



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.

Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ
ΜΙΚΡΟΡΟΜΠΟΤ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ
ΘΕΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ**

Κωνσταντίνος Καραΐσκος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2020

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του μικρορομπότ του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π. Η συγκεκριμένη μικρορομποτική πλατφόρμα, λόγω του πρωτοπόρου τρόπου κίνησης, μέσω επενεργητών δόνησης, δίνει τη δυνατότητα για τη ανάπτυξη μικροκινήσεων. Ο έλεγχος της κίνησης της πλατφόρμας, με ακρίβεια μικρόμετρων, ανοίγει τις δυνατότητες χρήσης της πλατφόρμας σε μία σειρά από εφαρμογές για την ικανοποίηση πρακτικών αναγκών.

Για το σκοπό αυτό βελτιώθηκε η κατασκευή της μικρορομποτικής πλατφόρμας, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ενσωμάτωση όσο το δυνατόν περισσότερων λειτουργιών και αισθητήρων. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας, είναι η λειτουργία και η μέτρηση των αισθητήριων μέσω του μικροελεγκτή της πλατφόρμας και η αποστολή των δεδομένων μέσω πρωτοκόλλου ασύρματης επικοινωνίας.

Η ενσωμάτωση των αισθητήρων αφορά την μέτρηση των στροφών των κινητήρων και τον εντοπισμό της θέσης. Οι αισθητήρες μέτρησης των στροφών αναπτύχθηκαν τόσο για επίβλεψη της τιμής τους, όσο και για τη χρήση τους ως ανάδραση σε περίπτωση ελέγχου κλειστού βρόχου. Το σύστημα εντοπισμού θέσης, με τη χρήση οπτικών αισθητήρων laser, ενσωματώθηκε στην πλατφόρμα ως ανάδραση για την μακροσκοπική κίνηση της πλατφόρμας, δηλαδή στον έλεγχο της κίνησης του μικρορομπότ μέχρι να φτάσει κάτω από το μικροσκόπιο, όπου εκτελεί τη βασική εργασία του.

Στην εργασία μελετήθηκε η κινηματική των συστημάτων συντεταγμένων των αισθητήρων και του ρομπότ, αναλύθηκαν οι εξισώσεις μεταφοράς των συστημάτων συντεταγμένων και έγιναν πειράματα εξακρίβωσης της ακρίβειας της εκτίμησης της θέσης του ρομπότ. Παράλληλα, μελετήθηκε τόσο η μακροσκοπική κίνηση με ανάδραση τους αισθητήρες θέσης για να εξακριβωθεί η δυνατότητα εύρεσης του μικροσκοπίου από την πλατφόρμα, όσο και η μικροσκοπική κίνηση του ρομπότ κάτω από το μικροσκόπιο. Τέλος, έγινε μία πρώτη προσπάθεια επέκτασης του αλγορίθμου ελέγχου για να είναι δυνατή η υπέρβαση των αδυναμιών του προηγούμενου νόμου ελέγχου.

Abstract

The goal of this Master Thesis is to optimize the operation of the microrobotic platform of the Control Systems Lab, NTUA. The microrobot, under the innovative system of motion with vibration motors, has the ability to achieve motion with micrometer resolution, giving the opportunity of being used in various practical operations.

For this purpose, we upgraded the second version of the platform, in order to include more operations and sensors. Thus, the integration and measurement of all desired sensors with simultaneous wireless transmission of the data, through a specific protocol was achieved.

The sensors have to do with motor angular velocity and position estimation of the platform. The velocity sensors were developed for monitoring purposes, and as well as feedback for closed loop control. The localization system, using optical mouse sensors, was developed to provide feedback for the macroscopic motion of the platform. This refers to the robot's motion control allowing approach to the location of the microscope, under which the platform performs its main task.

In the present work, we studied the kinematics of the coordinate systems of the sensors and the robot, we analyzed motion transfer functions and we performed experiments to validate the accuracy of the robot's position estimation. At the same time, we tested both the macroscopic motion with the sensors feedback to determine the possibility of approaching the desired point, as well as the microscopic motion of the robot under the microscope. Finally, it was attempted to extend the control algorithm to overcome the weaknesses of the previous control law.

*Στους γονείς μου και
στη θεία μου*

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας τον καθηγητή Ευάγγελο Παπαδόπουλο που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με έναν ενδιαφέροντα τομέα της σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας. Οι γνώσεις του, οι συμβουλές του και η εμπειρία του ήταν καταλυτικοί παράγοντες στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Κώστα Βλάχο για την στήριξη, την πολύτιμη βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια ολοκλήρωσης της εργασίας. Οι συμβουλές του, αλλά και η πρακτική του συμβολή σε καίρια σημεία της υλοποίησης υπήρξε σημαντική.

Έπειτα θέλω να ευχαριστήσω τον συνεργάτη μου, Χαράλαμπο Λαμπούση για την άψογη συνεργασία στην διάρκεια ολοκλήρωσης της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης, όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου για την βοήθεια τους κάθε φορά που τη χρειαζόμουν.

Τέλος, να ευχαριστήσω όλους του ανθρώπους που είναι κοντά μου και με στηρίζουν σε κάθε επόμενο βήμα μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	5
Περιεχόμενα	6
Κατάλογος Σχημάτων.....	8
Κατάλογος Πινάκων	11
1 Εισαγωγή.....	13
1.1 Σκοπός Εργασίας	13
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	17
1.3 Δομή Εργασίας.....	17
2 Στοιχεία Θεωρίας	19
2.1 Περιγραφή τρόπου κίνησης της μικρορομποτικής πλατφόρμας	19
2.2 Συνοπτική παρουσίαση σχεδιασμού μικρορομποτικής πλατφόρμας.....	21
2.3 Αλγόριθμοι Επεξεργασία εικόνας.....	25
2.3.1 Επεξεργασία κάμερας	25
2.3.2 Αλγόριθμος επεξεργασίας εικόνας κάμερας μικροσκοπίου	27
3 Αισθητήρες	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Αισθητήρες μέτρησης στροφών	29
3.2.1 Στοιχεία του Timer_A του CC430	31
3.2.2 Επενέργηση κινητήρων	33
3.2.3 Μέτρηση Στροφών	34
3.2.4 Πειραματικές μετρήσεις	38
3.3 Μέτρηση θέσης.....	39
3.3.1 Multiple Slaves	39
3.3.2 Υλοποίηση SPI επικοινωνίας.....	40
3.4 Αισθητήρας δύναμης	44
4 Αποστολή δεδομένων	46
4.1 Γενικά Αρχιτεκτονική.....	46
4.2 Πρωτόκολλο επικοινωνίας	47
4.3 Σειριακή Επικοινωνία.....	49
4.4 Ασύρματη επικοινωνία.....	52
5 Εντοπισμός θέσης με αισθητήρες laser	58

5.1	Συστήματα συντεταγμένων	58
5.2	Εύρεση προσανατολισμού	62
5.3	Υπολογισμός θέσης τελικού σημείου δράσης	64
5.4	Ελάχιστα τετράγωνα	66
5.5	Βαθμονόμηση	69
5.5.1	Πείραμα μετατόπισης σε σταθερή ευθεία	71
5.5.2	Πείραμα περιστροφής	73
5.6	Πειραματικές Μετρήσεις	76
5.6.1	Ευθεία Τροχιά	76
5.6.2	Πείραμα περιστροφής	80
5.6.3	Βελτίωση βαθμονόμησης	81
6	Έλεγχος κίνησης	83
6.1	Μελέτη κίνησης	83
6.2	Αλγόριθμος ελέγχου	86
6.2.1	Μελέτη κάτω από το μικροσκόπιο	87
6.2.2	Μελέτη εκτός μικροσκοπίου	90
6.3	Περιγραφή επέκτασης αλγορίθμου ελέγχου	92
7	Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία	96
7.1	Συμπεράσματα	96
7.2	Μελλοντική εργασία	96
	Βιβλιογραφία	98
	Παράρτημα Α	100

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1.	Παράδειγμα έγχυσης κυττάρου.....	13
Σχήμα 1-2.	Παράδειγμα micromanipulator.....	13
Σχήμα 1-3.	Παράδειγμα σταθμού μικροσυγκολλήσεων.....	14
Σχήμα 1-4.	Οι μικρομποτικές πλατφόρμες MICRON, Nanowalker και MINIMAN.	14
Σχήμα 1-5.	Αριστερά το ρομπότ Kilobot του Harvard, δεξιά του ρομπότ TinyERP του Maryland	15
Σχήμα 1-6.	Το ρομπότ mRoberto από το University of Toronto.	15
Σχήμα 1-7.	Η πρώτη έκδοση του μικρορομπότ του εργαστηρίου. [6]	15
Σχήμα 1-8.	Η δεύτερη κατασκευαστική έκδοση του μικρορομπότ.	16
Σχήμα 2-1.	Μοντέλο κινητήρα με έκκεντρη μάζα [16].	19
Σχήμα 2-2.	Μοντέλο μικρορομποτικής πλατφόρμας με δύο κινητήρες δονήσεις [16].	20
Σχήμα 2-3.	Το μικρορομπότ του εργαστηρίου με ενσωματωμένα και τα 5 επίπεδα.	21
Σχήμα 2-4.	Το επίπεδο του μικροελεγκτή.	22
Σχήμα 2-5.	Το επίπεδο της τροφοδοσίας.....	22
Σχήμα 2-6.	Το επίπεδο των οπτικών αισθητήρων.	23
Σχήμα 2-7.	Το επίπεδο των κινητήρων.	23
Σχήμα 2-8.	Επίπεδο μέτρησης δύναμης.	24
Σχήμα 2-9.	Επίπεδο debugger.	24
Σχήμα 2-10.	Οι αρχικές υποπεριοχές παρακολούθησης ετεροσυσχέτισης.....	26
Σχήμα 2-11.	Πάνω η grayscale εικόνα της κάμερα. Κάτω, η αντίστοιχη δυαδική εικόνα....	27
Σχήμα 2-12.	Η οριοθέτηση της βελόνας από την επεξεργασία της κάμερας.	28
Σχήμα 3-1.	Ο αισθητήρας QRE1113.....	29
Σχήμα 3-2.	Τοποθέτηση του αισθητήρα μέτρησης στροφών στο ρομπότ.	30
Σχήμα 3-3.	Η λειτουργία του συστήματος μέτρησης στροφών.	30
Σχήμα 3-4.	Επιλογή της περιόδου δειγματοληψίας.....	31
Σχήμα 3-5.	Up Mode λειτουργία του καταχωρητή TA1CCR0.....	33
Σχήμα 3-6.	Επιλογή του κατάλληλου OUTPUT bit.....	33
Σχήμα 3-7.	Continuous Mode λειτουργία του Timer.....	35
Σχήμα 3-8.	Ενεργοποίηση Interrupts του Timer.....	35
Σχήμα 3-9.	Η λειτουργία Capture του καταχωρητή.	36
Σχήμα 3-10.	Ο καταχωρητής του Interrupt του Timer.....	36
Σχήμα 3-11.	Λογικό διάγραμμα υπολογισμού των στροφών.....	37
Σχήμα 3-12.	Το καταγεγραμμένο σήμα του αισθητήρα από τον παλμογράφο.	38
Σχήμα 3-13.	Τα αποτελέσματα μέτρησης από τον αισθητήρα.....	38
Σχήμα 3-14.	Λειτουργία tri-state buffer.	39

Σχήμα 3-15.	Τα σήματα κατά την ανάγνωση και την εγγραφή μέσω του πρωτοκόλλου SPI.	42
Σχήμα 3-16.	Master-Slave επικοινωνία του SPI πρωτοκόλλου.	42
Σχήμα 3-17.	Λογικό διάγραμμα ανταλλαγής δεδομένων μέσω SPI διαύλου.	43
Σχήμα 3-18.	Ο default καταχωρητής για τον έλεγχο της σωστής επικοινωνίας.	44
Σχήμα 3-19.	Η μονάδα του ADC του μικροελεγκτή CC430.	45
Σχήμα 4-1.	Γενική αρχιτεκτονική του συστήματος.	47
Σχήμα 4-2.	Σύνδεση του εξομοιωτή με το ρολόι Chronos.	49
Σχήμα 4-3.	Οι ακροδέκτες του εξομοιωτή.	50
Σχήμα 4-4.	Επιλογή Baud Rate σειριακής επικοινωνίας του μικροελεγκτή CC430.....	51
Σχήμα 4-5.	Λογικό διάγραμμα υλοποίησης σειριακής επικοινωνίας.	52
Σχήμα 4-6.	Η μορφή του πακέτου της ασύρματης επικοινωνίας.	55
Σχήμα 4-7.	Λογικό διάγραμμα χειρισμού του πακέτου της ασύρματης επικοινωνίας, για την κύρια συσκευή.	57
Σχήμα 4-8.	Λογικό διάγραμμα χειρισμού του πακέτου της ασύρματης επικοινωνίας για το μικρορομπότ.	57
Σχήμα 5-1.	Το σωματόδετο ΣΣ των οπτικών αισθητήρων.....	58
Σχήμα 5-2.	Συστήματα συντεταγμένων του ρομπότ.....	59
Σχήμα 5-3.	Αναπαράσταση της γωνίας ρομπότ-αισθητήρα.	61
Σχήμα 5-4.	Εύρεση θέσης σημείου ρομπότ ως προς τη θέση του αισθητήρα.	62
Σχήμα 5-5.	Υπολογισμός της γωνίας προσανατολισμού μέσω της atan2.	63
Σχήμα 5-6.	Αναπαράσταση της atan2	63
Σχήμα 5-7.	Γεωμετρικός υπολογισμός της γωνίας.	64
Σχήμα 5-8.	Επιλογή σημείο O_R	65
Σχήμα 5-9.	Επίδραση της συχνότητας της δειγματοληψίας στην αναπαράσταση της κίνησης.....	70
Σχήμα 5-10.	Πείραμα βαθμονόμησης σε ευθεία.....	71
Σχήμα 5-11.	Υπολογισμός των μεταβλητών της βαθμονόμησης σε ευθεία.	72
Σχήμα 5-12.	Τα μεγέθη που υπολογίζονται στο πείραμα περιστροφής.....	73
Σχήμα 5-13.	Πειραματική διάταξη βαθμονόμησης με περιστροφή	74
Σχήμα 5-14.	Πείραμα περιστροφής για την βαθμόμηση των αισθητήρων.	75
Σχήμα 5-15.	Πείραμα 3cm ευθείας, άξονας x-y.	77
Σχήμα 5-16.	Πείραμα 3cm ευθείας, άξονας x,y και προσανατολισμού.	77
Σχήμα 5-17.	Πείραμα 6.3cm ευθείας, άξονας x-y.	78
Σχήμα 5-18.	Πείραμα 6.3cm ευθείας, άξονας x, y και προσανατολισμού.	78
Σχήμα 5-19.	Πείραμα 10cm ευθείας, άξονας x-y.	79
Σχήμα 5-20.	Πείραμα 10cm ευθείας, άξονας x,y και προσανατολισμού.	79
Σχήμα 5-21.	Πείραμα περιστροφής 90ο, άξονας x-y.....	80
Σχήμα 5-22.	Πείραμα περιστροφής, άξονες x,y και προσανατολισμού.	81
Σχήμα 5-23.	Βελτίωση βαθμονόμησης σε περιστροφή, άξονας x-y.	81

Σχήμα 5-24.	Βελτίωση βαθμονόμησης σε περιστροφή, γωνία προσανατολισμού.....	82
Σχήμα 5-25.	Βελτίωση ακρίβειας λόγω διόρθωσης γωνίας φ.....	82
Σχήμα 6-1.	Οι δυνάμεις του μοντέλου της πλατφόρμας με δύο επενεργητές.	83
Σχήμα 6-2.	Περιοχές λειτουργίας της πλατφόρμας.	83
Σχήμα 6-3.	Δυνατές κινήσεις της ρομποτικής πλατφόρμας [15].	85
Σχήμα 6-4.	Η παρασιτική κίνηση της πλατφόρμας.....	86
Σχήμα 6-5.	Σχηματική αναπαράσταση του αλγορίθμου ελέγχου.....	87
Σχήμα 6-6.	Η διάταξη του μικροσκοπίου.....	88
Σχήμα 6-7.	Διεξαγωγή πειραμάτων ανοιχτού βρόγχου.	89
Σχήμα 6-8.	Η αναπαράσταση της βελόνας κάτω από το μικροσκόπιο κατά τη διάρκεια της κίνησης προς το τελικό επιθυμητό σημείο.....	89
Σχήμα 6-9.	Τα αποτελέσματα του πειράματος κλειστού βρόγχου κάτω από το μικροσκόπιο.	90
Σχήμα 6-10.	Οι συντεταγμένες των αρχικών υποπεριοχών του ρομπότ στην ανάλυση του βίντεο.	91
Σχήμα 6-11.	Εξακρίβωση εντοπισμού θέσης μέσω σύγκρισης με εξωτερική κάμερα.....	91
Σχήμα 6-12.	Αποτελέσματα κίνησης του ρομπότ με ανάδραση αισθητήρων θέσης.	92
Σχήμα 6-13.	Περιγραφή P ελέγχου της ρομποτικής πλατφόρμας.	93
Σχήμα 6-14.	Αποτελέσματα ευθείας κίνησης στους άξονες x-y.	94
Σχήμα 6-15.	Αποτελέσματα προσανατολισμού και x,y συντεταγμένων στο πείραμα ευθείας.	94
Σχήμα 6-16.	Αποτελέσματα εύρεσης σημείου στους άξονες x-y.	95
Σχήμα 6-17.	Αποτελέσματα προσανατολισμού και x,y συντεταγμένων στο πείραμα εύρεσης σημείου.	95

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1.	Ακροδέκτες PWM του μικροελεγκτή.....	34
Πίνακας 3-2.	Οι ακροδέκτες των αισθητήρων στο μικροελεγκτή.....	36
Πίνακας 3-3.	Σύνδεση ακροδεκτών SPI στο μικροελεγκτή.....	40
Πίνακας 3-4.	Πακέτα αποστολής bytes για το πρωτόκολλο SPI του αισθητήρα.....	43
Πίνακας 4-1.	Μορφή πακέτου αποστολής εντολών ταχύτητας στα μικρορομπότ.....	48
Πίνακας 4-2.	Μορφή πακέτου αποστολή εντολών θέσης στα μικρορομπότ.....	48
Πίνακας 4-3.	Μορφή πακέτου αποστολής τιμών αισθητήρων στην κύρια συσκευή.	48
Πίνακας 4-4.	Interrupts flags της ασύρματης μονάδας και η συνθήκη ενεργοποίησής τους.....	53
Πίνακας 5-1.	Αποτελέσματα βαθμονόμηση μεταφορικής κίνησης.....	73
Πίνακας 5-2.	Αποτελέσματα βαθμονόμηση περιστροφικής κίνησης	76

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της ρομποτικής και πιο συγκεκριμένα των μικρορομποτικών συστημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική στην εξέλιξη της σύγχρονης τεχνολογίας. Η συνολική ανάπτυξη στον τομέα της μηχανοτρονικής, καθώς και η ολοένα και αυξανόμενη μείωση του μεγέθους των εξαρτημάτων και των ηλεκτρονικών, έχει βοηθήσει στην διεύρυνση του αριθμού των εργασιών που μπορούν να γίνουν από αυτοματοποιημένα και μικρορομποτικά συστήματα.

Η έρευνα και η εξέλιξη των συγκεκριμένων τεχνολογιών εδράζεται πάνω σε πραγματικές ανάγκες που υπάρχουν για την εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών και λειτουργιών. Τα μικρορομποτικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εργασίες μικροχειρισμού σε βιολογικές επεμβάσεις, όπως για παράδειγμα επεξεργασίες ιστών και πρωτεϊνών και εργασίες έγχυσης τους σε κάποιο κύτταρο. Λόγω της φύσης της κίνησης τους, οι εργασίες αυτές απαιτούν ανάλυση κίνησης σε επίπεδο μικρόμετρων.



Σχήμα 1-1. Παράδειγμα έγχυσης κυττάρου.

Ένα άλλο πεδίο που μπορούν να βρουν εφαρμογή οι μικρορομποτικές πλατφόρμες είναι στην μικροεπεξεργασία κατασκευών που είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν χειροκίνητα κάτω από μικροσκόπιο. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μικροχειριστές (manipulators) για την διευκόλυνση τέτοιων λειτουργιών (Σχήμα 1-2). Τα μικρορομποτά θα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν αντί για τους χειριστές, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας τους.



Σχήμα 1-2. Παράδειγμα micromanipulator.

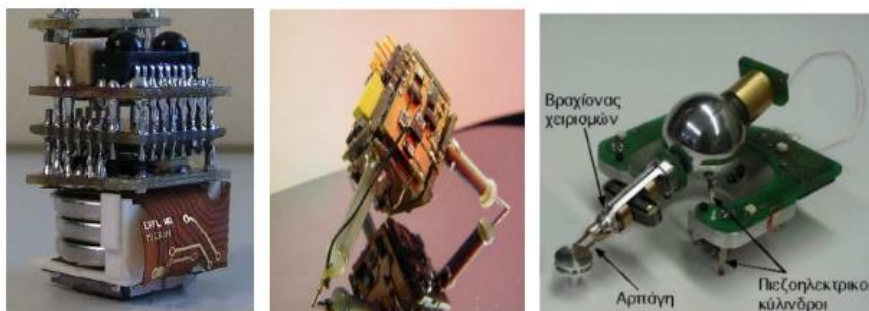
Επίσης, τα μικρορομποτικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν εφαρμογές μικροσυγκολλήσεων. Η ανάπτυξη των MEMS και γενικότερα η τάση για μείωση του μεγέθους των ηλεκτρονικών οδηγεί στην ανάγκη μικροκινήσεων κάτω από το μικροσκόπιο. Οι εργασίες αυτές μπορούν να αφορούν την τοποθέτηση μικροηλεκτρονικών στις πλακέτες, της επιδιόρθωση κάποιας κόλλησης, ή το εντοπισμό πιθανών βλαβών στις κολλήσεις.

Με τη χρήση των μικρορομποτικών συστημάτων οι εργασίες που πραγματοποιούνται σε σταθμούς κόλλησης μικροηλεκτρονικών θα μπορούν να αντικαταστήσουν τη χειροκίνητη λειτουργία, είτε αυτόματα, είτε με τηλεργασία.



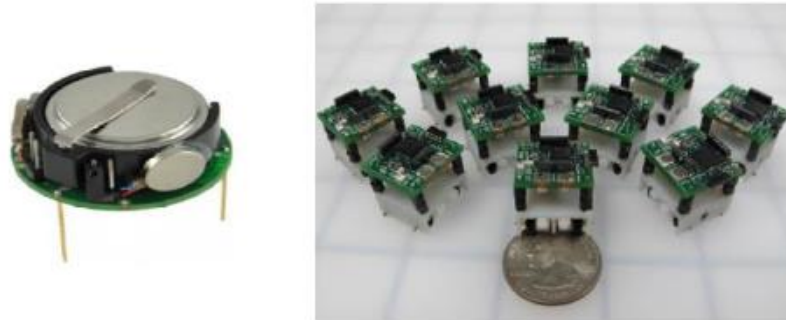
Σχήμα 1-3. Παράδειγμα σταθμού μικροσυγκολλήσεων.

Ορισμένες υλοποιήσεις μικρομποτικών συστημάτων αναφέρονται στα [4], [7]. Και τα τρία αποτελούν πανεπιστημιακές έρευνες και πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια τετραετούς συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών ομάδων. Κύρια ιδέα ήταν η κατασκευή αυτόνομης κινούμενης πλατφόρμας με μικρομετρική ακρίβεια και έχοντας εγκαταστήσει πάνω της μετρητικά συστήματα, συστήματα επικοινωνίας, επενέργησης, τροφοδοσίας και ελέγχου. Και στις τρεις περιπτώσεις ο μηχανισμός κίνησης χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. Στα συγκεκριμένα προγράμματα, με μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους, η αρχή λειτουργίας του μηχανισμού κίνησης τους ονομάζεται, αρχή προσκόλλησης-ολίσθησης(stick-slip).

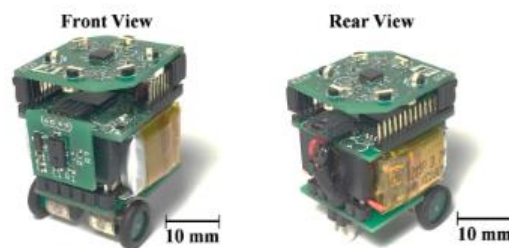


Σχήμα 1-4. Οι μικρομποτικές πλατφόρμες MICRON, Nanowalker και MINIMAN.

Άλλα παραδείγματα υλοποιήσεων μικρορομποτικών συστημάτων τα οποία αφορούν κυρίως τη χρήση σε εφαρμογές «σμήνους» (swarm robotics), φαίνονται στο Σχήμα 1-5 και στο Σχήμα 1-6. Οι υλοποιήσεις τέτοιων ρομπότ, έχουν διαφορετικό σκοπό χρήσης από το μικρορομπότ του εργαστηρίου, αλλά προσφέρουν ιδέες όσον αφορά τα περιφερειακά συστήματα που χρησιμοποιούν.



Σχήμα 1-5. Αριστερά το ρομπότ Kilobot του Harvard, δεξιά του ρομπότ Tinycam του Maryland



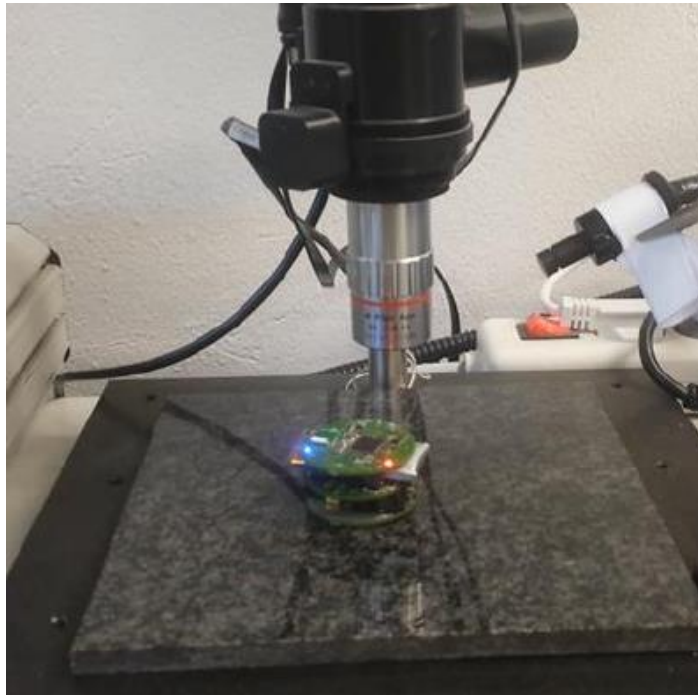
Σχήμα 1-6. Το ρομπότ mRoberto από το University of Toronto.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Δρ. Π. Βαρθολομαίου [16], στο εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. αναπτύχθηκε μία μικρορομποτική πλατφόρμα με παγκόσμια πρωτοπόρο τρόπο κίνησης μέσω φυγόκεντρων επενεργητών δόνησης, με δυνατότητα ανάλυσης κίνησης σε επίπεδο μm .



Σχήμα 1-7. Η πρώτη έκδοση του μικρορομπότ του εργαστηρίου. [6]

Στις εργασίες [17] [20] μελετήθηκε η δεύτερη έκδοση της μικρορομποτικής κατασκευής του εργαστηρίου (Σχήμα 1-8), με σκοπό την αναβάθμιση του μικροελεγκτή και της ασύρματης επικοινωνίας και την δυνατότητα ενσωμάτωσης αισθητήρων θέσης για τον έλεγχο της κίνησης εκτός μικροσκοπίου.



Σχήμα 1-8. Η δεύτερη κατασκευαστική έκδοση του μικρορομπότ.

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του ΔΠΜΣ Συστημάτων Αυτοματισμού σε συνεργασία με τον μεταπτυχιακό φοιτητή Χαράλαμπο Λαμπρούση [21].

Σκοπός της εργασίας ήταν η ολοκλήρωση της ενσωμάτωσης των πλήρων λειτουργιών του ρομποτικού συστήματος. Αυτό αφορά την ενσωμάτωση τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε επίπεδο λογισμικού αισθητήρων μέτρησης στροφών, αισθητήρων μέτρησης δύναμης και των οπτικών αισθητήρων θέσης της πλατφόρμας. Επίσης, αφορά τη δημιουργία πρωτοκόλλου επικοινωνίας μεταξύ των μικρορομπότ και του κεντρικού υπολογιστή καθώς και τη μελέτη του συστήματος εντοπισμού θέσης για τον έλεγχο της θέσης του μικρορομπότ κατά τη μακροσκοπική κίνηση του, δηλαδή κατά την προσέγγιση του μικροσκοπίου.

Η περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση του βελτιωμένου σχεδιασμού είχε ως σκοπό την ενσωμάτωση όλων των αισθητήρων που είχαν τοποθετηθεί στις διάφορες εκδόσεις και την εύρωστη λειτουργία τους στο καινούργιο σύστημα. Έτσι θα είναι δυνατή η λειτουργία της ανάγνωσης των στροφών του κινητήρα, τόσο για επίβλεψη τους όσο και για πιθανό έλεγχο τους μέσω αλγορίθμου κλειστού βρόγχου. Με βάση αυτό, έπρεπε να γίνει πιο συστηματική μελέτη για την ασύρματη επικοινωνία και την δημιουργία πρωτοκόλλου για τα συγκεκριμένα δεδομένα που θα ανταλλάσσονται.

Η ένταξη και η υλοποίηση του συστήματος εντοπισμού θέσης μέσω των οπτικών αισθητήρων, έγινε με σκοπό τον έλεγχο της μακροσκοπικής κίνησης του μικρορομπότ, δηλαδή την κίνηση που εκτελεί το ρομπότ για να μεταφερθεί κάτω από το μικροσκόπιο.

Στην παρούσα εργασία έγινε μια πρώτη μελέτη για την δυνατότητα του συστήματος να ανταποκριθεί στην ακρίβεια της τάξης των 1.5-3mm, όση δηλαδή είναι περίπου και η διάμετρος της κάμερας του μικροσκοπίου.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η μελέτη της βιβλιογραφίας για την παρούσα εργασία περιλαμβάνει μελέτη προηγούμενων εργασιών πάνω σε μικρορομποτικά συστήματα, μελέτη σε προηγούμενες δημοσιεύσεις και εργασίες που αφορούν στο μικρορομπότ του εργαστηρίου, δημοσιεύσεις που αφορούν την υλοποίηση εντοπισμού θέσης, καθώς και βιβλία και τεχνικές αναφορές πάνω στον προγραμματισμό του μικροελεγκτή και των διάφορων προγραμμάτων, όπως την ανάλυση εικόνων από βίντεο.

Στις δημοσιεύσεις [11], [12] μελετήθηκε ο τρόπος κίνησης και οι αρχές λειτουργίες του μικρορομπότ. Οι εργασίες [23], [26] περιγράφουν κάποιες κατασκευαστικές υλοποιήσεις που αφορούν την πρώτη έκδοση του μικρορομπότ. Οι εργασίες [20], [17] περιγράφουν τη δεύτερη κατασκευαστική έκδοση του μικρορομπότ.

Όσον αφορά τον έλεγχο της κίνησης του μικρορομπότ, η δημοσίευση [13] περιγράφει την υλοποίηση ενός αλγορίθμου ελέγχου για το μικρορομπότ, με ανάδραση θέσης από το μικροσκόπιο. Στην εργασία [15], μελετήθηκαν διάφορες τεχνικές για την αποφυγή των μη ολόνομων περιορισμών του μικρορομπότ.

Για το σύστημα εντοπισμού θέσης μελετήθηκαν οι εργασίες [19], [22], [24], [27], που αφορούν την τοποθέτηση οπτικών αισθητήρων στο ρομπότ του διαστημικού εξομοιωτή του εργαστηρίου. Οι δημοσιεύσεις [1], [2] μελετάνε την ανάπτυξη ενός συστήματος οδομετρίας για τροχοφόρο ρομπότ με τη χρήση οπτικών αισθητήρων. Προτείνουν ένα σύστημα βαθμονόμησης και ένα σύστημα διόρθωσης των σφαλμάτων των αισθητήρων. Οι δημοσιεύσεις [5], [9] αφορούν την τοποθέτηση και τη βαθμονόμηση των αισθητήρων, χρησιμοποιώντας την μορφή των ελαχίστων τετραγώνων.

1.3 Δομή Εργασίας

Η εργασία αυτή έχει 7 συνολικά κεφάλαια.

Στο πρώτο περιγράφονται οι δυνατότητες και οι εφαρμογές της μικρορομποτικής καθώς και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται κάποιες βασικές αρχές λειτουργίας του μικρορομπότ, καθώς και μια περιγραφή του βελτιωμένου σχεδιασμού που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας [21].

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία υλοποίησης του λογισμικού για τη μέτρηση των αισθητήρων με τη χρήση του μικροελεγκτή CC430.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η υλοποίηση της ανταλλαγής των δεδομένων μέσω της ασύρματης επικοινωνίας και του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιήθηκε.

Το πέμπτο κεφάλαιο εξετάζει τη σχεδίαση του συστήματος εντοπισμού θέσης. Περιγράφονται τα συστήματα συντεταγμένων και ο τρόπος υπολογισμού της θέσης στο χώρο και αποτυπώνονται οι πειραματικές μετρήσεις.

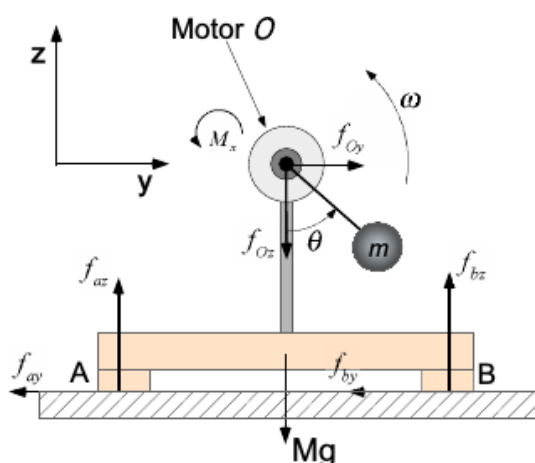
Το έκτο κεφάλαιο περιγράφει τη μελέτη του ελέγχου της κίνησης και της θέσης του μικρορομπότ, με ανάδραση τόσο το μικροσκόπιο όσο και τους οπτικούς αισθητήρες.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο, εξάγονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω μελέτες και προτείνονται βήματα για μελλοντική εργασία και επέκταση και βελτιστοποίηση των υπάρχοντων υλοποιήσεων.

2 Στοιχεία Θεωρίας

2.1 Περιγραφή τρόπου κίνησης της μικρορομποτικής πλατφόρμας

Η ανάλυση και η μελέτη του θεωρητικού μοντέλου κίνησης του μικρορομπότ πραγματοποιήθηκε εξολοκλήρου στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής του Δρ. Π. Βαρθολομαίου [16]. Στην εργασία του, ανέπτυξε ένα μοντέλο κίνησης το οποίο εφαρμόζεται σε μία πλατφόρμα που φέρει κινητήρες με έκκεντρο φορτίο. Για την μελέτη του θεωρητικού υποβάθρου, αναπτύχθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο, μίας έκκεντρης μάζας, ενός βαθμού ελευθερίας (Σχήμα 2-1).



Σχήμα 2-1. Μοντέλο κινητήρα με έκκεντρη μάζα [16].

Το μοντέλο περιλαμβάνει μία πλατφόρμα μάζας M κι έναν μηχανισμό κίνησης ο οποίος αποτελείται από μία έκκεντρη μάζα m και έναν κινητήρα O . Ο κινητήρας κινείται με γωνιακή ταχύτητα ω και κάθε κύκλος λειτουργίας του μοντέλου ολοκληρώνεται με την πλήρη περιστροφή της έκκεντρης μάζας.

Οι βαρυτικές και οι κεντρόφυγες δυνάμεις f_{oy} και f_{oz} που επενεργούν στην πλατφόρμα στους άξονες y και z περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$f_{oy} = m\omega^2 r \sin\theta \quad (2-1)$$

$$f_{oz} = -mg - m\omega^2 r \cos\theta \quad (2-2)$$

όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα, θ η γωνία περιστροφής του έκκεντρου, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και r η απόσταση της έκκεντρης μάζας από τον κινητήρα και κέντρο περιστροφής.

Οι τριβές αναπτύσσονται στα σημεία επαφή της πλατφόρμας με το έδαφος, δηλαδή τα σημεία A και B του Σχήματος Σχήμα 2-1. Οι τριβές αυτές μοντελοποιούνται με τον μοντέλο

τριβής Coulomb με μέγιστο συντελεστή στατικής τριβής ίσο με το συντελεστή τριβής ολίσθησης. Από τις εξισώσεις του μοντέλου φαίνεται πως μετά από μία συγκεκριμένη τιμή της γωνιακής ταχύτητας ω , οι επενεργούμενες δυνάμεις του κινητήρα μπορούν να ξεπεράσουν την δύναμη της τριβής κι έτσι η πλατφόρμα να κινηθεί.

Από το Σχήμα 2-1 φαίνεται πως με μία ανθρωρολογιακή φορά περιστροφής της μάζας m , η πλατφόρμα εκτελεί στοιχειώδη μετατόπιση κατά τον άξονα y . Συνεπώς οι εξισώσεις για την κίνηση εκφράζονται από τις σχέσεις:

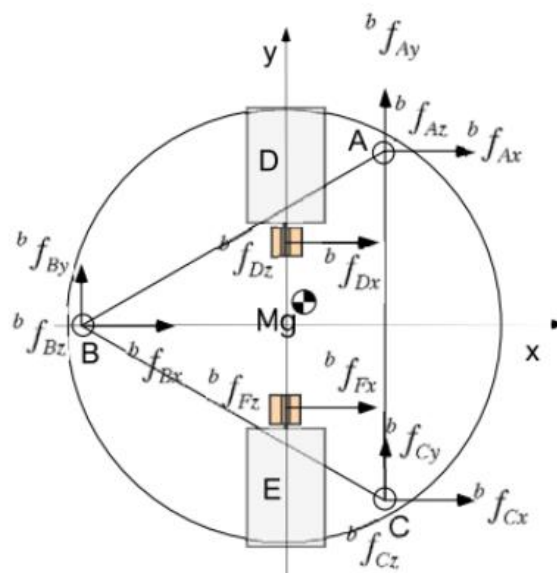
$$M\ddot{y} = f_{oz} - \mu(f_{oz} + f_{bz}) \quad (2-3)$$

$$f_{az} + f_{bz} - Mg + f_{oz} = 0 \quad (2-4)$$

$$N = Mg - f_{oz} \quad (2-5)$$

Όπου \ddot{y} η επιτάχυνση κατά τον άξονα y , N η συνολική κατακόρυφη αντίδραση, μ ο συντελεστής τριβής και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ο σχεδιασμός της πλατφόρμας έγινε με την χρήση δύο επενεργητών (Σχήμα 2-2). Με την χρήση δύο επενεργητών, D και E , είναι δυνατός ο έλεγχος της κίνησης στο επίπεδο, δηλαδή στις συντεταγμένες x , y , θ . Το μειονέκτημα της χρήσης των δύο επενεργητών ότι το σύστημα γίνεται μη ολόνομο και δεν είναι δυνατόν να παράξει πλήρως ελεγχόμενη κίνηση.



Σχήμα 2-2. Μοντέλο μικρορομποτικής πλατφόρμας με δύο κινητήρες δονήσεις [16].

Οι δυνάμεις f και οι ροπές n που επιδρούν στην πλατφόρμα περιγράφονται από τις εξισώσεις:

$${}^b f_{ix} = m_i r_i \omega_i^2 \sin\theta \quad (2-6)$$

$${}^b f_{iy} = 0 \quad (2-7)$$

$${}^b f_{iz} = -m_i g - m_i r_i \omega_i^2 \sin\theta \quad (2-8)$$

$${}^b n_{ix} = 0 \quad (2-9)$$

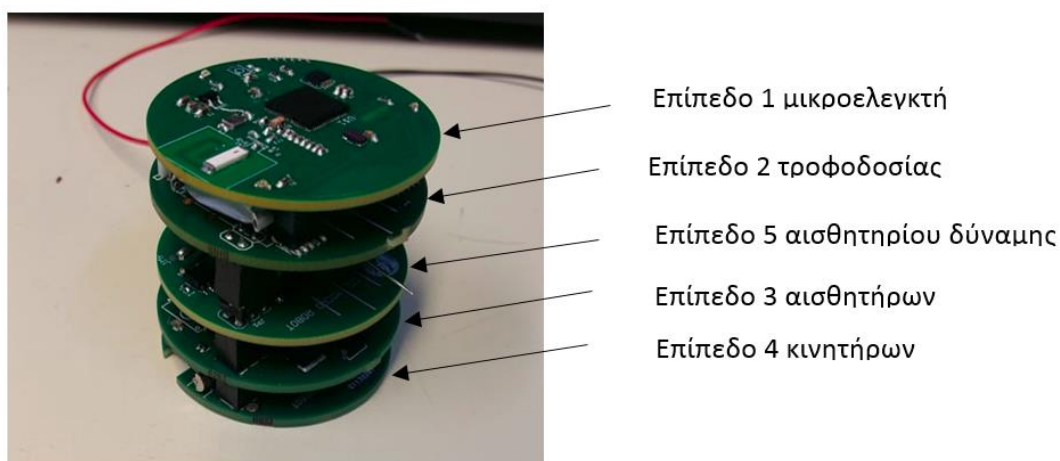
$${}^b n_{iy} = -m_i g r_i \sin\varphi_i \sin\theta \quad (2-10)$$

$${}^b n_{iz} = 0 \quad (2-11)$$

όπου $i = \{D, E\}$, $\varphi_D = 90^\circ$ και $\varphi_E = -90^\circ$ [16].

