinders**, η εκτέλεση του οποίου ενεργοποιεί ακολουθιακά κατάλληλες εντολές προγραμματισμού του βραχίονα. Η ίδια ακριβώς διαδικασία πραγματοποιείται και για τις επόμενες ασκήσεις.

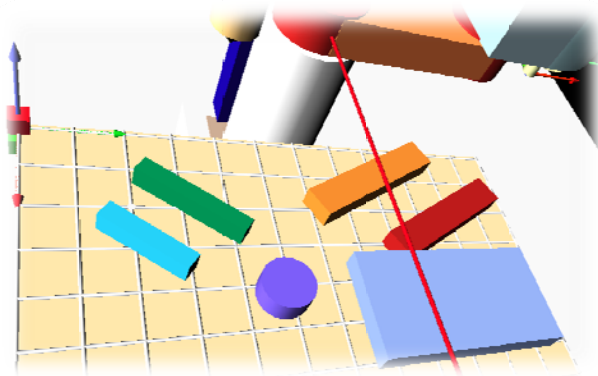


Εικόνα 6.α: Χώρος εργασίας της άσκησης «cylinders» Εικόνα 6.β: Σχεδιαστικές λεπτομέρειες για το πινάκιο τοποθέτησης των κυλίνδρων.



Εικόνα 7: Εικόνα του χώρου εργασίας μετά την συναρμολόγηση

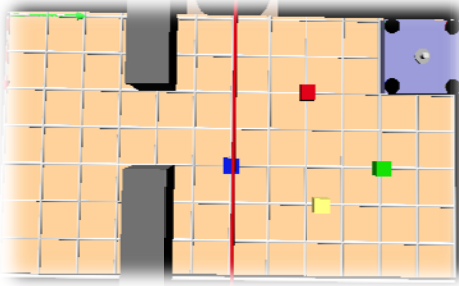
Η άσκηση «labyrinth»² έχει σκοπό την εξοικείωση του χρήστη με τον προγραμματισμό της κίνησης του ρομπότ για την αποφυγή εμποδίων. Πάνω στο χώρο εργασίας έχουν τοποθετηθεί κάποια σταθερά εμπόδια (βλ. Εικόνα 8). Στόχο αποτελεί η μετακίνηση του κόκκινου κύβου από την μία άκρη του τραπεζιού (στην τομή των αξόνων του πλαισίου του τραπεζιού) στην άλλη με κατάλληλες κινήσεις της αρπάγης. Προϋπόθεση αποτελεί να μην σηκωθεί το αντικείμενο από το επίπεδο του τραπεζιού και να μη συγκρουστεί με κάποιο από τα εμπόδια που υπάρχουν στον χώρο εργασίας.



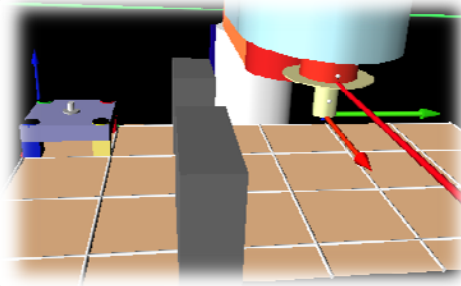
Εικόνα 8: Εικόνα του χώρου εργασίας για την άσκηση «labyrinth»

² Για να αρχικοποιηθούν τα αντικείμενα στον πάγκο εργασίας του ρομπότ πρέπει να δώσουμε στο MATLAB την εντολή **spread_labyrinth**. Ένα ενδεικτικό αρχείο εντολών που λύνει την παραπάνω άσκηση είναι το αρχείο **ask_labyrinth**, η εκτέλεση του οποίου ενεργοποιεί ακολουθιακά κατάλληλες εντολές προγραμματισμού του βραχίονα.

Η άσκηση «cubes³» απαιτεί τον προγραμματισμό του βραχίονα ώστε να μετακινηθούν οι κύβοι (βλ. Εικόνα 9.α) που υπάρχουν στο τραπέζι, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 9.β χωρίς ο βραχίονας να συγκρουστεί με τα δύο σταθερά εμπόδια. Το πινάκιο έχει τέτοιες διαστάσεις ώστε να μπορεί να διέλθει ακριβώς ανάμεσα από το κενό που δημιουργείται από τα εμπόδια. Ο τρόπος λαβής του πινακίου είναι ο ίδιος που παρουσιάστηκε στην άσκηση «cylinders».

