



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

*Έλεγχος Με Οπτική Ανατροφοδότηση Του Ρομποτικού Βραχίονα
ΚΥΚΑ ΚΡ 15/1 Για Αρπαγή Αντικειμένου Επί Κινούμενης
Μεταφορικής Ταινίας*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΠΑΝΕΤΣΟΥ ΦΩΤΙΟΥ

Επιβλέπων: Κυριακόπουλος Κωνσταντίνος,

Καθηγητής ΕΜΠ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Αθήνα, Ιούλιος 2020



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

***Visual Servoing Control Of The Robotic Manipulation KUKA KR
15/1 And Grasping Of A Moving Object From A Conveyor Belt***

DIPLOMA THESIS

of

PANETSOS FOTIOS

Supervisor: Konstantinos Kyriakopoulos,

Professor NTUA

CONTROL SYSTEM LABORATORY

Athens, July 2020

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες

Περίληψη

Abstract

1. Εισαγωγή

1.1 Ρομποτικοί Βραχίονες	7
1.2 Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης	9
1.3 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	10
1.4 Περιγραφή της Διπλωματικής Εργασίας	11

2. Κινηματική Ανάλυση

2.1 Ευθεία Κινηματική.....	13
2.1.1 Ομογενείς Μετασχηματισμοί.....	13
2.1.2 Μέθοδος <i>Denavit-Hartenberg</i>	14
2.1.3 Εφαρμογή της Μεθόδου <i>D&H</i> στον Βραχίονα KUKA	16
2.2 Διαφορική Κινηματική	17
2.2.1 Υπολογισμός Ιακωβιανής	17
2.2.2 Αντίστροφη Διαφορική Κινηματική	18

3. Κάμερα

3.1 Εισαγωγή	21
3.2 Γεωμετρία Κάμερας Και Προοπτικά Μοντέλα	21
3.3 Διάταξη Συστήματος Όρασης	24
3.4 Βαθμονόμηση Κάμερας	25
3.5 Επεξεργασία Εικόνας	27
3.6 Εκτίμηση Στάσης	30

4. Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης

4.1 Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης με Βάση την Εικόνα (<i>IBVS</i>)	32
4.1.1 Υλοποίηση <i>IBVS</i> Αλγορίθμου με Στάσιμο Αντικείμενο	34
4.2 Αρπαγή Κινούμενου Αντικειμένου από Μεταφορική Ταινία	40
4.2.1 Αλγόριθμος Αντίστροφης Κινηματικής	40
4.2.2 Διακριτό Φίλτρο Kalman	42
4.2.3 Εκτέλεση Πειράματος	43

Βιβλιογραφία

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κυριακόπουλο για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο υπό την επίβλεψή του. Ακόμη, ευχαριστώ όλα τα μέλη του εργαστηρίου, και ιδιαιτέρως τον Γ.Καρρά, για την προθυμία τους να με βοηθήσουν και να με καθοδηγήσουν. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την υποστήριξή τους.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται ο έλεγχος με οπτική ανατροφοδότηση του ρομποτικού βραχίονα *KUKA KR 15/1*. Σε πρώτο στάδιο, εξετάζονται η ευθεία και η διαφορική κινηματική του ρομποτικού βραχίονα με στόχο την ουσιαστική κατανόηση της κίνησής του ως προς το σταθερό σύστημα συντεταγμένων της βάσης, αγνοώντας τις δυνάμεις και τις ροπές που προκαλούν την κίνηση της δομής. Στην συνέχεια, με στόχο την αλληλεπίδραση του ρομποτικού βραχίονα με το περιβάλλον του, προσαρτάται στο τελικό στοιχείο δράσης ένας αισθητήρας όρασης, μια *Webcam PlayStation Eye*. Αφού παρουσιαστούν οι βασικές αρχές λειτουργίας ενός οπτικού αισθητήρα όπως και οι τεχνικές επεξεργασίας της ληφθείσας εικόνας, διερευνάται πειραματικά η δυνατότητα εντοπισμού ενός ακίνητου αντικειμένου (πλακάκι), που βρίσκεται τοποθετημένο στη μεταφορική ταινία. Μετά την επιτυχή ανίχνευση του αντικειμένου, υλοποιείται ένας αλγόριθμος ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης με βάση την εικόνα (*IBVS*), με στόχο την απεικόνιση του αντικειμένου στο κέντρο της εικόνας. Σε μεταγενέστερο στάδιο, το αντικείμενο τίθεται σε κίνηση με σταθερή ταχύτητα πάνω στη μεταφορική ταινία. Στο τελικό στοιχείο δράσης του ρομποτικού βραχίονα προσαρτάται μια αρπάγη, στο πάνω μέρος της οποίας τοποθετείται και η κάμερα. Η σχετική θέση του αντικειμένου ως προς την αρπάγη προσδιορίζεται είτε άμεσα μέσω της όρασης είτε έμμεσα λαμβάνοντας υπόψιν την εκτιμώμενη ταχύτητά του με χρήση ενός διακριτού φίλτρου *Kalman*. Αναπτύσσοντας έναν αλγόριθμο αντίστροφης κινηματικής, η αρπάγη έρχεται στην θέση λαβής και δίνεται εντολή για το κλείσιμό της. Με τον τρόπο αυτό υλοποιείται η αρπαγή του κινούμενου αντικειμένου από τον ρομποτικό βραχίονα *KUKA KR 15/1*.

Abstract

In this work, the visual servo control of the robotic manipulator *KUKA KR 15/1* is studied. At a first stage, the direct and differential kinematics of the manipulator is examined with the aim of understanding the robot motion with respect to the base frame. Afterwards, the interaction of the manipulator with the environment is achieved through a *Webcam PlayStation Eye*, which is mounted on the end effector. Once the perspective model of the camera and the image processing techniques are discussed, the possibility of object detection is investigated. The object is a motionless tile which is placed on the conveyor belt. After the successful feature extraction, an Image-Based visual servoing scheme is designed (*IBVS*). The goal is to position the camera so that it observes the tile as a centered square in the image. At a second stage, the object has a constant velocity on the conveyor belt. The end effector is equipped with a gripper and the webcam is attached to the gripper. The relative pose of the object with respect to the gripper either is obtained directly from the vision data or is estimated by taking into account the velocity of the object with a discrete Kalman filter. With the help of an inverse kinematics algorithm, a trajectory is planned which leads the gripper in an appropriate grasping configuration and, then, the closure of the gripper is commanded.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ρομποτικοί Βραχίονες

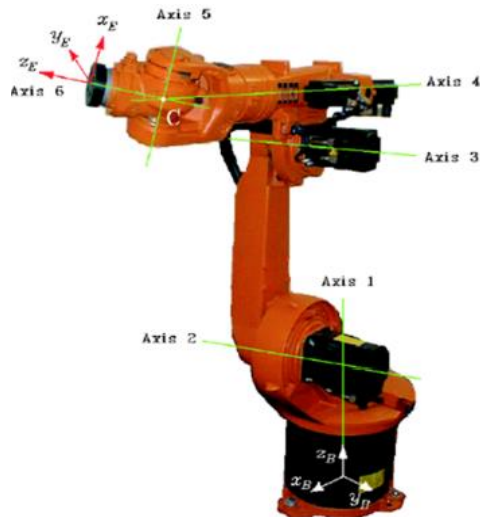
Το κύριο χαρακτηριστικό ενός ρομπότ είναι η μηχανική του δομή. Τα ρομπότ διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από ρομπότ που διαθέτουν σταθερή βάση, τους ρομποτικούς βραχίονες (*robot manipulators*), και η δεύτερη από εκείνα με κινούμενη βάση, τα τροχοφόρα ρομπότ (*mobile robots*).

Οι ρομποτικοί βραχίονες αποτελούνται από μία ακολουθία άκαμπτων συνδέσμων (*links*) που συνδέονται μεταξύ τους μέσω αρθρώσεων (*joints*). Το όλο δόμημα σχηματίζει μία κινηματική αλυσίδα όπου το ένα άκρο της παραμένει ακινητοποιημένο σε μία βάση, ενώ το άλλο συνδέεται με ένα τελικό στοιχείο δράσης ώστε να χειρίζεται αντικείμενα στον χώρο. Το τελευταίο είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση της εργασίας που ανατίθεται στον ρομποτικό βραχίονα και προσαρμόζεται κατάλληλα ανάλογα με το είδος της.

Η βασική δομή ενός βραχίονα είναι η σειριακή ή ανοιχτή κινηματική αλυσίδα, δηλαδή υπάρχει μόνο μία ακολουθία συνδέσμων που ενώνουν τα δύο άκρα της αλυσίδας. Συμπληρωματικά αναφέρεται και η περίπτωση της κλειστής κινηματικής αλυσίδας, όπου μία ακολουθία συνδέσμων σχηματίζει έναν βρόχο.

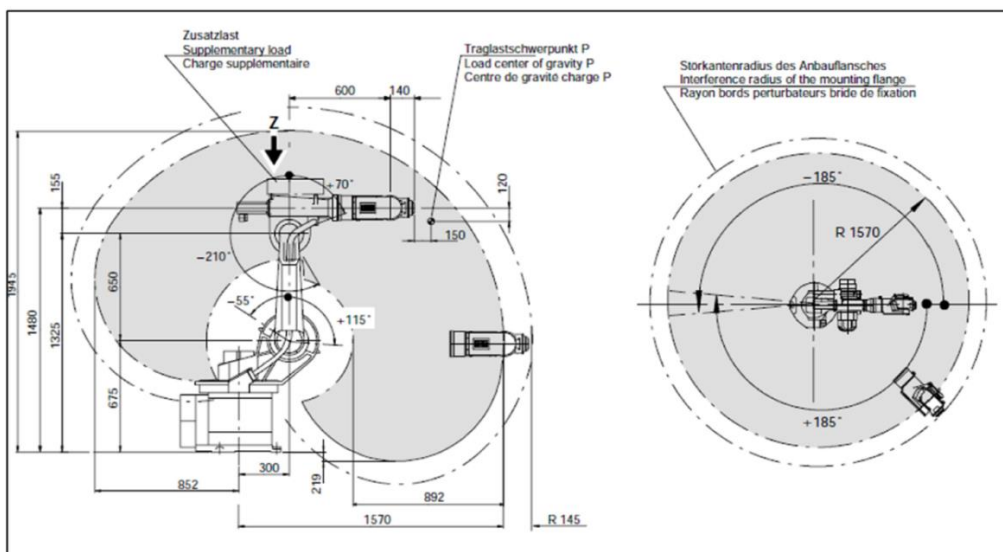
Η δυνατότητα κίνησης ενός βραχίονα εξασφαλίζεται από την παρουσία των αρθρώσεων. Πιο συγκεκριμένα, η σύνδεση μεταξύ δύο διαδοχικών συνδέσμων πραγματοποιείται με τη βοήθεια είτε πρισματικών είτε στροφικών αρθρώσεων. Η πρισματική άρθρωση δημιουργεί μία σχετική μεταφορική κίνηση, ενώ η στροφική μία σχετική περιστροφική κίνηση μεταξύ δύο συνδέσμων. Σε ανοιχτές κινηματικές αλυσίδες, κάθε πρισματική ή στροφική άρθρωση παρέχει στον βραχίονα έναν απλό βαθμό ελευθερίας (*degree of freedom-DOF*). Αντίθετα, σε κλειστές κινηματικές αλυσίδες, ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας είναι μικρότερος από τον αριθμό των αρθρώσεων λόγω των περιορισμών από τον βρόχο. Γενικότερα, για την αυθαίρετη τοποθέτηση και προσανατολισμό του τελικού στοιχείου δράσης στον τρισδιάστατο (*3D*) χώρο, απαιτούνται 6 βαθμοί ελευθερίας, 3 για την θέση και 3 για τον προσανατολισμό του τελικού στοιχείου δράσης ως προς ένα σύστημα αναφοράς. Αν είναι διαθέσιμοι περισσότεροι *DOF* τότε ο βραχίονας ονομάζεται πλεονάζων.

Ο ρομποτικός βραχίονας *KUKA KR 15/1* αποτελεί μία ανοιχτή κινηματική αλυσίδα με 6 περιστροφικές αρθρώσεις και, κατά συνέπεια, διαθέτει $n = 6$ βαθμούς ελευθερίας, οι οποίοι προσδιορίζουν κατά μοναδικό τρόπο τη θέση και τον προσανατολισμό του. Οι 3 πρώτες στροφικές αρθρώσεις προσδίδουν στον βραχίονα ανθρωπομορφική γεωμετρία, όπως απεικονίζεται στο *Σχήμα 1.1*, καθώς ο άξονας της πρώτης άρθρωσης είναι ορθογώνιος στους άξονες των άλλων δύο, οι οποίοι είναι παράλληλοι. Ως εκ τούτου, λόγω της ομοιότητας με τον ανθρώπινο βραχίονα, η δεύτερη άρθρωση ονομάζεται άρθρωση του ώμου και η τρίτη άρθρωση του αγκώνα.



Σχήμα 1.1 Άξονες Περιστροφής του KUKA KR 15/1

Η ανθρωπομορφική γεωμετρία εξασφαλίζει την δυνατότητα τοποθέτησης του καρπού σε οποιοδήποτε επιθυμητό σημείο του χώρου εργασίας. Ο χώρος εργασίας, δηλαδή το τμήμα του καρτεσιανού χώρου όπου έχει πρόσβαση το τελικό στοιχείο δράσης, είναι προσεγγιστικά ένα τμήμα σφαίρας (Σχήμα 1.2). Ο καρπός του KUKA KR 15/1 είναι υπεύθυνος για τον προσανατολισμό του τελικού στοιχείου δράσης του ρομποτικού βραχίονα. Κατέχει 3 βαθμούς ελευθερίας που παρέχονται από στροφικές αρθρώσεις, καθιστώντας έτσι, εφικτό τον αυθαίρετο προσανατολισμό του στον τρισδιάστατο χώρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι 3 στροφικές αρθρώσεις του καρπού τέμνονται σε ένα σημείο C (Σχήμα 1.1), σχεδίαση που εφοδιάζει τον καρπό με την υψηλότερη επιδεξιότητα. Χάρη σε αυτήν την σχεδίαση, ο καρπός ονομάζεται σφαιρικός με κύριο χαρακτηριστικό του την αποσύζευξη μεταξύ θέσης και προσανατολισμού του τελικού στοιχείου δράσης. Έτσι, η τοποθέτηση του σημείου τομής ανατίθεται στην ανθρωπομορφική δομή ενώ ο προσανατολισμός του τελικού στοιχείου δράσης καθορίζεται από τον καρπό.



Σχήμα 1.2 Χώρος Εργασίας και Διαστάσεις του KUKA KR 15/1

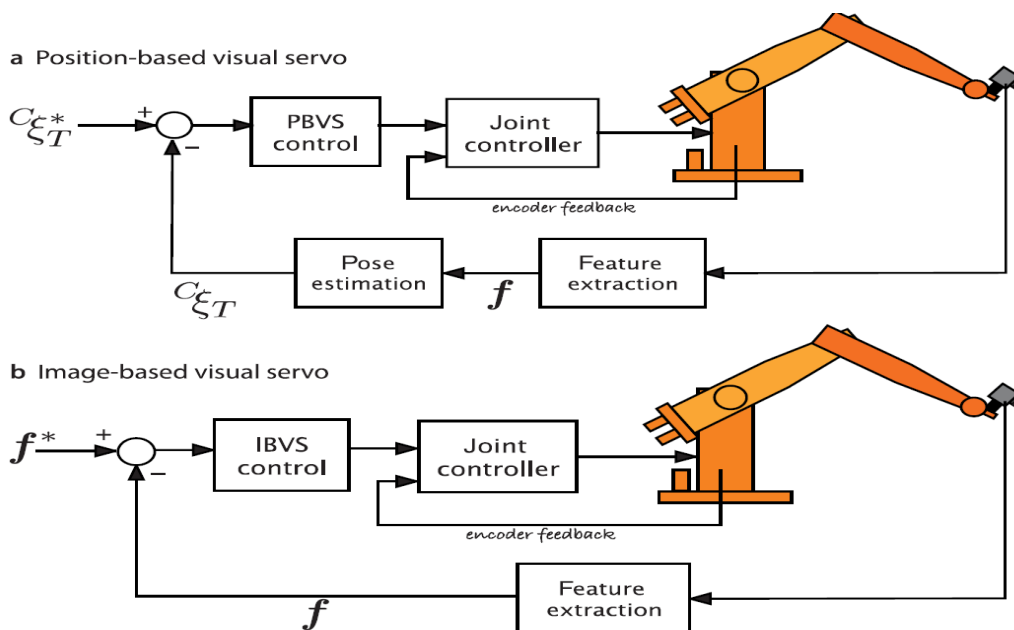
1.2 Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης

Η όραση (*vision*) επιτρέπει σε ένα ρομποτικό σύστημα να αποκτήσει γεωμετρικές και ποιοτικές πληροφορίες σχετικές με το περιβάλλον του. Ο έλεγχος οπτικής ανατροφοδότησης (*visual servoing*) βασίζεται στην ανάδραση αυτών των οπτικών μετρήσεων με σκοπό τον σχεδιασμό και τον έλεγχο της κίνησης ενός ρομπότ. Ο κύριος στόχος ενός ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης είναι να ελαχιστοποιήσει ένα σφάλμα, το οποίο ορίζεται ως εξής :

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

Στην Εξίσωση 1.1, το διάνυσμα $m(t)$ περιλαμβάνει τις μετρήσεις στην εικόνα, δηλαδή τις συντεταγμένες $pixels(u, v)$ στο επίπεδο της εικόνας των σημείων ενδιαφέροντος. Αυτές οι μετρήσεις αξιοποιούνται για τον υπολογισμό ενός διανύσματος k οπτικών χαρακτηριστικών (*visual features*), $s(m(t), a)$, όπου a μια σειρά από παραμέτρους που αντιπροσωπεύουν ενδεχόμενη επιπρόσθετη πληροφορία για το σύστημα, όπως οι εγγενείς παράμετροι της κάμερας και η γεωμετρία του αντικειμένου. Το διάνυσμα s^* περιλαμβάνει τις αντίστοιχες επιθυμητές τιμές των χαρακτηριστικών.

