



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

**Ανίχνευση/Παρακολούθηση Joystick,
Βελτιστοποίηση Λαβής και Τηλεχειρισμός Τροχοφόρου
Ρομπότ από Ρομποτικό Βραχίονα Μέσω Οπτικής
Ανατροφοδότησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΔΙΑΝΕΛΛΟΥ

Επιβλέπων : Κυριακόπουλος Κωνσταντίνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
& ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

**Ανίχνευση/Παρακολούθηση Joystick,
Βελτιστοποίηση Λαβής και Τηλεχειρισμός
Τροχοφόρου Ρομπότ από Ρομποτικό Βραχίονα Μέσω
Οπτικής Ανατροφοδότησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΔΙΑΝΕΛΛΟΥ

Επιβλέπων : Κυριακόπουλος Κωνσταντίνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1 Μαρτίου 2017.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Κωνσταντίνος Κυριακόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ευάγγελος Παπαδόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος-Χριστόφορος Βοσνιακός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017

(Υπογραφή)

.....

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΔΙΑΝΕΛΛΟΣ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2017 – All rights reserved



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
& ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Copyright © - All rights reserved. Γεώργιος Διανέλλος, 2017
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Κωνσταντίνο Κυριακόπουλο για την αρμονική συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Η καθοδήγηση του με βοήθησε να αντιληφθώ πως πρέπει να προσεγγίζεται ένα ζήτημα που τίθεται υπό έρευνα. Επίσης, με βοήθησε να ξεπεράσω δυσκολίες που αναμφίβολα προκύπτουν κατά την εκπόνηση μιας διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γεώργιο Καρρά, τον Δρ. Μπάμπη Μπεχλιούλη και τον Δρ. Πάνο Μαράντο για την σημαντική στήριξη τους σε κρίσιμα θέματα της διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μιχάλη Λογοθέτη, με τον οποίο εργαστήκαμε στο ίδιο project κατά την εκπόνηση των διπλωματικών μας εργασιών, και συνεργαστήκαμε άψογα ώστε να προκύψει από τον συνδυασμό των εργασιών μας το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα υπόλοιπα μέλη του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου (Control Systems Lab – CSL) για το εξαιρετικό κλίμα που δημιούργησαν και την βοήθεια που μου παρείχαν, πάντα με την καλύτερη των διαθέσεων.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους φίλους μου και την κοπέλα μου για την στήριξη που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανίχνευση και παρακολούθηση ενός joystick μέσω οπτικής ανατροφοδότησης, καθώς και ο τηλεχειρισμός ενός τροχοφόρου ρομπότ από ρομποτικό σύστημα πλατφόρμας-βραχίονα μέσω joystick. Σε πρώτο στάδιο διερευνήθηκε η βέλτιστη λαβή του joystick σύμφωνα με θεωρία Manipulability Ellipsoids. Για την αναγνώριση του joystick χρησιμοποιήθηκε στερεοσκοπικό σύστημα Kinect, για να είναι δυνατή η αντίληψη του βάθους, και με Position-Based Visual Servo σχήμα ελέγχου επιτεύχθηκε η προσέγγιση και η λαβή του joystick. Το ρομπότ-χειριστής φέρει ενσωματωμένη κάμερα, στραμμένη προς μία οθόνη από την οποία λαμβάνεται η οπτική πληροφορία. Στην οθόνη προβάλλεται η εικόνα από κάμερα, που βρίσκεται ενσωματωμένη στο χειραγωγούμενο ρομπότ. Με βάση αυτή την οπτική πληροφορία αρχικά αναγνωρίζεται η “νεκρή ζώνη” του joystick. Ακολούθως υπολογίζεται ο μετασχηματισμός μεταξύ της θέσης του ακροδέκτη του ρομπότ-χειριστή και της ταχύτητας του χειραγωγούμενου ρομπότ. Στο τελευταίο στάδιο του πειράματος, το ρομπότ-χειριστής οδηγεί το χειραγωγούμενο ρομπότ από μια αρχική τυχαία θέση στην τελική επιθυμητή θέση.

Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται τηλεχειρισμός ρομπότ σε περιοχές όπου είναι αδύνατη η ανθρώπινη πρόσβαση. Η γενικότητα της μεθοδολογίας έγκειται στο γεγονός ότι οι παράμετροι που διέπουν το χειραγωγούμενο ρομπότ - εκτός από τους βαθμούς ελευθερίας που δύναται να κινηθεί - είναι άγνωστες.

Λέξεις Κλειδιά: <<Λαβή, Τηλεχειρισμός, Ανίχνευση, Παρακολούθηση, Έλεγχος Οπτικής Οδήγησης, Τροχοφόρο Ρομπότ, Ρομποτική>>

Abstract

The scope of this thesis was the detection and tracking of a joystick based on visual feedback, as well as the teleoperation of a mobile robot from a mobile-manipulator system via joystick. At the first stage, the optimal grasp of the joystick was investigated with the method of Manipulability Ellipsoids. Furthermore, a Kinect sensor was used for the recognition of the joystick, so as the depth of the image to be known, and with Position-Based Visual Servo control scheme the approach and grasp of the joystick was achieved. The mobile-manipulator is equipped with a camera, which is monitoring a screen to acquire visual data. On the screen the image from the camera of the manipulated mobile robot is shown. Based on this visual data, firstly the “dead zone” of the joystick is identified. Moreover, the transformation between the end-effector pose of the mobile-manipulator and the manipulated mobile robot velocity is calculated. At the final stage, the mobile-manipulator drives the manipulated mobile robot from the initial random position to the final desired position.

This methodology can be used to situations, in which the teleoperation of a robot is required and the location is inaccessible by humans. The usefulness of the methodology is that the parameters of the manipulated robot – except its degrees of freedom – are unknown.

Keywords: <<Grasping, Teleoperation, Tracking, Detection, Visual Servoing, Mobile Robot, Robotics, Kinect, Joystick>>

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	15
1.1	Λαβή Αντικειμένων.....	15
1.2	Τροχοφόρα Οχήματα.....	21
1.3	Έλεγχος Οπτικής Οδήγησης.....	23
1.4	Τηλεχειρισμός.....	27
2	Σκοπός Διπλωματικής	29
2.1	Διατύπωση Προβλήματος.....	29
2.1	Σχετικές Εργασίες	31
3	Μοντελοποίηση	33
3.1	Τροχοφόρο Ρομπότ	33
3.2	Ρομποτικό Σύστημα Πλατφόρμας-Βραχίονα-Ακροδέκτη.....	35
3.3	Joystick	37
3.4	Κάμερες	38
3.5	Οθόνη - Εντοπισμός.....	42
4	Κινηματική Ανάλυση	46
4.1	Ευθεία Κινηματική Βραχίονα.....	46
4.2	Αντίστροφη Κινηματική Βραχίονα.....	51
4.3	Διαφορική Κινηματική Ρομποτικού-Συστήματος	54
4.4	Ευθεία Κινηματική Joystick	55
4.4.1	<i>Joystick Τοποθετημένο στο Έδαφος</i>	56
4.4.2	<i>Joystick Τοποθετημένο σε Κεκλιμένη Βάση 45°</i>	58
5	Διερεύνηση Βέλτιστης Λαβής	60
5.1	Joystick Τοποθετημένο στο Έδαφος.....	60
5.1.1	<i>Μέθοδος Manipulability Ellipsoids</i>	60
5.1.2	<i>Αντίστροφος Δείκτης Κατάστασης Ιακωβιανής</i>	63
5.2	Joystick Τοποθετημένο σε Κεκλιμένη Βάση 45°	66
5.2.1	<i>Μέθοδος Manipulability Ellipsoids</i>	66
5.2.2	<i>Αντίστροφος Δείκτης Κατάστασης Ιακωβιανής</i>	67
6	Ανίχνευση/Παρακολούθηση Joystick	69
6.1	Αναγνώριση Joystick.....	69

6.2	Έλεγχος Οπτικής Οδήγησης με Αισθητήρα-Kinect.....	71
7	Τηλεχειρισμός Τροχοφόρου Ρομπότ	73
7.1	Χειρισμός Joystick & Παρακολούθηση Τροχιάς Ακροδέκτη	73
7.2	Νεκρή-Ζώνη Joystick	75
7.3	Συσχετισμός Κίνησης Ακροδέκτη & Τροχοφόρου Ρομπότ	77
7.4	Μετακίνηση Τροχοφόρου Ρομπότ στην Επιθυμητή Θέση.....	79
8	Πειραματική Διαδικασία.....	81
8.1	Διάταξη.....	81
8.2	Αποτελέσματα.....	82
8.2.1	<i>Ανίχνευση / Παρακολούθηση Joystick.....</i>	<i>82</i>
8.2.2	<i>Χειρισμός Joystick & Παρακολούθηση Τροχιάς Ακροδέκτη.....</i>	<i>84</i>
8.2.3	<i>Νεκρή-Ζώνη Joystick.....</i>	<i>86</i>
8.2.4	<i>Συσχετισμός Κίνησης Ακροδέκτη & Τροχοφόρου Ρομπότ.....</i>	<i>87</i>
8.2.5	<i>Μετακίνηση Τροχοφόρου Ρομπότ στην Επιθυμητή Θέση.....</i>	<i>88</i>
9	Επίλογος.....	90
9.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα	90
9.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	91
10	Βιβλιογραφία	93

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1 - Barrett hand – λαβή διαφόρων αντικειμένων.....	16
Εικόνα 1.2 - Ρομποτικό χέρι DLR-HIT-I (αριστερά) και DLR-HIT-II (δεξιά)	16
Εικόνα 1.3 - Robonaut 2 Nasa – χειρισμός αντικειμένων.....	17
Εικόνα 1.4 - Shadow hand – λαβή στυλό.....	17
Εικόνα 1.5 - Laval Prosthetic Hand – λαβή κουτιού χυμού.....	18
Εικόνα 1.6 - Ανθρωπομορφικό υποεπενεργούμενο χέρι χαμηλού κόστους	18
Εικόνα 1.7 - Υποεπενεργούμενο χέρι χαμηλού κόστους με 2 , 3 ή 4 δάχτυλα.....	18
Εικόνα 1.8 - Pisa/ΠΤ SoftHand – λαβή μπάλας	19
Εικόνα 1.9 - Τύποι αρθρώσεων	20
Εικόνα 1.10 - Ρομποτικός βραχίονας Mitsubishi PA-10 / 7-DoFs.....	20
Εικόνα 1.11 - Ρομποτικός βραχίονας KUKA LBR iiwa / 7-DoFs	20
Εικόνα 1.12 - Υδραυλικός ρομποτικός βραχίονας βιομηχανικού τύπου, Fanuc R-2000 / 6-DoFs	21
Εικόνα 1.13 - Διαφορετικοί τύποι κανονικών τροχών (standard wheels)	21
Εικόνα 1.14 - Διαφορετικοί τύποι ειδικών τροχών (special wheels).....	22
Εικόνα 1.15 - Pioneer 3-DX (2-τροχοί και τροχός-caster) & Pioneer 3-AT (4-τροχοί).....	22
Εικόνα 1.16 - Τροχοφόρο ρομπότ Uranus	23
Εικόνα 1.17 - Τροχοφόρο ρομπότ Kuka OmniRob	23
Εικόνα 1.18 - Eye-in-hand σύστημα (αριστερά) και Eye-to-hand σύστημα (δεξιά)	23
Εικόνα 1.19 - Mars Exploration Rover	27
Εικόνα 3.1 - Σύστημα συντεταγμένων τηλεχειριζόμενου ρομπότ	34
Εικόνα 3.2 - Τροχοί του kuka youBot / swedish wheels.....	34
Εικόνα 3.3 - Βραχίονας του kuka youBot και μήκη συνδέσμων	35
Εικόνα 3.4 - Ρομποτικό σύστημα πλατφόρμας-βραχίονα.....	35

Εικόνα 3.5 - Υποεπενεργούμενο χέρι / Ακροδέκτης ρομποτικού-συστήματος	37
Εικόνα 3.6 - Διαφορικός μηχανισμός υποεπενεργούμενου χεριού	37
Εικόνα 3.7 - Joystick / Microsoft Sidewinder Force Feedback 2.....	38
Εικόνα 3.8 - Joystick / Βαθμοί ελευθερίας	38
Εικόνα 3.9 - Δομή αισθητήρα Kinect	39
Εικόνα 3.10 - Παράδειγμα εικόνας νέφους σημείων (Point Cloud).....	39
Εικόνα 3.11 - Συστήματα συντεταγμένων Kinect & πλατφόρμας ρομπότ-χειριστή.....	40
Εικόνα 3.12 - Microsoft Lifecam Cinema 720p HD Webcam.....	41
Εικόνα 3.13 - Συστήματα συντεταγμένων Microsoft Lifecam & βάσης τηλεχειριζόμενου ρομπότ	41
Εικόνα 3.14 - Sony Eye Camera PS3	42
Εικόνα 3.15 - Οθόνη και εικόνα-στόχος τηλεχειριζόμενου ρομπότ.....	43
Εικόνα 3.16 - Στόχος τηλεχειριζόμενου ρομπότ	45
Εικόνα 4.1 - Παράμετροι Denavit-Hartenberg (a).....	47
Εικόνα 4.2 - Παράμετροι Denavit-Hartenberg (b)	47
Εικόνα 4.3 - Κινηματικοί παράμετροι βραχίονα	48
Εικόνα 4.4 - Workspace Kuka – youBot πρόσοψη / 5η άρθρωση ανενεργή.....	50
Εικόνα 4.5 - Workspace Kuka – youBot πλάγια όψη / 5η άρθρωση ανενεργή	50
Εικόνα 4.6 - Workspace Kuka – youBot κάτοψη / 5η άρθρωση ανενεργή	51
Εικόνα 4.7 - Elbow-up σχηματισμός (αριστερά) & elbow-down σχηματισμός (δεξιά).....	51
Εικόνα 4.8 - Σχηματισμός 2ης , 3ης & 4ης άρθρωσης βραχίονα.....	53
Εικόνα 4.9 - Συστήματα συντεταγμένων Kuka – youBot & Joystick (παράλληλο στο έδαφος).....	56
Εικόνα 4.10 - Workspace Joystick (παράλληλο στο έδαφος).....	57
Εικόνα 4.11 - Συστήματα συντεταγμένων Kuka – youBot & Joystick (σε Κεκλιμένη Βάση 45°).....	58
Εικόνα 4.12 - Workspace Joystick (σε Κεκλιμένη Βάση 45°)	59

Εικόνα 5.1- Ρομπότ-χειριστής και Joystick / παράμετροι βελτιστοποίησης	62
Εικόνα 5.2- Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick στο έδαφος / Manipulability Ellipsoids	62
Εικόνα 5.3 - Ρομπότ-χειριστής & Joystick στο έδαφος / βελτιστοποιημένη λαβή / Manipulability Ellipsoids....	62
Εικόνα 5.4 - Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick στο έδαφος / αντ. δείκτης κατάστασης.....	65
Εικόνα 5.5 - Ρομπότ-χειριστής & Joystick στο έδαφος / βελτιστοποιημένη λαβή / αντ. δείκτης κατάστασης	65
Εικόνα 5.6 - Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick στο έδαφος / εκτ. αντ. δείκτης κατάστασης	65
Εικόνα 5.7 - Ρομπότ-χειριστής & Joystick στο έδαφος/βελτιστοποιημένη λαβή/εκτ. αντ. δείκτης κατάστασης .	66
Εικόνα 5.8 - Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick σε βάση 45° / Manipulability Ellipsoids	66
Εικόνα 5.9 - Ρομπότ-χειριστής & Joystick σε βάση 45° / βελτιστοποιημένη λαβή / Manipulability Ellipsoids...	67
Εικόνα 5.10 - Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick σε βάση 45° / αντ. δείκτης κατάστασης.....	67
Εικόνα 5.11 - Ρομπότ-χειριστής & Joystick σε βάση 45° / βελτιστοποιημένη λαβή / αντ. δείκτης κατάστασης .	68
Εικόνα 5.12 - Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick σε βάση 45° / εκτ. αντ. δείκτης κατάστασης	68
Εικόνα 5.13 - Ρομπότ-χειριστής & Joystick σε βάση 45°/βελτιστοποιημένη λαβή/εκτ. αντ. δείκτης κατάστασης	68
Εικόνα 6.1 - Ανίχνευση αντικειμένου / Νέφος σωματιδίων αντικειμένου	70
Εικόνα 7.1 - Σφάλμα λαβής/Επιθυμητό (d) και πραγματικό (r) πλαίσιο συντεταγμένων ακροδέκτη .	77
Εικόνα 8.1 - Προσομοίωση Gazebo / Διάταξη πειράματος.....	81
Εικόνα 8.2 - Προσέγγιση Joystick / θέση Joystick ως προς πλαίσιο της Kinect	82
Εικόνα 8.3 - Προσέγγιση Joystick / προσανατολισμός Joystick ως προς πλαίσιο της Kinect	83
Εικόνα 8.4 - Προσέγγιση Joystick / θέση ακροδέκτη ως προς πλαίσιο βάσης βραχίονα.....	83
Εικόνα 8.5 - Προσέγγιση Joystick / προσανατολισμός ακροδέκτη ως προς πλαίσιο βάσης βραχίονα	84
Εικόνα 8.6 - Παρακολούθηση τροχιάς / σφάλμα θέσης ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας	84
Εικόνα 8.7 - Παρακολούθηση τροχιάς/σφάλμα προσ. ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας.....	85
Εικόνα 8.8 - Παρακολούθηση τροχιάς / 3D τροχιά ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας.....	85

Εικόνα 8.9 - Εύρεση Νεκρής-Ζώνης / σφάλμα θέσης ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας	86
Εικόνα 8.10 - Εύρεση Νεκρής-Ζώνης/σφάλμα προσ. ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας	86
Εικόνα 8.11 - Εύρεση Νεκρής-Ζώνης / 3D τροχιά ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας	87
Εικόνα 8.12 - Ταχύτητες τηλεχειριζόμενου ρομπότ κατά την εύρεση του DZy^+ , DZy^-	88
Εικόνα 8.13 - Ταχύτητες τηλεχειριζόμενου ρομπότ / μετακίνηση στην επιθυμητή θέση.....	89

1

Εισαγωγή

1.1 Λαβή Αντικειμένων

Στην σημερινή εποχή, έχει σημειωθεί ιδιαίτερη πρόοδος στον σχεδιασμό και την κατασκευή ρομποτικών χεριών. Ως επακόλουθο, οι δυνατότητες των ρομποτικών χεριών έχουν αυξηθεί σημαντικά, όπως και η πολυπλοκότητα τους. Πλέον, υπάρχει πληθώρα ρομποτικών χεριών που φέρουν πολλά δάχτυλα και είναι πλήρως επενεργούμενα. Με τον όρο πλήρως επενεργούμενο χέρι, δηλώνεται ότι κάθε άρθρωση του χεριού, είναι ανεξάρτητη από την άλλη. Αυτό μπορεί εύκολα να επιτευχθεί με την οδήγηση κάθε άρθρωσης από ξεχωριστό κινητήρα. Σε τέτοιες κατασκευές είναι λογικό πως ο βαθμός επιδεξιότητας του χεριού είναι αυξημένος (έχει την ικανότητα να επιτύχει μεγάλη πληθώρα κινήσεων), όπως και το κόστος.

Επίσης, τα ρομποτικά χέρια φέρουν πολλά δάχτυλα και πολλές φορές βασίζονται στον σχεδιασμό τους στο ανθρώπινο χέρι (ανθρωπομορφικά χέρια). Αυτή η τάση οφείλεται στο γεγονός ότι ο άνθρωπος σχεδιάζει συχνά κατασκευές με βάση την ανθρώπινη φύση, ώστε να γίνονται ευκολότερα αποδεκτές στο ευρύ κοινό. Έτσι, π.χ. μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ανθρωπομορφικό χέρι, σε περίπτωση που κάποιος άνθρωπος χρειάζεται αντικατάσταση λόγω ατυχήματος, χωρίς να προξενεί αρνητική εντύπωση το αποτέλεσμα. Αφετέρου η τάση του ανθρώπου να κατασκευάζει ρομποτικά συστήματα με βάση την ανθρώπινη φύση, οφείλεται στο ότι ο στόχος είναι τα ρομποτικά αυτά συστήματα να συμπεριφέρονται όπως ο άνθρωπος.

Έτσι, στην περίπτωση του ανθρωπομορφικού χεριού, ο στόχος είναι να μπορεί αυτό το χέρι να επιτύχει τη λαβή και τον χειρισμό αντικειμένων που μπορεί να επιτύχει και ο ίδιος ο άνθρωπος. Μερικά από τα πιο αντιπροσωπευτικά πλήρως επενεργούμενα χέρια παρουσιάζονται παρακάτω. Αρχικά φαίνεται το Barrett Hand που φέρει 3-δάχτυλα και έχει ενσωματωμένους τους κινητήρες στη βάση του (ύψους μόλις 2.5cm) [1]. Παρακάτω φαίνεται το Barrett Hand κατά την διαδικασία λαβής διαφόρων αντικειμένων (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1 - Barrett hand – λαβή διαφόρων αντικειμένων

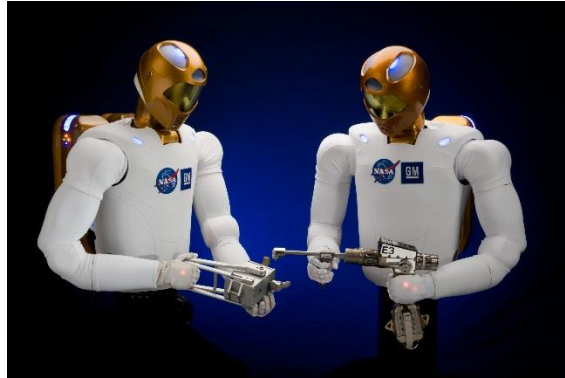
Ένα άλλο ρομποτικό ανθρωπομορφικό χέρι είναι το DLR/HIT Hand [2],[3],[4]. Ακολούθως φαίνονται τα χέρια DLR/HIT I και II, με το II –το οποίο φέρει 5 δάχτυλα- να αποτελεί την νέα βελτιωμένη έκδοση του I (Εικόνα 1.2). Το εν λόγω χέρι έχει ενσωματωμένους τους κινητήρες στα δάχτυλα και στην παλάμη, και άρα πρόκειται για ρομποτικό χέρι εσωτερικής επενέργησης (Internal Actuation Hand).



Εικόνα 1.2 – Ρομποτικό χέρι DLR-HIT-I (αριστερά) και DLR-HIT-II (δεξιά)

Έπειτα, σχεδιασμένο από τη Nasa, το ανθρωποειδές Robonaut 2 πρόκειται για μια κατασκευή που στοχεύει να βοηθήσει τον άνθρωπο στα επικείμενα ταξίδια του στο διάστημα [5]. Το

Robonaut 2 διαθέτει ανθρωπομορφικά χέρια με τους επενεργητές τους να βρίσκονται στον πήχη, και άρα πρόκειται για ρομποτικά χέρια εξωτερικής επενέργησης (External Actuation Hand). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το Robonaut 2 ενώ εκτελεί απαιτητικές διεργασίες, χειριζόμενο αντικείμενα/εξοπλισμό (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3 - Robonaut 2 Nasa – χειρισμός αντικειμένων

Μία πολύ εντυπωσιακή κατασκευή είναι το Shadow Hand [6]. Το χέρι αυτό διαθέτει 20-βαθμούς ελευθερίας και μπορεί να επιτύχει ιδιαίτερα επιδέξιες κινήσεις (Εικόνα 1.4). Οι διαστάσεις του ρομποτικού χεριού μοιάζουν με αυτές του ανθρώπινου χεριού, και πρόκειται για χέρι εξωτερικής επενέργησης.



Εικόνα 1.4 - Shadow hand – λαβή στυλό

Από την άλλη υπάρχουν αρκετά παραδείγματα ρομποτικών χεριών που λειτουργούν χωρίς πλήρη επενέργηση (υποεπενεργούμενα χέρια). Αυτό σημαίνει πως κάποιες από τις αρθρώσεις του χεριού αλληλεξαρτώνται, δηλαδή οδηγούνται από τον ίδιο κινητήρα. Έχουν σχεδιαστεί

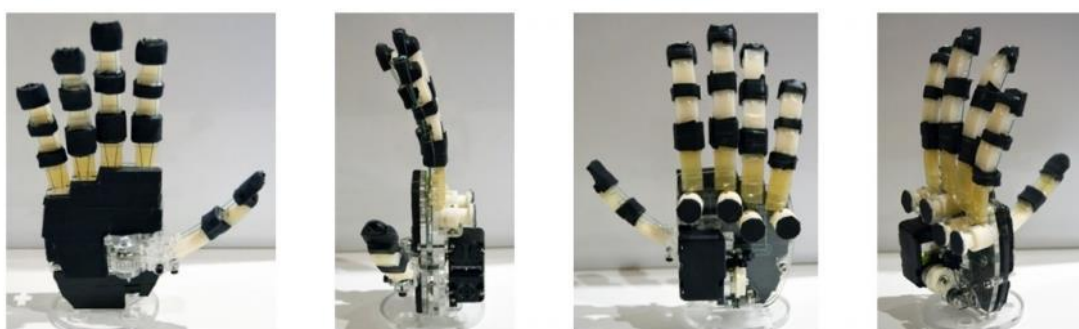
πολλά χέρια τα οποία έχουν ως κύριο στόχο να χρησιμοποιηθούν στον τομέα της προσθετικής. Μερικά από αυτά παρουσιάζονται παρακάτω.

Ένα ανθρωπομορφικό υποεπενεργούμενο χέρι από το Πανεπιστήμιο του Laval, φαίνεται ακολούθως (Εικόνα 1.5) [7].



Εικόνα 1.5 - Laval Prosthetic Hand – λαβή κουτιού χυμού

Ένα ακόμη ανθρωπομορφικό υποεπενεργούμενο χέρι, αλλά με υποχωρητικά δάχτυλα, και ιδιαίτερα χαμηλό κόστος φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 1.6) [8].



Εικόνα 1.6 – Ανθρωπομορφικό υποεπενεργούμενο χέρι χαμηλού κόστους

Ένα ακόμα υποεπενεργούμενο χέρι χαμηλού κόστους φαίνεται παρακάτω , το οποίο ωστόσο σχεδιάστηκε με λιγότερα από 5 δάχτυλα [9] (Εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.7 - Υποεπενεργούμενο χέρι χαμηλού κόστους με 2 , 3 ή 4 δάχτυλα

Ακόμη, ένα ανθρωπομορφικό υποεπενεργούμενο χέρι, το οποίο κατασκευάζεται με έναν ή δύο επενεργητές (ανάλογα το πόσο απαιτητικό χειρισμό αντικειμένου καλείται να εκτελέσει) φαίνεται παρακάτω [10] (Εικόνα 1.8).

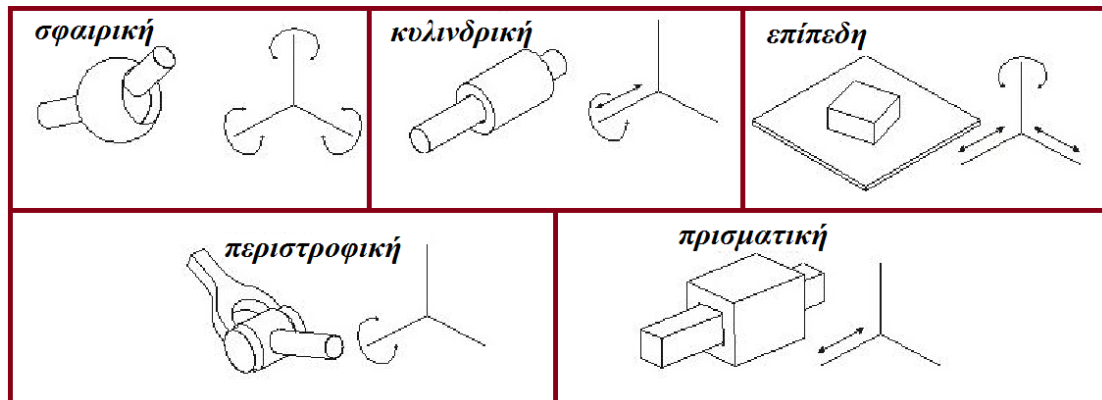


Εικόνα 1.8 - Pisa/IIT SoftHand – λαβή μπάλας

Εκτός από τους ακροδέκτες (ρομποτικά χέρια), απαραίτητο για την λαβή, αλλά και τον χειρισμό αντικειμένων είναι η ύπαρξη ρομποτικού βραχίονα. Ένας ρομποτικός βραχίονας αποτελείται από συνδέσμους, που συνδέονται μεταξύ τους μέσω αρθρώσεων. Ο ακροδέκτης (ρομποτικό χέρι) τοποθετείται στο άκρο του τελευταίου συνδέσμου του βραχίονα, κι αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του βραχίονα.

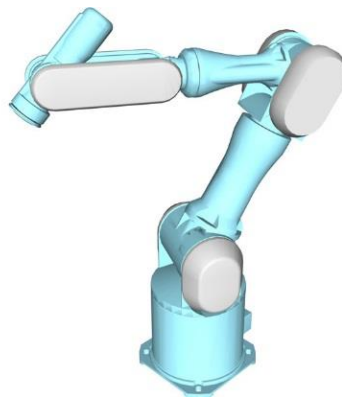
Ένας ρομποτικός βραχίονας μπορεί να περιγραφεί ως μια κινηματική αλυσίδα. Ένα ρομπότ σειριακής αλυσίδας είναι μια ακολουθία από συνδέσμους και αρθρώσεις που ξεκινούν από μια βάση και καταλήγουν στον ακροδέκτη [11]. Αντίθετα ένα ρομποτικό σύστημα στο οποίο δύο ή περισσότερα ρομπότ σειριακής αλυσίδας στηρίζουν τον ακροδέκτη (τελικό σημείο δράσης / End-Effector) ονομάζεται παράλληλο ρομπότ. Επίσης, αν στην κινηματική αλυσίδα κάποιοι από τους συνδέσμους σχηματίζουν βρόγχο (loop), τότε η κινηματική αλυσίδα ονομάζεται κλειστή, αλλιώς ονομάζεται ανοιχτή. Στην συνηθη περίπτωση οι ρομποτικοί βραχίονες είναι ανοιχτές σειριακές κινηματικές αλυσίδες.

Κάθε άρθρωση του βραχίονα έχει έναν συγκεκριμένο τύπο που προσδιορίζει τον/τους βαθμούς ελευθερίας που προσδίδει στην κατασκευή (Εικόνα 1.9). Οι συνηθέστεροι τύποι αρθρώσεων είναι οι περιστροφικές και οι πρισματικές αρθρώσεις, οι οποίες προσδίδουν 1-βαθμό ελευθερίας. Ωστόσο, υπάρχουν και αρθρώσεις που μπορούν και προσδίδουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας (Degrees of Freedom/DoF), όπως η κυλινδρική (2-DoFs), η σφαιρική (3-DoFs) και η επίπεδη (3-DoFs). Ωστόσο, αυτού του τύπου οι αρθρώσεις είναι πολύ δυσκολότερο και άρα πολύ πιο κοστοβόρο να κατασκευαστούν. Έτσι, προτιμάται να κατασκευάζονται τέτοιου τύπου αρθρώσεις, ως επαλληλία απλούστερων (όπως π.χ. μια σφαιρική άρθρωση ως 3-περιστροφικές αρθρώσεις σε σειρά).

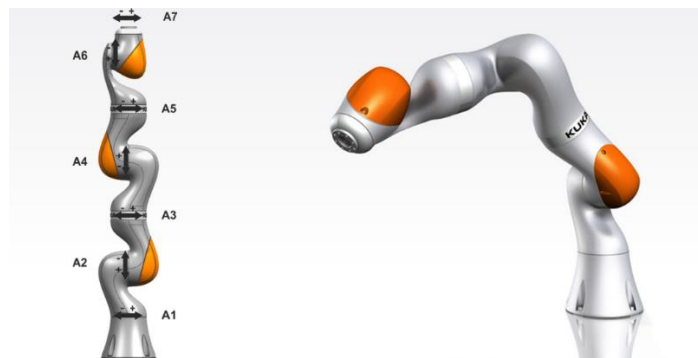


Εικόνα 1.9 – Τύποι αρθρώσεων

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα ρομποτικών βραχιόνων. Αρχικά, παρουσιάζεται ο ρομποτικός βραχίονας Mitsubishi PA-10, 7-βαθμών ελευθερίας [12] (Εικόνα 1.10). Ακολούθως, φαίνεται ο βραχίονας της Kuka LBR iiwa επίσης 7-βαθμών ελευθερίας [13] (Εικόνα 1.11). Τέλος, φαίνεται ένα παράδειγμα υδραυλικού βραχίονα (επειδή σκοπός του είναι να χειρίζεται μεγάλο φορτίο έως και 250 kg) βιομηχανικού τύπου Fanuc R-2000, 6-βαθμών ελευθερίας [14] (Εικόνα 1.12).



Εικόνα 1.10 – Ρομποτικός βραχίονας Mitsubishi PA-10 / 7-DoFs



Εικόνα 1.11 – Ρομποτικός βραχίονας KUKA LBR iiwa / 7-DoFs



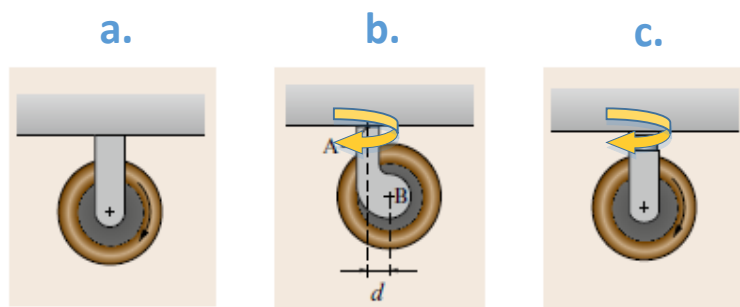
Εικόνα 1.12 - Υδραυλικός ρομποτικός βραχίονας βιομηχανικού τύπου, Fanuc R-2000 / 6-DoFs

1.2 Τροχοφόρα Οχήματα

Τα τροχοφόρα οχήματα χρησιμοποιούνται σε πληθώρα ρομποτικών εφαρμογών. Ο λόγος είναι ότι καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και κινούνται ταχύτερα από άλλους μηχανισμούς (όπως τα ρομπότ με πόδια). Παρόλα αυτά έχουν το μειονέκτημα πως δεν μπορούν με ευκολία να διασχίσουν ανώμαλο έδαφος, και σε αρκετές περιπτώσεις περιορίζονται σε χρήση εσωτερικού χώρου.

