

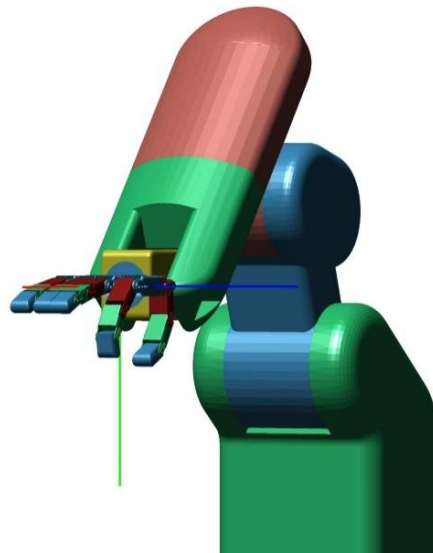
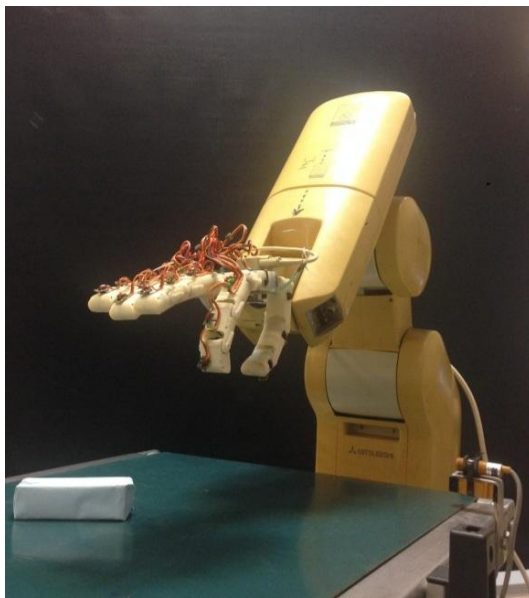


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υλοποίηση συναρτήσεων ελέγχου ρομποτικού συστήματος
αποτελούμενου από βιομηχανικού τύπου ρομποτικό χειριστή
και ανθρωπόμορφη αρπάγη λαβής αντικειμένων μέσω του
προγράμματος MATLAB



ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ(Α.Μ. 5059)

Επιβλέπων

Δρ. Φασουλάς Ιωάννης
Επίκουρος Καθηγητής

ΗΡΑΚΛΕΙΟ
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2016

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, ειλικρινά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Φασουλά Ιωάννη, για την βοήθεια του και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης με την ευκαιρία ολοκλήρωσης των σπουδών μου θα ήθελα να ευχαριστήσω οικογένεια και φίλους, για την υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η ανάπτυξη επιδέξιων ρομποτικών χεριών, με στόχο την χρήση τους είτε ως προσθετικά μέλη είτε την ενσωμάτωσή τους σε ρομποτικά συστήματα είναι ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα με πάρα πολλές ερευνητικές προκλήσεις, κάτι το οποίο διαφαίνεται και από την προσπάθεια που πραγματοποιείται σε αυτόν τον τομέα από πολλά ερευνητικά ιδρύματα του εξωτερικού.

Στο εργαστήριο ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης γίνεται μια προσπάθεια για την ανάπτυξη επιδέξιων ρομποτικών χεριών, διερευνώντας σε θεωρητικό αλλά και σε πειραματικό επίπεδο, κατάλληλοι νόμοι ελέγχου για τη λαβή και τον επιδέξιο χειρισμό αντικειμένων από ρομποτικά δάχτυλα. Στα πλαίσια της έρευνας που πραγματοποιείται, έχει κατασκευαστεί ένα *πρότυπο ανθρωπομορφικό ρομποτικό χέρι το TALOS-hand*, με σκοπό τη πειραματική εξέταση των νόμων λαβής, ενώ εμφανίζεται η ανάγκη δημιουργίας μίας ολοκληρωμένης πειραματικής διάταξης που θα μιμείται την κινητικότητα του ανθρώπινου άνω άκρου κατά την διάρκεια της λαβής, προκειμένου να εξεταστούν προβλήματα ευστάθειας της λαβής αντικειμένων από το ρομποτικό χέρι.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η υλοποίηση της διάταξης, η οποία αποτελεί ενοποίηση δύο ρομποτικών συστημάτων, του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού TALOS-hand και του ρομποτικού βραχίονα Mitsubishi RV2A του εργαστηρίου, το ρομποτικό χέρι συνδέεται ως τελικό στοιχείο δράσης για το ρομποτικό σύστημα. Δεδομένης της ανάγκης για ευελιξία στο χειρισμό του ενοποιημένου συστήματος κατά την πραγματοποίηση πειραμάτων, απαιτείται η ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου το οποίο θα παρέχει την δυνατότητα άμεσου χειρισμού ή και την ικανότητα αυτόνομης λειτουργίας, όπου τα δύο ρομποτικά συστήματα θα λειτουργούν σε πλήρη συνεργασία. Επιλέχθηκε το περιβάλλον του matlab στο οποίο αναπτύχθηκαν κατάλληλες συναρτήσεις για τον έλεγχο του συστήματος.

Οι συναρτήσεις που υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον του matlab αφορούν την επίλυση των κινηματικών προβλημάτων των δύο ρομποτικών συστημάτων, τον χειρισμό καθώς και την ανάπτυξη εικονικού περιβάλλοντος προσομοίωσης τους.

Abstract

The subject of this thesis is the implementation of the set-up, which consolidates two robotic systems, the anthropomorphic robot hand - TALOS-hand and the robotic arm Mitsubishi RV2A that exists in the robotics's laboratory, the robotic arm is connected as an end effector for the robotic system. Given the need for flexibility in the management of the unified system during the experimentations, the development of a control system is needed which is going to enable a direct operation or/and an autonomous operation, where the two robotic systems will operate in full cooperation. We chose the matlab environment where appropriate functions were developed in order to inspect the system.

The functions that performed in the matlab's environment are about the solution of the kinematic problems of both robotic systems, the handling as well as the development of a virtual simulation environment for them.

Πίνακας Περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Κίνητρα και σκοπός	1
1.2	Πειραματικές διατάξεις Βραχίονα χεριού	2
1.2.1	Πειραματική διάταξη BROWN UNIVERSITY, Institute for brain Science.....	2
1.2.2	Πειραματική διάταξη DARPA & University of Pittsburgh	3
1.2.3	Πειραματική διάταξη DARPA & Swiss federak Institute of technology.....	3
1.3	ΣΥΝΟΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	4
2	ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ	
RV2A.....	6
2.1	Εισαγωγή	6
2.2	Βασικά χαρακτηριστικά του βραχίονα.....	6
2.3	Βασικές έννοιες κινηματικής.....	7
2.4	Περιγραφή βασικών συστημάτων συντεταγμένων ρομπότ και περιβάλλοντος – επώνυμα πλαίσια.....	8
2.4.1	Το Πλαίσιο Βάσης του ρομπότ {B}.....	8
2.4.2	Το Πλαίσιο της Φλάντζας του ρομπότ {F}	9
2.4.3	Το Αδρανειακό Πλαίσιο του Κόσμου {W}	9
2.4.4	Το Πλαίσιο Τελικού Στοιχείου δράσης του ρομπότ - TOOL {T}	10
2.5	Κινηματική μοντελοποίηση ρομποτικού βραχίονα.....	10
2.5.1	Συνοπτική περιγραφή τροποποιημένης μεθόδου Denavit & Hartenberg (DHmdf) .	10
2.5.2	Εξαγωγή παραμέτρων για το Ρομποτικό βραχίονα RV2A.....	12
2.5.3	Καρπός Ρομποτικού βραχίονα-(πλαίσιο wrist)	13
2.5.4	Μήκος τελευταίου συνδέσμου-πλαίσιο φλάντζας	13
2.6	Γωνίες αρθρώσεων πραγματικού χειριστή	14
2.7	Ευθύ κινηματική ανάλυση	15
2.8	Αντίστροφη κινηματική ανάλυση	16
2.8.1	Υπολογισμός τοποθέτησης καρπού σχετικά της βάσης	17
2.8.2	Αντίστροφο Κινηματικό πρόβλημα θέσης καρπού	17
2.8.3	Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα προσανατολισμού καρπού	20
2.9	Αναγωγή γωνιών του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος σε γωνίες του πραγματικού βραχίονα RV2A	22
2.10	Χαρακτηρισμός λύσεων	22
2.11	Σύνοψη κεφαλαίου	24

3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ RV2A ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ MELFA BASIC IV26

3.1	Εισαγωγή	26
3.2	Controller-Teach pendant	26
3.3	Περιγραφή της γλώσσας MELFA BASIC IV	27
3.3.1	COSIROP	27
3.3.2	Περιγραφή Μετασχηματισμών συντεταγμένων και καταχώρηση στον ελεκτή	28
3.3.3	Συντεταγμένες στο χώρο των αρθρώσεων	28
3.3.4	Προσδιορισμός πλαισίου Κόσμου	28
3.3.5	Προσδιορισμός πλαισίου εργαλείου	29
3.3.6	Τοποθέτηση τελικού στοιχείου δράσης στο χώρο και διαμόρφωση του βραχίονα	29
3.3.7	Κινήσεις Ρομποτικού βραχίονα	30
3.3.8	Κίνηση γραμμικής παρεμβολής στο καρτεσιανό χώρο	30
3.3.9	Κίνηση ελεύθερης παρεμβολής στο καρτεσιανό χώρο	30
3.3.10	Κινήσεις κυκλικής παρεμβολής	31
3.3.11	Σχετικές κινήσεις	32
3.3.12	Εντολές παραμέτρων κίνησης	32
3.3.13	Εντολές Ελέγχου Λειτουργίας	33
3.4	Παράδειγμα τυπικής λειτουργίας	33
3.5	Συγκεντρωτικοί πίνακες Εντολών	34

4 Χειρισμός του ρομποτικού βραχίονα RV-2A από το περιβάλλον του matlab.....36

4.1	Εισαγωγή	36
4.2	Συναρτήσεις κινηματικής	36
4.2.1	Συνάρτηση επίλυσης ευθέως κινηματικού	36
4.2.2	Συνάρτηση επίλυσης αντίστροφου κινηματικού	38
4.3	Συναρτήσεις Ελέγχου Ρομποτικού βραχίονα	38
4.3.1	Συναρτήσεις προσδιορισμού κατάστασης λειτουργίας ρομποτικού βραχίονα	39
	OPENCOM_RV2A	39
	CLOSECOM_RV2A	39
	CNT	39
	SERVO	39
	STOP	39
4.3.2	Καταχώρηση συντεταγμένων	40
	SETPOSITION	40
	SETJOINTSVAL	41

4.3.3	Προσδιορισμός Πλαισίων Κόσμου – Τελικού στοιχείου δράσης	41
	BASE/TOOL	41
4.3.4	Συναρτήσεις κίνησης	42
	Καρτεσιανές κινήσεις	42
	Κίνηση των αρθρώσεων	42
	Κίνηση αναφορικά πλαισίου TOOL	42
	Παραμετροποίηση κίνησης	43
4.3.5	Συναρτήσεις Ερωτημάτων	43
	GETSTATE	43
	GETPOSITION	44
	GETPOSITION_FLAG1	44
	GETJOINTSVAL	44
4.4	Ειδικές οδηγίες εντολών	45
4.4.1	Χρήση της εντολής GETSTATE	45
4.4.2	Χρήση της εντολής STOP	45
4.4.3	Ειδικές Χρήσεις των συναρτήσεων κίνησης	46
4.5	Παράδειγμα τυπικής λειτουργίας	46
4.6	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ	47
5	ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ TALOS ΚΑΙ ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ MATLAB	48
5.1	Εισαγωγή	48
5.2	Κινηματική Ανάλυση Ρομποτικού Χεριού	49
5.2.1	Καθορισμός κοινού πλαισίου αναφοράς χεριού	49
5.2.2	Κινηματική μοντελοποίηση δακτύλων	50
5.2.3	Προσδιορισμός μετασχηματισμών που περιγράφουν τις βάσεις των δακτύλων ως προς το κοινό πλαίσιο αναφοράς της παλάμης	52
5.3	Ευθύ κινηματική ανάλυση δακτύλων	53
5.4	Αντίστροφη κινηματική ανάλυση δακτύλων	54
5.5	Χαρακτηρισμός γεωμετρικής διαμόρφωσης δακτύλου	56
5.6	Συναρτήσεις επίλυσης κινηματικής του ρομποτικού χεριού στο περιβάλλον του matlab57	
5.6.1	Συνάρτηση επίλυσης ευθέως κινηματικού	57
5.6.2	Συνάρτηση επίλυσης αντίστροφου κινηματικού χεριού	59
5.7	Έλεγχος ρομποτικού χεριού	60
5.7.1	Servos	61
5.7.2	Servo controller ssc-32	62
5.7.3	Τροφοδοσία ssc-32	62

5.7.4	Σύνδεση RC servosj.....	62
5.7.5	Σειριακή επικοινωνία	63
5.7.6	Σύνταξη εντολών	63
5.7.7	Βαθμονόμηση servos-CALIBRATION SERVOS PULSE.....	64
5.7.8	Έλεγχος ssc-32 – matlab	65
5.8	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ	66
6 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΙΡΙΣΤΗ ΜΑΖΙ ΜΕ ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΗ ΑΡΠΑΓΗ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ MATLAB.....		
6.1	Εισαγωγή	67
6.2	Τοποθέτηση χεριού στο ρομποτικό βραχίονα	68
6.3	Τοποθέτηση του χεριού στο χώρο / ρομποτικό χέρι ως τελικό στοιχείο δράσης	68
6.3.1	Απεικόνιση του Συστήματος στο περιβάλλον του matlab	69
6.4	Σύγκριση εικονικού μοντέλου προσομοίωσης και πραγματικής διάταξης	70
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	72
7.1	Συμπεράσματα.....	72
7.2	Προτάσεις	72
Βιβλιογραφία		73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Αλγεβρική επίλυση του αντίστροφου κινηματικού για τα δάχτυλα του ρομποτικού χεριού.		74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Δόμηση Αρχείου RV2A.mat.....		79

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κίνητρα και σκοπός

Η τεχνολογική έξαρση των τελευταίων ετών έκανε τα ρομποτικά συστήματα να δραπέτεύσουν από το δομημένο περιβάλλον της βιομηχανίας και να βρουν πλήθος εφαρμογών στην καθημερινότητα μας, οι εφαρμογές συνεχώς εξαπλώνονται με σκοπό να ικανοποιήσει τις ανάγκες εργασίας, παραγωγής, υγείας και ευημερίας του ανθρώπου. Είδη από την δεκαετία του 1980 μηχανικοί και επιστήμονες πραγματοποιούν έρευνα για την ανάπτυξη επιδέξιων ρομποτικών συστημάτων με στόχο να αντικαθιστούν ή υποβοηθούν τον άνθρωπο σε ένα σύνολο εργασιών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την ποικιλομορφία τους και από υψηλό βαθμό αβεβαιότητας ως προς την συμπεριφορά τους.

Ένα δυναμικό τομέα έρευνας του κλάδου της ρομποτικής αποτελεί η ανάπτυξη επιδέξιων ρομποτικών χεριών, ένα ρομποτικό χέρι είναι ηλεκτρομηχανικό σύστημα, το οποίο απαρτίζεται από διαφορά μέρη με σκοπό να προσεγγίσει την κινηματική δομή του πραγματικού χεριού. Τα ρομποτικά χέρια βρίσκουν εφαρμογή είτε ως εξειδικευμένες αρπάγες σε ρομποτικά συστήματα είτε ως προσθετικά μέλη.

Οι χρήσεις των ρομποτικών χεριών φέρνουν στο προσκήνιο την ανάγκη λαβής και χειρισμού αντικειμένων με τρόπο ιδανικά όμοιο με αυτόν ενός ανθρώπου, όμως κατά την λειτουργία σε ένα δυναμικό περιβάλλον εργασίας και το χειρισμό ενός πλήθους διαφορετικών αντικειμένων μη δεδομένης γεωμετρίας, απαιτείται το ρομποτικό χέρι να προσαρμόζεται δυναμικά με σκοπό την επιτυχία της επιτελούμενης ενέργειας, αυτό είναι και το χαρακτηριστικό που προσδίδει στο ρομποτικό χέρι την επιδεξιότητα. Κύριο συστατικό της επιδεξιότητας αποτελεί η ικανότητα απόσπασης πληροφοριών από το περιβάλλον δράσης, απαιτείται η ανάπτυξη νόμων ελέγχου βασισμένη σε δυναμική τροφοδότηση πληροφοριών από συστήματα αισθητήρων, η απόκτηση γνώσης συμβάλει στη μείωση του βαθμού αβεβαιότητας για την εκτέλεση της απαιτούμενης ενέργειας.

Η πειραματική εξέταση των νόμων ελέγχου για τον επιδέξιο χειρισμό των ρομποτικών χεριών, εμφανίζει την ανάγκη δημιουργίας ολοκληρωμένων ρομποτικών διατάξεων με χαρακτηριστικά ώμου αγκώνα και χεριού. Σκοπός τους η μίμηση/προσέγγιση της κινητικότητας του άνω άκρου κατά την διάρκεια της λαβής, αφού όπως εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς ο βραχίονας εκτός της προσέγγισης του αντικειμένου λαμβάνει σημαντικό ρόλο και κατά την διάρκεια της λαβής. Στο μεγαλύτερο πλήθος των λαβών, τα δάκτυλα ακολουθούν συγκεκριμένη τροχιά και ο βραχίονας του χεριού είναι αυτός που ρυθμίζει την τελική τοποθέτηση στο αντικείμενο. Επιπρόσθετα η κίνηση του βραχίονα για την μετακίνηση των αντικειμένων είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην δημιουργία του

δυναμικού περιβάλλοντος της λαβής, δεδομένων των αδρανειακών δυνάμεων που δημιουργεί.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο έλεγχος μίας ολοκληρωμένης διάταξης βραχίονα-χεριού, η οποία αποτελεί ενοποίηση δύο ρομποτικών συστημάτων, του ανθρωπομορφικού ρομποτικού χεριού TALOS-hand και του ρομποτικού βραχίονα Mitsubishi RV2A του εργαστηρίου, το ρομποτικό χέρι *συνδέεται ως τελικό στοιχείο δράσης* για το ρομποτικό σύστημα. Δεδομένης της ανάγκης για ευελιξία στο χειρισμό του ενοποιημένου συστήματος κατά την πραγματοποίηση πειραμάτων, απαιτείται η ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου το οποίο θα παρέχει την δυνατότητα άμεσου χειρισμού ή και την ικανότητα αυτόνομης λειτουργίας, όπου τα δύο ρομποτικά συστήματα θα λειτουργούν σε πλήρη συνεργασία, με δυνατότητα μεταβολής της ενέργειας που πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο.

Οι συμβατικές μέθοδοι χειρισμού(προγραμματισμός) των ρομποτικών συστημάτων σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αρκετά σύνθετες, αφού ο χρήστης θα πρέπει να προβλέψει για ένα πλήθος πιθανών καταστάσεων κατά την λειτουργία και να τις αναλύσει προγραμματιστικά σ' ένα σύνολο εντολών.

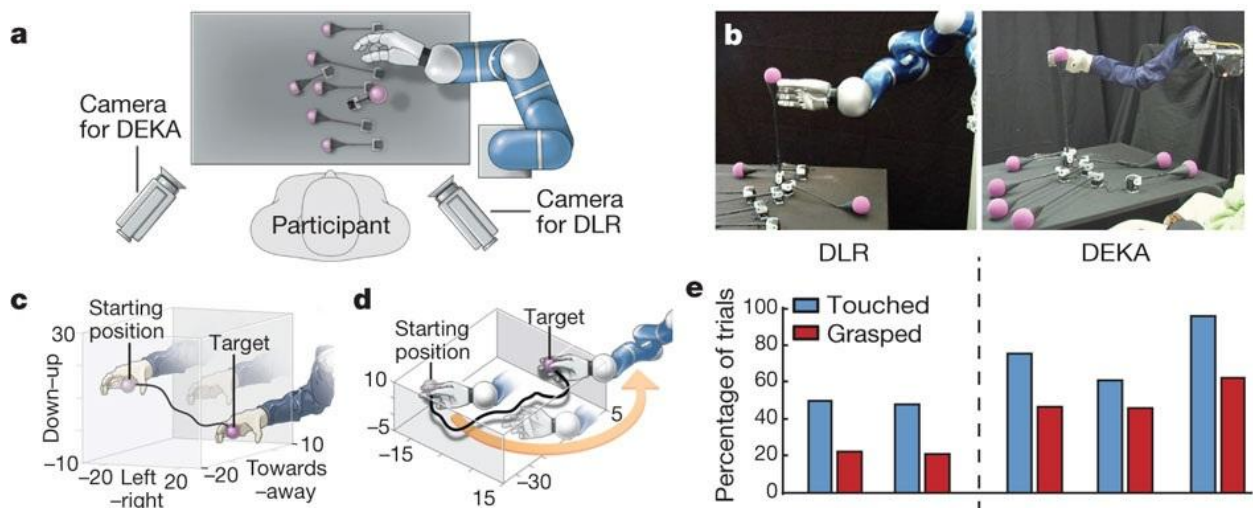
Επιλέχθηκε η πλατφόρμα του matlab στην οποία αναπτύχθηκαν κατάλληλες συναρτήσεις για τον έλεγχο των δύο ρομποτικών συστημάτων, με σκοπό να απλουστεύσουν την διαδικασία χειρισμού κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Δεδομένης της ευελιξίας που παρέχει η πλατφόρμα του matlab δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της πειραματικής διάταξης, βασισμένη σε θεωρητικούς αλγορίθμους των νόμων λαβής ή και σε συνεργασία με πληροφορίες από δυναμική ανατροφοδότηση αισθητήρων και ειδικά σε συστήματα μηχανικής όρασης. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα συλλογής δεδομένων κρίσιμων για την αποτίμηση των νόμων ελέγχου λαβής.

1.2 Πειραματικές διατάξεις Βραχίονα χεριού

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος πειραματικών διατάξεων που μιμούνται την κινητικότητα του άνω άκρου με σκοπό να εξεταστούν διάφοροι παράμετροι που αφορούν την λειτουργία αυτών των διατάξεων, ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω τρεις με συμπαγτικά ερευνητικά αποτελέσματα.

1.2.1 Πειραματική διάταξη BROWN UNIVERSITY, Institute for brain Science

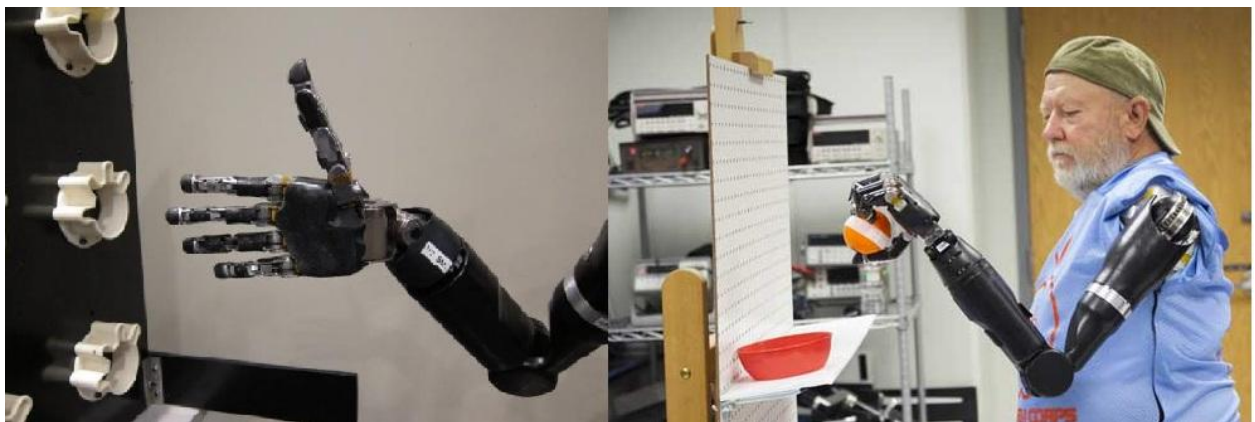
Το ινστιτούτο για της επιστήμες του εγκεφάλου του Brown University, στα πλαίσια της έρευνας που πραγματοποιεί για τον χειρισμό ρομποτικών μελών με τη σκέψη (BrainGate2) , έχει υλοποιήσει πειράματα λαβής αντικειμένων με χρήση σημάτων από νευρώνες στον κινητικό φλοιό του εγκεφάλου. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δυο ενοποιημένες ρομποτικές διατάξεις βραχίονα-χεριού, το DLR ARM και το DEKA ARM System.



Εικόνα 1.1 Brown University (DLR Arm / Deka Arm)

1.2.2 Πειραματική διάταξη DARPA & University of Pittsburgh

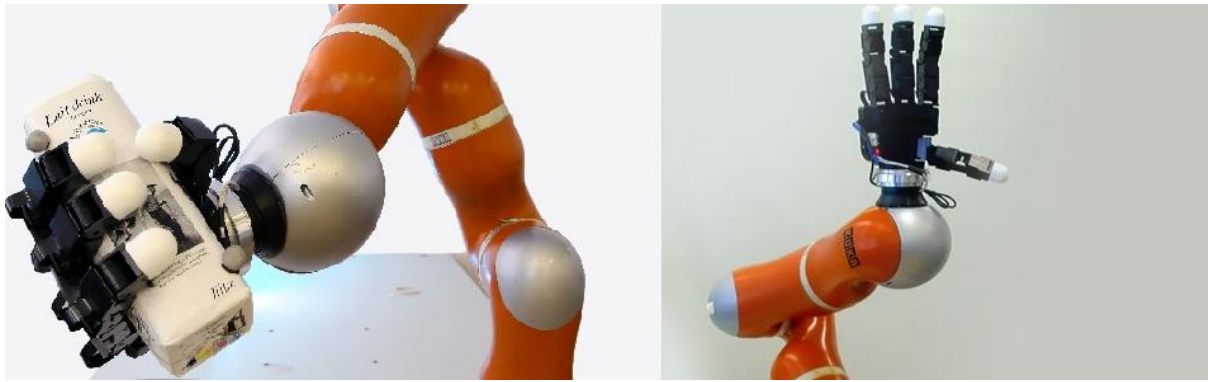
Αντίστοιχη έρευνα πραγματοποιείται και στο University of Pittsburgh Medical Center σε συνεργασία με τη DARPA, στα πειράματα που πραγματοποιούνται χρησιμοποιούνται οι διατάξεις που έχει αναπτύξει η DARPA και ο έλεγχος είναι βασισμένος σε ερεθίσματα από την μυϊκή δραστηριότητα και την δραστηριότητα του εγκεφάλου.



Εικόνα 1.2 Πειραματική διάταξη University of Pittsburgh

1.2.3 Πειραματική διάταξη DARPA & Swiss federal Institute of technology

Ερευνητές του Εργαστηρίου Αλγορίθμων εκμάθησης της Σχολή μηχανικής του Ομοσπονδιακού Πολυτεχνείου της Λοζάνης (EPFL) σε συνεργασία με την DARPA, πραγματοποιούν δοκιμές λαβής κινούμενων αντικειμένων από αυτόνομα ρομποτικό σύστημα βραχίονα-Χεριού βασισμένο σε σύστημα μηχανικής όρασης, το σύστημα έχει αναπτυχθεί από DEKA ARM Systems και περιλαμβάνει ένα ανθρωπομορφικό ρομποτικό βραχίονα και ένα ρομποτικό χέρι τεσσάρων δακτύλων.



Εικόνα 1.3 Πειραματική διάταξη Swiss federak Institute of technology – Ultra fast robot arm

1.3 ΣΥΝΟΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Για τον έλεγχο της διάταξης βραχίονα – χεριού μέσα από το περιβάλλον του matlab κατά τη διάρκεια των πειραμάτων λαβής, απαιτείται η γνώση όλων των παραμέτρων που αφορούν τα δύο ρομποτικά συστήματα στα κεφάλαια που ακολουθούν αναλύονται οι παράμετροι των δύο ρομποτικών συστημάτων και τέλος οι βασικές ρυθμίσεις για την αρμονική λειτουργία την ενοποιημένης διάταξης.

Η εργασία περιέχει συνολικά επτά κεφάλαια:

- **Κεφάλαιο 1:** Περιέχει τη παρουσίαση του προβλήματος της ρομποτικής λαβής και τη ανάγκη για ανάπτυξη ολοκληρωμένης διάταξης βραχίονα χεριού.
- **Κεφάλαιο 2:** Περιγράφεται η κινηματική ανάλυση του ρομποτικού βραχίονα RV2A, παρουσιάζονται οι μέθοδοι μοντελοποίησης και επίλυσης των κινηματικών του προβλημάτων.
- **Κεφάλαιο 3:** Παρουσίαση Προγραμματισμού του ρομποτικού βραχίονα μέσω της γλώσσας MELFA BASIC, παρουσίαση βασικών εντολών
- **Κεφάλαιο 4:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο έλεγχος του ρομποτικού βραχίονα μέσα από το περιβάλλον του matlab, περιγράφονται αναλυτικά όλες οι συναρτήσεις που αναπτύχθηκαν, οι ιδιαιτερότητες που εμφανίζονται και τέλος δίνονται παραδείγματα χρήσης.
- **Κεφάλαιο 5:** Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται το ρομποτικό χέρι TALOS, περιγράφεται η κινηματική του, αναλύονται η μέθοδοι επίλυσης των κινηματικών προβλημάτων του, τέλος παρουσιάζεται το σύστημα ελέγχου του και ο τρόπος χειρισμού του μέσα από το περιβάλλον του matlab.
- **Κεφάλαιο 6:** Γίνεται παρουσίαση της ολοκληρωμένης πειραματικής διάταξης βραχίονα – χεριού, περιγράφονται οι βασικές ρυθμίσεις για την λειτουργία της διάταξης, τέλος παρατίθενται παραδείγματα προσέγγισης αντικειμένων.
- **Κεφάλαιο 7:** Στο τελικό κεφάλαιο παρουσιάζονται συμπεράσματα και χαράσσονται μελλοντικές κατευθύνσεις που επεκτείνουν την εργασία.

Στις τελευταίες σελίδες παρατίθενται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της εργασίας και δύο παραρτήματα το πρώτο περιέχει αναλυτικά την επίλυση του αντίστροφου κινηματικού του χεριού, ενώ στο δεύτερο παρουσιάζεται η διαδικασία για την ορθή χρήση των συναντήσεων ελέγχου ενώ παρατίθεται ο κώδικας των κύριων συναρτήσεων.

2 ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ RV2A

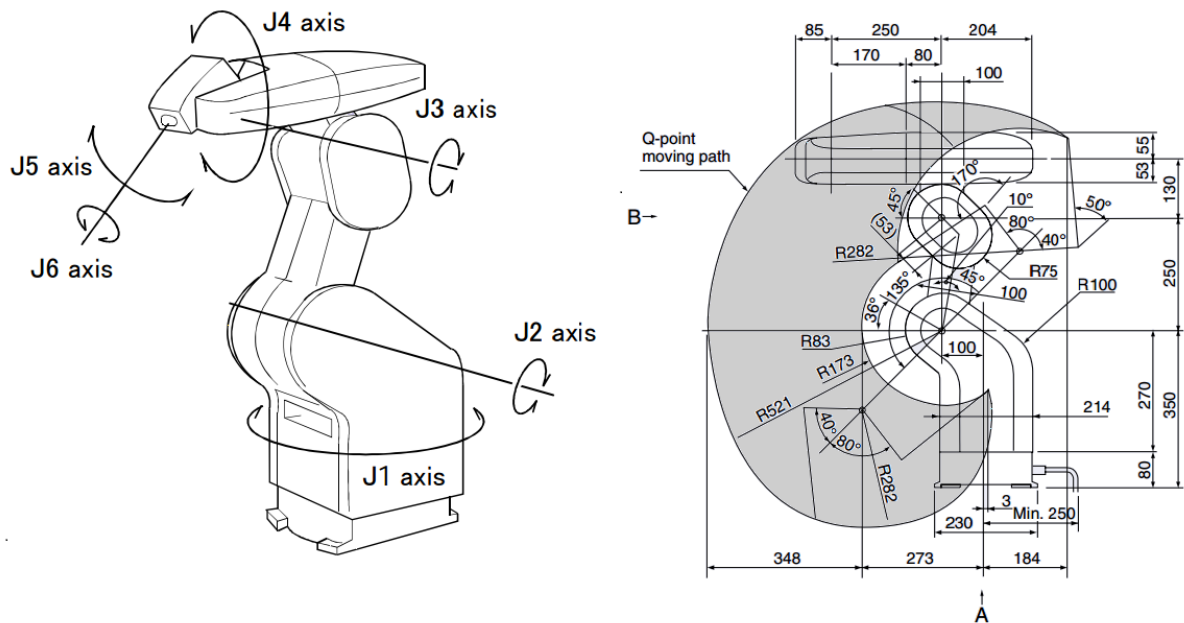
2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η κινηματική του ρομποτικού βραχίονα RV2A, περιγράφονται όλα τα μεγέθη και στοιχεία που την επηρεάζουν και τέλος αναλύονται οι μέθοδοι για την επίλυση των κινηματικών του προβλημάτων.