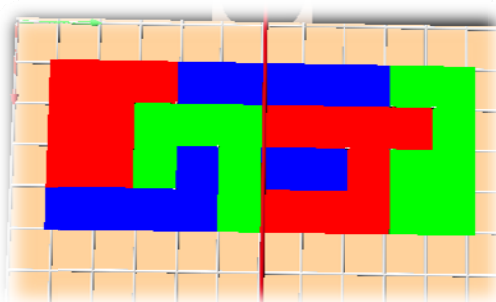
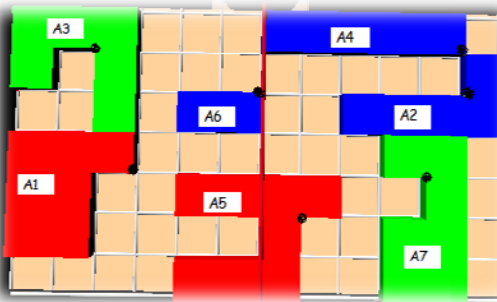


Εικόνα 9.α: Χώρος εργασίας για την άσκηση «cubes»



Εικόνα 9.β: Χώρος εργασίας μετά την επίλυση της άσκησης «cubes»

Ένας σημαντικός τομέας εργασίας των ρομπότ, είναι η συναρμολόγηση αντικειμένων. Σε πολλές περιπτώσεις, κάποια πολύπλοκα αντικείμενα κατασκευάζονται από συναρμολόγηση μικρότερων και απλούστερων αντικειμένων. Αυτός είναι και ο σκοπός αυτής της άσκησης «assemble⁴», η γνωριμία δηλαδή, με την επιλογή των κατάλληλων κινήσεων ώστε να συναρμολογηθεί ένα μεγάλο αντικείμενο από επιμέρους μικρότερα όπως επίσης και να εκμεταλλευτούμε κατά το δυνατό το χώρο εργασίας. Στην εικόνα 10, φαίνονται με μαύρα στίγματα τα σημεία στα οποία πρέπει να τοποθετηθεί η αρπάγη προκειμένου να μπορέσει να συγκρατήσει το κάθε αντικείμενο. Επίσης στην ίδια εικόνα παρουσιάζεται και η τελική μορφολογία των αντικειμένων μετά την συναρμολόγηση.



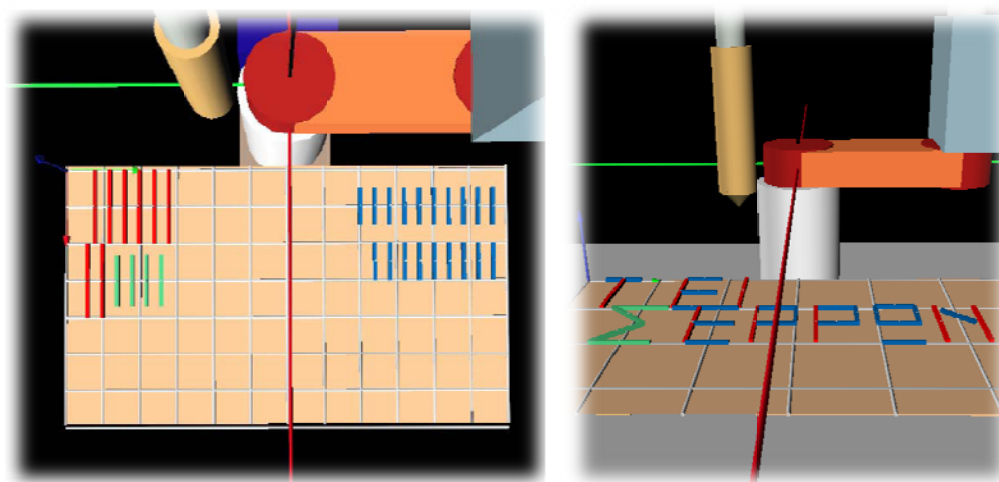
Εικόνα 10.: Χώρος εργασίας πριν και μετά την συναρμολόγηση των αντικειμένων A1, A2,..., A7 της άσκησης «assemble» από τον εικονικό βραχίονα SCARA

³ Για να αρχικοποιηθούν τα αντικείμενα στον πάγκο εργασίας του ρομπότ πρέπει να δώσουμε στο MATLAB την εντολή **spread_cubes**. Ένα ενδεικτικό αρχείο εντολών που λύνει την παραπάνω άσκηση είναι το αρχείο **ask_cubes**, η εκτέλεση του οποίου ενεργοποιεί ακολουθιακά κατάλληλες εντολές προγραμματισμού του βραχίονα.