Οι αλγόριθμοι *visual servoing* ποικίλλουν ανάλογα με τον τρόπο που σχεδιάζεται το διάνυσμα s . Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις, ο έλεγχος οπτικής ανατροφοδότησης με βάση την εικόνα (*Image-Based Visual Servoing – IBVS*) και ο έλεγχος με βάση την θέση (*Position-Based Visual Servoing – PBVS*). Στην πρώτη περίπτωση, το διάνυσμα s αποτελείται από χαρακτηριστικά που είναι απευθείας διαθέσιμα από τις μετρήσεις στην εικόνα, ενώ στην δεύτερη, ο έλεγχος βασίζεται στην ανακατασκευή σε πραγματικό χρόνο της σχετικής 'στάσης' του παρατηρούμενου αντικειμένου, σε σχέση με την κάμερα, χρησιμοποιώντας τις οπτικές μετρήσεις. Υπάρχουν επίσης διατάξεις που συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά και των δύο κατηγοριών, και εντάσσονται στον υβριδικό έλεγχο οπτικής ανατροφοδότησης.



Σχήμα 1.3 Οι Δύο Κύριες Διατάξεις Ελέγχου Οπτικής Ανατροφοδότησης

Σε μια αρχική προσέγγιση του ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης, θεωρείται ότι ο τελικός στόχος είναι σταθερός ($\mathbf{s}^* = const$) και το αντικείμενο ακίνητο, άρα οι μεταβολές στο διάνυσμα \mathbf{s} , οφείλονται αποκλειστικά στην κίνηση της κάμερας. Από την στιγμή που το διάνυσμα \mathbf{s} επιλεχθεί, ο πιο άμεσος τρόπος ελέγχου της κίνησης της κάμερας, είναι η σχεδίαση ενός ελεγκτή ταχύτητας. Η υλοποίηση ενός ελεγκτή ταχύτητας απαιτεί μία σχέση η οποία να συνδέει την χρονική μεταβολή του διανύσματος \mathbf{s} με την ταχύτητα της κάμερας, $\mathbf{v}_c = [u_c \omega_c]^T$, όπου u_c, ω_c η γραμμική και η γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου της κάμερας:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s \mathbf{v}_c \quad (1.2)$$

Ο πίνακας $\mathbf{L}_s \in R^{k \times 6}$ ονομάζεται πίνακας αλληλεπίδρασης (*interaction matrix*) και εξαρτάται γενικά από την τρέχουσα τιμή του διανύσματος \mathbf{s} και από την σχετική 'στάση' του αντικειμένου ως προς την κάμερα.

Επειδή όμως, ο στόχος θεωρείται σταθερός, η μεταβολή του σφάλματος ισούται με :

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{s}} \Rightarrow \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}_e \mathbf{v}_c = \mathbf{L}_s \mathbf{v}_c \quad (1.3)$$

Θεωρώντας σαν είσοδο στον ελεγκτή του ρομπότ την ταχύτητα της κάμερας \mathbf{v}_c και διασφαλίζοντας εκθετική μείωση του σφάλματος, δηλαδή $\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e}$, προκύπτει :

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \mathbf{L}_s^+ \mathbf{e} \quad (1.4)$$

Όπου $\mathbf{L}_s^+ = (\mathbf{L}_s^T \mathbf{L}_s)^{-1} \mathbf{L}_s^T$ ο Moore-Penrose ψευδο-αντίστροφος του πίνακα αλληλεπίδρασης, εφόσον, βέβαια, ο \mathbf{L}_s είναι τουλάχιστον 6^{ου} βαθμού. Ωστόσο, στην πράξη, δεν είναι εφικτό να υπολογιστεί με απόλυτη ακρίβεια ο πίνακας αλληλεπίδρασης παρά μόνο μία εκτίμησή του. Τελικά, ο νόμος ελέγχου είναι :

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \widehat{\mathbf{L}_s^+} \mathbf{e} \quad (1.5)$$

1.3 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι διμερής. Σε πρώτο στάδιο διερευνάται η δυνατότητα εντοπισμού ενός αντικειμένου, το οποίο είναι ακίνητο πάνω στη μεταφορική ταινία. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος ελέγχου οπτικής ανατροφοδότησης με βάση την εικόνα, που λαμβάνεται από μια *Webcam PlayStation Eye*, με ζητούμενο την απεικόνιση του αντικειμένου στο κέντρο της εικόνας. Στο δεύτερο μέρος, το αντικείμενο τίθεται σε κίνηση με σταθερή ταχύτητα πάνω στη μεταφορική ταινία. Η θέση του αντικειμένου υπολογίζεται μέσω της όρασης ή εκτιμάται με χρήση ενός φίλτρου *Kalman* όταν το αντικείμενο χαθεί από το οπτικό πεδίο της κάμερας. Ο ρομποτικός βραχίονας *KUKA KR 15/1*, στο τελικό στοιχείο δράσης του οποίου είναι προσαρτημένη η αρπάγη, καλείται να απομακρύνει το αντικείμενο από την μεταφορική ταινία με τη βοήθεια ενός αλγόριθμου αντίστροφης κινηματικής.

1.4 Περιγραφή της Διπλωματικής Εργασίας

Ο έλεγχος της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα προϋποθέτει την γνώση, σε κάθε χρονική στιγμή, της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού στοιχείου δράσης του. Ως εκ τούτου, κρίνεται σκόπιμο να αναλυθεί αρχικά η κινηματική του ρομποτικού βραχίονα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η ευθεία κινηματική, η οποία συνδέει τη θέση και τον προσανατολισμό του τελικού στοιχείου δράσης με τις μεταβλητές των 6 περιστροφικών αρθρώσεων του ρομπότ. Έτσι, προσδιορίζεται ο ομογενής μετασχηματισμός από το σύστημα συντεταγμένων της βάσης, στο σύστημα του τελικού στοιχείου δράσης. Ο υπολογισμός του πίνακα αυτού, πραγματοποιείται με χρήση της βελτιωμένης μεθόδου *Denavit-Hartenberg*, αξιοποιώντας, παράλληλα, τα γεωμετρικά στοιχεία του βραχίονα τα οποία δίνονται στα εγχειρίδια της *KUKA*.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η ευθεία διαφορική κινηματική, η οποία, κατ' αντιστοιχία δίνει τη σχέση μεταξύ των ταχυτήτων των αρθρώσεων και της γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας του τελικού σημείου δράσης. Η σχέση αυτή περιγράφεται μέσω ενός βασικού 'εργαλείου', της γεωμετρικής Ιακωβιανής. Για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, μελετάται και το αντίστροφο πρόβλημα, δηλαδή η εύρεση των απαιτούμενων ταχυτήτων των αρθρώσεων με δεδομένη την ταχύτητα του τελικού στοιχείου δράσης.

Έπειτα, με την βοήθεια της κάμερας, καθίσταται εφικτή η αλληλεπίδραση του βραχίονα με το περιβάλλον του. Η κάμερα είναι τοποθετημένη πάνω στην αρπάγη, διάταξη η οποία επιτρέπει στην κάμερα να παρατηρεί το αντικείμενο από πλεονεκτική θέση, με μειονέκτημα, όμως, τον θόρυβο στις μετρήσεις, λόγω της κίνησης του βραχίονα. Για τον εντοπισμό του αντικειμένου, είναι αναγκαία η επεξεργασία της εικόνας ούτως ώστε να διακριθεί το αντικείμενο από το φόντο. Το προς αρπαγή αντικείμενο είναι ένα πλακάκι λευκού χρώματος, γεγονός που δικαιολογεί την κατάτμηση της εικόνας με βάση την φωτεινότητα των pixels. Με αυτόν τον τρόπο, εξάγονται οι ελεγχόμενες μεταβλητές, δηλαδή το διάνυσμα των χαρακτηριστικών s (*feature extraction*). Έπειτα, οι 2D συντεταγμένες του αντικειμένου στο επίπεδο της εικόνας, σε συνδυασμό με την γνωστή γεωμετρία του στον 3D χώρο, εισάγονται σε έναν αλγόριθμο εκτίμησης στάσης (*pose estimation*). Ο αλγόριθμος αυτός, επιστρέφει την θέση και τον προσανατολισμό του αντικειμένου ως προς την κάμερα. Απαραίτητη προεργασία αποτελεί η βαθμονόμηση της κάμερας για τον υπολογισμό τόσο των εγγενών παραμέτρων, όπως το εστιακό μήκος, όσο και των εξωγενών, οι οποίες συσχετίζουν την θέση της κάμερας ως προς ένα σύστημα συντεταγμένων αναφοράς.

Μετά τον εντοπισμό του αντικειμένου, υλοποιείται ένας αλγόριθμος οπτικής ανατροφοδότησης με βάση την εικόνα (*IBVS*). Το πλακάκι είναι ακίνητο στην μεταφορική ταινία και σκοπός του αλγορίθμου είναι η τοποθέτησή του στο κέντρο της εικόνας. Συνεπώς, οι ελεγχόμενες μεταβλητές είναι οι συντεταγμένες του αντικειμένου στο 2D επίπεδο της εικόνας.

Στην περίπτωση όπου το αντικείμενο κινείται μέσω της μεταφορικής ταινίας, είναι αναγκαία η εκτίμηση της ταχύτητας τους. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται το διακριτό φίλτρο *Kalman*. Έπειτα, μέσω της όρασης, προσδιορίζεται η σχετική θέση του αντικειμένου ως προς την αρπάγη και με βάση την πληροφορία αυτή, σχεδιάζεται ένας αλγόριθμος

αντίστροφης κινηματικής, λαμβάνοντας υπόψιν ταυτόχρονα την εκτιμώμενη ταχύτητα. Όταν η αρπάγη έρθει στην θέση λαβής, δίνεται εντολή για το κλείσιμό της.

Κεφάλαιο 2

Κινηματική Ανάλυση

Η κινηματική ανάλυση της μηχανικής δομής ενός ρομπότ αφορά την περιγραφή της κίνησης ως προς ένα σταθερό καρτεσιανό σύστημα αναφοράς αγνοώντας τις δυνάμεις και τις ροπές που προκαλούν την κίνηση της δομής. Η ανάλυση διαχωρίζεται στην κινηματική και στην διαφορική κινηματική.

2.1 Ευθεία Κινηματική

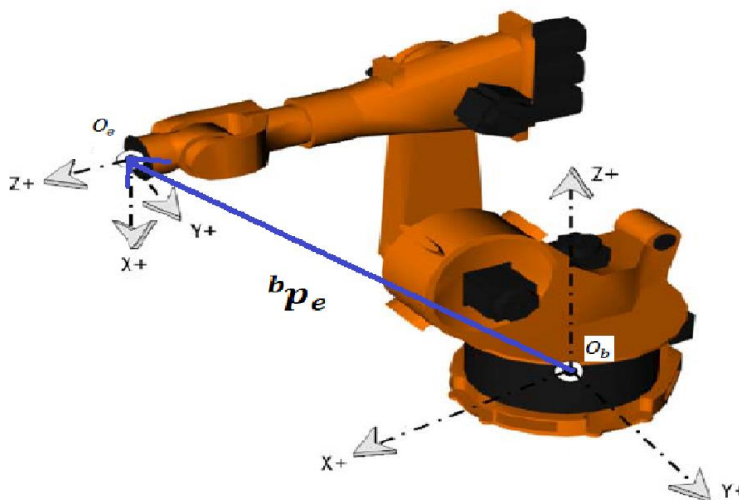
Για τους ρομποτικούς βραχίονες, η κινηματική περιγράφει τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών των αρθρώσεων και της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού στοιχείου δράσης.

2.1.1 Ομογενείς Μετασχηματισμοί

Για την περιγραφή της θέσης και του προσανατολισμού του συστήματος συντεταγμένων, που είναι προσαρτημένο στο τελικό στοιχείο δράσης, ως προς το σύστημα συντεταγμένων της βάσης, είναι απαραίτητη η εύρεση του ομογενούς μετασχηματισμού ${}^bT_e(\mathbf{q})$.

Ο πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού ${}^bT_e(\mathbf{q})$ από το σύστημα συντεταγμένων της βάσης $\{O_b\}$ στο σύστημα συντεταγμένων του τελικού στοιχείου δράσης $\{O_e\}$, ορίζεται ως ο πίνακας 4x4, που περιλαμβάνει τον πίνακα περιστροφής ${}^bR_e(\mathbf{q})$ και το διάνυσμα θέσης ${}^b\mathbf{p}_e(\mathbf{q})$ της αρχής του $\{O_e\}$ ως προς το $\{O_b\}$:

$${}^bT_e(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} {}^bR_e(\mathbf{q}) & {}^b\mathbf{p}_e(\mathbf{q}) \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.1 Συστήματα Συντεταγμένων Βάσης και Τελικού Στοιχείου Δράσης του Ρομποτικού Βραχίονα KUKA KR 15/1

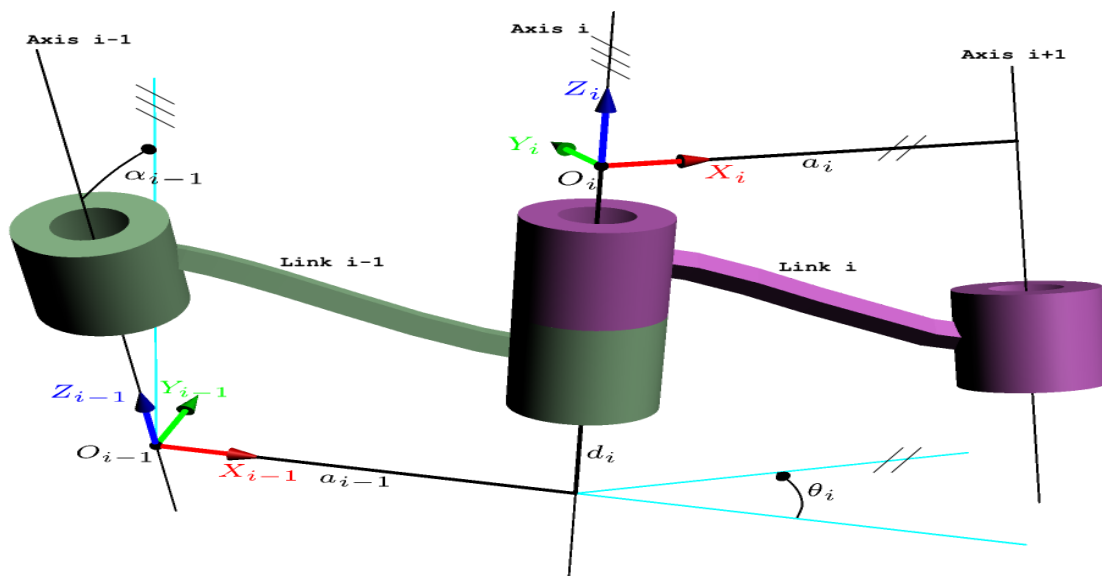
Για την εύρεση μιας συστηματικής διαδικασίας προσδιορισμού της ευθείας κινηματικής, γίνεται εκμετάλλευση της ανοιχτής κινηματικής αλυσίδας του ρομποτικού βραχίονα. Πράγματι, επειδή κάθε άρθρωση συνδέει δύο διαδοχικούς συνδέσμους, είναι λογικό να εξεταστεί πρώτα η περιγραφή της κινηματικής σχέσης μεταξύ δύο διαδοχικών συνδέσμων και στη συνέχεια να υπολογιστεί η όλη περιγραφή της κινηματικής του ρομποτικού βραχίονα κατά τρόπο αναδρομικό. Για τον σκοπό αυτό, είναι αναγκαία η προσάρτηση ενός συστήματος συντεταγμένων σε κάθε σύνδεσμο του ρομποτικού βραχίονα. Τελικά, ο ομογενής μετασχηματισμός που περιγράφει τη 'στάση' του τελικού στοιχείου δράσης ως προς την βάση, προκύπτει από απλά γινόμενα πινάκων ως εξής :

$${}^bT_e(\mathbf{q}) = {}^bT_1(q_1) {}^1T_2(q_2) {}^2T_3(q_3) \dots {}^5T_6(q_6) {}^6T_e \quad (2.2)$$

2.1.2 Μέθοδος Denavit-Hartenberg

Η μέθοδος *Denavit-Hartenberg* αποτελεί μια συστηματική, γενική μέθοδο καθορισμού της σχετικής θέσης και του προσανατολισμού δύο διαδοχικών συνδέσμων. Το πρόβλημα συνίσταται στην εύρεση δύο συστημάτων συντεταγμένων προσαρτημένων στους δύο συνδέσμους και στον υπολογισμό του πίνακα ομογενούς μετασχηματισμού T μεταξύ αυτών.

Στην παρούσα διπλωματική, χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη μέθοδος *D&H (modified D&H)*, η οποία προτάθηκε από μεταγενέστερους ερευνητές και αποτελείται από τα εξής βήματα :



Σχήμα 2.2 Παράμετροι και Συστήματα Συντεταγμένων σύμφωνα με τη Βελτιωμένη Μέθοδο *Denavit – Hartenberg*

1. Εύρεση των παραμέτρων *D&H*

- Με αναφορά στο Σχήμα 2.2, αναγνωρίζονται αρχικά οι άξονες των αρθρώσεων, δηλαδή οι άξονες περιστροφής όταν οι αρθρώσεις είναι στροφικές.

- Υπολογίζονται τα μήκη των συνδέσμων a_{i-1} (*link lengths*), τα οποία ορίζονται ως τα μήκη των κοινών καθέτων των αξόνων. Τα πρώτα και τελευταία μήκη λαμβάνονται ίσα με μηδέν.

$$a_{i-1}, a_i \quad (a_0 = a_6 = 0)$$

- Καθορίζονται οι στρέψεις των συνδέσμων α_{i-1} (*link twists*), δηλαδή οι γωνίες μεταξύ των αξόνων των αρθρώσεων. Οι πρώτες και τελευταίες γωνίες λαμβάνονται ίσες με μηδέν. Έτσι, τα \hat{z}_0 και \hat{z}_1 ταυτίζονται, όπως και τα \hat{z}_6 και \hat{z}_e .

$$\alpha_{i-1}, \alpha_i \quad (\alpha_0 = \alpha_6 = 0)$$

- Υπολογίζονται οι μετατοπίσεις των συνδέσμων (*link offsets*).

$$d_i, (i = 1, \dots, 6)$$

- Καθορίζονται οι γωνίες των αρθρώσεων (*joint angles*).

$$\theta_i, (i = 1, \dots, 6)$$

Οι παράμετροι $a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i$ είναι οι ελάχιστες παράμετροι που περιγράφουν έναν μηχανισμό κατά D&H. Από αυτές, προκειμένου για μία άρθρωση στροφική, οι a_i, α_i, d_i είναι παράμετροι συνδέσμου και η θ_i μεταβλητή άρθρωσης.