Κάθε τροχοφόρο ρομπότ μπορεί να φέρει τυπικούς ή ειδικούς τροχούς. Όσον αφορά τους τυπικούς τροχούς, τρεις γενικές περιπτώσεις μπορεί να ξεχωρίσει κανείς [11] (Εικόνα 1.13):

- i. Παθητικός σταθερός τροχός. Ο τροχός στρέφεται ενώ η βάση του μένει σταθερή.
- ii. Παθητικός ή ενεργητικός, με offset από τη βάση (τροχός caster). Η βάση του τροχού μπορεί να στρέφεται ή όχι.
- iii. Ενεργητικός τροχός χωρίς offset. Η βάση του τροχού στρέφεται.



Εικόνα 1.13 – Διαφορετικοί τύποι κανονικών τροχών (standard wheels)

Παρά το γεγονός όμως ότι οι τυπικοί τροχοί έχουν απλό σχεδιασμό, καλή αντοχή και χαμηλό κόστος, υπόκεινται σε διαφορικό περιορισμό κίνησης (non-holonomic velocity constraint) κι έτσι δεν μπορούν να κινηθούν πλαγιομετωπικά. Στις περιπτώσεις που είναι αναγκαίο να αρθεί αυτός ο περιορισμός, χρησιμοποιούνται ειδικοί τροχοί (πολυκατευθυντικοί τροχοί) που μπορούν να επιτύχουν ολονομική κίνηση. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων τροχών φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 1.14). Ο 1^{ος} τροχός πρόκειται για sweedish wheel, ενώ ο 2^{ος} για σφαιρικό τροχό.



Εικόνα 1.14 – Διαφορετικοί τύποι ειδικών τροχών (*special wheels*)

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα τροχοφόρων ρομπότ. Αρχικά φαίνονται τα τροχοφόρα ρομπότ της Pioneer με 3-τροχούς και 4-τροχούς αντίστοιχα [15] (Εικόνα 1.15)



Εικόνα 1.15 - Pioneer 3-DX (2-τροχοί και τροχός-caster) & Pioneer 3-AT (4-τροχοί)

Έπειτα παρουσιάζεται το ρομπότ Uranus με 4-πολυκατευθυντικούς τροχούς (sweedish wheels) [16] (Εικόνα 1.16). Ακόμη παρουσιάζεται και ένα παράδειγμα τροχοφόρου ρομπότ που διαθέτει βραχίονα προσαρτημένο στην βάση του, με σκοπό την εκτέλεση επιδέξιων χειρισμών αντικειμένων. Το ρομπότ αυτό διαθέτει επίσης 4-πολυκατευθυντικούς τροχούς και κατασκευάστηκε από την Kuka [17] (Εικόνα 1.17).



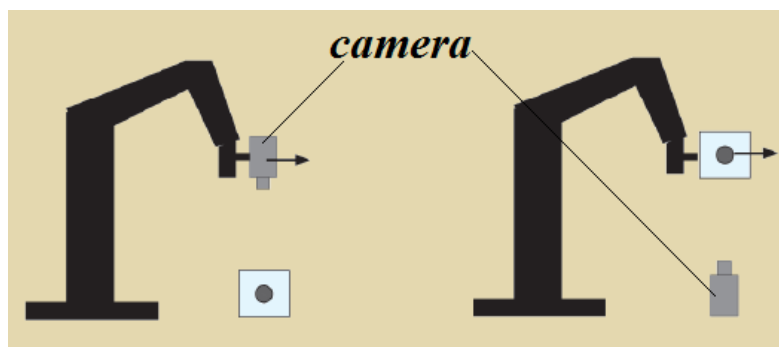
Εικόνα 1.16 – Τροχοφόρο ρομπότ Uranus



Εικόνα 1.17 – Τροχοφόρο ρομπότ Kuka OmniRob

1.3 Έλεγχος Οπτικής Οδήγησης

Ο όρος έλεγχος οπτικής οδήγησης (Visual Servo Control) αναφέρεται στην χρήση οπτικών δεδομένων, με σκοπό τον έλεγχο της κίνησης ενός ρομπότ [18],[19]. Τα οπτικά αυτά δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν από κάμερα τοποθετημένη πάνω στο ρομπότ (eye-in-hand σύστημα), ή από κάμερα που είναι τοποθετημένη στον χώρο και παρατηρεί τις κινήσεις του ρομπότ, από σταθερή συνήθως θέση (eye-to-hand σύστημα) (Εικόνα 1.18).



Εικόνα 1.18 – Eye-in-hand σύστημα (αριστερά) και Eye-to-hand σύστημα (δεξιά)

Ο στόχος του σχήματος ελέγχου βασισμένο στην οπτική, είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος $e(t)$ (Σχέση 1.1).

$$e(t) = s(m(t), a) - s^* \quad (1.1)$$

Όπου:

- $m(t)$ ένα σετ από μετρήσεις της εικόνας (π.χ. οι συντεταγμένες των σημείων υπό ενδιαφέρον στην εικόνα),
- a ένα σετ παραμέτρων που αναπαριστούν ενδεχόμενη επιπρόσθετη πληροφορία για το σύστημα (π.χ. οι παράμετροι που διέπουν την κάμερα),
- $s(m(t), a)$ ένα διάνυσμα από k οπτικά χαρακτηριστικά (features),
- s^* το διάνυσμα των επιθυμητών οπτικών χαρακτηριστικών.

Αρχικά επιλέγεται το s , δηλαδή τα οπτικά χαρακτηριστικά υπό ενδιαφέρον. Έπειτα, ζητείται η σχέση μεταξύ της χρονικής παραγώγου του s , και της ταχύτητας της κάμερας (Σχέση 1.2). Η ταχύτητα της κάμερας ορίζεται ως $v_c = (\mathbf{u}_c, \omega_c)$, με \mathbf{u}_c την στιγμιαία γραμμική ταχύτητα και ω_c την στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα στο πλαίσιο της κάμερας.

$$\dot{s} = L_s v_c \quad (1.2)$$

Όπου $L_s \in \mathbb{R}^{k \times 6}$ ο πίνακας αλληλεπίδρασης (interaction matrix).

Με χρήση των προηγούμενων σχέσεων, βρίσκουμε την εξίσωση του σφάλματος (Σχέση 1.3).

$$\dot{e} = L_e v_c \quad (1.3)$$

Όπου: $L_e = L_s$

Δεδομένου ότι η ταχύτητα v_c είναι η είσοδος στον ελεγκτή του ρομπότ, και ότι σκοπός είναι η επίτευξη εκθετικής μείωσης του σφάλματος (δηλαδή $\dot{e} = -\lambda e$), προκύπτει η ακόλουθη σχέση (Σχέση 1.4).

$$v_c = -\lambda L_e^+ e \quad (1.4)$$

Όπου $L_e^+ \in \mathbb{R}^{6 \times k}$ ο ψευδοαντίστροφος Moore-Penrose του πίνακα L_e , ο οποίος υπολογίζεται ως παρακάτω, όταν ο πίνακας L_e είναι πλήρους βαθμού (full rank) (Σχέση 1.5).

$$L_e^+ = (L_e^T L_e)^{-1} L_e^T \quad (1.5)$$

Επίσης όταν $k=6$, και η ορίζουσα του L_e δεν είναι μηδενική, τότε είναι δυνατή η αντιστροφή του L_e και μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση (Σχέση 1.6).

$$v_c = -\lambda L_e^{-1} e \quad (1.6)$$

Επειδή ωστόσο σε πραγματικά συστήματα οπτικής οδήγησης είναι αδύνατη η ακριβής γνώση του πίνακα L_e ή L_e^+ , χρησιμοποιείται μια προσέγγιση ή εκτίμηση σε κάποιον από τους δύο αυτούς πίνακες (\hat{L}_e, \hat{L}_e^+). Έτσι τελικά χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση (Σχέση 1.7)

$$v_c = -\lambda \hat{L}_e^+ e \quad (1.7)$$

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για τον έλεγχο οπτικής οδήγησης. Η 1^η εξ αυτών είναι η οπτική οδήγηση με βάση την εικόνα (Image-Based Visual Servo / IBVS), ενώ η 2^η η οπτική οδήγηση με βάση τη θέση του αντικειμένου (Position-Based Visual Servo / PBVS).

Όσον αφορά την μέθοδο IBVS, η μεταβλητή m , αντιπροσωπεύει συνήθως τις συντεταγμένες σε pixel, των σημείων της εικόνας, και η παράμετρος a αντιπροσωπεύει τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας. Πιο συγκεκριμένα, για ένα σημείο στον 3-διάστατο χώρο με συντεταγμένες $X = (X, Y, Z)$ στο πλαίσιο της κάμερας, το οποίο προβάλλεται στην εικόνα ως ένα 2-διάστατο σημείο με συντεταγμένες $x = (x, y)$ ισχύει η ακόλουθη εξίσωση (Σχέση 1.8).

$$\begin{cases} x = X/Z \\ y = Y/Z \end{cases} \quad (1.8)$$

Παίρνοντας την χρονική παράγωγο των προβολικών εξισώσεων λαμβάνουμε την ακόλουθη σχέση (Σχέση 1.9).

$$\begin{cases} \dot{x} = \dot{X}/Z - X\dot{Z}/Z^2 = (\dot{X} - x\dot{Z})/Z \\ \dot{y} = \dot{Y}/Z - Y\dot{Z}/Z^2 = (\dot{Y} - y\dot{Z})/Z \end{cases} \quad (1.9)$$

Ο συσχετισμός της ταχύτητας του 3-διάστατου σημείου με την χωρική ταχύτητα της κάμερας γίνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (Σχέση 1.10).

$$\dot{X} = -v_c - \omega_c \times X \iff \begin{cases} \dot{X} = -v_x - \omega_y Z + \omega_z Y \\ \dot{Y} = -v_y - \omega_z X + \omega_x Z \\ \dot{Z} = -v_z - \omega_x Y + \omega_y X \end{cases} \quad (1.10)$$

Με συνδυασμό των δύο προηγούμενων εξισώσεων προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση (Σχέση 1.11).

$$\begin{cases} \dot{x} = -v_x/Z + xv_z/Z + xy\omega_x - (1+x^2)\omega_y + y\omega_z \\ \dot{y} = -v_y/Z + yv_z/Z + (1+y^2)\omega_x - xy\omega_y - x\omega_z \end{cases} \quad (1.11)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί στην ακόλουθη μορφή (Σχέση 1.12), με L_x τον πίνακα αλληλεπίδρασης (Σχέση 1.13).

$$\dot{x} = L_x V_c \quad (1.12)$$

$$L_x = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -\frac{1}{Z} & \frac{y}{Z} & (1+y^2) & -xy & -x \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Ωστόσο, στην παραπάνω εξίσωση απαιτείται η γνώση του βάθους Z , που δεν είναι εφικτό σε όλες τις περιπτώσεις. Έτσι, σε αρκετές περιπτώσεις που είναι αδύνατη η γνώση του Z , υπολογίζεται μια προσέγγιση του L_x^+ (που συμβολίζεται ως \hat{L}_x^+), όπου $\hat{L}_x^+ = \hat{L}_{x,\text{desired}}^+$ και ο πίνακας $\hat{L}_{x,\text{desired}}^+$ έχει υπολογιστεί με χρήση του βάθους Z των επιθυμητών χαρακτηριστικών (με Z =σταθερά). Αυτή είναι μία από τις δυνατές επιλογές που έχουν ερευνηθεί για την εύρεση του πίνακα αλληλεπίδρασης [18],[19].

Για τον έλεγχο 6 DoFs, τουλάχιστον τρία σημεία είναι απαραίτητα (απαιτείται $k \geq 6$). Έτσι, ο πίνακας αλληλεπίδρασης για τα τρία σημεία $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3)$ προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση (Σχέση 1.14).

$$L_x = \begin{bmatrix} L_{x_1} \\ L_{x_2} \\ L_{x_3} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Επειδή όμως υπάρχουν περιπτώσεις που ο πίνακας L_x είναι ιδιόμορφος, συνήθως λαμβάνονται περισσότερα από τρία σημεία, για να είναι πιο εύρωστος ο έλεγχος οπτικής οδήγησης.

Απ' την άλλη πλευρά υπάρχει και η μέθοδος PBVS, στην οποία χρησιμοποιείται η θέση της κάμερας σε σχέση με κάποιο πλαίσιο συντεταγμένων αναφοράς για τον προσδιορισμό του \mathbf{s} . Ορίζονται τα συστήματα συντεταγμένων \mathbf{F}_c ως το τρέχον σύστημα συντεταγμένων της κάμερας, \mathbf{F}_{c^*} ως το επιθυμητό σύστημα συντεταγμένων της κάμερας και \mathbf{F}_o ως το σύστημα συντεταγμένων του αντικειμένου. Έπειτα ορίζεται ο πίνακας περιστροφής μεταξύ τρέχοντος και επιθυμητού συστήματος συντεταγμένων της κάμερας, $\mathbf{R} = {}^{c^*}\mathbf{R}_c$. Ορίζεται επίσης το διάνυσμα $\mathbf{s} = (\mathbf{t}, \theta\mathbf{u})$, με \mathbf{t} το διάνυσμα μεταφοράς και $\theta\mathbf{u}$ το ζεύγος ισοδύναμης γωνίας – άξονα περιστροφής.

Μια επιλογή για το σχήμα ελέγχου PBVS είναι η χρήση του $\mathbf{s} = ({}^{c^*}\mathbf{t}_c, \theta\mathbf{u})$. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε $\mathbf{s}^* = \mathbf{0}$, $\mathbf{e} = \mathbf{s}$ και τον πίνακα αλληλεπίδρασης να φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση (Σχέση 1.15). Παρατηρείται πως οι σχέσεις γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας είναι απεμπλεγμένες μεταξύ τους.

$$L_e = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & L_{\theta u} \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Ο πίνακας $L_{\theta u}$ (Σχέση 1.16), έχει την ιδιότητα $L_{\theta u}^{-1} \theta\mathbf{u} = \theta\mathbf{u}$.

$$L_{\theta u} = I_3 - \frac{\theta}{2}[u]_{\times} + \left(1 - \frac{\text{sinc}(\theta)}{\text{sinc}^2(\frac{\theta}{2})}\right)[u]_{\times}^2$$

$$\text{with } \text{sinc}(x) = \text{sinus cardinal and } x\text{sinc}(x) = \sin(x), \text{ sinc}(0) = 1 \quad (1.16)$$

Έτσι τελικά προκύπτουν οι τελικές σχέσεις για την γραμμική και γωνιακή ταχύτητα της κάμερας (Σχέση 1.17). Σε αυτήν την περίπτωση, και αν οι παράμετροι που εμπλέκονται στην Σχέση 1.17 υπολογίζονται με ακρίβεια, η τροχιά της κάμερας είναι μια ευθεία γραμμή.

$$\begin{cases} v_c = -\lambda R^T {}^{c^*}\mathbf{t}_c \\ \omega_c = -\lambda \theta u \end{cases} \quad (1.17)$$

1.4 Τηλεχειρισμός

Ο τηλεχειρισμός αφορά τον χειρισμό μια μηχανής από απόσταση (συνήθως αναφέρεται και ως remote control) [20]. Ο τηλεχειριστής (telem manipulator ή teleoperator) είναι μια συσκευή η οποία ελέγχεται απομακρυσμένα από άνθρωπο χειριστή. Στην περίπτωση που έχουμε πλήρως αυτόνομη συσκευή, τότε έχουμε τηλεχειρισμό ρομπότ. Η διεπαφή (interface) του τηλεχειρισμού μπορεί να είναι απλή και κοινότυπη όπως ένα σύστημα οθόνης-ποντικιού-πληκτρολογίου. Μια τροποποίηση του παραπάνω συστήματος είναι το joystick, που παρέχει ένα πιο ενστικτώδες σχήμα πλοήγησης για επίπεδη κίνηση ρομπότ.

Οι πιο σημαντικοί τομείς εφαρμογής του τηλεχειρισμού είναι οι ακόλουθοι:

Διάστημα (Space): Στον τομέα της εξερεύνησης του διαστήματος χρησιμοποιούνται ρομπότ τα οποία τηλεχειρίζεται ο άνθρωπος. Παράδειγμα είναι τα Mars Exploration Rovers (MER) τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε διαστημικές αποστολές στον Άρη (Εικόνα 1.19). Σε αυτήν την περίπτωση το MER λειτουργούσε με βάση αποθηκευμένα προγράμματα, τα οποία ανανέωναν καθημερινά από τη γη άνθρωποι, ανάλογα με την επιθυμητή αποστολή. Σε μια άλλη περίπτωση, στη Ρωσική αποστολή Lunokhod-1, τοποθετήθηκε ένα rover στο φεγγάρι, το οποίο τηλεχειρίζονταν άνθρωποι από τη γη. Η καθυστέρηση (delay) που υπήρχε ήταν της τάξεως των 2.5 sec.



Εικόνα 1.19 – Mars Exploration Rover

Τηλεπαρουσία (Telepresence): Τα ρομπότ τηλεπαρουσίας βοηθούν στη δημιουργία μιας καλύτερης αίσθησης απομακρυσμένης φυσικής παρουσίας, με σκοπό την επικοινωνία και την συνεργασία, σε χώρους όπου κάποιο πρόσωπο δεν δύναται να παρευρίσκεται φυσικά. Το ρομπότ, που αντιπροσωπεύει κάποιο πρόσωπο, μπορεί να κινηθεί ή να «κοιτάξει» γύρω του, με βάση τις εντολές του ανθρώπου χειριστή. Δύο βασικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στην τηλεδιάσκεψη είναι:

- i. *Ρομπότ τηλεπαρουσίας σε επιφάνεια εργασίας* – συνήθως στήριξη κάποιας συσκευής (π.χ. τηλεφώνου) σε μια περιστρεφόμενη βάση, ώστε το απομακρυσμένο πρόσωπο να μπορεί να κοιτάξει τον περιβάλλοντα χώρο.
- ii. *Οδηγούμενα ρομπότ τηλεπαρουσίας* – συνήθως περιλαμβάνουν μια οθόνη στηριζόμενη σε βάση που μπορεί να κινηθεί στον χώρο.

Θαλάσσιες εφαρμογές (Marine Applications): Τα θαλάσσια απομακρυσμένα-χειριζόμενα οχήματα (remotely operated vehicles / ROVs) χρησιμοποιούνται ευρέως για εργασία σε υδάτινο περιβάλλον είτε πολύ βαθύ, είτε πολύ επικίνδυνο για να επιχειρήσει ο άνθρωπος. Έχουν την δυνατότητα να επιδιορθώσουν πλατφόρμες πετρελαίου, αλλά και να συνδέσουν καλώδια σε βυθισμένα πλοία, έτσι ώστε να τα ανασύρουν στην επιφάνεια.

Τηλεϊατρική (Telemedicine): Τις τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει σπουδαία έρευνα στον τομέα των ιατρικών συσκευών και των ελάχιστα-διδειδυτικών χειρουργικών συστημάτων. Με την χρήση ενός ρομποτικού χειρουργικού συστήματος, μπορεί πλέον ο χειρουργός να εργαστεί διαμέσου μικροσκοπικών οπών στις οποίες διεισδύει το ρομποτικό εργαλείο, χωρίς να χρειάζεται να επέμβει με τα χέρια του. Έτσι, δεν δημιουργούνται μεγάλες τομές στον ασθενή, ενώ παράλληλα αυξάνεται η ακρίβεια της επέμβασης, και μειώνεται το ενδεχόμενο ανθρώπινου σφάλματος.

Παρά ταύτα αξίζει να σημειωθεί πως ο τομέας της τηλερομποτικής αντιμετωπίζει δύο σημαντικά προβλήματα. Το ένα αφορά την καθυστέρηση στην εκτέλεση των κινήσεων από το τηλεχειριζόμενο ρομπότ [21]. Σε περιπτώσεις που υπάρχει μεγάλη χρονική καθυστέρηση σχετικά με την ακρίβεια της κίνησης που απαιτείται να εκτελέσει το ρομπότ, τίθεται ακόμα και θέμα ευστάθειας του ελέγχου. Έπειτα, σημαντικό ζήτημα είναι η ανάδραση της δύναμης από το τηλεχειριζόμενο ρομπότ στον άνθρωπο-χειριστή, η οποία μπορεί να προκαλέσει θόρυβο, ικανό να επηρεάσει τον έλεγχο του ρομπότ [22]. Σε κάθε περίπτωση, η έρευνα που έχει γίνει στον τομέα του τηλεχειρισμού, περιλαμβάνει ένα τηλεχειριζόμενο ρομπότ και έναν άνθρωπο χειριστή. Το σενάριο στο οποίο στη θέση του χειριστή βρίσκεται ρομπότ, που οδηγεί στην πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας του τηλεχειρισμού, δεν έχει τεθεί υπό έρευνα.

2

Σκοπός Διπλωματικής

2.1 Διατύπωση Προβλήματος

Σε αυτήν την εργασία μελετάται το πρόβλημα ανίχνευσης και παρακολούθησης ενός joystick, καθώς και ο τηλεχειρισμός ενός τροχοφόρου ρομπότ από ρομποτικό σύστημα πλατφόρμας-βραχίονα μέσω του joystick. Το πρόβλημα αυτό θεωρήθηκε σημαντικό να ερευνηθεί, καθώς σε περιπτώσεις που απαιτείται τηλεχειρισμός ρομπότ, αλλά η ανθρώπινη πρόσβαση είναι αδύνατη – λόγω επικίνδυνου περιβάλλοντος, δύσβατου πεδίου ή μακρινής απόστασης ενώ χρειάζεται άμεση παρέμβαση – τότε ένα ρομπότ-χειριστής μπορεί να δώσει τη λύση και να φέρει σε πέρας τον εν λόγω τηλεχειρισμό. Άλλωστε, η ιδέα της διερεύνησης του παραπάνω σεναρίου, προέκυψε από το γεγονός ότι ο σκοπός που πρέπει να επιτελούν τα ρομπότ είναι να διευκολύνουν τους ανθρώπους, ιδιαίτερα σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης και υψηλής επικινδυνότητας.

Στο πλαίσιο της διπλωματικής, αρχικά διερευνάται το ζήτημα της ανίχνευσης του joystick. Το ρομπότ-χειριστής φέρει στο σώμα του δύο κάμερες. Οι κάμερες αυτές είναι τοποθετημένες σε θέσεις, τέτοιες ώστε να εξυπηρετούν το σκοπό τους. Η μία κάμερα πρόκειται για αισθητήρα Kinect, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή γιατί διαθέτει την ικανότητα να αντιλαμβάνεται το βάθος της εικόνας. Έτσι, αναλύεται η εικόνα σε νέφος σημείων και με την βοήθεια αλγορίθμου γίνεται η επεξεργασία της, ώστε να αναγνωριστεί ως στόχος το joystick. Στη συνέχεια, με κλασικό Έλεγχο Οπτικής Ανατροφοδότησης βασισμένο στη θέση του στόχου (Position Based Visual Servo – PBVS), το ρομπότ-χειριστής πλησιάζει το joystick μέχρις ότου φτάσει στην κατάλληλη θέση, κι έπειτα πραγματοποιείται η επιθυμητή λαβή από τον ακροδέκτη. Ο ακροδέκτης που προσαρμόζεται στο άκρο του τελευταίου συνδέσμου του βραχίονα, είναι ένα υποεπενεργούμενο χέρι με τρία ελαστικά δάχτυλα, που ελέγχεται από έναν σερβοκινητήρα. Η επιθυμητή θέση του ρομπότ-χειριστή από την οποία θα γίνει η λαβή, καθώς

και ο τρόπος λαβής, προκύπτουν έπειτα από ανάλυση που έγινε με τη μέθοδο των Manipulability Ellipsoids.

Ακολουθώντας, με τη δεύτερη κάμερα του ρομπότ-χειριστή παρακολουθείται μια οθόνη που βρίσκεται πλησίον του joystick. Εντός της οθόνης, φαίνεται η εικόνα από κάμερα που βρίσκεται ενσωματωμένη στο χειραγωγούμενο ρομπότ. Η κάμερα του χειραγωγούμενου ρομπότ βλέπει έναν στόχο, αποτελούμενο από τέσσερις μάρκες, και βρίσκεται σε μια τυχαία θέση ως προς τον στόχο. Είναι δεδομένο, πως το χειραγωγούμενο ρομπότ, ως ολονομικό ρομπότ, μπορεί να κινηθεί ελεύθερα στο επίπεδο, κι άρα έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας (2-μεταφορές και 1-περιστροφή γύρω από άξονα που διέρχεται από το κέντρο του και είναι κάθετος στο έδαφος). Οι τρεις αυτοί βαθμοί ελευθερίας αντιστοιχούν στους τρεις βαθμούς ελευθερίας του joystick (3-περιστροφές ως προς το κέντρο του). Το ρομπότ-χειριστής δεν γνωρίζει τα χαρακτηριστικά και την απόσταση από τον στόχο της κάμερας του χειραγωγούμενου ρομπότ. Επίσης, δεν είναι γνωστή η αντιστοιχία της θέσης του joystick με την ταχύτητα του χειραγωγούμενου ρομπότ καθώς επίσης δεν υπάρχει ανάδρασης θέσης ή ταχύτητας από το τηλεχειριζόμενο ρομπότ. Συνεπώς, δεν μπορεί να εφαρμοστεί ένας κλασσικός Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης βασισμένος στην εικόνα (Image Based Visual Servo – IBVS), αφού η εκτίμηση του βάθους του στόχου και των παραμέτρων της κάμερας είναι αδύνατη ενώ τα οπτικά χαρακτηριστικά δεν είναι άμεσα διαθέσιμα. Η επίλυση αυτού του προβλήματος επιτυγχάνεται με την σχεδίαση ενός ελεγκτή βασισμένο στον IBVS ελεγκτή, που είναι ανεξάρτητος από μεταβολές της σχετικής θέσης κάμερας-οθόνης. Ωστόσο, ο ελεγκτής χρησιμοποιεί μια σταθερή τιμή βάθους αντί για το πραγματικό βάθος του στόχου που αντιλαμβάνεται το χειραγωγούμενο ρομπότ. Επίσης, χρησιμοποιεί ως δεδομένο τις διαστάσεις της οθόνης.

Με βάση αυτόν τον ελεγκτή, το ρομπότ-χειριστής αναλαμβάνει να εκτελέσει τις ακόλουθες διεργασίες:

- i. Εύρεση της νεκρής ζώνης (Dead Zone – DZ) του joystick. Η νεκρή ζώνη ορίζεται ως η περιοχή στην οποία το joystick δεν δίνει εντολή κίνησης στο χειραγωγούμενο ρομπότ. Άρα, αναγνωρίζονται τα όρια αυτής της περιοχής, για κάθε βαθμό ελευθερίας, με την παρατήρηση της πρώτης στιγμής που το χειραγωγούμενο ρομπότ αρχίζει να κινείται, προερχόμενο από την ακινησία.
- ii. Υπολογισμός του μετασχηματισμού μεταξύ της θέσης του ακροδέκτη του ρομπότ-χειριστή και της ταχύτητας του χειραγωγούμενου ρομπότ. Στην ιδανική περίπτωση, είναι γνωστή η αντιστοιχία των βαθμών ελευθερίας του joystick με τους βαθμούς ελευθερίας του χειραγωγούμενου ρομπότ. Ωστόσο, υπάρχουν σφάλματα του ελεγκτή στην πρώτη φάση της προσέγγισης του joystick, σφάλματα κατά την λαβή, σφάλματα προερχόμενα από τις κάμερες και σφάλματα κίνησης των δύο ρομπότ. Αυτά οδηγούν

σε αλλοίωση της προαναφερθείσας αντιστοιχίας. Έτσι, με κίνηση του joystick σε διάφορες κατευθύνσεις και με παρατήρηση της κίνησης του χειραγωγούμενου ρομπότ, υπολογίζεται εκ νέου αυτή η αντιστοιχία.

- iii. Τηλεχειρισμός και μετακίνηση του χειραγωγούμενου ρομπότ από μια αρχική-τυχαία θέση στην τελική-επιθυμητή θέση. Έχοντας βρει τη νεκρή ζώνη και τον μετασχηματισμό μεταξύ της θέσης του joystick και της ταχύτητας του χειραγωγούμενου ρομπότ, το ρομπότ-χειριστής μεταβάλλει τη θέση του joystick σύμφωνα με τον προαναφερθέντα ελεγκτή IBVS. Η διαδικασία τηλεχειρισμού τελειώνει όταν ο στόχος του χειραγωγούμενου ρομπότ βρεθεί στην επιθυμητή σε σχέση με εκείνο θέση.

2.2 Σχετικές Εργασίες

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει πραγματοποιηθεί σημαντική πρόοδος όσον αφορά την λαβή αντικειμένων από ρομποτικά χέρια. Η ανάλυση της λαβής αντικειμένων έχει πραγματοποιηθεί τόσο για ανθρωπομορφικά χέρια [23], όσο και για μη-ανθρωπομορφικά χέρια [24]. Επίσης, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες για υποεπενεργούμενα χέρια [25],[26],[27]. Τα κριτήρια με τα οποία αξιολογείται η εκάστοτε λαβή, μπορεί να αφορούν γενικά κριτήρια κίνησης του ρομπότ [28],[29], ή ακόμη να αφορούν την εκπλήρωση μιας συγκεκριμένης εργασίας που ανατίθεται στο ρομπότ [23],[30],[31]. Βέβαια, πολύ σημαντική για την αξιολόγηση της λαβής, είναι η θεωρία των manipulability ellipsoids [32], που έχει εφαρμοστεί και για ρομποτικά συστήματα με περισσότερους του ενός βραχίονες [33].

Έπειτα, η οπτική οδήγηση (Visual Servoing) σε ρομποτικά συστήματα μπορεί να γίνει με βάση την εικόνα (IBVS), με βάση την θέση του αντικειμένου (PBVS), αλλά ακόμη και με υβριδικές μεθόδους (Hybrid Visual Servo), οι οποίες συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων μεθόδων [18],[19]. Σχετικές μελέτες έχουν γίνει και για το ζήτημα της λαβής αντικειμένων με χρήση οπτικής ανατροφοδότησης [34]. Με χρήση του αισθητήρα Kinect έχει ερευνηθεί η αναγνώριση αντικειμένων, τόσο με βάση την RGB εικόνα, όσο και με την εικόνα βάθους που παρέχει ο αισθητήρας Kinect [35]. Επίσης, έχει παρουσιαστεί πλήρης μεθοδολογία με την οποία είναι δυνατόν, αρχικά να δημιουργηθεί το 3-διάστατο μοντέλο αντικειμένου, κι έπειτα να γίνει η ανίχνευση του και η παρακολούθηση του στο χώρο με τη χρήση του αισθητήρα Kinect [36].

Στο ζήτημα του τηλεχειρισμού ρομποτικών συστημάτων από άνθρωπο, έχει παρουσιαστεί μελέτη που αφορά τον τηλεχειρισμό τροχοφόρου ρομπότ με ανάδραση δύναμης μεταβλητού κέρδους [22]. Επίσης, έχει ερευνηθεί η περίπτωση τηλεχειρισμού ρομποτικού βραχίονα από άνθρωπο, με βάση κινήσεις του ανθρώπου που καταγράφονται από κάμερα [37]. Ωστόσο, στην

υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν έχει μελετηθεί το ζήτημα του τηλεχειρισμού ρομπότ από άλλο ρομπότ.

Στην παρούσα διπλωματική ερευνάται το σενάριο, κατά το οποίο ένα ρομπότ-χειριστής καλείται αρχικά να αναγνωρίσει στο χώρο ένα joystick και να το παρακολουθήσει μέσω PBVS και με χρήση αισθητήρα Kinect. Έπειτα, ακολουθεί η λαβή του joystick από ρομποτικό βραχίονα που διαθέτει το ρομπότ-χειριστής. Ο βέλτιστος τρόπος της λαβής ερευνήθηκε με τη μέθοδο των Manipulability Ellipsoids. Στη συνέχεια, και με βάση IBVS σχήμα ελέγχου το οποίο λαμβάνει τα οπτικά δεδομένα από οθόνη [38], πραγματοποιείται από το ρομπότ-χειριστή:

- i. Εύρεση της νεκρής ζώνης (Dead Zone – DZ) του joystick.
- ii. Υπολογισμός του μετασχηματισμού μεταξύ της θέσης του ακροδέκτη του ρομπότ-χειριστή και της ταχύτητας του χειραγωγούμενου ρομπότ.
- iii. Τηλεχειρισμός και μετακίνηση του χειραγωγούμενου ρομπότ από μια αρχική-τυχαία θέση στην τελική-επιθυμητή θέση.