⁴ Για να αρχικοποιηθούν τα αντικείμενα στον πάγκο εργασίας του ρομπότ πρέπει να δώσουμε στο MATLAB την εντολή **spread_ase**. Ένα ενδεικτικό αρχείο εντολών που λύνει την παραπάνω άσκηση είναι το αρχείο **ask_ase**, η εκτέλεση του οποίου ενεργοποιεί ακολουθιακά κατάλληλες εντολές προγραμματισμού του βραχίονα.

Χάριν απλότητας επιλέξαμε ο αρχικός προσανατολισμός των αντικειμένων κατά την αρχικοποίηση της άσκησης να είναι ίδιος με τον τελικό. Μια πιο δύσκολη πλευρά της άσκησης θα ήταν να κατασκευαστεί ένα script αρχικοποίησης, με τον αρχικό προσανατολισμό του κάθε αντικειμένου διαφορετικό από τον αντίστοιχο τελικό.

Τέλος παρουσιάζεται η άσκηση «tei» κατά την οποία στο χώρο εργασίας έχουν τοποθετηθεί 31 χρωματιστές ράβδοι. Σκοπός της άσκησης είναι η τοποθέτηση των ράβδων σε κατάλληλες θέσεις, ώστε να σχηματιστεί η φράση : ΤΕΙ ΣΕΡΡΩΝ. Αφήνεται στην ευχέρεια του χρήστη να αποφασίσει που επιθυμεί να σχηματίσει τη φράση πάνω στο χώρο εργασίας. Χώρος εργασίας πριν και μετά την συναρμολόγηση της άσκησης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 11, όπως επίσης και ο πίνακας1 με τα αντικείμενα, τις διαστάσεις και τις αρχικές τους θέσεις. Η άσκηση αρχικοποιείται τρέχοντας το script 'spread_tei', ενώ για την επίλυση της τρέχουμε το script 'ask_tei'.



Εικόνα 11.:Χώρος εργασίας πριν και μετά την συναρμολόγηση της άσκησης «tei»

Τα αντικείμενα (ράβδοι) από τα οποία αποτελείται αυτή η άσκηση, αποτελούν εργαλεία για κατασκευή αρκετών ειδών ασκήσεων. Για παράδειγμα θα μπορούσε να κατασκευαστεί μια διαδρομή αποτελούμενη από ευθύγραμμα τμήματα χρησιμοποιώντας τις ράβδους, την οποία θα έπρεπε στη συνέχεια να ακολουθήσει η αρπάγη. Τέλος, μπορεί να ζητηθεί να κατασκευαστεί ένας πύργος με συγκεκριμένο τρόπο, τοποθετώντας τα αντικείμενα το ένα πάνω στο άλλο.

Πίνακας 1: Αντικείμενα που παίρνουν μέρος στην άσκηση 'tei'

Μεγάλες ράβδοι (κόκκινες)				Μικρές ράβδοι (μπλε)			
x-table	y-table	z-table	Μήκος	x-table	y-table	z-table	Μήκος
0.5	0,4	0,05	1	0,5	5,8	0,05	0,5
0.5	0,6	0,05	1	0,5	5,6	0,05	0,5
0.5	0,8	0,05	1	0,5	5,4	0,05	0,5
0.5	1	0,05	1	0,5	5,2	0,05	0,5
0.5	1,2	0,05	1	0,5	5	0,05	0,5
0.5	1,4	0,05	1	0,5	4,8	0,05	0,5
1.5	0,3	0,05	1	0,5	4,6	0,05	0,5
1.5	0,5	0,05	1	0,5	4,4	0,05	0,5

				0,5	4,2	0,05	0,5
				0,5	4	0,05	0,5
				1,5	4	0,05	0,5
				1,5	5,6	0,05	0,5
				1,5	5,4	0,05	0,5
				1,5	5,2	0,05	0,5
				1,5	5	0,05	0,5
				1,5	4,8	0,05	0,5
				1,5	4,6	0,05	0,5
				1,5	4,4	0,05	0,5
				1,5	4,2	0,05	0,5

Παράρτημα Α

Συναρτήσεις χειρισμού του εικονικού βραχίονα

ΓΕΝΙΚΗ Παρατήρηση: Σε όλες τις παραπάνω συναρτήσεις οι επιθυμητές καρτεσιανές συντεταγμένες xd, yd, zd εκφράζονται σε [dm] ενώ ο επιθυμητός προσανατολισμός fd (αναφέρεται ως προς το πλαίσιο του τραπέζιου) σε [deg], εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Επίσης οι τροχιές που παράγονται από τις συναρτήσεις εξαρτώνται από την επιλογή του χρήστη σχετικά με το είδος της τροχιάς (3^{ης} τάξης, 5^{ης} τάξης, παραβολικής μίξης).