2. Προσάρτηση Συστημάτων Συντεταγμένων στους συνδέσμους

Το μοναδιαίο \hat{z}_i τοποθετείται κατά τον άξονα i . Το μοναδιαίο διάνυσμα \hat{x}_i είναι κατά μήκος της κοινής καθέτου των αξόνων $i, i + 1$. Η αρχή του συστήματος συντεταγμένων $\{O_i\}$ λαμβάνεται στην τομή του \hat{x}_i με το \hat{z}_i . Το \hat{y}_i έχει προσανατολισμό τέτοιο ώστε $\hat{z}_i = \hat{x}_i \times \hat{y}_i$.

Αν $\alpha_i = 0$, δηλαδή οι δύο διαδοχικοί άξονες τέμνονται, τότε λαμβάνεται ο άξονας \hat{x}_i κάθετος στο επίπεδο που ορίζεται από τα μοναδιαία $(\hat{z}_i, \hat{z}_{i+1})$. Η αρχή $\{O_i\}$ λαμβάνεται στην τομή των $(\hat{z}_i, \hat{z}_{i+1})$.

3. Εύρεση του ομογενούς μετασχηματισμού ${}^{i-1}T_i$

Ο μετασχηματισμός συντεταγμένων μεταξύ του συστήματος i και $i - 1$ εκφράζεται σύμφωνα με τα επόμενα βήματα :

$${}^{i-1}T_i = ROT_x(\alpha_{i-1}) TRANS(a_{i-1}) ROT_z(\theta_i) TRANS(d_i)$$

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

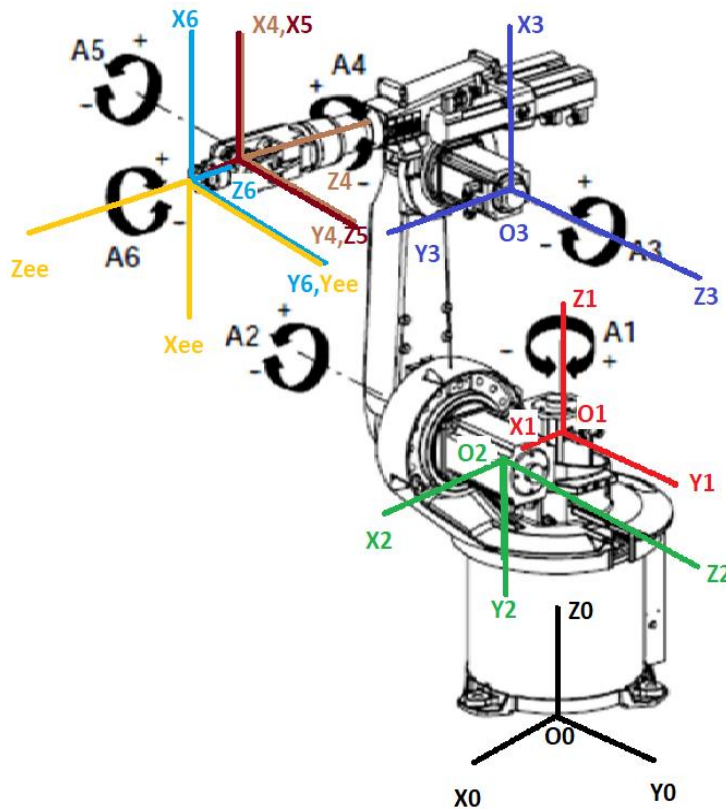
$$\Rightarrow {}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ c\alpha_{i-1}s\theta_i & c\alpha_{i-1}c\theta_i & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\alpha_{i-1}s\theta_i & s\alpha_{i-1}c\theta_i & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.1.3 Εφαρμογή της Μεθόδου D&H στον Ρομποτικό Βραχίονα KUKA

Για την υλοποίηση της μεθόδου, αρχικά, αξιοποιήθηκαν οι διαστάσεις του ρομποτικού χειριστή (Σχήμα 1.2), με σκοπό την εύρεση των μηκών a_{i-1} και των μετατοπίσεων των συνδέσμων d_i . Έπειτα, ακολουθώντας τα προαναφερθέντα βήματα, σχηματίστηκε ο πίνακας παραμέτρων D&H (Πίνακας 1) και προσαρτήθηκαν τα συστήματα συντεταγμένων στους συνδέσμους του βραχίονα (Σχήμα 2.3).

Πίνακας 1. Παράμετροι Denavit – Hartenberg για τον Ρομποτικό Βραχίονα KUKA

i	α_{i-1} (°)	a_{i-1} (m)	d_i (m)	θ_i (°)
1	0	0	0.675	$-\theta_1$
2	-90	0.300	0	θ_2
3	0	0.650	0	$-90+\theta_3$
4	90	0.155	-0.600	θ_4
5	-90	0	0	θ_5
6	90	0	-0.140	θ_6



Σχήμα 2.3 Συστήματα Συντεταγμένων προσαρτημένα στους Συνδέσμους του Ρομποτικού Βραχίονα KUKA

Αξίζει να σημειωθεί το αρνητικό πρόσημο στην πρώτη μεταβλητή άρθρωσης, καθώς η φορά περιστροφής είναι αντίθετη σε σχέση με αυτήν που ορίζει η εταιρία KUKA. Επίσης, η διόρθωση στην 3^η άρθρωση σχετίζεται με την θέση μηδέν που αναγνωρίζει ο ελεγκτής του ρομποτικού χειριστή.

Όσον αφορά τα συστήματα συντεταγμένων της βάσης $\{O_b \equiv O_0\}$ και του τελικού στοιχείου δράσης $\{O_e\}$, είναι καθορισμένα από την KUKA. Το σύστημα συντεταγμένων του τελικού στοιχείου δράσης $\{O_e\}$ προκύπτει μετά από περιστροφή του τελικού συστήματος συντεταγμένων $\{O_6\}$ κατά 180° γύρω από τον άξονα y_6 , δηλαδή :

$${}^6T_e = \begin{bmatrix} & R_{y_6}(180^\circ) & \\ 0 & 0 & 0 \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.2 Διαφορική Κινηματική

Κατ' αναλογία με την ευθεία κινηματική, η οποία συνδέει την θέση και τον προσανατολισμό του τελικού στοιχείου δράσης με τις μεταβλητές των αρθρώσεων \mathbf{q} , η ευθεία διαφορική κινηματική δίνει τη σχέση μεταξύ των ταχυτήτων των αρθρώσεων $\dot{\mathbf{q}}$ και της αντίστοιχης γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας του τελικού στοιχείου. Η σχέση αυτή περιγράφεται από ένα μητρώο, το οποίο ονομάζεται γεωμετρική Ιακωβιανή J_V και εξαρτάται από τη διάταξη του ρομποτικού χειριστή. Ο πίνακας J_V είναι διάστασης $6 \times n$, όπου n οι βαθμοί ελευθερίας.

Η εξίσωση της διαφορικής κινηματικής είναι :

$$\mathbf{V}_E = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_E \\ \boldsymbol{\omega}_E \end{bmatrix} = J_V(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2.5)$$

2.2.1 Υπολογισμός Ιακωβιανής

Σύμφωνα με την γενική μέθοδο, η Ιακωβιανή μπορεί να υπολογιστεί με τρόπο απλό και συστηματικό στηριζόμενοι στις σχέσεις της ευθείας κινηματικής. Αναλυτικότερα, η Ιακωβιανή διαμερίζεται ως εξής :

$$J_V = \begin{bmatrix} J_L \\ J_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{L,1} & \cdots & J_{L,n} \\ J_{A,1} & \cdots & J_{A,n} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

όπου ο J_L ($3 \times n$) αντιστοιχεί στον υποπίνακα της Ιακωβιανής που δίνει την γραμμική ταχύτητα ενώ ο J_A ($3 \times n$) αντιστοιχεί στον υποπίνακα της Ιακωβιανής που δίνει την γωνιακή ταχύτητα. Έτσι, η ταχύτητα του τελικού στοιχείου δράσης ως προς το σύστημα συντεταγμένων της βάσης είναι :

$$\begin{aligned} {}^0\mathbf{v}_E &= {}^0J_{L,1}\dot{q}_1 + \cdots + {}^0J_{L,n}\dot{q}_n \\ {}^0\boldsymbol{\omega}_E &= {}^0J_{A,1}\dot{q}_1 + \cdots + {}^0J_{A,n}\dot{q}_n \end{aligned} \quad (2.7)$$

Κάθε όρος στην *Εξίσωση 2.7*, παριστάνει τη συνεισφορά της ταχύτητας της άρθρωσης i στην γραμμική και γωνιακή ταχύτητα, αντίστοιχα, του τελικού στοιχείου δράσης, όταν όλες οι άλλες αρθρώσεις είναι ακίνητες. Για την περίπτωση των περιστροφικών αρθρώσεων ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} {}^0v_{E,i} &= ({}^0\hat{z}_i \dot{q}_i)^\times {}^0p_E^i = \{({}^0\hat{z}_i)^\times {}^0p_E^i\} \dot{q}_i = {}^0J_{L,i} \dot{q}_i \\ {}^0\omega_{E,i} &= {}^0\hat{z}_i \dot{q}_i = {}^0J_{A,i} \dot{q}_i \end{aligned} \quad (2.8)$$

Επομένως, η γεωμετρική Ιακωβιανή, για $n = 6$ περιστροφικές αρθρώσεις, είναι της μορφής:

$${}^0J_V = \begin{bmatrix} ({}^0\hat{z}_1)^\times {}^0p_E^1 & ({}^0\hat{z}_2)^\times {}^0p_E^2 & \dots & ({}^0\hat{z}_6)^\times {}^0p_E^6 \\ {}^0\hat{z}_1 & {}^0\hat{z}_2 & \dots & {}^0\hat{z}_6 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

όπου το ${}^0\hat{z}_i$ δίνεται από την τρίτη στήλη του μητρώου περιστροφής 0R_i , δηλαδή :

$${}^0\hat{z}_i = {}^0R_i \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0R_1(q_1) {}^1R_2(q_2) \dots {}^{i-1}R_i(q_i) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

ενώ για το ${}^0p_E^i$ ισχύει ότι :

$${}^0p_E^i = {}^0p_E - {}^0p_i \quad (2.10)$$

δηλαδή υπολογίζεται από την διαφορά των τετάρτων στηλών των ${}^0T_E, {}^0T_i$ χωρίς βέβαια το τελευταίο στοιχείο που είναι η μονάδα.

2.2.2 Αντίστροφη Διαφορική Κινηματική

Στην περίπτωση της αντίστροφης διαφορικής κινηματικής, το πρόβλημα συνίσταται στον υπολογισμό των απαιτούμενων ταχυτήτων των αρθρώσεων \dot{q} , με δεδομένη μία επιθυμητή ταχύτητα του τελικού στοιχείου δράσης, 0V_E . Θεωρώντας ότι ο πίνακας της Γεωμετρικής Ιακωβιανής 0J_V είναι τετράγωνος 6×6 , οι ταχύτητες των αρθρώσεων μπορούν να προκύψουν μέσω απλής αντιστροφής του Ιακωβιανού μητρώου, εφόσον, βέβαια, αυτό είναι αντιστρέψιμο, δηλαδή :

$$\dot{q} = {}^0J_V(q)^{-1} {}^0V_E \quad (2.11)$$

Για την εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου στον ρομποτικό χειριστή *KUKA*, είναι απαραίτητη η ολοκλήρωση των απαιτούμενων ταχυτήτων των αρθρώσεων ως προς τον χρόνο, καθώς ο controller *KRC1* του *KUKA* δίνει μόνο την δυνατότητα ελέγχου θέσης του ρομπότ. Η ολοκλήρωση μπορεί να γίνει σε διακριτό χρόνο αν χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι. Η απλούστερη τεχνική στηρίζεται στη μέθοδο ολοκλήρωσης του *Euler*. Για δοσμένο διάστημα ολοκλήρωσης Δt , όταν είναι γνωστές οι θέσεις των αρθρώσεων κατά την χρονική στιγμή t_k , οι θέσεις των αρθρώσεων κατά την νέα χρονική στιγμή $t_{k+1} = t_k + \Delta t$ υπολογίζονται από τον τύπο :

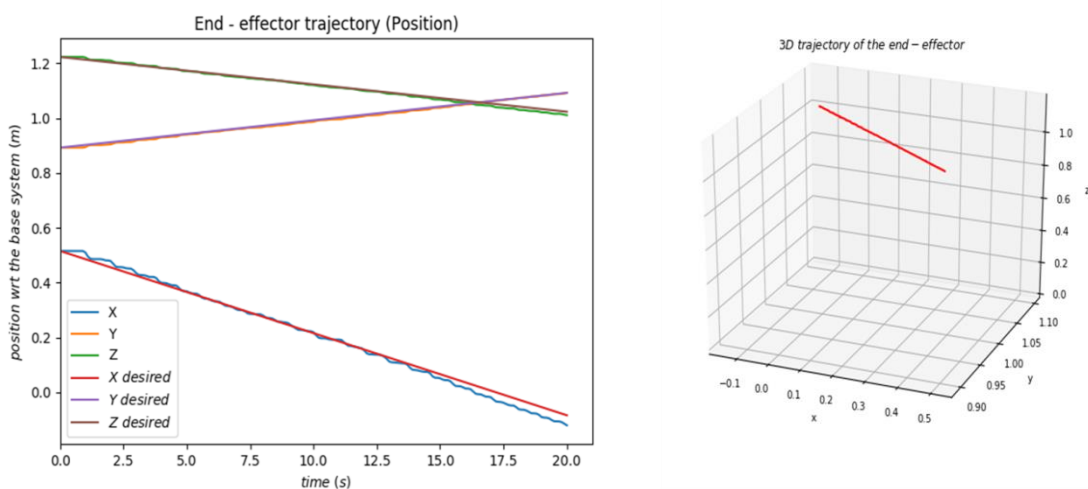
$$\begin{aligned} \mathbf{q}(t_{k+1}) &= \mathbf{q}(t_k) + \dot{\mathbf{q}} \Delta t \\ \Rightarrow \mathbf{q}(t_{k+1}) &= \mathbf{q}(t_k) + {}^0J_V(\mathbf{q}(t_k))^{-1} {}^0\mathbf{V}_E \Delta t \end{aligned} \quad (2.11)$$

Ο αλγόριθμος υλοποιείται θεωρώντας σταθερή γραμμική και μηδενική γωνιακή ταχύτητα του τελικού στοιχείου δράσης ως προς το σύστημα συντεταγμένων της βάσης, έστω, δηλαδή, η επιθυμητή ταχύτητα ${}^0\mathbf{V}_E = [-0.03, 0.01, -0.01, 0.0, 0.0, 0.0]^T$ σε m/s . Προφανώς, η αναμενόμενη τροχιά του τελικού στοιχείου δράσης στον καρτεσιανό χώρο θα είναι ευθεία, δηλαδή:

$$\begin{aligned} {}^b\mathbf{p}_e(\mathbf{q}(t)) &= {}^b\mathbf{p}_e(\mathbf{q}(t=0)) + \mathbf{v}_E t \\ \Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_t &= \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{t=0} + \begin{bmatrix} -0.03 \\ 0.01 \\ -0.01 \end{bmatrix} t \end{aligned} \quad (2.11)$$

όπου ${}^b\mathbf{p}_e$ το διάνυσμα θέσης του τελικού στοιχείου δράσης ως προς την βάση.

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, υπολογίζεται σε κάθε χρονική στιγμή το διάνυσμα ${}^b\mathbf{p}_e$, μέσω ευθείας κινηματικής, από τις μετρούμενες μεταβλητές των αρθρώσεων. Η σύγκριση της μετρούμενης θέσης του τελικού στοιχείου δράσης σε σχέση με την επιθυμητή απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα



Σχήμα 2.4 Τροχιά του Τελικού Στοιχείου Δράσης

Το σφάλμα, το οποίο παρατηρείται, οφείλεται στο γεγονός ότι η ανακατασκευή των μεταβλητών των αρθρώσεων \mathbf{q} ανατίθεται σε αριθμητική ολοκλήρωση, η οποία περιλαμβάνει φαινόμενα μετατόπισης (*drift*) της λύσης. Το γεγονός αυτό, γίνεται ακόμη πιο αισθητό αν ληφθεί υπόψιν η αργή σειριακή επικοινωνία μεταξύ του laptop και του ελεγκτή του βραχίονα. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την στιγμή που διαβάζονται οι τρέχουσες τιμές των αρθρώσεων μέχρι την κίνηση του βραχίονα σύμφωνα με τις νέες απαιτούμενες τιμές, κυμαίνεται μεταξύ 50 – 200 ms. Με χρήση της εντολής `rospy.Rate()` επιλέχθηκε σταθερό Δt ίσο με 100ms. Επίσης, υπάρχει η πιθανότητα να μην επιτευχθεί η

σειριακή επικοινωνία, με αποτέλεσμα το ρομπότ να μείνει στάσιμο μέχρι και 1s. Επιπροσθέτως, οι υπολογιζόμενες μεταβλητές των αρθρώσεων μεταφέρονται στον controller KRC του KUKA σε format .1f (ένα δεκαδικό ψηφίο), γεγονός που επιφέρει σφάλματα στρογγυλοποίησης. Οι μεταβλητές αυτές γεμίζουν έναν *buffer* 6 θέσεων, με βάση τον οποίο ο ελεγκτής του ρομπότ προσχεδιάζει την βέλτιστη τροχιά για τις επόμενες 6 κινήσεις. Ως συνέπεια, υπάρχει μία μικρή καθυστέρηση καθώς η τρέχουσα κίνηση του ρομπότ δεν είναι συγχρονισμένη σε σχέση με την επιθυμητή λόγω της παρουσίας του *buffer*. Όλα τα παραπάνω, έχουν ως αποτέλεσμα η στάση του τελικού στοιχείου δράσης να διαφέρει από την επιθυμητή. Επομένως, ο έλεγχος του ρομπότ μέσω του λάπτοπ δεν είναι ενδεδειγμένος για εργασίες που απαιτούν σημαντική ακρίβεια.