3

Μοντελοποίηση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε η πειραματική διάταξη. Αρχικά, θα γίνει αναφορά στο τροχοφόρο ρομπότ, το οποίο μετακινείται (slave-robot) μέσω του joystick. Έπειτα, θα παρουσιαστεί το ρομποτικό σύστημα πλατφόρμας-βραχίονα που τηλεχειρίζεται το 2^ο ρομπότ. Θα ακολουθήσει η περιγραφή του joystick, αλλά και των οπτικών μέσων (κάμερες), που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Τέλος, θα γίνει λόγος για την οθόνη και τον τρόπο αναγνώρισης της κίνησης του τηλεχειριζόμενου ρομπότ από το ρομπότ-χειριστή. Για κάθε επιμέρους σύστημα της πειραματικής διάταξης, θα παρουσιαστούν οι κινηματικές παράμετροι που το διέπουν, καθώς και η συσχέτιση του με τα άλλα συστήματα του πειράματος. Στο πλαίσιο της διπλωματικής ο συμβολισμός aT_b , χρησιμοποιείται για πίνακα ομογενή μετασχηματισμού, με διάσταση 4x4 (16 – στοιχεία), από το σύστημα συντεταγμένων b στο a (Σχέση 3.1).

$${}^aT_b = \begin{bmatrix} {}^aR_b & {}^ap_b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

με ${}^aR_b \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ τον πίνακα περιστροφής, ο οποίος δηλώνει την περιστροφή του b ως προς το a και ${}^ap_b \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ το διάνυσμα θέσης του b ως προς το a.

3.1 Τροχοφόρο Ρομπότ

Το τροχοφόρο ρομπότ που χρησιμοποιείται στο πείραμα πρόκειται για μια ολονομική πλατφόρμα youBot της κατασκευάστριας εταιρείας Kuka, που έχει τη δυνατότητα να κινηθεί χωρίς περιορισμούς στο επίπεδο. Αυτό σημαίνει ότι διαθέτει 3 – βαθμούς ελευθερίας (x,y,θ), δύο εκ των οποίων είναι μεταφορικές κινήσεις (x,y), και ο 3^{ος} εξ αυτών είναι η περιστροφή (θ) ως προς τον z-άξονα, που ορίζεται από το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x,y,z) που ευρίσκεται στο κέντρο και πάνω στο επίπεδο της πλατφόρμας (Εικόνα 3.1). Η πλατφόρμα είναι

ολονομική και μπορεί να κινηθεί ελεύθερα στο επίπεδο, καθώς διαθέτει 4 – swedish wheels, οι οποίοι δεν επιβάλλουν διαφορικό περιορισμό κίνησης στην πλατφόρμα (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.1 – Σύστημα συντεταγμένων τηλεχειριζόμενου ρομπότ

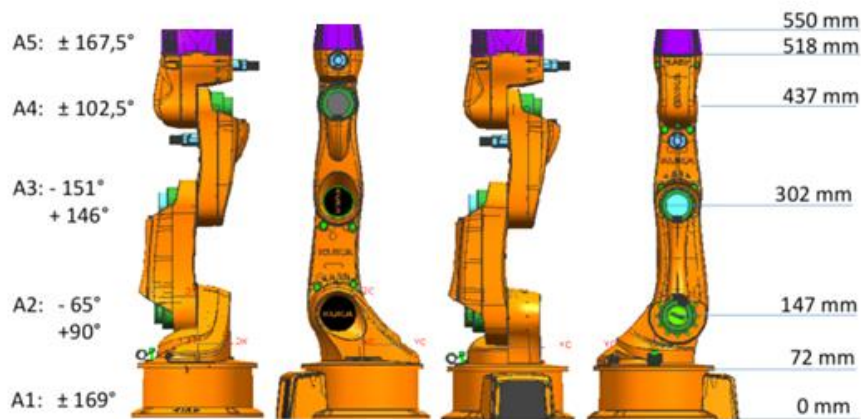


Εικόνα 3.2 – Τροχοί του kuka youBot / swedish wheels

Ο ελεγκτής που έχει υλοποιηθεί από την κατασκευάστρια εταιρεία δίνει την δυνατότητα να ελέγχεται η πλατφόρμα στέλνοντας εντολές ταχύτητας ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της $\{p_m\}$ (Εικόνα 3.1), αλλά και παράλληλα να εξάγεται η οδομετρία της ως προς το αντίστοιχο πλαίσιο με την βοήθεια των encoders που είναι τοποθετημένοι σε κάθε τροχό. Το διάνυσμα ταχυτήτων που εισάγεται στον ελεγκτή-ταχύτητας της πλατφόρμας είναι της μορφής $\mathbf{v} = [\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \boldsymbol{\omega}_z]^T$. Η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να κινηθεί είναι 0.8 m/s και μπορεί να μεταφέρει μέγιστο φορτίο 20kg.

3.2 Ρομποτικό Σύστημα Πλατφόρμας-Βραχίονα-Ακροδέκτη

Το ρομποτικό σύστημα πλατφόρμας-βραχίονα που χρησιμοποιείται στο πείραμα ως ρομπότ-χειριστής, πρόκειται για ένα youBot της κατασκευάστριας εταιρείας Kuka. Το ρομπότ αυτό διαθέτει την ίδια ακριβώς πλατφόρμα, όπως το χειραγωγούμενο ρομπότ, με τη διαφορά ότι έχει επιπλέον προσδεμένο στην πλατφόρμα έναν βραχίονα 5-βαθμών ελευθερίας της Kuka. Ο ρομποτικός βραχίονας (χωρίς τον ακροδέκτη), οι αρθρώσεις του και τα μήκη των συνδέσμων του φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3 – Βραχίονας του kuka youBot και μήκη συνδέσμων

Τα συστήματα συντεταγμένων του ρομποτικού βραχίονα και η κινηματική του θα παρουσιαστούν στην συνέχεια (Κεφάλαιο 4.1-4.2). Το ρομποτικό σύστημα πλατφόρμας-βραχίονα φαίνεται ακολούθως (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4 – Ρομποτικό σύστημα πλατφόρμας-βραχίονα

Στο εν λόγω ρομπότ μπορεί να εφαρμοστεί έλεγχος θέσης, ταχύτητας ή ροπής. Ωστόσο, κατά την πειραματική διαδικασία εφαρμόστηκε μόνο έλεγχος θέσης (βραχίονας στην αρχική θέση, πριν την προσέγγιση του joystick) και έλεγχος ταχύτητας (προσέγγιση του joystick, λαβή και τηλεχειρισμός 2^{ου} ρομπότ).

Τόσο στον βραχίονα, όσο και στην πλατφόρμα, υπάρχουν σε κάθε άρθρωση ξεχωριστά (και τροχό αντίστοιχα), κινητήρας και encoder. Ο κινητήρας είναι υπεύθυνος για την επιβολή ροπής στην κάθε άρθρωση, με σκοπό την κίνηση του ρομπότ. Ο encoder μπορεί σε κάθε στιγμή να μετρήσει την γωνία που έχει στραφεί κάθε άρθρωση και να ενημερώσει το χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, και με γνώση της κινηματικής που διέπει το ρομποτικό σύστημα (Κεφάλαιο 4.1-4.2), μπορεί να βγει συμπέρασμα για το που βρίσκεται κάθε στιγμή η πλατφόρμα, αλλά και ο ακροδέκτης του βραχίονα (στον 6-διάστατο χώρο).

Σε περίπτωση που γνωρίζουμε τις γωνίες των αρθρώσεων (μέσω της ανάδρασης από τους encoders), και αναζητούμε την θέση του ακροδέκτη επιλύουμε την ακόλουθη εξίσωση (Σχέση 3.2, Κεφάλαιο 4.1).

$${}^0T_{EE} = \begin{bmatrix} {}^0R_{EE} & {}^0p_{EE} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0T_1{}^1T_2{}^2T_3{}^3T_4{}^4T_5{}^5T_{EE} \quad (3.2)$$

Όταν γνωρίζουμε την θέση που θέλουμε να προσεγγίσει ο ακροδέκτης και αναζητούμε τις επιμέρους γωνίες των αρθρώσεων (αντίστροφη κινηματική βραχίονα), καταφεύγουμε στον αλγόριθμο που παρουσιάζεται αργότερα (Κεφάλαιο 4.2)

Όταν γνωρίζουμε την ταχύτητα που θέλουμε να επιβάλουμε στον ακροδέκτη, και αναζητούμε τις επιμέρους ταχύτητες αρθρώσεων-βραχίονα και πλατφόρμας (αντίστροφη διαφορική κινηματική ρομποτικού-συστήματος) χρησιμοποιούμε την παρακάτω σχέση (Σχέση 3.4, Κεφάλαιο 4.3).

$$V_{EE} = J_{a(q_a)} \dot{q}_a \quad (3.3)$$

$$\dot{q}_a = J_{a(q_a)}^+ V_{EE} \quad (3.4)$$

Ο ακροδέκτης πρόκειται για ένα υποεπενεργούμενο χέρι, που διαθέτει τρία ελαστικά δάχτυλα [9]. Το εν λόγω χέρι έχει φτιαχτεί από οικονομικά υλικά, είναι πολύ ελαφρύ (<200gr) και ως επί το πλείστον αποτελείται από πλαστικά 3D-printed κομμάτια. Το άνοιγμα/κλείσιμο των δαχτύλων πραγματοποιείται μέσω ενός σερβοκινητήρα Dynamixel AX-12A (με δυνατότητα ροπής 15.2 kg/cm). Κάθε δάχτυλο διαθέτει ανεξάρτητα μεταξύ τους νήματα, τα οποία συνδέονται με τον σερβοκινητήρα, μέσω ενός διαφορικού μηχανισμού μορφής δίσκου (Εικόνα 3.6). Με αυτόν τον μηχανισμό κάθε δάχτυλο μπορεί να ανοίγει/κλείνει ανεξάρτητα από το άλλο, ακόμη και αν κάποιο άλλο δάχτυλο βρει εμπόδιο κατά μήκος της τροχιάς του ή φτάσει στο όριο του πεδίου εργασίας του. Αυτή η ιδιαιτερότητα του ακροδέκτη, καθιστά ευκολότερη τη λαβή αντικειμένων, όταν υπάρχουν αβεβαιότητες, είτε στο σχήμα του αντικειμένου είτε

στον τρόπο λαβής, αλλά ταυτόχρονα καθιστά δυσκολότερη την ανάλυση δυνάμεων και σημείων επαφής κατά τη λαβή. Έτσι, στην διερεύνηση της βέλτιστης λαβής που θα ακολουθήσει (Κεφάλαιο 5), δεν θεωρήθηκαν σημεία επαφής (contact points) μεταξύ ακροδέκτη και joystick, αλλά θεωρήθηκε ως σημείο λαβής το κεντροειδές του τριγώνου των προσεγγιστικών σημείων επαφής. Η λαβή θεωρήθηκε πως δεν επηρεάζεται κατά την χειραγώγηση του joystick, και πως κατά την απουσία τριβής η λαβή διατηρείται (form closure) [39].



Εικόνα 3.5 – Υποεπενεργούμενο χέρι / Ακροδέκτης ρομποτικού-συστήματος



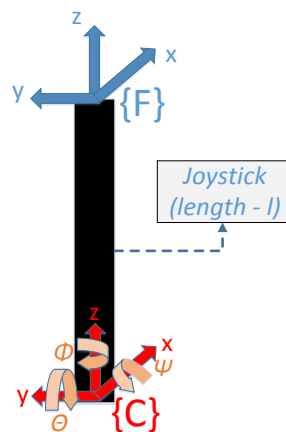
Εικόνα 3.6 – Διαφορικός μηχανισμός υποεπενεργούμενου χεριού

3.3 Joystick

Το joystick που χρησιμοποιήθηκε πρόκειται για το μοντέλο Microsoft Sidewinder Force Feedback 2 (Εικόνα 3.7). Όπως η πλειονότητα των joystick, μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια σφαιρική άρθρωση και ένας σύνδεσμος μήκους l . Επίσης, υπάρχει και η δυνατότητα περιστροφής του συνδέσμου γύρω από τον άξονα z (Εικόνα 3.8). Άρα το joystick διαθέτει τελικά 3-βαθμούς ελευθερίας (3-περιστροφές ως προς τους άξονες του $\{C\}$), καθένας από τους οποίους διαθέτει όρια που αφορούν την κίνηση του.



Εικόνα 3.7 – Joystick / Microsoft Sidewinder Force Feedback 2



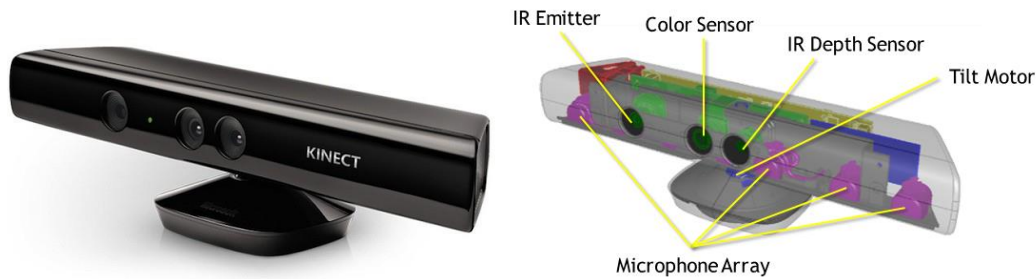
Εικόνα 3.8 – Joystick / Βαθμοί ελευθερίας

Οι 3-βαθμοί ελευθερίας (ψ, θ, ϕ) (περιστροφές (X,Y,Z)) του joystick έχουν όρια στο πεδίο εργασίας τους περίπου $\pm 25^\circ$ γύρω από το σημείο ισορροπίας του joystick. Υπογραμμίζεται πως στο joystick, από κατασκευής, δρουν δυνάμεις επαναφοράς, με σκοπό να το επαναφέρουν στην αρχική του θέση (θέση ισορροπίας), όταν άλλες δυνάμεις έχουν πάψει να επιβάλλονται σε αυτό.

3.4 Κάμερες

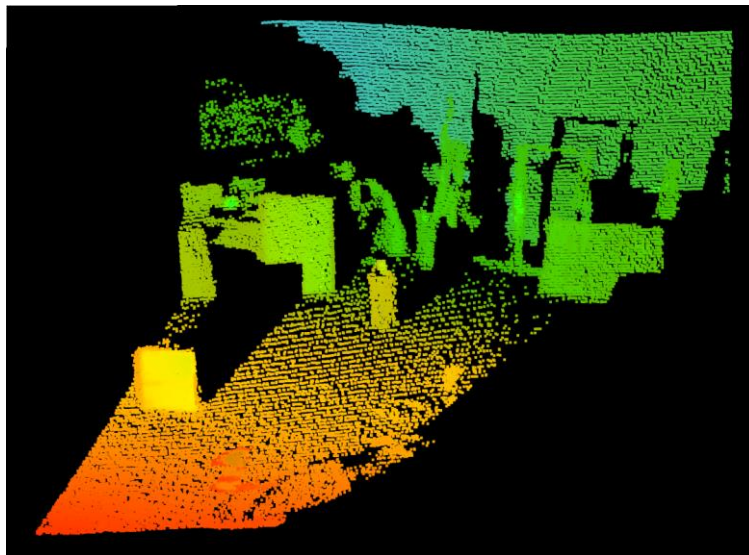
Κάθε κάμερα επιτελεί διαφορετικό ρόλο στο πείραμα. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τριών τύπων κάμερες. Στην 1^η φάση του πειράματος έγινε χρήση του αισθητήρα Kinect (Εικόνα 3.9). Πρόκειται για ένα στερεοσκοπικό σύστημα από κάμερες, που έχει τη δυνατότητα αντίληψης του βάθους της εικόνας. Αποτελείται από:

- μια κάμερα RGB με ανάλυση 1280x960,
- έναν πομπό IR (infrared) και έναν αισθητήρα βάθους IR, που μαζί αναγνωρίζουν το βάθος της εικόνας, χωρίς μάλιστα να επηρεάζονται από τις συνθήκες φωτισμού,
- 4-μικρόφωνα για την καταγραφή ήχου



Εικόνα 3.9 – Δομή αισθητήρα Kinect

Έχοντας λοιπόν την δυνατότητα να αντιλαμβανόμαστε το βάθος της εικόνας, χειριζόμαστε την εικόνα –μέσω της Kinect- ως ένα νέφος σημείων (Point Cloud). Κάθε σημείο έχει 3-διάστατη περιγραφή στον χώρο (x,y,z) (Εικόνα 3.10).



Εικόνα 3.10 – Παράδειγμα εικόνας νέφους σημείων (Point Cloud)

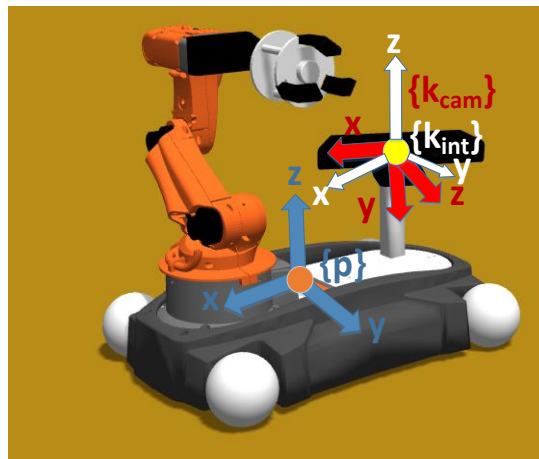
Ο αισθητήρας Kinect τοποθετείται πάνω στην πλατφόρμα του ρομπότ-χειριστή σε θέση τέτοια ώστε να μπορεί να παρακολουθεί το joystick, χωρίς να χάνεται από το οπτικό του πεδίο, από την αρχική θέση προσέγγισης ως την τελική θέση λαβής. Χρησιμοποιείται αλγόριθμος που αναγνωρίζει το joystick ως στόχο, και εν συνεχεία παρακολουθεί τη θέση του, παράγοντας ως αποτέλεσμα τη θέση του joystick στον 6-διάστατο χώρο $(x,y,z,roll,pitch,yaw)$.

Ωστόσο, το πλαίσιο συντεταγμένων του αισθητήρα Kinect διαφέρει από το πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης του ρομπότ-χειριστή. Στόχος της φάσης προσέγγισης είναι, με βάση τη θέση του joystick που προκύπτει από τον αλγόριθμο ανίχνευσης, να κινηθεί το ρομπότ-

χειριστής ούτως ώστε να πλησιάσει το joystick και να πραγματοποιήσει τη λαβή. Έτσι, πρέπει αρχικά να εκτελεστεί σχήμα ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης με βάση τη θέση του joystick (PBVS), για να παραχθούν οι επιθυμητές ταχύτητες, εκφρασμένες στο πλαίσιο της κάμερας (Σχέση 3.5). Έπειτα, πρέπει να μετασηματιστούν αυτές οι ταχύτητες στο πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης του ρομπότ-χειριστή, καθώς τελικά η εντολή κίνησης θα δοθεί στην πλατφόρμα του ρομπότ, με αποτέλεσμα να κινηθεί και η κάμερα, που είναι ενσωματωμένη στην πλατφόρμα του ρομπότ (Σχέση 3.6, Εικόνα 3.11). Το σύστημα συντεταγμένων $\{k_int\}$ είναι τέτοιο ώστε η αρχή του (origin) να συμπίπτει με την αρχή του $\{k_cam\}$ και οι διευθύνσεις των αξόνων του (x,y,z) να συμπίπτουν με αυτές του πλαισίου $\{p\}$.

$$V_{k_cam} = \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda R^T c^* t_c \\ -\lambda \theta u \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$V_p = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_p = \omega_{k_int} \times r + \frac{dr}{dt} + V_{k_int} = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & \omega_z \\ r_x & r_y & r_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{k_int} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -r_y \\ 0 & 1 & r_x \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{k_int} \quad (3.6)$$



Εικόνα 3.11 – Συστήματα συντεταγμένων Kinect & πλατφόρμας ρομπότ-χειριστή

Ο πίνακας μετασηματισμού μεταξύ των πλαισίων $\{k_cam\}$ και $\{k_int\}$, καθώς και η σχέση των ταχυτήτων μεταξύ των πλαισίων $\{k_cam\}$ και $\{k_int\}$, παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω (Σχέση 3.7). Μόνο 3-συνιστώσες της ταχύτητας στο πλαίσιο $\{k_int\}$ είναι εφικτές, άρα επιλέγουμε μόνο τα αντίστοιχα στοιχεία (v_x, v_y, ω_z).

$${}^{k_int}T_{k_cam} = T_z T_x = \begin{bmatrix} \cos(rot_z) & -\sin(rot_z) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(rot_z) & \cos(rot_z) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(rot_x) & -\sin(rot_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin(rot_x) & \cos(rot_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(rot_z) & -\sin(rot_z) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(rot_z) & \cos(rot_z) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(rot_x) & -\sin(rot_x) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin(rot_x) & \cos(rot_x) \end{bmatrix}$$

$$V_{k_int} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{k_int} = \left({}^{k_int}T_{k_cam} V_{k_cam} \right)_{rows:1,2,6} = \left({}^{k_int}T_{k_cam} [v_x \ v_y \ v_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]_{k_cam}^T \right)_{rows:1,2,6}$$

$$\text{with } rot_z = -27.5^\circ, \text{ } rot_x = -107.7^\circ, \text{ } r_x = -22\text{cm}, \text{ } r_y = -3\text{cm}, \text{ } r_z = 17\text{cm} \quad (3.7)$$

Αφού η πλατφόρμα φτάσει στην επιθυμητή θέση σε σχέση με το joystick, θα πρέπει να κινηθεί και ο βραχίονας με σκοπό να πραγματοποιηθεί η λαβή. Άρα, επιζητείται και ο μετασχηματισμός θέσης, μεταξύ των πλαισίων συντεταγμένων της Kinect και της βάσης του βραχίονα. Ο μετασχηματισμός αυτός παρουσιάζεται παρακάτω (Σχέση 3.8).

$${}^0p_{EE} = {}^0p_{js} = {}^0T_{k_cam} {}^{k_cam}p_{js}$$

$${}^0T_{k_cam} = T_d T'_z T'_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(rot_z) & -\sin(rot_z) & 0 & 0 \\ \sin(rot_z) & \cos(rot_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(rot_x) & -\sin(rot_x) & 0 \\ 0 & \sin(rot_x) & \cos(rot_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

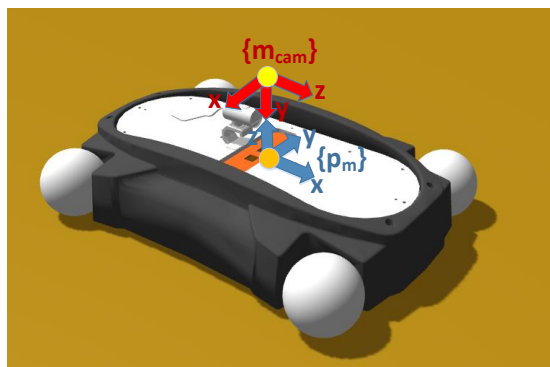
with $d_x = -38cm$, $d_y = -3cm$, $d_z = 17cm$ (3.8)

Όσον αφορά την κάμερα που χρησιμοποιήθηκε στο τηλεχειριζόμενο ρομπότ, πρόκειται για μια κάμερα τύπου Microsoft Lifecam Cinema 720p HD Webcam (Εικόνα 3.12). Και σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να μετασχηματιστούν οι ταχύτητες από το πλαίσιο της κάμερας στο πλαίσιο της βάσης του τηλεχειριζόμενου ρομπότ (Σχέση 3.9, Εικόνα 3.13). Αυτό είναι αναγκαίο καθώς στο ρομπότ-χειριστή είναι γνωστές μόνον οι ταχύτητες της κάμερας μέσω της οθόνης (Κεφάλαιο 3.5), κι έτσι αυτές οι ταχύτητες πρέπει να συσχετιστούν με τις ταχύτητες του τηλεχειριζόμενου ρομπότ, που είναι υπό ενδιαφέρον.

$$v_{p_m} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{p_m} = {}^{p_m}T_{m_cam} v_{m_cam} = {}^{p_m}T_{m_cam} \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \\ \omega_y \end{bmatrix}_{m_cam} \quad (3.9)$$



Εικόνα 3.12 - Microsoft Lifecam Cinema 720p HD Webcam



Εικόνα 3.13 – Συστήματα συντεταγμένων Microsoft Lifecam & βάσης τηλεχειριζόμενου ρομπότ

Αναλυτικά ο μετασχηματισμός μεταξύ των πλαισίων της κάμερας του τηλεχειριζόμενου ρομπότ και της βάσης του ρομπότ είναι ο ακόλουθος (Σχέση 3.10).

$${}^p m T_{m.cam} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Ο παραπάνω μετασχηματισμός σημαίνει τα εξής:

- η γραμμική ταχύτητα στον x-άξονα του ρομπότ ταυτίζεται με την γραμμική ταχύτητα στον z-άξονα της κάμερας,
- η γραμμική ταχύτητα στον y-άξονα του ρομπότ ταυτίζεται με το αντίθετο της γραμμικής ταχύτητας στον x-άξονα της κάμερας,
- η περιστροφική ταχύτητα γύρω από τον z-άξονα του ρομπότ ταυτίζεται με το αντίθετο της περιστροφικής ταχύτητας γύρω από τον y-άξονα της κάμερας.

Περαιτέρω, χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό της οθόνης Sony Eye Camera PS3 (Εικόνα 3.14). Σε αυτήν την περίπτωση, ο μετασχηματισμός υπό ενδιαφέρον, είναι μεταξύ του πλαισίου της κάμερας και του κέντρου της οθόνης (Κεφάλαιο 3.5).



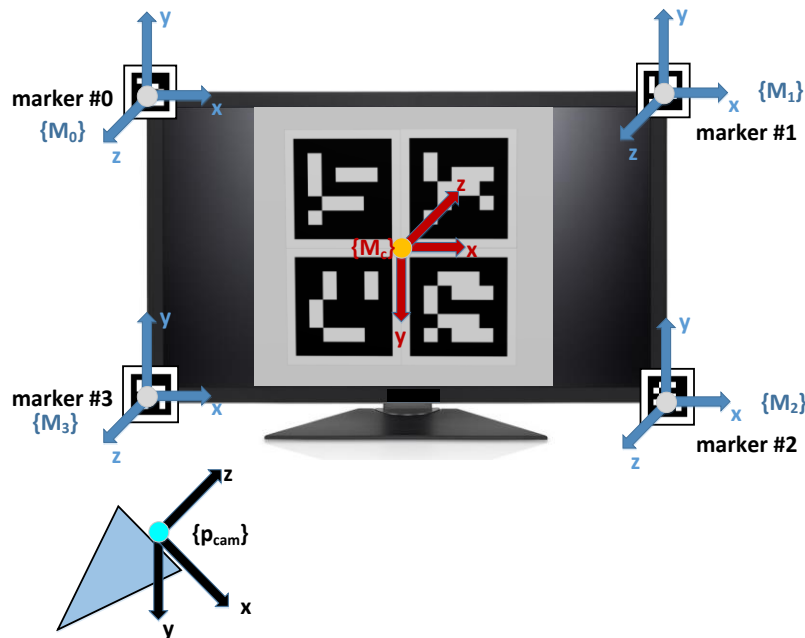
Εικόνα 3.14 - Sony Eye Camera PS3

Σημειώνεται ότι ακόμη δύο ίδιου τύπου κάμερες (Sony Eye Camera PS3) τοποθετούνται στο ταβάνι και χρησιμοποιούνται κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, για την απλή καταγραφή της κίνησης των δύο ρομπότ.

3.5 Οθόνη-Εντοπισμός

Το ρομπότ-χειριστής αντιλαμβάνεται τις κινήσεις του τηλεχειριζόμενου ρομπότ μέσω μιας οθόνης. Εντός της οθόνης φαίνεται η εικόνα από την κάμερα που βρίσκεται ενσωματωμένη στο τηλεχειριζόμενο ρομπότ. Άρα, το ρομπότ-χειριστής αντιλαμβάνεται τις κινήσεις της κάμερας, αλλά επειδή θεωρείται γνωστή η θέση που είναι τοποθετημένη η κάμερα στο ρομπότ, αντιλαμβάνεται τελικά τις κινήσεις του χειραγωγούμενου ρομπότ (Σχέση 3.9).

Αρχικά , πρέπει το ρομπότ-χειριστής να αντιληφθεί την ύπαρξη της οθόνης. Για αυτόν τον σκοπό τοποθετούνται στις 4 γωνίες της οθόνης μάρκες (Εικόνα 3.15). Έτσι, με βάση τις 4 αυτές μάρκες και θεωρώντας ότι η οθόνη είναι επίπεδη, μπορούμε να αναγνωρίσουμε το επίπεδο της οθόνης.



Εικόνα 3.15 – Οθόνη και εικόνα-στόχος τηλεχειριζόμενου ρομπότ

Ο μετασχηματισμός, μεταξύ του πλαισίου της κάμερας και του κέντρου της οθόνης, χρειάζεται ούτως ώστε στη συνέχεια να ακολουθήσει ο αλγόριθμος που, με δεδομένο τη μετακίνηση του στόχου (Εικόνα 3.16) του τηλεχειριζόμενου ρομπότ, παράγει τις ταχύτητες (ποιοτικά) του τηλεχειριζόμενου ρομπότ [38]. Ο εν λόγω μετασχηματισμός υπολογίζεται με τον εξής τρόπο:

1. Υπολογίζεται το κέντρο, με βάση τις συντεταγμένες των εξωτερικών μαρκών, που ορίζουν την οθόνη (Σχέση 3.11).

$${}^{p_cam}P_{M_c} = \begin{bmatrix} {}^{p_cam}X_{M_c} \\ {}^{p_cam}Y_{M_c} \\ {}^{p_cam}Z_{M_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=0}^3 ({}^{p_cam}X_{M_i})}{4} \\ \frac{\sum_{i=0}^3 ({}^{p_cam}Y_{M_i})}{4} \\ \frac{\sum_{i=0}^3 ({}^{p_cam}Z_{M_i})}{4} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

2. Υπολογίζονται τα κανονικοποιημένα διανύσματα $\mathbf{v}_{screen1}$ και $\mathbf{v}_{screen2}$, τα οποία είναι παράλληλα στο επίπεδο της οθόνης (Σχέση 3.12).

$$\mathbf{v}_{screen1} = \begin{bmatrix} {}^{p_cam}X_{M_3} - {}^{p_cam}X_{M_2} \\ {}^{p_cam}Y_{M_3} - {}^{p_cam}Y_{M_2} \\ {}^{p_cam}Z_{M_3} - {}^{p_cam}Z_{M_2} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{v}_{screen2} = \begin{bmatrix} {}^{p_cam}X_{M_1} - {}^{p_cam}X_{M_2} \\ {}^{p_cam}Y_{M_1} - {}^{p_cam}Y_{M_2} \\ {}^{p_cam}Z_{M_1} - {}^{p_cam}Z_{M_2} \end{bmatrix}^T \quad (3.12)$$

3. Υπολογίζεται το κάθετο στο επίπεδο της οθόνης διάνυσμα \mathbf{n}_{screen} (Σχέση 3.13).

$$n_{screen} = \frac{v_{screen1} \times v_{screen2}}{\|v_{screen1} \times v_{screen2}\|} \quad (3.13)$$

4. Υπολογίζεται το εξωτερικό γινόμενο (\mathbf{c}_p) μεταξύ του z-άξονα της κάμερας και του \mathbf{n}_{screen} (Σχέση 3.14).

$$\mathbf{c}_p = \begin{bmatrix} c_p[0] \\ c_p[1] \\ c_p[2] \end{bmatrix}^T = z_{p_cam} \times n_{screen} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \times n_{screen} \quad (3.14)$$

5. Υπολογίζεται ο skew-symmetric πίνακας (\mathbf{S}) του \mathbf{c}_p (Σχέση 3.15).

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & -c_p[2] & c_p[1] \\ c_p[2] & 0 & -c_p[0] \\ -c_p[1] & c_p[0] & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

6. Υπολογίζεται ο πίνακας περιστροφής ${}^{p_cam}\mathbf{R}_{screen}$ (Σχέση 3.16).

$${}^{p_cam}\mathbf{R}_{screen_int} = \mathbf{I}_{3 \times 3} + \mathbf{S} + \mathbf{S}^2 \frac{1 - z_{p_cam} \cdot n_{screen}}{\|\mathbf{c}_p\|^2} \quad (3.16)$$

7. Υπολογίζεται ο ομογενής μετασχηματισμός από την κάμερα στο κέντρο της οθόνης ${}^{p_cam}\mathbf{T}_{screen_int}$ (Σχέση 3.17).

$${}^{p_cam}\mathbf{T}_{screen_int} = \begin{bmatrix} {}^{p_cam}\mathbf{R}_{screen_int} & {}^{p_cam}\mathbf{P}_{M_c} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

8. Το μετασχηματισμένο πλαίσιο συντεταγμένων με το πραγματικό πλαίσιο του κέντρο της οθόνης διαθέτουν τον ίδιο z-άξονα (ταυτίζεται με το κάθετο στο επίπεδο της οθόνης διάνυσμα). Ωστόσο, οι x,y-άξονες δεν ταυτίζονται. Υπολογίζεται η περιστροφή γύρω από τον z-άξονα, ώστε να ταυτίζονται (Σχέση 3.18).

$${}^{screen_int}\mathbf{R}_{screen} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cor}) & -\sin(\theta_{cor}) & 0 \\ \sin(\theta_{cor}) & \cos(\theta_{cor}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{with } \theta_{cor} = \frac{P_{int_1}[1] - P_{int_0}[1]}{P_{int_1}[0] - P_{int_0}[0]}, \quad P_{int_i} = {}^{p_cam}\mathbf{R}_{screen_int}^T {}^{p_cam}\mathbf{P}_{M_i} \quad (3.18)$$

9. Υπολογίζεται ο συνολικός ομογενής μετασχηματισμός από την κάμερα στο κέντρο της οθόνης ${}^{p_cam}\mathbf{T}_{screen}$ (Σχέση 3.19).