Όνομα Συνάρτησης: **movev**

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο τις επιθυμητές τιμές για τις συντεταγμένες και τον προσανατολισμό της αρπάγης ως προς το πλαίσιο **{0}** (**world frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες (point-to-point) τροχιές για τις αρθρώσεις ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML.

Παράδειγμα χρήσης: `movev (xd,yd,zd,fd)`

Όνομα Συνάρτησης: **movews**

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο τις επιθυμητές τιμές για τις συντεταγμένες της αρπάγης ως προς το πλαίσιο **{0}** (**world frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες τροχιές για τις αρθρώσεις ώστε το άκρο να κινηθεί, προς το επιθυμητό σημείο, σε ευθεία τροχιά ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα (για την περίπτωση του scara και του RRR) ενώ η αρπάγη παραμένει πάντα στο ίδιο ύψος με πριν (για την περίπτωση του scara).

Παράδειγμα χρήσης : `movews(xd,yd)`

Όνομα Συνάρτησης: **moveworldx**

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο το επιθυμητό βήμα μετατόπισης επί του άξονα x του πλαισίου **{0}** (**world frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες (point-to-point) τροχιές για τις αρθρώσεις ώστε το άκρο να διαγράψει το επιθυμητό βήμα, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα (για την περίπτωση του scara και του RRR) ενώ η αρπάγη παραμένει πάντα στο ίδιο ύψος με πριν (για την περίπτωση του scara).

Παράδειγμα χρήσης: `moveworldx(step_xd)` ή `moveworldx(-step_xd)`

Παρατήρηση: Η κίνηση της αρπάγης του βραχίονα δεν είναι απαραίτητο να είναι ευθεία.

Όνομα Συνάρτησης: **moveworldy**

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο το επιθυμητό βήμα μετατόπισης επί του άξονα y του πλαισίου $\{0\}$ (**world frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες (point-to-point) τροχιές για τις αρθρώσεις ώστε το άκρο να διαγράψει το επιθυμητό βήμα, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα (για την περίπτωση του scara και του RRR) ενώ η αρπάγη παραμένει πάντα στο ίδιο ύψος με πριν (για την περίπτωση του scara).

Παράδειγμα χρήσης: moveworldy(step_yd) ή moveworldy(-step_yd)

Παρατήρηση: Η κίνηση της αρπάγης του βραχίονα δεν είναι απαραίτητο να είναι ευθεία.

Όνομα Συνάρτησης: moveworldxs

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο το επιθυμητό βήμα μετατόπισης επί του άξονα x του πλαισίου $\{0\}$ (**world frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες τροχιές για τις αρθρώσεις, λύνοντας το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα για κάθε ενδιάμεσο σημείο, ώστε το άκρο να κινηθεί σε ευθεία τροχιά στην διεύθυνση του x -world, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα (για την περίπτωση του scara και του RRR).

Παράδειγμα χρήσης: moveworldxs(step_xd) ή moveworldxs(-step_xd)

Όνομα Συνάρτησης: moveworldys

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο το επιθυμητό βήμα μετατόπισης επί του άξονα y του πλαισίου $\{0\}$ (**world frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες τροχιές για τις αρθρώσεις, λύνοντας το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα για κάθε ενδιάμεσο σημείο, ώστε το άκρο να κινηθεί σε ευθεία τροχιά στην διεύθυνση του y -world, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα (για την περίπτωση του scara και του RRR).

Παράδειγμα χρήσης: moveworldys(step_yd) ή moveworldys(-step_yd)

Όνομα Συνάρτησης: moveworldzs

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο το επιθυμητό βήμα μετατόπισης επί του άξονα z του πλαισίου $\{0\}$ (**world frame**) και επιστρέφει την απαιτούμενη τροχιά για της άρθρωση q_3 ώστε το άκρο να διαγράψει το επιθυμητό βήμα, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML.

Παράδειγμα χρήσης: moveworldzs(step_zd), ή moveworldzs(-step_zd)

Όνομα Συνάρτησης: moveq

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο τις επιθυμητές τιμές για τις αρθρώσεις του βραχίονα και επιστρέφει τις απαιτούμενες τροχιές τους ώστε να μεταβούν από την αρχική τους τιμή στις επιθυμητές.