2.2 Συνοπτική παρουσίαση σχεδιασμού μικρορομποτικής πλατφόρμας

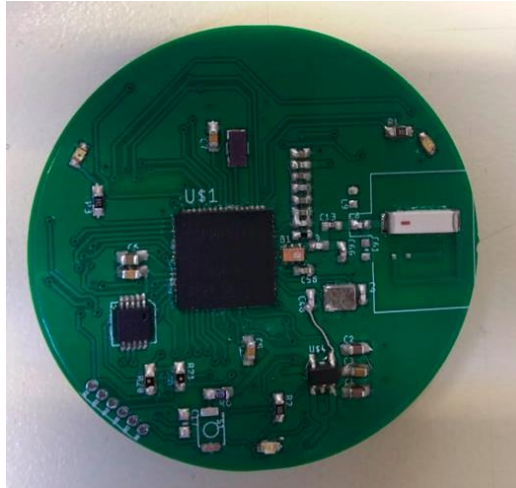
Εκτεταμένη περιγραφή της κατασκευής της πλατφόρμας (Σχήμα 2-3) γίνεται στην εργασία [21]. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται συνοπτικά η κατασκευή του μικρορομπότ για πιο ολοκληρωμένη παρουσίαση της συνολικής εικόνας του μικρορομπότ.



Σχήμα 2-3. Το μικρορομπότ του εργαστηρίου με ενσωματωμένα και τα 5 επίπεδα.

Το μικρορομπότ στις βασικές του λειτουργίες αποτελείται από τα παρακάτω επίπεδα πλακετών.

1. Επίπεδο μικροελεγκτή



Σχήμα 2-4. Το επίπεδο του μικροελεγκτή.

Το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει τον μικροελεγκτή του συστήματος που χρησιμοποιείται. Για την εφαρμογή έχει επιλεγθεί ο CC430f6137 της εταιρίας Texas Instruments για λόγους που έχουν να κάνουν με την πολύ χαμηλή κατανάλωση, το κόστος και την ενσωματωμένη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας.

Παράλληλα με τον μικροελεγκτή αναπτύχθηκαν και τα περιφερειακά κυκλώματα που αφορούν στις εισόδους στις αναλογικές θύρες, στον ταλαντωτή, στο κύκλωμα διασύνδεσης I2C και SPI πρωτοκόλλων επικοινωνίας και κυρίως στη σύνδεση της κεραίας και του κυκλώματος ενίσχυσης της ασύρματης επικοινωνίας.

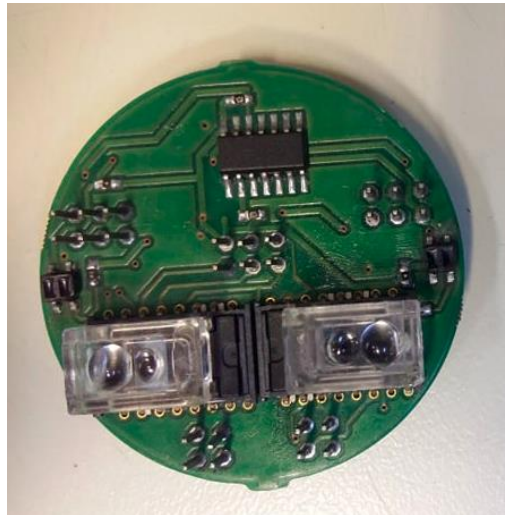
2. Επίπεδο τροφοδοσίας



Σχήμα 2-5. Το επίπεδο της τροφοδοσίας.

Το επίπεδο τροφοδοσίας περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του κυκλώματος τροφοδοσίας του συνολικού συστήματος. Το κύκλωμα τροφοδοσίας, αποτελείται από μία μονάδα διαχείρισης ισχύος, πιο συγκεκριμένα το ολοκληρωμένο TP65721 της Texas instruments. Η συγκεκριμένη επιλογή προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση για φόρτιση μπαταριών και ρυθμιζόμενων εξόδων τάσης μέσω ενός γραμμικού ρυθμιστή τάσης (LDO) και ενός DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (DC-DC converter). Στο επίπεδο αυτό τοποθετείται και η βελόνα του μικρορομπότ.

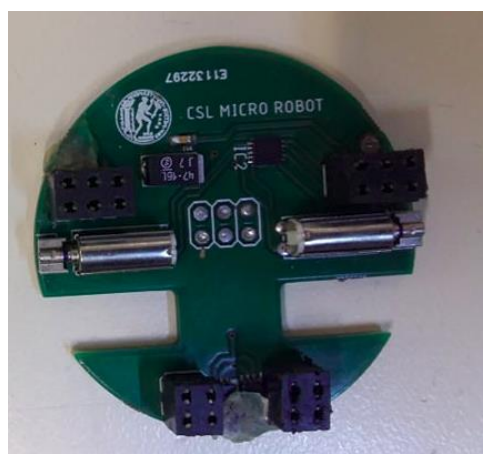
3. Επίπεδο Αισθητήρων



Σχήμα 2-6. Το επίπεδο των οπτικών αισθητήρων.

Στο επίπεδο αυτό τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες μέτρησης των στροφών και οι οπτικοί αισθητήρες θέσης. Έγινε μελέτη για την ορθή τοποθέτηση των αισθητηρίων στην βέλτιστη δυνατή θέση έτσι ώστε να έχουμε εύρυθμη λειτουργία και σωστές μετρήσεις.

4. Επίπεδο κινητήρων



Σχήμα 2-7. Το επίπεδο των κινητήρων.

Στο επίπεδο αυτό τοποθετήθηκαν οι μικροκινητήρες δόνησης και το κύκλωμα οδήγησης τους (H-bridge). Παράλληλα, υπήρξε πρόβλεψη για την δυνατότητα φόρτισης από τις

μεταλλικές σφαίρες στήριξης της πλατφόρμας και μελετήθηκε η ορθή τοποθέτηση των σφαιρών για την τοποθέτηση των οπτικών αισθητήρων στο κατάλληλο ύψος.

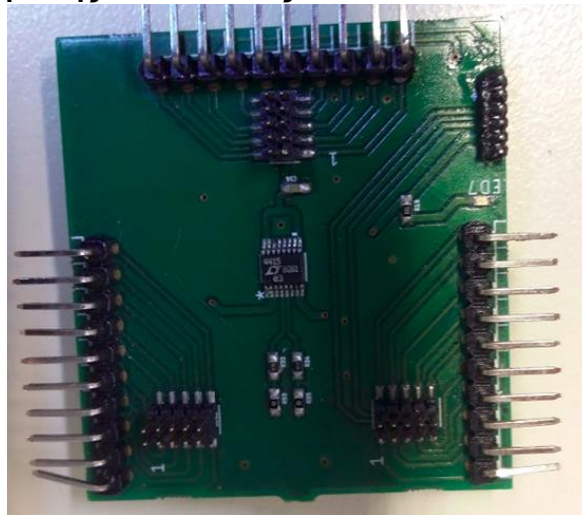
5. Επίπεδο μέτρησης αισθητηρίου δύναμης



Σχήμα 2-8. Επίπεδο μέτρησης δύναμης.

Στο επίπεδο αυτό τοποθετήθηκε το κύκλωμα μέτρησης του αισθητηρίου δύναμης. Αυτό περιλαμβάνει δύο στάδια ενίσχυσης, σχεδιασμό κυκλώματος μηδενισμού του offset της πρώτης ενίσχυσης και χαμηλοπερατό φίλτρο RC που εφαρμόζεται στην αναλογική έξοδο του αισθητήρα.

6. Επίπεδο σειριακής επικοινωνίας



Σχήμα 2-9. Επίπεδο debugger.

Το επίπεδο αυτό αποτελεί βοηθητικό επίπεδο λειτουργίας, και περιλαμβάνει το σχεδιασμό ενός κυκλώματος διαμοιρασμού τάσης τροφοδοσίας και σειριακής επικοινωνίας της πλακέτας του μικροελεγκτή.

2.3 Αλγόριθμοι Επεξεργασία εικόνας

Κατά την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές κάμερες.

- Μία κάμερα του μικροσκοπίου, η οποία λειτουργεί σαν ανάδραση για τον αλγόριθμο θέσης όταν το μικρορομπότ βρίσκεται κάτω από το μικροσκόπιο
- Κάμερα η οποία καταγράφει την κίνηση εκτός μικροσκοπίου με σκοπό την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της καταγραφής ποντικιών

Αναλύονται οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των frames του video και τον προσδιορισμό της θέσης του μικρορομπότ, και πιο συγκεκριμένα του τελικού σημείου δράσης του, της βελόνας.

2.3.1 Επεξεργασία κάμερας

Για την επεξεργασία της εικόνας από την κάμερα καταγραφής εκτός μικροσκοπίου χρησιμοποιείται η τεχνική της ετεροσυσχέτισης (cross correlation) η οποία συνήθως χρησιμοποιείται για σήματα τα οποία παρουσιάζουν μια χρονική μετατόπιση το ένα ως προς το άλλο. Η ετεροσυσχέτιση είναι ένας δείκτης της ομοιότητας δύο σημάτων, η οποία για συνεχή σήματα f, g ορίζεται ως [3]

$$(f * g)(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f^*(t)g(t + \tau)dt \quad (2-12)$$

όπου, f^* είναι η συζυγής συνάρτηση της f και τ η χρονική καθυστέρηση των δύο σημάτων.

Συνεπώς, για δύο σήματα f, g η ετεροσυσχέτιση είναι ένας δείκτης που δίνει το πόσο πρέπει να μετακινηθεί το σήμα g ώστε να συμπίπτει με το σήμα f . Το μέγιστο του αποτελέσματος της ετεροσυσχέτισης προκύπτει όταν οι δύο συναρτήσεις ταυτιστούν. Η κανονικοποιημένη μορφή του μεγέθους της ετεροσυσχέτισης χρησιμοποιείται για την σύγκριση των σημάτων σε ένα κοινό σύστημα. Η κανονικοποιημένη ετεροσυσχέτιση ενός σήματος $g(x, y)$ με ένα άλλο $f(x, y)$ υπολογίζεται ως

$$\frac{1}{n} \sum_{x,y} \frac{((f(x,y) - \bar{f})(g(x,y) - \bar{g}))}{\sigma_f \sigma_g} \quad (2-13)$$

όπου n το σύνολο των pixels στις εικόνες g και f , \bar{f} και \bar{g} οι συζυγείς μιγαδικοί των σημμάτων f, g και σ_f και σ_g οι τυπικές αποκλίσεις των σημάτων.

Στον τομέα της επεξεργασίας εικόνας, ο υπολογισμός της κανονικοποιημένης ετεροσυσχέτισης συχνά χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ανίχνευσης κίνησης (motion tracking): Η υποπεριοχή μιας αρχικής εικόνας της οποίας η κίνηση πρέπει να ανιχνευτεί, μετατοπίζεται σε διαφορετικά μέρη των επόμενων εικόνων-καρέ. Στα μέρη όπου όντως έχει υπάρξει μετατόπιση της ζητούμενης υποπεριοχής, η ετεροσυσχέτιση θα μεγιστοποιείται και έτσι είναι αρκετά απλή η παρακολούθηση της κίνησης. Μια ιδιότητα μάλιστα της κανονικοποιημένης μορφής που ευνοεί τη χρήση της, είναι ότι οι τιμές της είναι φραγμένες στο διάστημα $[-1.0, 1.0]$, κάνοντας πολύ απλές τις συγκρίσεις μεταξύ αποτελεσμάτων και το χαρακτηρισμό διαφορετικών εφαρμογών.

Στο περιβάλλον MATLAB υπάρχει η συνάρτηση `normxcorr2(A,B)` η οποία υπολογίζει την κανονικοποιημένη ετεροσυσχέτιση δύο διδιάστατων πινάκων A και B . Η συγκεκριμένη

συνάρτηση, χρησιμοποιείται και για την επεξεργασία των εικόνων καθώς μία εικόνα είναι ακριβώς ένας δισδιάστατος πίνακας από pixels. Η συνάρτηση :

- Υπολογίζει την ετεροσυσχέτιση των εικόνων, ανάλογα με το μέγεθος τους, στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας
- Υπολογίζει τα τοπικά αθροίσματα, έχοντας προϋπολογίσει τα προηγούμενα αθροίσματα
- Χρησιμοποιεί τα τοπικά αθροίσματα για την κανονικοποίησης της ετεροσυσχέτισης έτσι ώστε να εξαχθεί ο παράγοντας ετεροσυσχέτισης.

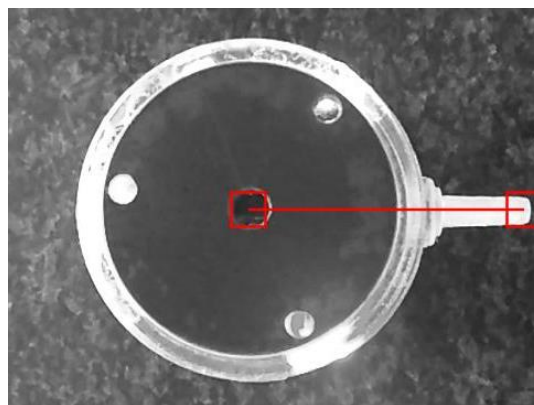
Η συνάρτηση που περιγράφει την παραπάνω υλοποίηση είναι

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}] [g(x - u, y - v) - \bar{g}]}{\{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [g(x - u, y - v) - \bar{g}]^2\}^{0.5}} \quad (2-14)$$

Όπου με f η εικόνα B, g η εικόνα A που ονομάζεται και πρότυπο, $\bar{f}_{u,v}$ η μέση τιμή της f στην περιοχή κάτω από το πρότυπο και \bar{g} η μέση τιμή του προτύπου.

Συνοπτικά ο αλγόριθμος εντοπισμού της θέσης της βελόνας του μικρορομπότ, έχει ως εξής:

- Εντοπίζεται η υποεικόνα της οποίας θέλουμε να ακολουθήσουμε την κίνηση και να εξακριβώσουμε τις συντεταγμένες της στο χώρο (Σχήμα 2-10).
- Επιλέγονται δύο υποπεριοχές, έτσι ώστε να είναι δυνατόν να εξαχθεί και η γωνία. Αυτές οι συντεταγμένες λειτουργούν ως αρχική θέση (x_{start}, y_{start}).
- Βρίσκουμε την κανονικοποιημένη ετεροσυσχέτιση μεταξύ της υποεικόνας και της συνολικής εικόνας που τραβήχτηκε από το frame
- Βρίσκουμε τις συντεταγμένες που αντιστοιχούν στην μέγιστη ετεροσυσχέτιση που εξάγαμε από το προηγούμενο βήμα
- Βρίσκουμε πόσο απέχουν οι συντεταγμένες αυτές από τις αρχικές
- Προσθέτουμε σε κάθε δειγματοληψία την απόσταση αυτή ώστε να βρούμε τις συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος
- Τα βήματα αυτά εφαρμόζονται σε κάθε frame μέχρι το τέλος του βίντεο. Έχοντας αποθηκεύσει τους πίνακες με τις συντεταγμένες των σημείων και μπορούμε να εξάγουμε τα συνολικά αποτελέσματα της κίνησης.



Σχήμα 2-10. Οι αρχικές υποπεριοχές παρακολούθησης ετεροσυσχέτισης.

2.3.2 Αλγόριθμος επεξεργασίας εικόνας κάμερας μικροσκοπίου

Για την επεξεργασία της εικόνας της κάμερας του μικροσκοπίου, χρησιμοποιείται η λογική της εύρεσης του ακρότατου σημείου της βελόνας καθώς φαίνεται από το μικροσκόπιο.

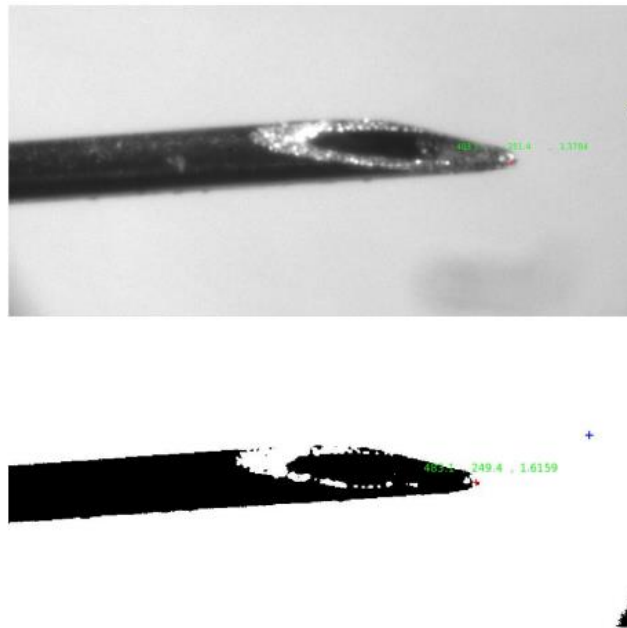
Η βασική ιδέα είναι να μετατραπεί η εικόνα της κάμερας του μικροσκοπίου, μοτίβου grayscale, σε δυαδική εικόνα – δηλαδή χρώματος άσπρου και μαύρου. Για το σκοπό αυτό επιλέγεται ένα κατώφλι (threshold), σύμφωνα με το οποίο χωρίζεται η εικόνα σε δύο κατηγορίες pixels και γίνεται δυαδική. Για την εκλογή αυτού του κατωφλίου χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι, ένας από τους πιο γνωστούς είναι ο αλγόριθμος του Otsu [8]. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προτείνει μία μέθοδο κατωφλίωσης μη παραμετρική, η οποία βασίζεται στο ιστόγραμμα της εικόνας.

Βασική ιδέα για τον αλγόριθμο είναι η επιλογή του κατωφλίου T τέτοιου ώστε να ελαχιστοποιεί την κατανομή σ_B , :

$$\sigma_w^2(t) = \omega_0(t)\sigma_0^2(t) + \omega_1(t)\sigma_1^2(t) \quad (2-15)$$

όπου ω_0 και ω_1 οι πιθανότητες των κατανομών σ_0 και σ_1 , οι οποίες αντιστοιχούν στις δύο καταστάσεις της δυαδικής εικόνας, μαύρο και λευκό.

Στο Σχήμα 2-11 φαίνεται η μετατροπή της εικόνας από grayscale σε binary με τη χρήση του αλγορίθμου για την επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου.

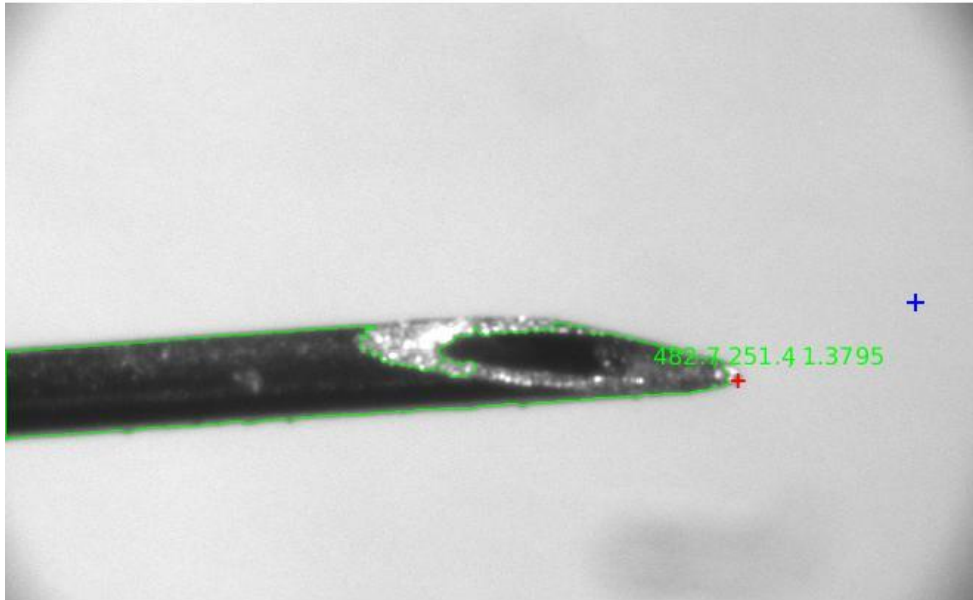


Σχήμα 2-11. Πάνω η grayscale εικόνα της κάμερας. Κάτω, η αντίστοιχη δυαδική εικόνα.

Αφού εξάγαμε τη δυαδική εικόνα, στη συνέχεια, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα για την εύρεση των συντεταγμένων της βελόνας.

- Επιλέγεται ένα σημείο στο οποίο γίνεται η μετάβαση από το λευκό στο μαύρο. Το σημείο αυτό αντιπροσωπεύει ένα σημείο της βελόνας (x_{init}, y_{init}).

- Στη συνέχεια, με χρήση της συνάρτησης `bwtraceboundary` μπορούμε να ιχνηλατήσουμε ένα αντικείμενο σε μία δυαδική εικόνα. Εκλέγοντας από το προηγούμενο βήμα ένα σημείο στο όριο της βελόνας, ιχνηλατούμε όλη τη βελόνα. Στο Σχήμα 2-12 φαίνεται η ιχνηλάτιση της οριοθέτησης της βελόνας με την πράσινη γραμμή.



Σχήμα 2-12. Η οριοθέτηση της βελόνας από την επεξεργασία της κάμερας.

- Από το διάνυσμα που προέκυψε στο προηγούμενο βήμα, ταξινομούμε τις συντεταγμένες, ώστε να βρούμε το ακρότατο σημείο που αντιστοιχεί στην άκρη της βελόνας (x,y) .
- Με βάση τις συντεταγμένες του προηγούμενου βήματος και τις συντεταγμένες του πρώτου σημείου, υπολογίζεται η γωνία προσανατολισμού σύμφωνα με τον τύπο

$$\theta = \text{atan2}(x - x_{\text{init}}, y - y_{\text{init}}) \quad (2-16)$$

3 Αισθητήρες

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται οι διαδικασίες υλοποίησης και ολοκλήρωσης των συστημάτων μέτρησης των αισθητήρων που τοποθετούνται στο τρίτο επίπεδο της ρομποτικής πλατφόρμας. Αυτό αφορά τους αισθητήρες μέτρησης των στροφών των κινητήρων, την μέτρηση της μετατόπισης της ρομποτικής πλατφόρμας για την εξαγωγή της θέσης της και του αισθητήρα δύναμης. Σκοπός της εργασίας που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο είναι η εύρωστη λειτουργία των αισθητήρων στο νέο κατασκευαστικό σχεδιασμό της πλατφόρμας και η επαλήθευση της ορθής λειτουργίας μετρήσεων.

Πιο συγκεκριμένα, για τους αισθητήρες μέτρησης των στροφών των κινητήρων, επεκτάθηκαν τα συμπεράσματα που είχαν προκύψει από τις εργασίες [16], [25]. Περιγράφεται το μοντέλο των κινητήρων που χρησιμοποιούνται στο μικρορομπότ, ο τρόπος μέτρησης των στροφών καθώς και το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την συνεχή ενημέρωση των μετρήσεων.

Για τους αισθητήρες θέσης, συνεχίζεται η δουλειά της εργασίας [20]. Ολοκληρώνεται η τοποθέτηση των κινητήρων στην πλακέτα της ρομποτικής πλατφόρμας και αναπτύσσεται το λογισμικό για την μέτρηση των κινητήρων. Στην παρούσα εργασία, αναπτύχθηκε η σωστή χρήση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας των αισθητήρων (SPI) και η ολοκλήρωση του λογισμικού ανάγνωσης των αισθητήρων.

Για τον αισθητήρα δύναμης, αναλύεται η διαδικασία αναλογικών μετρήσεων από τον μικροελεγκτή CC430, σαν συνέχεια της μελέτης της εργασίας [21].

3.2 Αισθητήρες μέτρησης στροφών

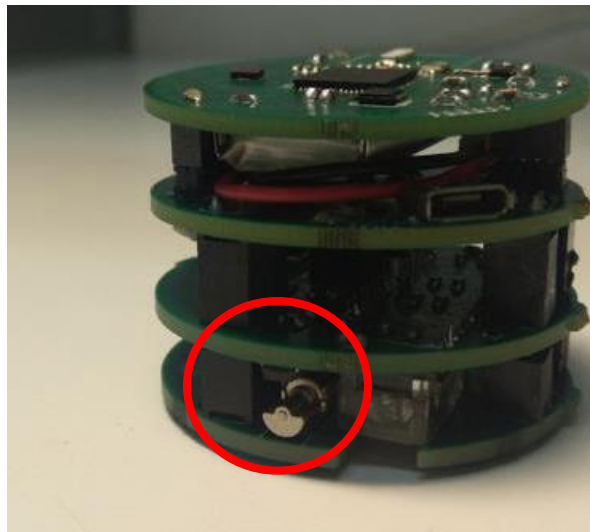
Για την κατασκευή του αισθητήρα μέτρησης των στροφών θα εκμεταλλευτούμε το έκκεντρο φορτίο του κινητήρα έτσι ώστε να μπορέσουμε εξάγουμε παλμούς που αντιστοιχούν στο στροφές των κινητήρων. Σύμφωνα με τα νέα κατασκευαστικά δεδομένα της εργασίας [21], σαν αισθητήρας μέτρησης επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα QRE1113 (Σχήμα 3-1). Ο συγκεκριμένος αισθητήρας αποτελείται από

- Ένα φωτοτρανζίστορ
- Έναν εκπομπό IR ακτινοβολίας.



Σχήμα 3-1. Ο αισθητήρας QRE1113

Η τοποθέτηση του αισθητήρα στο σώμα του ρομπότ φαίνεται στο Σχήμα 3-2.

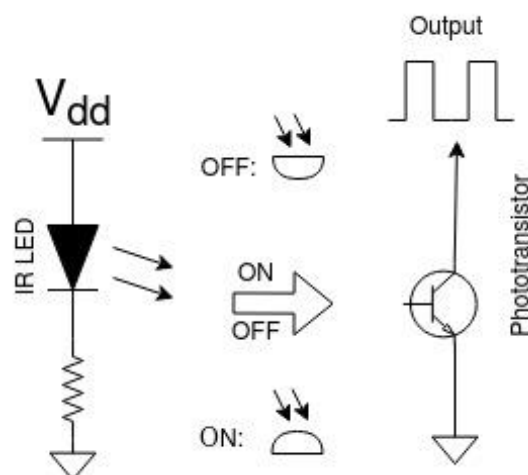


Σχήμα 3-2. Τοποθέτηση του αισθητήρα μέτρησης στροφών στο ρομπότ.

Συνοπτικά η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση ή μη της IR ακτινοβολίας πάνω στον κινητήρα (Σχήμα 3-3). Λόγω της κατασκευής του κινητήρα, (έκκεντρο φορτίο), όταν ο κινητήρας βρίσκεται στην θέση A, η ακτινοβολία ανακλάται πάνω στον κινητήρα και άγει το φωτοτρανζίστορ. Όταν ο κινητήρας βρίσκεται στην θέση B, η ακτινοβολία δεν ανακλάται στον κινητήρα, επομένως δεν άγει το φωτοτρανζίστορ.

Από την διαδικασία αυτή προκύπτει ένας παλμός, ο οποίος μέσω του Schmitt Trigger φιλτράρεται έτσι ώστε να αποκοπεί ο θόρυβος που θα δυσχέρανε στην διαδικασία των μετρήσεων από τον μικροελεγκτή.

Η κατάσταση HIGH του παλμού πριν την έξοδο από το Schmitt Trigger αντιστοιχεί στην στιγμή που ο κινητήρας άγει το φωτοτρανζίστορ, ενώ η κατάσταση LOW στην στιγμή που ο κινητήρας δεν άγει το φωτοτρανζίστορ. Λόγω του ότι το Schmitt Trigger αντιστρέφει το σήμα, για αποκοπή του θορύβου, οι τελικές καταστάσεις είναι αντίστροφες.



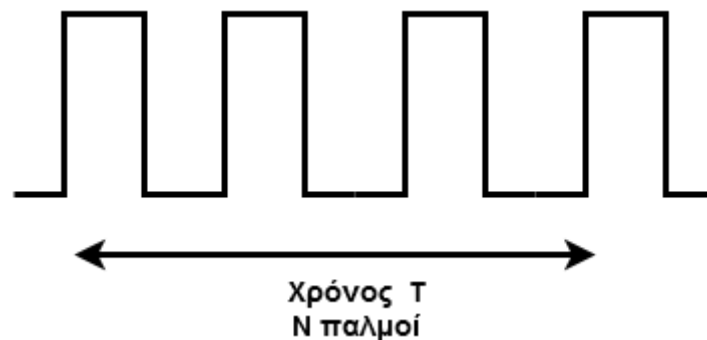
Σχήμα 3-3. Η λειτουργία του συστήματος μέτρησης στροφών.

Συμπερασματικά, για να βρεθεί η ταχύτητα των στροφών αρκεί να βρεθεί η συχνότητα των παλμών που οφείλονται στην περιστροφή του κινητήρα, δηλαδή πόσες περιστροφές πραγματοποιήθηκαν σε χρόνο T. Για να γίνει αυτό στηρίζομαστε στην παρατήρηση ότι μία

θετική ακμή του παλμού αντιστοιχεί στην θέση A και μία αρνητική ακμή στη θέση B. Επομένως μεταξύ δύο διαδοχικών θετικών ή αρνητικών ακμών του παλμού ο κινητήρας έχει πραγματοποιήσει μία περιστροφή.

Για τη μέτρηση της ταχύτητας σε επίπεδο υπολογισμού μέσω του λογισμικού μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε 2 μεθόδους (Σχήμα 3-4):

- Επιλέγοντας ένα σταθερό παράθυρο χρόνου T (σε ms), και μετρώντας πόσες φορές θετικές ακμές έχουν πραγματοποιηθεί στον χρόνο αυτό. Η συχνότητα του κινητήρα υπολογίζεται ως $f = 1000 \frac{N}{T}$, όπου N : ο αριθμός των θετικών ακμών. Ο τρόπος αυτός προσφέρει ευκολότερη υλοποίηση σε επίπεδο λογισμικού, ενώ ταυτόχρονα φιλτράρει σε πρώτο επίπεδο τις τιμές, ουσιαστικά υπολογίζοντας το μέσο όρο μεταξύ πολλών ακμών/περιστροφών. Αντίθετα, έχει το μειονέκτημα της μικρότερης ακρίβειας, λόγω του ότι στο παράθυρο χρόνου ο αριθμός των ακμών ή περιστροφών δεν είναι ακέραιος, καθώς και της αυξημένης ταχύτητας υπολογισμού της μέτρησης, κάτι που είναι ανασταλτικός παράγοντας σε περίπτωση κλειστού βρόχου ελέγχου
- Μετρώντας το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών θετικών ή αρνητικών ακμών. Αυτή η μέτρηση αντιστοιχεί σε μία περιστροφή, όπως αναφέρεται παραπάνω. Η συχνότητα του κινητήρα υπολογίζεται ως $f = \frac{1000}{T}$. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα της ταχύτητας, καθώς εξάγει ακριβώς το χρονικό διάστημα μεταξύ μίας περιστροφής (που στην περίπτωση μας είναι η μέγιστη ανάλυση που μπορούμε να έχουμε λόγω της φύσης του αισθητήρα). Αντίθετα, δεν φιλτράρει τις τιμές με αποτέλεσμα, μία λανθασμένη μέτρηση (λόγω λανθασμένης ένδειξης ακμής του παλμού, για παράδειγμα) να επηρεάσει την μέτρηση μας.



Σχήμα 3-4. Επιλογή της περιόδου δειγματοληψίας.

Για την εφαρμογή μας χρησιμοποιήθηκε ο δεύτερος τρόπος. Παρά το γεγονός ότι στην παρούσα εργασία, δεν εφαρμόστηκε στα πειράματα έλεγχος ταχύτητας, αναπτύχθηκε σε επίπεδο λογισμικού η ολοκληρωμένη λύση μέτρησης.

Για τη μέτρηση του χρονικού διαστήματος μεταξύ των παλμών, χρειάζεται η χρήση χρονιστή [28].

3.2.1 Στοιχεία του Timer_A του CC430

Ο Timer_A είναι ένας 16-bit χρονιστής ο οποίος διαθέτει 8 capture/compare καταχωρητές, 5 στον Timer_A0 και 3 στον Timer_A1. Λόγω των καταχωρητών αυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αντίστοιχες διεργασίες, οι οποίες περιλαμβάνουν τη μέτρηση χρονικών

διαστημάτων ή την παραγωγή PWM παλμών. Επίσης, διαθέτη ρουτίνα εκτέλεσης interrupt, η οποία εκτελείται είτε σε συνθήκες υπερχείλισης του καταχωρητή (overflow), είτε μέσω της προσπέλασης του είτε σε επίπεδο υλικού, είτε σε επίπεδο λογισμικού.

Οι βασικοί καταχωρητές του Timer_A είναι

- Ο TAxR, ο οποίος αποτελείται από 16 bits και αυξάνεται ή μειώνεται σε κάθε θετικό παλμό του σήματος του ρολογιού που έχει επιλεγεί. Η ανάγνωση της τιμής του καταχωρητή μας σε συνδυασμό με τις ρυθμίσεις που έχουν γίνει και θα αναφερθούν παρακάτω μας δίνει την πληροφορία για το χρονικό διάστημα. Κάθε φορά που χρονιστής υπερχειλίζει (στα 2^{16} bits), ενεργοποιώντας ένα interrupt.
- Ο TAxCTL, ο οποίος ρυθμίζει την λειτουργία του Timer_A. Οι βασικές λειτουργίες που ρυθμίζοντας θέτοντας τα κατάλληλα bits στον καταχωρητή είναι η πηγή του ρολογιού, δηλαδή σε ποια συχνότητα κι από ποιο ρολόι θα τροφοδοτείται ο χρονιστής, και σε ποιο mode θα λειτουργεί. Τα modes αυτά είναι τέσσερα:
 - Stop Mode : Ο χρονιστής είναι απενεργοποιημένος
 - Up Mode : Ο χρονιστής αυξάνεται μέχρι την τιμή του καταχωρητή TAxCCR0.
 - Continuous Mode : Ο χρονιστής αυξάνεται μέχρι την τιμή $2^{16}-1$.
 - Up/down mode: Ο χρονιστής αυξάνεται μέχρι την τιμή του καταχωρητή TAxCCR0 και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι την τιμή 0.
- Ο TAxCCRn, όπου n ο αύξων αριθμός του καταχωρητή. Στον καταχωρητή αυτόν, όταν βρισκόμαστε σε capture mode αντιγράφεται η τιμή του TAR καταχωρητή, ενώ σε compare mode η τιμή του ορίζεται για να γίνει η σύγκριση κάθε στιγμή με την τιμή του TAR καταχωρητή.
- Ο TAxCTLn, είναι ο καταχωρητής που ρυθμίζει την λειτουργία του TAxCCRn, θέτοντας τα κατάλληλα bits. Πιο συγκεκριμένα, ρυθμίζεται αν θα έχουμε Capture ή Compare Mode. Το Capture Mode αφορά τον εντοπισμό κάποιου γεγονότος (event) και την αποθήκευση της τιμής του Timer_A στον καταχωρητή TAxCCRn και είναι κατάλληλο για υπολογισμούς ταχύτητας και μετρήσεις χρόνου. Το Compare Mode, αφορά τη σύγκριση του Timer_A με την τιμή του καταχωρητή TAxCCRn, και είναι κατάλληλο για παραγωγή παλμών PWM. Επιπρόσθετα στο mode αυτό, ρυθμίζεται και η έξοδος του σήματος που προκύπτει από την παραπάνω σύγκριση των τιμών των καταχωρητών. Πιο αναλυτικά θα αναφερθούμε, στις συγκεκριμένες υλοποιήσεις που έγιναν για τη μέτρηση των στροφών των κινητήρων της μικρορομποτικής πλατφόρμας.
- Ο TAxIV, είναι ο καταχωρητής προσπέλασης της ρουτίνας του interrupt.

Συνοψίζοντας, ρυθμίζοντας κατάλληλα τους καταχωρητές, επιλέγοντας τα κατάλληλα modes μπορούμε να αναπτύξουμε το λογισμικό για τη σωστή χρήση των χρονιστών. Για την εφαρμογή μας χρειαζόμαστε :

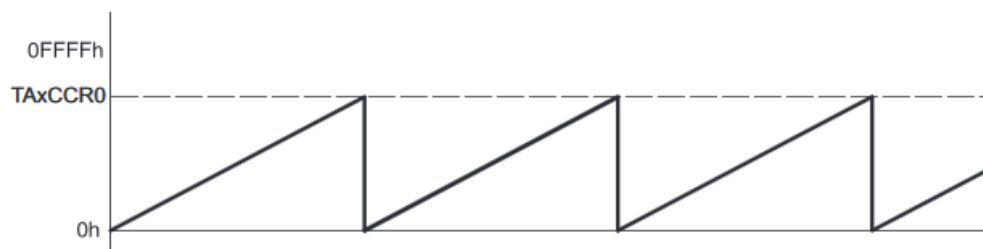
- Μέτρηση στροφών των δύο κινητήρων
- Παραγωγή παλμών PWM για τους κινητήρες

Ο μικροελεγκτής CC430F6137, διαθέτει δύο χρονιστές Timer_A. Λόγω του γεγονότος ότι το mode του χρονιστή ρυθμίζεται για όλους τους καταχωρητές TAxCCRn, για τις βασικές μας λειτουργίες είναι απαραίτητο να δεσμευτούν και οι δύο χρονιστές. Ο ένας θα χρησιμοποιείται για την επενέργεια των κινητήρων και ο άλλος για την μέτρηση της

ταχύτητας των στροφών. Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται αναλυτικά οι διαδικασίες υλοποίησης.

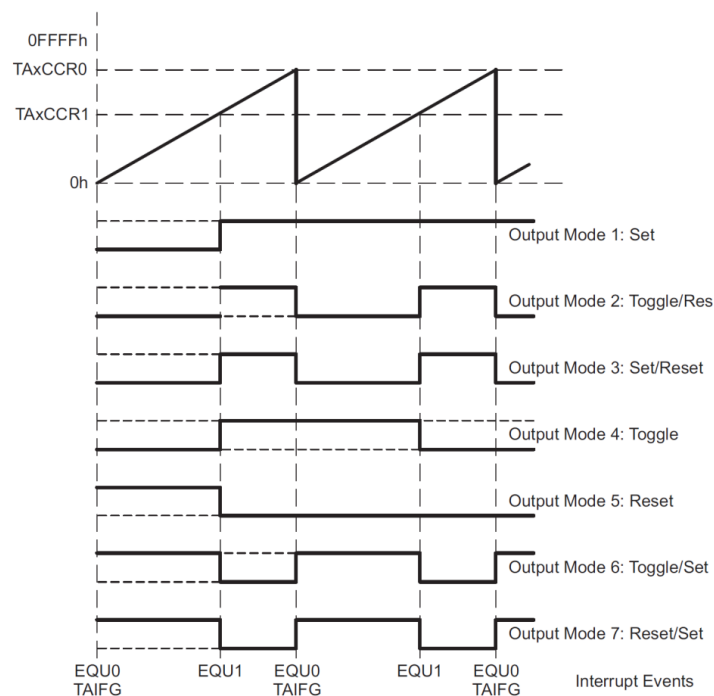
3.2.2 Επενέργηση κινητήρων

Για την επενέργηση των κινητήρων δεσμεύτηκε ο Timer_A0. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την παραγωγή PWM, είναι απαραίτητη η λειτουργία compare mode. Πριν όμως από τη ρύθμιση αυτή, πρέπει να ρυθμίσουμε τη συνολική λειτουργία του Timer_A0, αν θα είναι συνεχής ή διακοπτόμενη ανάλογα με την τιμή του TAxCCR0. Επιλέγεται η λειτουργία Up Mode. Κατά τη λειτουργία αυτή ο Timer_A0 αυξάνεται μέχρι την τιμή που έχει καταχωρηθεί στον TA1CCR0 (Σχήμα 3-5). Ταυτόχρονα ορίζεται και η συχνότητα και η πηγή του ρολογιού. Για το ρολόι επιλέξαμε την επιλογή της CPU με συχνότητα 12 MHz.



Σχήμα 3-5. Up Mode λειτουργία του καταχωρητή TA1CCR0.

Έπειτα εγγράφουμε τα κατάλληλα bits στον καταχωρητή TAxCTLn, για να ρυθμίσουμε της κατάλληλες λειτουργίες. Αφήνοντας την προεπιλογή του bit CAP = 0, επιλέγουμε Compare Mode. Στη συνέχεια, επιλέγουμε την μορφή της εξόδου που θέλουμε να έχει το παλμικό σήμα. Αυτό γίνεται, μέσω του bit OUTPUT. Υπάρχουν οκτώ συνολικά επιλογές ανάλογα με τις τιμές των καταχωρητών TAxCCR0 και TAxCCRn (Σχήμα 3-6).



Σχήμα 3-6. Επιλογή του κατάλληλου OUTPUT bit.

Για την παραγωγή των PWM επιλέξαμε το Output Mode 7 (Reset/Set), το οποίο δημιουργεί ένα σήμα κατάστασης 1, μέχρι την τιμή του καταχωρητή TAxCCR1, το οποίο ξαναγίνεται 1, όταν ο Timer_A0 φτάσει την τιμή του TA0CCR0.

Συμπερασματικά, ο καταχωρητής TA0CCRn ρυθμίζει το duty cycle του παλμού και τίθεται στην διάρκεια του κώδικα για να αλλάξουμε τις στροφές του κινητήρα, ενώ ο TA0CCR0 ρυθμίζει τη διακοπτική συχνότητα του PWM (switching frequency) και την ανάλυση του εξαγόμενου PWM σήματος. Για την επιλογή, έγινε ένας συμβιβασμός μεταξύ της επιθυμητής ανάλυσης που θέλαμε να έχουμε και της διακοπτικής συχνότητας. Κρατήθηκε η τιμή 2000, που είχε επιλεγεί στην εργασία [16]. Με την τιμή αυτή, επιτυγχάνουμε διακοπτική συχνότητα ίση με

$$f_{switch} = \frac{f_{timer}}{TA0CCR0} = \frac{12MHz}{2000} = 6kHz \quad (3-1)$$

Η διακοπτική συχνότητα αυτή είναι ικανοποιητική για τους κινητήρες μας.