Κεφάλαιο 3

Κάμερα

3.1 Εισαγωγή

Η κάμερα είναι ένας από τους σημαντικότερους εξωτερικοδεικτικούς αισθητήρες ενός βραχίονα. Με τη βοήθεια μίας κάμερας, είναι δυνατός ο εντοπισμός αντικειμένων στον χώρο εργασίας και η μέτρηση χαρακτηριστικών παραμέτρων αυτών των αντικειμένων. Έτσι, καθίσταται εφικτή η αλληλεπίδραση του βραχίονα με το περιβάλλον.

Ο ρόλος της κάμερας ως αισθητήρα όρασης είναι να μετρά την ένταση του φωτός που ανακλάται από ένα σώμα. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ένα φωτοευαίσθητο στοιχείο, που ονομάζεται εικονοστοιχείο – *pixel*, το οποίο είναι ικανό να μετατρέπει την ενέργεια του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Διαφορετικοί τύποι αισθητήρων είναι διαθέσιμοι, ανάλογα με την φυσική αρχή που αξιοποιείται για την πραγματοποίηση της ενεργειακής μετατροπής. Δημοφιλέστεροι είναι οι αισθητήρες CCD (*charge-coupled device*) ή CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*), οι οποίοι βασίζονται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο των ημιαγωγών. Εκτός από τον φωτοευαίσθητο αισθητήρα, η κάμερα διαθέτει ένα κλείστρο, αναλογικά ηλεκτρονικά προ-επεξεργασίας και φακό. Ο φακός είναι υπεύθυνος για την εστίαση του φωτός, που ανακλάται από το αντικείμενο, στο επίπεδο όπου βρίσκεται ο φωτοευαίσθητος αισθητήρας, δηλαδή το επίπεδο της εικόνας.

Στην παρούσα εργασία, η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε είναι η webcam PlayStation eye με ανάλυση 640x480 pixels και FPS (*frames per second*) 60 Hertz.

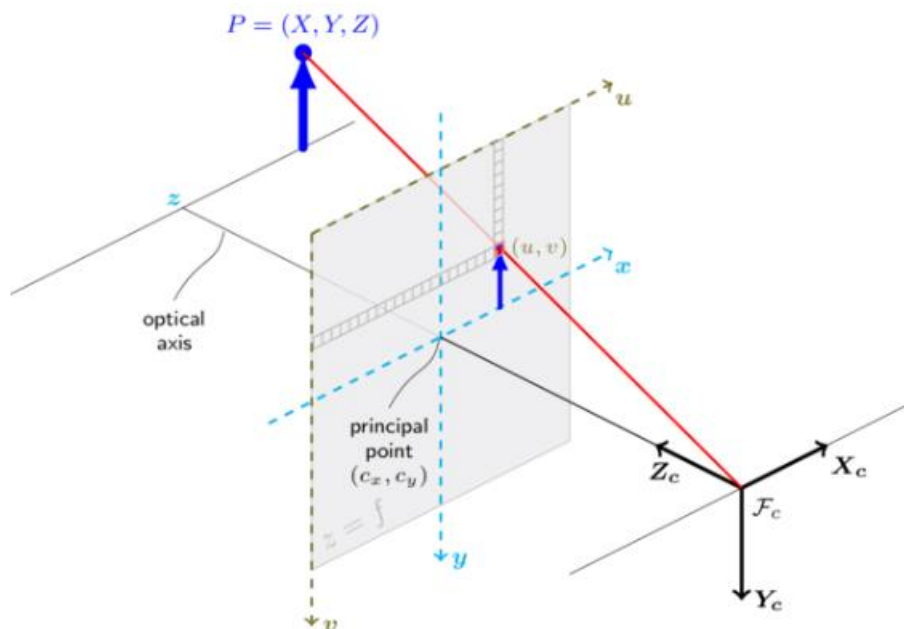


3.1 Webcam PlayStation Eye

3.2 Γεωμετρία Κάμερας και Προοπτικά Μοντέλα

Η διαδικασία σχηματισμού μιας εικόνας με μία κάμερα, εμπεριέχει την προβολή του τρισδιάστατου (3D) χώρου σε ένα δισδιάστατο (2D) επίπεδο. Η προβολή αυτή, η οποία ονομάζεται προοπτικός μετασχηματισμός, έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της πληροφορίας του βάθους. Συνεπώς, δεν είναι δυνατόν να διακριθεί ένα μεγάλων διαστάσεων και μακρινό αντικείμενο από ένα μικρότερο και πλησιέστερο στην κάμερα.

Στην τεχνητή όραση (*computer vision*), χρησιμοποιείται, συνήθως, το μοντέλο του μετωπικού προοπτικού μετασχηματισμού (*central projection model*). Σύμφωνα με αυτό, το επίπεδο της εικόνας θεωρείται ότι βρίσκεται σε απόσταση $z = f$ μπροστά από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων της κάμερας, όπου f το εστιακό μήκος του φακού. Ως συνέπεια, η εικόνα του αντικειμένου, που σχηματίζεται, δεν είναι ανεστραμμένη.



Σχήμα 3.2 Το Μοντέλο του Μετωπικού Προοπτικού Μετασχηματισμού

Με αναφορά στο Σχήμα 3.2, ορίζεται ένα σύστημα συντεταγμένων προσαρτημένο στην κάμερα, όπου ο άξονας Z_c ταυτίζεται με τον οπτικό άξονα της κάμερας. Θεωρείται, επίσης, ένα σημείο P του χώρου με συντεταγμένες (X, Y, Z) ως προς την κάμερα.

Μπορεί να εισαχθεί ένα σύστημα συντεταγμένων στο επίπεδο της εικόνας, του οποίου οι άξονες (x, y) είναι παράλληλοι στους άξονες X_c και Y_c του συστήματος συντεταγμένων της κάμερας, και η αρχή βρίσκεται στο σημείο τομής του οπτικού άξονα με το επίπεδο της εικόνας, δηλαδή στο κύριο σημείο. Το σημείο ${}^cP = (X, Y, Z)$ στο σύστημα συντεταγμένων της κάμερας μετασχηματίζεται σε σημείο $p = (x, y)$ του επιπέδου της εικόνας, με χρήση ομοιότητας τριγώνων, ως εξής :

$$\begin{cases} x = f \frac{X}{Z} \\ y = f \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (3.1)$$

Το σημείο p μπορεί να αναπαραστεί σε ομογενή μορφή $\tilde{p} = (x', y', z')$, όπου :

$$\begin{cases} x' = f \frac{X}{Z'} \\ y' = f \frac{Y}{Z'} \\ z' = Z \end{cases} \quad (3.2)$$

ή σε μορφή πινάκων :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \tilde{\mathbf{p}} &= \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{c} \tilde{\mathbf{P}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Σε πολλές εφαρμογές, είναι βολικότερο, από υπολογιστικής άποψης, να χρησιμοποιούνται οι κανονικοποιημένες συντεταγμένες (x, y) , οι οποίες προκύπτουν θέτοντας $f = 1$, δηλαδή:

$$\begin{cases} x = \frac{X}{Z} \\ y = \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (3.4)$$

Σε μία ψηφιακή κάμερα, το επίπεδο της εικόνας είναι ένα $W \times H$ πλέγμα από φωτοευαίσθητα στοιχεία, τα pixels. Οι συντεταγμένες ενός σημείου στο επίπεδο της εικόνας, εκφρασμένες σε μονάδες pixels, αποτελούν ένα δισδιάστατο διάνυσμα (u, v) από μη αρνητικούς ακέραιους αριθμούς. Λόγω σύμβασης, η αρχή του συστήματος των pixels, βρίσκεται στην πάνω αριστερή γωνία του επιπέδου της εικόνας. Τα pixels είναι περιορισμένων διαστάσεων με συνέπεια οι συντεταγμένες τους να σχετίζονται με τις συντεταγμένες (x, y) σε μετρικές μονάδες, μέσω δύο παραγόντων κλίμακας a_x και a_y (*pixels/length*), ως εξής :

$$\begin{cases} u = a_x x + c_u \\ v = a_y y + c_v \end{cases} \quad (3.5)$$

όπου (c_u, c_v) είναι οι συντεταγμένες του κύριου σημείου σε pixels.

Χρησιμοποιώντας τις ομογενείς συντεταγμένες $\tilde{\mathbf{p}} = [u' \quad v' \quad w']^T$ με $u = \frac{u'}{w'}$, $v = \frac{v'}{w'}$, προκύπτει ο μετασχηματισμός από το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας στο αντίστοιχο της εικόνας (pixels) σε γραμμική μορφή :

$$\tilde{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} f a_x & 0 & c_u \\ 0 & f a_y & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{c} \tilde{\mathbf{P}} \quad (3.6)$$

Γενικότερα, η κάμερα θα έχει μία τυχαία θέση και προσανατολισμό ως προς το σύστημα αναφοράς, η οποία καθορίζεται από τον ομογενή μετασχηματισμό ${}^{cam}T_0$. Συνεπώς, τελικά, θα ισχύει :

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{p}} &= \begin{bmatrix} f a_x & 0 & c_u \\ 0 & f a_y & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} {}^{cam}T_0 {}^0\tilde{\mathbf{P}} \\ &\Rightarrow \tilde{\mathbf{p}} = K P {}^{cam}T_0 {}^0\tilde{\mathbf{P}} \\ &\Rightarrow \tilde{\mathbf{p}} = C {}^0\tilde{\mathbf{P}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

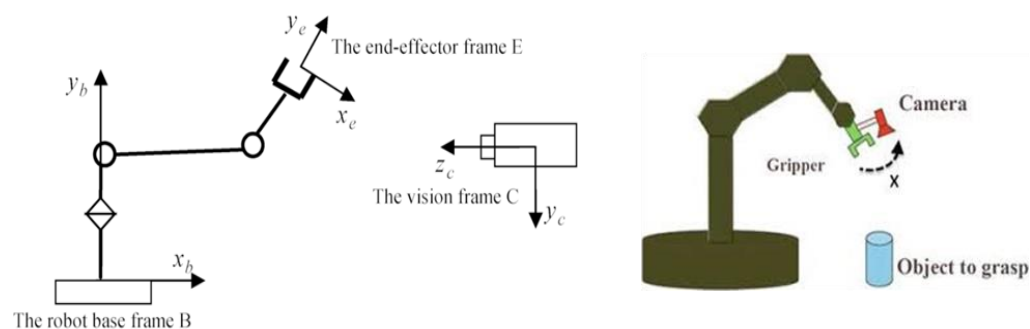
Ο πίνακας C αντιπροσωπεύει το λεγόμενο μητρώο βαθμονόμησης της κάμερας. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα τέτοιο μητρώο περιέχει εγγενείς παραμέτρους $a = (c_u, c_v, a_x, a_y, f)$, οι οποίες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και του φακού, καθώς επίσης και εξωγενείς παραμέτρους ${}^{cam}T_0$, που σχετίζονται με την 'στάση' της κάμερας σε σχέση με το σύστημα αναφοράς.

3.3 Διάταξη Συστήματος Όρασης

Ένα σύστημα όρασης μπορεί να αποτελείται από μόνο μία κάμερα, ή από περισσότερες κάμερες. Όταν χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία κάμερες για να παρατηρηθεί ένα αντικείμενο, είναι δυνατόν να ανακτηθεί πληροφορία για το βάθος του εκτιμώντας την απόσταση του σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας. Αυτή η περίπτωση αναφέρεται σαν τρισδιάστατη όραση (*3D vision*) ή στερεοσκοπική (*stereo vision*).

Αν μόνο μία εικόνα είναι διαθέσιμη, το βάθος μπορεί να εκτιμηθεί με βάση ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου που είναι γνωστά εκ των προτέρων. Συνεπώς, συστήματα μίας κάμερας προτιμώνται συνήθως σε σχέση με τα συστήματα πολλών καμερών, επειδή είναι φθηνότερα και ευκολότερα για βαθμονόμηση που χαρακτηρίζονται από μικρότερη ακρίβεια.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει τα συστήματα όρασης για ρομποτικούς βραχίονες είναι η τοποθέτηση των καμερών. Για συστήματα μίας κάμερας υπάρχουν δύο επιλογές: η σταθερή διάταξη, η οποία αναφέρεται σαν *eye-to-hand*, όπου η κάμερα είναι τοποθετημένη σε μία σταθερή θέση, και η κινούμενη διάταξη, ή *eye-in-hand*, με την κάμερα να είναι προσαρτημένη στο ρομπότ (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Διατάξεις *Eye-to-hand* και *Eye-in-hand*

Στη διάταξη *eye-to-hand*, το σύστημα όρασης παρατηρεί τα αντικείμενα από μία σταθερή 'στάση' σε σχέση με το πλαίσιο της βάσης του ρομποτικού βραχίονα. Το πλεονέκτημα είναι ότι το οπτικό πεδίο της κάμερας δεν αλλάζει κατά την διάρκεια εκτέλεσης της εργασίας, κάτι που σημαίνει ότι η ακρίβεια των μετρήσεων είναι, γενικά, σταθερή. Ωστόσο, σε κάποιες εφαρμογές, όπως η συναρμολόγηση, είναι δύσκολο να αποφύγουμε το γεγονός ότι ο βραχίονας, κινούμενος στο οπτικό πεδίο της κάμερας, εμποδίζει, εν μέρει ή εξ ολοκλήρου, την θέαση των αντικειμένων.

Στη διάταξη *eye-in-hand*, η κάμερα τοποθετείται στον βραχίονα και αυτό μπορεί να γίνει τόσο πριν όσο και μετά τον καρπό. Στην πρώτη περίπτωση, η κάμερα μπορεί να παρατηρεί το τελικό στοιχείο δράσης από μία ευνοϊκή θέση χωρίς τις εμφράξεις που προκαλούνται από τον βραχίονα. Στην δεύτερη περίπτωση, η κάμερα είναι προσαρτημένη στο τελικό στοιχείο δράσης και ουσιαστικά παρατηρεί μόνο το αντικείμενο. Και στις δύο περιπτώσεις, το οπτικό πεδίο της κάμερας μεταβάλλεται σημαντικά κατά την διάρκεια της κίνησης και αυτό παράγει μια υψηλή μεταβλητότητα στην ακρίβεια των μετρήσεων. Ωστόσο, όταν το τελικό στοιχείο δράσης είναι κοντά στο αντικείμενο, η ακρίβεια γίνεται σχεδόν σταθερή και είναι συνήθως υψηλότερη από αυτή που μπορεί να επιτευχθεί από τις κάμερες σε διάταξη *eye-to-hand*, με το πλεονέκτημα ότι οι εμφράξεις ουσιαστικά απουσιάζουν.

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε σύστημα όρασης μίας κάμερας σε διάταξη *eye-in-hand*.



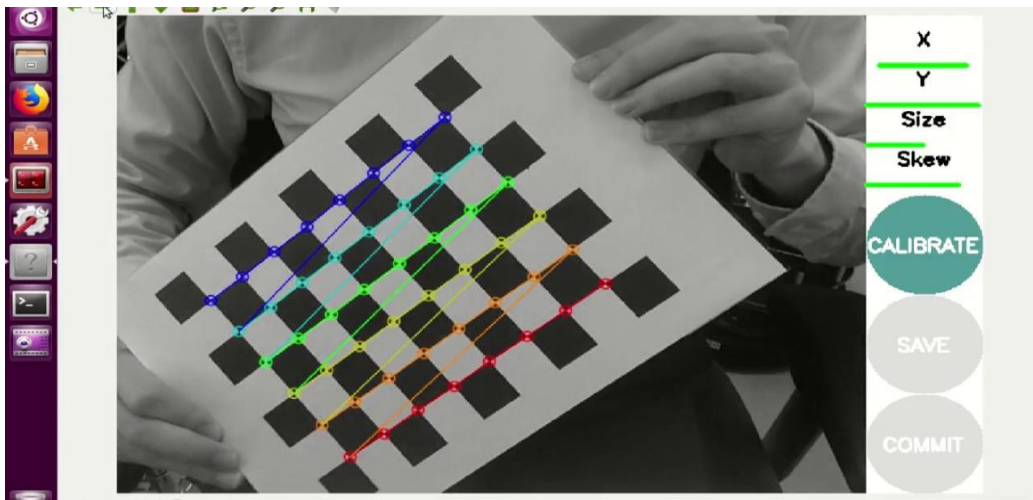
Σχήμα 3.4 Η Webcam PlayStation Eye προσαρτημένη στο Τελικό Στοιχείο Δράσης του Ρομποτικού Βραχίονα KUKA

3.4 Βαθμονόμηση Κάμερας

Ένα σημαντικό πρόβλημα για τις εφαρμογές ελέγχου οπτικής οδήγησης είναι η βαθμονόμηση της κάμερας. Η βαθμονόμηση, όπως προαναφέρθηκε, αποτελείται από τον υπολογισμό των εγγενών παραμέτρων (*intrinsic parameters*), οι οποίες προσδιορίζουν τον

πίνακα K , και των εξωγενών παραμέτρων (*extrinsic parameters*), που προσδιορίζουν την 'στάση' του πλαισίου της κάμερας ως προς το πλαίσιο του τελικού στοιχείου δράσης (για κάμερες σε διάταξη *eye-in-hand*).

Για την εύρεση των εγγενών παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκε μία σκακιέρα γνωστού πλέγματος και γεωμετρίας, καθώς επίσης, και το πακέτο `camera_calibration` του `ros`. Πιο συγκεκριμένα, τρέχοντας τον κόμβο `cameracalibrator.py`, εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο εντοπίζεται η σκακιέρα (Σχήμα 3.5). Στη συνέχεια, με σκοπό να επιτευχθεί μία έγκυρη βαθμονόμηση, ο χρήστης πρέπει να μετακινήσει την σκακιέρα καλύπτοντας όλο το οπτικό πεδίο της κάμερας και όλες τις πιθανές γωνίες. Όταν το κουμπί **CALIBRATE** ανάψει, σημαίνει ότι έχουν συλλεχθεί αρκετά δεδομένα για την βαθμονόμηση της κάμερας.