Παράδειγμα χρήσης: moveq(q1,q2,q3,q4)

Όνομα Συνάρτησης: moveq1

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο την επιθυμητή τιμή για την άρθρωση q1 του βραχίονα και επιστρέφει την απαιτούμενη τροχιά της ώστε να μεταβεί από την αρχική της τιμή στην επιθυμητή, διατηρώντας τις υπόλοιπες σταθερές.

Παράδειγμα χρήσης: moveq1(q1)

Όνομα Συνάρτησης: **moveq2**

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο την επιθυμητή τιμή για την άρθρωση q2 του βραχίονα και επιστρέφει την απαιτούμενη τροχιά της ώστε να μεταβεί από την αρχική της τιμή στην επιθυμητή, διατηρώντας τις υπόλοιπες σταθερές.

Παράδειγμα χρήσης: moveq2(q2)

Όνομα Συνάρτησης: **moveq3**

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο την επιθυμητή τιμή για την άρθρωση q3 του βραχίονα και επιστρέφει την απαιτούμενη τροχιά της ώστε να μεταβεί από την αρχική της τιμή στην επιθυμητή, διατηρώντας τις υπόλοιπες σταθερές.

Παράδειγμα χρήσης: moveq3(q3)

Όνομα Συνάρτησης: **moveq4**

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο την επιθυμητή τιμή για την άρθρωση q4 του βραχίονα και επιστρέφει την απαιτούμενη τροχιά της ώστε να μεταβεί από την αρχική της τιμή στην επιθυμητή, διατηρώντας τις υπόλοιπες σταθερές.

Παράδειγμα χρήσης: moveq4(q4)

Όνομα Συνάρτησης: **movetool**

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο τις επιθυμητές τιμές για τις συντεταγμένες και τον προσανατολισμό όπου απαιτείται, της αρπάγης ως προς το πλαίσιο **{e}** (**tool frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες (point-to-point) τροχιές για τις αρθρώσεις ώστε το άκρο να κινηθεί, προς το επιθυμητό σημείο, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML.

Παράδειγμα χρήσης: movetool(xd,yd,zd,fd)

Όνομα Συνάρτησης: **movetoolx**

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο την επιθυμητή τιμή για την τετμημένη επί του άξονα x του πλαισίου **{e}** (**tool frame**) στην οποία βρίσκεται το επιθυμητό σημείο και

επιστρέφει τις απαιτούμενες (point-to-point) τροχιές για τις αρθρώσεις ώστε το άκρο να φτάσει εκεί, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML.

Παράδειγμα χρήσης: movetoolx(xd)

Παρατήρηση: Η κίνηση της αρπάγης του βραχίονα δεν είναι απαραίτητο να είναι ευθεία.

Όνομα Συνάρτησης: movetooly

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο την επιθυμητή τιμή για την τεταγμένη επί του άξονα y του πλαισίου **{e} (tool frame)** στην οποία βρίσκεται το επιθυμητό σημείο και επιστρέφει τις απαιτούμενες (point-to-point) τροχιές για τις αρθρώσεις ώστε το άκρο να φτάσει εκεί, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML.

Παράδειγμα χρήσης: movetooly(yd)

Παρατήρηση: Η κίνηση της αρπάγης του βραχίονα δεν είναι απαραίτητο να είναι ευθεία.

Όνομα Συνάρτησης: movetools

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο τις επιθυμητές τιμές για τις συντεταγμένες της αρπάγης ως προς το πλαίσιο **{e} (tool frame)** και επιστρέφει τις απαιτούμενες τροχιές για τις αρθρώσεις ώστε το άκρο να κινηθεί, προς το επιθυμητό σημείο, σε ευθεία τροχιά ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα (για την περίπτωση του scara και του RRR) ενώ η αρπάγη παραμένει πάντα στο ίδιο ύψος με πριν (για την περίπτωση του scara).

Παράδειγμα χρήσης: movetools(xd,yd)

Όνομα Συνάρτησης: movetoolxs

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο την επιθυμητή τεταγμένη πάνω στον άξονα x του πλαισίου **{e} (tool frame)** και επιστρέφει τις απαιτούμενες τροχιές για τις αρθρώσεις, λύνοντας το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα για κάθε ενδιάμεσο σημείο, ώστε το άκρο να κινηθεί σε ευθεία τροχιά στην διεύθυνση του x-tool, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα (για την περίπτωση του scara και του RRR).

