

**Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης**

**Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών**

**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ):**

**«Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και  
Ρομποτικής»**



## **Μεταπτυχιακή εργασία**

**Τηλεχειρισμός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού με  
χρήση οπτικών δεδομένων**

**Μεταπτυχιακή φοιτήτρια: Βεϊσάκη Ελένη**

**ΑΜ: 06**

Επιβλέποντες καθηγητές:

Δρ. Φασουλάς Ιωάννης

Δρ. Κοσμόπουλος Δημήτριος

**Ηράκλειο 2016**

**Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης**  
**Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών**  
**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ):**  
**«Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής»**

## **Μεταπτυχιακή εργασία**

**Τηλεχειρισμός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού με χρήση οπτικών  
δεδομένων**

**Μεταπτυχιακή φοιτήτρια: Βεϊσάκη Ελένη**

**ΑΜ: 06**

Επιβλέποντες καθηγητές:  
Δρ. Φασουλάς Ιωάννης  
Δρ. Κοσμόπουλος Δημήτριος

Εγκρίθηκε από την επιτροπή στις 30/06/2016

1. Δρ. Φασουλάς Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης .....  
(Υπογραφή)
2. Δρ. Κοσμόπουλος Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστήμιο Πατρών.....  
(Υπογραφή)
3. Δρ. Καββουσανός Εμμανουήλ, Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης .....  
(Υπογραφή)
4. Δρ. Σφακιωτάκης Μιχαήλ, Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης .....  
(Υπογραφή)

Ηράκλειο 2016

## Ευχαριστίες

Με την ευκαιρία της ολοκλήρωσης της μεταπτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές μου, δρ. Φασουλά Ιωάννη και δρ. Κοσμόπουλο Δημήτριο, οι οποίοι μου έδωσαν την ευκαιρία να ασχοληθώ με το θέμα αυτό και βοήθησαν στην υλοποίηση της εργασίας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές του προγράμματος για την βοήθεια που πρόσφεραν σε όλη την διάρκεια της φοίτησης μου. Ειδικότερα θέλω να ευχαριστήσω τους δρ. Καββουσανό Εμμανουήλ και δρ. Γιαννακουδάκη Αριστοτέλη για την εμπιστοσύνη που έδειξαν στο πρόσωπο μου καθώς και τους δρ. Σφακιωτάκη Μιχαήλ και δρ. Παπαδάκη Νικόλαο για τις συμβουλές τους.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν στην υλοποίηση της εργασίας. Ειδικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Qammaz Ammar (CVRL, ITE) και Οικονομίδα Ιάσωνα (CVRL, ITE) για τις πληροφορίες και την βοήθεια που παρείχαν σχετικά με την εφαρμογή "3D Hand Tracking" καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον Πετρόπουλο Δημήτριο, φοιτητή στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του ΤΕΙ Κρήτης, για την παραχώρηση των συναρτήσεων που έχει υλοποιήσει για χειρισμό του βραχίονα μέσω του λογισμικό MATLAB.

Ακολούθως, για την βοήθεια και συμπαράσταση τόσο κατά την διάρκεια του ΔΠΜΣ όσο και κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής, θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στους συμφοιτητές μου Κωσταντίνο Δεδούση, Γκλίβα Ρόζα, Θοδωρή Νίκια, Καλαντζή Σπυρίδωνα, Αράπη Μανώλη καθώς και τον Καλλούδη Μανώλη, φοιτητή στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του ΤΕΙ Κρήτης.

Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου που με στηρίζουν σε όλα τα εγχειρήματα μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Mary και τον Norman για την συμπαράσταση τους. Ακολούθως, να ευχαριστήσω και τον Κ. Παντελάκη Αντώνη, προϊστάμενο της Σπουδαστικής Μεριμνάς στο ΤΕΙ Κρήτης, για τις πολύτιμες συμβουλές και συζητήσεις τόσο κατά την διάρκεια του προπτυχιακού όσο και του παρόντος προγράμματος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον άντρα μου Νίκο, για την συμπαράσταση και την κατανόηση που έδειξε όλο το διάστημα αυτό, και επειδή δεν σταματάει να υποστηρίζει και να πιστεύει στην γυναίκα του.

Σας ευχαριστώ όλους.

Ηράκλειο, Ιούνιος 2016

Ελένη Βεϊσιάκη

## Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται τον τηλεχειρισμό ενός ρομποτικού συστήματος με χρήση οπτικών δεδομένων, τα οποία εξάγονται από μια εξειδικευμένη εφαρμογή. Το τελικό ρομποτικό σύστημα αποτελείται από ένα βιομηχανικό βραχίονα και ένα ρομποτικό χέρι τοποθετημένο ως τελικό στοιχείο δράσης στο βραχίονα. Πιο αναλυτικά, για την υλοποίηση της εργασίας χρησιμοποιούνται τα παρακάτω συστήματα:

- Η εφαρμογή "3D Hand Tracking", από την οποία εξάγονται τα οπτικά δεδομένα. Η εφαρμογή αυτή αποτελεί ένα σύστημα αναγνώρισης και παρακολούθησης του ανθρώπινου χεριού και έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Υπολογιστικής Όρασης και Ρομποτικής, στο Ινστιτούτο Πληροφορικής του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας στο Ηράκλειο Κρήτης.
- Το ρομποτικό χέρι Talos' Hand, το οποίο έχει αναπτυχθεί από φοιτητές στα πλαίσια πτυχιακών εργασιών στο εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης.
- Ο βιομηχανικός βραχίονας RV2A της Mitsubishi.

Η διασύνδεση των παραπάνω συστημάτων υλοποιείται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή με εγκατεστημένο το λογισμικό MATLAB. Το ρομποτικό χέρι αναπαράγει την κίνηση των δαχτύλων του χρήστη και το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα αναπαράγει την κίνηση της παλάμης του χρήστη. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω το τελικό ρομποτικό σύστημα μιμείται την κίνηση του χεριού του χρήστη. Αυτό επιτυγχάνεται χωρίς ο χρήστης να φέρει οπτικά σημάδια στο χέρι του ή να φοράει ειδικά γάντια.

## Abstract

Remote control of complex mechatronic systems, in an intuitive way, is not an easy task especially when we refer to robot manipulators and anthropomorphic robotic hands. In this case, teleoperation is often performed through expensive motion tracking systems along with uncomfortable data gloves in order to capture the configuration of the palm and the motion of the fingers.

For this reason, we propose a teleoperation system that is solely based on optical data for controlling the motion of a robotic hand with 22 degrees of freedom (DoFs). The proposed system does not require the user to wear any motion capture glove or other exoskeleton devices. The main task for the system is to imitate user's hand configurations for grasping objects or doing human gestures. The system consists of the following subsystems:

- a. the 16 DoFs robot hand "Talos" that is developed by the Control Systems & Robotics Lab at the Technological Educational Institute of Crete
- b. the RV-2A six DoFs robot manipulator by Mitsubishi and
- c. the "3D Hand Tracking" software that is based on the RGB-D Kinect sensor and developed by the Computational Vision & Robotics Laboratory of the Institute of Computer Science /FORTH.

The interaction between the systems accomplished using a desktop PC with MATLAB installed. The Talos' hand is used as a gripper at the end effector of RV-2A and reproduces the movement of the user's fingers. The end effector of RV-2A reproduces the movement of the user's palm. As a result, the system's motion imitates that of the user's hand in near real time, without requiring the user to wear any motion capture gloves or other invasive devices.

## Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	ii
Abstract .....	iii
Πίνακας Περιεχομένων .....	iv
Κατάλογος Εικόνων .....	viii
Κατάλογος Πινάκων.....	xvi
Αρκτικόλεξα .....	xvii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός και κίνητρα.....	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας .....	4
1.3 Σχετικό υπόβαθρο .....	5
1.3.1 Αισθητήρας Kinect.....	5
1.3.2 Επίπεδα κίνησης και ορισμός κινήσεων .....	8
1.3.3 Ανθρώπινο χέρι .....	9
2. Σχετική Έρευνα (State of the art) .....	11
3. Περιγραφή Διαθέσιμων Συστημάτων.....	15
3.1 Εφαρμογή "3D Hand Tracking" .....	15
3.2 Talos' Hand .....	18
3.3 Βραχίονας RV-2A .....	20
4. Τηλεχειρισμός Talos' Hand με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" .....	24
4.1 Επικοινωνία Talos' Hand και "3D Hand Tracking" .....	24
4.2 Περιγραφή αλγορίθμου .....	25
4.3 Πειραματική αποτίμηση αλγορίθμου τηλεχειρισμού Talos' Hand.....	29
5. Τηλεχειρισμός Βραχίονα RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" .....	34

5.1	Γενικές παρατηρήσεις .....	35
5.1.1	Επικοινωνία RV-2A και "3D Hand Tracking" .....	35
5.1.2	Χειρισμός βραχίονα RV-2A μέσω MATLAB .....	35
5.1.3	Κατώφλι κίνησης – Αποφυγή άσκοπων κινήσεων.....	36
5.2	Ορισμός πλαισίων συντεταγμένων.....	39
5.2.1	Αρχική κατάσταση συστήματος και ορισμός πλαισίων συντεταγμένων .....	40
5.2.2	Περιγραφή της σχετικής θέσης κατά την διάρκεια κίνησης.....	41
5.3	Αλγόριθμος Α τηλεχειρισμού RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" .....	43
5.3.1	Κριτήριο επιλογής σημείων.....	43
5.3.2	Περιγραφή αλγορίθμου .....	43
5.3.3	Ρυθμίσεις βραχίονα RV2A.....	47
5.3.4	Πειραματική αποτίμηση τηλεχειρισμού RV2A για τον αλγόριθμο Α.....	51
5.4	Αλγόριθμος Β τηλεχειρισμού RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" .....	57
5.4.1	Κριτήριο επιλογής σημείων.....	57
5.4.2	Περιγραφή αλγορίθμου .....	58
5.4.3	Ρυθμίσεις βραχίονα και επιλογή χρονικής κατωφλίωσης.....	62
5.4.4	Πειραματική αποτίμηση τηλεχειρισμού RV2A για τον αλγόριθμο Β.....	68
5.5	Σύγκριση αλγορίθμων .....	73
6.	Τηλεχειρισμός Τελικού Ρομποτικού Συστήματος με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" .....	79
6.1	Περιγραφή τελικού συστήματος.....	79
6.2	Περιγραφή αλγορίθμου .....	80
6.3	Πειραματική αποτίμηση.....	85
6.3.1	Τηλεχειρισμός βραχίονα στο χώρο .....	86

6.3.2	Τηλεχειρισμός δακτύλων .....	86
6.3.3	Τηλεχειρισμός ρομποτικού συστήματος για λαβή αντικειμένου .....	88
6.3.4	Τηλεχειρισμός ρομποτικού συστήματος για λαβή υφάσματος .....	90
6.3.5	"Η Γέννηση Του Αδάμ" .....	91
7.	Συμπεράσματα – Προτάσεις .....	92
7.1	Συμπεράσματα .....	92
7.2	Προτάσεις βελτίωσης .....	92
	Βιβλιογραφία.....	94
	Παράρτημα Α – Συναρτήσεις χειρισμού RV2A μέσω MATLAB.....	i
1.	Περιγραφή συναρτήσεων .....	i
2.	Παράδειγμα υλοποίησης αλγόριθμου χειρισμού RV2A σε MATLAB .....	iv
	Παράρτημα Β – Διαγράμματα αλγ. Α.....	vi
1.	Ακίνητο χέρι χωρίς κατωφλίωση κίνησης, Αλγ. Α.....	vi
2.	Ακίνητο χέρι με κατωφλίωση κίνησης, Αλγ. Α .....	vii
3.	Πειραματική κίνηση .....	viii
4.	Μεταβολή της SPD, Αλγ. Α .....	x
5.	Μεταβολή της ACCEL, Αλγ. Α .....	xi
6.	Μεταβολή της OVRD, Αλγ. Α .....	xii
7.	Μεταβολή της JOVRD, Αλγ. Α.....	xiii
8.	Combinations, Αλγ. Α.....	xiv
	Παράρτημα Γ – Διαγράμματα αλγ. Β .....	xv
1.	Μεταβολή της SPD, Αλγ. Β .....	xv
2.	Μεταβολή της ACCEL, Αλγ. Β.....	xvi
3.	Μεταβολή της OVRD, Αλγ. Β .....	xvii
4.	Μεταβολή της JOVRD, Αλγ. Β .....	xviii



5.	Combinations, Αλγ. Β.....	xix
6.	ACCEL=100 OVRD=100 JOVRD=100 dt=[0 200 400 600 800 1000].....	xx
7.	ACCEL=80 OVRD=100 JOVRD=100 dt=[0 200 400 600 800 1000].....	xxi
8.	ACCEL=80 OVRD=100 JOVRD=100 dt=[0 200 400 600 800 1000].....	xxii
9.	ACCEL=80 OVRD=80 JOVRD=80 dt=[0 200 400 600 800 1000].....	xxiii
10.	ACCEL=80 OVRD=80 JOVRD=80 dt = 600 .....	xxiv
	Παράρτημα Δ – Διαφάνειες Παρουσίασης.....	xxv

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στην εργασία (α) Βραχίονας RV2A (β) Talos' Hand (γ) Στιγμιότυπο από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" .....	3
Εικόνα 1.2: Συσκευή Kinect .....	6
Εικόνα 1.3: Οι αισθητήρες που περιέχονται στο Kinect [3].....	6
Εικόνα 1.4: Το εσωτερικό της συσκευής [4] .....	6
Εικόνα 1.5: Υπολογισμός βάθους [5] .....	6
Εικόνα 1.6: Δεδομένα βάθους Kinect ανάλογα την απόσταση [5].....	6
Εικόνα 1.7: Χρήστης απέναντι από Kinect [6].....	7
Εικόνα 1.8: Οπτικό πεδίο Kinect στη κοντινή (near) λειτουργία [6].....	7
Εικόνα 1.9: Οριζόντιο οπτικό πεδίο Kinect στο προεπιλεγμένο εύρος [6].....	7
Εικόνα 1.10: Κάθετο οπτικό πεδίο Kinect στο προεπιλεγμένο εύρος [6].....	7
Εικόνα 1.11: Επίπεδα κίνησης και άξονες αναφοράς (ανθρώπινο σώμα) [8].....	8
Εικόνα 1.12: Επίπεδα κίνησης (χέρι).....	8
Εικόνα 1.13: Κινήσεις δαχτύλων .....	8
Εικόνα 1.14: Ονομασία δακτύλων και φάλαγγες ανθρώπινου χεριού .....	9
Εικόνα 1.15: Ονομασία αρθρώσεων .....	9
Εικόνα 3.1: Παράμετροι που σχετίζονται με την γεωμετρική διαμόρφωση του εικονικού χεριού .....	16
Εικόνα 3.2: Γραφική απεικόνιση μεθόδου εφαρμογής "3D Hand Tracking". (α) Η εικόνα RGB. (β) Ο χάρτης βάθους για την ίδια χρονική στιγμή. (γ) Το ανθρώπινο χέρι απομονωμένο. (δ) Η υπόθεση για το εικονικό χέρι που προκύπτει από τα δεδομένα. (ε) Ανάκτηση αρθρώσεων ανθρώπινου χεριού.[24].....	16
Εικόνα 3.3: Διαδικασία αρχικοποίησης εφαρμογής "3D Hand Tracking" .....	17
Εικόνα 3.4: Talos' Hand .....	18
Εικόνα 3.5: Χαρακτηριστικά Σερβοκινητήρων .....	18

Εικόνα 3.6: Talos' Hand και αρθρώσεις .....	19
Εικόνα 3.7: Διαστάσεις βιομηχανικού βραχίονα RV2A .....	20
Εικόνα 3.8: Χώρος εργασίας RV2A.....	21
Εικόνα 3.9: Αρθρώσεις και ονομασία συνδέσμων .....	21
Εικόνα 3.10: Ελεγκτής βραχίονα .....	22
Εικόνα 3.11: Πρόγραμμα διεπαφής COSIROP.....	22
Εικόνα 3.12: Χειριστήριο εκπαίδευσης (R28TB) .....	22
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής τηλεχειρισμού Talos' Hand.....	27
Εικόνα 4.2: Απεικόνιση στάσης δακτύλων στο λογισμικό MATLAB .....	28
Εικόνα 4.3: Χειρονομία με όλα τα δάκτυλα πλήρως εκτεταμένα (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand.....	30
Εικόνα 4.4: Χειρονομία με όλα τα δάκτυλα σε κάμψη (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand ...	30
Εικόνα 4.5: Χειρονομία με εκτεταμένο μόνο το μικρό δάκτυλο. (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand.....	30
Εικόνα 4.6: Χειρονομία με εκτεταμένα το μικρό δάκτυλο και τον αντίχειρα (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand.....	31
Εικόνα 4.7: Χειρονομία με τον αντίχειρα σε πλήρη έκταση (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand.....	31
Εικόνα 4.8: Χειρονομία με εκτεταμένους το δείκτη και το μέσο (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand.....	31

Εικόνα 4.9: Προσομοίωση πλαισίου XYZ (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand .....	32
Εικόνα 5.1: Μετατόπιση στους άξονες XYZ.....	37
Εικόνα 5.2: Μετατόπιση στον άξονα X.....	37
Εικόνα 5.3: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X.....	37
Εικόνα 5.4: Πορεία στο χώρο .....	38
Εικόνα 5.5: Μετατόπιση στον άξονα X.....	39
Εικόνα 5.6: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X.....	39
Εικόνα 5.7: Πλαίσια συντεταγμένων Kinect και εφαρμογής "3D Hand Tracking" (εικονικό χέρι) .....	40
Εικόνα 5.8: Πλαίσια συντεταγμένων του RV2A .....	40
Εικόνα 5.9: Διάγραμμα ροής τηλεχειρισμού RV2A.....	46
Εικόνα 5.10: Πειραματική κίνηση για την επιλογή των ρυθμίσεων.....	48
Εικόνα 5.11: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	48
Εικόνα 5.12: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	49
Εικόνα 5.13: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	49
Εικόνα 5.14: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	50
Εικόνα 5.15: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	51
Εικόνα 5.16: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	51
Εικόνα 5.17: Πορεία στο χώρο .....	52
Εικόνα 5.18: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY.....	52
Εικόνα 5.19: Μετατόπιση στον άξονα X.....	53
Εικόνα 5.20: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X.....	53
Εικόνα 5.21: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	53
Εικόνα 5.22: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y.....	53

Εικόνα 5.23: Μετατόπιση στον άξονα Z.....	53
Εικόνα 5.24: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z.....	53
Εικόνα 5.25: Πορεία στο χώρο .....	54
Εικόνα 5.26: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY.....	54
Εικόνα 5.27: Μετατόπιση στον άξονα X.....	54
Εικόνα 5.28: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X.....	54
Εικόνα 5.29: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	54
Εικόνα 5.30: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y.....	54
Εικόνα 5.31: Μετατόπιση στον άξονα Z.....	55
Εικόνα 5.32: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z.....	55
Εικόνα 5.33: Πορεία στο χώρο .....	55
Εικόνα 5.34: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY.....	55
Εικόνα 5.35: Μετατόπιση στον άξονα X.....	56
Εικόνα 5.36: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X.....	56
Εικόνα 5.37: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	56
Εικόνα 5.38: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y.....	56
Εικόνα 5.39: Μετατόπιση στον άξονα Z.....	56
Εικόνα 5.40: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z.....	56
Εικόνα 5.41: Επιλογή σημείων .....	58
Εικόνα 5.42: Διάγραμμα ροής τηλεχειρισμού RV2A.....	61
Εικόνα 5.43: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	63
Εικόνα 5.44: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	63
Εικόνα 5.45: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	64
Εικόνα 5.46: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	64
Εικόνα 5.47: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	65

Εικόνα 5.48: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	65
Εικόνα 5.49: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	66
Εικόνα 5.50: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	67
Εικόνα 5.51: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	67
Εικόνα 5.52: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	68
Εικόνα 5.53: Πορεία στο χώρο .....	69
Εικόνα 5.54: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY.....	69
Εικόνα 5.55: Μετατόπιση στον άξονα X.....	70
Εικόνα 5.56: Περιστροφή στον άξονα X.....	70
Εικόνα 5.57: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	70
Εικόνα 5.58: Περιστροφή στον άξονα Y .....	70
Εικόνα 5.59: Μετατόπιση στον άξονα Z.....	70
Εικόνα 5.60: Περιστροφή στον άξονα Z.....	70
Εικόνα 5.61: Πορεία στο χώρο .....	71
Εικόνα 5.62: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY.....	71
Εικόνα 5.63: Μετατόπιση στον άξονα X.....	71
Εικόνα 5.64: Περιστροφή ως προς τον άξονα X.....	71
Εικόνα 5.65: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	71
Εικόνα 5.66: Περιστροφή ως προς τον άξονα Y.....	71
Εικόνα 5.67: Μετατόπιση στον άξονα Z.....	72
Εικόνα 5.68: Περιστροφή ως προς τον άξονα Z.....	72
Εικόνα 5.69: Πορεία στο χώρο .....	72
Εικόνα 5.70: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY.....	72
Εικόνα 5.71: Μετατόπιση στον άξονα X.....	73
Εικόνα 5.72: Περιστροφή ως προς τον άξονα X.....	73

Εικόνα 5.73: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	73
Εικόνα 5.74: Περιστροφή ως προς τον άξονα Y.....	73
Εικόνα 5.75: Μετατόπιση στον άξονα Z.....	73
Εικόνα 5.76: Περιστροφή ως προς τον άξονα Z.....	73
Εικόνα 5.77 : Πορεία στο χώρο .....	74
Εικόνα 5.78: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY.....	74
Εικόνα 5.79: Μετατόπιση στον άξονα X.....	74
Εικόνα 5.80: Περιστροφή ως προς τον άξονα X.....	74
Εικόνα 5.81: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	74
Εικόνα 5.82: Περιστροφή ως προς τον άξονα Y.....	74
Εικόνα 5.83: Μετατόπιση στον άξονα Z.....	75
Εικόνα 5.84: Περιστροφή ως προς τον άξονα Z.....	75
Εικόνα 5.85: Πορεία στο χώρο .....	76
Εικόνα 5.86: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY.....	76
Εικόνα 5.87: Μετατόπιση στον άξονα X.....	76
Εικόνα 5.88: Περιστροφή ως προς τον άξονα X.....	76
Εικόνα 5.89: Μετατόπιση στον άξονα Y.....	77
Εικόνα 5.90: Περιστροφή ως προς τον άξονα Y.....	77
Εικόνα 5.91: Μετατόπιση στον άξονα Z.....	77
Εικόνα 5.92: Περιστροφή ως προς τον άξονα Z.....	77
Εικόνα 6.1: Διάταξη τελικού συστήματος.....	80
Εικόνα 6.2: Διάγραμμα ροής για το τελικό σύστημα (RV2A & TALOS).....	82
Εικόνα 6.3: Απεικόνιση ρουτίνας MoveTALOS .....	83
Εικόνα 6.4: Απεικόνιση ρουτίνας MoveRV2A .....	83
Εικόνα 6.5: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος .....	86

Εικόνα 6.6: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y του πλαισίου {H} .....	86
Εικόνα 6.7: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z του πλαισίου {H}.....	86
Εικόνα 6.8: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X του πλαισίου {H} .....	86
Εικόνα 6.9: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος .....	87
Εικόνα 6.10: Στιγμιότυπο κατά την κάμψη του δείκτη .....	87
Εικόνα 6.11: Στιγμιότυπο κατά την κάμψη όλων των δακτύλων εκτός του αντίχειρα .....	87
Εικόνα 6.12: Στιγμιότυπο κατά την κάμψη όλων των δακτύλων εκτός τον αντίχειρα.....	87
Εικόνα 6.13: Στιγμιότυπο κατά την επαναφορά του δείκτη στην θέση αρχικοποίησης....	87
Εικόνα 6.14: Επαναφορά όλων των δακτύλων στην θέση αρχικοποίησης .....	87
Εικόνα 6.15: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος .....	88
Εικόνα 6.16: Στιγμιότυπο πριν την αρπάγη του αντικειμένου .....	88
Εικόνα 6.17: Στιγμιότυπο κατά την αρπάγη του αντικειμένου .....	88
Εικόνα 6.18: Μετακίνηση του αντικειμένου σε διαφορετική θέση .....	88
Εικόνα 6.19: Απελευθέρωση αντικειμένου .....	88
Εικόνα 6.20: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος .....	89
Εικόνα 6.21: Στιγμιότυπο πριν την αρπάγη του αντικειμένου .....	89
Εικόνα 6.22: Στιγμιότυπο πριν την αρπάγη του αντικειμένου .....	89
Εικόνα 6.23: Στιγμιότυπο κατά την αρπάγη του αντικειμένου .....	89
Εικόνα 6.24: Μετακίνηση του αντικειμένου σε διαφορετική θέση .....	89
Εικόνα 6.25: Απελευθέρωση αντικειμένου .....	89
Εικόνα 6.26: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος .....	90
Εικόνα 6.27: Στιγμιότυπο πριν την αρπάγη του αντικειμένου .....	90
Εικόνα 6.28: Στιγμιότυπο πριν την αρπάγη του αντικειμένου .....	90
Εικόνα 6.29: Στιγμιότυπο κατά την αρπάγη του αντικειμένου .....	90
Εικόνα 6.30: Μετακίνηση του αντικειμένου σε διαφορετική θέση .....	90



Εικόνα 6.31: Απελευθέρωση αντικειμένου .....	90
Εικόνα 6.32: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος .....	91
Εικόνα 6.33: Στιγμιότυπο κατά την τοποθέτηση του συστήματος στην επιθυμητή θέση .	91
Εικόνα 6.34: Αναπαράσταση τοιχογραφίας του Michelangelo [33].....	91

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά RV2A.....	21
Πίνακας 5.1: Ρυθμίσεις βραχίονα RV2A .....	50
Πίνακας 5.2: Ρυθμίσεις βραχίονα και αποτελέσματα .....	65
Πίνακας 5.3: Σύγκριση αλγορίθμων .....	75
Πίνακας 5.4: Σύγκριση αλγορίθμων .....	77

## Αρκτικόλεξα

T.E.I. Κρήτης	Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
ITE / FORTH	Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας / Foundation for Research and Technology-Hellas
ICS	Ινστιτούτο Πληροφορικής (Institute of Computer Science)
CVRL	Εργαστήριο Υπολογιστικής Όρασης και Ρομποτικής (Computational Vision and Robotics Laboratory)
RGB-D	RGB δεδομένα και δεδομένα βάθους (Depth map)
BE	Βαθμοί Ελευθερίας (Degree of Freedom)
ΕΚΠ	Ευθύ Κινηματικό Πρόβλημα
ΑΚΠ	Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα
ΟΜ	Ομογενής μετασχηματισμός
DIP	Περιφερική μεσοφαλαγγική άρθρωση (Distal Interphalangeal)
PIP	Εγγύς μεσοφαλαγγική άρθρωση (Proximal Interphalangeal)
IP	Μεσοφαλαγγική άρθρωση (Interphalangeal)
MCP	Μετακαρποφαλαγγική άρθρωση (Metacarpophalangeal)
DoFs	Βαθμοί ελευθερίας (Degrees of Freedom)

# 1. Εισαγωγή

---

---

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται τα κίνητρα που οδήγησαν στην υλοποίηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και παρουσιάζονται οι στόχοι αυτής. Επίσης, παρουσιάζεται η δομή της εργασίας. Τέλος, παρατίθενται σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση μετέπειτα κεφαλαίων.

## 1.1 Σκοπός και κίνητρα

Τηλεχειρισμός είναι η τεχνική απομακρυσμένου ελέγχου. Για την υλοποίηση συστημάτων τηλεχειρισμού συνήθως απαιτούνται δυο υποσυστήματα. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται τον τηλεχειρισμό ενός ρομποτικού χεριού μέσω κινήσεων ενός ανθρώπινου χεριού. Συνήθως, σε παρόμοιες εφαρμογές, το πρώτο υποσύστημα αποτελείται από τον χρήστη και τον αισθητήρα (ή τους αισθητήρες), ο οποίος χρησιμοποιείται για ανίχνευση και αναγνώριση της εκάστοτε κίνησης. Οι κινήσεις μεταφράζονται σε εντολές τις οποίες εκτελεί το δεύτερο υποσύστημα. Το δεύτερο υποσύστημα, συνήθως, αποτελείται από ένα ρομποτικό σύστημα το οποίο εκτελεί εντολές. Από το ρομποτικό σύστημα είτε εκτελούνται προκαθορισμένες-συγκεκριμένες κινήσεις ανάλογα με την εντολή που δέχεται, είτε κινήσεις που αποτελούν μίμηση των κινήσεων του χρήστη. Στόχος σε αυτές τις εφαρμογές αποτελεί η ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ της εντολής και της απόκρισης του ρομποτικού συστήματος.

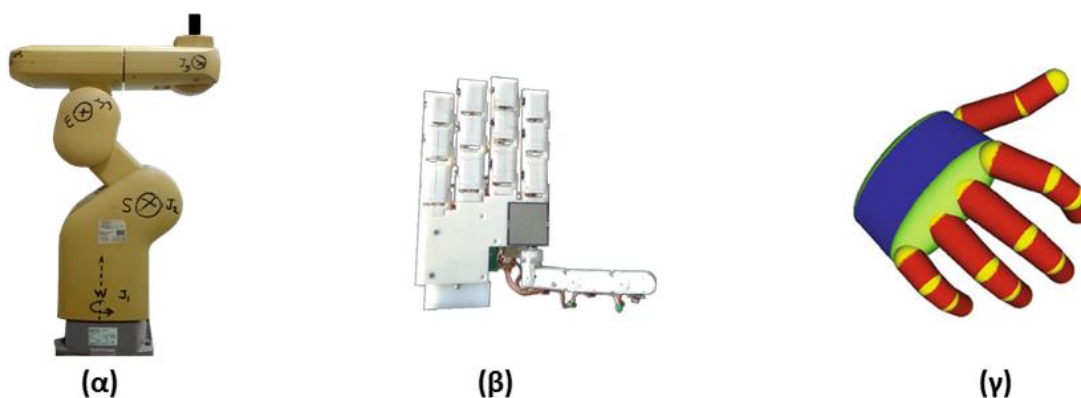
Ο τηλεχειρισμός ρομποτικών συστημάτων απασχολεί έντονα την επιστημονική κοινότητα. Οι πρώτοι ρομποτικοί χειριστές εμφανίστηκαν για πρώτη φορά με την έναρξη της πυρηνικής εποχής και ήταν γνωστοί ως τηλεχειριστές (teleoperators). Οι χειριστές αυτοί επέτρεπαν σε ένα χρήστη να εκτελεί εργασίες από ασφαλή απόσταση, όπως για παράδειγμα το χειρισμό ραδιενεργών υλικών [1, 2]. Γενικώς, τα συστήματα τηλεχειρισμού

χρησιμοποιούνται σε περιβάλλοντα εργασίας τα οποία μπορεί να είναι: απομακρυσμένα, μη δομημένα ή μη φιλικά ως προς τον άνθρωπο. Παράδειγμα αυτών αποτελούν εργασίες που απαιτείται να γίνουν στο διάστημα εκτός διαστημόπλοιου, κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, αφόπλιση βόμβας, διαχείριση επικίνδυνων υλικών (ραδιενεργά απόβλητα), αποστολές έρευνας και διάσωσης (search and rescue) καθώς και σε πειράματα στον τομέα της ναυτοτεχνολογίας όπου η εισπνοή ναυσοσωματιδίων δύναται να προκαλέσει επιπλοκές στην υγεία του ανθρώπου. Επίσης, συστήματα τηλεχειρισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές τηλεϊατρικής καθώς και για την φροντίδα ηλικιωμένων ανθρώπων ή ανθρώπων με ειδικές ανάγκες. Συνεπώς, η αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ προσφέρει πιο ασφαλές περιβάλλον για τους χρήστες, μεγαλύτερη ακρίβεια (π.χ. ρομποτική χειρουργική) και διευκόλυνση στην άρση βαρέων αντικειμένων ακόμα και σε βιομηχανικό περιβάλλον.

Το πρόβλημα του τηλεχειρισμού ενός ρομποτικού χεριού περιέχει έναν ακόμα παράγοντα δυσκολίας λόγω της πολυπλοκότητας της κατασκευής και του αριθμού των παραμέτρων ελέγχου. Εξίσου σύνθετος οφείλει να είναι και ο τρόπος εντολοδότησης. Μια, θεωρητικά, απλή προσέγγιση είναι η χρήση ενός ανθρώπινου χεριού για την παραγωγή των δεδομένων εισόδου. Για την μετατροπή των κινήσεων του ανθρώπινου χεριού σε εντολές διατίθενται διάφοροι αισθητήρες. Αναφορικά, μερικοί από τους αισθητήρες αυτούς αποτελούν τα γάντια με ενσωματωμένα ειδικά αισθητήρια τα οποία φοράει ο χρήστης και τα αισθητήρια ηλεκτρομυογραφίας. Τα αισθητήρια αυτά απαιτούν πολύπλοκα όργανα μετρήσεων και εξειδικευμένους χρήστες. Πλέον, για την αναγνώριση χειρονομιών, το οποίο αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην αλληλεπίδραση ανθρώπου μηχανής, χρησιμοποιούνται κάμερες και αισθητήρες RGB-D. Οι αισθητήρες RGB-D έχουν την δυνατότητα, εκτός από την έγχρωμη εικόνα (RGB), να παρέχουν και μια εικόνα βάθους (Depth map). Ένας διαδεδομένος πλέον αισθητήρας RGB-D για εφαρμογές τέτοιου τύπου είναι ο αισθητήρας Kinect [3], ο οποίος χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία και παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα 1.3.1.

Στόχος της παρακάτω εργασίας αποτελεί ο τηλεχειρισμός ενός ολοκληρωμένου ρομποτικού συστήματος στο χώρο. Το σύστημα που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της εργασίας αποτελείται από: την εφαρμογή "3D Hand Tracking" (ενότητα 3.1), το ρομποτικό χέρι με την ονομασία Talos' Hand (ενότητα 3.2) και τον βιομηχανικό βραχίονα RV2A της Mitsubishi (ενότητα 3.3). Η εφαρμογή αυτή, παρακολουθεί την θέση και τον προσανατολισμό της παλάμης καθώς και τις αρθρώσεις των δακτύλων σε τρισδιάστατο χώρο κάνοντας χρήση ενός αισθητήρα RGB-D (στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο αισθητήρας Kinect). Τα συστήματα αυτά απεικονίζονται στην Εικόνα 1.1.

Σκοπός της εργασίας είναι το ρομποτικό σύστημα να δέχεται ως είσοδο οπτικά δεδομένα τα οποία εξάγονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Η εφαρμογή αυτή αποτελεί μια εφαρμογή παρακολούθησης και αναγνώρισης του ανθρώπινου χεριού (παλάμη και δάχτυλα). Τα δεδομένα που εξάγονται και αφορούν τις αρθρώσεις των δαχτύλων του χρήστη αποστέλλονται σε ένα ρομποτικό χέρι (Talos' Hand) για κίνηση των ρομποτικών δακτύλων. Ενώ, τα δεδομένα που εξάγονται και αφορούν τον προσανατολισμό και την θέση της παλάμης του χρήστη αποστέλλονται σε έναν βιομηχανικό βραχίονα (RV2A) για κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης στο χώρο (θέση και προσανατολισμό). Το ρομποτικό χέρι είναι τοποθετημένο ως τελικό στοιχείο δράσης στον βραχίονα. Σημαντικό είναι το τελικό σύστημα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ευκολία από μη εξειδικευμένους χρήστες, το οποίο θα επιτευχθεί με την οπτική αναγνώριση του ανθρώπινου χεριού από την εφαρμογή "3D Hand Tracking"



Εικόνα 1.1: Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στην εργασία (α) Βραχίονας RV2A (β) Talos' Hand (γ) Στιγμιότυπο από την εφαρμογή "3D Hand Tracking"

Η επικοινωνία των παραπάνω συστημάτων επιτυγχάνεται μέσω ενός υπολογιστικού συστήματος. Ο υπολογιστής που χρησιμοποιείται διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μητρική κάρτα: ASUS P8H61-M LX3 R2.0/C/SI
- Επεξεργαστής: Intel Core i7-3770,
- Κάρτα γραφικών: Nvidia GeForce GTX 670
- Μνήμη RAM: 8 GB
- Σκληρός δίσκος: Toshiba SATA3 500GB, 7200 rpm
- Τροφοδοτικό: Corsair CX600, 600W

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται η δομή της εργασίας και παρατίθενται πληροφορίες χρήσιμες στην κατανόηση των μετέπειτα κεφαλαίων.

## 1.2 Διάρθρωση εργασίας

- Κεφάλαιο 1: Γίνεται μια μακροσκοπική αναφορά στα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της εργασίας. Αναφέρονται επίσης, τα περιεχόμενα των κεφαλαίων, ενώ τέλος, παρατίθενται σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση των επόμενων τμημάτων της εργασίας.
- Κεφάλαιο 2: Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί την ανασκόπηση βιβλιογραφίας.
- Κεφάλαιο 3: Παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαθέσιμα υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της εργασίας. Κάθε υποσύστημα παρουσιάζεται σε διαφορετική ενότητα και παρέχονται οι απαραίτητες πληροφορίες λειτουργίας.
- Κεφάλαιο 4: Παρουσιάζεται ο τηλεχειρισμός ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού. Στην παρούσα φάση το ρομποτικό χέρι είναι σταθερό στο χώρο (δεν κινείται, άρα ο προσανατολισμός του παραμένει σταθερός). Ο τηλεχειρισμός αναφέρεται στις κινήσεις των δαχτύλων και μιμείται τις κινήσεις του χρήστη όπως αυτές αναγνωρίζονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking".
- Κεφάλαιο 5: Παρουσιάζεται ο τηλεχειρισμός του ρομποτικού βραχίονα με χρήση οπτικών δεδομένων. Στο παρόν κεφάλαιο το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην θέση και το προσανατολισμό του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα. Το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα μιμείται τις κινήσεις της παλάμης του χρήστη στο χώρο όπως αυτές αναγνωρίζονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking".
- Κεφάλαιο 6: Παρουσιάζεται το τελικό σύστημα τηλεχειρισμού ενός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού στο χώρο. Το ρομποτικό χέρι τοποθετείται ως τελικό στοιχείο δράσης στον βραχίονα και μιμείται τις κινήσεις των δαχτύλων του χρήστη, καθώς και την θέση και τον προσανατολισμό που έχει η παλάμη του χρήστη.
- Κεφάλαιο 7: Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται αποτίμηση αυτής και προτείνονται μελλοντικές βελτιώσεις.
- Παράρτημα Α: Περιγράφονται οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον χειρισμό του βραχίονα RV2A μέσω MATLAB.

Παράρτημα Β-Γ: Παρατίθενται τα διαγράμματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ρύθμιση του ρομποτικού βραχίονα καθώς και για την πειραματική αποτίμηση των αλγορίθμων τηλεχειρισμού του βραχίονα.

Παράρτημα Δ: Παρατίθενται οι διαφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση της πτυχιακής.

Στην επόμενη ενότητα παρατίθενται σημαντικές πληροφορίες για την καλύτερη κατανόηση των επόμενων κεφαλαίων. Οι πληροφορίες που δίδονται αφορούν τόσο την λειτουργία του αισθητήρα Kinect όσο και την ανατομία του ανθρώπινου χεριού.

### 1.3 Σχετικό υπόβαθρο

Υπάρχουν διάφοροι αισθητήρες RGB-D, οι οποίοι συνεργάζονται με την εφαρμογή "3D Hand Tracking" και έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας Kinect και για το λόγο αυτό παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή. Επίσης, στις επόμενες ενότητες παρατίθενται πληροφορίες για την ανατομία του ανθρώπινου χεριού καθώς και για τα επίπεδα κίνησης. Οι πληροφορίες αυτές είναι χρήσιμες για την καλύτερη κατανόηση των επόμενων τμημάτων της εργασίας.

#### 1.3.1 Αισθητήρας Kinect

Ο αισθητήρας Kinect [3, 4] παρουσιάστηκε για πρώτη φορά τον Ιούνιο του 2009, στην έκθεση Electronic Entertainment Expo (E3), πραγματοποιήθηκε στο Los Angeles, με το κωδικό όνομα 'Project Natal'. Στο κοινό παρουσιάστηκε ως περιφερειακή συσκευή για την κονσόλα παιχνιδιών Xbox360 το Νοέμβριο του 2010 με την ονομασία Kinect [Εικόνα 1.2]. Μετά το έντονο ενδιαφέρον της επιστημονικής, και όχι μόνο, κοινότητας για ανάπτυξη εφαρμογών με χρήση του αισθητήρα η Microsoft κυκλοφόρησε το Software Development Kit (SDK) τον Ιούνιο του 2011. Το SDK είχε ως στόχο να βοηθήσει στην ανάπτυξη εφαρμογών σε διάφορες γλώσσες προγραμματισμού (C#, C++ κ.α.).

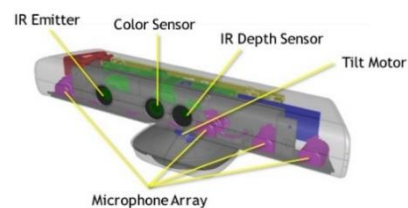
Ο αισθητήρας Kinect επιτρέπει στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με τους υπολογιστές ή τις κονσόλες με φωνητικές εντολές και χειρονομίες. Αποτελείται από τέσσερα μικρόφωνα, ένα επιταχυνσιόμετρο, μια RGB κάμερα, ένα αισθητήρα βάθους και ένα κινητήρα κλίσης. Ο αισθητήρας βάθους αποτελείται από ένα προβολέα υπέρυθρων (IR emitter) και έναν μονόχρωμο αισθητήρα CMOS (IR depth sensor), ο οποίος λαμβάνει τις υπέρυθρες μετά την ανάκλασή τους σε αντικείμενα [Εικόνα 1.3, Εικόνα 1.4]. Τέλος η κλίση της κάμερας δεν ρυθμίζεται χειροκίνητα αλλά μέσω ενός κινητήρα (tilt motor) [3].



Από τον αισθητήρα Kinect παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής διάφορων τύπων δεδομένων. Μέσω της κάμερας RGB δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής εικόνας σε χρωματικό μοντέλο τύπου RGB (κόκκινο - πράσινο - μπλε) με μέγιστη ανάλυση 1280x960. Επίσης, ο αισθητήρας βάθους παρέχει μονόχρωμο βίντεο βάθους με 2048 επίπεδα ευαισθησίας, καθώς και εικόνες βάθους (Depth map). Ο χάρτης βάθους δημιουργείται από τον προβολέα υπέρυθρων (IR emitter) και τον αισθητήρα CMOS (IR depth sensor) και κάθε pixel αντιπροσωπεύει την κάθετη απόσταση από το Kinect. Ο προβολέας εκπέμπει υπέρυθρο φως και ο αισθητήρας CMOS διαβάζει την αντανάκλαση. Από την αντανάκλαση υπολογίζεται η κάθετη απόσταση μεταξύ των σημείων και του αισθητήρα όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5 [5].



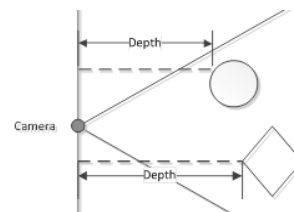
Εικόνα 1.2: Συσκευή Kinect



Εικόνα 1.3: Οι αισθητήρες που περιέχονται στο Kinect [3]



Εικόνα 1.4: Το εσωτερικό της συσκευής [4]



Εικόνα 1.5: Υπολογισμός βάθους [5]

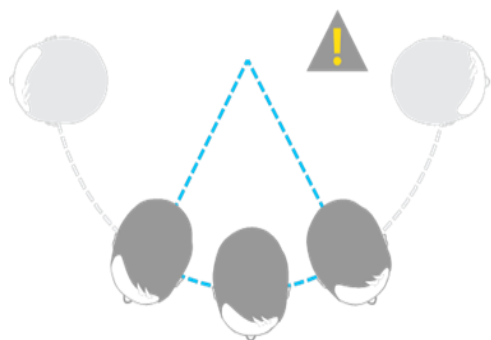
Πλέον, κυκλοφορούν στο εμπόριο διάφοροι αισθητήρες με την δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων RGB-D και δεδομένων βάθους (Depth map). Οι αισθητήρες αυτοί ονομάζονται αισθητήρες RGB-D. Ο αισθητήρας Kinect παρέχεται με δύο επιλογές λειτουργίας, την «προεπιλεγμένη» (default) και την «κοντινή» (near). Ανάλογα με την επιλεγμένη λειτουργία διαφέρει και το εύρος ανίχνευσης του αισθητήρα.



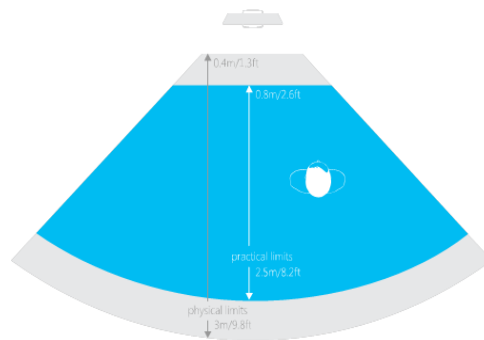
Εικόνα 1.6: Δεδομένα βάθους Kinect ανάλογα την απόσταση [5]

Στις δυνατότητες του Kinect συμπεριλαμβάνεται η αναγνώριση ανθρώπινων προσώπων. Το Kinect έχει την δυνατότητα να αναγνωρίσει ταυτόχρονα έξι ανθρώπους αλλά να παρακολουθεί δυο και τις κινήσεις αυτών. Η παρακολούθηση συμβαίνει είτε κατά την διάρκεια ενός παιχνιδιού, είτε με χρήση του SDK και του skeleton tracking για ανάπτυξη εφαρμογών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το skeleton tracking έχει δημιουργηθεί με τρόπο τέτοιο, ώστε να αναγνωρίζει μόνο όσους χρήστες βρίσκονται απέναντι από τον αισθητήρα [Εικόνα 1.7].

Όταν ο αισθητήρας Kinect βρίσκεται σε κοντινή λειτουργία, το εύρος λειτουργίας για αναγνώριση κυμαίνεται από 0.4 μέτρα έως 3 μέτρα. Πρακτικά όμως, για να είναι δυνατή η παρακολούθηση των κινήσεων του χρήστη από το Kinect, προτείνεται ο χρήστης να στέκεται από 0.8 μέτρα έως 2.5 μέτρα [Εικόνα 1.8].

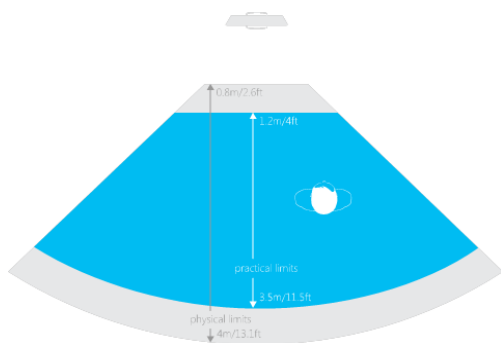


Εικόνα 1.7: Χρήστης απέναντι από Kinect [6]

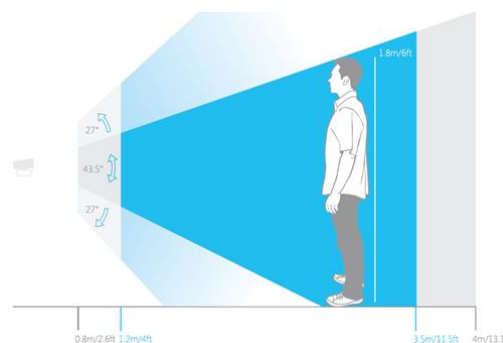


Εικόνα 1.8: Οπτικό πεδίο Kinect στη κοντινή (near) λειτουργία [6]

Ενώ, όταν ο αισθητήρας έχει ρυθμιστεί στην προεπιλεγμένη λειτουργία (Default mode) το οπτικό πεδίο των αισθητήρων IR διαμορφώνεται όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 1.9, Εικόνα 1.10). Συγκεκριμένα ο αισθητήρας μπορεί να αναγνωρίσει ανθρώπους από 0.8 μέτρα έως 4 μέτρα. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται ο χρήστης να στέκεται από 1.2 μέτρα έως 3.5 μέτρα [6].



Εικόνα 1.9: Οριζόντιο οπτικό πεδίο Kinect στο προεπιλεγμένο εύρος [6]



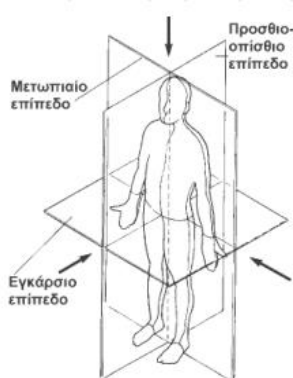
Εικόνα 1.10: Κάθετο οπτικό πεδίο Kinect στο προεπιλεγμένο εύρος [6]

Όπως είναι εμφανές, με την χρήση του Kinect είναι δυνατό να επιτευχθεί ο εντοπισμός, η παρακολούθηση και η αναγνώριση της ανθρώπινης κίνησης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Οι εφαρμογές με χρήση Kinect έχουν επεκταθεί σε πολλά και διαφορετικά πεδία, όπως είναι η υγειονομική περίθαλψη (healthcare), η εκπαίδευση (education), η εικονική πραγματικότητα (virtual reality), η ρομποτική (robotics), η νοηματική γλώσσα (sign language), οι τρισδιάστατες ανακατασκευές (3D reconstructions) κ.α. Η επιστημονική κοινότητα έχει δώσει ιδιαίτερη προσοχή στην μελέτη και ανάπτυξη τεχνικών για την παρακολούθηση και ανάλυση της ανθρώπινης κίνησης με χρήση του αισθητήρα Kinect [7].

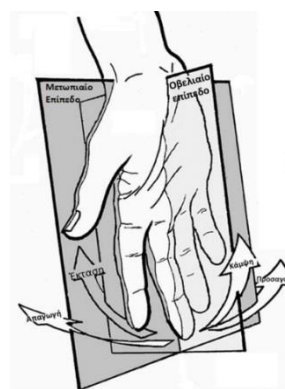
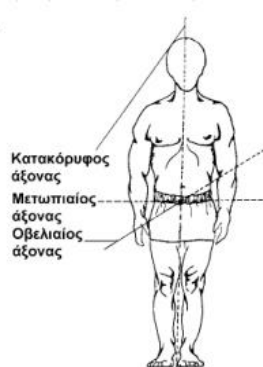
### 1.3.2 Επίπεδα κίνησης και ορισμός κινήσεων

Η κινησιολογία είναι η μελέτη της ανθρώπινης κίνησης. Προϋποθέτει ότι το σώμα είναι σε συγκεκριμένη στάση η οποία ονομάζεται ανατομική θέση. Από το πλήθος πληροφοριών που διατίθεται, σε αυτή την ενότητα αναφέρεται ότι είναι σχετικό με την παρούσα εργασία.

Σύμφωνα με την κινησιολογία υπάρχουν τρία επίπεδα κίνησης, το μετωπιαίο (frontal plane), το οβελιαίο (sagittal plane) και το εγκάρσιο (transverse plane) τα οποία είναι μεταξύ τους κάθετα. Το οβελιαίο επίπεδο χωρίζει το σώμα σε δεξί και αριστερό. Το μετωπιαίο επίπεδο χωρίζει το σώμα σε πρόσθιο και οπίσθιο ενώ το εγκάρσιο επίπεδο χωρίζει το σώμα σε επάνω και κάτω [Εικόνα 1.11]. Τέλος, οι άξονες αναφοράς που περιγράφουν την ανθρώπινη κίνηση είναι τρεις. Ο οβελιαίος, ο οποίος είναι κάθετος στο μετωπιαίο επίπεδο, ο μετωπιαίος που είναι κάθετος στο οβελιαίο επίπεδο και ο κατακόρυφος που είναι κάθετος στο εγκάρσιο επίπεδο. [Εικόνα 1.12]



Εικόνα 1.11: Επίπεδα κίνησης και άξονες αναφοράς (ανθρώπινο σώμα) [8]



Εικόνα 1.12: Επίπεδα κίνησης (χέρι)



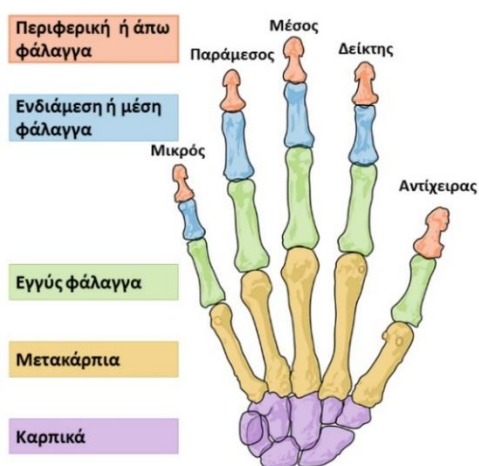
Εικόνα 1.13: Κινήσεις δαχτύλων

Σύμφωνα με τον ορισμό των κινήσεων, οι κινήσεις που αναπαράγονται ως προς τον μετωπιαίο άξονα είναι η κάμψη, η έκταση και η υπερέκταση. Ο όρος κάμψη χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια κίνηση κατά την οποία η γωνία μιας άρθρωσης

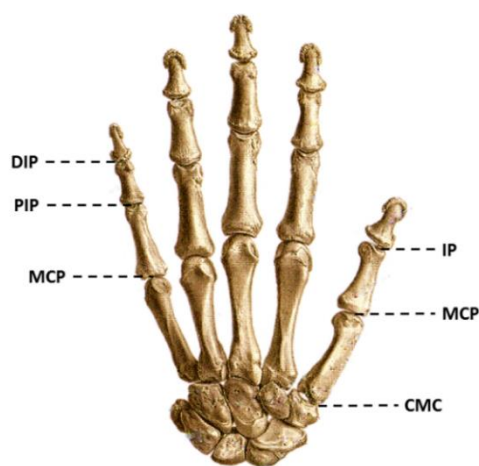
μικραίνει. Έκταση είναι όταν η γωνία της άρθρωσης μεγαλώνει και υπερέκταση όταν η άρθρωση μετακινείται πέρα από τα ανατομικά όρια. Οι κινήσεις που περιγράφονται ως προς τον οβελιαίο άξονα είναι η απαγωγή και η προσαγωγή. Απαγωγή είναι όταν ένα τμήμα του σώματος απομακρύνεται από την μέση γραμμή ενώ προσαγωγή είναι η αντίθετη κίνηση της απαγωγής. Οι παραπάνω πληροφορίες από την κινησιολογία ισχύουν εκτός από το ανθρώπινο σώμα και για το χέρι σαν μεμονωμένο σώμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.13 [8].

### 1.3.3 Ανθρώπινο χέρι

Το ανθρώπινο χέρι αποτελεί μια από τις πολυπλοκότερες δομές της ανθρώπινης ανατομίας. Ο σκελετός του σχηματίζεται από 27 οστά, τα οποία κατανέμονται σε οστά του καρπού, του μετακαρπίου και σε φάλαγγες των δαχτύλων. Κάθε χέρι αποτελείται από πέντε δάχτυλα, εκτός από περιπτώσεις τραυματισμού ή γενετικών ανωμαλιών. Τα δάχτυλα ονομάζονται δείκτης (index), μέσος (middle), παράμεσος (ring), μικρός (pinky) και αντίχειρας (thumb) όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.14. Κάθε δάχτυλο απαρτίζεται από αρθρώσεις και φάλαγγες, οι οποίες είναι παρένθετα τμήματα κοκάλων που αποτελούν το κάθε δάχτυλο. Ο δείκτης, ο μέσος, ο παράμεσος και ο μικρός αποτελούνται από τρεις φάλαγγες: την περιφερική ή άπω φάλαγγα (distal phalanx), την ενδιάμεση ή μέση φάλαγγα (middle phalanx) και την εγγύς φάλαγγα (proximal phalanx). Ενώ, ο αντίχειρας αποτελείται από δυο φάλαγγες: την περιφερική φάλαγγα και την εγγύς φάλαγγα. Για κάθε δάχτυλο μετά την εγγύς φάλαγγα ακολουθούν οι μετακάρπιες φάλαγγες (metacarpal), οι οποίες βρίσκονται στην παλάμη.



Εικόνα 1.14: Ονομασία δακτύλων και φάλαγγες ανθρώπινου χεριού



Εικόνα 1.15: Ονομασία αρθρώσεων

Οι φάλαγγες συνδέονται μεταξύ τους μέσω των αρθρώσεων, οι οποίες προσθέτουν ΒΕ (βαθμούς ελευθερίας) στο χέρι. Για όλα τα δάχτυλα, εκτός του αντίχειρα, ισχύει ότι η

περιφερική και η ενδιάμεση φάλαγγα ενώνονται με μια περιφερική μεσοφαλαγγική άρθρωση (Distal Interphalangeal, DIP). Επίσης, η ενδιάμεση με την εγγύς φάλαγγα συνδέεται με μια εγγύς μεσοφαλαγγική άρθρωση (Proximal Interphalangeal, PIP). Όμως, ο αντίχειρας αποτελείται από δυο φάλαγγες την περιφερική και την εγγύς φάλαγγα οι οποίες συνδέονται με μια μεσοφαλαγγική άρθρωση (Interphalangeal, IP). Να σημειωθεί ότι η IP άρθρωση εμφανίζεται μόνο στον αντίχειρα. Τέλος, για όλα τα δάκτυλα του ανθρώπινου χεριού ισχύει ότι η εγγύς φάλαγγα συνδέεται με τα μετακάρπια με μια μετακαρποφαλαγγική άρθρωση (Metacarpophalangeal, MCP) [9].

Κάθε άρθρωση που εμφανίζεται στα δάκτυλα προσθέτει βαθμούς ελευθερίας στο σύστημα του ανθρώπινου χεριού. Πιο συγκεκριμένα, όποτε εμφανίζονται οι αρθρώσεις DIP, PIP και η IP του αντίχειρα προσθέτουν από ένα ΒΕ για κάμψη/έκταση ως προς το μετωπιαίο επίπεδο. Η άρθρωση MCP προσθέτει δυο ΒΕ όποτε εμφανίζεται, ένα για κάμψη έκταση ως προς το μετωπιαίο επίπεδο και ένα για προσαγωγή/απαγωγή ως προς το οβελιαίο επίπεδο [9]. Συνεπώς, στο ανθρώπινο χέρι αποδίδονται 20 ΒΕ από τα δάκτυλα. Επίσης, από την παλάμη προστίθενται επιπλέον έξι ΒΕ, τρεις για κίνηση στο χώρο (position) και τρεις για τον προσανατολισμό της παλάμης στο χώρο (orientation). Στο ανθρώπινο χέρι (δάκτυλα και παλάμη) αποδίδονται 26 ΒΕ συνολικά.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται εργασίες που πραγματεύονται τον τηλεχειρισμό ρομποτικών συστημάτων με χρήση οπτικών δεδομένων. Για κάθε εργασία που παρουσιάζεται, παρατίθενται οι σημαντικότερες πληροφορίες που αποτυπώθηκαν από τους συγγραφείς.

## 2. Σχετική Έρευνα (State of the art)

---

Πριν την εμφάνιση των αισθητήρων RGB-D, μια συνηθισμένη τακτική για αναγνώριση ανθρώπινων χεριών αποτελούσε η χρήση ζεύγους καμερών (stereo camera) κατάλληλα τοποθετημένες έτσι ώστε να δημιουργούνται στερεοσκοπικές εικόνες.

Οι Infantino κ.α. στα [10, 11], ανέπτυξαν μια εφαρμογή για αναγνώριση των άκρων στα ανθρώπινα δάχτυλα, χρησιμοποιώντας στερεοσκοπικές κάμερες. Στην εφαρμογή αυτή, το ανθρώπινο χέρι τοποθετείται μπροστά από το σύστημα στερεοσκοπικών καμερών. Το περιβάλλον στο οποίο υλοποιούνται τα πειράματα είναι πλήρως ελεγχόμενο: μαύρο παρασκήνιο με ελεγχόμενο φωτισμό. Η εικόνα (frame) χρησιμοποιείται για αφαίρεση θορύβου και ανίχνευση ακμών. Έπειτα η επεξεργασμένη εικόνα χρησιμοποιείται για εξαγωγή και υπολογισμό των συντεταγμένων στο χώρο των ακροδάχτυλων και του καρπού. Με βάση τις συντεταγμένες που υπολογίζονται και το κινηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για το χέρι, επιλύεται το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα (ΑΚΠ). Από το ΑΚΠ υπολογίζονται και αποστέλλονται στο ρομποτικό χέρι οι απαιτούμενες γωνίες για την κίνηση των δακτύλων. Κατά την διάρκεια της αναγνώρισης, δεν λαμβάνεται υπόψη το μικρό δάκτυλο και ο προσανατολισμός του ανθρώπινου χεριού. Το ρομποτικό χέρι αποτελείται από τέσσερα δάχτυλα και δεν είναι τοποθετημένο σε κάποιο βραχίονα. Ως συνέπεια των παραπάνω, το ρομποτικό χέρι που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή τους έχει 13 ΒΕ (βαθμούς ελευθερίας) συνολικά.

Μετά την κυκλοφορία των αισθητήρων RGB-D η χρήση των στερεοσκοπικών καμερών μειώθηκε. Στις περισσότερες εφαρμογές, αν όχι σε όλες, οι στερεοσκοπικές κάμερες εξαλείφθηκαν και την θέση τους κατέλαβαν οι αισθητήρες RGB-D. Ο αισθητήρας Kinect, αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους αισθητήρες RGB-D [Ενότητα 1.3.1].

Οι Guanglong Du κ.α. στο [12], παρουσίασαν τον τηλεχειρισμό ενός βραχίονα με τελικό στοιχείο δράσης ένα ρομποτικό χέρι με δυο δάχτυλα. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται ο αισθητήρας Kinect και συγκεκριμένα ο χάρτης βάθους που εξάγεται από τον αισθητήρα. Με τα δεδομένα που υπάρχουν στο χάρτη βάθους σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο εντοπισμού, επιτυγχάνεται αναγνώριση δυο δακτύλων, του αντίχειρα και του δείκτη, καθώς και του τμήματος που υπάρχει ανάμεσα στα δάκτυλα αυτά. Από την εφαρμογή εξάγονται ο προσανατολισμός και η θέση των δακτύλων. Στη συνέχεια οι τιμές αυτές αποστέλλονται σε ένα σύστημα προσομοίωσης ώστε να ελεγχθεί αν είναι ασφαλές ο ρομποτικός βραχίονας να λάβει-εκτελέσει την κίνηση που προκύπτει σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Αν είναι ασφαλές, τότε οι τιμές αυτές αποστέλλονται στο πραγματικό ρομποτικό σύστημα, το οποίο μιμείται τις κινήσεις του χρήστη. Στην εργασία αυτή, έγιναν δοκιμές σε ενέργειες συλλογής και τοποθέτησης αντικειμένων (picking and placing).

Την ίδια περίοδο οι Nutan Chen κ.α. στο [13], παρουσίασαν μια διαφορετική προσέγγιση. Στόχος είναι η ανάπτυξη ενός ρομποτικού συστήματος, το οποίο θα είναι υποβοηθούμενο από τον άνθρωπο για την επιτυχημένη λαβή αντικειμένων. Στην εργασία αυτή συνδυάζεται η εναλλαγή από τηλεχειρισμό ενός ρομποτικού συστήματος σε αυτόνομη λειτουργία λαβής αντικειμένων. Το σύστημα αποτελείται από, τον χρήστη του συστήματος, δύο αισθητήρες Kinect και το ρομπότ MEKA. Το ρομπότ MEKA συντίθεται από: δυο βραχίονες, όπου κάθε βραχίονας έχει επτά BE, το τελικό στοιχείο δράσης σε κάθε βραχίονα είναι ένα χέρι αποτελούμενο από τέσσερα δάκτυλα με συνολικά πέντε BE και τον κορμό του «σώματος» το οποίο προσθέτει επιπλέον δύο BE στο ρομποτικό σύστημα. Το ένα εκ των δύο Kinect χρησιμοποιείται για ανίχνευση κίνησης διαφόρων αρθρώσεων από τον πάνω κορμό του ανθρώπινου σώματος: η θέση του ώμου, του αγκώνα, και οι αρθρώσεις του χεριού. Οι χειρονομίες που ανιχνεύονται από το ανθρώπινο χέρι χρησιμοποιούνται για να ενεργοποιήσουν/απενεργοποιήσουν την αυτόνομη λειτουργία, το οποίο δίδει την δυνατότητα εξοικονόμησης χρόνου και ανάπτυξη φυσικότερων λαβών, αφού μιμείται ανθρώπινες λαβές. Οι χειρονομίες που αναγνωρίζονται είναι δυο, ανοιχτή και κλειστή παλάμη. Για όσο διάστημα η παλάμη είναι ανοιχτή, ο χρήστης οδηγεί το ρομπότ σε συγκεκριμένη θέση και προσανατολισμό με βάση τις γωνίες του ανθρώπινου βραχίονα. Έπειτα ο χρήστης κλείνει την παλάμη και το ρομποτικό σύστημα μεταβαίνει στην λειτουργία αυτόνομης λαβής. Το δεύτερο Kinect χρησιμοποιείται για την αναγνώριση αντικειμένων. Τα αντικείμενα είναι τοποθετημένα πάνω σε ένα τραπέζι και υπάρχουν αποθηκευμένα σε μια βάση δεδομένων σε διάφορες πόζες. Ανάλογα με την αποθηκευμένη πόζα του αντικειμένου υπάρχει συσχέτιση με την λαβή που πρέπει να αναπτυχθεί για να επιτευχθεί η λαβή του αντικειμένου. Τα αντικείμενα στην βάση δεδομένων έχουν ένα κωδικό, ο οποίος αντιστοιχεί στην λαβή που

πρέπει να αναπτυχθεί. Τέλος, ανιχνεύεται το πιο κοντινό αντικείμενο στο ρομποτικό χέρι και αναγνωρίζεται από την βάση δεδομένων. Επιλέγεται η κατάλληλη λαβή και το ρομποτικό χέρι αναπαράγει την λαβή ώστε να γραπώσει το αντικείμενο.

Στην συνέχεια, οι Arango κ.α. [14], παρουσίασαν την δική τους προσέγγιση σε συστήματα τηλεχειρισμού. Στόχος της εργασίας αυτής, είναι ο έλεγχος της στάσης ενός ρομποτικού βραχίονα, χωρίς να γίνεται λόγος για την ύπαρξη τελικού στοιχείου δράσης. Το σύστημα αποτελείται από τον βιομηχανικό βραχίονα Kuka KR6 με έξι BE και από έναν αισθητήρα Kinect. Ο ρομποτικός βραχίονας είναι συνδεδεμένος σε έναν υπολογιστή μέσω σειριακής επικοινωνίας (RS-232). Ταυτόχρονα στον υπολογιστή αυτόν είναι συνδεδεμένος και ο αισθητήρας Kinect. Στο σύστημα αυτό οι κινήσεις του χρήστη ανιχνεύονται από το Kinect και αποστέλλονται στον ρομποτικό βραχίονα, ο οποίος μιμείται τις κινήσεις του χρήστη. Για την αναγνώριση των αρθρώσεων στον ανθρώπινο βραχίονα, χρησιμοποιήθηκε το Kinect SDK. Με χρήση του SDK αναγνωρίζονται 20 διαφορετικές αρθρώσεις του ανθρώπινου σώματος. Οι εντολές κίνησης που αποστέλλονται, σχετίζονται με τις γωνίες άρθρωσης του ανθρώπινου βραχίονα ελέγχοντας έτσι την στάση του ρομποτικού βραχίονα. Εάν ο βραχίονας βρίσκεται υπό κίνηση και λάβει την επόμενη εντολή, τότε το σύστημα τοποθετείται σε αναμονή μέχρι να ολοκληρωθεί η τρέχουσα κίνηση και να συνεχίσει με την επόμενη εντολή.

Οι Gil Vázquez κ.α. στο [15], ανέπτυξαν μια εφαρμογή αναγνώρισης και ανίχνευσης του ανθρώπινου χεριού, σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα που εξάγονται από την εφαρμογή τροποποιούνται κατάλληλα και αποστέλλονται σε ένα ρομποτικό χέρι με στόχο τον τηλεχειρισμό του. Η αναγνώριση και ανίχνευση του ανθρώπινου χεριού, υλοποιείται με χρήση δεδομένων RGB-D που εξάγονται από έναν αισθητήρα Kinect. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα ρομποτικό χέρι τύπου Barrett, το οποίο συχνά τοποθετείται ως τελικό στοιχείο δράσης σε ρομποτικούς βραχίονες. Το ρομποτικό χέρι αποτελείται από τρία δάκτυλα, τα οποία έχουν δυνατότητα περιστροφής γύρω από την παλάμη στην οποία είναι συνδεδεμένα. Παρόλο που αναγνωρίζονται στοιχεία για όλα τα δάκτυλα, στην διαδικασία προετοιμασίας των δεδομένων για την αποστολή τους στο ρομποτικό χέρι, επιλέγονται τρία: ο αντίχειρας, ο δείκτης και ο μέσος. Συνεπώς το ρομποτικό χέρι μιμείται τις κινήσεις των τριών αυτών δακτύλων. Τέλος, το ρομποτικό χέρι στην εργασία αυτή, δεν τοποθετήθηκε σε ρομποτικό βραχίονα (είναι τοποθετημένο σε σταθερό σημείο).

Στο εργαστήριο Υπολογιστικής Όρασης και Ρομποτικής του Ινστιτούτου Πληροφορικής στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας [16, 17] έχει αναπτυχθεί η εφαρμογή "3D Hand Tracking" [18]. Με την εφαρμογή αυτή επιλύεται το πρόβλημα αναγνώρισης και



παρακολούθησης ενός ανθρώπινου χεριού κατά την διάρκεια μιας ομαλής κίνησης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Με την εφαρμογή αυτή υπολογίζονται οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης, οι οποίοι περιγράφουν την θέση και τον προσανατολισμό της παλάμης, καθώς και οι τιμές των αρθρώσεων για τα δάκτυλα. Επίσης, στο εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε στο ΤΕΙ Κρήτης, έχει αναπτυχθεί ένα ρομποτικό χέρι (Talos' Hand) το οποίο αποτελείται από 16 περιστροφικές αρθρώσεις στα δάκτυλα. Τα συστήματα αυτά, μαζί με τον βιομηχανικό βραχίονα RV-2A, χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας και περιγράφονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

## 3. Περιγραφή Διαθέσιμων Συστημάτων

---

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα επιμέρους υποσυστήματα που απαρτίζουν το ολοκληρωμένο ρομποτικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Τα υποσυστήματα αυτά είναι: η εφαρμογή "3D Hand Tracking" για αναγνώριση και παρακολούθηση ενός ανθρώπινου χεριού, το ρομποτικό χέρι Talos' Hand και ο βιομηχανικός βραχίονας RV2A της Mitsubishi. Επί πλέον, σε κάθε ενότητα δίδονται πληροφορίες που απαιτούνται για την μεμονωμένη λειτουργία του κάθε συστήματος.

### 3.1 Εφαρμογή "3D Hand Tracking"

Η εφαρμογή "3D Hand Tracking" [18] αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Υπολογιστικής Όρασης και Ρομποτικής του Ινστιτούτου Πληροφορικής στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας στο Ηράκλειο Κρήτης [16,17]. Με την εφαρμογή αυτή επιλύεται το πρόβλημα της παρακολούθησης της παλάμης του χεριού και των δακτύλων, χωρίς χρήση υποβοηθητικών σημαδιών. Θεωρείται σημαντικό το γεγονός ότι δεν απαιτείται ο χρήστης να φοράει ειδικά γάντια ή να έχει στο χέρι ειδικά οπτικά σημάδια. Για την χρήση της εφαρμογής απαιτείται εγκατάσταση μιας συσκευής RGB-D, η οποία παρέχει έγχρωμη εικόνα και δεδομένα βάθους (Depth), όπως είναι ο αισθητήρας Kinect της Microsoft (ενότητα 1.3.1), ο αισθητήρας Xtion της ASUS [19, 20] ή παρόμοιες συσκευές που έχουν την δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων RGB-D (RGB + Depth map). Για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας Kinect.

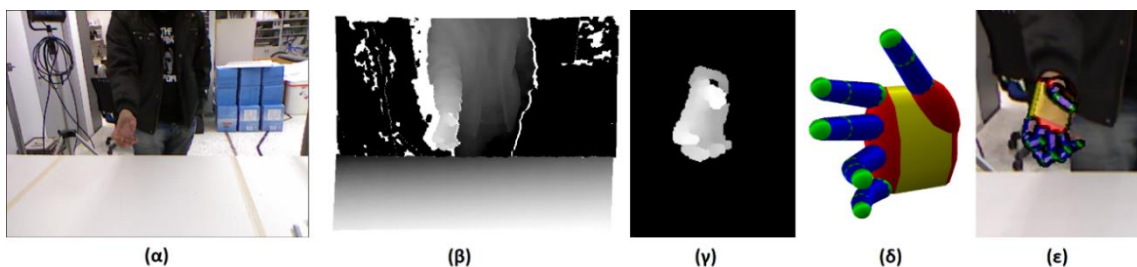
Στο εικονικό χέρι της εφαρμογής "3D Hand Tracking" αποδίδονται 26 BE (βαθμοί ελευθερίας) όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 3.1. Εκ των οποίων τρεις BE είναι για την θέση της παλάμης στο χώρο, τρεις BE για τον προσανατολισμό της παλάμης και οι εναπομείναντες 20 BE κατανέμονται ομοιόμορφα στα δάκτυλα όπως απεικονίζονται και

στην Εικόνα 3.1. Η εκτίμηση της θέσης της παλάμης στο χώρο υπολογίζεται (represented) με βάση το κέντρο της (σημείο M1 στην Εικόνα 3.1.). Ο προσανατολισμός στο χώρο αναπαρίσταται με την βοήθεια των quaternions [21, 22]. Το αποτέλεσμα της παραμετροποίησης ενός μοντέλου 26 βαθμών ελευθερίας, κωδικοποιείται σε ένα διάνυσμα με 27 παραμέτρους όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα [23].



Εικόνα 3.1: Παράμετροι που σχετίζονται με την γεωμετρική διαμόρφωση του εικονικού χεριού

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η διαδικασία ανεύρεσης του ανθρώπινου χεριού από την εφαρμογή "3D Hand Tracking", συνδυάζοντας έγχρωμη εικόνα και το χάρτη βάθους από έναν αισθητήρα RGB-D. Ως είσοδο η εφαρμογή δέχεται μια έγχρωμη εικόνα ανάλυσης 640x480 (α) και τον χάρτη βάθους (β) για την ίδια χρονική στιγμή, όπως αυτά δίνονται από τον αισθητήρα Kinect. Η ανίχνευση του ανθρώπινου χεριού, με βάση το χρώμα δέρματος, γίνεται στην έγχρωμη εικόνα σε ένα προκαθορισμένο πεδίο γύρω από το σημείο στο οποίο εντοπίστηκε τελευταία φορά το ανθρώπινο χέρι.



Εικόνα 3.2: Γραφική απεικόνιση μεθόδου εφαρμογής "3D Hand Tracking". (α) Η εικόνα RGB. (β) Ο χάρτης βάθους για την ίδια χρονική στιγμή. (γ) Το ανθρώπινο χέρι απομονωμένο. (δ) Η υπόθεση για το εικονικό χέρι που προκύπτει από τα δεδομένα. (ε) Ανάκτηση αρθρώσεων ανθρώπινου χεριού. [24]

Έπειτα, τα σημεία στα οποία βρέθηκε το ανθρώπινο χέρι απομονώνονται και στο χάρτη βάθους, αποδίδοντας μηδενική τιμή στο υπόλοιπα σημεία της εικόνας (γ). Πλέον, το ανθρώπινο χέρι έχει απομονωθεί σε δισδιάστατα (έγχρωμη εικόνα) και τρισδιάστατα δεδομένα (χάρτης βάθους), τα οποία χρησιμοποιούνται για την υπόθεση της πόζας του

ανθρώπινου χεριού (δ). Τέλος το εικονικό χέρι αναπαρίσταται από ένα σύνολο με καταλληλά συναρμολογημένα γεωμετρικά σχήματα (ε). [24]

Για την έναρξη της παρακολούθησης του ανθρώπινου χεριού απαραίτητο είναι να γίνει αρχικοποίηση του ανθρώπινου χεριού, κατά την οποία ο χρήστης βρίσκεται απέναντι από τον αισθητήρα Kinect. Όταν η εφαρμογή είναι σε θέση αναμονής-αρχικοποίησης το εικονικό χέρι είναι χρώματος κόκκινο (Εικόνα 3.3(α)). Ο χρήστης τοποθετεί το χέρι μπροστά από τον αισθητήρα σε προκαθορισμένη στάση και απόσταση για να γίνει η αρχικοποίηση. Όταν το χέρι βρίσκεται στην σωστή θέση το μοντελοποιημένο χέρι αποκτάει πράσινο χρώμα (Εικόνα 3.3(β)).



Εικόνα 3.3: Διαδικασία αρχικοποίησης εφαρμογής "3D Hand Tracking"

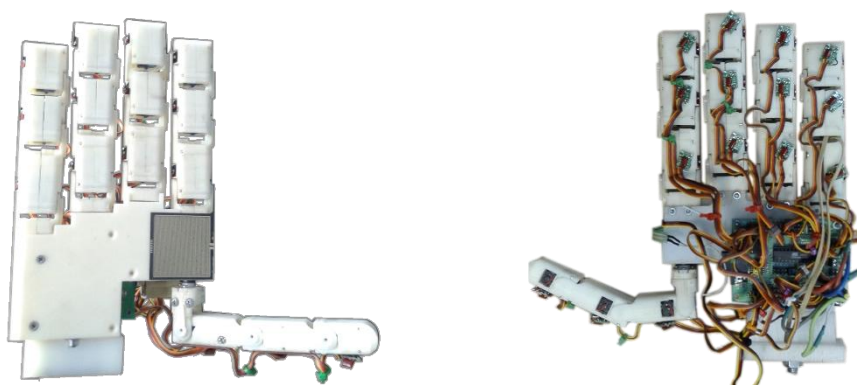
Όταν κριθεί από τον χρήστη, ότι το ανθρώπινο χέρι είναι στη σωστή θέση τότε πληκτρολογείτε ο χαρακτήρας 's', όπως υποδεικνύεται από την εφαρμογή. Στην συνέχεια το εικονικό χέρι αποκτάει διαφορετικά χρώματα για κάθε γεωμετρικό σχήμα που ανιχνεύεται [Εικόνα 3.3(γ)]. Για τον τερματισμό της εφαρμογής, ο χρήστης πληκτρολογεί το χαρακτήρα 'q'. Σημαντικό είναι, ότι κατά την διάρκεια μιας ομαλής κίνησης παρακολουθείται η παλάμη του ανθρώπινου χεριού και τα δάκτυλα, χωρίς να χρειάζονται οπτικά σημάδια (visual observations).

Η ιδιαιτερότητα της εφαρμογής αυτής έγκειται στις απαιτήσεις της. Συγκεκριμένα, για να γίνει χρήση της εφαρμογής απαιτείται η κάρτα γραφικών να υποστηρίζει την αρχιτεκτονική CUDA (Compute Unified Device Architecture) [25]. Η αρχιτεκτονική CUDA, υποστηρίζεται από κάρτες γραφικών της NVIDIA. Με την αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπεται η εκμετάλλευση των επεξεργαστών της κάρτας γραφικών (graphics processing unit, GPU) για εφαρμογές αυξημένου υπολογιστικού φορτίου. Οι τεχνικές με τις οποίες έχει αναπτυχθεί η συγκεκριμένη εφαρμογή δεν θα μας απασχολήσουν στην εργασία αυτή. Τέλος, να σημειωθεί ότι πλέον, κυκλοφορεί νέα αναβαθμισμένη έκδοση της εφαρμογής αυτής [18].

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το ρομποτικό χέρι Talos' Hand και παρατίθενται πληροφορίες για την κατασκευή και την λειτουργία του.

## 3.2 Talos' Hand

Το ανθρωπόμορφο ρομποτικό χέρι το οποίο χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία, ονομάζεται Talos' Hand και απεικονίζεται στην Εικόνα 3.4. Το Talos' Hand υλοποιήθηκε στα πλαίσια δυο προ-πτυχιακών εργασιών [26, 27], που εκπονήθηκαν στο εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε του ΤΕΙ Κρήτης. Σχεδιάστηκε σε σύστημα CAD/CAM. Τα επιμέρους κομμάτια των δακτύλων εκτυπώθηκαν στον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου και η παλάμη κατασκευάστηκε σε CNC εργαλειομηχανή στο εργαστήριο. Τα δάχτυλα αποτελούνται από πλαστικό ABS και η παλάμη αποτελείται από τεφλόν (Teflon).



Εικόνα 3.4: Talos' Hand

Η κίνηση των δακτύλων, επιτυγχάνεται με την βοήθεια 16 σερβοκινητήρων. Τα δάχτυλα, αποτελούνται από τρεις φάλαγγες και τρεις αρθρώσεις. Ο αντίχειρας έχει την ιδιαιτερότητα ότι, η MCP (μετακαρποφαλαγγική άρθρωση η οποία εφάπτεται στην παλάμη) αποτελείται από δυο φάλαγγες και δυο αρθρώσεις, οι οποίες συμπεριφέρονται σαν μια σφαιρική, για το λόγο αυτό αναφέρεται ως μια άρθρωση. Σε κάθε φάλαγγα όλων των δακτύλων είναι τοποθετημένος ένας σερβοκινητήρας Tower Pro SG90 [28], με μόνη εξαίρεση τον σύνδεσμο του αντίχειρα που εφάπτεται στην παλάμη, ο οποίος περιέχει επιπλέον ένα σερβοκινητήρα Hitec HS-225BB [29]. Συνολικά στον αντίχειρα είναι τοποθετημένοι τέσσερις σερβοκινητήρες. Τα χαρακτηριστικά αυτών απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα.



**Διαμόρφωση:** Αναλογική  
**Ροπή:** 4.8V: 1.80 kg-cm  
**Ταχύτητα (4.8V):** 0.12 sec/60°  
**Βάρος:** 9.0 gr  
**Διαστάσεις:** 23 x 12.2 x 29 mm  
**Τύπος γρναζιών:** Πλαστικό  
**Rotation / Support:** Bushing



**Διαμόρφωση:** Αναλογική  
**Ροπή:** 4.8V: 3.89 kg-cm  
 6.0V: 4.82 kg-cm  
**Ταχύτητα:** 4.8V: 0.14 sec/60°  
 6.0V: 0.11 sec/60°  
**Βάρος:** 26.9 gr  
**Διαστάσεις:** 32.3 x 16.8 x 31.00 mm  
**Τύπος γρναζιών:** Πλαστικό  
**Rotation / Support:** Single Bearing

Εικόνα 3.5: Χαρακτηριστικά Σερβοκινητήρων

Τα δάχτυλα ενός ανθρώπινου χεριού έχουν δυνατότητες κίνησης ως προς τον οβελιαίο και τον μετωπιαίο άξονα. Όλες οι άρθρωσες των δαχτύλων προσθέτουν στο ανθρώπινο χέρι από ένα βαθμό ελευθερίας και δίνουν την δυνατότητα κάμψης στις αρθρώσεις. Εξάιρεση αποτελούν οι μετακαρποφαλαγγικές αρθρώσεις (εφάπτονται στην παλάμη), οι οποίες προσθέτουν από δυο ΒΕ στο χέρι και εκτός από την δυνατότητα κάμψης έχουν και την δυνατότητα προσαγωγής-απαγωγής όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.13 (Ενότητες 1.3.3, 1.3.2).

Το ρομποτικό χέρι Talos' Hand έχει την δυνατότητα κάμψης σε όλες τις αρθρώσεις των δαχτύλων. Σε αντίθεση με την δυνατότητα απαγωγής/προσαγωγής, την οποία έχει μόνο η MCP άρθρωση, η οποία εφάπτεται στην παλάμη και την βάση του αντίχειρα. Συνεπώς κάθε δάχτυλο έχει τρεις ΒΕ (βαθμούς ελευθερίας), εκτός τον αντίχειρα που έχει τέσσερις. Συνολικά το Talos' Hand έχει 16 ΒΕ όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6: Talos' Hand και αρθρώσεις

Ο έλεγχος των σερβοκινητήρων στο Talos' Hand επιτυγχάνεται με την χρήση του σερβοελεγκτή SSC-32. Ο SSC-32 είναι τοποθετημένος στο οπίσθιο τμήμα της παλάμης και διαχειρίζεται τους σερβοκινητήρες που είναι τοποθετημένοι στις φάλαγγες των δαχτύλων. Η επικοινωνία με τον σερβοελεγκτή επιτυγχάνεται μέσω σειριακής θύρας (USB to serial) και χρήση του λογισμικού MATLAB (MATrix LABoratory).

Για την δημιουργία του PWM σήματος ελέγχου απαιτείται το εύρος παλμού. Ο σερβοελεγκτής δέχεται εντολές με την παρακάτω σύνταξη:

#(ch) P(pw) T(time) <cr>

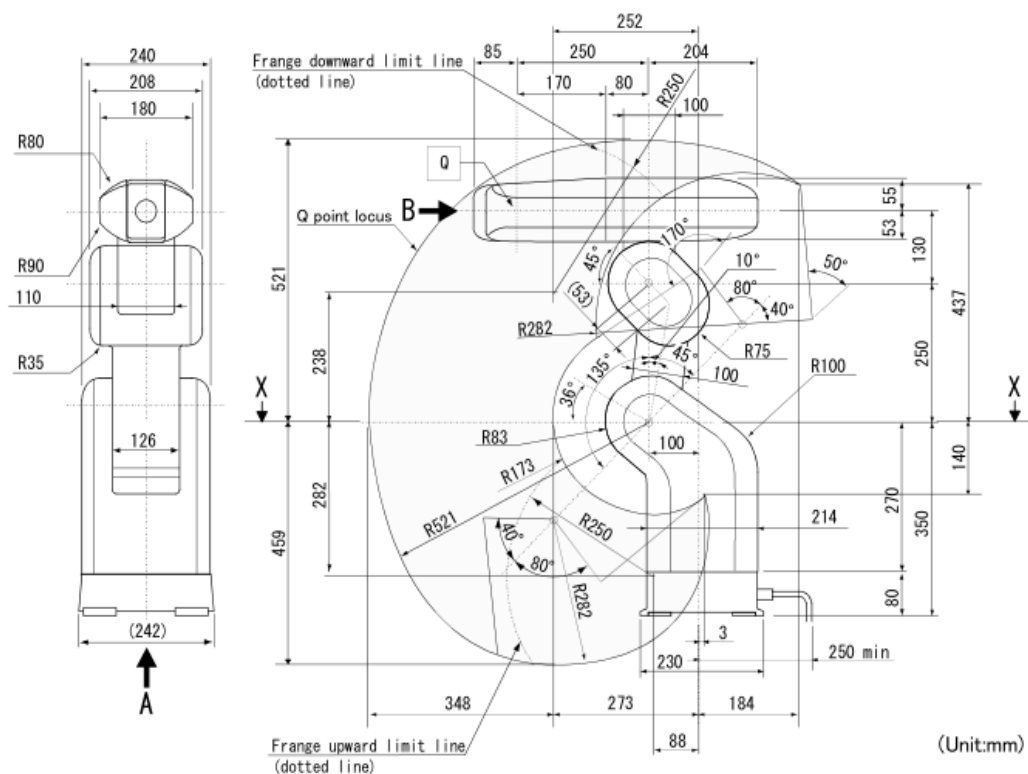
Όπου το ch αποτελεί τον αριθμό του καναλιού που είναι συνδεδεμένος ο σερβοκινητήρας, το pw αποτελεί το εύρος παλμού [500 – 2500 μsec] και time είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης της κίνησης σε milliseconds. Τέλος το <cr> σηματοδοτεί την ολοκλήρωση της εντολής [26, 27].

Στην επόμενη και τελευταία ενότητα του κεφαλαίου, περιγράφεται ο βιομηχανικός βραχίονας RV2A και παρατίθενται σημαντικές πληροφορίες για τον τρόπο λειτουργίας του και τον χειρισμό του.

### 3.3 Βραχίονας RV-2A

Ο βραχίονας που χρησιμοποιείται στην εργασία, είναι ο βιομηχανικός βραχίονας RV2A της Mitsubishi [30, 31, 32]. Ο βραχίονας είναι εγκατεστημένος στον χώρο του εργαστηρίου Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε στο ΤΕΙ Κρήτης.

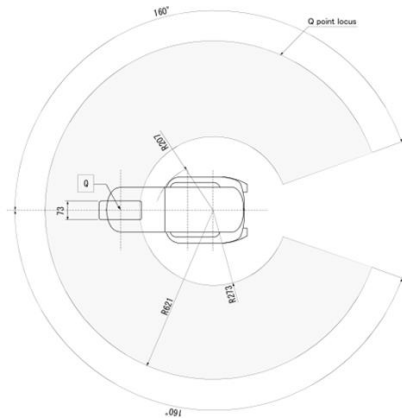
Στις εικόνες (Εικόνα 3.7, Εικόνα 3.8) απεικονίζεται ο χώρος εργασίας και οι διαστάσεις του βραχίονα όπως αυτά δίδονται από το εγχειρίδιο χρήσης.



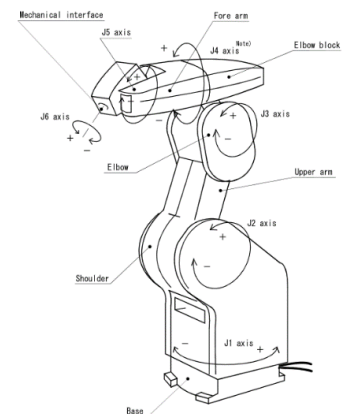
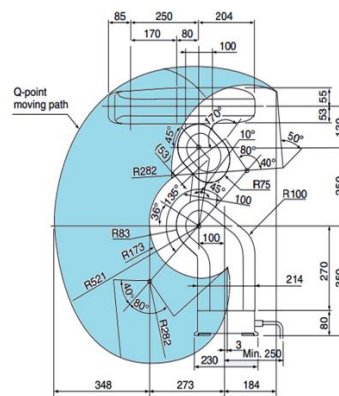
Εικόνα 3.7: Διαστάσεις βιομηχανικού βραχίονα RV2A

Το μηχανικό μέρος του βραχίονα αποτελείται από αρθρώσεις, κινητήρες και αισθητήρια. Συνολικά απαρτίζεται από έξι περιστροφικές αρθρώσεις όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9. Η κάθε άρθρωση οδηγείται από ένα σερβοκινητήρα (AC servo) ψηφιακά ελεγχόμενο μέσω ενσωματωμένου PID ελεγκτή. Κάθε περιστροφική άρθρωση επιτρέπει κίνηση γύρω από έναν άξονα κίνησης και προσθέτει στο ρομποτικό σύστημα ένα ΒΕ (έξι ΒΕ συνολικά). Το σύστημα ελέγχου κάθε άρθρωσης, εκτός από τον ελεγκτή, περιλαμβάνει και έναν κωδικοποιητή θέσης απόλυτου τύπου (absolute encoder). Για την υλοποίηση της

εργασίας τοποθετείται με κατάλληλο τρόπο το ρομποτικό χέρι Talos' Hand ως τελικό στοιχείο δράσης στο βραχίονα RV2A.



Εικόνα 3.8: Χώρος εργασίας RV2A



Εικόνα 3.9: Αρθρώσεις και ονομασία συνδέσμων

Συνηθισμένη τακτική αποτελεί η συσχέτιση των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα με αυτές του ανθρώπινου σώματος. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9 και στον παρακάτω πίνακα. Οι τρεις πρώτες αρθρώσεις αντιστοιχούν στις αρθρώσεις της μέσης, του ώμου και του αγκώνα αντίστοιχα, ενώ οι τρεις τελευταίες ομαδοποιούνται και αντιστοιχούν στην άρθρωση του καρπού. Τέλος, στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται μερικά βασικά χαρακτηριστικά του βραχίονα.

Πίνακας 3.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά RV2A

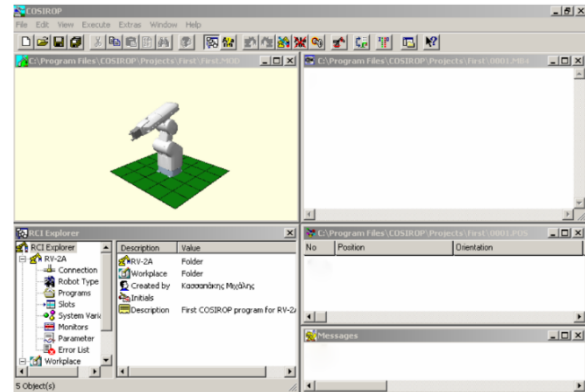
Όνομα άρθρωσης	Περιγραφή	Σύστημα κίνησης [Watt]	Μέγιστη ταχύτητα κίνησης		Εύρος λειτουργίας [degree]	
			[degree/sec]	[rpm]		
Άρθρωση J1	Βάση (Μέση)	80 με φρένο	150	25	320 [-160 +160]	
Άρθρωση J2	Όμος	80 με φρένο	150	25	180 [-45 +135]	
Άρθρωση J3	Αγκώνας	80 με φρένο	180	30	120 [+50 +170]	
Άρθρωση J4	Καρπός	Rotating forearm (yaw)	40 χωρίς φρένο	40	320 [-160 +160]	
Άρθρωση J5		Wrist tiling (pitch)	40 με φρένο	180	30	240 [-120 +120]
Άρθρωση J6		Wrist rotating (roll)	40 χωρίς φρένο	330	55	400 [-200 +200]
Ακρίβεια επαναληψιμότητας: $\pm 0.04$ mm						



Ο βιομηχανικός βραχίονας συνοδεύεται από έναν ελεγκτή (Εικόνα 3.10) και ένα πρόγραμμα διεπαφής (Εικόνα 3.11). Ο ελεγκτής (MELFA CR1-571) διαθέτει μεταξύ άλλων, σειριακή θύρα για σύνδεση με ηλεκτρονικό υπολογιστή, κάρτα δικτύου για σύνδεση με τοπικό δίκτυο και κάρτες που ενσωματώνουν ψηφιακές εισόδους και εξόδους γενικής χρήσης. Στον διαθέσιμο ελεγκτή που υπάρχει στο εργαστήριο, δεν είναι εγκατεστημένη η κάρτα δικτύου.



Εικόνα 3.10: Ελεγκτής βραχίονα



Εικόνα 3.11: Πρόγραμμα διεπαφής COSIROP

Το πρόγραμμα διεπαφής του βραχίονα ονομάζεται COSIROP και προσφέρει την δυνατότητα χειρισμού και προγραμματισμού του βραχίονα μέσω υπολογιστή. Με το COSIROP δίνεται η δυνατότητα προγραμματισμού μέσω εντολών (Command Window), είτε μέσω γραφικού περιβάλλοντος (Jog Operation).

Ένας εναλλακτικός τρόπος αλληλεπίδρασης χρήστη-βραχίονα επιτυγχάνεται με την χρήση του χειριστηρίου εκπαίδευσης (Teaching Pendant R28TB, Εικόνα 3.12). Από το χειριστήριο παρέχονται πολλές δυνατότητες λειτουργίας και χειρισμού. Μεταξύ άλλων, δίνεται η δυνατότητα ελέγχου κάθε άρθρωσης μεμονωμένα και η αποθήκευση της τρέχουσας πόζας για μετέπειτα χρήση.



Εικόνα 3.12: Χειριστήριο εκπαίδευσης (R28TB)

Τέλος, για τον προγραμματισμό του βραχίονα χρησιμοποιείται η γλώσσα προγραμματισμού MELFA BASIC (IV) η οποία αποτελεί επέκταση της BASIC. Το λογισμικό

COSIROP εγκαθίσταται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και συνδέεται μέσω σειριακής θύρας με τον ελεγκτή του. Ο ελεγκτής δέχεται τις εντολές κίνησης και επιλύεται εσωτερικά το ευθύ και το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα. Αν οι εντολές οδηγούν τα μέλη του βραχίονα σε μεταξύ τους σύγκρουση ή αν για οποιοδήποτε λόγο (σημείο εκτός χώρου εργασίας) δεν μπορεί να εκτελεστεί η κίνηση, ο ελεγκτής εμφανίζει μήνυμα λάθους και σταματάει η εκτέλεση του προγράμματος. Διαφορετικά εκτελούνται οι εντολές σύμφωνα με τη ροή του προγράμματος [30, 31, 32].

Όμως, για τον τηλεχειρισμό του βραχίονα, εμφανίζεται η ανάγκη δυναμικού προγραμματισμού, ο οποίος δεν μπορεί να παραχθεί στο πρόγραμμα διεπαφής που παρέχεται. Μέρος πτυχιακής εργασίας σε εξέλιξη [34], αποτελεί η δημιουργία συναρτήσεων για χειρισμό του βραχίονα μέσω της πλατφόρμας λογισμικού MATLAB.

Για λόγους απλοποίησης της εργασίας επιλέχθηκε ο διαχωρισμός του αρχικού προβλήματος σε δυο μικρότερα. Αρχικά, επιλύεται το πρόβλημα τηλεχειρισμού των ρομποτικών δακτύλων του Talos' Hand με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Ακολούθως, επιλύεται το πρόβλημα τηλεχειρισμού του βραχίονα RV-2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα αναπαριστά την παλάμη του ανθρώπινου χεριού. Τέλος, επιλύεται το πρόβλημα τηλεχειρισμού του τελικού ρομποτικού συστήματος με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Το τελικό ρομποτικό σύστημα αποτελείται από τον βραχίονα RV-2A με το ρομποτικό χέρι Talos' Hand τοποθετημένο ως τελικό στοιχείο δράσης.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την επίτευξη του τηλεχειρισμού του Talos' Hand με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking".

## 4. Τηλεχειρισμός Talos' Hand με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking"

---

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στο λογισμικό MATLAB με στόχο τον τηλεχειρισμό των δάκτυλων του ρομποτικού χεριού Talos' Hand σύμφωνα με τις κινήσεις του χρήστη, όπως αυτές αναγνωρίζονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Να σημειωθεί ότι στην παρούσα φάση το ρομποτικό χέρι είναι τοποθετημένο σε σταθερή βάση, άρα διατηρείται η θέση και ο προσανατολισμός του. Συνεπώς, οι παράμετροι που περιγράφουν την θέση και τον προσανατολισμό του ανθρώπινου χεριού δεν χρησιμοποιούνται.

### 4.1 Επικοινωνία Talos' Hand και "3D Hand Tracking"

Με την εφαρμογή "3D Hand Tracking" επιτυγχάνεται η παρακολούθηση της παλάμης και των δακτύλων του χρήστη για κάθε στιγμιότυπο (frame) το οποίο λαμβάνεται κατά την λειτουργία της εφαρμογής. Σε κάθε στιγμιότυπο, υπολογίζονται οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης σύμφωνα με την πόζα/στάση που προβλέπεται από την εφαρμογή για το ανθρώπινο χέρι και στη συνέχεια, γίνεται λήψη νέου στιγμιότυπου. Ο χρόνος λήψης και επεξεργασίας που απαιτείται για την διαδικασία αυτή διαφέρει μεταξύ διαδοχικών στιγμιότυπων. Οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης ανέρχονται στους 27 (θέση και προσανατολισμός παλάμης, καθώς και οι τιμές για τις γωνίες των αρθρώσεων των δακτύλων) [Εικόνα 3.1]. Οι παράμετροι αυτοί υπολογίζονται συνεχώς αλλά δεν καταγράφονται. Η ιδέα είναι να παραλαμβάνονται άμεσα οι παράμετροι αυτοί από τον αλγόριθμο τηλεχειρισμού ώστε να γίνεται η κατάλληλη επεξεργασία και να αποστέλλονται στο Talos' Hand στη κατάλληλη μορφή, έτσι ώστε τα δάκτυλα του Talos'

Hand να μιμούνται την κίνηση των δακτύλων του χρήστη της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Επίσης, απαραίτητο για την λειτουργία του αλγορίθμου θεωρείται το χρονικό διάστημα που διανύεται μεταξύ των στιγμιότυπων με σκοπό να αποστέλλεται στο ρομποτικό χέρι ώστε η κίνηση των ρομποτικών δακτύλων να διαρκεί όσο και η κίνηση του χρήστη.

Λόγω του ότι, το χρονικό διάστημα ανάμεσα στα στιγμιότυπα δεν υπολογίζεται και οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης που υπολογίζονται δεν καταγράφονται, εμφανίζεται η ανάγκη τροποποίησης της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Αρχικά, η εφαρμογή τροποποιήθηκε ώστε να υπολογίζεται **το χρονικό διάστημα που διανύεται μεταξύ διαδοχικών στιγμιότυπων**, δηλαδή το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε η εφαρμογή να προχωρήσει στην λήψη και ανάλυση από το προηγούμενο στο τρέχων στιγμιότυπο. Το διάστημα αυτό θα συμβολίζεται με **Δt**. Στη συνέχεια, η εφαρμογή τροποποιήθηκε ώστε οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης και το χρονικό διάστημα που διανύεται να αποθηκεύονται σε ένα αρχείο δεδομένων. Το αρχείο δεδομένων δημιουργείται και αποθηκεύεται σε προκαθορισμένο σημείο (path). Τέλος, να σημειωθεί ότι η διαδικασία αποθήκευσης συμβαίνει σε κάθε στιγμιότυπο. Η διαδρομή για το αρχείο (path) γνωστοποιείται στον αλγόριθμο στο λογισμικό MATLAB. Συνεπώς, η εφαρμογή "3D Hand Tracking" αποθηκεύει τις παραμέτρους γεωμετρικής διαμόρφωσης σε ένα αρχείο και αυτές εισάγονται στο περιβάλλον του MATLAB για περαιτέρω χρήση.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ξανά, ότι το ρομποτικό χέρι Talos' Hand έχει 16 BE (βαθμούς ελευθερίας) σε αντίθεση με το ανθρώπινο και το εικονικό χέρι της εφαρμογής "3D Hand Tracking", τα οποία έχουν 26.

Παρακάτω αναλύεται ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού των ρομποτικών δακτύλων σε βήματα και δίνεται μια γενική περιγραφή αυτού. Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής τηλεχειρισμού του Talos' Hand, στο οποίο είναι τοποθετημένη η αντιστοιχία των βημάτων, με βάση την περιγραφή που δίδεται παρακάτω.

## 4.2 Περιγραφή αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού του Talos' Hand με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" αποτελείται από οκτώ βήματα. Εκ των οποίων τα δυο πρώτα βήματα αφορούν την έναρξη της εφαρμογής "3D Hand Tracking" και την αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ λογισμικού MATLAB και Talos' Hand.

Αρχικά, εκκινείται η εφαρμογή "3D Hand Tracking" και γίνεται αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ Talos' Hand και MATLAB. Όταν η εφαρμογή "3D Hand Tracking" βρίσκεται σε θέση αναμονής εκκινείται ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού στο

MATLAB. Στη συνέχεια, εισάγονται δεδομένα από το αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται μέσω της εφαρμογής. Έπειτα, ο αλγόριθμος εισέρχεται στον κύριο βρόχο επανάληψης, όπου για κάθε στιγμιότυπο επιλέγονται οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης, τροποποιούνται στην κατάλληλη μορφή και αποστέλλονται στον σερβοελεγκτή του ρομποτικού χεριού για κίνηση των δακτύλων του. Προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του αλγόριθμου είναι η αρχικοποίηση του ανθρώπινου χεριού στην εφαρμογή "3D Hand Tracking" να πραγματοποιείται από τον χρήστη μετά την έναρξη του αλγορίθμου τηλεχειρισμού. Παρακάτω περιγράφονται τα βήματα πιο αναλυτικά. Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής και η αντιστοιχία των παρακάτω βημάτων.

**Βήμα 1. Έναρξη εφαρμογής "3D Hand Tracking":** Έναρξη της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης του χεριού αποθηκεύονται συνεχώς σε ένα αρχείο δεδομένων μαζί με το χρονικό διάστημα ( $\Delta t$ ) που διανύεται μεταξύ δυο διαδοχικών στιγμιότυπων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καταγραφή αυτή συμβαίνει ακόμα και κατά την διάρκεια στην οποία η εφαρμογή βρίσκεται σε λειτουργία αναμονής-αρχικοποίησης. Όταν, δηλαδή, έχουν ολοκληρωθεί οι αρχικοποιήσεις της εφαρμογής "3D Hand Tracking" και έχει εμφανιστεί το εικονικό χέρι στο παράθυρο της εφαρμογής [Εικόνα 3.3(α)]. Όταν ολοκληρωθούν οι αρχικοποιήσεις της εφαρμογής και αυτή βρεθεί σε θέση αναμονής/αρχικοποίησης, τότε εκκινείται (χειροκίνητα) ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού στο MATLAB ("Βήμα 3").

**Βήμα 2. Επικοινωνία Talos' Hand με MATLAB:** Κατά την εκκίνηση του λογισμικού MATLAB απαιτείται αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ λογισμικού και Talos' Hand (σερβοελεγκτή SSC-32). Η διαδικασία αυτή απαιτείται κάθε φορά που πραγματοποιείται εκ νέου εκκίνηση του λογισμικού.

**Βήμα 3. Έναρξη αλγορίθμου (MATLAB):** Αρχικά, γνωστοποιείται η θέση του αρχείου αποθήκευσης των δεδομένων (path) της εφαρμογής "3D Hand Tracking" στον αλγόριθμο και διαγράφονται τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί μέχρι στιγμής. Αυτό συμβαίνει ώστε να μην υπάρχουν δεδομένα που έχουν καταγραφεί σε διαφορετική χρονική στιγμή. Τέλος, αρχικοποιούνται οι μεταβλητές που απαιτούνται για την σωστή λειτουργία του αλγόριθμου. Πλέον, ο χρήστης έχει την δυνατότητα αρχικοποίησης του ανθρώπινου χεριού στην εφαρμογή "3D Hand Tracking" με στόχο τον τηλεχειρισμό του ρομποτικού χεριού.

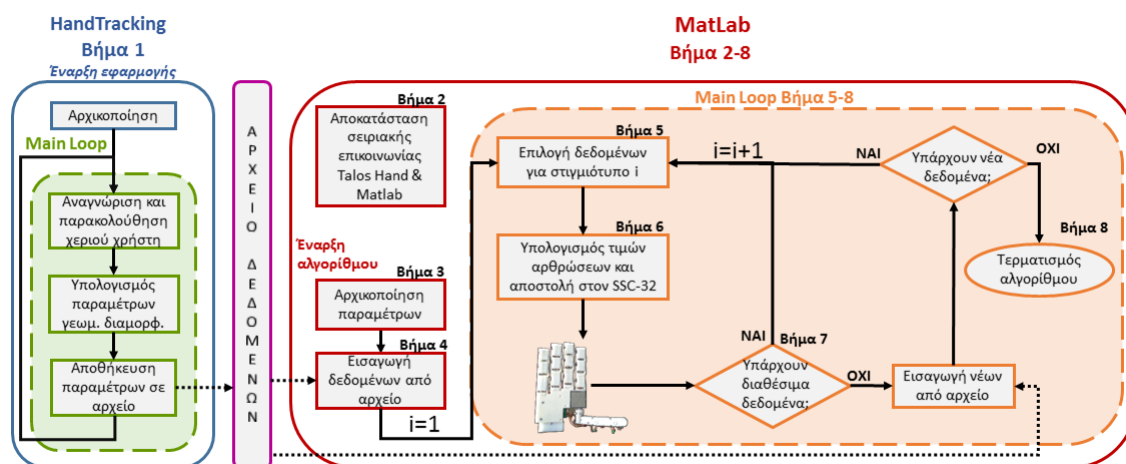
**Βήμα 4. Ανάγνωση δεδομένων από αρχείο:** Εισάγονται όσα δεδομένα έχουν καταγραφεί από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" από το αρχείο δεδομένων στο περιβάλλον του MATLAB.

Στο επόμενο βήμα ο αλγόριθμος εισέρχεται στο κύριο βρόχο επανάληψης του αλγόριθμου. Στην πρώτη επανάληψη ο μετρητής  $i$  έχει τιμή ίση με άσσο.

**Κύριος βρόχος επανάληψης:**

**Βήμα 5. Επιλογή δεδομένων:** Επιλέγονται τα δεδομένα γεωμετρικής διαμόρφωσης για το στιγμιότυπο  $i$ .

**Βήμα 6. Κίνηση ρομποτικών δακτύλων:** Επιλέγονται οι τιμές των γωνιών για τις αρθρώσεις του Talos' Hand, μετατρέπονται σε κατάλληλη μορφή (εύρος παλμού) και αποστέλλονται στον σερβοελεγκτή SSC-32 με στόχο την κίνηση των σερβοκινητήρων, άρα και των αρθρώσεων στα δάκτυλα του Talos'Hand. Μαζί με τις τιμές των γωνιών αποστέλλεται στον ελεγκτή του Talos' Hand και το χρονικό διάστημα  $\Delta t_i$ . Αυτό αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα στο οποίο θα εκτελεστεί η κίνηση από τους σερβοκινητήρες. Έπειτα ο αλγόριθμος προχωράει στο "Βήμα 7".



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής τηλεχειρισμού Talos' Hand

**Βήμα 7. Έλεγχος διαθέσιμων δεδομένων:** Ελέγχεται αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα (δεδομένα από τα οποία δεν έχουν επεξεργαστεί οι διαθέσιμες πληροφορίες), αν υπάρχουν ο μετρητής  $i$  αυξάνεται κατά μια μονάδα και ο αλγόριθμος προχωράει στο "Βήμα 5".

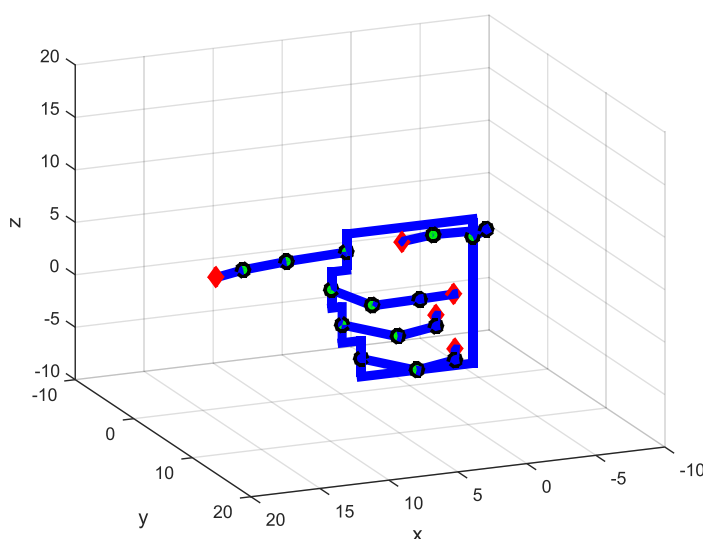
Αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, τότε γίνεται προσπάθεια εισαγωγής/ανάγνωσης των δεδομένων που έχουν καταγραφεί μέχρι στιγμής από την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Αν διαπιστωθεί η εισαγωγή νέων δεδομένων, τότε ο μετρητής  $i$  αυξάνεται κατά μια μονάδα και ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού (MATLAB) προχωράει στο "Βήμα 6". Διαφορετικά ο αλγόριθμος προχωράει στο "Βήμα 8". Το πλήθος των δεδομένων, τα οποία εισάγονται, δεν είναι σταθερό κάθε φορά και εξαρτάται από το ρυθμό αποθήκευσης της εφαρμογής "3D Hand Tracking".

**Βήμα 8. Τερματισμός αλγορίθμου:** Εμφανίζεται μήνυμα τέλους στο Command Window (στο MATLAB) και ολοκληρώνεται η εκτέλεση του αλγορίθμου.

Τέλος, επισημαίνεται ότι το ρομποτικό χέρι Talos' Hand δεν έχει τη δυνατότητα κινήσεων προσαγωγής-απαγωγής στα δάχτυλα, εκτός του αντίχειρα. Για το λόγο αυτό, από τα δεδομένα που καταγράφονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" χρησιμοποιούνται μόνο όσα αντιστοιχούν στις υλοποιημένες αρθρώσεις. Οι μεταβλητές, που δεν χρησιμοποιούνται αν και εξάγονται, αγνοούνται. Είναι προφανές ότι το Talos' Hand, εφόσον δεν έχει την δυνατότητα κινήσεων απαγωγής – προσαγωγής, δεν αναπαράγει τέτοιες κινήσεις.

#### Απεικόνιση δακτύλων.

Κατά την διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής του ρομποτικού χεριού είχε αναπτυχθεί κώδικας στο λογισμικό MATLAB, με τον οποίο απεικονίζεται η στάση του ρομποτικού χεριού [26, 27]. Αυτός, δέχεται ως είσοδο τις γωνίες για κάθε άρθρωση των δακτύλων, στην συνέχεια επιλύεται το ΕΚΠ (Ευθύ Κινηματικό Πρόβλημα) και ως έξοδος παράγεται ένα παράθυρο στο οποίο απεικονίζεται η στάση των δακτύλων (μαζί με την παλάμη) [Εικόνα 4.2].



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση στάσης δακτύλων στο λογισμικό MATLAB

Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιήθηκε στην εργασία, με μικρές τροποποιήσεις, για την απεικόνιση της στάσης των δακτύλων πριν σταλεί η εντολή κίνησης στους σερβοκινητήρες. Όταν είναι ενεργοποιημένη η δυνατότητα αυτή, τότε πρώτα απεικονίζεται η στάση των δακτύλων και στη συνέχεια υπολογίζονται και αποστέλλονται οι τιμές στους σερβοκινητήρες.

### 4.3 Πειραματική αποτίμηση αλγορίθμου τηλεχειρισμού Talos' Hand

Στα πειράματα που ακολουθούν το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στον τηλεχειρισμό των ρομποτικών δακτύλων με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Το ρομποτικό χέρι είναι τοποθετημένο σε σταθερό σημείο (επομένως διατηρείται σταθερή η θέση και ο προσανατολισμός). Για την εξαγωγή των πειραμάτων ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία.

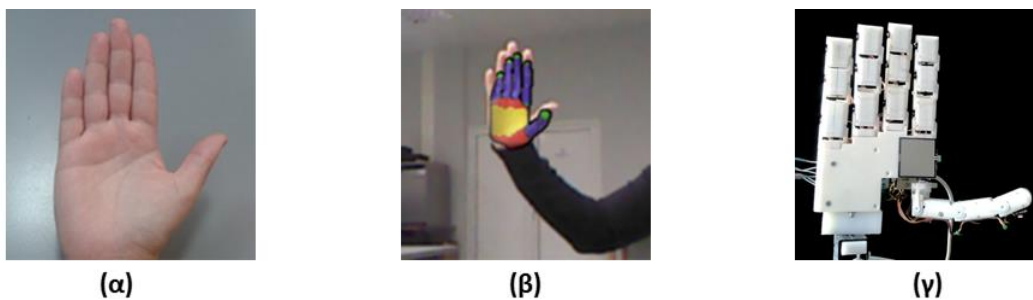
Αρχικά, εκκινείται η εφαρμογή "3D Hand Tracking" και γίνεται αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ Talos' Hand και MATLAB. Έπειτα, όταν η εφαρμογή "3D Hand Tracking" βρεθεί σε κατάσταση αναμονής [Εικόνα 3.3(α)], τότε εκκινείται (χειροκίνητα) ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού. Πλέον, ο χρήστης έχει την δυνατότητα αρχικοποίησης του ανθρώπινου χεριού στην εφαρμογή "3D Hand Tracking" [Εικόνα 3.3(β),(γ)]. Τέλος, ο χρήστης αναπαράγει την επιθυμητή στάση στα δάχτυλα του, η οποία αναγνωρίζεται από την εφαρμογή και αναπαράγεται από το ρομποτικό χέρι. Η κίνηση, από την θέση αρχικοποίησης στη επιθυμητή θέση, πραγματοποιείται με ομαλή ταχύτητα, ώστε η εφαρμογή να έχει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τον υπολογισμό και αποθήκευση των παραμέτρων.

Στα επόμενα σχήματα απεικονίζονται τρεις εικόνες. Στην πρώτη εικόνα απεικονίζεται η επιθυμητή χειρονομία, στην δεύτερη απεικονίζεται η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" και στην τρίτη απεικονίζεται το ρομποτικό χέρι να αναπαριστά την χειρονομία όπως αυτή αναγνωρίζεται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking".

Να σημειωθεί ότι για την υλοποίηση των παρακάτω πειραμάτων ορίστηκε, μέσω της εφαρμογής "3D Hand Tracking" η θέση αρχικοποίησης του ανθρώπινου χεριού να απέχει από τον αισθητήρα Kinect 90 cm. Παρατηρήθηκε ότι όταν το ανθρώπινο χέρι απομακρύνεται από τον αισθητήρα Kinect, τότε τα αποτελέσματα από την εφαρμογή έχουν μεγαλύτερη διαφοροποίηση από την πραγματική στάση των ανθρώπινων δακτύλων. Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω παρατήρηση, κατά την διάρκεια των πειραμάτων το ανθρώπινο χέρι δεν απομακρύνθηκε από τον αισθητήρα Kinect σε απόσταση μεγαλύτερη των 120 cm (περίπου).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το ανθρώπινο χέρι σε στάση αρχικοποίησης για την εφαρμογή "3D Hand Tracking" και όπως αναγνωρίζεται από την εφαρμογή (Εικόνα 4.3(α),(β)). Στην στάση αυτή όλες οι αρθρώσεις των δακτύλων βρίσκονται σε πλήρη έκταση ως προς το μετωπιαίο επίπεδο. Επίσης απεικονίζεται το ρομποτικό χέρι να αναπαριστά την στάση των δακτύλων όπως αυτή αναγνωρίζεται από την εφαρμογή.





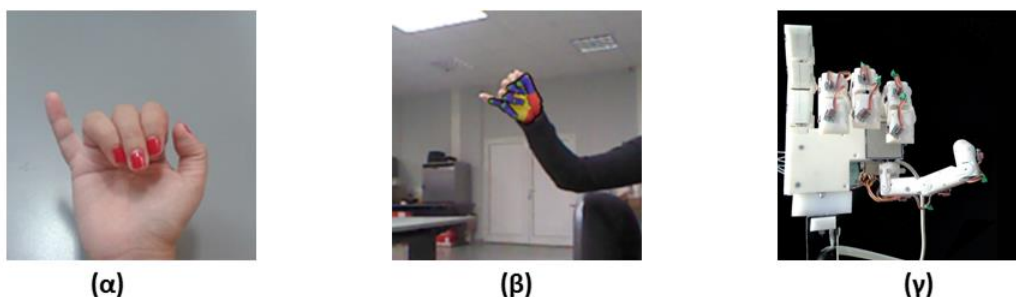
Εικόνα 4.3: Χειρονομία με όλα τα δάκτυλα πλήρως εκτεταμένα (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand

Στην δεύτερη χειρονομία απεικονίζεται το ανθρώπινο χέρι με τις αρθρώσεις των δακτύλων να βρίσκονται σε κάμψη ως προς το μετωπιαίο επίπεδο, εκτός από τις MCP αρθρώσεις οι οποίες αποκλείουν ελάχιστα από την πλήρη έκταση. Τέλος, οι αρθρώσεις του αντίχειρα βρίσκονται υπό κλίση ως προς το οβελιαίο επίπεδο.



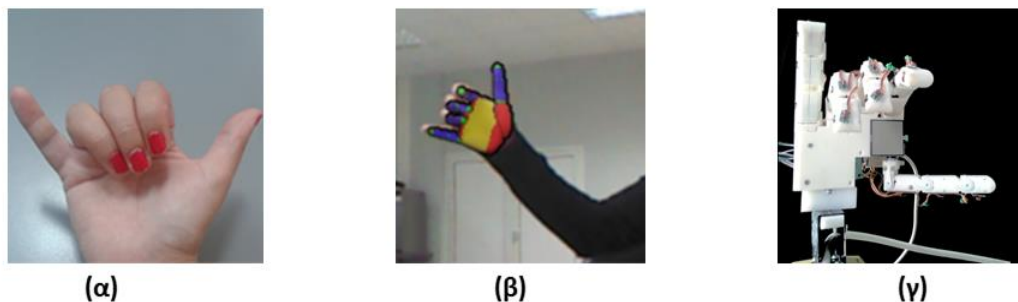
Εικόνα 4.4: Χειρονομία με όλα τα δάκτυλα σε κάμψη (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand

Στην επόμενη εικόνα, απεικονίζεται το ανθρώπινο χέρι στην επιθυμητή πόζα/χειρονομία, το μικρό δάκτυλο βρίσκεται σε πλήρη έκταση ενώ, για τον μέσο, τον παράμεσο και τον δείκτη οι MCP αρθρώσεις βρίσκονται σε πλήρη κάμψη ενώ οι PIP και DIP αρθρώσεις βρίσκονται σε μερική κάμψη. Τέλος, οι αρθρώσεις του αντίχειρα βρίσκονται υπό κλίση ως προς το οβελιαίο επίπεδο.



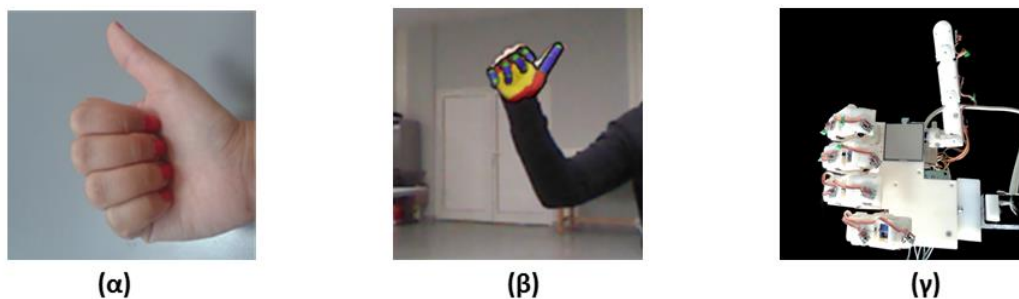
Εικόνα 4.5: Χειρονομία με εκτεταμένο μόνο το μικρό δάκτυλο. (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand

Στην τέταρτη χειρονομία απεικονίζεται το ανθρώπινο χέρι με το μικρό δάχτυλο και τον αντίχειρα σε πλήρη έκταση ως προς το μετωπιαίο επίπεδο και τα υπόλοιπα δάκτυλα (δείκτης, μέσος, παράμεσος) σε πλήρη κάμψη.



Εικόνα 4.6: Χειρονομία με εκτεταμένα το μικρό δάχτυλο και τον αντίχειρα (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand

Στην παρακάτω χειρονομία ο αντίχειρας είναι σε πλήρη έκταση ως προς το μετωπιαίο επίπεδο ενώ οι αρθρώσεις στα εναπομείναντα δάκτυλα βρίσκονται σε πλήρη κάμψη.



Εικόνα 4.7: Χειρονομία με τον αντίχειρα σε πλήρη έκταση (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand

Στην συνέχεια, στη χειρονομία που απεικονίζεται, το μικρό δάχτυλο και ο παράμεσος βρίσκονται σε κάμψη ως προς το μετωπιαίο επίπεδο, ο μέσος και ο δείκτης σε πλήρη έκταση και ο αντίχειρας υπό μερική κάμψη ως προς το μετωπιαίο επίπεδο.



Εικόνα 4.8: Χειρονομία με εκτεταμένους το δείκτη και το μέσο (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand

Παρακάτω προσομοιώνεται ένα πλαίσιο συντεταγμένων XYZ, σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Ο αντίχειράς και ο δείκτης βρίσκονται σε πλήρη έκταση, ο μέσος είναι κάθετος στο μετωπιαίο επίπεδο και ο παράμεσος με το μικρό δάκτυλο βρίσκονται υπό κάμψη. Ειδικότερα, για τον παράμεσο και το μικρό δάκτυλο, η MCP άρθρωση τους είναι υπό πλήρη κάμψη ενώ οι υπόλοιπες αρθρώσεις υπό μερική κάμψη.



Εικόνα 4.9: Προσομοίωση πλαισίου XYZ (α) Ανθρώπινο χέρι (β) Η υπόθεση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (γ) Αναπαράσταση υπόθεσης από το Talos' Hand

Από τις εικόνες που παρατίθενται παραπάνω, παρατηρείται ότι οι τιμές των γωνιών για τις αρθρώσεις υπολογίζονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" με μικρές αποκλίσεις. Ειδικότερα, στο μικρό δάκτυλο εμφανίζονται οι περισσότερες δυσκολίες στην ανεύρεση της σωστής υπόθεσης. Επίσης, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η εφαρμογή δεν ανιχνεύει πλήρως την εκάστοτε στάση των δακτύλων. Αυτό αποδίδεται στον προσανατολισμό και την απόσταση που έχει το ανθρώπινο χέρι ως προς τον αισθητήρα Kinect, καθώς και στις συνθήκες φωτισμού εφόσον η έκδοση της εφαρμογής "3D Hand Tracking", με την οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, είναι ευαίσθητη στις συνθήκες φωτισμού που επικρατούν.

Το Talos' Hand είναι σε θέση να αναπαριστά ποιοτικά τις κινήσεις που ανιχνεύονται από την εφαρμογή. Όπως ήταν αναμενόμενο, υπάρχουν μικρές αποκλίσεις λόγω κινήσεων που το ρομποτικό χέρι δεν είναι σε θέση να υλοποιήσει λόγω κατασκευαστικών περιορισμών (λιγότεροι βαθμοί ελευθερίας). Οι κινήσεις αυτές περιορίζονται σε κινήσεις που απαιτούν απαγωγή ή προσαγωγή των δακτύλων, εκτός του αντίχειρα. Το γεγονός αυτό διακρίνεται στην Εικόνα 4.8, όπου ο μέσος και ο δείκτης στο ανθρώπινο χέρι βρίσκονται σε απαγωγή ως προς το οβελιαίο επίπεδο.

Τέλος, λόγω των σερβοκινητήρων που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά την κατασκευή του χεριού δεν υπάρχει ανάδραση δεδομένων γωνιακής θέσης. Συνεπώς, δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί αν οι κινητήρες ολοκλήρωσαν πλήρως την κίνηση όσον αφορά την ακρίβεια του ελέγχου θέσης.

Να σημειωθεί ότι για τις παραπάνω εικόνες [Εικόνα 4.3 έως Εικόνα 4.9] το στιγμιότυπο για την πρόβλεψη της χειρονομίας από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" (β) καθώς και το στιγμιότυπο της αναπαράστασης από το Talos' Hand (γ) αντιστοιχούν στη τελική κίνηση και αποτυπώθηκαν με την ολοκλήρωση της κίνησης. Σε αντίθεση, με το στιγμιότυπο του ανθρώπινου χεριού, δηλαδή, την επιθυμητή στάση των δακτύλων (α) η οποία αποτυπώθηκε σε διαφορετική χρονική στιγμή.

Το πρόβλημα τηλεχειρισμού του Talos' Hand με χρήση της εφαρμογής 3D Hand Tracking θεωρείται λυμένο. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη του αλγορίθμου τηλεχειρισμού του βιομηχανικού βραχίονα RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking", καθώς και η πειραματική αποτίμηση του.

## 5. Τηλεχειρισμός Βραχίονα RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking"

---

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται γενικές παρατηρήσεις για την συμπεριφορά του βραχίονα, όταν εκτελείται χειρισμός αυτού μέσω MATLAB. Στην συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται η διαδικασία με την οποία η εφαρμογή "3D Hand Tracking" και ο βραχίονας RV2A. Επίσης παρουσιάζεται η ανάπτυξη δυο αλγορίθμων τηλεχειρισμού του βιομηχανικού βραχίονα με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Τέλος, κάθε αλγόριθμος συνοδεύεται από τις αντίστοιχες παρατηρήσεις για την ορθή κατανόηση και λειτουργία αυτού καθώς και την πειραματική αποτίμηση τους.

Στόχος στην ενότητα αυτή αποτελεί ο **τηλεχειρισμός του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα**, με τρόπο τέτοιο, ώστε η παραγόμενη κίνηση να μιμείται την κίνηση της **παλάμης του χρήστη** όπως αυτή αποδίδεται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Για τον τηλεχειρισμό του βραχίονα χρησιμοποιείται το MATLAB και οι συναρτήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τέλος, ως δεδομένα τηλεχειρισμού χρησιμοποιούνται τα δεδομένα θέσης και προσανατολισμού που εξάγονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Παρακάτω ακολουθούν επεξηγήσεις, οι οποίες αφορούν την λειτουργία του αλγόριθμου τηλεχειρισμού καθώς και πληροφορίες για την χρήση του βραχίονα μέσω των συναρτήσεων που υλοποιήθηκαν στο MATLAB.

Στην επόμενη ενότητα ακολουθούν γενικές παρατηρήσεις που σχετίζονται με την χρήση του βραχίονα RV-2A μέσω MATLAB καθώς και γενικές πληροφορίες για την ορθή λειτουργία του αλγόριθμου.

## 5.1 Γενικές παρατηρήσεις

### 5.1.1 Επικοινωνία RV-2A και "3D Hand Tracking"

Από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" υπολογίζονται οι παράμετροι που περιγράφουν την θέση και τον προσανατολισμό της παλάμης του χεριού ως προς το Kinect (ή ως προς όποιον αισθητήρα RGBD χρησιμοποιείται). Κρίνεται αναγκαίο οι παράμετροι αυτοί να εισάγονται στο περιβάλλον λειτουργίας του MATLAB για χρήση αυτών μέσω του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε. Επίσης, κρίνεται αναγκαίο τα δεδομένα να εισάγονται είτε συνεχώς είτε ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Αυτό επιτυγχάνεται με την τροποποίηση της εφαρμογής ώστε να καταγράφονται τα δεδομένα που υπολογίζονται για κάθε στιγμιότυπο σε ένα αρχείο δεδομένων.

Όπως αναφέρεται και στην ενότητα 4.1, η εφαρμογή "3D Hand Tracking" έχει τροποποιηθεί ώστε να υπολογίζεται και να αποθηκεύεται **το χρονικό διάστημα που διανύεται μεταξύ διαδοχικών στιγμιότυπο (Δt<sub>i</sub>)**. Το Δt<sub>i</sub> αποθηκεύεται στο ίδιο αρχείο με τις παραμέτρους γεωμετρικής διαμόρφωσης. Αυτό συμβαίνει για κάθε στιγμιότυπο και πριν η εφαρμογή να προβεί στην λήψη επόμενου. Το αρχείο δημιουργείται και αποθηκεύεται σε προκαθορισμένο σημείο (path). Να σημειωθεί ότι, η διαδικασία αποθήκευσης συμβαίνει για κάθε στιγμιότυπο. Η διαδρομή για το αρχείο (path) γνωστοποιείται στον αλγόριθμο τηλεχειρισμού (MATLAB). Μετά από κάθε εισαγωγή δεδομένων στο περιβάλλον του MATLAB, επεξεργάζονται κατάλληλα η θέση και ο προσανατολισμός της παλάμης και αποστέλλονται μέσω εντολών στον ελεγκτή του βραχίονα. Μέσω των εντολών αυτών **το τελικό στοιχείο δράσης κινείται με τρόπο τέτοιο ώστε να μιμείται την κίνηση της παλάμης του χρήστη**. Συνεπώς, η εφαρμογή "3D Hand Tracking" αποθηκεύει τις παραμέτρους γεωμετρικής διαμόρφωσης σε ένα αρχείο και μέσω του αλγορίθμου εισάγονται στο περιβάλλον του MATLAB για περαιτέρω χρήση.

### 5.1.2 Χειρισμός βραχίονα RV-2A μέσω MATLAB

Η αλληλεπίδραση με τον βραχίονα RV2A επιτυγχάνεται, είτε μέσω υπολογιστή με χρήση του προγράμματος διεπαφής που παρέχεται (COSIROP), είτε μέσω του χειριστηρίου εκπαίδευσης (teaching pendant) [Ενότητα 3.3]. Όμως για τον τηλεχειρισμό του βραχίονα εμφανίζεται η ανάγκη δυναμικού προγραμματισμού, ο οποίος δεν μπορεί να παραχθεί στο πρόγραμμα διεπαφής. Μέρος πτυχιακής εργασίας σε εξέλιξη [34], αποτελεί η δημιουργία συναρτήσεων με στόχο τον χειρισμό του βραχίονα μέσω της πλατφόρμας λογισμικού MATLAB. Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στην εργασία παρουσιάζονται στο παράρτημα [Παράρτημα Α – Συναρτήσεις χειρισμού RV2A].

Επιπλέον, κατά την ανάπτυξη του αλγόριθμου παρατηρήθηκε ότι αν κατά την διάρκεια που εκτελείται κίνηση σταλθεί εντολή μετακίνησης σε διαφορετικό σημείο ή προσανατολισμό τότε η εντολή αυτή αγνοείται από τον ελεγκτή, άρα δεν εκτελείται ποτέ. Επίσης, αν κατά την διάρκεια που ο βραχίονας βρίσκεται εν κινήσει σταλθεί εντολή αποθήκευσης σημείου στον ελεγκτή, τότε ο ελεγκτής εμφανίζει μήνυμα λάθους και διακόπτεται η εκτέλεση του αλγορίθμου. Σε κάθε περίπτωση η συμπεριφορά του βραχίονα δεν είναι η επιθυμητή. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με χρήση της εντολής *GETSTATE* η οποία περιγράφεται στο παράρτημα [Παράρτημα Α – Συναρτήσεις χειρισμού RV2A]. Ο ελεγκτής του βραχίονα έχει την δυνατότητα να ανταποκρίνεται σε αυτή την εντολή ανεξάρτητα από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Συνεπώς, μέσω της εντολής αυτής, δίδεται η δυνατότητα να διαπιστωθεί αν ο βραχίονας βρίσκεται υπό κίνηση ή όχι, ώστε να γίνουν οι κατάλληλες ενέργειες. Να σημειωθεί ότι ο ελεγκτής του βραχίονα δέχεται εντολές μέσω της σειριακής θύρας που διαθέτει.

Τέλος σημαντικό παράγοντα στον χειρισμό του βραχίονα μέσω MATLAB αποτελεί η μορφή των δεδομένων που δέχεται ο ελεγκτής του. Πιο συγκεκριμένα, ο ελεγκτής του βραχίονα αντιλαμβάνεται τα σημεία ως **γενικευμένο διάνυσμα** έξι μεταβλητών  $[x \ y \ z \ A \ B \ C]$ . Στο διάνυσμα αυτό, οι τρεις πρώτες τιμές  $[x \ y \ z]$  περιγράφουν την θέση και οι τρεις επόμενες  $[A \ B \ C]$  περιγράφουν τον προσανατολισμό του πλαισίου  $\{T\}$  ως προς τους σταθερούς άξονες XYZ του πλαισίου  $\{B\}$ . Επίσης οι γωνίες ABC αντιστοιχίζονται με την μορφή των γωνιών Euler  $Z(C)Y(B)X(A)$ . Συνεπώς, για να σταλθεί εντολή μετακίνησης θέσης και προσανατολισμού στον ελεγκτή απαιτείται να τηρεί την παραπάνω περιγραφή. Όμως για την εύρεση του προσανατολισμού και της θέσης, κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγόριθμου, χρησιμοποιούνται ομογενείς μετασχηματισμοί. Για τον λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί οι κατάλληλες συναρτήσεις που κάνουν τις αντίστοιχες μετατροπές από γενικευμένο διάνυσμα σε OM και το αντίστροφο.

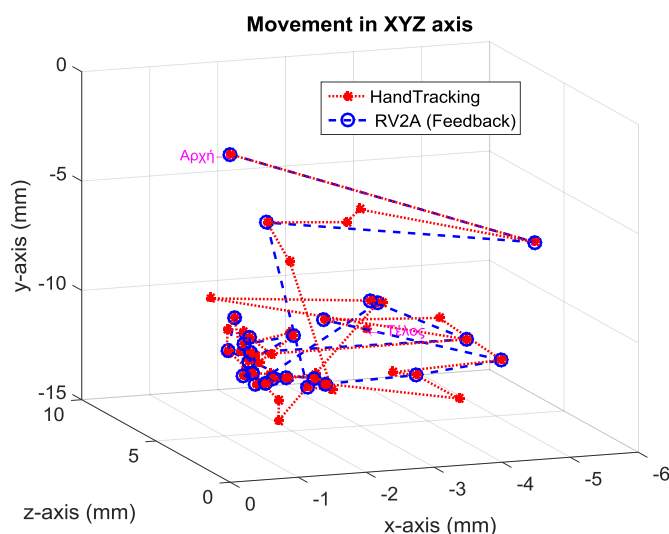
### 5.1.3 Κατώφλι κίνησης – Αποφυγή άσκοπων κινήσεων

Κατά την διάρκεια ανάπτυξης του αλγορίθμου παρατηρήθηκε ότι ενώ το ανθρώπινο χέρι είναι σταθερό αναγνωρίζονται μεταβολές από την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ακρίβεια που παρέχεται στον χάρτη βάθους του αισθητήρα Kinect καθώς και στις συνθήκες φωτισμού που επικρατούν κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Αυτό δημιουργεί δυσχέρεια στον τηλεχειρισμό του ρομποτικού βραχίονα αφού το τελικό στοιχείο δράσης του οδηγείται σε μικρές και άσκοπες κινήσεις.

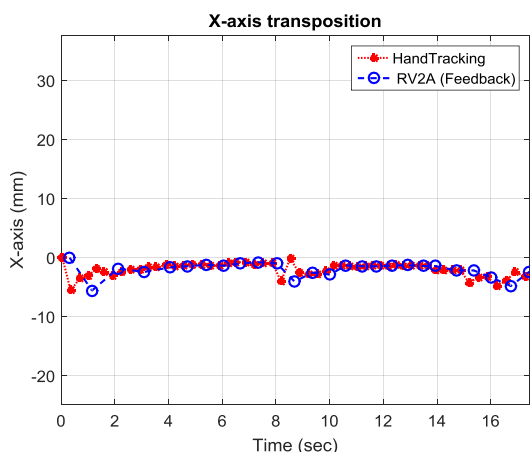
Για την επιβεβαίωση της παραπάνω παρατήρησης υλοποιήθηκε, με τον αλγόριθμο που περιγράφεται στην ενότητα 5.3, το εξής πείραμα: αρχικά εκκινείται η εφαρμογή "3D Hand Tracking". Στην συνέχεια γίνεται αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας με το

βραχίονα RV2A και εκκινείται ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού του βραχίονα (MATLAB). Ακολούθως, το ανθρώπινο χέρι τοποθετείται απέναντι από τον αισθητήρα Kinect και γίνεται η αρχικοποίηση αυτού στην εφαρμογή "3D Hand Tracking" (Εικόνα 3.3). Τέλος, το ανθρώπινο χέρι παραμένει ακίνητο για περίπου 17 δευτερόλεπτα καθώς η εφαρμογή παρακολουθεί το χέρι και καταγραφεί τις παραμέτρους γεωμετρικής διαμόρφωσης.

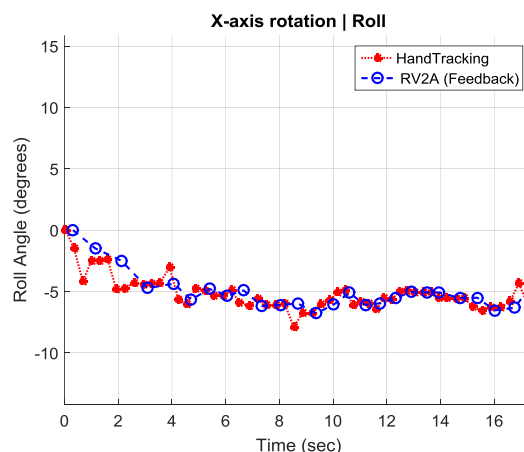
Στα γραφήματα που παρατίθενται παρακάτω, με κόκκινο χρώμα αποτυπώνονται τα σημεία που εντοπίστηκαν από την εφαρμογή και με μπλε χρώμα τα σημεία στα οποία τοποθετήθηκε το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα. Το πλήθος των σημείων που τοποθετείτε το τελικό στοιχείο δράσης συλλέγεται μέσω ανάδρασης από τον ελεγκτή. Ενδεικτικά παρατίθενται τα γραφήματα για την μετατόπιση των πλαισίου {T} και {H} στο χώρο καθώς και για την επιμέρους μετατόπιση και περιστροφή τους στον άξονα X ως συνάρτηση του χρόνου. Στο παράρτημα (Ακίνητο χέρι χωρίς κατωφλίωση κίνησης) παρατίθενται τα διαγράμματα για μετατόπιση και περιστροφή γύρω από τους άξονες XYZ.



Εικόνα 5.1: Μετατόπιση στους άξονες XYZ



Εικόνα 5.2: Μετατόπιση στον άξονα X



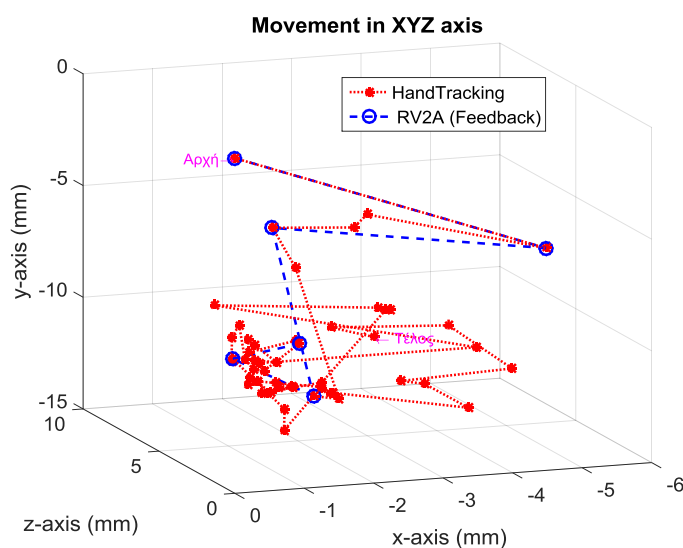
Εικόνα 5.3: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



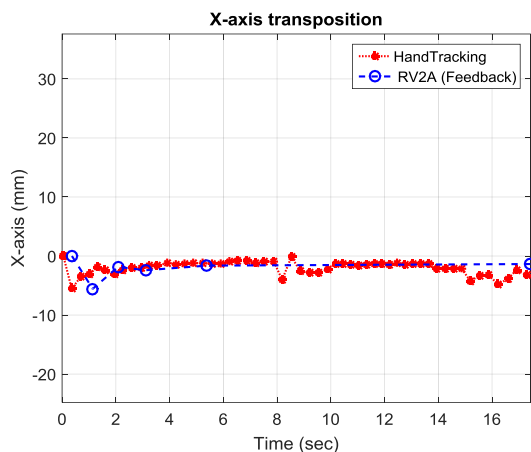
Από τα δεδομένα θέσης και προσανατολισμού που παράχθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος αυτού, υπολογίστηκε ότι η μέση μεταβολή θέσης από την προηγούμενη θέση είναι περίπου 5mm και η μέση μεταβολή προσανατολισμού είναι περίπου 5 μοίρες για τους άξονες XYZ. Για την αποφυγή των άσκοπων κινήσεων κρίθηκε αναγκαίο να τεθεί ένα κατώφλι κίνησης (threshold), το οποίο από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως **κατώφλι κίνησης** και συμβολίζεται ως  $move_{threshold}$ . Το κατώφλι κίνησης αποτελείται συνολικά από έξι μεταβλητές σε αντιστοιχία με ένα γενικευμένο διάνυσμα. Οι οποίες εκφράζουν την μεταβολή από την προηγούμενη θέση, οι τρεις αντιστοιχούν σε κίνηση στους άξονες XYZ και οι άλλες τρεις σε περιστροφή γύρω από τους άξονες XYZ.

Για να επέλθει κίνηση στο τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα απαιτείται η μεταβολή θέσης και προσανατολισμού να είναι μεγαλύτερη από το κατώφλι κίνησης που τίθεται. Γίνεται δηλαδή έλεγχος για κάθε μεταβλητή, αν όλες οι μεταβλητές του Γ.Δ. που ελέγχεται είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του κατωφλιού τότε δεν αποστέλλεται εντολή κίνησης στον ελεγκτή του βραχίονα. Διαφορετικά, αν έστω και μια μεταβλητή του Γ.Δ. έχει τιμή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του κατωφλιού, αποστέλλεται εντολή κίνησης στον ελεγκτή του βραχίονα. Παρακάτω ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα με ενεργοποιημένο το κατώφλι κίνησης όπου η ελάχιστη τιμή μετακίνησης είναι ίση με 5mm και η ελάχιστη τιμή περιστροφής 5 μοίρες.

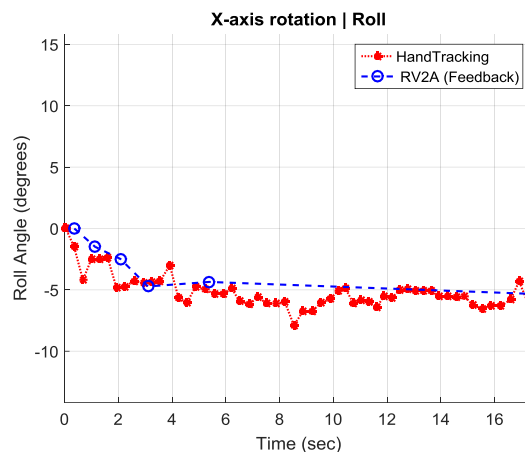
Όπως παρατηρείται και από τα παρακάτω διαγράμματα, με την ενεργοποίηση του κατωφλιού μειώνονται οι πολλές και άσκοπες κινήσεις του βραχίονα. Στο παράρτημα (Ακίνητο χέρι με κατωφλίωση κίνησης) παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων.



Εικόνα 5.4: Πορεία στο χώρο



Εικόνα 5.5: Μετατόπιση στον άξονα X



Εικόνα 5.6: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X

Κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου και με βάση την παραπάνω παρατήρηση (κατώφλι), για να υπολογιστεί ο ΟΜ  $g_d$  απαιτείται, να καταγράφονται δυο ομογενείς πίνακες. Ο ομογενής  $g_{KH}$  που προκάλεσε την τελευταία κίνηση του βραχίονα και ο ομογενής  $g_{KH}(t_i)$ , ο οποίος αντιστοιχεί στον ομογενή μετασχηματισμό για το τρέχον στιγμιότυπο και χρησιμοποιείται μόνο αν υπολογιστεί αξιοσημείωτη μεταβολή στις παραμέτρους του πλαισίου  $\{H\}$ . Όταν υπολογιστεί αξιοσημείωτη μεταβολή και αποσταλεί η εντολή στον βραχίονα, τότε ο  $g_{KH}$  αντικαθίσταται από τον  $g_{KH}(t_i)$ ,  $g_{KH} = g_{KH}(t_i)$ . Η Διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του αλγορίθμου.

Τέλος, για να είναι εφικτή η επεξεργασία των παραμέτρων προσανατολισμού και θέσης της παλάμης ως προς το Kinect απαιτείται να οριστούν τα πλαίσια συντεταγμένων τα οποία επισυνάπτονται τόσο στο Kinect όσο και στο εικονικό χέρι της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Ομοίως, για την αποστολή εντολών κίνησης στο βραχίονα απαιτείται να οριστούν τα πλαίσια συντεταγμένων της βάσης του βραχίονα και του τελικού στοιχείου δράσης αυτού. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες.

## 5.2 Ορισμός πλαισίων συντεταγμένων

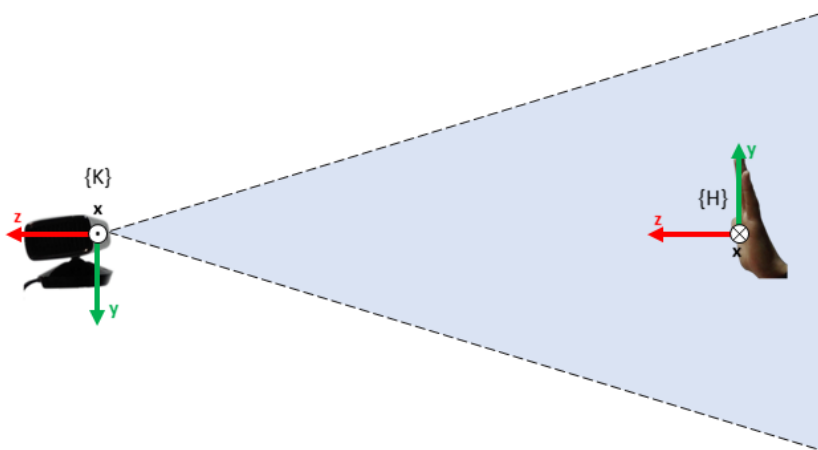
Για να επιτευχθεί ο τηλεχειρισμός του βραχίονα RV2A, απαιτείται ο ορισμός της σχετικής θέσης των πλαισίων συντεταγμένων των συστημάτων που εμπλέκονται. Τα πλαίσια αυτά είναι:

**το πλαίσιο συντεταγμένων  $\{K\}$**  που επισυνάπτεται στο Kinect, **το πλαίσιο συντεταγμένων  $\{H\}$**  που επισυνάπτεται στο εικονικό χέρι της εφαρμογής "3D Hand Tracking", **το πλαίσιο συντεταγμένων  $\{B\}$**  που επισυνάπτεται στη βάση του βραχίονα και **το πλαίσιο συντεταγμένων  $\{T\}$**  που επισυνάπτεται στο τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα.

Τέλος, εκτός από τα παραπάνω πλαίσια συντεταγμένων απαιτείται να οριστεί η αρχική κατάσταση του ρομποτικού συστήματος, καθώς και η σχετική θέση και προσανατολισμός των πλαισίων. Αυτή η διαδικασία απαιτείται τόσο για την αρχική κατάσταση του συστήματος, όσο και για την κατάσταση του συστήματος σε τυχαία χρονική στιγμή. Στην υπό-ενότητα που ακολουθεί περιγράφεται η αρχική κατάσταση και ο ορισμός των πλαισίων συντεταγμένων του συστήματος.

### 5.2.1 Αρχική κατάσταση συστήματος και ορισμός πλαισίων συντεταγμένων

Σε αυτή την ενότητα ορίζεται η αρχική κατάσταση του τρέχοντος ρομποτικού συστήματος καθώς και τα πλαίσια συντεταγμένων που επισυνάπτονται στα υποσυστήματα όπως απεικονίζονται στη συνέχεια. Παρακάτω, ακολουθεί η διαδικασία ορισμού των πλαισίων για την αρχική κατάσταση του συστήματος.



Εικόνα 5.7: Πλαίσια συντεταγμένων Kinect και εφαρμογής "3D Hand Tracking" (εικονικό χέρι)



Εικόνα 5.8: Πλαίσια συντεταγμένων του RV2A

Στο τρέχον σύστημα διακρίνονται δυο υποσυστήματα. Το ένα υποσύστημα αποτελείται από τον χρήστη και την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Για την λειτουργία της εφαρμογής απαιτείται η χρήση ενός αισθητήρα RGB-D, στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας Kinect. Η θέση αρχικοποίησης του υποσυστήματος απεικονίζεται στην Εικόνα 5.7, κατά την οποία ο χρήστης τοποθετεί το χέρι του απέναντι από τον αισθητήρα Kinect σε προκαθορισμένο σημείο σύμφωνα με την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Το δεύτερο υποσύστημα αποτελείται από τον βραχίονα RV2A και το τελικό στοιχείο δράσης. Η αρχική στάση του βραχίονα απεικονίζεται στην Εικόνα 5.8. Σημαντικό είναι ότι η θέση του πρώτου υποσυστήματος ως προς το δεύτερο και το αντίστροφο δεν επηρεάζει την λειτουργία του αλγόριθμου.

Το πλαίσιο {K} του Kinect ορίζεται με τον προσανατολισμό που απεικονίζεται στην Εικόνα 5.8. Το πλαίσιο {H} της εφαρμογής "3D Hand Tracking" ως προς το Kinect δεν είναι

γνωστό και απαιτείται ο ορισμός του. Ο ορισμός του πλαισίου {H} γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν τις παραμέτρους γεωμετρικής διαμόρφωσης του χεριού που εξάγονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking".

Ο προσανατολισμός του πλαισίου {H} (εικονικό χέρι) εξάγεται με την μορφή quaternion. Για την αρχική θέση οι παράμετροι που εξάγονται είναι:

$$qX = 0, qY = 0, qZ = 1, qW = 0 \quad 5.1$$

το οποίο ( $R_{KH}$ ) αντιστοιχεί στον πίνακα περιστροφής :

$$R_{KH} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad 5.2$$

Το πλαίσιο {H} ορίζεται ως προς το πλαίσιο {K} του Kinect, σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα στρόφης ( $R_{KH}$ ) και απεικονίζεται στην Εικόνα 5.7. Τέλος, το πλαίσιο {H} είναι τοποθετημένο σε ένα ανθρώπινο χέρι για λόγους καλύτερης απεικόνισης. Έξαλλου, το ανθρώπινο και το εικονικό χέρι τοποθετούνται σε προκαθορισμένο σημείο και με όμοιο προσανατολισμό για την αρχικοποίηση της εφαρμογής.

Το πλαίσιο {B} της βάσης του βραχίονα και το πλαίσιο {T} του τελικού στοιχείου δράσης ορίζονται με τον προσανατολισμό που απεικονίζεται στην. Το πλαίσιο {T} επισυνάπτεται στο τελικό στοιχείο δράσης ως προς το πλαίσιο {B} της βάσης του βραχίονα και ορίζεται με αρχικό προσανατολισμό όμοιο με αυτόν που έχει το πλαίσιο {H} της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Ο προσανατολισμός των πλαισίων {T} και {H} είναι όμοιος, όταν το ανθρώπινο χέρι βρίσκεται σε παράλληλη θέση με τον βραχίονα [Εικόνα 5.7, Εικόνα 5.8].

Κατά την διάρκεια μιας ομαλής κίνησης υπάρχουν δυο είδη πλαισίων. Τα σταθερά πλαίσια, τα οποία παραμένουν στην αρχική τους θέση όπως είναι τα πλαίσια {K} και {B} και τα πλαίσια, τα οποία, η σχετική τους θέση διαφοροποιείται όπως είναι τα πλαίσια {H} και {T}. Επιβάλλεται λοιπόν, να οριστεί και η σχετική θέση των πλαισίων μεταξύ τους κατά την διάρκεια μιας κίνησης.

### 5.2.2 Περιγραφή της σχετικής θέσης κατά την διάρκεια κίνησης

Κατά την διάρκεια τηλεχειρισμού του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα μέσω της εφαρμογής "3D Hand Tracking" τα πλαίσια {K} και {B} παραμένουν σταθερά, αυτό σημαίνει ότι δεν αλλάζουν θέση ή προσανατολισμό. Σε αντίθεση με τα πλαίσια {H} και {T}, στα οποία αλλάζει ο σχετικός προσανατολισμός και η σχετική τους θέση ως προς τα πλαίσια {K} και {B} αντίστοιχα.

Απαιτείται λοιπόν, να υπολογίζεται η μεταβολή της κίνησης (θέση κ προσανατολισμός) του πλαισίου {H} έτσι ώστε να αποστέλλεται με την κατάλληλη μορφή στον ελεγκτή του βραχίονα. Στόχος είναι οι εντολές που αποστέλλονται στον ελεγκτή να οδηγούν το τελικό στοιχείο δράσης σε όμοια μεταβολή κίνησης με αυτή του χρήστη.

Η μεταβολή της κίνησης του πλαισίου {H} υπολογίζεται μέσω μαθηματικών εκφράσεων και ανάγεται στο πλαίσιο {T} του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα. Παρακάτω, παρουσιάζεται η διαδικασία εύρεσης της μεταβολής της θέσης και του προσανατολισμού, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο ανάγεται η μεταβολή αυτή στο πλαίσιο του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα {T}.

Έστω  $g_{KH}(t_i)$  ο ομογενής μετασχηματισμός που περιγράφει το πλαίσιο του "3D Hand Tracking" ως προς το πλαίσιο του Kinect την χρονική στιγμή  $t_i$  και  $g_{KH}(t_{i+1})$  ο ομογενής μετασχηματισμός που περιγράφει το πλαίσιο την επόμενη χρονική στιγμή  $t_{i+1}$ . Από τον ομογενή μετασχηματισμό  $g_{KH}(t_i)$  στον ομογενή μετασχηματισμό  $g_{KH}(t_{i+1})$  μεσολαβεί μεταβολή κίνησης (θέση και προσανατολισμός) που περιγράφεται από τον ομογενή μετασχηματισμό  $g_{\Delta}$  ο οποίος υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$\begin{aligned} g_{KH}(t_i)g_{\Delta} &= g_{KH}(t_{i+1}) \leftrightarrow \\ g_{\Delta} &= g_{KH}^{-1}(t_i) g_{KH}(t_{i+1}) \end{aligned} \quad 5.3$$

Ο ΟΜ  $g_{\Delta}$  περιγράφει την μεταβολή κίνησης (θέσης και προσανατολισμού) που πραγματοποιείται ανάμεσα σε δυο στιγμιότυπα όπως αναγνωρίζεται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking".

Εφόσον, τα πλαίσια {H} και {T} έχουν όμοιο προσανατολισμό αρκεί να αποσταλεί στον ελεγκτή εντολή μεταβολή κίνησης, η οποία περιγράφεται από τον ομογενή  $g_{\Delta}$ , και η κίνηση να εκτελεστεί ως προς το πλαίσιο {T}. Έστω λοιπόν ότι,  $g_{BT}(t_i)$  ο ομογενής μετασχηματισμός που περιγράφει το πλαίσιο {T} ως προς την βάση του βραχίονα την χρονική στιγμή  $t$  ενώ με  $g_{BT}(t_{i+1})$  ο ομογενής μετασχηματισμός για την χρονική στιγμή  $t+1$  και  $g_{\Delta}$  ο ΟΜ της 5.3, τότε ισχύει ότι:

$$g_{BT}(t_{i+1}) = g_{BT}(t_i)g_{\Delta} \quad 5.4$$

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα μιμείται την κίνηση της παλάμης του χρήστη. Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια τηλεχειρισμού του βραχίονα RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking".

### 5.3 Αλγόριθμος Α τηλεχειρισμού RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking"

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού για τον βραχίονα RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Επίσης, παρουσιάζεται το κριτήριο επιλογής σημείων προς επεξεργασία, η διαδικασία με την οποία επιλέχθηκαν οι ρυθμίσεις του βραχίονα καθώς και η πειραματική αποτίμηση του αλγορίθμου. Η κίνηση που παράγεται από το τελικό στοιχείο δράσης αποτελεί μίμηση της κίνησης της παλάμης του χρήστη. Με τον αλγόριθμο που παρουσιάζεται παρακάτω **εξασφαλίζεται ότι η κίνηση που εκτελείται από το τελικό στοιχείο δράσης θα έχει την ίδια διάρκεια με την φυσική κίνηση του χρήστη**. Δηλαδή, οι δυο κινήσεις θα ολοκληρωθούν μαζί.

#### 5.3.1 Κριτήριο επιλογής σημείων

Κατά την διάρκεια ανάπτυξης του αλγορίθμου παρατηρήθηκε ότι αν αποστέλλονται όλα τα σημεία που αναγνωρίζονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" ως εντολή κίνησης στον ελεγκτή του βραχίονα, τότε η κίνηση που αναπαράγεται από το βραχίονα έχει πολύ μεγαλύτερη διάρκεια από την πραγματική. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να μην αποστέλλονται όλα τα σημεία που αναγνωρίζονται από την εφαρμογή στον ελεγκτή αλλά να γίνεται μια δειγματοληψία των σημείων. Στον αλγόριθμο που παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή, το κριτήριο επιλογής των σημείων αποτελεί η κατάσταση του βραχίονα. Πιο συγκεκριμένα, αν το τελικό στοιχείο δράσης βρίσκεται εν κινήσει τότε το σημείο που εξετάζεται από τον αλγόριθμο αγνοείται και ο αλγόριθμος συνεχίζει με το επόμενο σημείο. Διαφορετικά, αν το τελικό στοιχείο δράσης δεν κινείται τότε αποστέλλεται εντολή κίνησης στον ελεγκτή του βραχίονα. Η εντολή κίνησης προκύπτει σύμφωνα με τη μεταβολή που έχει προκύψει από την τελευταία γνωστή θέση που τοποθετήθηκε το τελικό στοιχείο δράσης σε σύγκριση με το τρέχον σημείο που εξετάζεται από τον αλγόριθμο.

Στην συνέχεια περιγράφεται ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού του βραχίονα. Υπενθυμίζεται ότι, το τελικό στοιχείο δράσης αναπαριστά την ανθρώπινη παλάμη και συνεπώς οι κινήσεις που αναπαράγονται από αυτό στόχο έχουν να αποτελούν μίμηση της κίνησης της παλάμης του χρήστη.

#### 5.3.2 Περιγραφή αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού του βραχίονα RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" αποτελείται από 14 βήματα. Εκ των οποίων τα δυο πρώτα βήματα αφορούν την έναρξη της εφαρμογής "3D Hand Tracking" και την αποκατάσταση της

σειριακής επικοινωνίας μεταξύ ελεγκτή του βραχίονα (MELFA CR1-571) και του λογισμικού MATLAB.

Συνοπτικά ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: Εκκινείται η εφαρμογή "3D Hand Tracking" και γίνεται αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή του βραχίονα με το MATLAB. Η εκκίνηση του αλγόριθμου τηλεχειρισμού στο MATLAB γίνεται (χειροκίνητα) όταν η εφαρμογή "3D Hand Tracking" βρεθεί σε θέση αναμονής [Εικόνα 3.3(α)]. Κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου εισάγονται δεδομένα στο περιβάλλον (workspace) του MATLAB. Αυτά εισάγονται από το αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" και αντιστοιχούν στις μεταβλητές οι οποίες περιγράφουν την γεωμετρική διαμόρφωση του ανθρώπινου χεριού (Εικόνα 3.1). Προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του αλγορίθμου είναι η **αρχικοποίηση του ανθρώπινου χεριού στην εφαρμογή να συμβαίνει αμέσως μετά την έναρξη του αλγορίθμου τηλεχειρισμού**. Τέλος, ο αλγόριθμος εισέρχεται στον κύριο βρόχο επανάληψης, όπου για κάθε στιγμιότυπο επιλέγονται οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης, επεξεργάζονται κατάλληλα και αποστέλλονται στον ελεγκτή του βραχίονα ώστε το τελικό στοιχείο δράσης του να αναπαράγει την κίνηση του χρήστη. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικότερα η διαδικασία μέσω βημάτων τα οποία απεικονίζονται και στο διάγραμμα ροής [Εικόνα 5.9].

**Βήμα 1. Έναρξη της εφαρμογής "3D Hand Tracking":** Έναρξη της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης του χεριού αποθηκεύονται συνεχώς σε ένα αρχείο δεδομένων μαζί με το χρονικό διάστημα (Δt) που διανύεται μεταξύ δυο διαδοχικών στιγμιότυπων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καταγραφή αυτή συμβαίνει ακόμα και κατά την διάρκεια στην οποία η εφαρμογή βρίσκεται σε λειτουργία αναμονής-αρχικοποίησης. Όταν, δηλαδή, έχουν ολοκληρωθεί οι αρχικοποιήσεις της εφαρμογής "3D Hand Tracking" και έχει εμφανιστεί το εικονικό χέρι στο παράθυρο της εφαρμογής [Εικόνα 3.3(α)]. Όταν ολοκληρωθούν οι αρχικοποιήσεις της εφαρμογής και αυτή βρεθεί σε θέση αναμονής/αρχικοποίησης, τότε εκκινείται (χειροκίνητα) ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού στο MATLAB ("Βήμα 3").

**Βήμα 2. Επικοινωνία ελεγκτή βραχίονα RV2A (MELFA CR1-571) με MATLAB:** Ο ελεγκτής συνδέεται μέσω σειριακής θύρας με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Συνεπώς, κατά την εκκίνηση του λογισμικού MATLAB απαιτείται η αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ MATLAB και ελεγκτή RV2A. Η διαδικασία αυτή απαιτείται κάθε φορά που πραγματοποιείται εκκίνηση του λογισμικού MATLAB.

**Βήμα 3. Έναρξη αλγορίθμου (MATLAB):** Προϋπόθεση για την εκκίνηση του αλγορίθμου τηλεχειρισμού στο MATLAB αποτελεί η εφαρμογή "3D Hand Tracking" να

βρίσκεται σε θέση αναμονής ("Βήμα 1") και η ολοκλήρωση της αποκατάστασης της σειριακής επικοινωνίας ("Βήμα 2"). Αρχικά, δίνεται εντολή στον ελεγκτή του βραχίονα, ώστε να μεταβεί το τελικό στοιχείο δράσης του σε συγκεκριμένη θέση και με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Η θέση αυτή αποτελεί την θέση αρχικοποίησης του βραχίονα [Εικόνα 5.8]. Έπειτα, γνωστοποιείται η διαδρομή αποθήκευσης (path) των δεδομένων που εξάγονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" και διαγράφονται όσα δεδομένα έχουν καταγραφεί μέχρι στιγμής. Αυτό συμβαίνει, ώστε να υπάρχουν δεδομένα από την χρονική στιγμή που εκκινείται ο αλγόριθμος (στο MATLAB) και έπειτα. Τέλος, αρχικοποιούνται οι μεταβλητές που απαιτούνται για την σωστή λειτουργία του αλγόριθμου.

Πλέον, ο χρήστης έχει την δυνατότητα αρχικοποίησης του ανθρώπινου χεριού στην εφαρμογή "3D Hand Tracking" με στόχο τον τηλεχειρισμό του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα.

**Βήμα 4. Ανάγνωση δεδομένων από αρχείο:** Εισάγονται όσα δεδομένα έχουν καταγραφεί από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" από το αρχείο δεδομένων στο περιβάλλον του MATLAB.

**Βήμα 5. Επιλογή δεδομένων:** Επιλέγονται οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης για το 1<sup>ο</sup> στιγμιότυπο και δημιουργείται ο ομογενής πίνακας  $g_{KH}$ , ο οποίος χρησιμοποιείται για την εύρεση του ομογενή πίνακα  $g_{\Delta}$ .

*Στο επόμενο βήμα ο αλγόριθμος εισέρχεται στο κύριο βρόχο επανάληψης του αλγόριθμου. Στην πρώτη επανάληψη ο μετρητής  $i$  έχει τιμή ίση με δυο.*

#### **Κύριος βρόχος επανάληψης:**

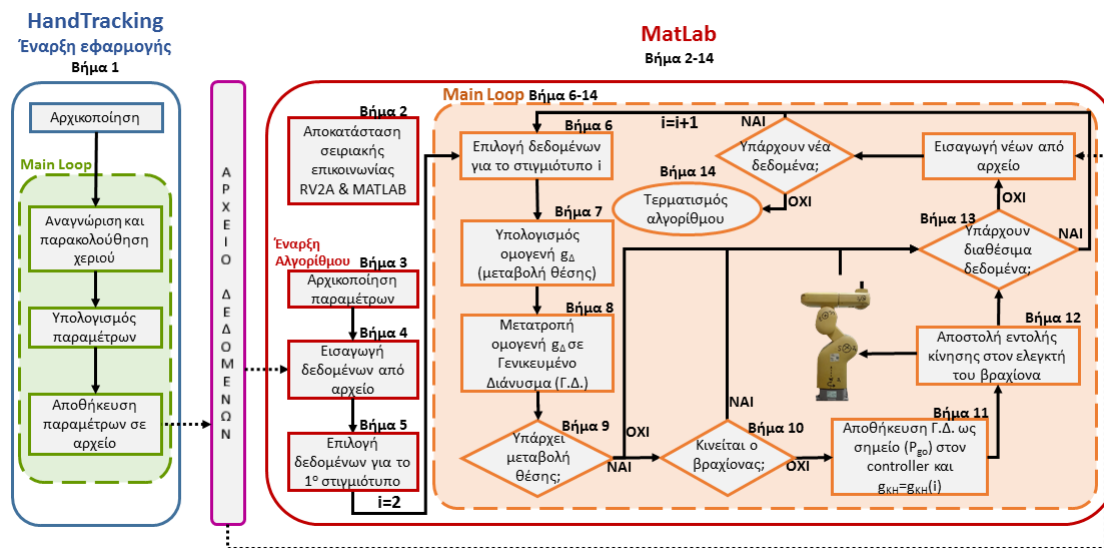
**Βήμα 6. Επιλογή δεδομένων:** Επιλέγονται τα δεδομένα γεωμετρικής διαμόρφωσης για το στιγμιότυπο  $i$ .

**Βήμα 7. Υπολογισμός μεταβολής θέσης και προσανατολισμού:** Υπολογίζεται ο ομογενής μετασχηματισμός  $g_{KH}(t_i)$ , ο οποίος περιγράφει τον ομογενή μετασχηματισμό για το στιγμιότυπο  $i$ . Έπειτα, με χρήση των ομογενών πινάκων  $g_{KH}$  και  $g_{KH}(t_i)$  υπολογίζεται ο ομογενής  $g_{\Delta}$ , ο οποίος περιγράφει την μεταβολή θέσης και προσανατολισμού που προκύπτει από τους δυο ομογενείς σύμφωνα με την σχέση  $g_{\Delta} = g_{KH}^{-1} g_{KH}(t_i)$ .

**Βήμα 8. Μετατροπή OM  $g_{\Delta}$  σε ΓΔ:** Ο ομογενής μετασχηματισμός  $g_{\Delta}$  μετατρέπεται σε γενικευμένο διάνυσμα. Αυτό γίνεται επειδή στον ελεγκτή του βραχίονα τα σημεία αποστέλλεται με την μορφή και επίσης είναι πιο απλό να ελεγχθεί το μέγεθος της μεταβολής σε ένα διάνυσμα έξι μεταβλητών από ότι σε έναν ομογενή μετασχηματισμό.



**Βήμα 9. Έλεγχος μεταβολής θέσης κ προσανατολισμού:** Ελέγχεται αν υπάρχει μεταβολή της κατάστασης (θέση και προσανατολισμός) μεγαλύτερη του κατωφλίου που έχει οριστεί. Η σύγκριση γίνεται ως προς την τελευταία γνωστή κατάσταση ( $g_{KH}$ ), η οποία αποτελεί παράλληλα και την τρέχουσα κατάσταση του τελικού στοιχείου δράσης. Αν υπάρχει επαρκής μεταβολή ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα. Διαφορετικά, η ροή του αλγόριθμου συνεχίζεται στο "Βήμα 13".



Εικόνα 5.9: Διάγραμμα ροής τηλεχειρισμού RV2A

**Βήμα 10. Έλεγχος κατάστασης βραχίονα:** Ελέγχεται η κατάσταση του βραχίονα. Αν ο βραχίονας δεν κινείται, τότε ο αλγόριθμος συνεχίζει στο επόμενο βήμα. Διαφορετικά, αν ο βραχίονας βρίσκεται εν κινήσει ο αλγόριθμος προχωράει στο «Βήμα 13».

**Βήμα 11. Αποστολή ΓΔ στον ελεγκτή του βραχίονα:** Το γενικευμένο διάνυσμα αποθηκεύεται στον ελεγκτή του βραχίονα ως σημείο με την ονομασία  $P_{go}$ . Παράλληλα ο ομογενής μετασχηματισμός  $g_{KH}$  αντικαθίσταται από τον ομογενή μετασχηματισμό  $g_{KH}(t_i)$  δηλαδή,  $g_{KH} = g_{KH}(t_i)$ .

**Βήμα 12. Εντολή κίνησης:** Αποστέλλεται εντολή στον ελεγκτή του βραχίονα, ώστε το τελικό άκρο δράσης του να κινηθεί σύμφωνα με το αποθηκευμένο διάνυσμα, το οποίο περιγράφει την μεταβολή θέσης και προσανατολισμού. Έπειτα ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα.

**Βήμα 13. Έλεγχος διαθέσιμων δεδομένων:** Πραγματοποιείται έλεγχος για την διαθεσιμότητα δεδομένων γεωμετρικής διαμόρφωσης στο περιβάλλον του λογισμικού MATLAB. Αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα τότε ο μετρητής  $i$  αυξάνεται κατά μια μονάδα και ο αλγόριθμος προχωράει στο "Βήμα 6".

Αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, τότε γίνεται προσπάθεια εισαγωγής/ανάγνωσης των δεδομένων που έχουν καταγραφεί μέχρι στιγμής από την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Αν διαπιστωθεί η εισαγωγή νέων δεδομένων, τότε ο μετρητής  $i$  αυξάνεται κατά μια μονάδα και ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού (MATLAB) προχωράει στο "Βήμα 6". Διαφορετικά, ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα.

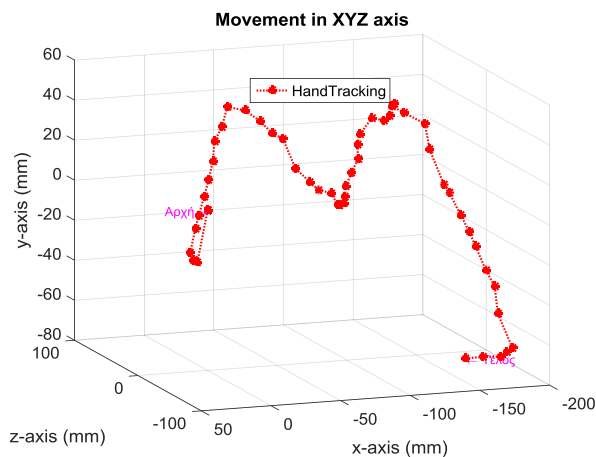
**Βήμα 14. Τερματισμός αλγορίθμου:** Εμφανίζεται μήνυμα τέλους στο Command Window του λογισμικού MATLAB και ολοκληρώνεται η εκτέλεση του αλγορίθμου.

Με τον αλγόριθμο τηλεχειρισμού ο βραχίονας έχει την δυνατότητα να κινηθεί σε όλο το εύρος στον χώρο εργασίας του (workspace). Προϋπόθεση είναι να μην δοθεί εντολή στον ελεγκτή να μεταβεί σε σημείο εκτός χώρου εργασίας. Αν δοθεί εντολή στον βραχίονα για να μεταφερθεί σε σημείο εκτός χώρου εργασίας (θέση ή προσανατολισμό) τότε η εκτέλεση του αλγορίθμου στο λογισμικό MATLAB τερματίζεται και εμφανίζεται μήνυμα λάθους στον ελεγκτή του βραχίονα καθώς και στο command window του λογισμικού MATLAB.

### 5.3.3 Ρυθμίσεις βραχίονα RV2A

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι σημαντικό ρόλο στην σωστή λειτουργία του αλγορίθμου έχουν οι ρυθμίσεις του βραχίονα που σχετίζονται με την ταχύτητα, την επιτάχυνση και την επιβράδυνση τόσο του τελικού στοιχείου δράσης όσο και των αρθρώσεων. Οι ρυθμίσεις του βραχίονα οι οποίες επηρεάζουν την συμπεριφορά του και υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης τους μέσω του λογισμικού MATLAB είναι οι SPD, ACCEL, OVRD και JOVRD οι οποίες περιγράφονται παρακάτω. Οι τιμές των ρυθμίσεων αυτών δεν πρέπει να είναι χαμηλές διότι χάνονται πολλά σημεία και η κίνηση που εκτελείται δεν αποτελεί μίμηση της αρχικής κίνησης, ούτε υψηλές διότι το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα πραγματοποιεί σπασμωδικές κινήσεις. Τέλος, σημειώνεται ότι ο βραχίονας επιλέχθηκε να κινείται με την εντολή MOV, η οποία χρησιμοποιείται για κίνηση ελεύθερης παρεμβολής.

Παρακάτω απεικονίζεται η κίνηση που επιλέχθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων και την επιλογή των ρυθμίσεων. Τα πειράματα διεξάχθηκαν με διαφορετικές ρυθμίσεις κάθε φορά. Σημειώνεται ότι για την παρακάτω κίνηση έχουν ανιχνευτεί 62 συνολικά σημεία από την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Τέλος, για κάθε πείραμα παρατίθενται μόνο τα διαγράμματα μετατόπισης για τον άξονα Y, τα διαγράμματα μετατόπισης και περιστροφής ως προς τους άξονες XYZ παρατίθενται συνολικά στο παράρτημα [Παράρτημα Β – Διαγράμματα].

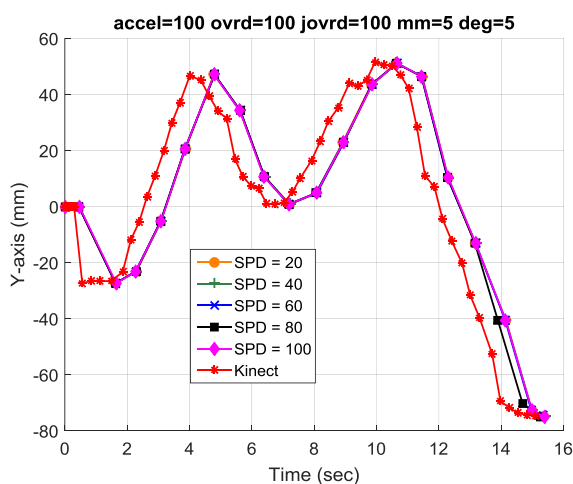


Εικόνα 5.10: Πειραματική κίνηση για την επιλογή των ρυθμίσεων

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα από τα πειράματα. Σημαντικό κριτήριο για την επιλογή των τελικών ρυθμίσεων αποτελεί το πλήθος των σημείων το οποίο αποστέλλεται στον ελεγκτή του βραχίονα.

### Πείραμα 1. Μεταβολή της SPD.

Μέσω της συνάρτησης SPD προσδιορίζεται η μέγιστη ταχύτητα που επιτρέπεται να αποκτήσει το τελικό στοιχείο δράσης για γραμμική και κυκλική κίνηση με αριθμητική τιμή mm/s.



Εικόνα 5.11: Μετατόπιση στον άξονα Y

Ρυθμίσεις:  
ACCEL=100%, OVRD=100% &  
JOVRD=100%

Αποτελέσματα:

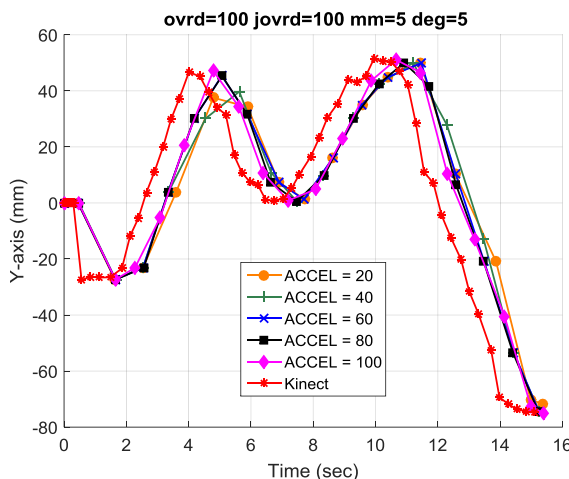
SPD (mm/sec)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
20	20	15.36
40	20	15.36
60	20	15.36
80	20	15.38
100	20	15.25

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα η τιμή ρύθμισης της ταχύτητας SPD δεν επηρεάζει την απόδοση του συστήματος. Αυτό ήταν αναμενόμενο, διότι το τελικό στοιχείο δράσης δεν κινείται με γραμμική ή κυκλική κίνηση, κινείται σε πορεία ελεύθερης παρεμβολής. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (Μεταβολή της SPD, Αλγ. Α). Το πλήθος των σημείων το οποίο αποστέλλεται στον ελεγκτή παραμένει σταθερό και ανέρχεται στο σύνολο των 20 σημείων (από την εφαρμογή αναγνωρίστηκαν

62 σημεία). Η SPD θα παραμείνει με την προεπιλεγμένη τιμή η οποία είναι 100 (mm/sccec) και δεν θα εξεταστεί περαιτέρω.

### Πείραμα 2. Μεταβολή της ACCEL

Μέσω της συναρτήσεως ACCEL ρυθμίζεται τόσο η επιτάχυνση όσο και η επιβράδυνση του τελικού άκρου δράσης, ανεξάρτητα. Για λόγους απλοποίησης επιλέχθηκε η επιτάχυνση και η επιβράδυνση να έχουν την ίδια επί τοις εκατό τιμή. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (Μεταβολή της ACCEL, Αλγ. Α).



Εικόνα 5.12: Μετατόπιση στον άξονα Y

Ρυθμίσεις:  
OVRD=100% & JOVRD=100%

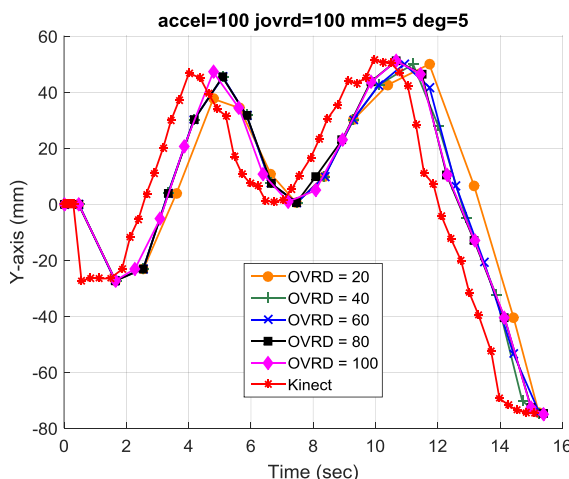
Αποτελέσματα:

ACCEL (%)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
20	17	15,26
40	17	15,23
60	18	15,26
80	19	15,34
100	20	15,35

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι όσο η επιτάχυνση και η επιβράδυνση μειώνονται μειώνεται και το πλήθος των σημείων το οποίο αποστέλλεται στον ελεγκτή.

### Πείραμα 3. Μεταβολή της OVRD

Μέσω της συνάρτησης OVRD προσδιορίζεται το ποσοστό (Override\_per) της μέγιστης ταχύτητας που μπορεί να αποκτήσει το τελικό στοιχείο δράσης. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (Μεταβολή της OVRD, Αλγ. Α).



Εικόνα 5.13: Μετατόπιση στον άξονα Y

Ρυθμίσεις:  
ACCEL=100% & JOVRD=100%

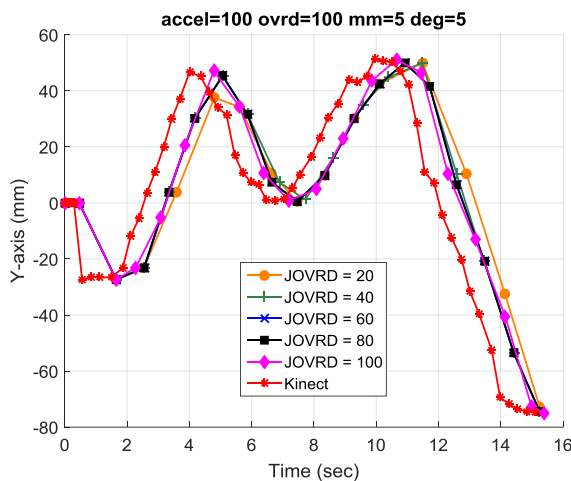
Αποτελέσματα:

OVRD (%)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
20	16	15,25
40	19	15,24
60	19	15,25
80	20	15,37
100	20	15,35

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα που συνοδεύει το διάγραμμα παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η επί τοις εκατό τιμή της ρύθμισης OVRD τόσο μειώνονται και τα σημεία τα οποία αποστέλλονται στον ελεγκτή.

#### Πείραμα 4. Μεταβολή της JOVRD

Τέλος, μέσω της συνάρτησης JOVRD προσδιορίζεται το ποσοστό της μέγιστης ταχύτητας κίνησης που μπορούν να αποκτήσουν οι αρθρώσεις. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (Μεταβολή της JOVRD, Αλφ. Α).



Εικόνα 5.14: Μετατόπιση στον άξονα Y

Ρυθμίσεις:  
ACCEL=100% & OVRD=100%

Αποτελέσματα:

JOVRD (%)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
20	16	15,25
40	18	15,26
60	19	15,26
80	19	15,37
100	20	15,35

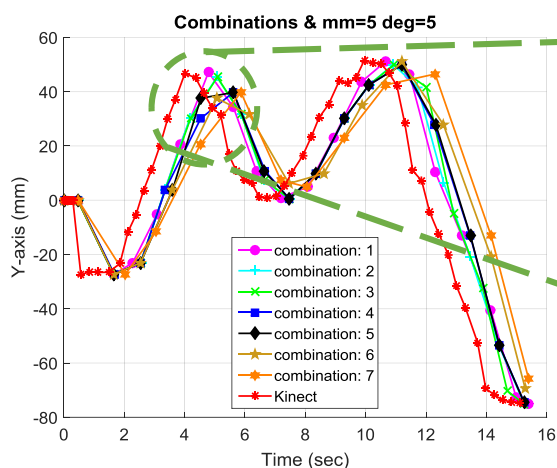
Παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η επί τοις εκατό τιμή της ρύθμισης JOVRD τόσο μειώνονται και τα σημεία τα οποία αποστέλλονται στον ελεγκτή.

Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας με ρυθμίσεις για διάφορες προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν, καθώς και με τα αποτελέσματα για κάθε συνδυασμό. Στην συνέχεια παρατίθεται ένα συνολικό διάγραμμα για τις προσομοιώσεις που έγιναν σύμφωνα με τον πίνακα.

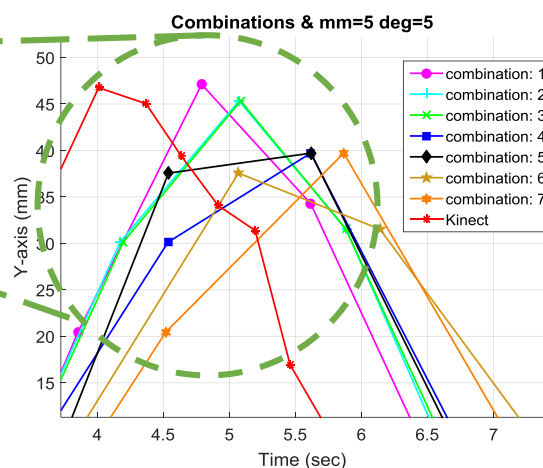
Πίνακας 5.1: Ρυθμίσεις βραχίονα RV2A

Combination	ACCEL (%)	OVRD (%)	JOVRD (%)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
1	100	100	100	20	15,38
2	80	100	100	19	15,36
3	80	80	80	19	15,24
4	80	60	60	17	15,24
5	60	60	60	17	15,24
6	60	40	40	14	15,27
7	40	40	40	13	15,25

Στην παρακάτω εικόνα παρατίθενται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση για τον παραπάνω πίνακα. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (Combinations).



Εικόνα 5.15: Μετατόπιση στον άξονα Y



Εικόνα 5.16: Μετατόπιση στον άξονα Y

Από τους παραπάνω συνδυασμούς που μελετήθηκαν (Πίνακας 5.1), επιλέχθηκε ο τρίτος συνδυασμός (ACCEL=80, OVRD=80, JOVRD=80) ο οποίος χρησιμοποιείται για την λειτουργία του αλγορίθμου. Αυτός επιλέχθηκε διότι τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και οι κινήσεις που εκτελούνται από το τελικό στοιχείο δράσης δεν είναι τόσο σπασμωδικές όσο με υψηλότερες τιμές των ρυθμίσεων.

#### 5.3.4 Πειραματική αποτίμηση τηλεχειρισμού RV2A για τον αλγόριθμο A

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η πειραματική αποτίμηση για τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε για τηλεχειρισμό του βραχίονα RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην πορεία που διαγράφει το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα καθώς κινείται. Η κίνηση που προκύπτει αποτελεί **μίμηση της κίνησης της παλάμης του χρήστη**. Οι ρυθμίσεις του βραχίονα είναι αυτές που επιλέχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Για την εξαγωγή των πειραμάτων αυτών ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω.

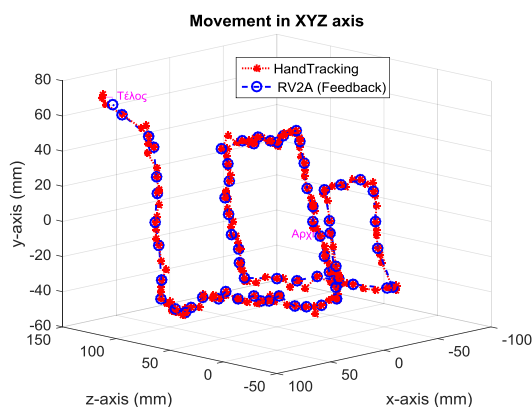
Αρχικά, εκκινείται η εφαρμογή "3D Hand Tracking και γίνεται αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας με το βραχίονα RV2A. Έπειτα εκκινείται (χειροκίνητα) ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού (MATLAB). Ακολούθως, το ανθρώπινο χέρι τοποθετείται απέναντι από τον αισθητήρα Kinect ώστε να γίνει αρχικοποίηση αυτού στην εφαρμογή "3D Hand Tracking" (Εικόνα 3.3). Τέλος, ο χρήστης διαγράφει με την παλάμη του την επιθυμητή πορεία. Οι παράμετροι θέσης και προσανατολισμού της παλάμης υπολογίζονται και καταγράφονται συνεχώς από την εφαρμογή. Μέσω του αλγορίθμου που παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή, οι παράμετροι επεξεργάζονται και μετατρέπονται

σε κατάλληλες εντολές για να αποστέλλονται στον ελεγκτή του βραχίονα. Ο ελεγκτής στέλνει το άκρο στην επιθυμητή θέση και προσανατολισμό.

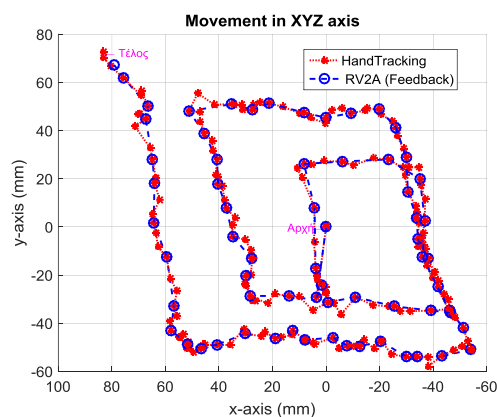
Η κίνηση της παλάμης του χρήστη, από την θέση αρχικοποίησης στην επιθυμητή θέση, πραγματοποιείται με ομαλή ταχύτητα. Αυτό συμβαίνει ώστε, να παρέχεται το χρονικό διάστημα που απαιτείται από την εφαρμογή για τον υπολογισμό και αποθήκευση των παραμέτρων, καθώς και για να δίδεται ο χρόνος που απαιτείται για να εκτελεστεί η εντολή από τον βραχίονα.

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα για τρεις διαφορετικές πορείες. Στο πρώτο πείραμα διαγράφεται μια πορεία σε τρία επίπεδα (με σταθερό προσανατολισμό), στο δεύτερο πείραμα παρουσιάζεται περιστροφή γύρω από έναν άξονα και στο τρίτο πείραμα διαγράφεται ταυτόχρονα περιστροφή και μετατόπιση. Για κάθε πείραμα παρατίθενται οκτώ διαγράμματα. Στο πρώτο διάγραμμα απεικονίζεται η κίνηση στο χώρο στο δεύτερο απεικονίζεται η προβολή της κίνησης σε δισδιάστατο διάγραμμα και τέλος στα επόμενα απεικονίζεται η μετατόπιση και η περιστροφή γύρω από κάθε άξονα ως προς το χρόνο. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η κίνηση της ανθρώπινης παλάμης, όπως ανιχνεύθηκε από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" και με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η ανάδραση από τον βραχίονα για την πορεία του άκρου.

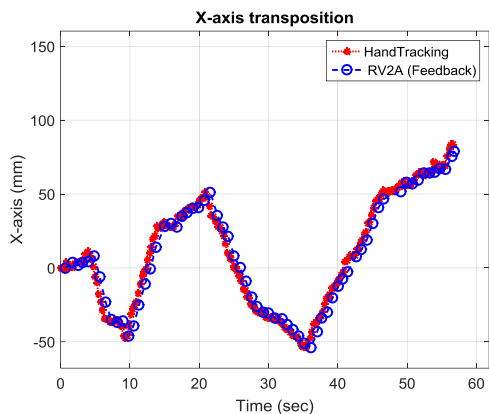
**Πείραμα 1: Κίνηση σε τρία επίπεδα.** Στο πείραμα αυτό διαγράφεται μια σπειροειδής κίνηση από την παλάμη του χρήστη δημιουργώντας τρία παράλληλα επίπεδα, με την παλάμη να διατηρεί σταθερό προσανατολισμό κατά την διάρκεια των πειραμάτων (όσο αυτό είναι εφικτό). Από την κίνηση του χρήστη δημιουργούνται παράλληλα τετράγωνα τα οποία σχηματίζονται σε διαφορετικό επίπεδο ως προς τον άξονα Z. Η κίνηση όπως φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα είναι διάρκειας, περίπου, 60 δευτερολέπτων.



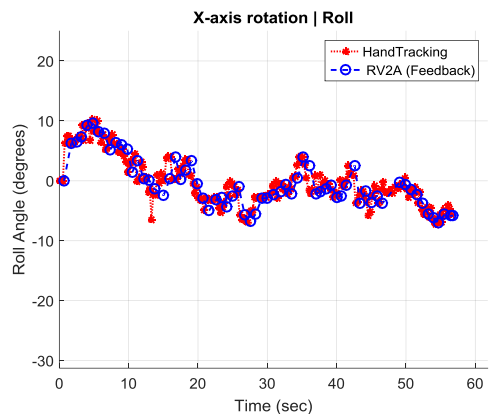
Εικόνα 5.17: Πορεία στο χώρο



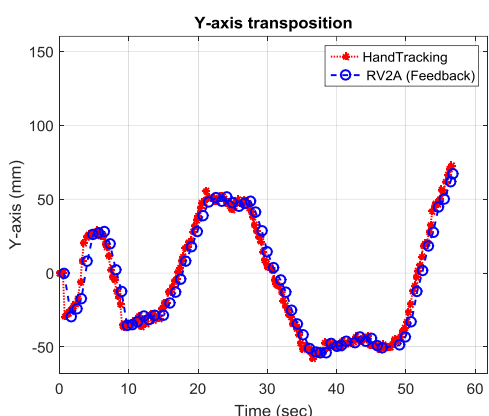
Εικόνα 5.18: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY



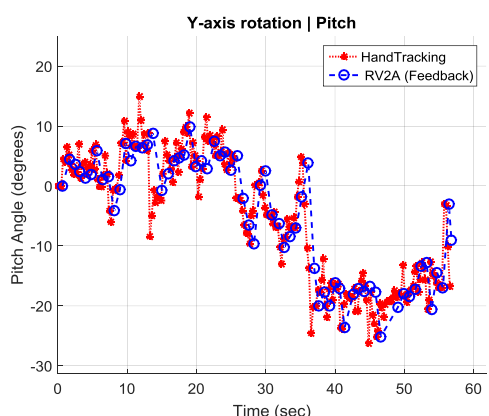
Εικόνα 5.19: Μετατόπιση στον άξονα X



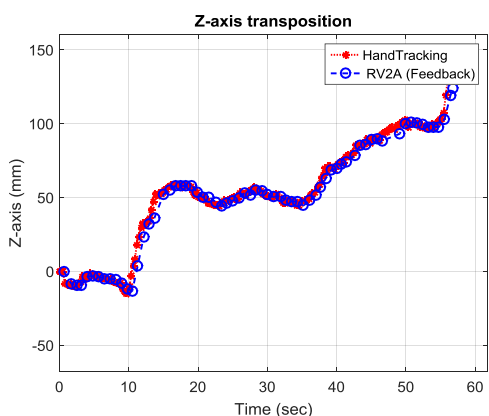
Εικόνα 5.20: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



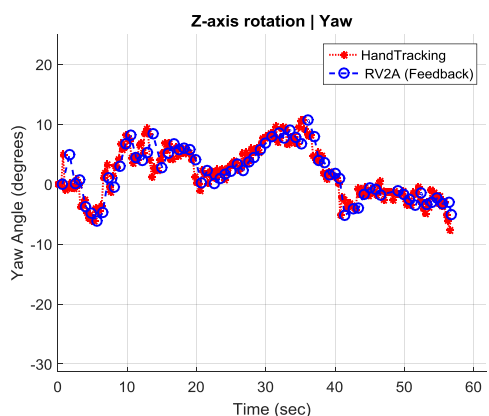
Εικόνα 5.21: Μετατόπιση στον άξονα Y



Εικόνα 5.22: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y



Εικόνα 5.23: Μετατόπιση στον άξονα Z

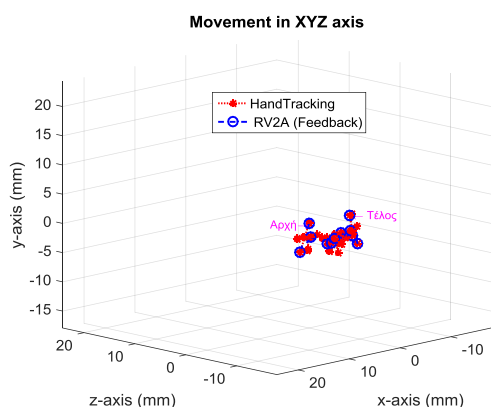


Εικόνα 5.24: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

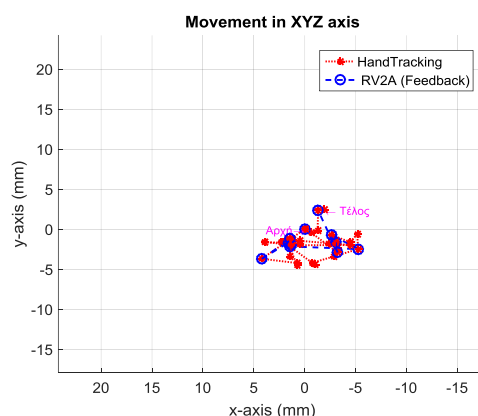
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η μετακίνηση της παλάμης του χρήστη προς όλες τις κατευθύνσεις (εμφανίζεται μετατόπιση και στους τρεις άξονες). Επίσης, παρατηρείται μικρή περιστροφή της παλάμης η οποία αποδίδεται είτε στην εκτίμηση της εφαρμογής, είτε σε ανθρώπινο λάθος. Τέλος, η κίνηση που πραγματοποιείται από το τελικό στοιχείο δράσης αποτελεί μίμηση της κίνησης ανθρώπινης παλάμης χωρίς να εμφανίζεται μεγάλη χρονική καθυστέρηση.



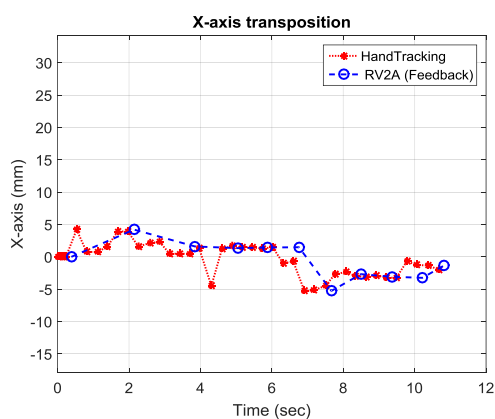
**Πείραμα 2: Περιστροφή γύρω από έναν άξονα.** Στο πείραμα αυτό ο χρήστης περιστρέφει την παλάμη του γύρω τον άξονα Y του πλαισίου {H} (Εικόνα 5.7), χωρίς να μετατοπίζεται το κέντρο της παλάμης. Η κίνηση όπως φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα είναι διάρκειας, περίπου, 10 δευτερολέπτων.



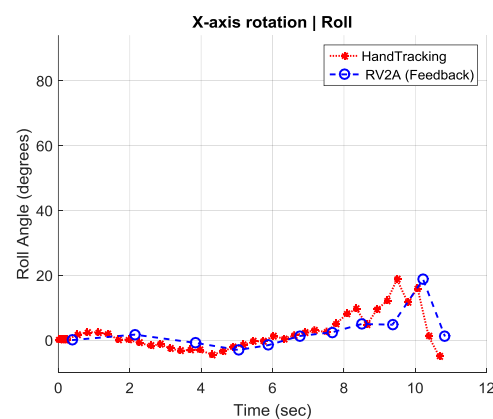
Εικόνα 5.25: Πορεία στο χώρο



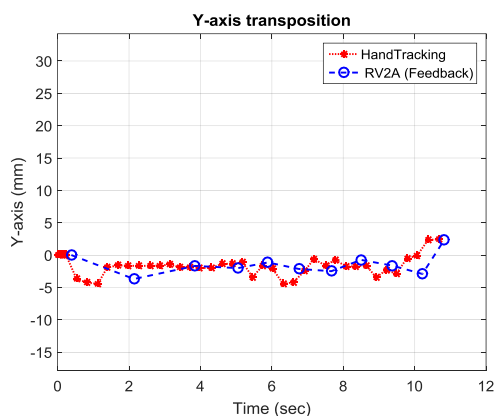
Εικόνα 5.26: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY



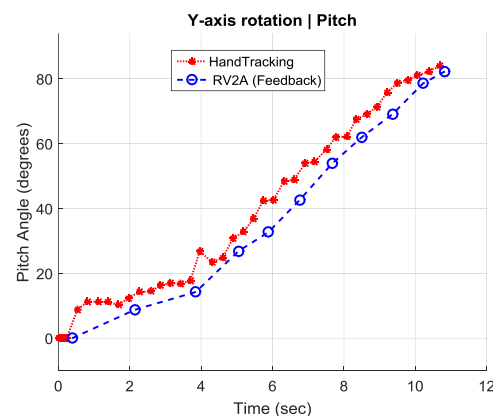
Εικόνα 5.27: Μετατόπιση στον άξονα X



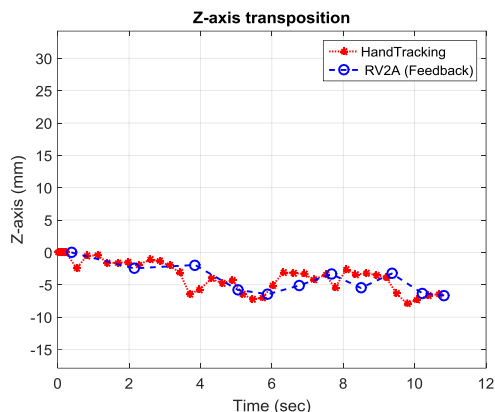
Εικόνα 5.28: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



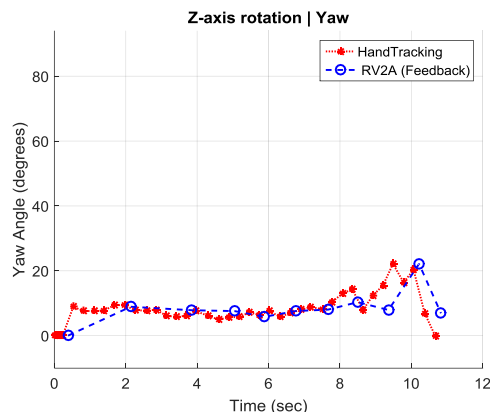
Εικόνα 5.29: Μετατόπιση στον άξονα Y



Εικόνα 5.30: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y



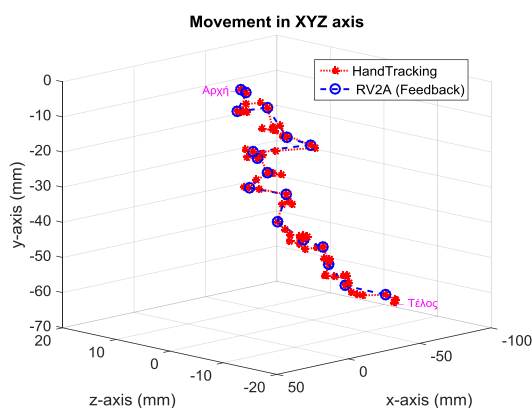
Εικόνα 5.31: Μετατόπιση στον άξονα Z



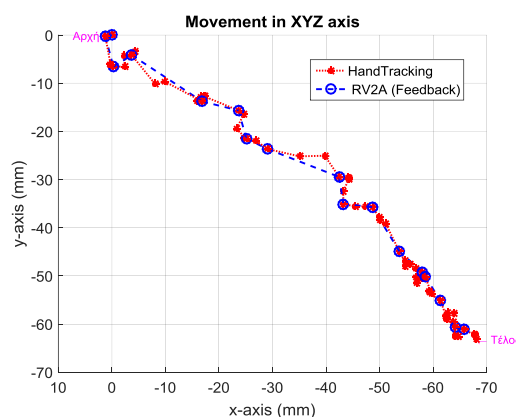
Εικόνα 5.32: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

Σε αυτό το πείραμα το ανθρώπινο χέρι υλοποιεί μια περιστροφή στον άξονα Y του πλαισίου {H} χωρίς να μετακινηθεί ή να περιστραφεί ως προς κάποιον άλλο άξονα. Η μετατόπιση στους άξονες είναι πολύ μικρή και η περιστροφή υλοποιήθηκε στον άξονα Y χωρίς να αλλάξει ιδιαίτερα ο προσανατολισμός ως προς τους άξονες XZ. Η μεταβολή που φαίνεται στους άξονες αυτούς αποδίδεται είτε στην εκτίμηση της εφαρμογής είτε σε ανθρώπινο λάθος. Το τελικό στοιχείο δράσης μμείται την κίνηση της παλάμης του χρήστη ικανοποιητικά, τόσο στην κίνηση όσο και στο χρονικό διάστημα στο οποίο πραγματοποιήθηκε αυτή.

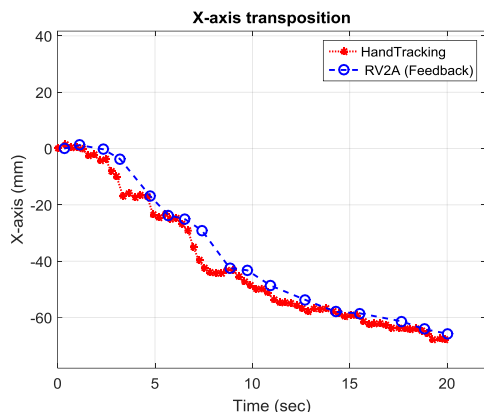
**Πείραμα 3: Διαγραφή τόξου γύρω από άξονα.** Σε αυτό το πείραμα ο χρήστης μετακινεί την παλάμη διαγράφοντας ένα τόξο γωνίας περίπου  $70^\circ$  ως από τον άξονα Z, το τόξο σχηματίζεται στο επίπεδο XY.



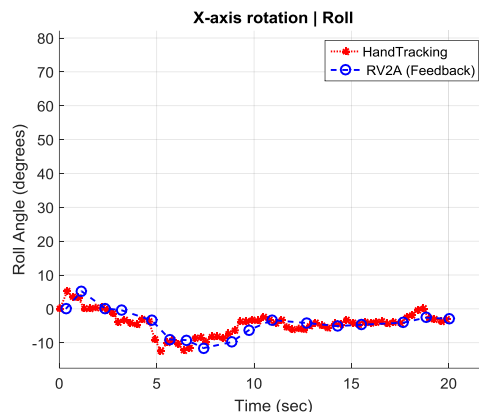
Εικόνα 5.33: Πορεία στο χώρο



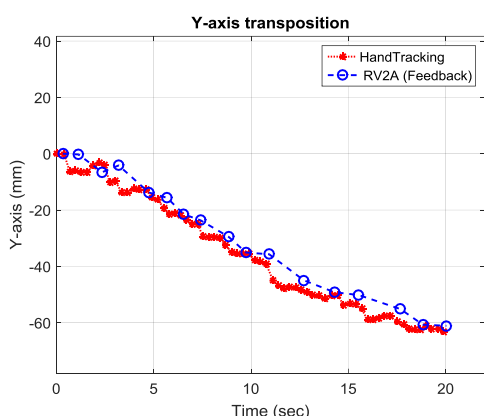
Εικόνα 5.34: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY



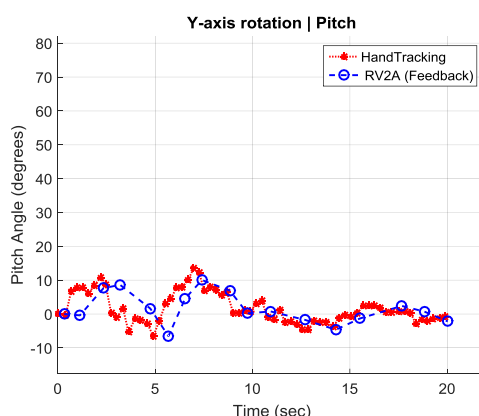
Εικόνα 5.35: Μετατόπιση στον άξονα X



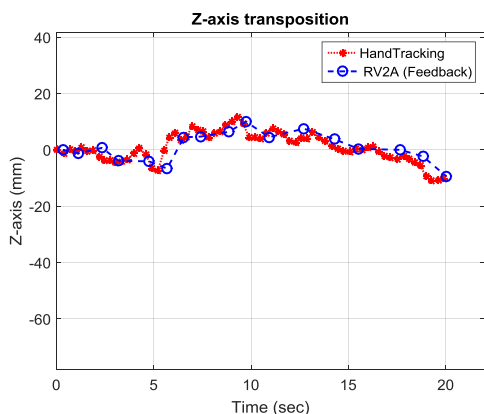
Εικόνα 5.36: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



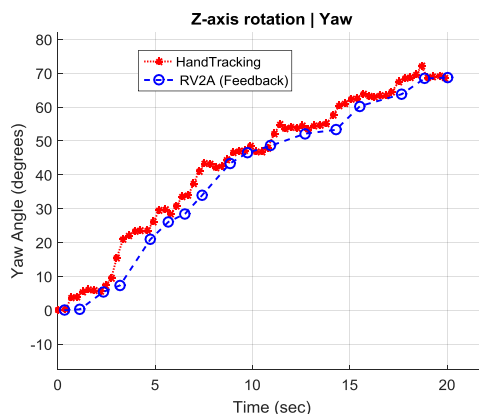
Εικόνα 5.37: Μετατόπιση στον άξονα Y



Εικόνα 5.38: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y



Εικόνα 5.39: Μετατόπιση στον άξονα Z



Εικόνα 5.40: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

Η κίνηση αυτή διαρκεί περίπου 20 δευτερόλεπτα και εμπλέκεται μεταβολή περιστροφής και μετατόπισης ταυτόχρονα. Όπως είναι εμφανές από τα παραπάνω διαγράμματα, το τελικό στοιχείο δράσης μιμείται την κίνηση του χρήστη.

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παρούσας ενότητας ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε εξασφαλίζει ότι η κίνηση που αναπαράγεται από το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα έχει την ίδια διάρκεια με την κίνηση της παλάμης του χρήστη.

Επίσης, με τον αλγόριθμο αυτό ο βραχίονας μένει ακίνητος για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αφού μόλις ολοκληρωθεί μια κίνηση δέχεται εντολή για επόμενη κίνηση. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται ο αλγόριθμος B, με τον οποίο εξασφαλίζεται ότι η παραγόμενη κίνηση από το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα αποτελεί μίμηση της πραγματικής κίνησης της παλάμης του χρήστη. Αυτό συμβαίνει ακόμα και αν η παραγόμενη κίνηση έχει μεγαλύτερη διάρκεια από ότι η πραγματική.

#### 5.4 Αλγόριθμος B τηλεχειρισμού RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking"

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο αλγόριθμος B, με τον οποίο εξασφαλίζεται ότι **η πορεία που παράγεται από το τελικό στοιχείο δράσης όμοια με αυτή του χρήστη ακόμα και αν έχει μεγαλύτερη διάρκεια από ότι η πραγματική**. Η διαφορά ανάμεσα στους δυο αλγόριθμους έγκειται στο κριτήριο επιλογής των σημείων που αποστέλλονται στον ελεγκτή, το οποίο αναλύεται παρακάτω. Οι δυο αλγόριθμοι (A και B) έχουν πολλές ομοιότητες στα βήματα υλοποίησής τους. Όμως, για λόγους πληρότητας αναφέρονται όλα τα βήματα. Τέλος, οι παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν στην ενότητα (Ενότητα 5.1) έχουν ισχύ και για τον παρών αλγόριθμο.

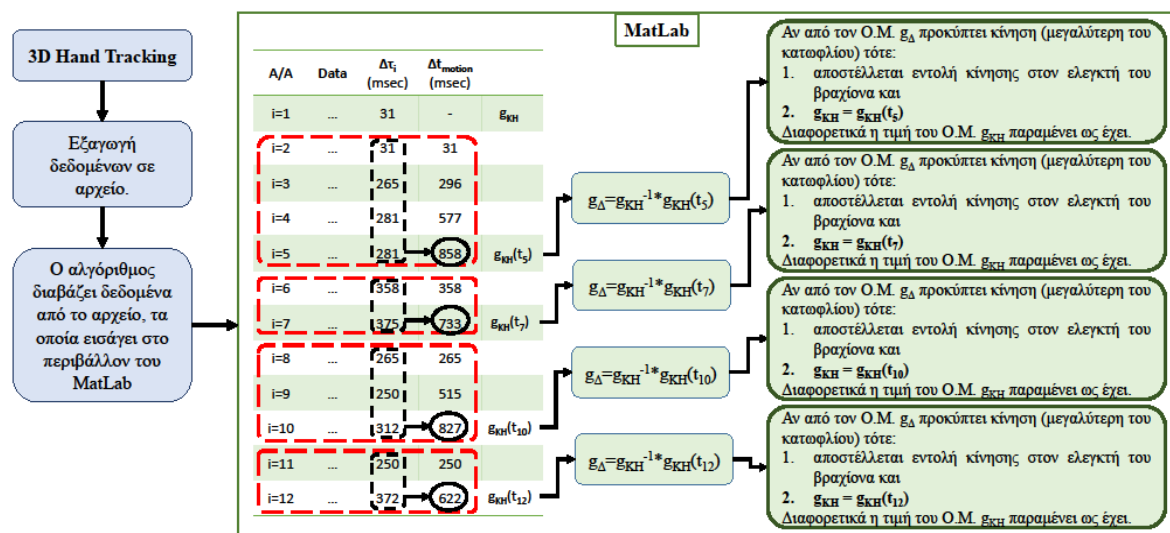
##### 5.4.1 Κριτήριο επιλογής σημείων

Κατά την διάρκεια ανάπτυξης του αλγορίθμου παρατηρήθηκε ότι, αν όλα τα σημεία που ανιχνεύονται από την εφαρμογή αποστέλλονται στον ελεγκτή προς εκτέλεση τότε η κίνηση του βραχίονα είχε μεγαλύτερη διάρκεια από την πραγματική. Απαιτείται να λαμβάνει χώρα μια δειγματοληψία σημείων. Σε αυτόν τον αλγόριθμο το κριτήριο της δειγματοληψίας αποτελεί το ελάχιστο χρονικό διάστημα ( $\Delta t_{motion}$ ) στο οποίο θα επιλέγεται σημείο προς αποστολή στον ελεγκτή του βραχίονα. Το χρονικό διάστημα ( $\Delta t_{motion}$ ) αντιπροσωπεύει το συνολικό χρόνο που έχει διανυθεί από την τελευταία κίνηση του βραχίονα και υπολογίζεται από το άθροισμα των χρονικών διαστημάτων  $\Delta t_i$  (το χρονικό διάστημα που διανύεται ανάμεσα σε διαδοχικά στιγμιότυπα). Αυτό υπολογίζεται και αποθηκεύεται στο αρχείο δεδομένων από την εφαρμογή "3D Hand Tracking".

Όταν το χρονικό διάστημα  $\Delta t_{motion}$  υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή η οποία αναφέρεται ως χρονική κατωφλίωση ( $time_{threshold}$ ) τότε ικανοποιείται το κριτήριο και γίνονται οι κατάλληλες ενέργειες. Η τιμή  $time_{threshold}$  ισούται με 600 msec και επιλέχθηκε μέσω πειραματικής διαδικασίας, η οποία περιγράφεται στην ενότητα 5.4.3.

Συνοπτικά, η διαδικασία επιλογής σημείων προς αποστολή στον ελεγκτή περιγράφεται παρακάτω καθώς και στην Εικόνα 5.41. Όταν το άθροισμα ( $\Delta t_{motion}$ ) υπερβεί την τιμή της χρονικής κατωφλίωσης ( $time_{threshold}$ ) τότε υπολογίζεται ο ΟΜ  $g_{KH}(t_i)$  και

υπολογίζεται η μεταβολή της κίνησης ( $g_{\Delta}$ ) που έχει επέλθει από την τελευταία γνωστή κίνηση. Έπειτα, η μεταβλητή  $\Delta t_{motion}$  μηδενίζεται και ξεκινά η εκ νέου άθροιση των επόμενων χρονικών διαστημάτων.



Εικόνα 5.41: Επιλογή σημείων

Τέλος, αν η μεταβολή κίνησης ( $g_{\Delta}$ ) που προκύπτει είναι μεγαλύτερη του κατωφλίου κίνησης ( $move_{threshold}$ ), τότε αποστέλλεται εντολή κίνησης στον ελεγκτή και ο ΟΜ  $g_{KH}(t_i)$  αντικαθιστά τον ομογενή  $g_{KH}$ . Διαφορετικά η τιμή του  $g_{KH}$  παραμένει ως έχει και η ροή του αλγόριθμου συνεχίζεται. Η παραπάνω διαδικασία διαδραματίζεται στα βήματα επτά και δέκα σύμφωνα με το διάγραμμα ροής (Εικόνα 5.42). Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζεται η διαδικασία επιλογής ρυθμίσεων για τον βραχίονα καθώς και η διαδικασία για την επιλογή ρύθμισης του χρονικού διαστήματος επικοινωνίας ( $\Delta t_{motion}$ ).

### 5.4.2 Περιγραφή αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού του βραχίονα RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" αποτελείται από 14 βήματα. Εκ των οποίων τα δυο πρώτα βήματα αφορούν την έναρξη της εφαρμογής "3D Hand Tracking" και την αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή (MELFA CR1-571) του βραχίονα και λογισμικού MATLAB.

Συνοπτικά ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: Εκκινείται η εφαρμογή "3D Hand Tracking" και γίνεται αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή του βραχίονα με το MATLAB. Η εκκίνηση του αλγόριθμου τηλεχειρισμού στο MATLAB γίνεται (χειροκίνητα) όταν η εφαρμογή "3D Hand Tracking" βρεθεί σε θέση αναμονής [Εικόνα 3.3(α)]. Κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου εισάγονται δεδομένα στο περιβάλλον (workspace) του MATLAB. Αυτά εισάγονται από το αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" και αντιστοιχούν στις μεταβλητές οι οποίες

περιγράφουν την γεωμετρική διαμόρφωση του ανθρώπινου χεριού (Εικόνα 3.1). Προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του αλγόριθμου είναι η **αρχικοποίηση του ανθρώπινου χεριού στην εφαρμογή να συμβαίνει αμέσως μετά την έναρξη του αλγορίθμου τηλεχειρισμού**. Τέλος, ο αλγόριθμος εισέρχεται στον κύριο βρόχο επανάληψης, όπου για κάθε στιγμιότυπο επιλέγονται οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης, επεξεργάζονται κατάλληλα και αποστέλλονται στον ελεγκτή του βραχίονα ώστε το τελικό στοιχείο δράσης του να αναπαράγει την κίνηση του χρήστη. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικότερα η διαδικασία μέσω βημάτων τα οποία απεικονίζονται και στο διάγραμμα ροής [Εικόνα 5.42].

**Βήμα 1. Έναρξη της εφαρμογής "3D Hand Tracking":** Έναρξη της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης του χεριού αποθηκεύονται συνεχώς σε ένα αρχείο δεδομένων μαζί με το χρονικό διάστημα ( $\Delta t$ ) που διανύεται μεταξύ δυο διαδοχικών στιγμιότυπων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καταγραφή αυτή συμβαίνει ακόμα και κατά την διάρκεια στην οποία η εφαρμογή βρίσκεται σε λειτουργία αναμονής-αρχικοποίησης. Όταν, δηλαδή, έχουν ολοκληρωθεί οι αρχικοποιήσεις της εφαρμογής "3D Hand Tracking" και έχει εμφανιστεί το εικονικό χέρι στο παράθυρο της εφαρμογής [Εικόνα 3.3(α)]. Όταν ολοκληρωθούν οι αρχικοποιήσεις της εφαρμογής και αυτή βρεθεί σε θέση αναμονής/αρχικοποίησης, τότε εκκινείται (χειροκίνητα) ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού στο MATLAB ("Βήμα 3").

**Βήμα 2. Επικοινωνία ελεγκτή βραχίονα RV2A (MELFA CR1-571) με MATLAB:** Ο ελεγκτής συνδέεται μέσω σειριακής θύρας με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Συνεπώς, κατά την εκκίνηση του λογισμικού MATLAB απαιτείται η αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ MATLAB και ελεγκτή RV2A. Η διαδικασία αυτή απαιτείται κάθε φορά που πραγματοποιείται εκκίνηση του λογισμικού MATLAB.

**Βήμα 3. Έναρξη αλγορίθμου (MATLAB):** Προϋπόθεση για την εκκίνηση του αλγόριθμου τηλεχειρισμού στο MATLAB αποτελεί η ολοκλήρωση των δυο προηγούμενων βημάτων. Αρχικά, δίνεται εντολή στον ελεγκτή του βραχίονα, ώστε να μεταβεί το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα σε συγκεκριμένη θέση και με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Η θέση και ο προσανατολισμός αποτελούν την θέση αρχικοποίησης του βραχίονα [Εικόνα 5.8]. Έπειτα, γνωστοποιείται η θέση αποθήκευσης (path) των δεδομένων που εξάγονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" και διαγράφονται όσα δεδομένα έχουν καταγραφεί μέχρι στιγμής. Αυτό συμβαίνει, ώστε να υπάρχουν δεδομένα από την χρονική στιγμή που εκκινείται ο αλγόριθμος (στο MATLAB) και έπειτα. Τέλος, αρχικοποιούνται οι μεταβλητές που απαιτούνται για την σωστή λειτουργία του αλγόριθμου. Μεταξύ των αρχικοποιήσεων είναι και **ο ορισμός του ελάχιστου χρονικού**

**διαστήματος** ( $time_{threshold}$ , Εικόνα 5.42) στο οποίο αποστέλλονται δεδομένα στον ελεγκτή. Από το σημείο αυτό και μετά, ο χρήστης έχει την δυνατότητα αρχικοποίησης το χέρι του στην εφαρμογή "3D Hand Tracking" με στόχο τον τηλεχειρισμό του ρομποτικού χεριού όποτε το θελήσει.

**Βήμα 4. Ανάγνωση δεδομένων από αρχείο:** Εισάγονται όσα δεδομένα έχουν καταγραφεί από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" από το αρχείο δεδομένων στο περιβάλλον του MATLAB.

**Βήμα 5. Επιλογή δεδομένων:** Επιλέγονται οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης για το 1<sup>ο</sup> στιγμιότυπο και δημιουργείται ο ομογενής πίνακας  $g_{KH}$ , ο οποίος χρησιμοποιείται για την εύρεση του ομογενή πίνακα  $g_{\Delta}$ .

Στο επόμενο βήμα ο αλγόριθμος εισέρχεται στο κύριο βρόχο επανάληψης του αλγόριθμου. Στην πρώτη επανάληψη ο μετρητής  $i$  έχει τιμή ίση με δύο.

#### **Κύριος βρόχος επανάληψης:**

**Βήμα 6. Επιλογή δεδομένων:** Επιλέγονται τα δεδομένα γεωμετρικής διαμόρφωσης για το στιγμιότυπο  $i$ .

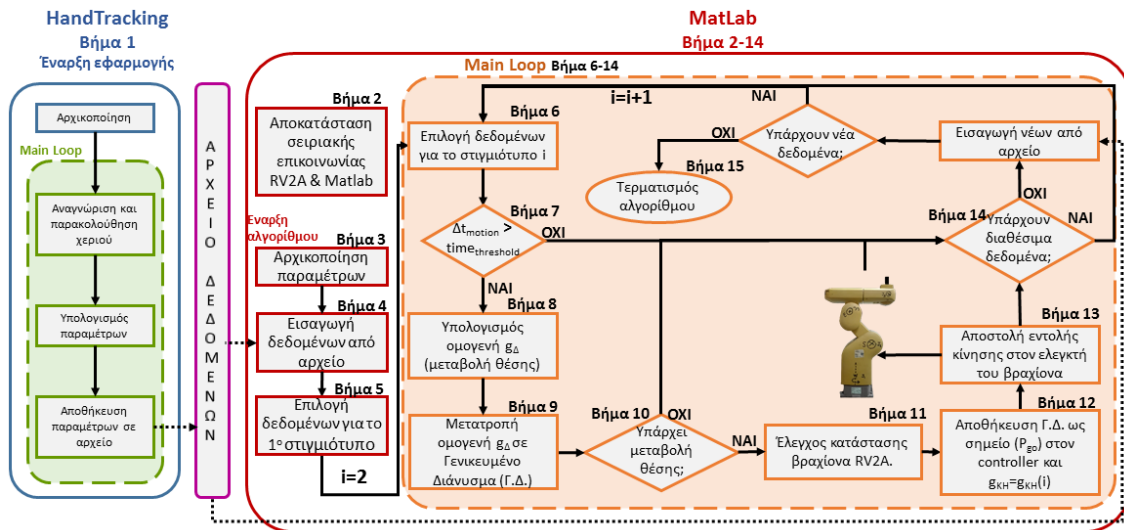
**Βήμα 7. Έλεγχος χρονικού διαστήματος  $\Delta t_{motion}$ :** Το χρονικό διάστημα  $\Delta t_i$  που αντιστοιχεί στο στιγμιότυπο  $i$  αθροίζεται στην μεταβλητή  $\Delta t_{motion}$ . Αν αυτή είναι μεγαλύτερη από το ελάχιστο χρονικό διάστημα ( $time_{threshold}$ ) επικοινωνίας τότε ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα. Διαφορετικά ο αλγόριθμος προχωράει στο «Βήμα 14».

**Βήμα 8. Υπολογισμός μεταβολής θέσης και προσανατολισμού:** Υπολογίζεται ο ομογενής μετασχηματισμός  $g_{KH}(t_i)$ , ο οποίος περιγράφει τον ομογενή μετασχηματισμό για το στιγμιότυπο  $i$ . Έπειτα, με χρήση των ομογενών πινάκων  $g_{KH}$  και  $g_{KH}(t_i)$  υπολογίζεται ο ομογενής  $g_{\Delta}$ , ο οποίος περιγράφει την μεταβολή θέσης και προσανατολισμού που προκύπτει από τους δυο ομογενείς σύμφωνα με την σχέση  $g_{\Delta} = g_{KH}^{-1} g_{KH}(t_i)$ .

**Βήμα 9. Μετατροπή OM  $g_{\Delta}$  σε ΓΔ:** Ο ομογενής μετασχηματισμός  $g_{\Delta}$  μετατρέπεται σε Γ.Δ και η μεταβλητή  $\Delta t_{motion}$  μηδενίζεται.

**Βήμα 10. Έλεγχος μεταβολής θέσης κ προσανατολισμού:** Ελέγχεται αν υπάρχει μεταβολή της κατάστασης (θέση και προσανατολισμός) μεγαλύτερη του κατωφλίου που έχει οριστεί. Η σύγκριση γίνεται ως προς την τελευταία γνωστή κατάσταση ( $g_{KH}$ ), η οποία αποτελεί παράλληλα και την τρέχουσα κατάσταση του τελικού στοιχείου δράσης. Αν υπάρχει επαρκής μεταβολή ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα. Διαφορετικά, η ροή του αλγόριθμου συνεχίζεται στο "Βήμα 14".

**Βήμα 11. Έλεγχος κατάστασης βραχίονα:** Σκοπός του βήματος αυτού αποτελεί η εξασφάλιση ότι ο βραχίονας δεν θα βρίσκεται εν κινήσει κατά την αποστολή εντολών στον ελεγκτή. Αν ο βραχίονας κινείται τότε ο αλγόριθμος τίθεται σε αναμονή ωστόσο ολοκληρωθεί η κίνηση. Έπειτα, ο αλγόριθμος συνεχίζει στο επόμενο βήμα.



Εικόνα 5.42: Διάγραμμα ροής τηλεχειρισμού RV2A

**Βήμα 12. Αποστολή ΓΔ στον ελεγκτή του βραχίονα:** Το γενικευμένο διάνυσμα αποθηκεύεται στον ελεγκτή του βραχίονα ως σημείο με την ονομασία  $P_{g0}$ . Παράλληλα ο ομογενής μετασχηματισμός  $g_{KH}$  αντικαθίσταται από τον ομογενή μετασχηματισμό  $g_{KH}(t_i)$  δηλαδή,  $g_{KH} = g_{KH}(t_i)$ .

**Βήμα 13. Εντολή κίνησης:** Αποστέλλεται εντολή στον ελεγκτή του βραχίονα, ώστε το τελικό άκρο δράσης του να κινηθεί σύμφωνα με το αποθηκευμένο διάνυσμα, το οποίο περιγράφει την μεταβολή θέσης και προσανατολισμού. Έπειτα ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα.

**Βήμα 14. Έλεγχος διαθέσιμων δεδομένων:** Πραγματοποιείται έλεγχος για την διαθεσιμότητα δεδομένων γεωμετρικής διαμόρφωσης στο περιβάλλον του λογισμικού MATLAB. Αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα τότε ο μετρητής  $i$  αυξάνεται κατά μια μονάδα και το χρονικό διάστημα ( $\Delta t_i$ ) που πέρασε από το τρέχων στιγμιότυπο, προστίθεται στην μεταβλητή  $\Delta t_{motion}$ . Ο αλγόριθμος προχωράει στο "Βήμα 6".

Αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, τότε γίνεται προσπάθεια εισαγωγής/ανάγνωσης των δεδομένων που έχουν καταγραφεί μέχρι στιγμής από την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Αν διαπιστωθεί η εισαγωγή νέων δεδομένων, τότε ο μετρητής  $i$  αυξάνεται κατά μια μονάδα και ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού (MATLAB) προχωράει στο "Βήμα 6". Διαφορετικά, ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα.



**Βήμα 15. Τερματισμός αλγορίθμου:** Εμφανίζεται μήνυμα τέλους στο Command Window του λογισμικού MATLAB και ολοκληρώνεται η εκτέλεση του αλγόριθμου.

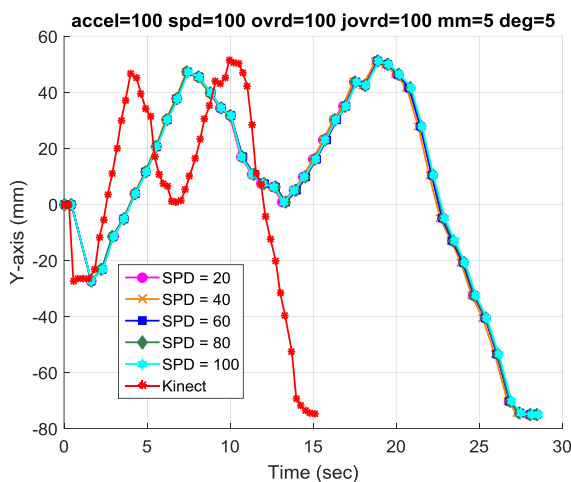
Ο βραχίονας έχει την δυνατότητα να κινηθεί σε όλο το εύρος στον χώρο εργασίας του. Προϋπόθεση είναι να μην δοθεί εντολή στον ελεγκτή να μεταβεί σε σημείο εκτός χώρου εργασίας. Αν δοθεί εντολή στον βραχίονα για να μεταφερθεί σε σημείο εκτός χώρου εργασίας (θέση ή προσανατολισμό), τότε η εκτέλεση του αλγορίθμου στο λογισμικό MATLAB τερματίζεται και εμφανίζεται μήνυμα λάθους στον ελεγκτή του βραχίονα καθώς και στο command window του λογισμικού MATLAB.

### 5.4.3 Ρυθμίσεις βραχίονα και επιλογή χρονικής κατωφλίωσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σημαντικό ρόλο για την ορθή λειτουργία του αλγόριθμου έχουν οι ρυθμίσεις του βραχίονα. Παρακάτω ακολουθούν πειράματα για διάφορες ρυθμίσεις του βραχίονα. Βασικά κριτήρια για την επιλογή των ρυθμίσεων, εκτός από την **διάρκεια κίνησης**, αποτελεί η **συμπεριφορά του βραχίονα** (ομαλή/σπασμωδική κίνηση) καθώς και το **πλήθος σημείων** το οποίο αποστέλλεται στον ελεγκτή του βραχίονα (όσα περισσότερα τόσο πιο αξιόπιστο το αποτέλεσμα). Επίσης, αναφέρεται ότι χρησιμοποιείται η ίδια κίνηση (Εικόνα 5.10) της παλάμης του χρήστη που χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή των ρυθμίσεων του κύριου αλγόριθμου (Αλγόριθμος A, Ενότητα 5.3). Να σημειωθεί ότι για τα παρακάτω πειράματα αποστέλλονται στον ελεγκτή όλα τα σημεία προς εκτέλεση, εκτός από εκείνα τα οποία δεν έχουν μεγαλύτερη μεταβολή από την τιμή της κατωφλίωσης κίνησης ( $move_{threshold}$ ). Αυτό σημαίνει ότι η χρονική κατωφλίωση ( $time_{threshold}$ ) δεν λαμβάνεται υπόψιν. Τέλος, σημειώνεται ότι για την κίνηση που χρησιμοποιείται υπολογίστηκαν **62 σημεία** μέσω της εφαρμογής.

#### Πείραμα 1: Επίδραση ρύθμισης SPD

Όπως παρατηρείται από το παρακάτω διάγραμμα η μεταβολή της SPD δεν επηρεάζει την απόδοση του συνολικού συστήματος, το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού δεν χρησιμοποιείται εντολή κίνησης ελεύθερης παρεμβολής. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (Μεταβολή της SPD, Αλγ. Β). Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα που συνοδεύει το διάγραμμα, το πλήθος των σημείων το οποίο αποστέλλεται στον ελεγκτή παραμένει σταθερό και ανέρχεται στο σύνολο των 45 σημείων. Η SPD θα παραμείνει με την προεπιλεγμένη τιμή η οποία είναι 100 (mm/sec) και δεν θα εξεταστεί περαιτέρω.



Εικόνα 5.43: Μετατόπιση στον άξονα Y

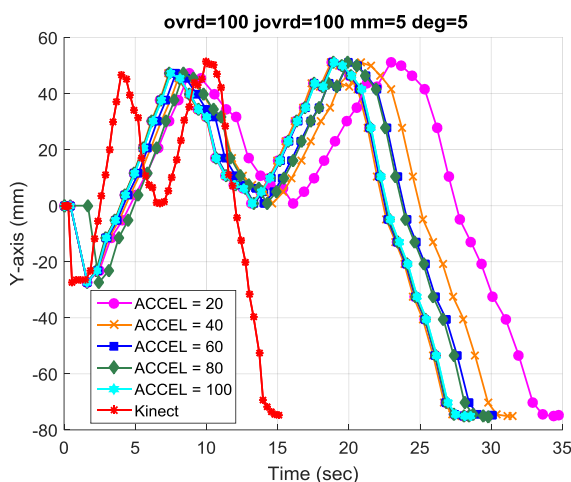
Ρυθμίσεις:  
ACCEL=100%, OVRD=100% &  
JOVRD=100%

Αποτελέσματα:

SPD (mm/sec)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
20	45	28,38
40	45	28,28
60	45	28,46
80	45	28,45
100	45	28,54

### Πείραμα 2: Επίδραση ρύθμισης ACCEL

Μέσω της συναρτήσεως ACCEL ρυθμίζεται τόσο η επιτάχυνση όσο και η επιβράδυνση που του τελικού άκρου δράσης, ανεξάρτητα. Για λόγους απλοποίησης επιλέχθηκε η επιτάχυνση και η επιβράδυνση να έχουν την ίδια επί τοις εκατό τιμή. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (Μεταβολή της ACCEL, Αλγ. Β).



Εικόνα 5.44: Μετατόπιση στον άξονα Y

Ρυθμίσεις:  
OVRD=100% & JOVRD=100%

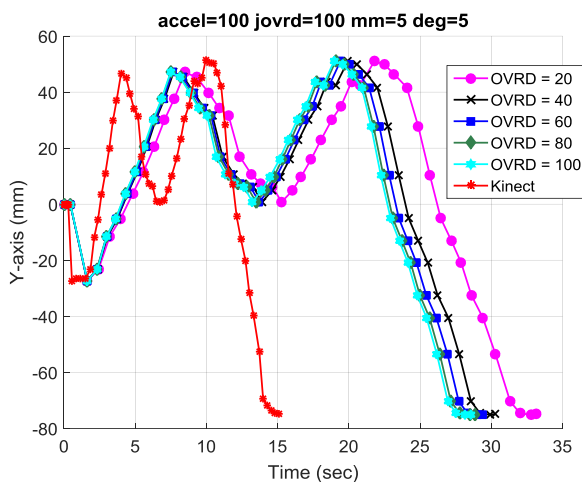
Αποτελέσματα:

ACCEL (%)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
20	45	34,76
40	45	31,53
60	45	30
80	45	29
100	45	28,55

Από το παρακάτω διάγραμμα και από τον πίνακα που συνοδεύεται παρατηρείται ότι όσο η επιτάχυνση και η επιβράδυνση αυξάνονται τόσο λιγότερο χρόνο απαιτεί η ολοκλήρωση της κίνησης ενώ το πλήθος των σημείων παραμένει σταθερό.

### Πείραμα 3: Επίδραση ρύθμισης OVRD

Μέσω της OVRD ρυθμίζεται το μέγιστο ποσοστό της ταχύτητας που μπορεί να αποκτήσει το τελικό στοιχείο δράσης. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (Μεταβολή της OVRD, Αλγ. Β).



Εικόνα 5.45: Μετατόπιση στον άξονα Y

Ρυθμίσεις:  
ACCEL=100% & JOVRD=100%

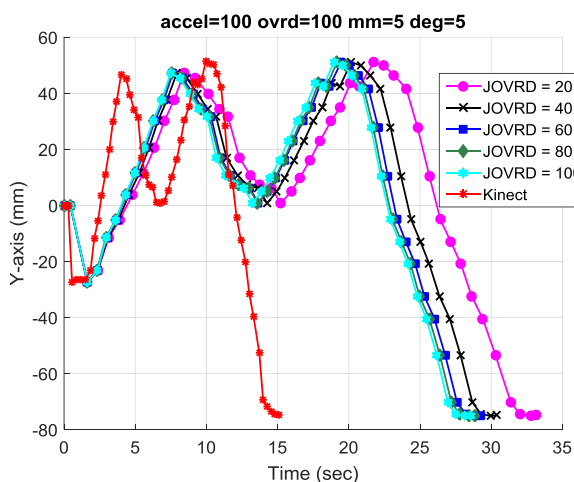
Αποτελέσματα:

OVRD (%)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
20	45	33
40	45	30,27
60	45	29,4
80	45	28,86
100	45	28,54

Το πλήθος των σημείων το οποίο αποστέλλεται στον ελεγκτή διατηρείται σταθερό (45 συνολικά σημεία). Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η επί τοις εκατό τιμή της ρύθμισης OVRD τόσο μειώνεται το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση της κίνησης.

#### Πείραμα 4: Επίδραση ρύθμισης JOVRD

Μέσω της JOVRD ρυθμίζεται το μέγιστο ποσοστό της ταχύτητας κίνησης για κάθε άρθρωση. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (Μεταβολή της JOVRD, Αλγ. Β).



Εικόνα 5.46: Μετατόπιση στον άξονα Y

Ρυθμίσεις:  
ACCEL=100% & OVRD=100%

Αποτελέσματα:

JOVRD (%)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
20	45	33,15
40	45	30,38
60	45	29,3
80	45	28,9
100	45	28,5

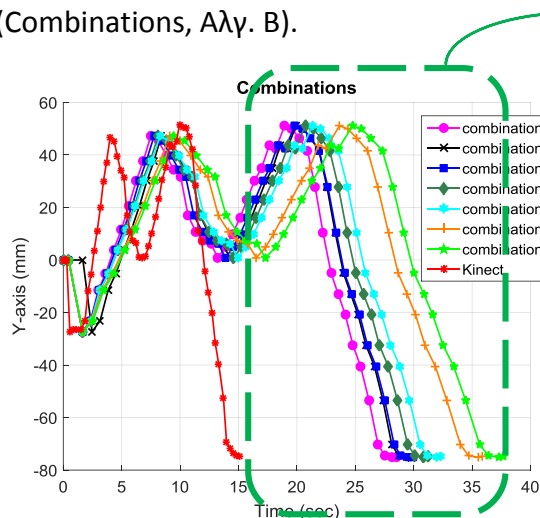
Το πλήθος των σημείων το οποίο αποστέλλεται στον ελεγκτή διατηρείται σταθερό (45 συνολικά σημεία). Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η επί τοις εκατό τιμή της OVRD τόσο μειώνεται το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση της κίνησης.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι ρυθμίσεις καθώς και τα αποτελέσματα για επιλεγμένους συνδυασμούς. Σύμφωνα με τα διαγράμματα και τον παρακάτω πίνακα επιλέγονται οι τρεις καλύτεροι συνδυασμοί (combination 1, 2 και 3). Αυτοί θα χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω διερεύνηση ώστε να επιλεγεί το κατάλληλο χρονικό διάστημα δειγματοληψίας και αποστολής σημείων στον ελεγκτή.

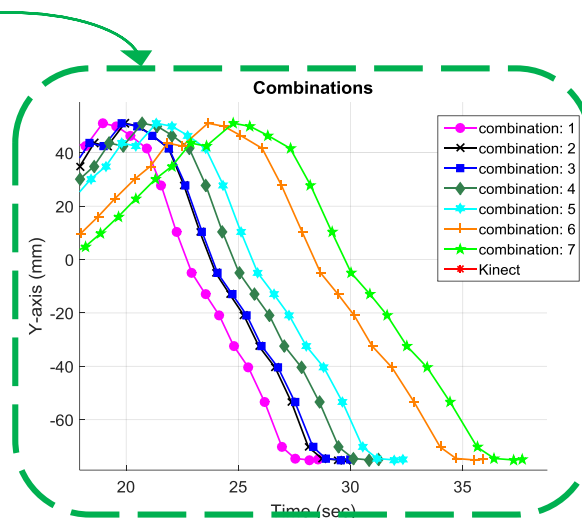
Πίνακας 5.2: Ρυθμίσεις βραχίονα και αποτελέσματα

Combination	ACCEL (%)	OVRD (%)	JOVRD (%)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
1	100	100	100	45	28,54
2	80	100	100	45	28,37
3	80	80	80	45	29
4	80	60	60	45	30
5	60	60	60	45	30,80
6	60	40	40	45	30,69
7	40	40	40	45	31,34

Οι συνδυασμοί που παρατίθενται στο παραπάνω πίνακα αποτυπώνονται στο επόμενο διάγραμμα. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (Combinations, Αλφ. Β).



Εικόνα 5.47: Μετατόπιση στον άξονα Y



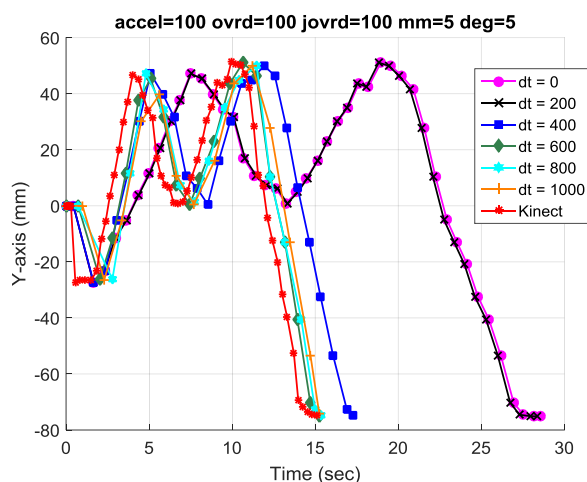
Εικόνα 5.48: Μετατόπιση στον άξονα Y

Παρακάτω ακολουθούν πειράματα με διαφορετικό χρόνο δειγματοληψίας ( $\text{time}_{\text{threshold}}$ ) για τα τρία σετ ρυθμίσεων που επιλέχθηκαν. Η μεταβλητή αυτή απεικονίζεται ως  $\Delta t$  στις λεζάντες των διαγραμμάτων.

#### Πείραμα 5. Ρυθμίσεις: ACCEL = 100%, OVRD = 100% , JOVRD=100%

Το πρώτο πείραμα για την ρύθμιση του χρονικού διαστήματος  $\Delta t_{\text{motion}}$  υλοποιείται με τις παραπάνω ρυθμίσεις. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα

με τον συνοδευτικό του πίνακα. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (ACCEL=100 OVRD=100 JOVRD=100 dt=[0 200 400 600 800 1000]).



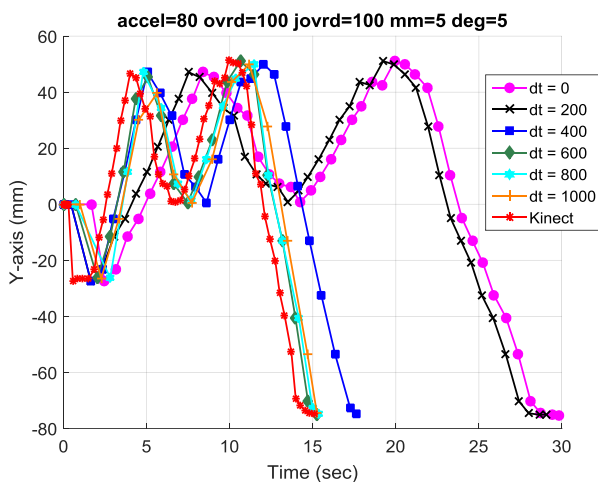
Εικόνα 5.49: Μετατόπιση στον άξονα Y

$time_{threshold}$ (msec)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
0	45	28,54
200	45	28,36
400	26	17,26
600	20	15,25
800	17	15,37
1000	15	15,25

Από τα παραπάνω παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα επικοινωνίας, τόσο λιγότερα σημεία αποστέλλονται στον ελεγκτή του βραχίονα και όπως ήταν αναμενόμενο η διάρκεια της κίνησης που υλοποιείται από τον βραχίονα μειώνεται όσο μειώνονται και τα σημεία. Επίσης, από τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνεται ότι η πρώτη βέλτιστη τιμή για την χρονική διάρκεια της παραγόμενης κίνησης εμφανίζεται όταν το  $time_{threshold}$  ισούται με 600 msec. Από την τιμή αυτή και έπειτα δεν παρατηρείται βελτίωση της κίνησης, αλλά συμβαίνει το αντίθετο. Αφού για την ίδια χρονική διάρκεια εκτελούνται λιγότερα σημεία. Τέλος, παρόλο που τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά ο βραχίονας εκτελεί σπασμωδικές κινήσεις και αυτός είναι ο λόγος που μειώνεται η επιτάχυνση (ACCEL) και πραγματοποιείται εκ νέου η διαδικασία αυτή.

#### Πείραμα 6. Ρυθμίσεις: ACCEL = 80%, OVRD = 100% , JOVRD=100%

Επαναλαμβάνεται το προηγούμενο πείραμα θέτοντας την επιτάχυνση και επιβράδυνση του τελικού στοιχείου δράσης, ίση με ποσοστό 80 τοις εκατό. Οι ρυθμίσεις που αφορούν το μέγιστο ποσοστό ταχύτητας κίνησης του τελικού στοιχείου δράσης (OVRD) και το μέγιστο ποσοστό ταχύτητας κίνησης των αρθρώσεων (JOVRD) παραμένουν στο 100%. Όπως παρατηρείται και από το παρακάτω διάγραμμα και τον συνοδευτικό του πίνακα, η βέλτιστη τιμή για την μεταβλητή  $time_{threshold}$  ισούται με 600 msec. Για την τιμή αυτή η κίνηση που παράγεται αποτελεί μίμηση της πραγματικής κίνησης και έχουν σχεδόν ίδια διάρκεια κίνησης. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (ACCEL=80 OVRD=100 JOVRD=100 dt=[0 200 400 600 800 1000]).



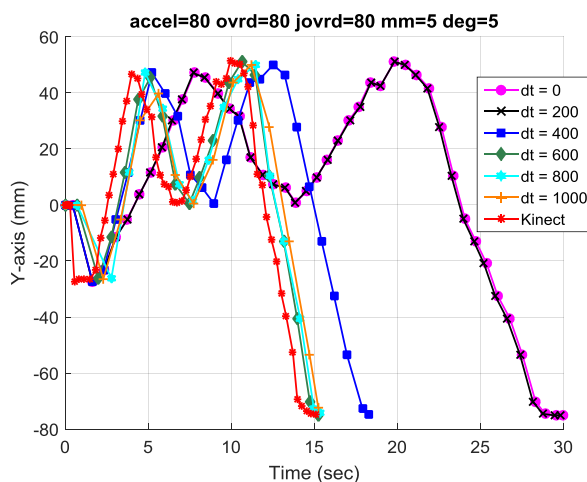
Εικόνα 5.50: Μετατόπιση στον άξονα Y

$time_{threshold}$ (msec)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
0	45	29,81
200	45	29,05
400	26	17,61
600	20	15,24
800	17	15,34
1000	15	15,25

Παρόλο όμως που για την τιμή αυτή ( $time_{threshold} = 600$  msec) η κίνηση που παράγεται αποτελεί μίμηση της πραγματικής, οι κινήσεις που εκτελούνται από το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα είναι αρκετά σπασμωδικές. Συνεπώς, μειώνεται το ποσοστό της OVRD JOVRD και επαναλαμβάνεται η διαδικασία αυτή.

#### Πείραμα 7. Ρυθμίσεις: ACCEL = 80%, OVRD = 80% , JOVRD=80%

Επαναλαμβάνεται το ίδιο πείραμα θέτοντας την ACCEL, την OVRD και την (JOVRD) ίσες με ποσοστό 80 τοις εκατό. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (ACCEL=80 OVRD=80 JOVRD=80 dt=[0 200 400 600 800 1000]).

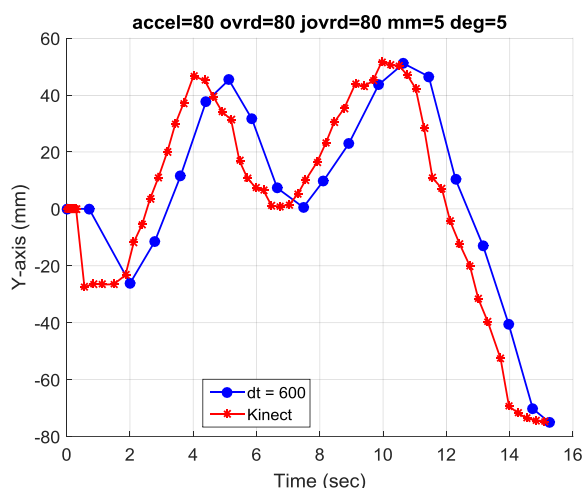


Εικόνα 5.51: Μετατόπιση στον άξονα Y

$time_{threshold}$ (msec)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
0	45	29,97
200	45	29,84
400	26	18,28
600	20	15,26
800	17	15,35
1000	15	15,24

Όπως παρατηρείται και από το παραπάνω διάγραμμα και τον συνοδευτικό του πίνακα, η βέλτιστη τιμή για την μεταβλητή  $time_{threshold}$  ισούται με **600 msec**. Για την τιμή αυτή η κίνηση που παράγεται αποτελεί μίμηση της πραγματικής κίνησης και έχουν σχεδόν ίδια διάρκεια κίνησης. Επιπλέον οι κινήσεις του βραχίονα έχουν μια ομαλή ροή.

Από τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν, συμπεραίνεται ότι το βέλτιστο χρονικό κατώφλι ισούται με 600 msec και οι ρυθμίσεις του βραχίονα ορίζονται με ACCEL = 80%, OVRD = 80% , JOVRD=80%. **Οι ρυθμίσεις αυτές αποτελούν τις ρυθμίσεις με τις οποίες εκτελείται ο αλγόριθμός** και το χρονικό διάστημα  $time_{threshold}$  ισούται με 600 msec. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η μετακίνηση στον άξονα Y συναρτήσει του χρόνου με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα σημεία που εντόπισε η εφαρμογή Hand Tracking και με μπλε τα σημεία που τοποθετήθηκε το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα. Στο παράρτημα παρατίθεται το πλήρες σετ των διαγραμμάτων (ACCEL=80 OVRD=80 JOVRD=80 dt = 600).



Εικόνα 5.52: Μετατόπιση στον άξονα Y

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται η πειραματική αποτίμηση του αλγορίθμου.

#### 5.4.4 Πειραματική αποτίμηση τηλεχειρισμού RV2A για τον αλγόριθμο B

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η πειραματική αποτίμηση για τον τηλεχειρισμό του βραχίονα RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην πορεία που κινείται το άκρο του βραχίονα, **η οποία αποτελεί μίμηση της παλάμης του χρήστη**. Για την εξαγωγή των πειραμάτων αυτών ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.

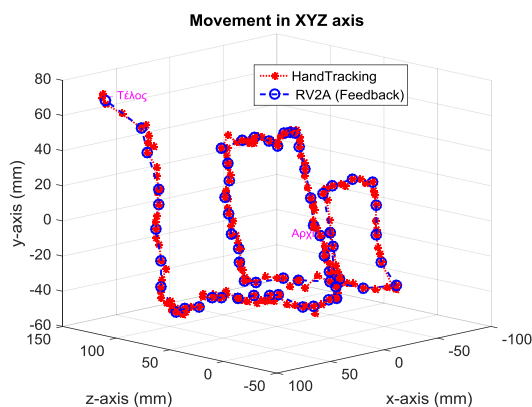
Αρχικά, εκκινείται η εφαρμογή "3D Hand Tracking" και γίνεται αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ ελεγκτή του βραχίονα και λογισμικού MATLAB. Έπειτα, όταν η εφαρμογή "3D Hand Tracking" βρεθεί σε κατάσταση αναμονής [Εικόνα 3.3(α)], τότε εκκινείται ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού που αναπτύχθηκε στο MATLAB. Στη συνέχεια ο χρήστης προχωράει σε αρχικοποίηση του ανθρώπινου χεριού στην εφαρμογή "3D Hand Tracking" [Εικόνα 3.3(β),(γ)]. Τέλος, ο χρήστης διαγράφει με το χέρι του την επιθυμητή κίνηση. Οι παράμετροι θέσης και προσανατολισμού της παλάμης υπολογίζονται και καταγράφονται συνεχώς από την εφαρμογή. Μέσω του αλγορίθμου οι παράμετροι

μετατρέπονται σε κατάλληλες εντολές και αποστέλλονται στον ελεγκτή του βραχίονα. Το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα μιμείται την ανθρώπινη κίνηση.

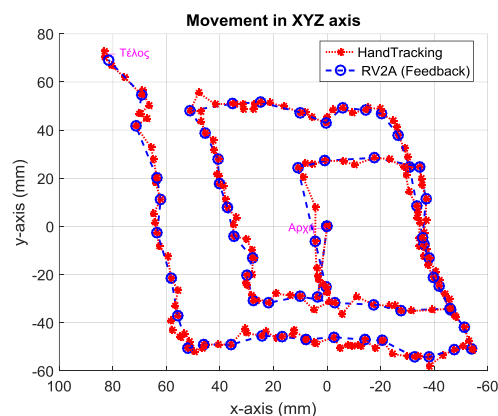
Η κίνηση της ανθρώπινης παλάμης πραγματοποιείται με ομαλή ταχύτητα ώστε η εφαρμογή να παρέχεται το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τον υπολογισμό και αποθήκευση των παραμέτρων, για την πραγματοποίηση επικοινωνίας του λογισμικού MATLAB με τον ελεγκτή του βραχίονα και για την εκτέλεση της εντολής από τον βραχίονα.

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα για τρεις διαφορετικές πορείες. Στο πρώτο πείραμα διαγράφεται μια πορεία σε τρία επίπεδα (με σταθερό προσανατολισμό), στο δεύτερο πείραμα παρουσιάζεται περιστροφή γύρω από έναν άξονα και στο τρίτο πείραμα διαγράφεται ταυτόχρονα περιστροφή και μετατόπιση. Για κάθε πείραμα παρατίθενται οκτώ διαγράμματα. Στο πρώτο διάγραμμα απεικονίζεται η κίνηση στο χώρο στο δεύτερο απεικονίζεται η προβολή της κίνησης σε δισδιάστατο διάγραμμα και τέλος στα επόμενα απεικονίζεται η μετατόπιση και η περιστροφή γύρω από κάθε άξονα ως προς το χρόνο. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η κίνηση της ανθρώπινης παλάμης, όπως ανιχνεύθηκε από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" και με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η ανάδραση από τον βραχίονα για την πορεία του άκρου.

**Πείραμα 1: κίνηση σε τρία επίπεδα.** Στο παρακάτω πείραμα διαγράφεται σπειροειδής κίνηση της παλάμης του χρήστη με στόχο την δημιουργία παράλληλων τετραγώνων. Με την κίνηση αυτή εμφανίζεται μετατόπιση και στους τρεις άξονες του πλαισίου {H}. Επίσης, ο χρήστης διατηρεί την παλάμη του σε σταθερό προσανατολισμό κατά την διάρκεια των πειραμάτων (όσο αυτό είναι εφικτό). Η κίνηση είναι διάρκειας, περίπου, 60 δευτερολέπτων όπως φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα.

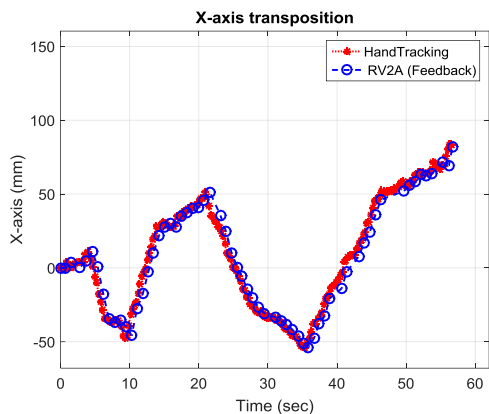


Εικόνα 5.53: Πορεία στο χώρο

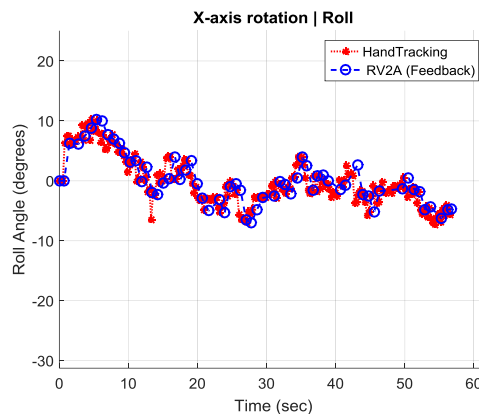


Εικόνα 5.54: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY

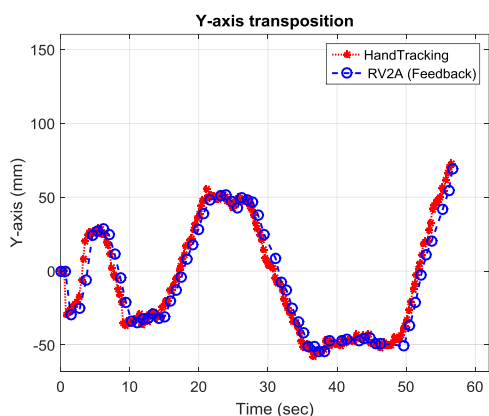




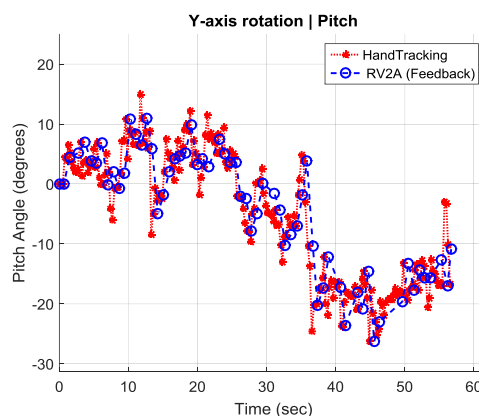
Εικόνα 5.55: Μετατόπιση στον άξονα X



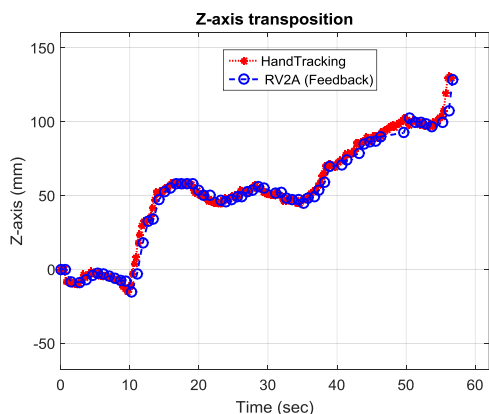
Εικόνα 5.56: Περιστροφή στον άξονα X



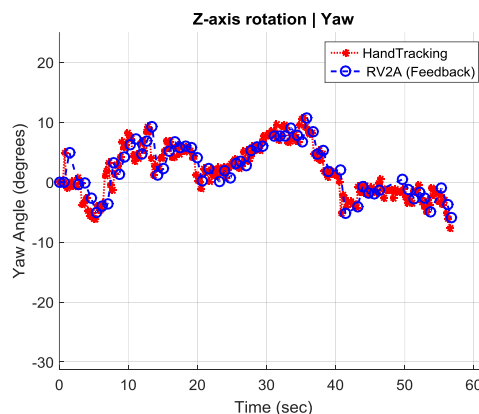
Εικόνα 5.57: Μετατόπιση στον άξονα Y



Εικόνα 5.58: Περιστροφή στον άξονα Y



Εικόνα 5.59: Μετατόπιση στον άξονα Z

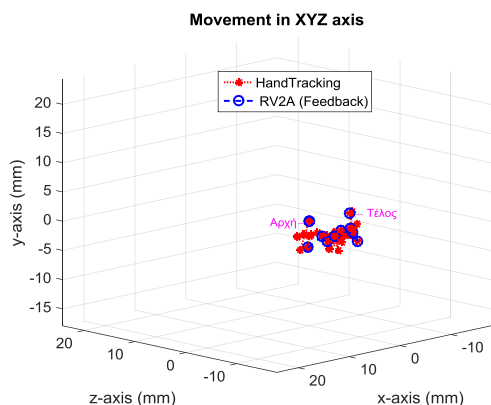


Εικόνα 5.60: Περιστροφή στον άξονα Z

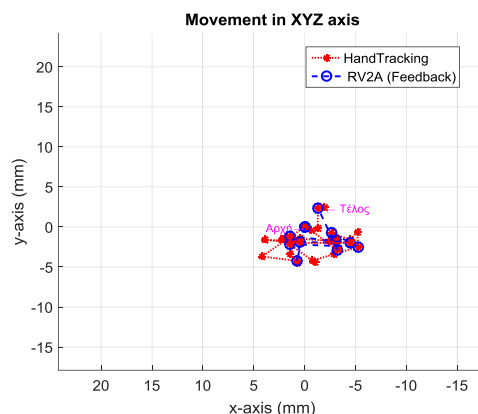
Όπως είναι εμφανές, από τα παραπάνω διαγράμματα, η παλάμη και το τελικό στοιχείο δράσης έχουν διατηρήσει τον αρχικό προσανατολισμό. Οι μικρές αποκλίσεις που εμφανίζονται στα διαγράμματα περιστροφής αποδίδονται σε λάθος εκτίμηση της θέσης από την εφαρμογή 3D Hand Tracking καθώς και σε ανθρώπινο λάθος κατά την εκτέλεση της κίνησης. Η κίνηση που εκτελέστηκε από το τελικό στοιχείο δράσης αποτελεί

μίμηση της πραγματικής τόσο ως προς την θέση-προσανατολισμό όσο και ως προς την χρονική διάρκεια αυτής.

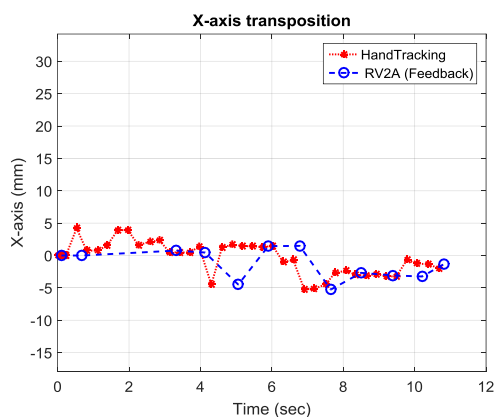
**Πείραμα 2: Περιστροφή γύρω από έναν άξονα.** Στο πείραμα αυτό ο χρήστης περιστρέφει την παλάμη του γύρω από τον άξονα Y του πλαισίου {H}, χωρίς να μετατοπίζεται η παλάμη ή να περιστρέφεται ως προς διαφορετικό άξονα. Η κίνηση όπως φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα είναι διάρκειας, περίπου, 10 δευτερολέπτων.



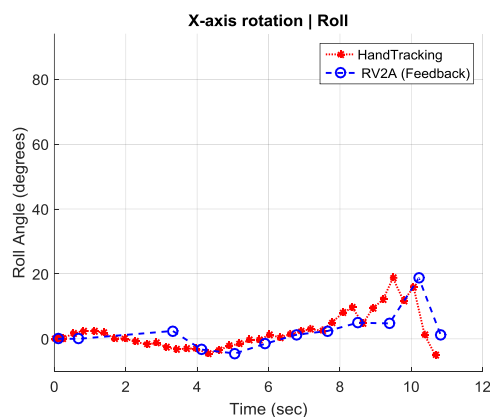
Εικόνα 5.61: Πορεία στο χώρο



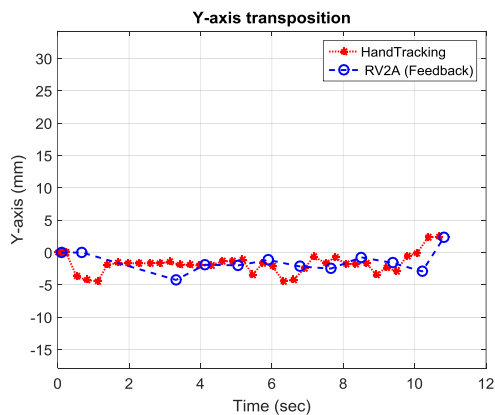
Εικόνα 5.62: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY



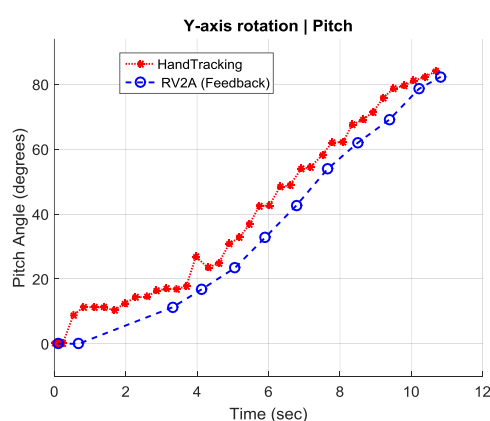
Εικόνα 5.63: Μετατόπιση στον άξονα X



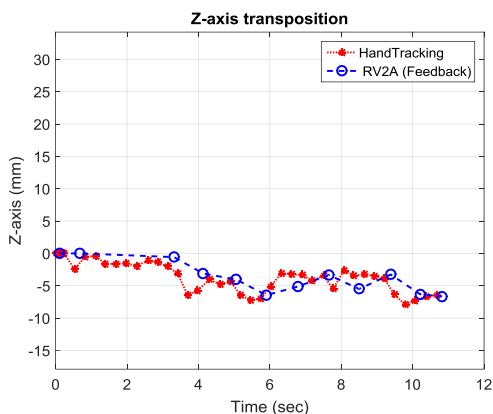
Εικόνα 5.64: Περιστροφή ως προς τον άξονα X



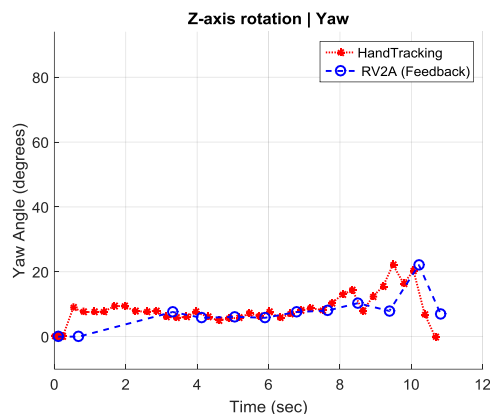
Εικόνα 5.65: Μετατόπιση στον άξονα Y



Εικόνα 5.66: Περιστροφή ως προς τον άξονα Y



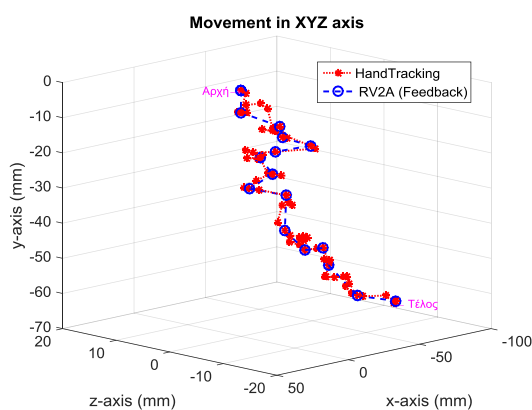
Εικόνα 5.67: Μετατόπιση στον άξονα Z



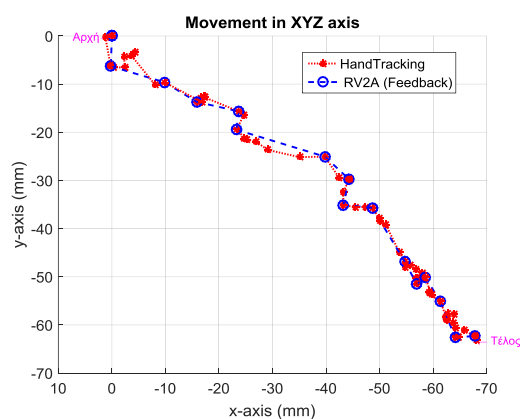
Εικόνα 5.68: Περιστροφή ως προς τον άξονα Z

Παρατηρείται ότι η μετατόπιση στους άξονες είναι πολύ μικρή και η περιστροφή υλοποιήθηκε στον άξονα Y χωρίς να μεταβληθεί ο προσανατολισμός ως προς τους υπόλοιπους άξονες. Τέλος, η παραγόμενη κίνηση από το τελικό στοιχείο αποτελεί μίμηση της ανθρώπινης παλάμης με μικρή χρονική απόκλιση (η οποία είναι αποδεκτή).

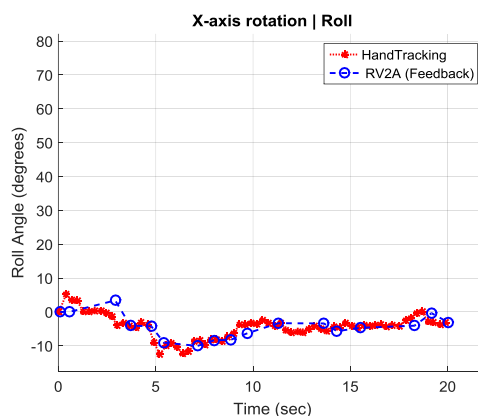
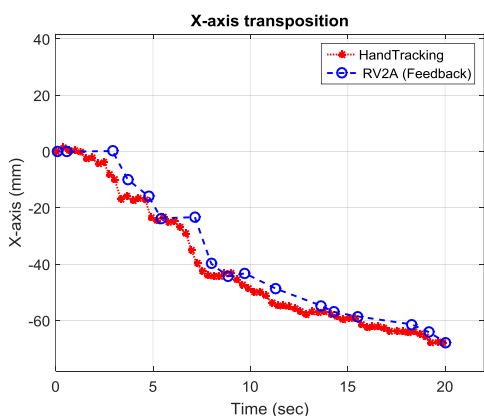
**Πείραμα 3: Διαγραφή τόξου γύρω από άξονα.** Σε αυτό το πείραμα ο χρήστης περιστρέφει και ταυτόχρονα κινεί την παλάμη του διαγράφοντας ένα τόξο γωνίας περίπου 70° γύρω από τον άξονα Z. Η κίνηση διαρκεί περίπου 20 δευτερόλεπτα.



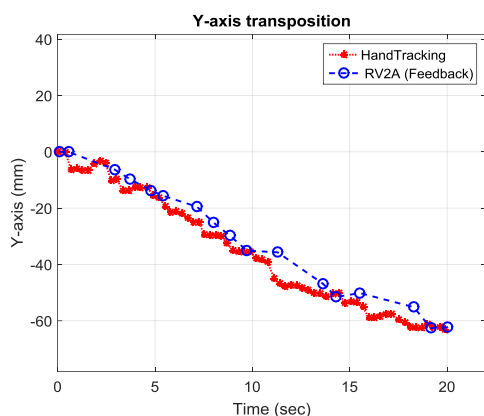
Εικόνα 5.69: Πορεία στο χώρο



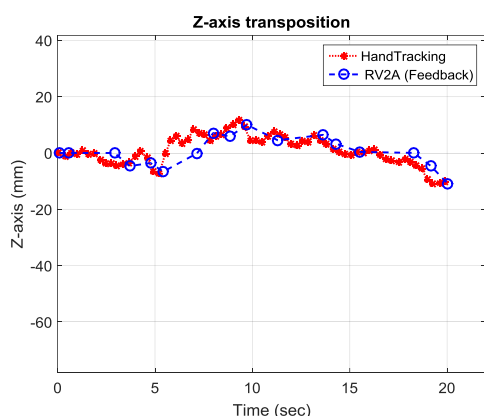
Εικόνα 5.70: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY



Εικόνα 5.71: Μετατόπιση στον άξονα X

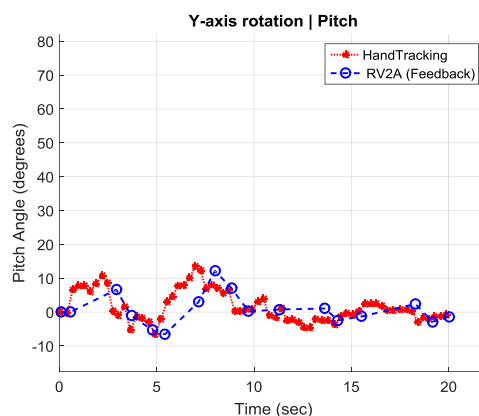


Εικόνα 5.73: Μετατόπιση στον άξονα Y

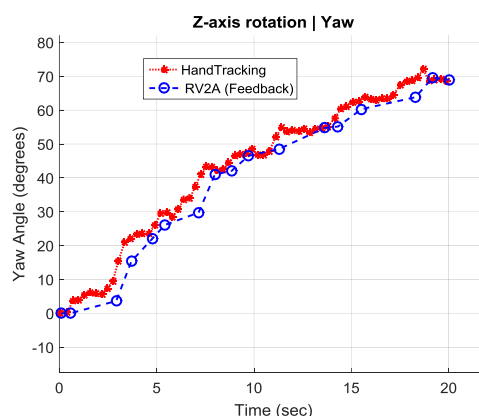


Εικόνα 5.75: Μετατόπιση στον άξονα Z

Εικόνα 5.72: Περιστροφή ως προς τον άξονα X



Εικόνα 5.74: Περιστροφή ως προς τον άξονα Y



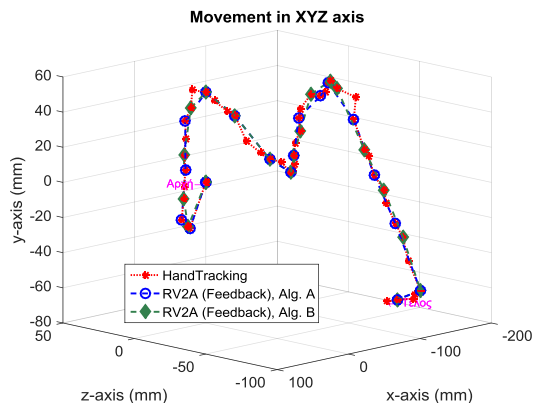
Εικόνα 5.76: Περιστροφή ως προς τον άξονα Z

Το τελικό στοιχείο δράσης μιμείται επιτυχώς την κίνηση του χρήστη με αποδεκτή καθυστέρηση. Σε αυτά τα διαγράμματα, αξίζει να επισημανθεί ότι ενώ από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" αναγνωρίζεται κίνηση με πολλές και μικρές διακυμάνσεις, η πορεία που εκτελείται από το τελικό στοιχείο δράσης είναι, σχετικά, πιο ομαλή. Στην επόμενη ενότητα παρατίθεται σύγκριση και σχολιασμός για την λειτουργία των δυο αλγορίθμων τηλεχειρισμού του βραχίονα που αναπτύχθηκαν.

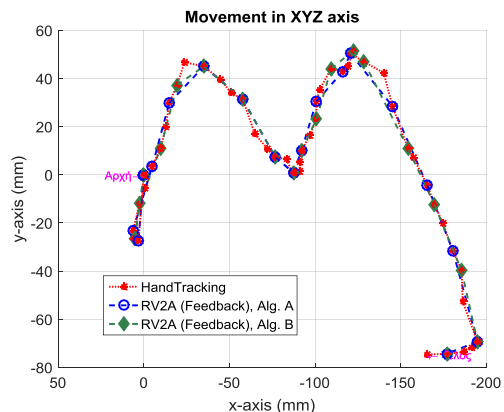
## 5.5 Σύγκριση αλγορίθμων

Σύμφωνα με τις προηγούμενες ενότητες, οι δυο αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν φέρνουν τα επιθυμητό αποτέλεσμα. Και με τους δυο αλγόριθμους επιτυγχάνεται τηλεχειρισμός του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα. Επίσης, οι ρυθμίσεις λειτουργίας του βραχίονα είναι κοινές και για τους δυο αλγόριθμους (ACCEL = 80%, OVRD = 80%, JOVRD=80%). Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα για την ίδια κίνηση και με τις επιλεγμένες ρυθμίσεις λειτουργίας του βραχίονα και για τους δύο αλγόριθμους. Με

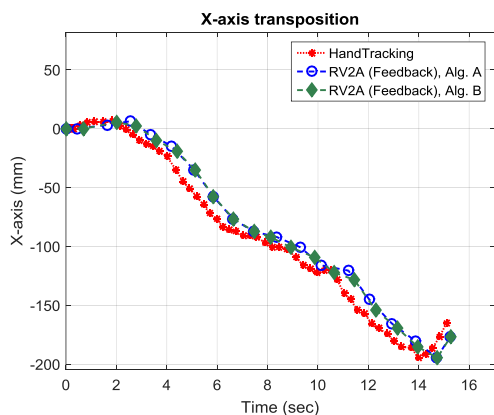
κόκκινο χρώμα αποδίδονται τα σημεία που αναγνωρίστηκαν από την εφαρμογή "3D Hand Tracking", με μπλε χρώμα αποδίδονται τα σημεία που τοποθετήθηκε το τελικό στοιχείο δράσης σύμφωνα με τον αλγόριθμο A και με πράσινο χρώμα αποδίδονται τα σημεία που τοποθετήθηκε το τελικό στοιχείο δράσης σύμφωνα με τον αλγόριθμο B.



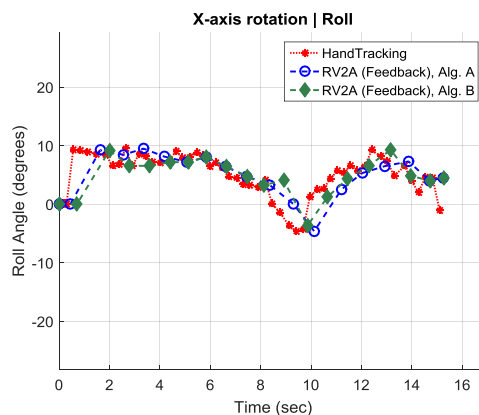
Εικόνα 5.77 : Πορεία στο χώρο



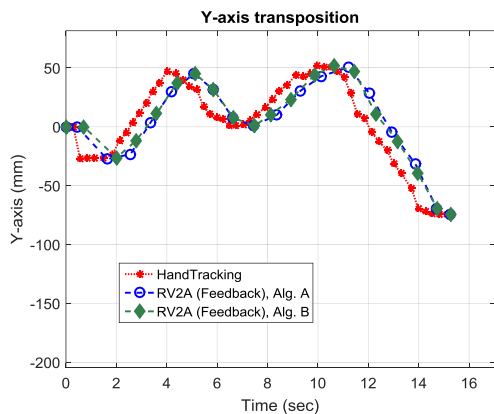
Εικόνα 5.78: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY



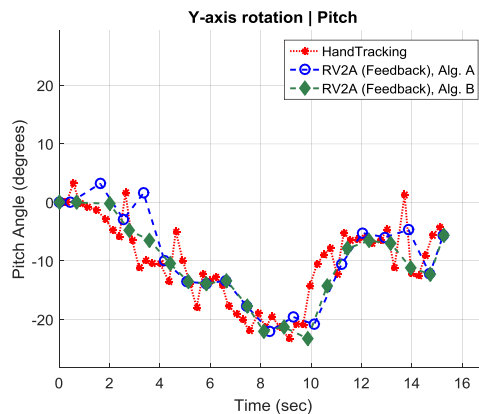
Εικόνα 5.79: Μετατόπιση στον άξονα X



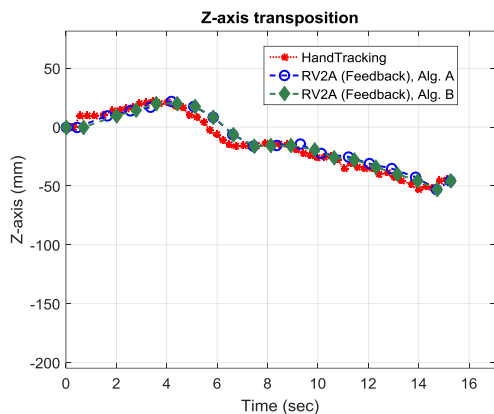
Εικόνα 5.80: Περιστροφή ως προς τον άξονα X



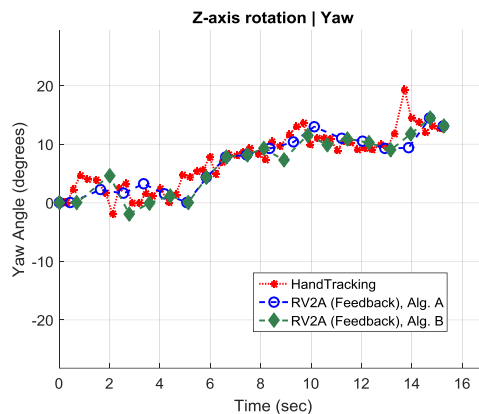
Εικόνα 5.81: Μετατόπιση στον άξονα Y



Εικόνα 5.82: Περιστροφή ως προς τον άξονα Y



Εικόνα 5.83: Μετατόπιση στον άξονα Z



Εικόνα 5.84: Περιστροφή ως προς τον άξονα Z

Τα παραπάνω διαγράμματα συνοδεύονται από τον παρακάτω πίνακα ο οποίος περιέχει πληροφορίες για την διάρκεια της κίνησης που ανιχνεύτηκε από την εφαρμογή αλλά και την διάρκεια εκτέλεσης των αλγορίθμων. Επίσης περιέχει πληροφορίες για το πλήθος σημείων της κίνησης που ανιχνεύτηκε από την εφαρμογή αλλά και το πλήθος σημείων στο οποίο τοποθετήθηκε το τελικό στοιχείο δράσης και για τους δυο αλγόριθμους.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση αλγορίθμων

	"3D Hand Tracking"	Αλγόριθμος A	Αλγόριθμος B
Πλήθος σημείων	62	19	20
Διάρκεια κίνησης (sec)	15,10	15,24	15,26

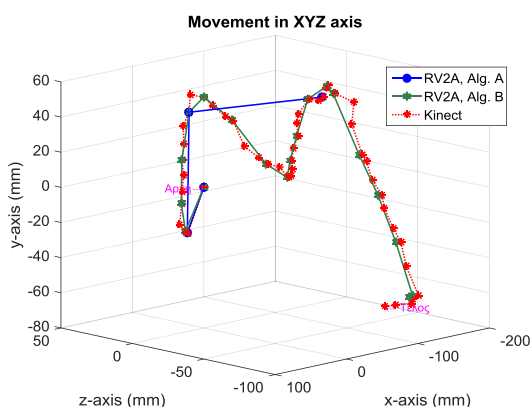
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα και τον παραπάνω πίνακα, σε σωστές συνθήκες λειτουργίας οι δυο αλγόριθμοι έχουν σχεδόν ίδια συμπεριφορά τόσο ως προς την διάρκεια της κίνησης του βραχίονα όσο και ως προς το πλήθος των σημείων στο οποίο αποστέλλεται το τελικό στοιχείο δράσης.

Η διαφορά των δυο αλγορίθμων έγκειται στο κριτήριο επιλογής σημείων καθώς και στην συμπεριφορά που αποκτάει το τελικό στοιχείο δράσης όταν κάποιο στοιχείο του συστήματος ανταποκρίνεται αργά (π.χ. βραχίονας, υπολογιστικό σύστημα). Υπενθυμίζεται ότι **για τον αλγόριθμο A το κριτήριο επιλογής σημείων αποτελεί η κατάσταση του βραχίονα, αν βρίσκεται εν κινήσει ή όχι** (όπως παρουσιάστηκε στις ενότητες 5.3.1, 5.3.2). Ενώ **για τον αλγόριθμο B το κριτήριο επιλογής σημείων αποτελεί το χρονικό διάστημα ( $time_{threshold}$ ) που έχει διανυθεί από την τελευταία κίνηση.** Όταν επέλθει χρόνος με διάρκεια μεγαλύτερη από το  $time_{threshold}$ , τότε αποστέλλεται κίνηση στον ελεγκτή. Σε περίπτωση που ο βραχίονας δεν έχει ολοκληρώσει την προηγούμενη

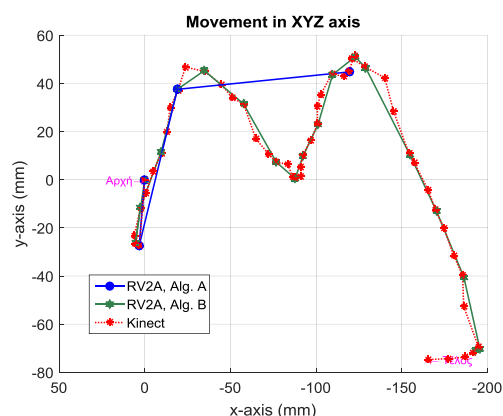
κίνηση, ο αλγόριθμος τίθεται σε αναμονή ωσότου ολοκληρωθεί η κίνηση και αποσταλεί η επόμενη εντολή κίνησης (όπως παρουσιάστηκε στις ενότητες 5.4.1, 5.4.2).

Με τον αλγόριθμο A εξασφαλίζεται ότι η κίνηση της παλάμης του χρήστη με την κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης θα έχουν την **ίδια διάρκεια**. Ενώ με τον αλγόριθμο B εξασφαλίζεται ότι η κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης θα αποτελεί **μίμηση της κίνηση της παλάμης του χρήστη**.

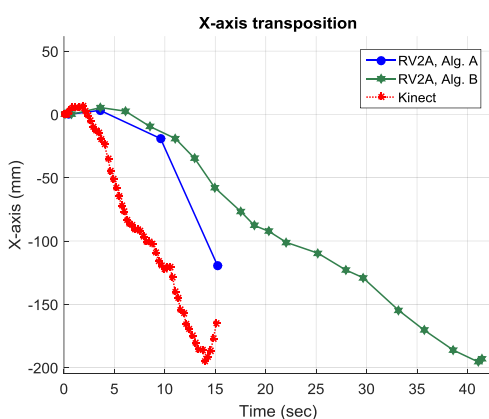
Με σκοπό να γίνει εμφανής η διαφορετική συμπεριφορά των δυο αλγορίθμων στον αναγνώστη, ο βραχίονας ρυθμίζεται σε πολύ χαμηλές συνθήκες λειτουργίας (ACCEL = 20%, OVRD = 20%, JOVRD=20%) και εκτελείται η ίδια προσομοίωση κίνησης και για τους δυο αλγορίθμους. Με κόκκινο χρώμα αποδίδονται τα σημεία που αναγνωρίστηκαν από την εφαρμογή "3D Hand Tracking", με μπλε χρώμα αποδίδονται τα σημεία που τοποθετήθηκε το τελικό στοιχείο δράσης σύμφωνα με τον αλγόριθμο A και με πράσινο χρώμα αποδίδονται τα σημεία που τοποθετήθηκε το τελικό στοιχείο δράσης σύμφωνα με τον αλγόριθμο B.



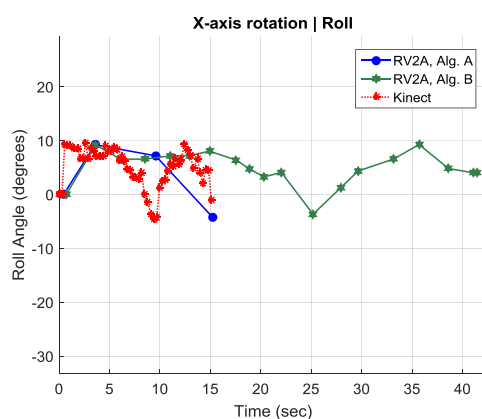
Εικόνα 5.85: Πορεία στο χώρο



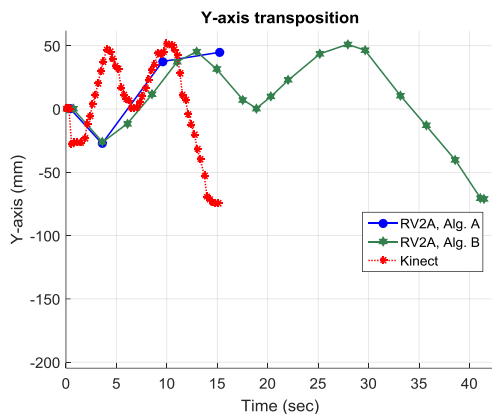
Εικόνα 5.86: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY



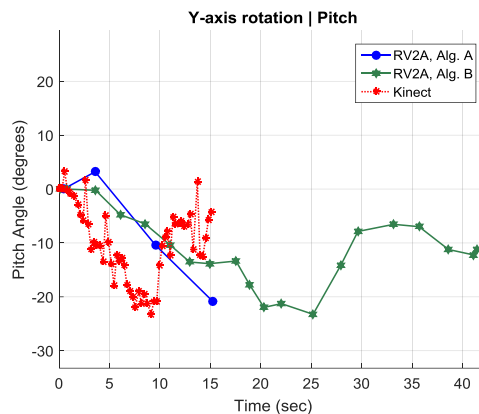
Εικόνα 5.87: Μετατόπιση στον άξονα X



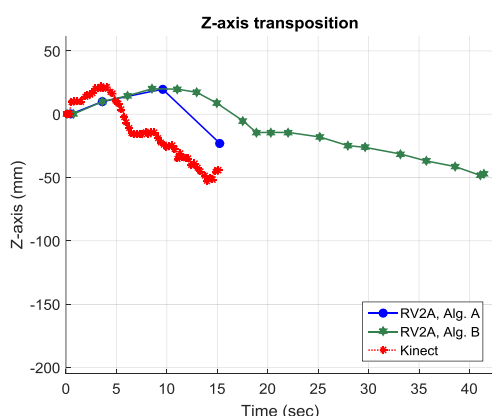
Εικόνα 5.88: Περιστροφή ως προς τον άξονα X



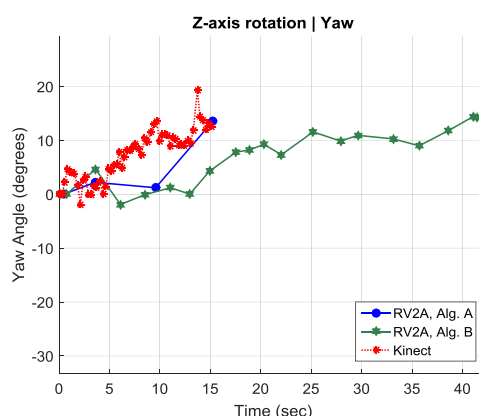
Εικόνα 5.89: Μετατόπιση στον άξονα Y



Εικόνα 5.90: Περιστροφή ως προς τον άξονα Y



Εικόνα 5.91: Μετατόπιση στον άξονα Z



Εικόνα 5.92: Περιστροφή ως προς τον άξονα Z

Τα παραπάνω διαγράμματα συνοδεύονται από τον παρακάτω πίνακα ο οποίος περιέχει πληροφορίες για την διάρκεια της κίνησης που ανιχνεύτηκε από την εφαρμογή αλλά και την διάρκεια εκτέλεσης των αλγορίθμων. Επίσης περιέχει πληροφορίες για το πλήθος σημείων της κίνησης που ανιχνεύτηκε από την εφαρμογή αλλά και το πλήθος σημείων στο οποίο τοποθετήθηκε το τελικό στοιχείο δράσης και για τους δυο αλγόριθμους.

Πίνακας 5.4: Σύγκριση αλγορίθμων

	"3D Hand Tracking"	Αλγόριθμος A	Αλγόριθμος B
<b>Πλήθος σημείων</b>	62	4	20
<b>Διάρκεια κίνησης (sec)</b>	15,10	15,24	41,47

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα και τον παραπάνω πίνακα, σε αυτές τις συνθήκες λειτουργίας οι δυο αλγόριθμοι έχουν διαφορετική συμπεριφορά τόσο ως προς την διάρκεια της κίνησης του βραχίονα όσο και ως προς το πλήθος των σημείων



στο οποίο αποστέλλεται το τελικό στοιχείο δράσης. Πιο συγκεκριμένα, **στον αλγόριθμο A** απορρίπτονται πολλά σημεία με αποτέλεσμα η κίνηση που εκτελείται από το τελικό στοιχείο δράσης να αποτελεί μια διαφορετική κίνηση από την πραγματική εξασφαλίστηκε όμως ότι οι δυο κινήσεις (κίνηση του χρήστη και κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης) **έχουν την ίδια διάρκεια**. Ενώ, **στον αλγόριθμο B** εξασφαλίστηκε ότι **η κίνηση που παράγεται από το τελικό στοιχείο δράσης αποτελεί μίμηση της κίνησης του χρήστη** (ως προς την θέση κ τον προσανατολισμό) όμως έχει μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Πιο συγκεκριμένα, για την ολοκλήρωση της κίνησης από τον χρήστη απαιτήθηκαν περίπου 15 δευτερόλεπτα ενώ για την ολοκλήρωση της κίνησης από τον βραχίονα απαιτήθηκαν περίπου 40 δευτερόλεπτα. Δηλαδή, σχεδόν ο τριπλάσιος χρόνος.

Συνεπώς, ανάλογα το αποτέλεσμα που χρειάζεται να εξασφαλιστεί σε μη επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας επιλέγεται και ο αντίστοιχος αλγόριθμος. Σημειώνεται ότι για τις επιλεγμένες συνθήκες λειτουργίας και για το υπολογιστικό σύστημα που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία και οι δυο αλγόριθμοι έχουν την επιθυμητή συμπεριφορά.

Πλέον, έχει επιλυθεί το πρόβλημα τηλεχειρισμού των δακτύλων του Talos' Hand μέσω της εφαρμογής "3D Hand Tracking" (κεφάλαιο 4), καθώς και το πρόβλημα τηλεχειρισμού του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα μέσω της ίδιας εφαρμογής. Υπενθυμίζεται ότι το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα αναπαριστά και μιμείται την ανθρώπινη παλάμη. Στην συνέχεια, ακολουθεί η ένωση των δυο υποσυστημάτων που αναπτύχθηκαν στα παραπάνω κεφάλαια με στόχο τον ταυτόχρονο τηλεχειρισμό τους (Talos' Hand και RV2A).

## 6. Τηλεχειρισμός Τελικού Ρομποτικού Συστήματος με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking"

---

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται το τελικό σύστημα τηλεχειρισμού καθώς και ο αλγόριθμός που αναπτύχθηκε στο λογισμικό MATLAB. Τέλος, παρατίθενται στιγμιότυπα από την διεξαγωγή διαφόρων πειραμάτων.

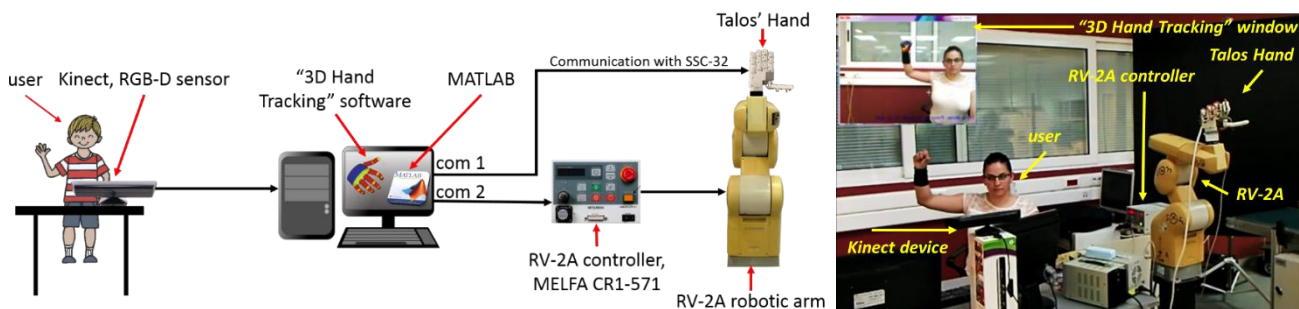
Στόχος αποτελεί ο τηλεχειρισμός του τελικού ρομποτικού συστήματος μέσω της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Για τον τηλεχειρισμό του ρομποτικού χεριού και τον τηλεχειρισμό του βραχίονα ως μεμονωμένα συστήματα ισχύει ότι αναφέρθηκε στα προηγούμενα δυο κεφάλαια. Άξιο αναφοράς θεωρείται το πλήθος των βαθμών ελευθερίας που έχει το τελικό ρομποτικό σύστημα που προκύπτει, το οποίο ανέρχεται σε 22 βαθμούς ελευθερίας. Από αυτούς, το ρομποτικό χέρι έχει 16 ΒΕ και ο βραχίονας έξι.

### 6.1 Περιγραφή τελικού συστήματος.

Το τελικό σύστημα τηλεχειρισμού με χρήση οπτικών δεδομένων απαρτίζεται από τον βιομηχανικό τύπου βραχίονα RV-2A με το ρομποτικό χέρι Talos' Hand τοποθετημένο ως τελικό στοιχείο δράσης στον βραχίονα. Για την εξαγωγή των οπτικών δεδομένων χρησιμοποιείται η εφαρμογή "3D Hand Tracking", για την λειτουργία της οποίας απαιτείται η χρήση ενός αισθητήρα RGB-D. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας Kinect. Τα προαναφερθέντα συστήματα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή με εγκατεστημένο το λογισμικό MATLAB [Εικόνα 6.1].

Η επικοινωνία με το ρομποτικό χέρι και το βραχίονα επιτυγχάνεται μέσω σειριακής θύρας. Για την ορθή λειτουργία της, ο χρήστης στέκεται απέναντι από τον αισθητήρα

Kinect με τρόπο τέτοιο ώστε το χέρι του να είναι παράλληλα με τον αισθητήρα για την αρχικοποίηση του στην εφαρμογή.



Εικόνα 6.1: Διάταξη τελικού συστήματος

Ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού του τελικού συστήματος αποτελείται από την συνένωση των αλγορίθμων τηλεχειρισμού που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Για λόγους πληρότητας όμως, τα βήματα υλοποίησης παρουσιάζονται παρακάτω.

## 6.2 Περιγραφή αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού του τελικού ρομποτικού συστήματος με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" αποτελείται από 11 βήματα. Εκ των οποίων τα δυο πρώτα βήματα αφορούν την έναρξη της εφαρμογής "3D Hand Tracking" και την αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ ελεγκτή βραχίονα και λογισμικού MATLAB, καθώς και μεταξύ Talos' Hand και λογισμικού MATLAB.

Συνοπτικά ο αλγόριθμος αναλύεται ως εξής: εκκινείται η εφαρμογή "3D Hand Tracking" και γίνεται αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας για το λογισμικό MATLAB με τον ελεγκτή του βραχίονα καθώς και με τον ελεγκτή του Talos' Hand. Όταν η εφαρμογή "3D Hand Tracking" βρίσκεται σε θέση αναμονής [Εικόνα 3.3(α)], τότε εκκινείται, χειροκίνητα, ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού στο MATLAB. Κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου εισάγονται δεδομένα στο περιβάλλον (workspace) του MATLAB. Αυτά εισάγονται από το αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" και αντιστοιχούν στις μεταβλητές οι οποίες περιγράφουν την γεωμετρική διαμόρφωση του ανθρώπινου χεριού (Εικόνα 3.1). Προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του αλγορίθμου είναι η **αρχικοποίηση του ανθρώπινου χεριού στην εφαρμογή να συμβαίνει αμέσως μετά την έναρξη του αλγορίθμου τηλεχειρισμού**. Τέλος, ο αλγόριθμος εισέρχεται στον κύριο βρόχο επανάληψης αυτού, όπου για κάθε στιγμιότυπο επιλέγονται οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης επεξεργάζονται και αποστέλλονται οι κατάλληλες εντολές στον ελεγκτή SSC-32 για κίνηση των δακτύλων, καθώς και στον

ελεγκτή του βραχίονα για κίνηση του τελικού στοιχείου δράσης, το οποίο είναι το ρομποτικό χέρι. Ως αποτέλεσμα, τα δάκτυλα του ρομποτικού χεριού μιμούνται την κίνηση των δακτύλων του χρήστη και το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα αναπαράγει την κίνηση της παλάμης του χρήστη. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικότερα η διαδικασία μέσω βημάτων τα οποία απεικονίζονται και στο διάγραμμα ροής [Εικόνα 6.2, Εικόνα 6.3, Εικόνα 6.4].

**Βήμα 1. Έναρξη της εφαρμογής "3D Hand Tracking":** Έναρξη της εφαρμογής "3D Hand Tracking". Οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης του χεριού αποθηκεύονται συνεχώς σε ένα αρχείο δεδομένων μαζί με το χρονικό διάστημα ( $\Delta t$ ) που διανύεται μεταξύ δυο διαδοχικών στιγμιότυπων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καταγραφή αυτή συμβαίνει ακόμα και κατά την διάρκεια στην οποία η εφαρμογή βρίσκεται σε λειτουργία αναμονής-αρχικοποίησης χεριού, όπου το εικονικό χέρι είναι χρώματος κόκκινο [Εικόνα 3.3(α)].

**Βήμα 2. Επικοινωνία ελεγκτή βραχίονα RV2A (MELFA CR1-571) και ελεγκτή Talos' Hand (SSC-32) με MATLAB:** Το ρομποτικό χέρι και ο βραχίονας συνδέονται μέσω σειριακής θύρας με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Συνεπώς, κατά την εκκίνηση του λογισμικού MATLAB απαιτείται η αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας βραχίονα RV2A με MATLAB και Talos' Hand με MATLAB. Η διαδικασία αυτή απαιτείται κάθε φορά που πραγματοποιείται εκκίνηση του λογισμικού MATLAB.

**Βήμα 3. Έναρξη αλγορίθμου (MATLAB):** Προϋπόθεση για την εκκίνηση του αλγορίθμου τηλεχειρισμού στο MATLAB αποτελεί η εφαρμογή "3D Hand Tracking" να βρίσκεται σε θέση αναμονής ("Βήμα 1") και η αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας ("Βήμα 2"). Εφόσον έχουν ολοκληρωθεί τα δυο πρώτα βήματα, δίνεται εντολή στον ελεγκτή του βραχίονα, ώστε να μεταβεί το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα σε συγκεκριμένη θέση και με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Η θέση και ο προσανατολισμός αποτελούν την θέση αρχικοποίησης του βραχίονα [Εικόνα 5.8, Εικόνα 6.1]. Υπενθυμίζεται ότι ως τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα έχει τοποθετηθεί το ρομποτικό χέρι Talos' Hand. Στο ρομποτικό χέρι αποστέλλονται οι τιμές αρχικοποίησης ώστε τα δάκτυλα να έχουν ίδια στάση με αυτήν της αρχικοποίησης για την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Παράλληλα, γνωστοποιείται η θέση αποθήκευσης (path) των δεδομένων που εξάγονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" και διαγράφονται όσα δεδομένα έχουν καταγραφεί μέχρι στιγμής. Αυτό συμβαίνει, ώστε να υπάρχουν δεδομένα από την χρονική στιγμή που εκκινείται ο αλγόριθμος (στο MATLAB) και έπειτα. Τέλος, αρχικοποιούνται οι μεταβλητές που απαιτούνται για την σωστή λειτουργία του αλγορίθμου. **Από το σημείο αυτό και μετά, ο χρήστης μπορεί να προβεί στην αρχικοποίηση του χεριού στην**

εφαρμογή "3D Hand Tracking" με στόχο τον τηλεχειρισμό του ρομποτικού συστήματος όποτε το θελήσει.

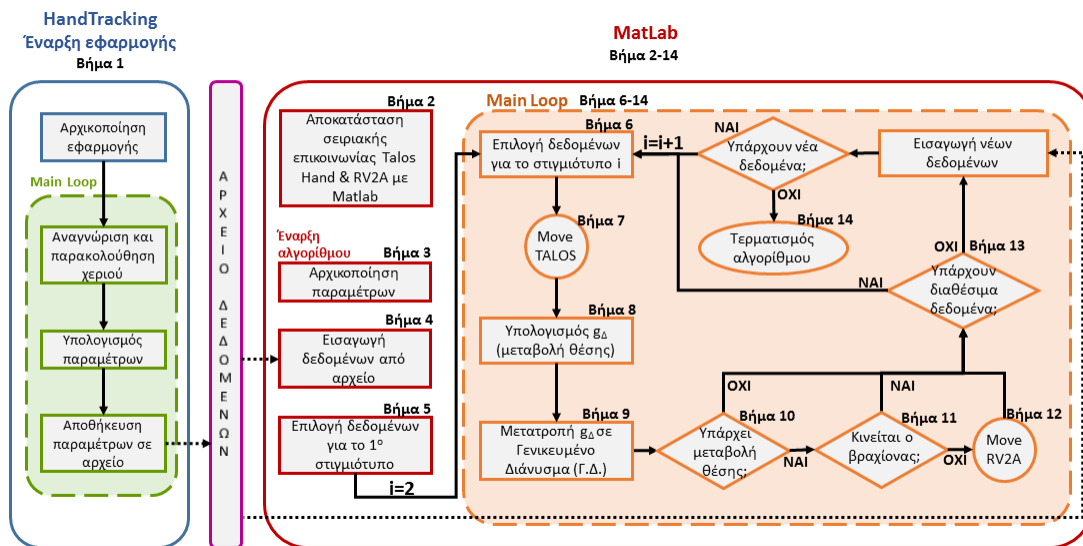
**Βήμα 4. Ανάγνωση δεδομένων από αρχείο:** Εισάγονται όσα δεδομένα έχουν καταγραφεί από την εφαρμογή "3D Hand Tracking" από το αρχείο δεδομένων στο περιβάλλον του MATLAB.

**Βήμα 5. Επιλογή δεδομένων:** Επιλέγονται οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης για το 1<sup>ο</sup> στιγμιότυπο και δημιουργείται ο ομογενής πίνακας  $g_{KH}$ , ο οποίος χρησιμοποιείται για την εύρεση του ομογενή πίνακα  $g_{\Delta}$ . Τέλος, αποστέλλεται στο ρομποτικό χέρι εντολή ώστε να αποκτήσει την πόζα που έχει το ανθρώπινο χέρι.

Στο επόμενο βήμα ο αλγόριθμος εισέρχεται στο κύριο βρόχο επανάληψης του αλγόριθμου. Στην πρώτη επανάληψη ο μετρητής  $i$  έχει τιμή ίση με δυο.

**Κύριος βρόχος επανάληψης:**

**Βήμα 6. Επιλογή δεδομένων:** Επιλέγονται τα δεδομένα γεωμετρικής διαμόρφωσης για το στιγμιότυπο  $i$

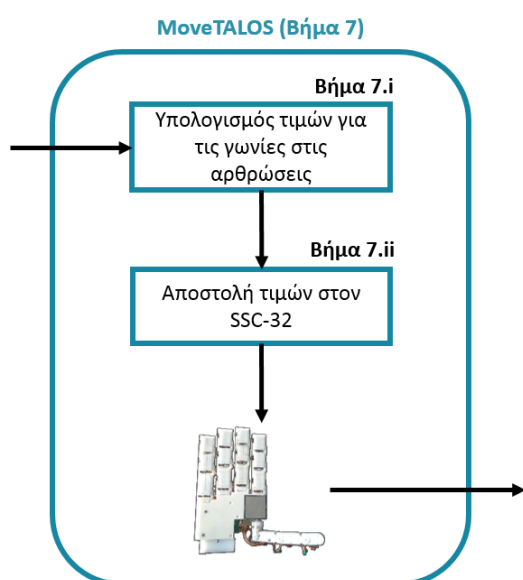


Εικόνα 6.2: Διάγραμμα ροής για το τελικό σύστημα (RV2A & TALOS)

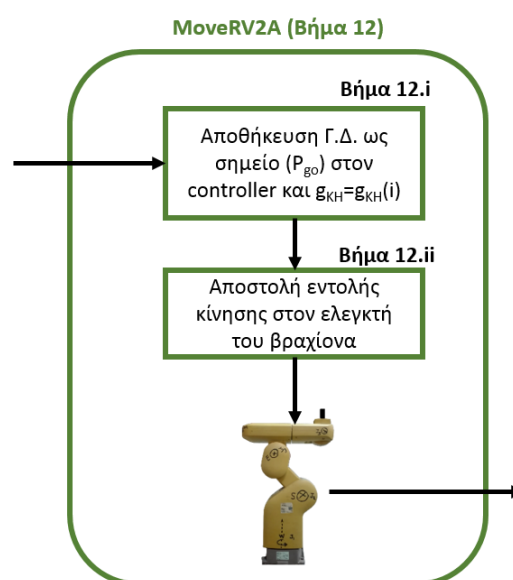
**Βήμα 7. Ρουτίνα MoveTALOS (Κίνηση δακτύλων Talos Hand):** Η ρουτίνα MoveTALOS απεικονίζεται στην Εικόνα 6.3. Είναι η ρουτίνα που κινεί τα δάκτυλα του Talos' Hand. Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή της σε βήματα

**Βήμα 7.i:** Επιλέγονται οι τιμές των γωνιών για τις αρθρώσεις του Talos' Hand και μετατρέπονται σε κατάλληλη μορφή (εύρος παλμού).

**Βήμα 7.ii:** Οι τιμές από το προηγούμενο βήμα αποστέλλονται στον σερβοελεγκτή SSC-32 με στόχο την κίνηση των σερβοκινητήρων, άρα και των αρθρώσεων στα δάκτυλα του Talos'Hand. Το χρονικό διάστημα το οποίο συνοδεύει τις παραμέτρους γεωμετρικής διαμόρφωσης  $\Delta t_i$ , αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που απαιτήθηκε για να ληφθεί το στιγμιότυπο  $i$ . Το χρονικό αυτό διάστημα αποστέλλεται στον σερβοελεγκτή και αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα στο οποίο θα εκτελεστεί η κίνηση από τους σερβοκινητήρες. Έπειτα ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα ("Βήμα 8").



Εικόνα 6.3: Απεικόνιση ρουτίνας MoveTALOS



Εικόνα 6.4: Απεικόνιση ρουτίνας MoveRV2A

**Βήμα 8. Υπολογισμός μεταβολής θέσης και προσανατολισμού:** Υπολογίζεται ο ομογενής μετασχηματισμός  $g_{KH}(t_i)$ , ο οποίος περιγράφει τον ομογενή μετασχηματισμό για το στιγμιότυπο  $i$ . Τέλος, με χρήση των ομογενών πινάκων  $g_{KH}$  και  $g_{KH}(t_i)$  υπολογίζεται ο ομογενής  $g_{\Delta}$ ,  $g_{\Delta}=g_{KH}^{-1}*g_{KH}(t_i)$ . Ο ΟΜ  $g_{\Delta}$  περιγράφει την μεταβολή θέσης και προσανατολισμού.

**Βήμα 9. Μετατροπή ΟΜ  $g_{\Delta}$  σε ΓΔ:** Ο ΟΜ  $g_{\Delta}$  μετατρέπεται σε γενικευμένο διάνυσμα.

**Βήμα 10. Έλεγχος μεταβολής θέσης κ προσανατολισμού:** Ελέγχεται αν υπάρχει μεταβολή της θέσης (προσανατολισμός και θέση) από την προηγούμενη (η οποία είναι και η τρέχουσα κατάσταση του τελικού στοιχείου δράσης). Αν υπάρχει μεταβολή, ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα. Διαφορετικά, η ροή του αλγόριθμου συνεχίζεται στο "Βήμα 13".

**Βήμα 11. Έλεγχος κατάστασης βραχίονα:** Ελέγχεται η κατάσταση του βραχίονα. Αν ο βραχίονας δεν κινείται, τότε ο αλγόριθμος συνεχίζει στο επόμενο βήμα. Διαφορετικά, αν ο βραχίονας βρίσκεται εν κινήσει ο αλγόριθμος προχωράει στο «Βήμα 13».

**Βήμα 12. Ρουτίνα MoveRV2A (Κίνηση τελικού στοιχείου δράσης RV-2A):** Η ρουτίνα MoveRV2A απεικονίζεται στην Εικόνα 6.4. Είναι η ρουτίνα που κινεί το άκρο του βραχίονα υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις. Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή της σε βήματα.

**Βήμα 12.i:** Το γενικευμένο διάνυσμα αποθηκεύεται στον ελεγκτή του βραχίονα ως σημείο με την ονομασία  $P_{go}$ . Παράλληλα ο ομογενής μετασχηματισμός  $g_{KH}$  αντικαθίσταται από τον ομογενή μετασχηματισμό  $g_{KH}(t_i)$  δηλαδή,  $g_{KH} = g_{KH}(t_i)$ .

**Βήμα 12.ii:** Αποστέλλεται εντολή στον ελεγκτή του βραχίονα, ώστε το τελικό άκρο δράσης του βραχίονα να κινηθεί σύμφωνα με το αποθηκευμένο σημείο που περιγράφει την μεταβολή θέσης και προσανατολισμού. Έπειτα ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα.

**Βήμα 13. Έλεγχος διαθέσιμων δεδομένων:** Πραγματοποιείται έλεγχος για την διαθεσιμότητα δεδομένων γεωμετρικής διαμόρφωσης στο περιβάλλον του λογισμικού MATLAB. Αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα τότε ο μετρητής  $i$  αυξάνεται κατά μια μονάδα. Ο αλγόριθμος προχωράει στο "Βήμα 6". Αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, τότε γίνεται προσπάθεια εισαγωγής/ανάγνωσης των δεδομένων που έχουν καταγραφεί μέχρι στιγμής από την εφαρμογή "3D Hand Tracking". Αν διαπιστωθεί η εισαγωγή νέων δεδομένων στο λογισμικό MATLAB, τότε ο μετρητής  $i$  αυξάνεται κατά μια μονάδα και ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού προχωράει στο "Βήμα 6". Διαφορετικά, ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα.

**Βήμα 14. Τερματισμός αλγορίθμου:** Εμφανίζεται μήνυμα τέλους στο Command Window του λογισμικού MATLAB και ολοκληρώνεται η εκτέλεση του αλγορίθμου.

Ο βραχίονας κινεί το τελικό στοιχείο δράσης με τρόπο τέτοιο ώστε να μιμείται την κίνηση της παλάμης του χρήστη. Ως τελικό στοιχείο δράσης είναι τοποθετημένο το ρομποτικό χέρι Talos' Hand το οποίο κινεί τις αρθρώσεις των δαχτύλων με τρόπο τέτοιο ώστε να μιμείται την κίνηση των αρθρώσεων του χρήστη. Ως αποτέλεσμα αυτού, το ρομποτικό σύστημα που περιγράφεται στην ενότητα αυτή, μιμείται την κίνηση του ανθρώπινου χεριού ως προς την θέση και το προσανατολισμό, για την παλάμη και τα δάκτυλα.

Με τον αλγόριθμο τηλεχειρισμού ο βραχίονας έχει την δυνατότητα να κινηθεί σε όλο το εύρος στον χώρο εργασίας του (θέση ή προσανατολισμό). Προϋπόθεση είναι να

μην δοθεί εντολή στον ελεγκτή να μεταβεί σε σημείο εκτός χώρου εργασίας. Όταν δοθεί εντολή στον βραχίονα για να μεταφερθεί σε σημείο εκτός χώρου εργασίας (θέση ή προσανατολισμό) τότε η εκτέλεση του αλγορίθμου στο λογισμικό MATLAB τερματίζεται και εμφανίζεται μήνυμα λάθους στον ελεγκτή του βραχίονα καθώς και στο command window του λογισμικού MATLAB. Να αναφερθεί ξανά ότι ο βραχίονας δέχεται εντολές σειριακά. Συνεπώς, κατά την διάρκεια εκτέλεσης τηλεχειρισμού ο ελεγκτής δέχεται τις εντολές σειριακά. Για όσο διάστημα ο βραχίονας εκτελεί κάποια ενέργεια δεν μπορεί να δεχθεί νέα εντολή. Αν για οποιοδήποτε λόγο σταλθεί εντολή, παρόλο που ο βραχίονας είναι απασχολημένος, η εντολή αυτή αγνοείται.

Στην επόμενη ενότητα παρατίθεται φωτογραφικό υλικό από την πειραματική αποτίμηση του αλγορίθμου τηλεχειρισμού που παρουσιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο.

### 6.3 Πειραματική αποτίμηση

Παρακάτω ακολουθούν στιγμιότυπα από την διαδικασία της πειραματικής αποτίμησης του αλγορίθμου. Συνολικά, παρουσιάζονται έξι πειράματα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων περιγράφεται παρακάτω.

Αρχικά, εκκινείται η εφαρμογή "3D Hand Tracking" και γίνεται αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ ελεγκτή του βραχίονα και λογισμικού MATLAB. Έπειτα, όταν η εφαρμογή "3D Hand Tracking" βρεθεί σε κατάσταση αναμονής [Εικόνα 3.3(α)], τότε εκκινείται ο αλγόριθμος τηλεχειρισμού που αναπτύχθηκε στο MATLAB. Στη συνέχεια ο χρήστης προχωράει σε αρχικοποίηση του ανθρώπινου χεριού στην εφαρμογή "3D Hand Tracking" [Εικόνα 3.3(β),(γ)]. Τέλος, ο χρήστης διαγράφει με το χέρι του την επιθυμητή κίνηση. Οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης του ανθρώπινου χεριού καταγράφονται συνεχώς από την εφαρμογή και εισάγονται στο MATLAB. Μέσω του αλγορίθμου οι παράμετροι θέσης και προσανατολισμού μετατρέπονται σε κατάλληλες εντολές και αποστέλλονται στον ελεγκτή του βραχίονα και οι παράμετροι για τις γωνίες των αρθρώσεων των δακτύλων μετατρέπονται κατάλληλα και αποστέλλονται στον ελεγκτή SSC-32 του Talos' Hand. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα, στην προκειμένη περίπτωση το Talos' Hand, μετακινείται όπως και η παλάμη του χρήστη. Αντίστοιχα, τα δάκτυλα του Talos' Hand μιμούνται τις κινήσεις των δακτύλων του χρήστη όπως αυτές αναγνωρίζονται από την εφαρμογή "3D Hand Tracking".

Η κίνηση, από την θέση αρχικοποίησης στην επιθυμητή θέση, πραγματοποιείται με ομαλή ταχύτητα. Αυτό συμβαίνει ώστε, η εφαρμογή να έχει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τον υπολογισμό και αποθήκευση των παραμέτρων, για να δίδεται ο χρόνος



που απαιτείται για την πραγματοποίηση επικοινωνίας του λογισμικού MATLAB με τον ελεγκτή του βραχίονα καθώς και για να εκτελεστεί η εντολή από τον βραχίονα.

### 6.3.1 Τηλεχειρισμός βραχίονα στο χώρο

Στο πειράματα αυτό γίνεται μετακίνηση της παλάμης ως προς τους άξονες του πλαισίου {H} (Εικόνα 5.7) καθώς και περιστροφή ως προς τους άξονες αυτούς. Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται στιγμιότυπα κατά την διάρκεια αρχικοποίησης του συστήματος καθώς και στιγμιότυπα κατά την διάρκεια τηλεχειρισμού του βραχίονα.



Εικόνα 6.5: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος



Εικόνα 6.6: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y του πλαισίου {H}



Εικόνα 6.7: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z του πλαισίου {H}



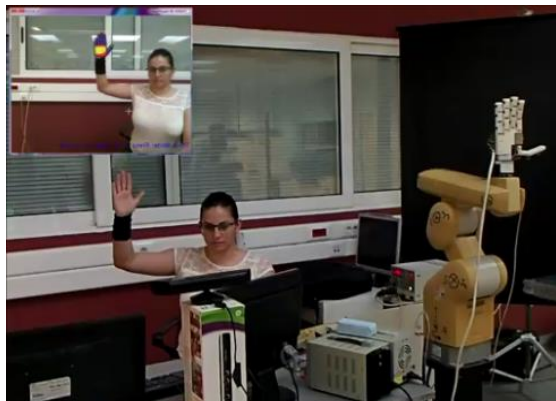
Εικόνα 6.8: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X του πλαισίου {H}

Η μετακίνηση του τελικού στοιχείου δράσης στο χώρο είναι επιτυχημένη καθώς δίδεται η δυνατότητα μετακίνησης και περιστροφής ως προς όποια πορεία επιθυμεί ο χρήστης, αρκεί να μην υπερβαίνει το χώρο εργασίας του βραχίονα. Αυτό ήταν αναμενόμενο σύμφωνα με το κεφάλαιο 5.

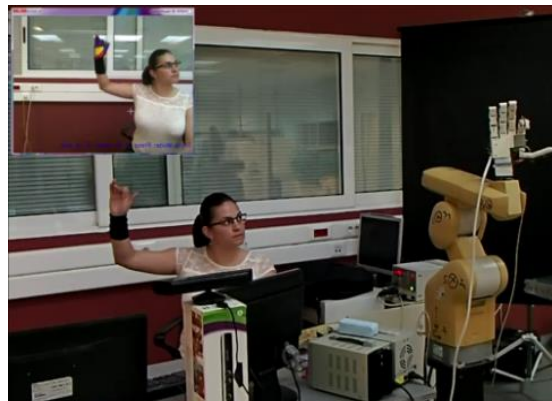
### 6.3.2 Τηλεχειρισμός δακτύλων

Κατά την εξαγωγή του πειράματος, ο χρήστης κάμπει και επαναφέρει στην αρχική τους θέση τα δάκτυλα. Παρακάτω παρατίθενται στιγμιότυπα κατά την κάμψη και

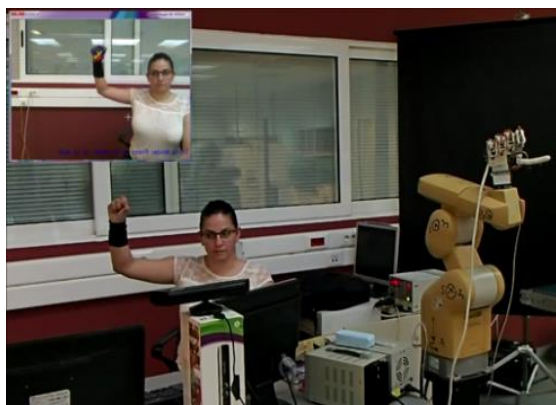
επαναφορά των δακτύλων. Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 3.2, το ρομποτικό χέρι έχει την δυνατότητα απαγωγής/προσαγωγής μόνο στην MCP άρθρωση του αντίχειρα.



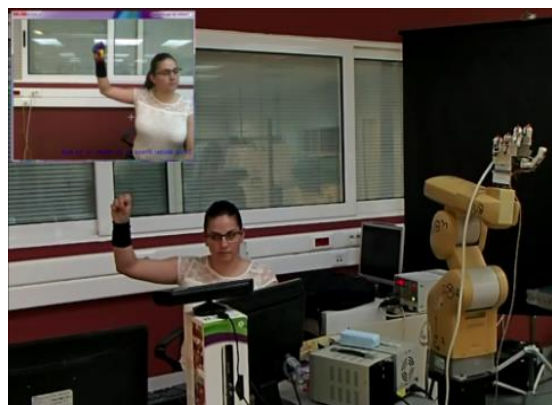
Εικόνα 6.9: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος



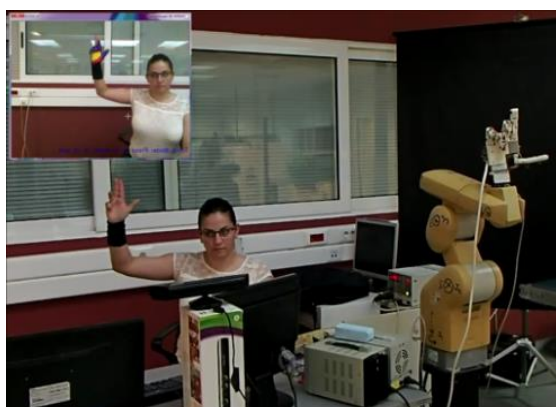
Εικόνα 6.10: Στιγμιότυπο κατά την κάμψη του δείκτη



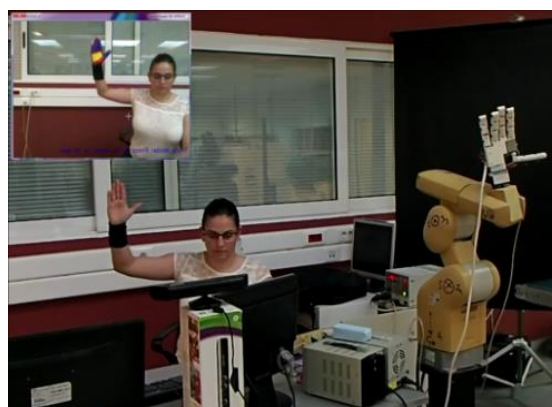
Εικόνα 6.11: Στιγμιότυπο κατά την κάμψη όλων των δακτύλων εκτός του αντίχειρα



Εικόνα 6.12: Στιγμιότυπο κατά την κάμψη όλων των δακτύλων εκτός τον αντίχειρα



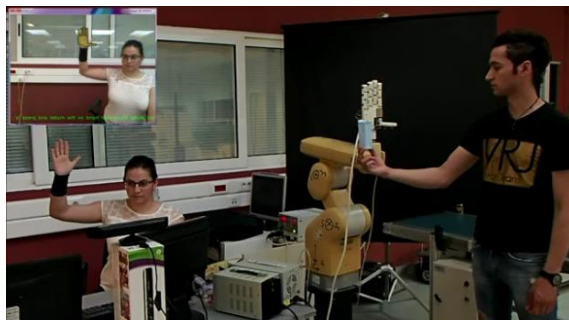
Εικόνα 6.13: Στιγμιότυπο κατά την επαναφορά του δείκτη στην θέση αρχικοποίησης



Εικόνα 6.14: Επαναφορά όλων των δακτύλων στην θέση αρχικοποίησης

### 6.3.3 Τηλεχειρισμός ρομποτικού συστήματος για λαβή αντικειμένου

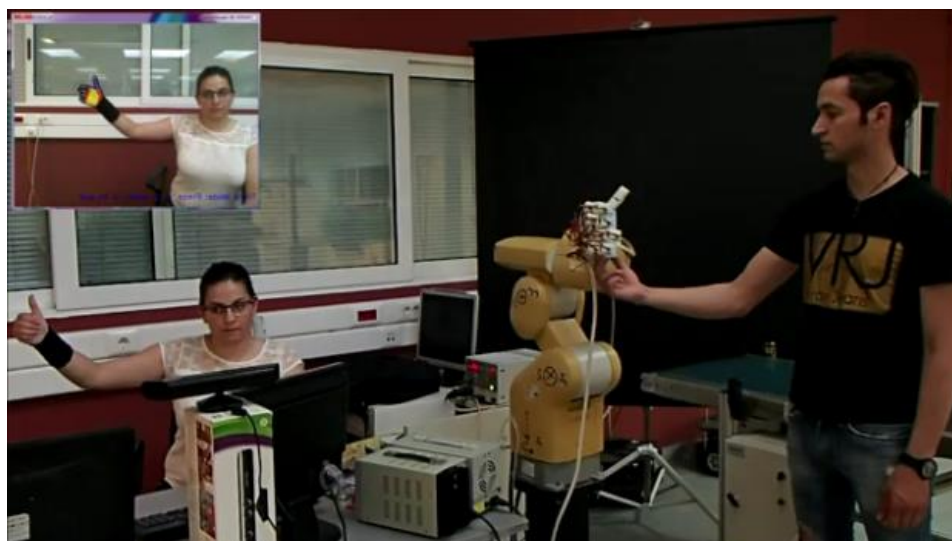
Στο επόμενο πείραμα γίνεται απόπειρα λαβής αντικειμένου. Μετά την αρπαγή του αντικειμένου, αυτό μετακινείται σε διαφορετική θέση και τέλος απελευθερώνεται. Το αντικείμενο αποτελείται από ένα ορθογώνιο κουτί διαστάσεων 12x3x5 cm.



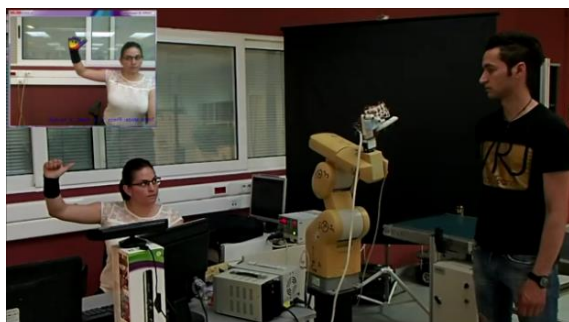
Εικόνα 6.15: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος



Εικόνα 6.16: Στιγμιότυπο πριν την αρπάγη του αντικειμένου



Εικόνα 6.17: Στιγμιότυπο κατά την αρπάγη του αντικειμένου



Εικόνα 6.18: Μετακίνηση του αντικειμένου σε διαφορετική θέση



Εικόνα 6.19: Απελευθέρωση αντικειμένου

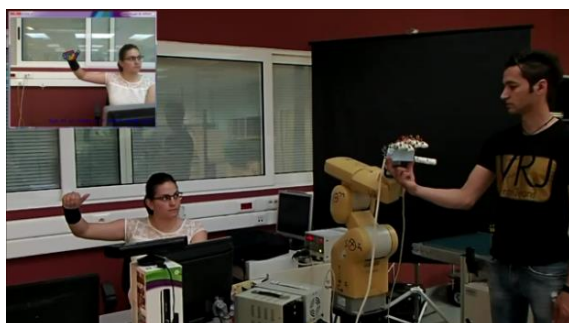
Η προσπάθεια λαβής αντικειμένου και μετακίνηση του ρομποτικού χεριού σε διαφορετική θέση είχε επιτυχία. Στη συνέχεια γίνεται απόπειρα λαβής του ίδιου αντικειμένου αλλά με διαφορετικό προσανατολισμό. Μετά την αρπαγή του αντικειμένου, αυτό μετακινείται σε διαφορετική θέση και τέλος απελευθερώνεται.



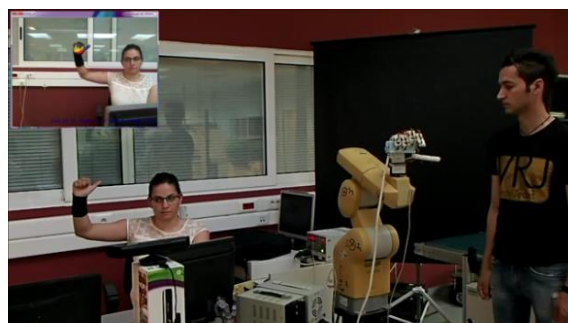
Εικόνα 6.20: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος



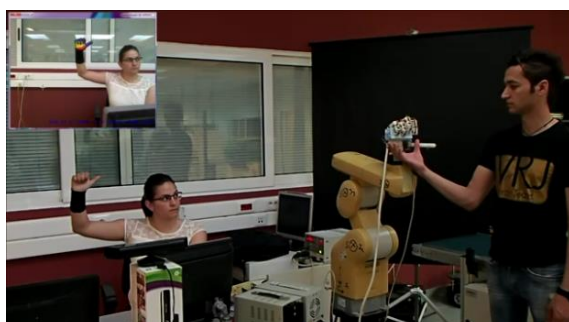
Εικόνα 6.21: Στιγμιότυπο πριν την αρπαγή του αντικειμένου



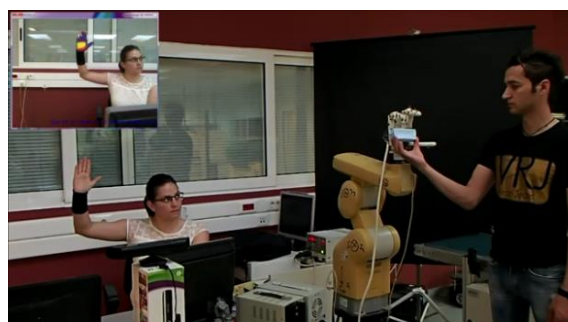
Εικόνα 6.22: Στιγμιότυπο πριν την αρπαγή του αντικειμένου



Εικόνα 6.23: Στιγμιότυπο κατά την αρπαγή του αντικειμένου



Εικόνα 6.24: Μετακίνηση του αντικειμένου σε διαφορετική θέση

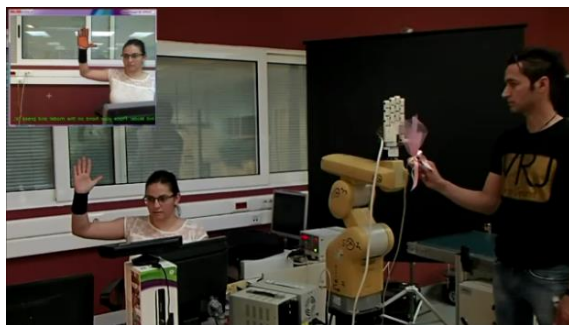


Εικόνα 6.25: Απελευθέρωση αντικειμένου

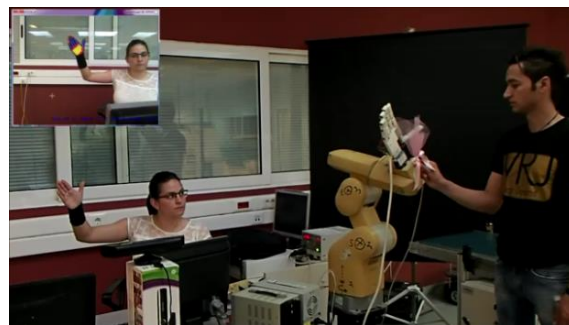
Το ρομποτικό σύστημα έχει την δυνατότητα λαβής αντικειμένου με διάφορες τοποθετήσεις του ανθρώπινου χεριού. Προϋπόθεση για την επιτυχημένη λαβή είναι η παλάμη του χρήστη και τα δάχτυλα να είναι σε πόζα τέτοια ώστε να μπορούν να αναγνωριστούν από την εφαρμογή "3D Hand Tracking"

### 6.3.4 Τηλεχειρισμός ρομποτικού συστήματος για λαβή υφάσματος

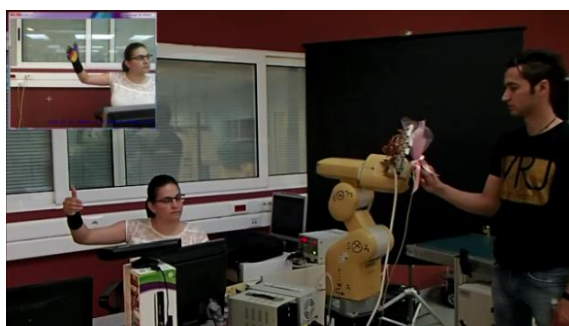
Στο τρέχων πείραμα γίνεται απόπειρα λαβής υφάσματος. Μετά την αρπάγη του υφάσματος, αυτό μετακινείται σε διαφορετική θέση και τέλος απελευθερώνεται.



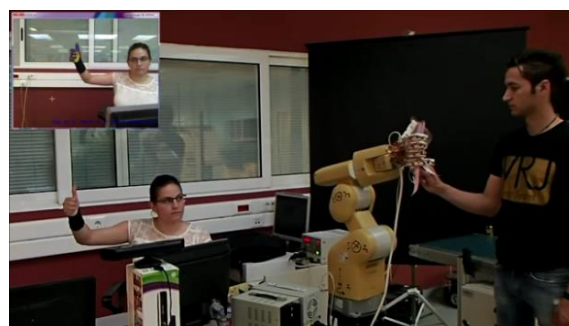
Εικόνα 6.26: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος



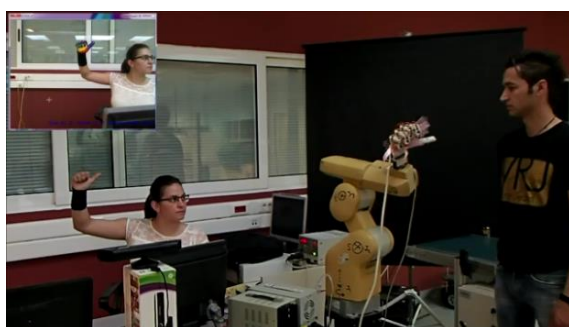
Εικόνα 6.27: Στιγμιότυπο πριν την αρπάγη του αντικειμένου



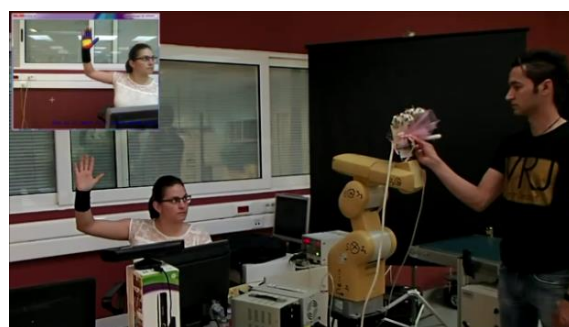
Εικόνα 6.28: Στιγμιότυπο πριν την αρπάγη του αντικειμένου



Εικόνα 6.29: Στιγμιότυπο κατά την αρπάγη του αντικειμένου



Εικόνα 6.30: Μετακίνηση του αντικειμένου σε διαφορετική θέση



Εικόνα 6.31: Απελευθέρωση αντικειμένου

Το ύφασμα αυτό θεωρείται αρκετά λεπτό. Το ρομποτικό σύστημα το οποίο έχει προκύψει είναι σε θέση να πραγματοποιήσει την αρπάγη και την μετακίνηση του σε διαφορετικό σημείο μέσω τηλεχειρισμού.

### 6.3.5 "Η Γέννηση Του Αδάμ"

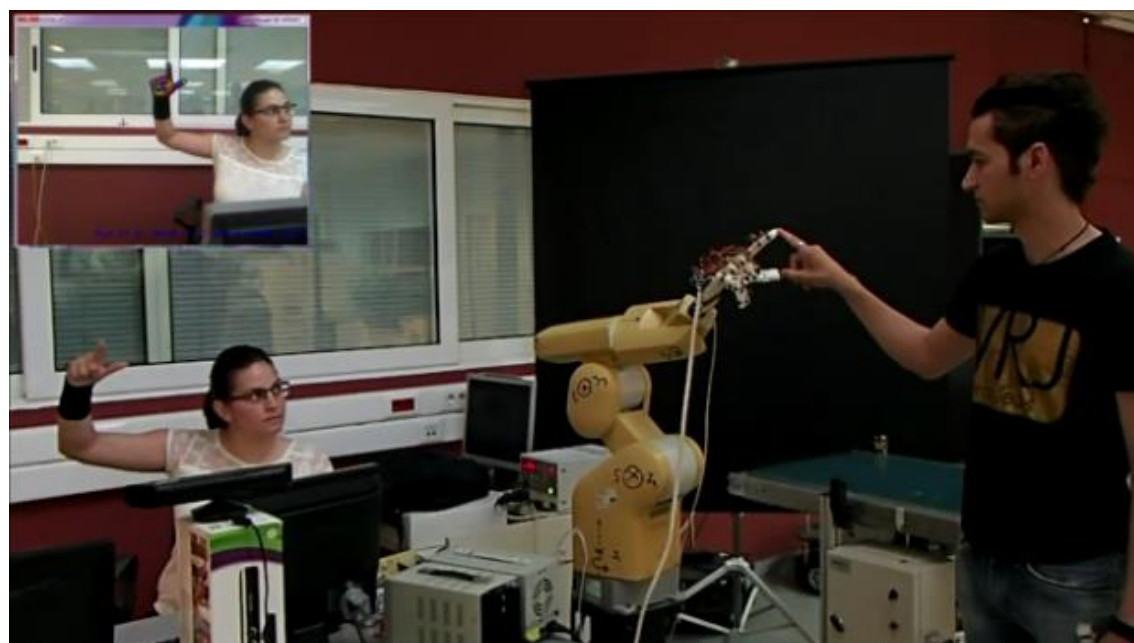
Μια απλή αλληλεπίδραση μεταξύ του ρομποτικού συστήματος και ανθρώπου παρουσιάζεται στο τελευταίο πείραμα. Σε αυτό το πείραμα γίνεται αναπαράσταση μιας από τις τοιχογραφίες της οροφής στην Cappella Sistina με ονομασία "Η Γέννηση Του Αδάμ" [33]. Παρακάτω παρατίθενται στιγμιότυπα κατά την εκτέλεση του πειράματος.



Εικόνα 6.32: Στιγμιότυπο αρχικοποίησης συστήματος



Εικόνα 6.33: Στιγμιότυπο κατά την τοποθέτηση του συστήματος στην επιθυμητή θέση



Εικόνα 6.34: Αναπαράσταση τοιχογραφίας του Michelangelo [33]

Η αναπαράσταση της τοιχογραφίας του Michelangelo [33] αναπαραστάθηκε επιτυχώς. Από την προσομοίωση αυτή παρατηρείται η δυνατότητα ρύθμισης της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού στοιχείου δράσης σε ικανοποιητικό ποσοστό ακρίβειας.

## 7. Συμπεράσματα – Προτάσεις

---

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται συμπερασματική αποτίμηση της παρούσας εργασίας και προτείνονται βελτιώσεις για περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος.

### 7.1 Συμπεράσματα

Κατά την διάρκεια ανάπτυξης των αλγορίθμων παρουσιάστηκαν δυσκολίες με την εφαρμογή "3D Hand Tracking", κατά τις οποίες δεν εκτιμάται επιτυχημένα η στάση των δακτύλων του ανθρώπινου χεριού από την εφαρμογή. Αυτό αποδίδεται στην ακρίβεια που παρέχεται από τον αισθητήρα Kinect και στις συνθήκες φωτισμού που επικρατούν στο εργαστήριο που είναι εγκατεστημένος ο ρομποτικός βραχίονας. Πλέον, έχει κυκλοφορήσει νέα έκδοση της εφαρμογής "3D Hand Tracking" [18], η οποία είναι πιο στιβαρή καθώς και νέα συσκευή Kinect [96] με καλύτερες αποδόσεις.

Παρ' όλα αυτά, το σύστημα το οποίο αναπτύχθηκε ανταποκρίνονται άμεσα κατά την διάρκεια τηλεχειρισμού. Συνεπώς, είναι ένα λειτουργικό σύστημα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω βελτίωση και ανάπτυξη.

### 7.2 Προτάσεις βελτίωσης

Παρακάτω παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος που αναπτύχθηκε:

- Ο τηλεχειρισμός του συστήματος να γίνει με την νέα έκδοση "3D Hand Tracking", η οποία είναι πιο εξελιγμένη σε σύγκριση με την έκδοση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

- Η δημιουργία interface με στόχο την απλοποίηση της διαδικασίας έναρξης του αλγορίθμου τηλεχειρισμού.
- Ανάπτυξη αλγορίθμου ώστε να αλλάζει δυναμικά η ταχύτητα του τελικού στοιχείου δράσης του βραχίονα με τρόπο τέτοιο ώστε να μιμείται την ταχύτητα της παλάμης του χρήστη.
- Εγκατάσταση της κάρτας δικτύου στον ελεγκτή MELFA CR1-571 και υλοποίηση τηλεχειρισμού μέσω Bluetooth ή tcp/ip protocol.



## Βιβλιογραφία

1. Δ.Μ. Εμίρης και Δ.Ε. Κουλουριώτης, ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ, 3<sup>η</sup> Έκδοση / 4<sup>η</sup> ανατύπωση, Αθήνα, ΤΕΚΔΟΤΙΚΗ ΣΕΛΚΑ 4Μ, 2013.
2. Goertz, R. C. (1963). Manipulators used for handling radioactive materials. *Human factors in technology*, 425-443.
3. "Kinect for Windows Sensor Components and Specifications". Available: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx> Accessed: May 2016.
4. Zhang, Z. (2012). Microsoft kinect sensor and its effect. *MultiMedia, IEEE*, 19(2), 4-10.
5. "Kinect, Coordinate Spaces". Available: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh973078.aspx#Depth\\_Ranges](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh973078.aspx#Depth_Ranges) Accessed: May 2016.
6. "Kinect, Skeletal Tracking". Available: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh973074.aspx> Accessed: May 2016.
7. Lun, R., & Zhao, W. (2015). A survey of applications and human motion recognition with Microsoft Kinect. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 29(05), 1555008.
8. Απ. Στεργιούλας και Χρ. Αγγελίδης, ΚΙΝΗΣΙΟΛΟΓΙΑ, Αθήνα 2001
9. Albrecht, I., Haber, J., & Seidel, H. P. (2003, July). Construction and animation of anatomically based human hand models. In *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation* (pp. 98-109). Eurographics Association.
10. Infantino, I., Chella, A., Džindo, H., & Macaluso, I. Human Hand Posture Reconstruction for a Visual Control of an Anthropomorphic Robotic Hand.
11. Infantino, I., Chella, A., Džindo, H., & Macaluso, I. (2003, October). Visual control of a robotic hand. In *Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on* (Vol. 2, pp. 1266-1271). IEEE.
12. Du, G., Zhang, P., Mai, J., & Li, Z. (2012). Markerless kinect-based hand tracking for robot teleoperation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9.
13. Chen, N., Chew, C. M., Tee, K. P., & Han, B. S. (2012, September). Human-aided robotic grasping. In *RO-MAN, 2012 IEEE* (pp. 75-80). IEEE.
14. Arango, Carlos, Jose R. Martínez, and Vera Z. Pérez. "Master-slave system using Kinect and an industrial robot for teleoperations." *Health Care Exchanges (PAHCE)*, 2013 Pan American. IEEE, 2013.

15. Gil, P., Mateo, C., & Torres, F. (2014). 3D visual sensing of the human hand for the remote operation of a robotic hand. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11.
16. "Ίδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας". Available: <https://www.forth.gr/index.php?l=g>
17. "Εργαστήριο Υπολογιστικής Όρασης και Ρομποτικής". Available: [http://www.ics.forth.gr/cvrl/index\\_main.php?l=g&c=11](http://www.ics.forth.gr/cvrl/index_main.php?l=g&c=11).
18. "3D Hand Tracking". Available: <http://cvrlcode.ics.forth.gr/handtracking/>  
Accessed: May 2016.
19. "Xtion Asus". Available: [https://www.asus.com/3D-Sensor/Xtion\\_PRO/](https://www.asus.com/3D-Sensor/Xtion_PRO/)  
Accessed: May 2016.
20. Grzeszczak, T., Mikulski, M., Szkodny, T., & Jędrasiak, K. (2012). Gesture based robot control. In *Computer Vision and Graphics* (pp. 407-413). Springer Berlin Heidelberg.
21. "Understanding Quaternions". Available: <http://www.chrobotics.com/library/understanding-quaternions> Accessed: May 2016
22. "Using Quaternion to Perform 3D rotations". Available: <http://www.cprogramming.com/tutorial/3d/quaternions.html> Accessed: May 2016.
23. Oikonomidis, I., Kyriazis, N., & Argyros, A. A. (2010). Markerless and efficient 26-dof hand pose recovery. In *Computer Vision—ACCV 2010* (pp. 744-757). Springer Berlin Heidelberg.
24. Oikonomidis, I., Kyriazis, N., & Argyros, A. A. (2011, August). Efficient model-based 3D tracking of hand articulations using Kinect. In *BmVC* (Vol. 1, No. 2, p. 3).
25. "CUDA". Available: [http://www.nvidia.com/object/cuda\\_home\\_new.html](http://www.nvidia.com/object/cuda_home_new.html)  
Accessed: May 2016.
26. Κωνσταντουδάκης Ι. (2012). Σχεδίαση και κατασκευή ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού. ΤΕΙ Κρήτης.
27. Κριτσωτάκης Ν. (2012). Κινηματική ανάλυση και έλεγχος κίνησης-λαβής ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού. ΤΕΙ Κρήτης.
28. "TowerPro SG90 Servo". Available: <http://www.servodatabase.com/servo/towerpro/sg90> Accessed: May 2016.
29. "Hitec HS-225BB". Available: <http://www.servodatabase.com/servo/hitec/hs-225bb> Accessed: May 2016.
30. RV-2A & 3AJ Standard Specifications Manual

31. Mitsubishi Robot Detailed explanations of functions
32. CR1 Controller instruction manual Troubleshooting
33. "The Creation of Adam" Available:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/The\\_Creation\\_of\\_Adam](https://en.wikipedia.org/wiki/The_Creation_of_Adam) Accessed: May 2016.
34. Πετρόπουλος Δ. "Έλεγχος ρομποτικού χειριστή με ανθρωπόμορφη αρπάγη ρομποτικού χεριού για την λαβή αντικειμένων". ΤΕΙ Κρήτης (Υπό εκπόνηση)
35. "Kinect". Available: <http://www.xbox.com/el-GR/xbox-one/accessories/kinect-for-xbox-one> Accessed: May 2016.

## Παράρτημα Α – Συναρτήσεις χειρισμού RV2A μέσω MATLAB

### 1. Περιγραφή συναρτήσεων

Συνάρτηση	Λειτουργία
<b>OPENCOM_RV2A</b>	<b>Κλήση:</b> OPENCOM_RV2A (COM) Δέχεται ως όρισμα την σειριακή θύρα (COM) στην οποία είναι συνδεδεμένος ο βραχίονας. Στόχος της συνάρτησης είναι, η αποκατάσταση της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή RV2A και του λογισμικού (MATLAB).
<b>CLOSECOM_RV2A</b>	<b>Κλήση:</b> CLOSECOM_RV2A Τερματισμός επικοινωνίας μεταξύ ελεγκτή RV2A και MATLAB.
<b>CNTL</b>	<b>Κλήση:</b> CNTL (0/1) Απενεργοποίηση (0, OFF) / Ενεργοποίηση ελεγκτή (1, ON)
<b>SRV</b>	<b>Κλήση:</b> SRV (0/1) Απενεργοποίηση (0, OFF) / Ενεργοποίηση σερβοκινητήρων (1, ON)
<b>GETPOSITION</b>	<b>Κλήση:</b> GETPOSITION Επιστρέφεται η τρέχουσα θέση και ο προσανατολισμός του πλαισίου συντεταγμένων του τελικού στοιχείου δράσης ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης.
<b>GETSTATE</b>	<b>Κλήση:</b> GETSTATE Επιστρέφονται πληροφορίες για την κατάσταση του βραχίονα και του ελεγκτή. (Αν εκτελεί κάποια εντολή ο βραχίονας, ποια είναι η κατάσταση των σερβοκινητήρων, σε ποια θέση το κλειδί στον ελεγκτή κ.α.)
<b>SPD</b>	<b>Κλήση:</b> SPD (Speed) Μέσω της συνάρτησης αυτής προσδιορίζεται η μέγιστη ταχύτητα που επιτρέπεται να αποκτήσει το τελικό στοιχείο δράσης για γραμμική και κυκλική κίνηση με αριθμητική τιμή (mm/s)

<b>OVRD</b>	<p><b>Κλήση:</b> OVRD (Override_per)</p> <p>Μέσω της συνάρτησης αυτής προσδιορίζεται το ποσοστό (Override_per) της μέγιστης ταχύτητας που μπορεί να αποκτήσει το τελικό στοιχείο δράσης.</p>
<b>JOVRD</b>	<p><b>Κλήση:</b> JOVRD (per)</p> <p>Μέσω της συνάρτησης αυτής προσδιορίζεται το ποσοστό της μέγιστης ταχύτητας κίνησης που μπορούν να αποκτήσουν οι αρθρώσεις.</p>
<b>ACCEL</b>	<p><b>Κλήση:</b> ACCEL (Acceleration rate, Deceleration Rate)</p> <p>Μέσω της συνάρτησης αυτής προσδιορίζεται το ποσοστό της μέγιστης επιτάχυνσης (Acceleration rate) και επιβράδυνσης (Deceleration Rate) του βραχίονα.</p>
<b>MOV</b>	<p><b>Κλήση A:</b> MOV('name')</p> <p>Κίνηση ελεύθερης παρεμβολής</p> <p>Μέσω της συνάρτησης αυτής κινείται ο βραχίονας από το τρέχων σημείο, στο σημείο το οποίο δίδεται ως όρισμα ('name'). Ο βραχίονας κατευθύνεται στο προκαθορισμένο σημείο χωρίς να ακολουθεί συγκεκριμένη διαδρομή.</p>
	<p><b>Κλήση B:</b> MOV('P_CURR*name')</p> <p>Κίνηση ελεύθερης παρεμβολής</p> <p>Μέσω της συνάρτησης αυτής ο βραχίονας κινείται ως προς το άκρο, σε θέση και προσανατολισμό που ορίζεται από το σημείο το οποίο δίδεται ως όρισμα ('name').</p>
<b>RSTALRM</b>	<p><b>Κλήση:</b> RSTALRM</p> <p>Επαναφορά του ελεγκτή σε κατάσταση λειτουργίας.</p>
<b>STOP</b>	<p><b>Κλήση:</b> STOP</p> <p>Άμεση ακινητοποίηση βραχίονα.</p>
<b>posData2tr</b>	<p><b>Κλήση:</b> posData2tr([x,y,z,A,B,C])</p>

	<p>Η συνάρτηση αυτή δέχεται ως είσοδο ένα γενικευμένο διάνυσμα και επιστρέφει τον αντίστοιχο ομογενή μετασχηματισμό.</p>
<b>tr2xyzABC</b>	<p><b>Κλήση:</b> tr2xyzABC(HTR)</p> <p>Η συνάρτηση αυτή δέχεται ως όρισμα έναν ομογενή μετασχηματισμό (HTR) και επιστρέφει το αντίστοιχο γενικευμένο διάνυσμα.</p>
<b>SAVE_CURRENT_POSITION</b>	<p><b>Κλήση:</b> SAVE_CURRENT_POSITION('name')</p> <p>Μέσω της συνάρτησης αυτής αποθηκεύεται στον ελεγκτή η τρέχουσα θέση του τελικού στοιχείου δράσης με όνομα το όρισμα (name) της συνάρτησης.</p> <p>Αν δοθεί όρισμα με αρχικό P αποθηκεύεται η θέση P_CURR αντίστοιχα για το χώρο των αρθρώσεων αρχικό J &gt;&gt; J_CURR</p>
<b>SETCOOR</b>	<p><b>Κλήση:</b> SETCOOR('name', [x,y,z,A,B,C])</p> <p>Η συνάρτηση αυτή δέχεται ως όρισμα το όνομα με το οποίο αποθηκεύεται το σημείο στον ελεγκτή καθώς και την περιγραφή αυτού με την μορφή γενικευμένου διανύσματος.</p>
<b>TOOL</b>	<p><b>Κλήση:</b> TOOL([x,y,z,A,B,C])</p> <p>Δέχεται ως όρισμα ένα γενικευμένο διάνυσμα (x,y,z,A,B,C) το οποίο περιγράφει το πλαίσιο συντεταγμένων του άκρου ως προς το πλαίσιο της 6<sup>ης</sup> και τελευταίας άρθρωσης του βραχίονα.</p>

## 2. Παράδειγμα υλοποίησης αλγόριθμου χειρισμού RV2A σε MATLAB

Παρακάτω παρατίθεται ένα πρόγραμμα MATLAB στο οποίο αποθηκεύεται η αρχική θέση του τελικού στοιχείου δράσης με ονομασία *Pinit*, δημιουργείται και αποθηκεύεται το σημείο P1. Με το παρακάτω πρόγραμμα το τελικό στοιχείο δράσης μετακινείται σύμφωνα με τον ομογενή πίνακα  $g_{ab}$  από την θέση την οποία βρίσκεται. Η μετακίνηση γίνεται ως προς το πλαίσιο που είναι επισυναπτόμενο στο τελικό στοιχείο δράσης. Έπειτα, το τελικό στοιχείο δράσης μετακινείται στο σημείο P1. Τέλος, το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα να επιστρέφει στην αρχική θέση που είχε κατά την έναρξη του αλγόριθμου.