Όσον αφορά την ανάλυση, σύμφωνα με τα datasheet των κινητήρων, έχουμε μέγιστη ταχύτητα 15000 RPM, δηλαδή 1570 rad/s, ενώ έχουμε μέγιστη τάση εξόδου 3.3V. Συνεπώς, όσον αφορά την ανάλυση της τάσης εξόδου έχουμε

$$resolution = \frac{V_{cc}}{TA0CCR0} = \frac{3.3V}{2000} = 0.00165V \quad (3-2)$$

Και όσον αφορά της στροφές

$$resolution = \frac{\omega_{max}}{TA0CCR0} = \frac{1570}{2000} = 0.785 \frac{rad}{s} = 7.5RPM \quad (3-3)$$

Η τελευταία ρύθμιση είναι να ρυθμίσουμε τα pins των εξόδων των PWM παλμών. Οι τέσσερις εξοδοί PWM από τον μικροελεγκτή έχουν σχεδιαστεί στα pins του (Πίνακας 3-1), καθώς αυτοί είναι οι προεπιλεγμένοι ακροδέκτες για τους αντίστοιχους καταχωρητές.

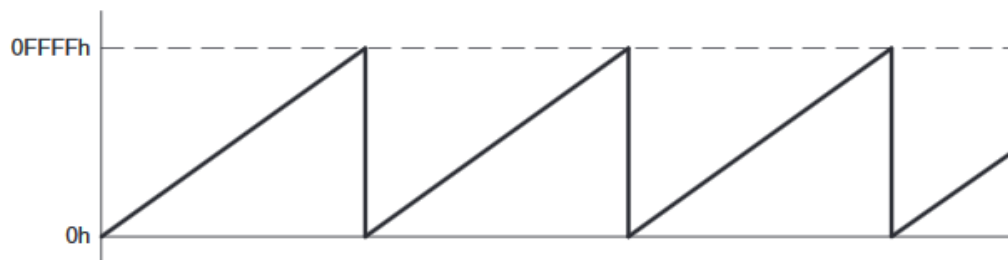
Πίνακας 3-1. Ακροδέκτες PWM του μικροελεγκτή.

CC430 Pin	Έξοδος
P3.2	TA0CCR1
P3.3	TA0CCR2
P3.4	TA0CCR3
P3.5	TA0CCR4

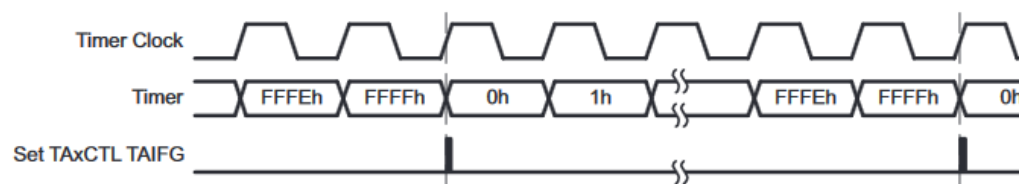
3.2.3 Μέτρηση Στροφών

Για την μέτρηση των στροφών των κινητήρων δεσμεύτηκε ο Timer_A1. Για τη συνολική λειτουργία του TimerA_A1, επιλέχθηκε η συνεχής λειτουργία του (Continuous Mode), μέσω των 2 bits MC. Η λειτουργία αυτή (Σχήμα 3-7), επιτρέπει στον Timer να αυξάνεται μέχρι την οριακή τιμή του και να υπερχειλίζει (overflow).

Μόλις ο Timer υπερχειλίσει, ενεργοποιείται το flag (TAIFG) για να εισέλθει το πρόγραμμα στην ρουτίνα του interrupt (Σχήμα 3-8).



Σχήμα 3-7. Continuous Mode λειτουργία του Timer.



Σχήμα 3-8. Ενεργοποίηση Interrupts του Timer.

Για το ρολόι επιλέγουμε ως πηγή τον εξωτερικό κρύσταλλο (ACLK), ο οποίος έχει συχνότητα 32kHz. Η επιλογή αυτή έγινε, έναντι της συχνότητας των 12MHz από το ρολόι της CPU, λόγω των λαθών που μας έδιναν τα overflows του χρονιστή. Καθώς και οι δύο κινητήρες χρησιμοποιούν τον ίδιο χρονιστή, ο χειρισμός των interrupt γίνεται μέσα από την ίδια ρουτίνα, με την προσπέλαση του καταχωρητή TA1IV. Σύμφωνα με το datasheet του μικροελεγκτή [29], έχουμε ότι η προτεραιότητα κατά σειρά στην προσπέλαση του TA1IV, είναι:

- TA1CCR1
- TA1CCR2
- Overflow

Όπως βλέπουμε η υπερχειλίση είναι τελευταία σε προτεραιότητα. Αυτό σημαίνει ότι όταν εξυπηρετείται ο ένας από τους δύο καταχωρητές, δεν θα εισέλθει στη ρουτίνα του interrupt όταν γίνει overflow. Με την επιλογή, λοιπόν, του ρολογιού των 12 MHz, και για 16 bits μεγέθους του χρονιστή, κάθε υπερχειλίση συμβαίνει κάθε

$$t = \frac{TA1R}{f_{scl}} 1000 = \frac{65535}{12000} = 5.46ms \quad (3-4)$$

Με μία αναμενόμενη λειτουργία των κινητήρων στα 10000 rpm έχουμε μία θετική ακμή κάθε

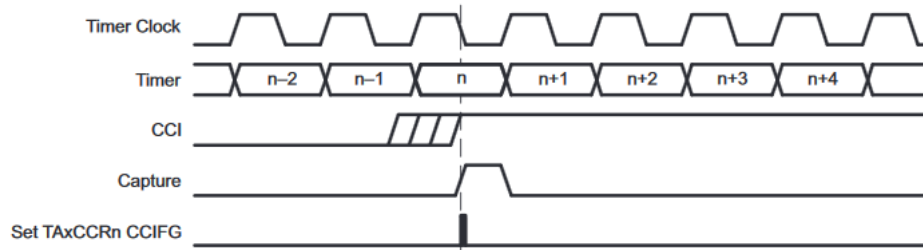
$$t = \frac{60000}{\omega} = 60ms \quad (3-5)$$

Συνεπώς, μεταξύ δύο στροφών του κινητήρα θα έχουμε περίπου 12 υπερχειλίσεις. Επομένως η απώλεια μίας υπερχειλίσης λόγω χαμηλής προτεραιότητας στο interrupt θα

επιπλέον επηρεάζει σημαντικά την μέτρηση μας. Γι αυτό επιλέχθηκε η συχνότητα των 32kHz, με μειονέκτημα την μειωμένη ανάλυση στη μέτρηση.

Στη συνέχεια θα ρυθμίσουμε του καταχωρητές CCR. Εφόσον έχουμε δύο κινητήρες, θα χρησιμοποιήσουμε αντίστοιχο αριθμό καταχωρητών CCR.

Έπειτα, ρυθμίζουμε τη λειτουργία των CCR καταχωρητών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω επιλέγεται η Capture λειτουργία, θέτοντας το bit CAP = 1. Η λειτουργία capture (Σχήμα 3-9), στηρίζεται στην παραγωγή ενός interrupt στην είσοδο του ακροδέκτη που αντιστοιχεί στο TA1CCRn καταχωρητή. Επιλέγεται επίσης, μέσω του bit, CM, πότε θα γίνεται το trigger του interrupt. Μεταξύ των διαθέσιμων επιλογών – θετική ακμή, αρνητική ακμή ή και στις δύο – επιλέγεται η θετική ακμή.



Σχήμα 3-9. Η λειτουργία Capture του καταχωρητή.

Τέλος, επιλέγονται οι ακροδέκτες του μικροελεγκτή που θα λειτουργήσουν ως είσοδοι των σημάτων από τα αισθητήρια μέτρησης των στροφών (Πίνακας 3-2).

Πίνακας 3-2. Οι ακροδέκτες των αισθητήρων στο μικροελεγκτή

CC430 Pin	Έξοδος	Κινητήρας
P3.2	TA0CCR1	Αριστερά
P3.3	TA0CCR2	Δεξιά

Αφού ρυθμίσουμε τους καταχωρητές του χρονιστή μέτρησης των στροφών, το επόμενο βήμα είναι ο χειρισμός του interrupt όπου εκεί θα μετρηθεί το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο θετικών ακμών/περιστροφών.

Κάθε φορά που συμβαίνει ένα interrupt, γίνεται προσπέλαση του καταχωρητή TA1IV. Ανάλογα με το λόγο που έχει γίνει το interrupt αλλάζει η τιμή του καταχωρητή κι έτσι μπορεί να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί (Σχήμα 3-10).

Bit	Field	Type	Reset	Description
15-0	TAIV	R	0h	Timer_A interrupt vector value 00h = No interrupt pending 02h = Interrupt Source: Capture/compare 1; Interrupt Flag: TAxCCR1 CCIFG; Interrupt Priority: Highest 04h = Interrupt Source: Capture/compare 2; Interrupt Flag: TAxCCR2 CCIFG 06h = Interrupt Source: Capture/compare 3; Interrupt Flag: TAxCCR3 CCIFG 08h = Interrupt Source: Capture/compare 4; Interrupt Flag: TAxCCR4 CCIFG 0Ah = Interrupt Source: Capture/compare 5; Interrupt Flag: TAxCCR5 CCIFG 0Ch = Interrupt Source: Capture/compare 6; Interrupt Flag: TAxCCR6 CCIFG 0Eh = Interrupt Source: Timer overflow; Interrupt Flag: TAxCTL TAIFG; Interrupt Priority: Lowest

Σχήμα 3-10. Ο καταχωρητής του Interrupt του Timer.

Ελέγχεται σε πρώτο επίπεδο, ποιος από τους δύο κινητήρες έχει προκαλέσει το interrupt. Στη συνέχεια γίνεται ανάγνωση της τιμής του καταχωρητή TA1CCR0 (TA1CCR0_{curr}) στον οποίο κατά τη λειτουργία Capture, αντιγράφεται η τιμή του χρονιστή Timer_A1. Η τιμή αυτή συγκρίνεται με την προηγούμενη μέτρηση που είχε γίνει. Εάν η τιμή του καταχωρητή είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη τιμή του, τότε το χρονικό διάστημα που υπολογίζεται απλά σαν η διαφορά της τρέχουσας τιμής του καταχωρητή από την τιμή της προηγούμενης μέτρησης/interrupt. Δηλαδή,

$$\Delta t = TA1CCR0_{curr} - TA1CCR0_{prev} \quad (3-6)$$

Αν η τιμή του καταχωρητή είναι μικρότερη από την προηγούμενη τιμή μέτρησης (TA1CCR0_{prev}), η οποία αποθηκεύεται στην μνήμη σε κάθε προσπέλαση της ρουτίνας, τότε σημαίνει ότι ο καταχωρητής έχει υπερχειλίσει και πρέπει να προστεθεί στον υπολογισμό του χρονικού διαστήματος. Καθώς πρόκειται για 16-bit μεγέθους έχουμε:

$$\Delta t = 2^{16} + TA1CCR0_{curr} - TA1CCR0_{prev} \quad (3-7)$$

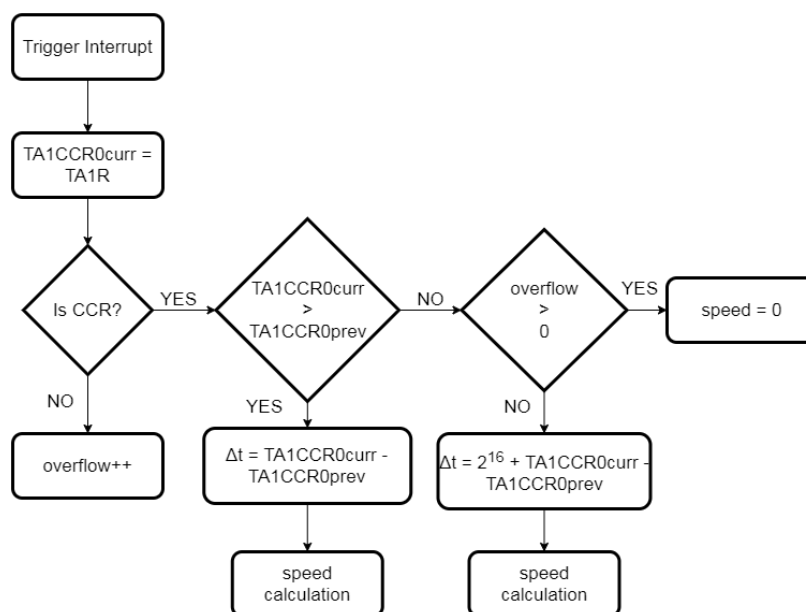
Επιπρόσθετα, γίνεται έλεγχος του αριθμού των υπερχειλίσεων που έχουν πραγματοποιηθεί. Μέσω της προσπέλασης του bit 14, του TA1IV καταχωρητή, εξακριβώνουμε πότε έγινε υπερχειλίση του καταχωρητή. Σε περίπτωση που η τιμή του χρονιστή είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη τιμή του, δηλαδή η πρώτη άνωθεν περίπτωση, και έχει γίνει υπερχειλίση τότε η ταχύτητα ισούται με 0.

Η ταχύτητα του κινητήρα υπολογίζεται από τη σχέση

$$speed = \frac{60 \cdot 1000}{\Delta t \cdot f} \quad (3-8)$$

όπου f, η συχνότητα λειτουργίας του χρονιστή, δηλαδή στην περίπτωση μας 32kHz.

Το λογικό διάγραμμα χειρισμού της συνάρτησης του interrupt φαίνεται στο Σχήμα 3-11.



Σχήμα 3-11. Λογικό διάγραμμα υπολογισμού των στροφών.

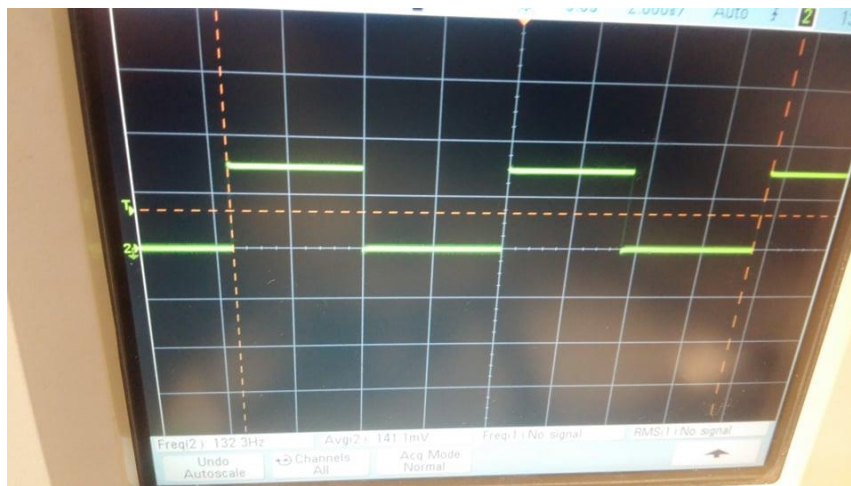
3.2.4 Πειραματικές μετρήσεις

Για να γίνει εξακρίβωση της σωστής μέτρησης των στροφών του κινητήρα, συνδέθηκαν οι ακροδέκτες των εξόδων του αισθητήριου σε έναν παλμογράφο. Με τον τρόπο αυτό έχουμε πλήρη εποπτεία των παλμών που παράγει ο κινητήρας καθώς αντανακλά την ακτινοβολία. Μέσω των ρυθμίσεων του παλμογράφου μπορούμε να πάρουμε σαν αποτέλεσμα τη συχνότητα του σήματος. Έχοντας αυτό σα δεδομένο, μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του συστήματος μέτρησης με την μέτρηση του παλμογράφου.

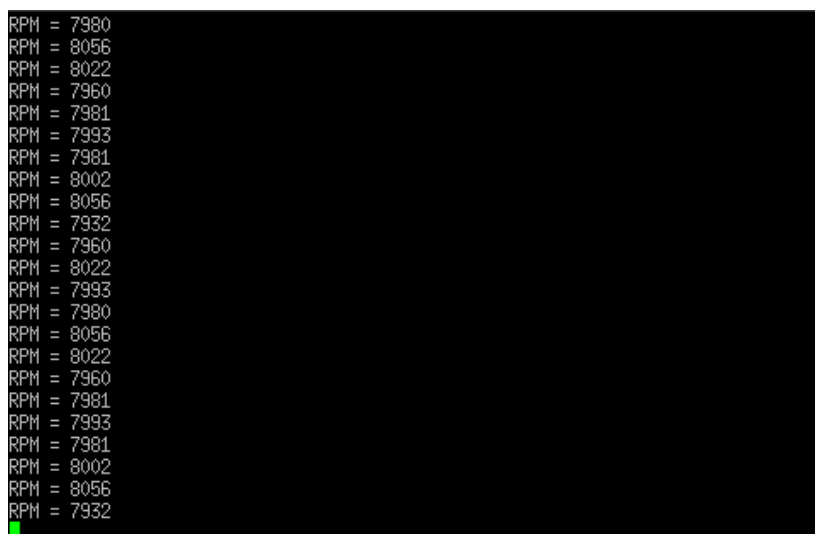
Ενδεικτικά το Σχήμα 3-12 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από μία δοκιμαστική διάταξη. Όπως φαίνεται, το σήμα που φτάνει στον παλμογράφο έχει συχνότητα 132Hz. Αυτά αντιστοιχούν σε

$$\omega = f * 60 = 7932 \text{ RPM} \quad (3-9)$$

Η παραπάνω τιμή επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα που εξάγονται από τη μέτρηση των αισθητήρων μέσω του μικροελεγκτή (Σχήμα 3-13).



Σχήμα 3-12. Το καταγεγραμμένο σήμα του αισθητήρα από τον παλμογράφο.



Σχήμα 3-13. Τα αποτελέσματα μέτρησης από τον αισθητήρα.

3.3 Μέτρηση θέσης

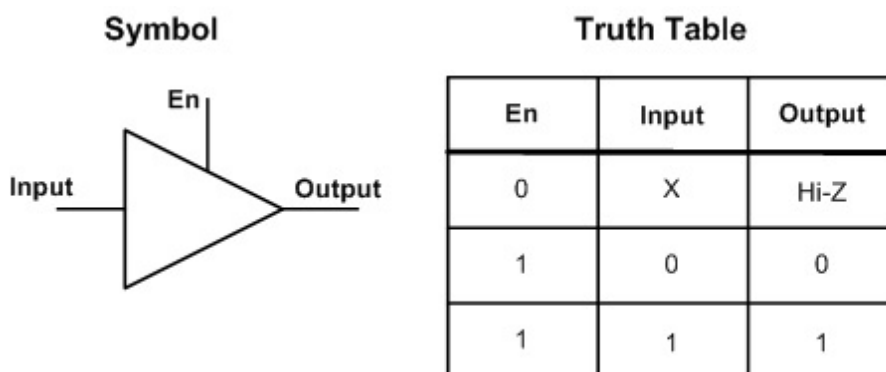
Για τους αισθητήρες εντοπισμού θέσης επιλέχθηκαν οι αισθητήρες laser ADNS7550, της εταιρίας Anago [28], [20]. Ο ADNS-7550 επιλέχθηκε πρωτίστως για το μικρό του μέγεθος, το οποίο είναι κατάλληλο για τη τοποθέτηση του στο κυκλικό δίσκο της πλακέτας. Επίσης ο αισθητήρας αυτός μπορεί να διακρίνει υψηλές ταχύτητες κίνησης μέχρι 30 ips (inch/s) και επιτάχυνσης μέχρι 8 g και έχει την δυνατότητα επιλογής της ανάλυσης της κίνησής του μεταξύ 5 διαφορετικών τιμών, 400,800,1200,1600 και 2000 cpi (counts/inch). Τέλος διαθέτει εσωτερικό κύκλωμα ανίχνευσης εσφαλμένης λειτουργίας του laser του για την προστασία των ματιών του χρήστη.

Οι αισθητήρες επικοινωνούν με τον μικροελεγκτή μέσω του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου SPI (Serial Peripheral Interference). Αναλυτικά το πρωτόκολλο περιγράφεται στο Παράρτημα Α.

3.3.1 Multiple Slaves

Για την λειτουργία του συστήματος εντοπισμού θέσης επιλέχθηκαν 2 αισθητήρες, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εύρεση όχι μόνο των συνιστωσών x,y αλλά και του προσανατολισμού του ρομπότ στο χώρο. Επομένως, θα πρέπει να ο μικροελεγκτής να είναι σε θέση να εξυπηρετεί ταυτόχρονα δύο αισθητήρες. Το πρωτόκολλο SPI, είναι πρωτόκολλο επικοινωνίας τύπου master-slave, δηλαδή μία συσκευή master, δίνει τις εντολές και τη συχνότητα των παλμών του ρολογιού στις στην συσκευή slave. Στην περίπτωση μας, ο μικροελεγκτής λειτουργεί σαν συσκευή master και οι δύο αισθητήρες σαν συσκευές slave. Η επικοινωνία SPI, επιτρέπει τη σύνδεση δύο ή περισσότερων περιφερειακών συσκευών στην κύρια συσκευή.

Στο θεωρητικό επίπεδο, όταν ο SS δίαυλος της μίας συσκευής πάρει την τιμή του λογικού 0, τότε η επικοινωνία ξεκινάει, ενώ αντίθετα όταν πάρει την τιμή 1, διακόπτεται η επικοινωνία. Παρόλα αυτά είναι απαραίτητο να υπάρχει ένας απομονωτής τριών καταστάσεων (tri-state buffer) στην έξοδο της περιφερειακής συσκευής, δηλαδή στο δίαυλο MISO. Αυτό είναι αναγκαίο ώστε όταν η συσκευή απενεργοποιείται, ο δίαυλος να μεταβαίνει σε κατάσταση υψηλής εμπέδησης (high impedance), και να απενεργοποιείται. Συνεπώς, δεν στέλνει σήματα προς το δίαυλο ώστε να διαταράσσεται η επικοινωνία της δεύτερης συσκευής που λειτουργεί. Η λειτουργία ενός απομονωτή τριών καταστάσεων φαίνεται στο Σχήμα 3-14.



Σχήμα 3-14. Λειτουργία tri-state buffer.

Στην περίπτωση μας οι αισθητήρες ADNS7550, διαθέτουν ενσωματωμένους απομονωτές τριών καταστάσεων, συνεπώς δεν χρειάζεται εξωτερικό κύκλωμα για την ανάγνωση τους από τον ίδιο μικροελεγκτή.

3.3.2 Υλοποίηση SPI επικοινωνίας

Οι βασικές αρχικοποιήσεις που είναι απαραίτητες για την πραγματοποίηση της επικοινωνίας, όσον αφορά το κομμάτι του λογισμικού είναι

- Η επιλογή της κύριας συσκευής και της δευτερεύουσας. Ως κύρια συσκευή και για τις δύο υλοποιήσεις του καταγραφέα ορίζεται ο μικροελεγκτής/υπολογιστής.
- Οι αρχικοποιήσεις των συνδέσεων ώστε να λειτουργήσουν για την συγκεκριμένη επικοινωνία.
- Ο ορισμός της τάξης του ψηφίου που θα μεταφερθεί πρώτο από τον καταχωρητή ολίσθησης, δηλαδή αν θα είναι το λιγότερο ή το πιο σημαντικό ψηφίο (LSB ή MSB).
- Ο ορισμός της συχνότητας του ρολογιού της επικοινωνίας.
- Ο ορισμός της πόλωσης και της φάσης του σήματος ρολογιού.
- Ο ορισμός της επιλογής της δευτερεύουσας συσκευής, θέτοντας στο λογικό 0 την κατάσταση του ακροδέκτη Slave Select (SS).
- Η έναρξη της επικοινωνίας.
- Μετάδοση των δεδομένων για επικοινωνία με τη δευτερεύουσα συσκευή.

Ο μικροελεγκτής για τη διαχείριση των σειριακών σημάτων από και προς αυτόν χρησιμοποιεί τις μονάδες διαχείρισης Universal Serial Communication Interface (USCI), οι οποίες υποστηρίζουν πολλών ειδών σειριακές επικοινωνίες. Κάθε ξεχωριστή μονάδα διαχείρισης USCI, εξυπηρετεί διαφορετικούς τύπους επικοινωνιών. Στον CC430f6137, υπάρχουν δύο διαφορετικές μονάδες, η USCI_A και η USCI_B

Η μονάδα USCI_A εξυπηρετεί:

- UART επικοινωνία
- IrDA επικοινωνίες
- SPI

Ενώ η μονάδα USCI_B εξυπηρετεί:

- I2C πρωτόκολλο
- SPI

Στο σχέδιο που έγινε στην πλακέτα, τα σήματα του SPI από τους αισθητήρες τοποθετήθηκαν στα παρακάτω ακροδέκτες του μικροελεγκτή (Πίνακας 3-3)

Πίνακας 3-3. Σύνδεση ακροδεκτών SPI στο μικροελεγκτή.

CC430 Pin	Σήμα ADNS7550
P1.2	MISO
P1.3	MOSI
P1.4	CLK
P4.7	Chip Select (Left Motor)
P4.6	Chip Select (Right Motor)

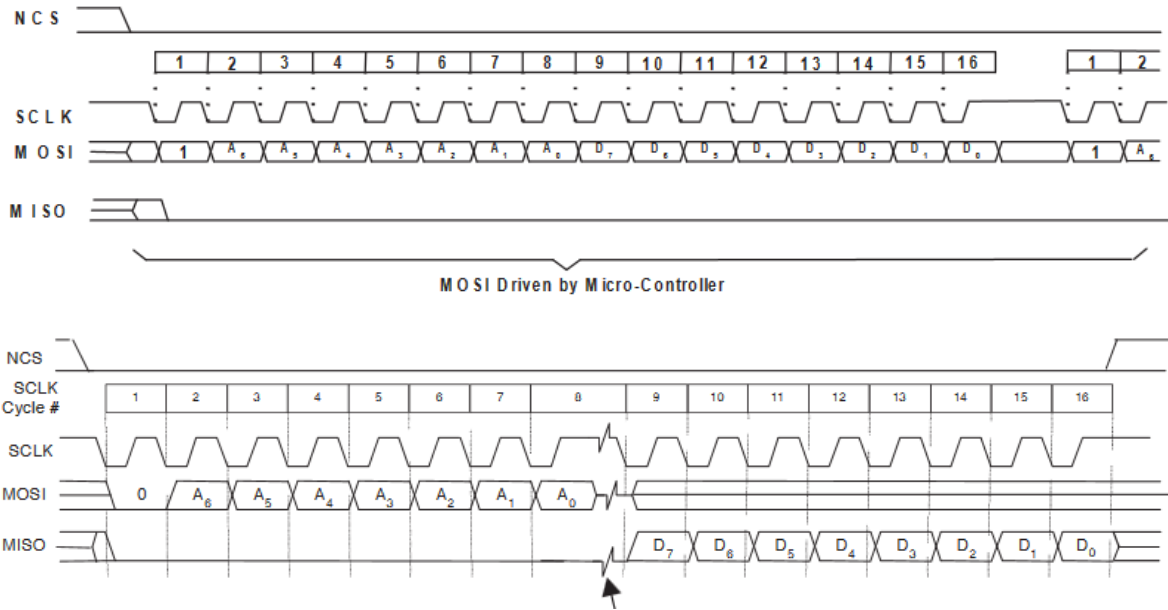
Οι ακροδέκτες οι συγκεκριμένοι του μικροελεγκτή αντιστοιχούν στη μονάδα USCI_B. Η μονάδα διαθέτει 14 συνολικά καταχωρητές, η προσπέλαση των οποίων μας επιτρέπει να υλοποιήσουμε την επικοινωνία SPI μεταξύ του μικροελεγκτή και των περιφερειακών συσκευών. Οι βασικοί καταχωρητές είναι

- UCBxCTL0 και UCBxCTRL1 οι οποίοι ρυθμίζουν τις αρχικοποιήσεις των διαύλων επικοινωνίας, την συχνότητα και τον τρόπο αποστολής των δεδομένων.
- UCBxBR0 και UCBxBR1, οι οποίοι ρυθμίζουν το ρυθμό αποστολής των bits στην επικοινωνία.
- UCBxSTAT ο οποίος δίνει πληροφορίες για την κατάσταση της επικοινωνίας κάθε χρονική στιγμή, ώστε να γίνεται καλύτερος χειρισμός των λαθών (error handling)
- UCBxRXBUF και UCBxTXBUF, οι οποίοι είναι οι καταχωρητές που αποθηκεύονται οι τιμές των δεδομένων που λαμβάνονται ή αποστέλλονται, αντίστοιχα.
- καταχωρητές (UCBxICTL, UCBxIE, UCBxIFG, UCBxIV) διαχείρισης των interrupt της επικοινωνίας

Για την αρχικοποίηση της επικοινωνίας πρέπει να εγγράψουμε τα κατάλληλα bits στους καταχωρητές UCBxCTL0 και UCBxCTRL1. Πιο συγκεκριμένα

- Ορίζουμε “3-pin” λειτουργία του SPI, μέσω του bit UCMODEx παραλείποντας δηλαδή το δίαυλο UCxSTE, οποίος είναι χρήσιμος όταν οι περιφερειακές συσκευές επικοινωνούν με πολλές κύριες συσκευές.
- Ορίζουμε λειτουργία Master, όπως προαναφέραμε μέσω του bit UCMST
- Ενεργοποιούμε τη σύγχρονη αποστολή δεδομένων, μέσω του bit UCSYNC
- Ορίζουμε, μέσω του bit UCMSB, την επικοινωνία σαν Most Significant Bit First, καθώς οι αισθητήρες ADNS7550, επικοινωνεί με την κύρια συσκευή, μεταφέροντας πρώτα το πιο σημαντικό bit στον καταχωρητή ολίσθησης.
- Θέτουμε το μέγεθος των bits που θα έχει κάθε πακέτο αποστολής των διαύλων της επικοινωνίας. Σύμφωνα με το datasheet των αισθητήρων τα πακέτα έχουν μέγεθος 8 bits. Αυτό ενεργοποιείται μέσω της προεπιλεγμένης τιμής του bit UC7BIT = 0.
- Στη συνέχεια, ορίζουμε τα bits UCCKPH και UCCKPL, που ρυθμίζουν την πόλωση και τη φάση του σήματος ρολογιού, η βιβλιοθήκη SPI έχει τέσσερις δυνατές λειτουργίες. Η ρύθμιση της πόλωσης απαιτεί τον προσδιορισμό της τιμής βάσης του ρολογιού (λογικό 1 ή λογικό 0) και η ρύθμιση της φάσης τον προσδιορισμό της θετικής ή αρνητικής ακμής που γίνεται η μεταφορά των δεδομένων.

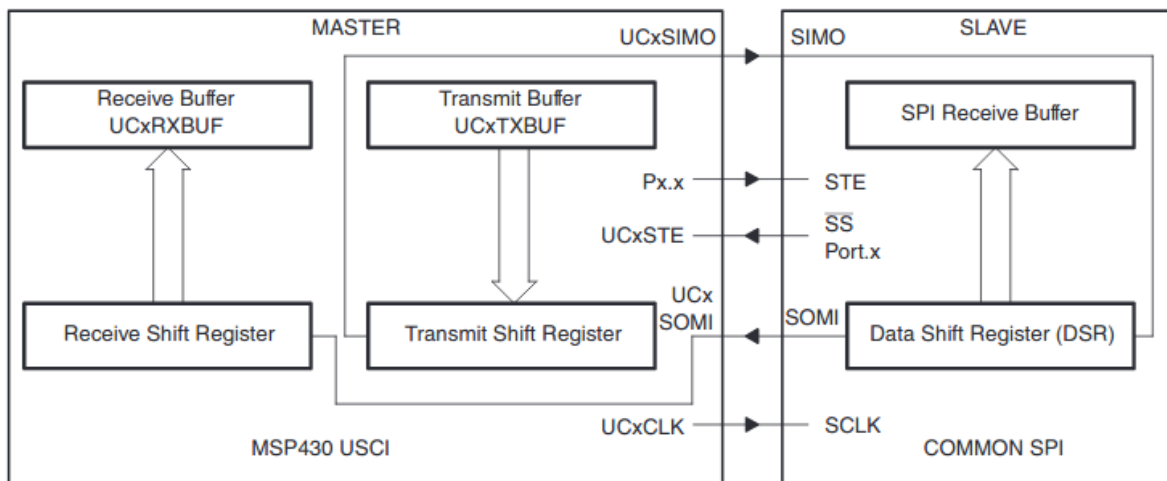
Από το datasheet του ADNS7550 βλέπουμε την μεταφορά των δεδομένων γίνεται στην αρνητική ακμή του ρολογιού (Σχήμα 3-15), επομένως θέτουμε το bit UCCKPH, για τον ορθό χρονισμό της αποστολής των πακέτων και την σωστή ανάγνωση τους από τον μικροελεγκτή.



Σχήμα 3-15. Τα σήματα κατά την ανάγνωση και την εγγραφή μέσω του πρωτοκόλλου SPI.

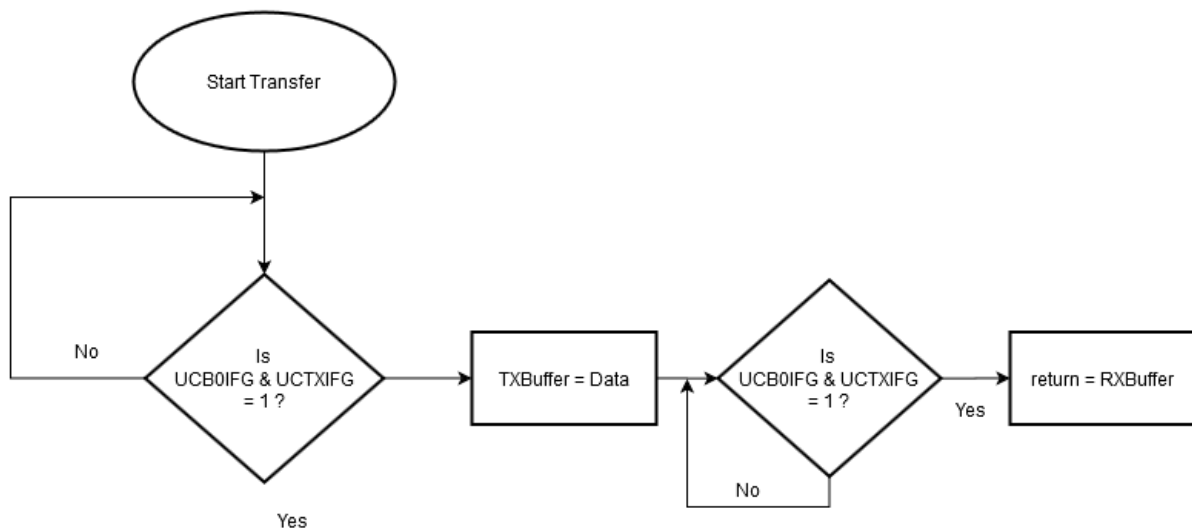
Ρυθμίζεται επίσης η πηγή του ρολογιού για τη συχνότητα της επικοινωνίας. Οι αισθητήρες ADNS λειτουργούν με συχνότητα 1MHz. Επομένως, επιλέγεται το ρολόι της CPU σαν πηγή ταλάντωσης καθώς έχει συχνότητα 12MHz. Στη συνέχεια μέσω των των καταχωρητών UCBxR0 και UCBxR1 μπορούμε να ρυθμίσουμε τη συχνότητα σύμφωνα με την σχέση $f_{sclk} = f_{mclc} / UCBRX$, όπου $UCBRx = UCB0BR0 + UCB0BR1 * 256$. Επιλέγοντας λοιπόν το $UCB0BR0 = 0x0c = 12$, μπορούμε να επιτύχουμε συχνότητα επικοινωνίας ίση με 1MHz.

Η επικοινωνία του SPI είναι σύγχρονη. Αυτό σημαίνει ότι τα σήματα που αποστέλλονται μεταξύ master και slave, ακολουθούνται από αντίστοιχα εισερχόμενα σήματα (Σχήμα 3-16).



Σχήμα 3-16. Master-Slave επικοινωνία του SPI πρωτοκόλλου.

Επομένως, για την υλοποίηση της αποστολής των δεδομένων γίνεται χρήση του UCBxIFG καταχωρητή. Μόλις ένα σήμα αποσταλεί από τον μικροελεγκτή ενεργοποιείται το UCRXIFG bit, ενώ μόλις προσληφθεί ενεργοποιείται το UCTXIFG (Σχήμα 3-17).



Σχήμα 3-17. Λογικό διάγραμμα ανταλλαγής δεδομένων μέσω SPI διαύλου.

Το παραπάνω σχήμα αποστολής εκτελείται σε κάθε ανταλλαγή δεδομένων στους διαύλους της επικοινωνίας SPI. Δηλαδή σε κάθε ανταλλαγή αποστέλλεται ένα byte δεδομένων από το μικροελεγκτή και στη συνέχεια επιστρέφεται από τον αισθητήρα ένα byte απάντησης. Επομένως, για την ορθή επικοινωνία με τη δευτερεύουσα συσκευή, δηλαδή τον ADNS7550, πρέπει να ακολουθηθεί το πρωτόκολλο ανταλλαγής πληροφοριών που ορίζει ο κατασκευαστής.

Για την προσπέλαση των καταχωρητών των αισθητήρων laser, όπως και σε κάθε δευτερεύουσα συσκευή SPI, υπάρχουν δύο διαφορετικές μορφές. Μία η εγγραφή τους και μία η απλή ανάγνωση τους. Κάθε μία από τις αποστολές δεδομένων αρχικοποιείται από τον μικροελεγκτή και αποτελείται από δύο bytes (Πίνακας 3-4). Ένα byte κατά το οποίο ορίζεται η διεύθυνση του καταχωρητή που προσπελάζεται και ένα byte δεδομένων. Το τελευταίο byte διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- Κατά την εγγραφή των καταχωρητών το byte αυτό αποτελείται από τα δεδομένα που θέλουμε να εγγράψουμε στον καταχωρητή.
- Κατά την ανάγνωση των καταχωρητών, το byte είναι ένα κενό (0x00) byte από το οποίο περιμένουμε ως απάντηση την τιμή του καταχωρητή που θέλουμε να διαβάσουμε

Ο προσδιορισμός της μορφής αποστολής γίνεται από το πρώτο bit (Most Significant Bit – MSB), του byte της διεύθυνσης

Πίνακας 3-4. Πακέτα αποστολής bytes για το πρωτόκολλο SPI του αισθητήρα.

	First Byte	Second Byte
0 (Read Register)	Address (7 bits)	NULL Byte (0x00)
1 (Write Register)	Address (7 bits)	Data writing to registers (8 bits)

Για την εξακρίβωση της σωστής επικοινωνίας, υπάρχει δυνατότητα προσπέλασης προκαθορισμένων καταχωρητών του αισθητήρα. Χρησιμοποιείται ο καταχωρητής Product_ID, ο οποίος βρίσκεται στη διεύθυνση 0x00 και έχει σαν προκαθορισμένη τιμή τη 0x32. Διαβάζοντας τον συγκεκριμένο καταχωρητή, εξακριβώνουμε αν η τιμή επιστροφής

κατά την αποστολή των δεδομένων είναι η συγκεκριμένη (Σχήμα 3-18). Με λάθος ανάγνωση της τιμής, υπάρχει πρόβλημα είτε στην επικοινωνία, είτε στον ίδιο τον αισθητήρα (για παράδειγμα, πρόβλημα τροφοδοσίας).

Registers

The ADNS-7550 registers are accessible via the serial port. The registers are used to read motion data and status as well as to set the device configuration.

Address	Register	Read/Write	Default Value
0x00	Product_ID	R	0x32

Σχήμα 3-18. Ο default καταχωρητής για τον έλεγχο της σωστής επικοινωνίας.

3.4 Αισθητήρας δύναμης

Ο αισθητήρας δύναμης παρουσιάζεται αναλυτικά στην εργασία [21]. Συνοπτικά, ο αισθητήρας δύναμης είναι αναλογικός αισθητήρας, το ηλεκτρικό κύκλωμα μέτρησης του οποίου αποτελείται από δύο στάδια ενίσχυσης. Η μέτρηση από τον μικροελεγκτή θα γίνει από τους αναλογικο-ψηφιακούς μετατροπείς ADC, που διαθέτει ο μικροελεγκτής CC430.

Σύμφωνα με την μελέτη που έχει γίνει η έξοδος του αισθητήρα πρέπει να βρίσκεται στο εύρος τάσης μεταξύ 0 – 3.3V. Η τροφοδοσία του μικροελεγκτή [30], είναι της τάξεως των 3.3V επομένως η μέγιστη τάση που μπορούν να δεχθούν οι αντίστοιχοι ακροδέκτες των ADC του μικροελεγκτή είναι 3.3V. Σύμφωνα, όμως με την μελέτη [21], η μέτρηση των αισθητήρων έχει μέγιστη τιμή τα 0.3 N.

Ο μικροελεγκτή CC430 έχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ δύο ADC. Ενός μεγέθους 10-bit και ενός μεγέθους 12-bit. Επιλέγεται ο 12-bit, ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ανάλυση στη μέτρηση. Σε μονάδες τάσης, ανάλυση που προσφέρει ο συγκεκριμένος ADC είναι ίση με

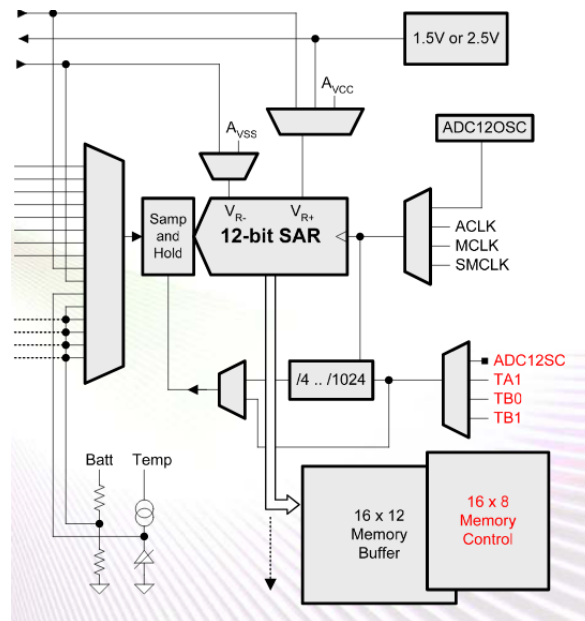
$$sensitivity = \frac{V_{cc}}{2^{12}} = 0.8mV \quad (3-10)$$

Και σε μονάδες δύναμης mN, με δεδομένο ότι η μέγιστη δύναμη είναι ίση με 0.3N

$$sensitivity = \frac{F}{2^{12}} = 1.41mN \quad (3-11)$$

Ο ADC_12 του CC430 (Σχήμα 3-19) είναι τύπου SAR (Successive Approximation Register), διαθέτει 16 θέσεις μνήμης (Memory Buffers) οι οποίες είναι προσπελάσιμες από την DMA, δηλαδή τη μονάδα του μικροελεγκτή που προσπελάζει τη μνήμη ανεξάρτητα από την Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας και έχει ταχύτητα επεξεργασίας των σημάτων ίση με 200ksps, ενώ είναι δυνατές τρεις διαφορετικές μέθοδοι ανάγνωσης των τιμών του

- Απλή μετατροπή
- Επαναλαμβανόμενη μετατροπή
- Επαναλαμβανόμενη μετατροπή ακολουθίας



Σχήμα 3-19. Η μονάδα του ADC του μικροελεγκτή CC430.