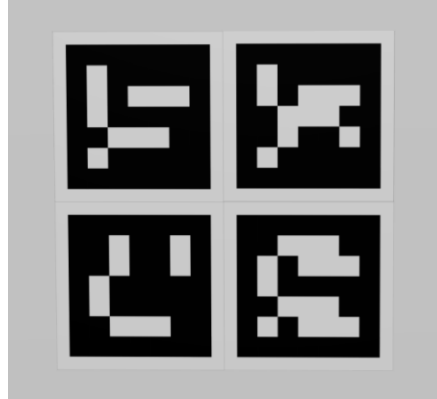
$${}^{p_cam}\mathbf{T}_{screen} = {}^{p_cam}\mathbf{T}_{screen_int} \begin{bmatrix} {}^{screen_int}\mathbf{R}_{screen} & [0 \ 0 \ 0]^T \\ [0 \ 0 \ 0] & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

10. Υπολογίζεται ο συνολικός ομογενής μετασχηματισμός από το κέντρο της οθόνης στην κάμερα ${}^{screen}\mathbf{T}_{p_cam}$ (Σχέση 3.20).

$${}^{screen}\mathbf{T}_{p_cam} = {}^{p_cam}\mathbf{T}_{screen}^{-1} \quad (3.20)$$

11. Υπολογίζεται το ύψος και το πλάτος της οθόνης, καθώς χρησιμοποιείται κατά τον αλγόριθμο εντοπισμού (Σχέση 3.21).

$$\begin{cases} Width = \frac{|p\text{-cam} X_{M_0} - p\text{-cam} X_{M_1}| + |p\text{-cam} X_{M_2} - p\text{-cam} X_{M_3}|}{2} \\ Height = \frac{|p\text{-cam} Y_{M_0} - p\text{-cam} Y_{M_3}| + |p\text{-cam} Y_{M_1} - p\text{-cam} Y_{M_2}|}{2} \end{cases} \quad (3.21)$$



Εικόνα 3.16 – Στόχος τηλεχειριζόμενου ρομπότ

Έπειτα από τον προσδιορισμό των παραπάνω παραμέτρων, ακολουθεί μια διαδικασία η οποία εκτελείται επαναληπτικά και με βάση την κίνηση των μαρκών-στόχου σε σχέση με τις εξωτερικές μάρκες της θόνης, δίνει ως αποτέλεσμα την ταχύτητα του τηλεχειριζόμενου ρομπότ. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται αναλυτικά στο [38]. Σημειώνεται, πως οι παράμετροι του τηλεχειριζόμενου ρομπότ -εκτός των βαθμών ελευθερίας του- και της κάμερας του, θεωρούνται άγνωστοι. Έτσι, είναι αδύνατον να γνωρίζουμε το βάθος της εικόνας-στόχου που παρατηρεί το χειραγωγούμενο ρομπότ. Έτσι, στην προαναφερθείσα διαδικασία χρησιμοποιείται ένα σταθερό βάθος (το βάθος του στόχου στην επιθυμητή θέση του χειραγωγούμενου ρομπότ).

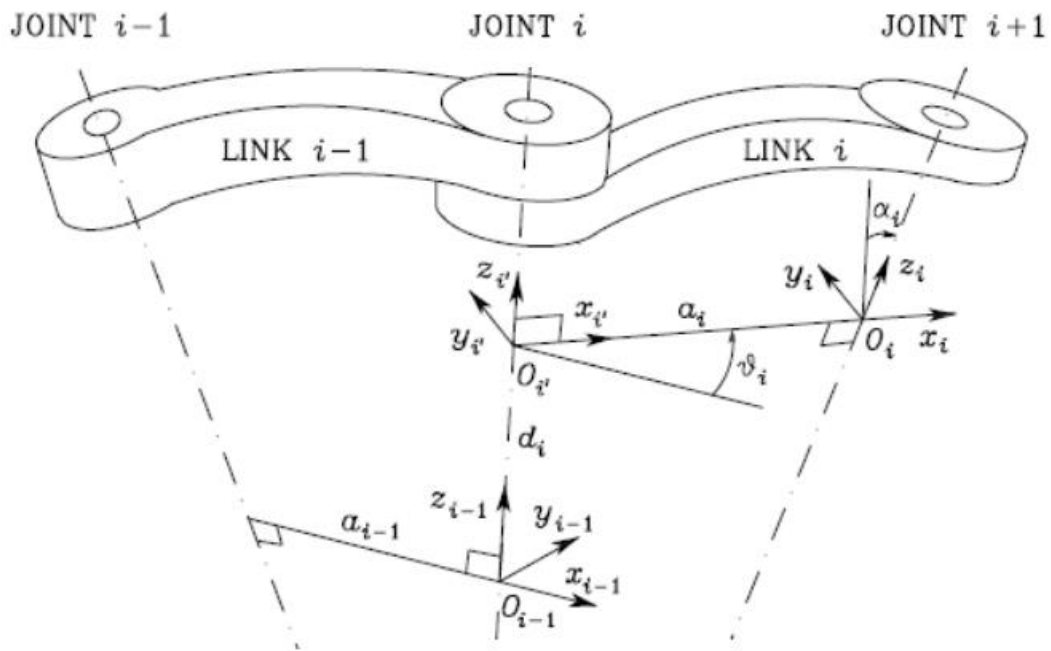
4

Κινηματική Ανάλυση

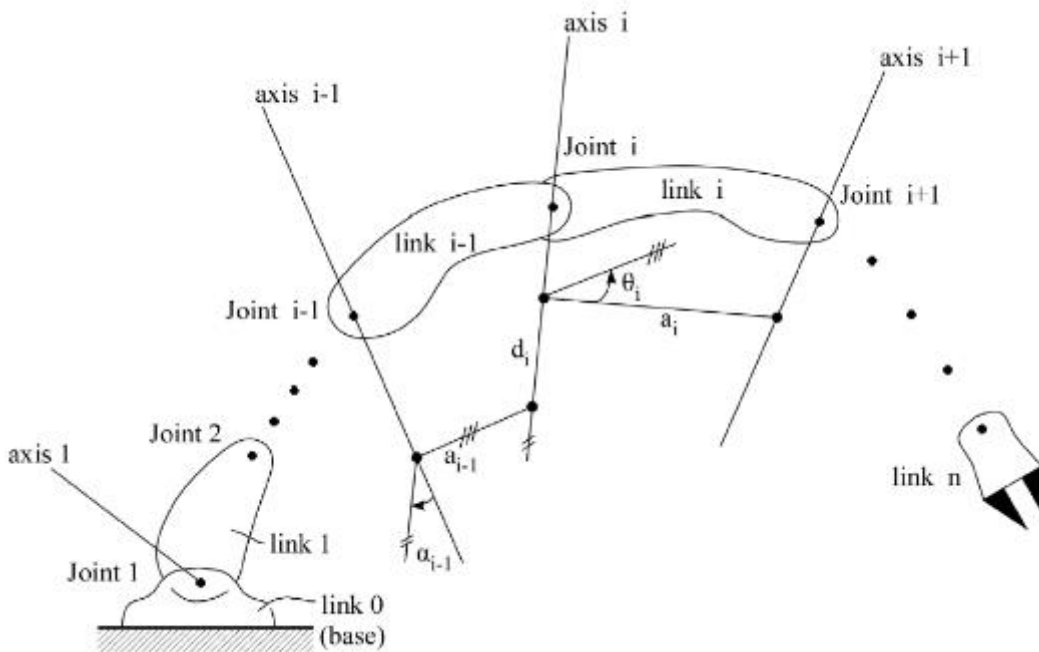
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται, αρχικά, η ευθεία κινηματική καθώς και η αντίστροφη κινηματική του ρομποτικού-βραχίονα. Η ευθεία και η αντίστροφη κινηματική, οι οποίες υπολογίζονται αναλυτικά, είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της βέλτιστης λαβής, αλλά και για την πειραματική διαδικασία στην φάση της λαβής του joystick. Ακολούθως υπολογίζεται αναλυτικά η διαφορική κινηματική του ρομποτικού-συστήματος, η οποία χρησιμοποιείται στην πειραματική διαδικασία κατά τη φάση του τηλεχειρισμού του χειραγωγούμενου ρομπότ. Τέλος υπολογίζεται η ευθεία κινηματική του joystick, η οποία χρησιμοποιείται στη συνέχεια, τόσο στη διερεύνηση της βέλτιστης λαβής, όσο και στην πειραματική διαδικασία του τηλεχειρισμού.

4.1 Ευθεία Κινηματική Βραχίονα

Η ευθεία κινηματική υπολογίστηκε αναλυτικά για τον ρομποτικό βραχίονα. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Denavit-Hartenberg [40]. Με τη μέθοδο αυτή βρίσκουμε τον ομογενή μετασχηματισμό μεταξύ διαδοχικών συστημάτων συντεταγμένων (Εικόνα 4.1,4.2). Η εξίσωση του ομογενή μετασχηματισμού που συνδέει το σύστημα συντεταγμένων i με το $i-1$ φαίνεται στη Σχέση 4.1 .



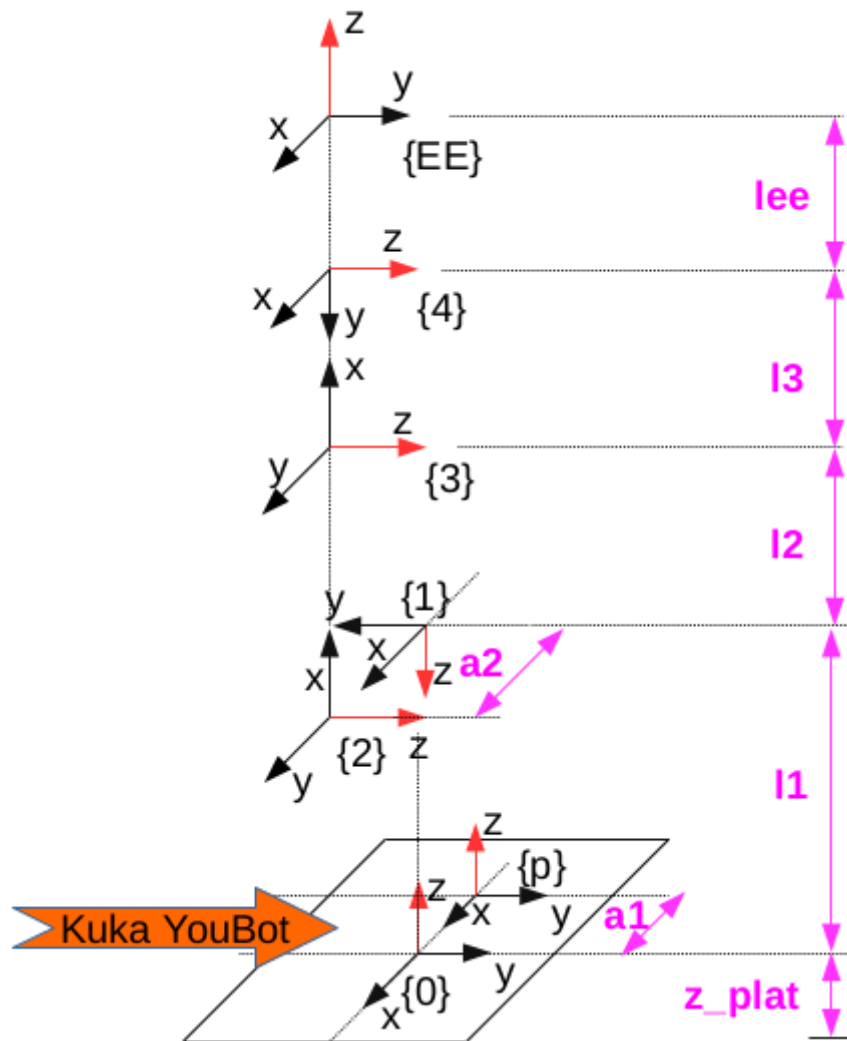
Εικόνα 4.1 - Παράμετροι Denavit-Hartenberg (a)



Εικόνα 4.2 - Παράμετροι Denavit-Hartenberg (b)

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(q_i) & -\sin(q_i) & 0 & a_{i-1} \\ \sin(q_i)\cos(\alpha_{i-1}) & \cos(q_i)\cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & -d_i\sin(\alpha_{i-1}) \\ \sin(q_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(q_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & d_i\cos(\alpha_{i-1}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη μέθοδο παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.3 . Οι τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 .



Εικόνα 4.3 – Κινηματικοί παράμετροι βραχίονα

i - Frame	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	q_i
{1}	-	π	l_1	q_1
{2}	a_2	$\pi/2$	-	$q_2 - \pi/2$
{3}	l_2	-	-	q_3
{4}	l_3	-	-	$q_4 + \pi/2$
{5}	-	$-\pi/2$	$-l_{ee}$	q_5
{EE}	-	π	-	-

Πίνακας 4.1 - Παράμετροι Denavit-Hartenberg

Οι ομογενείς μετασχηματισμοί που προκύπτουν από τη διαδικασία φαίνονται ακολούθως (Σχέση 4.2 – 4.7).

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & 0 \\ -\sin(q_1) & -\cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \sin(q_2) & \cos(q_2) & 0 & \alpha_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -\cos(q_2) & \sin(q_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & -\sin(q_3) & 0 & l_2 \\ \sin(q_3) & \cos(q_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} -\sin(q_4) & -\cos(q_4) & 0 & l_3 \\ \cos(q_4) & -\sin(q_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos(q_5) & -\sin(q_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_{EE} \\ -\sin(q_5) & -\cos(q_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$${}^5T_{EE} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

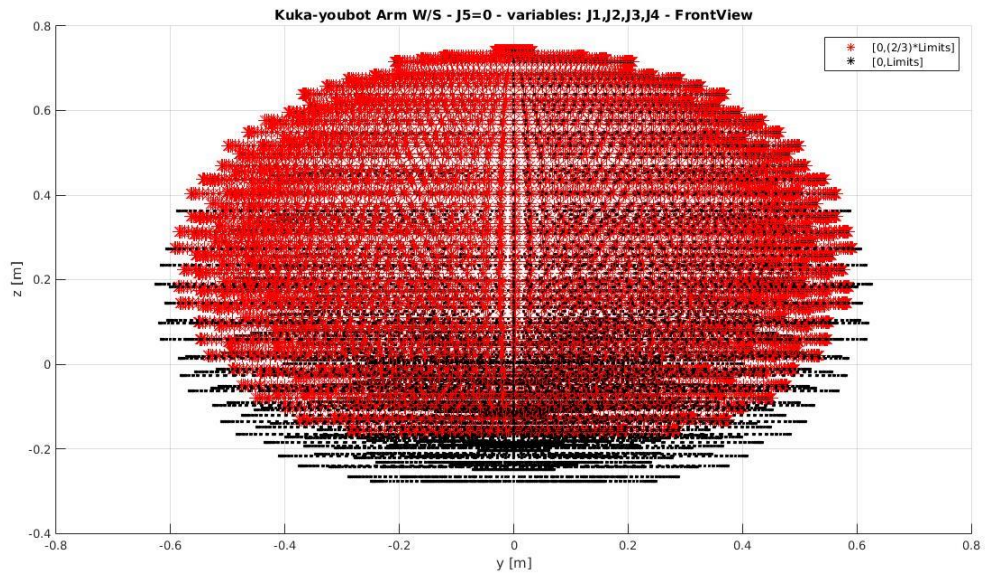
Συνθέτοντας τους επιμέρους ομογενείς μετασχηματισμούς (Σχέση 4.8), καταλήγουμε στον συνολικό μετασχηματισμό (Σχέση 4.9), που συνδέει το σύστημα συντεταγμένων στη βάση του βραχίονα με το σύστημα συντεταγμένων του ακροδέκτη (Εικόνα 4.3).

$${}^0T_{EE} = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_{EE} \quad (4.8)$$

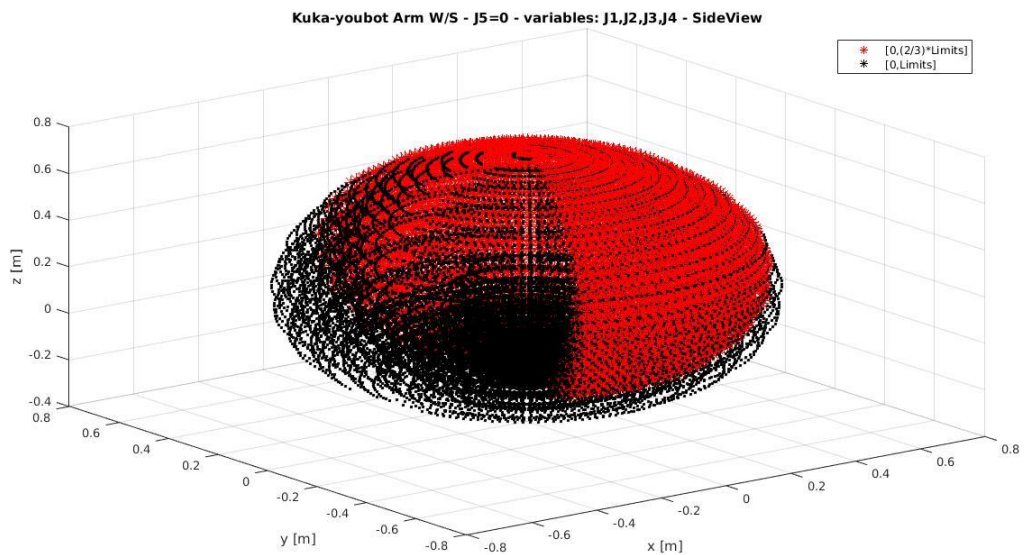
$${}^0T_{EE} = \begin{bmatrix} -s_1 s_5 + c_5 c_1 c_{234} & c_5 s_1 + s_5 c_1 c_{234} & c_1 s_{234} & c_1 (l_3 s_{23} + l_{EE} s_{234} + \alpha_2 + l_2 s_2) \\ -c_1 s_5 - c_5 s_1 c_{234} & c_1 c_5 - s_5 s_1 c_{234} & -s_1 s_{234} & s_1 (-l_3 s_{23} - l_{EE} s_{234} - \alpha_2 - l_2 s_2) \\ -c_5 s_{234} & -s_5 s_{234} & c_{234} & l_3 c_{23} + l_1 + l_2 c_2 + l_{EE} c_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν οι ακόλουθες εικόνες (Εικόνα 4.4-4.6), που αντικατοπτρίζουν τις θέσεις που δύναται να προσεγγίσει ο ακροδέκτης του βραχίονα

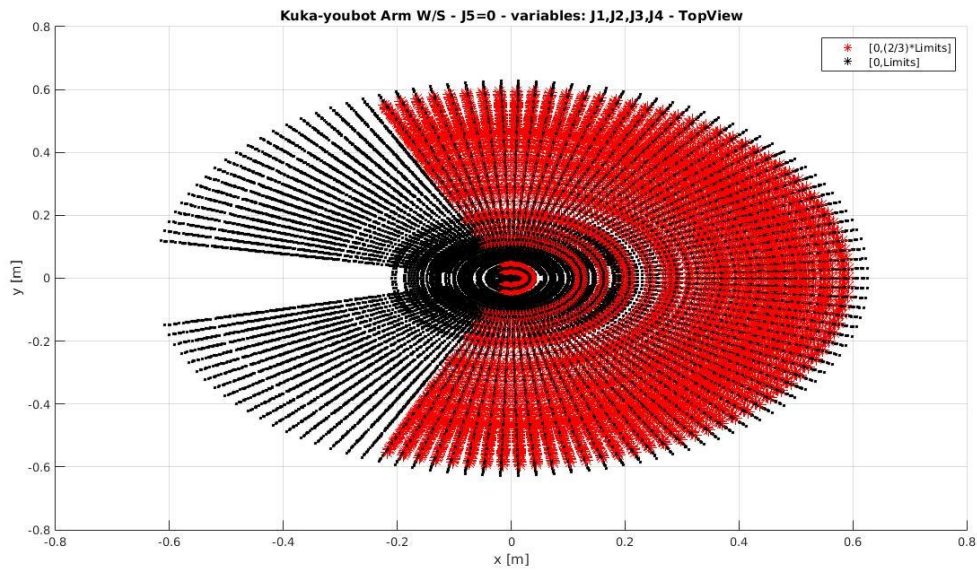
(Workspace). Με μαύρο χρώμα φαίνονται οι θέσεις που μπορεί να φτάσει ο βραχίονας φτάνοντας τις αρθρώσεις του μέχρι και τα όρια τους, ενώ με κόκκινο χρώμα, φτάνοντας τις αρθρώσεις του μέχρι τα 2/3 των ορίων τους.



Εικόνα 4.4 – Workspace Kuka – youBot πρόσοψη / 5^η άρθρωση ανενεργή



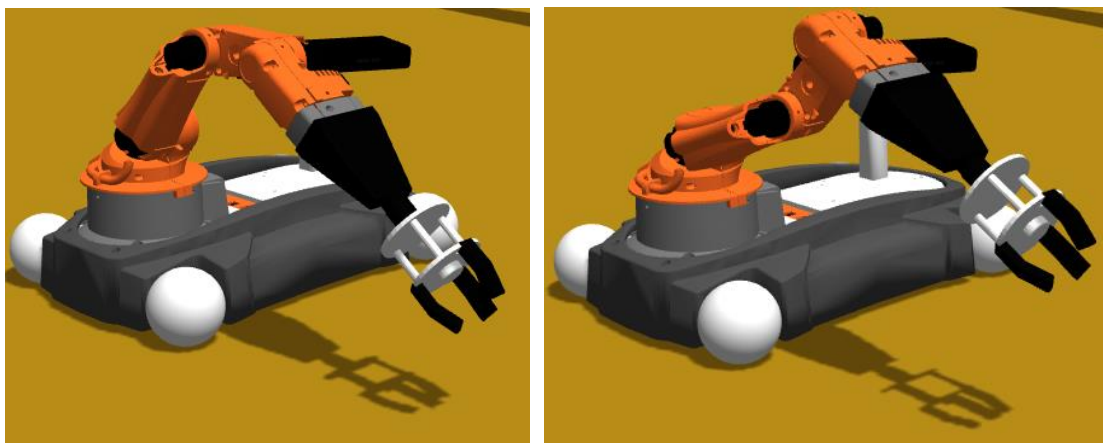
Εικόνα 4.5 – Workspace Kuka – youBot πλάγια όψη / 5^η άρθρωση ανενεργή



Εικόνα 4.6 – Workspace Kuka – youBot κάτοψη / 5^η άρθρωση ανενεργή

4.2 Αντίστροφη Κινηματική Βραχίονα

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται στη [41]. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν διαφέρουν, καθώς χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων και έγινε η παραδοχή πως ο ρομποτικός-βραχίονας βρίσκεται πάντοτε σε θέση elbow-up (Εικόνα 4.7). Η προαναφερθείσα παραδοχή τηρήθηκε, τόσο στην θεωρητική ανάλυση, όσο και στην πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 4.7 – Elbow-up σχηματισμός (αριστερά) & elbow-down σχηματισμός (δεξιά)

Για να επιλυθεί η αντίστροφη κινηματική πρέπει να λυθεί το παρακάτω σύστημα εξισώσεων (Σχέση 4.10)

$$({}^0T_1^{-1})^0T_{EE} = {}^1T_2{}^2T_3{}^3T_4{}^4T_5{}^5T_{EE} \quad (4.10.a)$$

$${}^0T_1^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & 0 \\ -\sin(q_1) & -\cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10.b)$$

$$({}^0T_1^{-1})^0T_{EE} = \begin{bmatrix} c_{234}c_5 & c_{234}s_5 & s_{234} & \alpha_2 + l_3s_{23} + l_2s_2 + l_{EE}s_{234} \\ s_5 & -c_5 & 0 & 0 \\ s_{234}c_5 & s_{234}s_5 & c_{234} & -l_3c_{23} - l_2c_2 - l_{EE}c_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10.c)$$

Τελικά, έπειτα από πράξεις πινάκων προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση πινάκων (Σχέση 4.11). Τα στοιχεία του μετασχηματισμού ${}^0T_{EE}$ (Σχέση 4.12) είναι γνωστά, κι επιβάλλονται ανάλογα με την επιθυμητή θέση και προσανατολισμό του ακροδέκτη. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία $\{p_x, p_y, p_z\}$ αντιπροσωπεύουν τη θέση, και τα στοιχεία $\{n_x, n_y, n_z, \{o_x, o_y, o_z\}, \{a_x, a_y, a_z\}\}$ αντιπροσωπεύουν τον προσανατολισμό του ακροδέκτη.

$$\begin{bmatrix} c_1r_{11} - s_1r_{21} & c_1r_{12} - s_1r_{22} & c_1r_{13} - s_1r_{23} & c_1p_x - s_1p_y \\ -s_1r_{11} - c_1r_{21} & -s_1r_{12} - c_1r_{22} & -s_1r_{13} - c_1r_{23} & -s_1p_x - c_1p_y \\ -r_{31} & -r_{32} & -r_{33} & -p_z + l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{234}c_5 & c_{234}s_5 & s_{234} & \alpha_2 + l_3s_{23} + l_2s_2 + l_{EE}s_{234} \\ s_5 & -c_5 & 0 & 0 \\ s_{234}c_5 & s_{234}s_5 & c_{234} & -l_3c_{23} - l_2c_2 - l_{EE}c_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$${}^0T_{EE} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Για την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία κατά βήματα:

1. Εξισώνοντας τα στοιχεία (2,4) από τη Σχέση 4.11, προκύπτει το ζεύγος Σχέσεων 4.13, για την 1^η άρθρωση. Ο ρομποτικός-βραχίονας έχει επιλεγθεί να κινείται πάντα σε περιοχή όπου $p_y > 0$, λόγω του τρόπου που έχουμε επιλέξει να γίνει η λαβή του joystick (Εικόνα 4.7). Επιλέγεται η 2^η σχέση που δίνει λύση στο 3^ο και 4^ο τεταρτημόριο.

$$q_1 = \text{atan2}(p_y, -p_x) \ \& \ q_1 = \text{atan2}(-p_y, p_x) \quad (4.13)$$

2. Έπειτα, εξισώνουμε τα στοιχεία (2,1) των πινάκων, και ακολούθως τα στοιχεία (2,2), και προκύπτουν οι ακόλουθες Σχέσεις (4.14,4.15). Στη συνέχεια, ελέγχουμε τους παρακάτω περιορισμούς (Σχέση 4.16) και αν δεν ευσταθούν, ο αλγόριθμος διακόπτεται, με το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει αντίστροφη κινηματική.

$$s_5 = -s_1r_{11} - c_1r_{21} \quad (4.14)$$

$$c_5 = -s_1r_{12} - c_1r_{22} \quad (4.15)$$

$$|s_1 r_{11} + c_1 r_{21}| \geq 1 \ \& \ |s_1 r_{12} + c_1 r_{22}| \geq 1 \quad (4.16)$$

3. Από τις προηγούμενες εξισώσεις (4.14,4.15), προκύπτει ως μοναδική λύση η ακόλουθη (Σχέση 4.17). Έτσι, βρίσκεται η τιμή της γωνίας για την 5^η άρθρωση.

$$q_5 = \text{atan2}(-s_1 r_{11} - c_1 r_{21}, -s_1 r_{12} - c_1 r_{22}) \quad (4.17)$$

4. Στη συνέχεια εξισώνουμε τα στοιχεία (1,3) και (3,3) αντίστοιχα και προκύπτουν οι παρακάτω Σχέσεις (4.18,4.19). Έπειτα, ελέγχουμε αν ευσταθούν οι περιορισμοί (Σχέση 4.20,4.21), αλλιώς ο αλγόριθμος διακόπτεται.

$$s_{234} = c_1 r_{13} - s_1 r_{23} \quad (4.18)$$

$$c_{234} = -r_{33} \quad (4.19)$$

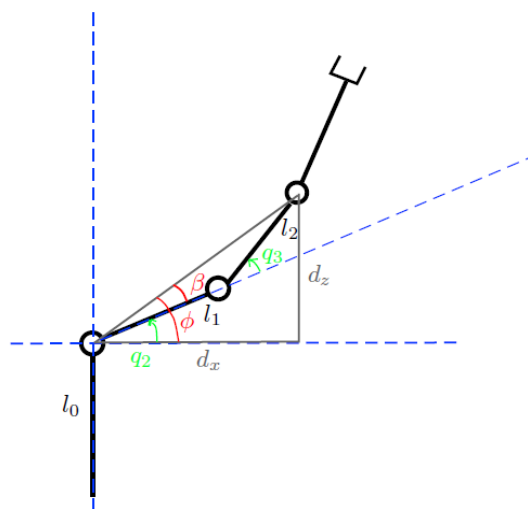
$$|s_1 r_{23} - c_1 r_{13}| \geq 1 \quad (4.20)$$

$$|r_{33}| \geq 1 \quad (4.21)$$

5. Με τον συνδυασμό των προηγούμενων Σχέσεων (4.18,4.19) προκύπτει το άθροισμα των γωνιών της 2^{ης}, 3^{ης} και 4^{ης} άρθρωσης (Σχέση 4.22).

$$q_2 + q_3 + q_4 = \text{atan2}(-s_1 r_{23} + c_1 r_{13}, -r_{33}) \quad (4.22)$$

6. Με απλές γεωμετρικές σχέσεις για τις αρθρώσεις 2,3 και 4 (Εικόνα 4.8), οι οποίες βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, προκύπτουν οι παρακάτω Σχέσεις (4.23,4.24). Για τη συνέχεια του αλγορίθμου απαιτείται να ικανοποιείται ο ακόλουθος περιορισμός (Σχέση 4.25).



Εικόνα 4.8 – Σχηματισμός 2ης, 3ης & 4ης άρθρωσης βραχίονα

$$d_x = \frac{p_x}{\cos(q_1)} - \alpha_2 - l_{EEs234} \quad (4.23)$$

$$d_z = p_z - l_1 - l_{EEc234} \quad (4.24)$$

$$|-(l_2)^2 - (l_3)^2 + (d_x)^2 + (d_z)^2| > 2l_2l_3 \quad (4.25)$$

7. Επιλύουμε έπειτα την ακόλουθη εξίσωση (Σχέση 4.26), θεωρώντας ότι ο βραχίονας βρίσκεται σε θέση *elbow-up*, και βρίσκουμε την τιμή της γωνίας της 3^{ης} άρθρωσης.

$$q_3 = \arccos\left(\frac{(d_x)^2 + (d_z)^2 - (l_2)^2 - (l_3)^2}{2l_2l_3}\right) \quad (4.26)$$

8. Βρίσκουμε τις ενδιάμεσες γωνίες (Εικόνα 4.8), από τις ακόλουθες Σχέσεις (4.27,4.28).

$$\phi = \operatorname{atan2}(d_x, d_z) \quad (4.27)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{(d_x)^2 + (d_z)^2 + (l_2)^2 - (l_3)^2}{2l_2\sqrt{(d_x)^2 + (d_z)^2}}\right) \quad (4.28)$$

9. Βρίσκουμε την τιμή της γωνίας της 2^{ης} άρθρωσης (Σχέση 4.29).

$$q_2 = \phi - \beta \quad (4.29)$$

10. Βρίσκουμε την τιμή της γωνίας της 4^{ης} άρθρωσης από τις Σχέσεις 4.22,4.26,4.29 (Σχέση 4.30).

$$q_4 = (q_2 + q_3 + q_4) - q_2 - q_3 \quad (4.30)$$

Σημειώνεται πως αν σε οποιοδήποτε σημείο του αλγορίθμου προκύψει γωνία άρθρωσης του βραχίονα, εκτός των επιτρεπτών ορίων, τότε ο αλγόριθμος σταματάει, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η εύρεση αντίστροφης κινηματικής.