Παράδειγμα χρήσης: movetoolxs(xd)

Όνομα Συνάρτησης: movetoolys

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο την επιθυμητή τεταγμένη πάνω στον άξονα y του πλαισίου **{e} (tool frame)** και επιστρέφει τις απαιτούμενες τροχιές για τις αρθρώσεις, λύνοντας το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα για κάθε ενδιάμεσο σημείο, ώστε το άκρο να κινηθεί σε ευθεία τροχιά στην διεύθυνση του y-tool, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα (για την περίπτωση του scara και του RRR).

Παράδειγμα χρήσης: movetoolys(yd)

Όνομα Συνάρτησης: movetoolzs

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο την κατηγορημένη επί του άξονα z του πλαισίου {e} (**tool frame**) στην οποία βρίσκεται το επιθυμητό σημείο και επιστρέφει τις απαιτούμενες τροχιές για τις αρθρώσεις ώστε το άκρο να φτάσει εκεί, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML.

Παράδειγμα χρήσης: movetoolzs(zd)

Όνομα Συνάρτησης: movetable

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο τις επιθυμητές τιμές για τις συντεταγμένες και τον προσανατολισμό της αρπάγης ως προς το πλαίσιο {T} (**table frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες (point-to-point) τροχιές για τις αρθρώσεις ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML.

Παράδειγμα χρήσης: movetable(xd,yd,zd,fd)

Όνομα Συνάρτησης: movetablex

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο το επιθυμητό βήμα μετατόπισης επί του άξονα x του πλαισίου {T} (**table frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες (point-to-point) τροχιές για τις αρθρώσεις ώστε το άκρο να διαγράψει το επιθυμητό βήμα, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται τόσο ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα, όσο και το y που έχει πριν ξεκινήσει, ενώ η αρπάγη παραμένει πάντα στο ίδιο ύψος με πριν.

Παράδειγμα χρήσης: movetablex(step_xd) ή movetablex(-step_xd)

Παρατήρηση: Η κίνηση της αρπάγης του βραχίονα δεν είναι απαραίτητο να είναι ευθεία.

Όνομα Συνάρτησης: movetabley

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο το επιθυμητό βήμα μετατόπισης επί του άξονα y του πλαισίου {T} (**table frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες (point-to-point) τροχιές για τις αρθρώσεις ώστε το άκρο να διαγράψει το επιθυμητό βήμα, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται τόσο ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα, όσο και το x που έχει πριν ξεκινήσει, ενώ η αρπάγη παραμένει πάντα στο ίδιο ύψος με πριν.

Παράδειγμα χρήσης: movetabley(step_yd) ή movetabley(-step_yd)

Παρατήρηση: Η κίνηση της αρπάγης του βραχίονα δεν είναι απαραίτητο να είναι ευθεία.

Όνομα Συνάρτησης: movetablexs

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο το επιθυμητό βήμα μετατόπισης που πρέπει να διανύσει η αρπάγη πάνω στον άξονα x του πλαισίου **{T}** (**table frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες τροχιές για τις αρθρώσεις, λύνοντας το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα για κάθε ενδιαμέσο σημείο, ώστε το άκρο να κινηθεί σε ευθεία τροχιά στην διεύθυνση του x-table ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται τόσο ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα, όσο και το y που έχει πριν ξεκινήσει.

Παράδειγμα χρήσης: movetablexs(step_xd) ή movetablexs(-step_xd)

Όνομα Συνάρτησης: movetableys

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο το επιθυμητό βήμα μετατόπισης που πρέπει να διανύσει η αρπάγη πάνω στον άξονα y του πλαισίου **{T}** (**table frame**) και επιστρέφει τις απαιτούμενες τροχιές για τις αρθρώσεις, λύνοντας το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα για κάθε ενδιαμέσο σημείο, ώστε το άκρο να κινηθεί σε ευθεία τροχιά στην διεύθυνση του y-table ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML. Επίσης κατά την κίνηση διατηρείται τόσο ο ήδη υπάρχων προσανατολισμός του βραχίονα, όσο και το x που έχει πριν ξεκινήσει.

Παράδειγμα χρήσης: movetableys(step_yd) ή movetableys(-step_yd)

Όνομα Συνάρτησης: movetablezs

Τρόπος λειτουργίας: Παίρνει σαν είσοδο το επιθυμητό βήμα μετατόπισης που πρέπει να διανύσει η αρπάγη επί του άξονα z του πλαισίου **{T}** (**table frame**) και επιστρέφει την απαιτούμενη τροχιά κίνησης για την άρθρωση q3 ώστε το άκρο να φτάσει εκεί, ενώ απεικονίζει παράλληλα την κίνηση του βραχίονα στο VRML.