Σχήμα 3.5 Βαθμονόμηση της Κάμερας με χρήση του ROS

Η παραπάνω διαδικασία οδήγησε στον πίνακα K της Εξίσωσης (3.8):

$$K = \begin{bmatrix} f a_x & 0 & c_u \\ 0 & f a_y & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 770.06 & 0 & 319.61 \\ 0 & 776.22 & 228.35 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Επίσης, η *Webcam PlayStation Eye* διαθέτει μία δεύτερη ρύθμιση με μικρότερο εστιακό μήκος και, κατ' επέκταση, μεγαλύτερο οπτικό πεδίο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο πίνακας K είναι :

$$K = \begin{bmatrix} f a_x & 0 & c_u \\ 0 & f a_y & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 508.37 & 0 & 342.78 \\ 0 & 505.30 & 237.29 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Όσον αφορά τις εξωγενείς παραμέτρους, μετρήθηκε ότι το πλαίσιο της κάμερας προκύπτει μετά από περιστροφή του άξονα Z_e του τελικού στοιχείου δράσης κατά -90° , και μετατόπιση κατά το διάνυσμα θέσης της αρχής του πλαισίου της κάμερας ως προς το σύστημα συντεταγμένων του τελικού στοιχείου δράσης ${}^e t_{cam} = [-0.03 \quad -0.03 \quad 0.090]^T$ σε μέτρα m, δηλαδή :

$${}^eT_{cam} = \begin{bmatrix} R_{z_e}(-90^\circ) & -0.03 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.5 Επεξεργασία Εικόνας

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του ελέγχου οπτικής οδήγησης, συγκρινόμενος με τον έλεγχο π.χ. κίνησης ή δύναμης, είναι το γεγονός ότι οι ελεγχόμενες μεταβλητές δεν μετρούνται από τον αισθητήρα, αλλά αποκτώνται από τις μετρούμενες ποσότητες μέσω μιας πολύπλοκης διαδικασίας, η οποία βασίζεται σε αλγορίθμους επεξεργασίας εικόνας (*image processing*) και όρασης υπολογιστών (*computer vision*).

Αναλυτικότερα, η οπτική πληροφορία, σε αντίθεση με την πληροφορία που παρέχεται από άλλου τύπου αισθητήρες είναι πολύ πλούσια, και έτσι απαιτεί σύνθετους και υπολογιστικά ακριβούς μετασχηματισμούς πριν να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο ενός ρομποτικού συστήματος. Σκοπός της επεξεργασίας εικόνας είναι να δημιουργήσει μία καινούργια εικόνα, αλλάζοντας τα δεδομένα της αρχικής, με τέτοιο τρόπο ώστε οι χαρακτηριστικές ιδιότητες που ενδιαφέρουν τον αναλυτή να βελτιωθούν αφ' ενός, αφ' ετέρου δε να μειώσει τις επιπτώσεις τυχόν θορύβου της αρχικής εικόνας.

Η εικόνα, που προέρχεται από την κάμερα, έχει διαμόρφωση (*format*) RGB. Σε αυτό το *format*, ένα χρώμα περιγράφεται από την ένταση του φωτός στα μήκη κύματος των τριών βασικών χρωμάτων, δηλαδή του κόκκινου (*Red*), του πράσινου (*Green*) και του μπλε (*Blue*). Έτσι, σε κάθε pixel (u, v) αντιστοιχούν 3 συνιστώσες $I_r(u, v)$, $I_g(u, v)$ και $I_b(u, v)$.



Σχήμα 3.6 Τυπική Εικόνα από τον Χώρο Εργασίας του Ρομπότ σε *format* RGB

Για ευκολότερη επεξεργασία της εικόνας (Σχήμα 3.6), επιλέχθηκε η μετατροπή της σε ασπρόμαυρη. Στην περίπτωση της μονόχρωμης εικόνας (Σχήμα 3.7), σε κάθε pixel (u, v) ορίζεται μια αριθμητική τιμή, που βασίζεται στην φωτεινότητά του. Η τιμή αυτή, η οποία αναφέρεται σαν επίπεδο του γκρι (*grey level*), κυμαίνεται από μαύρο, περνάει από διάφορες αποχρώσεις του γκρι και φτάνει ως την τιμή του λευκού χρώματος.

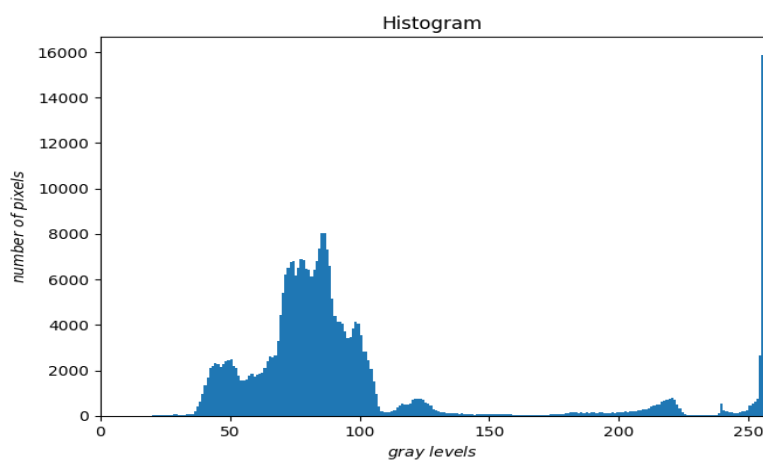
Ο αριθμός των επιπέδων του γκρι εξαρτάται από την υιοθετούμενη ανάλυση της κλίμακας του γκρι. Στην παρούσα περίπτωση, η κλίμακα αποτελείται από 256 επίπεδα γκρι, τα οποία μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα απλό *byte* μνήμης. Επομένως, τα επίπεδα του γκρι είναι κβαντισμένα από $[0 - 255]$, όπου το μηδέν αντιστοιχεί στο μαύρο και το 255 στο λευκό.



Σχήμα 3.7 Ασπρόμαυρη Εικόνα από τον Χώρο Εργασίας του Ρομπότ

Με σκοπό την εύρεση του αντικειμένου, είναι απαραίτητη η κατάτμηση της εικόνας, δηλαδή η διαδικασία μέσω της οποίας η εικόνα χωρίζεται σε ένα συγκεκριμένο αριθμό ομάδων – τμημάτων (*segments*), έτσι ώστε τα περιεχόμενα της κάθε ομάδας να είναι όμοια με βάση ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά.

Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την παραπάνω διαδικασία είναι το ιστόγραμμα του επιπέδου του γκρι, το οποίο περιέχει την συχνότητα εμφάνισης του κάθε επιπέδου του γκρι στην εικόνα. Ουσιαστικά, το ιστόγραμμα είναι ένα διάγραμμα, που έχει ως άξονες τα επίπεδα του γκρι (κβαντισμένα από 0 – 255) και το πλήθος των pixels που έχουν κοινή τιμή φωτεινότητας.



Σχήμα 3.8 Ιστόγραμμα Ασπρόμαυρης Εικόνας

Χρησιμοποιώντας το ιστόγραμμα, είναι δυνατός ο διαχωρισμός της εικόνας σε περιοχές που εμφανίζουν χαρακτηριστικές διαφορές. Προχωρώντας από αριστερά προς τα δεξιά, μπορούν να παρατηρηθούν δύο κύριες κορυφές που αντιστοιχούν στο σκοτεινό φόντο-*background* (μεταφορική ταινία) και το φωτεινότερο αντικείμενο (πλακάκι). Ενδιάμεσα, παρατηρείται και μία μικρή κορυφή, που αντιστοιχεί στο πάτωμα.

Μια πρακτική τεχνική κατάτμησης της εικόνας, είναι η μετατροπή της σε δυαδική (*binary*) μορφή με τη βοήθεια του τελεστή *threshold*. Αναλυτικότερα, ένα ή περισσότερα αντικείμενα, που υπάρχουν στην εικόνα, διαχωρίζονται από το φόντο συγκρίνοντας το επίπεδο του γκρι στο κάθε *pixel* με ένα κατώφλι (*threshold*). Στην παρούσα περίπτωση, όπου υπάρχει ένα φωτεινό αντικείμενο σε σκοτεινότερο φόντο, όλα τα *pixel* με επίπεδο γκρι μεγαλύτερο από ένα κατώφλι θεωρούνται ότι ανήκουν στο αντικείμενο, ενώ όλα τα υπόλοιπα ανήκουν στο φόντο. Λαμβάνοντας υπόψη το ιστόγραμμα, τίθεται ως κατώφλι η τιμή $I = 180$. Συνεπώς, ο τελεστής *threshold* θα έχει την εξής μορφή :

$$dst(u, v) = \begin{cases} 255 \text{ (άσπρο)}, & \text{if } src(u, v) > 180 \\ 0 \text{ (μαύρο)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.11)$$

όπου *dst*, *src* η δυαδική και η μονόχρωμη εικόνα αντίστοιχα.



Σχήμα 3.9 Δυαδική Εικόνα με χρήση του Τελεστή *Threshold*

Στην συνέχεια, με την βοήθεια της συνάρτησης `cv2.findContours` της βιβλιοθήκης `openCV`, εντοπίζονται στην δυαδική εικόνα όλα τα περιγράμματα, δηλαδή τα σύνορα των διαφόρων τμημάτων στα οποία έχει διαχωριστεί η εικόνα. Έπειτα, μέσω της συνάρτησης `cv2.approxPolyDP`, τα περιγράμματα προσεγγίζονται από πολυγωνικές καμπύλες με μικρότερο αριθμό σημείων, ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη καθώς, λόγω θορύβου, είναι δύσκολο να εντοπιστεί ένα τέλειο τετράγωνο.

Για την επιλογή του περιγράμματος που αντιστοιχεί στο πλακάκι, λαμβάνεται υπόψιν ότι το περίγραμμα θα πρέπει να προσεγγίζεται από 4 σημεία, να έχει περίπου ίσες πλευρές και

περίμετρο εντός κάποιων ορίων. Έτσι, εξασφαλίζεται ο εντοπισμός μόνο του προς αρπαγήν αντικειμένου και όχι άλλων φωτεινών περιοχών, όπως το πάτωμα.



Σχήμα 3.10 Περίγραμμα του Αντικειμένου

Τελικά, από την παραπάνω επεξεργασία της εικόνας, είναι εφικτή η εξαγωγή των συντεταγμένων pixels $[u_i, v_i]^T$ των 4 κορυφών του αντικειμένου, οι οποίες θα αποτελέσουν τις ελεγχόμενες μεταβλητές στον αλγόριθμο *visual servoing*.

3.6 Εκτίμηση Στάσης

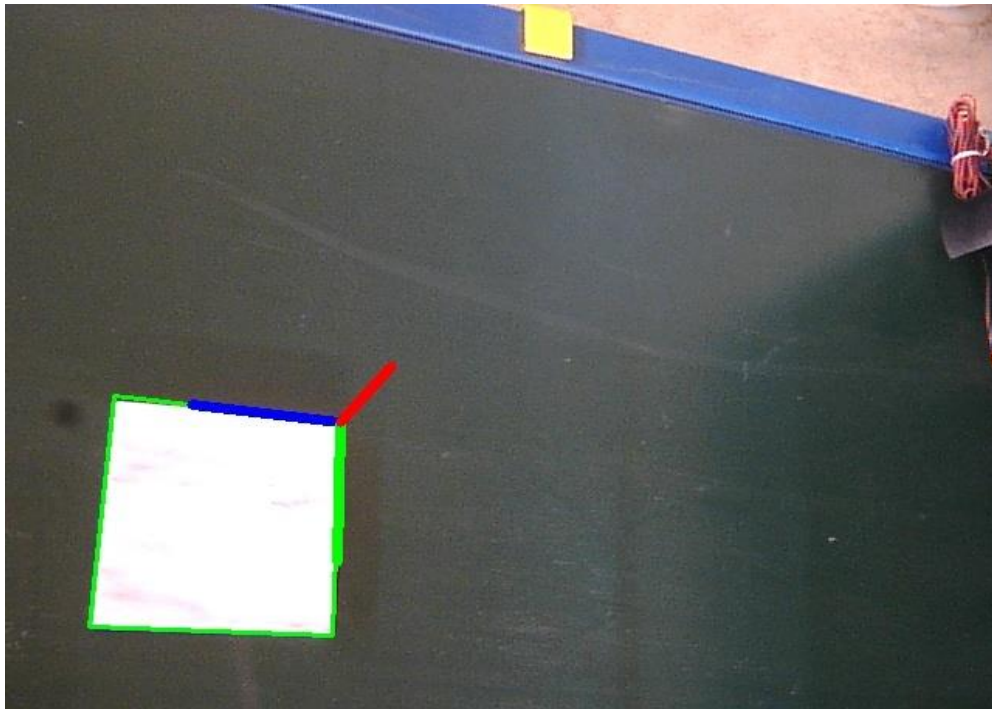
Ένας αλγόριθμος εκτίμησης στάσης (*pose estimation*) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θέσης και του προσανατολισμού ενός αντικειμένου ως προς το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας. Πιο συγκεκριμένα, έστω ένα πλαίσιο $\{O_{obj}\}$ προσαρτημένο στο αντικείμενο, το οποίο υποτίθεται ότι είναι άκαμπτο. Η γεωμετρία του αντικειμένου θεωρείται ότι είναι γνωστή, δηλαδή είναι διαθέσιμα τα διανύσματα θέσης n σημείων του αντικειμένου σε σχέση με την αρχή του $\{O_{obj}\}$. Οι αντίστοιχες προβολές αυτών των σημείων στο επίπεδο της εικόνας δίνονται από την :

$$w_i' \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f a_x & 0 & c_u \\ 0 & f a_y & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^{cam}T_{obj} \begin{bmatrix} {}^{obj}X_i \\ {}^{obj}Y_i \\ {}^{obj}Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Η Εξίσωση 3.12 συνδέει τις γνωστές συντεταγμένες ενός σημείου τόσο στο επίπεδο της εικόνας $[u_i, v_i]^T$ όσο και στο πλαίσιο του αντικειμένου $[{}^{obj}X_i, {}^{obj}Y_i, {}^{obj}Z_i]^T$. Σχηματίζοντας n τέτοιες εξισώσεις για κάθε ένα από τα σημεία του αντικειμένου, ορίζεται ένα σύστημα από την επίλυση του οποίου υπολογίζονται τα άγνωστα στοιχεία του πίνακα ${}^{cam}T_{obj}$. Το πρόβλημα αυτό είναι γνωστό σαν PnP (*Perspective-n-points* ή Προοπτική n σημείων) και η αναλυτική του λύση είναι αρκετά επίπονη. Σε περίπτωση, όμως, όπου τα n σημεία είναι

συνεπίπεδα, δηλαδή ισχύει για παράδειγμα ότι $objZ_i = 0$ για κάθε σημείο, τότε η επίλυση του προβλήματος γίνεται απλούστερη.

Το αντικείμενο, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική, είναι ένα τετράγωνο πλακάκι πλευράς $15cm$. Για την εύρεση της 'στάσης' του ως προς την κάμερα, αξιοποιήθηκε η συνάρτηση `cv2.solvePnP`, στην οποία εισάγονται ως δεδομένα οι συντεταγμένες των 4 κορυφών του τετραγώνου στο επίπεδο της εικόνας και στο πλαίσιο του αντικειμένου καθώς, επίσης, και ο πίνακας K των εγγενών παραμέτρων της κάμερας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το πρόβλημα PnP έχει μοναδική λύση στην περίπτωση τουλάχιστον τεσσάρων συνεπίπεδων σημείων χωρίς τριάδες συγγραμικών σημείων.



Σχήμα 3.11 Σύστημα Συντεταγμένων προσαρτημένο στο Αντικείμενο

Κεφάλαιο 4

Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης

4.1 Έλεγχος Οπτικής Ανατροφοδότησης με Βάση την Εικόνα (IBVS)

Όπως αναφέρεται στην Κεφάλαιο 1.3, υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις, ο έλεγχος οπτικής ανατροφοδότησης με βάση την εικόνα (*Image-Based Visual Servoing – IBVS*) και ο έλεγχος με βάση την θέση (*Position-Based Visual Servoing – PBVS*). Στην παρούσα εργασία, προτιμήθηκε ο έλεγχος οπτικής ανατροφοδότησης με βάση την εικόνα. Σε έναν αλγόριθμο IBVS, το διάνυσμα των χαρακτηριστικών αποτελείται από τις κανονικοποιημένες συντεταγμένες $s = x = (x, y)$, οι οποίες προκύπτουν αξιοποιώντας τις συντεταγμένες σε ρικελ του σημείου στο επίπεδο της εικόνας $m = (u, v)$ και τις εγγενείς παραμέτρους της κάμερας $a = (c_u, c_v, a_x, a_y, f)$. Πιο συγκεκριμένα, έστω ένα 3D σημείο με συντεταγμένες ${}^cP = (X, Y, Z)$ ως προς το πλαίσιο της κάμερας. Το σημείο αυτό μετασχηματίζεται σε 2D σημείο του επιπέδου της εικόνας $x = (x, y)$ μέσω του προοπτικού μετασχηματισμού :

$$\begin{cases} x = \frac{X}{Z} = \frac{u - c_u}{f_x a} \\ y = \frac{Y}{Z} = \frac{v - c_v}{f_y a} \end{cases} \quad (4.1)$$

Παραγωγίζοντας ως προς τον χρόνο, προκύπτει :

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\dot{X}}{Z} - \frac{X\dot{Z}}{Z^2} = \frac{\dot{X} - x\dot{Z}}{Z} \\ \dot{y} = \frac{\dot{Y}}{Z} - \frac{Y\dot{Z}}{Z^2} = \frac{\dot{Y} - y\dot{Z}}{Z} \end{cases} \quad (4.2)$$

Η σχέση η οποία συνδέει την ταχύτητα του 3D σημείου με την ταχύτητα της κάμερας v_c είναι:

$$\dot{X} = -v_c - \omega_c \times X \Leftrightarrow \begin{cases} \dot{X} = -v_x - \omega_y Z + \omega_z Y \\ \dot{Y} = -v_y - \omega_z X + \omega_x Z \\ \dot{Z} = -v_z - \omega_x Y + \omega_y X \end{cases} \quad (4.3)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4.2) και (4.3) :

$$\begin{cases} \dot{x} = -\frac{v_x}{Z} + \frac{xv_z}{Z} + xy\omega_x - (1 + x^2)\omega_y + y\omega_z \\ \dot{y} = -\frac{v_y}{Z} + \frac{yv_z}{Z} + (1 + y^2)\omega_x - xy\omega_y - x\omega_z \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -\frac{1}{Z} & \frac{y}{Z} & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s \mathbf{v}_c$$

Όπως είναι ορατό, για τον υπολογισμό του πίνακα αλληλεπίδρασης \mathbf{L}_s είναι απαραίτητη η εκτίμηση του βάθους Z του σημείου.