Για την κινηματική περιγραφή του βραχίονα επιλέχθηκε η *τροποποιημένη μέθοδος των Denavit & Hartenberg*, η οποία αποτελεί το πλέον δόκιμο τρόπο περιγραφής μια ανοιχτής κινηματικής αλυσίδας. Το ευθύ κινηματικό επιλύεται αλγεβρικά εκμεταλλευόμενοι τη μέθοδο περιγραφής, ενώ για το αντίστροφο κινηματικό επιλέχθηκε ο συνδυασμός αλγεβρικής και γεωμετρικής επίλυσης κυρίως λόγω της απλότητας που προσφέρει έναντι των αμιγών επιλύσεων, η λύση που επιφέρει είναι κλειστής μαθηματικής μορφής, ιδανική για χρήση σε βρόχο ελέγχου πραγματικού χρόνου.

2.2 Βασικά χαρακτηριστικά του βραχίονα

Ο ρομποτικός βραχίονας Mitsubishi RV2A αποτελεί μια συνήθη περίπτωση ανθρωπομορφικού ρομποτικού βραχίονα χωρίς περίπλοκη γεωμετρία. Αποτελείται από *έξι μέλη και τη βάση*, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με *έξι περιστροφικές αρθρώσεις*. Η παραπάνω γεωμετρία προσδίδει στον ρομποτικό βραχίονα *έξι βαθμούς ελευθερίας (6DOF)*. Από πλευράς κινητικότητας οι τρεις πρώτες είναι υπεύθυνες για την τοποθέτηση του άκρου και οι τρεις τελευταίες για τον προσανατολισμό του. Επίσης συνηθίζεται η ταύτιση των αρθρώσεων του, με τις αρθρώσεις του ανθρώπινου σώματος, οι τρεις πρώτες αρθρώσεις αντιστοιχούν στις αρθρώσεις μέσης, ώμου και αγκώνα αντίστοιχα, ενώ οι τρεις τελευταίες ομαδοποιούνται και αντιστοιχούν στην άρθρωση του καρπού. Στο παρακάτω σχήμα 2.1 παρουσιάζονται οι διαστάσεις του ρομποτικού βραχίονα, οι μονάδες μήκους και γωνίας που εμφανίζονται είναι εκφρασμένες σε χιλιοστά [mm] και μοίρες αντίστοιχα [deg]. Σε όλο το μήκος της εργασίας οι μονάδες μήκους είναι χιλιοστά και οι μονάδες γωνίας μοίρες.



Εικόνα 2.1 αριστερά: ρομποτικός βραχίονας RV2A, δεξιά: διαστάσεις και χώρος εργασίας ρομποτικού βραχίονα

Άρθρωση	Περιγραφή		Μέγιστη ταχύτητα [deg/sec]	όρια άρθρωσης [deg]	
J1 axis	Waist axis		150	-160	160
J2 axis	Shoulder axis		150	-45	135
J3 axis	Elbow axis		180	50	170
J4 axis	W R I S T	Rotating forearm axis	240	-160	160
J5 axis		Wrist tilting axis	180	-120	120
J6 axis		Hand rotating axis	330	-200	200

Πίνακας 2.1 Βασικά χαρακτηριστικά αρθρώσεων βραχίονα

2.3 Βασικές έννοιες κινηματικής

Η χρήση των ρομποτικών συστημάτων, απαιτεί βασικές γνώσεις κινηματικής καθώς και των κανόνων που την διέπουν. Τα ρομποτικά συστήματα από την σκοπιά της κινηματικής αντιμετωπίζονται ως ένα σύνολο στερεών σωμάτων (μέλη) κατάλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους των οποίων απαιτείται η περιγραφή της τοποθέτησης (θέση και προσανατολισμός) τους στο χώρο κατά την εκτέλεση εργασιών. Στην κινηματική η περιγραφή της τοποθέτησης στο χώρο γίνεται περιγράφοντας τη σχετική τοποθέτηση συστημάτων συντεταγμένων (πλαίσια), επομένως απαιτείται η απόδοση συστημάτων συντεταγμένων τόσο στα μέλη του ρομποτικού συστήματος όσο και στο περιβάλλοντα χώρο, τα οποία αριθμούνται ή ονοματίζονται.

Την πλέον δόκιμη και συμπαγή αναπαράσταση της θέσης και του προσανατολισμού αποτελεί ο ομογενής μετασχηματισμός (Ο.Μ), ο οποίος συμβολίζεται με ${}^A g_B$ και περιγράφει την θέση και τον προσανατολισμό του πλαισίου $\{B\}$ σχετικά του πλαισίου αναφοράς $\{A\}$. Αποτελεί έναν

πίνακα 4x4 οποίος συντίθεται από συντεταγμένες μετασχηματισμού θέσης ${}^A P_B$ και μετασχηματισμού προσανατολισμού ${}^A R_B$.

$${}^A g_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B & {}^A P_B \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \rightarrow {}^A g_B = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ειδικές περιπτώσεις μετασχηματισμών

Ειδικές περιπτώσεις μετασχηματισμών αποτελούν αυτοί οι οποίοι περιγράφουν είτε στροφή γύρω από συγκεκριμένο άξονα του συστήματος συντεταγμένων, είτε αποκλειστικά μετασχηματισμό θέσης (μετατόπιση), αυτές οι περιπτώσεις μπορούν να λάβουν διαφορετικό συμβολισμό με σκοπό να γίνεται άμεσα διακριτός ο μετασχηματισμός που περιγράφουν.

Μετασχηματισμός θέσης, συμβολίζεται με $Trans_{xyz}(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ όπου $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ οι μονάδες μετατόπισης σχετικά των αξόνων του συστήματος το οποίο αναφέρονται, επίσης σε περιπτώσεις όπου περιγράφουν μετατόπιση αποκλειστικά σε έναν άξονα μπορούν να συμβολιστούν όπως ακολούθως, $Trans_x(\Delta x)$, $Trans_y(\Delta y)$, $Trans_z(\Delta z)$. Στις περιπτώσεις μετασχηματισμού θέσης οι συντεταγμένες προσανατολισμού συμπληρώνονται με $I_{3 \times 3}$.

$$Trans_{xyz}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta_x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta_y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Υπάρχουν τρεις μετασχηματισμός καθαρής στροφής ως προς τους σταθερούς άξονες x-y-z, οι οποίοι συμβολίζονται αντιστοίχως με $Rot_x(\theta_x)$, $Rot_y(\theta_y)$ και $Rot_z(\theta_z)$.

$$Rot_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\theta_x} & -s_{\theta_x} & 0 \\ 0 & s_{\theta_x} & c_{\theta_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Rot_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} c_{\theta_y} & 0 & s_{\theta_y} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_{\theta_y} & 0 & c_{\theta_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Rot_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} c_{\theta_z} & -s_{\theta_z} & 0 & 0 \\ s_{\theta_z} & c_{\theta_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4 Περιγραφή βασικών συστημάτων συντεταγμένων ρομπότ και περιβάλλοντος – επώνυμα πλαίσια

Όπως αναφέρθηκε στην παραπάνω ενότητα, αποδίδονται συστήματα συντεταγμένων (πλαίσια) τόσο στο ρομποτικό βραχίονα όσο και στον περιβάλλοντα χώρο. Η απόδοση ονομάτων για τα πλαίσια τα οποία χρησιμοποιούνται με καθιερωμένο τρόπο είναι μια βολική συμφωνία αρχής. Τα πλαίσια αυτά είναι το πλαίσιο του τελικού στοιχείου δράσης $\{T\}$, κόσμου $\{W\}$, της βάσης του ρομποτικού βραχίονα $\{B\}$ και το πλαίσιο φλάντζας $\{F\}$.

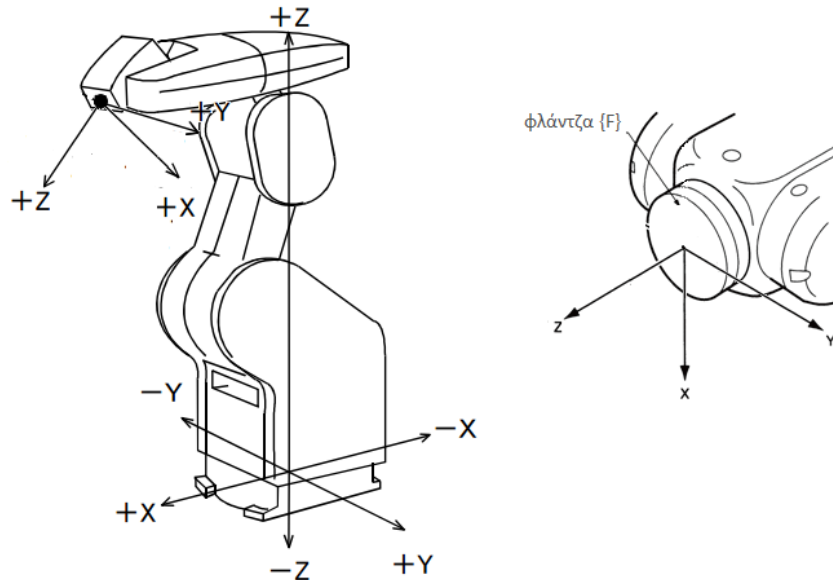
Τα πλαίσια βάσης και φλάντζας τοποθετούνται απαρέγκλιτα στο ρομποτικό βραχίονα, ενώ τα πλαίσια κόσμου και εργαλείου ορίζονται από το χρήστη, κατά περίπτωση. Παρακάτω περιγράφεται η τοποθέτηση τους στο σύστημα.

2.4.1 Το Πλαίσιο Βάσης του ρομπότ $\{B\}$

Το πλαίσιο βάσης $\{B\}$ προσαρτάται στην βάση του βραχίονα, συχνά καλείται και πλαίσιο $\{0\}$. Στην περίπτωση του RV2A έχει κέντρο (origin) εφαιπόμενο στην κάτω επιφάνεια της βάσης με κατευθύνσεις αξόνων όπως φαίνονται στην εικόνα 2.2.

2.4.2 Το Πλαίσιο της Φλάντζας του ρομπότ $\{F\}$

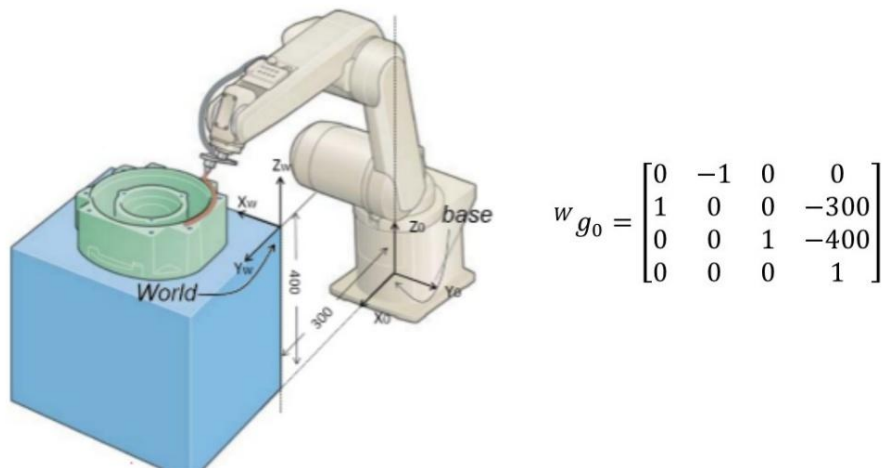
Το πλαίσιο φλάντζας βρίσκεται στην επιφάνεια του ελεύθερου άκρου του βραχίονα όπου προσαρμόζεται το τελικό στοιχείο δράσης τοποθετείται όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2 Αριστερά: Τοποθέτηση πλαισίου βάσης , Δεξιά: τοποθέτηση πλαισίου φλάντζας

2.4.3 Το Αδρανειακό Πλαίσιο του Κόσμου $\{W\}$

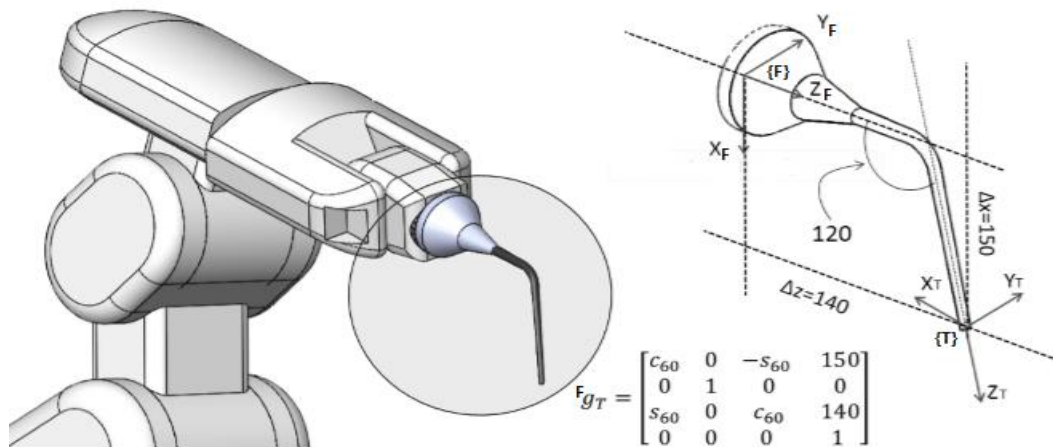
Το πλαίσιο κόσμου συνήθως σχετίζεται με το έργο που ο βραχίονας καλείται να διεκπεραιώσει, δηλαδή αφορά το χώρο στον οποίο περιορίζεται η εργασία του βραχίονα. Τοποθετείται προς διευκόλυνσή του χρήστη στο σχεδιασμό των οδεύσεων και είναι το **απόλυτο πλαίσιο συντεταγμένων** για τη περιγραφή των θέσεων, ορίζεται από το χρήστη σχετικά του πλαισίου βάσης του ρομποτικού βραχίονα μέσω του μετασχηματισμού Wg_0 , δηλαδή περιγράφεται η τοποθέτηση του πλαισίου βάσης $\{0\}$ του ρομποτικού βραχίονα σχετικά του πλαισίου κόσμου $\{W\}$.



Εικόνα 2.3 Παράδειγμα σχετικής τοποθέτησης πλαισίων βάσης και κόσμου

2.4.4 Το Πλαίσιο Τελικού Στοιχείου δράσης του ρομπότ - TOOL $\{T\}$

Το πλαίσιο του τελικού στοιχείου δράσης $\{T\}$ ή εργαλείου πρέπει να οριστεί σε σχέση με το πλαίσιο φλάντζας $\{F\}$ του ρομπότ, έχει επικρατήσει ο άξονας Z_T του εργαλείου να λαμβάνει την διεύθυνση της δράσης του εργαλείου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και ορίζεται μέσω του μετασχηματισμού ${}^F g_T$.



Εικόνα 2.4 Παράδειγμα εξαγωγής μετασχηματισμός πλαισίου τελικού στοιχείου δράσης

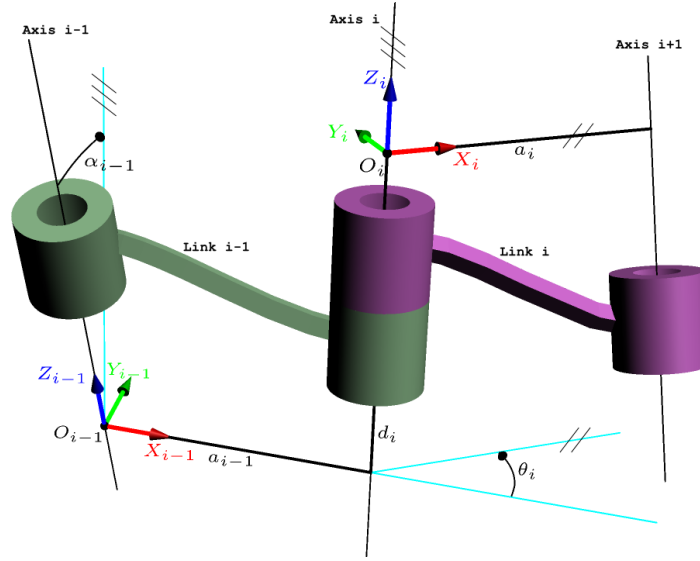
2.5 Κινηματική μοντελοποίηση ρομποτικού βραχίονα

Η κινηματική μοντελοποίηση αφορά την διαδικασία μαθηματικής περιγραφής του ρομποτικού βραχίονα, η οποία συμβαίνει σύμφωνα της τροποποιημένης μεθόδου των Denavit & Hartenberg.

2.5.1 Συνοπτική περιγραφή τροποποιημένης μεθόδου Denavit & Hartenberg (DHmdf)

Η μέθοδος των Denavit & Hartenberg (1955) αναπτύχθηκε με σκοπό την πλήρη περιγραφή μιας κινηματικής αλυσίδας από ένα ελάχιστο αριθμό παραμέτρων, η τροποποίηση της μεθόδου (Craig) κάνει χρήση των ίδιων παραμέτρων, αλλά διαφοροποιείται ελαφρώς ως προς την τοποθέτηση των πλαισίων στα μέλη της αλυσίδας.

Βασική αρχή της μεθόδου είναι η αναγνώριση του άξονα κάθε άρθρωσης του μηχανισμού. Σε κάθε άρθρωση γίνεται επισύναψη ενός πλαισίου συντεταγμένων όπως ορίζει η μέθοδος, το πλαίσιο που τοποθετείται στην άρθρωση είναι αυτό που περιγράφει την θέση και προσανατολισμό του μέλους που ακολουθεί και θεωρείται σωματοπαγές για αυτό (τοποθετείται απαρέγκλιτα για το μέλος). Επίσης βάσει της μεθόδου προσαρτώνται πλαίσια στα ακραία μέλη της αλυσίδας (βάση και φλάντζα), τα οποία τοποθετούνται βάσει συνθηκών. Τα πλαίσια αριθμούνται προς διευκόλυνση της περιγραφής, η αρίθμηση συμβαίνει διαδοχικά, ξεκινώντας από το πλαίσιο βάσης το οποίο λαμβάνει τον αριθμό μηδέν $\{0\}$ έως και τελευταίο μέλος της αλυσίδας. Για κάθε επισυναπτόμενο πλαίσιο συντεταγμένων γίνεται εξαγωγή τεσσάρων παραμέτρων, οι οποίοι μπορούν να περιγράψουν την τοποθέτηση του, ως προς αμέσως προηγούμενο.



Εικόνα 2.5 Παράδειγμα εξαγωγής παραμέτρων μέλους

Frame	a_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
$\{i\}$	[deg]	[mm]	[mm]	[deg]
$\{1\}$	α_0	a_0	d_1	θ_1
$\{2\}$	α_1	a_1	d_2	θ_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\{n-1\}$	α_{n-2}	a_{n-2}	d_{n-1}	θ_{n-1}
$\{n\}$	α_{n-1}	a_{n-1}	d_n	θ_n

Πίνακας 2.2 Παράδειγμα πίνακα παραμέτρων της τροποποιημένης μεθόδου D-H (DHmddf)

Μετασχηματισμός μέλους (μαθηματική περιγραφή)

Η μέθοδος *DHmddf* παράγει τον πίνακα μετασχηματισμού (${}^{i-1}g_i$) για την περιγραφή της τοποθέτησης του κάθε μέλους $\{i\}$ αναφορικά του αμέσως προηγούμενου $\{i-1\}$, σύμφωνα της ακόλουθης σχέσης

$${}^{i-1}g_i = Rot_{x_{i-1}}(\alpha_{i-1}) \cdot Trans_{x_{i-1}}(a_{i-1}) \cdot Rot_{z_i}(\theta_i) \cdot Trans_{z_i}(d_i)$$

$${}^{i-1}g_i = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & a_{i-1} \\ s_{\theta_i}c_{a_{i-1}} & c_{\theta_i}c_{a_{i-1}} & -s_{a_{i-1}} & -s_{a_{i-1}}d_i \\ s_{\theta_i}s_{a_{i-1}} & c_{\theta_i}s_{a_{i-1}} & c_{a_{i-1}} & c_{a_{i-1}}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Η σύνθεση των ομογενών πινάκων μετασχηματισμού που προκύπτουν για κάθε μέλος της αλυσίδας, μπορεί να περιγράψει την τοποθέτηση του τελικού πλαισίου $\{n\}$ ως προς το πλαίσιο αναφοράς της βάσης του μηχανισμού $\{0\}$ σύμφωνα της παρακάτω σχέση

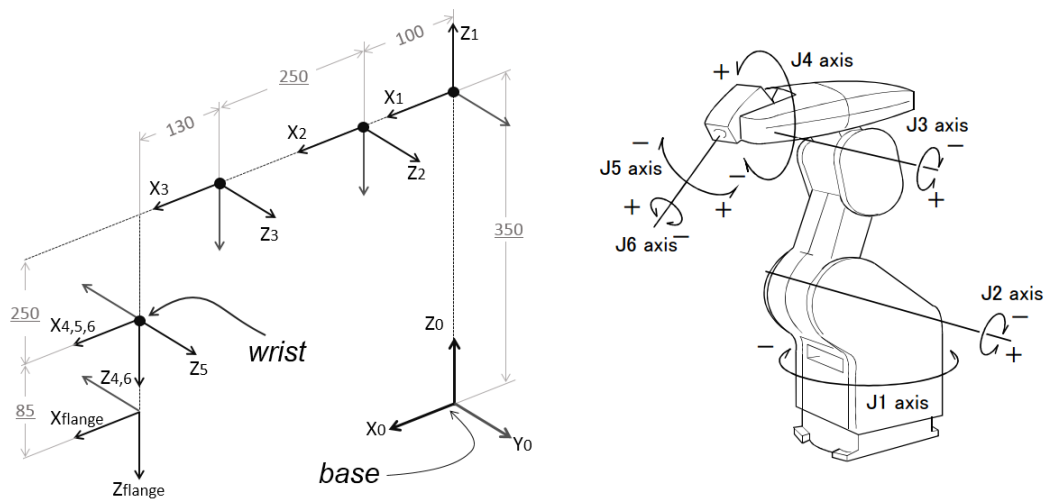
$${}^0g_n = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}g_i$$

ή ισοδύναμα

$${}^0g_n = {}^0g_1 {}^1g_2 \dots {}^{n-2}g_{n-1} {}^{n-1}g_n$$

2.5.2 Εξαγωγή παραμέτρων για το Ρομποτικό βραχίονα RV2A

Σύμφωνα με τη μέθοδο *DHmdf* και δεδομένης της θετικής φοράς περιστροφής των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα εξάγονται οι παράμετροι που τον περιγράφουν, όπως εμφανίζονται παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 2.6 Αριστερά: συμβολική αναπαράσταση βραχίονα για $\theta=0$, Δεξιά: Φορά περιστροφής αρθρώσεων

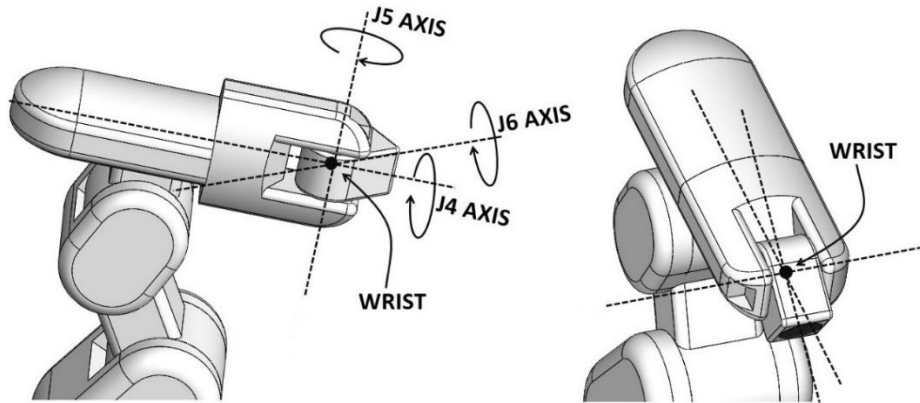
frame (i)	a_{i-1} [deg]	a_{i-1} [mm]	d_i [mm]	θ_i [deg]
1	0	0	350	θ_1
2	-90	100	0	θ_2
3	0	250	0	θ_3
4	-90	130	250	θ_4
5	90	0	0	θ_5
6	-90	0	0	θ_6

Πίνακας 2.3 Παράμετροι περιγραφής ρομποτικού βραχίονα

$${}^0g_6(\theta) = {}^0g_1(\theta_1) {}^1g_2(\theta_2) {}^2g_3(\theta_3) {}^3g_4(\theta_4) {}^4g_5(\theta_5) {}^5g_6(\theta_6) \quad (2.1)$$

2.5.3 Καρπός Ρομποτικού βραχίονα-(πλαίσιο wrist)

Οι τρεις τελευταίες αρθρώσεις (J_4 , J_5 , J_6) ομαδοποιούνται και αποτελούν την άρθρωση του καρπού, τα πλαίσια των τριών αυτών αρθρώσεων κατά την μοντελοποίηση τοποθετούνται σε κοινό σημείο. Το πλαίσιο που περιγράφει τη θέση και τον προσανατολισμό του καρπού είναι αυτό της 6ης άρθρωσης και μία βολική συμφωνία είναι να καλείται ως πλαίσιο καρπού $\{WRIST\}$.

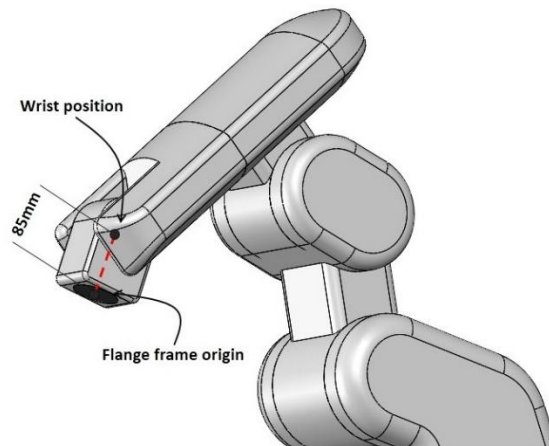


Εικόνα 2.7 Ορισμός της θέσης του καρπού από τους τεμνόμενους άξονες των τριών τελευταίων αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα

2.5.4 Μήκος τελευταίου συνδέσμου-πλαίσιο φλάντζας

Κατά την μοντελοποίηση σύμφωνα της τροποποιημένης μεθόδου D-H γίνεται εξαγωγή μιας σχέσης που συνδέει την βάση $\{0\}$ του ρομπότ με το τελευταίο μέλος του $\{6\}$, ωστόσο το μήκος του τελευταίου συνδέσμου δεν εμφανίζεται στον πίνακα παραμέτρων, αφού η σύμβαση τοποθετεί τα πλαίσια στην αρχή του συνδέσμου. Μπορεί να περιγραφεί από ένα πίνακα ομογενούς μετασχηματισμού 6g_f , ο οποίος συνδέει το πλαίσιο της φλάντζας με το πλαίσιο της 6ης άρθρωσης.

$${}^6g_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 85 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$



Εικόνα 2.8 Μήκος τελευταίου μέλους από το σημείο του καρπού στη βάση της φλάντζας του άκρου

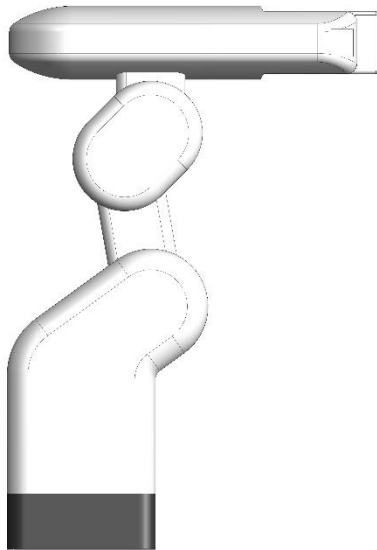
2.6 Γωνίες αρθρώσεων πραγματικού χειριστή

Κατά την χρήση του ρομπότ, εύκολα μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι οι γωνίες των αρθρώσεων του δεν ταυτίζονται με αυτές όπως έχουν περιγραφεί στο κινηματικό μοντέλο. Υπάρχει μια διαφοροποίηση μεταξύ των γωνιών, η οποία συμβαίνει για λόγους απλότητας κατά τον χειρισμό του ρομποτικού βραχίονα και για την επίλυση των κινηματικών πρέπει να ληφθεί υπόψη και εξάγεται σύμφωνα των παρακάτω σχέσεων.

q_i	\rightarrow	θ_i
θ_1	=	q_1
θ_2	=	$q_2 - 90$
θ_3	=	$q_3 - 90$
θ_4	=	q_4
θ_5	=	q_5
θ_6	=	$q_6 + 180$

Πίνακας 2.4 Σχέσεις αναγωγής γωνιών ($q \rightarrow \theta$)

Όπου q οι γωνίες του πραγματικού ρομπότ, για παράδειγμα οι γωνίες $q=[0 \ 0 \ 90 \ 0 \ 0 \ 0]$ αντιστοιχούν σε γωνίες $\theta=[0 \ -90 \ 0 \ 0 \ 0 \ 180]$ για το κινηματικό μοντέλο και είναι αυτές που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την λύση του ευθέως κινηματικού όπως περιγράφεται παρακάτω.



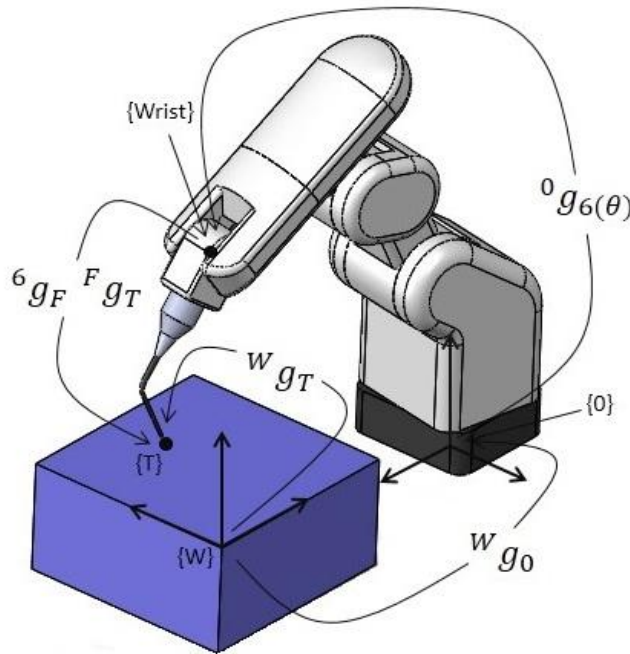
Εικόνα 2.9 Διαμόρφωση ρομποτικού βραχίονα για τιμές αρθρώσεων $q=[0,0,90,0,0,0]$

2.7 Ευθύ κινηματική ανάλυση

Αφού έχουν προσδιορισθεί όλοι οι κατά σειρά μετασχηματισμοί από το πλαίσιο κόσμου έως και το πλαίσιο του τελικού στοιχείου δράσης και **δεδομένων των γωνιών (θ)**, προκύπτει ο μετασχηματισμός που περιγράφει την τοποθέτηση του τελικού στοιχείου δράσης $\{T\}$ στον χώρο αναφορικά του πλαισίου κόσμου $\{W\}$.

$${}^W g_T(\theta) = {}^W g_0 {}^0 g_6(\theta) {}^6 g_F {}^F g_T \quad (2.3)$$

Οι μετασχηματισμοί ${}^W g_0$ και ${}^F g_T$ έχουν περιγραφεί στην ενότητα 2.4, ο πρώτος περιγράφει την τοποθέτηση της βάσης του ρομπότ αναφορικά του πλαισίου κόσμου, ενώ ο δεύτερος το πλαίσιο του τελικού στοιχείου δράσης αναφορικά του πλαισίου της φλάντζας. Οι μετασχηματισμοί αυτοί είναι γνωστοί, αφού ορίζονται από το χρήστη, και για το λόγο αυτό συμβολίζονται με έντονη γραφή, στο παρακάτω κείμενο κάθε γνωστός μετασχηματισμός θα συμβολίζεται με έντονη γραφή.