Για τη ρύθμιση της λειτουργίας του ADC πρέπει να αρχικοποιηθούν τα παρακάτω μεγέθη.

- **Sampling Timer:** Ορίζεται από το SSELx bit του καταχωρητή ADC12CTL1. Μεταξύ των διαθέσιμων επιλογών επιλέχθηκε η μετατροπή να γίνεται κάθε φορά που τίθεται το bit ADC12SC, το οποίο αρχίζει την διαδικασία δειγματοληψίας και μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.
- **Το κανάλι εισόδου:** Ορίζεται από τα τέσσερα bit ADC12INCHx. Λόγω του ότι η έξοδος μέτρησης του αισθητήρα σχεδιάστηκε να εισάγεται στον ακροδέκτη P2.4 του μικροελεγκτή, επιλέγουμε σαν τιμή της σειράς των ADC12INCHx bits, το (0100b) που αντιστοιχεί σε αυτόν τον ακροδέκτη.
- **Η κατάσταση (mode) λειτουργίας :** Επιλέγεται λειτουργία απλής μετατροπής του αναλογικού σήματος, καθώς η μόνη μέτρηση που χρειάζεται για την εφαρμογή είναι η μέτρηση του αισθητήρα δύναμης. Αυτό γίνεται μέσω της προκαθορισμένης τιμής 0x0 του bit ADC12CONSEQx του καταχωρητή ADC12CTL1.
- **Επιλογή πηγή τάσης αναφοράς:** Σαν πηγή της τάσης αναφοράς επιλέχθηκε η εξωτερική τροφοδοσία μέσω του ακροδέκτη Avss, η οποία είναι ίση με την τροφοδοσία του συνολικού κυκλώματος του μικροελεγκτή, δηλαδή 3.3V. Η επιλογή αυτή είναι δυνατή μέσω των τριών bit ADC12SREFx, του καταχωρητή ADC12MCTL0 με τιμή (0x000), τα οποία επιλέγουν $V+ = A_{VCC}$ και $V- = A_{VSS}$, το οποίο έχει συνδεθεί στην κοινή γείωση όλου του κυκλώματος.
- **Επιλογή τιμής τάσης αναφοράς:** Σαν τάση αναφοράς επιλέγεται η τιμή των 2V, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που τέθηκαν στην εργασία [21]. Η επιλογή των τάσεων αναφοράς, γίνεται μεταξύ των τιμών 1.5, 2 και 2.5 Volt. Επιλέγεται η μεσαία τιμή, γιατί καλύπτει το εύρος των μετρήσεων που αναμένονται από τον αισθητήρα δύναμης, όσο και την όσο το δυνατόν μικρότερη ανάλυση. Αυτό γίνεται μέσω της τιμής (0x10) των bit REFVSELx του καταχωρητή REFCTL0.

4 Αποστολή δεδομένων

4.1 Γενικά Αρχιτεκτονική

Τα βασικά στοιχεία της υλοποίησης της αρχιτεκτονικής της ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των διαφόρων συσκευών, στην ολοκληρωμένη λύση λειτουργίας της μικρορομποτικής πλατφόρμας περιλαμβάνουν τα μικρορομπότ, τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και την συσκευή RF. Ειδικότερα έχουμε:

1. Τα μικρορομπότ

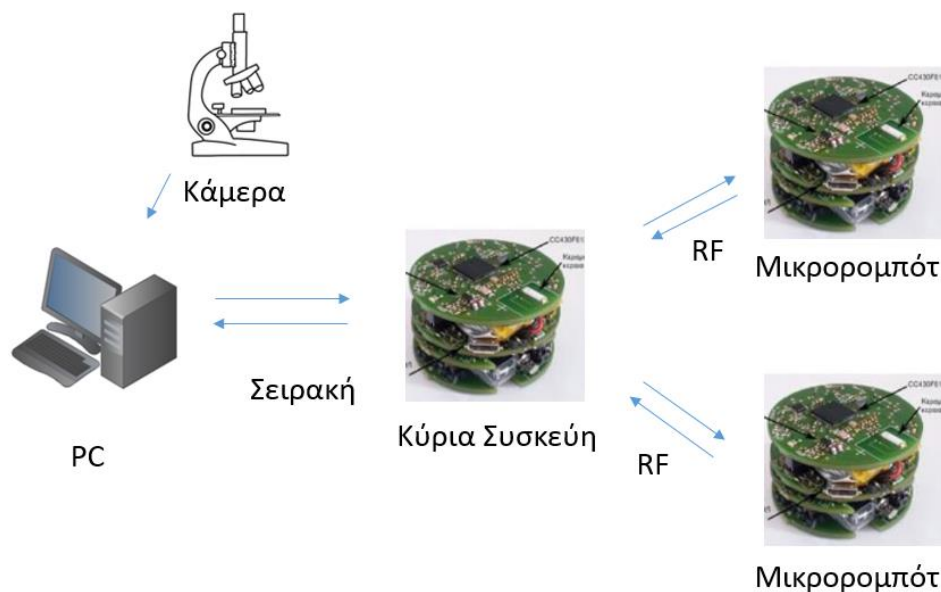
Τα μικρορομπότ συλλέγουν πληροφορίες από τα αισθητήρια που είναι ενσωματωμένα στις πλακέτες τους και τα επεξεργάζονται. Στην υπάρχουσα έκδοση του μικρορομπότ, δεν έχει υλοποιηθεί η αποθήκευση των δεδομένων με σκοπό την μετέπειτα αξιοποίηση τους. Οι βασικοί αλγόριθμοι ελέγχου, οι οποίοι έχουν ως ανάδραση τα σήματα των ενσωματωμένων αισθητήρων, υλοποιούνται στον μικροελεγκτή του μικρορομπότ, ώστε να αποφευχθούν καθυστερήσεις και τυχόν απώλειες δεδομένων. Η επικοινωνία RF από τον μικροελεγκτή στον κεντρικό υπολογιστή, χρησιμοποιείται σε πρώτο βαθμό για εποπτεία και αποθήκευση των δεδομένων των αισθητήρων. Σε δεύτερο βαθμό, για την αξιοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες για ανάπτυξη αλγορίθμων προσομοιώσεων και σε τρίτο βαθμό για την συλλογή των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την επεξεργασία τους με βάση άλλους αισθητήρες (πχ. κάμερα). Η ασύρματη επικοινωνία από τον υπολογιστή στο μικρορομπότ χρησιμοποιείται για την αποστολή των επεξεργασμένων δεδομένων από την κάμερα και την αποστολή των εντολών ελέγχου στα μικρορομπότ. Τέλος, αναπτύχθηκε και σειριακή επικοινωνία στον πυρήνα του μικρορομπότ, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανάγνωση των σημάτων από κάποιο υπολογιστή και η αποσφαλμάτωση της λειτουργίας του.

2. Υπολογιστής

Ο υπολογιστής επεξεργάζεται την εικόνα της κάμερας και υλοποιεί την επεξεργασία της εικόνας για τον εντοπισμό της θέσης του μικρορομπότ στο χώρο. Στην συνέχεια εκτελεί τον αλγόριθμο ελέγχου και αποστέλλει τα σήματα εξόδου του ελεγκτή, δηλαδή τις εντολές ταχύτητας μέσω της κύριας συσκευής RF. Παράλληλα, λαμβάνει και από το μικρορομπότ τις μετρήσεις των αισθητήρων για εξακρίβωση των μετρήσεων.

3. Κύρια συσκευή RF

Η κύρια συσκευή, είναι μία συσκευή με RF επικοινωνία που λαμβάνει και στέλνει τα σήματα από και προς το μικρορομπότ. Πρέπει να είναι σε θέση ανά πάσα στιγμή να εξυπηρετεί το μικρορομπότ στέλνοντας σήματα ελέγχου και να λαμβάνει την απαραίτητη πληροφορία αντίστοιχα. Η συσκευή αυτή επικοινωνεί με τον υπολογιστή με σειριακή επικοινωνία. Η επικοινωνία αυτή είναι αμφίδρομη, δηλαδή και αποστέλλονται και λαμβάνονται πληροφορίες. Αποστέλλονται οι πληροφορίες των αισθητήρων των μικρορομπότ, ενώ λαμβάνονται τα σήματα ελέγχου που είναι να σταλούν.



Σχήμα 4-1. Γενική αρχιτεκτονική του συστήματος.

4.2 Πρωτόκολλο επικοινωνίας

Στις τηλεπικοινωνίες, το σύνολο από κανόνες που διέπουν την επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων συσκευών ονομάζεται πρωτόκολλο. Μεταξύ του ρομπότ και υπολογιστή, χρησιμοποιείται πρωτόκολλο μεταγωγής πακέτου με το οποίο η πληροφορία μεταδίδεται σε πακέτα σταθερού ή δυναμικού μήκους. Με αυτή τη μέθοδο η μετάδοση της χρήσιμης πληροφορίας προϋποθέτει μια σύνδεση των δύο συσκευών με την αποστολή και αποδοχή κριτήριων από την πλευρά τους τα οποία ορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας.

Για να ορίσουμε το πρωτόκολλο επικοινωνίας, πρέπει να δούμε ποιες πώς θέλουμε να στέλνουμε τις πληροφορίες και να τις διαχειριζόμαστε στο λογισμικό. Με αυτό ως δεδομένο, αναλύουμε τις συγκεκριμένες πληροφορίες που θέλουμε να μεταφερθούν από τον υπολογιστή στο μικρορομπότ και αντίστροφα.

Για την πρώτη περίπτωση, την αποστολή δεδομένων προς το μικρορομπότ οι εντολές που θέλουμε να στείλουμε είναι οι εξής:

- Εντολές ταχύτητας για τους κινητήρες (Πίνακας 4-1)
- Εντολές θέσης για το μικρορομπότ (Πίνακας 4-2)
- Εντολές ενεργοποίησης/απενεργοποίησης αποστολής δεδομένων από το μικρορομπότ (Πίνακας 4-2)

Για την αποστολή δεδομένων από το μικρορομπότ οι εντολές που θέλουμε να στείλουμε είναι οι εξής (Πίνακας 4-3):

- Αποστολή ταχύτητας στροφών (2 κινητήρες)
- Αποστολή θέσης του μικρορομπότ στο χώρο
- Αποστολή τιμών αισθητήρων θέσης

Η γενική μορφή του πακέτου που θα ανταλλάσσεται θα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Έναν αναγνωριστικό χαρακτήρα (ID), ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση της ταυτότητας της συσκευής που αντιστοιχεί το συγκεκριμένο πακέτο. Με τον τρόπο

αυτό αποφεύγεται η λανθασμένη ανάγνωση δεδομένων από τα μικρορομπότ, ειδικά σε περίπτωση που στο χώρο εργασίας υπάρχουν περισσότερα από ένα μικρορομπότ. Επομένως, ορίζεται μία συγκεκριμένη τιμή για κάθε μικρορομπότ, αλλά και για τον κύρια συσκευή.

- Έναν χαρακτήρα που θα περιγράφει το είδος της πληροφορίας που ανταλλάσσεται. Αυτό είναι απαραίτητο για να γίνει η διαχείριση των bytes των δεδομένων, ώστε να αποθηκευτούν στις κατάλληλες μεταβλητές εντός του προγράμματος.
- Τα bytes που αντιστοιχούν στις τιμές των προς αποστολή πακέτων.

Πίνακας 4-1. Μορφή πακέτου αποστολής εντολών ταχύτητας στα μικρορομπότ.

ID	Αναγνωριστικό	DATA			Action
x	98	PWM (Left Motor) Unsigned Int (16 bit)	PWM (Right Motor) Unsigned Int (16 bit)		Move Forward
x	102	PWM (Left Motor) Unsigned Int (16 bit)	PWM (Right Motor) Unsigned Int (16 bit)		Move Backwards
x	99	PWM (Left Motor) Unsigned Int (16 bit)	PWM (Right Motor) Unsigned Int (16 bit)		Move Clockwise
x	100	PWM (Left Motor) Unsigned Int (16 bit)	PWM (Right Motor) Unsigned Int (16 bit)		Move Counter Clockwise

Πίνακας 4-2. Μορφή πακέτου αποστολή εντολών θέσης στα μικρορομπότ.

ID	Αναγνωριστικό	DATA			Action
x	50		-		Stop Transmitting
x	51		-		Start Transmitting
x	52	X position float (32 bits)	Y position float (32 bits)	Orientation float (32 bits)	Update position

Πίνακας 4-3. Μορφή πακέτου αποστολής τιμών αισθητήρων στην κύρια συσκευή.

ID	Αναγνωριστικό	DATA			Action
x	'r' (ASCII)	RPM (Left Motor) unsigned int (16 bits)	RPM (Right Motor) unsigned int (16 bits)		Angular Velocity
x	'f' (ASCII)		Force (mN) float (32 bits)		Force Sensor Data
x	'p' (ASCII)	X position float (32 bits)	Y position float (32 bits)	Orientation float (32 bits)	Position Data

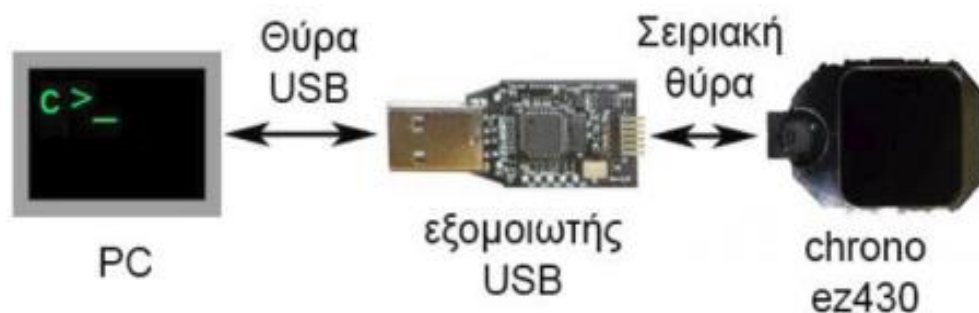
4.3 Σειριακή Επικοινωνία

Η σειριακή επικοινωνία, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του κεντρικού υπολογιστή με τον κύρια συσκευή για την ανταλλαγή πακέτων δεδομένων. Ταυτόχρονα χρησιμοποιείται και από τις περιφερειακές συσκευές των μικρορομπότ, για την αποστολή δεδομένων στον υπολογιστή και την αποθήκευσή τους. Πέρα από αυτό, είναι απαραίτητο για το “φόρτωμα” του λογισμικού τόσο στην κύρια συσκευή, όσο και στις περιφερειακές και την αποσφαλμάτωση του κώδικα.

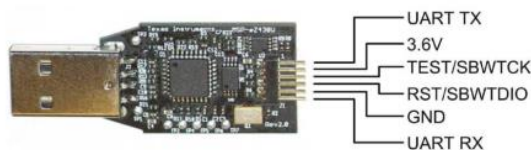
Στις εργασίες [17] και [20], η υλοποίηση της κύριας συσκευής έγινε με το σύστημα ασύρματης επικοινωνίας *chronos ez430* της Texas Instruments. Η επιλογή της συγκεκριμένης συσκευής έγινε επειδή το *chronos* και ο μικροελεγκτής του ρομπότ έχουν τους ίδιους πομποδέκτες πράγμα που συνετέλεσε στην απλοποίηση και ενίσχυση της αξιοπιστίας της σύνδεσης. Παρόλα αυτά, για την κύρια συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε πλακέτα επιπέδου μικροελεγκτή του αναβαθμισμένου σχεδιασμού της μικρορομποτικής πλατφόρμας, σε συνδυασμό με το επίπεδο του debugger. Το πλεονέκτημα της συσκευής *chronos* είναι η LED οθόνη που διαθέτει ενσωματωμένη, με αποτέλεσμα να μπορούν να εμφανίζονται ενδείξεις για την ανταλλαγή των πακέτων και την ευκολότερη αποσφαλμάτωση της λειτουργίας της επικοινωνίας.

Για το σκοπό αυτό, απαιτείται ένα κύκλωμα που θα γεφυρώνει την επικοινωνία τους. Η υλοποίηση της σύνδεσης αυτής γίνεται με χρήση του εξομοιωτή USB, ο οποίος διατίθεται με τη συσκευή *chronos* της TI. Ο εξομοιωτής διαθέτει ενσωματωμένο κύκλωμα USB-to-UART στην καθορισμένη ταχύτητα των 9600bps και χρησιμοποιείται για προγραμματισμό και το debugging του *chronos* (Σχήμα 4-2).

Το πλεονέκτημα του υποσυστήματος αυτού είναι ότι η αποστολή και λήψη δεδομένων μέσω της σειριακής μπορεί να πραγματοποιείται ανεξάρτητα, κατά τη διάρκεια του debugging. Για την επικοινωνία *chronos*-USB emulator μετατρέπονται δύο ψηφιακοί ακροδέκτες εξόδου και εισόδου του *chronos* σε είσοδο και έξοδο αντίστοιχα της σειριακής μονάδας (Σχήμα 4-3).



Σχήμα 4-2. Σύνδεση του εξομοιωτή με το ρολόι Chronos.



Σχήμα 4-3. Οι ακροδέκτες του εξομοιωτή.

Σε επίπεδο λογισμικού η σειριακή επικοινωνία υλοποιείται, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, από την μονάδα Universal Serial Communication Interface (USCI). Στην πλακέτα του μικρορομπότ οι ακροδέκτες της σειριακής επικοινωνίας, TX και RX, συνδέονται στους ακροδέκτες P1.5 και P1.6, αντίστοιχα, ενώ στο ρολόι του χρονos οι ακροδέκτες είναι οι P2.0 και P2.1. Οι ακροδέκτες αυτοί αντιστοιχούν στην μονάδα USCI_A, η οποία υποστηρίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας της σειριακής επικοινωνίας). Οι καταχωρητές της μονάδας που ρυθμίζουν τη διαμόρφωση της επικοινωνίας είναι οι :

- UCAxCTL0 και UCAxCTRL1 οι οποίοι ρυθμίζουν τις αρχικοποιήσεις των διαύλων επικοινωνίας, την συχνότητα και τον τρόπο αποστολής των δεδομένων.
- UCAxBR0 και UCAxBR1, οι οποίοι ρυθμίζουν το ρυθμό αποστολής των bits στην επικοινωνία.
- UCAxSTAT ο οποίος δίνει πληροφορίες για την κατάσταση της επικοινωνίας κάθε χρονική στιγμή, ώστε να γίνεται καλύτερος χειρισμός των λαθών (error handling)
- UCAxRXBUF και UCAxTXBUF, οι οποίοι είναι οι καταχωρητές που αποθηκεύονται οι τιμές των δεδομένων που λαμβάνονται ή αποστέλλονται, αντίστοιχα.
- καταχωρητές (UCAxICTL, UCAxIE, UCAxIFG, UCAxIV) διαχείρισης των interrupt της επικοινωνίας

Για την αρχικοποίηση της σειριακής επικοινωνίας πρέπει να εγγράψουμε τα κατάλληλα bits στους καταχωρητές UCAxCTL0 και UCAxCTRL1. Πιο συγκεκριμένα:

- Ρυθμίζουμε τους ακροδέκτες TX σαν εξόδους.
- Ρυθμίζουμε τους ακροδέκτες του μικροελεγκτή να λειτουργήσουν την μονάδα USCI_A0.
- Ρυθμίζεται επίσης η πηγή του ρολογιού για τη συχνότητα της επικοινωνίας. Επιλέγεται το ρολόι 12MHz της CPU, μέσω της ενεργοποίησης των bit UCSSEL = (10)2.
- Ρυθμίζουμε το baudrate της επικοινωνίας, μέσω της εγγραφής των καταχωρητών UCAxBR0 και UCAxBR1 (Σχήμα 4-4). Επιλέγεται Baud Rate ίσο με 9600, λόγω της χαμηλού ποσοστού λαθών κατά την εκτέλεση της επικοινωνίας σε αυτή τη συχνότητα αποστολής δεδομένων. Για να επιτύχουμε 9600 bps συχνότητα εγγράφουμε στους καταχωρητές την τιμή 1250, σύμφωνα με τον τύπο που δίνει την τιμή του καταχωρητή $N = f_{clk}/\text{Baud Rate}$. Εφαρμόζοντας τη σχέση $UCAxBR0 + UCAxBR1 \times 256$, για να προκύψει η τιμή 1250 και με δεδομένο ότι οι καταχωρητές είναι μεγέθους 8 bits, επομένως έχουν μέγιστη τιμή 255, εγγράφουμε τις εξής τιμές $UCAxBR0 = 226$ και $UCAxBR1 = 4$.

Table 22-4. Commonly Used Baud Rates, Settings, and Errors, UCOS16 = 0 (continued)

BRCLK Frequency (Hz)	Baud Rate (baud)	UCBRx	UCBR5x	UCBRF5x	Maximum TX Error (%)	Maximum RX Error (%)		
4,194,304	19200	218	4	0	-0.2	0.2	-0.3	0.6
4,194,304	57600	72	7	0	-1.1	0.6	-1.3	1.9
4,194,304	115200	36	3	0	-1.9	1.5	-2.7	3.4
8,000,000	9600	833	2	0	-0.1	0	-0.2	0.1
8,000,000	19200	416	6	0	-0.2	0.2	-0.2	0.4
8,000,000	38400	208	3	0	-0.2	0.5	-0.3	0.8
8,000,000	57600	138	7	0	-0.7	0	-0.8	0.6
8,000,000	115200	69	4	0	-0.6	0.8	-1.8	1.1
8,000,000	230400	34	6	0	-2.1	0.6	-2.5	3.1
8,000,000	460800	17	3	0	-2.1	4.8	-6.8	5.8
8,388,608	9600	873	7	0	-0.1	0.06	-0.2	0.1
8,388,608	19200	436	7	0	-0.3	0	-0.3	0.2
8,388,608	57600	145	5	0	-0.5	0.3	-1.0	0.5
8,388,608	115200	72	7	0	-1.1	0.6	-1.3	1.9
12,000,000	9600	1250	0	0	0	0	-0.05	0.05
12,000,000	19200	625	0	0	0	0	-0.2	0
12,000,000	38400	312	4	0	-0.2	0	-0.2	0.2
12,000,000	57600	208	2	0	-0.5	0.2	-0.6	0.5
12,000,000	115200	104	1	0	-0.5	0.6	-0.9	1.2
12,000,000	230400	52	0	0	-1.8	0	-2.6	0.9
12,000,000	460800	26	0	0	-1.8	0	-3.6	1.8

Σχήμα 4-4. Επιλογή Baud Rate σειριακής επικοινωνίας του μικροελεγκτή CC430.

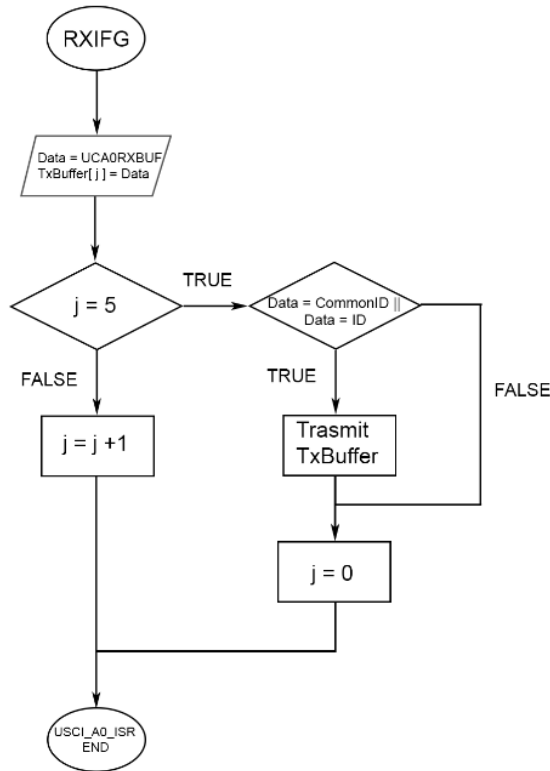
- Ενεργοποιούμε τα Interrupts της επικοινωνίας

Η σειριακή επικοινωνία χρησιμοποιείται με δύο τρόπους, και στην αποστολή και στη λήψη πακέτων δεδομένων.

Η αποστολή των δεδομένων γίνεται μέσω του buffer UCA0TXBUF, μεγέθους ενός byte. Κάθε φορά που ένα byte εισάγεται στον buffer, τα δεδομένα μεταφέρονται στον καταχωρητή shift και στη συνέχεια αποστέλλονται διαμέσου των επικοινωνιακών διαύλων. Ο buffer είναι προσπελάσιμος κάθε στιγμή του προγράμματος, με την προϋπόθεση το bit UCTXIFG να είναι απενεργοποιημένο. Κάθε φορά που εγγράφεται ο buffer το bit ενεργοποιείται, ενώ όταν τα δεδομένα μεταφέρονται στο δίαυλο, μηδενίζεται εκ νέου. Συνεπώς, πριν από κάθε αποστολή, πρέπει να γίνεται έλεγχος του UCTXIFG, ώστε να εγγράφεται ο buffer, μόνο τη στιγμή που αδειάζει, για την αποφυγή λανθασμένων πακέτων επικοινωνίας.

Η λήψη των δεδομένων γίνεται μέσω της προσπέλασης του UCA0RXBUF, μεγέθους 8 bit. Στο συγκεκριμένο buffer φορτώνεται ένα byte από τον shift καταχωρητή λήψης. Με το που το πακέτο του ενός byte εγγραφεί στον buffer, ενεργοποιείται το flag του interrupt λήψης, UCRXIFG. Με την ανάγνωση του καταχωρητή από το πρόγραμμα του λογισμικού, το flag ξαναγίνεται ίσο με την τιμή 0. Κάθε φορά που ενεργοποιείται το flag του interrupt, γίνεται προσπέλαση της ρουτίνας του Interrupt. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να χειριστούμε τα σήματα που δέχεται η συσκευή (Σχήμα 4-5).

Στην εφαρμογή μας, τα εισερχόμενα σήματα σειριακής αφορούν τις εντολές ταχυτήτων που παράγονται από τον αλγόριθμο ελέγχου στον κεντρικό υπολογιστή. Η συσκευή, θέλουμε να δέχεται τα πακέτα που έρχονται από τη σειριακή και να τα στέλνει κατευθείαν μέσω ασύρματης επικοινωνίας.



Σχήμα 4-5. Λογικό διάγραμμα υλοποίησης σειριακής επικοινωνίας.

4.4 Ασύρματη επικοινωνία

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το μικρορομπότ και το ρολόι χρονos χρησιμοποιούν τον ίδιο μικροελεγκτή CC430f6137 του οποίου η ασύρματη μονάδα του φέρει τον πυρήνα του πομποδέκτη CC1101 της Texas Instruments. Ο πυρήνας CC1101 λειτουργεί σε συχνότητες ραδιοκυμάτων στην μπάντα των κάτω από 1 GHz και περιλαμβάνει έναν δέκτη μεσολάβησης χαμηλής συχνότητας (IF). Το εισερχόμενο σήμα ραδιοκυμάτων (RF) ενισχύεται από ένα ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA). Τα σήματα που εισέρχονται στον IF, ψηφιοποιούνται από τους αναλογοψηφιακούς μετατροπείς (ADCs), οπότε το φιλτράρισμα του καναλιού, ο αυτόματος έλεγχος κέρδους και ο συγχρονισμός των πακέτων, γίνονται ψηφιακά. Η αποστολή των δεδομένων επιτυγχάνεται με τη σύνθεση της συχνότητας RF.

Για την υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας είναι απαραίτητη η ανάπτυξη συστήματος λογισμικού το οποίο απαρτίζεται από το πρωτόκολλο επικοινωνίας και από τον μηχανισμό διαχείρισης των διακοπών (interrupts) των μονάδων σειριακής και ασύρματης επικοινωνίας. Η επικοινωνία μεταξύ της ασύρματης μονάδας διαχείρισης του μικροεπεξεργαστή και του πυρήνα του CC1101 πραγματοποιείται μέσω λογικών καναλιών. Κάθε εντολή προγραμματισμού που παρουσιάζεται στον πυρήνα αποστέλλεται υπό τη μορφή ενημέρωσης κατάστασης στην ασύρματη διεπαφή ενώ κάθε δεδομένο υπό τη μορφή byte ή word στέλνεται από τον πυρήνα στην μονάδα διατηρώντας την εκάστοτε μορφή.

Η διεπαφή της ασύρματης μονάδας των interrupts περιλαμβάνει έναν αριθμό από flags με τα οποία ελέγχει τη ροή των δεδομένων μεταξύ του πυρήνα και του μικροεπεξεργαστή.

Η ευθύνη του πυρήνα είναι να παρέχει τα σήματα interrupt στην ασύρματη μονάδα διαχείρισης. Για την υλοποίηση της αποστολής υπάρχουν τρία προγραμματιζόμενα σήματα εξόδου GDO0, GDO1, και GDO2 τα οποία μπορούν να δρομολογηθούν σε ακροδέκτες. Για

κάθε σήμα interrupt υπάρχει ένα σχετικό flag RFIFGx, μαζί με έναν καταχωρητή ενεργοποίησης RFIEx, έναν καταχωρητή επιλογής της ακμής του σήματος RFIESx και έναν καταχωρητή εισόδου που επιτρέπει την ανάκτηση της κατάστασης του σήματος με την μορφή ερώτησης.

Τα interrupts flags του πυρήνα (Πίνακας 4-4) έχουν ιεραρχηθεί ανάλογα με την προτεραιότητα τους και έχουν συνδυαστεί ώστε να συνθέτουν ένα διάνυσμα σε συνδυασμό με τα interrupts της διεπαφής. Ο καταχωρητής του διανύσματος RF1AIV χρησιμοποιείται για να εξακριβωθεί πιο flag του πυρήνα προκάλεσε interrupt. Το ενεργοποιημένο interrupt με την υψηλότερη προτεραιότητα δημιουργεί έναν αριθμό στον καταχωρητή RF1AIV ο οποίος μπορεί να αξιολογηθεί ή να προστεθεί στον μετρητή του προγράμματος για εισέλθει στην κατάλληλη ρουτίνα.

Πίνακας 4-4. Interrupts flags της ασύρματης μονάδας και η συνθήκη ενεργοποίησής τους.

Interrupt Flag	Συνθήκη
RFINSTRIFG	Επόμενη εντολή
RFDINIFG	Έτοιμα Data
RFSTATIFG	Ενημέρωση κατάστασης
RFDOUTIFG	Τα data μπορούν να διαβαστούν
RFERRIFG	Error

Η πρόσβαση της ασύρματης μονάδα στον πυρήνα μέσω του πίνακα των interrupts γίνεται με τις ακόλουθες μεθόδους καθώς και με συνδυασμό τους:

- Απευθείας πρόσβαση στους καταχωρητές της διεπαφής

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην υλοποιημένη καθυστέρηση η οποία μπορεί να προκαλέσει την αδράνεια του επεξεργαστή μέχρι και 16 κύκλους. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι υπάρχει άμεση πρόσβαση και απαιτεί και τον λιγότερο κώδικα υλοποίησης. Το μειονέκτημα της είναι ότι στην χειρότερη περίπτωση η καθυστέρηση εξυπηρέτησης του interrupt ανέρχεται στους 16 κύκλους.

- Συνεχόμενη ανίχνευση αλλαγών (polling) στα flags της διεπαφής των interrupts

Τα interrupt flags ελέγχονται συνεχώς πριν γίνει η πρόσβαση στους καταχωρητές της διεπαφής. Αυτή η μέθοδος δεν προσθέτει καθυστέρηση καθώς ελέγχοντας το περιεχόμενο του flag δεν απαιτεί την αδρανοποίηση του επεξεργαστή. Το μειονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι η συνεχόμενη ανίχνευση πρέπει να γίνεται πάντα πριν την πρόσβαση στους καταχωρητές.

- Χρησιμοποίηση των interrupts της διεπαφής

Η συγκεκριμένη μέθοδος αντί, για συνεχόμενη ανίχνευση και έλεγχο του περιεχομένου των flags, πραγματοποιεί την πρόσβαση στους καταχωρητές μέσω της ρουτίνας εξυπηρέτησης των interrupts της διεπαφής. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση που όλα τα interrupts του διαχειριστή είναι απενεργοποιημένα, και ένας καταχωρητής του interrupt πρέπει να γραφεί, ένας καταχωρητής εντολής θα γράψει την εντολή σε μία global μεταβλητή η οποία μπορεί να διαβαστεί από την ρουτίνα εξυπηρέτησης και θα ενεργοποιήσει το αντίστοιχο interrupt μέσω του καταχωρητή RFINSTRIE = 1. Μέσα στη ρουτίνα εξυπηρέτησης, ένας καταχωρητής εντολής ελέγχει αν το flag RFINSTRIFG πήρε τιμή και φορτώνει τον καταχωρητή RFAINSTRB με την τιμή που έχει αποθηκευτεί στη global μεταβλητή.

Η μέθοδος αυτή όπως και η προηγούμενη δεν προσθέτει καθυστέρηση στα interrupts και αποφεύγεται η χρήση του συνεχόμενου ελέγχου. Η μόνη δυσκολία έγκειται στο ότι η υλοποίηση της ρουτίνας εξυπηρέτησης είναι τεχνικά απαιτητική.

Για την αποστολή των δεδομένων μέσω της ασύρματης επικοινωνίας του CC430, υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι, μία μέθοδος που περιλαμβάνει την αποστολή πακέτων και μία που υποστηρίζει την συνεχόμενη ροή δεδομένων. Τα πακέτα αποστέλλονται ή λαμβάνονται μέσω μίας λίστας First In First Out (FIFO) μεγέθους 64 bytes. Οι διαφορετικές μέθοδοι ανταλλαγής δεδομένων έχουν αντίστοιχα και διαφορετικές μεθόδους χειρισμού των δεδομένων

Για τη μέθοδο των πακέτων διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- Το μέγεθος του πακέτου είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος της FIFO λίστας.
- Το μέγεθος του πακέτου είναι μικρότερο από το μέγεθος της FIFO λίστας.

Κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις χωρίζονται στις περιπτώσεις χειρισμού σταθερού και μεταβλητού μήκους πακέτου δεδομένων.

Για την συνεχόμενη ροή δεδομένων υποστηρίζονται:

- Σύγχρονη επικοινωνία
- Ασύγχρονη επικοινωνία

Η ασύρματη μονάδα του επεξεργαστή έχει ενσωματωμένο φυσικό μηχανισμό που υποστηρίζει τα ασύρματα πρωτόκολλα επικοινωνίας που υλοποιούνται με πακέτα δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, σε κατάσταση εκπομπής ο διαχειριστής του πακέτου δεδομένων μπορεί να παραμετροποιηθεί ώστε να προσθέσει τα παρακάτω στοιχεία στο πακέτο που είναι αποθηκευμένο στην FIFO λίστα.

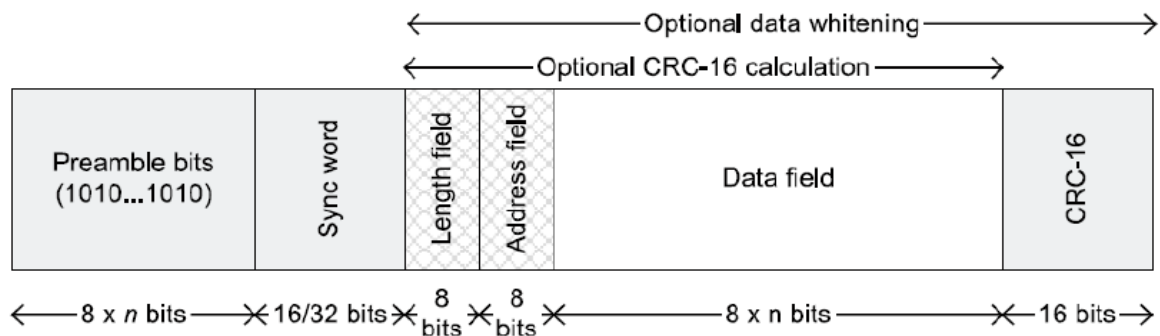
- Έναν αριθμό προγραμματιζόμενων bytes εισαγωγής
- Ένα word συγχρονισμού μεγέθους 2 byte. Προτείνεται η δημιουργία διπλότυπου ώστε το συνολικό μέγεθος να ανέλθει στα 4 byte. Προϋπόθεση για τη εισαγωγή bytes εισαγωγής και συγχρονισμού είναι η χρήση και των δύο στοιχείων στο πακέτο.
- Ένα αποτέλεσμα ελέγχου CRC (Cyclic Redundancy Check) κατά μήκος του πεδίου δεδομένων

Σε κατάσταση λήψης ο διαχειριστής πακέτων διαχειρίζεται την λαμβανόμενη πληροφορία υλοποιώντας τα παρακάτω (Σχήμα 4-6):

- Ανίχνευση bytes εισαγωγής
- Ανίχνευση word συγχρονισμού
- Υπολογισμός του CRC και έλεγχός του
- Έλεγχος του byte διεύθυνσης
- Έλεγχος του μήκους του πακέτου

- Μηχανισμός dewatering.

Σε πραγματικές συνθήκες τα δεδομένα που ανταλλάσσονται με ασύρματες μεθόδους περιέχουν μακριές ακολουθίες από άσσους και μηδενικά. Για να βελτιωθεί η απόδοση του πομποδέκτη όλα τα δεδομένα εκτός από τα δύο πρώτα στοιχεία του πακέτου περνάνε από μία πύλη XOR με μία 9-bit τυχαία ακολουθία ώστε να αντικατασταθούν μακριές ακολουθίες μηδενικών με το 1. Αυτό εκτελείται και πριν αποσταλούν αλλά και κατά τη λήψη. Με αυτόν τον τρόπο μόνο τα αρχικά χρήσιμα δεδομένα εμφανίζονται στον δέκτη. Η συγκεκριμένη δυνατότητα ενεργοποιείται μέσω του καταχωρητή PKTCTRL0.WHITE_DATA = 1.



Σχήμα 4-6. Η μορφή του πακέτου της ασύρματης επικοινωνίας.

Η ασύρματη μονάδα υποστηρίζει πρωτόκολλα πακέτων δυναμικού και σταθερού μήκους, μεγέθους έως 255 bytes. Για πακέτα μεγέθους μεγαλύτερο από τα 255 bytes χρησιμοποιείται η κατάσταση πακέτων απείρου μήκους. Η κατάσταση για πακέτα σταθερού, δυναμικού και άπειρου μήκους επιλέγεται ρυθμίζοντας την τιμή του καταχωρητή PKTCTRL0.LENGTH_CONFIG ίση με την τιμή 0,1,2 αντίστοιχα.

Συμπερασματικά, για τη ρύθμιση της μορφής και του μεγέθους του πακέτου εγγράφουμε τους καταχωρητές

- PKTCTRL0: Τιμή ίση με (0x04) που αντιστοιχεί στην τιμή (0x00) για τα bits LENGTH_CONFIG, τα οποία ρυθμίζουν το σταθερό μήκος του πακέτου που επιλέγουμε για την επικοινωνία. Παράλληλα, ενεργοποιείται και ο έλεγχος CRC, μέσω του αντίστοιχου bits, έτσι ώστε να μπορούμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα λήψης και αποστολής του πακέτου.
- PKTLEN: Εγγράφουμε το μήκος που θέλουμε να έχουν τα σταθερά πακέτα που θα ανταλλάσσονται κατά την επικοινωνία. Επιλέγουμε μέγεθος 16 bytes. Αυτό δεν είναι απαραίτητο να αφορά όλα τα πακέτα, αλλά ένα μέγιστο αριθμό που μπορεί να μεταφερθεί κατά την επικοινωνία. Με τις κατάλληλες συναρτήσεις στο λογισμικό, δημιουργούμε τα συγκεκριμένα πακέτα σύμφωνα με το πρωτόκολλο επικοινωνίας που έχουμε δημιουργήσει.

Οι συγκεκριμένες ρυθμίσεις είναι απαραίτητο να γίνουν τόσο στον πομπό, όσο και στο δέκτη, δηλαδή και στην κύρια και σε κάθε περιφερειακή συσκευή του συστήματός μας. Με τον τρόπο αυτό, ρυθμίζεται ένα κοινό πρωτόκολλο σε επίπεδο λογισμικού της επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου, ώστε ο πυρήνας CC1101 να επεξεργάζεται τα σήματα με τον ίδιο τρόπο.

Έπειτα από τις γενικές ρυθμίσεις του πρωτοκόλλου χαμηλού επιπέδου και στις δύο συσκευές (κύρια και περιφερειακή), ακολουθεί η υλοποίηση του σε επίπεδο λογισμικού. Για την υλοποίηση της σε επίπεδο χαμηλού επιπέδου λογισμικού θα χρησιμοποιήσουμε την

ρουτίνα του Interrupt που χρησιμοποιείται για την προσπέλαση των buffers λήψης των δεδομένων. Στη βασική λειτουργία ο μικροελεγκτής βρίσκεται στην κατάσταση λήψης δεδομένων από την κύρια συσκευή. Μόλις έρθει ένα σήμα ενεργοποιείται το RFIG9 bit του καταχωρητή και ο χειρισμός του πακέτου γίνεται μέσα στην ρουτίνα του interrupt. Τα δεδομένα που περιμένουμε είναι δεδομένα κινητήρων. Με τον τρόπο αυτό και σύμφωνα με το πρωτόκολλο που έχουμε ορίσει, γίνεται ο χειρισμός των δεδομένων.