Για τον έλεγχο και των 6 βαθμών ελευθερίας ενός ρομποτικού βραχίονα, απαιτούνται τουλάχιστον 3 σημεία, ούτως ώστε το διάνυσμα των χαρακτηριστικών να έχει διάσταση $k \geq 6$. Χρησιμοποιώντας, για παράδειγμα, το διάνυσμα χαρακτηριστικών $\mathbf{s} = (x_1, x_2, x_3)$, και στοιβάζοντας τους επιμέρους πίνακες αλληλεπίδρασης, προκύπτει :

$$\mathbf{L}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{x_1} \\ \mathbf{L}_{x_2} \\ \mathbf{L}_{x_3} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει η πιθανότητα ο πίνακας \mathbf{L}_x να μην είναι αναστρέψιμος. Για αυτόν τον λόγο, συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερα από 3 σημεία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα της κάμερας που προκύπτει από τον νόμο ελέγχου $\mathbf{v}_c = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_s^+ \mathbf{e}$ (Εξίσωση 1.5), είναι εκφρασμένη ως προς το πλαίσιο της κάμερας, το οποίο σπάνια συμπίπτει με το σύστημα συντεταγμένων του τελικού στοιχείου δράσης. Για να εκφραστεί η ταχύτητα ως προς το πλαίσιο του τελικού στοιχείου δράσης, αξιοποιείται ο ομογενής μετασχηματισμός :

$${}^e T_{cam} = \begin{bmatrix} {}^e R_{cam} & {}^e t_{cam} \\ 0_{3 \times 1} & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^e \mathbf{v}_c = \begin{bmatrix} {}^e u_c \\ {}^e \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^e R_{cam} u_c - {}^e R_{cam} \omega_c \otimes {}^e t_{cam} \\ {}^e R_{cam} \omega_c \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Έπειτα, με χρήση της ευθείας κινηματικής, η ταχύτητα μετασχηματίζεται ως προς το σύστημα συντεταγμένων της βάσης :

$${}^b \mathbf{v}_c = \begin{bmatrix} {}^b u_c \\ {}^b \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^b R_e u_c - {}^b R_e \omega_c \otimes {}^b t_e \\ {}^b R_e \omega_c \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Η ταχύτητα αυτή συνδέεται με τις ταχύτητες των αρθρώσεων μέσω της γεωμετρικής Ιακωβιανής :

$${}^b \mathbf{v}_c = {}^0 J_V(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$$

$$\dot{\mathbf{q}} = {}^0 J_V^{-1}(\mathbf{q}) {}^b \mathbf{v}_c \quad (4.8)$$

Επιπροσθέτως, υπάρχει η δυνατότητα να σχεδιαστεί ο νόμος ελέγχου απευθείας στον χώρο των αρθρώσεων. Τότε, η χρονική μεταβολή του διανύσματος s συνδέεται με την ταχύτητα των μεταβλητών των αρθρώσεων, μέσω της σχέσης :

$$\dot{s} = J_s \dot{q}, \quad J_s \in R^{k \times n} \quad (4.9)$$

Ο πίνακας J_s ονομάζεται Ιακωβιανή της εικόνας και, για ένα σύστημα *eye in hand*, δίνεται από την εξίσωση :

$$J_s = L_s {}^{cam}V_e {}^eJ_V \quad (4.10)$$

Στην Εξίσωση (4.10), L_s είναι ο πίνακας αλληλεπίδρασης, ${}^{cam}V_e = \begin{bmatrix} {}^{cam}R_e & [{}^{cam}t_e]_x \\ 0 & {}^{cam}R_e \end{bmatrix}$ ο πίνακας που μετασχηματίζει τις ταχύτητες από το πλαίσιο της κάμερας στο σύστημα συντεταγμένων του τελικού στοιχείου δράσης και ${}^eJ_V = \begin{bmatrix} {}^eR_b & 0 \\ 0 & {}^eR_b \end{bmatrix} {}^bJ_V$ η Ιακωβιανή του βραχίονα εκφρασμένη στο τελικό στοιχείο δράσης.

Όπως προηγουμένως, θεωρώντας μία εκθετική μείωση του σφάλματος, προκύπτει ο τελικός νόμος ελέγχου :

$$\dot{q} = -\lambda \widehat{J}_e^+ e, \quad \lambda > 0_{6 \times 6} \quad (4.11)$$

4.1.1 Υλοποίηση IBVS Αλγορίθμου με Στάσιμο Αντικείμενο

Ο παραπάνω έλεγχος οπτικής ανατροφοδότησης με βάση την εικόνα σχεδιάστηκε στο *ros*. Αναλυτικότερα, υλοποιήθηκαν δύο κόμβοι *Publisher* και *Subscriber*, σε γλώσσα *python*, οι οποίοι ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους μέσω ενός *topic*.

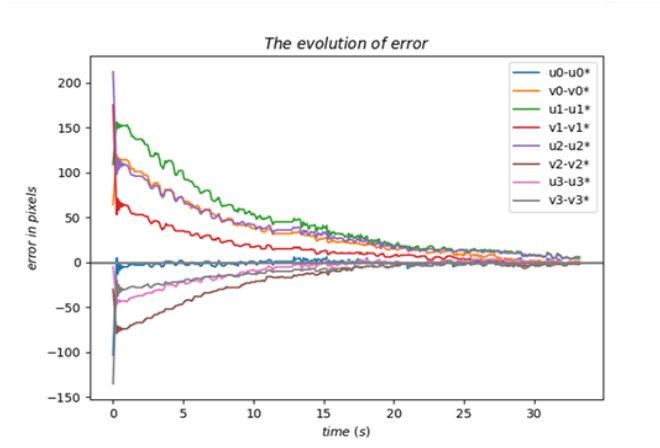
Ο πρώτος κόμβος *Publisher* επεξεργάζεται σε πραγματικό χρόνο την εικόνα (Κεφάλαιο 3.5), εντοπίζει τις 4 κορυφές του αντικειμένου $m_i = [u_i, v_i]^T$ $i = 1, \dots, 4$, αν αυτό βρίσκεται στο οπτικό πεδίο της κάμερας, και, στη συνέχεια, τις μετασχηματίζει σε κανονικοποιημένες συντεταγμένες $s_i = [x_i, y_i]^T$ με την βοήθεια των εγγενών παραμέτρων α της κάμερας (Εξίσωση 4.1). Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται το διάνυσμα των χαρακτηριστικών $s = [s_1, s_2, s_3, s_4]^T$. Έπειτα, χρησιμοποιώντας την συνάρτηση *cv2.solvePnP*, εκτιμάται το βάθος Z_i των 4 σημείων, το οποίο είναι απαραίτητο για την προσέγγιση του πίνακα αλληλεπίδρασης L_{x_i} . Στοιβάζοντας τις επιμέρους μήτρες, προκύπτει ο τελικός πίνακας :

$$L_x = \begin{bmatrix} L_{x_1} \\ L_{x_2} \\ L_{x_3} \\ L_{x_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z_1} & 0 & \frac{x_1}{Z_1} & x_1 y_1 & -(1+x_1^2) & y_1 \\ 0 & -\frac{1}{Z_1} & \frac{y_1}{Z_1} & 1+y_1^2 & -x_1 y_1 & -x_1 \\ -\frac{1}{Z_2} & 0 & \frac{x_2}{Z_2} & x_2 y_2 & -(1+x_2^2) & y_2 \\ 0 & -\frac{1}{Z_2} & \frac{y_2}{Z_2} & 1+y_2^2 & -x_2 y_2 & -x_2 \\ -\frac{1}{Z_3} & 0 & \frac{x_3}{Z_3} & x_3 y_3 & -(1+x_3^2) & y_3 \\ 0 & -\frac{1}{Z_3} & \frac{y_3}{Z_3} & 1+y_3^2 & -x_3 y_3 & -x_3 \\ -\frac{1}{Z_4} & 0 & \frac{x_4}{Z_4} & x_4 y_4 & -(1+x_4^2) & y_4 \\ 0 & -\frac{1}{Z_4} & \frac{y_4}{Z_4} & 1+y_4^2 & -x_4 y_4 & -x_4 \end{bmatrix} = L_e \quad (4.12)$$

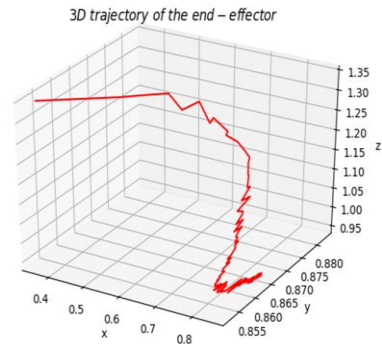
Τέλος, συγκρίνοντας το διάνυσμα s με το αντίστοιχο επιθυμητό s^* , κατά το οποίο το πλακάκι είναι κεντραρισμένο στην εικόνα, υπολογίζεται το σφάλμα e . Τα δεδομένα, τα οποία μεταφέρονται από τον κόμβο *Publisher* στο *topic*, είναι μία λογική μεταβλητή, που προσδιορίζει αν ήταν επιτυχής η ανίχνευση του αντικειμένου, ο πίνακας αλληλεπίδρασης, το σφάλμα καθώς και η θέση του αντικειμένου σε σχέση με την κάμερα.

Από την άλλη, στον κόμβο *Subscriber*, ο οποίος επικοινωνεί με τον ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα ΚΥΚΑ μέσω σειριακής επικοινωνίας, υπολογίζεται η Ιακωβιανή της εικόνας J_s . Όπως φαίνεται στην *Εξίσωση* (4.10), είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψιν ο σταθερός ομογενής μετασχηματισμός ${}^e T_{cam}$ και να γίνει χρήση της ευθείας κινηματικής και της Ιακωβιανής του ρομπότ με βάση την τρέχουσα θέση των μεταβλητών των αρθρώσεων. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι απαιτούμενες ταχύτητες των αρθρώσεων, σύμφωνα με τον νόμο ελέγχου της *Εξίσωσης* (4.11) $\dot{q} = -\lambda \widehat{J}_e^+ e$. Επισημαίνεται ότι η ταχύτητα της πρώτης άρθρωσης θα πρέπει να αλλάξει πρόσημο ούτως ώστε να επιτευχθεί συμφωνία με την φορά περιστροφής που ορίζεται από το ΚΥΚΑ. Οι ταχύτητες αυτές διακριτοποιούνται με τη μέθοδο ολοκλήρωσης του Euler, $q(t_{k+1}) = q(t_k) + \dot{q} \Delta t$, και οι επόμενες θέσεις των αρθρώσεων αποστέλλονται στον controller του βραχίονα. Σε περίπτωση που το πλακάκι δεν εντοπιστεί, ο βραχίονας παραμένει στην τρέχουσα θέση του.

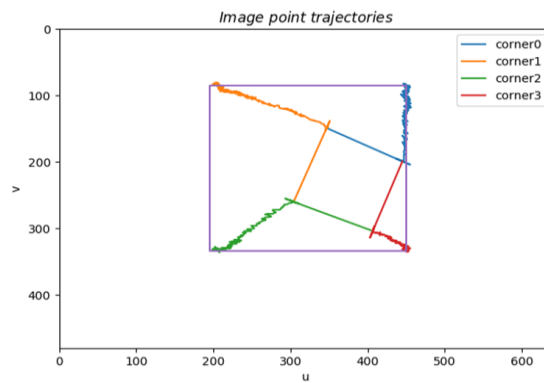
Με σκοπό να ελεγχθεί η εγκυρότητα του παραπάνω αλγορίθμου, τοποθετήθηκε το πλακάκι πάνω στην ακίνητη μεταφορική ταινία και το ρομπότ αρκετά μακριά από αυτό. Τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές του κέρδους λ είναι:



(α)

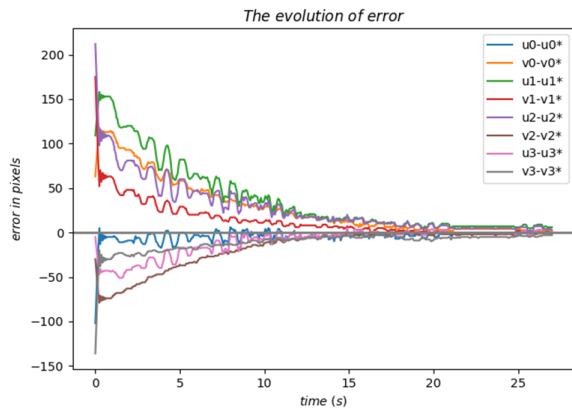


(β)

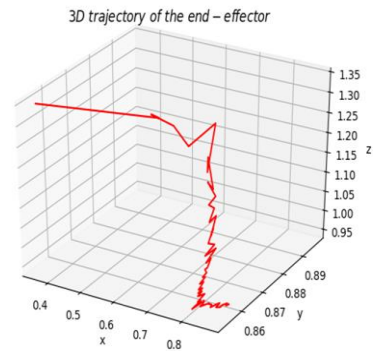


(γ)

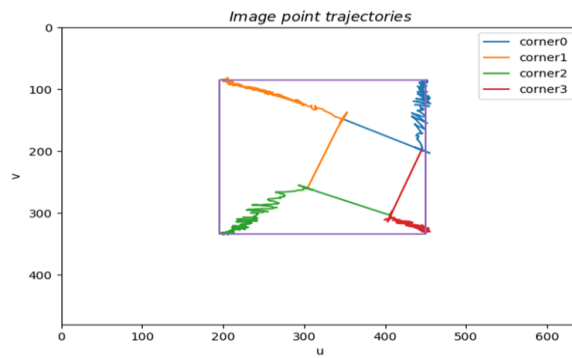
Σχήμα 4.1 Η Συμπεριφορά του Συστήματος για Κέρδος $\lambda = 0.1$: (α) Η Χρονική Μεταβολή του Σφάλματος σε Μονάδες *Pixels*, (β) Η πορεία του Τελικού Στοιχείου Δράσης (σε m) και (γ) Η Πορεία των 4 Κορυφών στο Επίπεδο



(α)

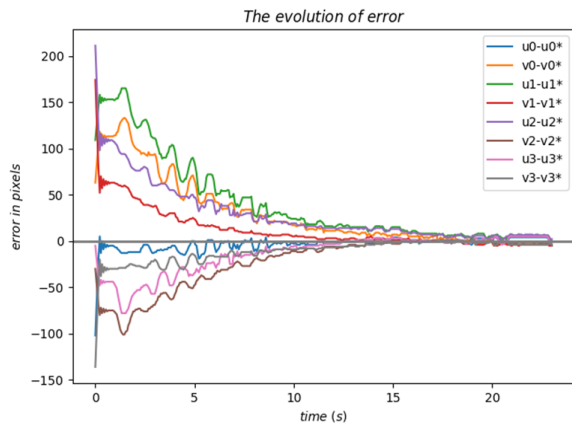


(β)

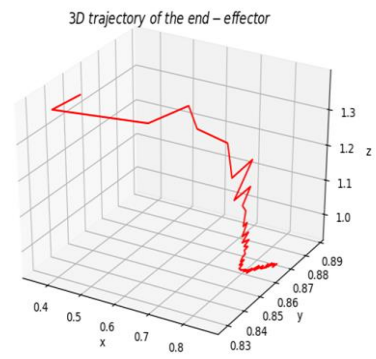


(γ)

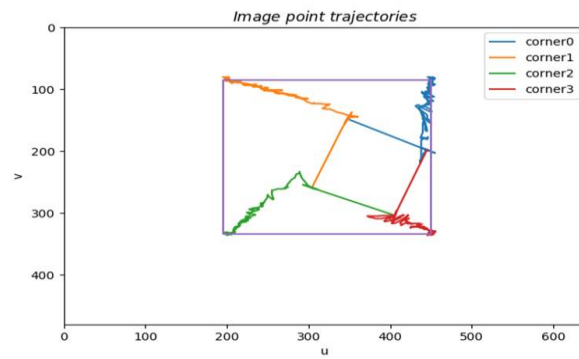
Σχήμα 4.2 Η Συμπεριφορά του Συστήματος για Κέρδος $\lambda = 0.14$



(α)

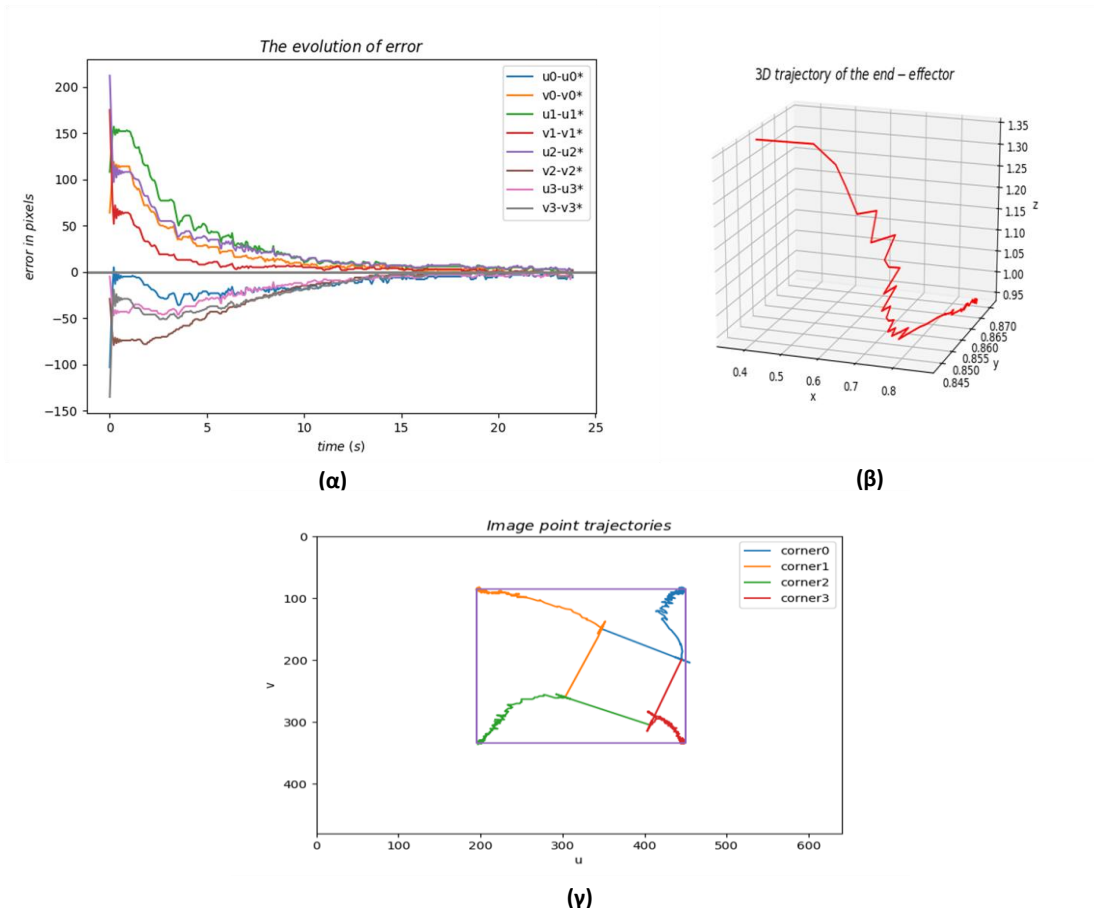


(β)