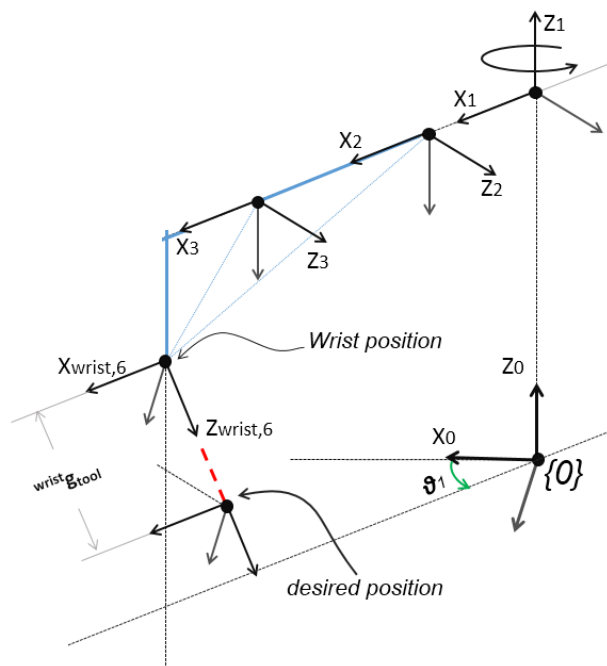
Εικόνα 2.10 Σχέσεις μεταξύ βασικών πλαισίων ρομποτικού βραχίονα και περιβάλλοντα χώρου.

2.8 Αντίστροφη κινηματική ανάλυση

Στο αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα δεδομένης της επιθυμητής τοποθέτησης του τελικού στοιχείου δράσης $\{T\}$ στο χώρο αναφορικά του πλαισίου κόσμου $\{W\}$, αναζητούνται οι πιθανοί συνδυασμοί των γωνιών των αρθρώσεων που θα επιφέρουν τη επιθυμητή τοποθέτηση. Γενικά στους ρομποτικούς βραχίονες με έξι βαθμούς ελευθερίας μπορεί να επιτευχθεί μια τοποθέτηση με έως και οχτώ διαφορετικούς συνδυασμούς γωνιών.

Για την επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος του βραχίονα απαιτείται η αποσύνθεση του συνολικού σε επιμέρους απλούστερα προβλήματα. Η μέθοδος του διαχωρισμού εφαρμόζεται στους βραχίονες με έξι βαθμούς ελευθερίας με τους τρεις τελευταίους άξονες τεμνόμενους σε κοινό σημείο (καρπός) και καλείται **μέθοδος κινηματικής αποσύνδεσης**. Το συνολικό πρόβλημα επιμερίζεται σε αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα θέσης και σε αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα προσανατολισμού.

Οι γωνίες που υπολογίζονται αφορούν τις θεωρητικές γωνίες (θ) και δεν θα πρέπει να γίνει σύγχυση με τις γωνίες του πραγματικού βραχίονα (q). Τα βήματα υπολογισμού του αντίστροφου κινηματικού περιγράφονται παρακάτω



Εικόνα 2.11 Σχηματική αναπαράσταση ρομποτικού βραχίονα

2.8.1 Υπολογισμός τοποθέτησης καρπού σχετικά της βάσης

Έστω ότι δίνεται ο ομογενής μετασχηματισμός ${}^W g_{T_{desired}}$, ο οποίος περιγράφει την επιθυμητή τοποθέτηση του πλαισίου του τελικού στοιχείου δράσης $\{T\}$ ως προς το πλαίσιο κόσμου $\{W\}$, υπολογίζεται η τοποθέτηση του πλαισίου του καρπού $\{WRIST\}$ αναφορικά του πλαισίου βάσης του ρομπότ $\{0\}$, σύμφωνα της ακόλουθης σχέσης.

$${}^0 g_{WRIST_d} = {}^0 g_W {}^W g_{T_{desired}} {}^T g_F {}^F g_6 \quad (2.4)$$

$${}^0 g_{WRIST_d} = {}^W g_0^{-1} {}^W g_{T_{desired}} {}^F g_T^{-1} {}^6 g_F^{-1} \quad (2.5)$$

Στη παραπάνω σχέση (2.4), όλοι οι ομογενείς μετασχηματισμοί που την αποτελούν είναι γνωστοί και έχουν περιγραφεί στις ενότητες 2.4 και 2.5.4.

Σύμφωνα της κινηματικής μοντελοποίησης σχέση (2.1) καταλήγουμε στην ακόλουθη έκφραση

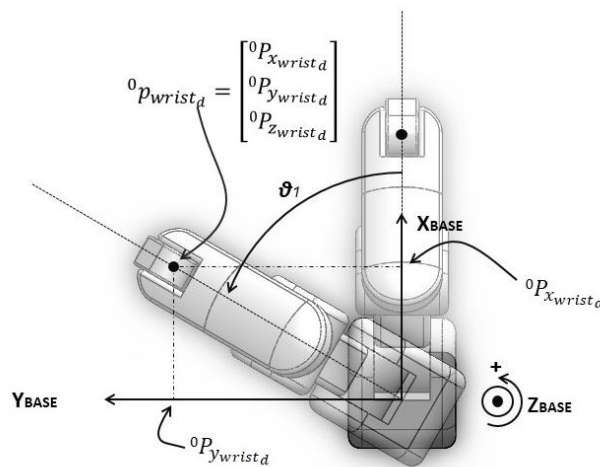
$${}^0 g_{WRIST_d} = {}^0 g_6(\theta) \quad (2.6)$$

2.8.2 Αντίστροφο Κινηματικό πρόβλημα θέσης καρπού

Από κινηματικής δομής του βραχίονα οι τρεις πρώτες αρθρώσεις είναι αποκλειστικά υπεύθυνες για την θέση του καρπού, επομένως από τον ομογενή μετασχηματισμό ${}^0 g_{wrist_d}$ μπορούμε να απομονώσουμε τις συντεταγμένες θέσης ${}^0 P_{wrist_d}$ και να αναζητήσουμε τις γωνίες των τριών πρώτων αρθρώσεων $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$. Η λύση συμβαίνει σε δύο βήματα, αναζήτηση των λύσεων για την πρώτη άρθρωση και αναζήτηση του συνδυασμού λύσεων για τη δεύτερη και τρίτη άρθρωση.

$${}^0 P_{wrist_d} = \begin{bmatrix} {}^0 P_{x_{wrist_d}} \\ {}^0 P_{y_{wrist_d}} \\ {}^0 P_{z_{wrist_d}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Αναζήτηση γωνιών 1ης άρθρωσης



Εικόνα 2.12 Προσδιορισμός πρώτης άρθρωσης

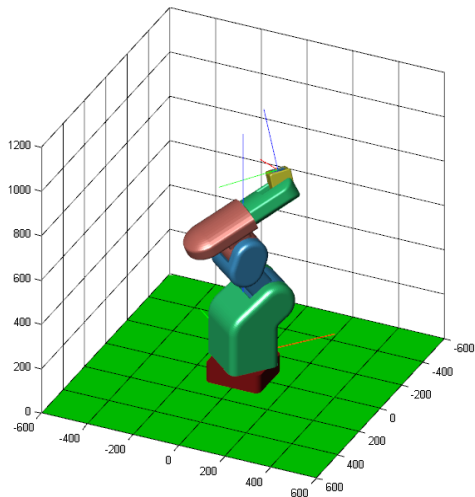
Η πρώτη άρθρωση είναι η μοναδική άρθρωση που επιφέρει στροφή του καρπού γύρω από τον Z_0 άξονα της βάσης του ρομπότ, επίσης η κινηματική δομή του βραχίονα επιτρέπει την τοποθέτηση του καρπού σε ένα σημείο με έως και δύο διαφορετικές γωνίες για την πρώτη άρθρωση.

$$\theta_1 = \text{atan2}({}^0P_{y_{wrist_d}}, {}^0P_{x_{wrist_d}}) \quad (2.8)$$

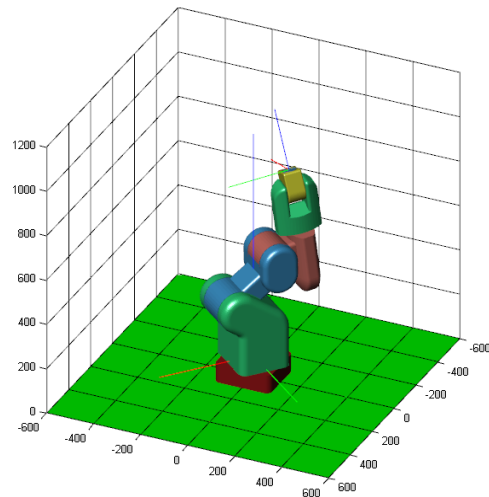
$$\theta'_1 = \theta_1 + 180 \quad (2.9)$$

Οι δύο συμμετρικές λύσεις μπορούν να γίνουν ευκολότερα κατανοητές παρατηρώντας κανείς τις εικόνες 2.13 και 2.14 οι οποίες απεικονίζουν την προσέγγιση του ίδιου σημείου στόχο με δύο διαφορετικές τιμές για την πρώτη άρθρωση. Όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο η γεωμετρική διαμόρφωση του βραχίονα της εικόνας 2.13 χαρακτηρίζεται ως RIGHT, ενώ αυτή της 2.14 ως LEFT

Αναζήτηση γωνιών 2ης και 3ης άρθρωσης



Εικόνα 2.13 Προσέγγιση με γωνία πρώτης άρθρωσης θ_1 (RIGHT)



Εικόνα 2.14 Προσέγγιση με γωνία πρώτης άρθρωσης θ'_1 (LEFT)

Για κάθε λύση για την πρώτη άρθρωση γίνεται αναζήτηση των τιμών της δεύτερης και τρίτης άρθρωσης που θα τοποθετήσουν τον καρπό στο επιθυμητό σημείο. Τα μέλη της δεύτερης και τρίτης άρθρωσης βρίσκονται κινούμενα πάντα πάνω στο επίπεδο Z_1X_1 , επομένως το πρόβλημα της εύρεσης λύσεων για την δεύτερη και τρίτη άρθρωση αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα βραχίονα δύο μελών επίπεδου χώρου εργασίας (επίπεδο εργασίας το επίπεδο Z_1X_1), συνήθη επίλυση η γεωμετρική κάνοντας χρήση του νόμου των συνημίτονων, η γενική λύση επιφέρει δύο διαφορετικούς συνδυασμούς λύσεων για την δεύτερη και τρίτη άρθρωση.

$$c_\omega = \frac{a_2^2 - \left({}^2P_{x_{wrist}}^2 + {}^2P_{y_{wrist}}^2 \right) + (a_3^2 + d_4^2)}{2a_2^2\sqrt{a_3^2 + d_4^2}}$$

$$\omega = \text{atan2}(\sqrt{1 - c_\omega^2}, c_\omega)$$

Με τον υπολογισμό των εσωτερικών γωνιών των τριγώνων εξαγονται οι γωνίες θ_2 και θ_3 σύμφωνα το παρακάτω

1ος συνδυασμός λύσεων - AVOVE (δες παράγραφο 2.10)

$$\theta_2 = \beta - \psi \quad (2.10)$$

$$\theta_3 = 180^\circ - \omega - \tan^{-1}(d_4/a_3) \quad (2.11)$$

2ος συνδυασμός λύσεων - BELOW

$$\theta'_2 = \beta + \psi \quad (2.12)$$

$$\theta'_3 = 180^\circ + \omega - \tan^{-1}(d_4/a_3) \quad (2.13)$$

2.8.3 Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα προσανατολισμού καρπού

Όπως διαφαίνεται συνολικά προκύπτουν τέσσερις συνδυασμοί γωνιών για την τοποθέτηση του καρπού. Για κάθε ένα από αυτούς αναζητούνται οι συνδυασμοί των γωνιών του καρπού $(\theta_4, \theta_5, \theta_6)$ που θα επιφέρουν το τελικό προσανατολισμό. Καταλληλότερη επίλυση είναι η αλγεβρική για τον καρπό, παρακάτω παρουσιάζεται η λύση για τις γωνίες του καρπού. Από την μοντελοποίηση του ρομποτικού βραχίονα είναι γνωστή η παρακάτω σχέση

$${}^0g_{wrist_d} = {}^0g_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3) {}^3g_4(\theta_4) {}^4g_5(\theta_5) {}^5g_6(\theta_6) \quad (2.14)$$

όπου ${}^0g_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = {}^0g_1(\theta_1) {}^1g_2(\theta_2) {}^2g_3(\theta_3)$

Για κάθε συνδυασμό γωνιών για τις τρεις πρώτες αρθρώσεις $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ εκτελούνται τα παρακάτω βήματα.

Απομονώνουμε τους γνωστούς όρους της σχέση (2.16) εκτελώντας πολλαπλασιασμό από αριστερά με ${}^0g_3^{-1}(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, προκύπτει η σχέση

$${}^0g_3^{-1}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) {}^0g_{wrist_d} = {}^3g_4(\theta_4) {}^4g_5(\theta_5) {}^5g_6(\theta_6) \quad (2.15)$$

Ο όρος ${}^0g_3^{-1}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) {}^0g_{wrist_d}$ περιγράφει τις συντεταγμένες θέσης και προσανατολισμού του πλαισίου του καρπού {wrist} σχετικά του πλαισίου της τρίτης άρθρωσης {3}, μπορεί να υπολογιστεί αφού οι γωνίες θ_1, θ_2 και θ_3 είναι γνωστές και έστω ότι

$${}^0\mathbf{g}_3^{-1}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) {}^0\mathbf{g}_{wrist_d} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Για να απλοποιήσουμε υπολογιστικά το πρόβλημά μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε με ${}^3\mathbf{g}_{4(\theta_4)}^{-1}$ από αριστερά στη σχέση (2.17)

$${}^3\mathbf{g}_{4(\theta_4)}^{-1} {}^0\mathbf{g}_3^{-1}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) {}^0\mathbf{g}_{wrist_d} = {}^4\mathbf{g}_5(\theta_5) {}^5\mathbf{g}_6(\theta_6)$$

Εκτελώντας τις πράξεις και απομονώνοντας τις συντεταγμένες προσανατολισμού καταλήγουμε στην παρακάτω έκφραση

$$\begin{bmatrix} c_4r_{11} - r_{31}s_4 & c_4r_{12} - r_{32}s_4 & c_4r_{13} - r_{33}s_4 \\ -c_4r_{31} - r_{11}s_4 & -c_4r_{32} - r_{12}s_4 & -c_4r_{33} - r_{13}s_4 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_5c_6 & -c_5s_6 & -s_5 \\ s_6 & c_6 & 0 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & c_5 \end{bmatrix}$$

Από την οποία μπορεί να προκύψει ένα σύστημα πέντε μη γραμμικών εξισώσεων προς επίλυση για την εύρεση των γωνιών του καρπού

$$0 = -c_4r_{33} - r_{13}s_4$$

$$s_6 = -c_4r_{31} - r_{11}s_4$$

$$c_6 = -c_4r_{32} - r_{12}s_4$$

$$-s_5 = c_4r_{13} - r_{33}s_4$$

$$c_5 = r_{23}$$

Η επίλυση τους επιφέρει δύο συνδυασμούς λύσεων για τις γωνίες θ_4 , θ_5 και θ_6

1ος Συνδυασμός - NON FLIP (δες παράγραφο 2.10)

$$\theta_4 = \text{atan2}(r_{23}, -r_{13}) \quad (2.16)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}((-r_{13}c_{\theta_4} + r_{33}s_{\theta_4}), r_{33}) \quad (2.17)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}((-r_{31}c_{\theta_4} - r_{11}s_{\theta_4}), (-r_{12}s_{\theta_4} - r_{32}c_{\theta_4})) \quad (2.18)$$

2ος συνδυασμός - FLIP

$$\theta'_4 = \theta_4 + 180 \quad (2.19)$$

$$\theta'_5 = -\theta_5 \quad (2.20)$$

$$\theta'_6 = \theta_6 + 180 \quad (2.21)$$

Προκύπτουν για κάθε ένα από τους τέσσερις συνδυασμούς των $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, δύο συνδυασμοί $(\theta_4, \theta_5, \theta_6)$ έτσι το σύνολο των πιθανών λύσεων ανέρχεται σε οχτώ για την επιθυμητή τοποθέτηση του τελικού στοιχείου δράσης. Οι λύσεις αυτές μπορούν να περιοριστούν λαμβάνοντας υπόψη τα όρια των αρθρώσεων.

2.9 Αναγωγή γωνιών του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος σε γωνίες του πραγματικού βραχίονα RV2A

Ο συνδυασμός των γωνιών που προκύπτουν από το αντίστροφο κινηματικό αφορά τις θεωρητικές γωνίες (θ) σύμφωνα με την μοντελοποίηση, πρέπει να γίνει αναγωγή στις γωνίες (q), όπως αυτές αποστέλλονται στον ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα και μετέπειτα μπορεί να γίνει σύγκριση με τα όρια των αρθρώσεων όπως αυτά δίνονται από τον κατασκευαστή και να περιοριστούν οι δυνατοί συνδυασμοί λύσεων. Εδώ να αναφερθεί ότι οι γωνίες πρέπει να αναχθούν στο διάστημα από -180° έως 180° .

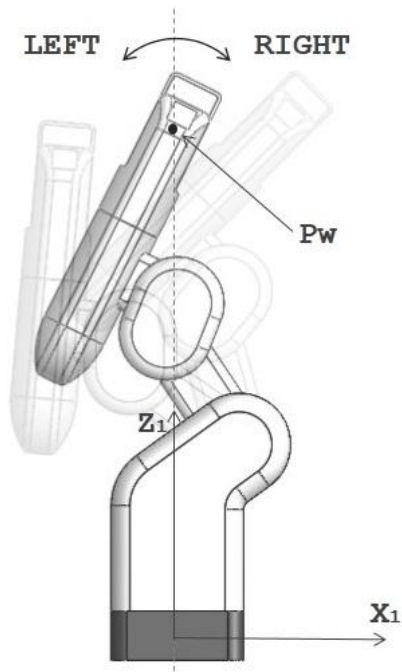
$\theta_i \rightarrow q_i$	όρια άρθρωσης q_i	
$q_1 = \theta_1$	-160	160
$q_2 = \theta_2 + 90$	-45	135
$q_3 = \theta_3 + 90$	50	170
$q_4 = \theta_4$	-160	160
$q_5 = \theta_5$	-120	120
$q_6 = \theta_6 - 180$	-200	200

Πίνακας 2.5 Σχέσεις αναγωγής γωνιών ($\theta \rightarrow q$) και όρια των αρθρώσεων

2.10 Χαρακτηρισμός λύσεων

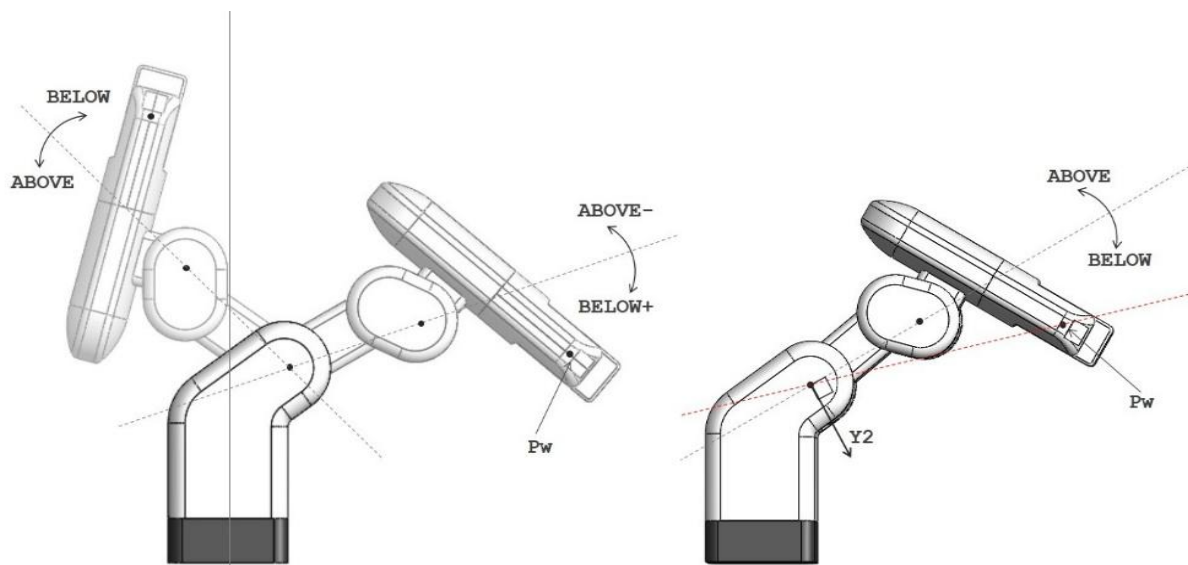
Η ύπαρξη πολλαπλών λύσεων επιβάλλει τον χαρακτηρισμό τους, προς διευκόλυνση της περιγραφής τους και αποσαφήνιση της γεωμετρικής διαμόρφωσης των μελών του βραχίονα (στάσης) κατά την προσέγγιση του σημείου στόχου, διακρίνονται οι ακόλουθοι χαρακτηρισμοί που αφορούν μέλη του βραχίονα ή ολόκληρο το βραχίονα.

Ο χαρακτηρισμός **LEFT/ RIGHT** αφορά τη διαμόρφωση του βραχίονα κατά την προσέγγιση του σημείου στόχο, η σύμβαση για την εξαγωγή του χαρακτηρισμού κάνει σύγκριση της **θέσης του καρπού κατά την προσέγγιση του σημείου στόχου**, αναφορικά του επιπέδου Y_1Z_1 ($1^{η}$ ς άρθρωσης). Στην περίπτωση που η θέση του καρπού βρίσκεται στον θετικό ημιχώρο (αναφορικά του άξονα X_1) η διαμόρφωση χαρακτηρίζεται ως **RIGHT** και αντίθετα ως **LEFT**, για το αντίστροφο κινηματικό εκφράζεται από την θ_1 και θ'_1 (σχέσεις 2.8 και 2.9) αντίστοιχα. Στις περισσότερες των εργασιών η διαμόρφωση που λαμβάνει ο βραχίονας είναι η **RIGHT**, ενώ η διαμόρφωση **LEFT** είναι επιτεύξιμη κοντά στον κατακόρυφο άξονα της βάσης Z_0 . Με απλά λόγια θα μπορούσαμε να πούμε ότι αν η προβολή του σημείου του καρπού στο επίπεδο X_1Y_1 δίνει θετική τετμημένη (x) τότε έχουμε τον χαρακτηρισμό **RIGHT**, ενώ αν είναι αρνητική το χαρακτηρισμό **LEFT**, το οποίο φαίνεται και στις εικόνες 2.8 και 2.9, να αναφέρουμε ότι οι άξονες των πλαισίων $x-y-z$ χρωματίζονται αντιστοίχως με κόκκινο-πράσινο και μπλε χρώμα.



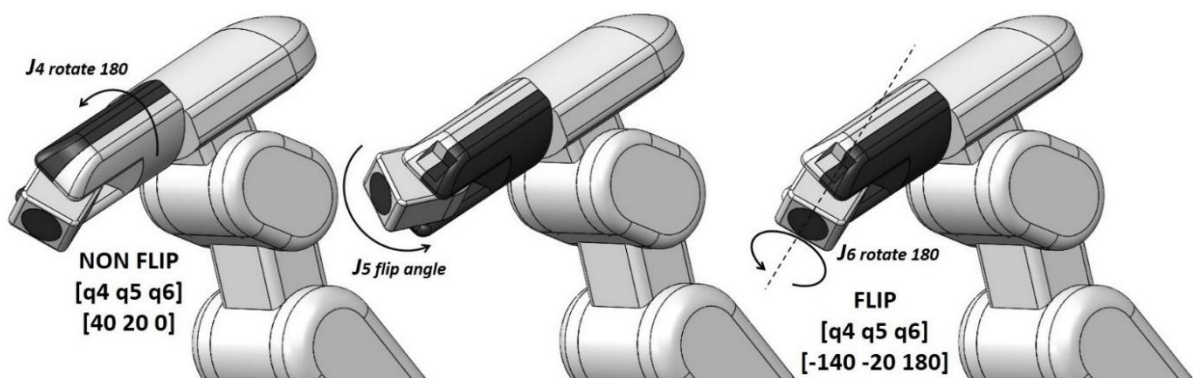
Εικόνα 2.16 Προσέγγιση LEFT / RIGHT

Ο χαρακτηρισμός **ABOVE/BELOW** αφορά τη γεωμετρική διαμόρφωση των μελών του αγκώνα (2^ο και 3^ο μέλος), η θέση του καρπού συγκρίνεται σχετικά του κοινού επιπέδου που ανήκουν οι άξονες της 2^{ης} και 3^{ης} άρθρωσης, στην περίπτωση που η θέση του καρπού βρίσκεται στο θετικό μέρος κατά την διεύθυνση του άξονα Y_2 τότε η διαμόρφωση χαρακτηρίζεται ως ABOVE και αντίθετα ως BELOW, εκφράζεται από τους συνδυασμούς γωνιών $\theta_2\theta_3$ (σχέσεις 2.10-2.11) και $\theta'_2\theta'_3$ (σχέσεις 2.11-2.12) αντίστοιχα. **Αν λάβουμε υπόψη μας τα όρια των αρθρώσεων η διαμόρφωση below δεν είναι επιτεύξιμη για το ρομποτικό βραχίονα.** Εναλλακτικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι, όταν το επίπεδο που σχηματίζεται με κατεύθυνση από τον άξονα της δεύτερης άρθρωσης προς το σημείο του καρπού, αφήνει προς τα αριστερά του, τον άξονα της τρίτης άρθρωσης τότε έχουμε την λύση ABOVE, αντιθέτως έχουμε την λύση BELOW.



Εικόνα 2.17 Προσέγγιση ABOVE / BELOW

Ο χαρακτηρισμός **NON FLIP/FLIP** αντιστοιχεί στην γεωμετρική διαμόρφωση των μελών του καρπού, πρακτικά ο χαρακτηρισμός μπορεί να εξαχθεί από την τιμή της πέμπτης άρθρωσης (J_5 Wrist tilting) κατά την προσέγγιση του σημείου στόχο, στην περίπτωση που λαμβάνει θετική τιμή η διαμόρφωση χαρακτηρίζεται ως NON FLIP, στην αντίθετη περίπτωση ως FLIP και για το αντίστροφο κινηματικό εκφράζεται από τους συνδυασμούς γωνιών $\theta_4\theta_5\theta_6$ (σχέσεις 2.16-2.17-2.18) και $\theta'_4\theta'_5\theta'_6$ (σχέσεις 2.19-2.20-2.21) αντίστοιχα. Για κάθε πιθανή τοποθέτηση του τελικού στοιχείου δράσης υπάρχει δυνατότητα προσέγγισης και με τις δύο γεωμετρικές διαμορφώσεις για τα μέλη του καρπού, εξαίρεση αποτελούν οι τοποθετήσεις για τις οποίες η τέταρτη άρθρωση (J_4) λαμβάνει τιμές γωνίας που βρίσκονται στο διάστημα $[-20\ 20]$, σε αυτήν τη περίπτωση η προσέγγιση μπορεί να γίνει με μία μοναδική διαμόρφωση για τα μέλη του καρπού, η συγκεκριμένη παρατήρηση αποτελεί απόρροια των ορίων της τέταρτης άρθρωσης.

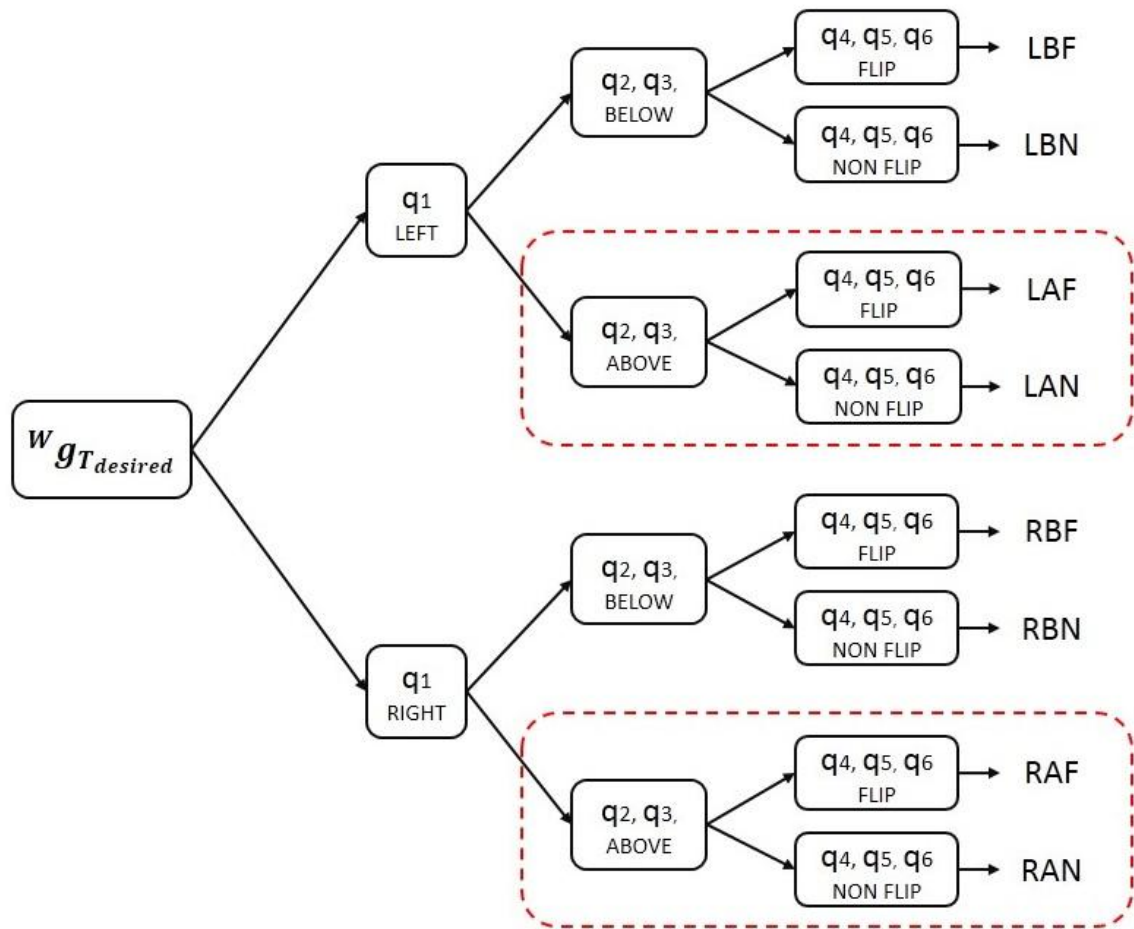


Εικόνα 2.18 Από προσέγγιση NON FLIP σε προσέγγιση FLIP

2.11 Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε η κινηματική του ρομποτικού βραχίονα, προτάθηκαν μέθοδοι για την μοντελοποίηση και την επίλυση των κινηματικών προβλημάτων αυτού, τέλος αναλύθηκαν οι δυνατές γεωμετρικές διαμορφώσεις του βραχίονα για την τοποθέτηση του τελικού στοιχείου δράσης στο χώρο. Γενικά οι συνηθισμένες διαμορφώσεις για το ρομποτικό βραχίονα στις περισσότερες των εργασιών είναι οι RAF και RAN, παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα γεωμετρικών διαμορφώσεων του ρομποτικού βραχίονα (εικόνα 2.19).