- Διαβάζεται η λίστα RXFIFO και εισάγονται τα δεδομένα σε έναν Buffer ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν.
- Γίνεται έλεγχος του CRC bit, έτσι ώστε να εξακριβώσουμε ότι το πακέτο των δεδομένων έχει ληφθεί ορθά και είναι αναγνώσιμο (Σχήμα 4-6). Αυτό γίνεται με τον έλεγχο του bit 7 του πρώτου byte, από το πακέτο των δύο bytes που αντιστοιχεί στον CRC έλεγχο.
- Γίνεται έλεγχος του ID. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να φιλτράρουμε σήματα τα οποία δεν θέλουμε να εισέρχονται ή σε μελλοντικό χρόνο να γίνει χειρισμό ανάλογα με το ID των διαφόρων συσκευών, σε περίπτωση που είναι αναγκαία η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των μικρορομπότ.
- Γίνεται χειρισμός του πακέτου. Τα δεδομένα που έχουν ληφθεί και αντιγραφεί στον RxBuffer, ελέγχονται ως προς το 5^ο byte που αφορά το είδος της κίνησης που θα κάνει.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται στην πλευρά της κύριας συσκευής. Ακολουθούνται τα ίδια βήματα που αφορούν τον έλεγχο των πακέτων και την αντιγραφή των δεδομένων στον Buffer. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο, γίνεται χειρισμός των δεδομένων, ελέγχοντας το κατάλληλο byte για το είδος της μέτρησης που έχει ληφθεί (στροφές κινητήρων, θέση ρομπότ). Με τη λήψη της τιμής γίνεται σειριακή αποστολή δεδομένων στον υπολογιστή, για επεξεργασία ή αποθήκευση των τιμών.

Στην πλευρά της περιφερειακής συσκευής η αποστολή των δεδομένων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

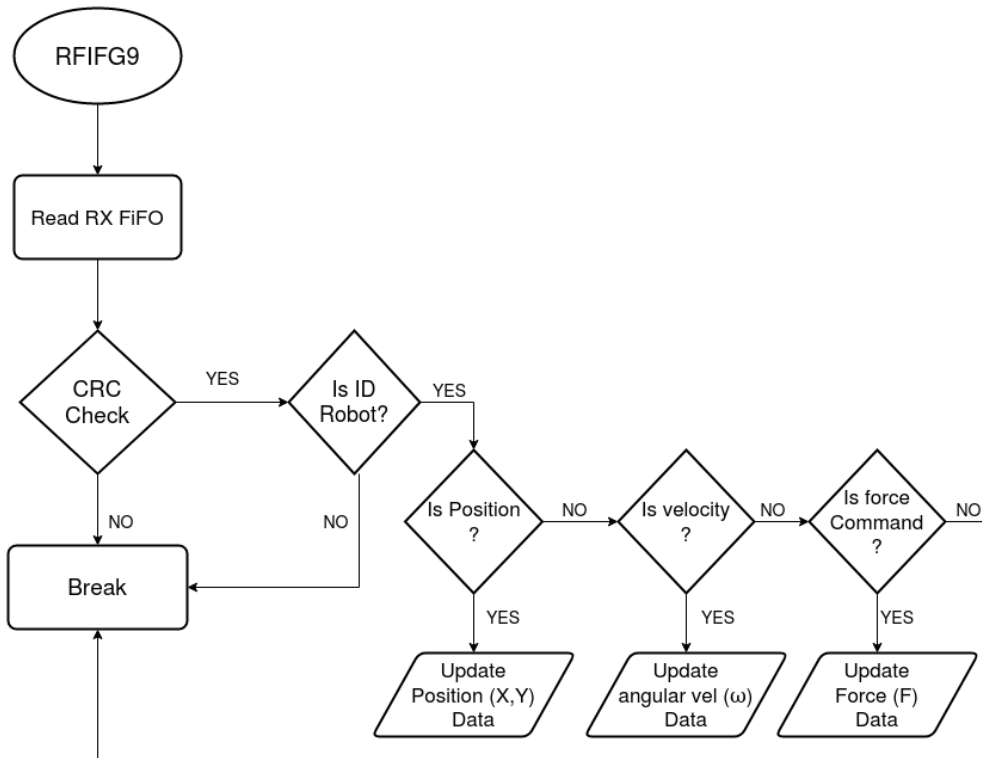
- Η κύρια συσκευή ζητάει κάθε φορά τα δεδομένα που θέλει από την περιφερειακή για τους αισθητήρες
- Η περιφερειακή συσκευή συνεχώς στέλνει δεδομένα στην κύρια συσκευή.

Η πρώτη περίπτωση έχει υλοποιηθεί στην εργασία [17] σε επίπεδο αποστολής ID. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η δεύτερη υλοποίηση έτσι ώστε να έχουμε συνεχή ροή δεδομένων από τα μικρορομπότ.

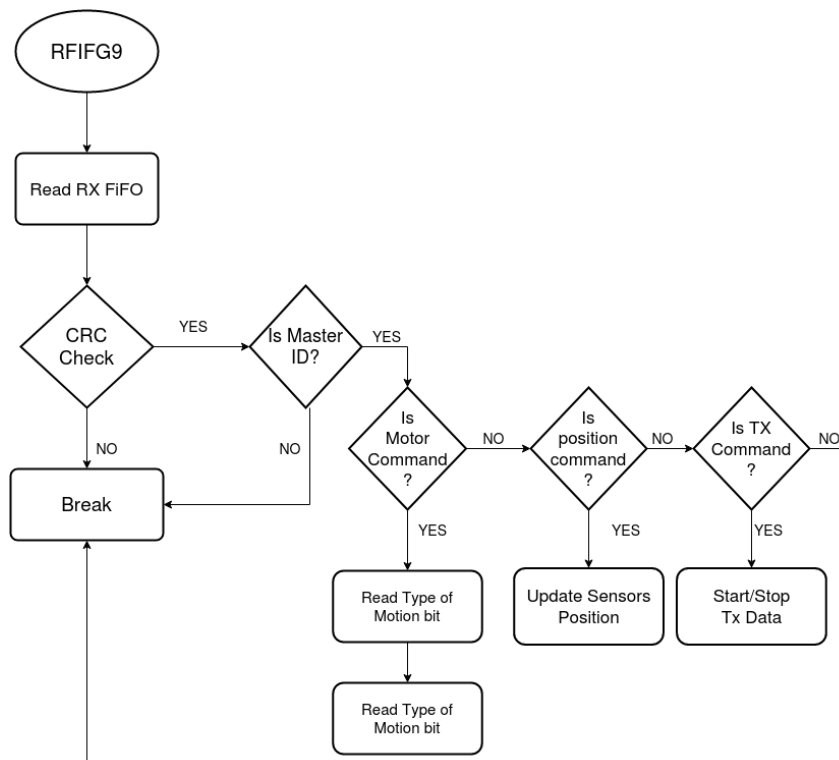
Στην περίπτωση της αποστολής των ρομπότ, ορίζεται μία συχνότητα αποστολής των δεδομένων. Αυτό γίνεται έτσι ώστε να μην υπάρχει σύγκρουση μεταξύ της διαδικασίας αποστολής και της διαδικασίας λήψης των δεδομένων, λόγω του γεγονότος ότι και οι δύο διαδικασίες μοιράζονται κοινή ρουτίνα interrupt.

Στην περίπτωση της κύριας συσκευής, η αποστολή των δεδομένων γίνεται μόλις ο αλγόριθμος ελέγχου έχει εξάγει το αποτέλεσμα των επιθυμητών στροφών του κινητήρα για το μικρορομπότ. Η επικοινωνία μεταξύ του υπολογιστή και της κύριας συσκευής γίνεται σειριακά, οπότε αποστολή δεδομένων έχουμε μόνο στην περίπτωση που ενεργοποιείται το interrupt της σειριακής επικοινωνίας.

Τα λογικά διαγράμματα του χειρισμού του πακέτου της επικοινωνίας τόσο στην κύρια συσκευή, όσο και στο μικρορομπότ φαίνονται στο Σχήμα 4-7 και Σχήμα 4-8.



Σχήμα 4-7. Λογικό διάγραμμα χειρισμού του πακέτου της ασύρματης επικοινωνίας, για την κύρια συσκευή.



Σχήμα 4-8. Λογικό διάγραμμα χειρισμού του πακέτου της ασύρματης επικοινωνίας για το μικρορομπότ.

5 Εντοπισμός θέσης με αισθητήρες laser

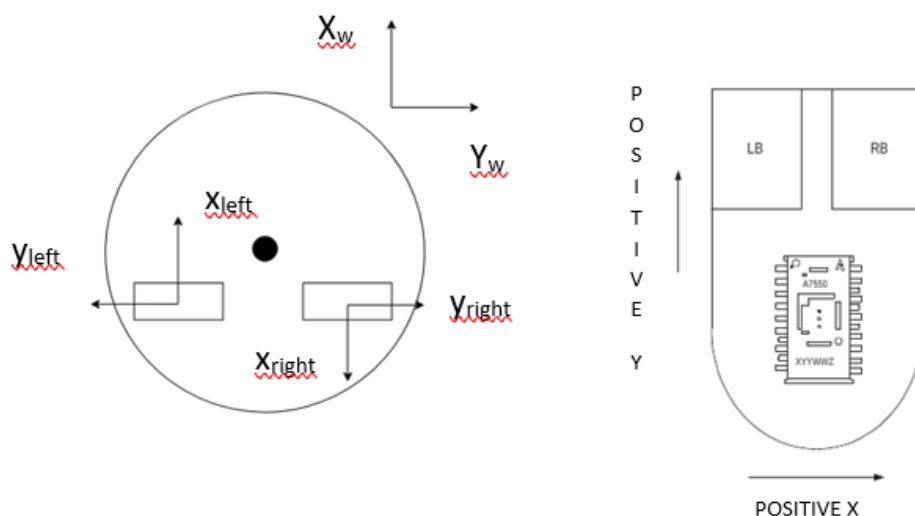
5.1 Συστήματα συντεταγμένων

Για την ανάπτυξη του συστήματος εντοπισμού θέσης του ρομπότ, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του συστήματος συντεταγμένων. Τα βασικά συστήματα συντεταγμένων που υπάρχουν στο προς μελέτη σύστημα είναι τα εξής

- Το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων
- Το σύστημα συντεταγμένων του ρομπότ
- Το σύστημα συντεταγμένων των αισθητήρων

Ο προσδιορισμός της θέσης του ρομπότ γίνεται σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων. Για να μπορούμε να μπορούμε να γνωρίζουμε όμως κάθε στιγμή τη θέση του, δηλαδή τις συντεταγμένες κατά τον άξονα x και y καθώς και τον προσανατολισμό του ρομπότ, είναι απαραίτητο να βρεθούν οι σχέσεις που συνδέουν το σύστημα συντεταγμένων των αισθητήρων με το σύστημα συντεταγμένων του ρομπότ και στη συνέχεια να περάσουμε στο παγκόσμιο σύστημα. Για να γίνει αυτό είναι απαραίτητη η τοποθέτηση των αισθητήρων σε γνωστά σημεία πάνω στο ρομπότ, οι αποστάσεις μεταξύ τους καθώς και η τοποθέτηση των αξόνων του σωματόδετου συστήματος συντεταγμένων.

Κάθε αισθητήρας έχει προσαρμοσμένο πάνω του ένα σύστημα συντεταγμένων. Καθώς ο αισθητήρας κινείται στο χώρο, μαζί με το ρομπότ εφόσον είναι τοποθετημένος σε σταθερή θέση, κινείται μαζί και το σύστημα συντεταγμένων. Κάθε χρονική στιγμή δειγματοληψίας, από τον αισθητήρα θέσης μέσω των διαδικασιών που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3, παίρνουμε σαν αποτέλεσμα της επεξεργασίας του δύο τιμές που αντιστοιχούν στην σχετική μετατόπισή του (σε σχέση με την προηγούμενη θέση), κατά τον άξονα x και τον άξονα y . Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε counts του αισθητήρα. Η τοποθέτηση των αισθητήρων στο σώμα του ρομπότ έχει γίνει σύμφωνα με το Σχήμα 5-1. Σύμφωνα με το datasheet των αισθητήρων [28], τοποθετείται και το σύστημα συντεταγμένων των αισθητήρων.



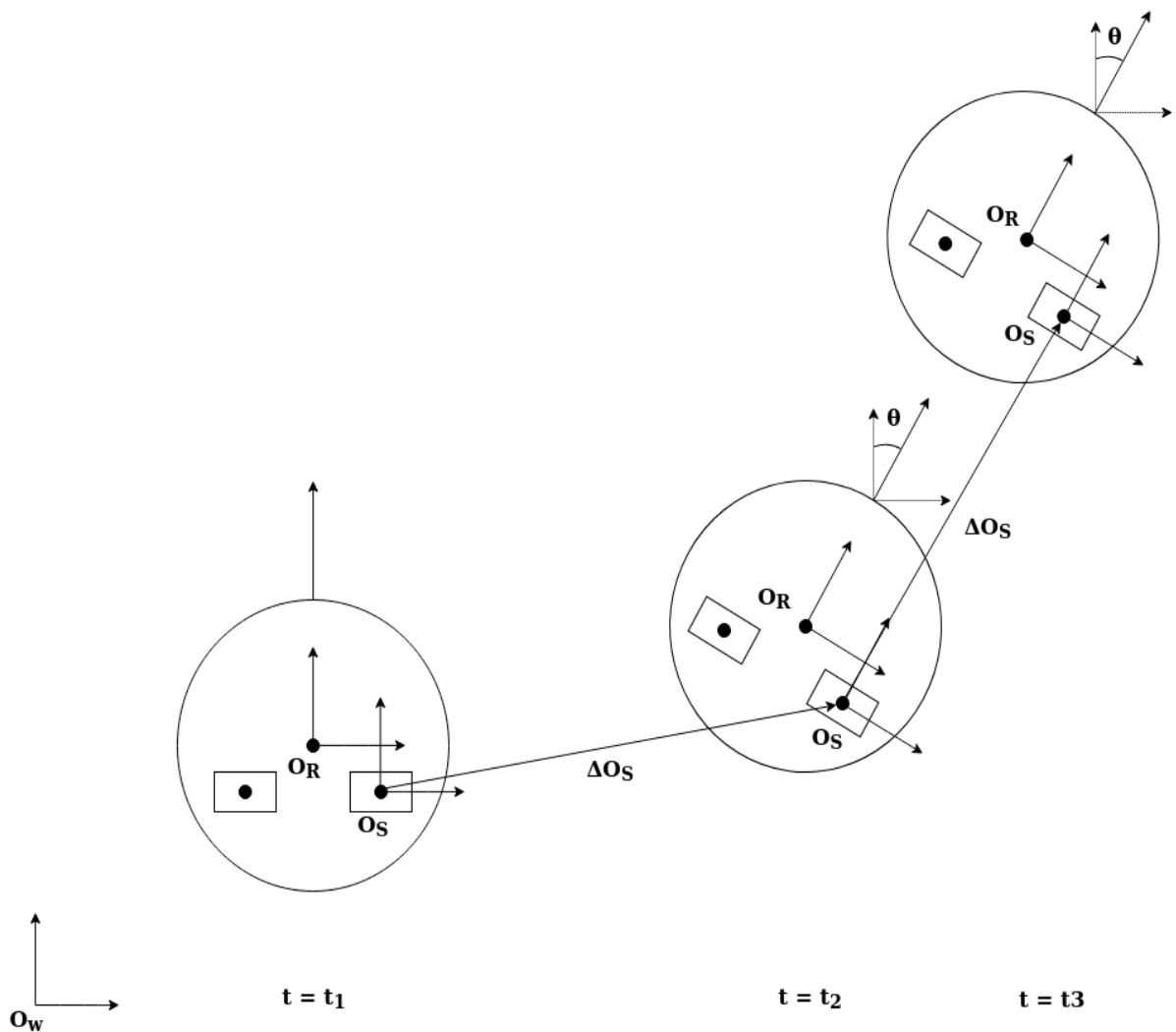
Σχήμα 5-1. Το σωματόδετο ΣΣ των οπτικών αισθητήρων.

Όπως φαίνεται, καθώς γίνεται η ανάγνωση των τιμών των 2 αισθητήρων, δηλαδή των συντεταγμένων (x_{left}, y_{left}) και (x_{right}, y_{right}) , πρέπει να γίνει η μετατροπή των τιμών σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων (x', y') έτσι ώστε να είναι δυνατή η μετατροπή τους στο σύστημα του ρομπότ. Από το Σχήμα 5-1 προκύπτει ότι πρέπει να αντιστρέψουμε τις συντεταγμένες x'_{right} και y'_{left}

$$x'_{right} = -x_{right} \quad (5-1)$$

$$y'_{left} = -y_{left} \quad (5-2)$$

Στη συνέχεια πρέπει να εκφράσουμε την θέση των αισθητήρων ως προς το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων. Θα στηριχτούμε στο γεγονός ότι οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε συγκεκριμένες και γνωστές θέσεις πάνω στην πλακέτα της ρομποτικής πλατφόρμας.



Σχήμα 5-2. Συστήματα συντεταγμένων του ρομπότ.

Οι απεικονίσεις των συστημάτων είναι:

- O_R : Η θέση του ρομπότ (ενός συγκεκριμένου σημείου) ως προς το αδρανειακό ΣΣ
- O_s : Η θέση του αισθητήρα θέσης ως προς το αδρανειακό ΣΣ
- O_w : Το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων
- ΔO_s : Η μετατόπιση του αισθητήρα ως προς το αδρανειακό ΣΣ
- ΔO_s^s : Η μετατόπιση του αισθητήρα ως προς το ΣΣ του αισθητήρα
- ΔO_R : Η μετατόπιση του ρομπότ ως προς το αδρανειακό ΣΣ
- θ : Η γωνία που σχηματίζει το ΣΣ O_R σε σχέση με το αδρανειακό ΣΣ.

Εάν το ρομπότ δεν αλλάζει τον προσανατολισμό του, είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε τη θέση του ρομπότ αθροίζοντας τα αποτελέσματα των δεδομένων των αισθητήρων, δηλαδή το ΔO_s και εξάγοντας μετά με βάση την τοποθέτηση των σταθερών αισθητήρων, οποιοδήποτε σημείο του ρομπότ.

Όμως η ρομποτική πλατφόρμα αλλάζει προσανατολισμό κατά τη διάρκεια της κίνησης (Σχήμα 5-2). Συνεπώς, μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών οι αισθητήρες μας δίνουν τη σχετική κίνηση μεταξύ τους. Σε μία τρίτη χρονική στιγμή, ο αισθητήρας θα μας δώσει πάλι τη σχετική μετατόπιση. Έχοντας όμως αλλάξει προσανατολισμό κατά γωνία θ , αν δεν εκφραστεί η μετατόπιση αυτή ως προς το αδρανειακό ΣΣ το αποτέλεσμα θα είναι λανθασμένο.

Στο ίδιο σχήμα έχουν αποτυπωθεί τα συστήματα συντεταγμένων, οι μετατοπίσεις και η θέση του αισθητήρα. Για λόγους απλούστευσης, παρίσταται μόνο ο ένας αισθητήρας, παρόλα αυτά η ίδια ακριβώς ανάλυση ισχύει και για τον δεύτερο ή για οποιονδήποτε άλλον τυχόν τοποθετηθεί στο σώμα του ρομπότ σε μία γενικότερη περίπτωση.

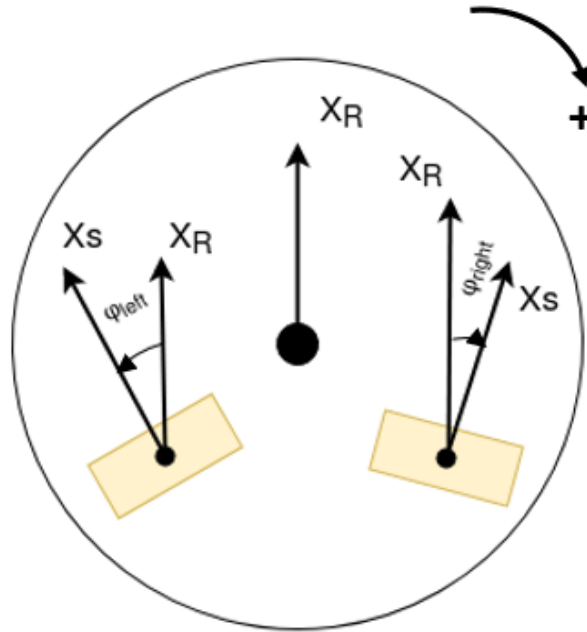
Για να εκφραστεί η μετατόπιση του του αισθητήρα ως προς το αδρανειακό ΣΣ, πρέπει να πολλαπλασιαστεί το διάνυσμα της μετατόπισης με τον πίνακα περιστροφής του ρομπότ ως προς τη γωνία που βρισκόταν την προηγούμενη χρονική στιγμή.

Με κάθε επανάληψη i του αλγορίθμου είναι γνωστή η προηγούμενη θέση του κάθε αισθητήρα, $O_{s(i-1)}$, ως προς το αδρανειακό σύστημα, αθροίζοντας τις νέες μετατοπίσεις ΔO_s , βρίσκεται η θέση του αισθητήρα ως προς το αδρανειακό. Συνεπώς, κάθε φορά με κάθε δειγματοληψία του λογισμικού η θέση του κάθε αισθητήρα βρίσκεται μέσω του πίνακα περιστροφής R_s κατά γωνία θ_{i-1} , δηλαδή την γωνία που έχει περιστραφεί η πλατφόρμα του ρομπότ τη χρονική στιγμή $(i-1)$.

$$\Delta O_{s(i)} = R_s(\theta_{i-1}) \cdot \Delta O_{s(i)}^s \Rightarrow \quad (5-3)$$

$$\Delta O_{s(i)} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{i-1}) & -\sin(\theta_{i-1}) \\ \sin(\theta_{i-1}) & \cos(\theta_{i-1}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_{s(i)}^s \\ \Delta y_{s(i)}^s \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

Εκτός από τη γωνία περιστροφής θ του ΣΣ, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η γωνία που σχηματίζει ο οπτικός αισθητήρας με τον άξονα προσανατολισμού του ρομπότ (Σχήμα 5-3).



Σχήμα 5-3. Αναπαράσταση της γωνίας ρομπότ-αισθητήρα.

Η τοποθέτηση των αισθητήρων στην πλακέτα, έγινε έτσι ώστε να είναι μηδενική η γωνία φ και για τους δύο αισθητήρες. Παρόλα αυτά, στην τοποθέτηση είναι δυνατόν να υπήρξαν λάθη τα οποία δημιουργούν μία γωνία μεταξύ των αισθητήρων. Εκτός αυτού του γεγονότος είναι απαραίτητο να συνυπολογιστεί η γωνία φ στις εξισώσεις υπολογισμού, έτσι ώστε να καλύπτουν τη γενικότερη περίπτωση. Με αυτά τα δεδομένα η Εξίσωση (5-4), μετατρέπεται στην παρακάτω η οποία συμπεριλαμβάνει τα παραπάνω συμπεράσματα:

$$\Delta O_{s(i)} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{i-1} + \varphi) & -\sin(\theta_{i-1} + \varphi) \\ \sin(\theta_{i-1} + \varphi) & \cos(\theta_{i-1} + \varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_{s(i)}^s \\ \Delta y_{s(i)}^s \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

Η παραπάνω ανάλυση μας δίνει τη θέση του αισθητήρα κάθε φορά με δεδομένο μηδενικό αρχικό διάνυσμα θέσης, δηλαδή τη μετατόπιση του ως προς την αρχική του θέση. Για τον προσδιορισμό της θέσης στο απόλυτο σύστημα ($O_{s(i)}$), πρέπει να ορίσουμε μία αρχική θέση για κάθε αισθητήρα και στη συνέχεια η κάθε μετατόπιση να προστίθεται στο αρχικό διάνυσμα.

$$O_{s(i)} = \Delta O_{s(i)} + O_{s(i-1)} \quad (5-6)$$

Σε αυτό μας βοηθάει η σταθερή θέση του αισθητήρα πάνω στο σώμα του ρομπότ, επομένως είναι εύκολο να ορίσουμε από πριν τις αρχικές συντεταγμένες. Το αρνητικό της διαδικασίας μέτρησης με αυτόν τον τρόπο, είναι ότι για να βρούμε τη θέση ως προς το αδρανειακό είναι απαραίτητο να τοποθετήσουμε το ρομπότ σε μία γνωστή αρχική θέση την οποία θα θεωρούμε σαν μηδενική.

Έχοντας εκφράσει την θέση των αισθητήρων ως προς το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων, πρέπει στη συνέχεια να μεταφερθεί και η θέση του ρομπότ ως προς το ίδιο σύστημα. Για να βρούμε αυτό θα στηριχτούμε στην τοποθέτηση των αισθητήρων σε ένα

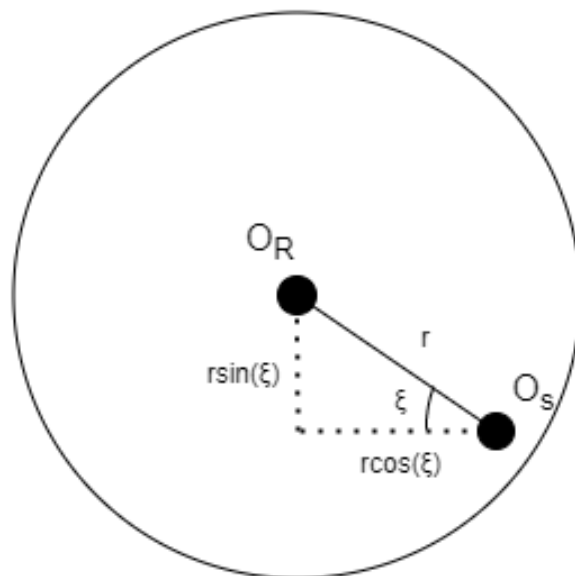
γνωστό σημείο της πλακέτας του ρομπότ. Επομένως η θέση οποιοδήποτε σταθερού σημείου του ρομπότ (O_R) ως προς έναν αισθητήρα μέτρησης εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$O_R = O_S - R_S(\theta)O_S^R \quad (5-7)$$

Με το διάνυσμα O_S^R να αντιπροσωπεύει τον σταθερό μετασχηματισμό από το Σ_S του αισθητήρα στο Σ_S του ρομπότ και εκφράζεται από τη σχέση :

$$O_S^R = [r \cos(\xi), r \sin(\xi)] \quad (5-8)$$

όπου ξ είναι η γωνία που σχηματίζει το σημείο της θέσης του αισθητήρα με το σταθερό σημείο του ρομπότ και r η μεταξύ τους απόσταση (Σχήμα 5-4).

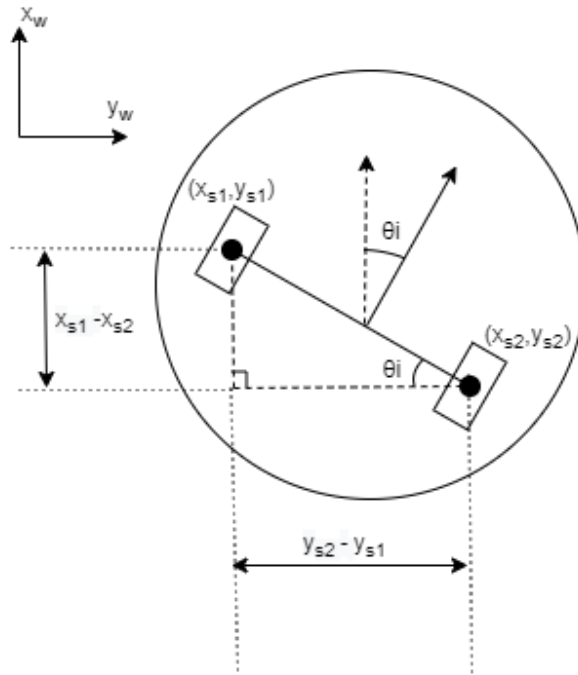


Σχήμα 5-4. Εύρεση θέσης σημείου ρομπότ ως προς τη θέση του αισθητήρα.

5.2 Εύρεση προσανατολισμού

Για την εύρεση του προσανατολισμού του ρομπότ θα στηριχτούμε στις μετρήσεις που έχουμε από τους δύο αισθητήρες. Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση είναι δυνατόν να γνωρίζουμε την θέση (x_s, y_s) του κάθε αισθητήρα ως προς αδρανειακό Σ_S . Επομένως, η γωνία που σχηματίζουν οι δύο αισθητήρες σε σχέση με την αρχική γωνία προσανατολισμού (αδρανειακό Σ_S), προκύπτει ως εξής (Σχήμα 5-5):

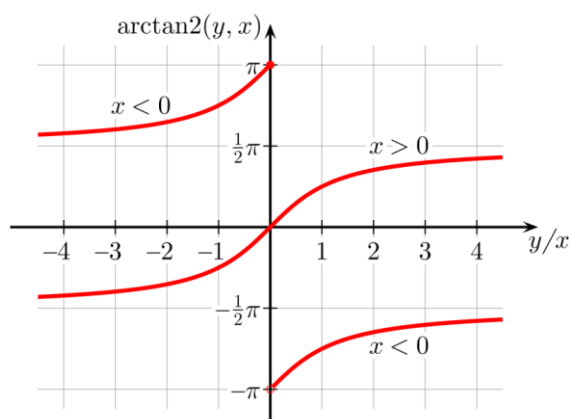
$$\theta_i = \text{atan2}(x_{s1,i} - x_{s2,i}, y_{s2,i} - y_{s1,i}) \quad (5-9)$$



Σχήμα 5-5. Υπολογισμός της γωνίας προσανατολισμού μέσω της atan2.

Συνεπώς, θεωρώντας αρχικό προσανατολισμό γωνίας θ_0 , μπορούμε να βρούμε τον προσανατολισμό του ρομπότ κάθε χρονική στιγμή. Με αυτό τον τρόπο υπολογισμού προκύπτει ένα πρόβλημα, όσον αφορά τον υπολογισμό της γωνίας με τη χρήση της συνάρτησης atan2 , η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντίστροφης εφαπτομένης των δύο μεταβλητών $x_{s,i}, y_{s,i}$. Όμως, ο υπολογισμός της γωνίας με τη χρήση της συνάρτησης έχει μία ασυνέχεια (Σχήμα 5-6), στις γωνίες π και $-\pi$ rad.

Συνεπώς κάθε φορά που η γωνία πλησιάζει τις π ή $-\pi$ μοίρες, πρέπει αυτή να μετατρέπεται ο υπολογισμός στο διάστημα $[0, 2\pi)$.



Σχήμα 5-6. Αναπαράσταση της atan2

Για να μην χρειαστεί να γίνει αυτό μπορεί να υπολογίζεται σε κάθε δειγματοληψία η διαφορά της γωνίας σε σχέση με την προηγούμενη τιμή και η συνολική τους άθροιση, δηλαδή

$$\Delta\theta = \theta_i - \theta_{i-1} \quad (5-10)$$

Με τον τρόπο, εξάγουμε τον προσανατολισμό του ρομπότ (σε σχέση, πάντα, με τον αρχικό) μόνο από τις μετρήσεις που μας δίνουν οι αισθητήρες ποντικιών. Από το Σχήμα 5-7 προκύπτει ότι :

$$\Delta\theta = \text{atan2}(x_l - x_r, y') \quad (5-11)$$

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό γεωμετρικά

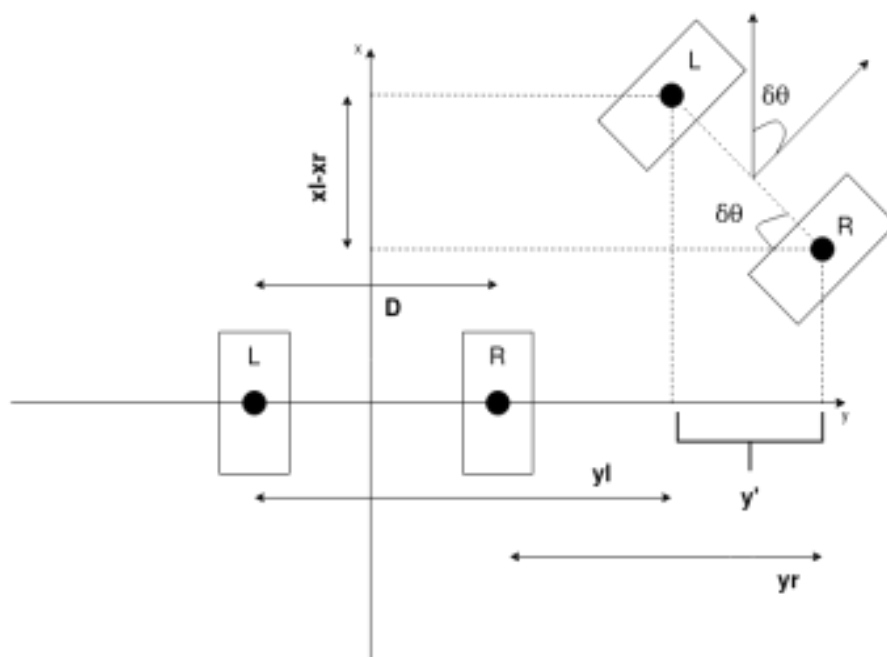
$$y' = D + y_r - y_l \quad (5-12)$$

Εν τέλει, η μεταβολή της γωνίας εξάγεται ως:

$$\Delta\theta = \text{atan2}(\Delta x_l - \Delta x_r, D + \Delta y_r - \Delta y_l) \quad (5-13)$$

Τον προσανατολισμό τον βρίσκουμε τελικά προσθέτοντας τη διαφορά της

$$\theta_i = \Delta\theta + \theta_{i-1} \quad (5-14)$$

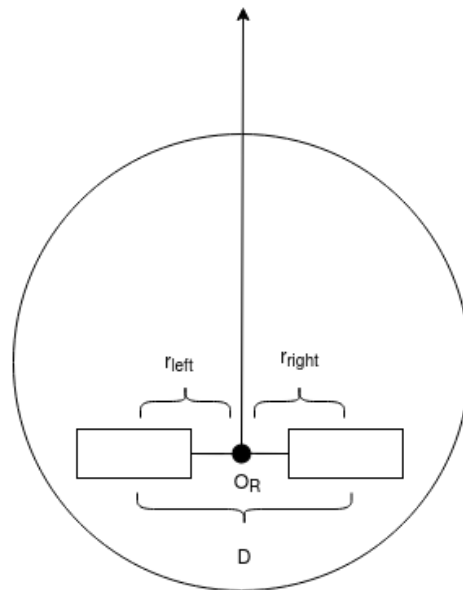


Σχήμα 5-7. Γεωμετρικός υπολογισμός της γωνίας.

5.3 Υπολογισμός θέσης τελικού σημείου δράσης

Για τον προσδιορισμό της θέσης του μικρορομπότ σε κάθε χρονική στιγμή στο αδρανειακό ΣΣ, πρέπει να προσδιορίσουμε το σημείο του ρομπότ στο οποίο θα παίρνουμε τις μετρήσεις.

Η πιο απλή περίπτωση είναι να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμό θέσης στο μέσο της ευθείας που ενώνει τους δύο αισθητήρες (Σχήμα 5-8).



Σχήμα 5-8. Επιλογή σημείο O_R .

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν παραπάνω, μπορούμε να πάρουμε την θέση του ρομπότ O_R , με συντεταγμένες (X_R, Y_R) από τις τιμές που δίνει ο κάθε αισθητήρας, δηλαδή (X_{sleft}, Y_{sleft}) για αυτόν που βρίσκεται στα αριστερά και (X_{sright}, Y_{sright}) για τον αισθητήρα που βρίσκεται στα δεξιά.

$$X_R = X_{sleft} - r_{left} \sin(\theta + \xi_{left}) \quad (5-15)$$

$$Y_R = Y_{sleft} + r_{left} \cos(\theta + \xi_{left}) \quad (5-16)$$

$$X_R = X_{sright} + r_{right} \sin(\theta + \xi_{right}) \quad (5-17)$$

$$Y_R = Y_{sright} - r_{right} \cos(\theta + \xi_{right}) \quad (5-18)$$

όπου ξ , η γωνία που σχηματίζει κάθε αισθητήρα με το σημείο O_R .

Για την χρήση και των δύο αισθητήρων, χρησιμοποιώντας τον μέσο όρο των τιμών που μας δίνουν οι εξισώσεις από τις τιμές των δύο αισθητήρων μπορούμε να εξάγουμε σύμφωνα με τις σχέσεις (5-19) και (5-20). Λόγω της τοποθέτησης των αισθητήρων με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε $\xi_{right} = \xi_{left} \approx 0$, θεωρούμε ότι $\xi_{right} = \xi_{left} = 0$. Συνεπώς, έχουμε τις συντεταγμένες του σημείου $O_R (X_R, Y_R)$ ως

$$X_R = \frac{X_{sleft} + X_{sright}}{2} \quad (5-19)$$

$$Y_R = \frac{Y_{sleft} + Y_{sright}}{2} \quad (5-20)$$

Όπως συμπεραίνεται, η επιλογή του μέσου της απόστασης των αισθητήρων και η χρήση του μέσου όρου μπορεί να γίνει με τη χρήση της τελευταίας εξίσωσης απευθείας, χωρίς τον ενδιάμεσο υπολογισμό της εκτίμησης της θέσης του κέντρου με τον κάθε αισθητήρα ξεχωριστά.

Εφόσον έχουμε τον υπολογισμό ενός σημείου του ρομπότ (O_R), μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε οποιοδήποτε άλλο σημείο. Στην περίπτωση μας, το σημείο που μας ενδιαφέρει είναι η βελόνα του μικρορομπότ. Από το σχέδιο της πλακέτα [21]. σχεδιάστηκε έτσι ώστε η βελόνα να τοποθετείται ακριβώς στο κέντρο του μικρορομπότ. Κατά συνέπεια κάθε χρονική στιγμή, η θέση της βελόνας, O_{needle} , του μικρορομπότ στο παγκόσμιο ΣΣ, βρίσκεται από τη σχέση:

$$O_{needle} = O_R + \rho \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (5-21)$$

όπου ρ : η απόσταση του άκρου της βελόνας από το κέντρο της απόστασης των δύο αισθητήρων

5.4 Ελάχιστα τετράγωνα

Εξάγοντας την χρονική παράγωγο της εξίσωσης (5-7) και με δεδομένη τη σταθερή σχέση της εξίσωσης (5-8), το διάνυσμα της ταχύτητας του ρομπότ u_{OR} και του αισθητήρα u_{OS} μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την σχέση

$$u_{OS} = u_{OR} + S(\omega)R(\theta)O_S^R \quad (5-22)$$

όπου ο $S(\omega)$ είναι ένας 2×2 αντισυμμετρικός πίνακας τέτοιος ώστε

$$\frac{dR(\theta)}{dt} = S(\omega)R(\theta) \quad (5-23)$$

και

$$\|\omega\|_2 = \frac{d\theta}{dt} \quad (5-24)$$

Λόγω του γεγονότος ότι η δειγματοληψία έχει ένα σταθερό ρυθμό dt , συνεπώς η εξίσωση γράφεται

$$\frac{\Delta O_S}{dt} = \frac{\Delta O_R}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} -r \cos(\theta + \xi) \\ r \sin(\theta + \xi) \end{bmatrix} \Rightarrow \quad (5-25)$$

$$\Delta O_S = \Delta O_R + \Delta\theta \begin{bmatrix} -r \cos(\theta + \xi) \\ r \sin(\theta + \xi) \end{bmatrix} \quad (5-26)$$

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, η στοιχειώδης μετατόπιση του αισθητήρα ΔO_S , που αφορά το αδρανειακό ΣΣ, συνδέεται με το ΣΣ του αισθητήρα με την σχέση (5-8).

Συνεπώς, μπορούμε να γράψουμε εκ νέου την εξίσωση (5-26) ως

$$R_s(\theta + \varphi)\Delta O_s^s = \Delta O_R + \Delta\theta \begin{bmatrix} -r\cos(\theta + \xi) \\ r\sin(\theta + \xi) \end{bmatrix} \quad (5-27)$$

Η τελευταία σχέση συνδέει την γραμμική και τη γωνιακή στοιχειώδη μετατόπιση του ρομπότ σε ένα χρονικό διάστημα dt, με τις μετρήσεις των αισθητήρων ΔO_s. Με αυτά τα δεδομένα, μπορούν οι εξισώσεις αυτές να γραφτούν σε μία γενική μορφή

$$F \cdot u = b \quad (5-28)$$

Με u το διάνυσμα των μεταβλητών που θέλουμε να εξάγουμε από τις εξισώσεις, b το διάνυσμα των μετρούμενων μεγεθών και F το διάνυσμα των γνωστών / σταθερών μεγεθών.

Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση μας έχουμε

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -r_1\sin(\theta + \xi_1) \\ 0 & 1 & r_1\cos(\theta + \xi_1) \\ 1 & 0 & -r_2\sin(\theta + \xi_2) \\ 0 & 1 & r_2\cos(\theta + \xi_2) \end{bmatrix} \quad (5-29)$$

$$b = \begin{bmatrix} Rot(\theta + \varphi_1) & 0 \\ 0 & Rot(\theta + \varphi_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta O_{S_1}^{S_1} \\ \Delta O_{S_2}^{S_2} \end{bmatrix} \quad (5-30)$$

$$u = \begin{bmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (5-31)$$

Ενώ στη γενική μορφή, που αφορά την τοποθέτηση N αισθητήρων, οι εξισώσεις γράφονται:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -r_1\sin(\theta + \xi_1) \\ 0 & 1 & r_1\cos(\theta + \xi_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -r_2\sin(\theta + \xi_2) \\ 0 & 1 & r_2\cos(\theta + \xi_2) \end{bmatrix} \quad (5-32)$$

$$b = \text{diag}\{Rot(\theta + \varphi_1), \dots, Rot(\theta + \varphi_N)\} \begin{bmatrix} \Delta O_{S_1}^{S_1} \\ \vdots \\ \Delta O_{S_N}^{S_N} \end{bmatrix} \quad (5-33)$$

$$u = \begin{bmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (5-34)$$

Η γενική μορφή της εξίσωσης είναι

$$F(r_1, r_2, \xi_1, \xi_2) \cdot u(\Delta O_R, \Delta\theta) = b(\theta, \varphi_1, \varphi_2, \Delta O_{S_1}, \Delta O_{S_2}) \quad (5-35)$$

Όπως αναφέραμε το διάνυσμα u έχει τις μεταβλητές εξόδου ώστε με βάση τις μετρήσεις των αισθητήρων να εξάγουμε τη θέση του ρομπότ στο χώρο.