Παράδειγμα χρήσης: movetablezs(step_zd) ή movetablezs(-step_zd)

Όνομα Συνάρτησης: ready

Τρόπος λειτουργίας: Όταν κληθεί η συνάρτηση, από όποιο σημείο βρίσκεται ο βραχίονας, επιστρέφει στη θέση παρκαρίσματος. Τη θέση δηλαδή, στην οποία όλες οι αρθρώσεις του έχουν τιμή 0, ($q_1=q_2=q_3=q_4=0$).

Όνομα Συνάρτησης: grasp – leave

Τρόπος λειτουργίας: Εντολές εμπλοκής-απεμπλοκής της αρπάγης. Η εντολή grasp συγκρίνει τις αποστάσεις όλων των αντικειμένων από την τρέχουσα θέση της αρπάγης, και συλλαμβάνει το κοντινότερο. Η εντολή leave απεμπλέκει όποιο αντικείμενο είναι στην αρπάγη, την στιγμή της κλήσης της.

Παρατήρηση: Οι εντολές λειτουργούν μόνο στον βραχίονα SCARA.

Όνομα Συνάρτησης: `pause`

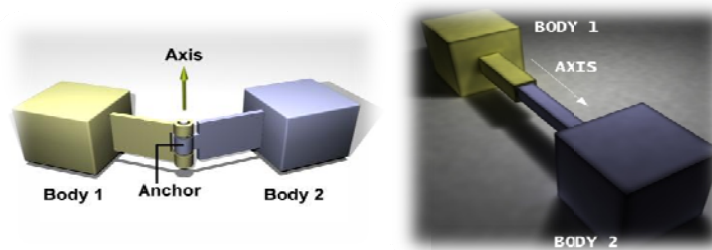
Τρόπος λειτουργίας: Είναι εσωτερική συνάρτηση του matlab. Δημιουργεί μια παύση του κώδικα που εκτελείται, στο σημείο που καλείται, και για χρονικό διάστημα όσο το όρισμά της σε δευτερόλεπτα.

Παράδειγμα γενικής χρήσης: `pause(0.5)`

Παράρτημα Β

Βασικές γνώσεις κινηματικής και τροχιών

Τα ρομπότ αποτελούνται από συνδέσμους, οι οποίοι κινούνται από αρθρώσεις. Υπάρχουν δύο βασικά είδη αρθρώσεων (σχήμα Β.1), οι περιστροφικές και οι πρισματικές. Μια περιστροφική άρθρωση μεταβάλλει την περιεχόμενη γωνία των δύο εκατέρωθεν συνδέσμων της, ενώ μια πρισματική άρθρωση αλλάζει το μήκος του συνδέσμου στον οποίο είναι προσαρμοσμένη.



Β.1: Περιστροφική και πρισματική άρθρωση

Βασικό γνώρισμα κάθε ρομπότ αποτελεί ο Βαθμός Ελευθερίας (Degree Of Freedom – DOF) του. Σε γενικές γραμμές δηλώνει το πόσο ευκίνητο είναι ένα ρομπότ στο χώρο. Συνήθως, κάθε ανεξάρτητα κινούμενη άρθρωση προσθέτει ένα βαθμό ελευθερίας στο ρομπότ. Οι παραπάνω αρθρώσεις έχουν από έναν βαθμό ελευθερίας.

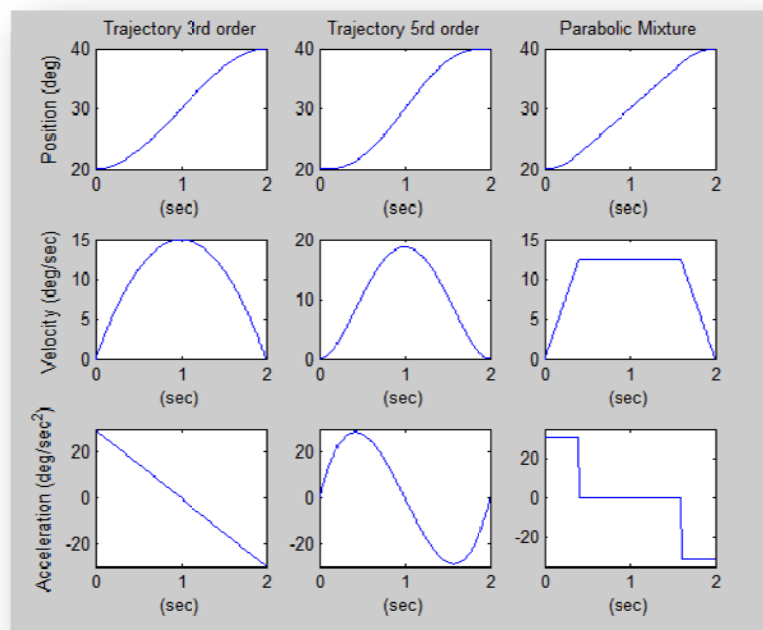
Για να περιγράψουμε ακριβώς τη θέση ενός στερεού σώματος στο χώρο, χρειαζόμαστε 6 μεταβλητές, 3 για την θέση και 3 για τον προσανατολισμό του. Άρα, σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, για να μπορεί ένα ρομπότ να κινηθεί οπουδήποτε στο χώρο με οποιοδήποτε προσανατολισμό, πρέπει να έχει το πολύ 6 βαθμούς ελευθερίας.

Οι δυνατές τιμές των αρθρώσεων καθώς, το είδος τους, και το μέγεθος των συνδέσμων, είναι τα στοιχεία που καθορίζουν το χώρο εργασίας του ρομπότ, στον οποίο ανήκουν όλα τα σημεία στα οποία μπορεί να φτάσει το άκρο του ρομπότ. Οι δυνατές τιμές των αρθρώσεων καθώς και το είδος τους, και το μέγεθος των συνδέσμων, είναι τα στοιχεία που καθορίζουν το χώρο εργασίας του ρομπότ, στον οποίο ανήκουν όλα τα σημεία στα οποία μπορεί να φτάσει το άκρο του ρομπότ. Τα παραπάνω αποτελούν στατικά χαρακτηριστικά ενός ρομποτικού βραχίονα. Προκειμένου να αναλύσουμε τις δυνατές κινήσεις ενός ρομπότ, θα πρέπει να ασχοληθούμε με την κινηματική ανάλυση.

Η Κινηματική ανάλυση ενός βραχίονα αφορά της επίλυση δύο προβλημάτων που ονομάζονται ευθύ και αντίστροφο κινηματικό. Στην κινηματική μελέτη ασχολούμαστε με τις κινήσεις, χωρίς δυνάμεις και μάζες. Το ευθύ κινηματικό πρόβλημα ασχολείται με την εύρεση της θέσης και του προσανατολισμού του άκρου του βραχίονα, όταν γνωρίζουμε την

τιμή της κάθε άρθρωσης, ενώ το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα αναφέρεται στην εύρεση της τιμής για κάθε άρθρωση, προκειμένου να τοποθετηθεί το άκρο σε μια επιθυμητή θέση και προσανατολισμό, σε σχέση με τη βάση του.

Για να πραγματοποιηθεί μια κίνηση ενός βραχίονα, θα πρέπει πρωτίστως να έχει υπολογιστεί μια τροχιά, η οποία θα περιλαμβάνει τις τιμές των αρθρώσεων του βραχίονα, συναρτήσει του χρόνου. Έτσι βάσει ορισμένων αλγορίθμων δημιουργούνται ορισμένα πολυώνυμα, από τα οποία τελικά εξάγονται οι τροχιές των αρθρώσεων. Γενικά αν θέλουμε να ελέγξουμε μόνο την ταχύτητα των αρθρώσεων κατά την κίνηση χρησιμοποιούμε πολυωνυμική τροχιά 3ης τάξης, ενώ αν θέλουμε να ελέγξουμε και την επιτάχυνση των αρθρώσεων χρησιμοποιήσουμε πολυωνυμική τροχιά 5ης τάξης. Τέλος, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την τροχιά παραβολικής μείξης κατά την οποία η κάθε άρθρωση επιταχύνει, με σταθερή επιτάχυνση, μέχρι μια επιθυμητή τιμή ταχύτητας στην συνέχεια διατηρεί την ταχύτητά της σταθερή, μέχρι να ξεκινήσει να επιβραδύνει σταθερά ώσπου να τελειώσει την κίνησή της. Η παραβολική μείξη δημιουργεί τη λιγότερη καταπόνηση στις αρθρώσεις, επομένως είναι και η προτιμότερη κίνηση στα πραγματικά ρομπότ. Στο παρακάτω σχήμα B.2 δίνονται τα προφίλ θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης για τα παραπάνω είδη κινήσεων.



Σχήμα B.2: Προφίλ θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης για πολυωνυμική τροχιά 3^{ης} και 5^{ης} τάξης όπως επίσης και παραβολικής μίξης.