Επίσης για την επίλυση των κινηματικών προβλημάτων του ρομποτικού βραχίονα όπως παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, έχουν υλοποιηθεί δύο συναρτήσεις στο matlab, οι οποίες παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.



Εικόνα 2.19 Διάγραμμα Γεωμετρικών διαμορφώσεων ρομποτικού βραχίονα RV2A

3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ RV2A ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ MELFA BASIC IV

3.1 Εισαγωγή

Βασικό γνώρισμα των ρομποτικών συστημάτων είναι η ικανότητα προγραμματισμού για την εκτέλεση εργασιών και η ικανότητα αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον. Για τον προγραμματισμό των ρομποτικών συστημάτων συνήθως γίνεται χρήση τροποποιημένων δημοφιλών γλωσσών προγραμματισμού όπως η BASIC και η Pascal , η τροποποίηση αφορά την επέκτασή τους με προσθήκη εξειδικευμένων βιβλιοθηκών ώστε να καταστεί δυνατός ο χειρισμός των ρομποτικών συστημάτων με εντολές υψηλού επιπέδου.

Για τον προγραμματισμό των ρομποτικών συστημάτων της Mitsubishi, η γλώσσα που παρέχεται είναι μια επέκταση της BASIC και καλείται **MELFA BASIC IV**.

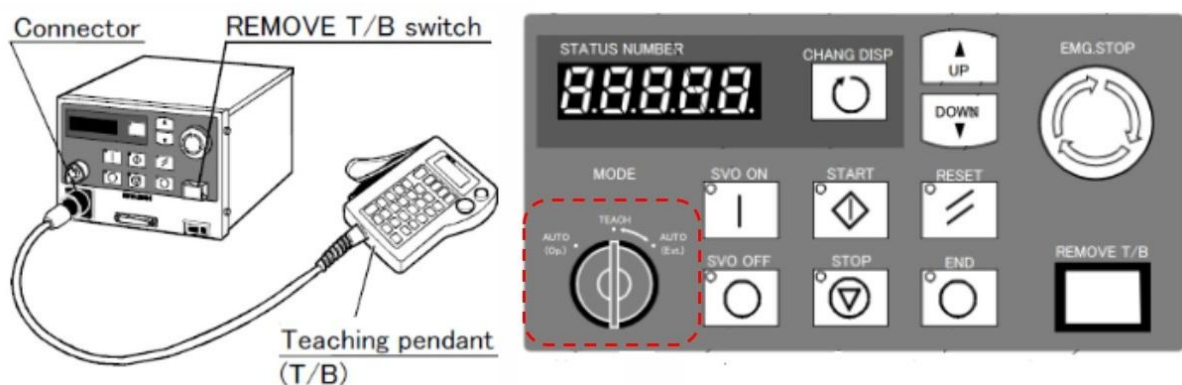
3.2 Controller-Teach pendant

Ο ελεγκτής MELFA CR1-571 αποτελεί το κέντρο ελέγχου για το ρομποτικό σύστημα . Αναλαμβάνει να μεταφράσει τις εντολές σε κατάλληλα σήματα ελέγχου των κινητήρων του ρομποτικού βραχίονα, πραγματοποιεί όλου τους απαιτούμενους ελέγχους για την επιτυχή ολοκλήρωση των επιτελούμενων ενεργειών. Επίσης αποτελεί το σύνδεσμο μεταξύ χρήστη και ρομποτικού βραχίονα, αφού συνδέεται με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και το χειριστήριο ελέγχου (Teaching pendant). Πρακτικά συνδέεται με τον Η/Υ μέσω σειριακής θύρας τύπου RS232, δίνοντας τη δυνατότητα αποστολής σε αυτόν εντολών, καταχώρησης συντεταγμένων και προγραμμάτων από το περιβάλλον του COSIROP τα οποία αποθηκεύονται στην μνήμη του ελεγκτή με σκοπό την μετέπειτα εκτέλεσή τους.

Στην πρόσοψη του ελεγκτή υπάρχει οθόνη ανάγνωσης πληροφοριών που αφορούν τη λειτουργία του συστήματος όπως κωδικοί σφάλματος, επίσης διάφορες επιλογές μέσω button βρίσκονται στην πρόσοψη. Εδώ να αναφερθεί ότι η λειτουργία ελέγχου του βραχίονα από το περιβάλλον του COSIROP επιτυγχάνεται με την επιλογή **MODE AUTO (Ext.)** για τον ελεγκτή.

Το χειριστήριο ελέγχου ή Teaching pendant (R28TB) αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο αλληλεπίδρασης χρήστη - βραχίονα, χρησιμοποιείται για την κίνηση του βραχίονα με σκοπό την αποθήκευση σημείων στόχων ή οδούσεων για τη μετέπειτα χρήση τους.

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά της λειτουργίας του ελεγκτή και του χειριστηρίου υπάρχουν στις εργαστηριακές σημειώσεις του μαθήματος της ρομποτικής [2] και στα εγχειρίδια χρήσης του βραχίονα [1].

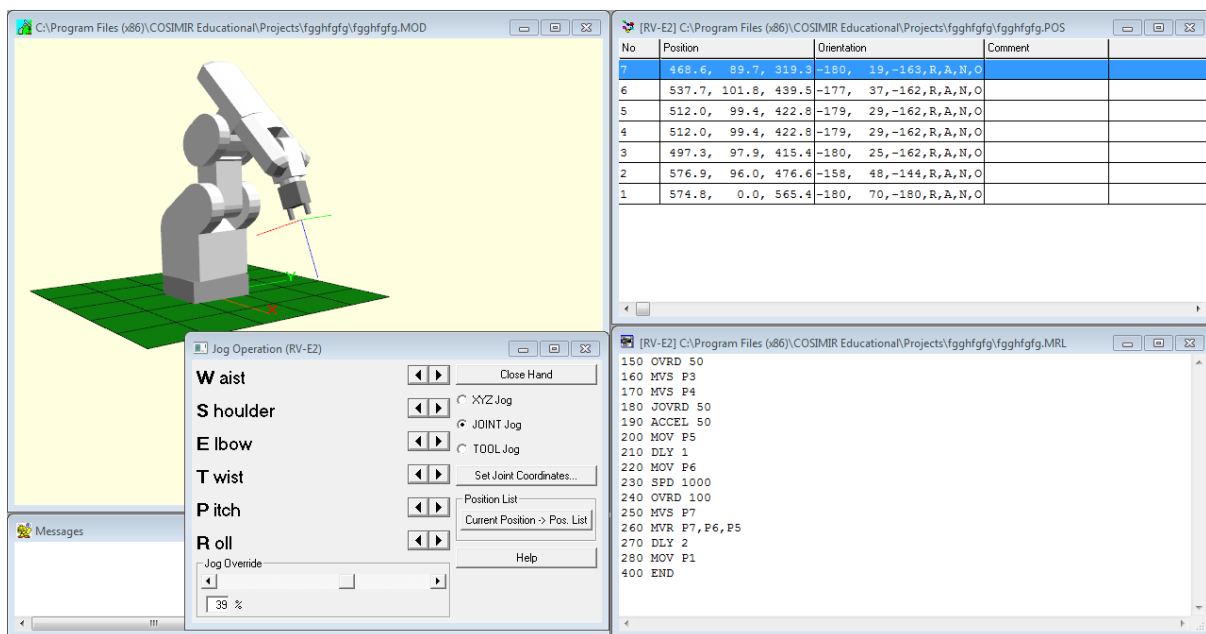


Εικόνα 3.1 Ο ελεγκτής CR1-571

3.3 Περιγραφή της γλώσσας MELFA BASIC IV

3.3.1 COSIROP

Η γραφή του προγράμματος πραγματοποιείται στο προγραμματιστικό περιβάλλον *COSIROP* και αποστέλλεται στο ελεκτή του ρομποτικού βραχίονα *προς μεταγλώττιση και εκτέλεση*. Επίσης το περιβάλλον του COSIROP επιτρέπει την διεπαφή του χρήστη με ρομποτικού βραχίονα καθώς παρέχεται η δυνατότητα για χειρισμό μέσω εντολών (*Command Tool*) ή γραφικού περιβάλλοντος (*Jog operation*) και η ανάγνωση όλων των πληροφοριών που αφορούν τη λειτουργία του (*monitors – parameters*).



Εικόνα 3.2 Το περιβάλλον του COSIROP

3.3.2 Περιγραφή Μετασχηματισμών συντεταγμένων και καταχώρηση στον ηλεκτή

Στη γλώσσα *MELFA BASIC*, αντίθετα της συνήθους περιγραφή μετασχηματισμού συντεταγμένων με τη μορφή ομογενή πίνακα, γίνεται χρήση ενός γενικευμένου διανύσματος συντεταγμένων, το οποίο περιέχει τις συντεταγμένες μετατόπισης και στροφής. Το διάνυσμα είναι της μορφής $[P_x, P_y, P_z, A_x, B_y, C_z]$ οι στροφές *Ax-By-Cy* αφορούν τις στροφές ως προς του σταθερούς άξονες *X-Y-Z* του πλαισίου αναφοράς (*X-Y-Z fixed angles*). Για την έκφραση του σε ομογενή μετασχηματισμό πραγματοποιούνται οι ακόλουθοι μετασχηματισμοί

$$Trans_{xyz}(P_x, P_y, P_z) \cdot Rot_z(C_z) \cdot Rot_y(B_y) \cdot Rot_x(A_x)$$

Η καταχώρηση ενός γενικευμένου διανύσματος συντεταγμένων στην μνήμη του ηλεκτή γίνεται με την ακόλουθη σύνταξη $Pn=(P_x, P_y, P_z, A_x, B_y, C_z)$ για παράδειγμα $P1=(100,0,200,180,0,180)$ στο παράθυρο γραφής του προγράμματος του COSIROP. Εναλλακτικά μπορεί να καταχωρηθεί στο παράθυρο **POSITION LIST** στο οποίο συμπληρώνονται τα αντίστοιχα κελιά· οι μονάδες των συντεταγμένων είναι σε χιλιοστά και μοίρες.

Με τη καταχώρηση του διανύσματος δεν προσδιορίζεται ποιο είναι το πλαίσιο αναφοράς ούτε ποιο περιγράφεται και ο προσδιορισμός τους γίνεται ανάλογα τη χρήση αυτού. Συνήθως γίνεται χρήση για να περιγράψει την επιθυμητή τοποθέτηση του άκρου $\{T\}$ αναφορικά του πλαισίου κόσμου $\{W\}$, ωστόσο αυτό δεν αποτελεί υποχρέωση και μπορεί να κληθεί για οποιαδήποτε άλλη λειτουργία απαιτηθεί, όπως για παράδειγμα ένας καταχωρημένος μετασχηματισμός μπορεί να προσδιορίσει τη σχέση που συνδέει το τελικό στοιχείο δράσης με το πλαίσιο φλάντζας.

3.3.3 Συντεταγμένες στο χώρο των αρθρώσεων

Με τον όρο συντεταγμένες στο χώρο των αρθρώσεων νοούνται οι μεταβλητές των αρθρώσεων, στην MELFA BASIC η καταχώρηση γίνεται όπως το ακόλουθο παράδειγμα $J1=(20,-20,120,0,-10,0)$.

3.3.4 Προσδιορισμός πλαισίου Κόσμου

Για τον προσδιορισμό του πλαισίου κόσμου απαιτείται να περιγραφεί η τοποθέτηση του πλαισίου βάσης $\{0\}$ του ρομπότ σχετικά του πλαισίου κόσμου, η περιγραφή της τοποθέτησης για την MELFA BASIC γίνεται με την εντολή *BASE* ακολουθούμενη από τα δεδομένα μετασχηματισμού πχ *BASE (0,-300,-100,0,0,90)* ή *BASE P4* όπου *P4* ήδη καταχωρημένη μεταβλητή συντεταγμένων. Στις περισσότερες περιπτώσεις εργασιών το πλαίσιο κόσμου ταυτίζεται με το πλαίσιο τα της βάσης του βραχίονα και σε περίπτωση που επιθυμούμε την ταύτιση του πλαισίου κόσμου με αυτό της βάσης του ρομπότ, εκτελείται η εντολή ως ακολούθως *BASE(0,0,0,0,0,0)* ή *BASE P_NBASE*. Η μεταβλητή *P_NBASE* είναι καταχωρημένη στον ηλεκτή του βραχίονα, χωρίς την δυνατότητα τροποποίησης της και πρόκειται για γενικευμένο διάνυσμα με μηδενικές τιμές $P_NBASE=(0,0,0,0,0,0)$, παρέχεται προς διευκόλυνση στην επαναφορά του πλαισίου κόσμου στην θέση ταύτισης.

3.3.5 Προσδιορισμός πλαισίου εργαλείου

Το πλαίσιο του εργαλείου $\{T\}$ πρέπει να ορισθεί σε σχέση με το πλαίσιο φλάντζας $\{F\}$ του ρομπότ όπως περιγράφηκε και στην ενότητα 2.2, στη MELFA BASIC για το προσδιορισμό του γίνεται χρήση της εντολής **TOOL** ακολουθούμενη και εδώ από τα δεδομένα μετασχηματισμού, για παράδειγμα **TOOL (150,0,140,0,60,0)**. Η επαναφορά στην αρχική θέση (ταύτιση $\{T\} - \{F\}$) μπορεί να γίνει με σύνταξη όπως ακολούθως **TOOL P_NTOOL**, όπου **P_NTOOL** αντίστοιχα με την **P_NBASE** πρόκειται για καταχωρημένη μεταβλητή μηδενικών συντεταγμένων.

3.3.6 Τοποθέτηση τελικού στοιχείου δράσης στο χώρο και διαμόρφωση του βραχίονα

Η τοποθέτηση του τελικού στοιχείου δράσης στο τριωδιάστατο χώρο για το ρομποτικό βραχίονα μπορεί να πραγματοποιηθεί με έως και τέσσερις διαφορετικές γεωμετρικές διαμορφώσεις των μελών του όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, έτσι στην περίπτωση που μία καταχώρηση μεταβλητής συντεταγμένων κληθεί για να **περιγράψει την τοποθέτηση του τελικού στοιχείου $\{T\}$ δράσης αναφορικά του πλαισίου κόσμου $\{W\}$** μπορεί επιπρόσθετα να συνοδεύεται και από τα δεδομένα γεωμετρικής διαμόρφωσης.

Στη Melfa Basic IV η περιγραφή της στάσης γίνεται με ένα αριθμό (0-7), ο οποίος εξάγεται βάσει της ακόλουθης σύμβασης. Αυτός αριθμός καλείται ως **FLAG1** ή **POSTURE FLAG** από τη MELFA BASIC.

Non Flip / Flip → 1/0

Right / Left → 1/0

Above / Below → 1/0

<i>Posture</i>			<i>Binary Value</i>			<i>Dec Value</i>
<i>Arm</i>	<i>Elbow</i>	<i>Wrist</i>	<i>Arm</i>	<i>Elbow</i>	<i>Wrist</i>	<i>FLAG1</i>
L	B	F	0	0	0	0
L	B	N	0	0	1	1
L	A	F	0	1	0	2
L	A	N	0	1	1	3
R	B	F	1	0	0	4
R	B	N	1	0	1	5
R	A	F	1	1	0	6
R	A	N	1	1	1	7

Πίνακας 3.1 Εξαγωγή δεδομένων γεωμετρικής διαμόρφωσης Βραχίονα

Με βάση τα παραπάνω η καταχώρηση συντεταγμένων συνοδευμένη από δεδομένα διαμόρφωσης (FLAG1) γράφεται

$P1 = (-164, 45.1, 989, -7.4, 19.2, -137.5)(3,0)$

$P2 = (-164, 45.1, 989, -7.4, 19.2, -137.5)(6,0)$

Στη πρώτη περίπτωση με την τοποθέτηση του τελικού στοιχείου δράσης όπως περιγράφει το P1 ο ρομποτικός βραχίονας θα λάβει τη διαμόρφωση LAN, ενώ στη δεύτερη περίπτωση θα

γινόταν προσέγγιση του ίδιου σημείου με διαμόρφωση RAF.

Στην Περίπτωση που τα δεδομένα διαμόρφωσης (FLAG1) αγνοηθούν τότε ο η τοποθέτηση γίνεται με διαμόρφωση για την οποία θα πραγματοποιηθεί η ελάχιστη περιστροφή των αρθρώσεων.

Σε αυτό το σημείο να υπενθυμίσουμε ότι στην περίπτωση που η καταχωρημένη μεταβλητή κληθεί να περιγράψει τοποθέτηση του τελικού στοιχείου δράσης **οι συντεταγμένες περιγράφονται αναφορικά του πλαισίου κόσμου {W} και δεν πρέπει να συγχέεται με το πλαίσιο βάσης του ρομπότ** ειδικά όταν έχει επιλεγεί να μη ταυτίζεται με αυτό.

3.3.7 Κινήσεις Ρομποτικού βραχίονα

Η τοποθέτηση πραγματοποιείται με την κίνηση από το τρέχον σημείο στο σημείο στόχο. Για την πραγματοποίηση της κίνησης πρέπει να περιγραφεί το είδος της. Οι κινήσεις που δύναται να πραγματοποιήσει ο βραχίονας διακρίνονται σε *οδεύσεις στον καρτεσιανό χώρο του τελικού στοιχείου δράσης* και σε *οδεύσεις στο χώρο των αρθρώσεων*. Οι οδεύσεις στον καρτεσιανό χώρο μπορούν να χαρακτηριστούν από το είδος της τροχιάς που ακολουθεί το άκρο, σε κίνηση ευθύγραμμης παρεμβολής, σε κινήσεις κυκλικής παρεμβολής και σε κίνηση ελεύθερης παρεμβολής.

3.3.8 Κίνηση γραμμικής παρεμβολής στο καρτεσιανό χώρο

Η κίνηση της γραμμικής παρεμβολής ή *ευθύγραμμης καρτεσιανής κίνησης* για το ρομποτικό βραχίονα πραγματοποιείται με τη κλήση της εντολής *MVS* ακολουθούμενη από τη καταχωρημένη μεταβλητή συντεταγμένων που περιγράφουν το σημείο στόχο. Το άκρο του βραχίονα πρακτικά κινείται πάνω στο ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει το αρχικό σημείο (τρέχων κατά την αποστολή της εντολής) και το σημείο στόχο, επίσης οι γωνίες που χαρακτηρίζουν το προσανατολισμό του άκρου μεταβάλλονται γραμμικά κατά τη διάρκεια της κίνησης, παράδειγμα χρήσης *MVS P1*. Η κίνησης γραμμικής παρεμβολής χρησιμοποιείται για σχετικά μικρές μετατοπίσεις.

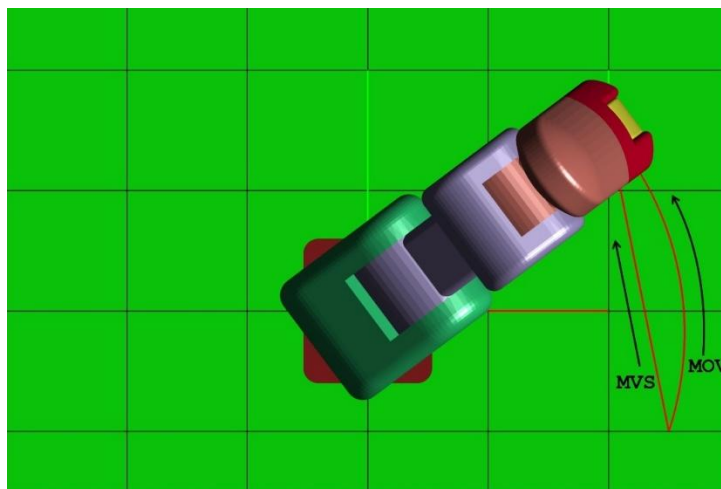
3.3.9 Κίνηση ελεύθερης παρεμβολής στο καρτεσιανό χώρο

Η κίνηση της ελεύθερης παρεμβολής αφορά τη μετακίνηση του άκρου βραχίονα από ένα σημείο σε ένα άλλο (point to point movement) χωρίς να προσδιορίζεται άμεσα η τροχιά που θα ακολουθήσει. Πρακτικά με τη αποστολή της εντολής, για την επιθυμητή τοποθέτηση επιλύεται το αντίστροφο κινηματικό, υπολογίζεται η γωνιά που πρέπει να περιστρέφει (διανύσει) η κάθε άρθρωση, στη συνέχεια με βάση την μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα της κάθε άρθρωσης υπολογίζεται ο χρόνος μετάβασης της στην τιμή στόχο και βάσει τον μεγαλύτερο χρόνο εξ αυτών πραγματοποιείται η κίνηση ορίζοντας τέτοια τιμή ταχύτητας για κάθε άρθρωση έτσι ώστε όλες οι αρθρώσεις να ξεκινήσουν και να ολοκληρώσουν την κίνηση ταυτόχρονα. Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι η τελική κίνηση του στοιχείου δράσης είναι απροσδιόριστη τόσο ως προς την τροχιά, όσο και ο προς τον προσανατολισμό που θα έχει κατά την διάρκεια της κίνησης, ωστόσο η κίνηση στο χώρο των αρθρώσεων είναι απόλυτα γραμμική και τον συγκεκριμένο είδος κίνησης αναφέρεται και ως Joint Interpolation Movement.

Η κίνηση της ελεύθερης παρεμβολής είναι αυτή με τη συχνότερη χρήση, εντούτοις η χρήση της είναι απαγορευτική σε περιπτώσεις κινήσεων κοντά σε εμπόδια και σε κινήσεις

ακριβείας.

Για το βραχίονα εκτελείται με την αποστολή της συνάρτησης **MOV** ακολουθούμενη από τη καταχωρημένη μεταβλητή συντεταγμένων που περιγράφει το σημείο στόχο πχ **MOV P1**. Εναλλακτικά μπορεί να δεχτεί όρισμα μεταβλητή με καταχωρημένες τις μεταβλητές των αρθρώσεων, πχ **MOV J1**.



Εικόνα 3.3 Σύγκριση τροχιάς με χρήση των εντολών MOV και MVS

3.3.10 Κινήσεις κυκλικής παρεμβολής

Για τις κινήσεις κυκλικής παρεμβολής το άκρο του βραχίονα κινείται σε τόξο κύκλου ή σε ολόκληρο κύκλο, οι εντολές που δημιουργούν τις κινήσεις είναι οι ακόλουθες **MVR**, **MVR2**, **MVR3**, **MVC** και για τις τέσσερις εντολές η κλήση γίνεται ακολουθούμενη από τρία σημεία τα οποία ορίζουν κύκλο.

Η **MVR** συντάσσεται ως εξής **MVR P1,P2,P3** τα τρία σημεία ορίζουν κύκλο και βρίσκονται στην περίμετρο αυτού, το άκρο του βραχίονα θα κινηθεί στο τόξο του κύκλου από το αρχικό P1 στο τελικό P3 διερχόμενο από το P2.

Η **MVR2** συντάσσεται ως εξής **MVR2 P1,P2,P3** τα τρία σημεία βρίσκονται στη περίμετρο του κύκλου, σε αυτή την περίπτωση το άκρο θα κινηθεί από το P1 στο τελικό P3 αποφεύγοντας να περάσει από το P2, συγκεκριμένα τα σημεία P1 και P3 χωρίζουν το κύκλο σε δύο τόξα, η κίνηση θα πραγματοποιηθεί στο τόξο που δεν περιέχει το P2.

Η **MVR3** συντάσσεται ως εξής **MVR3 P1,P2,P3** σε αυτή τη περίπτωση το τόξο ορίζεται από το κέντρο του και από σημεία της περιμέτρου του, το P2 αποτελεί το κέντρο του κύκλου ενώ το P1 και P3 τα άκρα του, το άκρο του βραχίονα κινείται από το P1 στο τελικό P3.

Η εντολή **MVC** αφορά την κίνηση του άκρου κατά μήκος ολόκληρου κύκλου, συντάσσεται ως εξής **MVC P1,P2,P3** τα τρία σημεία αποτελούν σημεία της περιμέτρου του κύκλου το P1 αποτελεί το αρχικό και τελικό σημείο τα P2 και P3 ορίζουν τη κατεύθυνση της κίνησης αφού πρώτα θα περάσει από το P2 και μετά από το P3.

Στις παραπάνω τέσσερις περιπτώσεις κυκλικής παρεμβολής στην περίπτωση που το αρχικό σημείο της παρεμβολής δεν είναι το τρέχον σημείο του άκρου ο βραχίονας κινείται σε αυτό

γραμμικά, επίσης ο προσανατολισμός του άκρου θα μεταβάλλεται γραμμικά κατά την διάρκεια της κίνησης.

3.3.11 Σχετικές κινήσεις

Η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα όπως περιγράφηκε παραπάνω αφορά την κίνηση του άκρου αναφορικά του ορισμένου πλαισίου κόσμου, σε πολλές όμως εργασίες είναι χρήσιμη η μετακίνηση του άκρου αναφορικά άλλων πλαισίων συντεταγμένων όπως της τρέχουσας τοποθέτησης του άκρου. Από την MELFA BASIC δεν παρέχεται συγκεκριμένη εντολή που να προσδιορίζει το πλαίσιο αναφοράς για την κίνηση και αυτό μπορεί να γίνει έμμεσα με τη κατάλληλη σύνταξη της εντολής όπως φαίνεται παρακάτω **MOV P1*P2, MVS P1*P2** σε αυτές τις περιπτώσεις το άκρο του βραχίονα θα κινηθεί στο σημείο που προκύπτει από την σχετική θέση που περιγραφεί η γενικευμένη συντεταγμένη P2 αναφορικά της P1 η οποία αναφέρεται ως προς το πλαίσιο του κόσμου {W} Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η *κίνηση αναφορικά του πλαισίου του άκρου*, σε αυτή τη περίπτωση γίνεται χρήση της μεταβλητής **P_CURR**, η οποία είναι μια δυναμική μεταβλητή καταχωρημένη στη μνήμη του ρομπότ και περιέχει την τρέχουσα τοποθέτηση του άκρου αναφορικά του πλαισίου κόσμου, η σύνταξη των εντολών γίνεται ως εξής **MOV P_CURR*P1, MVS P_CURR*P1**. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά Αριθμητικών πράξεων στη MELFA BASIC IV υπάρχουν στις σημειώσεις του εργαστηριακού μαθήματος της ρομποτικής [2] (pg.27).

3.3.12 Εντολές παραμέτρων κίνησης

Για τον πλήρη έλεγχο των κινήσεων του ρομποτικού βραχίονα απαιτείται η παραμετροποίηση τους ως προς την ταχύτητα και την επιτάχυνση κατά την εκτέλεση τους. Οι εντολές παραμετροποίησης της κίνησης που προσφέρονται από την MELFA BASIC είναι οι **SPD, OVRD, JOVRD, ACCEL**.

SPD

Η εντολή **SPD** καλείται για να ορίσει τη μέγιστη γραμμική ταχύτητα του τελικού στοιχείου του βραχίονα, η μέγιστη δυνατή ταχύτητα κίνησης όπως αυτή δίνεται από τον κατασκευαστή είναι τα **3500 mm/s**, καλείται όπως φαίνεται στο ακόλουθο παράδειγμα **SPD 400**, η αποστολή της περιορίζει την ταχύτητα στο 400 mm/s.

OVRD

Η εντολή **OVRD** αφορά επίσης τη γραμμική ταχύτητα του άκρου, σε αυτή την περίπτωση εκφράζουμε την ταχύτητα ως ποσοστό επί της μέγιστης ορισμένης γραμμικής ταχύτητας από το χρήστη, καλείται με όρισμα τον ακέραιο αριθμό επί τις εκατοστιαίας αναλογίας, για παράδειγμα **OVRD 50**, η αποστολή της περιορίζει την μέγιστη γραμμική ταχύτητα στο 50% της μέγιστης ορισμένης (SPD).

JOVRD

Η εντολή **JOVRD** καλείται για να περιορίσει ποσοστιαία την μέγιστης γωνιακή ταχύτητα των αρθρώσεων, η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα για κάθε άρθρωση είναι ορισμένη από τον κατασκευαστή, καλείται όπως στο ακόλουθο παράδειγμα **JOVRD 50**.

Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι ο περιορισμός της γραμμικής ταχύτητας αφορά τα καρτεσιανά μοντέλα κίνησης ενώ ο περιορισμός της γωνιακής ταχύτητας αφορά την κίνηση στο χώρο των αρθρώσεων.

ACCEL

Η εντολή **ACCEL** καλείται για να ορίσει την επιτάχυνσης-επιβράδυνση κατά την κίνηση, είτε η κίνηση αφορά το καρτεσιανό χώρο είτε το χώρο των αρθρώσεων. Η εντολή ορίζει τον χρόνο στον οποίο θα επιτευχθεί η μέγιστη ταχύτητα ή η ακινητοποίηση από αυτή ως ένα ποσοστό, με προκαθορισμένο χρόνο μεταβολής τα 0.2 sec να αντιπροσωπεύουν το 100%. Η εντολή συντάσσεται όπως ακολούθως ACCEL 100,50 η οποία εκφράζει χρόνο επιτάχυνσης 0.2 sec και χρόνο επιβράδυνσης 0.4 sec ή με μοναδικό όρισμα όπως ACCEL 40 όπου επιτάχυνση και επιβράδυνση λαμβάνουν κοινό χρόνο. Μέγιστη δυνατή τιμή που μπορεί να λάβει είναι το 400, το οποίο αντιστοιχεί σε χρόνο 0.05sec (50ms).

$$t = \frac{100\% \times 0.2 \text{ [sec]}}{\text{Accel Value}}$$

3.3.13 Εντολές Ελέγχου Λειτουργίας

Οι παρακάτω εντολές αφορούν το χειρισμό του βραχίονα μέσα από το παράθυρο Command Tool του COSIROP για αποστολή μεμονωμένων εντολών, σε όλες τις άλλες περιπτώσεις λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα οι παρακάτω παράμετροι καθορίζονται αυτόματα.

CNTL

Η εντολή **CNTL** ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί την δυνατότητα ελέγχου του ρομπότ από εντολές στο παράθυρο Command Tool, συντάσσεται ως **CNTL ON** ή **CNTL OFF**.

SRV

Η εντολή **SRV** ενεργοποιεί τους κινητήρες του ρομποτικού βραχίονα ώστε να είναι δυνατή η πραγματοποίηση κινήσεων και συντάσσεται ως **SRV ON** ή **SRV OFF**.

STOP

Η εντολή **STOP** αποστέλλεται ως έχει και σκοπός της είναι η ακύρωση της τρέχουσας κίνησης.

3.4 Παράδειγμα τυπικής λειτουργίας

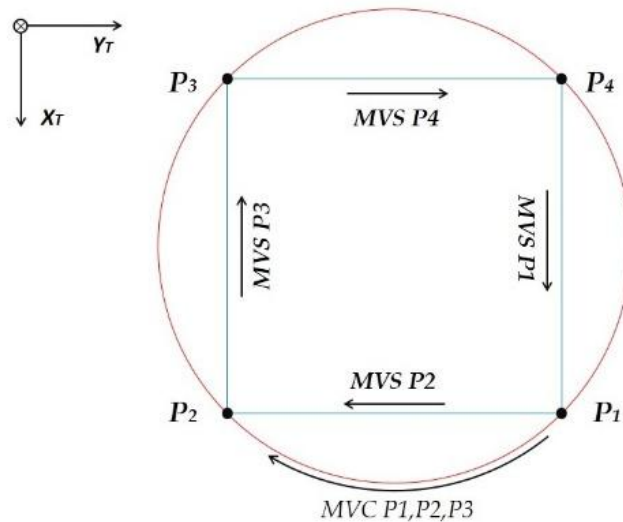
Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αποστολής εντολών από το Command Tool του COSIROP, στο σύνολο του παραλείποντας τις εντολές CNTL και SERVO θα μπορούσε να γραφεί και ως πρόγραμμα και να σταλεί στον ελεγκτή προς εκτέλεση.