Για να το βρούμε αυτό πρέπει να αντιστρέψουμε τον πίνακα F ο οποίος είναι διαστάσεων (4x3), επομένως δεν είναι αντιστρέψιμος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τον ψευδοαντίστροφο πίνακα F⁻¹ και έχουμε

$$u = \text{pinv}(F) \cdot b \quad (5-36)$$

Λύνοντας την εξίσωση αυτή, με δεδομένο ότι $r_1=r_2$, προκύπτει ότι

$$\begin{bmatrix} \Delta O_{R,x}^A \\ \Delta O_{R,y}^A \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta x_r \cos(\theta + \varphi) - \Delta y_r \sin(\theta + \varphi) + \Delta x_l \cos(\theta + \varphi) - \Delta y_l \sin(\theta + \varphi)}{2} \\ \frac{\Delta y_r \cos(\theta + \varphi) + \Delta x_r \sin(\theta + \varphi) + \Delta y_l \cos(\theta + \varphi) + \Delta x_l \sin(\theta + \varphi)}{2} \\ \frac{\Delta y_l \cos(\psi - \varphi) - \Delta y_r \cos(\psi - \varphi) - \Delta x_l \sin(\psi - \varphi) + \Delta x_r \sin(\psi - \varphi)}{2r} \end{bmatrix} \quad (5-37)$$

Παρατηρούμε ότι ο υπολογισμός της θέσης του σημείου του ρομπότ O_R , προκύπτει μέσω των ίδιων εξισώσεων όπως οι (5-20) και (5-19).

Η ανάπτυξη αυτής της μορφής, μας προσφέρει τη δυνατότητα υπολογισμού των επιθυμητών μεγεθών (ΔO , $\Delta \theta$) μέσω των τεσσάρων μεταβλητών των αισθητήρων. Εκτός αυτού, σύμφωνα με τη δημοσίευση [5], χρησιμοποιείται για την εύρεση του βέλτιστου σημείου τοποθέτησης των αισθητήρων.

Γενικότερα, η επιλογή του σημείου τοποθέτησης των αισθητήρων είναι πολύ σημαντική για την επίδραση που τυχόν έχουν τυχαία σφάλματα των αισθητήρων στο τελικό αποτέλεσμα της εκτιμώμενης θέσης της ρομποτικής πλατφόρμας. Είναι ορθότερη η επιλογή της θέσης των οπτικών αισθητήρων να γίνει έτσι ώστε μία μικρή κίνηση του ρομπότ να επιδρά σε αρκετά μεγάλες τιμές εξόδου των αισθητήρων. Σε διαφορετική περίπτωση, η επίδραση των σφαλμάτων θα επιδρά σε μεγάλο βαθμό στην εκτίμηση της θέσης και θα δίνει λανθασμένες εκτιμήσεις.

Μαθηματικά, το πρόβλημα αυτό επιλύεται [5], μεγιστοποιώντας τις ιδιάζουσες τιμές του πίνακα F . Με δεδομένο του συστήματος $Fu = b$, οι ιδιοτιμές του πίνακα F , είναι τα μήκη της υπερ-έλλειψης E .

$$E \triangleq \{b: b = Fu, u \in C^3, \|u\| = 1\} \quad (5-38)$$

Με δεδομένο ότι

$$\|b\| = \left\| \begin{bmatrix} \Delta O_{S_1}^{S_1} \\ \Delta O_{S_2}^{S_2} \end{bmatrix} \right\| \quad (5-39)$$

Οι ιδιάζουσες τιμές του πίνακα αντιπροσωπεύουν έναν δείκτη του πόσο μεγάλη είναι η ένδειξη της εξόδου των αισθητήρων για μικρή μεταβολή της θέσης του ρομπότ. Επομένως, το πρόβλημα μεγιστοποίησης της εξόδου των οπτικών αισθητήρων επιλύεται σαν πρόβλημα μεγιστοποίησης των ιδιάζουσων τιμών του πίνακα F . Οι ιδιάζουσες τιμές του πίνακα, αντιστοιχούν στις ιδιοτιμές του τετραγωνικού πίνακα $F^T F$

$$F^T F = \begin{bmatrix} 2 & 0 & p \\ 0 & 2 & q \\ p & q & r_1^2 + r_2^2 \end{bmatrix} \quad (5-40)$$

όπου

$$p = -r_1 \sin(\theta + \xi_1) - r_2 \cos(\theta + \xi_2) \quad (5-41)$$

$$q = r_1 \cos(\theta + \xi_1) + r_2 \cos(\theta + \xi_2) \quad (5-42)$$

Υπολογίζονται ότι οι ιδιάζουσες τιμές εν τέλει βρίσκονται από τις σχέσεις

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{2}(r_1^2 + r_2^2 + 2) + \frac{1}{2}\sqrt{(r_1^2 + r_2^2)^2 + 4 + 8r_1r_2\cos(\xi_1 - \xi_2)} \quad (5-43)$$

$$\sigma_2^2 = 2 \quad (5-44)$$

$$\sigma_3^2 = \frac{1}{2}(r_1^2 + r_2^2 + 2) + \frac{1}{2}\sqrt{(r_1^2 + r_2^2)^2 + 4 + 8r_1r_2\cos(\xi_1 - \xi_2)} \quad (5-45)$$

Και τελικά προκύπτει ότι το πρόβλημα ικανοποιείται [5] για $r_1 = r_2$ και $\xi = \pi$. Δηλαδή, η βέλτιστη τοποθέτηση των αισθητήρων βρίσκεται αντιδιαμετρικά από το γεωμετρικό κέντρο του ρομπότ. Στο μοντέλο όμως της ρομποτικής πλατφόρμας του εργαστηρίου, αυτή η θέση είναι κατειλημμένη από τους κινητήρες, συνεπώς η θέση που τοποθετήθηκαν είναι ακριβώς από κάτω και όσο το δυνατό πιο μακριά από το κέντρο περιστροφής.

5.5 Βαθμονόμηση

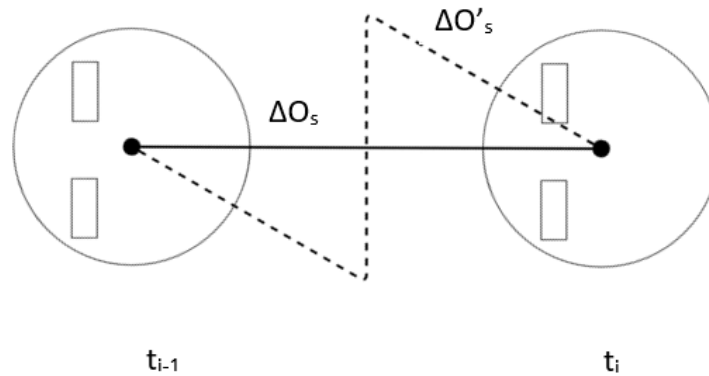
Εφόσον έχουμε εξάγει τους βασικούς αλγορίθμους υπολογισμού της θέσης του ρομπότ στο χώρο με βάση τις τιμές μέτρησης των αισθητήρων, επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός του είδους των σφαλμάτων και η συστηματική βαθμονόμηση του αισθητήρα, έτσι ώστε να μειωθεί το σφάλμα που τυχόν μπορεί να υπάρξει. Πριν από την περιγραφή της διαδικασίας της βαθμονόμησης, είναι σημαντικό να εξετάσουμε το είδος των σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν και τρόπους μείωσής τους.

Σημαντικό στοιχείο για την ορθή εξαγωγή των δεδομένων είναι η συχνότητα δειγματοληψίας. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι απαραίτητο να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, για την σωστή απεικόνιση της πορείας του ρομπότ στο χρόνο.

Στο Σχήμα 5-9 φαίνεται η σημασία της συχνότητας δειγματοληψίας για την σωστή απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Με την συνεχή γραμμή απεικονίζεται το μονοπάτι της εκτίμησης της τροχιάς του ρομπότ όπως εξήχθη από τον αισθητήρα θέσης. Η τροχιά αυτή, λόγω των αποτελεσμάτων αποτελεί μία ευθεία. Η διακεκομμένη γραμμή, αναπαριστά την πραγματική τροχιά που είναι δυνατόν να διέγραψε το ρομπότ μεταξύ δύο χρονικών στιγμών δειγματοληψίας $i-1$ και i . Όπως φαίνεται $\Delta O_S \neq \Delta O'_S$.

Όπως είναι κατανοητό, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα δειγματοληψίας, τόσο ακριβέστερη θα είναι η απεικόνιση της εκτίμησης της τροχιάς από τους αισθητήρες.

Η παραπάνω ανάλυση έχει ως προϋπόθεση την μη αλλαγή του προσανατολισμού του ρομπότ κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Η ίδια ανάλυση ισχύει και σε περίπτωση αλλαγής του προσανατολισμού φαίνεται η διαφορά που μπορεί να προκαλέσει η λανθασμένη εκτίμηση αλλαγή της γωνίας θ .



Σχήμα 5-9. Επίδραση της συχνότητας της δειγματοληψίας στην αναπαράσταση της κίνησης.

Εκτός από τη συχνότητα δειγματοληψίας, υπάρχουν και τα σφάλματα που προέρχονται από τη μέτρηση των αισθητήρων και από τους αλγορίθμους υπολογισμού. Αυτά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Στα συστηματικά σφάλματα
- Στα μη συστηματικά (τυχαία) σφάλματα

Τα συστηματικά σφάλματα οφείλονται σε λανθασμένους υπολογισμούς των παραμέτρων που εισέρχονται στις εξισώσεις υπολογισμού της θέσης και του προσανατολισμού του ρομπότ. Η μείωση των σφαλμάτων αυτών γίνεται μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης που θα αναλυθεί παρακάτω

Τα τυχαία σφάλματα αφορούν τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων και των τρόπων μέτρησης τους. Πιο συγκεκριμένα, αυτά αφορούν

- Σφάλμα του DSP του αισθητήρα στον υπολογισμό των pixels που κατέγραψε η κάμερα των αισθητήρων κατά την επεξεργασία της επιφάνειας.
- Σφάλμα λόγω της απόστασης των αισθητήρων από το έδαφος. Η ενδεικνυόμενη απόσταση της κάμερας του αισθητήρα από την επιφάνεια αναφέρεται στο datasheet με τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα.
- Σφάλμα λόγω είδους επιφάνειας. Είναι γνωστό από την χρήση των οπτικών ποντικιών, ότι η απόδοση τους πέφτει σε ανακλαστικές επιφάνειες όπως το γυαλί. Αυτό ισχύει και για την περίπτωση των laser αισθητήρων. Παρόλα αυτά, και ανάλογα την επιφάνεια κίνησης, πρέπει να αναμένεται διαφορετικός αριθμός παλμών για την ίδια μεταβολή θέσης.
- Σφάλμα λόγω εξοικονόμησης ενέργειας. Όταν ο αισθητήρας είναι ακίνητος, λειτουργεί σε μία κατάσταση ελαχιστοποίησης ενέργειας, και λαμβάνει φωτογραφίες σε αραιά διαστήματα. Μόλις διαπιστώσει κίνηση όμως, επανέρχεται στην κανονική του κατάσταση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα μικρό, αλλά σημαντικό χρονικό διάστημα, κατά το οποίο ο αισθητήρας δεν λαμβάνει, ή λαμβάνει με μεγάλο σφάλμα, μέτρηση της μετακίνησης του. Οι παλμοί τότε δεν αντιστοιχούν στην πραγματική μετακίνηση.

Για να μειώσουμε τα συστηματικά σφάλματα, χρησιμοποιούμε μία συστηματική διαδικασία βαθμονόμησης των μεγεθών των αισθητήρων. Τα μεγέθη αυτά αφορούν

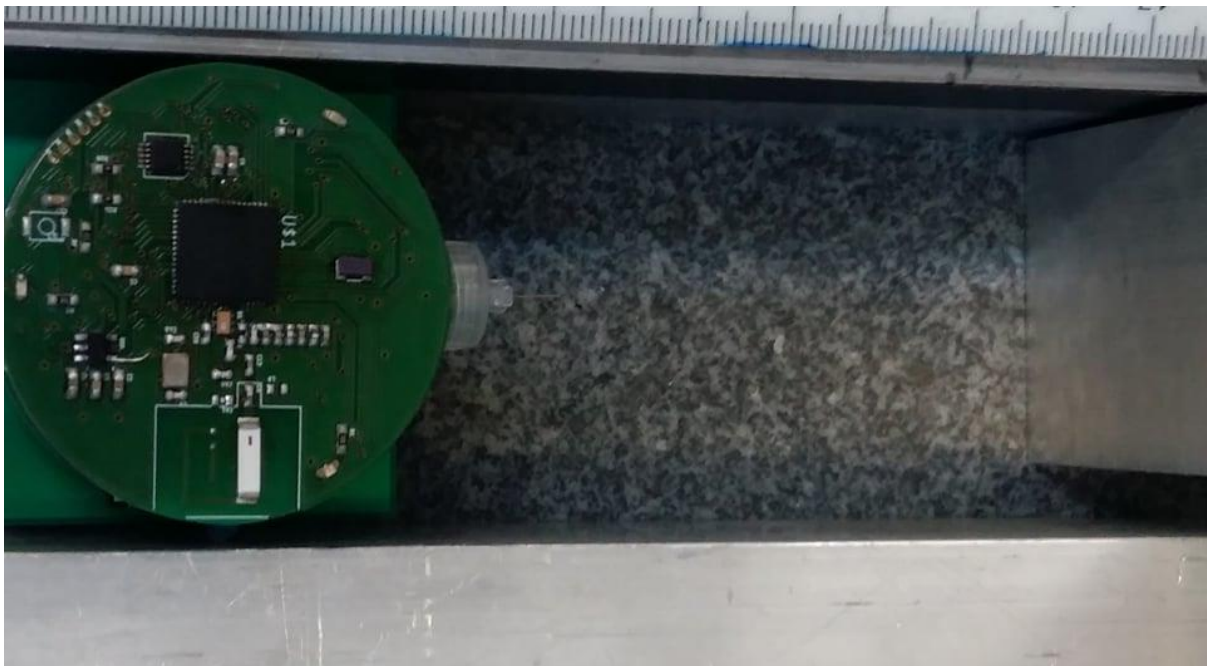
- Τους παλμούς που καταγράφει ο αισθητήρας για μία γνωστή μετατόπιση, δηλαδή να ρυθμίσουμε το cpi των αισθητήρων
- Την απόσταση των αισθητήρων μεταξύ τους, D.

- Η γωνία που σχηματίζει το σώμα των αισθητήρων σε σχέση με τον προσανατολισμό του ρομπότ, φ .
- Η γωνία της ευθείας που συνδέει τους δύο αισθητήρες, ψ .

Παρακάτω, αναλύεται η διαδικασία βαθμονόμησης και εύρεσης των σταθερών μεγεθών που μας ενδιαφέρουν.

5.5.1 Πείραμα μετατόπισης σε σταθερή ευθεία

Για τον προσδιορισμό των c_{pi} και της γωνίας φ , εφαρμόζουμε μία πειραματική δοκιμή, η οποία αποτελείται από την μετατόπιση του σώματος του ρομπότ κατά γνωστή ευθεία. Για την υλοποίηση αυτής της δοκιμής, προσαρμόστηκε στο σώμα του ρομπότ, ενδιάμεσα των επιπέδων του μία τετραγωνική πλακέτα, η οποία συνδέεται με τα επίπεδα της πλακέτα μέσω ακροδεκτών για την μετάδοση των σημάτων. Παράλληλα, το ρομπότ τοποθετείται στο γρανίτη στον οποίο θα γίνουν οι πειραματικές δοκιμές. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να εξαλείψουμε την πιθανότητα λάθους, εξαιτίας διαφορετικής επιφάνειας. Παράλληλα το ρομπότ τοποθετείται μεταξύ δύο ράβδων, έτσι ώστε το ενδιάμεσο βοηθητικό επίπεδο να εφάπτεται στα άκρα τους και να μην επιτρέπουν την μετατόπιση του ρομπότ κατά τον άλλον άξονα, αλλά ούτε και τη γωνιακή του μετατόπιση (Σχήμα 5-10).



Σχήμα 5-10. Πείραμα βαθμονόμησης σε ευθεία

Στη συνέχεια μετακινείται το ρομπότ κατά τον άξονα x της κίνησης του, για 5 cm. Κατά τη διάρκεια της κίνησης λαμβάνονται οι μετρήσεις των δύο αισθητήρων ($\Delta X_s, \Delta Y_s$), οι οποίες προστίθενται σε κάθε δειγματοληψία έτσι ώστε να προκύψει η τελική θέση του ρομπότ σε κάθε άξονα (X_i, Y_i)

$$X_i = \Delta X_s + X_{i-1} \quad (5-46)$$

Και αντίστοιχα

$$Y_i = \Delta Y_s + Y_{i-1} \quad (5-47)$$

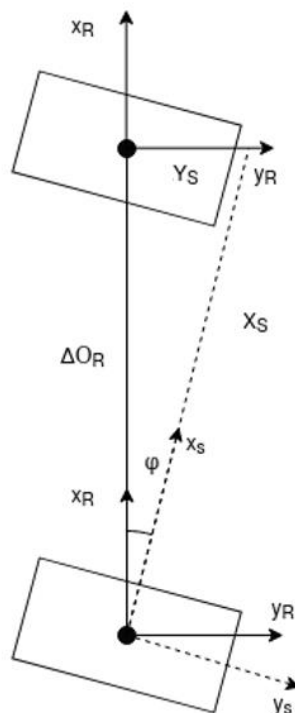
Συνεπώς στο τέλος της μέτρησης, θα έχουμε τις μεταβλητές ($X_{S_{right}}$, $Y_{S_{right}}$) και ($X_{S_{left}}$, $Y_{S_{left}}$) που αντιστοιχούν στη θέση κάθε αισθητήρα. Τα μεγέθη αυτά αναφέρονται σε παλμούς των αισθητήρων laser. Από εκεί μπορούμε να εξάγουμε τα κέρδη k που αντιστοιχούν στον αριθμό των cpi του κάθε αισθητήρα.

$$k = \frac{50mm}{\left(\sqrt{X_S^2 + Y_S^2}\right)} \quad (5-48)$$

Η διαδικασία που αναπτύχθηκε μας δίνει τα κέρδη τα οποία πολλαπλασιάζονται στον αριθμό των counts που αντλούμε ως πληροφορία απευθείας από τους αισθητήρες laser, μέσω SPI, με σκοπό την μετατροπή τους σε mm.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μέσω του προγραμματισμού του κατάλληλου καταχωρητή του αισθητήρα μπορούμε να ρυθμίσουμε τον επιθυμητό αριθμό cpi. Παρόλα αυτά, η διαδικασία της βαθμονόμησης έχει σαν στόχο τον προσδιορισμό του ακριβούς αριθμού cpi που αντιστοιχεί στον κάθε αισθητήρα, λόγω της απόκλισης της τιμής που μπορεί να οφείλεται σε λόγους επιφάνειας, ταχύτητας κτλ.

Με την χρήση των ίδιων μετρήσεων, μπορούμε να υπολογίσουμε και την γωνία που σχηματίζει ο κάθε αισθητήρας με τον κεντρικό άξονα προσανατολισμού του ρομπότ όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-11.



Σχήμα 5-11. Υπολογισμός των μεταβλητών της βαθμονόμησης σε ευθεία.

Η γωνία φ , υπολογίζεται ως:

$$\varphi = \text{atan2}(X_s, Y_s) \quad (5-49)$$

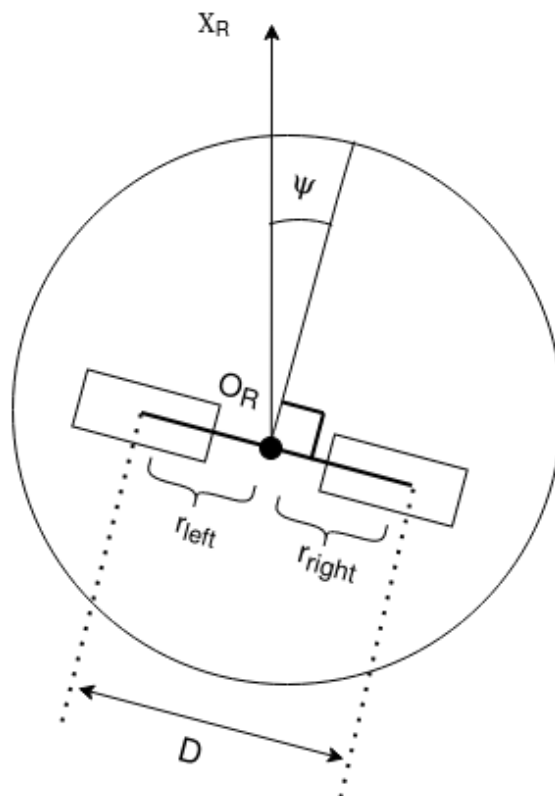
Ο Πίνακας 5-1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση. Κατά την εκτέλεση του πειράματος εκτελέστηκαν 10 επαναλήψεις της γραμμικής μετατόπισης κατά τον άξονα x της πλατφόρμας και εξήχθη ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 5-1. Αποτελέσματα βαθμονόμηση μεταφορικής κίνησης

Counts Measured		Calibration Results	
X_{left}	3550 counts	K_{left}	1804 cpi
Y_{left}	63 counts	φ_{left}	1.02°
X_{right}	3622 counts	K_{right}	1840 cpi
Y_{right}	-48 counts	φ_{right}	-0.77°

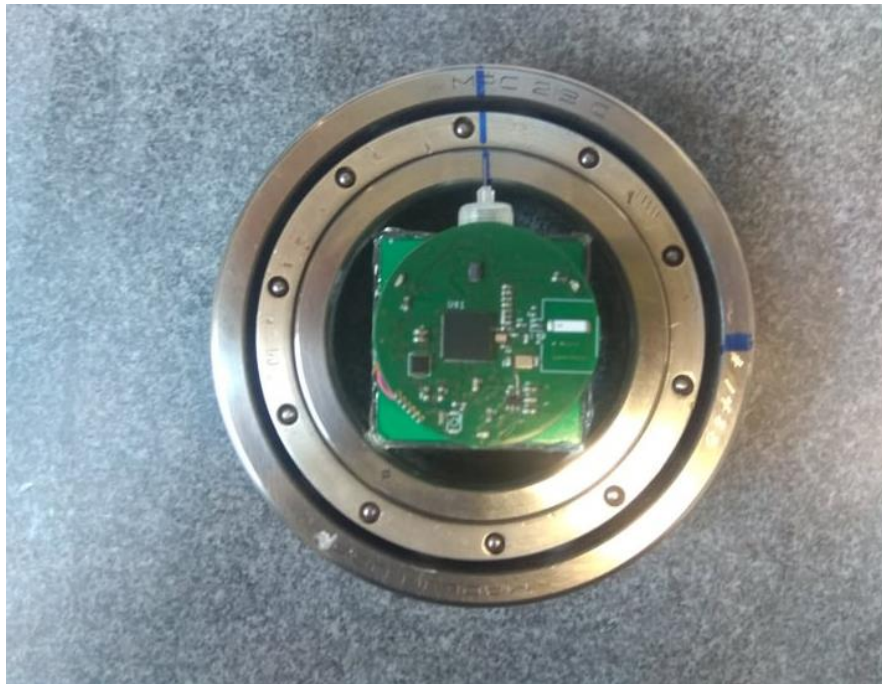
5.5.2 Πείραμα περιστροφής

Για τον προσδιορισμό της απόστασης των δύο αισθητήρων D και της γωνίας ψ που σχηματίζει ο άξονας που ενώνει τους δύο αισθητήρες με τον άξονα του ρομπότ, (Σχήμα 5-12), θα χρειαστεί να πραγματοποιηθεί πείραμα περιστροφής του ρομπότ, ως προς ένα σταθερό σημείο, κατά μία γνωστή γωνία θ .



Σχήμα 5-12. Τα μεγέθη που υπολογίζονται στο πείραμα περιστροφής.

Για την πειραματική δοκιμή χρησιμοποιήθηκε η ενδιάμεση βοηθητική πλακέτα, η οποία στηρίχθηκε σε ένα ρουλεμάν (Σχήμα 5-13). Έτσι ήταν δυνατή η περιστροφή του σώματος του ρομπότ γύρω από ένα σταθερό σημείο.



Σχήμα 5-13. Πειραματική διάταξη βαθμονόμησης με περιστροφή

Αρχικά, υπολογίζεται πάλι η συνολική απόσταση (X_s , Y_s) στους άξονες x και y που διένυσε ο αισθητήρας, σύμφωνα με τις εξισώσεις (5-46) (5-47). Όσο το ρομπότ περιστρέφεται, και οι αισθητήρες δίνουν τιμές, μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό μήκος του τόξου που διέγραψε ο κάθε αισθητήρας.

$$l = \sqrt{X_s^2 + Y_s^2} \quad (5-50)$$

Έχοντας σαν δεδομένο αυτό, καθώς και τη γνωστή γωνία κατά την οποία περιστρέψαμε το ρομπότ, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση του αισθητήρα από το σταθερό κέντρο περιστροφής. Γεωμετρικά μπορούμε να εξάγουμε ότι:

$$r = \frac{l}{\theta} \quad (5-51)$$

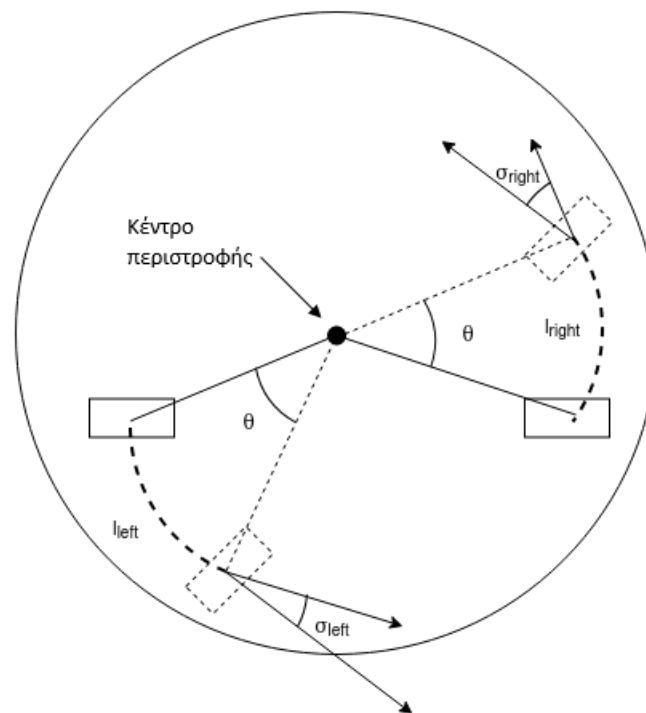
Η απόσταση αυτή, δεν αντιστοιχεί στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο αισθητήρων, δηλαδή

$$D \neq r_{left} + r_{right} \quad (5-52)$$

Αυτό συμβαίνει καθώς το κέντρο περιστροφής του ρομπότ, δεν είναι το μέσο της απόστασης των δύο laser αισθητήρων, σύμφωνα με την τοποθέτηση που έγινε στο επίπεδο της πλακέτα. Επιπλέον, ακόμα και στο κέντρο να είχαν τοποθετηθεί οι δύο αισθητήρες, θα έπρεπε να βρεθεί τυχόν αστοχίες στην τοποθέτηση με αποτέλεσμα, να δημιουργείται διαφορά στη γωνία.

Κατά συνέπεια, για να βρεθεί η απόσταση πρέπει να υπολογίσουμε καταρχήν την εφαπτομένη που σχηματίζουν οι άξονες των αισθητήρων με το τόξο που διαγράφει (Σχήμα 5-14). Την γωνία αυτή μπορούμε να εξάγουμε από τη σχέση

$$\sigma = \text{atan2}(X_s, Y_s) \quad (5-53)$$



Σχήμα 5-14. Πείραμα περιστροφής για την βαθμολογία των αισθητήρων.

Γνωρίζοντας λοιπόν τις γωνίες και καθώς και τα και υπολογίζουμε τις προβολές (X_{proj}, Y_{proj}) της απόστασης των δύο αισθητήρων στους άξονες x και y ως εξής [2]:

$$X_{proj} = r_r \cos(\sigma_r) - r_l \cos(\sigma_l) \quad (5-54)$$

$$Y_{proj} = r_r \sin(\sigma_r) - r_l \sin(\sigma_l) \quad (5-55)$$

Με αυτά τα δεδομένα, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση D, ως

$$D = \sqrt{X_{proj}^2 + Y_{proj}^2} \quad (5-56)$$

Και την γωνία ψ

$$\psi = \text{atan2}(X_{proj}, Y_{proj}) \quad (5-57)$$

Ο Πίνακας 5-2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση. Κατά την εκτέλεση του πειράματος εκτελέστηκαν 5 επαναλήψεις της γωνιακής μετατόπισης κατά γωνία ίση με 2π και εξήχθη ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 5-2. Αποτελέσματα βαθμονόμηση περιστροφικής κίνησης

Counts Measured		Calibration Results	
ΔX_{left}	-72.42 mm	Γ_{left}	12.74 mm
ΔY_{left}	34.1 mm	σ_{left}	-64.78°
ΔX_{right}	63.63 mm	Γ_{right}	11.33 mm
ΔY_{right}	31.9 mm	σ_{right}	63.35°
		D	21.65 mm
		ψ	0.01°

5.6 Πειραματικές Μετρήσεις

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που εξήχθησαν για την εξακρίβωση της ακρίβειας μέτρησης του συστήματος εντοπισμού θέσης με τη χρήση των δύο οπτικών αισθητήρων.

Παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν

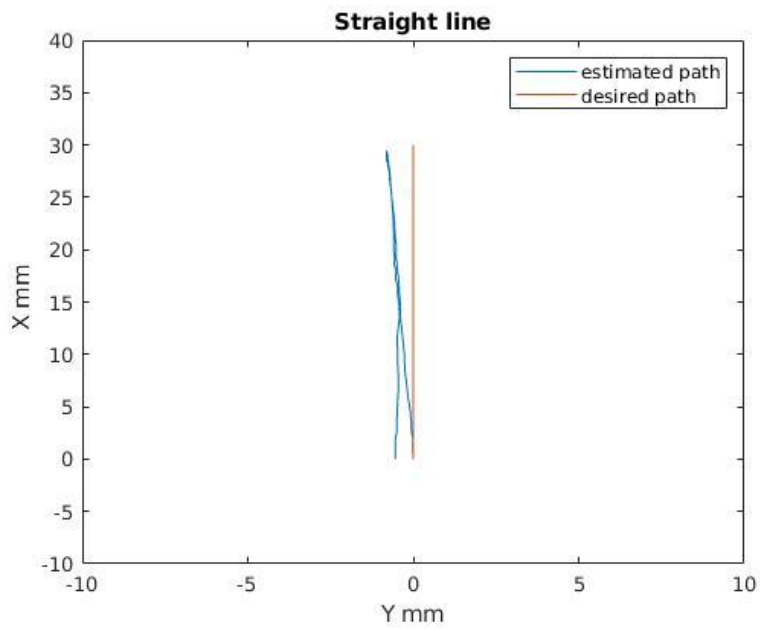
- Την εκτέλεση πειραμάτων μίας τροχιάς γνωστής ευθείας
- Την εκτέλεση πειραμάτων κυκλικής τροχιάς
- Την βελτίωση της λειτουργίας λόγω της διαδικασίας βαθμονόμησης

5.6.1 Ευθεία Τροχιά

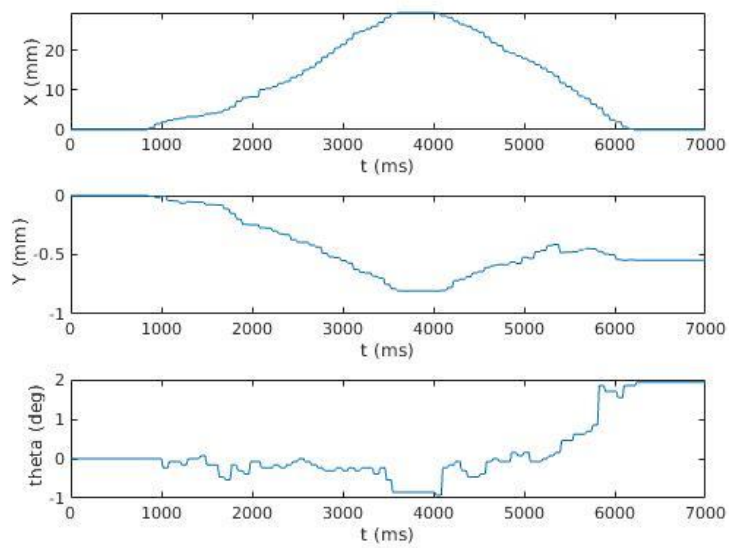
Για την εξακρίβωση της ακρίβειας του συστήματος εντοπισμού θέσης, εκτελέστηκαν πειράματα γνωστής ευθείας τροχιάς. Καταρχήν, μελετήθηκαν οι ευθείες τροχιές τριών διαφορετικών μηκών:

- 3 cm
- 6.2 cm
- 10 cm

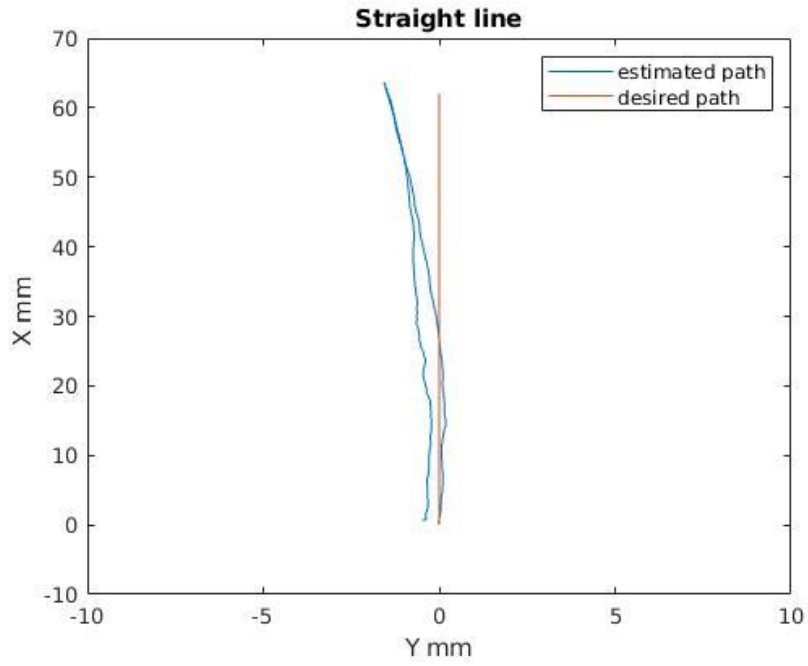
Από το Σχήμα 5-15 έως το Σχήμα 5-20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τα πειράματα αυτά.



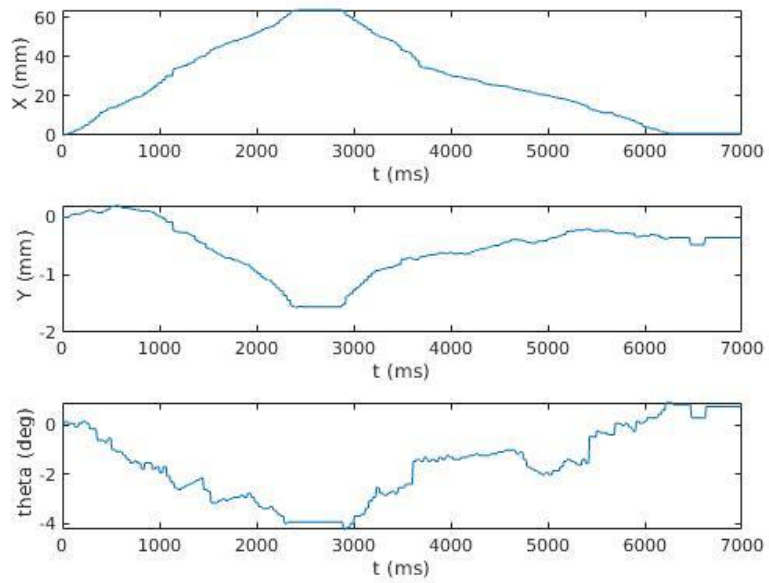
Σχήμα 5-15. Πείραμα 3cm ευθείας, άξονας x-y.



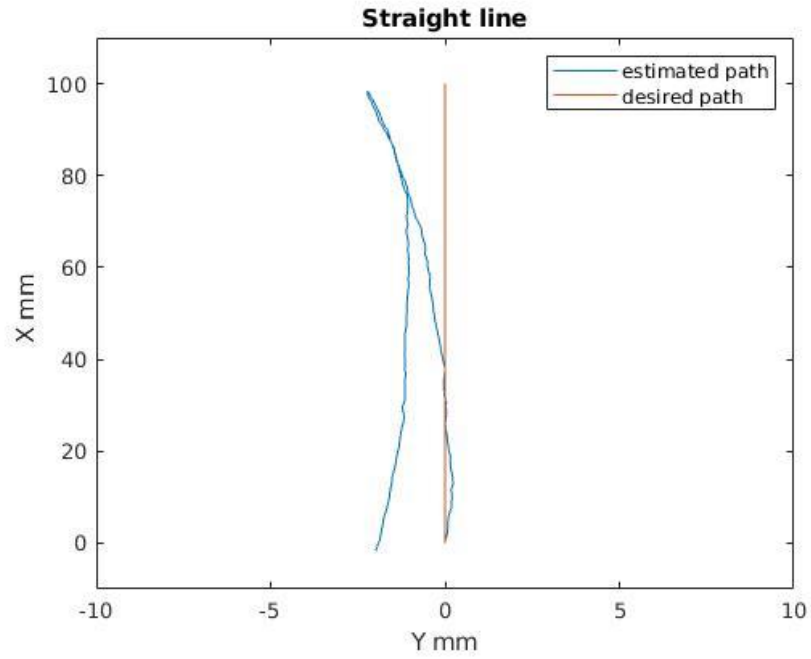
Σχήμα 5-16. Πείραμα 3cm ευθείας, άξονας x,y και προσανατολισμού.



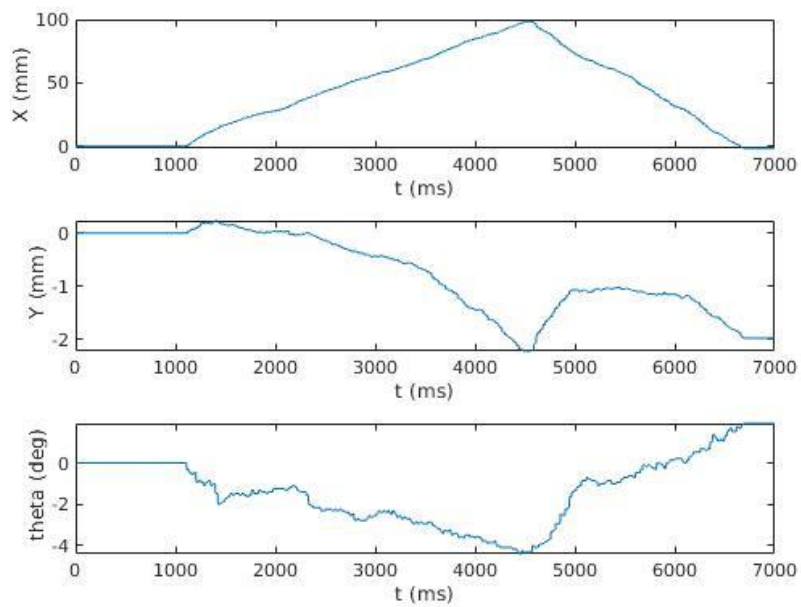
Σχήμα 5-17. Πείραμα 6.3cm ευθείας, άξονας x-y.



Σχήμα 5-18. Πείραμα 6.3cm ευθείας, άξονας x, y και προσανατολισμού.



Σχήμα 5-19. Πείραμα 10cm ευθείας, άξονας x-y.

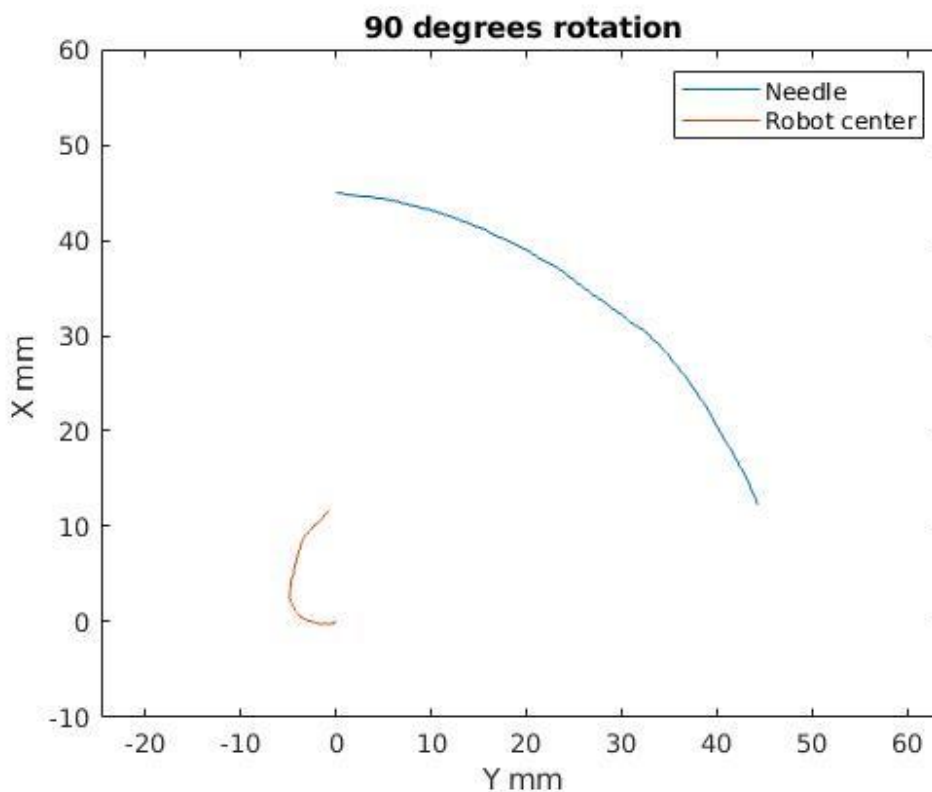


Σχήμα 5-20. Πείραμα 10cm ευθείας, άξονας x,y και προσανατολισμού.

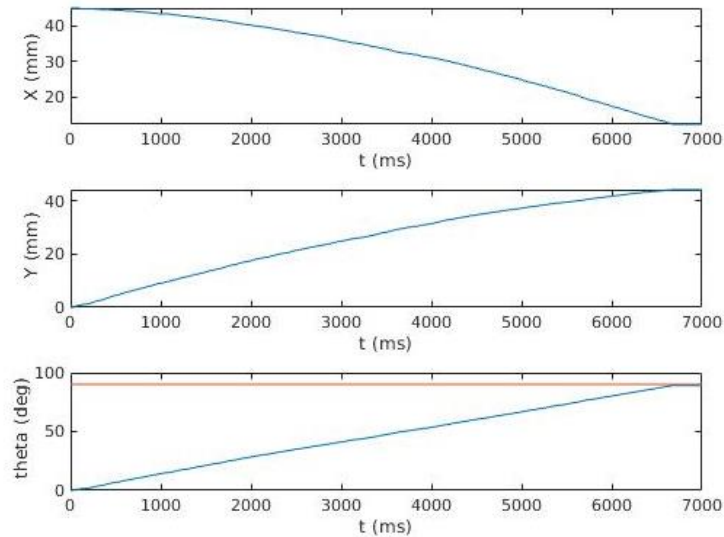
Όπως παρατηρούμε, εμφανίζεται ένα σφάλμα κατά τον άξονα των y , καθώς το ρομπότ δεν αλλάζει προσανατολισμό, θα έπρεπε η y θέση του να παραμένει στο 0. Όπως αναμένεται όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διανύει η πλατφόρμα, τόσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα που προκύπτει. Σημαντικό στοιχείο επίσης είναι η διακύμανση των τιμών της γωνίας του προσανατολισμού. Παρατηρούμε σφάλμα στις τιμές της, οι οποίες θα έπρεπε και αυτές να είναι μηδέν. Το σφάλμα αυτό προκύπτει καθώς ο υπολογισμός της γωνίας γίνεται μέσω των τιμών των δύο αισθητήρων, δηλαδή τις τέσσερις συνιστώσες θέσης που έχουμε σαν είσοδο για τον υπολογισμό της θέσης του ρομπότ. Συνεπώς, τα λάθη που συσσωρεύονται, λόγω του προσθετικού χαρακτήρα του συστήματος των οπτικών αισθητήρων, δίνουν λανθασμένες τιμές στη γωνία, η οποία όπως είδαμε παραπάνω επιδρά στον συνολικό υπολογισμό της θέσης του ρομπότ.

5.6.2 Πείραμα περιστροφής

Στη συνέχεια διενεργείται πείραμα περιστροφής του ρομπότ κατά 90° . Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5-21 και στο Σχήμα 5-22.



Σχήμα 5-21. Πείραμα περιστροφής 90° , άξονας x - y .

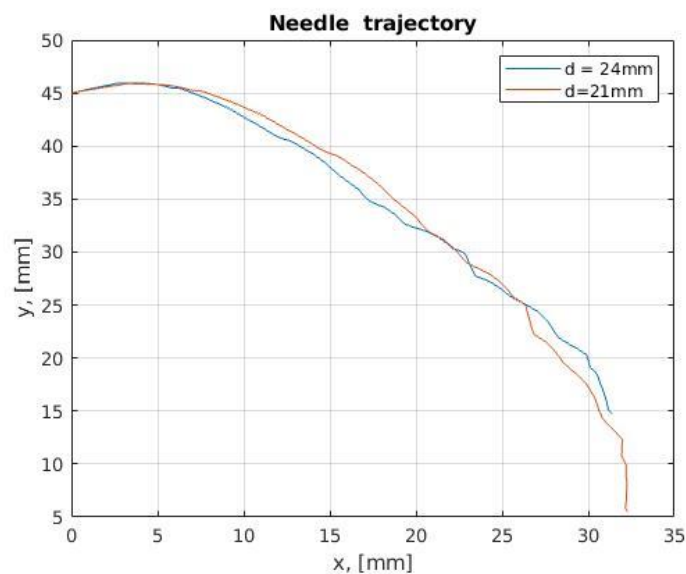


Σχήμα 5-22. Πείραμα περιστροφής, άξονες x,y και προσανατολισμού.

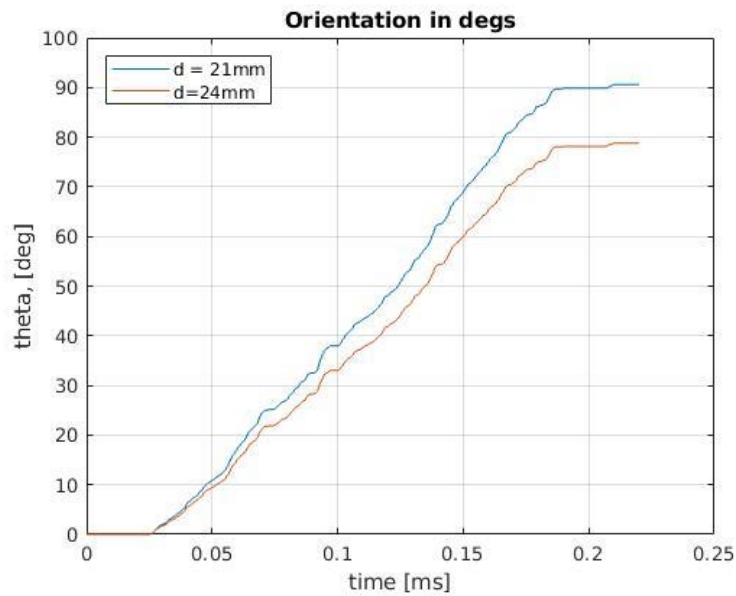
Η απόκλιση που έχουμε κατά την περιστροφή είναι της τάξης των $1-2^\circ$. Η μικρή απόκλιση οφείλεται στη διαδικασία της βαθμονόμησης που έγινε.

5.6.3 Βελτίωση βαθμονόμησης

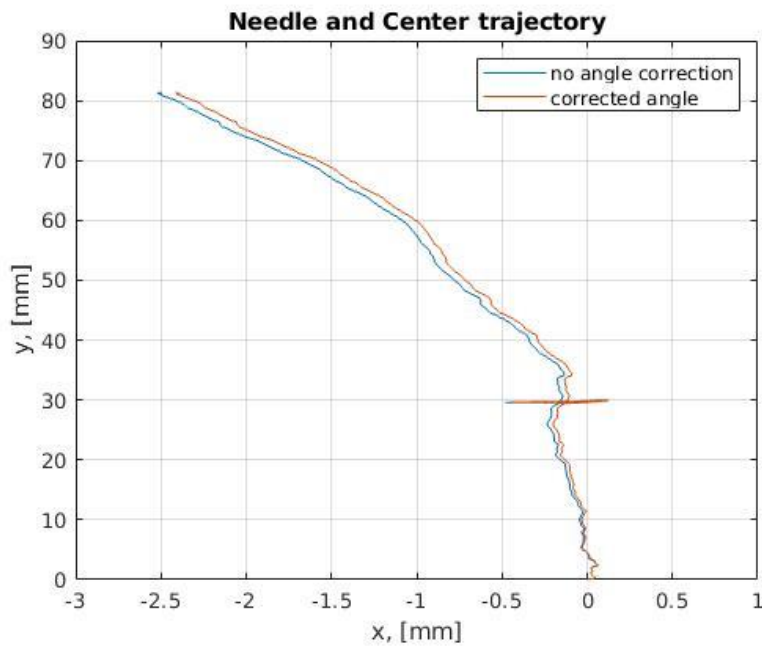
Στην επόμενη πειραματική δοκιμή, συλλέχθηκαν δεδομένα μετατόπισης (ΔO) από τους αισθητήρες και μέσω προγράμματος εισήχθησαν στους αλγορίθμους υπολογισμού της θέσης που αναφέραμε παραπάνω, δηλαδή τις Εξισώσεις (5-4), (5-5), (5-13), (5-14) και (5-19) έως (5-21). Με τον τρόπο αυτό, μπορούμε να μεταβάλλουμε τις μεταβλητές του συστήματος και να δούμε την επίδραση τους στην έξοδο της εκτίμησης. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε ένα πείραμα περιστροφής κατά 90° , όπου δοκιμάστηκαν 2 διαφορετικές τιμές μεταβλητών απόστασης D μεταξύ των laser, μία για την απόσταση που έχει βρεθεί από τη διαδικασία βαθμονόμησης και μία με απόκλιση 3mm σε σχέση με αυτή (Σχήμα 5-23 και Σχήμα 5-24) και ένα πείραμα σε γνωστή ευθεία για την εξακρίβωση της διόρθωσης του σφάλματος λόγω εύρεσης της γωνίας φ (Σχήμα 5-25).



Σχήμα 5-23. Βελτίωση βαθμονόμησης σε περιστροφή, άξονας x-y.



Σχήμα 5-24. Βελτίωση βαθμονόμησης σε περιστροφή, γωνία προσανατολισμού.



Σχήμα 5-25. Βελτίωση ακρίβειας λόγω διόρθωσης γωνίας φ.

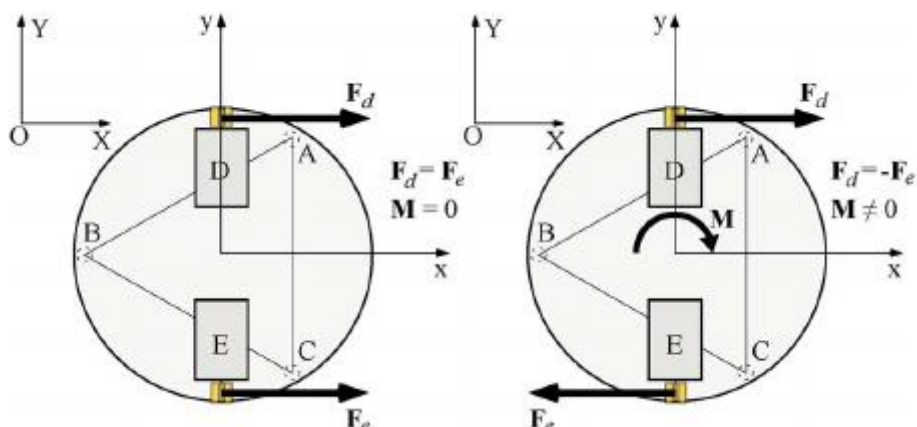
Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, η σωστή εξακρίβωση της απόστασης D, μεταξύ των δύο αισθητήρων είναι πολύ σημαντικός παράγοντας. Όπως εξάγεται από τα διαγράμματα, μία απόκλιση της τάξης των 3mm είναι δυνατόν να οδηγήσει σε λάθος εκτίμηση της γωνίας της τάξης των 10° (βλ. Σχήμα 5-23).

Αντίθετα, η διόρθωση της εκτιμώμενης θέσης λόγω της εύρεσης της γωνίας φ, είναι πολύ μικρή, λόγω του γεγονότος ότι η γωνία είναι πολύ μικρή της τάξης της 1° (Σχήμα 5-25).

6 Έλεγχος κίνησης

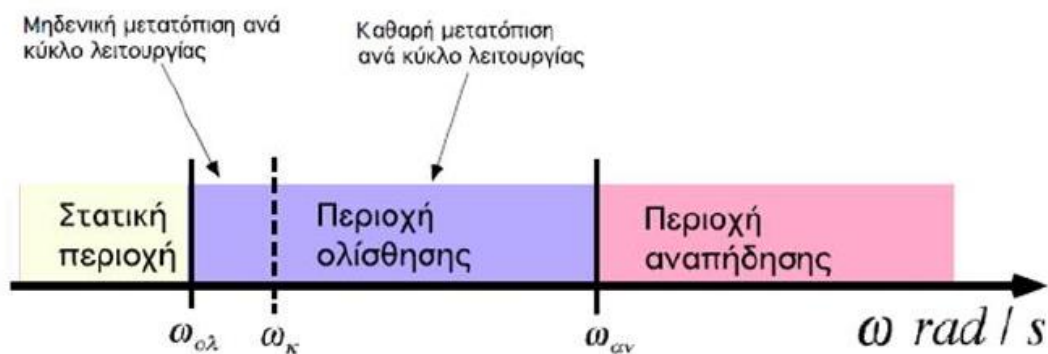
6.1 Μελέτη κίνησης

Αναλυτικά η δυναμική του μικρορομπότ εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 2. Οι βασικές κινήσεις που απορρέουν από τη δυναμική του συστήματος της μικρορομποτικής πλατφόρμας είναι δύο, η σύγχρονη και η ασύγχρονη. Όταν οι δύο κινητήρες, D και E, λειτουργούν με σύγχρονες στροφές, δηλαδή $\omega_D = \omega_E$, τότε οι έκκεντρες δυνάμεις F_d και F_e είναι ίσες, έχοντας σαν αποτέλεσμα τη γραμμική κίνηση του ρομπότ (Σχήμα 6-1). Επιπλέον όταν οι κινητήρες λειτουργούν με ίσες και αντίρροπες στροφές, τότε η πλατφόρμα εκτελεί πλήρη περιστροφική κίνηση.



Σχήμα 6-1. Οι δυνάμεις του μοντέλου της πλατφόρμας με δύο επενεργητές.

Κατά τη διάρκεια της σύγχρονης κίνησης της πλατφόρμας μπορούμε να ορίσουμε τρεις καταστάσεις κινήσεις, οι οποίες διακρίνονται με βάση το πλάτος της ενεργούμενης δύναμης (Σχήμα 6-2).



Σχήμα 6-2. Περιοχές λειτουργίας της πλατφόρμας.

- Στατική περιοχή: η πλατφόρμα είναι στατική σε όλη τη διάρκεια του κύκλου αυτού λειτουργίας.
- Περιοχή ολίσθησης: Στην περίπτωση αυτή η δύναμη, υπερνικά την τριβή Coulomb και η πλατφόρμα ολισθαίνει έπειτα από μία οριακή τιμή γωνιακής ταχύτητας (ω_{msl}). Εδώ εμφανίζονται δύο υποπεριπτώσεις. (α) δεν προκύπτει καθαρή μετατόπιση ανά κύκλο λειτουργίας. Η πλατφόρμα ταλαντώνεται γύρω από ένα σταθερό σημείο και (β) για λίγο μεγαλύτερο ω η πλατφόρμα ολισθαίνει και παρουσιάζει καθαρή μετατόπιση ανά κύκλο λειτουργίας. Όταν η πλατφόρμα βρίσκεται στην περιοχή ολίσθησης μπορεί να επιτευχθεί ελεγχόμενη οδήγηση. Η αρχή αυτή οδήγησε στην συσχέτιση της ταχύτητας περιστροφής των επενεργητών ανάλογα με την κινητική κατάσταση (γραμμική ή περιστροφική κίνηση) καθώς και στον προσδιορισμό του εύρους ταχυτήτων όπου η πλατφόρμα λειτουργεί στην περιοχή αυτή.
- Αναπήδηση: Για ω μεγαλύτερο από μια κρίσιμη τιμή (ω_{mtip}), η πλατφόρμα αναπηδά. Το αποτέλεσμα της δύναμης προκαλεί απώλεια του σημείου ισορροπίας στον κάθετο άξονα.

Οι τρεις αυτές διακριτές περιοχές κίνησης της πλατφόρμας, διαχωρίζονται η μία από την άλλη από συγκεκριμένες τιμές γωνιακής ταχύτητας που λειτουργούν ως κατώφλι. Αναλυτικά ο υπολογισμός των εξισώσεων που περιγράφουν τις τιμές των γωνιακών ταχυτήτων γίνεται στο [16]. Συνοπτικά, παρουσιάζονται οι εξισώσεις αυτές:

Για γραμμική κίνηση τα όρια της γωνιακής ταχύτητας των κινητήρων για την περιοχή ολίσθησης είναι:

$$\omega_{msl} = \sqrt{\frac{\mu g M}{2mr\sqrt{1 + \mu^2}}} \quad (6-1)$$

Ενώ για την περιοχή αναπήδησης είναι:

$$\omega_{mtip} = \sqrt{\frac{gM}{2mr\sqrt{1 + \left(\frac{h}{\sqrt{2}l}\right)^2}}} \quad (6-2)$$

Για την περιστροφική κίνηση τα όρια δίνονται από τις σχέσεις

$$\omega_{msl} = \sqrt{\frac{\mu g M}{2mr\sqrt{\left(\frac{d}{\sqrt{2}l}\right)^2 + \mu^2}}} \quad (6-3)$$

$$\omega_{mtip} = \sqrt{\frac{gM}{2mr}} \quad (6-4)$$

όπου M η μάζα της πλατφόρμας, m η μάζα του εκκέντρου, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, μ ο συντελεστής τριβής, r η ακτίνα της αζυγοσταθμίας, h το ύψος των επενεργητών από το δάπεδο, d η απόσταση των επενεργητών και l η απόσταση μεταξύ δύο σφαιρών στήριξης της πλατφόρμας.

Όταν οι κινητήρες λειτουργούν ασύγχρονα, δηλαδή οι ταχύτητες των κινητήρων είναι διαφορετικές, δηλαδή $\omega_D \neq \omega_E$, και με δεδομένο ότι αυτές είναι σταθερές, τότε το αποτέλεσμα των επενεργούμενων δυνάμεων είναι η υπέρθεση ημιτόνων

$$f_x(t) = A_d \sin(\omega_d t) - A_e \sin(\omega_e t) \quad (6-5)$$

$$f_z(t) = -2mg - A_d \cos(\omega_d t) + A_e \cos(\omega_e t) \quad (6-6)$$

Ενώ οι ροπές που επενεργούν γύρω από τους άξονες z και x περιγράφονται από τις σχέσεις

$$M_z(t) = -dA_d \sin(\omega_d t) + dA_e \sin(\omega_e t) \quad (6-7)$$

$$M_x(t) = dA_d \cos(\omega_d t) + dA_e \cos(\omega_e t) \quad (6-8)$$

Οι όροι A_d και A_e , περιγράφονται στις σχέσεις

$$A_d = m_d r_d \omega_d^2 \quad (6-9)$$

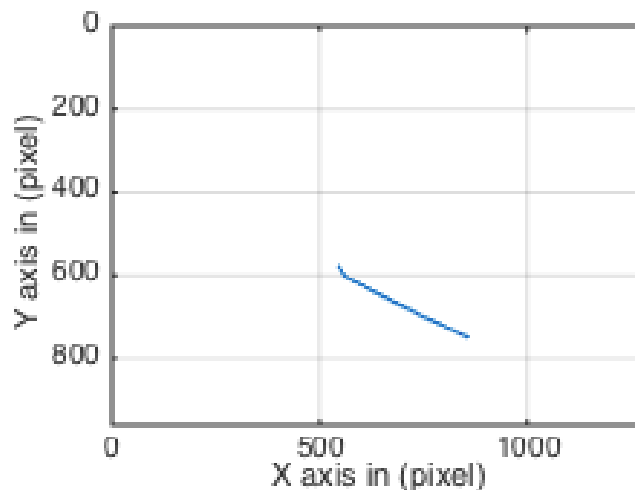
$$A_e = m_e r_e \omega_e^2 \quad (6-10)$$

Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις της κίνησης [12], όσο και με τα πειραματικά δεδομένα οι βασικές λειτουργικότητες της κίνησης επιβεβαιώνουν το μοντέλο. Το ρομπότ είναι σε θέση να κινηθεί προς τα προς, προς τα πίσω καθώς και διαγωνίως. Επίσης, όπως αναφέραμε, μπορεί να εκτελέσει περιστροφική κίνηση τόσο σε ωρολογιακή, όσο και σε ανθωρολογιακή φορά. Ρυθμίζοντας κατάλληλα τις στροφές των κινητήρων D και E μπορούμε να εκτελέσουμε τις συγκεκριμένες κινήσεις (Σχήμα 6-3). Όπως φαίνεται από το σχήμα, και επιβεβαιώνεται από πειραματικές δοκιμές, όταν κινείται μόνο ο ένας κινητήρας από τους δύο της πλατφόρμας και ο άλλος είναι ακίνητος, το ρομπότ εκτελεί διαγώνια κίνηση εξαιτίας της δράσης της δύναμης του κινητήρα και της δύναμης της τριβής που επιδρά στην πλατφόρμα.

ω_D^+/ω_E^-	ω_D^-/ω_E^+	$\omega_D^+/0$	$0/\omega_E^+$	$\omega_D^-/0$	$0/\omega_E^-$	ω_D^+/ω_E^+	ω_D^-/ω_E^-
↑	↓	↗	↘	↙	↖	↻	↻

Σχήμα 6-3. Δυνατές κινήσεις της ρομποτικής πλατφόρμας [15].

Σύμφωνα με το κινηματικό μοντέλο της μικρορομποτικής πλατφόρμας, όταν οι κινητήρες λειτουργούν με σύγχρονες στροφές τότε το μικρορομπότ εκτελεί γραμμική κίνηση. Στην πραγματικότητα, υπάρχει μία απόκλιση κατά τον άξονα τον y , η οποία αυξάνεται όσο το ρομπότ συνεχίζει να κινείται γραμμικά. Το Σχήμα 6-4, παρουσιάζει την παρασιτική κίνηση του ρομπότ κατά τον άξονα y .



Σχήμα 6-4. Η παρασιτική κίνηση της πλατφόρμας.

Η παρασιτική αυτή κίνηση του ρομπότ, οφείλεται σε μικρές ασυμμετρίες της μικρορομποτικής πλατφόρμας, έτσι ώστε το κέντρο περιστροφής δεν συμπίπτει με το κέντρο μάζας του ρομπότ. Στο [12] έγινε αναλυτική μελέτη για την παρασιτική μετατόπιση.

Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός αλγόριθμου κλειστού βρόχου ελέγχου θέσης.

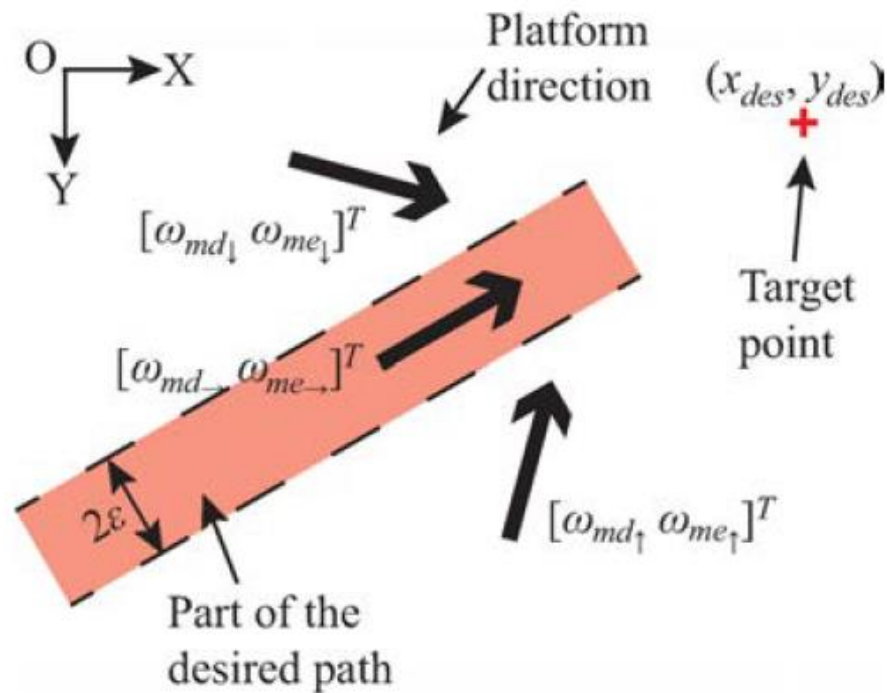
6.2 Αλγόριθμος ελέγχου

Στη δημοσίευση [13], παρουσιάζεται ένα αλγόριθμος κλειστού βρόχου για τον έλεγχο θέσης της μικρορομποτικής πλατφόρμας. Ο έλεγχος αφορά την μετατόπιση του τελικού σημείου δράσης του ρομπότ σε μία επιθυμητή θέση με συντεταγμένες (x_{des} , y_{des}). Λόγω της φύσης της μικρορομποτικής πλατφόρμας, ο έλεγχος υλοποιείται με τη χρήση κανόνων (rule-based), οι οποίοι έχουν εξαχθεί από την μελέτη των συμπερασμάτων των προσομοιώσεων και των πειραμάτων για τον προσδιορισμό της κίνησης.

Η βασική ιδέα, γύρω από τον αλγόριθμο παρουσιάζεται στην εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} \omega_d \\ \omega_e \end{bmatrix} = \begin{cases} [\omega_d \downarrow, \omega_e \downarrow], & \text{if } y < y_{des} - \varepsilon \\ [\omega_d \rightarrow, \omega_e \rightarrow], & \text{if } y_{des} - \varepsilon < y < y_{des} \\ [\omega_d \uparrow, \omega_e \uparrow], & \text{if } y > y_{des} \end{cases} \quad (6-11)$$

Ορίζεται μία περιοχή συνολικού πλάτους 2ε μέσα στην οποία θέλουμε να κινείται το ρομπότ (Σχήμα 6-5). Ταυτόχρονα, εφαρμόζουμε τρία ζεύγη γωνιακών ταχυτήτων ($\omega_d \rightarrow$, $\omega_e \rightarrow$), ($\omega_d \downarrow$, $\omega_e \downarrow$) και ($\omega_d \uparrow$, $\omega_e \uparrow$).



Σχήμα 6-5. Σχηματική αναπαράσταση του αλγορίθμου ελέγχου.

Το ζεύγος ($\omega_{d \rightarrow}, \omega_{e \rightarrow}$) αρχίζει να επιδρά στους κινητήρες του μικρορομπότ όταν αυτό βρίσκεται μέσα στην επιθυμητή περιοχή και αντιστοιχεί σε μία ευθεία κίνηση. Πρακτικά, όταν το μικρορομπότ βρίσκεται μέσα σε αυτή την περιοχή, θέλουμε να εκτελέσει ευθεία μετατόπιση, και να βρεθεί στην επιθυμητή θέση-στόχο.

Το ζεύγος ($\omega_{d \downarrow}, \omega_{e \downarrow}$), αφορά την περιοχή δεξιά της επιθυμητής ζώνης και αντιστοιχεί σε αριστερή διαγώνια κίνηση/στροφή.

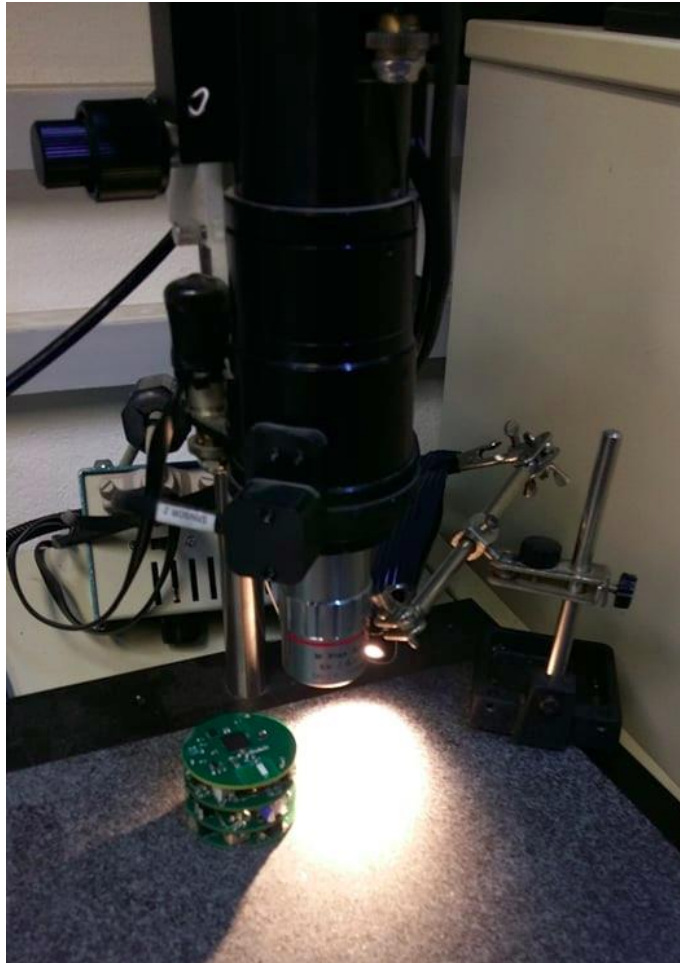
Το ζεύγος ($\omega_{d \uparrow}, \omega_{e \uparrow}$), αφορά την περιοχή αριστερά της επιθυμητής ζώνης και αντιστοιχεί σε δεξιά διαγώνια κίνηση/στροφή.

Όταν, λοιπόν, το ρομπότ βρεθεί εκτός της επιθυμητής ζώνης κατά τον άξονα τον y , το ρομπότ εκτελεί μικροδιορθώσεις έτσι ώστε να επανέλθει στην επιθυμητή θέση. Ο συγκεκριμένος, αλγόριθμος ελέγχου αφορά, συμπερασματικά, τον άξονα y και το σφάλμα/απόκλιση από την επιθυμητή θέση y_{des} . Για τον άξονα x , στηριζόμαστε στην κινηματική της πλατφόρμας, για την εμπρόσθια κίνηση, συνεπώς μόλις το ρομπότ φτάσει στην επιθυμητή θέση x , σταματάει παραγωγή παλμών PWM στους κινητήρες και το ρομπότ σταματάει την κίνηση του.

6.2.1 Μελέτη κάτω από το μικροσκόπιο

Εδώ τα πειράματα αφορούν την κίνηση του ρομπότ και τον έλεγχο της θέσης του κάτω από το μικροσκόπιο, με σκοπό να έχουμε έλεγχο της θέσης του μικρορομπότ σε επίπεδο μικρόμετρων (μm).

Η κάμερα που υπάρχει στη διάταξη κάμερας-μικροσκοπίου είναι η Marlin F-146B της εταιρείας Allied Vision Technologies, το μικροσκόπιο είναι από την εταιρία Edmund Optics με προσαρμοσμένο πάνω τον φακό εστίασης της εταιρείας Mitutoyo (Σχήμα 6-6).

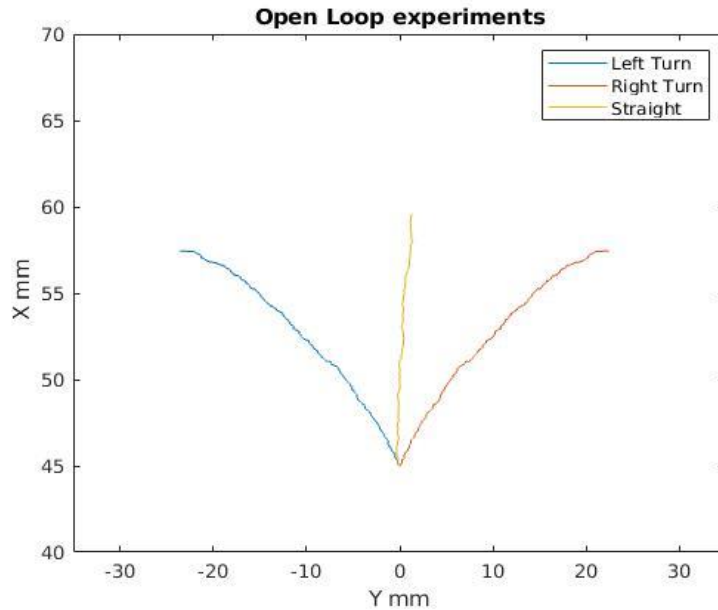


Σχήμα 6-6. Η διάταξη του μικροσκοπίου.

Η κάμερα επικοινωνεί με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του πρωτοκόλλου Firewire. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται laptop που διαθέτει ειδική θύρα εισόδου Firewire, στον οποίο έχουν εγκατασταθεί οι οδηγοί (drivers) ανάγνωσης της κάμερας. Στον υπολογιστή επίσης συνδέεται ο πομπός/δέκτης του ρολογιού Chronos ενώ υλοποιούνται οι αλγόριθμοι ανάλυσης της εικόνας και οι αλγόριθμοι ελέγχου. Παράλληλα, παράγονται τα σήματα των ταχυτήτων και τα αποστέλλει σειριακά στον πομπό. Ο πομπός στέλνει τα σήματα στο μικρορομπότ έτσι ώστε να εκτελέσει την επιθυμητή κίνηση.

Το σύστημα εντοπισμού θέσης της κάμερας του μικροσκοπίου αναγνωρίζει την άκρη της βελόνας, το οποίο αντιπροσωπεύει το τελικό σημείο δράσης του ρομπότ. Στη συνέχεια σύμφωνα με τον αλγόριθμο, εξάγονται οι γωνιακές ταχύτητες για τους δύο κινητήρες. Ο αλγόριθμος έχει υλοποιηθεί έτσι ώστε τα δεδομένα να εισάγονται σε παλμούς PWM. Σε κάθε χρονική στιγμή t της δειγματοληψίας, αποστέλλονται τα σήματα στο μικρορομπότ το οποίο εκτελεί την επιθυμητή κίνηση. Μόλις το ρομπότ προσεγγίσει την επιθυμητή θέση, εξάγονται τα αποτελέσματα γραφικά, ενώ αποθηκεύονται και τα frames της δειγματοληψίας της εικόνας από την κάμερα, ώστε να εξαχθεί το συνολικό βίντεο του πειράματος.

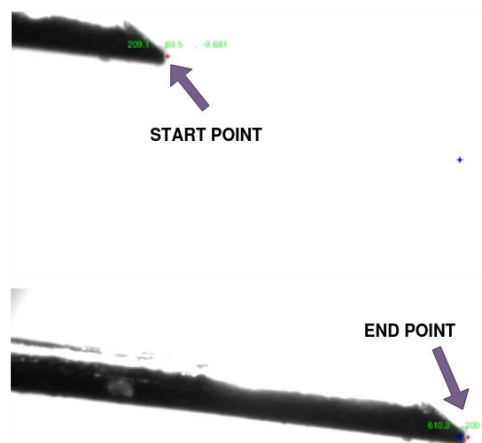
Για την υλοποίηση του αλγορίθμου που είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των ζευγών των γωνιακών ταχυτήτων έτσι ώστε να είναι δυνατή η υλοποίηση του αλγορίθμου. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η εκτέλεση πειραμάτων ανοιχτού βρόγχου έτσι ώστε να διαπιστωθούν οι αριθμοί (Σχήμα 6-7).



Σχήμα 6-7. Διεξαγωγή πειραμάτων ανοιχτού βρόχου.

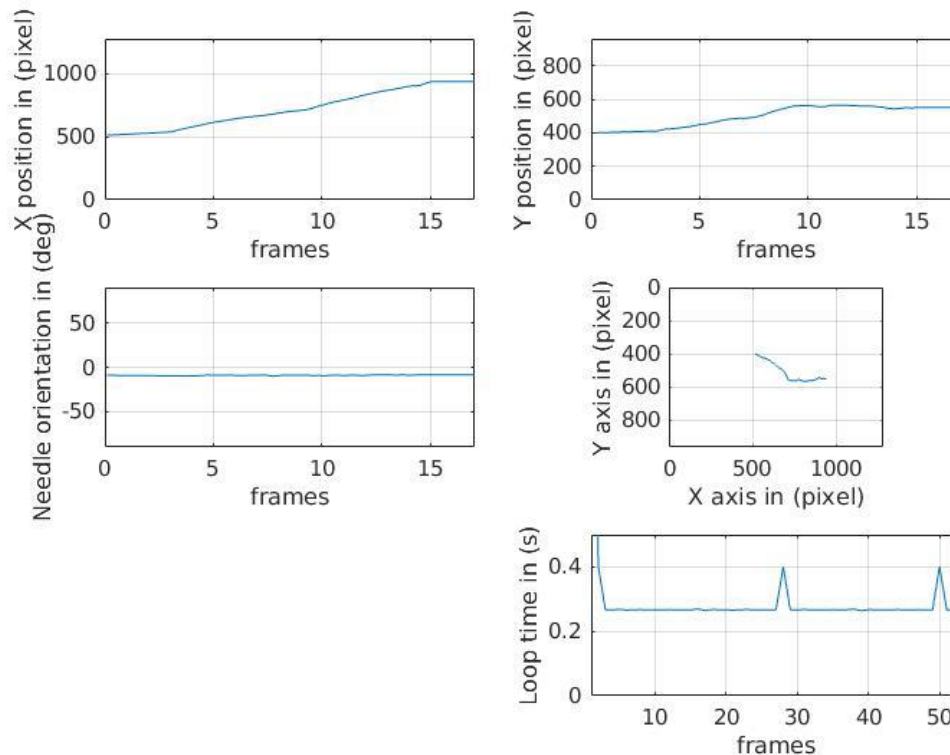
Στην ενότητα του ελέγχου, δεν χρησιμοποιήσαμε αλγόριθμο κλειστού βρόχου των στροφών του κινητήρα, έτσι ώστε να μπορούμε να στέλνουμε εντολές ταχύτητες στον ελεγκτή. Συνεπώς, θα δίνουμε εντολές PWM.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος, το μικρορομπότ τοποθετείται κάτω από το μικροσκόπιο. Στη συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος ελέγχου. Για την εκτέλεση του αλγορίθμου σαν αρχικό σημείο λαμβάνεται η αρχική θέση της βελόνας στο ΣΣ της κάμερας και σαν τελικό σημείο ένα προκαθορισμένο σημείο (x_{des} , y_{des}), το οποίο έχει προσδιοριστεί από πριν (Σχήμα 6-8). Πιο συγκεκριμένα, για την εκτέλεση του πειράματος επιλέχθηκε το σημείο (600,200) ως προς το ΣΣ της κάμερας. Τα μεγέθη αφορούν τα pixels της εικόνας.



Σχήμα 6-8. Η αναπαράσταση της βελόνας κάτω από το μικροσκόπιο κατά τη διάρκεια της κίνησης προς το τελικό επιθυμητό σημείο.

Τα αναλυτικά συγκεντρωτικά αποτελέσματα που αφορούν την κίνηση του ρομπότ στους δύο άξονες, τον προσανατολισμό της βελόνας, και την τροχιά που διέγραψε το τελικό σημείο δράσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-9.



Σχήμα 6-9. Τα αποτελέσματα του πειράματος κλειστού βρόγχου κάτω από το μικροσκόπιο.

6.2.2 Μελέτη εκτός μικροσκοπίου

Εκτός από την κίνηση κάτω από το μικροσκόπιο, έγινε και μελέτη του ελέγχου θέσης εκτός του μικροσκοπίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε σαν ανάδραση θέσης ο εντοπισμός θέσης μέσω των οπτικών αισθητήρων laser.

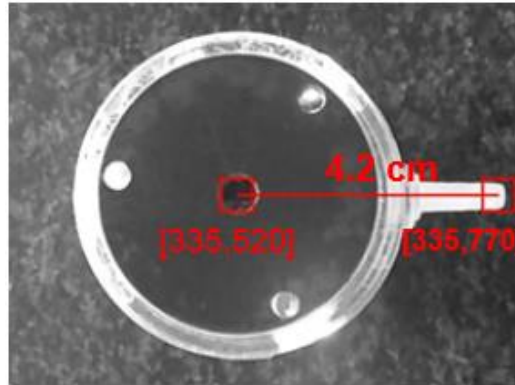
Για το πείραμα ελέγχτηκε μία κίνηση σε ευθεία γραμμή, κατά απόσταση 1.5cm. Η κίνηση αυτή αντιστοιχεί στην κίνηση του μικρορομπότ ώστε να προσεγγίσει το μικροσκόπιο ώστε να ξεκινήσει ο έλεγχος μέσω της κάμερας του μικροσκοπίου. Για το σκοπό αυτό τοποθετήθηκε το ρομπότ σε μία συγκεκριμένη θέση και παράλληλα έγινε καταγραφή της κίνησης μέσω μίας κάμερας. Η αρχική θέση του ρομπότ θεωρήθηκε ως το σημείο (0,0). Παράλληλα έγινε καταγραφή της κίνησης του μικρορομπότ από μία κάμερα για την επιβεβαίωση του εντοπισμού θέσης από τους οπτικούς αισθητήρες. Όπως και στο πείραμα κάτω από το μικροσκόπιο, ως τελικό σημείο δράσης του ρομπότ το οποίο θα μεταβεί στην επιθυμητή θέση (x_{des}, y_{des}) είναι η άκρη της βελόνας που έχει ενσωματωμένη το ρομπότ.

Η βελόνα μετρήθηκε ότι βρίσκεται σε απόσταση $R = 48$ mm από το κέντρο της απόστασης των δύο αισθητήρων. Συνεπώς, η αρχική θέση, σύμφωνα με την εξίσωση (5-21) εξάγεται ως $(x,y) = (48,0)$. Με το που ο αλγόριθμος ελέγχου αρχίζει και η κίνηση του ρομπότ, αρχίζει ο αλγόριθμος ελέγχου, ενώ παράλληλα οι τιμές των αποτελεσμάτων των οπτικών αισθητήρων αποστέλλονται στον υπολογιστή για καταγραφή.