4.3 Διαφορική Κινηματική Ρομποτικού Συστήματος

Η Ιακωβιανή υπολογίστηκε με τη γενική μέθοδο, για το συνολικό ρομποτικό σύστημα πλατφόρμα-βραχίονας. Το ρομποτικό σύστημα αποτελείται από 5-περιστροφικές αρθρώσεις του βραχίονα, 1-περιστροφική άρθρωση της πλατφόρμας, καθώς και 2-πρισματικές αρθρώσεις της πλατφόρμας (Υπενθυμίζεται ότι η πλατφόρμα κινείται με τη βοήθεια omnidirectional τροχών, αλλά η κίνηση αυτή μοντελοποιείται με τη βοήθεια 3^{ων} αρθρώσεων, τοποθετημένων στο κέντρο της πλατφόρμας). Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της Ιακωβιανής φαίνονται παρακάτω (Σχέση 4.31-4.36).

$$J_{i\text{-column/revolute}} = \begin{bmatrix} ({}^0\hat{z}_i)^x & 0 & p_E^i \\ 0 & \hat{z}_i & 0 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$J_{i\text{-column/prismatic}} = \begin{bmatrix} {}^0\hat{z}_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$(k)^x = \begin{bmatrix} 0 & -k_z & k_y \\ k_z & 0 & -k_x \\ -k_y & k_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

$${}^0\hat{z}_i = {}^0R_i \ i\hat{z}_i = {}^0R_i \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$${}^0p_E^i = {}^0p_E - {}^0p_i \quad (4.35)$$

$$J = \begin{bmatrix} {}^0\hat{z}_{0p} & {}^0\hat{z}_{1p} & ({}^0\hat{z}_{2p})^x & {}^0p_E^{2p} & ({}^0\hat{z}_1)^x & {}^0p_E^1 & ({}^0\hat{z}_2)^x & {}^0p_E^2 & ({}^0\hat{z}_3)^x & {}^0p_E^3 & ({}^0\hat{z}_4)^x & {}^0p_E^4 & ({}^0\hat{z}_5)^x & {}^0p_E^5 \\ 0 & 0 & {}^0\hat{z}_{2p} & & {}^0\hat{z}_1 & & {}^0\hat{z}_2 & & {}^0\hat{z}_3 & & {}^0\hat{z}_4 & & {}^0\hat{z}_5 & \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Τελικά, η Ιακωβιανή όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς ήταν:

$$J_{\text{columns}(1:4)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s_{q_1-\theta}(\alpha_2 + l_3s_{23} + l_2s_2 + l_{EE}s_{234}) - \alpha_1s_\theta & -s_{q_1-\theta}(\alpha_2 + l_3s_{23} + l_2s_2 + l_{EE}s_{234}) \\ 0 & 1 & c_{q_1-\theta}(\alpha_2 + l_3s_{23} + l_2s_2 + l_{EE}s_{234}) + \alpha_1c_\theta & -c_{q_1-\theta}(\alpha_2 + l_3s_{23} + l_2s_2 + l_{EE}s_{234}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$J_{\text{columns}(5:8)} = \begin{bmatrix} c_{q_1-\theta}(l_3c_{23} + l_2c_2 + l_{EE}c_{234}) & c_{q_1-\theta}(l_3c_{23} + l_{EE}c_{234}) & c_{q_1-\theta}(l_3c_{23} - l_3(c_2c_3 - s_2s_3) + l_{EE}c_{234}) & 0 \\ s_{\theta-q_1}(l_3c_{23} + l_2c_2 + l_{EE}c_{234}) & s_{\theta-q_1}(l_3c_{23} + l_{EE}c_{234}) & s_{\theta-q_1}(l_3c_{23} - l_3(c_2c_3 - s_2s_3) + l_{EE}c_{234}) & 0 \\ -(l_3s_{23} + l_2s_2 + l_{EE}s_{234}) & -(l_3s_{23} + l_{EE}s_{234}) & -l_{EE}s_{234} & 0 \\ s_{q_1-\theta} & s_{q_1-\theta} & s_{q_1-\theta} & -c_{q_1-\theta}s_{234} \\ c_{q_1-\theta} & c_{q_1-\theta} & c_{q_1-\theta} & s_{q_1-\theta}s_{234} \\ 0 & 0 & 0 & -c_{234} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

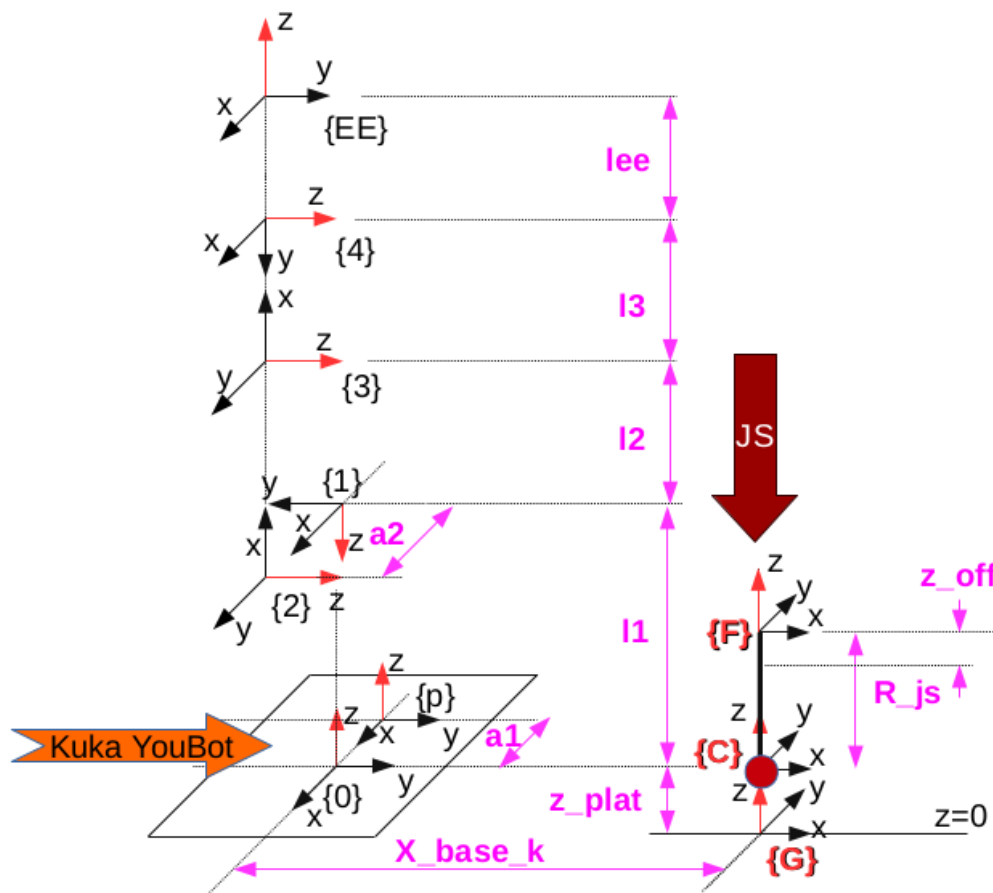
with $s_{i-j} = \sin(i-j)$ & $c_{i-j} = \cos(i-j)$

4.4 Ευθεία Κινηματική Joystick

Το joystick διαθέτει τρεις βαθμούς ελευθερίας, οι οποίοι είναι 3-περιστροφές γύρω από τους άξονες συστήματος συντεταγμένων, που είναι προσδεδεμένο σε σταθερό σημείο C (Εικόνα 4.9,4.11). Σε αυτό το κεφάλαιο επιθυμούμε να βρούμε τον ομογενή μετασχηματισμό από το σύστημα συντεταγμένων-{0} της βάσης του βραχίονα, ως το κέντρο περιστροφής-{C} του joystick, και τελικά ως το σημείο λαβής-{F} (grasping point).

4.4.1 Joystick Τοποθετημένο στο Έδαφος

Η θέση του joystick σε σχέση με τη θέση του ρομπότ-χειριστή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 4.9). Επιθυμούμε να βρούμε τον μετασχηματισμό από το σύστημα συντεταγμένων- $\{0\}$ ως το σύστημα συντεταγμένων- $\{F\}$. Αυτός ο μετασχηματισμός είναι απαραίτητος για την λαβή του joystick, έτσι ώστε να δοθεί η κατάλληλη εντολή κίνησης στις αρθρώσεις του βραχίονα (μέσω της αντίστροφης κινηματικής). Έπειτα, ο μετασχηματισμός χρειάζεται έτσι ώστε οι 3-περιστροφές ως προς το $\{C\}$ (βαθμοί ελευθερίας του joystick), να εκφραστούν ως προς το σύστημα συντεταγμένων $\{p\}$, για να δοθούν εντολές κίνησης στο ρομποτικό σύστημα πλατφόρμας-βραχίονα κατά τη φάση του τηλεχειρισμού.



Εικόνα 4.9 – Συστήματα συντεταγμένων Kuka – youBot & Joystick (παράλληλο στο έδαφος)

Αρχικά ορίζεται ο μετασχηματισμός μεταξύ του κέντρου του joystick $\{C\}$ και του σημείου λαβής $\{F\}$ (Σχέση 4.38).

$${}^C T_F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_{js} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Έπειτα, ορίζεται ο μετασχηματισμός μεταξύ της βάσης του βραχίονα $\{0\}$ και του σημείου $\{G\}$, το οποίο πρόκειται για την προβολή του κέντρου του joystick στο έδαφος (Σχέση 4.39).

$${}^0T_G = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) & -\sin(\theta_0) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_0) & \cos(\theta_0) & 0 & x_{base_k} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{plat} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \theta_0 = \frac{\pi}{2} \quad (4.39)$$

Ακολούθως, με αναπαράσταση σταθερών γωνιών $XYZ - (\psi, \theta, \phi)$ υπολογίζουμε τον μετασχηματισμό μεταξύ της προβολής του κέντρου του joystick $\{G\}$, και του κέντρου του joystick $\{C\}$ (Σχέση 4.40). Οι τρεις γωνίες $XYZ - (\psi, \theta, \phi)$, είναι οι 3-βαθμοί ελευθερίας που διαθέτει το joystick.

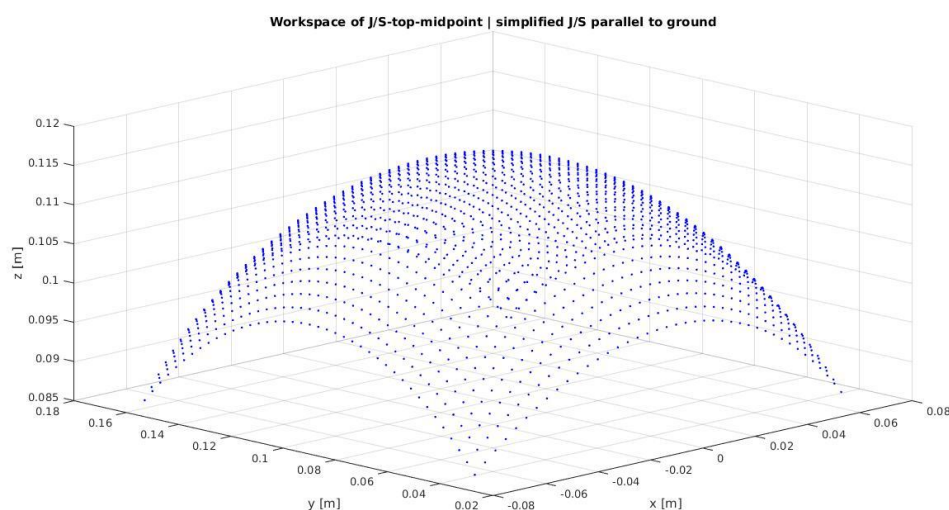
$${}^G T_C = \begin{bmatrix} \cos(\phi)\cos(\theta) & \cos(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) - \sin(\phi)\cos(\psi) & \cos(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) + \sin(\phi)\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\phi)\cos(\theta) & \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) + \cos(\theta)\cos(\psi) & \sin(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) - \cos(\phi)\sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\psi) & \cos(\theta)\cos(\psi) & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Τέλος, βρίσκουμε τον μετασχηματισμό από τη βάση του βραχίονα ως το σημείο λαβής (Σχέση 4.41, 4.42).

$${}^G T_F = {}^G T_C {}^C T_F \quad (4.41)$$

$${}^0 T_F = {}^0 T_G {}^G T_F \quad (4.42)$$

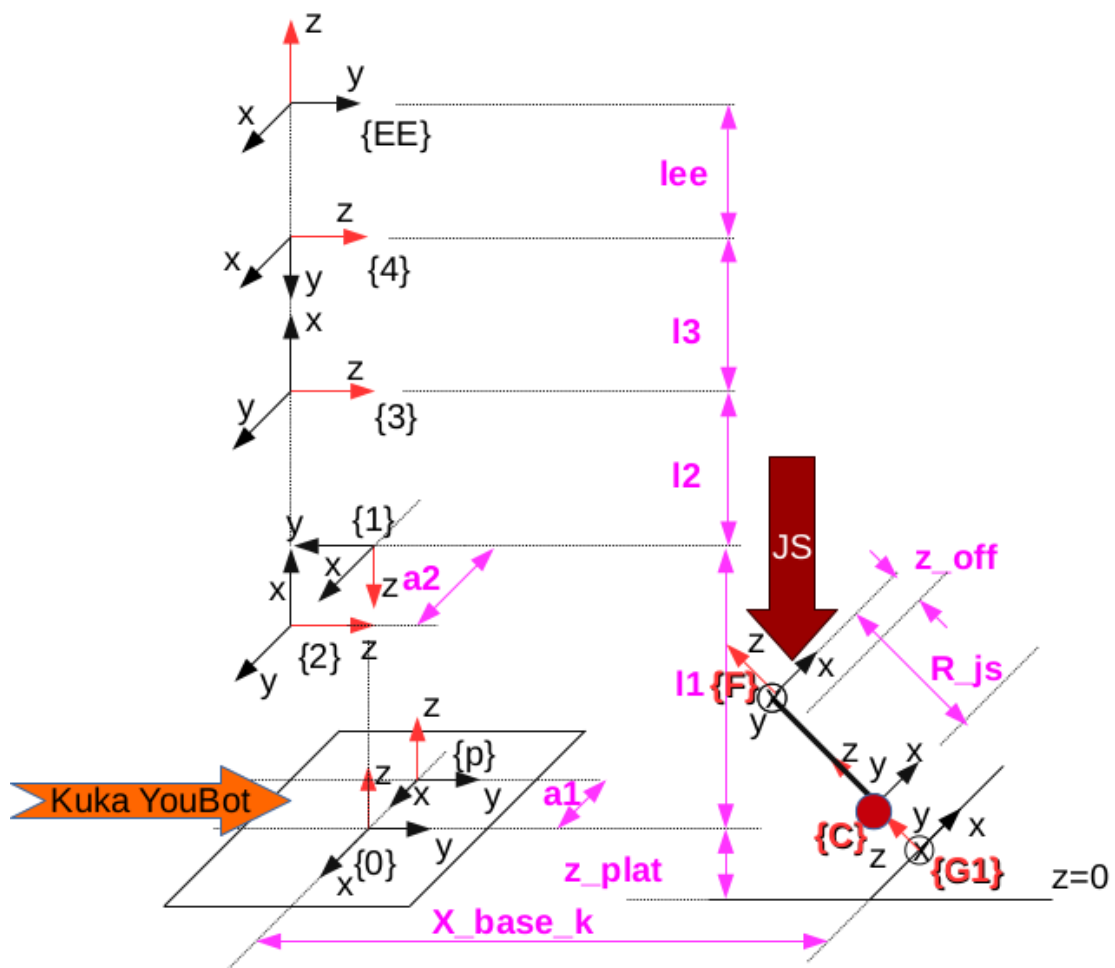
Παρακάτω φαίνεται ο χώρος εργασίας (Workspace), σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, που δύναται να κινηθεί το joystick (Εικόνα 4.10). Κάθε βαθμός ελευθερίας έχει όριο κίνησης, περίπου ίσο με $\pm 25^\circ$, γύρω από το σημείο ισορροπίας. Το επίπεδο $z=0$, αντιστοιχεί στο επίπεδο της πλατφόρμας του ρομπότ-χειριστή.



Εικόνα 4.10 – Workspace Joystick (παράλληλο στο έδαφος)

4.4.2 Joystick Τοποθετημένο σε Κεκλιμένη Βάση 45°

Αντιστοίχως με πριν πράττουμε και για το joystick σε κεκλιμένη βάση 45° (Εικόνα 4.11). Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα συντεταγμένων $\{G_1\}$ είναι η προβολή του $\{C\}$ πάνω στο επίπεδο της κεκλιμένης βάσης. Επίσης, η αρχή (origin) του συστήματος συντεταγμένων $\{G_1\}$, βρίσκεται κατά 9,8cm ανυψωμένη από το έδαφος.



Εικόνα 4.11 – Συστήματα συντεταγμένων Kuka – youBot & Joystick (σε Κεκλιμένη Βάση 45°)

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση του ομογενή μετασχηματισμού μεταξύ των συστημάτων συντεταγμένων $\{0\}$ και $\{C\}$ είναι οι ακόλουθες (Σχέση 4.43-4.50).

$$x_{kj} = x_{base.k} + 0.098 \tan\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (4.43)$$

$$z_{kj} = z_{plat} - 0.098 \quad (4.44)$$

$${}^0T_G = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) & -\sin(\theta_0) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_0) & \cos(\theta_0) & 0 & x_{kj} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{kj} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \theta_0 = \frac{\pi}{2} \quad (4.45)$$

$${}^G T_{G_1} = \begin{bmatrix} \cos(-\frac{\pi}{4}) & 0 & \sin(-\frac{\pi}{4}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-\frac{\pi}{4}) & 0 & \cos(-\frac{\pi}{4}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

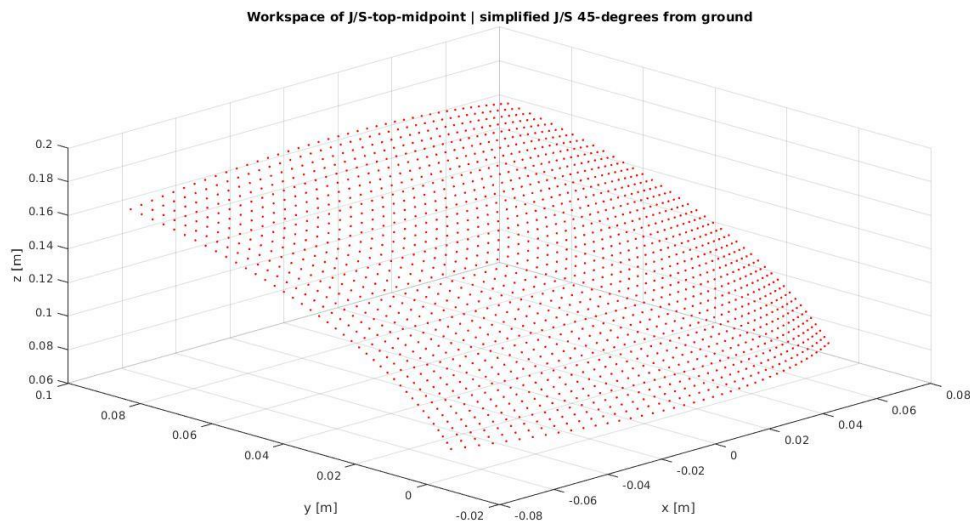
$${}^0T_{G_1} = {}^0T_G {}^G T_{G_1} \quad (4.47)$$

$${}^{G_1}T_C = \begin{bmatrix} \cos(\phi)\cos(\theta) & \cos(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) - \sin(\phi)\cos(\psi) & \cos(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) + \sin(\phi)\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\phi)\cos(\theta) & \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) + \cos(\theta)\cos(\psi) & \sin(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) - \cos(\phi)\sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\psi) & \cos(\theta)\cos(\psi) & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

$${}^{G_1}T_F = {}^{G_1}T_C {}^C T_F \quad (4.49)$$

$${}^0T_F = {}^0T_{G_1} {}^{G_1}T_F \quad (4.50)$$

Αντίστοιχα, παρακάτω φαίνεται ο χώρος εργασίας (Workspace), σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, που δύναται να κινηθεί το joystick (Εικόνα 4.12). Το επίπεδο $z=0$, αντιστοιχεί στο επίπεδο της πλατφόρμας του ρομπότ-χειριστή.



Εικόνα 4.12 – Workspace Joystick (σε Κεκλιμένη Βάση 45°)

5

Διερεύνηση Βέλτιστης Λαβής

Σε αυτό το κεφάλαιο θα διερευνηθεί ο βέλτιστος τρόπος με τον οποίο καλείται το ρομπότ-χειριστής να πραγματοποιήσει τη λαβή του joystick. Η ανάλυση γίνεται τόσο για joystick τοποθετημένο στο έδαφος, όσο και σε κεκλιμένη βάση 45° . Για την ανάλυση της λαβής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των manipulability ellipsoids [32], αλλά και ο αντίστροφος δείκτης κατάστασης ιακωβιανής [34]. Κατά τη διερεύνηση έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

- 1) Η λαβή του joystick είναι σταθερή (rigid), άρα δεν συμπεριλήφθηκαν οι παράμετροι του ακροδέκτη (ελαστικότητα και ολίσθηση δαχτύλων, αναπτυσσόμενες δυνάμεις).
- 2) Η λαβή θεωρήθηκε ως ένα σημείο (δεν υπολογίστηκαν σημεία επαφής δαχτύλων-joystick) και με βάση αυτό μόνο οι παράμετροι του βραχίονα και το τελικό μήκος μεταξύ του σημείου λαβής και του άκρου του βραχίονα επηρέασαν το αποτέλεσμα της διαδικασίας. Άρα το αποτέλεσμα όρισαν μόνο κινηματικές παράμετροι.
- 3) Όσον αφορά τη μέθοδο των manipulability ellipsoids θεωρείται πως επιτυγχάνεται η μεταφορά δύναμης στο σημείο λαβής, με βάση τις δυνατότητες του ρομπότ-χειριστή. Άρα διερευνάται η βέλτιστη λαβή μόνο με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του ελλειψοειδούς της ταχύτητας, που αντικατοπτρίζει την «ευκολία» με την οποία μπορεί το ρομπότ-χειριστής να επιβάλλει ταχύτητα με τον ακροδέκτη του κατά τους βαθμούς ελευθερίας του joystick.

5.1 Joystick Τοποθετημένο στο Έδαφος

5.1.1 Μέθοδος Manipulability Ellipsoids

Αρχικά, μελετάται η επίτευξη της βέλτιστης λαβής με τη μέθοδο των manipulability ellipsoids. Ως πρώτο βήμα, ορίζονται οι κινήσεις ($d_i \in \mathbb{R}^6$) που επιθυμούμε να επιτύχει ο ακροδέκτης κατά την χειραγώγηση του joystick (Σχέση 5.1-5.3). Επισημαίνεται ότι, κατά τον τηλεχειρισμό, το

σύστημα συντεταγμένων του ακροδέκτη επιθυμούμε να είναι πάντα στην ίδια σχετική θέση με το σύστημα συντεταγμένων του joystick, όπως ήταν στην αρχική θέση λαβής.

$$d_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ Yaw]^T \quad (5.1)$$

$$d_2 = \left[0 \ y \ (\sqrt{R_{js} - y^2} - R_{js}) \ -\arcsin\left(\frac{y}{R_{js}}\right) \ 0 \ 0 \right]^T \quad (5.2)$$

$$d_3 = \left[x \ 0 \ (\sqrt{R_{js} - x^2} - R_{js}) \ 0 \ \arcsin\left(\frac{x}{R_{js}}\right) \ 0 \right]^T \quad (5.3)$$

Στις σχέσεις που αφορούν τις επιθυμητές κινήσεις του ακροδέκτη, όπου x η κίνηση κατά τον x -άξονα του joystick, όπου y η κίνηση κατά τον y -άξονα του joystick και όπου yaw η περιστροφή γύρω από τον z -άξονα του joystick (πλαίσιο {F}). Στις κινήσεις αυτές πρέπει να δοθεί μια τιμή για να αξιολογηθεί η κάθε λαβή. Έτσι, δόθηκαν τέτοιες τιμές, σύμφωνα και με τα όρια κάθε βαθμού ελευθερίας του joystick, ώστε να θεωρείται κάθε κίνηση εξίσου σημαντική κατά την χειραγώγηση (Σχέση 5.4). Με βάση αυτά προκύπτει το ελλειψοειδές της ταχύτητας για κάθε επιθυμητή κίνηση, και τελικά η αντικειμενική συνάρτηση $-z$, που ορίζεται ως το άθροισμα αυτών (Σχέση 5.5).

$$\text{variables} : x = 1cm, y = 1cm, yaw = 0.1rad = 5.7degrees \quad (5.4)$$

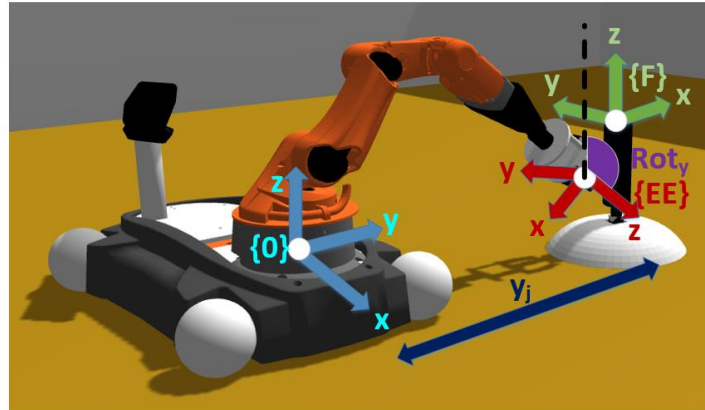
$$\text{Objective Function} : z = d_1^T (J_{(q)} J_{(q)}^T)^{-1} d_1 + d_2^T (J_{(q)} J_{(q)}^T)^{-1} d_2 + d_3^T (J_{(q)} J_{(q)}^T)^{-1} d_3 \quad (5.5)$$

Διερευνήθηκε λοιπόν, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, για όλες τις δυνατές αποστάσεις ρομπότ-χειριστή και joystick, και για όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς του ακροδέκτη σε σχέση με το joystick (Εικόνα 5.1). Ο προσανατολισμός της πλατφόρμας ως προς το joystick επιλέχθηκε με βάση τις ανάγκες του πειράματος, αφού το ρομποτικό σύστημα είναι 8 – βαθμών ελευθερίας και ο ακροδέκτης καλείται να επιτύχει κίνηση στον 6-διάστατο χώρο. Ο τρόπος επιλογής του προσανατολισμού είναι τέτοιος ώστε, αφενός να μπορεί να τοποθετηθεί με σωστό τρόπο η Kinect για την αναγνώριση του joystick, αφετέρου για να μπορεί η 2^η κάμερα του ρομποτικού συστήματος να αναγνωρίσει την οθόνη κατά τη διαδικασία του τηλεχειρισμού. Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν το ακόλουθο (Εικόνα 5.2-5.3, Σχέση 5.6).

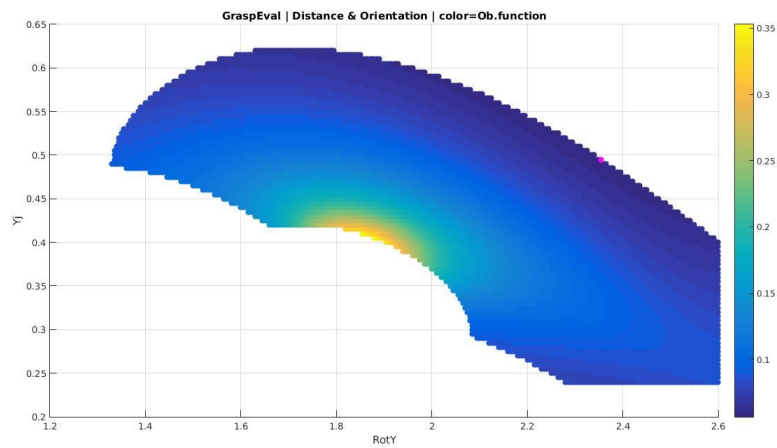
Στα γραφήματα που παρατίθενται παρακάτω, ως μωβ σημείο, αναπαρίσταται το σημείο στο οποίο υπάρχει η βέλτιστη λαβή.

$$\text{Optimized Grasp} : Ob.Fun = z = 0.05655, Rot_y = 2.355rad, y_j = 0.495m$$

$$[q_1, q_2, q_3, q_4, q_5] = [-90, 56.7, 2.8, 75.3, 0] \quad (\text{degrees}) \quad (5.6)$$

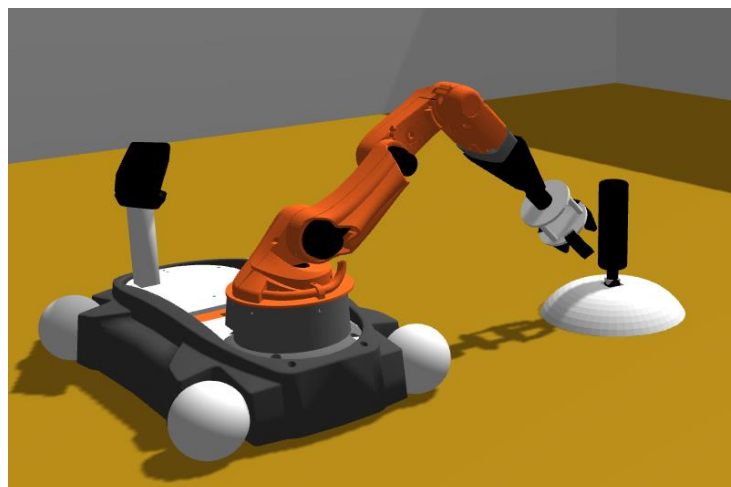


Εικόνα 5.1 – Ρομπότ-χειριστής και Joystick / παράμετροι βελτιστοποίησης



Εικόνα 5.2 – Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick στο έδαφος /

Manipulability Ellipsoids



Εικόνα 5.3 – Ρομπότ-χειριστής & Joystick στο έδαφος /

βελτιστοποιημένη λαβή / Manipulability Ellipsoids

5.1.2 Αντίστροφος Δείκτης Κατάστασης Ιακωβιανής

Ως δεύτερο κριτήριο επιλέχθηκε ο αντίστροφος δείκτης κατάστασης ιακωβιανής [34]. Αυτό το μετρικό αφορά ρομπότ-χειριστές που μπορούν να κινηθούν με τον ακροδέκτη τους, σε όλο το πεδίο εργασίας τους (workspace), με οποιονδήποτε προσανατολισμό (redundant manipulators). Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην ανάλυση του manipulability ellipsoid που δημιουργείται από τα ιδιοδιανύσματα της ιακωβιανής. Το μετρικό που προτείνεται είναι το ακόλουθο (Σχέση 5.7).

$$w = \sqrt{\det(J_{(q)}J_{(q)}^T)} = s_1s_2s_3s_4s_5s_6 \quad (5.7)$$

Αφού το w είναι το γινόμενο των ιδιοτιμών (s_i) της ιακωβιανής, το μετρικό είναι ανάλογο του όγκου του manipulability ellipsoid. Ο αντίστροφος δείκτης κατάστασης (inverse condition number) ορίζεται ως το πηλίκο της ελάχιστης προς την μέγιστη ιδιοτιμή της ιακωβιανής (Σχέση 5.8). Ο δείκτης αυτός μπορεί να πάρει τιμές από 0 (χειρότερη περίπτωση) έως 1 (βέλτιστη περίπτωση). Τα σημεία στα οποία ο δείκτης αποκτά τη μέγιστη τιμή του, λέγονται ισοτροπικά σημεία. Σε αυτά τα σημεία, το ρομπότ με τον ακροδέκτη του μπορεί να μεταφέρει δυνάμεις και ταχύτητες σε όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια «ευκολία».

$$c = \frac{1}{\text{cond}(J_{(q)})} = \frac{s_n}{s_1} \quad (5.8)$$

Ωστόσο, στην παραπάνω σχέση δεν έχουν συμπεριληφθεί τα όρια των αρθρώσεων. Υπάρχει περίπτωση το ρομπότ να βρίσκεται σε ισοτροπικό σημείο, αλλά να μην έχει δυνατότητα να κινηθεί σε κάποια κατεύθυνση, επειδή κάποια άρθρωση του βρίσκεται στο όριο της. Έτσι, πρέπει να εισαχθεί μια συνάρτηση ποινής που να αφορά τα όρια των αρθρώσεων του ρομπότ [42]. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, αναλύεται μια διαφοροποιημένη ιακωβιανή, της οποίας τα στοιχεία δέχονται ποινή, ανάλογα με το πόσο μακριά βρίσκονται από τα όρια των αρθρώσεων (l_j^- και l_j^+). Προτείνεται η συνάρτηση δυναμικού που αφορά τα όρια των αρθρώσεων $h_{(\theta)}$, της οποίας η βαθμίδα $\nabla h_{(\theta)}$, φαίνεται παρακάτω (Σχέση 5.9).

$$\nabla h_{(\theta)_j} = \frac{\partial h_{(\theta)}}{\partial \theta_j} = \frac{(\theta_j - l_j^-)^2(2\theta_j - l_j^+ - l_j^-)}{4(l_j^+ - \theta_j)^2(\theta_j - l_j^-)^2} \quad (5.9)$$

Ανάλογα με την πραγματική θέση κάθε άρθρωσης, προκύπτουν οι ακόλουθοι όροι ποινής (Σχέση 5.10).

$$p_j^- = \begin{cases} 1, & \text{if } |\theta_j - l_j^-| > |l_j^+ - \theta_j| \\ \frac{1}{\sqrt{1+|\nabla h_{(\theta)_j}|}}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$p_j^+ = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1+|\nabla h_{(\theta)_j}|}}, & \text{if } |\theta_j - l_j^-| > |l_j^+ - \theta_j| \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.10)$$

Όπου: p_j^- , p_j^+ ο όρος ποινής όταν εξετάζεται η κίνηση της άρθρωσης στην αρνητική και θετική κατεύθυνση αντίστοιχα,

θ_j η γωνία της περιστροφικής άρθρωσης j ,

l_j^- , l_j^+ το όριο της άρθρωσης j , στην αρνητική και θετική κατεύθυνση αντίστοιχα.

Ακολούθως πρέπει να βρούμε την επαυξημένη ιακωβιανή που περιλαμβάνει την ποινή των αρθρώσεων. Για τον σκοπό αυτόν, πρέπει να διερευνήσουμε όλες τις πιθανές κινήσεις στον 6-διάστατο χώρο. Έτσι χωρίζουμε τον χώρο των δυνατών κινήσεων σε 2^6 hyperoctants που ορίζονται από τη συνάρτηση $\Gamma \in \{-1, +1\}^6$. Με αυτόν τον τρόπο βρίσκουμε τον πίνακα $L(\Gamma, \theta)$ που αντιπροσωπεύει τις ποινές των αρθρώσεων (Σχέση 5.11).

$$L_{i,j}(\Gamma, \theta) = \begin{cases} p_j^-, & \text{if } \text{sgn}(J_{i,j}(\theta))\text{sgn}(\Gamma_i) < 0 \\ p_j^+, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.11)$$

Έπειτα βρίσκουμε την επαυξημένη ιακωβιανή $\tilde{J}(\Gamma, \theta)$ ως παρακάτω (Σχέση 5.12).

$$\tilde{J}_{i,j}(\Gamma, \theta) = L_{i,j}(\Gamma, \theta) J_{i,j}(\theta) \quad (5.12)$$

Καθώς η διερεύνηση γίνεται για κάθε δυνατή κίνηση (δηλαδή για κάθε συνδυασμό της συνάρτησης Γ), προκύπτουν $2^6=64$ – ιακωβιανές καθεμία από τις οποίες περιγράφει την ικανότητα προς ελιγμό (maneuverability) στο αντίστοιχο hyperoctant του χώρου εργασίας. Για κάθε πίνακα ιακωβιανής βρίσκουμε τις ιδιοτιμές (\tilde{s}_Γ) με την μέθοδο Singular Value Decomposition (SVD). Έτσι, υπολογίζουμε τελικά τον εκτεταμένο αντίστροφο δείκτη κατάστασης (extended inverted condition number) που ορίζεται ως εξής (Σχέση 5.13).

$$\tilde{c}_{ext} = \frac{\min\{\tilde{s}_\Gamma\}}{\max\{\tilde{s}_\Gamma\}} \quad (5.13)$$

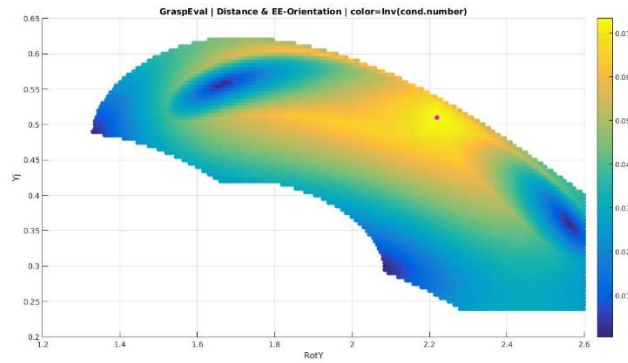
Με το μετρικό \tilde{c}_{ext} εξετάζεται «σιωπηρά» η περίπτωση πλεονασμού βαθμών ελευθερίας (redundancy), καθώς η ποινή στις αρθρώσεις μπορεί να αντισταθμιστεί από τις πλεονάζουσες αρθρώσεις στην κινηματική δομή.

Με βάση τα παραπάνω αναζητήθηκε η βελτιστοποιημένη λαβή, τόσο με την επιβολή ποινής στις αρθρώσεις, όσο και χωρίς ποινή.

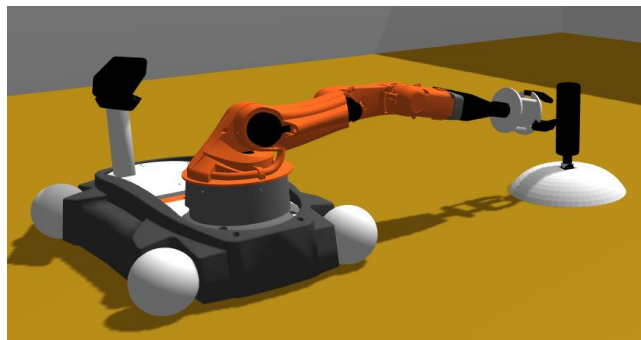
Τα αποτελέσματα χωρίς την επιβολή ποινής με τον αντίστροφο δείκτη κατάστασης, φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 5.4-5.5, Σχέση 5.14).

Optimized Grasp : Ob.Fun = z = 0.09876, Rot_y = 1.795rad, y_j = 0.62m

$$[q_1, q_2, q_3, q_4, q_5] = [-90, 86.4, 5.3, 11.1, 0] \text{ (degrees)} \quad (5.14)$$



Εικόνα 5.4 – Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick στο έδαφος / αντίστροφος δείκτης κατάστασης

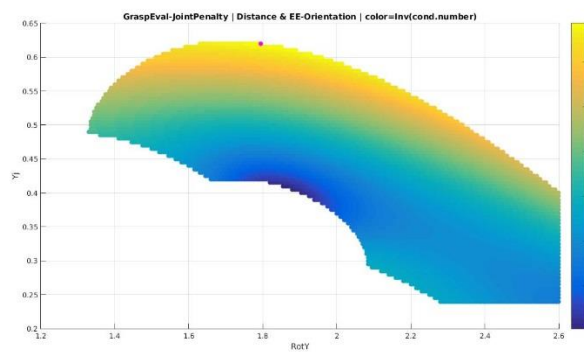


Εικόνα 5.5 – Ρομπότ-χειριστής & Joystick στο έδαφος / βελτιστοποιημένη λαβή / αντίστροφος δείκτης κατάστασης

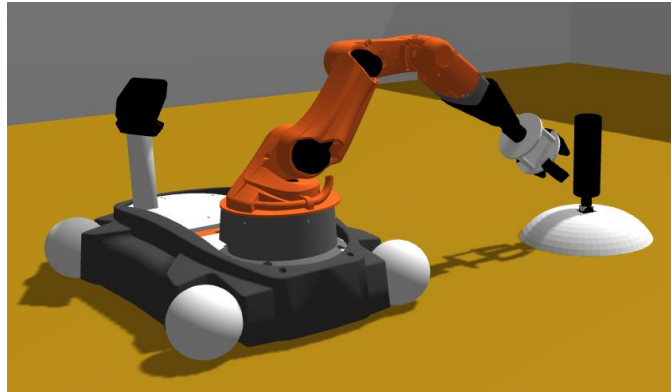
Τα αποτελέσματα με την επιβολή ποινής με τον εκτεταμένο αντίστροφο δείκτη κατάστασης, φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 5.6-5.7 , Σχέση 5.15).

$$\text{Optimized Grasp : } Ob.Fun = z = 0.073312, \text{ Rot}_y = 2.22\text{rad}, y_j = 0.51\text{m}$$

$$[q_1, q_2, q_3, q_4, q_5] = [-90, 39.7, 48.9, 38.5, 0] \text{ (degrees)} \quad (5.15)$$



Εικόνα 5.6 – Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick στο έδαφος / εκτεταμένος αντίστροφος δείκτης κατάστασης



Εικόνα 5.7 – Ρομπότ-χειριστής & Joystick στο έδαφος /
βελτιστοποιημένη λαβή / εκτεταμένος αντίστροφος δείκτης κατάστασης

5.2 Joystick Τοποθετημένο σε Κεκλιμένη Βάση 45°

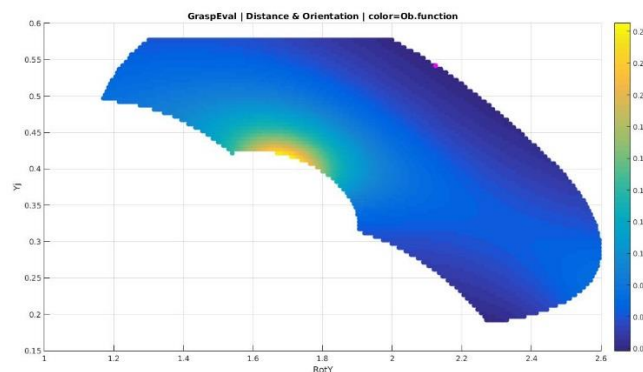
Η ίδια μεθοδολογία ακολουθήθηκε και για joystick σε κεκλιμένη βάση 45°. Η αλλαγή που υπεισέρχεται αφορά το πλαίσιο συντεταγμένων του joystick σε σχέση με το πλαίσιο της βάσης του βραχίονα, και ως εκ τούτου αλλάζουν οι επιθυμητές κινήσεις του ακροδέκτη και το σημείο λαβής.

5.2.1 Μέθοδος Manipulability Ellipsoids

Το αποτέλεσμα που προέκυψε για τη συγκεκριμένη μέθοδο ήταν το ακόλουθο (Εικόνα 5.8-5.9, Σχέση 5.16).

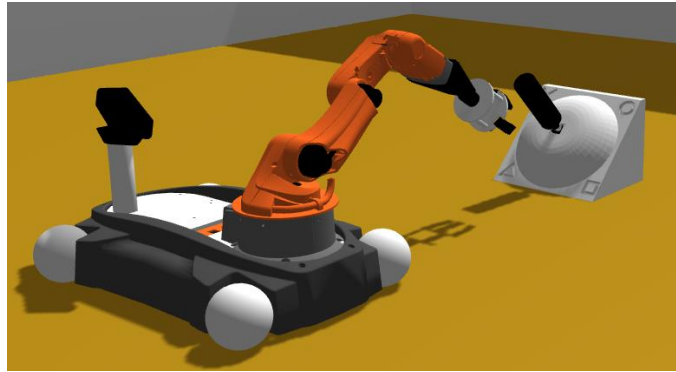
Optimized Grasp : $Ob.Fun = z = 0.038633$, $Rot_y = 2.125rad$, $y_j = 0.542m$

$$[q_1, q_2, q_3, q_4, q_5] = [-90, 58.4, 2.2, 61.2, 0] \text{ (degrees)} \quad (5.16)$$



Εικόνα 5.8 – Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick σε βάση 45° /

Manipulability Ellipsoids



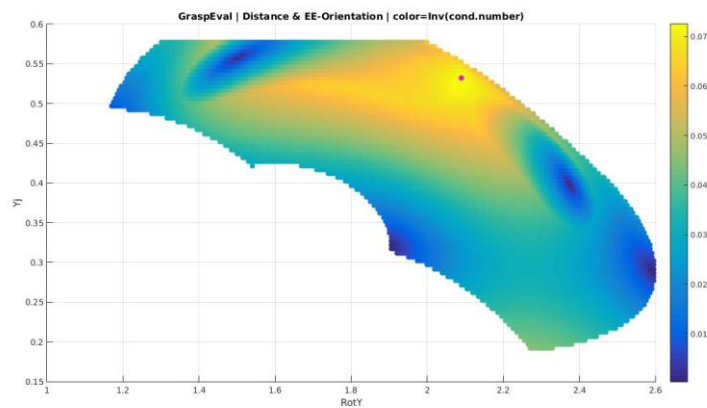
Εικόνα 5.9 – Ρομπότ-χειριστής & Joystick σε βάση 45° /
βελτιστοποιημένη λαβή / Manipulability Ellipsoids

5.2.2 Αντίστροφος Δείκτης Κατάστασης Ιακωβιανής

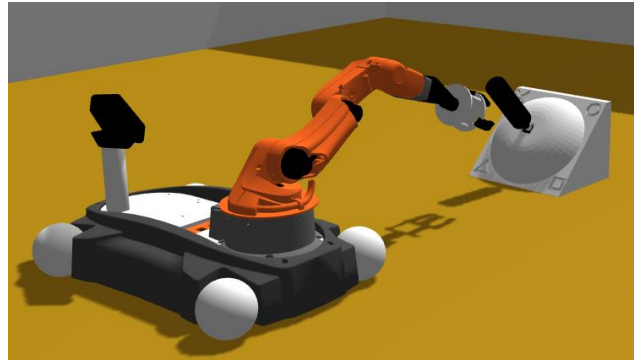
Τα αποτελέσματα χωρίς την επιβολή ποινής με τον αντίστροφο δείκτη κατάστασης, φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 5.10-5.11 , Σχέση 5.17).

Optimized Grasp : $Ob.Fun = z = 0.092592$, $Rot_y = 2rad$, $y_j = 0.577m$

$$[q_1, q_2, q_3, q_4, q_5] = [-90, -54, 87.6, 101.7, 0] \text{ (degrees)} \quad (5.17)$$



Εικόνα 5.10 – Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick σε βάση 45° /
αντίστροφος δείκτης κατάστασης

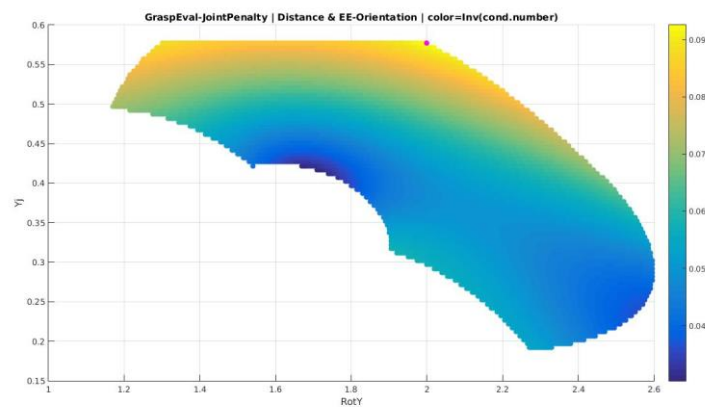


Εικόνα 5.11 – Ρομπότ-χειριστής & Joystick σε βάση 45° / βελτιστοποιημένη λαβή / αντίστροφος δείκτης κατάστασης

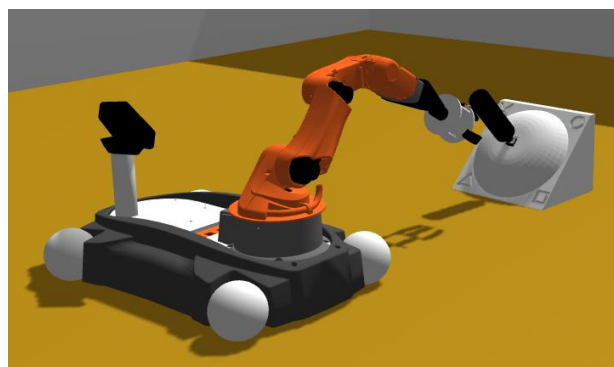
Τα αποτελέσματα με την επιβολή ποινής με τον εκτεταμένο αντίστροφο δείκτη κατάστασης, φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 5.12-5.13 , Σχέση 5.18).

Optimized Grasp : $Ob.Fun = z = 0.072452$, $Rot_y = 2.09rad$, $y_j = 0.532m$

$$[q_1, q_2, q_3, q_4, q_5] = [-90, 65.7, 2.4, 46.5, 0] \text{ (degrees)} \quad (5.18)$$



Εικόνα 5.12 – Γράφημα βελτιστοποίησης λαβής / Joystick σε βάση 45° / εκτεταμένος αντίστροφος δείκτης κατάστασης



Εικόνα 5.13 – Ρομπότ-χειριστής & Joystick σε βάση 45° / βελτιστοποιημένη λαβή / εκτεταμένος αντίστροφος δείκτης κατάστασης

6

Ανίχνευση / Παρακολούθηση Joystick

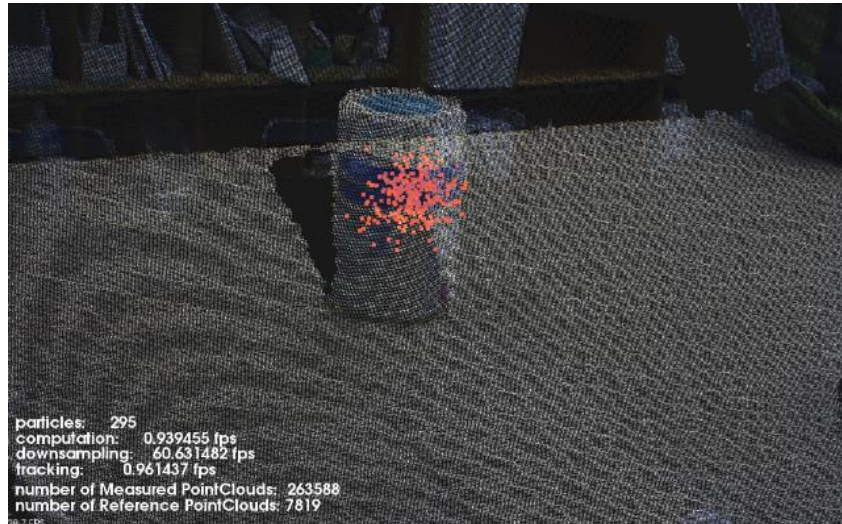
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η μέθοδος που ακολουθήθηκε με σκοπό την ανίχνευση και την παρακολούθηση του joystick. Στόχος ήταν, με βάση τα οπτικά δεδομένα που παρείχε ο αισθητήρας Kinect, να πλησιάσει το ρομπότ-χειριστής το joystick, και τελικά να πραγματοποιήσει τη λαβή μέσω του συστήματος ρομποτικού βραχίονα – ακροδέκτη, το οποίο διαθέτει. Η επιθυμητή θέση και προσανατολισμός της πλατφόρμας και του ρομποτικού βραχίονα, στην οποία θα φτάσει τελικά το ρομπότ-χειριστής, προέκυψε από την διερεύνηση που παρουσιάστηκε παραπάνω (Κεφάλαιο 5.1.1). Το joystick είναι τοποθετημένο στο έδαφος, με σκοπό να παρουσιαστεί η γενική περίπτωση του σεναρίου που ερευνάται.

6.1 Αναγνώριση Joystick

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση του joystick, βασίστηκε σε αλγόριθμο της PCL (Point Cloud Library) [43]. Με αυτήν την μέθοδο είναι δυνατή η ανίχνευση αντικειμένου στον 6-διάστατο χώρο (αναγνώριση θέσης (x,y,z) και περιστροφής $(roll,pitch,yaw)$ αντικειμένου).

Αρχικά, πρέπει να γίνει μια διαδικασία αρχικοποίησης (initialization procedure). Ο αλγόριθμος, στο 1^ο στάδιο, αναγνωρίζει το αντικείμενο-στόχο, ως ένα αντικείμενο πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια. Στην πειραματική διαδικασία η επίπεδη επιφάνεια θα είναι το πάτωμα και το αντικείμενο-στόχος το joystick. Για να ολοκληρωθεί επιτυχώς η διαδικασία αρχικοποίησης πρέπει ο στόχος να βρίσκεται περίπου 1.5m μακριά από τον οπτικό αισθητήρα, και να μην υπάρχουν άλλα αντικείμενα πλησίον του στόχου. Επίσης, μόλις εντοπισθεί ο στόχος, θεωρείται πως σε αυτό το σημείο οι περιστροφές $(roll,pitch,yaw)$ του αντικειμένου ως προς την κάμερα είναι μηδενικές. Άρα, κατά την αρχικοποίηση θεωρούμε πως η πλατφόρμα του ρομπότ-χειριστή έχει τον ίδιο προσανατολισμό με αυτόν που θα έχει κατά την επίτευξη της λαβής (όπου $(roll,pitch,yaw)=(0,0,0)$).

Ο αλγόριθμος έχει την δυνατότητα να παρακολουθεί το αντικείμενο σε πραγματικό χρόνο γιατί, ύστερα από την διαδικασία αρχικοποίησης, χρησιμοποιεί ορισμένα σημεία που αντιπροσωπεύουν το αντικείμενο (σωματίδια / particles), και όχι το συνολικό αντικείμενο (Εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1 – Ανίχνευση αντικειμένου / Νέφος σωματιδίων αντικειμένου

Σε κάθε επανάληψη, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί την προηγούμενη θέση και προσανατολισμό των σωματιδίων για να προβλέψει την θέση τους και προσανατολισμό στην επόμενη χρονική στιγμή. Έπειτα, υπολογίζονται τα "βάρη" των σωματιδίων (ποια σωματίδια αντιπροσωπεύουν καλύτερα το αντικείμενο, και άρα είναι πιο σημαντικά για την παρακολούθηση του στόχου), μέσω μιας συνάρτησης πιθανότητας. Τέλος, χρησιμοποιείται μια συνάρτηση αξιολόγησης που συγκρίνει τα πραγματικά οπτικά δεδομένα από τον αισθητήρα, με τα σωματίδια που προέκυψαν από τη διαδικασία πρόβλεψης, και έπειτα γίνεται νέα δειγματοληψία σωματιδίων ώστε να ξεκινήσει νέος κύκλος επανάληψης.

Ως αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας μπορούμε να πάρουμε το διάνυσμα θέσης του αντικειμένου (Σχέση 6.1). Οι τρεις πρώτοι όροι αφορούν την θέση του κεντροειδούς του joystick ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της κάμερας, ενώ οι τρεις τελευταίοι όροι αφορούν τον προσανατολισμό του joystick ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της κάμερας (σε σχέση πάντα με τον αρχικό προσανατολισμό στην αρχικοποίηση). Ως κεντροειδές ορίζεται ο αριθμητικός μέσος των συντεταγμένων των σημείων του joystick που αντιλαμβάνεται η κάμερα. Έτσι, αν επαναληφθεί η διαδικασία αρχικοποίησης για ένα μη-συμμετρικό στόχο, από άλλη οπτική γωνία (με αποτέλεσμα να αλλάζουν τα σημεία που αντιλαμβάνεται η κάμερα ως στόχο), τότε το κεντροειδές του στόχου θα είναι διαφορετικό.

$${}^{k_cam}P_{js} = [P_x \ P_y \ P_z \ roll \ pitch \ yaw]^T \quad (6.1)$$

Στην παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν οι τυπικές τιμές των παραμέτρων ανίχνευσης που προτείνονται στον αλγόριθμο. Αξίζει να σημειωθεί πως, επειδή κατά τον αλγόριθμο χρησιμοποιείται προβλεπτική μέθοδος (για να μπορεί να εκτελεστεί ο κώδικας σε πραγματικό χρόνο), υπάρχουν σφάλματα στην θέση του joystick. Αυτά τα σφάλματα αφορούν κυρίως τον προσανατολισμό του joystick, αφού η αναγνώριση του προσανατολισμού αντικειμένων που διαθέτουν συμμετρία είναι λιγότερο ακριβής.

6.2 Έλεγχος Οπτικής Οδήγησης με Αισθητήρα – Kinect

Έχοντας λοιπόν στη διάθεση του το ρομπότ-χειριστή, την θέση του joystick, καλείται να το προσεγγίσει και να εκτελέσει τη λαβή. Το πείραμα χωρίστηκε σε δύο μέρη:

- i. Προσέγγιση του joystick από την πλατφόρμα του ρομπότ-χειριστή. Ο ρομποτικός βραχίονας (που βρίσκεται πάνω στην πλατφόρμα) παραμένει ακίνητος.
- ii. Όταν η πλατφόρμα φτάσει σε μια περιοχή πλησίον του joystick, τότε εκκινεί η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα. Σε αυτήν την φάση υπάρχει ταυτόχρονη κίνηση και του ρομποτικού βραχίονα, αλλά και της πλατφόρμας.

Η προσέγγιση του joystick έγινε μέσω σχήματος ελέγχου PBVS (Κεφάλαιο 1.3). Κατά την 1^η φάση προσέγγισης δίνονταν εντολές ταχύτητας στην πλατφόρμα, στο πλαίσιο συντεταγμένων $\{p\}$. Με βάση τις Σχέσεις 3.5-3.7 (Κεφάλαιο 3.4), προκύπτει η ακόλουθη συνοπτική εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της πλατφόρμας (Σχέση 6.2)

$$V_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -r_y \\ 0 & 1 & r_x \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left({}^{k_int}T_{k_cam} V_{k_cam} \right)_{rows:1,2,6} \quad (6.2)$$

Κατά την 2^η φάση προσέγγισης δίνονταν ταυτόχρονα εντολές ταχύτητας και στον ρομποτικό βραχίονα, αλλά και στην πλατφόρμα. Οι εντολές ταχύτητας για την πλατφόρμα δίνονταν με τον ίδιο τρόπο που παρουσιάστηκε παραπάνω (Σχέση 6.2). Όσον αφορά τον ρομποτικό βραχίονα η θέση (x,y,z) που καλούνταν να επιτύχει ήταν εξαρτώμενη από την οπτική πληροφορία του αισθητήρα Kinect (Σχέση 3.8). Αντίθετα ο προσανατολισμός του ακροδέκτη, ήταν αυτός ο οποίος είχε προκύψει από την διερεύνηση βέλτιστης λαβής και ήταν ανεξάρτητος της οπτικής πληροφορίας (Σχέση 6.3).

$${}^0R_{EE} = R_z R_y = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) & -\sin(\theta_0) & 0 \\ \sin(\theta_0) & \cos(\theta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(Rot_y) & 0 & \sin(Rot_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(Rot_y) & 0 & \cos(Rot_y) \end{bmatrix}$$

$$with \ \theta_0 = \frac{\pi}{2} rad, \ Rot_y = 2.355 rad \quad (6.3)$$

Σημειώνεται πως το αποτέλεσμα του αλγορίθμου ανίχνευσης ήταν το κεντροειδές του joystick. Ωστόσο, το σημείο λαβής με το κεντροειδές του joystick δεν ταυτίζονται. Έτσι, το επιθυμητό σημείο λαβής εκφράζεται ως το κεντροειδές του joystick μετατοπισμένο κατά δεδομένα *offsets* (Σχέση 6.4).

$${}^0P_{EE(des)} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix}_{EE} = {}^0T_{k.cam} {}^{k.cam}P_{js} - X_{off} = {}^0T_{k.cam} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix}_{js} - \begin{bmatrix} x_{off} \\ y_{off} \\ z_{off} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Έτσι το σφάλμα θέσης του ακροδέκτη ορίζεται ως παρακάτω (Σχέση 6.5).

$$e_p = {}^0P_{EE(des)} - {}^0P_{EE(cur)} \quad (6.5)$$

Χρησιμοποιείται έλεγχος PID, οπότε τελικά το σφάλμα που θα εφαρμοστεί στο σχήμα ελέγχου θα είναι το ακόλουθο (Σχέση 6.6).

$$e_p^* = K_p e_p + K_d \dot{e}_p + K_i \int e_p \quad (6.6)$$

Όσον αφορά τον έλεγχο προσανατολισμού έχοντας ότι $\mathbf{R}=[\mathbf{n}_i, \mathbf{s}_i, \mathbf{a}_i]$ ο τρέχων πίνακας περιστροφής και $\mathbf{R}_d=[\mathbf{n}_d, \mathbf{s}_d, \mathbf{a}_d]$ ο επιθυμητός πίνακας περιστροφής, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση σφάλματος του προσανατολισμού του ακροδέκτη (Σχέση 6.7).

$$e_o = \frac{1}{2} \left(n_t \times n_d + o_t \times o_d + a_t \times a_d \right) \quad (6.7)$$

Έτσι τελικά λύνοντας το πρόβλημα της αντίστροφης διαφορικής κινηματικής (με την Ιακωβιανή του βραχίονα), προκύπτει η ακόλουθη σχέση, που προσδιορίζει τον έλεγχο της ταχύτητας των αρθρώσεων του ρομποτικού – βραχίονα (Σχέση 6.8).

$$\dot{q} = J_{(q)}^+ \begin{bmatrix} e_p^* \\ K_o e_o \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Η διαδικασία λαμβάνει τέλος όταν το ρομπότ-χειριστής βρεθεί στην επιθυμητή θέση (όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5.1.1). Τότε, ο ακροδέκτης “κλείνει” τα δάχτυλα του. Το “κλείσιμο” των δαχτύλων πραγματοποιείται μέσω εντολής που δίνεται σε Arduino [44] που είναι τοποθετημένο στο ρομποτικό χέρι. Το Arduino ελέγχει σερβοκινητήρα που οδηγεί τα νήματα των δαχτύλων μέσω του διαφορικού μηχανισμού του χεριού [9].

7

Τηλεχειρισμός Τροχοφόρου Ρομπότ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι ενέργειες που θα εκτελέσει το ρομπότ-χειριστής, ύστερα από την πραγματοποίηση της λαβής. Αρχικά, εξετάζεται το ποια θα πρέπει να είναι η κίνηση του ακροδέκτη του ρομπότ-χειριστή, ώστε να βρίσκεται πάντα στην ίδια θέση σχετικά με το joystick, κατά την διαδικασία του τηλεχειρισμού. Ακολούθως γίνεται παρακολούθηση κυκλικής τροχιάς από τον ακροδέκτη, για να παρουσιαστεί η ακρίβεια με την οποία μπορεί το ρομπότ-χειριστής να ελέγξει το joystick. Στην συνέχεια διερευνάται η νεκρή-ζώνη του joystick, έτσι ώστε να γνωρίζει το ρομπότ-χειριστής, σε ποια περιοχή του Workspace του joystick, δεν στέλνονται εντολές ταχύτητας στο τηλεχειριζόμενο ρομπότ. Έπειτα, επειδή όπως αναφέρθηκε (Κεφάλαιο 6.1) υπάρχουν σφάλματα στην ανίχνευση και στην λαβή του joystick, εξετάζεται ο συσχετισμός κίνησης ακροδέκτη και τροχοφόρου ρομπότ, ο οποίος ενδέχεται να διαφέρει από τον επιθυμητό συσχετισμό κινήσεων. Τέλος, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο το ρομπότ-χειριστής μετακινεί το τηλεχειριζόμενο ρομπότ, από μια τυχαία-αρχική θέση στην τελική-επιθυμητή θέση. Οι παραπάνω διαδικασίες παρουσιάζονται θεωρητικά στο παρόν κεφάλαιο. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 8).

7.1 Χειρισμός Joystick & Παρακολούθηση Τροχιάς Ακροδέκτη

Το πρώτο ζήτημα που εξετάστηκε ήταν οι κινήσεις που πρέπει να κάνει ο ακροδέκτης –μέσω του ρομποτικού βραχίονα και της πλατφόρμας- έτσι ώστε να βρίσκεται πάντοτε στην ίδια σχετική θέση με το joystick, όπως κατά την πραγματοποίηση της λαβής. Αυτό είναι αναγκαίο γιατί επειδή τα δάχτυλα του υποεπενεργούμενου ρομποτικού-χεριού είναι υποχωρητικά και ελαστικά, μια ενδεχόμενη μεταβολή της σχετικής θέσης των δαχτύλων ως προς το joystick, μπορεί να μην είναι αναστρέψιμη. Έτσι, ο ακροδέκτης δεν θα μπορεί να επιστρέψει στην θέση κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η λαβή, και ο έλεγχος του joystick θα έχει πια επηρεαστεί σημαντικά.

Τα πλαίσια συντεταγμένων που πρέπει να μένουν στην ίδια σχετική θέση και προσανατολισμό είναι τα πλαίσια {EE} και {F} (Εικόνα 5.1). Το πλαίσιο {F} βρίσκεται στο επιθυμητό σημείο λαβής πάνω στο joystick, και κινείται μαζί με το joystick. Το πλαίσιο {EE} βρίσκεται στο επιθυμητό σημείο λαβής πάνω στο τελικό σημείο δράσης, και κινείται μαζί με τον ακροδέκτη. Οι επιθυμητές κινήσεις εκφρασμένες στο πλαίσιο {F} παρουσιάζονται παρακάτω (Σχέση 7.1-7.2).

Θεωρείται πως η αρχή (origin) των πλαισίων {F} και {EE} ταυτίζεται, άρα ${}^P\mathbf{P}_F = {}^P\mathbf{P}_{EE}$.

Η Σχέση 7.1 αφορά τη θέση, ενώ η Σχέση 7.2 αφορά τον προσανατολισμό του πλαισίου {F}, σε σχέση με την θέση και προσανατολισμό του πλαισίου {F}={F_{initial}} όταν το joystick βρίσκεται στην θέση ισορροπίας (στο κέντρο του Workspace). Γνωρίζουμε πως το joystick διαθέτει μια σφαιρική άρθρωση (2-DoFs) και μια περιστροφική άρθρωση (1-DoF) γύρω από τον z-άξονα του {C} (Εικόνα 3.8). Έτσι το πλαίσιο {F} κινείται σε μια σφαίρα με κέντρο το {C}. Επίσης, η μεταφορά κατά τον x-άξονα επιφέρει περιστροφή γύρω από τον y-άξονα και η μεταφορά κατά τον y-άξονα επιφέρει περιστροφή γύρω από τον x-άξονα (με σκοπό την διατήρηση σχετικής θέσης/προσανατολισμού joystick-ακροδέκτη).

$${}^{F_{init}}P_F = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ \sqrt{R_{js}^2 - (d_x^2 + d_y^2)} - R_{js} \end{bmatrix} \quad \text{with } R_{js} = 15\text{cm} = \text{distance from grasp_point to js_center} \quad (7.1)$$

$${}^{F_{init}}R_F = R_y R_x R_z = \begin{bmatrix} \cos(\phi_y) & 0 & \sin(\phi_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi_y) & 0 & \cos(\phi_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi_x) & -\sin(\psi_x) \\ 0 & \sin(\psi_x) & \cos(\psi_x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{with } \phi_y = \text{asin}\left(\frac{d_x}{R_{js}}\right), \quad \psi_x = \text{asin}\left(\frac{-d_y}{R_{js}}\right) \quad (7.2)$$

Όπου:

dx, dy οι 2-βαθμοί ελευθερίας του joystick εκφρασμένοι ως μετατοπίσεις στο πλαίσιο {F},

θ_z ο 3ος βαθμός ελευθερίας του joystick (περιστροφή γύρω από τον z-άξονα του {F})

Οι παραπάνω κινήσεις πρέπει να εκφραστούν στο πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης της πλατφόρμας {p}. Στην αρχή της διαδικασίας του τηλεχειρισμού, όταν έχει εκπληρωθεί η λαβή, λαμβάνουμε μέσω των encoders, τις γωνίες των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα αλλά και την οδομετρία της πλατφόρμας. Έτσι, γνωρίζουμε το μητρώο περιστροφής του συνολικού ρομποτικού συστήματος ${}^P\mathbf{R}_{EE_init} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, αλλά και το μητρώο περιστροφής του ρομποτικού βραχίονα ${}^0\mathbf{R}_{EE_init} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$. Έτσι μπορούμε να βρούμε την πραγματική περιστροφή \mathbf{Rot}_y του {EE} –με μετατροπή του μητρώου ${}^0\mathbf{R}_{EE_init} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ σε γωνίες Euler– η οποία ενδέχεται να διαφέρει από

την επιθυμητή (Εικόνα 5.1). Επίσης, καθώς από την ευθεία κινηματική (Κεφάλαιο 4) γνωρίζουμε τον ομογενή μετασχηματισμό ${}^p\mathbf{T}_{EE_init} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$, γνωρίζουμε και την θέση του ακροδέκτη σε σχέση με το $\{p\}$, ${}^p\mathbf{P}_{EE_init} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$.

Για να εκφραστεί η θέση του $\{F\}$, ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων $\{p\}$, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση (Σχέση 7.3).

$${}^pP_{EE_init} = {}^pP_{EE_init} + {}^{F_init}P_F, \text{ with } {}^pP_{EE_init} = {}^pP_{F_init} \quad (7.3)$$

Για να εκφραστεί ο προσανατολισμός του $\{F\}$, ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων $\{p\}$, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση (Σχέση 7.4).

$${}^pR_{EE_init} = {}^pR_{EE_init} {}^{EE_init}R_{F_init} {}^{F_init}R_F {}^{EE_init}R_{F_init}^T \quad (7.4)$$

Έπειτα γίνεται έλεγχος ταχύτητας στο σύνολο του ρομποτικού συστήματος μέσω της αντίστροφης διαφορικής κινηματικής (Σχέση 6.8, χρησιμοποιώντας την συνολική Ιακωβιανή του ρομποτικού συστήματος). Η τροχιά που επιλέγεται να ακολουθήσει ο ακροδέκτης είναι μια κυκλική τροχιά με ταυτόχρονη περιστροφή θ_z (Σχέση 7.5).

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ \theta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x \cos(2\pi\omega t) \\ A_y \sin(2\pi\omega t) \\ A_z \sin(2\pi\omega t) \end{bmatrix} \text{ with } A_x = A_y = 0.02, A_z = 0.4, \omega = 0.02 \quad (7.5)$$

7.2 Νεκρή - Ζώνη Joystick

Η νεκρή-ζώνη (Dead-Zone) είναι ένα χαρακτηριστικό που υπάρχει σε κάθε joystick. Πρόκειται για μια περιοχή –υποσύνολο του Workspace του joystick– στην οποία, δεν δίνονται εντολές ταχύτητας στο τηλεχειριζόμενο ρομπότ. Αν η νεκρή-ζώνη έχει μηδενική διάσταση, τότε το μόνο σημείο που δεν θα στέλνονταν εντολές ταχύτητας στο τηλεχειριζόμενο ρομπότ, θα ήταν το κέντρο του joystick (σημείο ισορροπίας). Ωστόσο, αυτό θα καθιστούσε ιδιαίτερα δύσκολο τον έλεγχο του joystick, ακόμη και στην περίπτωση που ο χειριστής ήταν άνθρωπος.

Για να μπορέσει λοιπόν το ρομπότ-χειριστής να μετακινήσει το χειραγωγούμενο ρομπότ στην τελική επιθυμητή θέση, απαιτείται η γνώση του Dead-Zone. Έτσι, όταν καλείται το ρομπότ-χειριστής να μετακινήσει το χειραγωγούμενο ρομπότ, θα μπορεί να κινεί το joystick στην περιοχή εκείνη, στην οποία στέλνονται εντολές ταχύτητας.

Οι ταχύτητες του χειραγωγούμενου ρομπότ αναγνωρίζονται από το ρομπότ-χειριστή μέσω μιας οθόνης (Κεφάλαιο 3.5). Όπως παρουσιάστηκε στο [38], στον αλγόριθμο εισάγεται μια επιθυμητή θέση του στόχου ως προς το τηλεχειριζόμενο ρομπότ. Έτσι, με βάση την τρέχουσα θέση του στόχου ως προς το τηλεχειριζόμενο ρομπότ, παράγονται από τον αλγόριθμο οι ταχύτητες που πρέπει να επιτύχει το ρομπότ για να φτάσει τελικά στην επιθυμητή θέση.

Ωστόσο, σε αυτήν την φάση του πειράματος επιζητείται η αναγνώριση των ταχυτήτων του τηλεχειριζόμενου ρομπότ, όταν αυτό κινείται. Έτσι, ως επιθυμητή θέση ορίζεται η θέση στην οποία βρίσκεται ακίνητο το ρομπότ. Όταν ξεκινήσει η κίνηση του, ο αλγόριθμος θα παράγει ταχύτητες, τέτοιες ώστε να επιστρέψει το ρομπότ στην αρχική επιθυμητή θέση. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται γνωστό το πότε ξεκινάει να κινείται το ρομπότ (Dead-Zone του joystick), και προς ποια κατεύθυνση κινείται.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

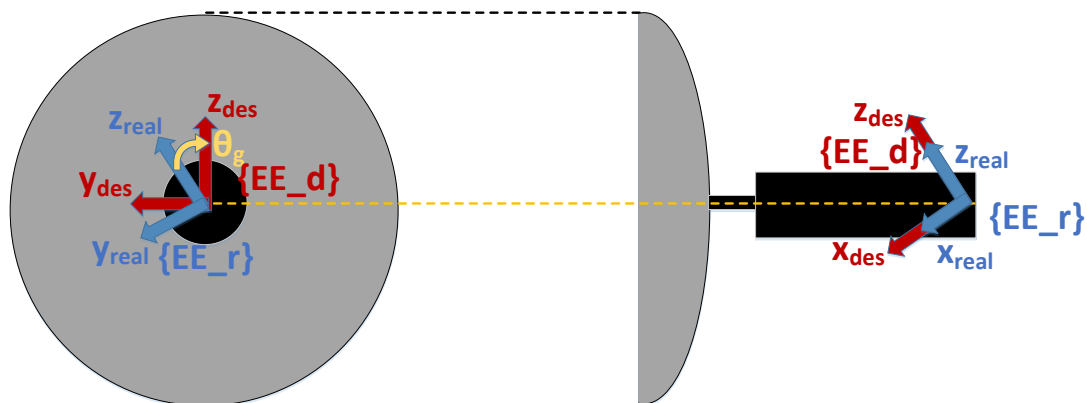
- i. Αρχικά, γίνεται η διαδικασία όπως στο Κεφάλαιο 7.1, για να αναγνωριστεί η θέση και ο προσανατολισμός του ρομποτικού βραχίονα την στιγμή της λαβής.
- ii. Ως επιθυμητό σημείο ορίζεται η θέση του στόχου όπως είναι αυτήν την στιγμή. Έπειτα ξεκινάει η διαδικασία του τηλεχειρισμού.
- iii. Κίνηση κατά τον άξονα- ($y+$) (στην θετική κατεύθυνση) του πλαισίου {F}. Όταν αναπτυχθούν ταχύτητες πάνω από το όριο που έχει τεθεί, το ρομπότ-χειριστής έχει υπερβεί το Dead-Zone. Καταγράφεται το DZ_{y+} (Dead-Zone στην κατεύθυνση $y+$).
- iv. Επιστροφή στην θέση ισορροπίας του joystick (σημείο το οποίο βρίσκεται εντός του Dead-Zone). Ορισμός νέου επιθυμητού σημείου του στόχου, στη θέση που βρίσκεται την δεδομένη στιγμή.
- v. Κίνηση κατά τον άξονα- ($y-$) (στην αρνητική κατεύθυνση) του πλαισίου {F}. Όταν αναπτυχθούν ταχύτητες πάνω από το όριο που έχει τεθεί, το ρομπότ-χειριστής έχει υπερβεί το Dead-Zone. Καταγράφεται το DZ_{y-} (Dead-Zone στην κατεύθυνση $y-$).
- vi. Επιστροφή στην θέση ισορροπίας του joystick. Ορισμός νέου επιθυμητού σημείου του στόχου, στη θέση που βρίσκεται την δεδομένη στιγμή.
- vii. Κίνηση κατά τον άξονα- ($x+$) του πλαισίου {F}. Όταν αναπτυχθούν ταχύτητες πάνω από το όριο που έχει τεθεί, το ρομπότ-χειριστής έχει υπερβεί το Dead-Zone. Καταγράφεται το DZ_{x+} .
- viii. Επιστροφή στην θέση ισορροπίας του joystick. Ορισμός νέου επιθυμητού σημείου του στόχου, στη θέση που βρίσκεται την δεδομένη στιγμή.
- ix. Κίνηση κατά τον άξονα- ($x-$) του πλαισίου {F}. Όταν αναπτυχθούν ταχύτητες πάνω από το όριο που έχει τεθεί, το ρομπότ-χειριστής έχει υπερβεί το Dead-Zone. Καταγράφεται το DZ_{x-} .

- x. Επιστροφή στην θέση ισορροπίας του joystick. Ορισμός νέου επιθυμητού σημείου του στόχου, στη θέση που βρίσκεται την δεδομένη στιγμή.
- xi. Περιστροφή γύρω από άξονα-z (θ_{z+}) του πλαισίου {F}. Όταν αναπτυχθούν ταχύτητες πάνω από το όριο που έχει τεθεί, το ρομπότ-χειριστής έχει υπερβεί το Dead-Zone. Καταγράφεται το $DZ_{\theta_{z+}}$.
- xii. Επιστροφή στην θέση ισορροπίας του joystick. Ορισμός νέου επιθυμητού σημείου του στόχου, στη θέση που βρίσκεται την δεδομένη στιγμή.
- xiii. Περιστροφή γύρω από άξονα-z (θ_{z-}) του πλαισίου {F}. Όταν αναπτυχθούν ταχύτητες πάνω από το όριο που έχει τεθεί, το ρομπότ-χειριστής έχει υπερβεί το Dead-Zone. Καταγράφεται το $DZ_{\theta_{z-}}$.
- xiv. Επιστροφή στην θέση ισορροπίας του joystick. Ολοκλήρωση διαδικασίας
- xv. Τελικά, προκύπτει ως αποτέλεσμα το Dead-Zone,

$$DZ = [DZ_{x+}, DZ_{x-}, DZ_{y+}, DZ_{y-}, DZ_{\theta_{z+}}, DZ_{\theta_{z-}}]$$

7.3 Συσχετισμός Κίνησης Ακροδέκτη & Τροχοφόρου Ρομπότ

Λόγω πιθανών θορύβων κατά τη φάση της προσέγγισης του joystick (κυρίως λόγω της κάμερας και του αλγορίθμου ανίχνευσης του joystick, αλλά και λόγω της παραμόρφωσης και ολίσθησης των δαχτύλων κατά τη λαβή), ο τρόπος με τον οποίο έχει πραγματοποιηθεί η λαβή, δεν συμπίπτει με τον επιθυμητό (Εικόνα 7.1). Αυτό σημαίνει πως ο επιθυμητός τρόπος λαβής μπορεί να συσχετισθεί με τον πραγματικό τρόπο λαβής, μέσω ενός ομογενούς μετασχηματισμού.



Εικόνα 7.1 – Σφάλμα λαβής / Επιθυμητό (d) και πραγματικό (r) πλαίσιο συντεταγμένων ακροδέκτη

Στη γενική περίπτωση ο ομογενής μετασχηματισμός ορίζεται ως ακολούθως (Σχέση 7.6). Ωστόσο, λόγω των ιδιοτήτων του πίνακα περιστροφής R (είναι ορθογώνιος και διατηρεί τα μήκη), ισχύει ο παρακάτω περιορισμός (Σχέση 7.7).

$${}^{EE}T_{EE.d} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & t_x \\ n_y & o_y & a_y & t_y \\ n_z & o_z & a_z & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma & c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma & t_x \\ s_\alpha c_\beta & s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma & t_y \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \left(ZYX \text{ Euler Angles } (\alpha, \beta, \gamma) \right) \quad (7.6)$$

$$\begin{cases} \sqrt{n_x + n_y + n_z} = 1 \\ \sqrt{o_x + o_y + o_z} = 1 \\ \sqrt{a_x + a_y + a_z} = 1 \end{cases} \quad (7.7)$$

Ωστόσο, κατά τη διεξαγωγή του πειράματος έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές:

1. Η λαβή μεταξύ joystick και ακροδέκτη θεωρείται σταθερή (rigid). Αυτό σημαίνει πως το joystick "ακολουθεί" την κίνηση του ακροδέκτη, χωρίς να αλλάζει ο τρόπος της λαβής κατά τη διάρκεια του τηλεχειρισμού.
2. Από τη στιγμή που έχει πραγματοποιηθεί η λαβή, θεωρούμε πως το πραγματικό σημείο λαβής, βρίσκεται σε μια περιοχή κοντά στο επιθυμητό σημείο λαβής. Επειδή, τα σφάλματα, όσον αφορά το σημείο λαβής (x,y,z) , μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα, και μπορούν να αντισταθμιστούν από την υποχωρητικότητα (compliance) των δαχτύλων, τελικά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το επιθυμητό και το πραγματικό σημείο λαβής ταυτίζονται.
3. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει και για το πραγματικό και το επιθυμητό σύστημα συντεταγμένων του ακροδέκτη. Στη γενική περίπτωση, μπορούν να υπάρχουν σφάλματα που αναπαρίστανται με έναν πίνακα περιστροφής. Έτσι το πρόβλημα ανάγεται στην αναζήτηση 3^{ων} παραμέτρων, των γωνιών Euler-ZYX (Σχέση 7.8). Όμως, η γωνία μεταξύ του άξονα-z του ακροδέκτη και του εδάφους, είναι γνωστή και επιβάλλεται μέσω της χρήσης της αντίστροφης κινηματικής κατά τη φάση της λαβής. Έτσι, τελικά το πρόβλημα ανάγεται στην αναζήτηση μιας παραμέτρου – της γωνίας γύρω από τον επιθυμητό άξονα-x του ακροδέκτη (Σχέση 7.9).

Αυτή η γωνία ισοδυναμεί με την γωνία μετασχηματισμού μεταξύ του επιθυμητού πλαισίου $\{F_{desired}\}$ του joystick, και του πραγματικού πλαισίου του joystick $\{F_{real}\}$ στο σημείο λαβής, γύρω από τον z-άξονα.

$${}^{EE}R_{EE.d} = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma & c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma \\ s_\alpha c_\beta & s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

$${}^{EE}R_{EE.d} = \begin{bmatrix} c_{\theta_g} & -s_{\theta_g} & 0 \\ s_{\theta_g} & c_{\theta_g} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

Οπότε για την εύρεση του εν λόγω μετασχηματισμού (της γωνίας γύρω από τον άξονα-z), πρέπει να συλλεχθούν δεδομένα που συσχετίζουν τη θέση του joystick και την ταχύτητα του τηλεχειριζόμενου ρομπότ. Πρέπει να βρεθεί η σχέση μεταξύ των περιστροφών x & y του joystick γύρω από το κέντρο του {C} (σφαιρική άρθρωση), και των γραμμικών ταχυτήτων x & y του τηλεχειριζόμενου ρομπότ. Άρα, πρέπει να συλλεχθούν δεδομένα στην κατεύθυνση x ή y του joystick, όταν όμως το joystick βρίσκεται σε περιοχή εκτός του Dead-Zone. Αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει παράλληλα με την διαδικασία εύρεσης του Dead-Zone. Επιλέγεται να συλλεχθούν δεδομένα όταν το joystick κινείται στις κατευθύνσεις y+ & y-. Όταν οι ταχύτητες υπερβούν το όριο θεωρούμε ότι το joystick έχει υπερβεί το Dead-Zone και αποθηκεύονται οι ταχύτητες που υπολογίστηκαν για το τηλεχειριζόμενο ρομπότ. Το ρομπότ-χειριστής προλαβαίνει να συλλέξει αρκετά δεδομένα, καθώς παραμένει εκτός των ορίων του Dead-Zone για αρκετό χρόνο μέχρι να αναπτυχθούν ικανές ταχύτητες στο τηλεχειριζόμενο ρομπότ (που να ξεπερνούν το όριο/threshold που έχει τεθεί).

Ο συσχετισμός των δεδομένων έγινε με χρήση του υπολογιστικού πακέτου MATLAB και του Optimization Toolbox [45]. Χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση *lsqcurvefit*, που αφορά την μη-γραμμική συσχέτιση δεδομένων, βασισμένη στην μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων (Least Squares Method). Ζητείται η εύρεση της γωνίας θ_g , που ικανοποιεί την παρακάτω εξίσωση (Σχέση 7.10).

$$\min_{\theta_g} \|F(\theta_g, x_{data}) - y_{data}\|_2^2 = \min_{\theta_g} \sum_i \left(F(\theta_g, x_{data_i}) - y_{data_i} \right)^2 \quad (7.10)$$

Τα δεδομένα εισόδου (x_{data}) είναι η θέση του joystick (d_x, d_y), ενώ τα δεδομένα εξόδου (y_{data}) είναι οι ταχύτητες του τηλεχειριζόμενου ρομπότ (v_x, v_y) (Σχέση 7.11).

$$x_{data} = \begin{bmatrix} d_{x_{js}}[0] & d_{y_{js}}[0] \\ \vdots & \vdots \\ d_{x_{js}}[i] & d_{y_{js}}[i] \end{bmatrix}, \quad y_{data} = \begin{bmatrix} v_x[0] & v_y[0] \\ \vdots & \vdots \\ v_x[i] & v_y[i] \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

Η συνάρτηση που επιλέγεται να προσεγγίσει τα δεδομένα παρουσιάζεται παρακάτω (Σχέση 7.12).

$$F(\theta_g, x_{data}) = \begin{bmatrix} d_{x_{js}} \cos(\theta_g) - d_{y_{js}} \sin(\theta_g) \\ d_{x_{js}} \sin(\theta_g) + d_{y_{js}} \cos(\theta_g) \end{bmatrix}^T \quad (7.12)$$

Επιλέγονται όρια (lb, ub) στη γωνία (θ_g), ώστε να προκύψει αποτέλεσμα στο 1° ή 4° τεταρτημόριο (Σχέση 7.13).

$$lb = lower_bound = -\frac{\pi}{2}, \quad ub = upper_bound = \frac{\pi}{2} \quad (7.13)$$

7.4 Μετακίνηση Τροχοφόρου Ρομπότ στην Επιθυμητή Θέση

Το τελευταίο στάδιο που αφορά τον τηλεχειρισμό του τροχοφόρου ρομπότ, είναι η μετακίνηση του από μια αρχική-τυχαία θέση στην τελική επιθυμητή θέση. Χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος από το [38], έτσι ώστε να προκύψουν οι ταχύτητες που πρέπει να επιβληθούν στο χειραγωγούμενο ρομπότ, μέσω του joystick. Γνωρίζοντας το Dead-Zone (**DZ**), τον πίνακα μετασχηματισμού ${}^{EE_r}R_{EE_d}$, και τις ταχύτητες που πρέπει να επιβληθούν στο χειραγωγούμενο ρομπότ V_{pm} , προκύπτει η ακόλουθη σχέση για την θέση στην οποία πρέπει να κινηθεί το joystick (Σχέση 7.14).

$$P_{js} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ \theta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} {}^{EE_r}R_{EE_d} V_{pm} + \begin{bmatrix} DZ_{x(dir_0)} \\ DZ_{y(dir_1)} \\ DZ_{\theta_z(dir_2)} \end{bmatrix}$$

$$with \left((dir_i \rightarrow +) \text{ if } V_{pm_i} > 0 \text{ and } (dir_i \rightarrow -) \text{ if } V_{pm_i} < 0 \right) \text{ for } i = 0, 1, 2 \quad (7.14)$$

Ωστόσο υπάρχουν όρια στην κίνηση του joystick. Πέρα από τα όρια στις αρθρώσεις του joystick, υπάρχουν και όρια που προκύπτουν από τις δυνατότητες του ρομποτικού συστήματος. Σημειώνεται πως το ρομποτικό σύστημα έχει όρια στον συνδυασμό θέσεων και προσανατολισμών που μπορεί να επιτύχει ο ακροδέκτης, ακόμη και αν πρόκειται για redundant ρομποτικό σύστημα. Έτσι, χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση που δεσμεύει το ρομποτικό σύστημα να μετακινεί το joystick σε ένα υποσύνολο του Workspace του (Σχέση 7.15).

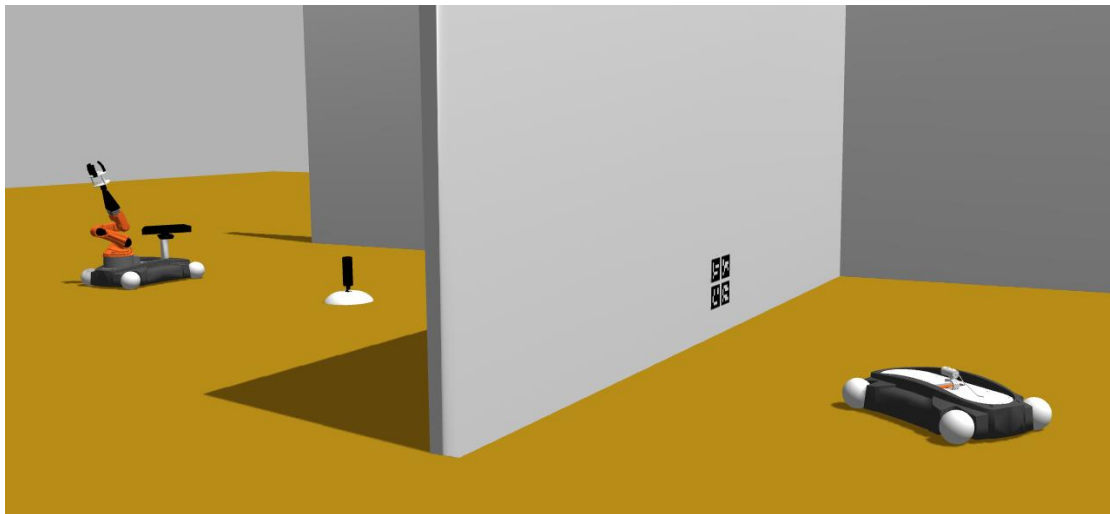
$$if \ |P_{js,i}| > P_{js,limit,i} \rightarrow P_{js,i} = sgn(P_{js,i})P_{js,limit,i} \text{ (for } i = 0, 1, 2) \quad (7.15)$$

Όταν οι ταχύτητες, που πρέπει να επιβληθούν στο χειραγωγούμενο ρομπότ για να φτάσει στην επιθυμητή θέση, πλησιάσουν το μηδέν, σημαίνει πως το ρομπότ έχει φτάσει την επιθυμητή θέση και η διαδικασία πρέπει να λάβει τέλος. Τότε το ρομπότ-χειριστής αφήνει το joystick (τα δάχτυλα του ρομποτικού χεριού απελευθερώνουν το joystick) και απομακρύνεται.

8

Πειραματική Διαδικασία

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν η διάταξη, αλλά και τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Πέρα από το πείραμα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση σε περιβάλλον Gazebo [46]. Η διάταξη της προσομοίωσης φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 8.1). Ωστόσο, στην προσομοίωση υλοποιήθηκε μόνο η προσέγγιση του joystick, λόγω δυσκολιών που υπήρχαν στην υλοποίηση της λαβής και στον χειρισμό του joystick.



Εικόνα 8.1 – Προσομοίωση Gazebo / Διάταξη πειράματος

8.1 Διάταξη

Η διάταξη περιλαμβάνει τα εξής:

- i. Ένα Kuka youBot με ρομποτικό βραχίονα και υποεπενεργούμενο ακροδέκτη 3^{ων} δαχτύλων. Το ρομποτικό αυτό σύστημα λειτουργεί ως χειριστής του τηλεχειριζόμενου ρομπότ. Φέρει αισθητήρα Kinect για την αναγνώριση του joystick, και κάμερα Sony Eye PS3 για τον εντοπισμό της οθόνης.

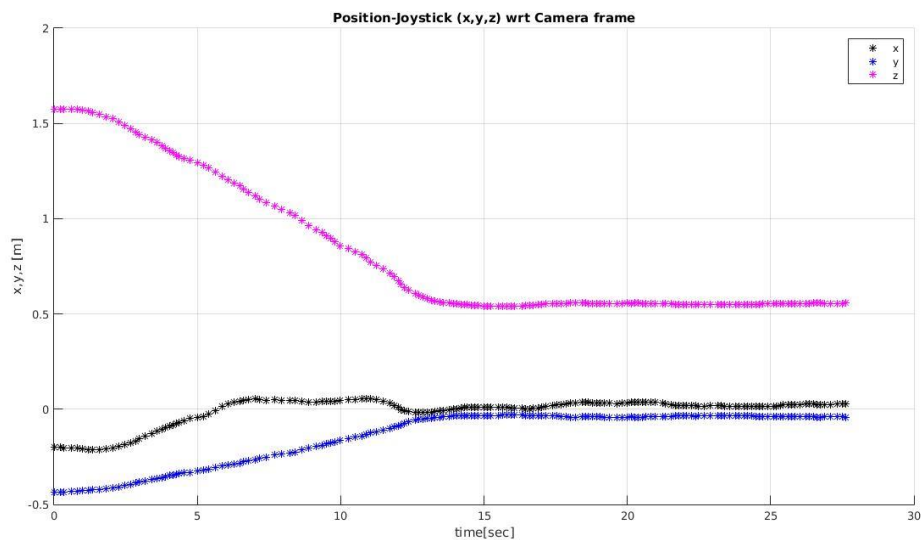
- ii. Ένα Kuka youBot χωρίς ρομποτικό βραχίονα που λειτουργεί ως το τηλεχειριζόμενο ρομπότ. Φέρει κάμερα Microsoft Lifecam Cinema Webcam για την αναγνώριση του στόχου (4-μάρκες).
- iii. Ένα joystick Microsoft Sidewinder Force Feedback 2, που χρησιμοποιείται για να δώσει εντολές ταχύτητας στο τηλεχειριζόμενο ρομπότ.
- iv. Μια οθόνη, με την οποία το ρομπότ-χειριστής βλέπει την εικόνα της κάμερας του τηλεχειριζόμενου ρομπότ και αντιλαμβάνεται τις κινήσεις του.

8.2 Αποτελέσματα

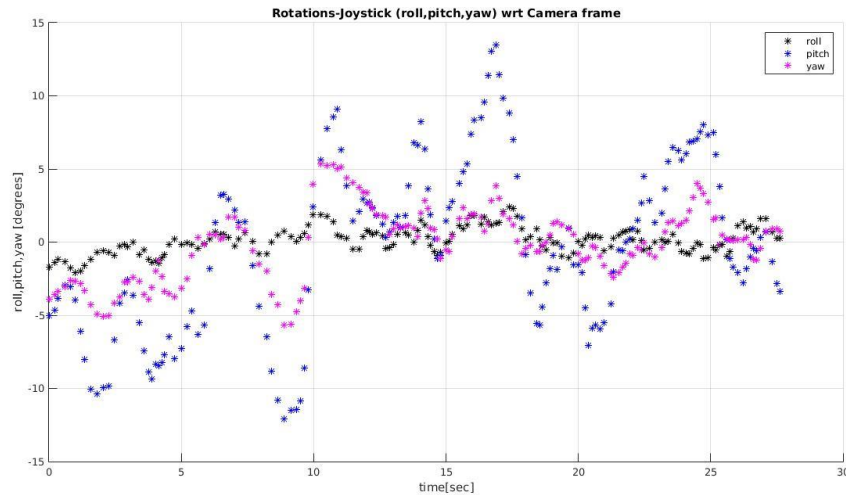
8.2.1 Ανίχνευση / Παρακολούθηση Joystick

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσέγγισης του joystick.

Παρουσιάζεται αρχικά η θέση και ο προσανατολισμός του joystick ως προς την κάμερα κάθε στιγμή (Εικόνα 8.2,8.3). Ουσιαστικά, αλλαγές στην θέση και προσανατολισμό του joystick, σημαίνουν κίνηση της πλατφόρμας του ρομπότ-χειριστή, αφού ο αισθητήρας Kinect είναι στερεωμένος σε σταθερό σημείο πάνω στην πλατφόρμα.



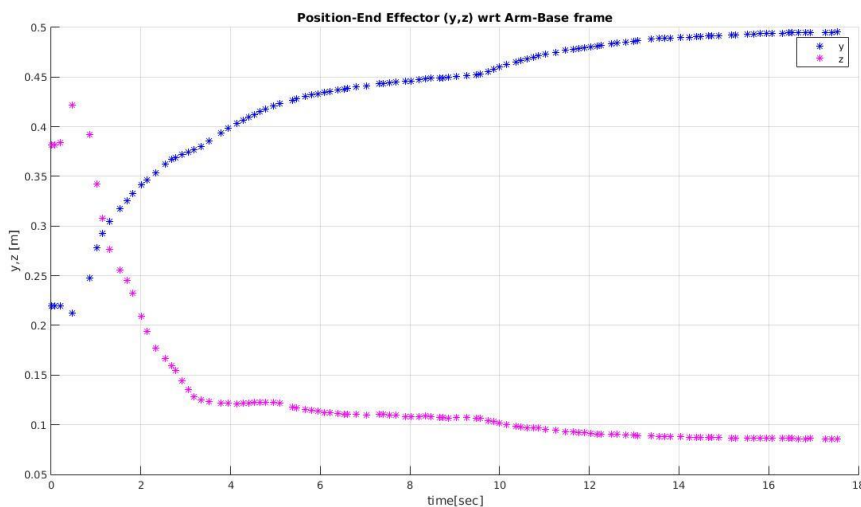
Εικόνα 8.2 – Προσέγγιση Joystick / θέση Joystick ως προς πλαίσιο της Kinect



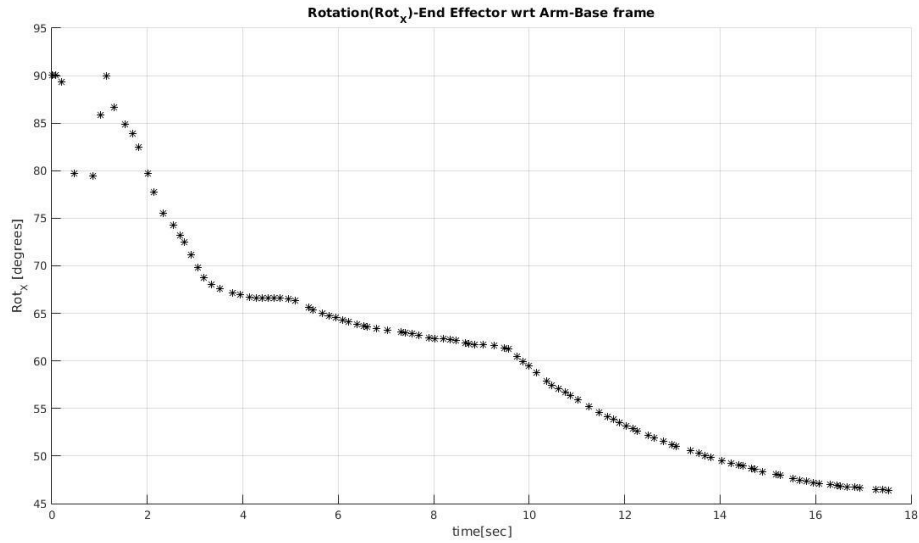
Εικόνα 8.3 – Προσέγγιση Joystick / προσανατολισμός Joystick ως προς πλαίσιο της Kinect

Συμπεραίνεται πως η πλατφόρμα έχει φτάσει την επιθυμητή θέση πριν τα 15sec, ενώ η λαβή έχει πραγματοποιηθεί περίπου στα 28sec, όπου σταματάει και η καταγραφή της θέσης και του προσανατολισμού. Ο προσανατολισμός του joystick ως προς την κάμερα (και άρα ως προς την πλατφόρμα) έχει μεγάλα σφάλματα γύρω από το σημείο ισορροπίας $(roll,pitch,yaw)=(0,0,0)$. Η γωνία pitch, είναι η γωνία γύρω από τον άξονα της κάμερας που πραγματοποιείται η κύρια περιστροφή, γι' αυτό και παρατηρούνται εκεί τα μεγαλύτερα σφάλματα.

Στη συνέχεια φαίνονται τα διαγράμματα για την θέση και τον προσανατολισμό του ακροδέκτη ως προς το πλαίσιο της βάσης του βραχίονα (Εικόνα 8.4,8.5). Όσον αφορά την θέση δεν παρουσιάζεται η x-συντεταγμένη γιατί είναι σταθερή και ίση με μηδέν. Επίσης στον προσανατολισμό δεν παρουσιάζεται η στροφή γύρω από τον z-άξονα (σταθερή και ίση με $\pi/2$) και η στροφή γύρω από τον x-άξονα (σταθερή και ίση με μηδέν).



Εικόνα 8.4 – Προσέγγιση Joystick / θέση ακροδέκτη ως προς πλαίσιο βάσης βραχίονα

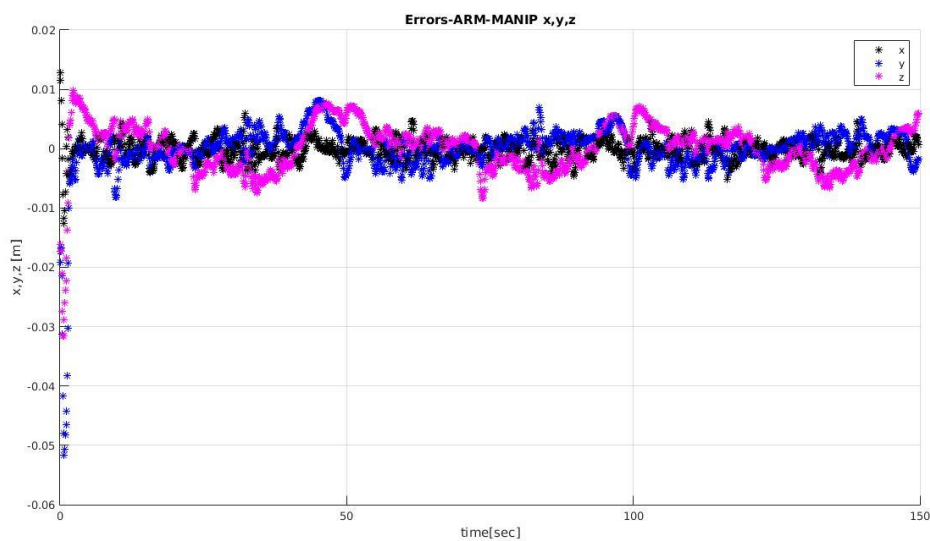


Εικόνα 8.5 – Προσέγγιση Joystick / προσανατολισμός ακροδέκτη ως προς πλαίσιο βάσης βραχίονα

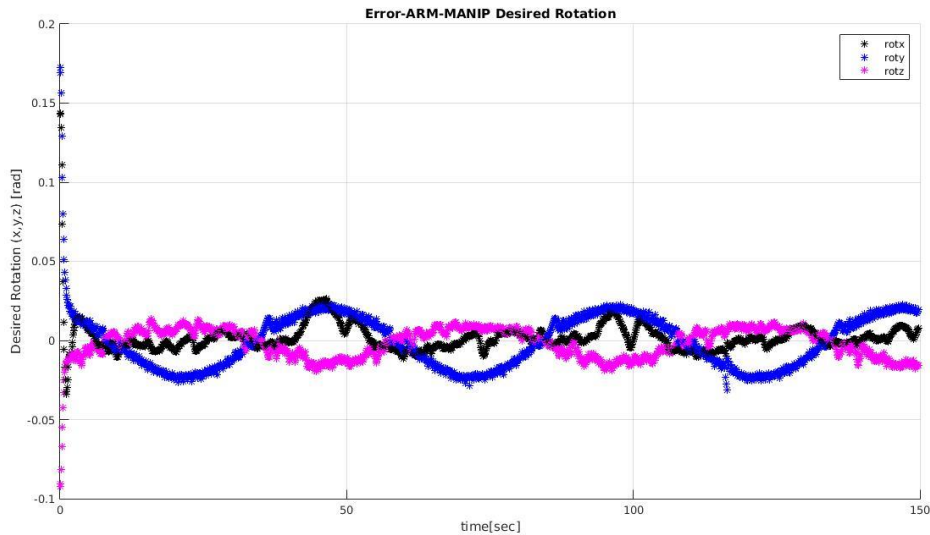
8.2.2 Χειρισμός Joystick & Παρακολούθηση Τροχιάς Ακροδέκτη

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου ακρίβειας που έγινε στο ρομποτικό σύστημα. Το joystick ήταν τοποθετημένο σε κεκλιμένη βάση 45°, αλλά αντίστοιχα ήταν τα αποτελέσματα και για joystick τοποθετημένο στο έδαφος. Η τροχιά προς παρακολούθηση αναφέρθηκε παραπάνω (Κεφάλαιο 7.1).