Έστω ότι ο ελεγκτής του βραχίονα είναι συνδεδεμένος στην σειριακή θύρα 3 (com3).

```
%%%%%%%%%%
% !! οι παρακάτω εντολές εκτελούνται μόνο μια φορά κατά την έναρξη του λογισμικού MATLAB!!
OPENCOM_RV2A(3)    % συνάρτηση αποκατάστασης επικοινωνίας
CNTL(1)           % ενεργοποίηση ελεγκτή
% στις επόμενες συναρτήσεις ορίζεται το ποσοστό της ταχύτητας του βραχίονα και των αρθρώσεων
καθώς και η επιτάχυνση αυτών
OVRD(80)
JOVRD(80)
ACCEL(80,80)
SRV(1)           % ενεργοποίηση σερβοκινητήρων
%%%%%%%%%%

%%
PosData = [ 280 40 900 89 0 91]; Position=6;    % δημιουργία σημείου P1,
SETPOSITION('P1', PosData, Position)

Pinit=GETPOSITION_ready; % αποθήκευση αρχικής θέσης και στάσης τελικού στοιχείου δράσης
SETPOSITION('Pinit', Pinit, Position)

gab=[0 0 0 10; 0 0 0 10; 0 0 0 10; 0 0 0 1]; % δημιουργία ομογενή μετασχηματισμού gab.

GenDia = tr2xyzABC(gab);           % μετατροπή του ομογενή gab σε γενικευμένο διάνυσμα
% ακολουθεί έλεγχος για την κατάσταση του βραχίονα. Η while θα τερματιστεί όταν ο βραχίονας δεν
βρίσκεται εν κινήσει.
stateRV2A=GETSTATE;
while (stateRV2A.Stopped==0)
stateRV2A=GETSTATE;
end

SETCOORD('Pgo', [GenDia(1) , GenDia(2) , GenDia(3) , GenDia(4) , GenDia(5) , GenDia(6)]); %
αποθήκευση γενικευμένου διανύσματος στον ελεγκτή

MOV('P_CURR*Pgo')    % Αποστέλλεται εντολή στο τελικό στοιχείο δράσης ώστε αυτό να κινηθεί
σύμφωνα με το διάνυσμα Pgo, δηλαδή σύμφωνα με τον ομογενή gab. Το P_CURR είναι η τρέχουσα θέση
του τελικού στοιχείου δράσης, το οποίο δίνεται από τον ελεγκτή και δεν απαιτείται ο ορισμός του. Η
κίνηση που θα γίνει θα είναι ως προς το πλαίσιο του τελικού άκρου δράσης.

% Ακολουθεί έλεγχος για την κατάσταση του βραχίονα. Η while θα τερματιστεί όταν ο βραχίονας δεν
βρίσκεται εν κινήσει.
```

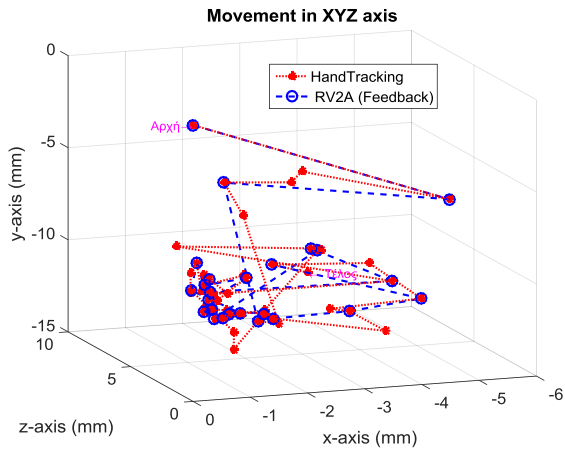
```
stateRV2A=GETSTATE;
while (stateRV2A.Stopped==0)
stateRV2A=GETSTATE;
end
MOV('P1'); % μετακινεί το τελικό στοιχείο δράσης στο σημείο P1 (θέση και προσανατολισμός) το οποίο
δημιουργήθηκε στην αρχή του προγράμματος.
% ακολουθεί έλεγχος για την κατάσταση του βραχίονα. Η while θα τερματιστεί όταν ο βραχίονας δεν
βρίσκεται εν κινήσει.
stateRV2A=GETSTATE;
while (stateRV2A.Stopped==0)
stateRV2A=GETSTATE;
end
MOV('Pinit'); % αποστέλλεται εντολή στον ελεγκτή του βραχίονα ώστε το τελικό στοιχείο δράσης να
μετακινηθεί στην αρχική θέση του τελικού στοιχείου δράσης (θέση και προσανατολισμός).

CLOSECOM_RV2A(); % απενεργοποιείται η επικοινωνία μεταξύ MATLAB και βραχίονα.
```

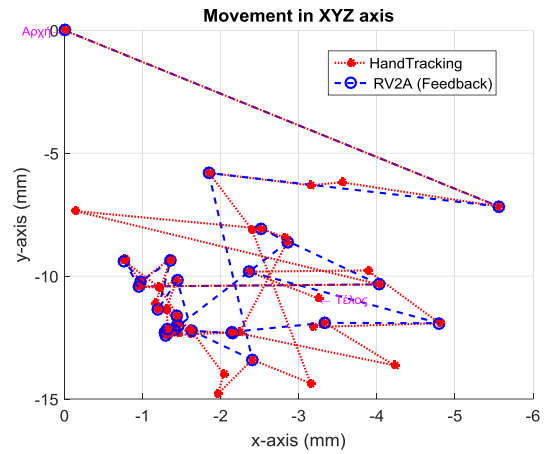


# Παράρτημα Β – Διαγράμματα αλγ. Α

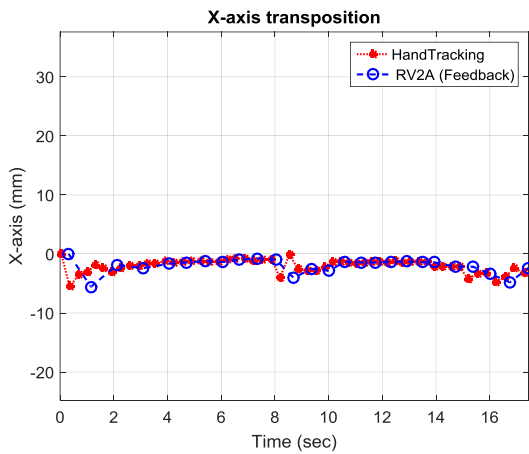
## 1. Ακίνητο χέρι χωρίς κατωφλίωση κίνησης, Αλγ. Α



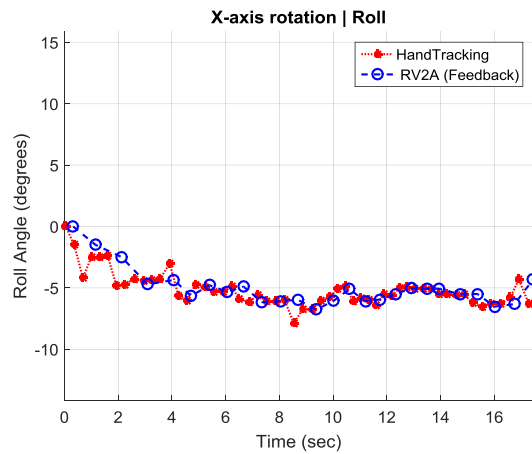
Διάγραμμα 1: Πορεία στο χώρο



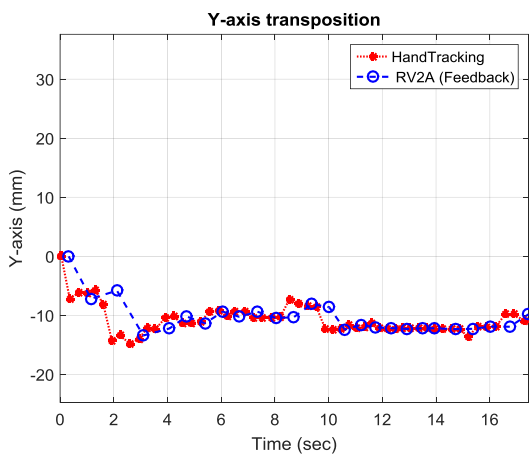
Διάγραμμα 2: Προβολή κίνησης στο επίπεδο ΧΥ



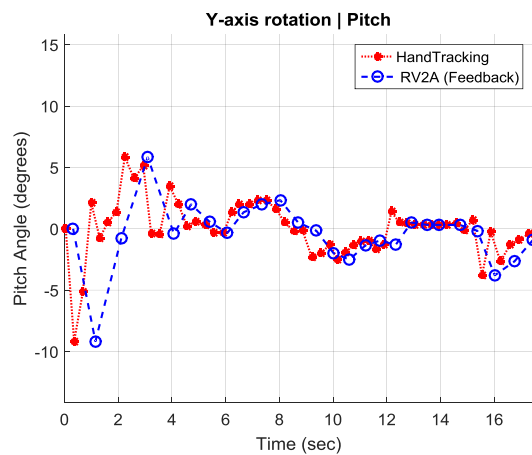
Διάγραμμα 3: Μετατόπιση στον άξονα Χ



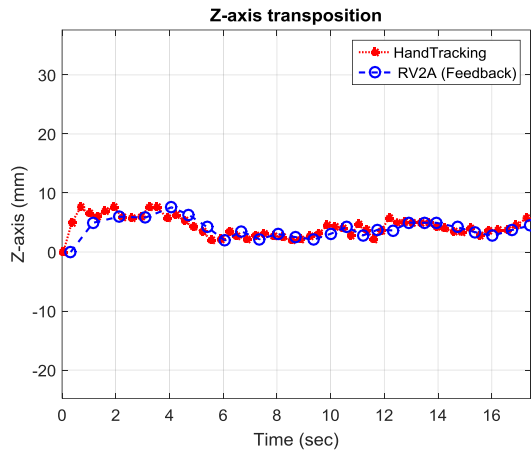
Διάγραμμα 4: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Χ



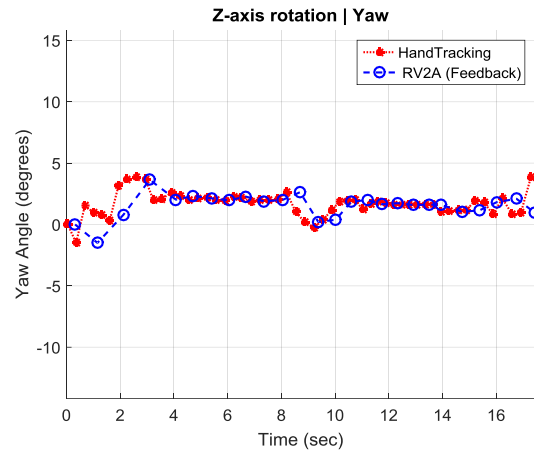
Διάγραμμα 5: Μετατόπιση στον άξονα Υ



Διάγραμμα 6: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Υ

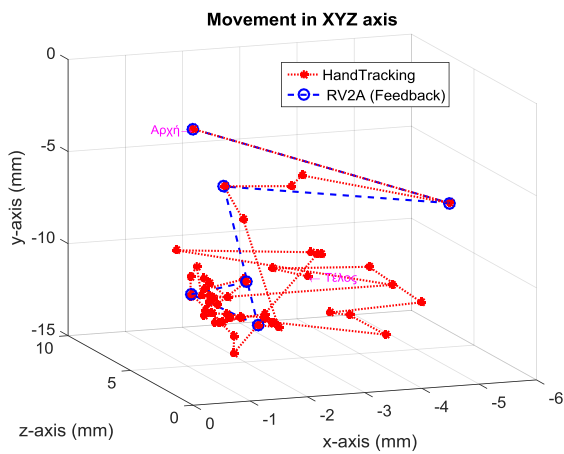


Διάγραμμα 7: Μετατόπιση στον άξονα Z

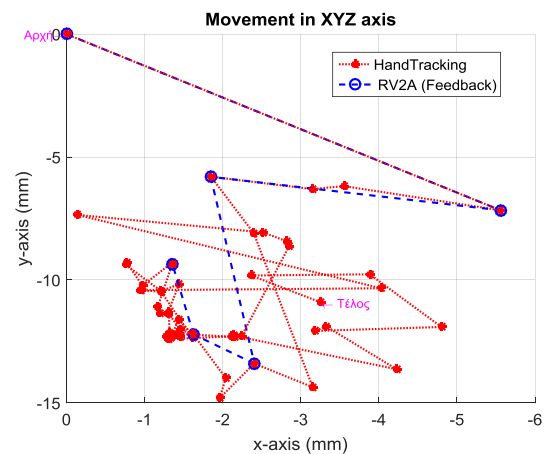


Διάγραμμα 8: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

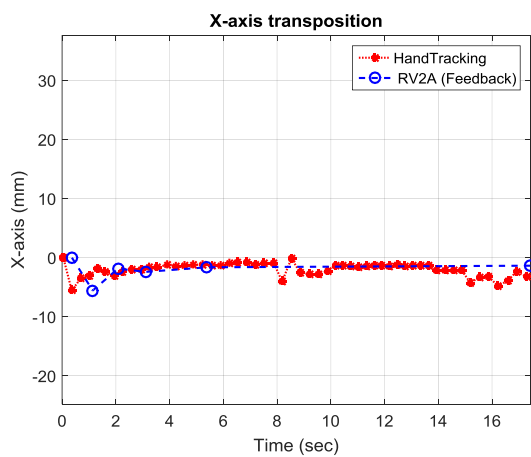
## 2. Ακίνητο χέρι με κατωφλίωση κίνησης, Αλγ. Α



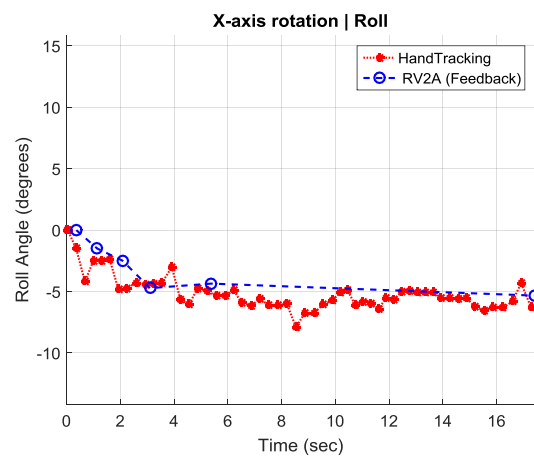
Διάγραμμα 9: Πορεία στο χώρο



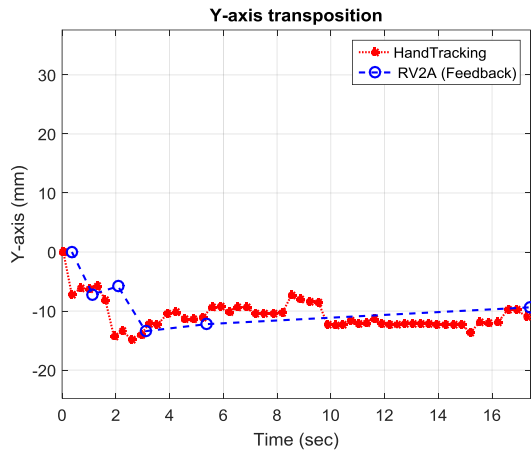
Διάγραμμα 10: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY



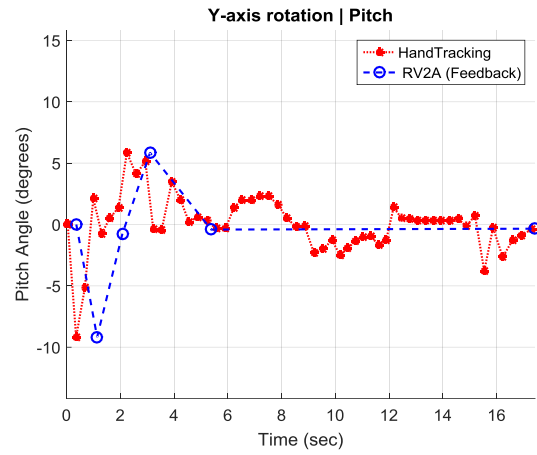
Διάγραμμα 11: Μετατόπιση στον άξονα X



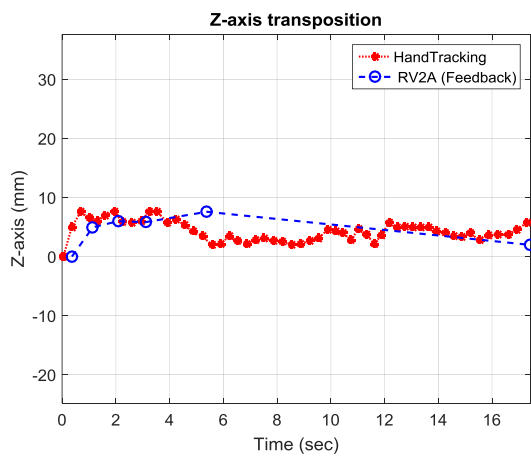
Διάγραμμα 12: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



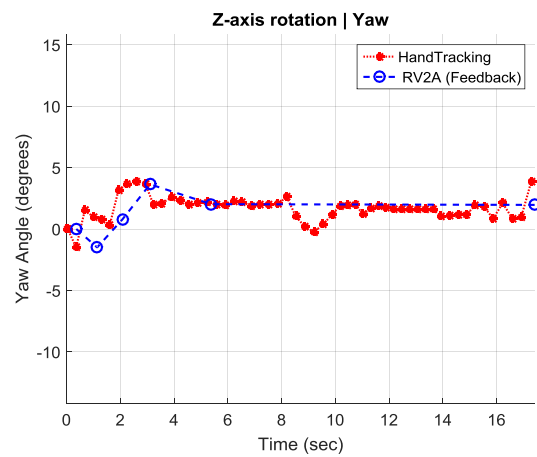
Διάγραμμα 13: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 14: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

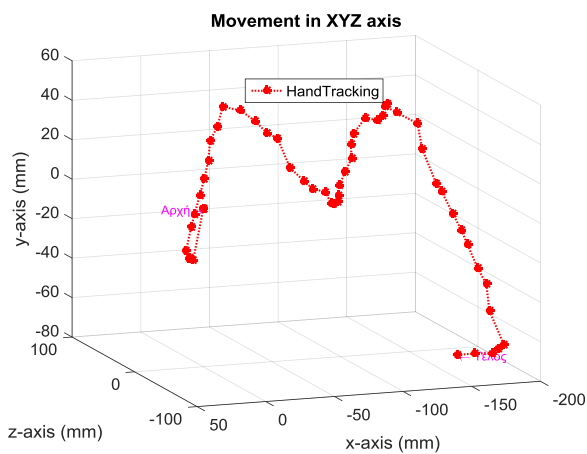


Διάγραμμα 15: Μετατόπιση στον άξονα Z

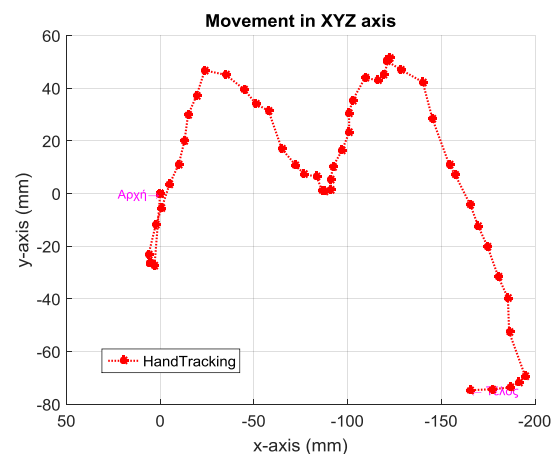


Διάγραμμα 16: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

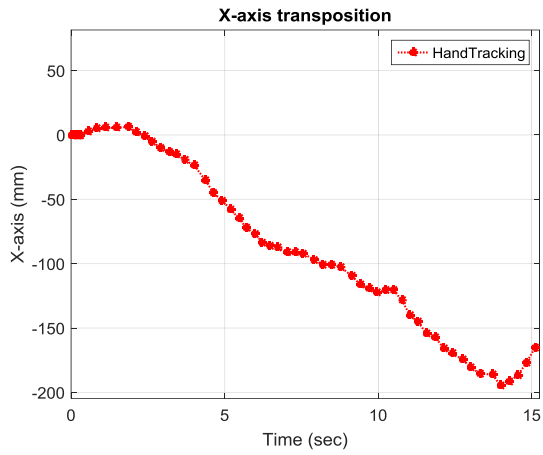
### 3. Πειραματική κίνηση



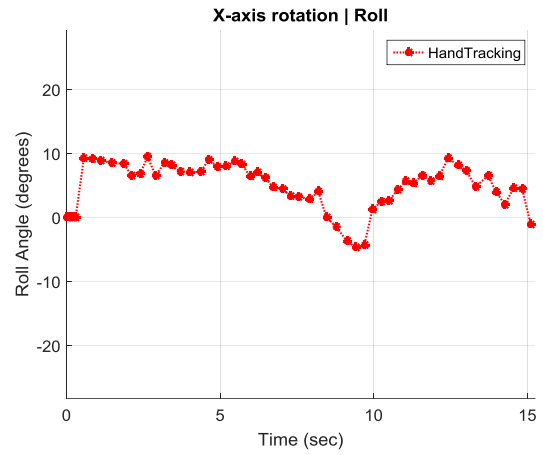
Διάγραμμα 17: Πορεία στο χώρο



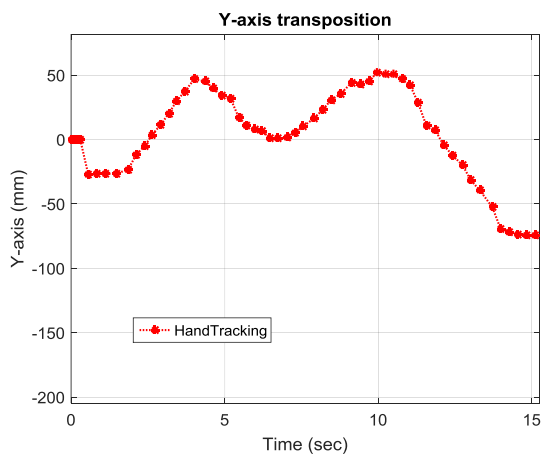
Διάγραμμα 18: Προβολή κίνησης στο επίπεδο XY



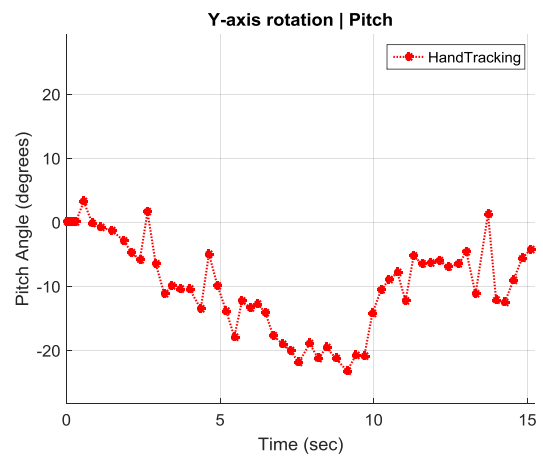
Διάγραμμα 19: Μετατόπιση στον άξονα X



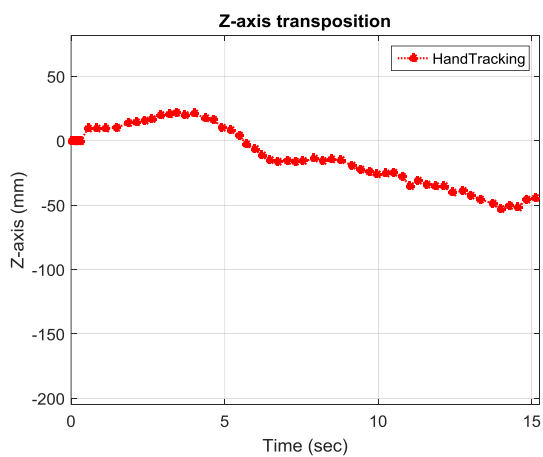
Διάγραμμα 20: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



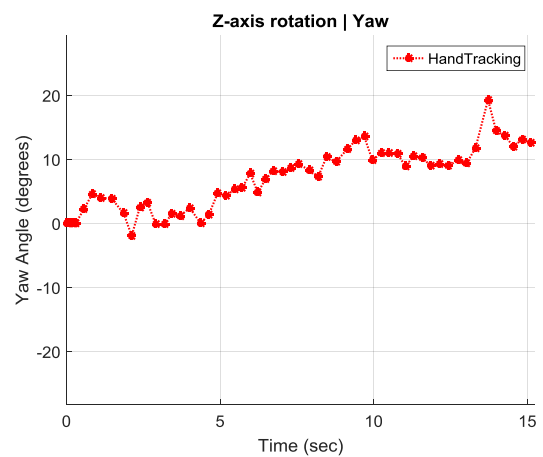
Διάγραμμα 21: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 22: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

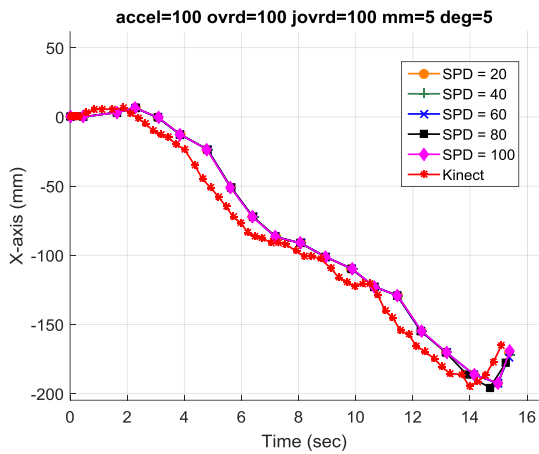


Διάγραμμα 23: Μετατόπιση στον άξονα Z

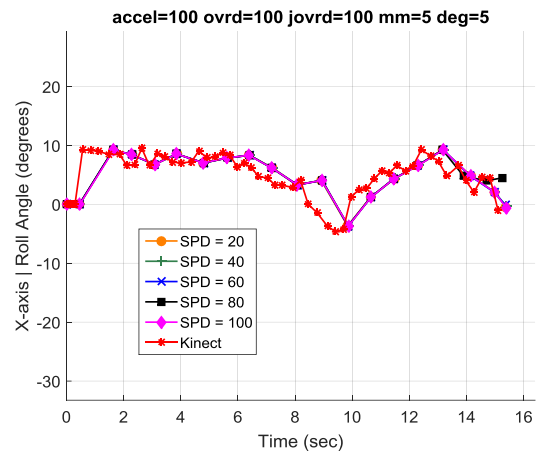


Διάγραμμα 24: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

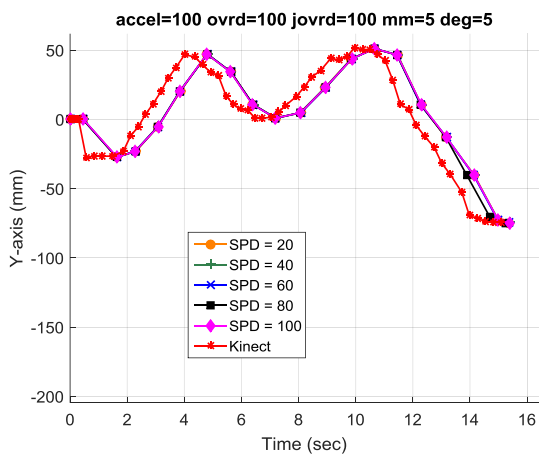
#### 4. Μεταβολή της SPD, Αλγ. Α



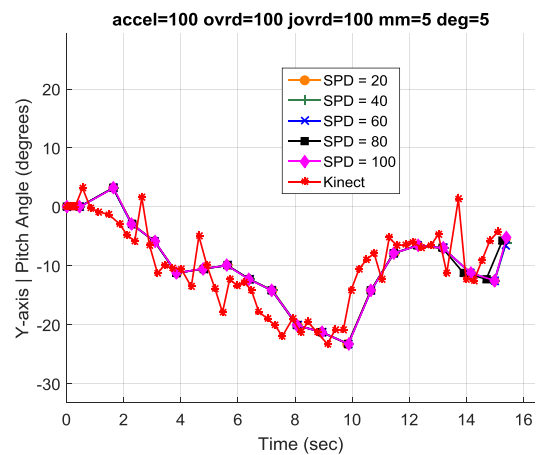
Διάγραμμα 25: Μετατόπιση στον άξονα X



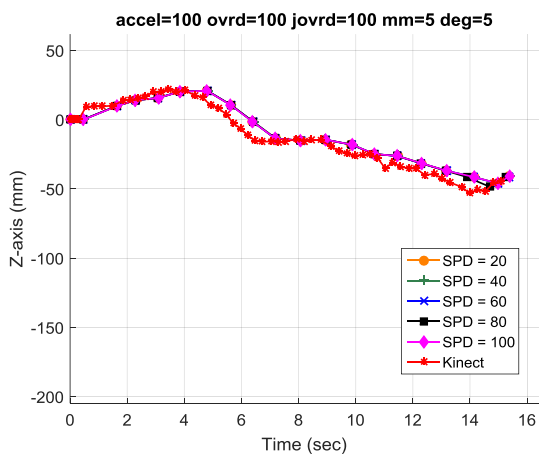
Διάγραμμα 26: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



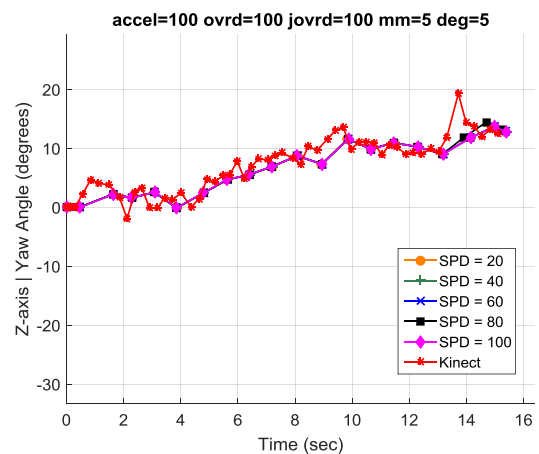
Διάγραμμα 27: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 28: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

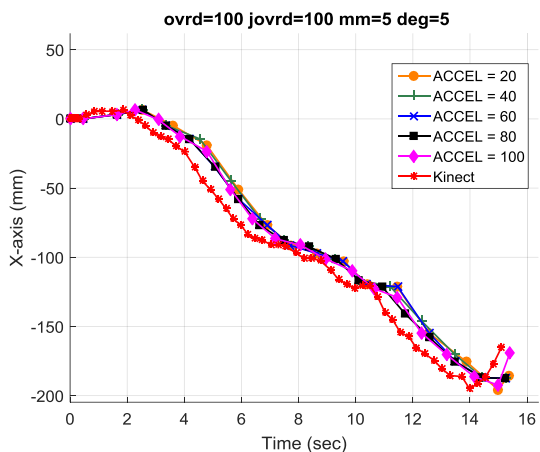


Διάγραμμα 29: Μετατόπιση στον άξονα Z

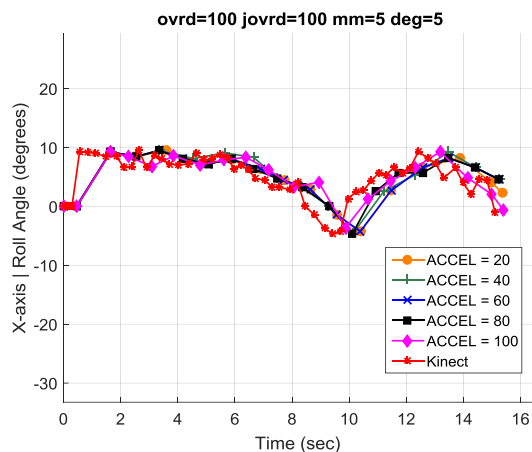


Διάγραμμα 30: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

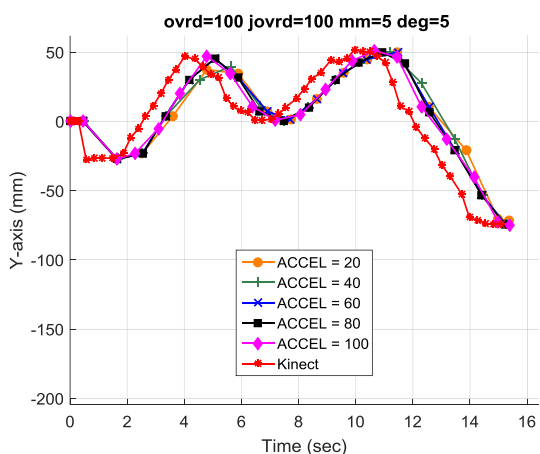
## 5. Μεταβολή της ACCEL, Αλγ. Α



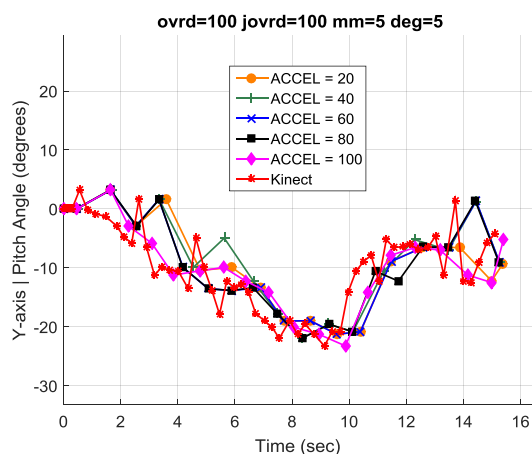
Διάγραμμα 31: Μετατόπιση στον άξονα X



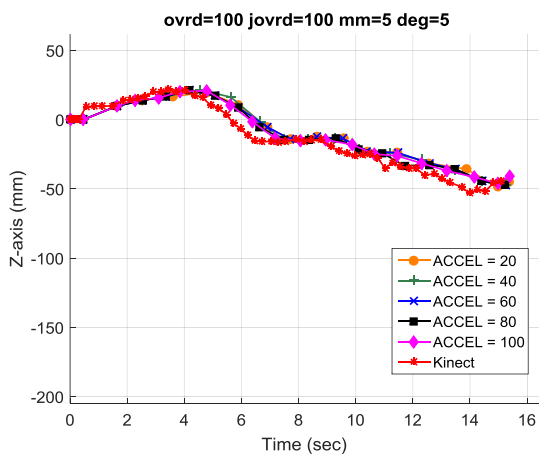
Διάγραμμα 32: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



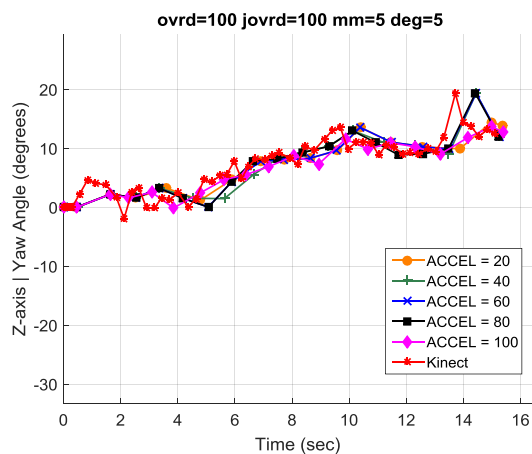
Διάγραμμα 33: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 34: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

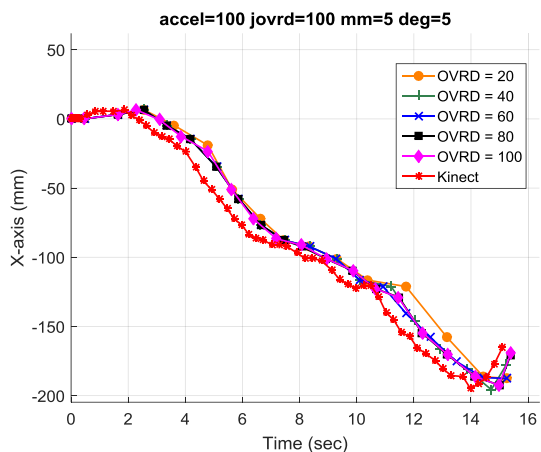


Διάγραμμα 35: Μετατόπιση στον άξονα Z

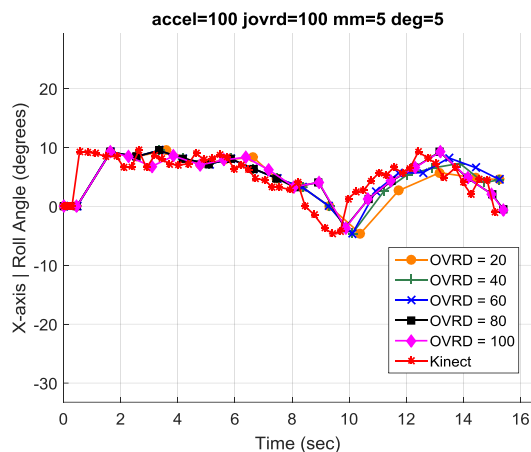


Διάγραμμα 36: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

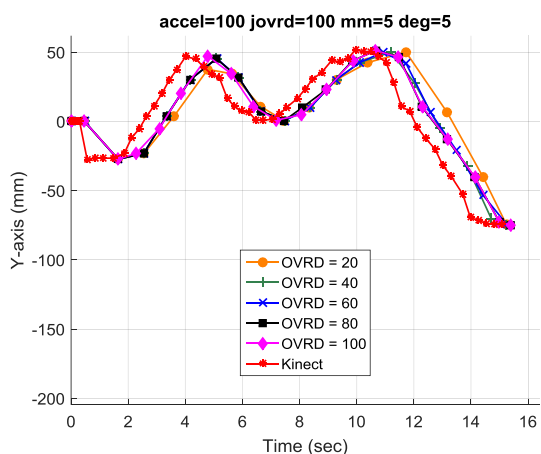
## 6. Μεταβολή της OVRD, Αλγ. Α



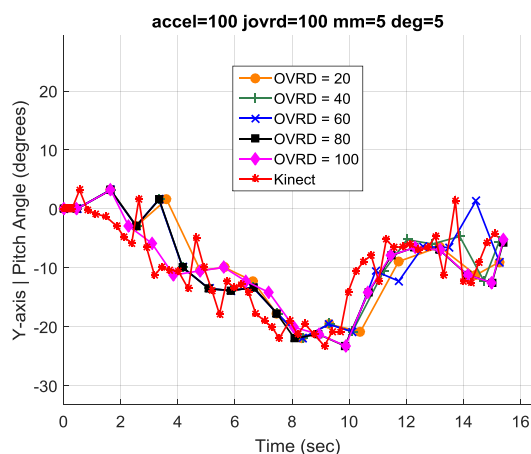
Διάγραμμα 37: Μετατόπιση στον άξονα X



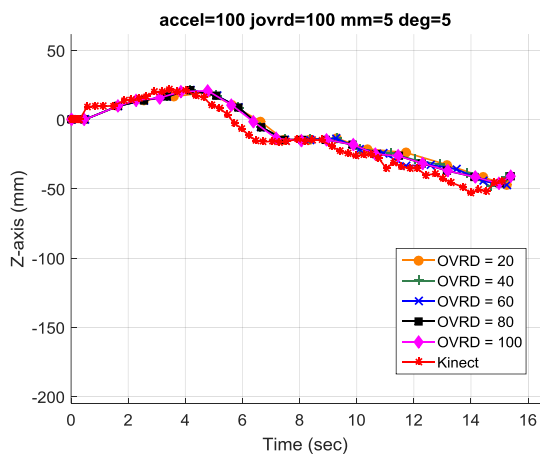
Διάγραμμα 38: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



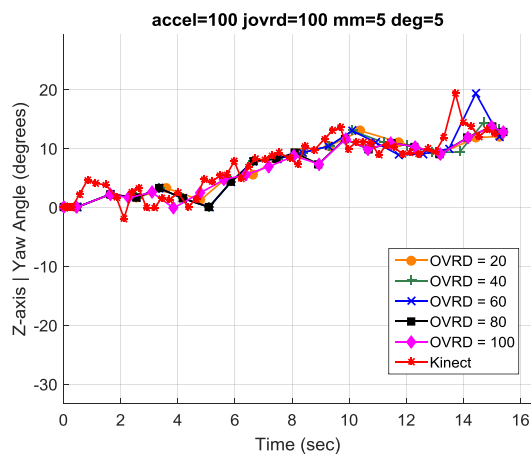
Διάγραμμα 39: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 40: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

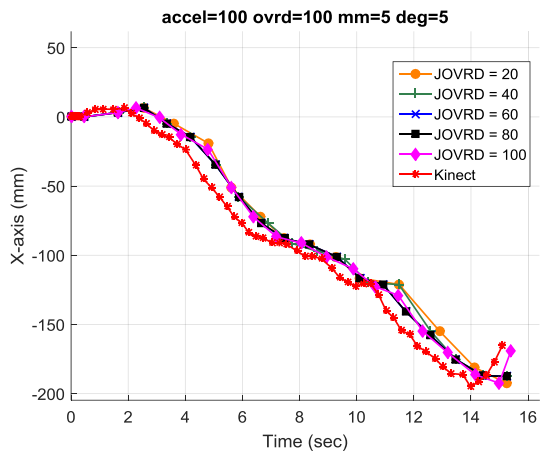


Διάγραμμα 41: Μετατόπιση στον άξονα Z

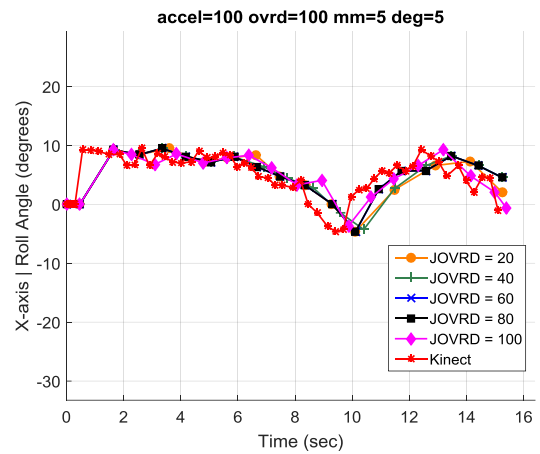


Διάγραμμα 42: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

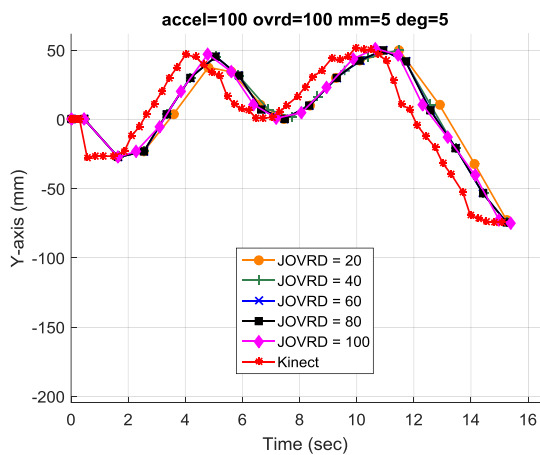
## 7. Μεταβολή της JOVRD, Αλγ. Α



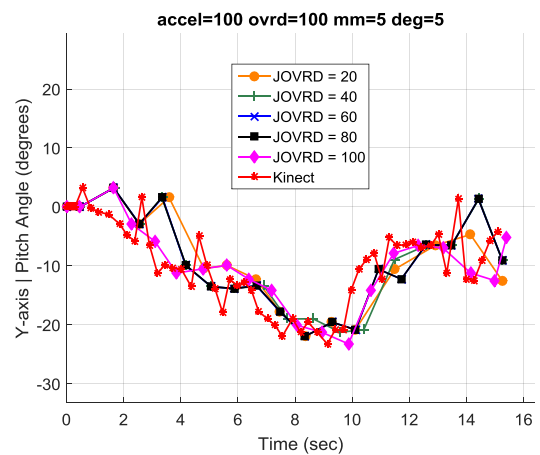
Διάγραμμα 43: Μετατόπιση στον άξονα X



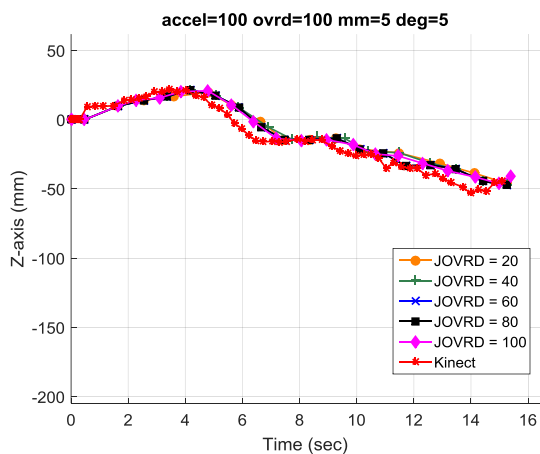
Διάγραμμα 44: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



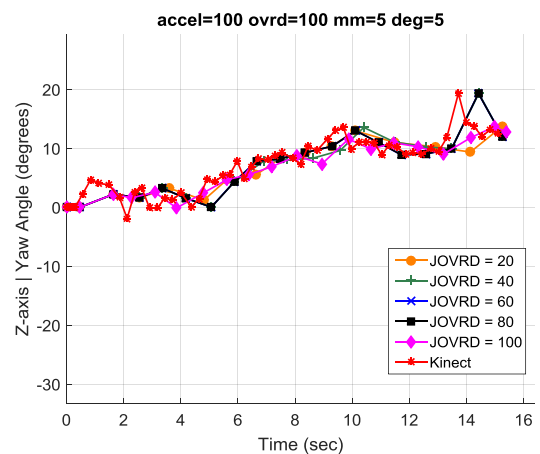
Διάγραμμα 45: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 46: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y



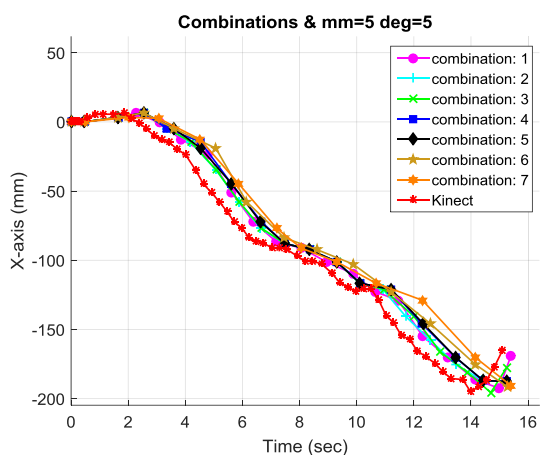
Διάγραμμα 47: Μετατόπιση στον άξονα Z



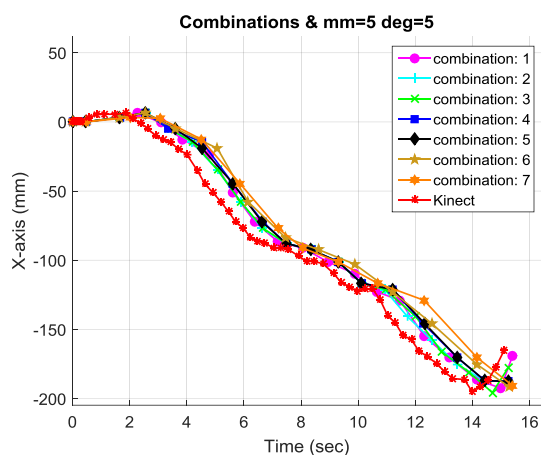
Διάγραμμα 48: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z



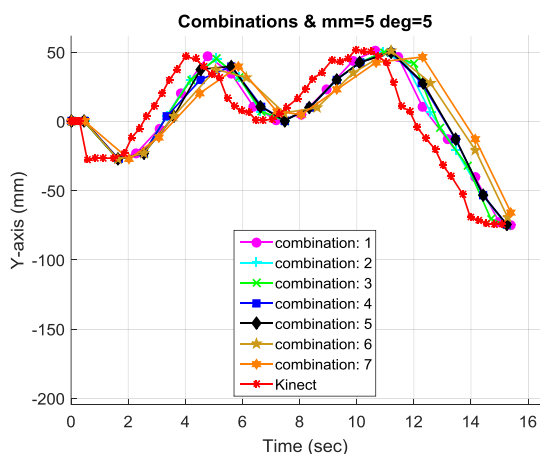
## 8. Combinations, Αλφ. Α



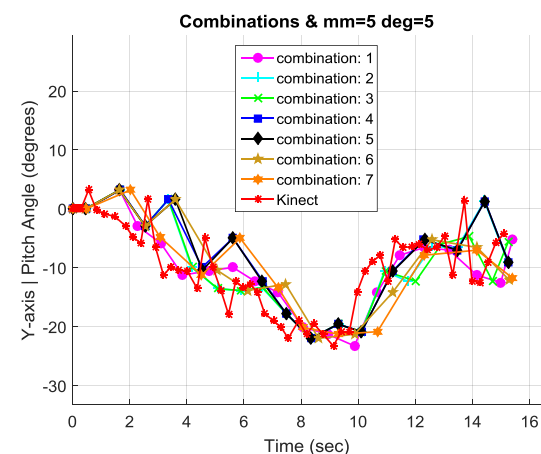
Διάγραμμα 49: Μετατόπιση στον άξονα X



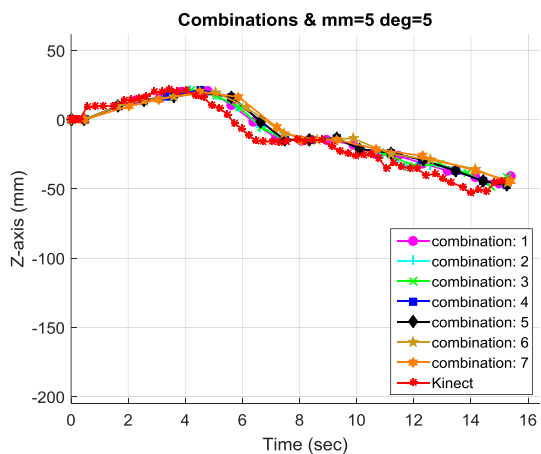
Διάγραμμα 50: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



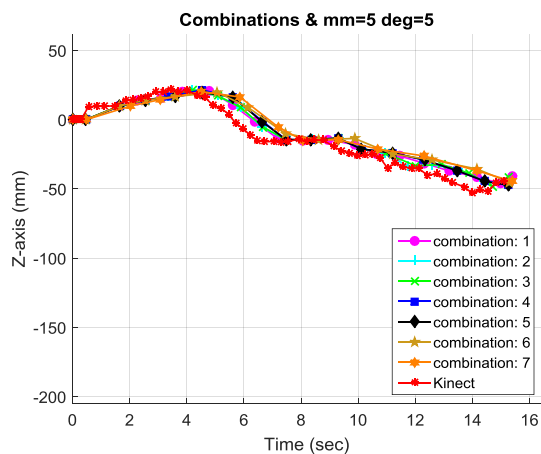
Διάγραμμα 51: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 52: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y



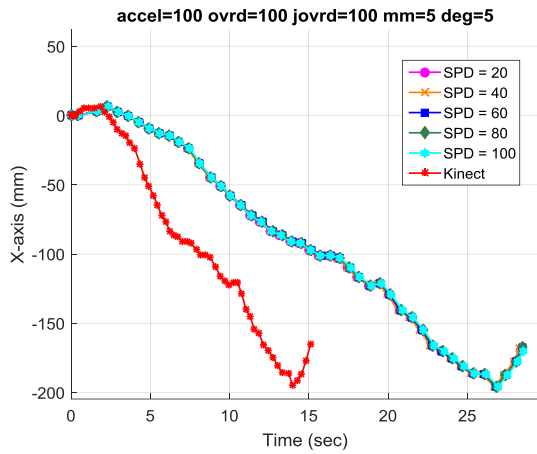
Διάγραμμα 53: Μετατόπιση στον άξονα Z



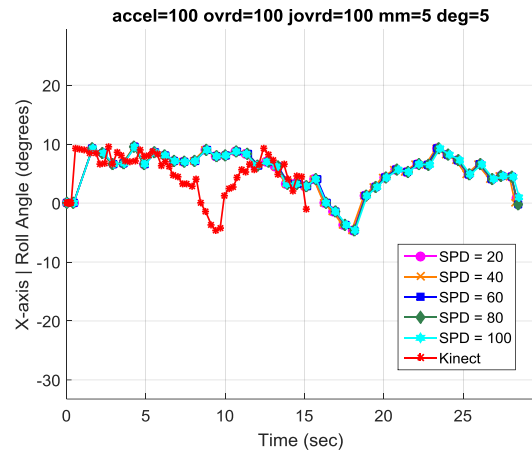
Διάγραμμα 54: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

# Παράρτημα Γ – Διαγράμματα αλγ. Β

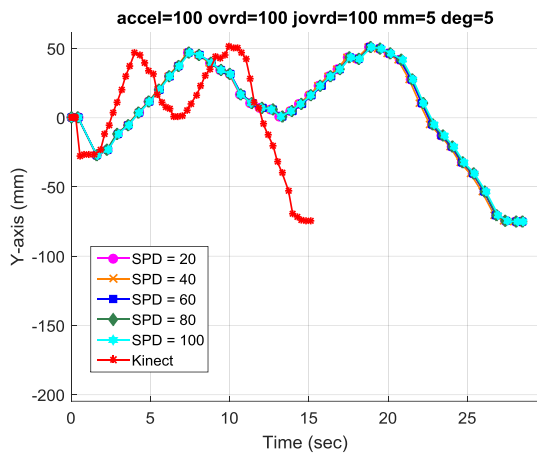
## 1. Μεταβολή της SPD, Αλγ. Β



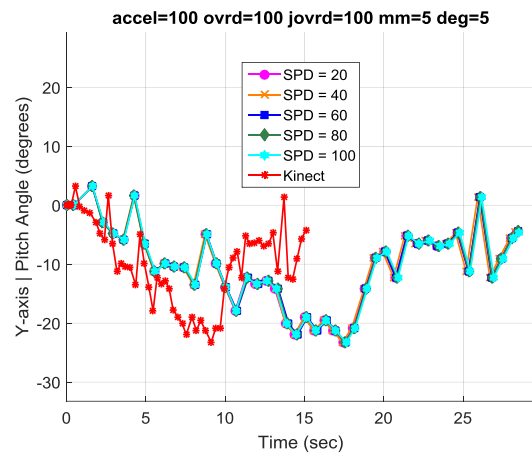
Διάγραμμα 55: Μετατόπιση στον άξονα X



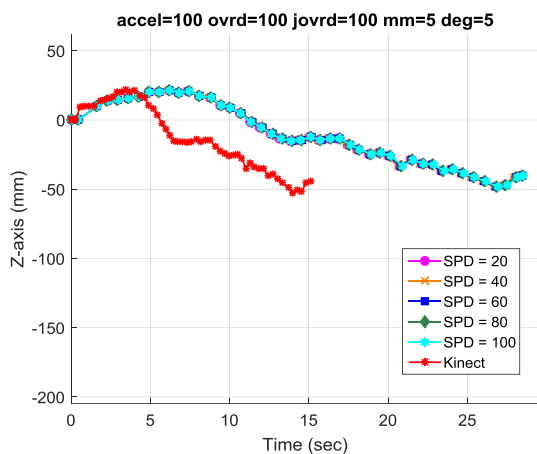
Διάγραμμα 56: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



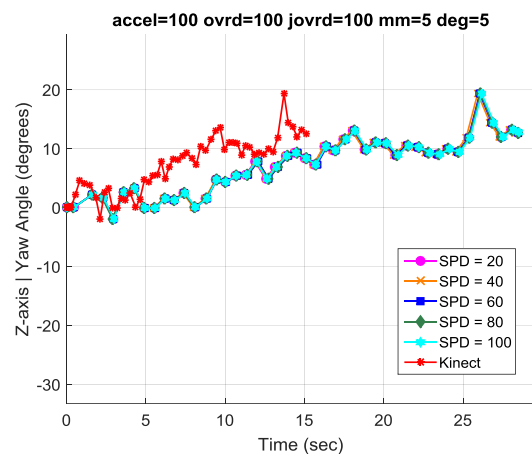
Διάγραμμα 57: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 58: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

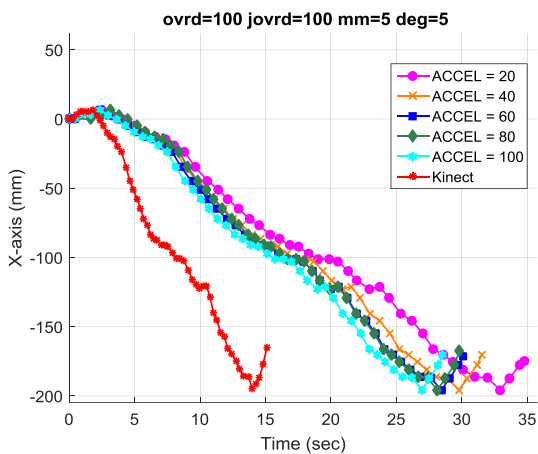


Διάγραμμα 59: Μετατόπιση στον άξονα Z

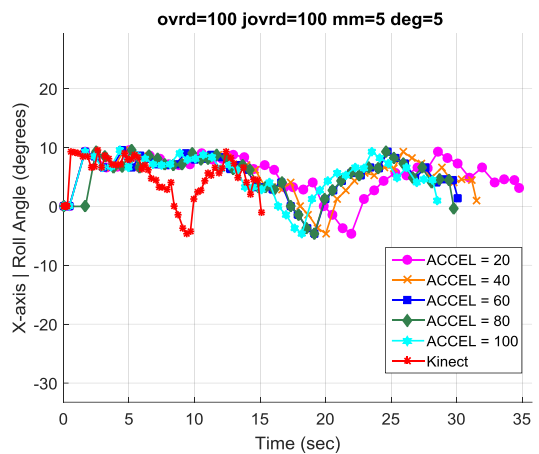


Διάγραμμα 60: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

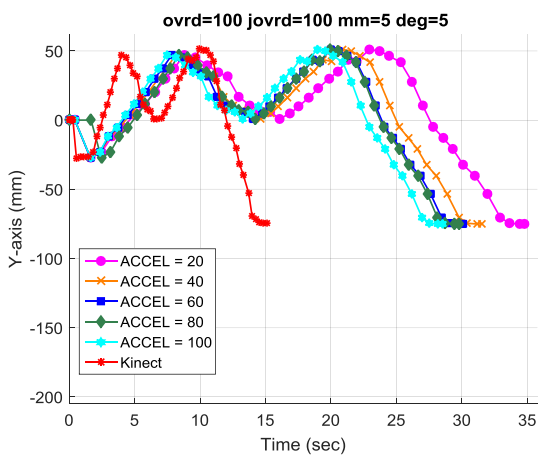
## 2. Μεταβολή της ACCEL, Αλγ. Β



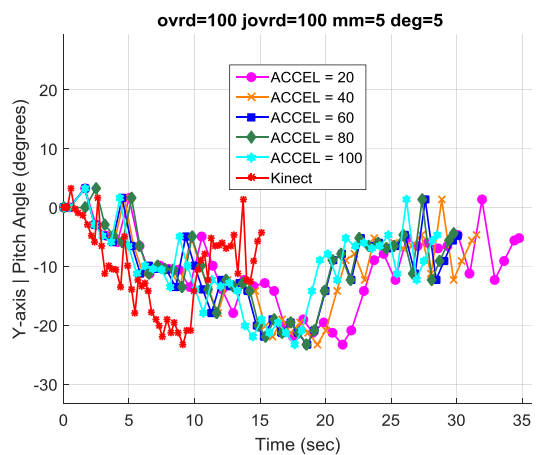
Διάγραμμα 61: Μετατόπιση στον άξονα X



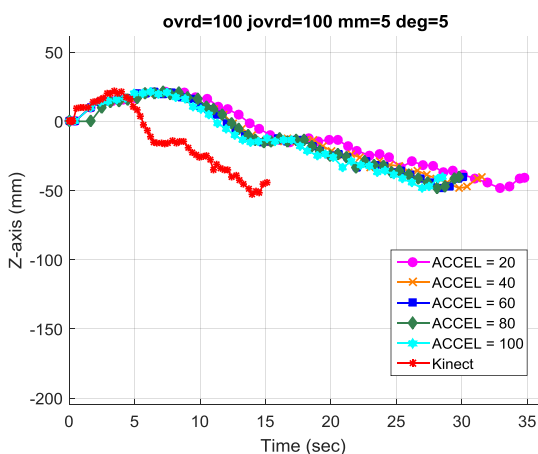
Διάγραμμα 62: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



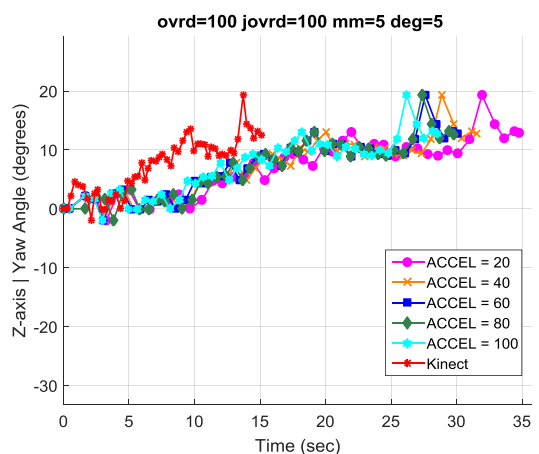
Διάγραμμα 63: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 64: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

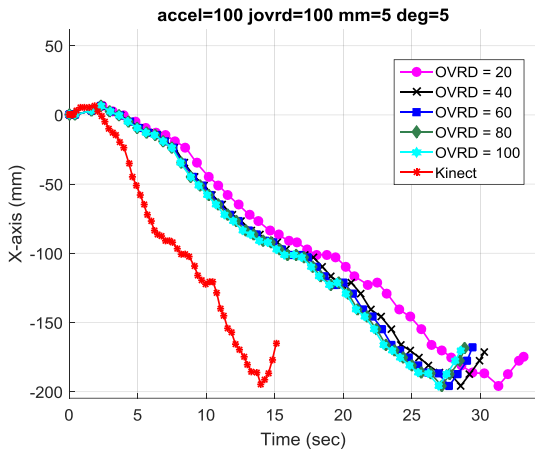


Διάγραμμα 65: Μετατόπιση στον άξονα Z

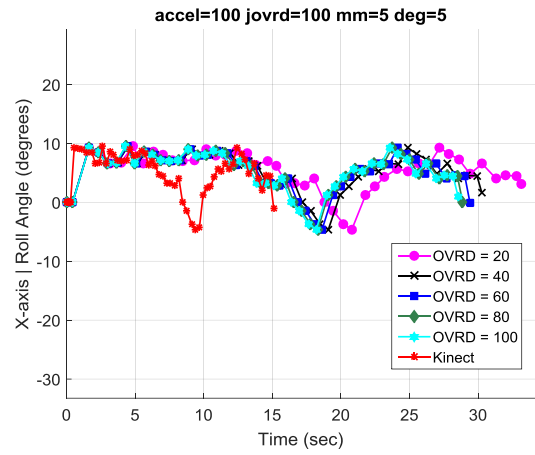


Διάγραμμα 66: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

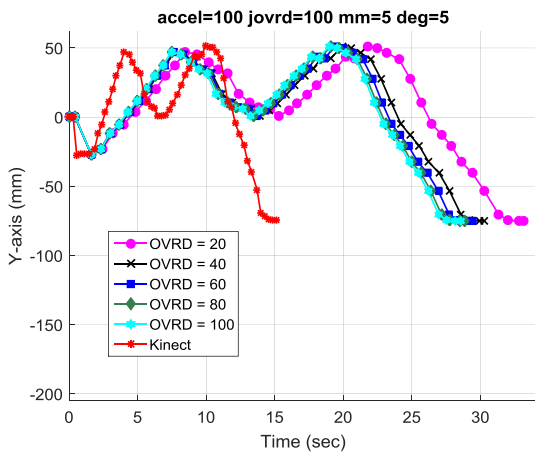
### 3. Μεταβολή της OVRD, Αλγ. Β



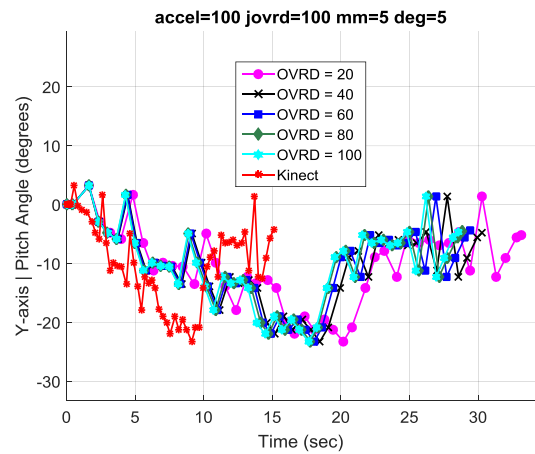
Διάγραμμα 67: Μετατόπιση στον άξονα X



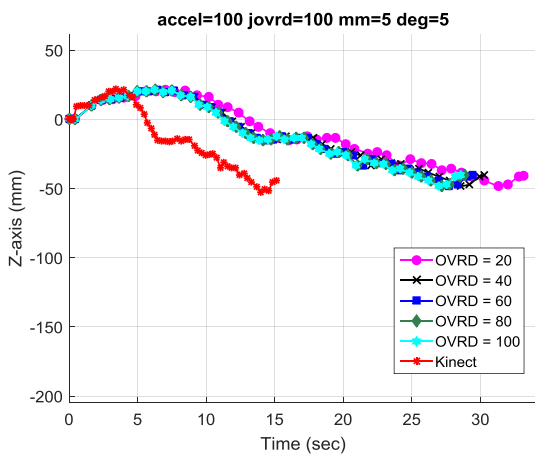
Διάγραμμα 68: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



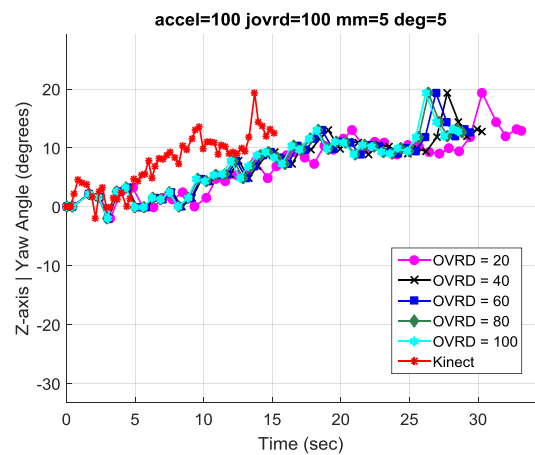
Διάγραμμα 69: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 70: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