Στο τέλος της κίνησης έχουμε σαν δεδομένα :

- Τις θέσεις που κατέγραψαν οι οπτικοί αισθητήρες, σε mm με αρχικό σημείο το σημείο (X,0).
- Τις απόλυτες θέσεις στο workspace που κατέγραψε η κάμερα σε τιμές pixels.

Για να μπορέσει να γίνει αντιστοίχιση ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα είναι απαραίτητο να μετατραπούν τα pixels σε mm σύμφωνα με κάποια γνωστά μεγέθη (Σχήμα 6-10)

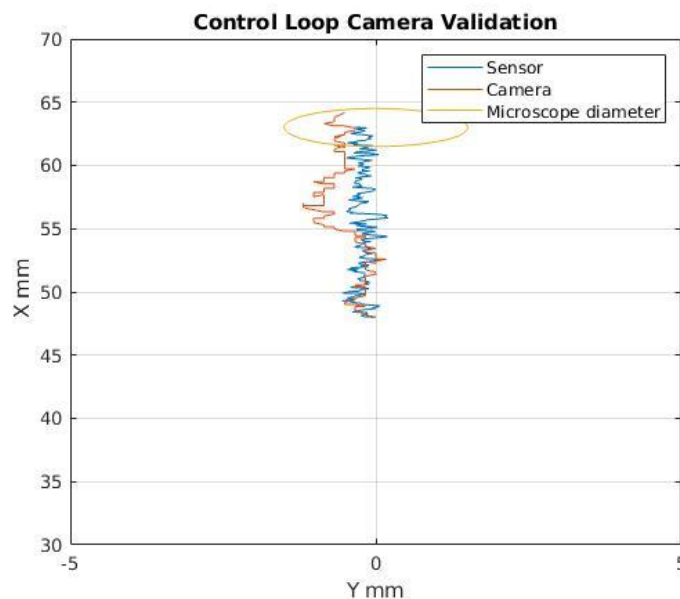


Σχήμα 6-10. Οι συντεταγμένες των αρχικών υποπεριοχών του ρομπότ στην ανάλυση του βίντεο.

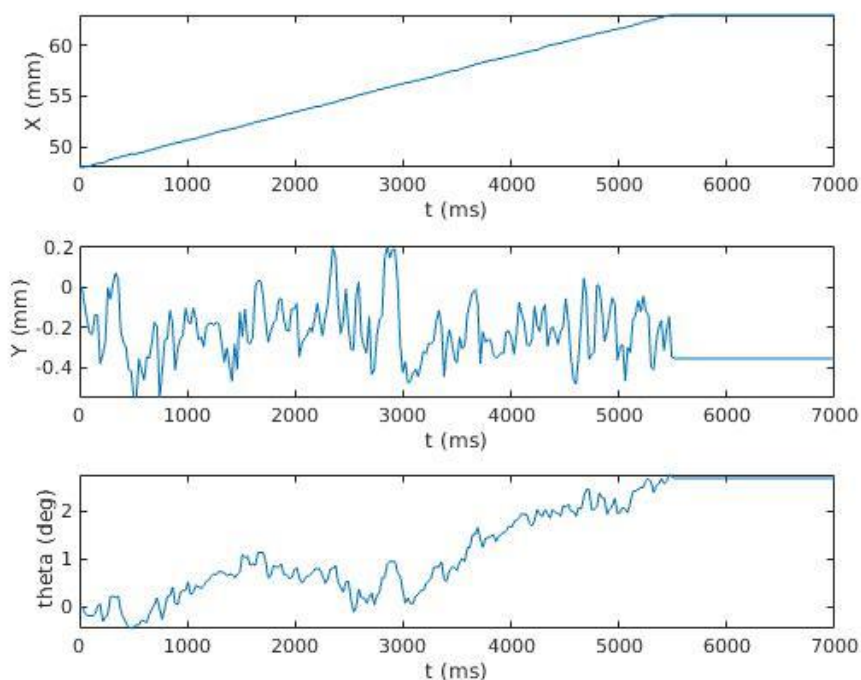
Συνεπώς, μετρώντας την πραγματική απόσταση του κέντρου του ρομπότ από την άκρη της βελόνας, βρίσκουμε το λόγο μετασχηματισμού ώστε να μετατραπεί κάθε εξαγόμενη μεταβλητή από pixel σε mm

$$K = \frac{D_{real}}{D_{pixel}} = \frac{42mm}{250 pixel} = 0.17 mm/pixel \quad (6-12)$$

Κάνοντας τα παραπάνω βήματα τα αποτελέσματα που εξήχθησαν φαίνονται στο Σχήμα 6-11 και στο Σχήμα 6-12.



Σχήμα 6-11. Εξακρίβωση εντοπισμού θέσης μέσω σύγκρισης με εξωτερική κάμερα.



Σχήμα 6-12. Αποτελέσματα κίνησης του ρομπότ με ανάδραση αισθητήρων θέσης.

Στα διαγράμματα, παρατηρούμε την αποτύπωση των εκτιμήσεων της θέσης από τους οπτικούς αισθητήρες, καθώς και την ένδειξη που πήραμε από την καταγραφή της κάμερας και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που έδωσε ο αλγόριθμος επεξεργασίας του βίντεο. Παράλληλα, αποτυπώνεται και η διάμετρος του μικροσκοπίου, έτσι ώστε να γίνει μία εκτίμηση εξακρίβωσης της δυνατότητας της μικρορομποτικής πλατφόρμας να βρεθεί κάτω από το μικροσκόπιο με ανάδραση από τους οπτικούς αισθητήρες.

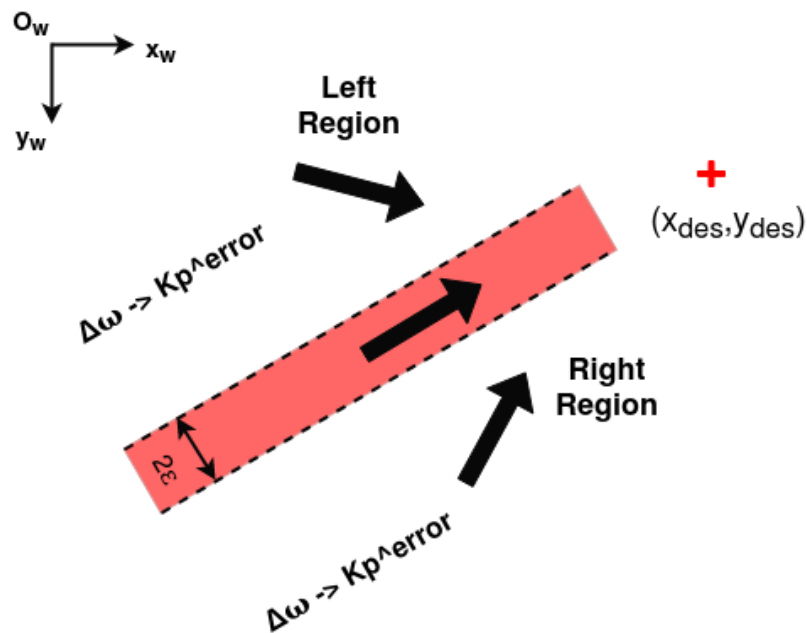
Όπως φαίνεται από τις πειραματικές δοκιμές, το σφάλμα που έχουμε λόγω της ανάδρασης είναι της τάξης των 1mm, ενώ και ο έλεγχος έχει σφάλμα γύρω στα 0.3mm. Το συνολικό σφάλμα που προκύπτει, δίνει ως αποτέλεσμα την είσοδο του μικρορομπότ κάτω από το μικροσκόπιο.

6.3 Περιγραφή επέκτασης αλγορίθμου ελέγχου

Ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα, έχει ως προϋπόθεση για την πραγματοποίηση του την υλοποίηση πειραμάτων ώστε να βρεθούν τα τρία ζεύγη των γωνιακών ταχυτήτων με τα οποία το ρομπότ θα κινηθεί εμπρός, δεξιά ή αριστερά. Τα μεγέθη αυτά δεν είναι απόλυτα και εξαρτώνται από το επίπεδο που θα τοποθετηθεί η μικρορομποτική πλατφόρμα ή την κλίση του επιπέδου. Μία μικρή αλλαγή σε κάποιο σταθερό μέγεθος, θα μας οδηγήσει σε αναζήτηση νέων πειραματικών δοκιμών για την εύρεση νέων γωνιακών ταχυτήτων που ικανοποιούν τις επιθυμητές κινήσεις.

Για το λόγο αυτό, έγινε μία πρώτη προσπάθεια επέκτασης του αλγορίθμου, έτσι ώστε να μην είναι απαραίτητη η διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών. Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, η εύρεση του είδους της κίνησης της πλατφόρμας γίνεται μέσω της ρύθμισης της διαφοράς των γωνιακών ταχυτήτων ω_d και ω_e . Η διαφορά τους ρυθμίζεται από έναν P όρο

ανάλογα με το σφάλμα της θέσης της πλατφόρμας σε σχέση με το επιθυμητό στον άξονα y (Σχήμα 6-13).



Σχήμα 6-13. Περιγραφή P ελέγχου της ρομποτικής πλατφόρμας.

Επομένως, το σφάλμα της επιθυμητής θέσης από την μετρούμενη τιμή προκύπτει :

$$error = y_{des} - y_{meas} \quad (6-13)$$

Και οι στροφές ρυθμίζονται ως εξής:

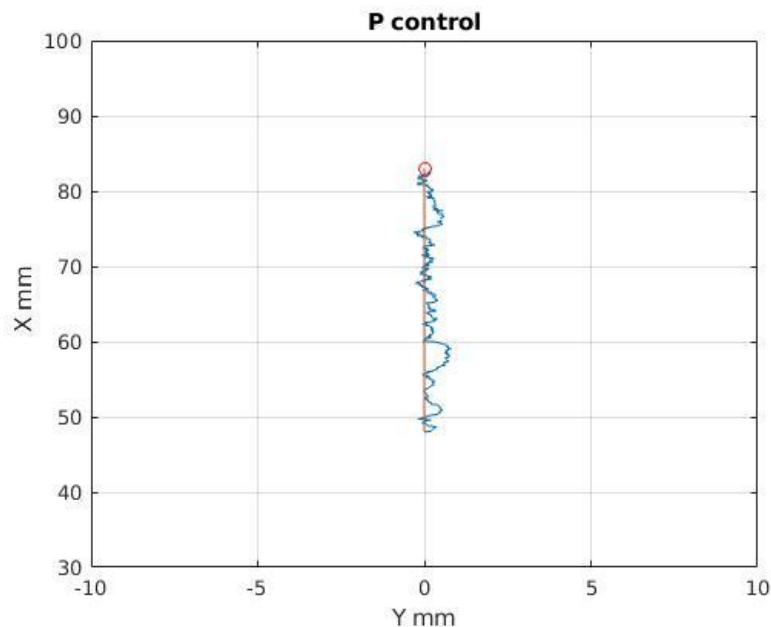
$$\omega_D = \omega_D - K_p \cdot error, \text{ εάν } |error| > \varepsilon \quad (6-14)$$

$$\omega_E = \omega_E + K_p \cdot error, \text{ εάν } |error| > \varepsilon \quad (6-15)$$

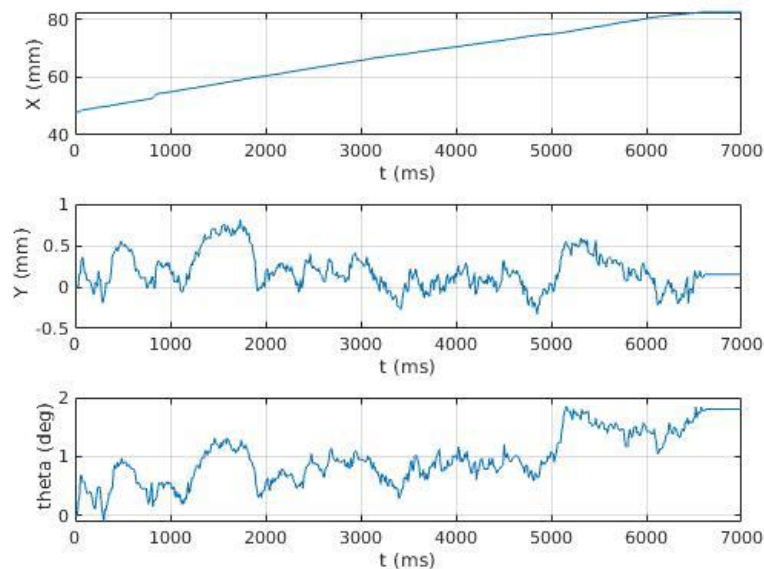
Συνεπώς, από την παραπάνω εξίσωση και την αποτύπωση στο Σχήμα 6-13, όταν η βελόνα του ρομπότ βρίσκεται αριστερά της ζώνης επιθυμητής θέσης y, θα αυξάνεται η γωνιακή ταχύτητα του αριστερού κινητήρα ω_D και ταυτόχρονα θα μειώνεται η γωνιακή ταχύτητα του δεξιού κινητήρα ω_E . Παράλληλα, εφαρμόζονται κατώφλια (thresholds) στις τιμές που μπορούν να λάβουν οι ω_D και ω_E , έτσι ώστε το ρομπότ να μην βρεθεί σε στατική περιοχή ή περιοχή αναπήδησης.

Παράλληλα με τον αλγόριθμο, αναπτύχθηκε και διαδικασία για την ομαλή εκκίνηση της πλατφόρμας, έτσι ώστε να αποφευχθούν οι απότομες ταλαντώσεις κατά την εκκίνηση. Αυξάνοντας σταδιακά τα PWM που δίνονται στους δύο επενεργητές, αυξάνουμε τη γωνιακή ταχύτητα μέχρι να ξεπεράσει την οριακή τιμή της στατικής περιοχής και να αρχίσει να κινείται. Μέσω της ανάγνωσης των οπτικών αισθητήρων μπορούμε να προσδιορίσουμε πότε το ρομπότ αρχίζει την κίνηση του και να εισαχθεί ο αλγόριθμος ελέγχου της κίνησης της πλατφόρμας.

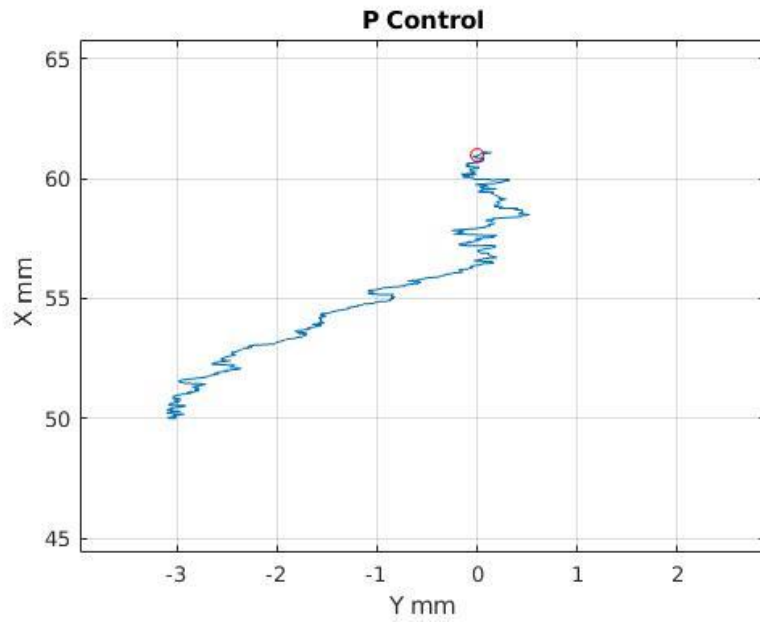
Εφαρμόζοντας τον παραπάνω αλγόριθμο ελέγχου με ανάδραση την εκτίμηση της θέσης μέσω των οπτικών αισθητήρων λαμβάνουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 6-14 έως το Σχήμα 6-17. Μελετώνται δύο περιπτώσεις. Μία περίπτωση όπου το ρομπότ εκτελεί ευθεία κίνηση μέχρι ενός επιθυμητού σημείου (x_{des}, y_{des}) , όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-14, και μία περίπτωση όπου η αρχική θέση του ρομπότ είναι διαφορετική από την επιθυμητή κατά τον άξονα τον y (Σχήμα 6-16).



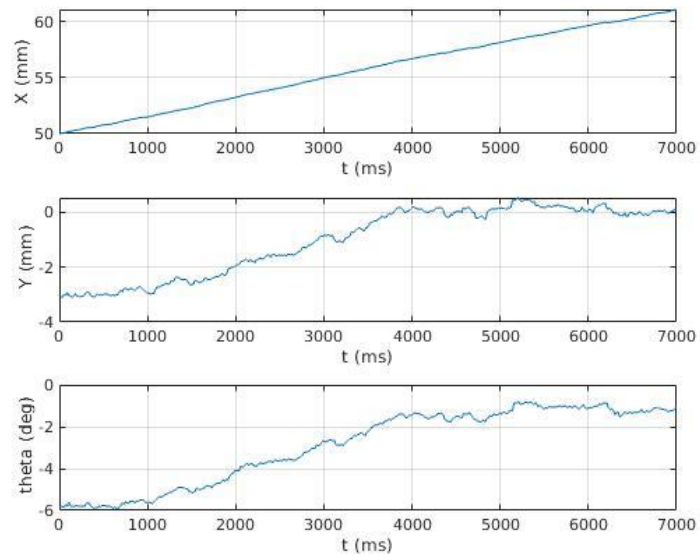
Σχήμα 6-14. Αποτελέσματα ευθείας κίνησης στους άξονες x-y.



Σχήμα 6-15. Αποτελέσματα προσανατολισμού και x,y συντεταγμένων στο πείραμα ευθείας.



Σχήμα 6-16. Αποτελέσματα εύρεσης σημείου στους άξονες x-y.



Σχήμα 6-17. Αποτελέσματα προσανατολισμού και x,y συντεταγμένων στο πείραμα εύρεσης σημείου.

7 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε η χρήση των επιθυμητών αισθητήρων που ήταν απαραίτητοι για την επέκταση της λειτουργίας της μικρορομποτικής πλατφόρμας. Ενσωματώθηκε η μέτρηση ταχύτητας των στροφών στο νέο σχεδιασμό και έγιναν πειράματα εξακρίβωσης της λειτουργίας τους. Καταγράφηκαν εκτενώς οι πρακτικές που χρησιμοποιήθηκαν σε επίπεδο λογισμικού για τη μέτρηση των στροφών των κινητήρων μέσω της χρήσης των αναγκαίων χρονοιστών, ενώ μελετήθηκε η παραγωγή των παλμών ενεργοποίησης των κινητήρων. Έπειτα αναλύθηκε η υλοποίηση του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου SPI που είναι απαραίτητο για τη σωστή λειτουργία των οπτικών αισθητήρων. Παράλληλα, μελετήθηκε η ενεργοποίηση σε επίπεδο μικροελεγκτή του αναλογικοψηφιακού μετατροπέα για τη μέτρηση των αναλογικών σημάτων και πιο συγκεκριμένα του αισθητήρα δύναμης που αναλύθηκε στην εργασία [21].

Παράλληλα, επεκτάθηκε η ασύρματη επικοινωνία της εργασίας [20] για την αποστολή ολοκληρωμένων πακέτων μέσω επικοινωνιακού πρωτοκόλλου σε δύο κατευθύνσεις: από το μικρορομπότ στον Η/Υ και αντίστροφα.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε το σύστημα εντοπισμού θέσης. Αναλύθηκαν οι εξισώσεις που μας δίνουν τη θέση του ρομπότ με εισόδους τις συντεταγμένες των οπτικών αισθητήρων και έγιναν πειραματικές μετρήσεις. Αναλύθηκε το είδος του σφάλματος και δόθηκε μια διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων.

Τέλος, εξετάστηκε η κίνηση του μικρορομπότ έξω και κάτω από το μικροσκόπιο. Επιβεβαιώθηκαν τα πειράματα που είχαν γίνει κάτω από το μικροσκόπιο με προηγούμενη έκδοση του μικρορομπότ και χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ελέγχου με ανάδραση τους οπτικούς αισθητήρες. Εξακριβώθηκε η δυνατότητα προσέγγισης του μικροσκοπίου μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων με ανάλυση του βίντεο εξωτερικής κάμερας, ενώ επεκτάθηκε ο αλγόριθμος ελέγχου με τη χρήση ενός P ελεγκτή.

7.2 Μελλοντική εργασία

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της εργασίας αναδεικνύονται κάποιες μελλοντικές κατευθύνσεις επέκτασης και βελτίωσης της λειτουργίας του μικρορομποτικού μηχανισμού.

Όσον αφορά την ανάδραση θέσης, κύριος στόχος είναι η μείωση του προσθετικού σφάλματος των αισθητήρων laser. Κάποια βήματα που θα μπορούσαν να ακολουθηθούν είναι:

- Η εύρεση αλγορίθμου διόρθωσης των σφαλμάτων του αισθητήρα, μέσω της χρήσης της σταθερής μεταβλητής της απόστασης.
- Η χρήση ενός ακόμα οπτικού αισθητήρα. ΜΕ τον τρόπο αυτό, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες μέθοδοι υπολογισμού της εκτίμησης θέσης, καθώς με τον τρόπο αυτό θα είχαμε 3 βαθμούς ελευθερίας παραπάνω, λόγω της ύπαρξης 6 μεταβλητών εισόδων και 3 επιθυμητών μεταβλητών εξόδου (x,y,θ).

- Η χρήση εξωτερικής κάμερας. Με τον τρόπο αυτό, θα μπορούσε να γίνει διόρθωση της εξόδου των αισθητήρων, λόγω της μικρότερης δειγματοληψίας με την οποία λειτουργεί η κάμερα σαν αισθητήρας ανάδρασης. Επίσης, η κάμερα θα βοηθούσε, στην εξακρίβωση της αρχικής θέσης της πλατφόρμας κάθε φορά στο χώρο εργασίας, λόγω της αδυναμίας εντοπισμού της απόλυτης θέσης κάθε χρονικής στιγμής μέσω των οπτικών αισθητήρων.

Όσον αφορά τον αλγόριθμο ελέγχου κάποιες μελλοντικές δυνατότητες είναι

- Η διεξαγωγή προσομοιώσεων με βάση το υπάρχον κινηματικό μοντέλο της πλατφόρμας και η σύγκριση των αποτελεσμάτων
- Η επέκταση του P ελέγχου με εισαγωγή I και D όρων
- Η συστηματική εύρεση των κερδών
- Η μελέτη του συγκεκριμένου αλγορίθμου κάτω από το μικροσκόπιο

Βιβλιογραφία

- [1] Bonarini A., Matteucci M., and Restelli M., “A kinematic-independent dead-reckoning sensor for indoor mobile robotics,” in *Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 4, 2004, pp. 3750–3755.
- [2] Bonarini A., Matteucci M., and Restelli M., “Automatic error detection and reduction for an odometric sensor based on two optical mice,” in *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, April 2005, pp. 1675–1680.
- [3] Bracewell, R. “Pentagram Notation for Cross Correlation. The Fourier Transform and Its Applications”. *New York: McGraw-Hill*, pp. 46 and 243, 1965.
- [4] Brufau J. et al. “MICRON: Small Autonomous Robot for Cell Manipulation Applications”, *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Volume, Issue*, 18-22 April 2005, pp. 844 –849.
- [5] Cimino Mauro and Pagilla R. Prabhakar, “Location of optical mouse sensors on mobile robots for odometry”, *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 3-8, 2010, Anchorage, Alaska, USA, pp 5429-5434.
- [6] Eshaghi, K., Li, Y., Kashino, Z., Nejat, G., & Benhabib, B. (2020). “mROBerTO 2.0\$ - An Autonomous milli-Robot with Enhanced Locomotion for Swarm Robotics.”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1–1, 2020.
- [7] Martel S., Ph.D “Introduction to the NanoWalker: A miniature autonomous robot capable of various tasks at the molecular and atomic scales”, *Phd Thesis*, BioInstrumentation Laboratory Massachusetts Institute of Technology May 2000.
- [8] Otsu, N., “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 1979, pp. 62–66.
- [9] Paijens, A. F. M., Huang, L., & Al-Jumaily, A. M., “Implementation and calibration of an odometry system for mobile robots, based on optical computer mouse sensors”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 301, 111731, 2020.
- [10] S. Hellan and F. Storvik, “Using the CC1101 in the European 868 MHz SRD band”, *Application Report, AN050*–April 2009.
- [11] Vartholomeos P. and Papadopoulos E., “Analysis, design and control of a planar micro-robot driven by two centripetal-force actuators”, *Proc. Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA’06)*, Orlando, FL, USA, May 15–19, 2006, pp. 649–654.
- [12] Vartholomeos P. and Papadopoulos E., “Dynamics, design and simulation of a novel microrobotic platform employing vibration microactuators,” *J. Dynamic Syst., Meas. Control, ASME*, vol. 128, pp. 122–134, March 2006.
- [13] Vartholomeos P., Vlachos K., and Papadopoulos E., “Analysis and motion control of a centrifugal-force microrobotic platform”, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*10(3), 2013, pp. 545–553.
- [14] Vincent Chan, Steve Underwood, Mars Leung, Roc Yu, “CC430-Based Simple Wireless Mesh Network Mains Switch”, *Application Report, SLAA487*–April 2011.
- [15] Vlachos K., Papadimitriou D., and Papadopoulos E., “Vibration-Driven Microrobot Positioning Methodologies for Nonholonomic Constraint Compensation”, *Engineering Transactions of CAE, (Special Issue on Robotics-invited)*, vol. 1, no. 1, 2015, pp. 66–72.
- [16] Βαρθολομαίος Παναγιώτης, «Μοντελοποίηση και Έλεγχος Μικρορομποτικών Συστημάτων». *Διδακτορική Διατριβή*, ΕΜΠ 2007, ΑΘΗΝΑ.

- [17] Δημητρόπουλος Χρύσανθος, «Κατασκευή και προγραμματισμός αναβαθμισμένου αυτόνομου μικρορομπότ με φυγοκεντρική επενέργεια». *Μεταπτυχιακή Εργασία*, ΕΜΠ 2014, ΑΘΗΝΑ.
- [18] Δημητρόπουλος Χρύσανθος, «Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ασύρματης Επικοινωνίας Μικροεπεξεργαστών με Εφαρμογή στην Οδήγηση Μικρορομποτικού Μηχανισμού». *Διπλωματική Εργασία*, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ 2012, ΑΘΗΝΑ.
- [19] Καλλίσης Π. Νικόλαος, «Σχεδιασμός και υλοποίηση συστήματος οπτικών αισθητήρων για τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού σώματος», *Διπλωματική Εργασία*, ΕΜΠ 2011, ΑΘΗΝΑ.
- [20] Λαμπούσης Χαράλαμπος, «Ανάπτυξη και Υλοποίηση Συστήματος Οπτικών Αισθητήρων και Ασύρματης Επικοινωνίας Μικρορομποτικής Πλατφόρμας», *Μεταπτυχιακή Εργασία*, ΕΜΠ 2017, ΑΘΗΝΑ.
- [21] Λαμπούσης Χαράλαμπος, «Σχεδιασμός και Κατασκευή βελτιωμένης μικρορομποτικής πλατφόρμας με δυνατότητα ανάδρασης δύναμης», *Μεταπτυχιακή Εργασία*, ΕΜΠ 2020, ΑΘΗΝΑ.
- [22] Μαχαιράς Κωνσταντίνος, «Σχεδιασμός και υλοποίηση ηλεκτρικού/ ηλεκτρονικού υποσυστήματος, και προγραμματισμός πραγματικού χρόνου ρομπότ διαστημικού εξομοιωτή», *Διπλωματική Εργασία*, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ 2013, ΑΘΗΝΑ.
- [23] Μουγιάκος Κωνσταντίνος, «Υλοποίηση Συστήματος Ελέγχου Αυτόνομου Μικρορομπότ με Μικροελεγκτή PIC», *Μεταπτυχιακή Εργασία*, ΕΜΠ 2007, ΑΘΗΝΑ.
- [24] Παρασκευάς Σ, Ιωσήφ, «Ανάπτυξη συστήματος οπτικών αισθητήρων για εντοπισμό θέσης ρομπότ σε επίπεδη κίνηση», *Μεταπτυχιακή Εργασία*, ΕΜΠ 2007, ΑΘΗΝΑ.
- [25] Σπάρταλη Ηλιάνα, «Αναγνώριση παραμέτρων και έλεγχος στροφών μικροκινητήρων δόνησης μικρορομποτικής πλατφόρμας», *Μεταπτυχιακή Εργασία*, ΕΜΠ 2013, ΑΘΗΝΑ.
- [26] Σούλης Γεράσιμος, «Σχεδιασμός και Υλοποίηση κυκλωμάτων ασύρματης επικοινωνίας, οδήγησης και ελέγχου αυτόνομης μικρορομποτικής πλατφόρμας», *Μεταπτυχιακή Εργασία*, ΕΜΠ 2009, ΑΘΗΝΑ.
- [27] Τεγοπούλου Β. Αναστασία, «Παρασκευάς Σ, Ιωσήφ, «Ανάπτυξη συστήματος οπτικών αισθητήρων για εντοπισμό θέσης ρομπότ σε επίπεδη κίνηση», *Μεταπτυχιακή Εργασία*, ΕΜΠ 2011, ΑΘΗΝΑ.

Datasheets

- [28] ADNS-7550 Integrated molded lead-frame DIP Sensor.
- [29] CC430 Family User's Guide (Rev. E)
- [30] CC430F613x, CC430F612x, CC430F513x MSP430 SoC With RF Core (Rev. H). Sep 2013.

Παράρτημα Α

SPI

Η μονάδα σύγχρονης σειριακής επικοινωνίας (Serial Peripheral Interface – SPI) είναι ένας δίαυλος επικοινωνίας κοντινών αποστάσεων μεταξύ των μικροελεγκτών και διάφορων άλλων περιφερειακών συσκευών, όπως οι μετατροπείς αναλογικού-σε-ψηφιακό, και χρησιμοποιείται ευρέως σε ενσωματωμένα συστήματα.

Υλικό του SPI

Η αρχιτεκτονική της επικοινωνίας είναι το μοντέλο μίας κύριας συσκευής (master) η οποία αρχικοποιεί και ελέγχει μία η περισσότερες δευτερεύουσες συσκευές (slaves). Η επικοινωνία προϋποθέτει τη συμφωνία μεταξύ κύριας και δευτερεύουσας συσκευής στις ρυθμίσεις του σήματος χρονισμού. Τέσσερα σήματα χρειάζονται για την επικοινωνία: MISO, MOSI, SCK και SS. Η λειτουργία κάθε σήματος είναι η εξής:

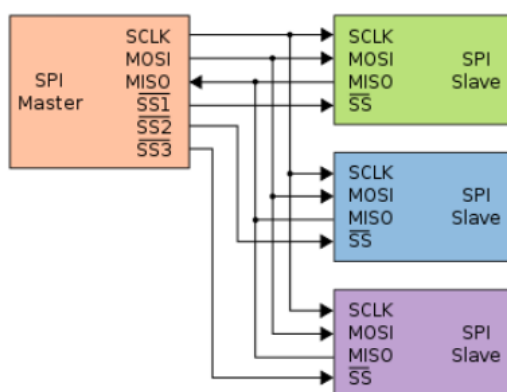
MISO (Master In Slave Out): Η έξοδος των σημάτων της δευτερεύουσας συσκευής.

MOSI (Master Out Slave In): Η έξοδος των σημάτων της κύριας συσκευής.

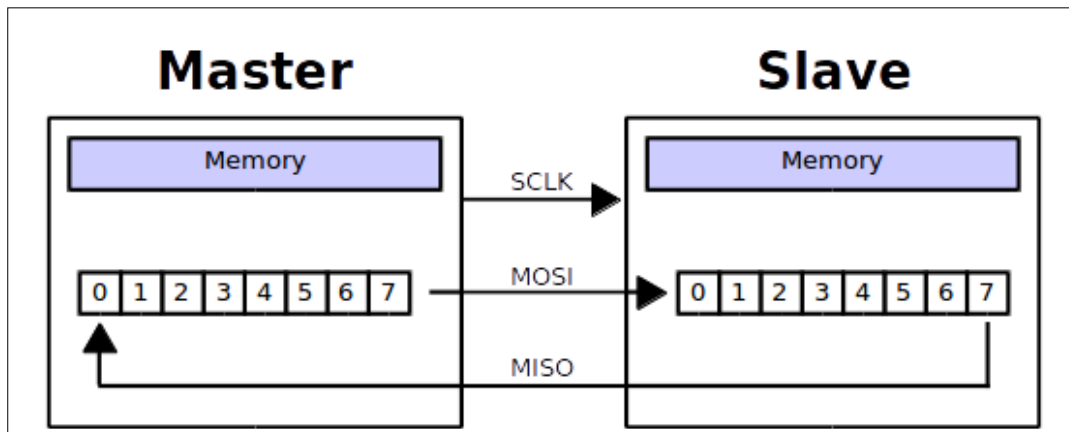
SCK(Serial Clock): Στην κύρια διάταξη είναι η έξοδος του σήματος της γεννήτριας χρονισμού, ενώ στην δευτερεύουσα είναι η είσοδος του σήματος χρονισμού.

SS (Slave Select): Το σήμα επιλογής δευτερεύουσας συσκευής. Όταν είναι σε υψηλή κατάσταση (high), όλοι οι ακροδέκτες των δευτερευουσών διατάξεων είναι είσοδοι και δεν λαμβάνουν δεδομένα από τη μονάδα SPI. Όταν είναι σε χαμηλή κατάσταση η μονάδα SPI ενεργοποιείται, Το λογισμικό της κύριας ελέγχει τη γραμμή SS κάθε δευτερεύουσας. Στην κύρια διάταξη, η συμπεριφορά του ακροδέκτη SS εξαρτάται από τη κατεύθυνση δεδομένων του ακροδέκτη. Αν ο SS ρυθμιστεί ως έξοδος, τότε δεν επιδρά στην μονάδα SPI. Αν ρυθμιστεί ως είσοδος, τότε πρέπει να διατηρηθεί σε υψηλή κατάσταση για να επιτύχουμε κύρια λειτουργία (master).

Στο Σχήμα φαίνεται η επικοινωνία της κύριας συσκευής με περισσότερες περιφερειακές:



Μετάδοση δεδομένων



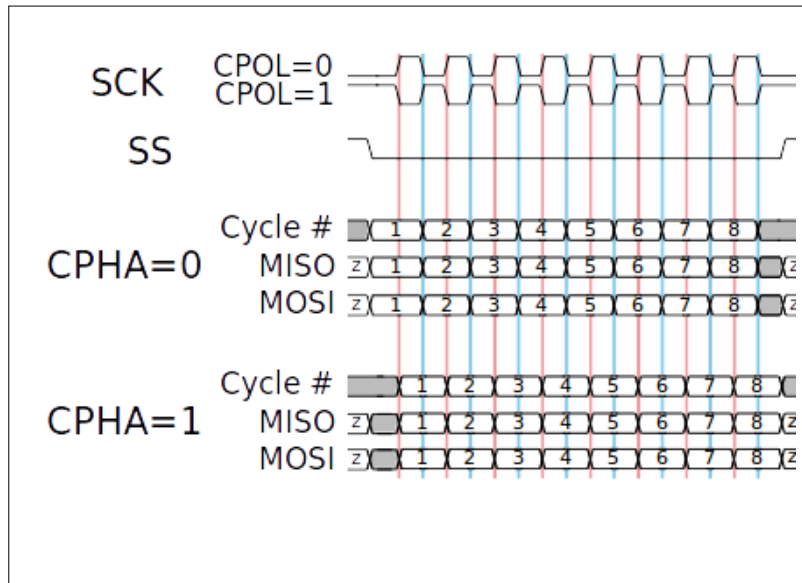
Ο πυρήνας της μονάδας SPI είναι ένας 8-bit καταχωρητής ολίσθησης, που βρίσκεται και στις δύο συσκευές όπως φαίνεται στο σχήμα. Πριν αρχίσει η επικοινωνία, η κύρια συσκευή ρυθμίζει το ρολόι, που συνήθως είναι της τάξεως των MHz. Ύστερα, γίνεται η επιλογή της περιφερειακής συσκευής μέσω της θύρας SS, η οποία μεταβαίνει στο λογικό 0 για την επιλεγμένη γραμμή μεταφοράς. Σε μερικές περιπτώσεις, είναι απαραίτητη μία περίοδος αναμονή μέχρι την αρχή της επικοινωνίας, η οποία εξαρτάται από την εκάστοτε περιφερειακή συσκευή. Οι δύο συσκευές τοποθετούν τα δεδομένα τους στους καταχωρητές ολίσθησης.

Με το που αρχίσει η επικοινωνία η κύρια συσκευή παράγει 8 παλμούς ρολογιού και τα περιεχόμενα του καταχωρητή ολίσθησης του master μεταφέρονται στον slave και αντίστροφα. Αυτό σημαίνει ότι η επικοινωνία SPI είναι αμφίδρομη. Σε κάθε bit που στέλνει η κύρια συσκευή μέσω του διαύλου MOSI, η περιφερειακή συσκευή στέλνει το πρώτο bit του καταχωρητή ολίσθησης μέσω της γραμμής MISO.

Η επιλογή του bit που θα μεταφερθεί από τον καταχωρητή ολίσθησης της κάθε συσκευής, εξαρτάται κυρίως από την περιφερειακή σύσκευή και ποιο μοντέλο υποστηρίζει. Όσον αφορά την κύρια συσκευή, η επιλογή αυτή ρυθμίζεται στις αρχικοποιήσεις της επικοινωνίας. Συνηθέστερη περίπτωση είναι η μετάδοση των δεδομένων να αρχίζει με το πιο σημαντικό bit (MSB). Μετά το τέλος της μετάδοσης η κύρια και η δευτερεύουσα συσκευή έχουν πλέον ανταλλάξει περιεχόμενο στους καταχωρητές ολίσθησης. Εάν είναι απαραίτητη η συνέχιση της μετάδοσης νέων δεδομένων, τότε οι καταχωρητές φορτώνονται εκ νέου και ξεκινάει η ίδια διαδικασία. Όταν η τερματίζει οριστικά η μετάδοση, η κύρια συσκευή σταματά να στέλνει σήματα ρολογιού και συνήθως αποσυνδέει την περιφερειακή συσκευή **Invalid source specified**.

Πόλωση και φάση σήματος ρολογιού

Η κύρια συσκευή πέρα από την ρύθμιση της συχνότητας λειτουργίας του ρολογιού, ρυθμίζει και την πόλωση σήματος ρολογιού (Clock Polarity – CPOL) και τη φάση σήματος ρολογιού (CPHA).



Για τον καθορισμό των τιμών λειτουργίας της φάση και της πόλωσης διακρίνουμε τις παρακάτω καταστάσεις:

Όταν η πόλωση είναι CPOL=0 η τιμή βάσης του ρολογιού είναι το 0, επομένως η ενεργή κατάσταση του είναι στο λογικό 1 και η κατάσταση αδράνειας στο λογικό 0.

- Όταν η φάση είναι ίση με CPHA=0, τα δεδομένα λαμβάνονται κατά την θετική ακμή του σήματος χρονισμού και εξάγονται κατά την αρνητική
- Όταν η φάση είναι ίση με CPHA=1, τα δεδομένα λαμβάνονται κατά την αρνητική ακμή και εξάγονται κατά την θετική.

Όταν η πόλωση είναι ίση με CPOL=1, τότε η τιμή βάσης του ρολογιού είναι το 1, επομένως η ενεργή κατάσταση του είναι στο λογικό 0 και η κατάσταση αδράνειας στο λογικό 1.

- Όταν η φάση είναι ίση με CPHA=0, τα δεδομένα λαμβάνονται κατά την αρνητική ακμή και εξάγονται κατά την θετική.
- Όταν η φάση είναι ίση με CPHA=1, τα δεδομένα λαμβάνονται κατά την θετική ακμή του σήματος χρονισμού και εξάγονται κατά την αρνητική.

Επομένως όταν η CPHA=0, η δειγματοληψία πραγματοποιείται στην αρχή της φάσης χρονισμού, δηλαδή στην πρώτη ακμή του παλμού ρολογιού. Όταν η CPHA=1, η δειγματοληψία πραγματοποιείται στο τέλος της φάσης χρονισμού, δηλαδή στη δεύτερη ακμή, είτε θετική είτε αρνητική.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της επικοινωνίας SPI συνοψίζονται στα:

- ✓ Είναι αμφίδρομη επικοινωνία
- ✓ Μεγάλη ευελιξία για τα μεταφερόμενα bits

- ✓ Δεν περιορίζεται στην μεταφορά 8-bit λέξεων
- ✓ Σχετικά απλή διεπαφή υλικού
- ✓ Χαμηλότερες απαιτήσεις ισχύος σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα όπως το I²C
- ✓ Η δευτερεύουσα επαφή χρησιμοποιεί το ρολόι της κύριας και δεν χρειάζεται ταλαντωτής
- ✓ Η δευτερεύουσα συσκευή δεν χρειάζεται μοναδική διεύθυνση
- ✓ Χρησιμοποιεί 4 ακροδέκτες, τα οποία είναι πολύ λιγότερα από άλλες παράλληλες επικοινωνίες
- ✓ Έχει μόνο μία μοναδική θύρα για κάθε συσκευή (την SS). Όλες οι υπόλοιπες μοιράζονται
- ✓ Τα σήματα είναι μονής κατεύθυνσης, επιτρέποντας εύκολη γαλβανική απομόνωση

Τα κυριότερα μειονεκτήματα του είναι:

- * Χρειάζεται περισσότερους ακροδέκτες σε σχέση με το I²C πρωτόκολλο.
- * Δεν υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου ροής από την περιφερειακή συσκευή
- * Δεν είναι δυνατή η αναγνώριση ύπαρξης δευτερεύουσας συσκευής σε υλικό επίπεδο
- * Υποστηρίζει μόνο μία κύρια συσκευή
- * Δεν έχει οριστεί πρωτόκολλο ελέγχου σφαλμάτων
- * Είναι συμβατό για επικοινωνία μικρών αποστάσεων