Αρχικά παρουσιάζονται τα σφάλματα θέσης και προσανατολισμού του ακροδέκτη ως προς το πλαίσιο του κέντρου της πλατφόρμας του ρομπότ-χειριστή (Εικόνα 8.6, 8.7).

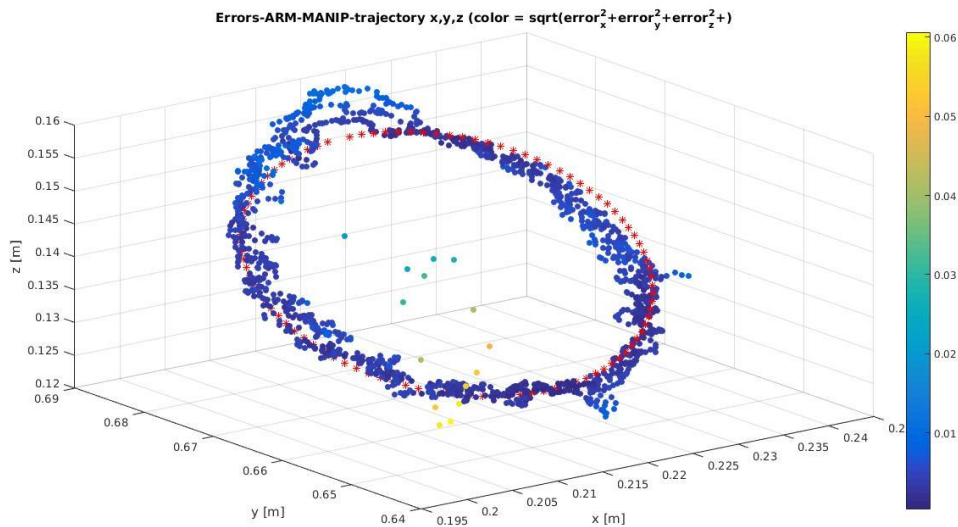


Εικόνα 8.6 – Παρακολούθηση τροχιάς / σφάλμα θέσης ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας



Εικόνα 8.7–Παρακολούθηση τροχιάς/σφάλμα προσανατολισμού ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας

Τέλος παρουσιάζεται η τροχιά του ακροδέκτη στον 3-διάστατο χώρο (Εικόνα 8.8).



Εικόνα 8.8 – Παρακολούθηση τροχιάς / 3D τροχιά ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας

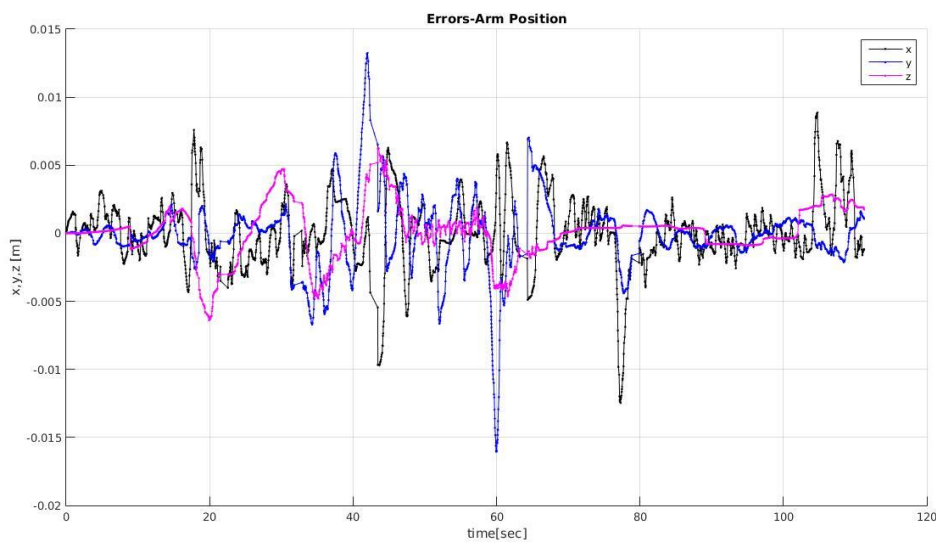
Παρατηρείται πως η παρακολούθηση τροχιάς είναι αρκετά ικανοποιητική. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η επιθυμητή τροχιά που ζητείται να επιτύχει ο ακροδέκτης. Τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται στην εκκίνηση της παρακολούθησης της τροχιάς γιατί ο ακροδέκτης βρίσκεται στο κέντρο του joystick, που είναι μακριά από την επιθυμητή τροχιά. Έγιναν, τρεις πλήρεις κύκλοι για την καταγραφή των παραπάνω διαγραμμάτων.

8.2.3 Νεκρή - Ζώνη Joystick

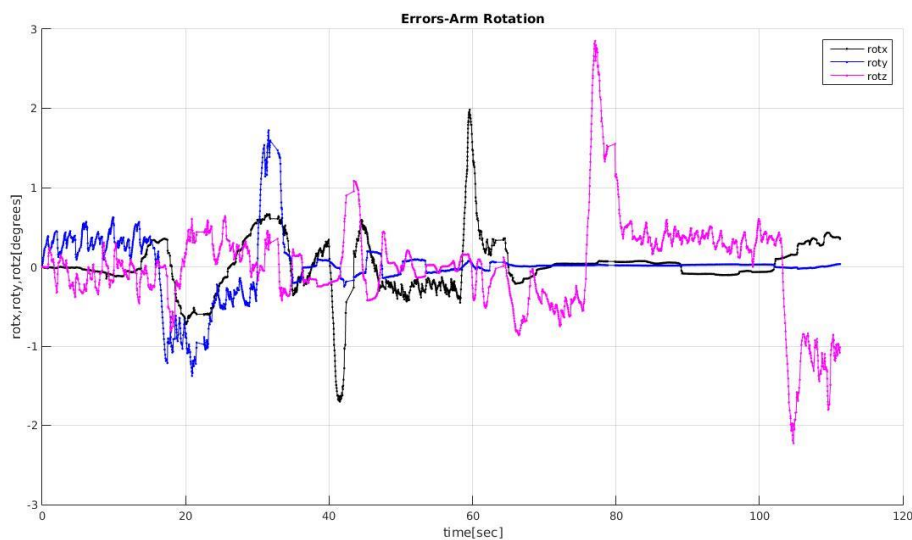
Όσον αφορά την εύρεση του Dead-Zone η διαδικασία διήρκησε περίπου 2min, γιατί οι κινήσεις του ρομπότ-χειριστή ήταν αργές. Αν το ρομπότ-χειριστής κινούνταν γρηγορότερα, θα υπήρχε μεγάλος θόρυβος στην αναγνώριση των ταχυτήτων του τηλεχειριζόμενου ρομπότ. Ακολουθώντας τη διαδικασία που παρουσιάστηκε παραπάνω (Κεφάλαιο 7.2) προέκυψε η ακόλουθη τιμή του Dead-Zone (Σχέση 8.1).

$$DZ = [DZ_{x+} \ DZ_{x-} \ DZ_{y+} \ DZ_{y-} \ DZ_{\theta z+} \ DZ_{\theta z-}] = [1.2 \text{ cm} \ -1.6 \text{ cm} \ 1.6 \text{ cm} \ -1.2 \text{ cm} \ 7^\circ \ -7^\circ] \quad (8.1)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται τα σφάλματα θέσης και προσανατολισμού του ακροδέκτη ως προς το πλαίσιο της πλατφόρμας κατά την εύρεση της Νεκρής-Ζώνης (Εικόνα 8.9-8.10).

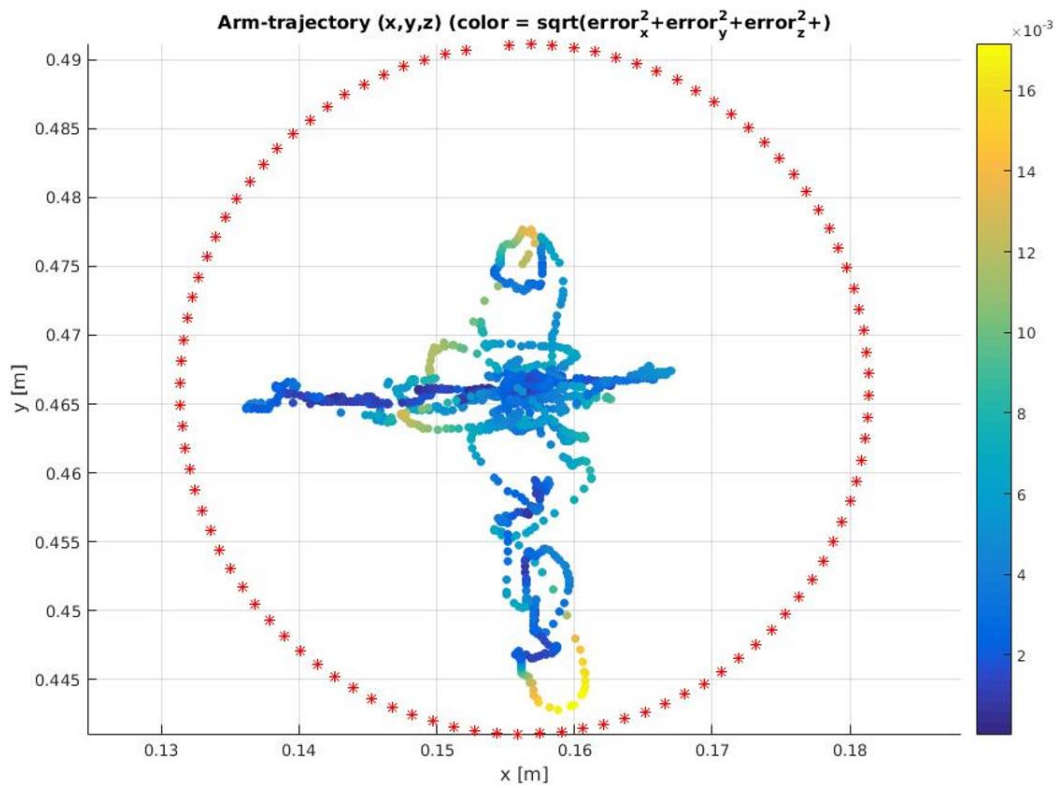


Εικόνα 8.9 – Εύρεση Νεκρής-Ζώνης / σφάλμα θέσης ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας



Εικόνα 8.10–Εύρεση Νεκρής-Ζώνης/σφάλμα προσανατολισμού ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας

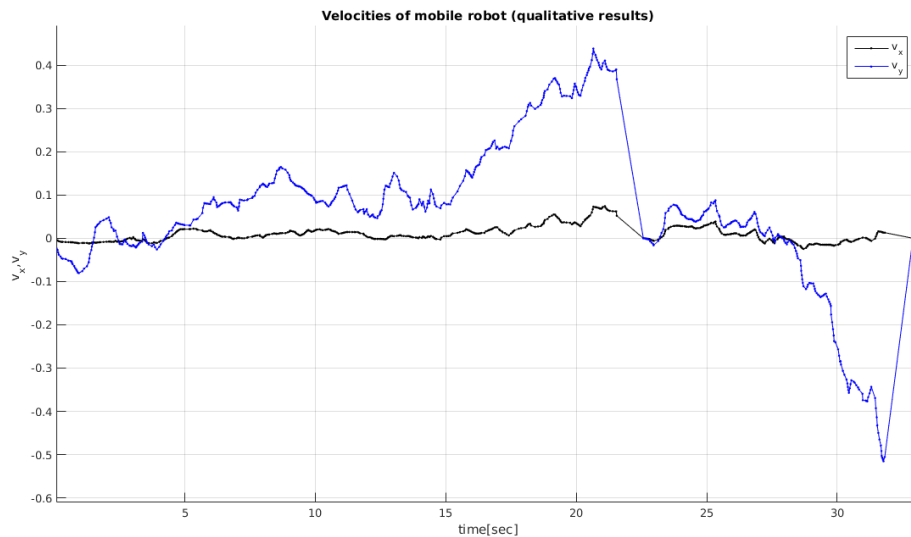
Η τροχιά που διέγραψε ο ακροδέκτης κατά την διαδικασία εύρεσης του Dead-Zone φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 8.11). Με κόκκινο χρώμα φαίνεται το όριο του Workspace στο οποίο επιλέχθηκε να κινείται το ρομπότ-χειριστής.



Εικόνα 8.11 – Εύρεση Νεκρής-Ζώνης / 3D τροχιά ακροδέκτη ως προς πλαίσιο πλατφόρμας

8.2.4 Συσχετισμός Κίνησης Ακροδέκτη & Τροχοφόρου Ρομπότ

Για την εύρεση του μετασχηματισμού μεταξύ του επιθυμητού και του πραγματικού πλαισίου λαβής, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που αναφέρθηκε (Κεφάλαιο 7.3). Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 8.12), οι κινήσεις του τηλεχειριζόμενου ρομπότ, στις κατευθύνσεις x & y , είναι απεμπλεγμένες, αφού με την κίνηση του joystick στις κατευθύνσεις $y+$ & $y-$, παράγονται μόνο ταχύτητες y στο τηλεχειριζόμενο ρομπότ. Μικρές μεταβολές στην ταχύτητα x του τηλεχειριζόμενου ρομπότ, θεωρείται πως παράγονται λόγω θορύβου και άρα θεωρούνται μηδενικές. Έτσι, για το συγκεκριμένο πείραμα προέκυψε πως η παράμετρος $\theta_g = 0^\circ$.

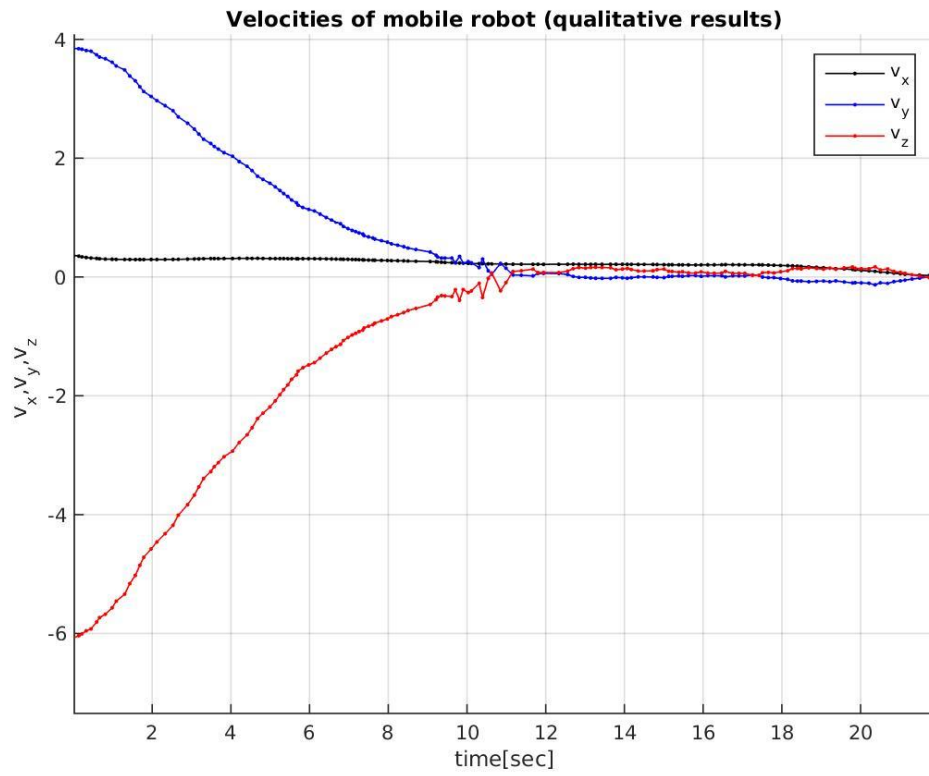


Εικόνα 8.12 – Ταχύτητες τηλεχειριζόμενου ρομπότ κατά την εύρεση του DZ_{y^+} , DZ_{y^-} .

Υπογραμμίζεται πως ενδέχεται πραγματικά η γωνία μετασχηματισμού να μην είναι μηδενική, παρά το αποτέλεσμα της παραπάνω μεθόδου. Αυτό συμβαίνει γιατί λόγω του Dead-Zone, μπορεί η κίνηση κατά τον θεωρητικό y-άξονα του joystick, να επιφέρει μετακίνηση του joystick και κατά τον πραγματικό x-άξονα, αλλά αυτή η κίνηση να μην μεταφράζεται σε ταχύτητα στο τηλεχειριζόμενο ρομπότ, επειδή βρισκόμαστε εντός της νεκρής-ζώνης. Αυτή η περίπτωση δεν ερευνήθηκε περαιτέρω γιατί θεωρείται πως δεν επηρεάζει την ευστάθεια και την ευρωστία του αλγορίθμου, για την μετακίνηση του τηλεχειριζόμενου ρομπότ στην επιθυμητή θέση.

8.2.5 Μετακίνηση Τροχοφόρου Ρομπότ στην Επιθυμητή Θέση

Παρακάτω παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου που αναλύθηκε παραπάνω (Κεφάλαιο 7.4). Το ρομπότ-χειριστής μετακινεί το τηλεχειριζόμενο ρομπότ από μια αρχική-τυχαία θέση στην τελική-επιθυμητή θέση, κάνοντας σύνθετες κινήσεις (χρησιμοποιώντας την ίδια στιγμή όλους τους βαθμούς ελευθερίας του joystick). Το αποτέλεσμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, που δείχνει την μεταβολή των ταχυτήτων του τηλεχειριζόμενου ρομπότ, όπως προέκυψε από τον αλγόριθμο που προτείνεται στο [38] (Εικόνα 8.13). Η διαδικασία διήρκησε περίπου 22sec, και έλαβε τέλος όταν το τηλεχειριζόμενο ρομπότ έφτασε στην επιθυμητή θέση (δηλαδή όταν οι τιμές της ταχύτητας που παρήγαγε ο αλγόριθμος ήταν μικρότερες του ορίου/threshold που είχε τεθεί).



Εικόνα 8.13 – Ταχύτητες τηλεχειριζόμενου ρομπότ / μετακίνηση στην επιθυμητή θέση

9

Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα από την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα εξεταστούν τόσο η θετική, όσο και η αρνητική όψη των αποτελεσμάτων. Έπειτα, θα προταθούν πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις που μπορούν να ερευνηθούν με βάση αυτήν την εργασία.

9.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ερευνήθηκε η δυνατότητα τηλεχειρισμού ρομπότ από άλλο ρομπότ. Ο τηλεχειρισμός έγινε με τη βοήθεια ενός τυπικού joystick, 3^{ov} βαθμών ελευθερίας, και μιας οθόνης που βοηθούσε το ρομπότ-χειριστή να αντιλαμβάνεται τις κινήσεις του τηλεχειριζόμενου ρομπότ. Το συνολικό σύστημα ήταν πλήρως αυτοματοποιημένο και δεν συμπεριελάμβανε ανθρώπινη παρέμβαση σε κανένα σημείο. Μια τέτοια εφαρμογή τηλεχειρισμού δεν είχε ερευνηθεί στην μέχρι πρότινος βιβλιογραφία. Αντίθετα, έχει ερευνηθεί σε πολλές περιπτώσεις η δυνατότητα τηλεχειρισμού ρομπότ από άνθρωπο, αλλά και οι προκλήσεις που εμπεριέχει μια τέτοια εφαρμογή (καθυστέρηση στην εκτέλεση των εντολών, μεταβλητή ανάδραση δύναμης).

Στην παρούσα διπλωματική επιτεύχθηκε αρχικά η ανίχνευση ενός joystick στον χώρο, από στερεοσκοπικό σύστημα Kinect, και η προσέγγιση του από το ρομπότ-χειριστή. Η προσέγγιση έγινε σε μικρό χρονικό διάστημα (<30sec) και έπειτα εκτελέστηκε η λαβή επιτυχώς, με βάση την θεωρητική ανάλυση που είχε προηγηθεί (με μέθοδο Manipulability Ellipsoids). Όσον αφορά τον χειρισμό του joystick, επιτεύχθηκε η εύρεση της νεκρής-ζώνης, παράλληλα με την εύρεση του συσχετισμού της κίνησης του ακροδέκτη με την ταχύτητα του τηλεχειριζόμενου ρομπότ. Η διαδικασία διήρκεσε περίπου 2min. Τέλος έγινε η μετακίνηση του τηλεχειριζόμενου ρομπότ από μια τυχαία-αρχική θέση στην επιθυμητή-τελική θέση, επίσης σε μικρό χρονικό διάστημα (<25sec).

Στην παραπάνω πειραματική διαδικασία η ανάδραση ήταν βασισμένη μόνο σε οπτικά δεδομένα. Ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της λαβής, αλλά και κατά τον χειρισμό του joystick, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ανάδραση δύναμης από το ρομποτικό χέρι (με αισθητήρα Force/Torque στον καρπό, ή προτιμότερα με tactile sensors στα σημεία επαφής των δαχτύλων του χεριού [47]). Επίσης, κατά την διαδικασία εύρεσης της νεκρής-ζώνης η κίνηση του ρομπότ-χειριστή ήταν πολύ αργή. Αυτό συνέβη, επειδή σε αυτήν την φάση ζητούνταν η αναγνώριση πολύ μικρών ταχυτήτων του τηλεχειριζόμενου ρομπότ, και πιο γρήγορες κινήσεις του ρομπότ-χειριστή προκαλούσαν τέτοιο θόρυβο (από τον αλγόριθμο εντοπισμού της οθόνης) που “κάλυπτε” αυτές τις ταχύτητες. Τέλος, όσον αφορά την αναγνώριση του joystick από τον αισθητήρα Kinect, προηγήθηκε της προσέγγισης, διαδικασία αρχικοποίησης για να οριστεί ο στόχος. Στην διαδικασία αρχικοποίησης ο αισθητήρας Kinect πρέπει να είναι σε συγκεκριμένη θέση, γιατί αλλιώς επηρεάζεται η τελική θέση προσέγγισης του ρομπότ-χειριστή.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μεθοδολογία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται τηλεχειρισμός ρομπότ σε περιοχές όπου είναι αδύνατη η ανθρώπινη πρόσβαση. Η γενικότητα της μεθοδολογίας έγκειται στο γεγονός ότι οι παράμετροι που διέπουν το χειραγωγούμενο ρομπότ - εκτός από τους βαθμούς ελευθερίας που δύναται να κινηθεί - είναι άγνωστες. Η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη, έτσι σε περιπτώσεις που ο άνθρωπος δεν δύναται να επιβλέψει την διαδικασία τηλεχειρισμού, το ρομπότ-χειριστής μπορεί να φέρει εις πέρας την συγκεκριμένη εργασία με βάση τους αισθητήρες που διαθέτει.

9.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Ως μελλοντικές επεκτάσεις αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα μπορούσαν να ερευνηθούν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- i. Ανίχνευση και αναγνώριση ενός γενικού τύπου joystick. Χωρίς γνώση του ακριβούς μοντέλου το joystick, αναγνώριση του στον χώρο, κι έπειτα –είτε μέσω οπτικών δεδομένων είτε και μέσω αίσθησης δύναμης– αναγνώριση των κύριων παραμέτρων που το διέπουν (κέντρο του joystick, απόσταση κέντρου με σημείο λαβής, βαθμοί ελευθερίας)
- ii. Κατά τον χειρισμό του joystick, αντί να ευρεθεί ο συσχετισμός επιθυμητής και πραγματικής λαβής ως διαδικασία εύρεσης μιας παραμέτρου (Κεφάλαιο 7.3, 8.2.4), να ευρεθεί στην γενική περίπτωση ως διαδικασία εύρεσης του πλήρους ομογενή μετασχηματισμού.
- iii. Χρησιμοποίηση αισθητήρα δύναμης/ροπής για την εύρεση της κατάλληλης λαβής (όταν τα δάχτυλα συγκρούονται με το joystick, να γίνεται επαναπροσδιορισμός της τροχιάς του ακροδέκτη κατά την λαβή). Εύρεση δύναμης επαναφοράς στο κέντρο του

- joystick, και εύρεση παραμέτρων των δαχτύλων (ελαστικότητα, ολίσθηση). Έλεγχος εμπέδησης (impedance control) με βάση το δυναμικό μοντέλο του joystick.
- iv. Προσαρμοστικός έλεγχος (Adaptive Control) για την εύρεση του μοντέλου επαφής δαχτύλων-joystick (λόγω ελαστικότητας και ολίσθησης δαχτύλων, το μοντέλο ενδέχεται να αλλάζει κατά την διάρκεια του τηλεχειρισμού).
 - v. Προσομοίωση της συγκεκριμένης εφαρμογής σε περιβάλλον που επιτρέπει την μοντελοποίηση ελαστικής επαφής μεταξύ ρομποτικού χεριού και joystick. Μοντελοποίηση της επαφής και των παραμέτρων που τη διέπουν μέσω κατάλληλου δυναμικού μοντέλου.

10

Βιβλιογραφία

- [1] Barrett Technology Inc., Official Website. [Online]. Available: <http://www.barrett.com> [March 2017]
- [2] J. Butterfaß, M. Grebenstein, H. Liu and G. Hirzinger, “DLR-HAND II: Next Generation of a Dextrous Hand” Conference Paper in Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001.
- [3] H. Liu, P. Meusel, G. Hirzinger, M. Jin, Y. Liu and Z. Xie, “The Modular Multisensory DLR-HIT-Hand: Hardware and Software Architecture Mechatronics”, IEEE/ASME Transactions on, pp. 461-469, volume 13, 2008.
- [4] DLR. German Aerospace Center, Official Website. [Online]. Available: <http://www.dlr.de/en> [March 2017]
- [5] L. B. Bridgwater, C. A. Ihrke, M. A. Diftler, M. E. Abdallah, N. A. Radford, J. M. Rogers, S. Yayathi, R. S. Askew, and D. M. Linn, “The robonaut 2 hand-designed to do work with tools”. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'12, pages 3425-3430, 2012.
- [6] Shadow Dexterous Hand, Shadow Robot Company, [Online]. Available: <http://www.shadowrobot.com> [March 2017]
- [7] M. Baril, T. Laliberté, C. Gosselin, and F. Routhier, “On the design of a mechanically programmable underactuated anthropomorphic prosthetic gripper,” Journal of Mechanical Design, vol. 135, no. 12, p. 121008, 2013.
- [8] George P. Kontoudis, Minas V. Liarokapis, Agisilaos G. Zisimatos, Christoforos I. Mavrogiannis and Kostas J. Kyriakopoulos, “Open-Source, Anthropomorphic,

- Underactuated Robot Hands with a Selectively Lockable Differential Mechanism: Towards Affordable Prostheses”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015, pp. 5857–5862.
- [9] Agisilaos G. Zisimatos, Minas V. Liarokapis, Christoforos I. Mavrogiannis, George P. Kontoudis and Kostas J. Kyriakopoulos, “How to Create Affordable, Modular, Light-Weight, Underactuated, Compliant Robot Hands”, Control Systems Lab, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Technical Report, 2015.
- [10] M. G. Catalano, G. Grioli, E. Farnioli, A. Serio, C. Piazza, and A. Bicchi, “Adaptive synergies for the design and control of the pisa/iit soft hand,” The International Journal of Robotics Research, vol. 33, no. 5, pp. 768–782, 2014.
- [11] B. Siciliano and O. Khatib, “Springer handbook of robotics”, Springer, 2008.
- [12] C. W. Kennedy, J. P. Desai, "Modeling and Control of the Mitsubishi PA10 Robot Arm Harmonic Drive System", IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 10, no. 3, pp. 263-274, Jun. 2005.
- [13] Kuka LBR iiwa, KUKA Industrial Robots, [Online]. Available: <https://www.kuka.com> [March 2017]
- [14] Fanuc R-2000 , Fanuc, [Online]. Available: <http://www.fanuc.eu/be/en> [March 2017]
- [15] Pioneer 3-AT , Pioneer 3-DX, Omron Adept, [Online]. Available: <http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots> [March 2017]
- [16] P. F. Muir and C. P. Neuman, “Kinematic modeling for feedback control of an omnidirectional wheeled mobile robot” in Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation , 1987, pp 1772-1778.
- [17] Kuka OmniRob, KUKA Industrial Robots, [Online]. Available: <https://www.kuka.com> [March 2017]
- [18] F. Chaumette and S. Hutchinson, “Visual Servo Control Part I: Basic Approaches,” Robotics & Automation Magazine, IEEE, vol. 13, no. 4, pp. 82–90, 2006.
- [19] F. Chaumette and S. Hutchinson, “Visual Servo Control Part II: Advanced Approaches [tutorial],” Robotics & Automation Magazine, IEEE, vol. 14, no. 1, pp. 109 –118, 2007.
- [20] Telerobotics, In Wikipedia [Online]. Available:

- <https://en.wikipedia.org/wiki/Telerobotics> [March 2017]
- [21] W. K. Yoon, T. Goshozono, H. Kawabe, "Model-based space robot teleoperation of ETS-VII manipulator", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 20, no. 3, pp. 602-612, 2004.
- [22] I. Farkhatdinov, J.H. Ryu, J. An, "A preliminary experimental study on haptic teleoperation of mobile robot with variable force feedback gain," in *Proc. IEEE Haptics Symposium*, Waltham, MA, USA, 2010.
- [23] M. Roa, M. Argus, D. Leidner, C. Borst, and G. Hirzinger, "Power grasp planning for anthropomorphic robot hands," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, may 2012, pp. 563-569.
- [24] Miao Li, Kaiyu Hang, Danica Kragic, Aude Billard, "Dexterous grasping under shape uncertainty", *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 75, Part B, January 2016, Pages 352–364.
- [25] C. I. Mavrogiannis, C. P. Bechlioulis, M. V. Liarokapis, K. J. Kyriakopoulos, "Task-specific grasp selection for underactuated hands", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3676-3681, May 2014.
- [26] L. Birglen, C. M. Gosselin, "Kinetostatic analysis of underactuated fingers", *Robot. Autom. IEEE Trans.*, vol. 20, no. 2, pp. 211-221, 2004.
- [27] Domenico Prattichizzo, Monica Malvezzi, Marco Gabiccini, Antonio Bicchi, "On the manipulability ellipsoids of underactuated robotic hands with compliance" *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60, Issue 3, March 2012, Pages 337–346.
- [28] R. Suárez, M. Roa, and J. Cornella, "Grasp quality measures", *Universitat Politècnica de Catalunya, Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials*, Tech. Rep. IOC-DT-P 2006-10, 2006.
- [29] N. Vahrenkamp, T. Asfour, G. Metta, G. Sandini, R. Dillmann, "Manipulability analysis", *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 568-573, 2012.
- [30] Ekaterina Nikandrova, Ville Kyrki, "Category-based task specific grasping", *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 70, August 2015, pp. 25–35.
- [31] Minas V. Liarokapis, Aaron M. Dollar, Kostas J. Kyriakopoulos, "Humanlike task specific reaching and grasping with redundant arms and low-complexity hands", *Advanced Robotics (ICAR) 2015 International Conference on*, pp. 490-497, 2015.

- [32] T. Yoshikawa, "Manipulability and redundancy control of robotic mechanisms", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1004-1009, 1985.
- [33] P. Chiacchio, S. Chiaverini, L. Sciavicco, B. Siciliano, "Global task space manipulability ellipsoids for multiple arm systems", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 7, pp. 678-685, 1991.
- [34] N. Vahrenkamp, S. Wieland, P. Azad, D. Gonzalez, T. Asfour, and R. Dillmann, "Visual servoing for humanoid grasping and manipulation tasks", in 8th IEEE-RAS Int. Conference Humanoid Robots, 2008, pp. 406 – 412.
- [35] José -Juan Hernández-López, Ana-Linnet Quintanilla-Olvera, José-Luis López-Ramírez, Francisco-Javier Rangel-Butanda, Mario-Alberto Ibarra-Manzano, Dora-Luz Almanza-Ojeda, "Detecting objects using color and depth segmentation with Kinect sensor", Procedia Technology, Volume 3, 2012, Pages 196–204, The 2012 Iberoamerican Conference on Electronics Engineering and Computer Science.
- [36] Willow Garage, "Object Recognition Kitchen," [Online]. Available: http://wg-perception.github.io/object_recognition_core [March 2017]
- [37] J. Kofman, X. Wu, T. J. Luu, and S. Verma, "Teleoperation of a robot manipulator using vision-based human-robot interface," IEEE Trans on Industrial Electronics, vol. 52, pp. 1206-1219, Oct 2005.
- [38] M. Logothetis, "A visual servo control scheme for the tele-operation of a mobile robot via a mobile - manipulator system", Control Systems Lab, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Technical Report, 2016.
- [39] E. Rimon and J. Burdick, "On force and form closure for multiple finger grasps," in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1795-1800, 1996.
- [40] R. S. Hartenberg and J. Denavit, "A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices", Journal of Applied Mechanics, 77:215–221, 1955.
- [41] I. Tsogias, "Kinematic Analysis of a KUKA YouBot", Control Systems Lab, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Technical Report, 2016.
- [42] T. F. Chan and R. Dubey, "A weighted least-norm solution based scheme for

- avoiding joint limits for redundant joint manipulators,” Robotics and Automation, IEEE Transactions on, vol. 11, no. 2, pp. 286–292, 1995.
- [43] Point Cloud Library (PCL), " Tracking object in real time " [Online]. Available: <http://pointclouds.org/documentation/tutorials/tracking.php> [March 2017]
- [44] Arduino, “Open-source electronics prototyping platform based on microcontroller,” [Online]. Available: <http://www.arduino.cc> , [March 2017]
- [45] MATLAB, Mathworks, “High-level language and interactive environment”, [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/products/matlab/> [March 2017]
- [46] Gazebo, “A dynamic multi-robot simulator”, [Online]. Available: <http://gazebosim.org> [March 2017]
- [47] H. Kawasaki, T. Komatsu, and K. Uchiyama, "Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 7, pp. 296-303, 2002.