(γ)

Σχήμα 4.3 Η Συμπεριφορά του Συστήματος για Κέρδος $\lambda = 0.18$



Σχήμα 4.4 Η Συμπεριφορά του Συστήματος για Κέρδος $\lambda = \begin{bmatrix} 0.18 & & & & & \\ & 0.15 & & & & \\ & & 0.15 & & & \\ & & & 0.18 & & \\ & & & & 0.15 & \\ & & & & & 0.15 \end{bmatrix}$

Όπως είναι ορατό, παρά το γεγονός ότι το ρομπότ απέχει αρκετά μακριά από την επιθυμητή 'στάση', το σφάλμα συγκλίνει στο μηδέν. Η ταχύτητα σύγκλισης εξαρτάται άμεσα από το κέρδος λ . Σε έναν έλεγχο τύπου P, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του κέρδους, τόσο ταχύτερη είναι η απόκριση του συστήματος. Ωστόσο, το κέρδος δεν μπορεί να αυξηθεί απεριόριστα, καθώς ενδέχεται να καταστήσει το σύστημα ασταθές. Επίσης, το κέρδος επηρεάζει άμεσα και την ομαλότητα της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα. Το γεγονός ότι ελέγχεται μόνο η θέση και όχι η ταχύτητα του ρομπότ, σε συνδυασμό με την αργή σειριακή επικοινωνία με τον controller του βραχίονα, έχει ως αποτέλεσμα το ρομπότ να κινείται και να σταματάει σε κάθε loop. Αύξηση του κέρδους οδηγεί σε όλο και πιο απότομες κινήσεις του βραχίονα με κίνδυνο ακόμη και να χαθεί το αντικείμενο από το οπτικό πεδίο της κάμερας.

Ακόμη, ο κόμβος *Publisher*, που ασχολείται με το κομμάτι της όρασης, τρέχει στα 35 Hz, δηλαδή σε συχνότητα αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του *Subscriber*. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις μικρού πλάτους ταλαντώσεις, οι οποίες παρατηρούνται στην χρονική μεταβολή του σφάλματος και προκαλούνται από το θόρυβο στο επίπεδο της εικόνας.

Τέλος, τονίζεται ότι σε έναν έλεγχο οπτικής ανατροφοδότησης με βάση την εικόνα, η τροχιά του τελικού στοιχείου δράσης δεν μπορεί να προβλεφθεί εκ των προτέρων. Επομένως, απαιτείται προσοχή καθώς ενδέχεται να υπάρξουν συγκρούσεις με εμπόδια ή παραβίαση των ορίων των αρθρώσεων. Ωστόσο, η χρήση της μεθόδου *IBVS*, έχει ως πλεονέκτημα την ευστάθεια του συστήματος ακόμη και σε αρκετά πρόχειρες εκτιμήσεις των εγγενών και εξωγενών παραμέτρων της κάμερας. Πράγματι, το σφάλμα μετράται απευθείας στον χώρο της εικόνας, και οι παράμετροι βαθμονόμησης εμφανίζονται μόνο στον υπολογισμό του πίνακα αλληλεπίδρασης L_x . Συνεπώς, η αβεβαιότητα στις παραμέτρους συνεπάγεται μόνο διαταραχές στην πορεία σύγκλισης του σφάλματος στο μηδέν. Αντίθετα, ο έλεγχος με βάση τη θέση (*PBVS*), είναι αρκετά πιο ευαίσθητος σε σφάλματα βαθμονόμησης της κάμερας, καθώς η αβεβαιότητα αυτή εισάγεται στην εκτίμηση της στάσης του αντικειμένου και, άρα, στην ανάδραση του κλειστού βρόχου.

4.2 Αρπαγή Κινούμενου Αντικειμένου από Μεταφορική Ταινία

Με σκοπό την αρπαγή ενός αντικειμένου, που κινείται πάνω στην μεταφορική ταινία, ο ρομποτικός βραχίονας χρησιμοποιεί την όραση ούτως ώστε να αποκτήσει αρκετή πληροφορία για τον προσδιορισμό της σχετικής 'στάσης' του αντικειμένου ως προς την αρπαγή. Αυτή η πληροφορία επιτρέπει στο σύστημα ελέγχου να σχεδιάσει μια τροχιά που να οδηγεί τον βραχίονα σε μία κατάλληλη διάταξη λαβής, η οποία υπολογίζεται με βάση τη 'στάση' και το σχήμα του αντικειμένου.

Η τροχιά που έχει σχεδιαστεί μπορεί να εκτελεστεί με τη βοήθεια ενός απλού ελεγκτή κίνησης. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, που ονομάζεται *look-and-move*, οι μετρήσεις από την εικόνα χρησιμοποιούνται σε ανοιχτό βρόχο, γεγονός που καθιστά το σύστημα ιδιαίτερα ευαίσθητο σε αβεβαιότητες, όπως η βαθμονόμηση της κάμερας, οι διαταραχές στην εκτίμηση στάσης του αντικειμένου λόγω θορύβου στο επίπεδο της εικόνας κ.ά.

4.2.1 Αλγόριθμος Αντίστροφης Κινηματικής

Για την αρπαγή του κινούμενου αντικειμένου, είναι απαραίτητο το τελικό στοιχείο δράσης, πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένη η αρπαγή, να κινείται αφενός με την ταχύτητα του αντικειμένου και αφετέρου να βρεθεί τελικά σε τέτοια θέση και προσανατολισμό, ώστε το αντικείμενο να είναι εντός των δακτύλων της αρπαγής.

Επομένως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν το σφάλμα στον χώρο λειτουργίας μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής θέσης και προσανατολισμού του τελικού στοιχείου δράσης, έστω :

$$e = x_d - x_e \quad (4.13)$$

Η χρονική παράγωγος του σφάλματος είναι :

$$\dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x}_e \Rightarrow \dot{e} = \dot{x}_d - J_A \dot{q} \quad (4.14)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι η χρήση ποσοτήτων του χώρου λειτουργίας οδηγεί στην χρησιμοποίηση της αναλυτικής Ιακωβιανής αντί της γεωμετρικής. Η 'στάση' του τελικού στοιχείου δράσης υπολογίζεται με την βοήθεια της ευθείας κινηματικής, δηλαδή μέσω του ομογενή μετασχηματισμού bT_e .

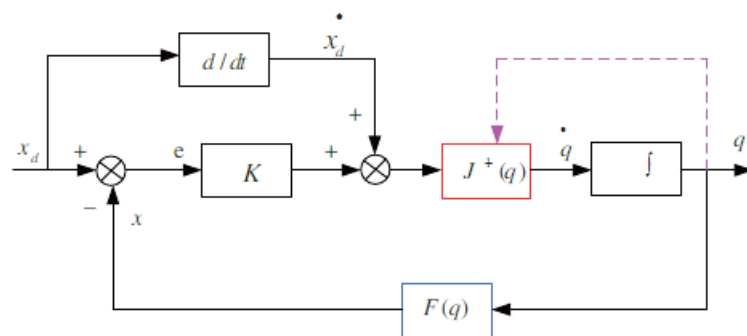
Σε έναν αλγόριθμο ανάστροφης κινηματικής, πρέπει να συσχετιστεί το διάνυσμα των υπολογιζόμενων ταχυτήτων των αρθρώσεων \dot{q} με το σφάλμα e με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η σύγκλιση του σφάλματος στο μηδέν. Με την παραδοχή ότι ο πίνακας της Ιακωβιανής είναι τετραγωνικός και αναστρέψιμος, η επιλογή :

$$\dot{q} = J_A^{-1}(q)(\dot{x}_d + Ke) \quad (4.15)$$

οδηγεί στο ισοδύναμο σύστημα :

$$\dot{e} + Ke = 0 \quad (4.16)$$

Όταν το K είναι θετικά ορισμένος, συνήθως διαγώνιος, πίνακας, το σύστημα είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Το σφάλμα τείνει προς το μηδέν με ρυθμό σύγκλισης ο οποίος εξαρτάται από τις ιδιοτιμές του μητρώου K . Όσο μεγαλύτερες είναι οι ιδιοτιμές, τόσο ταχύτερη είναι η σύγκλιση. Επειδή η υλοποίηση, όμως, γίνεται με σύστημα διακριτού χρόνου, αναμένεται η ύπαρξη ενός άνω φράγματος των ιδιοτιμών. Ανάλογα με τον χρόνο δειγματοληψίας, υπάρχει κάποιο όριο για τη μέγιστη ιδιοτιμή του K για την οποία εξασφαλίζεται ασυμπτωτική ευστάθεια του σφάλματος.



Σχήμα 4.5 Αλγόριθμος Αντίστροφης Κινηματικής με αντιστροφή Ιακωβιανής

4.2.2 Διακριτό φίλτρο Kalman

Για την εκτίμηση της ταχύτητας του στόχου, χρησιμοποιείται το διακριτό φίλτρο *Kalman*, ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος εκτιμητής κατάστασης που απορρίπτει τους θορύβους τόσο στις μετρήσεις όσο και στην επενέργηση. Το φίλτρο *Kalman* εκτιμά τις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος βασιζόμενο σε δύο βήματα, την πρόβλεψη και την ανανέωση. Αρχικά, γίνεται πρόβλεψη του διανύσματος κατάστασης με βάση το μοντέλο του συστήματος. Στη συνέχεια, μετά την άφιξη των μετρήσεων, ανανεώνεται η αρχική πρόβλεψη, με σκοπό η τελική εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης να είναι η βέλτιστη προσέγγιση της πραγματικής του τιμής.

Αναλυτικότερα, το αντικείμενο είναι τοποθετημένο πάνω στην μεταφορική ταινία και κινείται με σταθερή ταχύτητα σε σχέση με το σύστημα αναφοράς, δηλαδή το σύστημα συντεταγμένων της βάσης. Επιπροσθέτως, το αντικείμενο κινείται σε οριζόντιο επίπεδο, δηλαδή παράλληλο στο επίπεδο xy του συστήματος $\{O_b\}$, χωρίς να περιστρέφεται. Επομένως, για την ταχύτητα του ισχύει ότι ${}^b v_{obj} = [{}^b \dot{X}_{obj} \quad {}^b \dot{Y}_{obj} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T = ct$. Τελικά, το μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το διακριτό σύστημα είναι :

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + w_k \\ z_k = Cx_k + v_k \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \begin{bmatrix} {}^b X_{obj} \\ {}^b Y_{obj} \\ {}^b Z_{obj} \\ {}^b \dot{X}_{obj} \\ {}^b \dot{Y}_{obj} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^b X_{obj} \\ {}^b Y_{obj} \\ {}^b Z_{obj} \\ {}^b \dot{X}_{obj} \\ {}^b \dot{Y}_{obj} \end{bmatrix}_k + w_k \\ z_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^b X_{obj} \\ {}^b Y_{obj} \\ {}^b Z_{obj} \\ {}^b \dot{X}_{obj} \\ {}^b \dot{Y}_{obj} \end{bmatrix}_k + v_k \end{cases} \quad (4.17)$$

όπου T ο χρόνος δειγματοληψίας.

Θεωρείται ότι, τόσο στην επενέργηση όσο και στη μέτρηση, υπάρχει θόρυβος που ακολουθεί κανονική κατανομή και έχει αντίστοιχα στατιστικά χαρακτηριστικά :

$$\begin{aligned} w &\sim N(0, Q) \\ v &\sim N(0, R) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Οι μετρήσεις z_k , δηλαδή η θέση του αντικειμένου ως προς σύστημα της βάσης, προκύπτουν μέσω του αλγόριθμου εκτίμησης στάσης ως εξής :

$$\begin{bmatrix} {}^bX_{obj} \\ {}^bY_{obj} \\ {}^bZ_{obj} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^bT_e(\mathbf{q}) {}^eT_{cam} \begin{bmatrix} {}^{cam}t_{obj} \ 3x1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο του φίλτρου KALMAN, η εκτίμηση $\hat{x}_k(+)$ της κατάστασης κατά την χρονική στιγμή k , μετά την άφιξη της μέτρησης z_k , μπορεί να υπολογισθεί ως γραμμικός συνδυασμός της μέτρησης z_k και της εκτίμησης $\hat{x}_k(-)$ (πριν από την άφιξη της μέτρησης), μέσω της σχέσης :

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k(z_k - C\hat{x}_k(-)) \quad (4.20)$$

όπου :

- Η πρόβλεψη $\hat{x}_k(-)$ προκύπτει από την δυναμική του συστήματος, δηλαδή $\hat{x}_k(-) = A\hat{x}_{k-1}(+)$, με πίνακα συμμεταβλητότητας του σφάλματος $\tilde{x}_k(-)$ ίσο με $P_k(-) = AP_{k-1}(+)A^T + Q$,
- Και ο πίνακας κερδών KALMAN K_k επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο πίνακας συμμεταβλητότητας του σφάλματος $\tilde{x}_k(+)$ και δίνεται από τη σχέση :

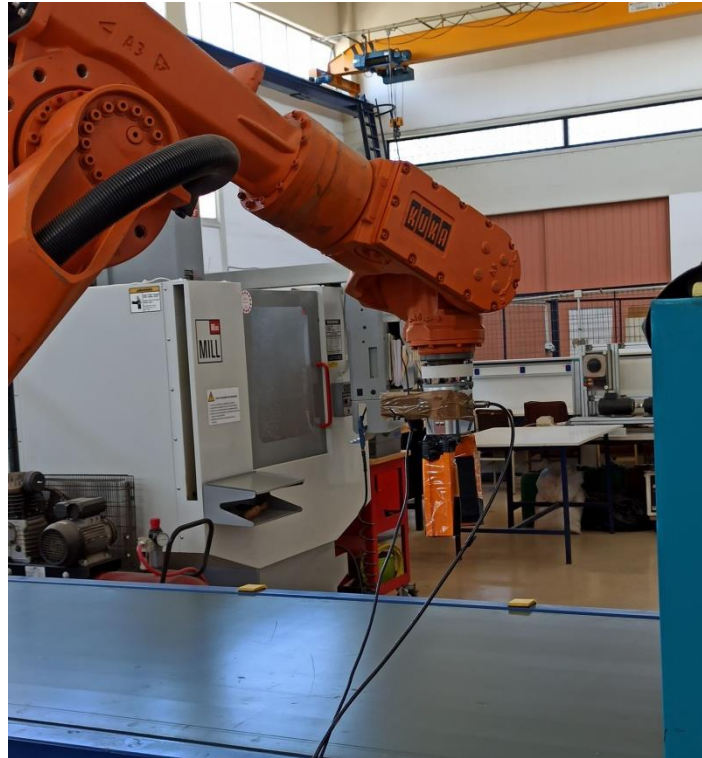
$$K_k = P_k(-)C^T[CP_k(-)C^T + R]^{-1} \quad (4.21)$$

Ο νέος πίνακας συμμεταβλητότητας που προκύπτει είναι :

$$P_k(+) = [I - K_kC]P_k(-) \quad (4.22)$$

4.2.3 Εκτέλεση Πειράματος

Ο ρομποτικός βραχίονας, αρχικά, παραμένει στάσιμος και παρατηρεί το κινούμενο αντικείμενο με σκοπό την γρήγορη εκτίμηση τόσο της ταχύτητας ${}^b\mathbf{v}_{obj}$ όσο και του ύψους ${}^bZ_{obj}$ του αντικειμένου σε σχέση με το σύστημα της βάσης. Η εκτίμηση αυτή, υλοποιείται με τη βοήθεια του φίλτρου *Kalman*, σύμφωνα με το μοντέλο της Εξίσωσης 4.17. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι της τάξης των 30Hz.