Με την εκτέλεση των παρακάτω εντολών το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα θα κινηθεί από την τρέχουσα θέση με ελεύθερη παρεμβολή (MOV) στο σημείο P1, εν συνεχεία υλοποιούνται γραμμικές και κυκλικές κινήσεις μεταξύ σημείων που σχηματίζουν τετράγωνο και κύκλο αντίστοιχα, καθ' όλη την διάρκεια των κινήσεων ο προσανατολισμός του τελικού στοιχείου δράσης παραμένει σταθερός. Με το πέρας των κινήσεων ο βραχίονας επιστρέφει στην αρχική του διαμόρφωση, η οποία είχε καταχωρηθεί στη μεταβλητή P0 πριν την πραγματοποίηση των κινήσεων. Επίσης θεωρούμε τελικό στοιχείο δράσης με μήκος 120mm και ταύτιση πλαίσιο κόσμου {W} με πλαίσιο βάσης {0}.

```

CNTL ON
TOOL(0,0,120,0,0,0)
BASE P_NBASE
P0=P_CURR
P1=(300,-100,400,180,0,180)
P2=(300,100,400,180,0,180)
P3=(500,100,400,180,0,180)
P4=(500,-100,400,180,0,180)
ACCEL 50,100
SPD 1000
JOVRD 40
OVRD 80
SERVO ON
MOV P1
MVS P2
MVS P3
MVS P4
MVS P1
OVRD 40
MVC P1,P2,P3
MOV P0
SERVO OFF
CNTL OFF

```



3.5 Συγκεντρωτικοί πίνακες Εντολών

Πίνακας καταχωρημένων μεταβλητών στον CONTROLLER

μεταβλητή	Περιγραφή
P_CURR	περιέχει την τρέχουσα θέση του τελικού στοιχείου δράσης αναφορικά του πλαισίου κόσμου
J_CURR	περιέχει τις τρέχουσες τιμές των αρθρώσεων
P_TOOL	Περιέχει τον τρέχον μετασχηματισμό του τελικού στοιχείου δράσης ως προς τη φλάντζα
P_BASE	Περιέχει τον τρέχον μετασχηματισμό της βάσης ως προς το πλαίσιο κόσμου
P_NTOOL	(0,0,0,0,0,0)
P_NBASE	(0,0,0,0,0,0)

Πίνακας εντολών MELVA BASIC IV

Εντολές	<Arguments>	Περιγραφή	Σύνταξη
CNTL	ON / OFF	Ενεργοποίηση/ Απενεργοποίηση Επικοινωνίας ρομπότ HY	CNTLON CNTLOFF
SRV	ON / OFF	Ενεργοποίηση/ Απενεργοποίηση Κινητήρων Ρομποτικού βραχίονα	SRVON SRVOFF
STOP	-	Διακοπή κίνησης ρομποτικού βραχίονα	STOP
BASE	Position Variable	Προσδιορισμός πλαισίου κόσμου	BASE (0,0,0,0,0,0)
TOOL	Position Variable	Προσδιορισμός πλαισίου εργαλείου	TOOL(0,0,120,0,0,0)
JOVRD	Value (%)	Περιορισμός μέγιστης ταχύτητας αρθρώσεων	JOVRD 50
OVRD	Value (%)	Περιορισμός μέγιστης γραμμικής ταχύτητας	OVRD 40
SPD	Value [mm/s]	Προσδιορισμός μέγιστης γραμμικής ταχύτητας	SPD 1000
ACCEL	Value (%)	Προσδιορισμός επιτάχυνσης/ επιβράδυνσης	ACCEL 50,40
MOV	Position Variable	Κίνηση point to point	MOV P1
MVS	Position Variable	Κίνηση γραμμικής παρεμβολής	MVS P1
MVR	Position Variables	Κίνηση σε τόξο κύκλου	MVR P1,P2,P3
MVR2	Position Variables	Κίνηση σε τόξο κύκλου	MVR2 P1,P2,P3
MVR3	Position Variables	Κίνηση σε τόξο κύκλου	MVR3 P1,P2,P3
MVC	Position Variables	Κίνηση σε ολόκληρο κύκλο	MVC P1,P2,P3

4 Χειρισμός του ρομποτικού βραχίονα RV-2A από το περιβάλλον του matlab

4.1 Εισαγωγή

Για το χειρισμό του ρομποτικού βραχίονα από το περιβάλλον του matlab αναπτύχθηκε ένα σύνολο συναρτήσεων που αναλαμβάνουν να αποστείλουν τις εντολές στο ελεγκτή του ρομπότ. Η ονοματολογία των συναρτήσεων επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να παραπέμπει τόσο στην ενέργεια που πραγματοποιούν όσο και στις εντολές τις MELFA BASIC. Επίσης δημιουργήθηκαν οι συναρτήσεις επίλυσης του ευθέως και αντίστροφου κινηματικού για το ρομποτικό βραχίονα. Σε όλες τις περιπτώσεις των συναρτήσεων που γίνεται χρήση μεταβλητών των αρθρώσεων, αυτές αφορούν τις τιμές όπως αποστέλλονται στον ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα (q).

Σε αυτό το σημείο να επισημάνουμε, ότι ο χειρισμός μέσα από το περιβάλλον του matlab δεν επηρεάζει τις συνθήκες ασφαλείας του ρομποτικού βραχίονα, ο ελεγκτής εκτελεί τις ίδιες λειτουργίες εποπτείας με σκοπό την επιτυχή και ασφαλή χρήση. Επίσης η γραφή των συναρτήσεων κινηματικής στο περιβάλλον του matlab έγινε με τρόπο ιδανικό για χρήση σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, ώστε να προσθέσουν μια επιπλέον δικλίδα ασφαλείας στο χειρισμό του ρομποτικού συστήματος, χαρακτηριστικά οι συναρτήσεις κινηματικής επιφέρουν λύσεις σε χρόνους μικρότερους των 20ms.

4.2 Συναρτήσεις κινηματικής

Για την επίλυση των κινηματικών προβλημάτων του βραχίονα είναι απαραίτητη η γνώση όλων των παραμέτρων που αφορούν τη λειτουργία του ρομπότ, για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε το αρχείο **RV2A.mat** το οποίο περιέχει όλες τις βασικές παραμέτρους που απαιτούνται για το ρομπότ, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο χρήστη να παραμετροποιεί τις πληροφορίες που αφορούν την λειτουργία του χωρίς να επεμβαίνει στις συναρτήσεις κινηματικής, στο παράρτημα 2 παρουσιάζεται ο τρόπος δόμησης του αρχείου RV2A.mat. Για την χρήση των συναρτήσεων επίλυσης των κινηματικών προβλημάτων προϋπόθεση είναι η φόρτωση του αρχείου **RV2A.mat** στο workspace του matlab. Με άλλα λόγια, οι συναρτήσεις επίλυσης του κινηματικού προβλήματος αντλούν τις απαραίτητες παραμέτρους του ρομπότ από το αρχείο **RV2A.mat**.

4.2.1 Συνάρτηση επίλυσης ευθέως κινηματικού

Για την επίλυση του ευθέως κινηματικού του ρομποτικού βραχίονα δημιουργήθηκε η συνάρτηση *fkinRV2A*, η οποία δέχεται ως όρισμα τις τιμές των αρθρώσεων όπως αυτές θα αποστέλλονται στον ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα (q) καταχωρημένες σε ένα πίνακα

έξι στοιχείων γραμμής ή στήλης. Η συνάρτηση επιστρέφει τον ομογενή πίνακα που περιγράφει το πλαίσιο του τελικού στοιχείου δράση $\{T\}$ αναφορικά του πλαισίου κόσμου $\{W\}$ καθώς και τον αριθμό (POSTURE FLAG) που χαρακτηρίζει την συγκεκριμένη γεωμετρική διαμόρφωση που λαμβάνει ο βραχίονας.

```
%-----
%Example 1
>> [T,flag]=fkinRV2A([0 0 100 50 20 40]')

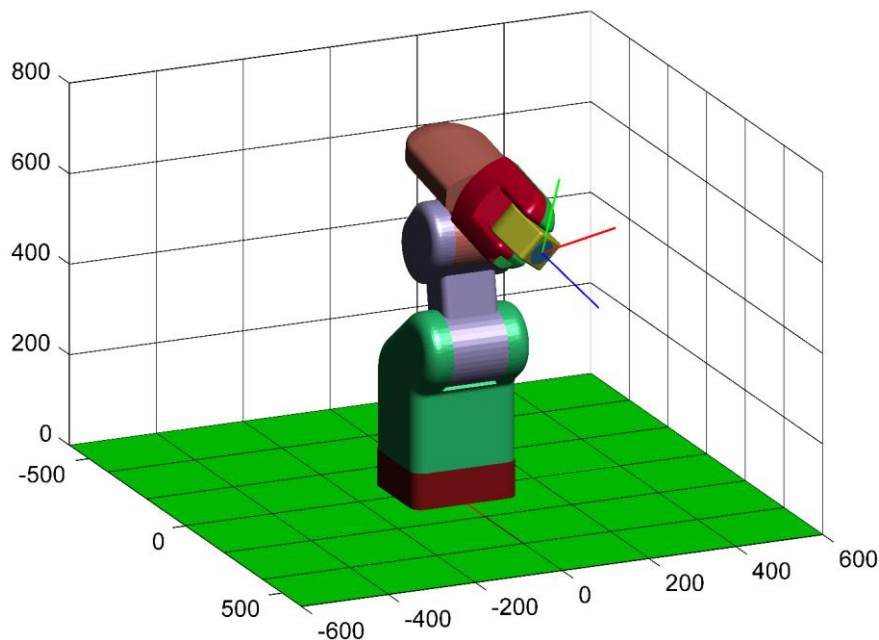
T =
    -0.2529    0.3858    0.8872   444.1917
     0.9646    0.0297    0.2620    22.2702
     0.0747    0.9221   -0.3797   652.3400
         0         0         0        1.0000

flag =
     7
%-----
```

Η συνάρτηση *fkinRV2A* μπορεί να δεχτεί επιπρόσθετα δύο ορίσματα (options) με σκοπό είτε να για να επιστρέψει τον ομογενή μετασχηματισμό με την μορφή γενικευμένου διανύσματος, είτε να απεικονίσει το ρομποτικό βραχίονα για τις δεδομένες γωνίες· τα options είναι *'MELFA'* και *'disp'* αντίστοιχα και ο τρόπος εφαρμογής παρουσιάζεται στο παρακάτω παράδειγμα.

```
%-----
%Example 2
>> [T,flag]=fkinRV2A([0 0 100 50 20 40], 'MELFA')

T =
    444.1917    22.2702    652.3400   112.3800   -4.2863   104.6892
    flag =
         7
%Example 3
>> [T,flag]= fkinRV2A([0 0 100 50 20 40], 'MELFA', 'disp');
%-----
```



Εικόνα 4.1 Παράδειγμα απεικόνισης του ρομποτικού βραχίονα στο περιβάλλον του matlab

4.2.2 Συνάρτηση επίλυσης αντίστροφου κινηματικού

Η επίλυση του αντίστροφου κινηματικού του ρομποτικού βραχίονα γίνεται με την κλήση της συνάρτησης *ikinRV2A()*, η οποία δέχεται ως όρισμά τον μετασχηματισμό που περιγράφει τη σχετική τοποθέτηση του τελικού στοιχείου δράσης αναφορικά του πλαισίου κόσμου. Για τον μετασχηματισμό υπάρχει η δυνατότητα καταχώρησης του είτε με την μορφή ομογενή πίνακα μετασχηματισμού συντεταγμένων είτε με την μορφή γενικευμένου διανύσματος όπως αυτό στην γλώσσα MELFA BASIC. Η συνάρτηση επιστρέφει τους πιθανούς συνδυασμούς γωνιών που επιφέρουν την επιθυμητή τοποθέτηση. Το αποτέλεσμα επιστέφεται με την μορφή πίνακα 8x6 στοιχείων, για τον οποίο κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό συνδυασμό λύσης, η λύσεις είναι ταξινομημένες στον πίνακα σύμφωνα με την στάση (διαμόρφωση) που υλοποιούν, δηλαδή η διαμόρφωση 0 (LBF) τοποθετείται στην πρώτη γραμμή, η διαμόρφωση 1 (LBN) στην δεύτερη γραμμή έως και την τελευταία διαμόρφωση, στην περίπτωση που κάποια διαμόρφωση δεν είναι επιτεύξιμη τότε η συγκεκριμένη γραμμή συμπληρώνεται με NaN. **Οι γωνίες που επιστρέφονται αντιστοιχούν στις γωνίες του πραγματικού ρομποτικού βραχίονα (q).** Ακολουθεί ένα παράδειγμα στο οποίο δίνεται ως όρισμα στην συνάρτηση το επιθυμητό γενικευμένο διάνυσμα συντεταγμένων.

```
%-----  
% Example 1  
  
>> ikinRV2A([-145.0200   83.8800   873.4000   -7.3900   19.2400 -137.4800])  
  
ans =  
  
0 LBF→   NaN         NaN         NaN         NaN         NaN         NaN  
1 LBN→   NaN         NaN         NaN         NaN         NaN         NaN  
2 LAF→  -40.0000    -44.0000    51.0000    85.0000   -20.0000   180.0000  
3 LAN→  -40.0000    -44.000    51.0000   -95.000    20.0000    0.0000  
4 RBF→   NaN         NaN         NaN         NaN         NaN         NaN  
5 RBN→   NaN         NaN         NaN         NaN         NaN         NaN  
6 RAF→  140.0000   -25.2550    92.1390   -20.8540   -73.1770    90.9780  
7 RAN→  140.0000   -25.2550    92.1390   159.1460    73.1770    89.0220  
  
%-----
```

4.3 Συναρτήσεις Ελέγχου Ρομποτικού βραχίονα

Παρακάτω περιγράφονται οι συναρτήσεις που αφορούν το χειρισμό του ρομποτικού βραχίονα από το περιβάλλον του matlab, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει των ενεργειών που επιτελούν σε συναρτήσεις προσδιορισμού κατάστασης λειτουργίας, καταχώρησης συντεταγμένων, προσδιορισμού πλαισίων TOOL/BASE, συναρτήσεις κίνησης και συναρτήσεις ερωτημάτων.

4.3.1 Συναρτήσεις προσδιορισμού κατάστασης λειτουργίας ρομποτικού βραχίονα

OPENCOM_RV2A

Η συνάρτηση καλείται για την αποκατάσταση της επικοινωνίας του ρομποτικού βραχίονα με το matlab δέχεται ως όρισμα τον αριθμό της θύρας COM, η οποία έχει δεσμευτεί από το ρομποτικό βραχίονα, για παράδειγμα θύρα 6 (COM6).

```
%-----  
% Example  
>> OPENCOM_RV2A(6)  
%-----
```

CLOSECOM_RV2A

Η συνάρτηση καλείται για την αποδέσμευση της θύρας από το matlab

```
%-----  
% Example  
>> CLOSECOM_RV2A  
%-----
```

CNTL

Η συνάρτηση *CNTL* καλείται με σκοπό να ενεργοποιήσει/ απενεργοποιήσει τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα από τον Η/Υ με αποστολή εντολών, δέχεται ως όρισμα τιμές 1 ή 'ON' για την ενεργοποίηση του έλεγχου και 0 ή 'OFF' για την απενεργοποίηση.

```
%-----  
% Example  
>> CNTL(1)  
>> CNTL(0)  
>> CNTL('ON')  
>> CNTL('OFF')  
%-----
```

SERVO

Η συνάρτηση *SERVO* καλείται για την ενεργοποίηση/ απενεργοποίηση των σερβοκινητήρων, ορίσματα που δέχεται 1 ή 'ON' και 0 ή 'OFF'.

```
%-----  
% Example  
>> SERVO(1)  
>> SERVO(0)  
>> SERVO('ON')  
>> SERVO('OFF')  
%-----
```

STOP

Η συνάρτηση καλείται χωρίς όρισμα και χρησιμοποιείται για την άμεση παύση της κίνηση που εκτελεί ο βραχίονας.

```

%-----
% Example
>> STOP
%-----

```

4.3.2 Καταχώρηση συντεταγμένων

SETPOSITION

Καλείται για την καταχώρηση στον ελεγκτή του βραχίονα μίας μεταβλητής που αντιστοιχεί σε συντεταγμένες στο καρτεσιανό χώρο, δέχεται ως όρισμα το όνομα της μεταβλητής και τα δεδομένα των συντεταγμένων. Το όνομα της μεταβλητής πρέπει να ξεκινάει με το γράμμα 'P' το οποίο υποδηλώνει ότι πρόκειται για καρτεσιανές συντεταγμένες για παράδειγμα 'P1'. Τα δεδομένα των συντεταγμένων μπορεί να είναι είτε της μορφής γενικευμένου διανύσματος είτε της μορφής ομογενή πίνακα και μπορούν να συνοδεύονται από δεδομένα διαμόρφωσης (FLAG1) στην περίπτωση που επιθυμείται. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα κλήση της συνάρτησης για καταχώρηση της τρέχουσας τοποθέτησης του άκρου σε μία μεταβλητή με σκοπό την αποθήκευση της για μεταγενέστερη χρήση καλώντας την συνάρτηση με option 'current', παρακάτω ακολουθούν παραδείγματα κλήσης της συνάρτησης.

```

%-----
% Example 1
>> SETPOSITION('P1',[400 0 650 180 0 180])
>> SETPOSITION('P1',[400 0 650 180 0 180],7)

% Example 2
>> SETPOSITION('P2',HT4x4)
>> SETPOSITION('P2',HT4x4,7)

% Example 3 SAVE CURRENT POSITION
>> SETPOSITION('P2','current')
%-----

```

Μετατροπή αναπαραστάσεων καρτεσιανών συντεταγμένων

Για τη μετατροπή των αναπαραστάσεων μετασχηματισμών από ομογενή πίνακα σε γενικευμένο διάνυσμα και αντίστροφα δημιουργήθηκαν δύο συναρτήσεις, με σκοπό να απλοποιήσουν τη διαδικασία μετατροπής κατά την χρήση της εφαρμογής.

Η συνάρτηση *tr2xyzABC* καλείται με όρισμα ομογενή μετασχηματισμό και επιστρέφει γενικευμένο διάνυσμα συντεταγμένων $[P_x, P_y, P_z, A_x, B_y, C_z]$.

Η συνάρτηση *xyzABC2tr* καλείται με όρισμα γενικευμένο διάνυσμα συντεταγμένων και επιστρέφει ομογενή μετασχηματισμό.

```

%-----
%Example GENERAL VECTOR [X,Y,Z,A,B,C] -> HT4x4
>> T=xyzABC2tr([400 100 400 180 0 90]) % INPUT GENERAL VECTOR
T =
    0         1         0         400
    1         0         0         100
    0         0        -1         400
    0         0         0         1.0000
%-----

```



```

%-----
%Example HT4x4 -> GENERAL VECTOR [X,Y,Z,A,B,C]
>> T=tr2xyzABC(T)
T =
    400    100    400    180         0     90
%-----

```

SETJOINTSVAL

Καλείται για να καταχωρήσει μεταβλητή με συντεταγμένες των αρθρώσεων, όπως και στην SETPOSITION δέχεται όρισμα το όνομα της μεταβλητής και τις επιθυμητές τιμές των αρθρώσεων. Στην περίπτωση της SETJOINTSVAL το όνομα της μεταβλητής πρέπει να ξεκινάει με το γράμμα 'J', τα δεδομένα των αρθρώσεων πρέπει να περιέχονται σε ένα πίνακα έξι στοιχείων, επίσης παρέχεται η δυνατότητα καταχώρησης της τρέχουσας διαμόρφωσης με συντεταγμένες των αρθρώσεων με χρήση του option 'current', η σύνταξη γίνεται όπως τα παρακάτω παραδείγματα

```

%-----
% Examples
>> SETJOINTSVAL('J1',[ 0 0 90 0 40 0])

>> SETJOINTSVAL('J0','current')
%-----

```

4.3.3 Προσδιορισμός Πλαισίων Κόσμου – Τελικού στοιχείου δράσης

BASE/TOOL

Για τον προσδιορισμό των πλαισίων κόσμου και τελικού στοιχείου δράσης δημιουργήθηκαν οι συναρτήσεις *BASE* και *TOOL* αντίστοιχα, λαμβάνουν όμοια ονοματολογία με τις αντίστοιχες εντολές στην Melfa Basic, οι οποίες έχουν περιγραφεί στις παραγράφους 3.3.4 και 3.3.5. Στην περίπτωση των συναρτήσεων από το matlab παρέχεται ευελιξία ως προς το είδος του ορίσματος που θα περιγράψει την τοποθέτηση των πλαισίων, πέραν μιας καταχωρημένης μεταβλητής συντεταγμένων μπορεί να δοθεί με την μορφή γενικευμένου διανύσματος συντεταγμένων ή ομογενή μετασχηματισμού. Για επαναφορά στην αρχική θέση μπορεί να σταλεί ένας πίνακας μηδενικός πίνακας 6x1.

```

%-----
% Example 1
>> BASE([400 0 300 0 0 0])
>> TOOL([0 0 0 0 0 0])          % P_NTOOL
>> BASE('P1')
>> TOOL('P_NTOOL')

% Example 2
>> BASE(HT4x4)
>> TOOL(HT4x4)
%-----

```

4.3.4 Συναρτήσεις κίνησης

Καρτεσιανές κινήσεις

Οι συναρτήσεις δημιουργήθηκαν για την πραγματοποίηση καρτεσιανών κινήσεων λαμβάνουν την ίδια ονοματολογία με τις αντίστοιχες εντολές της Melfa Basic (MOV/MVS/MVC/MVR/MVR2/MVR3). Στην περίπτωση των συναρτήσεων χειρισμού από το περιβάλλον του matlab υπάρχει η ευελιξία ως προς το όρισμα που μπορούν να δεχτούν αντίθετα με τις εντολές στη Melfa Basic που δέχονται ως όρισμα ήδη καταχωρημένη μεταβλητή που περιέχει πληροφορίες συντεταγμένων, εναλλακτικά μπορούν να δεχτούν όρισμα πίνακα ομογενή μετασχηματισμού ή γενικευμένο διάνυσμα συντεταγμένων οι οποίοι μπορούν να συνοδεύονται από τα δεδομένα διαμόρφωσης όπως φαίνεται και στο παράδειγμα παρακάτω.

```
%-----  
% Example 1  
>> MOV([400 100 650 180 0 180])  
>> MVS([400 100 650 180 0 180])  
>> MVS([400 100 650 180 0 180],7)  
  
% Example 2  
>> MOV('P1')  
>> MOV('P1*P3')  
>> MVS('P2')  
>> MVC('P1','P2','P3')  
  
% Example 3  
>> MOV(HT4x4)  
>> MVS(HT4x4)  
>> MVC(HT4x4, 'P2',HT4x4) %ΚΛΗΣΗ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΘΕΣΗΣ  
>> MVR3(HT4x4,HT4x4, 'P2')  
%-----
```

Κίνηση των αρθρώσεων

Για την κίνηση στο χώρο των αρθρώσεων δημιουργήθηκε η συνάρτηση MVJ ώστε να είναι άμεσα διακριτή η επιτελούμενη ενέργεια, δέχεται ως όρισμα είτε καταχωρημένη μεταβλητή συντεταγμένων των αρθρώσεων είτε άμεσα τις συντεταγμένες.

```
%-----  
% Example 1  
>> MVJ([ 0 0 90 0 40 0])  
  
% Example 2  
>> MVJ('J2')  
%-----
```

Κίνηση αναφορικά πλαίσιου TOOL

Η κίνηση αναφορικά του πλαισίου του TOOL είναι μια βολική ενέργεια σε περιπτώσεις προσέγγισης στόχων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω από την MELFA BASIC δεν παρέχετε κάποια εντολή που να επιτελεί άμεσα την ενέργεια. Δημιουργήθηκε η συνάρτηση MVT με

σκοπό να υλοποιεί άμεσα την ενέργεια της κίνησης αναφορικά του TOOL, δέχεται ως όρισμα είτε καταχωρημένη μεταβλητή είτε μετασχηματισμό συντεταγμένων με μορφή ομογενή πίνακα ή γενικευμένου διανύσματος συντεταγμένων. Η κίνηση αναφορικά του TOOL ενδεικνύεται για μικρές κινήσεις κοντά σε σημεία στόχους. Η κίνηση αναφορικά του πλαισίου του TOOL δύναται να πραγματοποιηθεί και με τα δύο είδη κίνησης για τον καρτεσιανό χώρο, της ελεύθερης παρεμβολής και της γραμμικής παρεμβολής (βλέπε παράγραφους 3.3.8-3.3.9), με κατάλληλη σύνταξη της εντολής. Στην περίπτωση που επιθυμείται κίνηση ελεύθερης παρεμβολής η κλήση της συνάρτησης γίνεται απλά με όρισμα τις συντεταγμένες μετασχηματισμού, ενώ στην περίπτωση που επιθυμείται κίνηση γραμμικής παρεμβολής η κλήση πρέπει να περιέχει επιπλέον όρισμα το option `'straight'`, παρακάτω παρατίθενται παραδείγματα σύνταξης της συνάρτησης.

```
%-----
% Example 1 Joint Interpolation movement (MOV)
>> MVT([10 0 10 0 0 0])
>> MVT('P1')
>> MVT(HT4x4)

% Example 1 Linear Interpolation movement (MVS)
>> MVT([10 0 10 0 0 0], 'straight')
>> MVT('P1', 'straight')
>> MVT(HT4x4, 'straight')
%-----
```

Παραμετροποίηση κίνησης

Οι συναρτήσεις παραμετροποίησης κίνησης (*SPD / OVRD / JOVRD / ACCEL*) συνάσσονται όπως φαίνεται παρακάτω, οι αντίστοιχες εντολές της MELFA BASIC IV έχουν περιγραφεί στη παράγραφο 3.3.12.

```
%-----
% Example 1
>> SPD(400)
>> OVRD(50)
>> JOVRD(60)
>> ACCEL(60,70)
>> ACCEL(60)
%-----
```

4.3.5 Συναρτήσεις Ερωτημάτων

GETSTATE

Με την κλήση της συνάρτησης GETSTATE επιστρέφεται στο περιβάλλον του matlab μια μεταβλητή, η οποία περιέχει πληροφορίες για την κατάσταση λειτουργίας του ρομπότ, η μεταβλητή που επιστρέφει είναι της μορφής struct και περιέχει τις παρακάτω πληροφορίες.

• Servo	0→OFF	1→ON
• Stopped	0→RUN	1→STOP
• Control	0→OFF	1→ON

```
%-----
```

```
%Example
>> [ST]=GETSTATE;
%-----
```

GETPOSITION

Με την κλήση της συνάρτησης *GETPOSITION* επιστρέφεται στο matlab η τρέχουσα θέση του πλαισίου του τελικού στοιχείου δράσης με την μορφή ομογενή πίνακα συντεταγμένων.

```
%-----
%Example
>> [T]=GETPOSITION
T =
    444.1917    22.2702   652.3400   112.3800   -4.2863   104.6892
%-----
```

GETPOSITION_FLAG1

Η συνάρτηση *GETPOSITION_FLAG1* επιστρέφει την τρέχουσα διαμόρφωση των μελών του ρομποτικού βραχίονα, με την μορφή δεκαδικού αριθμού και μπορεί να γίνει η αντιστοίχιση σύμφωνα του παρακάτω πίνακα.

<i>FLAG1</i>	<i>POSTURE</i>
0	<i>LBF</i>
1	<i>LBN</i>
2	<i>LAF</i>
3	<i>LBN</i>
4	<i>RBF</i>
5	<i>RBN</i>
6	<i>RAF</i>
7	<i>RAN</i>

Πίνακας 4.1 Αντιστοίχιση FLAG1 με διαμόρφωση βραχίονα

```
%-----
%Example
>> [flag]=GETPOSITION_FLAG1
flag =
     7
%-----
```

GETJOINTSVAL

Η συνάρτηση *GETJOINTSVAL* επιστρέφει τις τρέχουσες τιμές των αρθρώσεων.

```
%-----
%Example
>> [J]=GETJOINTSVAL

J =
    0.0000    0.0000   90.0000    0.0000    0.0000    0.0000
%-----
```

4.4 Ειδικές οδηγίες εντολών

Στην περίπτωση που ο βραχίονας βρίσκεται σε κίνηση η αποστολή εντολών αγνοείται, εξαίρεση αποτελούν οι εντολές ερωτημάτων και η εντολή *STOP*. Επίσης η αποστολή εντολών με ελλιπή ή λανθασμένα δεδομένα αγνοείται. Σε κάθε περίπτωση η αποδοχή των εντολών από τον ελεγκτή επιστρέφει ως αποτέλεσμα στο matlab την λογική τιμή 1 σε αντίθετη περίπτωση 0.

```
%-----  
%ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΕΝΤΟΛΗΣ  
>> exc=MOV('P1')  
  
exc =  
1  
%-----
```

4.4.1 Χρήση της εντολής GETSTATE

Η συνάρτηση *GETSTATE* όπως περιγράφηκε παραπάνω αποστέλλεται με σκοπό να επιστρέψει στο περιβάλλον του matlab την κατάσταση λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα, μια σημαντική πληροφορία που περιέχει είναι αυτή της κατάστασης κίνησης, με την οποία μπορεί να γίνει έλεγχος πριν την αποστολή εντολών. Η συνάρτηση επιστρέφει μια μεταβλητή τύπου struct, από την οποία μπορεί να εξαχθεί η πληροφορία κατάστασης της κίνησης, ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα επιστροφής μόνο μιας λογικής τιμής που αφορά την κατάσταση κίνησης, η οποία μπορεί να απλοποιήσει τον απαιτούμενο έλεγχο. Η επιστροφή μόνο της κατάστασης κίνησης γίνεται καλώντας την συνάρτηση *GETSTATE* με option '*Stopped*'. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα κλήσης της συνάρτησης με σκοπό την αναμονή έως ότου ολοκληρωθεί η κίνηση, και συμβαίνει καλώντας την συνάρτηση με option '*WaitForStop*'.

```
%-----  
%ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΙΔΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ GET STATE  
>> MoveStatus=GETSTATE('Stopped')  
MoveStatus =  
1 %1-> Stopped / 0-> IN MOVEMENT  
  
%ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΝΑΜΟΝΗΣ  
>> GETSTATE('WaitForStop') %ΑΝΑΜΟΝΗ ΕΩΣ ΟΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΘΕΙ Η ΚΙΝΗΣΗ  
%-----
```

4.4.2 Χρήση της εντολής STOP

Στις περιπτώσεις που απαιτείται εξαναγκασμένη μεταβολή της κίνησης ή ακύρωση αυτής μπορεί να γίνει χρήση της εντολής *STOP*. Για την μεταβολή της κίνησης αποστέλλεται η εντολή *STOP* και αποστολή των νέων πληροφοριών που θα ορίσουν τη νέα κίνηση.

```
%-----  
%ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΚΥΡΩΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ  
>> MoveStatus=GETSTATE('Stopped')  
  
MoveStatus =  
0  
  
>> STOP;  
>> MOV('P2');  
%-----
```

4.4.3 Ειδικές Χρήσεις των συναρτήσεων κίνησης

Για όλες τις συναρτήσεις κίνησης υπάρχει η δυνατότητα κλήσης του με δύο options **'now'** και **'wait'**. Στη περίπτωση κλήσης της συνάρτησης με option **'now'** υλοποιεί την κίνηση, ακυρώνοντας πιθανή κίνηση που εκτελείται ήδη. Στην περίπτωση κλήσης της συνάρτησης με option **'wait'**, πραγματοποιείται αναμονή έως την ολοκλήρωση άλλης πιθανής κίνησης που εκτελείται.

```
%-----  
%ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ  
>> MOV('P1', 'now');  
  
>> MVC(HT4x4, HT4x4, HT4x4, 'wait')  
  
>> MVS('P1', 'wait');  
  
>> MVJ('J2', 'wait');  
  
>> MVT(HT4x4, 'straight', 'wait');           %STRAIGHT MOVEMENT ABOUT TOOL  
  
>> MVS(HT4x4, 7, 'now');                     %INCLUDE POSTURE FLAG1  
  
>> MOV([500,0,500,180,0,180], 6, 'now');      %GENERAL VECTOR + FLAG1  
%-----
```

4.5 Παράδειγμα τυπικής λειτουργίας

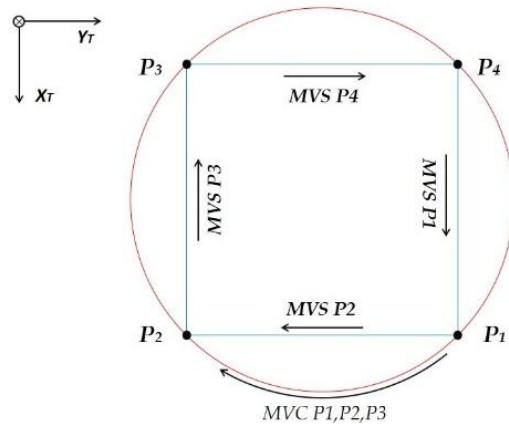
Η παρακάτω ακολουθία εντολών υλοποιεί το παράδειγμα της παραγράφου 3.4 μέσα από το περιβάλλον του matlab.

```
OPENCOM_RV2A(7)  
CNTL('ON')  
TOOL(0,0,120,0,0,0)  
BASE('P_NBASE')  
SETPOSITION('P0', 'current')  
SETPOSITION('P1', [300,-100,400,180,0,180])  
SETPOSITION('P2', [300,100,400,180,0,180])  
SETPOSITION('P3', [500,100,400,180,0,180])  
SETPOSITION('P4', [500,-100,400,180,0,180])  
ACCEL(50,100)  
SPD(1000)  
JOVRD(40)  
OVRD(80)  
SERVO('ON')  
MOV('P1')  
MVS('P2', 'wait')  
MVS('P3', 'wait')
```

```

MVS('P4','wait')
MVS('P1','wait')
GETSTATE('wait')
OVRD(40)
MVC('P1','P2','P3')
MOV('P0','wait')
SERVO('OFF')
CNTL('OFF')

```



Στο παραπάνω παράδειγμα αντί της καταχώρησης των συντεταγμένων στη μνήμη του ελεγκτή και την κλήση τους με την εντολή κίνησης θα μπορούσε να δοθούν άμεσα ως όρισμα στη συνάρτηση κίνησης, για παράδειγμα αντί του $MVS('P2','wait')$ μπορεί να δοθεί $MVS([300,100,400,180,0,180], 'wait')$.

4.6 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με όλες τις συναρτήσεις που έχουν υλοποιηθεί στο περιβάλλον του matlab για τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα.

Συναρτήσεις matlab για τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα RV2A
OPENCOM_RV2A CLOSECOM_RV2A CNTL SERVO STOP
SETPOSITION SETJOINTSVAL
TOOL BASE
MOV MVS MVJ MVT MVC/MVR/MVR2/MVR3
SPD OVRD JOVRD ACCEL
GETSTATE GETPOSITION GETJOINTSVAL GETPOSITION_FLAG1

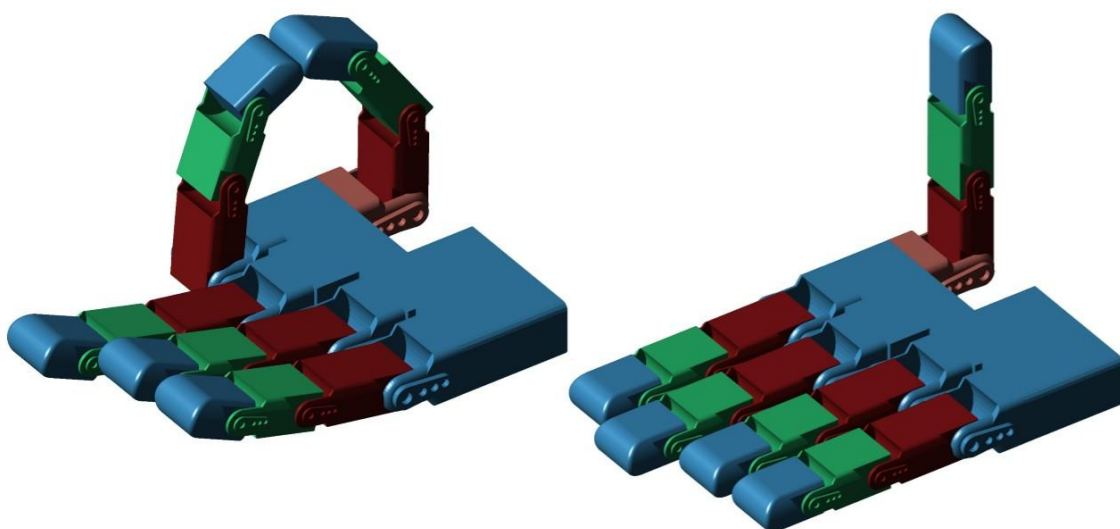
Πίνακας 4.2 Συγκεντρωτικός πίνακας
Συναρτήσεων ελέγχου ρομποτικού
βραχίονα RV2A

5 ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΡΙΟΥ TALOS ΚΑΙ ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ MATLAB

5.1 Εισαγωγή

Το TALOS-hand ως ανθρωπομορφικό αποτελείται από πέντε δάκτυλα και παλάμη, *είναι ένα πλήρως αρθρωτό χέρι με ικανότητα ανεξάρτητης επενέργειας σε κάθε άρθρωση*. Κάθε δάκτυλο φέρει τρεις αρθρώσεις με εξαίρεση τον αντίχειρα στον οποίο προστίθεστε επιπλέον μια, αποτέλεσμα ένα σύνολο *16 βαθμών ελευθερίας για το χέρι*. Από κατασκευαστικής δομής εμφανίζεται απουσία της κίνησης απαγωγής-προσαγωγής των τεσσάρων δακτύλων, η κίνηση των οποίων πραγματοποιείται αποκλειστικά σε επίπεδα κάθετα στην παλάμη (οβελιαίο-παραοβελιαία), ενώ ο αντίχειρας πραγματοποιεί όλες της κινήσεις που εμφανίζονται και στο πραγματικό χέρι. *Με αυτήν την διάταξη των αρθρώσεων και των βαθμών ελευθερίας, είναι δυνατός ο σχηματισμός όλων των βασικών τύπων σύλληψης*.

Το Ρομποτικό χέρι είναι κατασκευασμένο στα πλαίσια της εργασίας [3] και η κινηματική του έχει περιγραφεί στη εργασία [4], σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια σύντομη ανακαιφαλαίωση των δύο εργασιών, ενώ παρουσιάζεται μια εναλλακτική μέθοδος επίλυσης του αντίστροφου κινηματικού.



Εικόνα 5.1 Το ρομποτικό χέρι TALOS-hand

5.2 Κινηματική Ανάλυση Ρομποτικού Χεριού

Τα ρομποτικά χέρια από τη σκοπιά της κινηματικής αντιμετωπίζονται ως πολυαρθρωτοί-πολυσχιδείς μηχανισμοί, *παράλληλα συνεργαζόμενων ρομποτικών στελεχών ανοιχτής κινηματικής αλυσίδας*. Απαιτείται η περιγραφή της κινηματικής κάθε ρομποτικού στελέχους (δακτύλου) ξεχωριστά, αλλά αναφορικά ενός κοινού πλαισίου για όλα, προς διευκόλυνση της περιγραφής και σύγκρισης της κίνησης τους. Το κοινό πλαίσιο αναφοράς τοποθετείται στο σώμα της παλάμης, η οποία αποτελεί και το στοιχείο που συνδέει τα δάκτυλα.

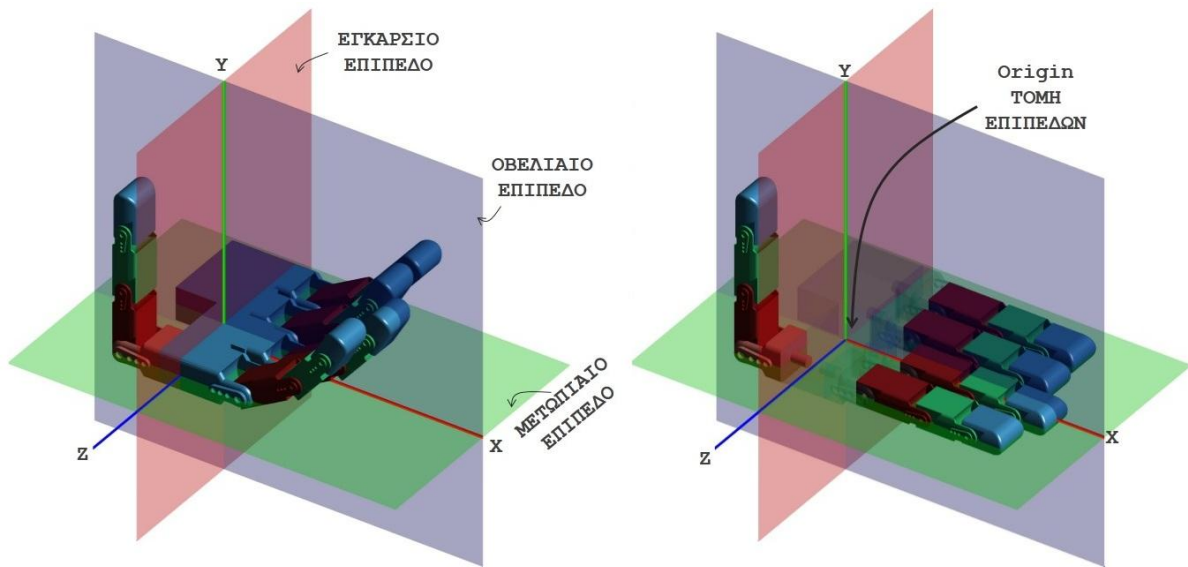
5.2.1 Καθορισμός κοινού πλαισίου αναφοράς χεριού

Για τον καθορισμό του κοινού πλαισίου αναφοράς του χεριού γίνεται χρήση των ανατομικών επιπέδων που περιγράφουν και το πραγματικό χέρι, **το κοινό πλαίσιο αναφοράς συμβολίζεται με $\{p\}$** , λόγω της τοποθέτησης του στην παλάμη και μπορεί να καλείται και ως πλαίσιο της παλάμης.

Για το ρομποτικό χέρι το *οβελιαίο* ή μεσαίο επίπεδο τοποθετείται *όπως φυσιολογικά και στο πραγματικό*, δηλαδή *κάθετο στην παλάμη*, *κατά μήκος του χεριού* και *χωρίζει την παλάμη* σε δεξί και αριστερό ημιμόριο, φυσιολογικά διέρχεται από το μεσαίο δάκτυλο.

Μετωπιαίο το κάθετο στο οβελιαίο, παράλληλο με την παλάμη το οποίο διέρχεται από τους επιμήκης άξονες των δακτύλων όταν αυτά είναι σε πλήρη έκταση. Επιπλέον ορίζεται ένα τρίτο επίπεδο προς διευκόλυνση της περιγραφής και του προσδιορισμού του πλαισίου αναφοράς, ως τρίτο επίπεδο ορίζεται το κάθετο στο οβελιαίο και μετωπιαίο επίπεδο της παλάμης και σε ίση απόσταση από τις βάσεις του δείκτη και αντίχειρα, το οποίο καλείται *εγκάρσιο επίπεδο* της παλάμης. Κάνοντας χρήση των επιπέδων του χεριού, το πλαίσιο αναφοράς αυτού ορίζεται όπως ακολούθως.

- *Κέντρο του πλαισίου (origin)*, το σημείο τομής των τριών επιπέδων.
- *Άξονας x* του πλαισίου, *ο κοινός εφαπτόμενος* άξονας στο οβελιαίο και μετωπιαίου επίπεδο, με διεύθυνση από τον καρπό προς τα δάκτυλα.
- *Άξονας y* του πλαισίου, ο κοινός άξονας για το οβελιαίο και εγκάρσιο επίπεδο και εφαπτόμενος σε αυτά με *διεύθυνσης από την ράχη της παλάμης προς την παλάμη*. (κάθετος στο μετωπιαίο επίπεδο)
- *Άξονας z* όπως προκύπτει από τον κανόνα του δεξιού χεριού (κοινός εφαπτόμενος σε μετωπιαίο και εγκάρσιο επίπεδο).



Εικόνα 5.2 Τα επίπεδα του ρομποτικού χεριού και το κοινό πλαίσιο αναφοράς

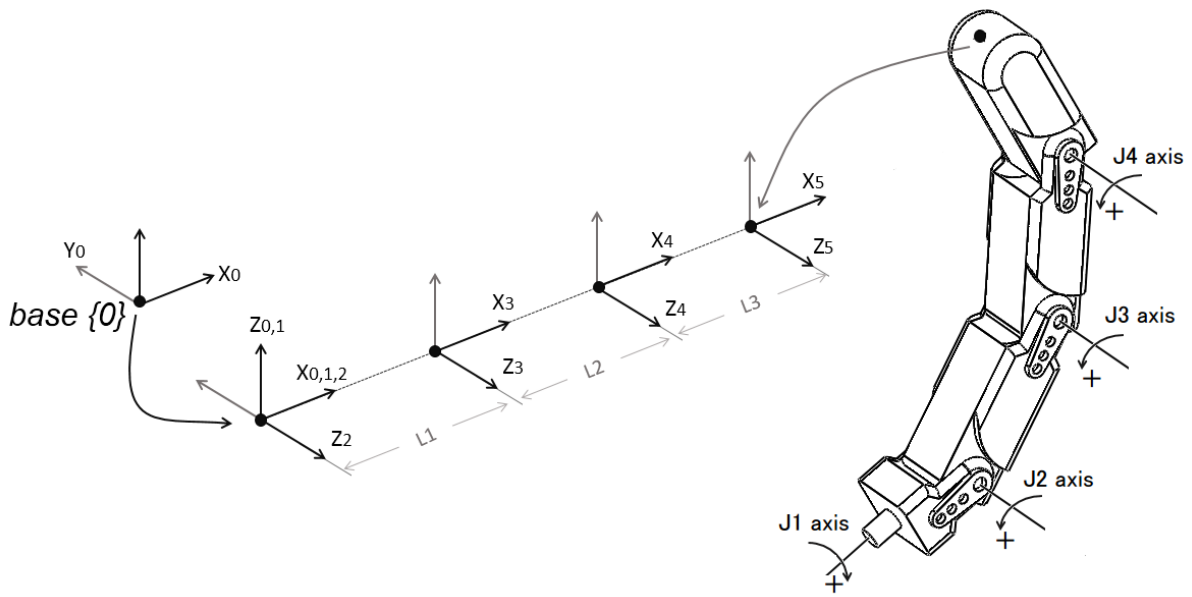
5.2.2 Κινηματική μοντελοποίηση δακτύλων

Για λόγους ομοιογένειας τόσο στην περιγραφή όσο και στην επίλυση των κινηματικών προβλημάτων του χεριού επιλέχθηκε κατά την μοντελοποίηση η προσθήκη της άρθρωση της απαγωγής-προσαγωγής (J_1) σε όλα τα δάκτυλα του χεριού, η οποία για τα τέσσερα δάκτυλα θα θεωρείται ανενεργή με τιμή μηδέν. Τα δάκτυλα αριθμούνται για την περιγραφή τους ως ακολούθως.

j	Δάκτυλο
1	Δείκτης
2	Μέσος
3	Παράμεσος
4	Μικρός
5	Αντίχειρας

Πίνακας 5.1 Αρίθμηση δακτύλων ρομποτικού χεριού

Τα τέσσερα δάκτυλα είναι ίδια μεταξύ τους, ενώ ο αντίχειρας διαφοροποιείται ως προς το μήκος των τελευταίων δυο συνδέσμων (φαλαγγών). Σύμφωνα της μεθόδου DHmdf και δεδομένου της ορισμένης θετικής φάρας περιστροφής των αρθρώσεων προκύπτουν οι παράμετροι που περιγράφουν τα δάκτυλα όπως εμφανίζονται στους πίνακες 5.2 και 5.3.



Εικόνα 5.3 Αναπαράσταση κινηματικής δομής δακτύλου

Πίνακας Παραμέτρων DHmdf για τα 4 δάκτυλα

πλαίσιο i	α_{i-1} [deg]	a_{i-1} [mm]	d_i [mm]	θ_i [deg]	Joint Limits [deg]
1	0	0	0	θ_1	0
2	90	0	0	θ_2	-20 120
3	0	46 (L_1)	0	θ_3	-20 120
4	0	35 (L_2)	0	θ_4	-20 120
5	0	25.7 (L_3)	0	0	0

Πίνακας 5.2 Παράμετροι DHmdf για τα τέσσερα δάκτυλα

Πίνακας Παραμέτρων DHmdf για τον αντίχειρα

πλαίσιο i	α_{i-1} [deg]	a_{i-1} [mm]	d_i [mm]	θ_i [deg]	Joint Limits [deg]
1	0	0	0	θ_1	-60 90
2	90	0	0	θ_2	-90 30
3	0	46 (L_1)	0	θ_3	-20 120
4	0	44.6 (L_2)	0	θ_4	-20 120
5	0	30 (L_3)	0	0	0

Πίνακας 5.3 Παράμετροι DHmdf για τον αντίχειρα

Το τελευταίο πλαίσιο $\{5\}$ τοποθετείται στην επιφάνεια της τελευταίας φάλαγγας του δακτύλου, το οποίο αποτελεί το πλαίσιο δράσης για το δάκτυλο.

Βάσει της σύμβασης DHmdf προκύπτει η σχέση ${}^0g_{5j}(\theta_j)$ που συνδέει το τελικό πλαίσιο $\{5\}$ με της πλαίσιο βάσης $\{0\}$ για κάθε δάκτυλο j και $\theta_j = (\theta_{1j}, \theta_{2j}, \theta_{3j}, \theta_{4j}, \theta_{5j})$.

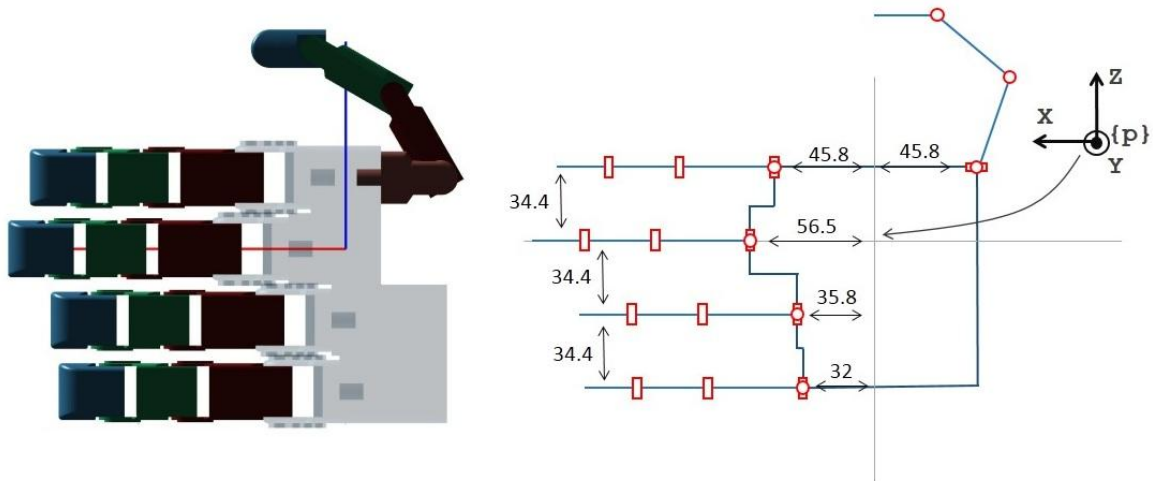
$${}^0g_{5j}(\theta_j) = {}^0g_1(\theta_{1j}) {}^1g_2(\theta_{2j}) {}^2g_3(\theta_{3j}) {}^3g_4(\theta_{4j}) {}^4g_5$$

$${}^0g_{5j}(\theta_j) = \begin{bmatrix} c_1c_{234} & -c_1s_{234} & s_1 & c_1(L_1c_2 + L_2c_{23}) + L_3c_1c_{234} \\ s_1c_{234} & -s_1s_{234} & -c_1 & s_1(L_1c_2 + L_2c_{23}) + L_3s_1c_{234} \\ s_{234} & c_{234} & 0 & L_1s_2 + L_2s_{23} + L_3s_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Στην παραπάνω αναπαράσταση του ομογενή μετασχηματισμού, τα μεγέθη αφορούν το εκάστοτε δάκτυλο ανάλυσης, ο δείκτης j παραλείπεται για απλοποίηση στη γραφή. Επίσης όπου s_{234} και c_{234} ισοδυναμούν με $\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ και $\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ αντίστοιχα.

5.2.3 Προσδιορισμός μετασχηματισμών που περιγράφουν τις βάσεις των δακτύλων ως προς το κοινό πλαίσιο αναφοράς της παλάμης

Με προσδιορισμένη πλέον την θέση του κοινού πλαισίου αναφοράς της παλάμης, μπορεί να εξαχθεί ο ομογενής μετασχηματισμός συντεταγμένων που περιγράφει την *τοποθέτηση* του κάθε δακτύλου ως προς το κοινό πλαίσιο της παλάμης, δηλαδή τη σχέση που συνδέει το πλαίσιο βάσης $\{0\}$ του κάθε δακτύλου με το πλαίσιο αναφοράς της παλάμης $\{p\}$.



Εικόνα 5.4 Τοποθέτηση δακτύλων στην παλάμη

Τα πλαίσια βάσης των τεσσάρων δακτύλων του χεριού, λαμβάνουν ίδιο προσανατολισμό ως προς το πλαίσιο αναφοράς της παλάμης $\{P\}$, η τοποθέτησή τους αναφορικά αυτού περιγράφεται από τον παρακάτω ομογενή μετασχηματισμό, όπου Δx_j και Δz_j οι σχετικές μετατοπίσεις της βάσης του εκάστοτε δακτύλου αναφορικά του πλαισίου αναφοράς της παλάμης $\{p\}$.

$${}^p g_{0j} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_j \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \Delta z_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Δάκτυλο	Δx_j	Δz_j
j	[mm]	[mm]
1	45.8	34.4

2	56.5	0
3	35.8	-34.4
4	32	-68.8

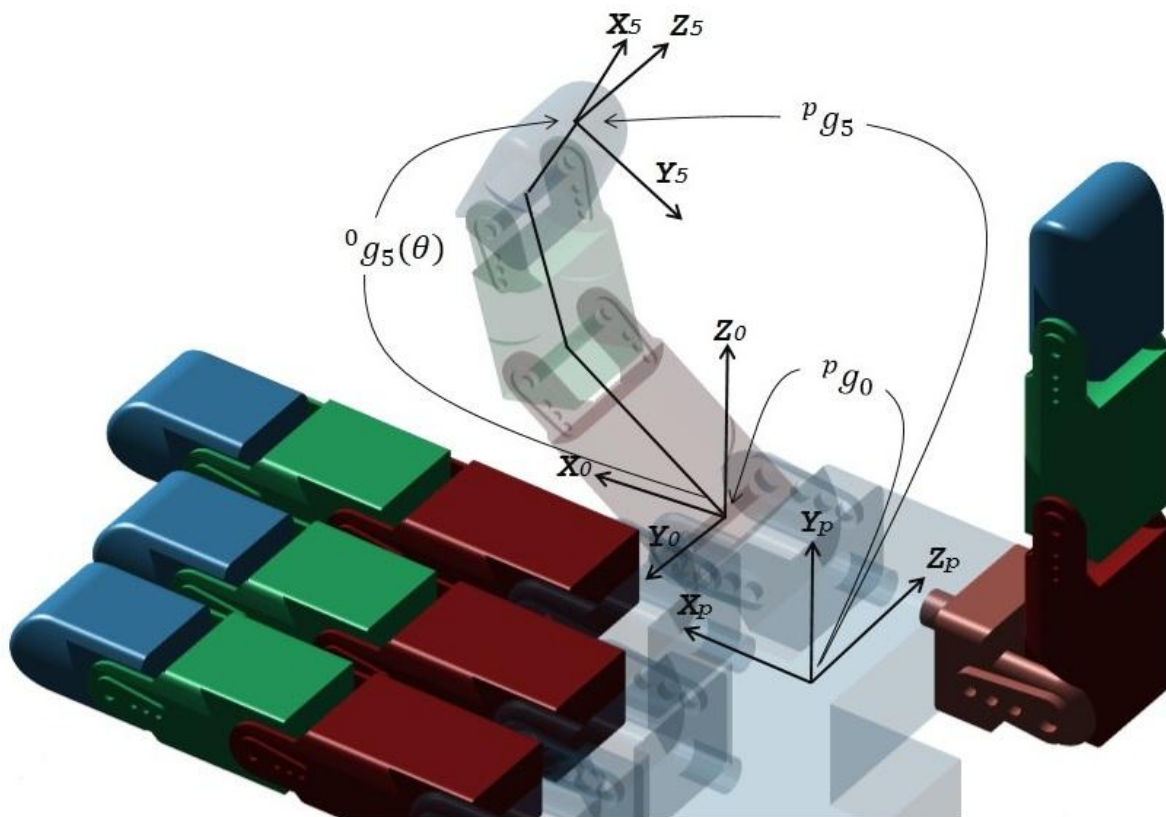
Ομογενής μετασχηματισμός που περιγράφει θέση και προσανατολισμό της βάσης του αντίχειρα ως προς το πλαίσιο αναφοράς της παλάμης

$${}^p g_{0_5} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -45.8 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 34.4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5.3 Ευθύ κινηματική ανάλυση δακτύλων

Με γνωστούς όλους του κατά σειρά μετασχηματισμούς, από το πλαίσιο της παλάμης έως και το τελευταίο πλαίσιο του δακτύλου **δεδομένων των μεταβλητών των αρθρώσεων** $(\theta_j)=[\theta_{1j},\theta_{2j},\theta_{3j},\theta_{4j}]$ **προκύπτει**, ο ομογενής μετασχηματισμός ${}^p g_{5_j}$ που περιγράφει το πλαίσιο δράσης του δακτύλου $\{5\}$ αναφορικά του πλαισίου της παλάμης $\{p\}$.

$${}^p g_{5_j} = {}^p g_{0_j} {}^0 g_{5_j}(\theta_j) \quad (5.1)$$



Εικόνα 5.5 Αναπαράσταση κινηματικής δομής δακτύλου

5.4 Αντίστροφη κινηματική ανάλυση δακτύλων

Για το πρόβλημα του αντίστροφου κινηματικού του χεριού επιλέχθηκε η αλγεβρική επίλυση, η λύση που επιφέρει είναι κλειστής μαθηματικής μορφής. Παρακάτω περιγράφεται η λύση του αντίστροφου κινηματικού, ενώ η αναλυτική επίλυση παρατίθεται στο παράρτημα 1. **Ότι περιγράφεται παρακάτω αφορά και τα πέντε δάκτυλα, για λόγους λιτότητας στη γραφή παραλείπεται ο δείκτης j.**

Δεδομένων της επιθυμητής θέσης και του προσανατολισμού του τελικού πλαισίου $\{5\}$ του δακτύλου ως προς το πλαίσιο της παλάμης $\{p\}$, αναζητάτε ο συνδυασμός των γωνιών $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ και θ_4 , ο οποίος θα επιφέρει την επιθυμητή τοποθέτηση.

Εστω ότι η επιθυμητή τοποθέτηση για το δάκτυλο περιγράφεται από τον ομογενή μετασχηματισμό

$${}^p g_{5_{desired}}$$

Από την κινηματική μοντελοποίηση (σχέση 5.1) είναι γνωστό ότι

$${}^p g_{5_{desired}} = {}^p g_0 {}^0 g_1(\theta_1) {}^1 g_2(\theta_2) {}^2 g_3(\theta_3) {}^3 g_4(\theta_4) {}^4 g_5$$

Για να απλοποιηθεί υπολογιστικά το πρόβλημα μπορούμε να μεταθέσουμε τους γνωστούς ανεξάρτητους σταθερούς όρους στο πρώτο μέλος της εξίσωσης όπως φαίνεται παρακάτω.

$${}^p g_0^{-1} {}^p g_{5_{desired}} {}^4 g_5^{-1} = g_1(\theta_1) {}^1 g_2(\theta_2) {}^2 g_3(\theta_3) {}^3 g_4(\theta_4) \quad (5.2)$$

Ο όρος ${}^0 g_{4_d} = {}^p g_0^{-1} {}^p g_{5_{desired}} {}^4 g_5^{-1}$ περιγράφει τις συντεταγμένες θέσης και προσανατολισμού του πλαισίου της τέταρτης άρθρωσης $\{4\}$ αναφορικά του πλαισίου βάσης $\{0\}$ του δακτύλου, μπορεί να υπολογιστεί αφού όλοι οι μετασχηματισμοί ${}^p g_0^{-1}$, ${}^p g_{5_{desired}}$, ${}^4 g_5^{-1}$ είναι γνωστοί και έστω ότι

$${}^0 g_{4_d} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Η σχέση 5.2 μπορεί να γραφεί ως

$${}^0 g_{4_d} = g_1(\theta_1) {}^1 g_2(\theta_2) {}^2 g_3(\theta_3) {}^3 g_4(\theta_4)$$

Εκτελώντας πολλαπλασιασμό από δεξιά με ${}^3 g_4^{-1}(\theta_4)$ προκύπτει

$${}^0 g_{4_d} {}^3 g_4^{-1}(\theta_4) = g_1(\theta_1) {}^1 g_2(\theta_2) {}^2 g_3(\theta_3)$$

Εκτελώντας τις πράξεις καταλήγουμε

$$\begin{bmatrix} c_1 r_{11} + s_1 r_{21} & c_1 r_{12} + s_1 r_{22} & c_1 r_{13} + s_1 r_{23} & c_1 r_{14} + s_1 r_{24} \\ c_1 r_{21} - s_1 r_{11} & c_1 r_{22} - s_1 r_{12} & c_1 r_{23} - s_1 r_{13} & c_1 r_{24} - s_1 r_{14} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{234} & -s_{234} & 0 & L_1 c_2 + L_2 c_{23} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_{234} & c_{234} & 0 & L_1 s_2 + L_2 s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει το παρακάτω σύστημα πέντε μη γραμμικών εξισώσεων προς επίλυση

$$\begin{aligned}c_1 r_{13} + s_1 r_{23} &= 0 \\s_{234} &= r_{31} \\s_{234} &= r_{32} \\L_1 c_2 + L_2 c_{23} &= c_1 r_{14} + s_1 r_{24} \\L_1 s_2 + L_2 s_{23} &= r_{34}\end{aligned}$$

Υπολογισμός τιμής 1ης άρθρωσης

Η λύση για την πρώτη άρθρωση υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση, η γενική λύση επιφέρει δύο συμμετρικά αποτελέσματα για την θ_1 , ωστόσο λαμβάνοντας υπόψη το εύρος λειτουργίας της πρώτης άρθρωσης, περιοριζόμαστε σε μοναδική λύση αφού η συμμετρική της είναι εκτός του εύρους της άρθρωσης.

$$\theta_1 = \text{atan2}(\mathbf{r}_{13}, -\mathbf{r}_{23}) \quad (5.3)$$

Υπολογισμός τιμής 3ης άρθρωσης

Με γνωστή την τιμή της πρώτης άρθρωσης μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της τρίτης άρθρωσης, σε αυτό το σημείο μπορεί να γίνει έλεγχος αν το σημείο στόχος βρίσκεται μέσα στον προσβάσιμο χώρο για το εκάστοτε δάκτυλο αφού η τιμή c_3 πρέπει να βρίσκεται εντός του ορίου τιμών $-1 \leq c_3 \leq 1$.

$$\begin{aligned}c_3 &= \frac{((c_1 r_{14} + s_1 r_{24}))^2 + r_{34}^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} \\s_3 &= \pm \sqrt{1 - c_3^2} \\ \theta_3 &= \text{atan2}(s_3, c_3)\end{aligned} \quad (5.4)$$

Υπολογισμός τιμής 2ης άρθρωσης

Η παραπάνω λύση επιφέρει δύο αποτελέσματα για την τρίτη άρθρωση, για κάθε ένα από αυτά υπολογίζεται η τιμή της δεύτερης άρθρωσης σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

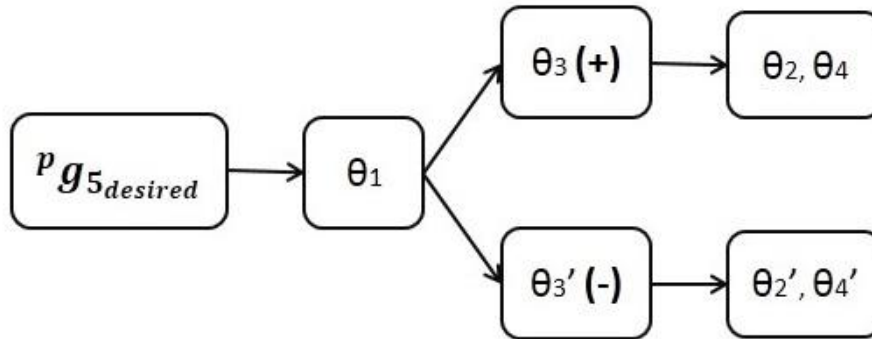
$$\theta_2 = \text{atan2}(\mathbf{r}_{34}, (c_1 r_{14} + s_1 r_{24})) - \text{atan2}(L_2 s_3, (L_1 + L_2 s_3)) \quad (5.5)$$

Υπολογισμός τιμής 4ης άρθρωσης

Με γνωστούς πλέον τους δύο συνδυασμούς τιμών για τη θ_2 και θ_3 μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της θ_4 σύμφωνα της ακόλουθης σχέσης.

$$\theta_4 = \text{atan2}(\mathbf{r}_{31}, \mathbf{r}_{32}) - \theta_2 - \theta_3 \quad (5.6)$$

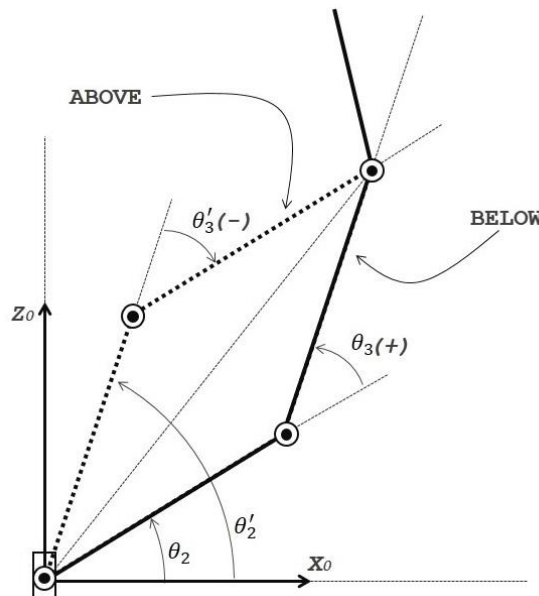
Για κάθε επιθυμητή τοποθέτηση του δακτύλου προκύπτουν δύο πιθανοί συνδυασμοί γωνιών (δύο λύσεις), ο οποίος μπορούν να περιοριστούν συγκρίνοντας τις με τα όρια των αρθρώσεων. Κάθε συνδυασμός εκφράζει μία διαφορετική διαμόρφωση των μελών του δακτύλου για την επιθυμητή τοποθέτηση του πλαισίου {5}.



Εικόνα 5.6 Διάγραμμα λύσεων αντίστροφου κινηματικού δακτύλου

5.5 Χαρακτηρισμός γεωμετρικής διαμόρφωσης δακτύλου

Η γεωμετρική διαμόρφωση που λαμβάνει το κάθε δάκτυλο μπορεί να χαρακτηριστεί για την περιγραφή της, ο χαρακτηρισμός μπορεί να εξαχθεί από την τιμή της τρίτης άρθρωσης. Στην περίπτωση που η τρίτη άρθρωση λαμβάνει θετική τιμή ($\theta_3 > 0$), η διαμόρφωση χαρακτηρίζεται ως BELOW (αγκώνας κάτω), ενώ στην αντίθετη περίπτωση ως ABOVE (αγκώνας πάνω).



Εικόνα 5.7 Γεωμετρικές διαμορφώσεις δακτύλου

5.6 Συναρτήσεις επίλυσης κινηματικής του ρομποτικού χεριού στο περιβάλλον του matlab

Για την επίλυση των κινηματικών προβλημάτων του ρομποτικού χεριού TALOS, υλοποιήθηκαν οι συναρτήσεις *fkinTALOS* και *ikinTALOS* οι οποίες επιλύουν το ευθύ και το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα αντίστοιχα.

Για την χρήση των συναρτήσεων λύσης των κινηματικών προβλημάτων, απαιτείται η φόρτωση του αρχείου *TALOS.mat* στο workspace του matlab, το αρχείο όπως και στην περίπτωση του ρομποτικού βραχίονα περιέχει όλες τις πληροφορίες που αφορούν την λειτουργία του ρομποτικού χεριού.

5.6.1 Συνάρτηση επίλυσης ευθέως κινηματικού

Η συνάρτηση *fkinTALOS* δέχεται ως όρισμα τις τιμές των αρθρώσεων του ρομποτικού χεριού και επιστρέφει τους πίνακες μετασχηματισμών που περιγράφουν την θέση του πλαισίου {5} του κάθε δακτύλου αναφορικά του πλαισίου της παλάμης {p}. Το όρισμα πρέπει να δοθεί με την μορφή πίνακα 4x5 στοιχείων όπου κάθε στήλη j αντιστοιχεί στο j δάκτυλο, και το αποτέλεσμα επιστρέφεται ως μία μεταβλητή τύπου struct που περιέχει τους πέντε πίνακες μετασχηματισμών των δακτύλων. Να υπενθυμίσουμε ότι η τιμή της πρώτης άρθρωσης για τα τέσσερα δάκτυλα είναι πάντα μηδενική.

```
%-----  
%Example 1  
  
J= [0 0 0 0 -30  
    0 90 0 0 0  
    0 30 0 0 30  
    0 30 0 0 30]  
  
>> T=fkinTALOS(J)  
  
T =  
    [4x4 double]    [4x4 double]    [4x4 double]    [4x4 double]    [4x4 double]  
  
%-----  
  
%EXPORT HOMOGENOUS TRANSFORMATION FROM STRUCT VARIABLE FOR 3st FINGER  
  
>> T3=T{1,3}  
  
T3=  
    1    0    0 142.500  
    0    1    0     0  
    0    0    1 -34.400  
    0    0    0     1  
  
%-----
```

Η συνάρτηση *fkinTALOS* μπορεί επιπρόσθετα να δεχτεί ως όρισμα δύο options, το option *'disp'* με σκοπό την απεικόνιση του ρομποτικού χεριού και το option *'gencoordinates'* για το οποίο επιστρέφεται η τοποθέτηση των δακτύλων με μορφή συντεταγμένων θέσης και δύο παραμέτρων προσανατολισμού. Οι συντεταγμένες θέσης είναι εκφρασμένες στο πλαίσιο

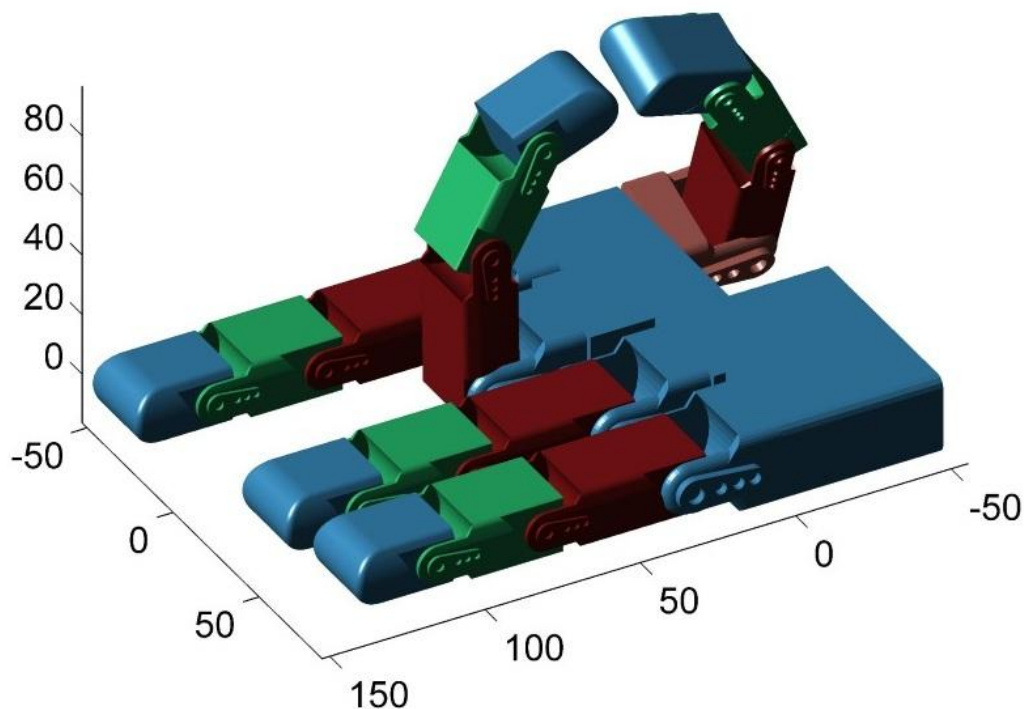
της παλάμης {p}. Ο προσανατολισμός του δαχτύλου στην περίπτωση μας είναι δυνατόν να προσδιορίζεται από δύο παραμέτρους. Η πρώτη είναι η $f_1 = \theta_1$, η οποία είναι η πρώτη άρθρωση του κάθε δαχτύλου, που του επιτρέπει να κάνει απαγωγή και προσαγωγή ως προς το οβελιαίο επίπεδο. Η δεύτερη είναι η $f_2 = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$, που είναι ο προσανατολισμός του δαχτύλου στο επίπεδο που δημιουργείται από τις τρεις φάλαγγες του δαχτύλου, περισσότερες πληροφορίες σχετικά της αναπαράστασης υπάρχουν στην εργασία [4]. Παρακάτω ακολουθούν παραδείγματα με χρήση των δύο options

```
%-----
%Example 2

>> T=fkinTALOS(J, 'gencoordinates')
T =
  X->    152.5000    16.7431    142.5000    138.7000     2.4808
  Y->         0     89.1609         0         0     86.2775
  Z->    34.4000         0    -34.400    -68.8000    -15.4124
  f1->         0         0         0         0        -30
  f2->         0        150         0         0         60
%-----

%Example 3

>> T=fkinTALOS(J, 'disp')
%-----
```



Εικόνα 5.8 Παράδειγμα απεικόνισης του ρομποτικού χεριού στο περιβάλλον του matlab

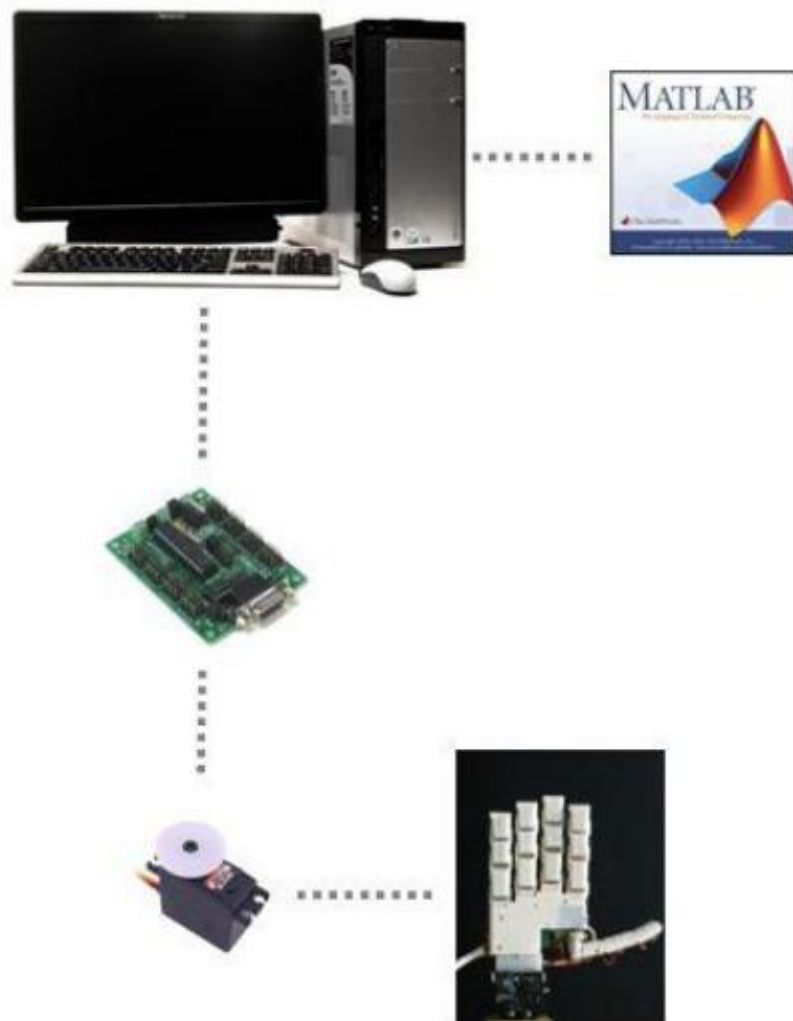
5.6.2 Συνάρτηση επίλυσης αντίστροφου κινηματικού χεριού

Η συνάρτηση *ikinTALOS* δέχεται ως όρισμα μεταβλητή τύπου struct η οποία περιέχει τους πέντε ομογενείς μετασχηματισμούς που περιγράφουν την τοποθέτηση του δακτύλου αναφορικά του πλαισίου αναφοράς της παλάμης, εναλλακτικά μπορεί να δεχτεί τον πίνακα συντεταγμένων και παραμέτρων προσανατολισμού όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, δηλαδή με τις μορφές που επιστρέφονται από το ευθύ κινηματικό. Επιστρέφει δύο πίνακες 4x5 στοιχείων οι οποίοι περιέχουν τους συνδυασμούς των γωνιών των δακτύλων για την επιθυμητή τοποθέτηση, ο πρώτος περιέχει τις λύσεις για τη διαμόρφωση below ενώ ο δεύτερος τις λύσεις για τη διαμόρφωση above των δακτύλων. Οι γωνίες στους πίνακες είναι ταξινομημένες όπως δίνονται στο ευθύ κινηματικό. Στη περίπτωση που δεν υπάρχει λύση για την προσέγγιση η στήλη συμπληρώνεται με NaN.

```
%-----  
%Example 1  
  
>> [Qbelow,Qabove]=ikinTALOS(T)  
  
Qbelow =  
  
    0    0    0    0   -30  
    0   90    0    0    0  
    0   30    0    0   30  
    0   30    0    0   30  
  
Qabove =  
  
   NaN   NaN   NaN   NaN   NaN  
   NaN   NaN   NaN   NaN   NaN  
   NaN   NaN   NaN   NaN   NaN  
   NaN   NaN   NaN   NaN   NaN  
%-----
```

5.7 Έλεγχος ρομποτικού χεριού



Σε κάθε ρομποτικό σύστημα απαιτείται ένα υποσύστημα ελέγχου για την ολοκλήρωση του. Στο ρομποτικό χέρι TALOS γίνεται χρήση mini R/C DC servos για την κίνηση των αρθρώσεων του, τα οποία ελέγχονται από τον ελεγκτή ssc-32 servo controller. Για τον έλεγχο της κίνησης των δακτύλων απαιτείται η μετάδοση πληροφοριών στον ελεγκτή μέσω σειριακής επικοινωνίας η οποία επιτυγχάνεται μέσω διασύνδεσης του με το περιβάλλον του matlab.



Εικόνα 5.9 Το σύστημα ελέγχου του ρομποτικού χεριού

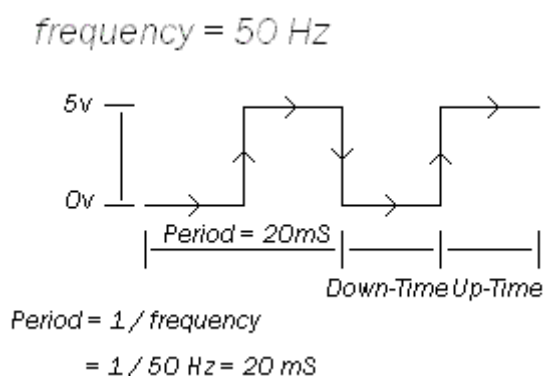
5.7.1 Servos

Για την κίνηση των αρθρώσεων του ρομποτικού χεριού TALOS γίνεται χρήση συνολικά 16 RC servos εκ των οποίων, για την κίνηση της πρώτης άρθρωσης του αντιχειρα χρησιμοποιήθηκε ο Hitec HS-225BB ενώ για τις υπόλοιπες αρθρώσεις ο Tower Pro SG90.

Hitec HS-225BB	Tower Pro SG90
	
Εύρος παλμού [μs] 900-2100	Εύρος παλμού [μs] 500-2400
Ταχύτητα [deg/s] 60°/0.12s	Ταχύτητα [deg/s] 60°/0.14s

Ο έλεγχος των servos γίνεται με ένα εξωτερικό σήμα τετραγωνικών παλμών (PWM). Ένα PWM σήμα αποτελεί μια περιοδική κυματομορφή στην οποία διακρίνονται δύο τμήματα, το τμήμα για το οποίο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή (ON) και το τμήμα στο οποίο λαμβάνει τιμή μηδέν (OFF), το σύνολο του χρόνου των δύο τμημάτων αποτελεί την περίοδο του σήματος.

Για τον έλεγχο των servos απαιτείται σήμα με σταθερή περίοδο 20ms ενώ ο χρόνος για το οποίο λαμβάνει μέγιστη τιμή μπορεί να διαρκεί από 0.5-2.5ms (500-2500μs). Ο χρόνος αυτός αναφέρεται ως *πλάτος παλμού* και είναι γραμμικά ανάλογος της γωνίας του servo.

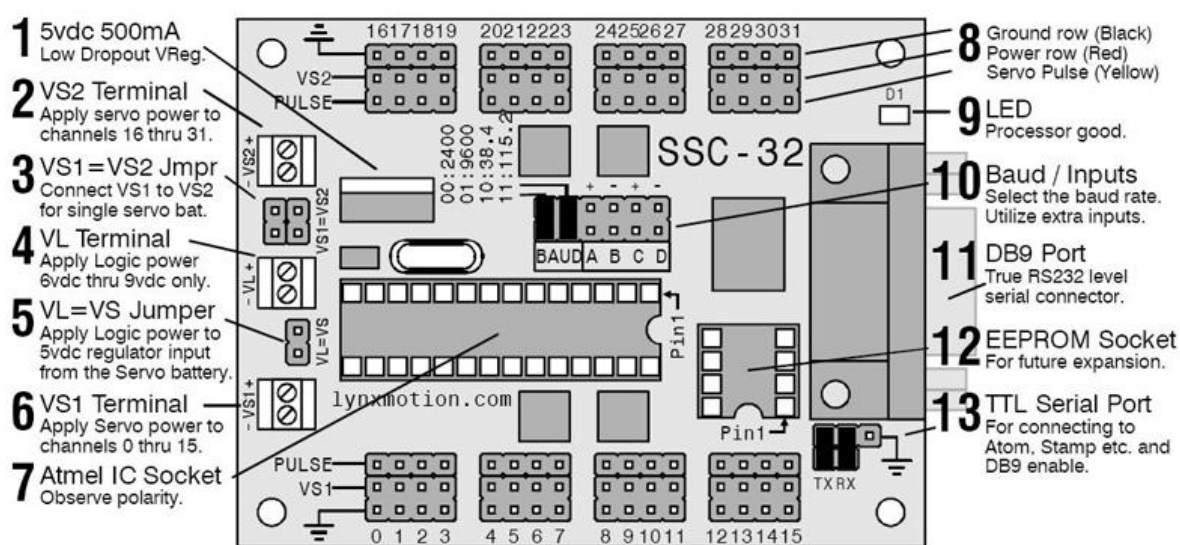


Εικόνα 5.10 Σήμα PWM

5.7.2 Servo controller ssc-32

Ο ελεγκτής ssc-32 servo controller της εταιρίας Lynxmotion, έχει την ικανότητα ελέγχου έως και 32 RC servos. Τα 32 κανάλια σύνδεσης αριθμούνται από το 0 έως το 31 και υπάρχει η δυνατότητα να ομαδοποιηθούν ανά 16 όσο αφορά την τροφοδοσία τους, σε περιπτώσεις που η εφαρμογή το απαιτεί.

Ο ελεγκτής ssc-32 αναλαμβάνει να διαμορφώσει τον παλμό για τον έλεγχο των servos, για τον έλεγχο απαιτείται η αποστολή της εντολής μέσω της σειριακής θύρας με τυποποιημένη μορφή οι οποία περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν την κίνηση των servos.



Εικόνα 5.11 Ο ελεγκτής ssc-32

5.7.3 Τροφοδοσία ssc-32

Στην περίπτωση του ρομποτικού χεριού τα πιθανά φορτία ρεύματος κατά την λειτουργία του απαιτούν την ανεξάρτητη τροφοδοσία των ομάδων καναλιών του ελεγκτή. Η ανεξάρτητη τροφοδοσία των καναλιών απαιτεί την αφαίρεση των γεφυρών (jumpers) VS1=VS2 (3) και VL=VS (5) (βλέπε εικόνα 5.11). Οι τροφοδοσίες VS1 και VS2 είναι υπεύθυνες για την λειτουργία των ομάδων καναλιών 0-15 και 16-31 αντίστοιχα και η τάση τους ρυθμίζεται στα 6 Volt, ενώ η τροφοδοσία VL είναι υπεύθυνη για τη λειτουργία του κυκλώματος ελέγχου του ελεγκτή με τιμή τάσης από 6-9 Volt.

5.7.4 Σύνδεση RC servosj

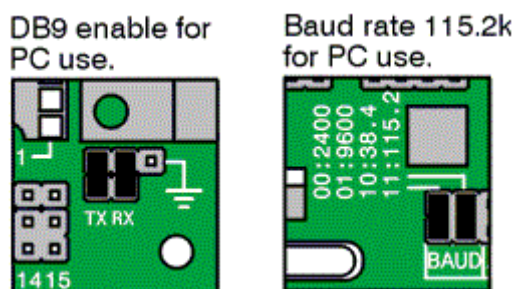
Η σύνδεση των servos του ρομποτικού χεριού στον ελεγκτή συμβαίνει όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα

Δάκτυλο	Δείκτης			Μέσος			Παράμεσος			Μικρός			Αντίχειρας			
Αρθρώσεις	q2	q3	q4	q2	q3	q4	q2	q3	q4	q2	q3	q4	q1	q2	q3	q4
channel-ssc32	15	14	13	12	11	10	9	8	7	16	17	18	31	30	29	28

Πίνακας 5.4 Κανάλια σύνδεση servo

5.7.5 Σειριακή επικοινωνία

Για την επίτευξη της σειριακής επικοινωνίας του ελεγκτή με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή απαραίτητη είναι η ρύθμιση του, για τη λειτουργία αυτή. Η επιλογή της λειτουργίας για χειρισμό από ηλεκτρονικό υπολογιστή γίνεται με την γεφύρωση των pin 13 όπως φαίνεται στην εικόνα 5.12 (αριστερά) επίσης η ρύθμιση του baud rate η οποία επιλέχθηκε να είναι στα 115200 γίνεται με γεφύρωση των pin όπως φαίνεται στην εικόνα 5.12 (δεξιά).



Εικόνα 5.12 Ρυθμίσεις Σειριακής Επικοινωνίας του ελεγκτή ssc-32

5.7.6 Σύνταξη εντολών

Μια εντολή για την κίνηση ενός servo συντάσσεται όπως το παράδειγμα που ακολουθεί

```
#15 P1600 T2000 <cr>
```

οι πληροφορίες που περιέχει η εντολή είναι αυτές που απαιτούνται για την κίνηση του servo και περιέχει, τον **αριθμό του καναλιού** το οποίο είναι συνδεδεμένο το servo #<ch>, **το πλάτος παλμού** της επιθυμητής γωνίας P<pw> και **το χρόνο ολοκλήρωσης της κίνηση** σε ms T<time>, η εντολή ολοκληρώνεται με τον χαρακτήρα <cr> ο οποίος σηματοδοτεί την έναρξη εκτέλεσης της κίνησης.

Για την λειτουργία του ρομποτικού χεριού απαιτείται η ταυτόχρονη κίνηση παραπάνω από ένα servo, ο ελεγκτής ssc-32 παρέχει την δυνατότητα ταυτόχρονης κίνησης των servos (**group move**), συντάσσοντας κατάλληλα την εντολή ελέγχου η οποία περιέχει πληροφορίες όπως φαίνεται στο ακόλουθο παράδειγμα.

```
#15 P1500 #16 P1500 #17 P2000 T3000 <cr>
```

Η παραπάνω εντολή θα κινήσει ταυτόχρονα τα servo των καναλιών 15, 16 και 17 στις γωνίες στόχους που περιγράφονται από τον παλμό που τα ακολουθεί σε χρόνο 3000ms, η κίνηση θα ξεκινήσει και θα ολοκληρωθεί ταυτόχρονα και για τα 3 servos.

#<ch>	P<pw>...#<ch>	P<pw>	T<time>	<cr>
<ch>	Αριθμός καναλιού, 0-31			
<pw>	Πλάτος παλμού σε μS, 500-2500			
<time>	Χρόνος κίνησης σε ms			
<cr>	Χαρακτήρας ολοκλήρωσης της εντολής			

5.7.7 Βαθμονόμηση servos-CALIBRATION SERVOS PULSE

Για την συσχέτιση του πλάτους παλμού με την γωνία για κάθε servo πραγματοποιήθηκε μια πειραματική διαδικασία στα πλαίσια της εργασίας [4] η οποία εξάγει την σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη. Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία εξαλείφει πιθανές αποκλίσεις που μπορούν να έχουν προκύψει. Παρακάτω παρατίθενται το αποτέλεσμα της διαδικασίας.

Δείκτης						
Άρθρωση	$q2$		$q3$		$q4$	
Channel	15		14		13	
Γωνία καταγραφής	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Πλάτος παλμού [μs]	1300	300	2100	1050	2050	1000

Μέσος						
Άρθρωση	$q2$		$q3$		$q4$	
Channel	12		11		10	
Γωνία καταγραφής	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Πλάτος παλμού [μs]	1800	800	2000	950	2190	1190

Παράμεσος						
Άρθρωση	$q2$		$q3$		$q4$	
Channel	9		8		7	
Γωνία καταγραφής	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Πλάτος παλμού [μs]	2000	1030	2250	1000	1800	750

Μικρός						
Άρθρωση	$q2$		$q3$		$q4$	
Channel	16		17		18	
Γωνία καταγραφής	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Πλάτος παλμού [μs]	2800	1630	2000	950	1970	950

Αντίχειρας								
Άρθρωση	$q1$		$q2$		$q3$		$q4$	
Channel	31		30		29		18	
Γωνία καταγραφής	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Πλάτος παλμού [μs]	1280	2220	550	1090	2100	1090	2000	950

Τα δύο μεγέθη (πλάτος παλμού και γωνία) είναι γραμμικά ανάλογα, προκύπτει η παρακάτω σχέση που τα συνδέει, όπου α το πλάτος του παλμού για την γωνία 0° και β το πλάτος παλμού για γωνία 90°, επίσης $pw_{m_{q_i}}$ το πλάτος παλμού για τη γωνία q_i .

$$pwm_{q_i} = \text{round} \left\{ a - \frac{\alpha - \beta}{90} * q_i \right\}$$

Στη παραπάνω σχέση η στρογγυλοποίηση συμβαίνει λόγω του ότι το πλάτος παλμού για τον ελεγκτή καταχωρείται με την μορφή ακέραιου αριθμού.

5.7.8 Έλεγχος ssc-32 – matlab

OPENCOM_TALOS

Η συνάρτηση OPENCOMTALOS καλείται με σκοπό την αποκατάσταση της σύνδεσης του ελεγκτή ssc-32 με το περιβάλλον του matlab, δέχεται ως όρισμα τον αριθμό της σειριακής θύρας που έχει δεσμεύσει ο ελεγκτής για παράδειγμα COM(5).

```
%-----
%Example OPENCOM_TALOS

>> OPENCOM_TALOS(5)
%-----
```

MOVEHAND

Για το έλεγχο του ρομποτικού χεριού από το περιβάλλον του matlab υλοποιήθηκε η συνάρτηση **MOVEHAND** η οποία αναλαμβάνει να στείλει στο ελεγκτή ssc-32 την εντολή για την εκτέλεση των επιθυμητών κινήσεων. Η εντολή δέχεται ως όρισμα τις επιθυμητές τιμές για τις αρθρώσεις του ρομποτικού χεριού όπως δίνονται στην συνάρτηση λύσης του ευθέως κινηματικού του χεριού και επιπλέον το χρόνο σε ms για την ολοκλήρωση των κινήσεων. Για την λειτουργία της συνάρτησης απαιτείται επίσης η φόρτωση του αρχείου TALOS.mat το οποίο περιέχει τις πληροφορίες σύνδεσης βαθμονόμησης των servos.

```
%-----
%Example MOVE HAND

>> J= [0 0 0 0 -30
      20 20 20 20 20
      30 30 30 30 30
      20 20 20 20 20]

>> MOVEHAND(J,2000)
%-----
```

Στη περίπτωση που δεν επιθυμείται την κίνηση κάποιας άρθρωσης το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα μπορεί να συμπληρωθεί με NaN

```
%-----
%Example2 MOVE HAND

>> J= [0 NaN NaN NaN 270
      20 20 NaN NaN 20
      30 NaN NaN NaN 30
      20 NaN NaN NaN 20]

>> MOVEHAND(J,2000)
%-----
```

Στο παραπάνω παράδειγμα με την αποστολή της εντολής θα πραγματοποιηθεί κίνηση των αρθρώσεων των δακτύλων 1 και 5 και της δεύτερης άρθρωσης του δακτύλου 2.

5.8 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τις συναρτήσεις που έχουν υλοποιηθεί στο περιβάλλον του matlab για την επίλυση των κινηματικών του ρομποτικού χεριού καθώς και για τον έλεγχο αυτού.

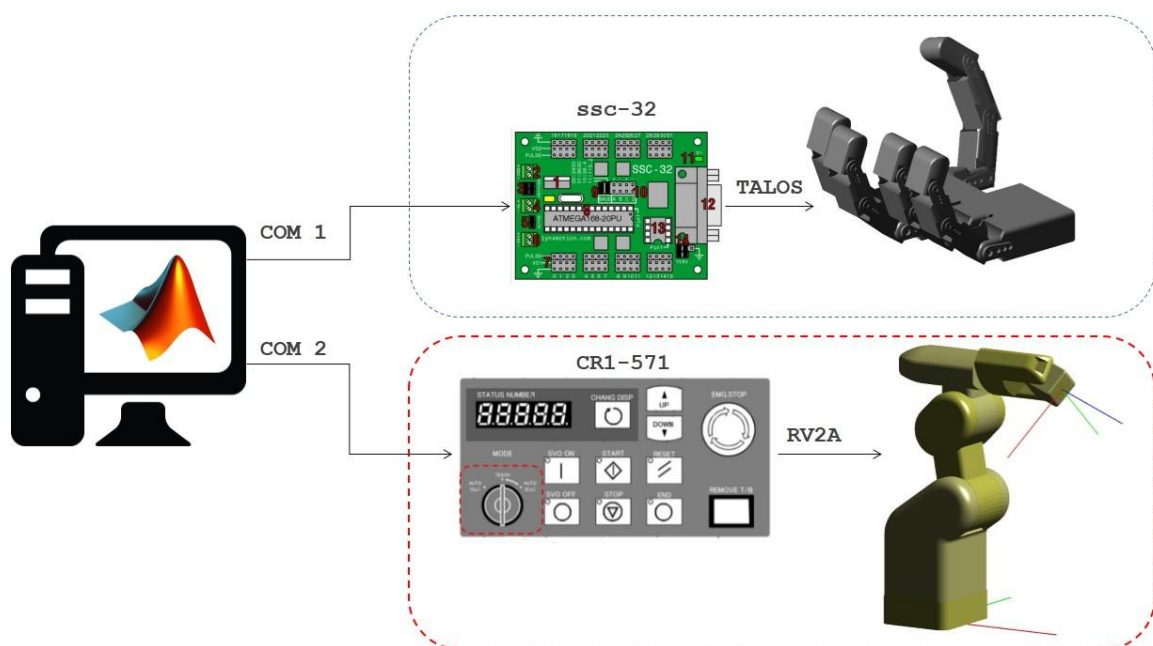
Συναρτήσεις matlab για το ρομποτικό χέρι TALOS
fkinTALOS
ikinTALOS
OPENCOM_TALOS
MOVEHAND

Πίνακας 5.5 Συγκεντρωτικός πίνακας
Συναρτήσεων ρομποτικού χεριού TALOS

6 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΧΕΙΡΙΣΤΗ ΜΑΖΙ ΜΕ ΑΝΘΡΩΠΟΜΟΡΦΗ ΑΡΠΑΓΗ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ MATLAB

6.1 Εισαγωγή

Το ρομποτικό χέρι συνδέεται ως τελικό στοιχείο δράση για το ρομποτικό σύστημα, καταλήγοντας σε μία ολοκληρωμένη υλοποίηση ενός ανθρωπόμορφου βραχίονα με τα χαρακτηριστικά μέσης, ώμου, αγκώνα, καρπού και χεριού. Ο χειρισμός του συστήματος συμβαίνει βάσει αυτών που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, μέσα από το περιβάλλον του matlab, ωστόσο μπορούν να γίνουν ρυθμίσεις με σκοπό την απλοποίηση της λειτουργίας ελέγχου του ενοποιημένου συστήματος, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις για την λειτουργία του ενοποιημένου συστήματος.

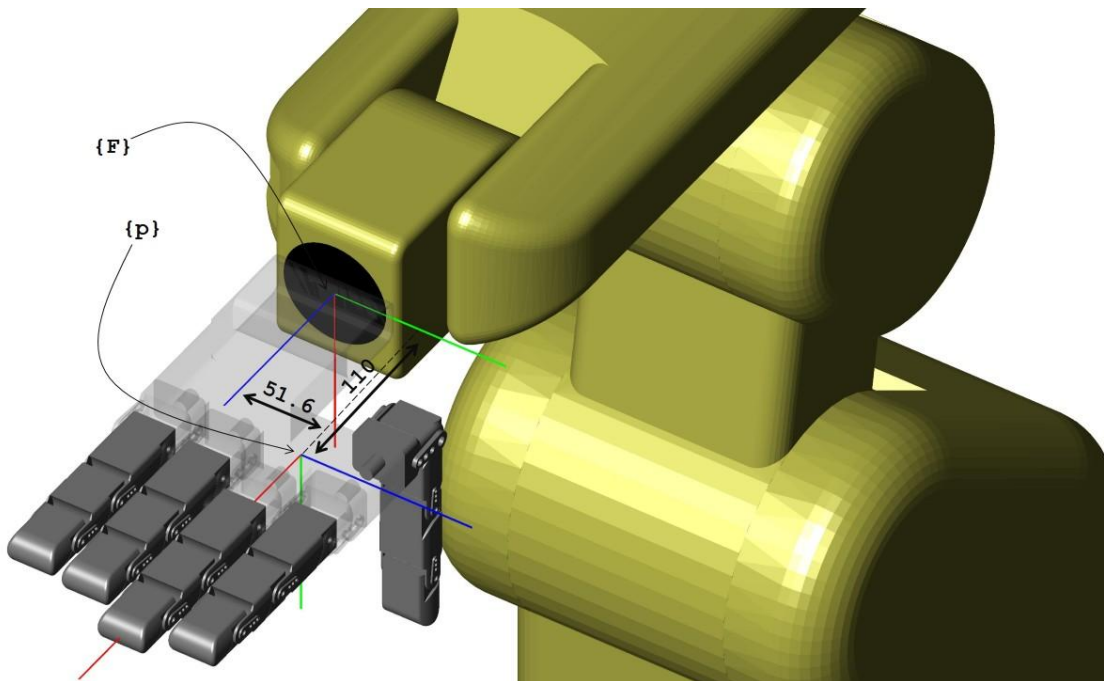


Εικόνα 6.1 Αρχιτεκτονική του τελικού συστήματος

6.2 Τοποθέτηση χεριού στο ρομποτικό βραχίονα

Με την τοποθέτηση του ρομποτικού χεριού στο βραχίονα απαιτείται να εξαχθεί ο ομογενής μετασχηματισμός ${}^F g_p$ που συνδέει στο πλαίσιο της παλάμης $\{p\}$ με το πλαίσιο της φλάντζας του βραχίονα $\{F\}$. Η σχέση περιέχεται στο αρχείο TALOS.mat στη θέση TALOS.HANDHUB, ο μετασχηματισμός προκύπτει

$${}^F g_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 51.6 \\ 1 & 0 & 0 & 110 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Εικόνα 6.2 Σχέση πλαισίων παλάμης χεριού και φλάντζας ρομποτικού βραχίονα

6.3 Τοποθέτηση του χεριού στο χώρο / ρομποτικό χέρι ως τελικό στοιχείο δράσης

Η τοποθέτηση του χεριού στο χώρο συνεπάγεται την κατάλληλη διαμόρφωση του βραχίονα. Για την τοποθέτηση του χεριού στο χώρο απαιτείται η περιγραφή του πλαισίου της παλάμης $\{p\}$ αναφορικά του πλαισίου κόσμου $\{W\}$. Για να λάβει ο βραχίονας την κατάλληλη διαμόρφωση πρέπει η σχέση ${}^F g_p$ που συνδέει πλαίσιο παλάμης $\{p\}$ και πλαίσιο φλάντζας $\{F\}$ να ορισθεί ως σχέση τελικού στοιχείου δράσης για το ρομποτικό βραχίονα, πρακτικά το πλαίσιο $\{T\}$ του βραχίονα ταυτίζεται με το πλαίσιο της παλάμης $\{p\}$. Έτσι οι συντεταγμένες για την τοποθέτηση του χεριού εκφράζουν άμεσα και τη διαμόρφωση του βραχίονα.

```
%-----  
%Example SET HAND AS ROBOT'S TOOL  
  
>> RV2A.TOOL=TALOS.HANDHUB          % ΕΝΗΜΕΡΩΣΗ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΤΗ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ  
>> TOOL(RV2A.TOOL)                  % ΕΝΗΜΕΡΩΣΗ ΕΛΕΓΚΤΗ CR1-571
```

%-----

6.3.1 Απεικόνιση του Συστήματος στο περιβάλλον του matlab

Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης των δύο επιμέρους ρομποτικών συστημάτων στο περιβάλλον του matlab, όμως κατά την χρήση του ενοποιημένου συστήματος είναι βολικό να το απεικονίσουμε όπως είναι η φυσική του δομή, δηλαδή το ρομποτικό χέρι στο ελεύθερο άκρο του ρομποτικού βραχίονα. Η απεικόνιση του ενοποιημένου ρομποτικού συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με κατάλληλη σύνταξη της εντολής fkinTALOS όπου επιπλέον του option `'disp'` πρέπει να συνοδεύεται από το μετασχηματισμό που περιγράφει την τοποθέτηση του χεριού στο χώρο, δηλαδή του πλαισίου τη παλάμης {p} αναφορικά του πλαισίου κόσμου {W}, για το ενοποιημένο σύστημα ο μετασχηματισμός αυτός είναι ο μετασχηματισμός που συνδέει το πλαίσιο του τελικού στοιχείου δράσης {T} του ρομποτικού βραχίονα αναφορικά του πλαισίου κόσμου {W} για την επιθυμητή τοποθέτηση.

%-----

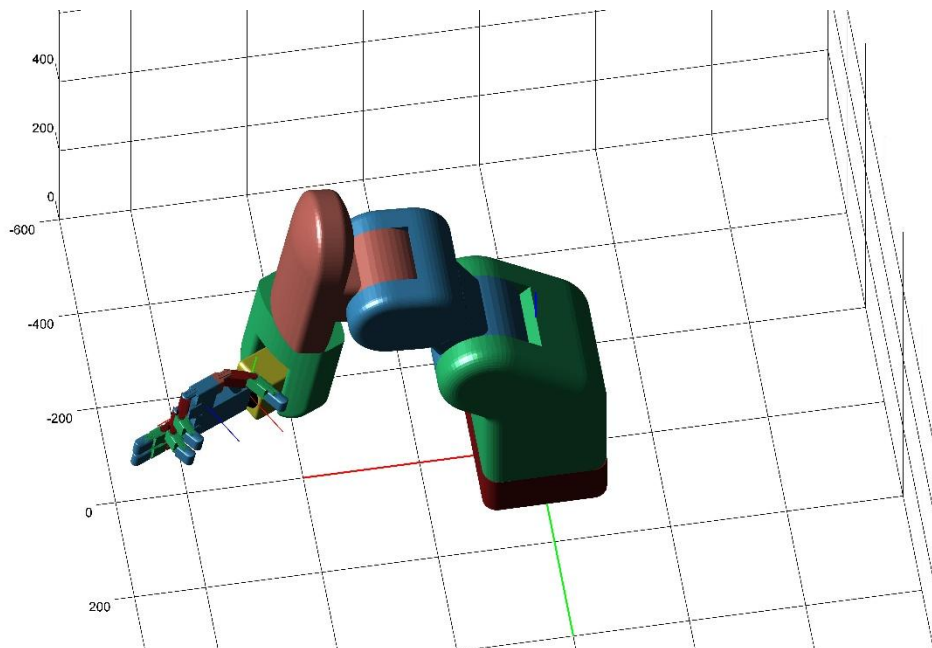
%Example

```
>> RV2A.TOOL=TALOS.HANDHUB % ΕΝΗΜΕΡΩΣΗ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΤΗ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ
```

```
>> T=fkinRV2A([0,0,50,140,-30,-90,90], 'disp');
```

```
>> T1=fkinTALOS(Jhand,'disp', T);
```

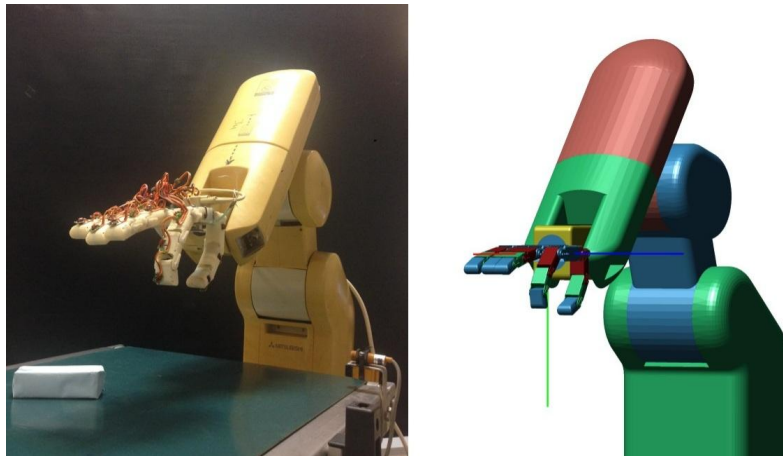
%-----



Εικόνα 6.3 Παράδειγμα απεικόνισης ενοποιημένου συστήματος στο περιβάλλον του matlab

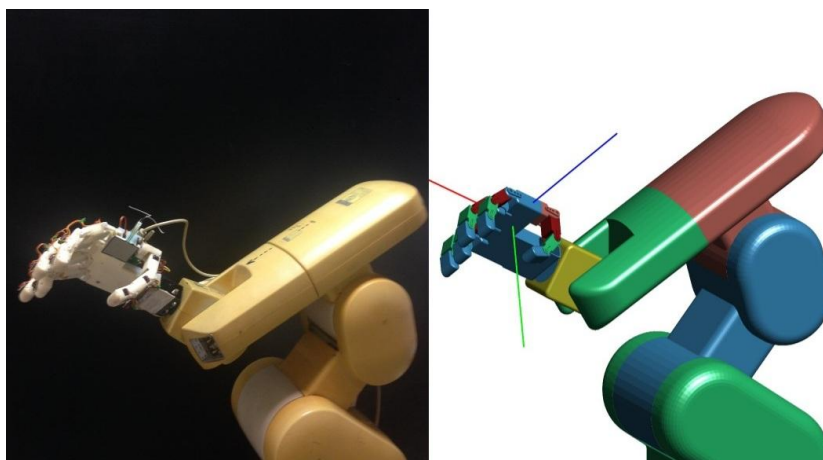
6.4 Σύγκριση εικονικού μοντέλου προσομοίωσης και πραγματικής διάταξης

Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά στιγμιότυπα για διάφορες διαμορφώσεις του συστήματος, με σκοπό τη σύγκριση του εικονικού περιβάλλοντος προσομοίωσης με το πραγματική ρομποτική διάταξη.



Εικόνα 6.4 Διαμόρφωση 1

```
%-----  
%Example picture 6.4  
  
>> Jhand= [0  NaN  NaN  NaN  0  
           45 NaN  NaN  NaN  0  
           15 NaN  NaN  NaN  35  
           40 NaN  NaN  NaN  30]  
  
>> MOVEHAND(Jhand,2000)  
>> MVJ([0 30 110 0 -50 0])  
>> T=fkinRV2A([0 30 110 0 -50 0], 'disp');  
>> T1=fkinTALOS(Jhand, 'disp', T);  
%-----
```



Εικόνα 6.5 Διαμόρφωση 2

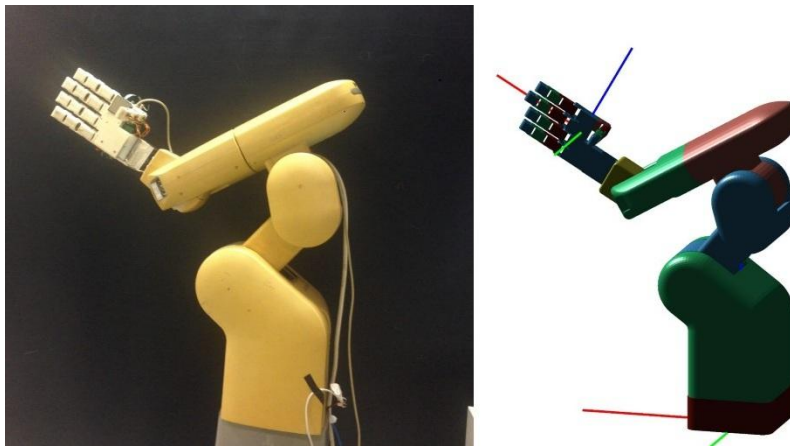
```

%-----
%Example picture 6.5

>> Jhand= [0 0 0 0 0
            45 45 45 45 0
            30 30 30 30 30
            15 15 15 15 15]

>> MOVEHAND(Jhand,2000)
>> MVJ([-40 -30 150 0 -60 50])
>> T=fkinRV2A([-40 -30 150 0 -60 50],'disp');
>> T1=fkinTALOS(Jhand,'disp', T);
%-----

```



Εικόνα 6.6 Διαμόρφωση 3

```

%-----
%Example picture 6.6

>> Jhand= [0 0 0 0 0
            0 0 0 0 0
            0 0 0 0 0
            0 0 0 0 0]

>> MOVEHAND(Jhand,2000)
>> MVJ([0 -30 150 0 -60 90])
>> T=fkinRV2A([0 -30 150 0 -60 90],'disp');
>> T1=fkinTALOS(Jhand,'disp', T);
%-----

```

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Ο χειρισμός της ολοκληρωμένης ρομποτικής διάταξης από το περιβάλλον του matlab γίνεται πιο εύκολος και ευέλικτος, έναντι του χειρισμού τους μεμονωμένα από μητρικά περιβάλλοντα χειρισμού-προγραμματισμού.

Ειδικά για τον ρομποτικό βραχίονα Mitsubishi RV2A, η ανάπτυξη συναρτήσεων ελέγχου από το περιβάλλον του matlab μπορεί να συντελέσει στην αύξηση της λειτουργικότητας και της ευελιξίας του για ένα πλήθος μελλοντικών εφαρμογών.

Παρέχεται η δυνατότητα στα δύο ρομποτικά συστήματα να επικοινωνούν ευκολά με άλλες συσκευές, λόγω του ενδιαμέσου συνδέσμου που αποτελεί ο H/Y και το περιβάλλον του matlab, πράγμα το οποίο μπορεί να ανοίξει νέου δρόμου για ενδιαφέρουσες εφαρμογές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο χειρισμός της ενοποιημένης διάταξης βασισμένη σε χρήση οπτικών δεδομένων, η εφαρμογή έχει αποτελέσει αντικείμενο της εργασίας [9].

Επιπλέον οι συναρτήσεις κινηματικής των δύο ρομποτικών συστημάτων και η δυνατότητα απεικόνισης τους, παρέχουν τη δυνατότητα εξοικείωσης των χρηστών με τα δύο ρομποτικά συστήματα.

7.2 Προτάσεις

Παρακάτω παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος που αναπτύχθηκε:

- Ένα μέρος της εργασίας μπορεί να συντελέσει στην ανάπτυξη ενός εικονικού περιβάλλοντος προσομοίωσης των δύο ρομποτικών συστημάτων με σκοπό την εξοικείωση φοιτητών με τα ρομποτικά συστήματα.
- Ο χειρισμός από το περιβάλλον του matlab, η χρήση μηχανικής όρασης και οι κατάλληλοι νόμοι ελέγχου λαβής μπορούν να συντελέσουν στην ανάπτυξης μία μεθοδολογία ρομποτικού προγραμματισμού σε επίπεδο διεργασιών, με την έννοια ότι μπορούν να αναπτυχθούν κατάλληλες εντολές οι οποίες περιγράφουν άμεσα μια ενέργεια που έχει σχέση με την επιτελούμενη εργασία- στόχο, δηλαδή χωρίς ο χρήστης να χρειάζεται να προσδιορίσει τις λεπτομέρειες της συγκεκριμένης, κατά περίπτωση, ενέργειας, καταλήγοντας στην ανάπτυξη ενός επιδέξιου ρομποτικού συστήματος.

Βιβλιογραφία

1. “COSIROP Programming Software for Mitsubishi Industrial Robot” Available: <http://www.oamk.fi/~eero/ko/Opetus/Tuotantoautomaatio/Robotiikka/CosiropFirstSteps.pdf>
2. Φασουλάς Ιωάννης Σημειώσεις Ρομποτικής ΤΕΙ Κρήτης . Ηράκλειο 2016.
3. Γιάννης Κωνσταντουδάκης Σχεδίαση και κατασκευή ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού [Εργασία] - Ηράκλειο Κρήτης , 2012.
4. Ν. Κριτσωτάκης, Πτυχιακή εργασία: Κινηματική ανάλυση και έλεγχος κίνησης-λαβής ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού, Ηράκλειο: Τ.Ε.Ι Κρήτης, 2012.
5. Robotic Toolbox for Matlab Peter Corke Available: <http://www.petercorke.com/RTB/robot.pdf>
6. The Grasping Hand C.L. Mackenzie (chapter 2 pg. 21), Available: [link](#)
7. Craig John J. Εισαγωγή στην Ρομποτική-Εισαγωγή και Αυτόματος Έλεγχος [Βιβλίο] : Εκδόσεις Τζιόλα, 2009.
8. SSC-32 Manual Available: <http://www.lynxmotion.com/images/html/build136.htm>
9. Τηλεχειρισμός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού με χρήση οπτικών δεδομένων Available: <http://apothesis.lib.teicrete.gr/handle/11713/7882>
10. RV-2A & 3AJ Standard Specifications Manual

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Αλγεβρική επίλυση του αντίστροφου κινηματικού για τα δάκτυλα του ρομποτικού χεριού.

Αναλυτική αλγεβρική επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος για ένα οποιοδήποτε δάκτυλο του ρομποτικού χεριού (Εικόνα 5.5.) .

Παρακάτω παρουσιάζεται η αναλυτική επίλυση του αντίστροφου κινηματικού για τα δάκτυλα. Δοθέν ομογενή πίνακα ${}^p g_{5_{desired}}$ ο οποίος εκφράζει την επιθυμητή τοποθέτηση του τελικού πλαισίου του δακτύλου $\{5\}$ εκφρασμένη ως προς το πλαίσιο τη παλάμης $\{p\}$ αναζητούνται οι γωνίες που θα επιφέρουν την τελική τοποθέτηση.

Η σχέση που συνδέει το πλαίσιο της παλάμης με το τελικό πλαίσιο του δακτύλου είναι η παρακάτω.

$${}^p g_{5_{desired}} = {}^p g_0 {}^0 g_1(\theta_1) {}^1 g_2(\theta_2) {}^2 g_3(\theta_3) {}^3 g_4(\theta_4) {}^4 g_5$$

Για να απλοποιήσουμε υπολογιστικά το πρόβλημα μπορούμε να μεταθέσουμε τους γνωστούς σταθερούς όρους της εξίσωσης στο πρώτο μέλος της όπως φαίνεται παρακάτω

$${}^p g_0^{-1} {}^p g_{5_{desired}} {}^4 g_5^{-1} = {}^p g_0^{-1} {}^p g_0 {}^0 g_1(\theta_1) {}^1 g_2(\theta_2) {}^2 g_3(\theta_3) {}^3 g_4(\theta_4) {}^4 g_5 {}^4 g_5^{-1}$$

$${}^p g_0^{-1} {}^p g_{5_{desired}} {}^4 g_5^{-1} = {}^0 g_1(\theta_1) {}^1 g_2(\theta_2) {}^2 g_3(\theta_3) {}^3 g_4(\theta_4) \quad (1)$$

Όπου ${}^p g_0$ ο μετασχηματισμός που συνδέει το πλαίσιο βάσης του δακτύλου με το πλαίσιο της παλάμης και ${}^4 g_5$ ο μετασχηματισμός που περιγράφει το τελευταίο μέλος του δακτύλου ο οποίος είναι ένας πίνακας καθαρής μετατόπισης στο άξονα x κατά L_3 .

Ο όρος ${}^p g_0^{-1} {}^p g_{5_{desired}} {}^4 g_5^{-1} = {}^0 g_{4_d}$ περιγράφει τις συντεταγμένες θέσης και προσανατολισμού του πλαισίου της τέταρτης άρθρωσης $\{4\}$ αναφορικά του πλαισίου βάσης $\{0\}$ του δακτύλου, μπορεί να υπολογιστεί αφού όλοι οι μετασχηματισμοί είναι γνωστοί και έστω ότι

$${}^0 g_{4_d} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Η σχέση 1 μπορεί να γραφεί ως

$${}^0 g_{4_d} = g_1(\theta_1) {}^1 g_2(\theta_2) {}^2 g_3(\theta_3) {}^3 g_4(\theta_4)$$

Εκτελώντας πολλαπλασιασμό από δεξιά με ${}^3 g_4^{-1}(\theta_4)$ προκύπτει

$${}^0 g_{4_d} {}^3 g_4^{-1}(\theta_4) = g_1(\theta_1) {}^1 g_2(\theta_2) {}^2 g_3(\theta_3)$$

Εκτελώντας τις πράξεις καταλήγουμε

$$\begin{bmatrix} c_1 r_{11} + s_1 r_{21} & c_1 r_{12} + s_1 r_{22} & \textcolor{red}{c_1 r_{13} + s_1 r_{23}} & \textcolor{green}{c_1 r_{14} + s_1 r_{24}} \\ c_1 r_{21} - s_1 r_{11} & c_1 r_{22} - s_1 r_{12} & c_1 r_{23} - s_1 r_{13} & c_1 r_{24} - s_1 r_{14} \\ \textcolor{blue}{r_{31}} & \textcolor{blue}{r_{32}} & r_{33} & \textcolor{green}{r_{34}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{234} & -s_{234} & \textcolor{red}{0} & \textcolor{green}{L_1 c_2 + L_2 c_{23}} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \textcolor{blue}{s_{234}} & \textcolor{blue}{c_{234}} & 0 & \textcolor{green}{L_1 s_2 + L_2 s_{23}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Προκύπτει ένα σύστημα 5 μη γραμμικών συναρτήσεων προς επίλυση

$$\textcolor{red}{c_1 r_{13} + s_1 r_{23}} = 0 \quad (2)$$

$$\textcolor{blue}{s_{234}} = \textcolor{blue}{r_{31}} \quad (3)$$

$$\textcolor{blue}{s_{234}} = \textcolor{blue}{r_{32}} \quad (4)$$

$$\textcolor{green}{L_1 c_2 + L_2 c_{23}} = \textcolor{green}{c_1 r_{14} + s_1 r_{24}} \quad (5)$$

$$\textcolor{green}{L_1 s_2 + L_2 s_{23}} = \textcolor{green}{r_{34}} \quad (6)$$

Από τις σχέσεις 2 μπορούμε να υπολογίσουμε την θ_1

$$\theta_1 = \text{atan2d}(r_{13}, -r_{23})$$

Η γενική λύση για την θ_1 επιφέρει διπλό αποτέλεσμα (2 συμμετρικές γωνίας) δεδομένου όμως των ορίων των αρθρώσεων, περιοριζόμαστε σε μοναδική λύση.

Με γνωστό πλέον το θ_1 μπορούμε να κάνουμε χρήση των (5) και (6) για υπολογισμό των θ_2 και θ_3

Αθροίζοντας τα τετράγωνα των (5) και (6), καταλήγουμε στην σχέση

$$L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 c_2 c_{23} + 2L_1 L_2 s_2 s_{23} = (\textcolor{green}{c_1 r_{14} + s_1 r_{24}})^2 + r_{34}^2$$

Κάνοντας χρήση των τύπων $c_{23} = c_2 c_3 - s_2 s_3$ και $s_{23} = c_2 s_3 + s_2 c_3$ στη σχέση καταλήγουμε

$$L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 c_3 = (\textcolor{green}{c_1 r_{14} + s_1 r_{24}})^2 + r_{34}^2$$

Επιλύοντας την ως προς c_3

$$c_3 = \frac{(\textcolor{green}{c_1 r_{14} + s_1 r_{24}})^2 + r_{34}^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2}$$

Επομένως

$$s_3 = \pm \sqrt{1 - c_3^2}$$

Με την χρήση της συνάρτησης δύο ορισμάτων τόξου εφαπτομένης προκύπτει η θ_3 για την οποία προκύπτουν δύο λύσεις

$$\theta_3 = \text{atan2}(s_3, c_3)$$

Για τον υπολογισμό της θ_2 θα γίνει χρήση των (5) και (6) με δεδομένη την θ_3 (2 τιμές), από τις παραπάνω σχέσεις θα απομονώσουμε την θ_2 γωνία όπως φαίνεται παρακάτω. Χρήση των τύπων $c_{23} = c_2 c_3 - s_2 s_3$ και $s_{23} = c_2 s_3 + s_2 c_3$ στη σχέση 5 και 6 καταλήγουμε

- Για τη **σχέση 5** προκύπτει $L_1 c_2 + L_2 c_2 c_3 - L_2 s_2 s_3 = c_1 r_{14} + s_1 r_{24}$
ή ισοδύναμα $(L_1 + L_2 c_3) c_2 - (L_2 s_3) s_2 = c_1 r_{14} + s_1 r_{24}$
- Για τη **σχέση 6** προκύπτει $L_1 s_2 + L_2 c_2 s_3 - L_2 s_2 c_3 = r_{34}$
ή ισοδύναμα $(L_1 + L_2 c_3) s_2 + (L_2 s_3) c_2 = r_{34}$

Για απλοποίηση στην γραφή έστω $(L_1 + L_2 c_3) = k_1$ και $L_2 s_3 = k_2$ (γνωστά) και $\frac{r_{14}}{c_1} = A$ και $r_{34} = B$

$$k_1 c_2 - k_2 s_2 = A$$

$$k_1 s_2 + k_2 c_2 = B$$

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να γραφούν

$$\frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} c_2 - \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} s_2 = \frac{A}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \quad (7)$$

$$\frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} s_2 + \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} c_2 = \frac{B}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \quad (8)$$

Έστω $\sqrt{k_1^2 + k_2^2} = R$ μπορούμε να ορίσουμε $\frac{k_1}{R} = \cos(x)$ και $\frac{k_2}{R} = \sin(x)$ τότε προκύπτει

$$c_x c_2 - s_x s_2 = \frac{A}{R}$$

$$c_x s_2 + s_x c_2 = \frac{B}{R}$$

Δεδομένου ότι $c_x c_2 - s_x s_2 = \cos(x + \theta_2)$ και $c_x s_2 + s_x c_2 = \sin(x + \theta_2)$ οι (7) και (8) γράφονται

$$\cos(x + \theta_2) = \frac{A}{R}$$

$$\sin(x + \theta_2) = \frac{B}{R}$$

Προκύπτει

$$(x - \theta_2) = \text{atan2}\left(\frac{B}{R}, \frac{A}{R}\right)$$

Άρα

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\frac{B}{R}, \frac{A}{R}\right) - x$$

Όμως $x = \text{atan2}(k_2, k_1)$ αφού $\frac{k_1}{R} = \cos(x)$ και $\frac{k_2}{R} = \sin(x)$

Επομένως

$$\theta_2 = \text{atan2}(B, A) - \text{atan2}(k_2, k_1)$$

Για κάθε θ_3 προκύπτει μία θ_2 , άρα προκύπτουν δύο συνδυασμοί τιμών για τις θ_2 και θ_3

$$\theta_2 = \text{atan2}(r_{34}, (c_1 r_{14} + s_1 r_{24})) - \text{atan2}(L_2 s_3, (L_1 + L_2 s_3))$$

Τελικά προκύπτουν δύο συνδυασμοί τιμών για τις θ_2 και θ_3

Με γνωστές τις θ_2 και θ_3 η θ_4 προκύπτει από τις σχέσεις (3) και (4)

$$\begin{aligned} \tan(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) &= \frac{r_{31}}{r_{32}} \\ \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 &= \text{atan2}(r_{31}, r_{32}) \\ \theta_4 &= \text{atan2}(r_{31}, r_{32}) - \theta_2 - \theta_3 \end{aligned}$$

Οι πίνακες μετασχηματισμού για κάθε μέλος του δακτύλου όπως προκύπτουν σύμφωνα της τροποποιημένης μεθόδου D-H

$${}^0g_{1(\theta_1)} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1g_{2(\theta_2)} = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2g_{3(\theta_3)} = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_1 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3g_{4(\theta_4)} = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & L_2 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4g_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Δόμηση Αρχείου RV2A.mat

Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία δόμησης ενός ενδεικτικού αρχείου RV2A.mat, το οποίο περιέχει τις βασικές κινηματικές παραμέτρους του ρομποτικού βραχίονα.

```
% BUILDING RV2A.mat file

%Πλαίσιο TOOL {T} αναφορικά πλαίσιου φλάντζας {F}
RV2A.TOOL = eye(4);

%Πλαίσιο βάσης {B}={0} αναφορικά πλαίσιου κόσμου {W}
RV2A.BASE = eye(4);

%DHmdf (Graig) parameters for RV2A robot
RV2A.DHmdf =
    [0      0    350      0
     -90    100      0      0
       0    250      0      0
     -90    130    250      0
       90      0      0      0
     -90      0      0      0];

%Μετασχηματισμός από το πλαίσιο του καρπού {WRIST} στο πλαίσιο {F}
RV2A.AWF =
    [1      0      0      0
     0      1      0      0
     0      0      1     85
     0      0      0      1];

%Προσαρμογή γωνιών του κινηματικού μοντέλου σε γωνίες πραγματικού βραχίονα
RV2A.thetaoffset = [0      -90     -90      0      0      180]';

%Όρια των αρθρώσεων ρομποτικού βραχίονα
RV2A.JointLimit =
    [-160    -45     50    -160    -120    -200
     160     135    170     160     120     200]';

%Αποθήκευση μεταβλητής

global RV2A    %Η μεταβλητή RV2A πρέπει να γίνει global πριν την αποθήκευση

save('RV2A','RV2A')
%-----
```

Αξίζει να αναφερθεί ότι το παραπάνω αρχείο δημιουργεί μια μεταβλητή τύπου struct στο matlab, και απεικονίζεται ενδεικτικά όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:

Field ▲	Value	Min	Max
abc joints	<6x1 char>		
abc USER	'Dimitris Petropoulos'		
JointLimit	<6x2 double>	-200	200
axisofjointfreedom	<6x6 double>	0	1
abc Manufacturer	'Mitsubishi'		
abc Language	'MELFA IV'		
TOOL	<4x4 double>	0	1
BASE	<4x4 double>	0	1
abc model	'RV2A'		
defaultposeangles	[0 0 90 0 0 0]	0	90
AWF	<4x4 double>	0	85
DHmdf	<6x4 double>	-90	350
thetaoffset	[0;-90;-90;0;0;180]	-90	180
STL	<1x1 struct>		

Παρατηρήστε ότι για την απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα έχουμε προσθέσει την μεταβλητή STL που είναι τύπου 1x1 struct. Η μεταβλητή αυτή περιέχει όλη την πληροφορία για την απεικόνιση στο matlab του ρομποτικού βραχίονα. Η ανάλυση της μεταβλητής αυτής δεν περιγράφεται χάριν συντομίας.