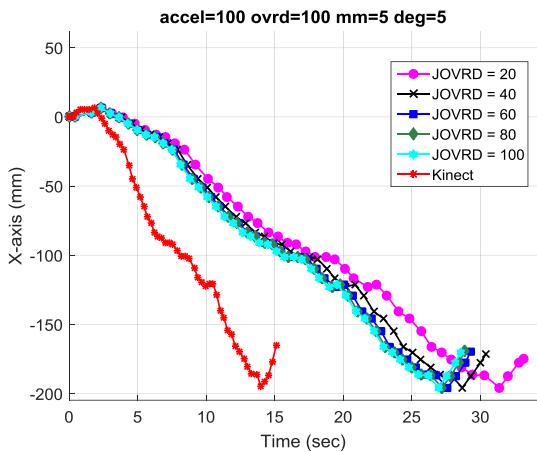


Διάγραμμα 71: Μετατόπιση στον άξονα Z

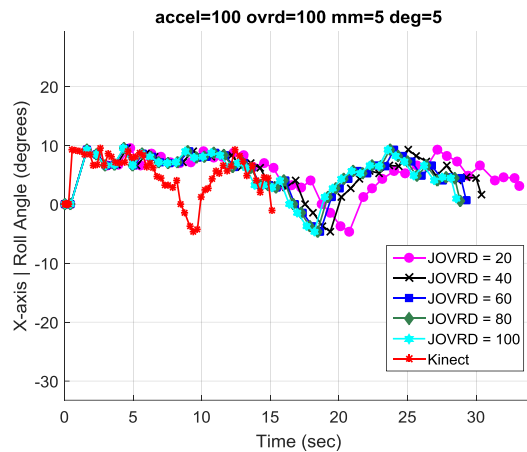


Διάγραμμα 72: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

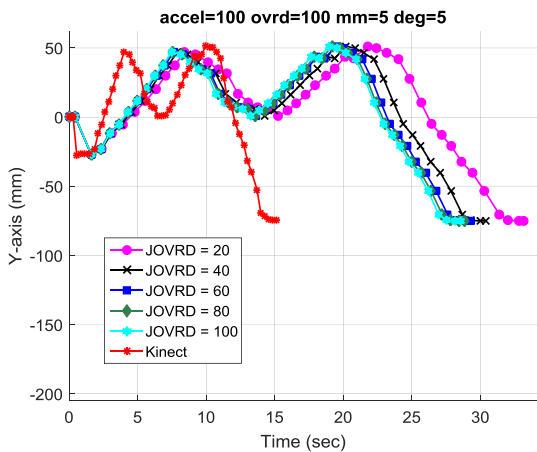
#### 4. Μεταβολή της JOVRD, Αλγ. Β



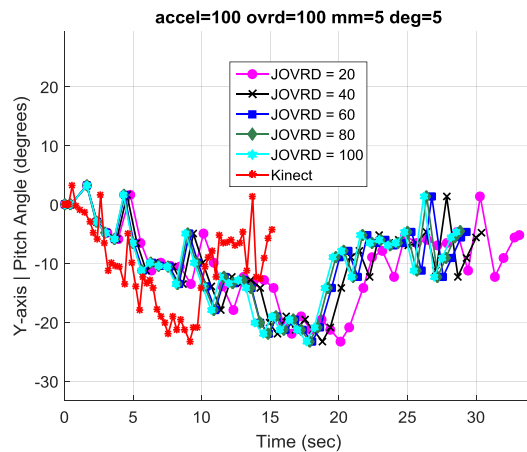
Διάγραμμα 73: Μετατόπιση στον άξονα X



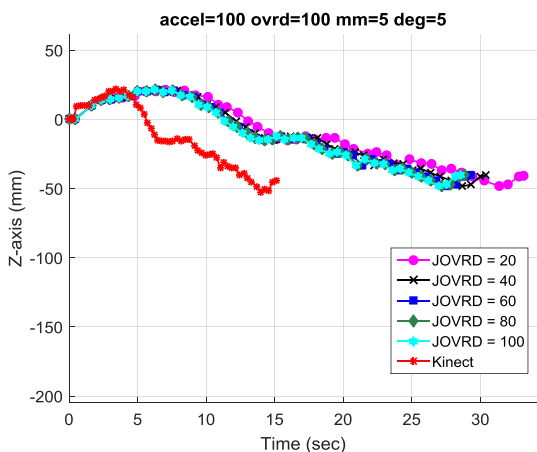
Διάγραμμα 74: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



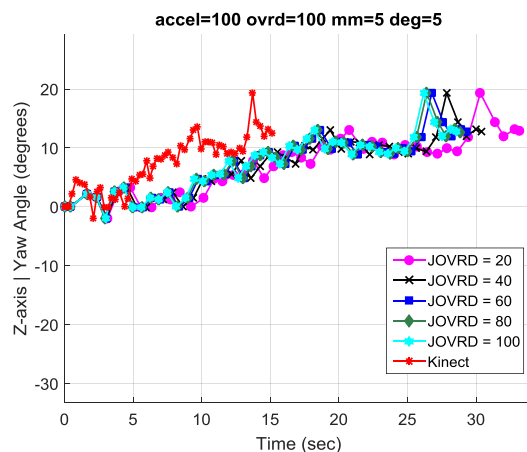
Διάγραμμα 75: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 76: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

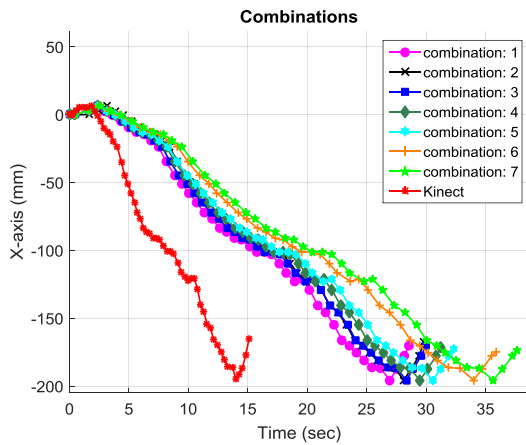


Διάγραμμα 77: Μετατόπιση στον άξονα Z

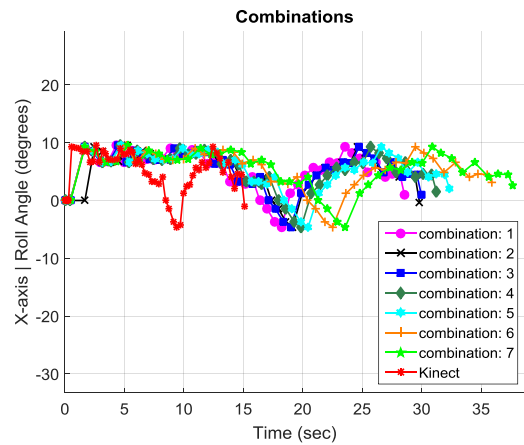


Διάγραμμα 78: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

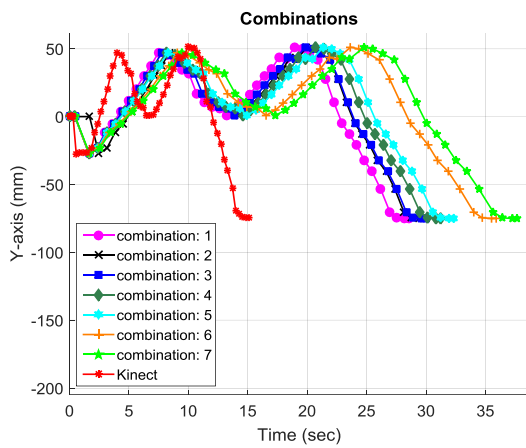
## 5. Combinations, Αλγ. Β



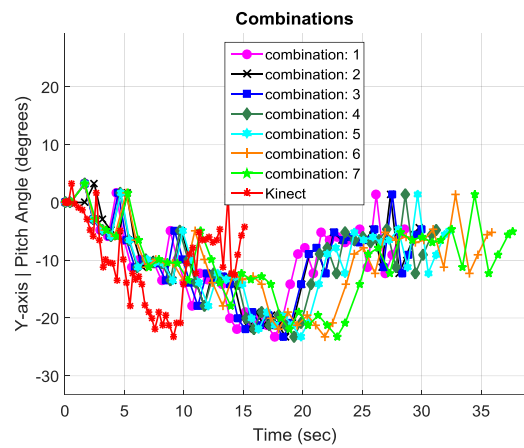
Διάγραμμα 79: Μετατόπιση στον άξονα X



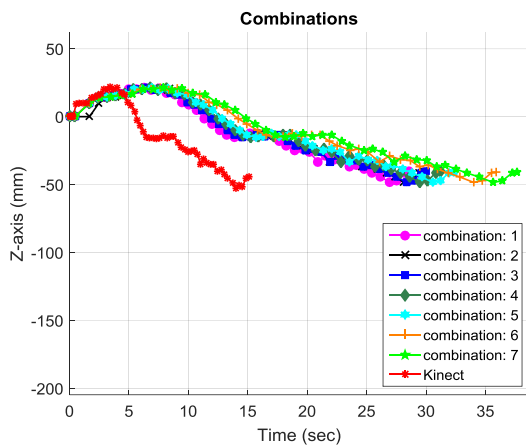
Διάγραμμα 80: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



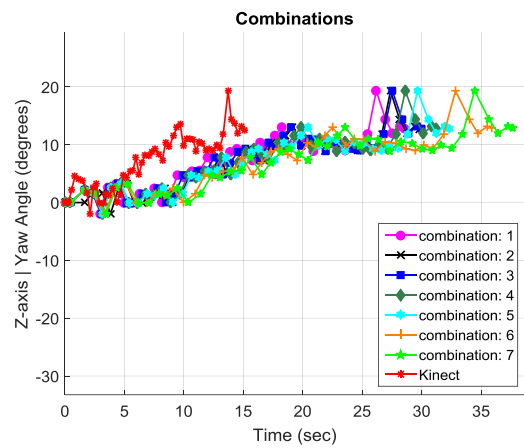
Διάγραμμα 81: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 82: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

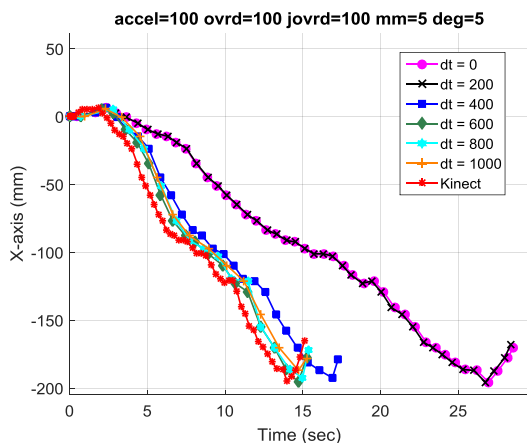


Διάγραμμα 83: Μετατόπιση στον άξονα Z

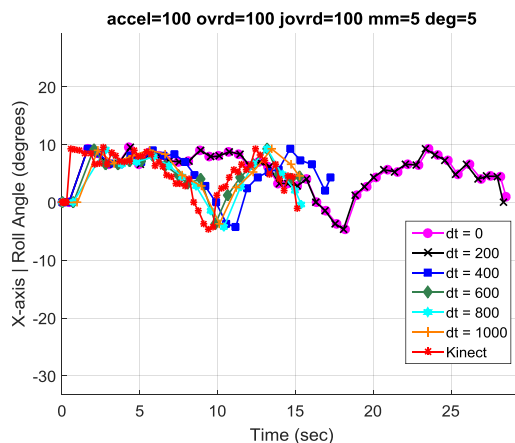


Διάγραμμα 84: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

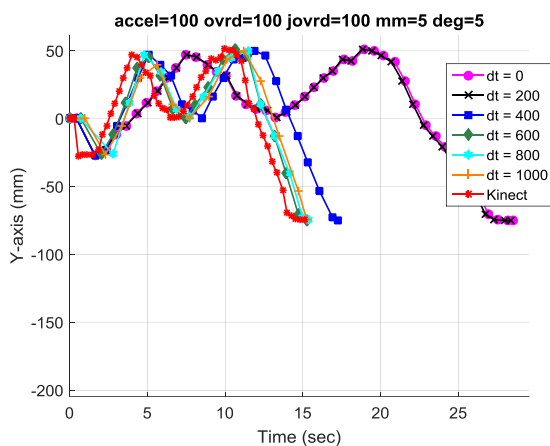
**6. ACCEL=100 OVRD=100 JOVRD=100 dt=[0 200 400 600 800 1000]**



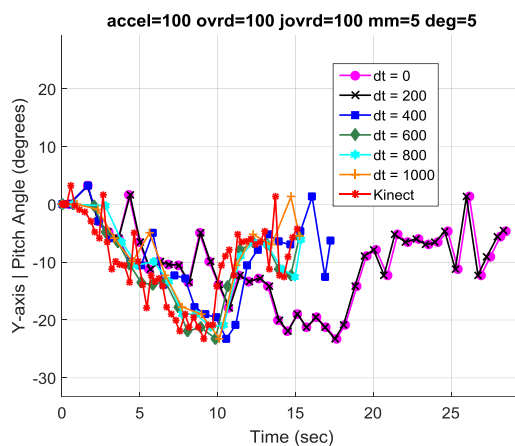
Διάγραμμα 85: Μετατόπιση στον άξονα X



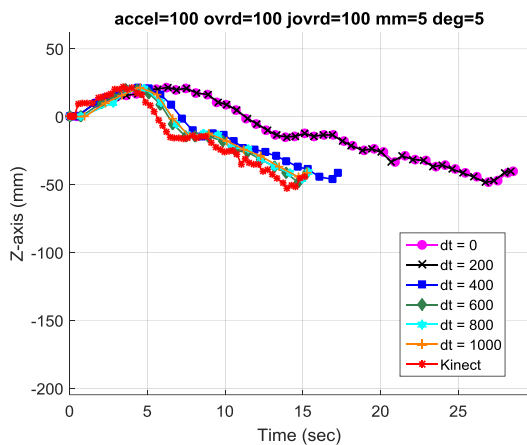
Διάγραμμα 86: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



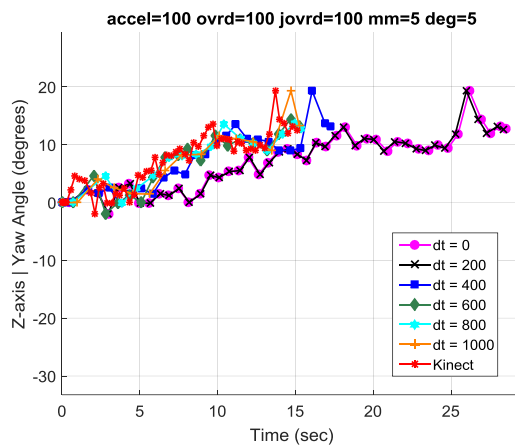
Διάγραμμα 87: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 88: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

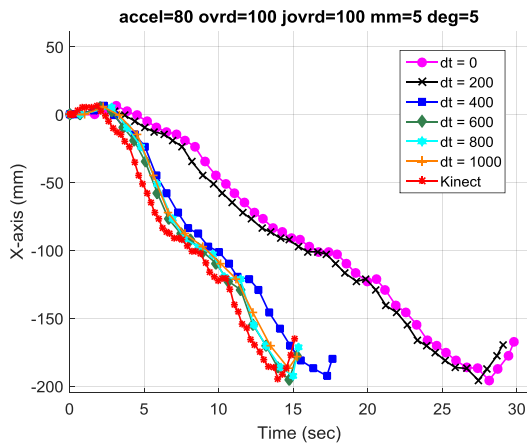


Διάγραμμα 89: Μετατόπιση στον άξονα Z

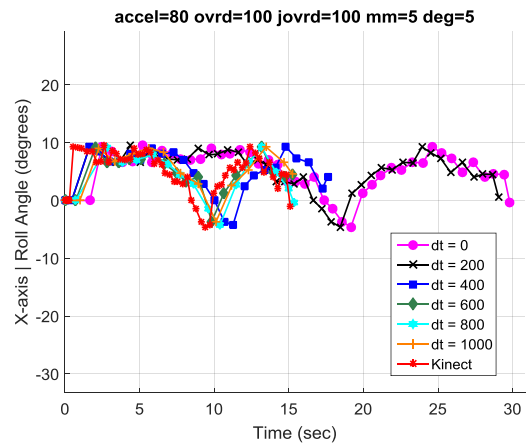


Διάγραμμα 90: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

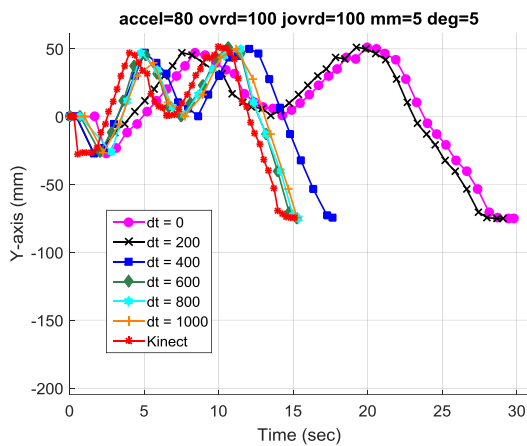
**7. ACCEL=80 OVRD=100 JOVRD=100 dt=[0 200 400 600 800 1000]**



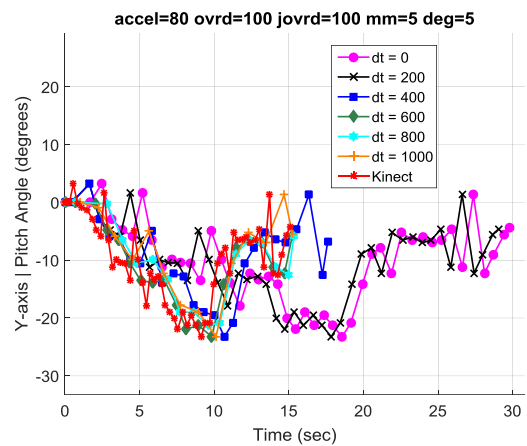
Διάγραμμα 91: Μετατόπιση στον άξονα X



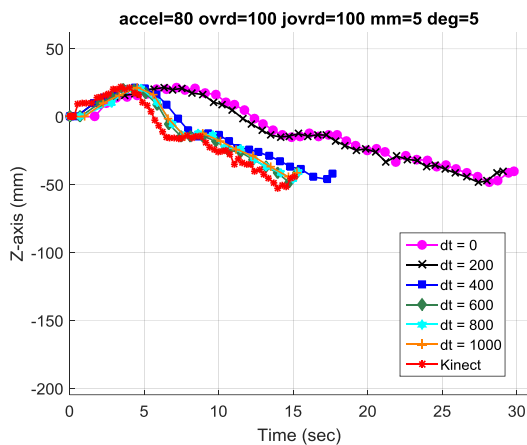
Διάγραμμα 92: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



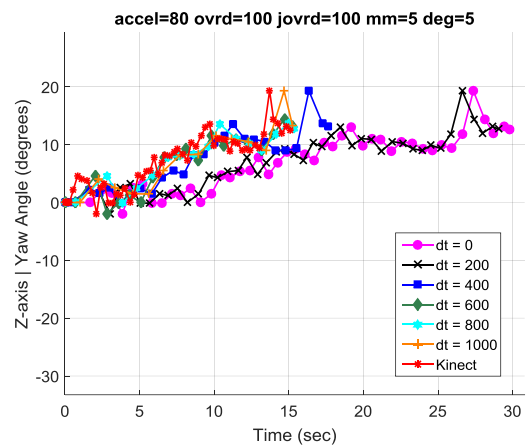
Διάγραμμα 93: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 94: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y



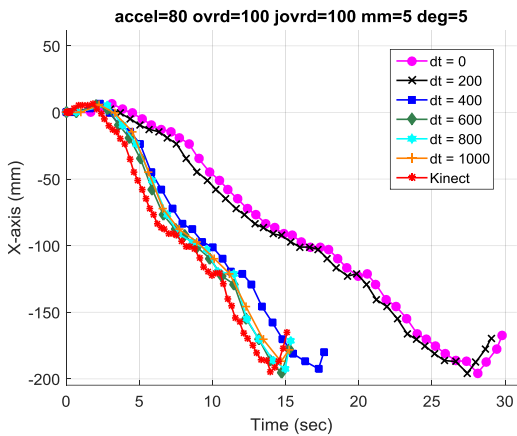
Διάγραμμα 95: Μετατόπιση στον άξονα Z



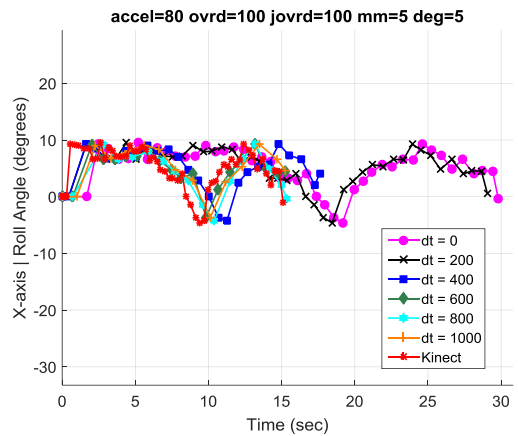
Διάγραμμα 96: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z



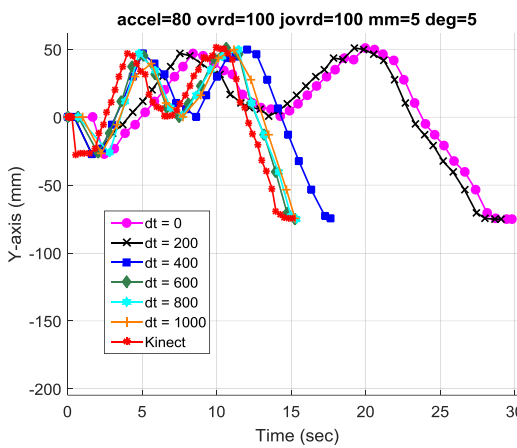
**8. ACCEL=80 OVRD=100 JOVRD=100 dt=[0 200 400 600 800 1000]**



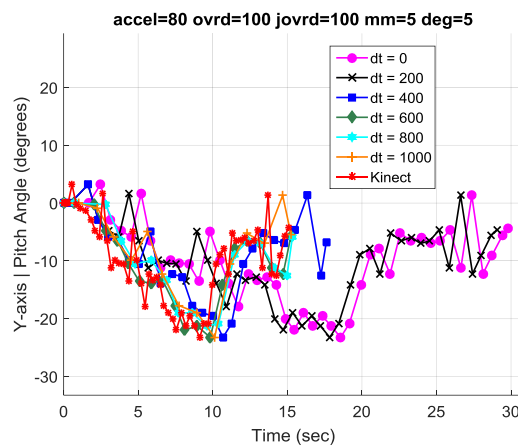
Διάγραμμα 97: Μετατόπιση στον άξονα X



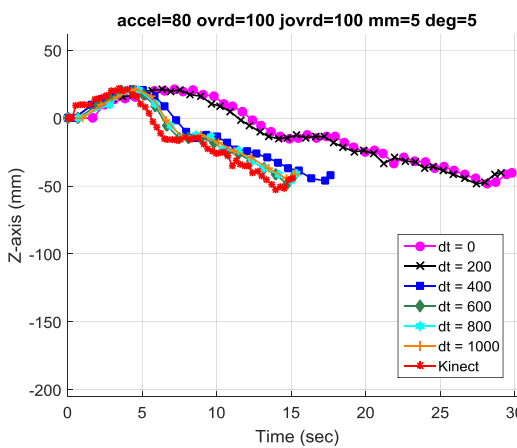
Διάγραμμα 98: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



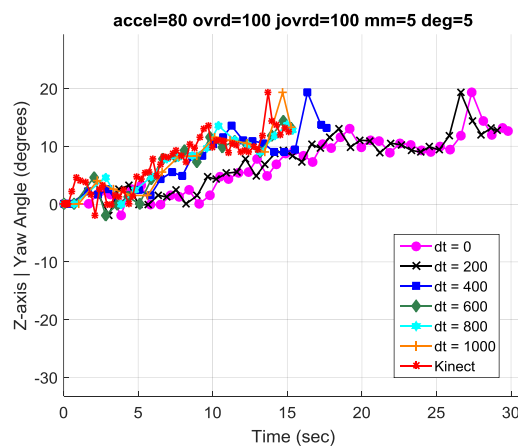
Διάγραμμα 99: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 100: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y

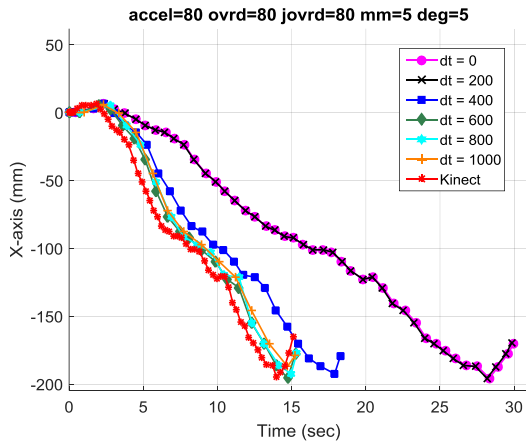


Διάγραμμα 101: Μετατόπιση στον άξονα Z

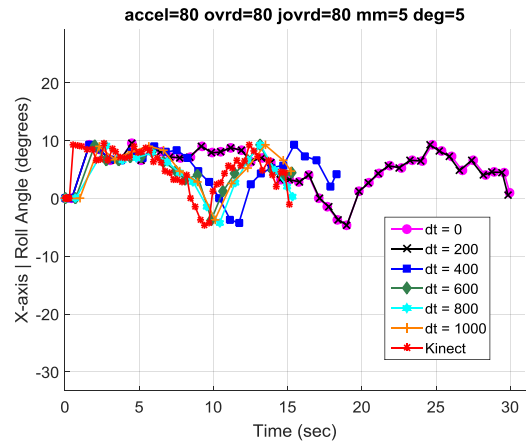


Διάγραμμα 102: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

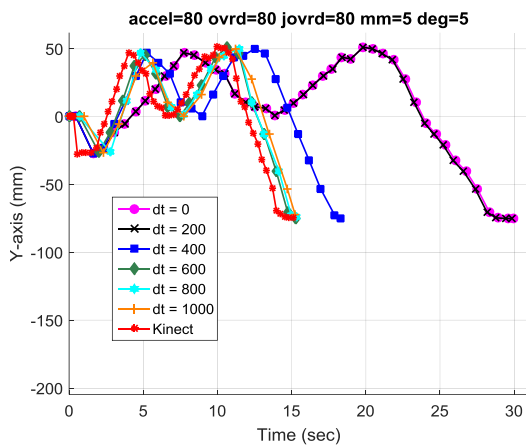
**9. ACCEL=80 OVRD=80 JOVRD=80 dt=[0 200 400 600 800 1000]**



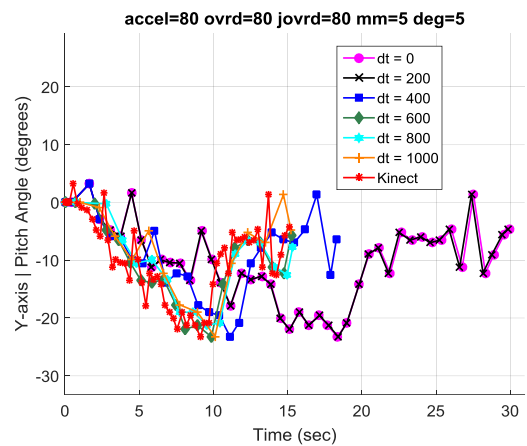
Διάγραμμα 103: Μετατόπιση στον άξονα Χ



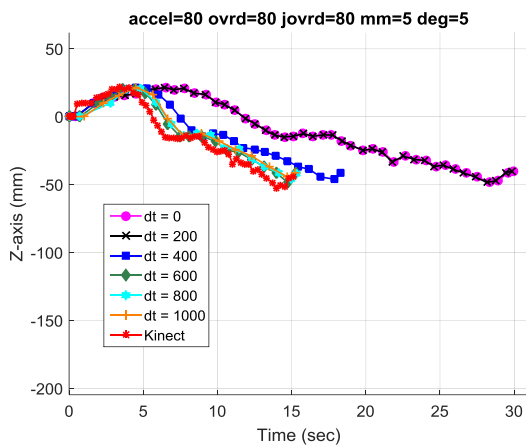
Διάγραμμα 104: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Χ



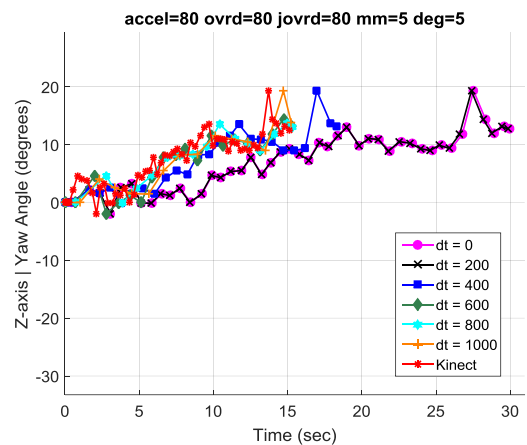
Διάγραμμα 105: Μετατόπιση στον άξονα Υ



Διάγραμμα 106: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Υ

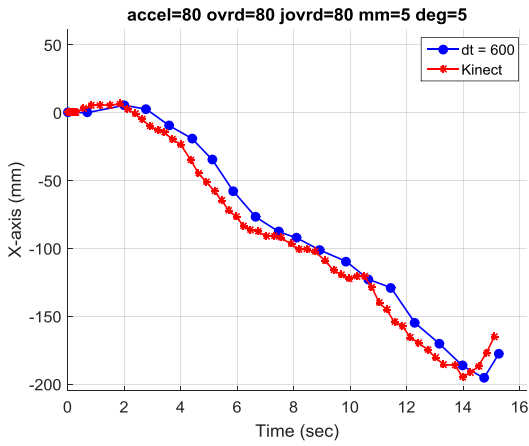


Διάγραμμα 107: Μετατόπιση στον άξονα Ζ

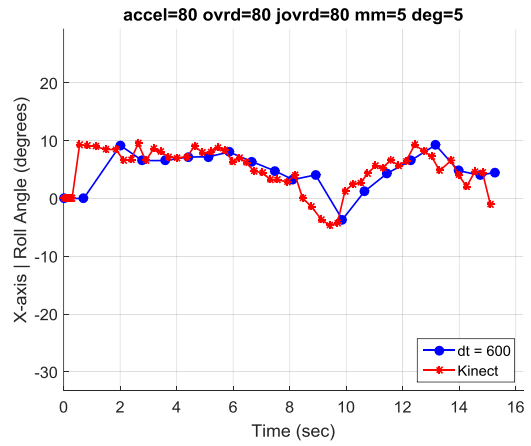


Διάγραμμα 108: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Ζ

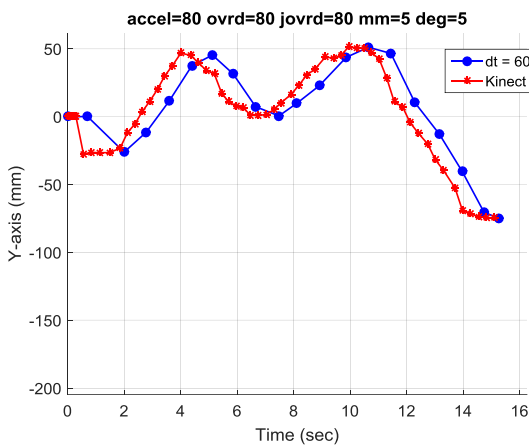
**10. ACCEL=80 OVRD=80 JOVRD=80 dt = 600**



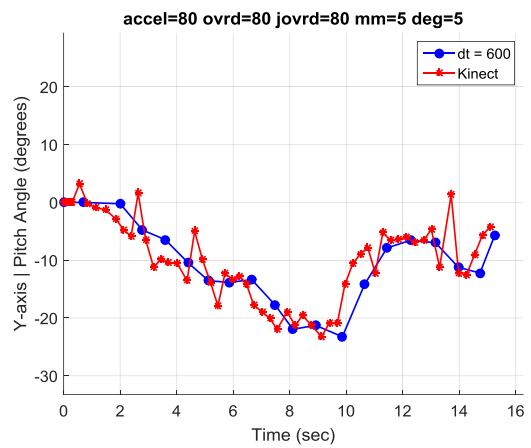
Διάγραμμα 109: Μετατόπιση στον άξονα X



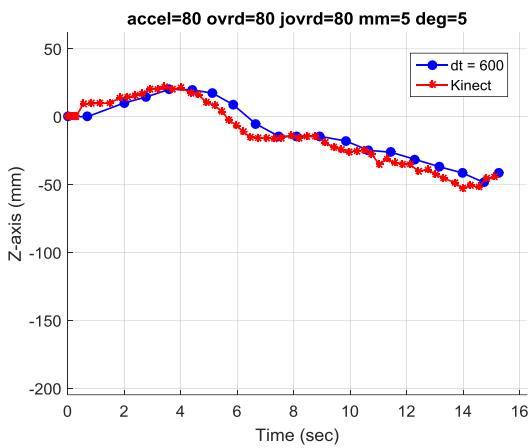
Διάγραμμα 110: Περιστροφή γύρω από τον άξονα X



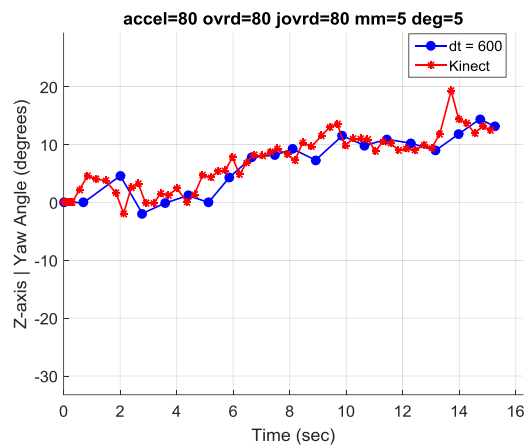
Διάγραμμα 111: Μετατόπιση στον άξονα Y



Διάγραμμα 112: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y



Διάγραμμα 113: Μετατόπιση στον άξονα Z



Διάγραμμα 114: Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z

## Παράρτημα Δ – Διαφάνειες Παρουσίασης

# Τηλεχειρισμός ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού με χρήση οπτικών δεδομένων

Βεΐσάκη Ελένη, AM: 06


Επιβλέποντες:  
Δρ. Φασουλός Ιωάννης  
Δρ. Κοσμόπουλος Δημήτριος

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
ΔΠΜΣ : «Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής»

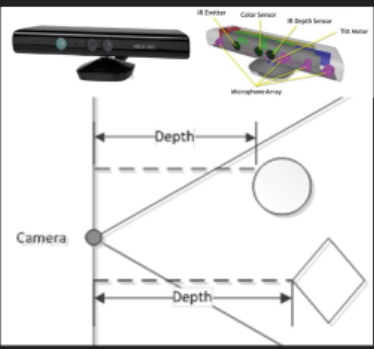


## Εισαγωγή – Σκοπός

- **Τηλεχειρισμός:** η τεχνική απομακρυσμένου ελέγχου
- **Δύο υποσυστήματα:**
  1. Χρήστης & αισθητήρας
  2. Ρομποτικό σύστημα
- Οι πρώτοι ρομποτικοί χειριστές εμφανίστηκαν για πρώτη φορά με την έναρξη της πυρηνικής εποχής και ήταν γνωστοί ως τηλεχειριστές (teleoperators).
- Χρησιμοποιούνται σε περιβάλλοντα εργασίας: μη δομημένα ή μη φιλικά ως προς τον άνθρωπο.
- **Στόχος:** Τηλεχειρισμός ενός ολοκληρωμένου ρομποτικού συστήματος στο χώρο με χρήση οπτικών δεδομένων.
- **Εμπλεκόμενα συστήματα:**
  1. βιομηχανικός βραχίονας RV2A της Mitsubishi,
  2. το ρομποτικό χέρι Talos' Hand και
  3. η εφαρμογή "3D Hand Tracking"



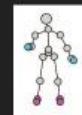
## Αισθητήρας Kinect



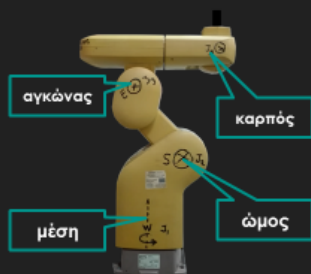
- Αισθητήρας RGB-D
- Ιούνιο 2009, Project Natal
- Αποτελείται από
  - τέσσερα μικρόφωνα, ένα επιταχυνσιόμετρο, μια RGB κάμερα, ένα αισθητήρα βάθους και ένα κινητήρα κλίσης.

## Βιβλιογραφία

- Infantino κ.α. (2003)
  - Στερεοσκοπικές κάμερες
  - Ελεγχόμενο περιβάλλον
  - Αναγνώριση καρπού και ακροδάχτυλων
  - 13 BE
- Guanglong Du κ.α. (2012)
  - Αναγνώριση αντίχειρα, δείκτη και ενδιάμεσου τμήματος
  - Χάρτης βάθους & αλγόριθμος εντοπισμού
- Nutan Chen κ.α. (2012)
  - Εναλλαγή από τηλεχειρισμό σε αυτόνομη λειτ.
  - 2 Kinect + 1 MEKA
- Arango κ.α. (2013)
  - Έλεγχος στάσης βραχίονα με το SDK του Kinect



## Περιγραφή διαθέσιμων συστημάτων - Βιομηχανικός βραχίονας RV2A

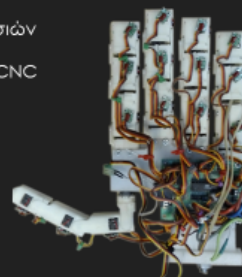


- Εταιρεία κατασκευής: Mitsubishi
- BE: Έξι
- Αρθρώσεις: Έξι Περιστροφικές
- Κινητήρες: AC servo με PID ελεγκτή
- Ελεγκτής: MELFA CR1-571
- Πρόγραμμα διεπαφής: COSIROP

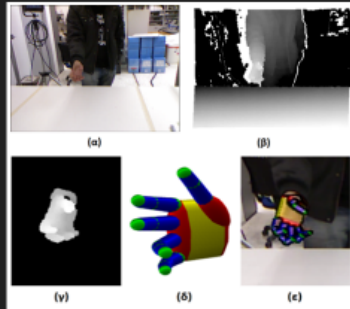
## Περιγραφή διαθέσιμων συστημάτων – Ρομποτικό χέρι Talos' Hand



- Αποτέλεσμα προ-πτυχιακών εργασιών
- Κατασκευάστηκε με 3d printer και CNC εργαλειομηχανή
- 16 BE, 16 σερβοκινητήρες
- Σερβοελεγκτής SSC-32



## Περιγραφή διαθέσιμων συστημάτων – Εφαρμογή "3D Hand Tracking"



- Αναπτύχθηκε στο CVRL, ICS, FORTH
- Παρακολούθηση παλάμης και δαχτύλων
- Απαιτείται η χρήση αισθητήρα RGB-D και κάρτας GPU με CUDA (NVIDIA)
- 26 BE

## "3D Hand Tracking", παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης



## "3D Hand Tracking", δυσκολίες – αντιμετώπιση

- Δεν υπολογίζεται η χρονική διάρκεια μεταξύ διαδοχικών στιγμιότυπων
- Δεν καταγράφονται οι παράμετροι γεωμετρικής διαμόρφωσης

Τροποποίηση εφαρμογής

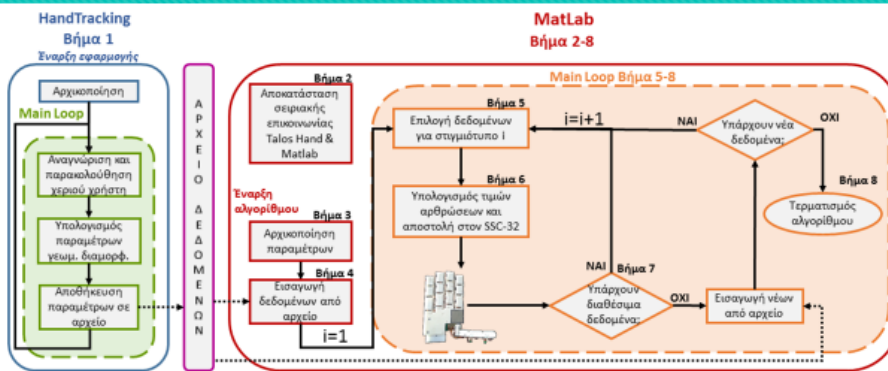
- Υπολογισμός χρονικής διάρκειας μεταξύ διαδοχικών στιγμιότυπων
- Καταγραφή παραμέτρων γεωμετρικής διαμόρφωσης και χρονικής διάρκειας

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
Θέση			Προσανατολισμός				Μικρός				Αντίχειρας				Παράμεσος				Δείκτης				Μέσος				Δις				
x	y	z	qx	qy	qz	qw	pitch	yaw	pitch	pitch	pitch	yaw	pitch	pitch	pitch	yaw	pitch	pitch	pitch	yaw	pitch	pitch	pitch	yaw	pitch	pitch	pitch	yaw	pitch	pitch	msac

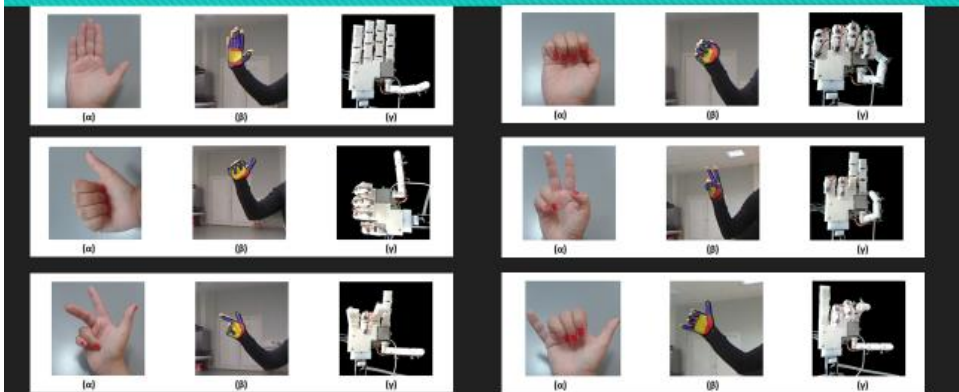
# Talos' Hand, Βαθμοί ελευθερίας



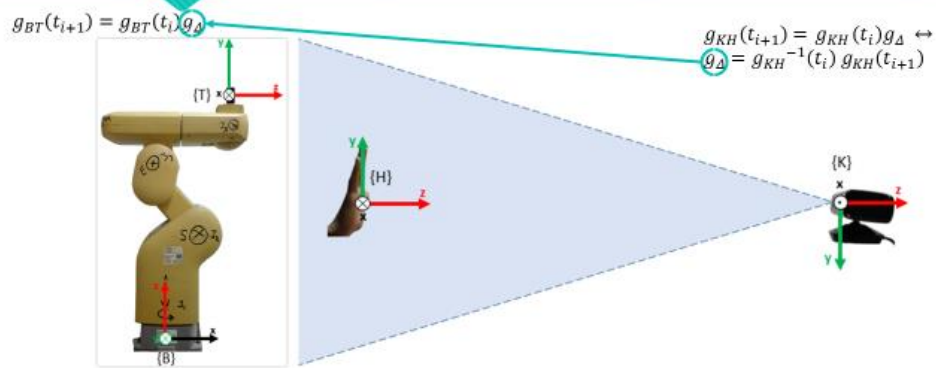
# Τηλεχειρισμός Talos' Hand με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking"



# Πειραματική αποτίμηση αλγορίθμου

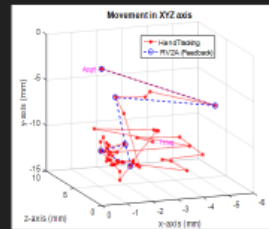
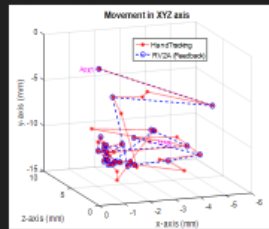


## Πλαίσια συντεταγμένων



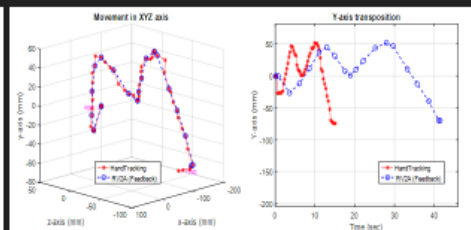
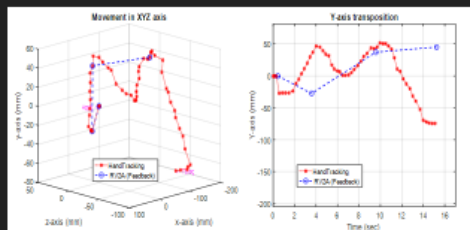
## Ιδιαιτερότητες RV2A & "3D Hand Tracking"

- Βραχίονας εν κινήσει + εντολή μετακίνησης
  - Βραχίονας εν κινήσει + εντολή αποθήκευσης σημείου
  - Υπόθεση μικρών μεταβολών σε σταθερό χέρι από την εφαρμογή 3D Hand Tracking
- ○ Η εντολή αγνοείται
  - ○ Ο ελεγκτής του βραχίονα εμφανίζει μήνυμα λάθους
  - ○ Δημιουργία πολλών και άσκοπων κινήσεων



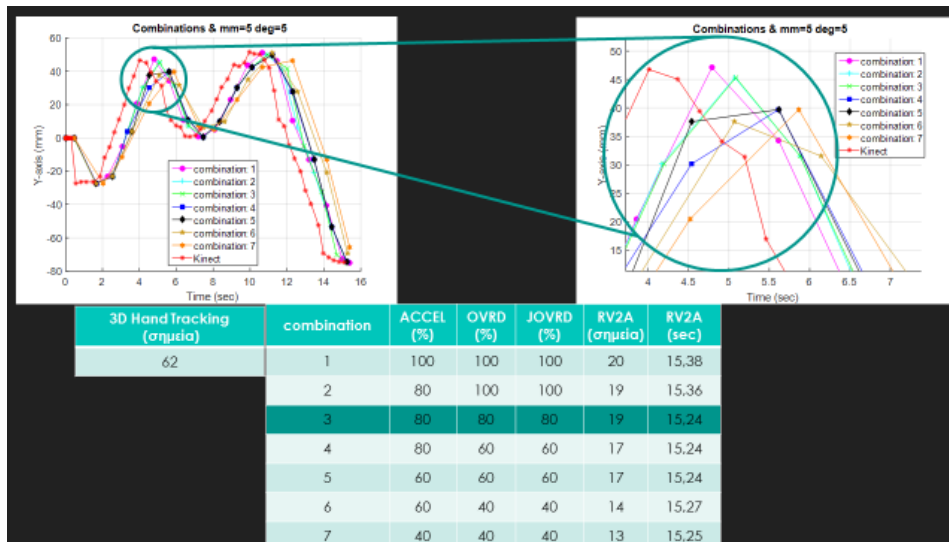
## Αλγόριθμοι τηλεχειρισμού βραχίονα RV2A

- Αλγόριθμος τηλεχειρισμού RV2A με έμφαση στη χρονική διάρκεια (Αλγ. Α)
- Αλγόριθμος τηλεχειρισμού με έμφαση στη πορεία (Αλγ. Β)

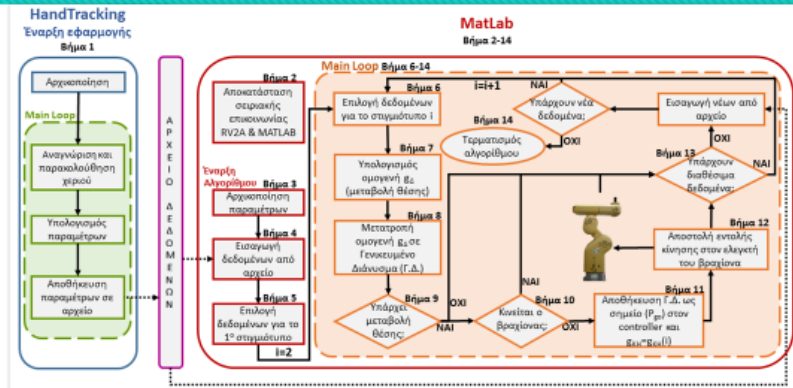




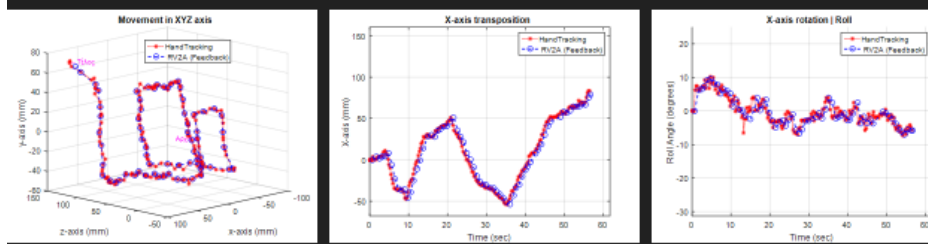
## Επιλογή ρυθμίσεων λειτουργίας RV2A



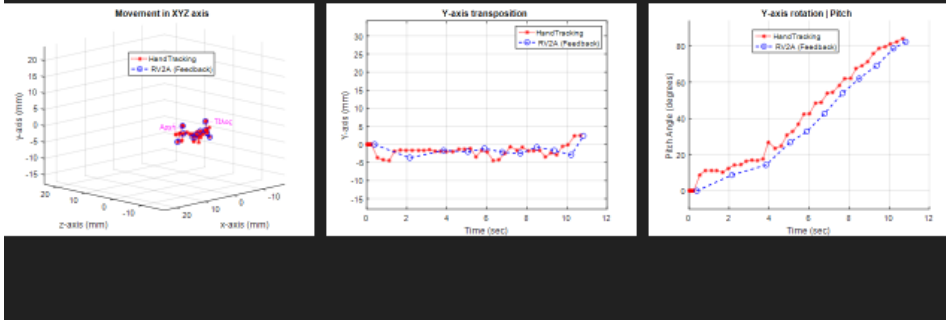
## Τηλεχειρισμός βραχίονα RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking", Αλγ. Α



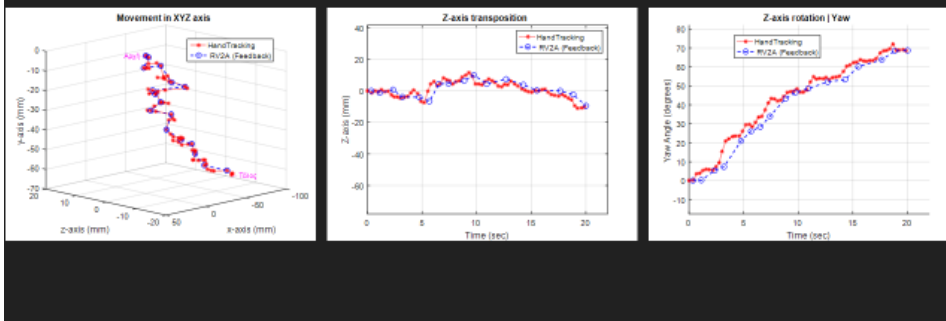
## Πειραματική αποτίμηση (Αλγ. Α), Εμφωλευμένα τετράγωνα



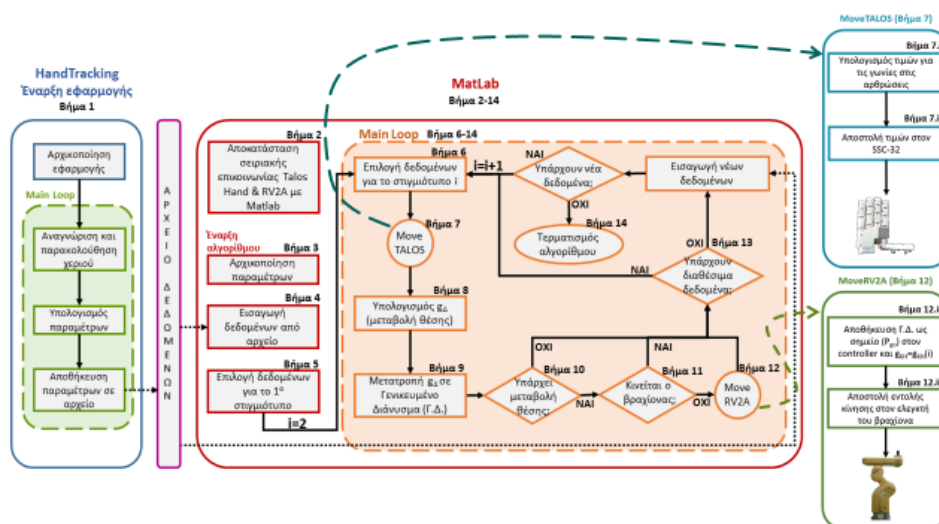
## Πειραματική αποτίμηση (Αλγ. Α) Περιστροφή ως προς άξονα



## Πειραματική αποτίμηση (Αλγ. Α) Διαγραφή τόξου γύρω από άξονα



## Τηλεχειρισμός τελικού ρομποτικού συστήματος





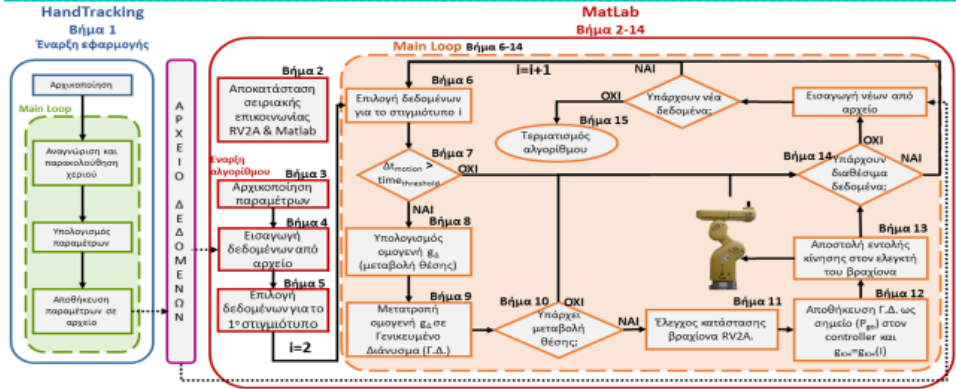
## Προτάσεις βελτίωσης

- Νέα έκδοση "3D Hand Tracking"
- Νέο ρομποτικό χέρι
- Δημιουργία interface
- Δυναμική αλλαγή της ταχύτητας του τελικού στοιχείου δράσης ώστε να μιμείται την ταχύτητα της παλάμης του χρήστη
- Δυνατότητα εναλλαγής από τηλεχειρισμό σε αυτόνομη λαβή
- Δημιουργία βάσης δεδομένων με συσχετισμούς αντικείμενο-λαβή
- Εγκατάσταση κάρτας δικτύου στον ελεγκτή MELFA CR1-571 και υλοποίηση τηλεχειρισμού μέσω Bluetooth ή tcp/Ip protocol

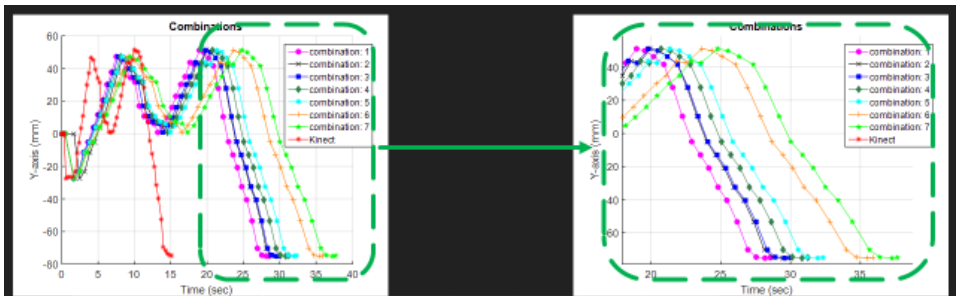
## Ερωτήσεις - Απορίες;



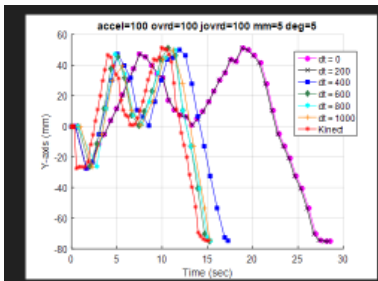
# Τηλεχειρισμός βραχίονα RV2A με χρήση της εφαρμογής "3D Hand Tracking", Αλγ. Β



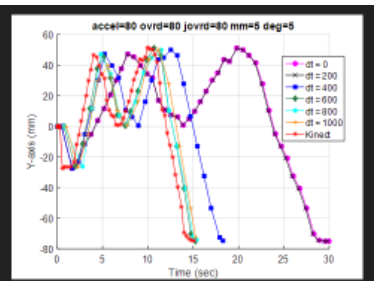
## Επιλογή ρυθμίσεων λειτουργίας RV2A



3D Hand Tracking (σημεία)	Combination	ACCEL (%)	OVRD (%)	JOVRD (%)	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
62	1	100	100	100	45	28.54
	2	80	100	100	45	28.37
	3	80	80	80	45	29
	4	80	60	60	45	30
	5	60	60	60	45	30.80
	6	60	40	40	45	30.69
	7	40	40	40	45	31.34



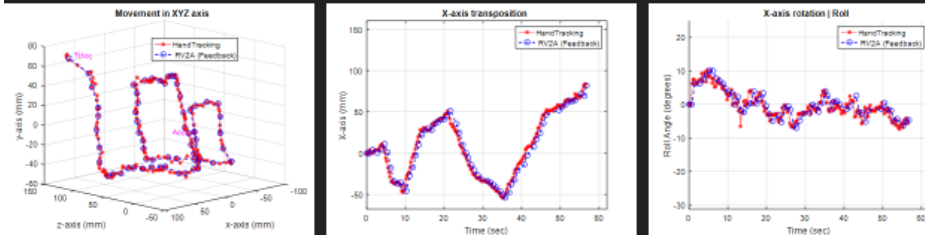
dt	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
0	45	28.54
200	45	28.36
400	26	17.26
600	20	15.25
800	17	15.37
1000	15	15.25



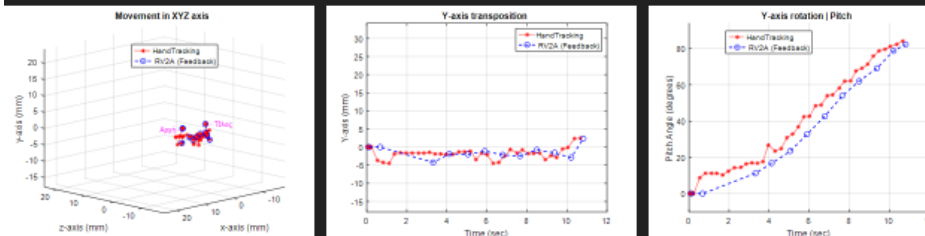
dt	RV2A (σημεία)	RV2A (sec)
0	45	29.97
200	45	29.84
400	26	18.28
400	20	15.26
800	17	15.35
1000	15	15.24

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
Θέση			Προσανατολισμός				Μικρός				Αντίγραφο				Παράμτρος				Δείκτης				Μέτρος				Δt				
X	Y	Z	qx	qy	qz	qw	pitch	yaw	pitch	pitch	pitch	yaw	pitch	pitch	pitch	yaw	pitch	pitch	pitch	yaw	pitch	pitch	pitch	yaw	pitch	pitch	pitch	yaw	pitch	pitch	msec

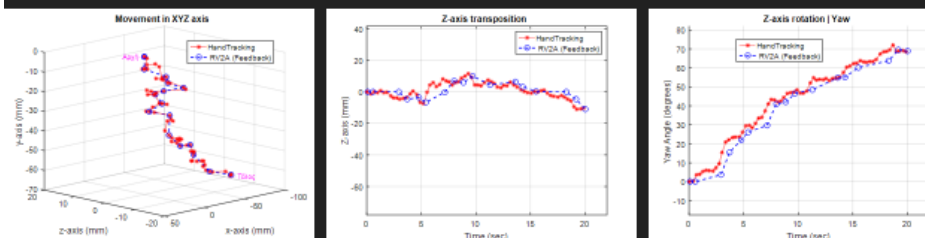
## Πειραματική αποτίμηση (Αλγ. Β), Εμφωλευμένα τετράγωνα



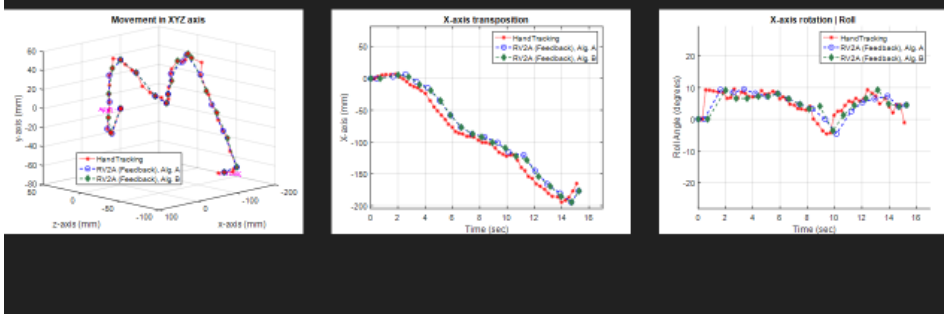
## Πειραματική αποτίμηση (Αλγ. Β) Περιστροφή ως προς άξονα



## Πειραματική αποτίμηση (Αλγ. Β) Διαγραφή τόξου γύρω από άξονα



## Επισκόπηση δυο αλγορίθμων



## Ερωτήσεις - Απορίες;



## Ερωτήσεις - Απορίες;

**Ευχαριστώ για τον χρόνο σας!**