Σχήμα 4.6 Η Αρπάγη προσαρτημένη στο Τελικό Στοιχείο Δράσης

Επιπροσθέτως, επισημαίνεται ότι το τελικό στοιχείο δράσης αρχικοποιείται με τον επιθυμητό προσανατολισμό, δηλαδή ο άξονας Z_e είναι κάθετος στο επίπεδο της μεταφορικής ταινίας (Σχήμα 4.6). Συνεπώς το σφάλμα στην Εξίσωση 4.13 ορίζεται ως :

$$e = \begin{bmatrix} {}^bX_{obj|k} - {}^bX_e \\ {}^bY_{obj|k} - {}^bY_e \\ {}^bZ_{obj} - ({}^bZ_e + Z_g) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Στην Εξίσωση (4.23), Z_g είναι το μήκος των δακτύλων της αρπάγης ενώ η τρέχουσα θέση ${}^bX_{obj|k}$, ${}^bY_{obj|k}$ του αντικειμένου προκύπτει άμεσα μέσω του αλγόριθμου εκτίμησης στάσης. Ωστόσο, όταν η αρπάγη έρθει αρκετά κοντά στη θέση λαβής, το αντικείμενο χάνεται από το οπτικό πεδίο της κάμερας και, έτσι, η θέση του προσεγγίζεται με βάση την εκτιμώμενη ταχύτητά του:

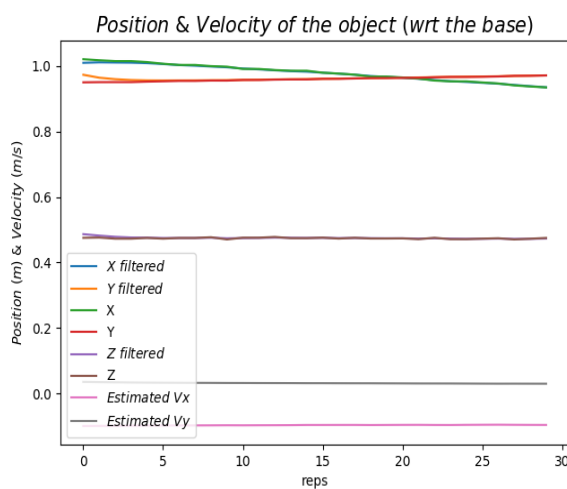
$$\begin{aligned} {}^bX_{obj|k} &= {}^bX_{obj|k-1} + {}^b\dot{X}_{obj} \Delta t \\ {}^bY_{obj|k} &= {}^bY_{obj|k-1} + {}^b\dot{Y}_{obj} \Delta t \end{aligned} \quad (4.24)$$

Το χρονικό διάστημα Δt διατηρείται σταθερό και ίσο με 0.4 s με τη βοήθεια της εντολής `rospy.Rate()`.

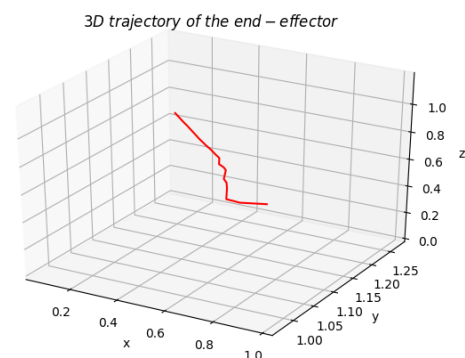
Στη συνέχεια, υλοποιείται ο νόμος ελέγχου της Εξίσωσης (4.15) $\dot{q} = J^{-1}(q)({}^b v_{obj} + Ke)$ και οι απαιτούμενες τιμές των αρθρώσεων αποστέλλονται στον ελεγκτή του βραχίονα μετά από ολοκλήρωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι χρήζει ιδιαίτερης προσοχής η επιλογή του κέρδους $K[3,3]$, που σχετίζεται με το σφάλμα στον άξονα Z. Η τιμή του δεν θα πρέπει να είναι υψηλή ούτως ώστε να αποφευχθεί η υπερακόντιση του σφάλματος και άρα η σύγκρουση της αρπάγης με την μεταφορική ταινία.

Όταν η αρπάγη έρθει αρκετά κοντά στη θέση λαβής, δίνεται εντολή για το κλείσιμό της μέσω ενός *Arduino* και το αντικείμενο απομακρύνεται από τη μεταφορική ταινία.

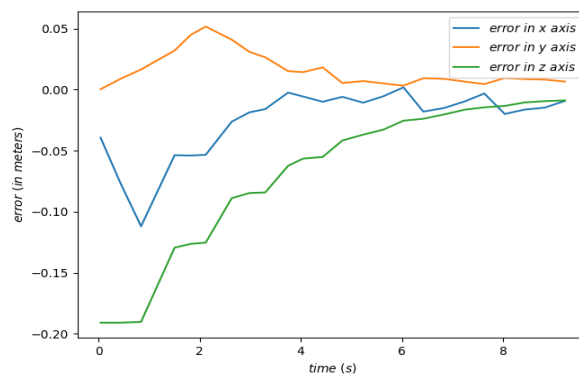
Η εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου εξετάζεται για διάφορες ταχύτητες της μεταφορικής ταινίας και τα αποτελέσματα είναι:



(α)

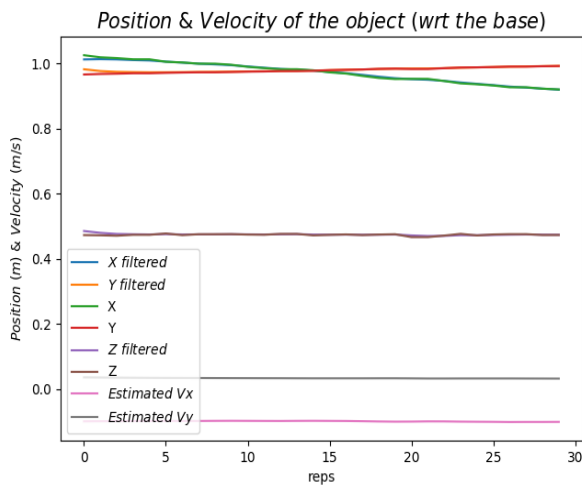


(β)

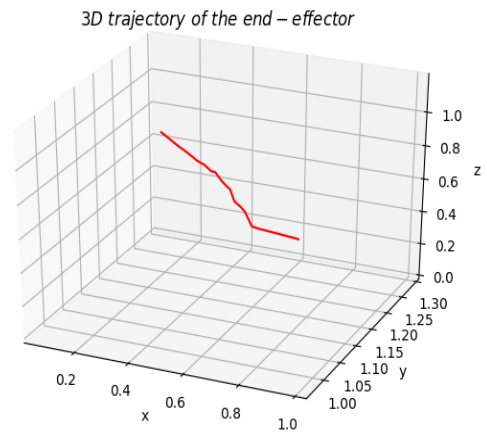


(γ)

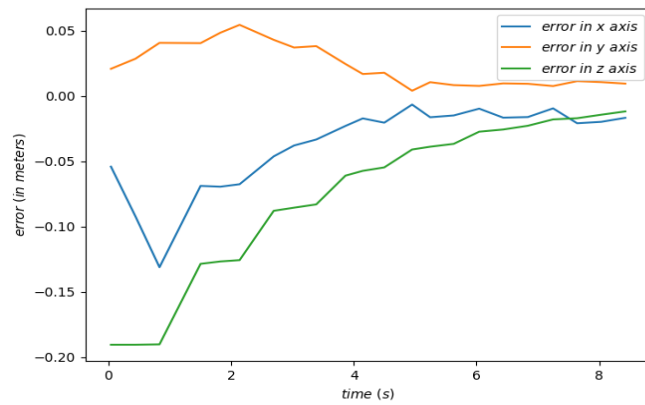
Σχήμα 4.7 Η Συμπεριφορά του Συστήματος για Ταχύτητα της Μεταφορικής Ταινίας ίση με 3.8 Hz (α) Η Εκτίμηση της Θέσης και της Ταχύτητας του Αντικειμένου με Kalman, (β) Η πορεία του Τελικού Στοιχείου Δράσης (σε m) και (γ) Η Χρονική Μεταβολή του Σφάλματος μεταξύ της Μετρούμενης ή Εκτιμώμενης Θέσης του Αντικειμένου και της Θέσης της Αρπάγης



(α)

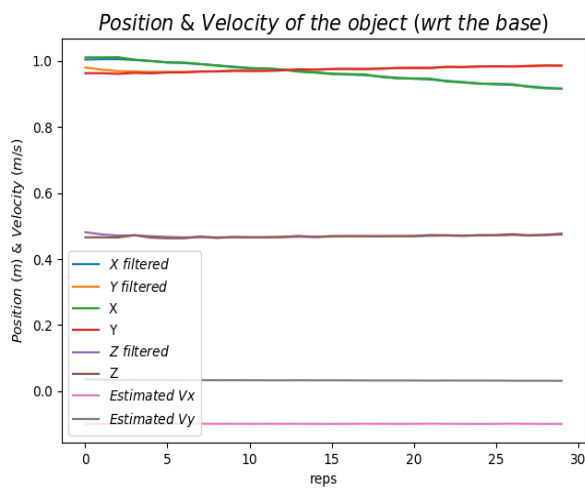


(β)

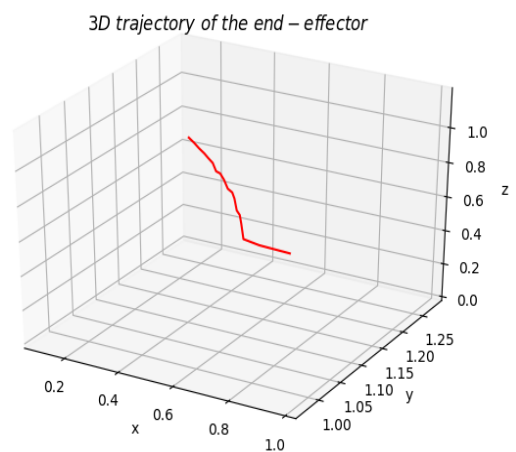


(γ)

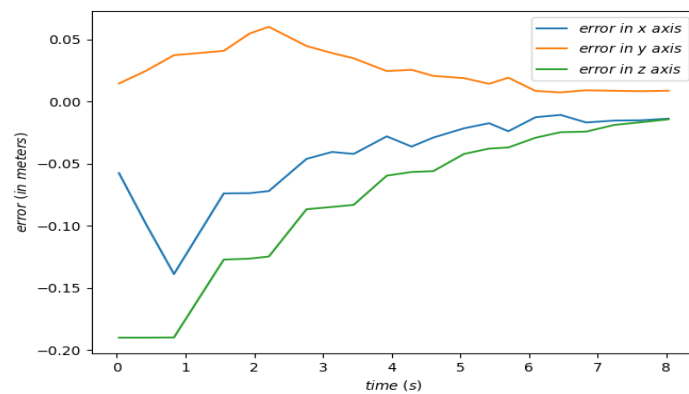
Σχήμα 4.8 Η Συμπεριφορά του Συστήματος για Ταχύτητα της Μεταφορικής Ταινίας ίση με 4.0 Hz



(α)



(β)



(γ)

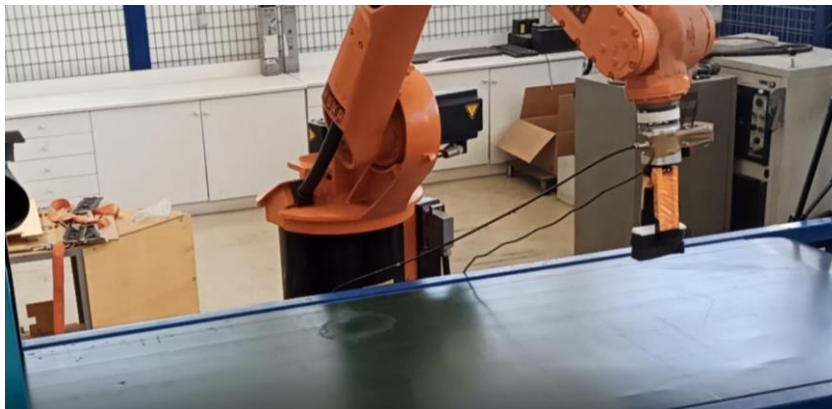
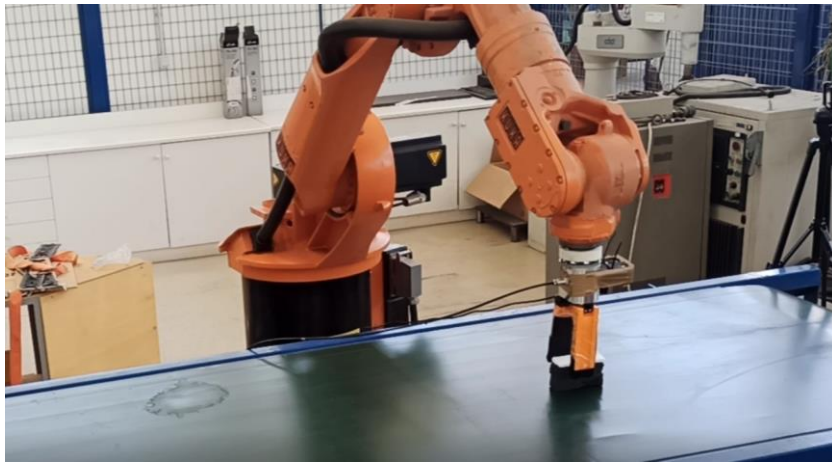
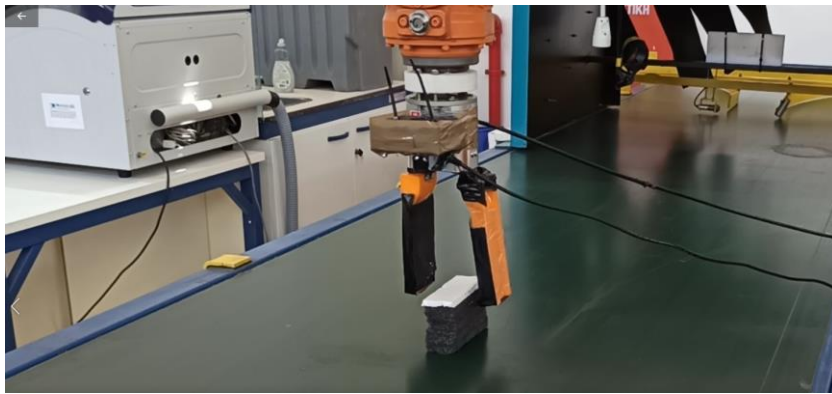
Σχήμα 4.9 Η Συμπεριφορά του Συστήματος για Ταχύτητα της Μεταφορικής Ταινίας ίση με 4.2 Hz

Όπως διαφαίνεται, το φίλτρο *Kalman* παρέχει μία καλή εκτίμηση της ταχύτητας και του ύψους του αντικειμένου μετά από μόλις 30 επαναλήψεις. Στη συνέχεια, το τελικό στοιχείο δράσης πλησιάζει το αντικείμενο και, τελικά, κινείται ευθύγραμμα στον 3D χώρο, με το αντικείμενο να βρίσκεται εντός των δαχτύλων της αρπάγης, δηλαδή το σφάλμα μεταξύ της θέσης του αντικειμένου και της αρπάγης τείνει στο μηδέν. Η επιλογή ενός χαμηλού κέρδους στο σφάλμα του άξονα *Z* αφενός αποτρέπει την σύγκρουση της αρπάγης με τη μεταφορική ταινία, αφετέρου διασφαλίζει την παρουσία του αντικειμένου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στο οπτικό πεδίο της κάμερας. Με αυτόν τον τρόπο, διορθώνεται η αρχική πρόβλεψη της κίνησης του αντικειμένου και αυξάνονται οι πιθανότητες αρπάγης του.

Για την αξιολόγηση του αλγορίθμου, ελέγχθηκε η επαναληψιμότητα του εκτελώντας το πείραμα σε διάφορες συνθήκες. Η ταχύτητα της μεταφορικής ταινίας τέθηκε ίση με 3.8 Hz. Υπολογίστηκε ότι στο 90% των πειραμάτων η αρπαγή ήταν επιτυχής. Οι αποτυχημένες προσπάθειες προκλήθηκαν κατά κύριο λόγο όταν η σειριακή επικοινωνία μεταξύ του ελεγκτή και του Η/Υ δεν επετεύχθη. Στην περίπτωση αυτή, οι απαιτούμενες μεταβλητές των αρθρώσεων δεν αποστέλλονται στον controller του βραχίονα και το ρομπότ παραμένει ακίνητο για 1 με 2 δευτερόλεπτα.

Επισημαίνεται ότι η αύξηση της ταχύτητας της μεταφορικής ταινίας μειώνει τις πιθανότητες αρπάγης του αντικειμένου. Τα σφάλματα στην ανίχνευση του αντικειμένου και στην εκτίμηση της στάσης του επιδρούν περισσότερο αρνητικά όταν αυξάνεται η ταχύτητα του. Επίσης, η εκτίμηση της θέσης του, όταν αυτό χάνεται από το οπτικό πεδίο της κάμερας, δεν είναι απόλυτα ακριβής. Τέλος, η αργή σειριακή επικοινωνία μεταξύ του Η/Υ και του ελεγκτή μειώνει τον χρόνο αντίδρασης του βραχίονα. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται εκ νέου ρύθμιση των κερδών για την επίτευξη υψηλότερης επαναληψιμότητας.

Τα σφάλματα διακρίνονται σε συστηματικά (βαθμονόμηση της κάμερας) και τυχαία (θόρυβος στις μετρήσεις της εικόνας). Οι διαταραχές που προκαλούν είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν σε ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου, όπως το παραπάνω. Συνεπώς, για την ευστάθεια του συστήματος, θα μπορούσε να τοποθετηθεί μία επιπλέον κάμερα σε σταθερό σημείο του χώρου, η οποία θα παρατηρούσε τόσο το αντικείμενο όσο και την αρπάγη. Έτσι, θα υπολογιζόταν, σε κάθε χρονική στιγμή, το σφάλμα μεταξύ της τρέχουσας θέσης του αντικειμένου και της αρπάγης και το σύστημα ελέγχου θα ήταν κλειστού βρόχου, γεγονός που θα οδηγούσε σε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα



Σχήμα 4.10 Η Αρπαγή του Αντικειμένου από τον Ρομπωτικό Βραχίονα

Βιβλιογραφία

- [1] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, Robotics: modelling, planning and control. Springer Science & Business Media, 2010
- [2] P. Corke, Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB, vol. 73 Springer, 2011
- [3] F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual servo control. i. Basic approaches," Robotics and Automation Magazine, IEEE, vol. 13, no. 4, pp. 82-90, 2006
- [4] F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual servo control. ii. Advanced approaches," Robotics and Automation Magazine, IEEE, vol. 14, no. 1, pp. 109-118, 2007
- [5] KR-C2-KR-C3-Operating-Handbook
- [6] KRL_Reference_guide v4_1
- [7] KUKA KSS 8.2 Messages
- [8] KUKA System Variables 8.1 8.2 8.3
- [9] Ε. Παπαδόπουλος και Κ. Κυριακόπουλος, Σημειώσεις Μαθήματος «Συστήματα Ευφυούς Ελέγχου & Ρομποτικής»
- [10] Κ. Κυριακόπουλος, Σημειώσεις Μαθήματος «Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά»
- [11] https://docs.opencv.org/master/d9/df8/tutorial_root.html
- [12] <http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials>