



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.  
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**Ανάπτυξη και Υλοποίηση Συστήματος Οπτικών Αισθητήρων και Ασύρματης  
Επικοινωνίας Μικρορομποτικής Πλατφόρμας**

Χαράλαμπος Λαμπούσης

*Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος*

ΑΘΗΝΑ 2017



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται περιγραφή της κατασκευής μιας νέας βαθμίδας του μικρορομπότ του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π. που φέρει σύστημα οπτικών αισθητήρων laser με σκοπό την ανάγνωση της θέσης του, καθώς και περιγραφή της υλοποίησης ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ μικρορομπότ-Η/Υ.

Στο πλαίσιο της κατασκευής της βαθμίδας με τους οπτικούς αισθητήρες laser, μελετήθηκε αρχικά ο τρόπος κίνησης και η κατασκευαστική δομή του μικρορομπότ, με σκοπό την μελέτη των περιορισμών που θα πρέπει να ακολουθηθούν για τη σχεδίαση της πλακέτας. Παράλληλα κατασκευάστηκε δοκιμαστική πλακέτα για τον έλεγχο της λειτουργίας των οπτικών αισθητήρων laser που θα χρησιμοποιηθούν στο μικρορομπότ και πραγματοποιήθηκαν πειράματα. Η εισαγωγή του επιπλέον επιπέδου με τους οπτικούς αισθητήρες, δίνει τη δυνατότητα στο μικρορομπότ να αναγνωρίζει τη θέση του στο χώρο εργασίας και να πηγαίνει ελεγχόμενα με οποιοδήποτε προσανατολισμό στη θέση κάτω από το μικροσκόπιο.

Για την υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας του μικρορομπότ με τον προσωπικό υπολογιστή σχεδιάστηκε πρωτόκολλο επικοινωνίας για την τοπολογία Point to Point του συστήματος. Η υλοποίηση αυτή έγινε με σκοπό την αποστολή δεδομένων των παραπάνω αισθητήρων στον Η/Υ, για την πραγματοποίηση ελέγχου θέσης του ρομπότ. Έτσι για την επικοινωνία αυτή, υλοποιήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα που υποστηρίζει τηλεμετρία, με τη χρήση του οποίου ο ηλεκτρονικός υπολογιστής αιτείται την αποστολή δεδομένων λειτουργίας δίνοντας τη δυνατότητα μιας πιο λεπτομερούς εποπτείας των υποσυστημάτων του κάθε μικρορομπότ.

## **Abstract**

In this diploma thesis we describe the manufacturing of a new board, which will be included in the assembly of the microrobot of the NTUA's Control System Lab. The board carries a system of optical laser sensors used for reading the robot's position. Furthermore, in this thesis we describe the implementation of a wireless communication between the microrobot and a personal computer (PC).

In order to manufacture the board with the laser optical sensors, the movement's mechanism and the structure of the microrobot were initially studied. The purpose was to identify the guidelines, that should be followed for the design of this board. At the same time, a testing board was manufactured to test the operation of the laser optical sensors, that will be used on the microrobot. For that reason, experiments were carried out. The insertion of the extra layer with the optical sensors allows the microrobot to recognize its position in the workspace so that it moves to the position under the microscope regardless the orientation.

A communication protocol for the Point-to-Point topology of the system was designed to implement the wireless communication of the microrobot with a PC. This implementation was done, in order to send the data of the sensors described above to the computer and perform position control. Thus, for this communication, a suitable program supporting telemetry was implemented, which was used by the computer to request operational data for a more detailed supervision of the subsystems of each microrobot.

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας καθηγητή κ. Ευάγγελο Παπαδόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετάσχω ενεργά στην ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου. Οι πολύπλευρες γνώσεις και οι χρήσιμες συμβουλές του με καθοδήγησαν έως και την ολοκλήρωση της εργασίας μου. Ομοίως, θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συνεχή υποστήριξη και συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου, τον καθηγητή κ. Κώστα Βλάχο.

Συνεχίζοντας, θα ήθελα να εκφράσω ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη στο πρόσωπο του Χρύσανθου Δημητρόπουλου ο οποίος με καθοδήγησε σε κάθε βήμα του προγραμματισμού του μικρομπότ και του ρολογιού *chronos*. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα των ανθρώπων που στελεχώνει το Εργαστήριο του Αυτομάτου Ελέγχου, που παρ' όλους τους χρονικούς περιορισμούς, υπήρξαν πρόθυμοι και διαθέσιμοι να συνεισφέρουν. Επιπλέον, δε θα μπορούσα να μη συμπεριλάβω στις ευχαριστίες, όλους τους φίλους μου εκτός εργαστηρίου που με στήριξαν και με ενθάρρυναν σε όλα μου τα βήματα όλα αυτά τα χρόνια στη σχολή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ειδικότερα τη μητέρα μου για την υποστήριξη της και για τις θυσίες που έκανε έτσι ώστε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

*Αφιερώνεται στη μητέρα μου,*

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Ευχαριστίες.....	5
Περιεχόμενα.....	7
Κατάλογος Σχημάτων .....	9
Κατάλογος Πινάκων.....	11
<b>1 Εισαγωγή .....</b>	<b>12</b>
1.1 Σκοπός Εργασίας .....	12
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	14
1.3 Δομή Εργασίας.....	15
<b>2 Μικρορομπότ Φυγοκεντρής Επενέργησης .....</b>	<b>16</b>
2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2 Μηχανισμός Μικροκίνησης .....	16
2.2.1 Μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας της πλατφόρμας .....	16
2.2.2 Αρχή λειτουργίας του μηχανισμού κίνησης της πλατφόρμας.....	17
2.2.3 Πλατφόρμα με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές.....	20
2.2.4 Ανάλυση μονοδιάστατης κίνησης και καθορισμός σχεδιαστικών παραμέτρων ...	21
2.3 Σχεδιαστική και Κατασκευαστική Μελέτη της 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του Μικρορομπότ	22
2.3.1 Σχεδιασμός 2 <sup>ης</sup> έκδοσης μικρορομπότ στο Η/Υ.....	22
2.3.2 Κατασκευή 2 <sup>ης</sup> έκδοσης μικρορομπότ .....	28
2.3.3 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα .....	32
<b>3 Ανάπτυξη συστήματος Οπτικών Αισθητήρων Laser .....</b>	<b>34</b>
3.1 Εισαγωγή.....	34
3.2 Σχεδιασμός και κατασκευή δοκιμαστικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα .....	35
3.2.1 Σχεδιασμός σχηματικού διαγράμματος δοκιμαστικής πλακέτας .....	35
3.2.2 Κατασκευή δοκιμαστικής πλακέτας .....	37
3.2.3 Διεξαγωγή πειραμάτων.....	39
3.3 Σχεδιασμός και κατασκευή πλακέτας οπτικών αισθητήρων laser.....	42
3.3.1 Σχεδιασμός πλακέτας οπτικών αισθητήρων laser στον Η/Υ.....	42
3.3.2 Κατασκευή πλακέτας οπτικών αισθητήρων laser .....	43
3.3.3 Διεξαγωγή πειραμάτων.....	45
<b>4 Ανάπτυξη και Υλοποίηση Ασύρματης Επικοινωνίας Μικρορομπότ-με Η/Υ Ελέγχου.....</b>	<b>48</b>
4.1 Εισαγωγή.....	48
4.2 Ασύρματα δίκτυα και Πρωτόκολλο Επικοινωνίας .....	48
4.3 Αρχιτεκτονική συστήματος.....	49
4.3.1 Σύστημα Υλικού.....	49
4.3.2 Σύστημα Λογισμικού .....	51

4.4	Υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας Μικρορομπότ–Η/Υ .....	55
4.4.1	Υλοποίηση σε επίπεδο Πρωτόκολλου Επικοινωνίας.....	55
4.4.2	Υλοποίηση σε επίπεδο λογισμικού .....	56
4.4.3	Τηλεμετρία.....	57
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....</b>	<b>60</b>
5.1	Συμπεράσματα .....	60
5.2	Μελλοντική Εργασία .....	61
<b>6</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>Παράρτημα Α: «Datasheets» .....</b>	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>Παράρτημα Β: «Πρωτόκολλο SPI».....</b>	<b>65</b>
<b>9</b>	<b>Παράρτημα Γ: «Κυρίως προγράμμα μικρορομπότ και chronos» .....</b>	<b>67</b>



## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 1-1.</b>	Απεικόνιση του ρομπότ Kilobot ,του Harvard. ....	12
<b>Σχήμα 1-2.</b>	Απεικόνιση του ρομπότ TinyTeRP, του Maryland. ....	12
<b>Σχήμα 1-3.</b>	Απεικόνιση της 1 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου Ε.Μ.Π. [14]. ....	13
<b>Σχήμα 1-4.</b>	Απεικόνιση της 2 <sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου Ε.Μ.Π. ....	14
<b>Σχήμα 2-1.</b>	3-D μοντέλο της πλατφόρμας ενός βαθμού ελευθερίας [19]. ....	16
<b>Σχήμα 2-2.</b>	Απλοποιημένο 2-Δ μοντέλο πλατφόρμας 1β.ε. [19]. ....	17
<b>Σχήμα 2-3.</b>	Οι δυνάμεις τριβής, οριζόντιας επενέργησης και Coulomb [19]. ....	18
<b>Σχήμα 2-4.</b>	Διάγραμμα τριών φάσεων μετατόπισης της πλατφόρμας [19]. ....	19
<b>Σχήμα 2-5.</b>	Σχέδιο για πλατφόρμα δύο κινητήρων [19]. ....	20
<b>Σχήμα 2-6.</b>	Δυνάμεις που εφαρμόζονται στην πλατφόρμα δύο κινητήρων [19]. ....	20
<b>Σχήμα 2-7.</b>	Συνοπτική απεικόνιση των περιοχών ταχυτήτων [19]. ....	21
<b>Σχήμα 2-8.</b>	Σχηματικό διάγραμμα του Επιπέδου 0 του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE [15]. ....	23
<b>Σχήμα 2-9.</b>	Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 1 στο πρόγραμμα CadSoft EAGLE [15]. ....	24
<b>Σχήμα 2-10.</b>	Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα του ρυθμιστή τάσης TPS780 [27]. ....	25
<b>Σχήμα 2-11.</b>	Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 2 στο πρόγραμμα CadSoft EAGLE [15]. ....	26
<b>Σχήμα 2-12.</b>	Σχηματικό διάγραμμα γραμμικού συγκριτή τάσης LTC1540 [25]. ....	27
<b>Σχήμα 2-13.</b>	Σχηματικό διάγραμμα επιπέδου 3 στο πρόγραμμα CadSoft EAGLE [15]. ....	27
<b>Σχήμα 2-14.</b>	Τυπικό διάγραμμα ελέγχου δύο κινητήρων συνεχούς ρεύματος [21]. ....	28
<b>Σχήμα 2-15.</b>	Τελική μορφή απεικόνισης των τεσσάρων επιπέδων του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE [15]. ....	29
<b>Σχήμα 2-16.</b>	Στοιχεία για την εκτύπωση πλακετών. ....	29
<b>Σχήμα 2-17.</b>	Διαδικασία επικάλυψης αλοιφής κόλλησης. ....	30
<b>Σχήμα 2-18.</b>	Αποτελέσματα της τοποθέτησης των ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών στοιχείων. ....	30
<b>Σχήμα 2-19.</b>	Τοποθέτηση του PCB με τα εξαρτήματα στον φούρνο (IR IC Heater T-962) του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου. ....	31
<b>Σχήμα 2-20.</b>	Σταθμός κόλλησης ηλεκτρονικών του εργαστηρίου του Αυτομάτου Ελέγχου. ....	31
<b>Σχήμα 2-21.</b>	Τελική μορφή του επιπέδου 0 του μικρορομπότ. ....	32
<b>Σχήμα 2-22.</b>	Τελική μορφή μικρορομπότ. Διακρίνονται τα τρία επίπεδα ηλεκτρονικών. ....	32
<b>Σχήμα 2-23.</b>	Τελική μορφή απεικόνισης των επιπέδων 1, 2 και 3 του ρομπότ. ....	32
<b>Σχήμα 3-1.</b>	Σχηματικό διάγραμμα του αισθητήρα ADNS-7550 [22]. ....	34
<b>Σχήμα 3-2.</b>	Σχηματικό διάγραμμα δοκιμαστικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser. ....	35
<b>Σχήμα 3-4.</b>	Διάγραμμα αποτυπώματος του τρανζίστορ NTA4151P. ....	36
<b>Σχήμα 3-3.</b>	Σχηματικό διάγραμμα τρανζίστορ NTA4121P. ....	36
<b>Σχήμα 3-5.</b>	Διάγραμμα εκτυπωμένης μορφής δοκιμαστικής πλακέτα οπτικού αισθητήρα laser. ....	37
<b>Σχήμα 3-6.</b>	Μηχανή κατασκευής πλακετών LPKF S63 του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π. ....	38
<b>Σχήμα 3-7.</b>	Απεικόνιση της δοκιμαστικής πλακέτας μετά την κατασκευή. ....	38
<b>Σχήμα 3-8.</b>	Τελική μορφή απεικόνισης της δοκιμαστικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser. ....	39
<b>Σχήμα 3-9.</b>	Πειραματική διάταξη δοκιμαστικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser. ....	39

<b>Σχήμα 3-10.</b>	Απεικόνιση Πειραματικής διαδικασίας της δοκιμαστικής πλακέτας κατά τον x άξονα. ..	40
<b>Σχήμα 3-11.</b>	Απεικόνιση Πειραματικής διαδικασίας της δοκιμαστικής πλακέτας κατά τον y άξονα. ..	40
<b>Σχήμα 3-12.</b>	Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας μέτρησης του αισθητήρα κατά τον x και y άξονα. .....	41
<b>Σχήμα 3-13.</b>	Σχηματικό Διάγραμμα 4ης βαθμίδας του μικρορομπότ. ....	42
<b>Σχήμα 3-14.</b>	Διάταξη μετατροπής της τάσης σε 5V, της Sparkfun. ....	43
<b>Σχήμα 3-15.</b>	Τελική μορφή απεικόνισης εκτυπώσιμης μορφής επιπέδου 4. ....	44
<b>Σχήμα 3-16.</b>	Τελική μορφή απεικόνισης του επιπέδου 4 του ρομπότ. ....	44
<b>Σχήμα 3-17.</b>	Τελική μορφή απεικόνισης της πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser του ρομπότ. ....	45
<b>Σχήμα 3-18.</b>	Πειραματική διάταξη της τελικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser. ....	45
<b>Σχήμα 3-19.</b>	Απεικόνιση Πειραματικής διαδικασίας της τελικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser κατά τον x άξονα. ....	46
<b>Σχήμα 3-20.</b>	Απεικόνιση Πειραματικής διαδικασίας της τελικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser κατά τον y άξονα. ....	46
<b>Σχήμα 3-21.</b>	Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας μέτρησης του αισθητήρα κατά τον x και y άξονα. .....	47
<b>Σχήμα 4-1.</b>	Σύστημα ασύρματης επικοινωνίας chronos ez430 της TI. ....	49
<b>Σχήμα 4-2.</b>	Απλοποιημένο διάγραμμα απεικόνισης της ασύρματης μονάδας CC1101 [23]. ....	50
<b>Σχήμα 4-3.</b>	Επικοινωνία του chronos ez-430 με τον H/Y. ....	51
<b>Σχήμα 4-4.</b>	Φωτογραφική απεικόνιση του εξομοιωτή USB [15]. ....	51
<b>Σχήμα 4-5.</b>	Συνοπτική παρουσίαση της διεπαφής της ασύρματης μονάδας του μικροελεγκτή CC430F6137 με τον πυρήνα του CC1101 [23]. ....	52
<b>Σχήμα 4-6.</b>	Μορφή πακέτου δεδομένων [23]. ....	54
<b>Σχήμα 4-7.</b>	Σχηματικό διάγραμμα του ασύρματου δικτύου τοπολογίας Point-to-Point network [15]. ....	55
<b>Σχήμα 4-8.</b>	Διάγραμμα ροής του interrupt της ασύρματης μονάδας του μικρορομπότ. ....	56
<b>Σχήμα 4-9.</b>	Σχηματική απεικόνιση των δεδομένων τηλεμετρίας στο τερματικό Docklight. ....	57
<b>Σχήμα 4-10.</b>	Διάγραμμα ροής λήψης δεδομένων τηλεμετρίας του chronos ez430. ....	58
<b>Σχήμα 4-11.</b>	Απεικόνιση πειραματικής διάταξης τηλεμετρίας. ....	59
<b>Σχήμα 5-1.</b>	Φωτογραφική απεικόνιση του μικρορομπότ στο χώρο εργασίας κάτω από το μικροσκόπιο. ....	60
<b>Σχήμα 8-1.</b>	Τρόπος σύνδεσης master-slave ολοκληρωμένων στο SPI. ....	65
<b>Σχήμα 8-2.</b>	Τρόπος σύνδεσης master-πολλαπλών slave ολοκληρωμένων στο SPI. ....	66

## **Κατάλογος Πινάκων**

<b>Πίνακας 2-1.</b> Τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή CC430F6137 [24]. .....	24
<b>Πίνακας 2-2.</b> Τεχνικά χαρακτηριστικά μικροκινητήρα δόνησης 304-100 [28]. .....	28
<b>Πίνακας 4-1.</b> Interrupts flags της ασύρματης μονάδας και η συνθήκη ενεργοποίησής τους [23]. .....	52

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός Εργασίας

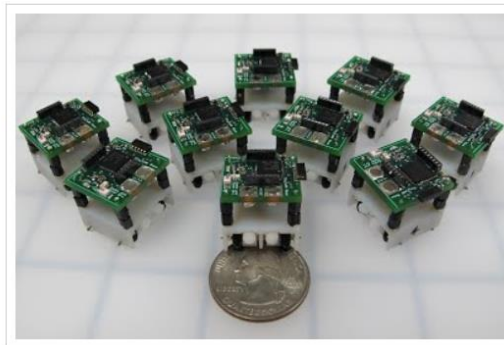
Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η συγχρόνη ρομποτική έρευνα καταπιάνεται όλο και περισσότερο με τη μελέτη και ανάπτυξη ρομποτικών εφαρμογών στο μικρόκοσμο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη ραγδαία ανάπτυξη της μηχανοτρονικής η οποία έχει συμβάλει στην αναβάθμιση και εξέλιξη των μικρορομποτικών συστημάτων.

Η εξέλιξη των μικρορομποτικών συστημάτων περιλαμβάνει τη μείωση του μεγέθους των συστημάτων αυτών καθώς και τη δυνατότητα συνεργασίας μεταξύ δύο ή και περισσότερων ίδιων μικρορομποτ με σκοπό την εκτέλεση εργασιών υψηλής ακρίβειας

Τα Σχήματα 1-1 και 1-2 αποτελούν ενδεικτικά παραδείγματα της εξέλιξης τέτοιων ρομποτικών συστημάτων.



**Σχήμα 1-1.** Απεικόνιση του ρομπότ Kilobot ,του Harvard.



**Σχήμα 1-2.** Απεικόνιση του ρομπότ TinyTeRP, του Maryland.

Μια τέτοια προσπάθεια έχει γίνει στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ με την αναβάθμιση του μικρορομποτικού του μηχανισμού, ο οποίος έχει σχεδιαστεί να εκτελεί μικροσκοπική επίπεδη κίνηση της τάξεως μεγέθους 1mm χάρη σε δύο φυγοκεντρικούς κινητήρες πολύ μικρών διαστάσεων.

Στην πρωτότυπη μορφή του, το μικρορομπότ είχε περιορισμένη ενεργειακή αυτονομία καθώς και χαμηλή επεξεργαστική ισχύς. που έθεταν περιορισμούς στη λειτουργία του. Στο Σχήμα 1-3 απεικονίζεται η πρώτη έκδοση του μικρορομπότ.



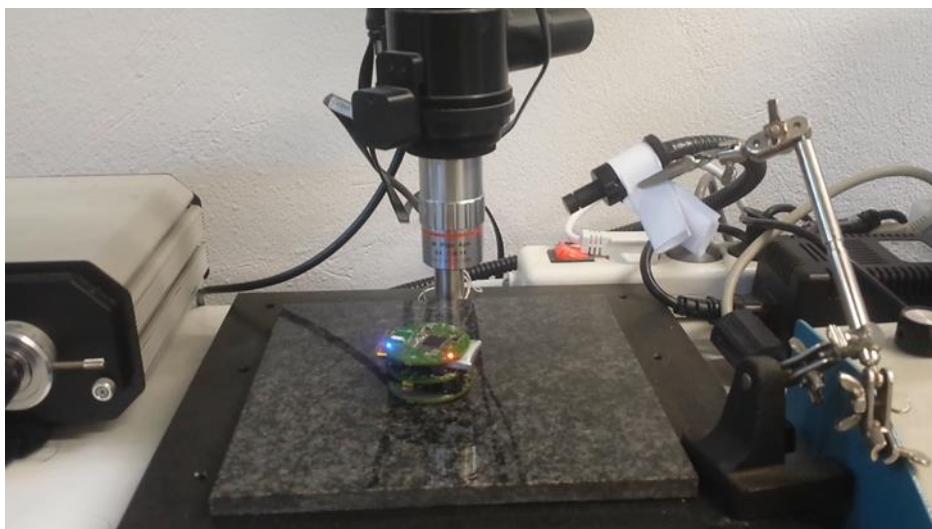
**Σχήμα 1-3.** Απεικόνιση της 1<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου Ε.Μ.Π. [14].

Στην μεταπτυχιακή εργασία [15] πραγματοποιήθηκε η αναβάθμισή του με την κατασκευή της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ που πρόσφερε μια σημαντική τεχνολογική βάση ώστε να μπορούν να σχεδιαστούν και να εκτελεστούν σύνθετα πειράματα συνεργατικού χαρακτήρα, βλ. Σχήμα 1-4.

Στην έκδοση αυτή, πραγματοποιούταν έλεγχος θέσης του ρομπότ μόνο μέσω της επεξεργασίας εικόνας της κάμερας του μικροσκοπίου και είχε γίνει μια πρώτη προσπάθεια ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ δύο μικρορομπότ με τον Η/Υ, με σκοπό τη συνεργασία τους. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η βελτίωση του μικρορομποτικού μηχανισμού αυτού με την ενσωμάτωση μίας επιπλέον βαθμίδας ηλεκτρονικών που θα φέρει οπτικούς αισθητήρες laser ειδικευμένους στην ανάγνωση θέσης. Η ενσωμάτωσή της βαθμίδας αυτής, θα αποτελέσει σημαντικό βήμα στην ακόμα μεγαλύτερη αυτονόμηση του. Για την υλοποίηση της αναβάθμισης αυτής, ήταν απαραίτητο η εκμάθηση προγραμμάτων σχεδιασμού τυπωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (PCB) καθώς και η ανάπτυξη προγράμματος ανάγνωσης των αισθητήρων από τον μικροελεγκτή του ρομπότ.

Η εισαγωγή του επιπλέον επιπέδου με τους οπτικούς αισθητήρες δίνει τη δυνατότητα στο μικρορομπότ να μπορεί να αναγνωρίζει τη θέση του στο χώρο εργασίας του και να πηγαίνει ελεγχόμενα με οποιοδήποτε προσανατολισμό στη θέση κάτω από το μικροσκόπιο. Για το σκοπό αυτό, δόθηκε έμφαση και στην εξέλιξη της ασύρματης επικοινωνίας, ώστε το μικρορομπότ να μπορεί να ανταλλάσσει πληροφορίες με τον Η/Υ δηλώνοντας τη θέση του. Η βελτίωση της ασύρματης επικοινωνίας του μικρορομπότ με τον Η/Υ θα συμβάλει και στην

ασύρματη επικοινωνία μεταξύ δύο μικρορομπότ ώστε να μπορούν να εκτελεστούν σύνθετα πειράματα συνεργατικού χαρακτήρα στον μέλλον.



**Σχήμα 1-4.** Απεικόνιση της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου Ε.Μ.Π.

## 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η βιβλιογραφία που μελετήθηκε και συντέλεσε τη συγγραφή αυτής της εργασίας περιλαμβάνει πρωτίστως προηγούμενες δημοσιεύσεις και εργασίες πάνω στο μικρορομποτικό μηχανισμό του εργαστηρίου,

Στις δημοσιεύσεις και τις εργασίες [11], [12], [14], [18], [19] και [20] που αφορούσαν το μικρορομπότ του εργαστηρίου παρουσιάστηκαν οι αρχές και ο τρόπος λειτουργίας του καθώς και η πρώτη κατασκευαστική του δομή. Στις παραπάνω εργασίες στηρίχθηκε μια πολύ σημαντική μελέτη [15] που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια μεταπτυχιακής εργασίας στο εργαστήριο του Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π, που σαν σκοπό είχε την υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ χρήστη και της αναβαθμισμένης έκδοσης του μικρορομπότ. Συγχρόνως μελετήθηκαν οι διπλωματικές εργασίες [16], [17] στις οποίες πραγματοποιήθηκε υλοποίηση και ανάπτυξη συστημάτων οπτικών αισθητήρων σε ρομποτικό σύστημα, ενώ παράλληλα έγινε και η μελέτη των ξένων δημοσιεύσεων [2], [3], [4], [5], [6] και [9] που αφορούσαν την ανάπτυξη ασυρμάτου συστήματος για μικρορομποτικούς μηχανισμούς.

Τέλος, ήταν απαραίτητη η μελέτη των τεχνικών φύλλων δεδομένων (datasheet) των ηλεκτρονικών που επιλέχθηκαν. Πιο συγκεκριμένα των μικροελεγκτών της Texas Instrument (TI) της οικογένειας CC430 [23], του οπτικού αισθητήρα ADNS-7550 [22], του ρυθμιστή τάσης TPS780 [27], του συγκριτή τάσης LTC1540 [25] και των κινητήρων δόνησης [28].

### 1.3 Δομή Εργασίας

Η εργασία αναπτύσσεται σε πέντε κεφάλαια. Το **πρώτο** περιλαμβάνει την εισαγωγή της εργασίας και αναφέρεται στο σκοπό συγγραφής της και στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Το **δεύτερο** κεφάλαιο παραθέτει σημαντικά εισαγωγικά στοιχεία θεωρίας σχετικά με το μηχανισμό κίνησης του μικρορομπότ που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ. Επιπλέον περιλαμβάνει, τη σχεδιαστική μελέτη, την κατασκευή και τη συναρμολόγηση του αναβαθμισμένου μικρορομπότ.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο αναπτύσσεται και υλοποιείται σύστημα οπτικών αισθητήρων laser για το μικρορομπότ. Γίνεται αναλυτική περιγραφή της σχεδιαστικής μελέτης και της κατασκευής της βαθμίδας που φέρει τους αισθητήρες αυτούς και θα αποτελεί μέρος της δομής του μικρορομπότ. Στο **τέταρτο** κεφάλαιο περιγράφεται του πρωτόκολλου επικοινωνίας που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην αποστολή και λήψη δεδομένων ανάμεσα στον προσωπικό υπολογιστή και το μικρορομπότ καθώς και η υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας τους.

Τέλος στο **πέμπτο** κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη που παρουσιάστηκε στην εργασία και η προτεινόμενη μελλοντική εργασία για τη βελτίωση της λειτουργίας του μικρορομπότ.

## 2 Μικρορομπότ Φυγοκεντρής Επενέργησης

### 2.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το συνδυαστικό κρίκο ανάμεσα στις προηγούμενες ερευνητικές μελέτες που αναπτύχθηκαν στο μικρορομπότ και την παρούσα.

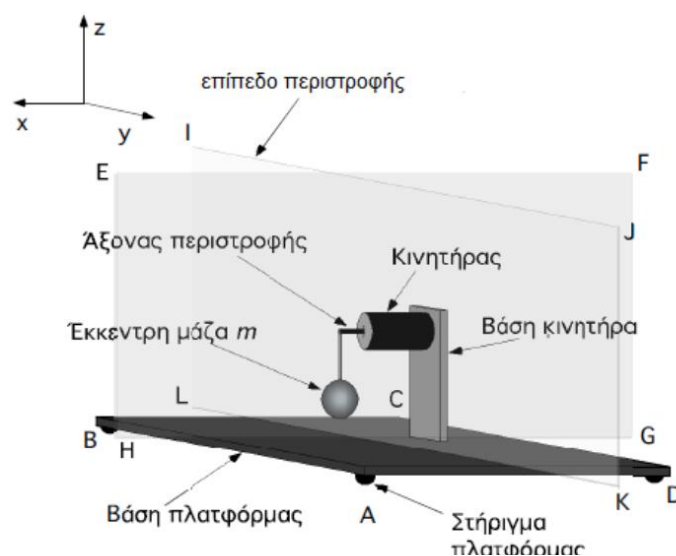
Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να παραθέσει τα σημαντικά στοιχεία της θεωρίας καθώς και τις απαραίτητες πληροφορίες για το μικρορομπότ ώστε να διευκολύνει τον αναγνώστη στην κατανόηση της παρούσας εργασίας. Τα κύρια σημεία του κεφαλαίου είναι η συνοπτική περιγραφή του πρωτότυπου μηχανισμού κίνησης του μικρορομπότ καθώς και η παρουσίαση της σχεδιαστικής μελέτης και της επανακατασκευής της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ.

### 2.2 Μηχανισμός Μικροκίνησης

Οι βασικές αρχές λειτουργίας του μοντέλου κίνησης περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια. Η μελέτη και η ανάλυση του μηχανισμού κίνησης του μικρορομπότ έγινε στην προηγούμενη διδακτορική διατριβή [19]. Σε αυτή έγινε η ανάπτυξη του θεωρητικού μοντέλου η οποία εφαρμόζεται σε δονούμενη πλατφόρμα που φέρει δύο κινητήρες με έκκεντρο φορτίο. Η εφαρμογή αυτού του μοντέλου πραγματοποιείται με την κατασκευή της μικρορομποτικής πλατφόρμας.

#### 2.2.1 Μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας της πλατφόρμας

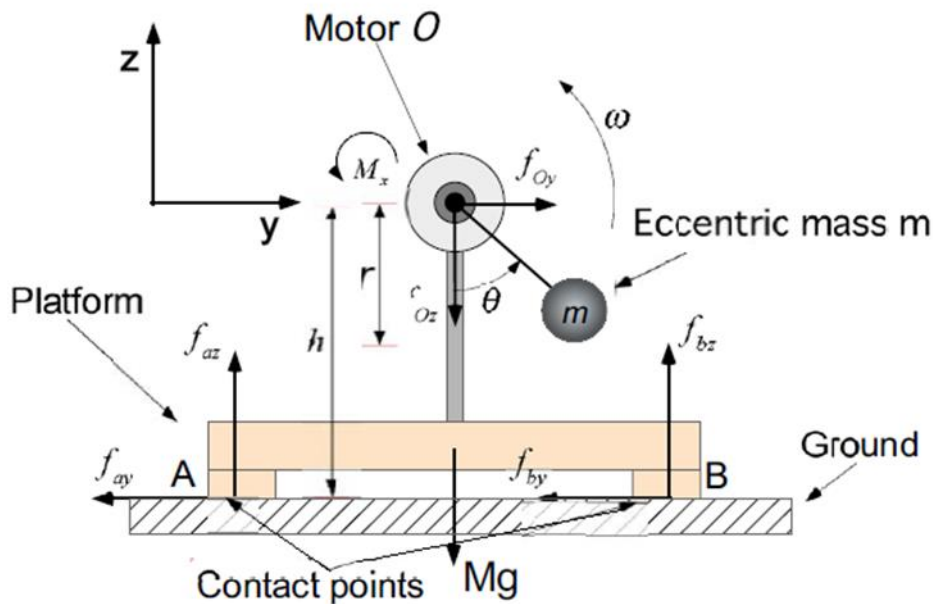
Για την ανάλυση και τη μελέτη της επενέργησης των φυγοκεντρικών δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας. Το κυρίως σώμα του μικρορομπότ προσομοιάστηκε από ένα τρισδιάστατο μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας.βλ. Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1. 3-D μοντέλο της πλατφόρμας ενός βαθμού ελευθερίας [19].



Για την διευκόλυνση της ανάλυσης των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε ένα δισδιάστατο απλοποιημένο μοντέλο της πλατφόρμας ενός β.ε. βλ. Σχήμα 2-2.



**Σχήμα 2-2.** Απλοποιημένο 2-Δ μοντέλο πλατφόρμας 1β.ε. [19].

Στο μοντέλο αυτό θεωρήθηκε ότι η πλατφόρμα θα κινηθεί κατά τον άξονα  $y$  και ότι το έκκεντρο μάζας  $m$  του κινητήρα, περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  γύρω από το σημείο  $O$ . Έτσι με τις παραδοχές αυτές από την ανάλυση δυνάμεων προκύπτουν για τις δυνάμεις επενέργησης  $f_{oy}$ ,  $f_{oz}$ , οι εξής τύποι [19]:

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

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

όπου  $r$  το μήκος αβαρούς ράβου που συνδέει τον άξονα του κινητήρα με το έκκεντρο και  $\theta$  η γωνία του διαγράφει το έκκεντρο.

Οι δυνάμεις  $f_{oy}$ ,  $f_{oz}$ , ονομάζονται φυγοκεντρικές δυνάμεις επενέργησης και εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής  $\omega$ .

### 2.2.2 Αρχή λειτουργίας του μηχανισμού κίνησης της πλατφόρμας

Με την ανάλυση των δυνάμεων είναι πλέον δυνατή η περιγραφή και η ανάλυση της αρχής λειτουργίας του μηχανισμού κίνησης.

Οι φυγοκεντρικές δυνάμεις επενέργησης σε συνδυασμό με τις δυνάμεις τριβής, που αναπτύσσονται στα σημεία επαφής της πλατφόρμας  $A$  και  $B$ , είναι υπεύθυνες για την κίνηση της πλατφόρμας. Για τις τριβές αυτές υιοθετείται μοντέλο τριβής Coulomb με μέγιστο συντελεστή στατικής τριβής  $\mu_r$  ίσο με το συντελεστή τριβής ολίσθησης  $\mu_{ολ}$ , ( $\mu_r = \mu_{ολ} = \mu$ ). Δεδομένου ότι η πλατφόρμα μπορεί να κινηθεί μόνο κατά τη διεύθυνση του άξονα  $y$ , οι εξισώσεις κίνησης προκύπτουν από τις παρακάτω εξισώσεις [19]:

$$\sum F_y = M\ddot{y} \Rightarrow M\ddot{y} = f_{Oz} - \mu(f_{az} + f_{bz}) \quad (2-3)$$

$$\sum F_z = 0 \Rightarrow f_{az} + f_{bz} = f_{Oz} - Mg + f_{Oz} = 0 \quad (2-4)$$

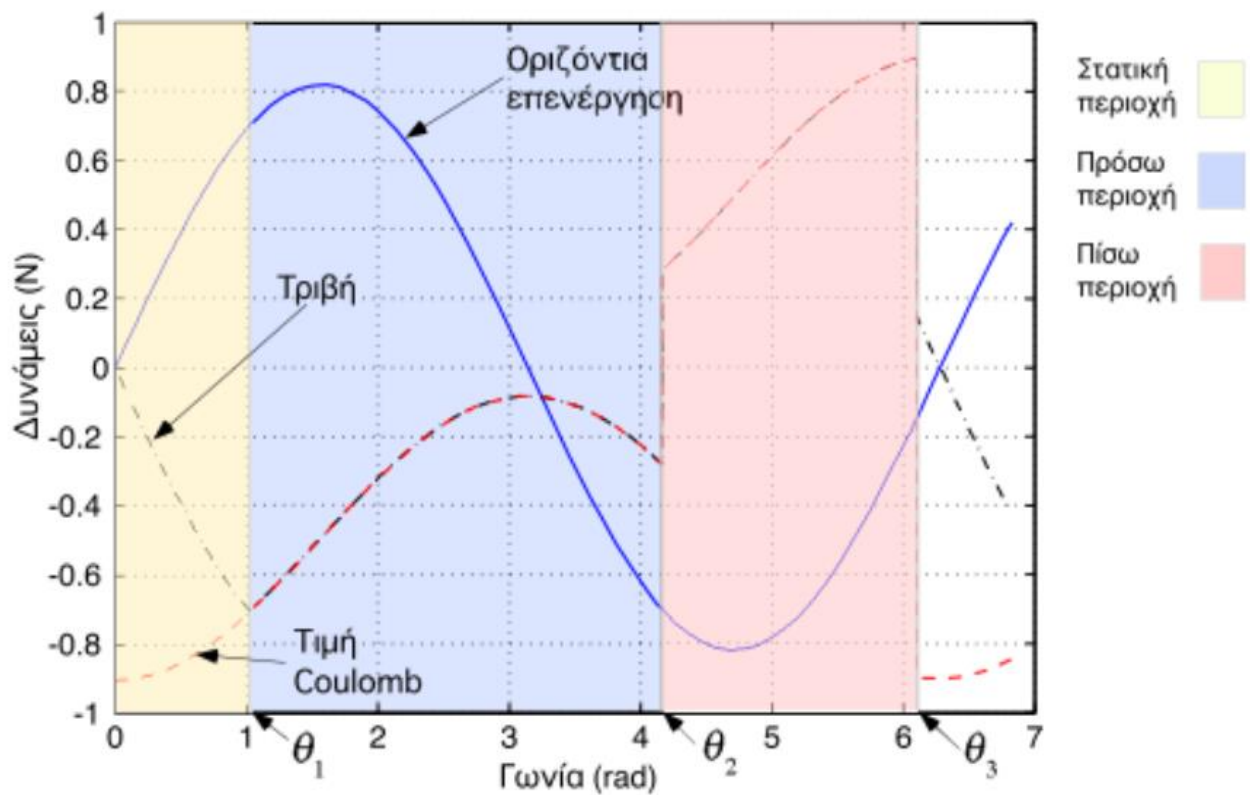
$$\sum M_x = 0 \Rightarrow M_x + \frac{1}{2}f_{bz} + \frac{1}{2}f_{az} - hf_{Oy} + h_{CM}f_{ay} + h_{CM}f_{by} = 0 \quad (2-5)$$

όπου  $\mu$  ο συντελεστής τριβής,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $M$  η μάζα της πλατφόρμας,  $h$  το ύψος του κινητήρα από το έδαφος και  $h_{CM}$  η απόσταση του κέντρου μάζας από το δάπεδο.

Η συνολική κατακόρυφη αντίδραση  $N$  δίνεται από τη σχέση:

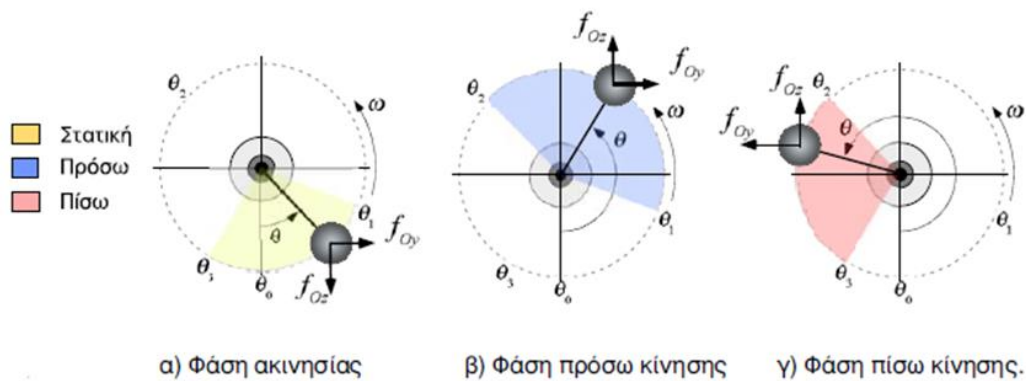
$$N = Mg - f_{Oy} \quad (2-6)$$

Η μονόπλευρη αυτή μετατόπιση της πλατφόρμας οφείλεται στη διαφορά φάσης  $\pi/2$  μεταξύ των δυνάμεων  $f_{Oy}$  και  $N$  και στον τρόπο που αυτές μεταβάλλονται καθώς το έκκεντρο διαγράφει πλήρη κύκλο λειτουργίας, βλ. Σχήμα 2-3.



**Σχήμα 2-3.** Οι δυνάμεις τριβής, οριζόντιας επενέργειας και Coulomb [19].

Έτσι ανάλογα τη φορά περιστροφής του έκκεντρου καθορίζεται και η φορά μετατόπισης της πλατφόρμας. Στο παρακάτω σχήμα διακρίνονται για τις διάφορες γωνίες του έκκεντρου οι τρεις φάσεις της μετατόπισης της πλατφόρμας, βλ. Σχήμα 2-4.



**Σχήμα 2-4.** Διάγραμμα τριών φάσεων μετατόπισης της πλατφόρμας [19].

Για γωνία εκκίνησης  $\theta_0 = 0 \text{ rad}$  η οριζόντια δύναμη επενέργησης είναι  $f_{Oy} = 0 \text{ N}$ . Επομένως η συνισταμένη των δυνάμεων κατά τον άξονα  $y$  είναι μηδέν και λέμε ότι η πλατφόρμα βρίσκεται στη *φάση ακινησίας*.

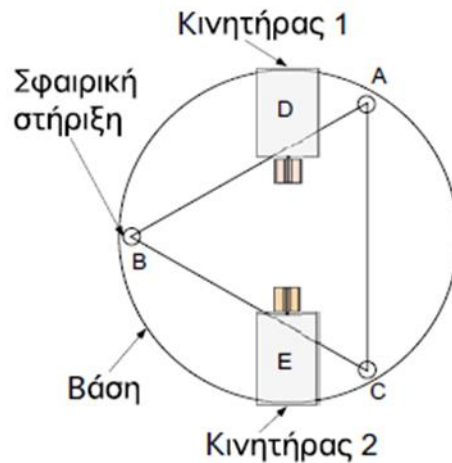
Όσο συνεχίζει να αυξάνει η γωνία  $\theta$ , η  $f_{Oy}$  γίνεται μεγαλύτερη από την τριβή Coulomb. Στο σημείο αυτό δημιουργείται επιτάχυνση, αναπτύσσεται ταχύτητα και η πλατφόρμα μετατοπίζεται στα θετικά του άξονα  $y$ . Η πλατφόρμα κινείται και λέγεται ότι εκτελεί *πρόσω κίνηση*.

Όταν το έκκεντρο περάσει τη γωνία  $\pi \text{ rad}$  η οριζόντια δύναμη  $f_{Oy}$  γίνεται αρνητική και παράλληλα με τις τριβές επιβραδύνει την πλατφόρμα. Για  $\theta = \theta_2$  η ταχύτητα της πλατφόρμας μηδενίζεται και η κίνηση αντιστρέφεται. Στη φάση αυτή λέγεται ότι η πλατφόρμα εκτελεί *πίσω κίνηση*.

Καθώς η γωνία του έκκεντρο πλησιάζει τα  $2\pi \text{ rad}$  η οριζόντια δύναμη επενέργησης μειώνεται ενώ η κατακόρυφη δύναμη αυξάνεται. Σταδιακά η πλατφόρμα επιβραδύνει έως ότου η κίνησή της σταματήσει. Ο χρόνος που απομένει να κινηθεί η πλατφόρμα προς τα πίσω προτού επιβραδυνθεί και ακινητοποιηθεί είναι μικρός και η μετατόπιση που προκύπτει είναι μικρότερη σε σχέση με τη μετατόπιση που προέκυψε κατά την πρόσω κίνηση. Έτσι, για ανθρωπολογιακή περιστροφή του έκκεντρο με σταθερή ταχύτητα  $\omega$ , η καθαρή μετατόπιση κατά μήκος του άξονα  $y$ , που προκύπτει κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας, είναι *θετική*.

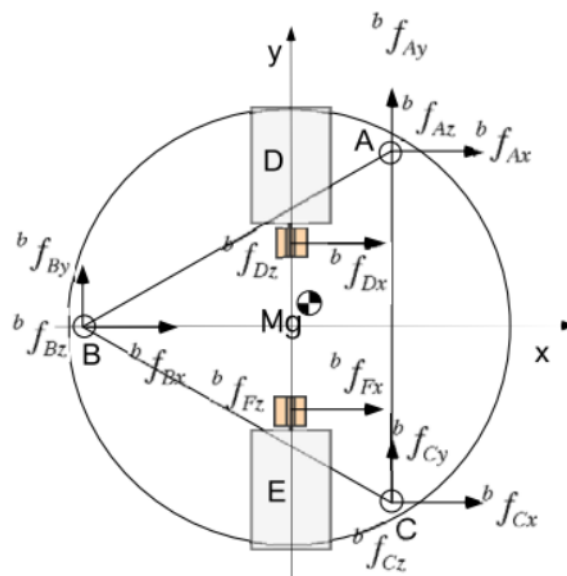
### 2.2.3 Πλατφόρμα με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές

Η πλατφόρμα με τους δύο κινητήρες μπορεί να κινηθεί από οποιοδήποτε αρχικό σημείο  $x_i, y_i, \theta_i$  σε οποιοδήποτε τελικό  $x_f, y_f, \theta_f$ . Το σύστημα αυτό είναι μη ολόνομο καθώς οι δύο επενεργητές δεν πληρούν τις προϋποθέσεις για πλήρως ελεγχόμενη τοπικά κίνηση, όμως υπάρχει η δυνατότητα για έλεγχο  $x, y, \theta$  της κίνησης μετά από κάποια διαδρομή, βλ. Σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5. Σχέδιο για πλατφόρμα δύο κινητήρων [19].

Οι δυνάμεις που ασκούνται στην πλατφόρμα με δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές απεικονίζονται στο Σχήμα 2-6.



Σχήμα 2-6. Δυνάμεις που εφαρμόζονται στην πλατφόρμα δύο κινητήρων [19].

Εάν υποθεθεί ότι το γεωμετρικό κέντρο της πλατφόρμας συμπίπτει με το κέντρο μάζας τότε, όταν οι κινητήρες D, E στρέφονται ομόρροπα, η πλατφόρμα τείνει να περιστραφεί γύρω

από τον κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από το κέντρο μάζας. Αντίστοιχα όταν οι κινητήρες κινούνται αντίρροπα η πλατφόρμα τότε τείνει να κινηθεί προς τα θετικά του άξονα x.

Οι δυνάμεις και οι ροπές επενέργειας δίνονται από τις εξ. (2-7) έως (2-12) [19] όπου  $i = \{d, e\}$ ,  $\varphi_d = 90^\circ$ ,  $\varphi_e = -90^\circ$ ,  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα της έκκεντρης μάζας σε κάθε κινητήρα και  $r$  η εκκεντρότητα της αζυγοστάθμητης μάζας  $m$ .

$${}^b f_{ix} = m_i r_i \sin \varphi_i \sin \theta \quad (2-7)$$

$${}^b f_{iy} = 0 \quad (2-8)$$

$${}^b f_{iz} = -m_i g - m_i r_i \omega_i^2 \cos \theta \quad (2-9)$$

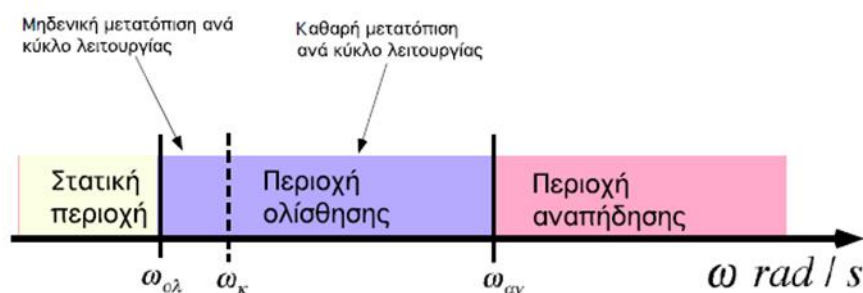
$${}^b n_{ix} = 0 \quad (2-10)$$

$${}^b n_{iy} = -m_i g r_i \sin \varphi_i \sin \theta \quad (2-11)$$

$${}^b n_{iz} = 0 \quad (2-12)$$

## 2.2.4 Ανάλυση μονοδιάστατης κίνησης και καθορισμός σχεδιαστικών παραμέτρων

Ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής των επενεργητών η πλατφόρμα μπορεί να βρεθεί σε τρεις διαφορετικές κινητικές καταστάσεις, βλ. Σχήμα 2-7. Οι καταστάσεις αυτές είναι:



**Σχήμα 2-7.** Συνοπτική απεικόνιση των περιοχών ταχυτήτων [19].

- 1) Για  $\omega$  μικρό, η πλατφόρμα είναι στατική σε όλη τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας.
- 2) Για  $\omega$  μεγαλύτερο, η πλατφόρμα ολισθαίνει.

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  $\omega$  η πλατφόρμα ολισθαίνει και παρουσιάζει καθαρή μετατόπιση ανά κύκλο λειτουργίας. Αυτή είναι η περίπτωση με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

- 3) Για  $\omega$  μεγαλύτερο από μια κρίσιμη τιμή, η πλατφόρμα αναπηδά.

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.

Ο σχεδιασμός της πλατφόρμας πρέπει να επιδιώκει τη μεγιστοποίηση του εύρους  $[\omega_k, \omega_{av}]$  που αποτελεί το ωφέλιμο εύρος επενέργειας. Όμως για λόγους απλότητας στην ανάλυση αυτή μεγιστοποιείται το εύρος  $[\omega_{o\lambda}, \omega_{av}]$ , επειδή η διαφορά μεταξύ  $\omega_{o\lambda}$  και  $\omega_k$  είναι μικρή.

Για να εξασφαλιστεί ελεγχόμενη ολίσθηση πρέπει να ισχύει [19]:

$$\omega_{o\lambda\_min} < \omega_{av\_min}$$

Για απλή γραμμική κίνηση πρέπει να ισχύει:

$$\sqrt{\frac{g(M+3m)\lambda_1}{2mr\sqrt{\lambda_1^2+1}}} < k \sqrt{\frac{g(M+3m)\lambda_2}{mr\sqrt{\lambda_2^2+1}}} \quad (2-13)$$

Για απλή περιστροφική κίνηση πρέπει να ισχύει:

$$\frac{2\mu H}{\sqrt{(2\mu H)^2+(\sqrt{3}d_1+3d_2)^2}} < \frac{g(m+M/3)}{mr} \quad (2-14)$$

όπου  $m$  η μάζα του έκκεντρου,  $M$  η μάζα της πλατφόρμας,  $r$  η ακτίνα αζυγοσταθμίας,  $H$  το ύψος του τριγώνου της βάσης,  $d_1$  είναι το ήμισυ της βάσης του τριγώνου  $d_2$  η απόσταση του κέντρου της πλατφόρμας από τη βάση,  $\lambda_1 = 2\mu/\sqrt{3}$  και  $\lambda_2 = 2H/\sqrt{3}h_{cm}$

## 2.3 Σχεδιαστική και Κατασκευαστική Μελέτη της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του Μικρορομπότ

Στην ενότητα αυτή γίνεται περιγραφή των κατασκευαστικών και τεχνικών χαρακτηριστικών της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή του, υπογραμμίζεται ότι υλοποιήθηκε στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασία [15], η οποία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο του Αυτομάτου Ελέγχου. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επανακατασκευάστηκαν οι πλακέτες της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ καθώς υπήρχαν προβλήματα στη λειτουργία των προηγούμενων πλακετών. Η αναφορά στη σχεδιαστική μελέτη και στη κατασκευή του μικρορομπότ της έκδοσης αυτής θεωρήθηκε απαραίτητη καθώς υπάρχουν σχεδιαστικές ατέλειες που προκαλούν περιορισμούς στη λειτουργία του μικρορομπότ.

### 2.3.1 Σχεδιασμός 2<sup>ης</sup> έκδοσης μικρορομπότ στο Η/Υ.

Για την κατασκευή των πλακετών (PCB) του μικρορομπότ, οι οποίες αποτελούν τα επίπεδα της δομής του, σχεδιάστηκε πρώτα το σχηματικό διάγραμμα των κυκλωμάτων. Ο σχεδιασμός έγινε σύμφωνα με την επιλογή των ηλεκτρονικών και τις ενδεικνυόμενες σχεδιαστικές κατευθύνσεις των εγχειρίδιων χρήσης των ενσωματωμένων κυκλωμάτων καθώς και τις τεχνικές σημειώσεις που προσφέρονται από τις κατασκευάστριες εταιρίες. Για το σχεδιασμό των διαγραμμάτων είχε χρησιμοποιηθεί το λογισμικό της CadSoft, EAGLE.

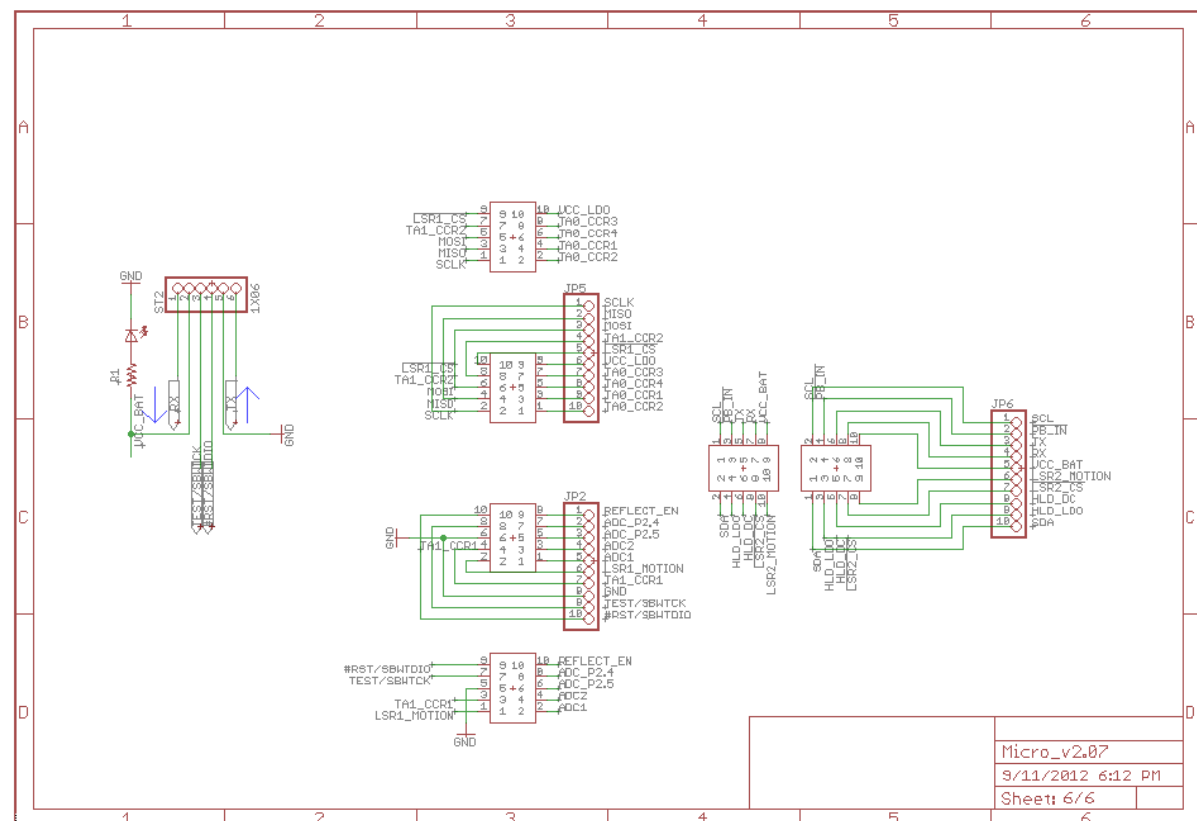
Παρακάτω γίνεται η παρουσίαση των σχηματικών διαγραμμάτων για κάθε επίπεδο ξεχωριστά όπως υλοποιήθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα. Για τα επίπεδα του μικρορομπότ

παραθέτονται και επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τα ηλεκτρικά/ηλεκτρονικά στοιχεία που διαμορφώνουν τη λειτουργία τους. Έτσι έχουμε τα εξής επίπεδα:

### Επίπεδο 0: πλακέτα προγραμματισμού μC του μικρορομπότ

Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή CC430f6137 του ρομπότ γίνεται μέσω της τεχνολογίας Spy-Bi-Wire που διαθέτει. Με τη συγκεκριμένη τεχνολογία επιτρέπεται η σύνδεση του ελεγκτή με συσκευή ανάγνωσης σφαλμάτων και μέσω των δύο ακροδεκτών SBWTCK και SBWTDIO, στους οποίους έχει πρόσβαση ο χρήστης μέσω του Επίπεδου 0, γίνεται ουσιαστικά ο προγραμματισμός.

Στους παραπάνω ακροδέκτες υπάρχει πρόσβαση από το χρήστη και από το Επίπεδο 1. Συνεπώς ο προγραμματισμός του μπορεί να γίνει χωρίς την ύπαρξη του βαθμίδας 0. Ο κύριος λόγος χρήσης της είναι ότι έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να δίνεται πρόσβαση στο χρήστη σε βασικούς ακροδέκτες του μικροελεγκτή. Το σχηματικό διάγραμμα του Επίπεδου 0 δίνεται στο Σχήμα 2-8.



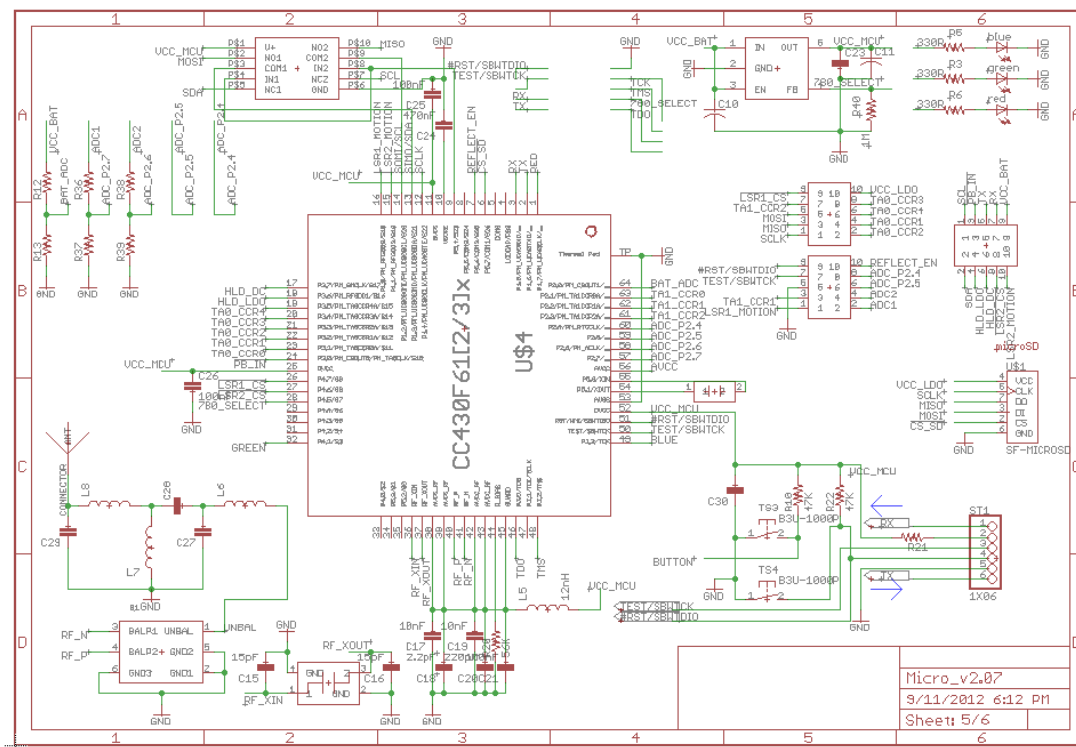
**Σχήμα 2-8.** Σχηματικό διάγραμμα του Επίπεδου 0 του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE [15].

Η πλακέτα αυτή παρεμβάλλεται ανάμεσα στο 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> επίπεδο και ο χρήστης μπορεί να εξετάσει τις τιμές των ακροδεκτών σε κατάσταση λειτουργίας για τυχόν σφάλματα. Χωρίς τη βαθμίδα αυτήν, ο έλεγχος της λειτουργίας του μικροελεγκτή και των ηλεκτρονικών γενικότερα

είναι ιδιαίτερα δύσκολος καθώς οι διαστάσεις των αποτυπωμάτων των περισσότερων ηλεκτρονικών είναι ιδιαίτερα μικρές.

### Επίπεδο 1: πλακέτα μικροελεγκτή

Το επίπεδο αυτό αποτελεί τον πυρήνα του ρομπότ καθώς σε αυτό βρίσκεται ο μικροελεγκτής που είναι υπεύθυνος για όλες τις λειτουργίες του. Το σχηματικό διάγραμμα του Επίπεδου 1 δίνεται στο Σχήμα 2-9.



Σχήμα 2-9. Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 1 στο πρόγραμμα CadSoft EAGLE [15].

Τα βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία του επιπέδου αυτού είναι:

#### Μικροελεγκτής CC430F6137, της Texas Instruments

Ο ελεγκτής αυτός ανήκει στην οικογένεια CC430, η οποία χαρακτηρίζεται από την εξαιρετικά χαμηλής ενεργειακής απόδοσης των μικροελεγκτών της, τον ενσωματωμένο πυρήνα ασύρματου πομποδέκτη CC1101 1-GHz και το μεγάλο αριθμό ποιοτικών περιφερειακών μονάδων. Στον Πίνακα 2-1 δίνονται συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του:

Πίνακας 2-1. Τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή CC430F6137 [24].

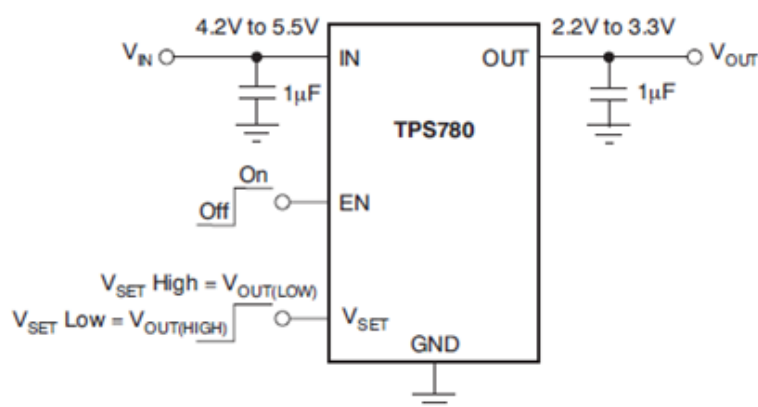
Συσκευή	Χαρακτηριστικά
Μνήμη προγράμματος	32 kB
SRAM	4 kB
Timer_A	5, 3



LCD_B	96 segments
UART/LIN/IrDA/SPI	1
SPI/I2C	1
ADC12	8 εξ./4 εσ
Comparators	8 κανάλια
I/O	4

### Ρυθμιστής τάσης TPS780, της Texas Instruments

Για τη ρύθμιση της τάσης λειτουργίας του CC430F6137 επιλέχθηκε ο ρυθμιστής τάσης TPS780. Ο ρυθμιστής αυτός υποστηρίζει την εναλλαγή από το χρήστη μεταξύ δύο επιπέδων τάσης εν ώρα λειτουργίας μέσω μιας συμβατής εισόδου με τον μικροελεγκτή. Η δυνατότητα αυτή αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη, καθώς το μικρορομπότ μπορεί σε κατάσταση αναμονής να μειώνει τις ενεργειακές του απαιτήσεις, αυξάνοντας παράλληλα την ενεργειακή του αυτονομία. Παρακάτω δίνεται το σχηματικό του διαγράμματος, βλ. Σχήμα 2-10.



**Σχήμα 2-10.** Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα του ρυθμιστή τάσης TPS780 [27].

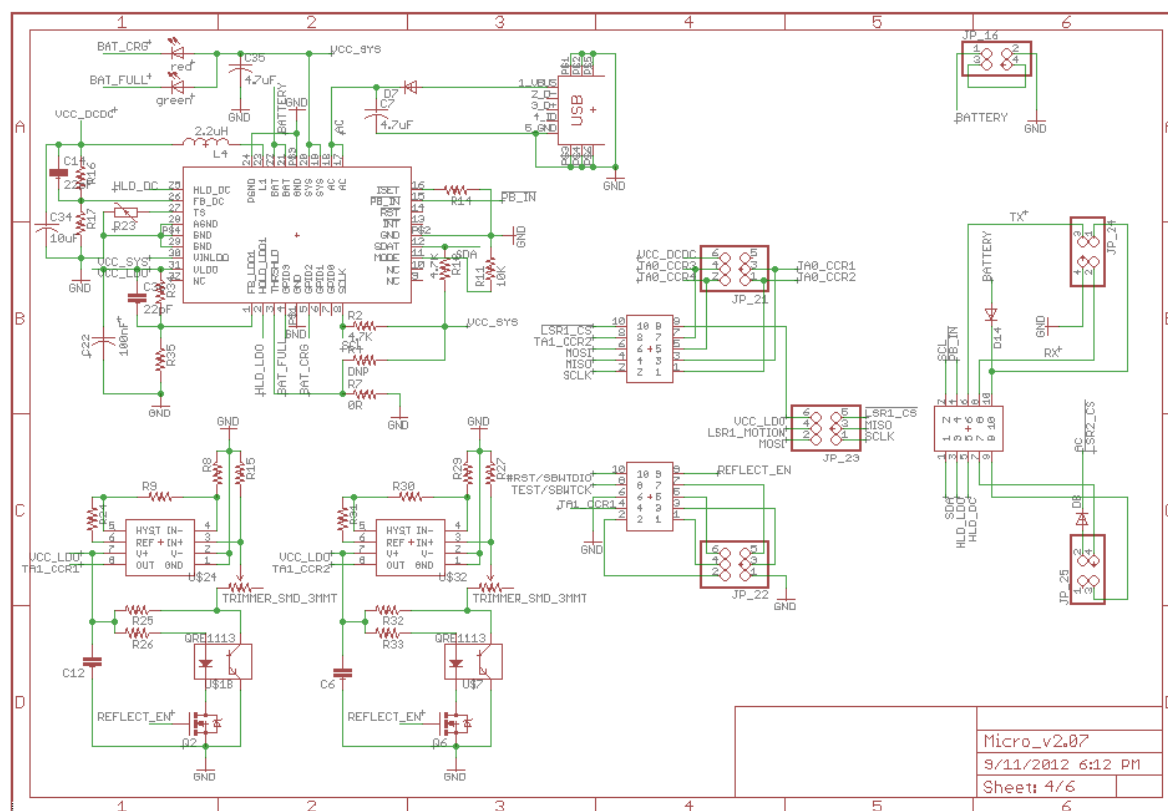
### Κεραμική κεραία στα 868 MHz, της Johanson Technology

Για αύξηση της απόδοσης και της συμβατότητας με τις συχνότητες κάτω από 1 GHz επιλέχθηκε το φίλτρο Balun και αυτό της Johanson Technology, το οποίο είναι σχεδιασμένο ειδικά για το φιλτράρισμα των σημάτων του ενσωματωμένου ασύρματου πυρήνα CC110x του μικροελεγκτή. Μεταξύ της κεραία και του φίλτρου Balun, ενσωματώθηκε μια σειρά από φίλτρα LC τα οποία βελτιώνουν σημαντικά την ποιότητα λήψης και αποστολής δεδομένων.

### **Επίπεδο 2: πλακέτα τροφοδοσίας**

Στο επίπεδο αυτό περιλαμβάνονται όλα τα απαραίτητα ηλεκτρικά /ηλεκτρονικά στοιχεία που χρειάζονται για τη τροφοδότηση του ελεγκτή, των κινητήρων καθώς και των άλλων ηλεκτρονικών στοιχείων του ρομπότ. Επίσης εδώ βρίσκονται και οι οπτικοί αισθητήρες

ανάκλασης που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο των στροφών των κινητήρων. Παρακάτω δίνεται το σχηματικό του διάγραμμα, βλ. Σχήμα 2-11.



**Σχήμα 2-11.** Σχηματικό διάγραμμα του επιπέδου 2 στο πρόγραμμα CadSoft EAGLE [15].

Τα βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία του επιπέδου αυτού είναι:

Μονάδα διαχείρισης ισχύος TPS65721, της Texas Instruments

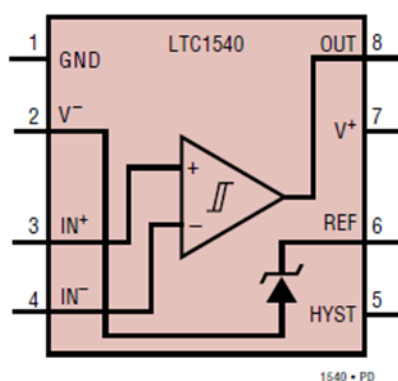
Η μονάδα αυτή απαρτίζεται από ένα ενσωματωμένο σύστημα με ρυθμιστή τάσης LDO το οποίο διαχειρίζεται τη φόρτιση της μπαταρίας, την τροφοδοσία του μικροελεγκτή σε συνδυασμό με το TPS780 καθώς και των υπολοίπων συστημάτων του μικρορομπότ (οπτικούς αισθητήρες, μικροκινητήρες δόνησης, ενδεικτικές λυχνίες κλπ.).

Η συγκεκριμένη μονάδα είναι εξειδικευμένη για εφαρμογές και συστήματα χαμηλής κατανάλωσης και διαστάσεων. Για τη φόρτιση της μπαταρίας, η PMU υποστηρίζει τη χρήση ως τροφοδοτικής γραμμής 5V τη γενικής χρήσης θύρα micro USB. Η PMU φέρει επιπλέον και ένα θερμίστορ τύπου NTC, το οποίο λειτουργεί ως αισθητήρας θερμοκρασίας της μπαταρίας. Σε περίπτωση σημαντικής αύξησης της θερμοκρασίας της μπαταρίας, η αντίσταση του θερμίστορ αυξάνεται και η PMU διακόπτει την τροφοδοσία της μπαταρίας.

Αισθητήριο ανάκλασης QRE1113GR, της Fairchild Semiconductor

Για τη μέτρηση της ταχύτητας των κινητήρων χρησιμοποιήθηκε ο οπτικός ανακλαστήρας QRE1113GR, ο οποίος διατηρήθηκε από την πρωτότυπη κατασκευή λόγω των μικρών του διαστάσεων και της ευκολίας ανάγνωσης του έκκεντρου στον άξονα του μικροκινητήρα. Σε

αντίθεση με την πρώτη έκδοση του μικρορομπότ χρησιμοποιήθηκε για το φιλτράρισμα των τάσεων εξόδου ο γραμμικός συγκριτής τάσης LTC1540 της Linear Technology που είναι

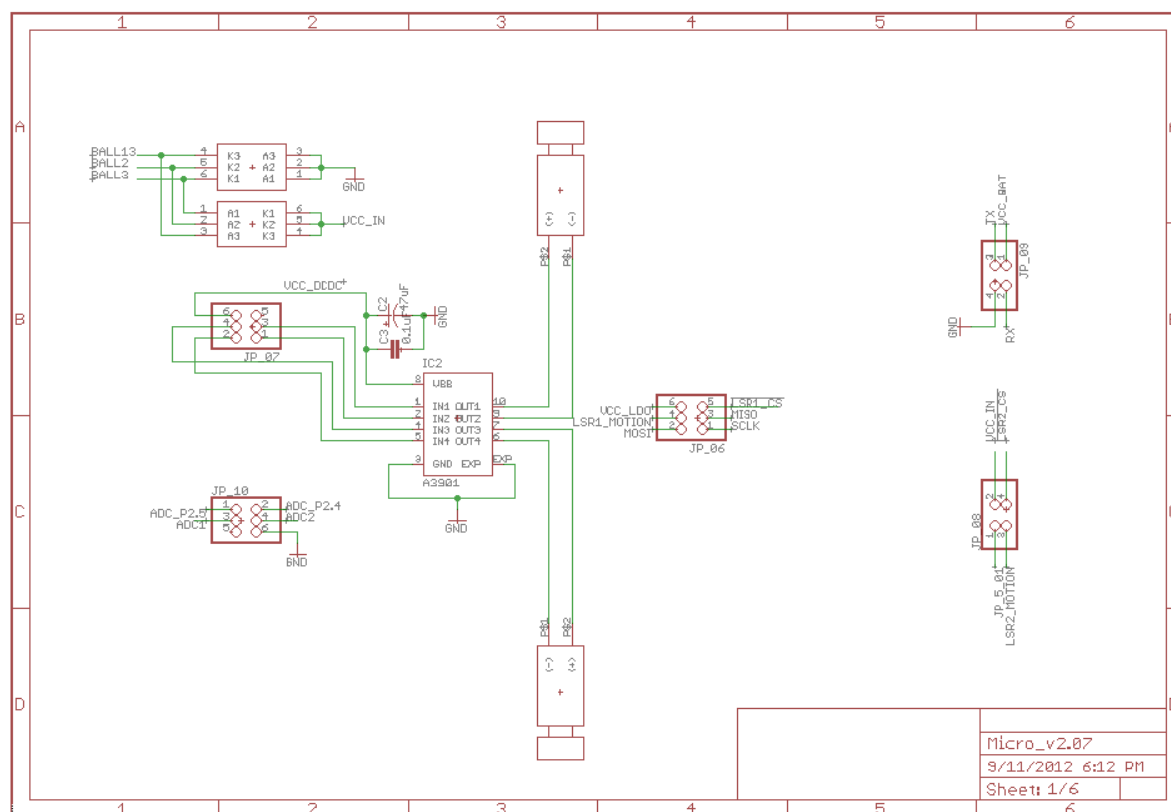


**Σχήμα 2-12.** Σχηματικό διάγραμμα γραμμικού συγκριτή τάσης LTC1540 [25].

κατάλληλος για τάσεις λειτουργίας από 2V έως 11V και συνεχόμενο ρεύμα πηγής 40mA. Παρακάτω δίδεται το σχηματικό διάγραμμα του συγκριτή τάσης, βλ. Σχήμα 2-12.

### Επίπεδο 3: πλακέτα κινητήρων

Το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει τους δύο φυγοκεντρικούς επενεργητές που είναι υπεύθυνοι για την κίνηση της πλατφόρμας. Το σχηματικό διάγραμμα του Επιπέδου 3 δίνεται στο Σχήμα 2-13.



**Σχήμα 2-13.** Σχηματικό διάγραμμα επιπέδου 3 στο πρόγραμμα CadSoft EAGLE [15].

Τα βασικά στοιχεία του επιπέδου αυτού:

### Μικροκινητήρες δόνησης 304-100, της Precision Microdrives

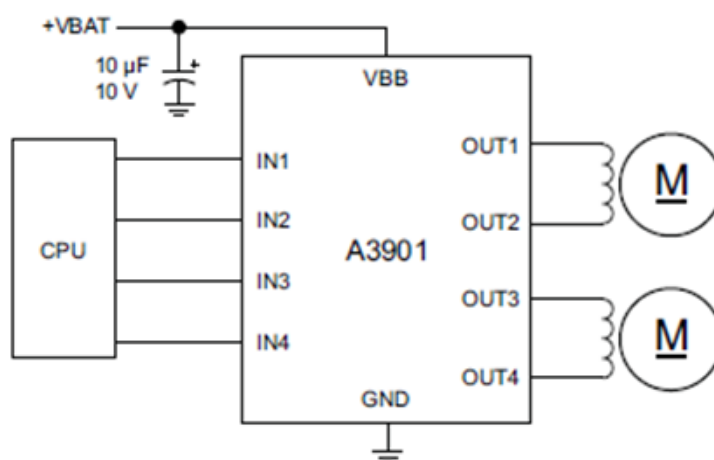
Παρατίθενται παρακάτω στον Πίνακα 2-2 τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητήρων

**Πίνακας 2-2.** Τεχνικά χαρακτηριστικά μικροκινητήρα δόνησης 304-100 [28].

Τεχνικά χαρακτηριστικά	304-100
<b>Τάση λειτουργίας (V)</b>	3
<b>Μέγιστες στροφές ανά λεπτό (rpm)</b>	15.000 ±3.000
<b>Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας (mA)</b>	76
<b>Μέγιστο ρεύμα εκκίνησης (mA)</b>	120
<b>Μέγιστη τάση εκκίνησης (V)</b>	2

### Μονάδα οδήγησης των κινητήρων A3901, της Allegro

Η μονάδα αυτή περιέχει δύο Η-Γέφυρες πλήρους λειτουργίας με παλμοδότηση συχνότητας έως και 250 kHz. Με τις γέφυρες αυτές παρέχεται η δυνατότητα πρόσω και ανάστροφη κίνηση καθώς και πέδη. Το τσιπ A3901 καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές απαιτήσεις των μικροκινητήρων καθώς μπορεί να τους παρέχει ρεύμα έντασης μέχρι και 400mA, μέσω του κάθε ζεύγους εξόδων του, βλ. Σχήμα 2-14.

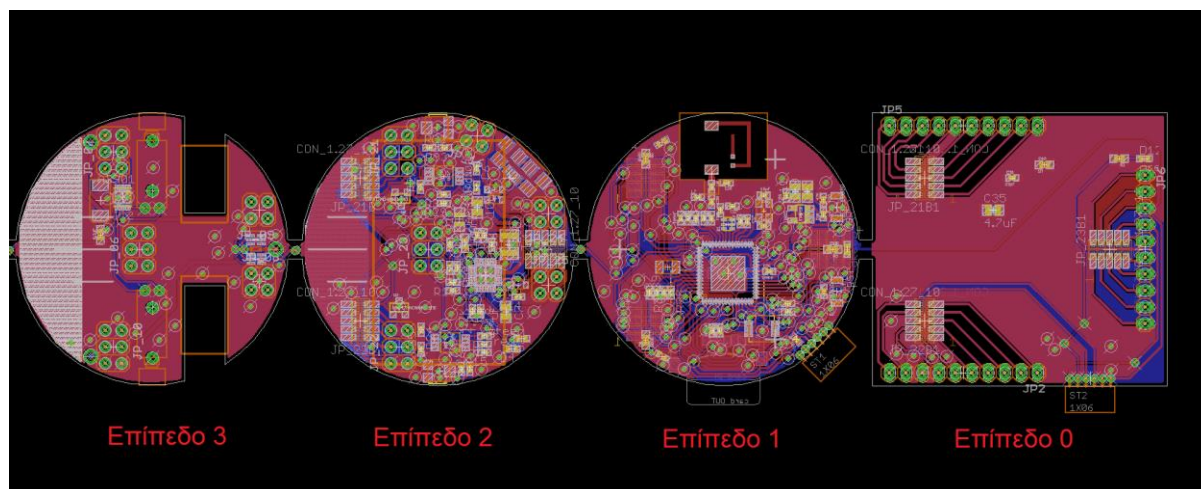


**Σχήμα 2-14.** Τυπικό διάγραμμα ελέγχου δύο κινητήρων συνεχούς ρεύματος [21].

### **2.3.2 Κατασκευή 2<sup>ης</sup> έκδοσης μικρορομπότ**

Έχοντας ολοκληρώσει το σχεδιασμό των σχηματικών διαγραμμάτων των πλακετών, ακολουθεί ο σχεδιασμός της εκτυπώσιμης μορφής αυτών, που ουσιαστικά αποτελεί τα δομικά επίπεδα του μικρορομπότ. Η απεικόνιση των επιπέδων έγινε στον ίδιο χώρο με μία ενιαία πλακέτα PCB, βλ. Σχήμα 2-15.. Τα επίπεδα συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας μικρής

«γέφυρας» η οποία μπορεί εύκολα να κοπεί. Πραγματοποιήθηκε σχεδίαση 2 επιφανειών (πάνω-κάτω όψη ) της πλακέτας PCB ώστε να γίνει καλύτερη διαχείριση του κυκλικού χώρου.

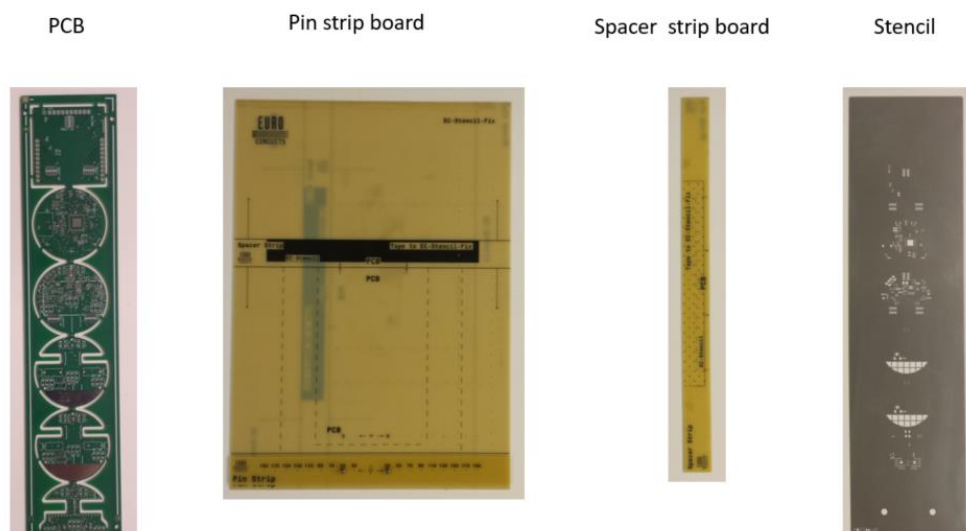


**Σχήμα 2-15.** Τελική μορφή απεικόνισης των τεσσάρων επιπέδων του μικρορομπότ στο πρόγραμμα EAGLE [15].

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την τελική κατασκευή των πλακετών και κατ' επέκταση του μικρορομπότ ήταν τα εξής:

#### Εκτύπωση των πλακετών

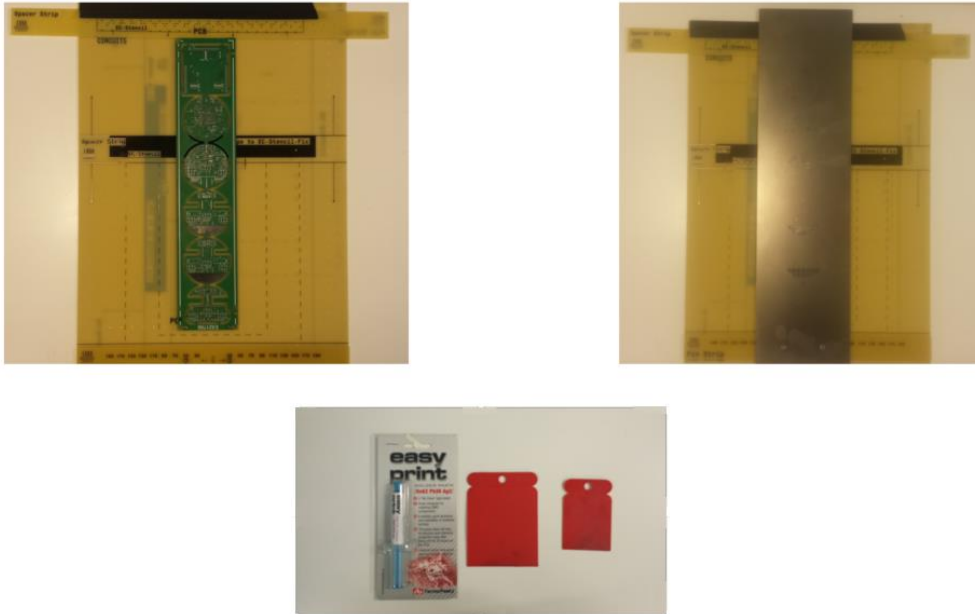
Η εκτύπωση των επιπέδων του ρομπότ καθώς και η εκτύπωση του stencil έγινε σε εξωτερική εταιρεία, την Eurocircuits καθώς δεν υπήρχε τρόπος να εκτυπωθούν οι πλακέτες διπλής όψεως στο εργαστήριο. Για τη χρήση του stencil περιλαμβάνονταν μαζί η πλάκα βάσης του PCB (Pin strip board) και η πλάκα στήριξης του PCB πάνω στη βάση (Spacer strip board), βλ. Σχήμα 2-16.



**Σχήμα 2-16.** Στοιχεία για την εκτύπωση πλακετών.

### Τοποθέτηση αλοιφής κόλλησης

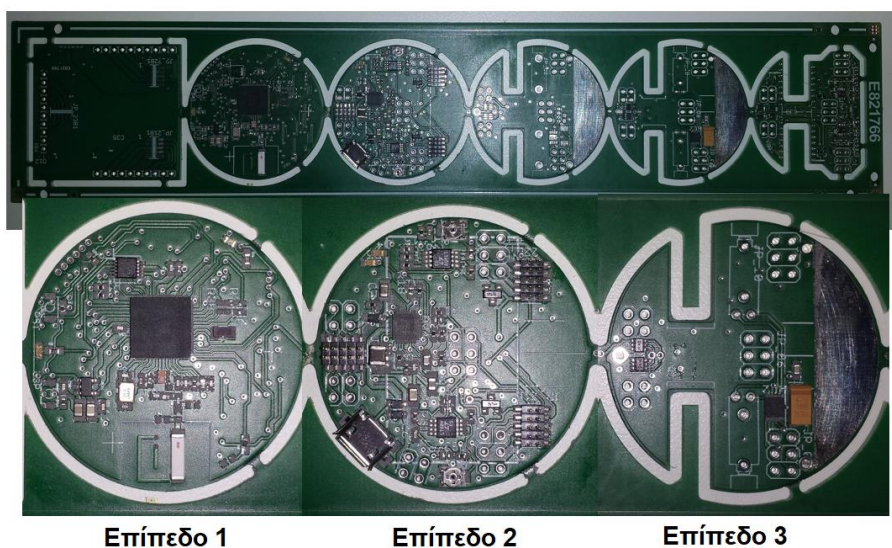
Για την τοποθέτηση της αλοιφής κόλλησης χρησιμοποιήθηκε το εκτυπωμένο stencil μαζί με τις δύο άλλες πλάκες, σε διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 2-17, για λόγους ακρίβειας. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η τοποθέτηση της αλοιφής κόλλησης με τη χρήση ειδικών εργαλείων επικάλυψης.



**Σχήμα 2-17.** Διαδικασία επικάλυψης αλοιφής κόλλησης.

### Τοποθέτηση ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών στοιχείων

Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρικά /ηλεκτρονικά στοιχεία στην πάνω όψη των πλακετών ενδιαφέροντος με τη χρήση ειδικών τσιμπιδών, βλ. Σχήμα 2-18.



**Σχήμα 2-18.** Αποτελέσματα της τοποθέτησης των ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών στοιχείων.



### Κόλληση των εξαρτημάτων

Η κόλληση των εξαρτημάτων έγινε από εξειδικευμένο φούρνο, που υπήρχε διαθέσιμος στο Εργαστήριο του Αυτομάτου Ελέγχου, βλ. Σχήμα 2-19. Ο φούρνος απαιτείται επειδή τα εξαρτήματα είναι τεχνολογίας SMD και επομένως η κόλληση τους είναι δύσκολη με συμβατικούς τρόπους. Στον εξειδικευμένο φούρνο επιλέχθηκε το κατάλληλο θερμοκρασιακό προφίλ σύμφωνα με τις προδιαγραφές των ηλεκτρονικών και της πάστας κολλήσεως για να αποφευχθούν φυσαλίδες. Το προφίλ αυτό είναι μία καμπύλη θέρμανσης και ψύξης που εξασφαλίζει τη σωστή τήξη και πήξη της πάστας.



**Σχήμα 2-19.** Τοποθέτηση του PCB με τα εξαρτήματα στον φούρνο (IR IC Heater T-962) του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου.

### Κόλληση των υπόλοιπων εξαρτημάτων

Έγινε με συμβατικές μεθόδους η κόλληση των υπόλοιπων εξαρτημάτων, βλ. Σχήμα 2-20. Τα εξαρτήματα αυτά είναι όσα δεν κολλήθηκαν με τη χρήση του εξειδικευμένου φούρνου (δηλαδή εξαρτήματα της κάτω όψης των πλακετών), οι κινητήρες, οι μεταλλικές σφαίρες, που αποτελούν τις βάσεις του ρομπότ και τέλος οι ακροδέκτες οι οποίοι συνδέουν τις βαθμίδες 3 και 2 μεταξύ τους.

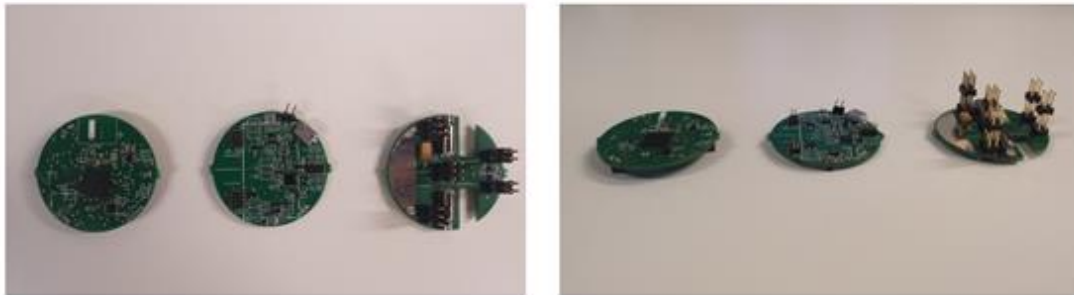


**Σχήμα 2-20.** Σταθμός κόλλησης ηλεκτρονικών του εργαστηρίου του Αυτομάτου Ελέγχου.

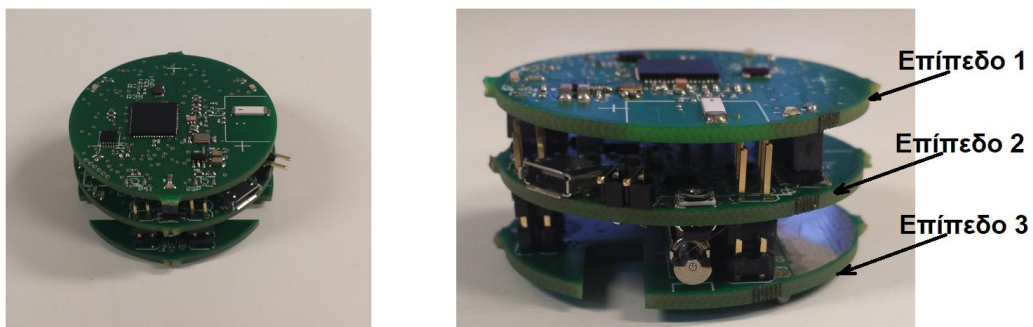
### 2.3.3 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

#### Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της κατασκευής του μικρορομπότ της προηγούμενης διαδικασίας δίνονται σε φωτογραφική απεικόνιση στα Σχήματα 2-21, 2-22 και 2-23. Απεικονίζονται τα τρία κύρια επίπεδα του ρομπότ και η πλακέτα προγραμματισμού. Στο επανακατεσκευασμένο μικρορομπότ φορτώθηκε ο υπάρχων κώδικας προγραμματισμού του και έγιναν πειράματα να ελεγχθεί ως προς τη λειτουργία του.



Σχήμα 2-23. Τελική μορφή απεικόνισης των επιπέδων 1, 2 και 3 του ρομπότ.



Σχήμα 2-22. Τελική μορφή μικρορομπότ. Διακρίνονται τα τρία επίπεδα ηλεκτρονικών.



Σχήμα 2-21. Τελική μορφή του επιπέδου 0 του μικρορομπότ.



## **Συμπεράσματα**

Εξετάζοντας τη 2<sup>η</sup> έκδοση του μικρορομπότ από κατασκευαστικής και τεχνικής πλευράς προκύπτουν οι παρακάτω προβληματισμοί:

1. Τα περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία που επιλέχθηκαν για το ρομπότ έχουν διάσταση πολύ μικρή με αποτέλεσμα να δυσκολεύεται η κόλληση τους, ενώ υπάρχει το περιθώριο για μεγαλύτερη διάσταση.

2. Σημαντικό επίσης είναι το μικρό κενό που υπάρχει μεταξύ της περιοχής γείωσης και των διαδρόμων τροφοδοσίας και σημάτων. Το αρνητικό αποτέλεσμα αυτού, είναι ότι δημιουργείται αντίσταση μεταξύ της γείωσης και της τροφοδοσίας με αποτέλεσμα η μπαταρία του ρομπότ να αδειάζει σύντομα.

3. Επίσης η σύνδεση των επιπέδων 2,3 και 4 γίνεται μέσω ακροδεκτών με σύνδεση απλής επαφής και όχι με τη χρήση κάποιου κονέκτορα με αποτέλεσμα στη διάρκεια λειτουργίας του να σταματάει να κινείται.

4. Τέλος παρατηρείται ότι με την προσθήκη του 4ου επιπέδου στη δομή του ρομπότ δεν θα μπορεί να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος των κινητήρων των στροφών αφού τα αισθητήρια ανάκλασης δεν θα είναι όσο κοντά θα πρέπει με τους κινητήρες.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβληματισμών προτείνεται η κατασκευή της 3<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ, η οποία θα έχει ως στόχο την αναβάθμιση και τη βελτίωση της λειτουργίας του.

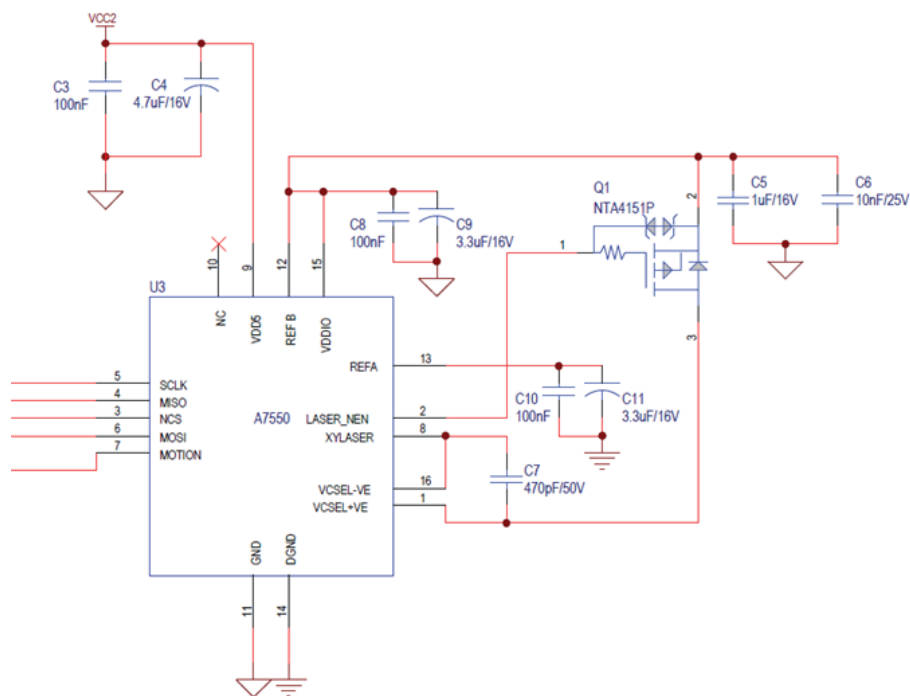
### 3 Ανάπτυξη συστήματος Οπτικών Αισθητήρων Laser

#### 3.1 Εισαγωγή

Για την ανάπτυξη συστήματος οπτικών αισθητήρων, που θα χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό της θέσης του μικρορομπότ και θα αποτελεί το 4<sup>ο</sup> επίπεδο του, ήταν απαραίτητη η δημιουργία πρώτα μιας δοκιμαστικής πλακέτας ώστε να ελεγχθεί τόσο ο τρόπος λειτουργίας, όσο και η ακρίβεια του αισθητήρα. Οι αισθητήρες που επιλέχθηκαν για την πλακέτα του ρομπότ είναι της εταιρίας Avago technologies και συγκεκριμένα το μοντέλο ADNS-7550.

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/sec) 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.

Για δημιουργία της δοκιμαστικής πλακέτας πραγματοποιήθηκε αρχικά μελέτη του τεχνικού δελτίου (datasheet) του αισθητήρα και συγκεκριμένα το σχηματικό διάγραμμα ώστε να διακριθούν τα απαραίτητα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά στοιχεία που χρειάζεται για να λειτουργήσει, βλ. Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1. Σχηματικό διάγραμμα του αισθητήρα ADNS-7550 [22].

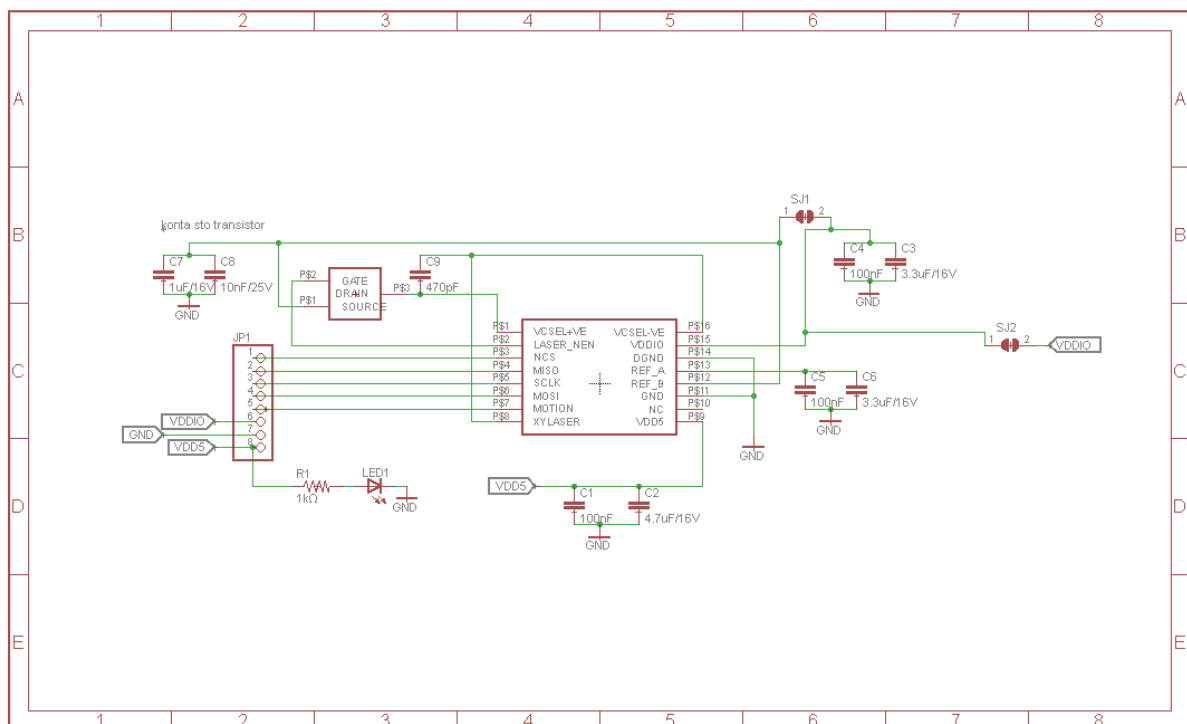
Τα κύρια στοιχεία από τη μελέτη του σχηματικού διαγράμματος που θα μας απασχολήσουν στο σχεδιασμό της πλακέτας είναι:

1. Οι δύο τάσεις τροφοδοσίας του αισθητήρα, μια στα 5V και μια στα 3.3V.
2. Και το τρανζίστορ NTA4151P που είναι απαραίτητο για τη λειτουργία του συστήματος laser του αισθητήρα.

### 3.2 Σχεδιασμός και κατασκευή δοκιμαστικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα

#### 3.2.1 Σχεδιασμός σχηματικού διαγράμματος δοκιμαστικής πλακέτας

Μετά την μελέτη του σχηματικού διαγράμματος του αισθητήρα, σχεδιάστηκε η δοκιμαστική πλακέτα στον Η/Υ με χρήση του λογισμικού σχεδίασης PCB, της εταιρίας Autodesk, EAGLE. Αρχικά σχεδιάζεται το σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας, βλ. Σχήμα 3-2.

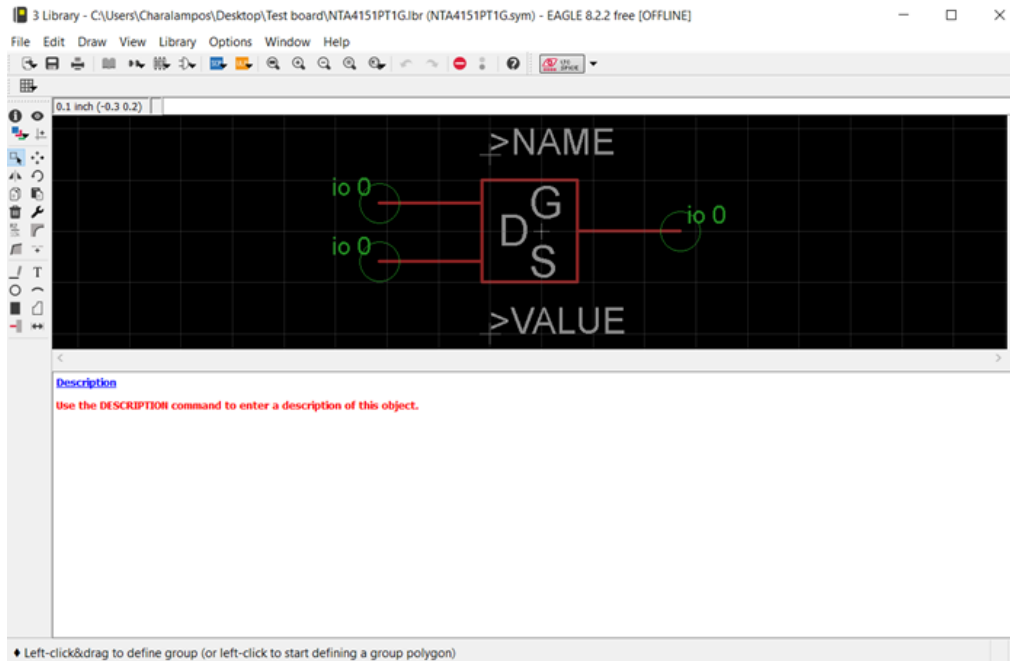


**Σχήμα 3-2.** Σχηματικό διάγραμμα δοκιμαστικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser.

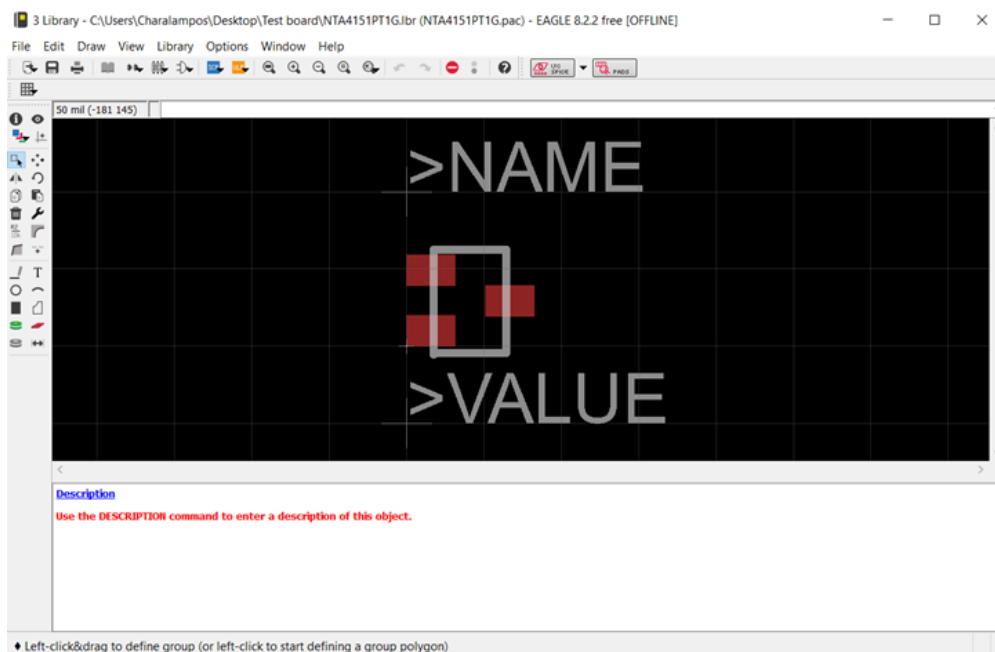
Για τη δημιουργία του σχηματικού διαγράμματος τοποθετήθηκαν όλα τα ηλεκτρικά/ηλεκτρονικά στοιχεία όπως υπαγορεύει το τεχνικό δελτίο (datasheet) του αισθητήρα, βλ. Παράρτημα Α. Για το τρανζίστορ NTA4151P του αισθητήρα, επειδή δεν υπήρχε διαθέσιμη βιβλιοθήκη, κατασκευάστηκε εκ νέου το σχηματικό του και το αποτύπωμα του στη πλακέτα από την αρχή, βλ. Σχήματα 3-3, 3-4.

Επιπλέον προστέθηκε μια λυχνία LED στην τάση τροφοδοσίας των 5V, ώστε να διακρίνεται η λειτουργία του. Τέλος προστέθηκαν solder jumpers στους διαδρόμους των τάσεων τροφοδοσίας ώστε να ελέγχονται για πιθανόν βραχυκύκλωμα με τη γείωση. Η

αναφορά αυτή είναι σημαντική καθώς υπάρχει πιθανότητα ανεπανόρθωτης βλάβης του αισθητήρα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.



Σχήμα 3-4. Σχηματικό διάγραμμα τρανζίστορ NTA4121P.



Σχήμα 3-3. Διάγραμμα αποτυπώματος του τρανζίστορ NTA4151P.

### 3.2.2 Κατασκευή δοκιμαστικής πλακέτας

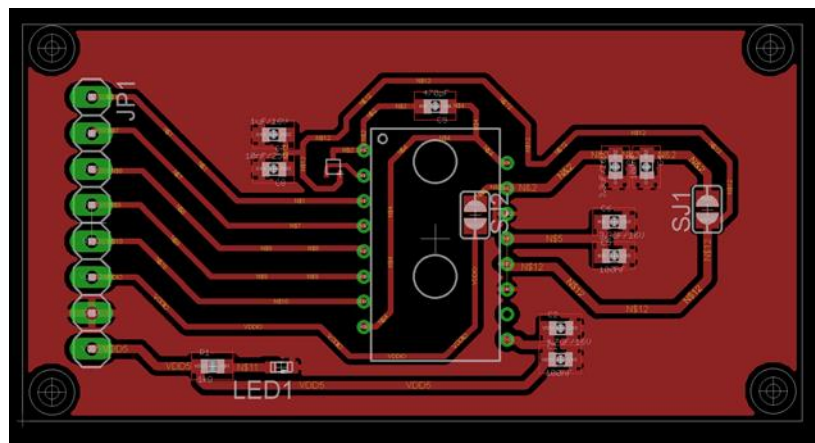
Μετά τη δημιουργία του σχηματικού διαγράμματος της δοκιμαστικής πλακέτας ακολουθεί η σχεδιαστική μελέτη που έγινε για τη δημιουργία της εκτυπωμένης μορφής της πλακέτας (board), βλ. Σχήμα 3-5.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η τοποθέτηση των ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών στοιχείων του, στις κατάλληλες θέσεις. Τοποθετήθηκαν οι πυκνωτές σταθεροποίησης και φιλτραρίσματος της τάσης, όσο πιο κοντά ήταν επιτρεπτό, στους ακροδέκτες τροφοδοσίας του αισθητήρα και του τρανζίστορ NTA4151P αντίστοιχα.

Επιπλέον τοποθετήθηκε μια σειρά 8 ακροδεκτών (JP1) όπου συνδέθηκαν τα σήματα εισόδου/εξόδου του αισθητήρα καθώς οι δύο τροφοδοσίες του και η γείωση. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα σύνδεσης της πλακέτας μέσω απλών καλωδίων, με Η/Υ ελέγχου.

Η μεγάλη κόκκινη περιοχή που διακρίνεται στο Σχήμα 3-5 αποτελεί την περιοχή γείωσης (ground plane) η οποία θα πρέπει να καλύπτει μεγάλο μέρος της επιφάνειας της πλακέτας και να είναι σε κατάλληλη κατά το δυνατό απόσταση από τους διαδρόμους των σημάτων και της τροφοδοσίας. Αυτό είναι σημαντικό καθώς η περιοχή γείωσης είναι συνδεδεμένη με το αρνητικό δυναμικό της πηγής τροφοδοσίας οπότε αποτελεί την διαδρομή επιστροφής των ρευμάτων των διαφόρων στοιχείων της πλακέτας και επίσης εξομαλύνεται και ο θόρυβος των σημάτων.

Τέλος στο διάγραμμα της πλακέτας του αισθητήρα δημιουργήθηκαν 4 οπές στις γωνίες της πλακέτας ώστε να περαστούν κοχλίες και με χρήση περικοχλίων να ρυθμίζεται το ύψος του αισθητήρα από το έδαφος.

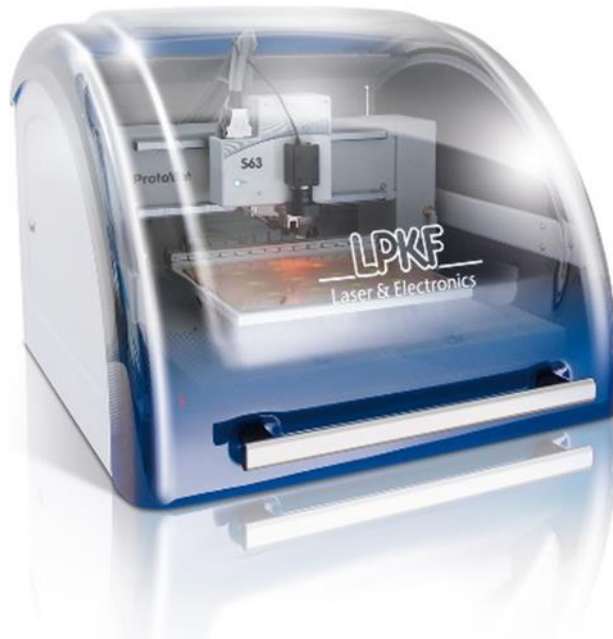


**Σχήμα 3-5.** Διάγραμμα εκτυπωμένης μορφής δοκιμαστικής πλακέτα οπτικού αισθητήρα laser.

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδιαστικής μελέτης ακολούθησε η κατασκευή της που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την τελική κατασκευή της δοκιμαστικής πλακέτας ήταν τα εξής:

### Εκτύπωση της πλακέτας

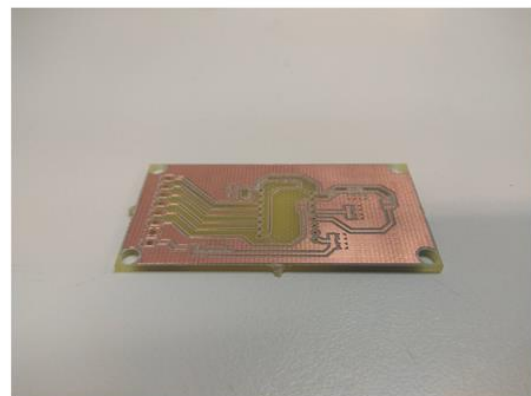
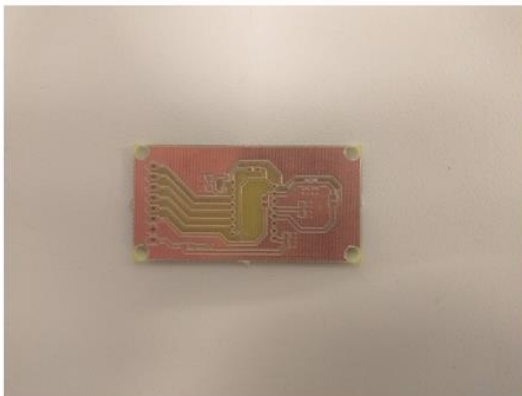
Η εκτύπωση έγινε με χρήση της ειδικής εργαλειομηχανής LPKF που είναι διαθέσιμη στο εργαστήριο του Αυτομάτου Ελέγχου, βλ. Σχήμα 3-6. Από το σχεδιαστικό πρόγραμμα (EAGLE)



**Σχήμα 3-6.** Μηχανή κατασκευής πλακετών LPKF S63 του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π.

ο χρήστης παράγει το τελικό σχέδιο σε ειδικής μορφής αρχεία (Gerber files), κατάλληλων για την ανάγνωση τους από την εργαλειομηχανή. Σε ειδική εφαρμογή του προγράμματος της μηχανής LPKF ρυθμίζονται τα εργαλεία, το είδος της πλακέτας που χρησιμοποιείται (one sided, double sided κτλ.) και φορτώνονται τα Gerber files ώστε να παραχθεί η πλακέτα.

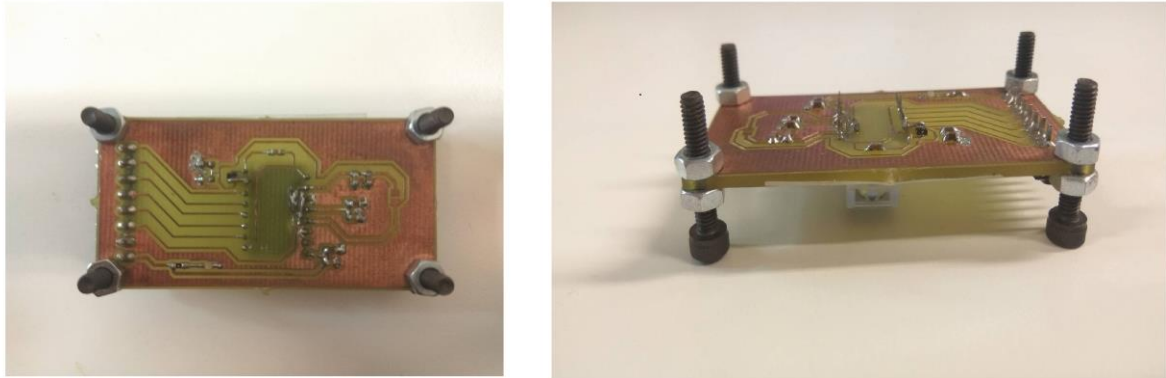
Στο Σχήμα 3-7 διακρίνεται το αποτέλεσμα της κατεργασίας που πραγματοποιήθηκε από την ειδική εργαλειομηχανή LPKF.



**Σχήμα 3-7.** Απεικόνιση της δοκιμαστικής πλακέτας μετά την κατασκευή.

### Κόλληση των εξαρτημάτων

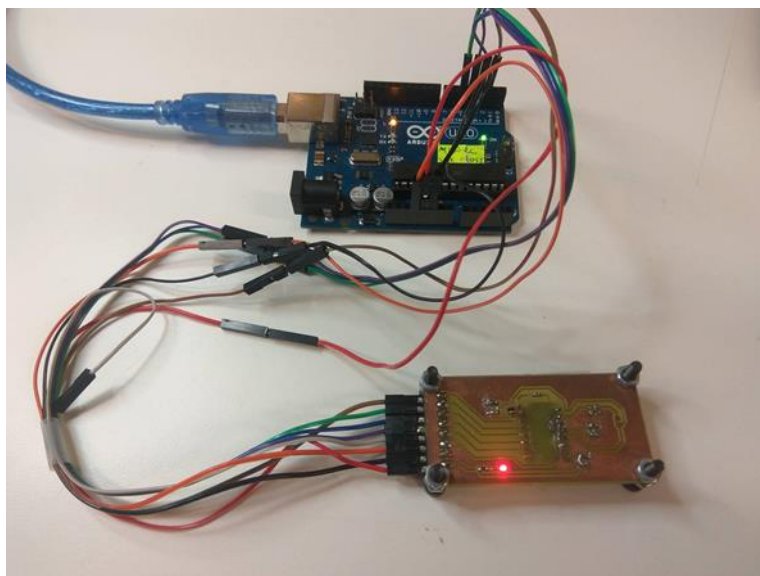
Τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά στοιχεία, καθώς και ο αισθητήρας κολλήθηκαν με συμβατικές μεθόδους. Παρόλο που τα στοιχεία ήταν τεχνολογίας SMD, δεν έγινε χρήση του εξειδικευμένου φούρνου, καθώς ο αριθμός των εξαρτημάτων ήταν μικρός και η χρήση του θα ήταν υπερβολική. Το Σχήμα 3-8 δείχνει την τελική απεικόνιση της δοκιμαστικής πλακέτας.



**Σχήμα 3-8.** Τελική μορφή απεικόνισης της δοκιμαστικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser.

### **3.2.3 Διεξαγωγή πειραμάτων**

Μετά την κατασκευή, ήταν απαραίτητο να βρεθεί κατάλληλο προγραμματιστικό περιβάλλον ώστε να πραγματοποιηθούν πειράματα λειτουργίας του αισθητήρα. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε η πλατφόρμα του Arduino καθώς υπήρχε διαθέσιμη βιβλιοθήκη. Γράφτηκε ο κατάλληλος κώδικας δοκιμής του αισθητήρα και πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τον έλεγχο της ακρίβειάς του. Το Σχήμα 3-9 απεικονίζει την πειραματική διάταξη.



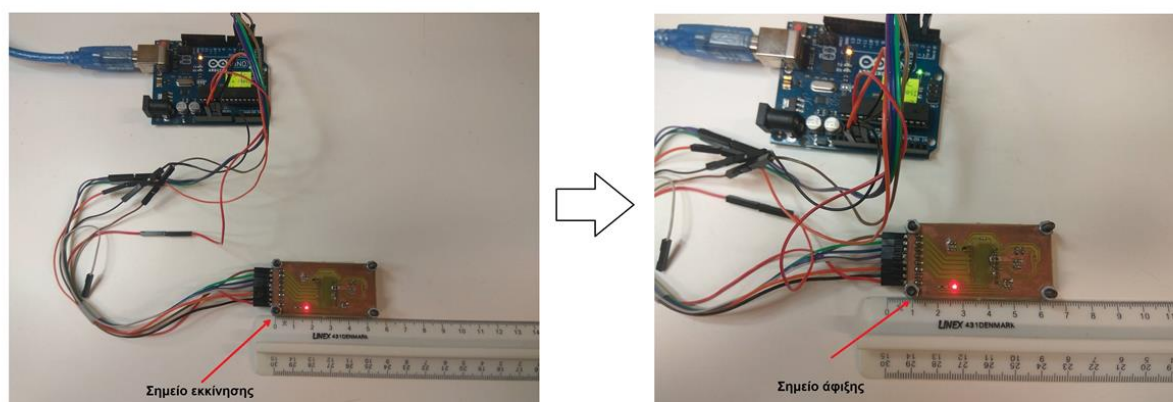
**Σχήμα 3-9.** Πειραματική διάταξη δοκιμαστικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser.



### Πειραματική διαδικασία

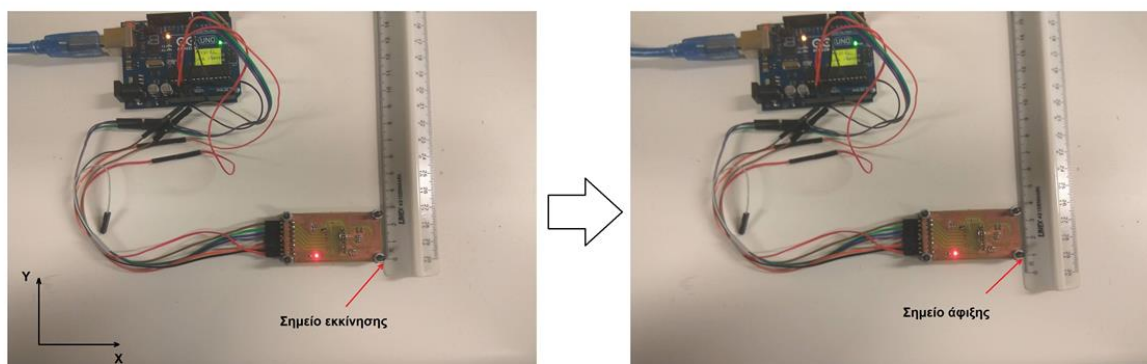
Ο οπτικός αισθητήρας ADNS-7550 έχει 4 καταχωρητές σταθερής τιμής οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της επικοινωνίας του με τη μονάδα ελέγχου. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιεί ο αισθητήρας είναι σύγχρονη σειριακή επικοινωνία (SPI), αναλυτικές πληροφορίες δίνονται στο Παράρτημα Β. Έτσι το πρώτο βήμα της πειραματικής διαδικασίας ήταν η ανάγνωση των τεσσάρων αυτών καταχωρητών ώστε να ελεγχθεί η επικοινωνία του με το Arduino.

Έχοντας ελέγξει τη σωστή λειτουργία της επικοινωνίας το επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος της ακρίβειας των μετρήσεων. Για τον έλεγχο των μετρήσεων τοποθετήθηκε η δοκιμαστική πλακέτα σε αριθμημένο κανόνα. Πραγματοποιήθηκε πρώτα ο έλεγχος των μετρήσεων κατά τον x άξονα του αισθητήρα, βλ. Σχήμα 3-10. Οπότε η κάτω αριστερή γωνία της πλακέτας τοποθετήθηκε στη θέση 0 mm (σημείο εκκίνησης) του κανόνα και μετακινήθηκε κατά 10 mm (χιλιοστά) δεξιά (σημείο άφιξης). Η ταχύτητα μετακίνησης της πλακέτας ήταν ίδια με την συνήθη ταχύτητα μετακίνησης ενός οποιουδήποτε ποντικιού ηλεκτρονικού υπολογιστή.



**Σχήμα 3-10.** Απεικόνιση Πειραματικής διαδικασίας της δοκιμαστικής πλακέτας κατά τον x άξονα.

Με αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος των μετρήσεων κατά τον y άξονα του αισθητήρα, βλ. Σχήμα 3-11. Στην περίπτωση αυτή, η κάτω δεξιά γωνία της πλακέτας



**Σχήμα 3-11.** Απεικόνιση Πειραματικής διαδικασίας της δοκιμαστικής πλακέτας κατά τον y άξονα.

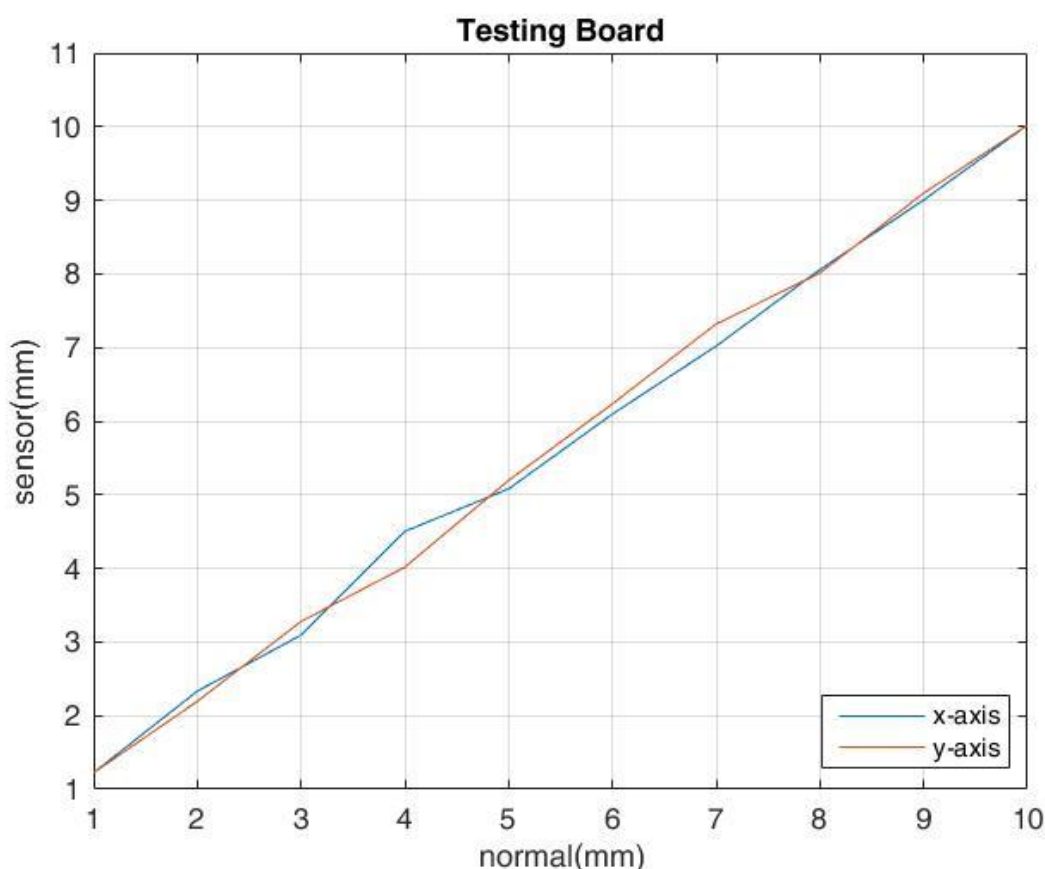


τοποθετήθηκε στη θέση 0 mm (σημείο εκκίνησης) του κανόνα και μετακινήθηκε κατά 10 mm (χιλιοστά) προς τα πάνω (σημείο άφιξης).

Το κύριο μέρος του προγράμματος διαβάζει τις τιμές των καταχωρητών που δίνουν τα δΧ και δΥ σε counts. Από την ανάλυση που επιλέγεται για τον αισθητήρα (για το συγκεκριμένο πείραμα επιλέχθηκε ανάλυση 1600cpi) γίνεται η μετατροπή των δΧ και δΥ σε ίντσες και στη συνέχεια σε χιλιοστά.

### Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στο Σχήμα 3-12.



**Σχήμα 3-12.** Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας μέτρησης του αισθητήρα κατά τον x και y άξονα.

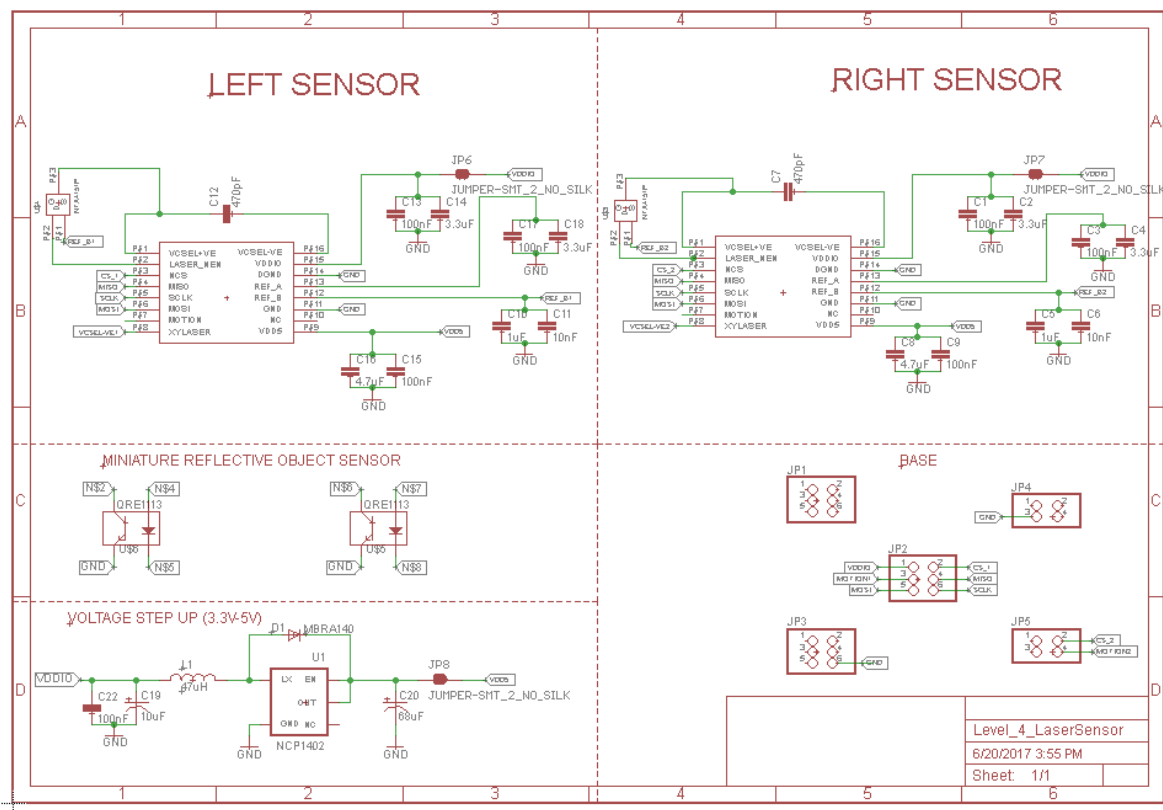
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι τιμές κατά τον x και y άξονα του κανόνα (οριζόντιος άξονας) προσεγγίζονται αρκετά καλά από τις τιμές που καταγράφει ο αισθητήρας (κατακόρυφος άξονας). Και στις δύο περιπτώσεις τους πειράματος μετρούσαμε μόνο την μία τιμή ανάλογα με τον άξονα ενδιαφέροντος ενώ η άλλη τιμή που έδινε ο αισθητήρας έπερεπε να παραμένει σταθερή και ίση με το μηδέν ιδανικά. Για τις σταθερές τιμές του y και του x άξονα αντίστοιχα παρατηρήθηκε μία μικρή μεταβολή στην τιμή τους που όμως παρέμενε πολύ κοντά στο μηδέν. Αυτό συνέβει επειδή η μετακίνηση του αισθητήρα έγινε με το χέρι και όχι από

κάποια διάταξη ακριβείας, που όμως δεν ήταν απαραίτητη έτσι και αλλιώς για τέτοιου είδους πείραμα.

### 3.3 Σχεδιασμός και κατασκευή πλακέτας οπτικών αισθητήρων Laser

#### 3.3.1 Σχεδιασμός πλακέτας οπτικών αισθητήρων Laser στον H/Y.

Η σχεδίαση του σχηματικού διαγράμματος της 4<sup>ης</sup> βαθμίδας του ρομπότ έγινε και αυτή στο περιβάλλον του EAGLE, της Autodesk, βλ. Σχήμα 3-13. Στη συνέχεια αναλύεται η σχεδιαστική μελέτη για τη δημιουργία του σχηματικού του Επιπέδου 4.



Σχήμα 3-13. Σχηματικό Διάγραμμα 4ης βαθμίδας του μικρορομπότ.

Αρχικά ακολουθήθηκαν όλα τα βήματα που έγιναν για τη δοκιμαστική πλακέτα αλλά για δύο αισθητήρες. Παρόλα αυτά, επειδή η πλακέτα αυτή θα αποτελεί μέρος του μικρορομπότ, έπρεπε να μελετηθούν και άλλοι περιορισμοί.

Συγκεκριμένα, επειδή το μικρορομπότ δεν έχει δυνατότητα παροχής 5V που χρειάζεται ο αισθητήρας, καθώς η ονομαστική τάση της μπαταρία του είναι 3.7V, προστέθηκε μια διάταξη μετατροπής της τάσης 3.3V, που παρέχεται από το ρομπότ μέσω ενός ακροδέκτη του, σε 5V. Η διάταξη μετατροπής που επιλέχθηκε ήταν μια έτοιμη πρόταση της εταιρίας SparkFun, βλ. Σχήμα 3.14. Η διάταξη αυτή αποτελείται από μια συστοιχία πυκνωτών και ενός πηνίου. Η

μετατροπή γίνεται με τη βοήθεια του ρυθμιστή τάσης NCP1402, της εταιρίας ON Semiconductor.

Στην βαθμίδα αυτή προστέθηκαν οι οπτικοί αισθητήρες ανάκλασης του 2ου επιπέδου, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του κινητήρα αφού με την εισαγωγή της βαθμίδας στο ρομπότ καλύπτεται η επιφάνεια των αισθητηρίων ανάκλασης του 2ου επιπέδου και δημιουργεί πρόβλημα στον έλεγχο των στροφών των κινητήρων. Για το σκοπό αυτό έγινε η κατάλληλη μελέτη για την προσθήκη των αισθητηρίων αυτών σε αυτή τη βαθμίδα και κατάλληλος σχεδιασμός ώστε να επικοινωνεί με τα απαραίτητα στοιχεία του 2ου επιπέδου. Η μελέτη αυτή παρουσιάζεται στη συνέχεια.



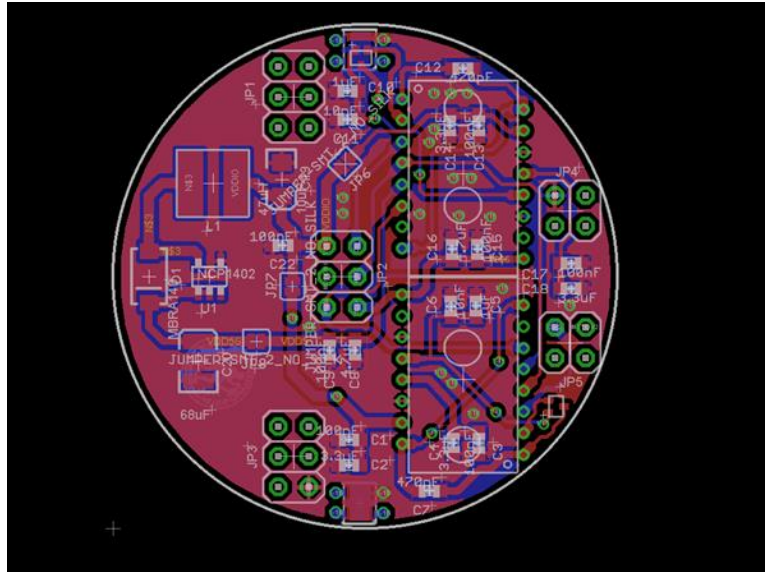
**Σχήμα 3-14.** Διάταξη μετατροπής της τάσης σε 5V, της Sparkfun.

### 3.3.2 Κατασκευή πλακέτας οπτικών αισθητήρων laser

Έχοντας ολοκληρώσει το σχεδιασμό του σχηματικού διαγράμματος, προχωρήσαμε στο σχεδιασμό της εκτυπώσιμης μορφής της πλακέτας των οπτικών αισθητήρων laser. Η σχεδιαστική μελέτη που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει όλες τις παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Συγκεκριμένα τα αισθητήρια ανάκλασης τοποθετήθηκαν στην ίδια ακριβώς θέση όπως και στο 2<sup>ο</sup> επίπεδο και σχεδιάστηκαν ακροδέκτες στα 4 σημεία του αποτυπώματος του αισθητηρίου QRE1113GR έτσι ώστε να συνδέονται με το από πάνω επίπεδο. Στο Σχήμα 3-15 διακρίνεται και το αποτύπωμα της διάταξης μετατροπής τάσης της SparkFun.

Όπως και στις υπόλοιπες βαθμίδες του ρομπότ, έτσι και εδώ σχεδιάστηκαν δύο επιφάνειες (πάνω-κάτω όψη) της πλακέτας PCB ώστε να γίνει καλύτερη διαχείριση του κυκλικού δίσκου της πλακέτας. Το ίδιο πραγματοποιήθηκε και με την περιοχή γείωσης, στην πάνω και στην κάτω πλευρά της πλακέτας, με μόνη διαφορά ότι εδώ υπάρχει κατάλληλο κενό μεταξύ της γείωσης και των διαδρόμων τροφοδοσίας και σημάτων για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων.

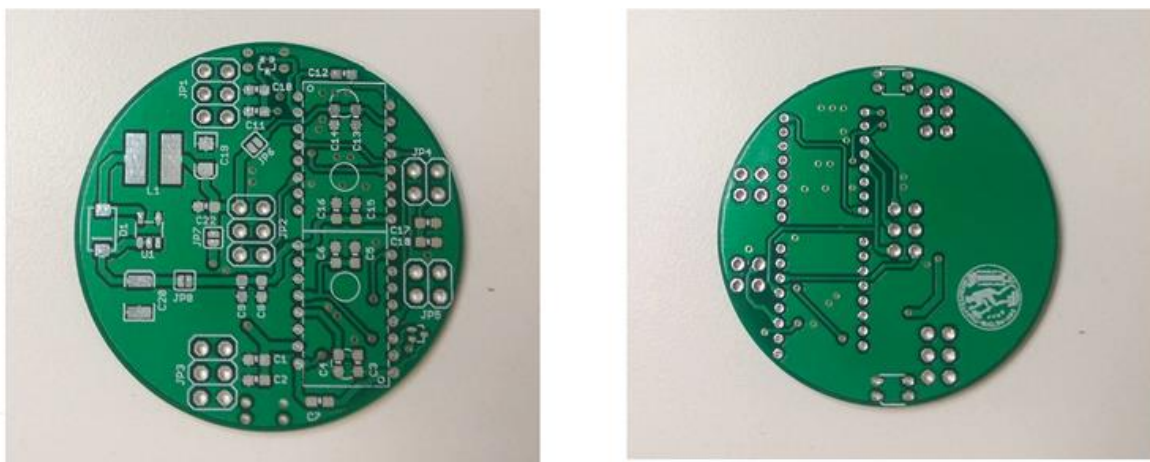


**Σχήμα 3-15.** Τελική μορφή απεικόνισης εκτυπώσιμης μορφής επιπέδου 4.

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδιαστικής μελέτης ακολούθησε η κατασκευή της που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την τελική κατασκευή της βαθμίδας που θα προστεθεί στο μικρορομπότ ήταν τα εξής:

#### Εκτύπωση των πλακετών

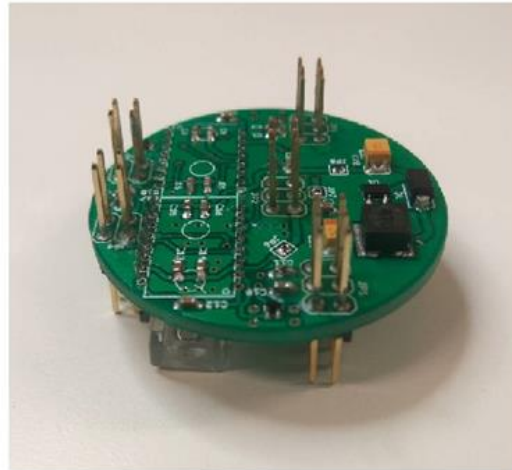
Η εκτύπωση της 4ης βαθμίδας του ρομπότ έγινε σε εξωτερική εταιρεία, την Elecrow, αφού όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως δεν υπήρχε τρόπος να εκτυπωθούν οι πλακέτες διπλής όψεως στο εργαστήριο, βλ. Σχήμα 3-16. Πριν την αποστολή των σχεδίων της πλακέτας στην εταιρία πραγματοποιήθηκε σχεδιαστικός έλεγχος (DRC) Το αρχείο που χρειάζεται για να γίνει από το πρόγραμμα ο έλεγχος αυτός δίνεται από την εταιρία και μπορεί να είναι διαφορετικός ανάλογα με τις προδιαγραφές που ορίζονται από την εκάστοτε εταιρία.



**Σχήμα 3-16.** Τελική μορφή απεικόνισης του επιπέδου 4 του ρομπότ.

### Κόλληση των εξαρτημάτων

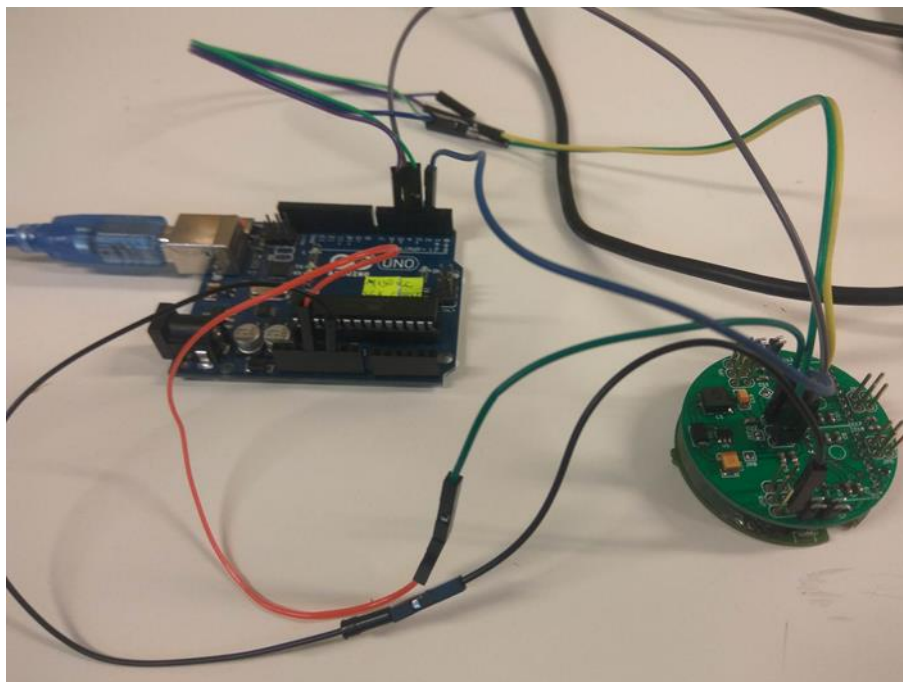
Για την κατασκευή της τελικής πλακέτας έγινε η τοποθέτηση όλων των στοιχείων και κόλληση του με συμβατικές μεθόδους, βλ. Σχήμα 3-17. Για τους ίδιους λόγους, όπως και στην προηγούμενη ενότητα, δεν έγινε χρήση του ειδικού φούρνου.



**Σχήμα 3-17.** Τελική μορφή απεικόνισης της πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser του ρομπότ.

### **3.3.3 Διεξαγωγή πειραμάτων**

Τα πειράματα λειτουργίας του αισθητήρα έγιναν όπως και με τη δοκιμαστική πλακέτα στο περιβάλλον του Arduino, βλ. Σχήμα 3-18. Με τον ίδιο κώδικα ελέγχθηκαν και οι δύο αισθητήρες ως προς τη λειτουργία και την ανάλυση του αισθητήρα



**Σχήμα 3-18.** Πειραματική διάταξη της τελικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser.

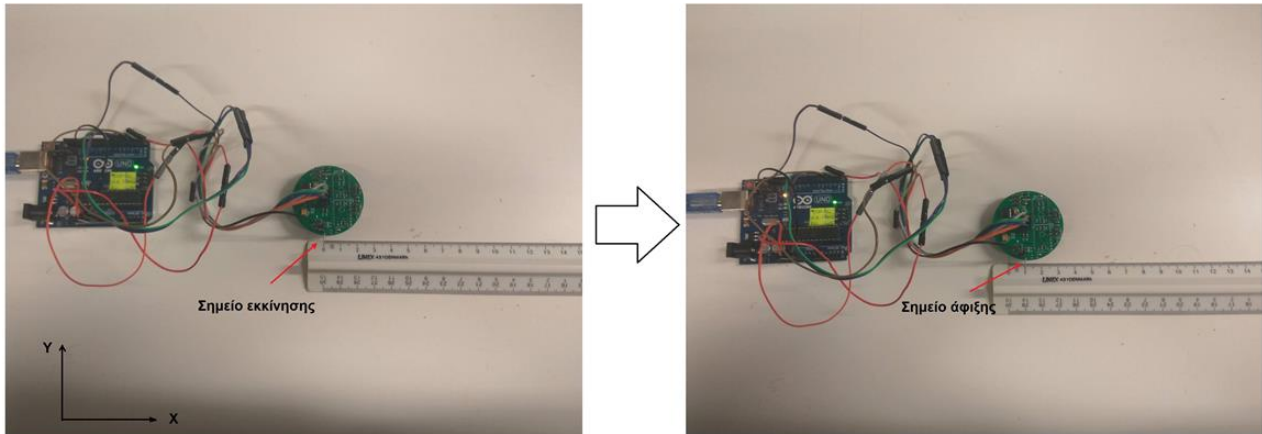


### Πειραματική διαδικασία

Ακολουθήθηκε η ίδια πειραματική διαδικασία όπως και προηγουμένως για τον έλεγχο της επικοινωνίας και τις ακρίβειες του αισθητήρα ADNS-7550 για την βαθμίδα 4 που θα χρησιμοποιηθεί στο μικρορομπότ.

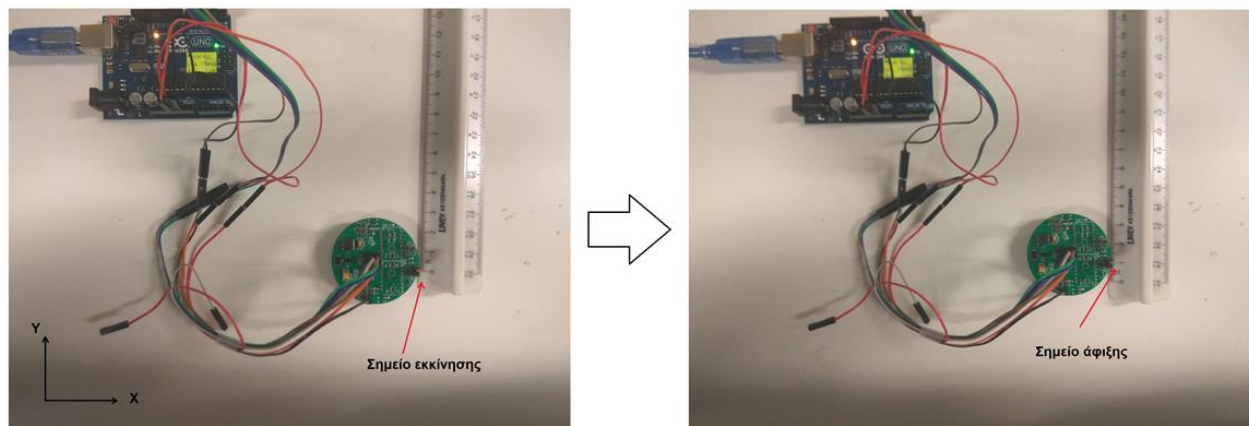
Στα Σχήματα 3-19 και 3-20 απεικονίζεται η πειραματική διαδικασία κατά τον άξονα x και y αντίστοιχα.

#### Κατά τον άξονα x



**Σχήμα 3-19.** Απεικόνιση Πειραματικής διαδικασίας της τελικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser κατά τον x άξονα.

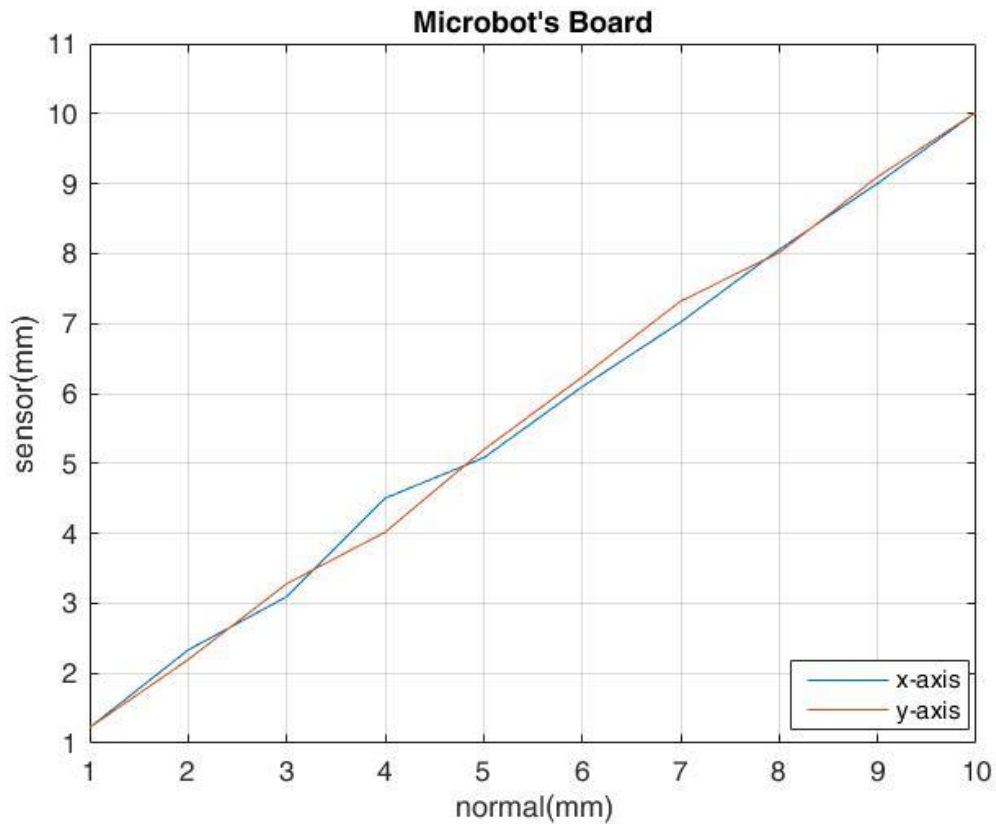
#### Κατά τον άξονα y



**Σχήμα 3-20.** Απεικόνιση Πειραματικής διαδικασίας της τελικής πλακέτας οπτικού αισθητήρα laser κατά τον y άξονα.

## Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 3-21.



**Σχήμα 3-21.** Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας μέτρησης του αισθητήρα κατά τον x και y άξονα.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με τη τελική πλακέτα των οπτικών αισθητήρων παρατηρείται και εδώ ότι οι τιμές κατά τον x και y άξονα του κανόνα προσεγγίστηκαν αρκετά καλά από τις τιμές που καταγράφει ο αισθητήρας και η άλλη παράμετρος παρέμενε (σχεδόν) σταθερή και κοντά στο μηδέν. Αυτό είναι λογικό καθώς η φύση του πειραμάτος αυτού ήταν να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία της πλακέτας των οπτικών αισθητήρων που θα εισαχθεί στο μικρορομπότ.

Έχοντας ελέγξει τους οπτικούς αισθητήρες της 4ης βαθμίδας είναι εφικτή η εισαγωγή της στη δομή του ρομπότ ώστε να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος θέσης. Ωστόσο για να γίνει αυτό θα πρέπει να έχει υλοποιηθεί ενσύρματη ή ασύρματη επικοινωνία του ρομπότ με τον Η/Υ, ώστε μετά την ανάγνωση των δεδομένων από τους οπτικούς αισθητήρες το ρομπότ να μπορεί να στείλει στο Η/Υ τα δεδομένα προς επεξεργασία. Η ενσύρματη επικοινωνία του ρομπότ με το Η/Υ υπάρχει, ωστόσο μέσω της επικοινωνίας αυτής η τάση τροφοδοσίας που πηγαίνει στο ρομπότ δεν φτάνει να τροφοδοτήσει τους αισθητήρες. Έτσι λοιπόν δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης και υλοποίησης της ασύρματης επικοινωνίας μικρορομπότ-Η/Υ.

## 4 Ανάπτυξη και Υλοποίηση Ασύρματης Επικοινωνίας Μικρορομπότ-με Η/Υ Ελέγχου

### 4.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη και υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας μικρορομπότ-Η/Υ δεν είναι απαραίτητη μόνο για την πραγματοποίηση του ελέγχου θέσης μέσω των οπτικών αισθητήρων laser. Μέσω της υλοποίησης της αποστολής δεδομένων από το μικρορομπότ στον Η/Υ μπορούμε να παίρνουμε πληροφορίες και από άλλους αισθητήρες. Η καταγραφή και η περαιτέρω επεξεργασία των πληροφοριών αυτών μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της γενικότερης λειτουργίας του μικρορομπότ.

Στην μεταπτυχιακή εργασία [15], η ασύρματη επικοινωνία περιλάμβανε την αποστολή απλών αριθμητικών δεδομένων και εντολών ταχύτητας από Η/Υ σε δύο μικρορομπότ και επιστροφή μόνο των αριθμητικών δεδομένων αυτών από τα ρομπότ πίσω στον Η/Υ. Στην παρούσα εργασία, η ασύρματη επικοινωνία περιλαμβάνει επιπλέον την *αποστολή πακέτων πληροφοριών* της λειτουργίας του μικρορομπότ στον Η/Υ και κατ' επέκταση την μελλοντική αποστολή πληροφοριών από τους οπτικούς αισθητήρες laser ή και πιθανόν πρόσθετων αισθητήρων.

Στις επόμενες ενότητες αναλύεται η παραπάνω υλοποίηση. Αρχικά αναφέρονται μερικά στοιχεία θεωρίας ασύρματων δικτύων και πρωτοκόλλου επικοινωνίας μεταξύ του ρομπότ και του χρήστη-προσωπικό υπολογιστή. Στην συνέχεια δίνεται η αρχιτεκτονική του συστήματος σε επίπεδο υλικού και λογισμικού και τέλος αναλύεται η πειραματική υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας μικρορομπότ-Η/Υ.

### 4.2 Ασύρματα δίκτυα και Πρωτόκολλο Επικοινωνίας

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί, ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας των υποσυστημάτων που απαιτούνται για την επικοινωνία απομακρυσμένων συσκευών. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο.

Το σύστημα μικρορομπότ-Η/Υ περιλαμβάνει τις απομακρυσμένες συσκευές, που ανταλλάσσουν πληροφορίες σε ψηφιακή μορφή. Η μετάδοση της ψηφιακής πληροφορίας γίνεται με τη μορφή 0 και 1 με χρήση RF σημάτων που εκπέμπονται, μέσω του αέρα, από ψηφιακούς πομποδέκτες. Για την επικοινωνία των απομακρυσμένων συσκευών του συστήματος μικρορομπότ-Η/Υ αλλά και για κάθε είδους επικοινωνία, πρέπει να υπάρχουν κάποιοι κοινός κανόνες και συμβάσεις μεταξύ των επικοινωνούντων συστημάτων.

Στις τηλεπικοινωνίες, το σύνολο από κανόνες που διέπουν την επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων συσκευών ονομάζεται πρωτόκολλο. Μεταξύ του ρομπότ και του χρήστη-



προσωπικού 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 κριτηρίων από την πλευρά τους τα οποία ορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας.

### 4.3 Αρχιτεκτονική συστήματος

Το σύστημα ασύρματης επικοινωνίας που επιλέχθηκε για τον αναβαθμισμένο μικρορομποτικό μηχανισμό, είναι το *chronos ez430* της Texas Instruments. Η συσκευή αυτή, με μια μικρή μετατροπή και μαζί με το USB emulator που παρέχεται από την εταιρία για τον προγραμματισμό του, χρησιμοποιήθηκε για την επικοινωνία προσωπικού υπολογιστή-μικρορομπότ, βλ. Σχήμα 4-1. Αυτή έγινε επειδή το *chronos* και ο μικροελεγκτής του ρομπότ έχουν τους ίδιους πομποδέκτες πράγμα που συνετέλεσε στην απλοποίηση και ενίσχυση της αξιοπιστίας της σύνδεσης.



Σχήμα 4-1. Σύστημα ασύρματης επικοινωνίας *chronos ez430* της TI.

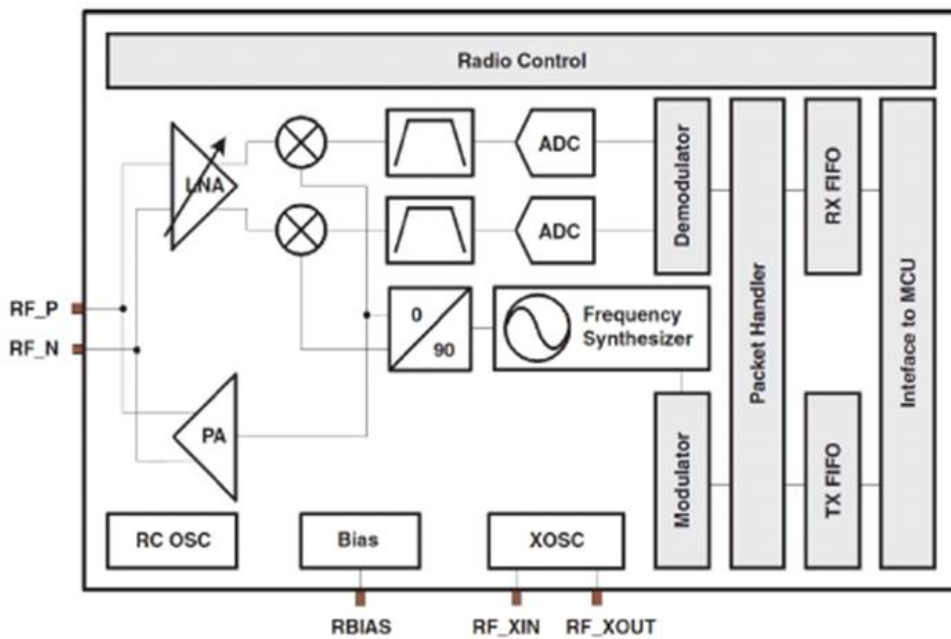
#### 4.3.1 Σύστημα Υλικού

Όλα τα φυσικά στοιχεία που συνθέτουν το σύστημα αλλά και ο τρόπος με τον οποίο σχετίζεται το κάθε στοιχείο με τα υπόλοιπα αποτελεί το σύστημα υλικού. Τα στοιχεία υλικού που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του παρόντος συστήματος ασύρματης επικοινωνίας μικρορομπότ-προσωπικός υπολογιστής είναι οι πομποδέκτες *CC1101*, οι οποίοι είναι ταυτόσημοι και για το μικρορομπότ αλλά και για το *chronos* καθώς και τα δύο χρησιμοποιούν τον ίδιο μικροελεγκτή *CC430f6137* και ο εξομοιωτής *USB* που πραγματοποιεί τη σειριακή σύνδεση προσωπικού υπολογιστή-*chronos*.

## Πομποδέκτης CC1101

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το μικρορομπότ και το ρολόι *chronos* 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.

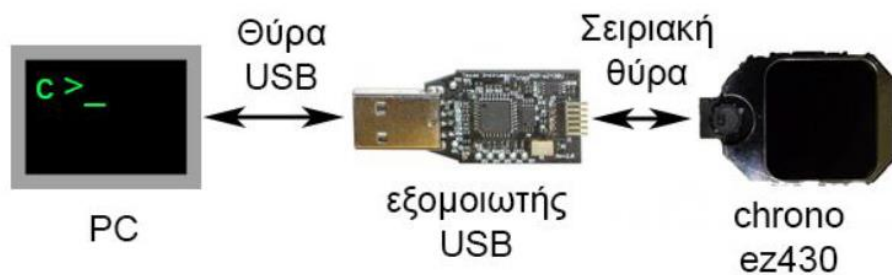
Η αποστολή των δεδομένων επιτυγχάνεται με τη σύνθεση της συχνότητας RF. Στο Σχήμα 4-2 απεικονίζεται το απλοποιημένο διάγραμμα της ασύρματης μονάδας CC110 του μικροελεγκτή CC430F6137, όπου διακρίνεται η σύνθεση της συχνότητας RF καθώς και κάποιες δυνατότητες που υποστηρίζει η μονάδα αυτή όπως η παραμετροποίηση των καναλιών, η διαχείριση των πακέτων και το buffering των δεδομένων.



**Σχήμα 4-2.** Απλοποιημένο διάγραμμα απεικόνισης της ασύρματης μονάδας CC1101 [23].

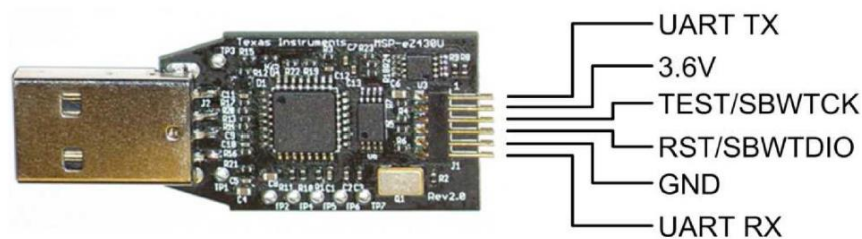
## Εξομοιωτής USB

Για την σύνδεση του *chronos ez430* με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή 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, βλ. Σχήμα 4-3.



**Σχήμα 4-3.** Επικοινωνία του chronos ez-430 με τον Η/Υ.

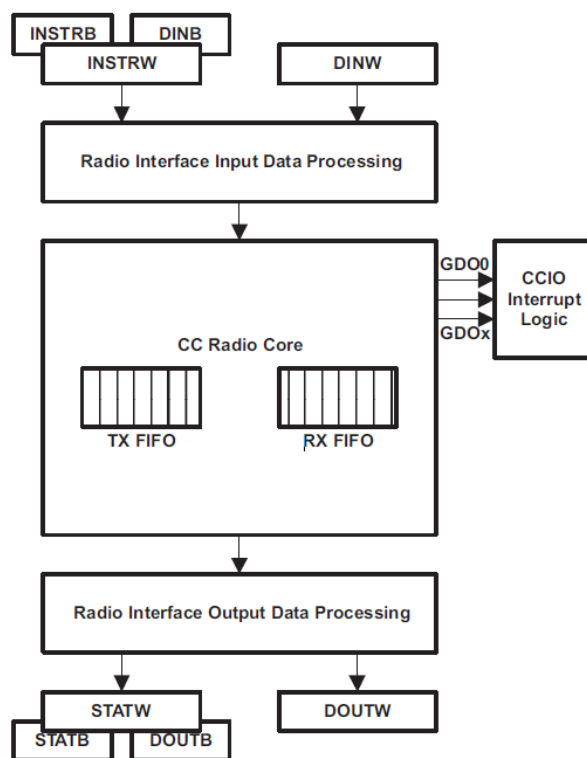
Ο εξομοιωτής διαθέτει ενσωματωμένο κύκλωμα USB-to-UART στην καθορισμένη ταχύτητα των 9600bps και χρησιμοποιείται για προγραμματισμό και το debugging του chronos, βλ. Σχήμα 4-4. Το πλεονέκτημα του υποσυστήματος αυτού είναι ότι η αποστολή και λήψη δεδομένων μέσω της σειριακής μπορεί να πραγματοποιείται 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 4-4.** Φωτογραφική απεικόνιση του εξομοιωτή USB [15].

#### 4.3.2 Σύστημα Λογισμικού

Το σύστημα λογισμικού αποτελείται από το μηχανισμό διαχείρισης των διακοπών (interrupts) των μονάδων σειριακής και ασύρματης επικοινωνίας καθώς και από το πρωτόκολλο επικοινωνίας. Στο Σχήμα 4-5 απεικονίζεται μια συνοπτική παρουσίαση της διεπαφής της ασύρματης μονάδας του CC430F6137 με τον πυρήνα του CC1101.



**Σχήμα 4-5.** Συνοπτική παρουσίαση της διεπαφής της ασύρματης μονάδας του μικροελεγκτή CC430F6137 με τον πυρήνα του CC1101 [23].

### Μηχανισμός διαχείρισης των διακοπών (Interrupts)

#### *Μονάδα ασύρματης επικοινωνίας*

Η διεπαφή της ασύρματης μονάδας των interrupts περιλαμβάνει έναν αριθμό από flags με τα οποία ελέγχει τη ροή των δεδομένων μεταξύ του πυρήνα CC1101 και του μικροελεγκτή CC430F6137. Στον Πίνακα 4-1 απεικονίζονται τα flags των interrupts της ασύρματης μονάδας και δίνεται μια μικρή περιγραφή τους.

**Πίνακας 4-1.** Interrupts flags της ασύρματης μονάδας και η συνθήκη ενεργοποίησής τους [23].

<b>Interrupt flag</b>	<b>Συνθήκη</b>
RFINSTRIFG	Ο πυρήνας είναι έτοιμος να δεχτεί την επόμενη εντολή: Για να πραγματοποιηθεί αυτό η προηγούμενη εντολή έχει επεξεργαστεί.
RFDINIFG	Ο πυρήνας είναι έτοιμος να δεχθεί επιπλέον δεδομένα.
RFSTATIFG	Ο πυρήνας ενημέρωσε την κατάσταση προσβασιμότητας μέσω των καταχωρητών RF1ASTAT. Εάν η εντολή στάλθηκε σαν word μέσω του RF1AINSTRW, το flag παίρνει την τιμή 1.
RFDOUTIFG	Τα δεδομένα στάλθηκαν από τον πυρήνα και μπορούν να διαβασθούν από τους καταχωρητές RF1ADOUT.
RFERRIFG	Ο καταχωρητής παίρνει την τιμή 1 όταν παρουσιάζεται σφάλμα κατά την επαφή με τον πυρήνα.

Τα σήματα interrupt στέλνονται από τον πυρήνα στην ασύρματη μονάδα διαχείρισης μέσω τριών προγραμματιζόμενων σημάτων εξόδου GDO0, GDO1, και GDO2 τα οποία μπορούν να δρομολογηθούν σε ακροδέκτες. Για κάθε interrupt σήμα 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.

Η ασύρματη μονάδα διαθέτει δύο καταχωρητές διανύσματος των interrupts, τους RF1AIFIV και RF1AIV, που χρησιμοποιούνται για να εξακριβωθεί πιο flag του πυρήνα προκάλεσε interrupt. Το ενεργοποιημένο interrupt με την υψηλότερη προτεραιότητα δημιουργεί έναν αριθμό στους καταχωρητές RF1AIFIV και RF1AIV. Ο αριθμός αυτός μπορεί να αξιολογηθεί ή να προστεθεί στον μετρητή του προγράμματος για εισέλθει στην κατάλληλη ρουτίνα.

#### *Μονάδα σειριακής επικοινωνίας*

Η σειριακή επικοινωνία του chip με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή υλοποιείται με τη μονάδα Universal Serial Communication Interface (USCI) που διαθέτει ο εξομοιωτής USB. Η διεπαφή της μονάδας USCI έχει μόνο ένα διάνυσμα για interrupts το οποίο μοιράζεται και για τη λήψη και για την αποστολή.

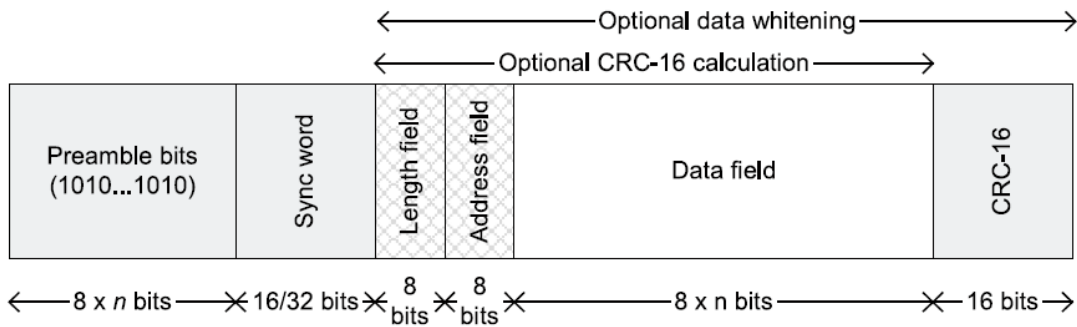
Έτσι, η λειτουργία των interrupts εκπομπής και λήψης γίνονται με τον ίδιο τρόπο. Κατά την *εκπομπή*, το interrupt flag UCTXIFG παίρνει τιμή από τον πομπό και υποδεικνύει ότι ο καταχωρητής UCAxTXBUF είναι έτοιμος να δεχτεί τον επόμενο χαρακτήρα. Όταν οι καταχωρητές ενεργοποίησης UCTXIE και GIE ρυθμιστούν στην τιμή 1, δημιουργείται ένα αίτημα για interrupt. Κατά τη *λήψη*, το interrupt flag UCRXIFG παίρνει τιμή από τον πομπό κάθε φορά που ένας χαρακτήρας λαμβάνεται και φορτώνεται στο UCAxRXBUF. Ένα αίτημα για interrupt δημιουργείται όταν οι καταχωρητές ενεργοποίησης UCRXIE και GIE ρυθμιστούν στην τιμή 1.

#### Πρωτόκολλο Ασύρματης επικοινωνίας

Η ασύρματη μονάδα του μικροελεγκτή CC430F6137 υποστηρίζει ασύρματα πρωτόκολλα επικοινωνίας που υλοποιούνται με πακέτα δεδομένων.

Η μορφή του πακέτου δεδομένων εκπομπής και λήψης αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία, βλ. Σχήμα 4-6 [23]:

- Word εισαγωγής
- Word συγχρονισμού
- Προαιρετικό byte μήκους
- Προαιρετικό byte διεύθυνσης
- Μήκος δεδομένων χρήστη
- Προαιρετικό 2-byte CRC



**Σχήμα 4-6.** Μορφή πακέτου δεδομένων [23].

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. Στην κατάσταση για πακέτα σταθερού μήκους το επιθυμητό μήκος πακέτου ρυθμίζεται μέσω του καταχωρητή PKTLEN, ενώ στην κατάσταση για πακέτα δυναμικού μήκους το μήκος του πακέτου ορίζεται ως το μέγεθος της πληροφορίας. Οπότε η τιμή του καταχωρητή PKTLEN ορίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος στον πομπό. Στην τρίτη επιλογή ρύθμισης του μεγέθους, το μήκος του πακέτου ρυθμίζεται ως άπειρο και η αποστολή και λήψη συνεχίζεται μέχρι να διακοπεί με μη αυτόματο τρόπο. Όποιο πακέτο δεν πληροί τις προϋποθέσεις μεγέθους σύμφωνα με την τιμή του καταχωρητή PKTLEN απορρίπτεται.

Κατά την εκπομπή πακέτου δεδομένων, τα στοιχεία που αποθηκεύονται στον καταχωρητή TX FIFO (Transmission First in–First out) είναι [23]:

- Ο αριθμός προγραμματιζόμενων bytes εισαγωγής
- Το word συγχρονισμού μεγέθους 2 byte
- Το αποτέλεσμα ελέγχου CRC (Cyclic Redundancy Check) κατά μήκος του πεδίου δεδομένων

Κατά τη λήψη πακέτου δεδομένων, τα στοιχεία που αποθηκεύονται στον καταχωρητή RX FIFO (Receive First in–First out) είναι [23]:

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

## 4.4 Υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας Μικρορομπότ–Η/Υ

### 4.4.1 Υλοποίηση σε επίπεδο Πρωτόκολλου Επικοινωνίας

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται για την ασύρματη επικοινωνία του μικρορομπότ και του χρονος περιγράφηκε αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα. Αυτό που επισημαίνεται εδώ, είναι η εξασφάλιση της αποστολής και λήψης του πακέτου δεδομένων καθώς από μόνο του το πακέτο δεν κατοχυρώνει ότι τα δεδομένα που μεταφέρονται από κάθε πλευρά μεταφράζονται ορθά σε δεδομένα τηλεμετρίας.

Από τη μορφή του πακέτου, το πεδίο δεδομένων που περιέχει τις πληροφορίες, που στέλνονται και λαμβάνονται, εντοπίζεται ανάμεσα στα 2 byte του CRC, βλ. Σχήμα 4-6. Ανάλογα με το είδος της τοπολογίας που επιλέγεται, καθώς και το είδος και τη μορφή των δεδομένων που ανταλλάσσονται, η μορφή του πακέτου πρέπει να διαμορφώνεται κατάλληλα.

Στην περίπτωση μας η τοπολογία του ασύρματου δικτύου είναι η *σημείο προς σημείο* (Point-to-Point network). Αποτελεί την πιο απλή τοπολογία δικτύων η οποία υλοποιείται με την μόνιμη σύνδεση μεταξύ δύο συσκευών, βλ. Σχ. 4-7. Η επικοινωνία ανάμεσα στις συσκευές είναι αμφίδρομη οπότε για την υλοποίηση της δεν χρειάζεται ειδική διαμόρφωση των πακέτων δεδομένων.



**Σχήμα 4-7.** Σχηματικό διάγραμμα του ασύρματου δικτύου τοπολογίας Point-to-Point network [15].

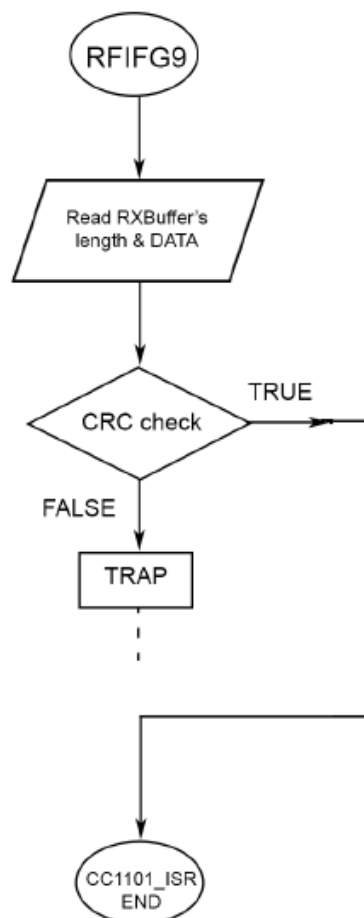
Η κατάσταση του πακέτου δεδομένων που επιλέχθηκε ήταν αυτή του δυναμικού μήκους μεγέθους μέχρι εως 255 bytes καθώς οι πληροφορίες που αποστέλονται από το ρομπότ στον Η/Υ δεν είναι σταθερού μήκους. Οπότε για πακέτα δυναμικού μήκους ορίστηκε η τιμή του καταχωρητή να είναι `PKTCTRL0.LENGTH_CONFIG = 2`, ενώ για την τιμή του καταχωρητή `PKTLEN` ορίστηκε το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος στον πομπό να είναι η μέγιστη επιτρεπτή τιμή που μπορεί να πάρει, δηλαδή 255 bytes.

#### 4.4.2 Υλοποίηση σε επίπεδο λογισμικού

Η υλοποίηση σε επίπεδο λογισμικού της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ του μικρορομπότ και του προσωπικού υπολογιστή γίνεται σε στάδια διαμόρφωσης και ελέγχου της πληροφορίας. Τα στάδια αυτά βρίσκονται κατά μήκος της ροής της πληροφορίας. Σε όλο το μήκος της ροής αυτής, η μορφή των δεδομένων ακολουθεί τους κανόνες που διέπουν το πρωτόκολλο επικοινωνίας.

Η ροή των δεδομένων ξεκινάει από τη στιγμή που γίνεται η ενεργοποίηση του chonos ez430 και αποστέλλεται μέσω της σειριακής θύρας του εξομοιωτή USB στον προσωπικό υπολογιστή, η πληροφορία αρχικοποίησης του συστήματος της ασύρματης μονάδας του. Δηλαδή, η ασύρματη μονάδα του μικρελεγκτή του chonos εισέρχεται στην κατάσταση αποστολής και λήψης δεδομένων.

Με την ενεργοποίηση του μικρορομπότ ξεκινάει η αποστολή των πληροφοριών κατάστασης λειτουργίας του στον ασύρματο πομποδέκτη (chonos). Μόλις το πακέτο δεδομένων σταλεί στην ασύρματη μονάδα του chonos, εκτελείται ο CRC έλεγχος (Cyclic Redundancy Check), που διασφαλίζει την ορθότητα του πακέτου ως προς το συντακτικό του



Σχήμα 4-8. Διάγραμμα ροής του interrupt της ασύρματης μονάδας του μικρορομπότ.



πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Στην περίπτωση που το πακέτο των δεδομένων που έχει σταλεί από το μικρορομπότ πληροί τους κανόνες, τότε αποστέλλεται στην ασύρματη μονάδα του χρονos, αλλιώς απορρίπτεται, βλ. Σχ. 4-8.

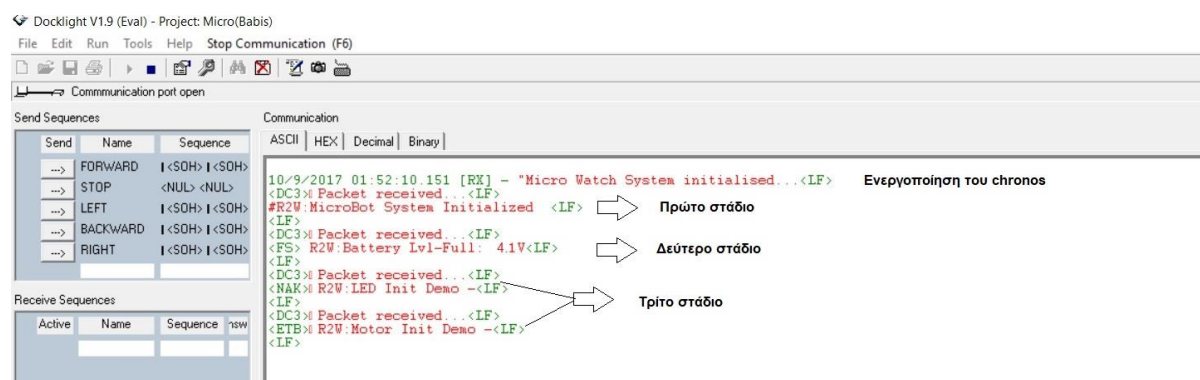
Στη συνέχεια τα πακέτα δεδομένων που λαμβάνονται από το μικρορομπότ στέλνονται μέσω της σειριακής θύρας του εξομοιωτή USB στον προσωπικό υπολογιστή με σκοπό την ανάλυσή τους και πιθανή επεξεργασία τους.

### 4.4.3 Τηλεμετρία

Η υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας γίνεται με σκοπό την αποστολή δεδομένων από αισθητήρες και πληροφοριών λειτουργίας του μικρορομπότ στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για την περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία τους. Η συλλογή των δεδομένων αυτών από τον Η/Υ που επιτυγχάνεται από απόσταση ορίζεται ως *τηλεμετρία*.

Το προγραμματιστικό περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή CC430f6137 του ρομπότ και του χρονos ez430 είναι το Code Composer Studio της Texas Instruments. Στο περιβάλλον αυτό γράφτηκε κατάλληλος κώδικας που υλοποιεί την ασύρματη επικοινωνία του μικρορομπότ-Η/Υ. Το κυρίως πρόγραμμα του μικρορομπότ και του χρονos δίνονται στο Παράρτημα Γ στο τέλος της εργασίας. Το τερματικό που χρησιμοποιήθηκε από τον Η/Υ για την απεικόνιση των δεδομένων τηλεμετρίας είναι το Docklight.

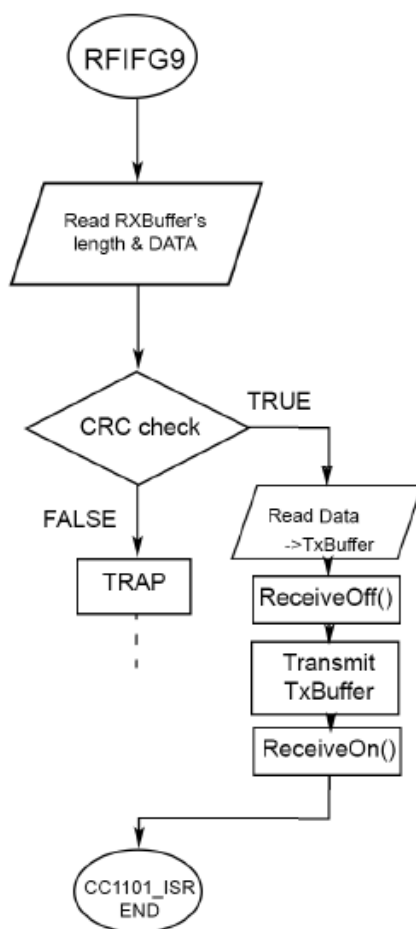
Τα δεδομένα που στέλνονται στον Η/Υ είναι η τάση της μπαταρίας του μικρορομπότ καθώς και πληροφορίες για τις φάσεις λειτουργίας του ρομπότ. Πιο αναλυτικά, το μικρορομπότ πριν φτάσει στην κύρια συνάρτησή του προγράμματός του ακολουθεί κάποια στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η ενεργοποίηση όλων των συστημάτων λειτουργίας του, όπως για παράδειγμα είναι η ενεργοποίηση της ασύρματης μονάδας του. Σε δεύτερο στάδιο γίνεται εσωτερικά ο έλεγχος της τάσης της μπαταρίας του. Και τέλος σε τρίτο στάδιο γίνεται η ενεργοποίηση και δοκιμή των περιφερειακών μονάδων του μικροελεγκτή όπως είναι οι κινητήρες, οι λυχνίες led του επιπέδου 1 και πιθανώς αργότερα άλλων αισθητήρων. Τα δεδομένα τηλεμετρίας του μικρορομπότ δίνονται στο Σχήμα 4-9.



**Σχήμα 4-9.** Σχηματική απεικόνιση των δεδομένων τηλεμετρίας στο τερματικό Docklight.

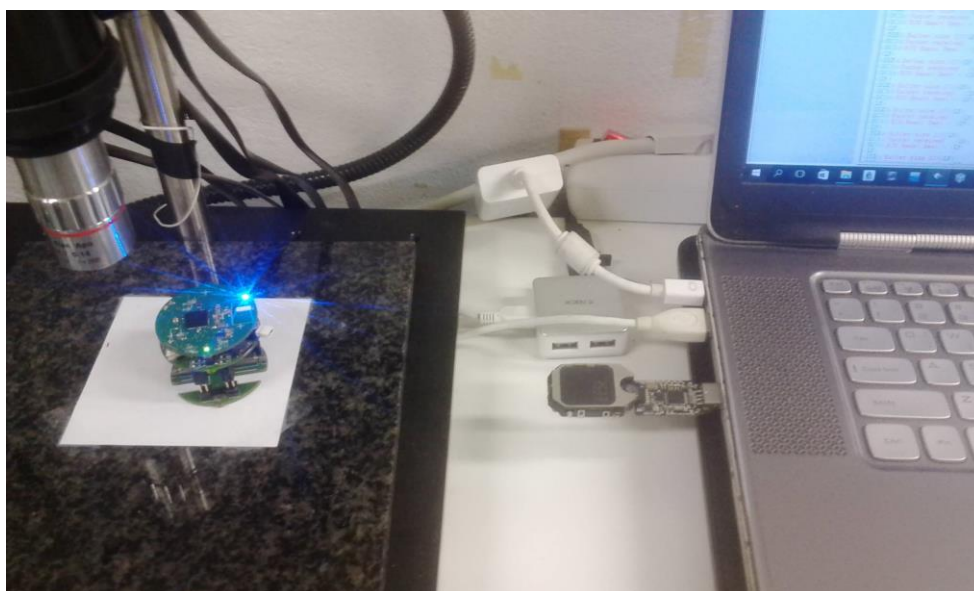
Η μελλοντική επεξεργασία των δεδομένων αυτών, που καταγράφηκαν παραπάνω, θα συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της εκτέλεσης του πειράματος καθώς και της γενικότερης λειτουργίας του μικρορομπότ. Το πλεονέκτημα που αποκτά ο επιβλέπων της πειραματικής διαδικασίας με τη χρήση της τηλεμετρίας είναι μια εποπτική εικόνα όλων των παραμέτρων και πληροφοριών του συστήματος. Με αυτόν τρόπο, ο χειριστής του ρομπότ μπορεί να κατανοήσει τυχόν παρασιτικές ή ακόμα και ανεξέλεγκτες κινητικές συμπεριφορές του μικρορομπότ. Αυτές οι ανεπιθύμητες κινητικές συμπεριφορές συχνά οφείλονται σε δυσλειτουργία των κινητήρων η οποία όμως δεν μπορεί να αποσβεστεί από τον ελεγκτή ταχύτητας του μικροελεκτή και επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια κίνησης του ρομπότ. Επομένως, η μελέτη της απόκρισης των κινητήρων μπορεί να αποτελέσει μια επιπλέον πληροφορία συμβάλλοντας στη βελτίωση της ακρίβειας κίνησης του.

Η υλοποίηση της τηλεμετρίας γίνεται περαιτέρω κατανοητή με το ακόλουθο διαγράμμα ροής του χρόνου που λαμβάνει τα δεδομένα τηλεμετρίας που στέλνονται από το μικρορομπότ, βλ. Σχήμα 4-10.



**Σχήμα 4-10.** Διάγραμμα ροής λήψης δεδομένων τηλεμετρίας του chronos ez430.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4-10, μόλις το chropos λάβει το πακέτο της τηλεμετρίας, το στέλνει στον καταχωρητή TxBuffer και μπαίνει σε κατάσταση λειτουργίας πομπού (ReceivOff()). Μέσω της σειριακής θύρας του εξομοιωτή USB, τα δεδομένα αυτά στέλνονται στο ηλεκτρονικό υπολογιστή και το chropos μπαίνει πάλι σε κατάσταση λειτουργίας δέκτη (ReceivOn()). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να σταλεί και το τελευταίο πακέτο. Στο Σχήμα 4-11 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη της τηλεμετρίας.



**Σχήμα 4-11.** Απεικόνιση πειραματικής διάταξης τηλεμετρίας.

## 5 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

### 5.1 Συμπεράσματα

Ο κύριος σκοπός της παρούσας δπλωματικής εργασίας ήταν η κατασκευή μιας νέας βαθμίδας της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του μικρορομπότ του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου ώστε να φέρει σύστημα οπτικών αισθητήρων laser ειδικευμένους στην ανάγνωση θέσης, καθώς και η ανάπτυξη και υλοποίηση ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ μικρορομπότ-H/Y.

Για την κατασκευή του επιπέδου με τους οπτικούς αισθητήρες laser αναλύθηκε αρχικά η κατασκευαστική δομή του μικρορομπότ και μελετήθηκαν οι περιορισμοί που θα πρέπει να ακολουθηθούν κατά τη σχεδίαση της πλακέτας. Παράλληλα για τη σχεδίαση και κατασκευή της βαθμίδας αυτής μελετήθηκε το σχηματικό διάγραμμα του αισθητήρα ADNS-7550 και κατασκευάστηκε δοκιμαστική πλακέτα. Η δημιουργία της δοκιμαστικής πλακέτας έγινε με σκοπό να μελετηθεί ο τρόπος λειτουργίας του αισθητήρα καθώς και το ηλεκτρικό κύκλωμα που χρειάζεται, για να ληφθούν περαιτέρω περιορισμοί.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η κατασκευή του επιπέδου με τους οπτικούς αισθητήρες και έγιναν πειραμάτα με σκοπό τη μελέτη της λειτουργίας του. Με την εισαγωγή του επιπλέον επιπέδου με τους οπτικούς αισθητήρες, δίνεται η δυνατότητα στο μικρορομπότ να αναγνωρίζει τη θέση του στο χώρο εργασίας του και να πηγαίνει ελεγχόμενα με οποιοδήποτε προσανατολισμό στη θέση κάτω από το μικροσκόπιο, βλ. Σχήμα 5-1.

Για να γίνει αυτό, υλοποιήθηκε ασύρματη επικοινωνία του μικρορομπότ με τον προσωπικό υπολογιστή και σχεδιάστηκε πρωτόκολλο επικοινωνίας για την τοπολογία Point to Point του συστήματος. Σημαντικό βήμα στην επικοινωνία αυτή αποτέλεσε η υλοποίηση προγράμματος που υποστηρίζει τηλεμετρία, με τη χρήση του οποίου ο ηλεκτρονικός υπολογιστής αιτείται την αποστολή των δεδομένων λειτουργίας του μικρορομπότ δίνοντας τη δυνατότητα μιας πιο λεπτομερούς εποπτείας των υποσυστημάτων του κάθε μικρορομπότ.



**Σχήμα 5-1.** Φωτογραφική απεικόνιση του μικρορομπότ στο χώρο εργασίας κάτω από το μικροσκόπιο.

## 5.2 Μελλοντική Εργασία

Η εισαγωγή του επιπέδου με τους οπτικούς αισθητήρες laser στην κατασκευαστική δομή του μικρορομπότ προσφέρει μια σημαντική τεχνολογική βάση πάνω στην οποία μπορούν να σχεδιαστούν και να εκτελεστούν σύνθετα πειράματα συνεργατικού χαρακτήρα.

Σε μια μελλοντική εργασία, η χρήση της βαθμίδας αυτής θα αποτελούσε σημαντικό βήμα στον έλεγχο θέσης του μικρορομπότ για ακόμα μεγαλύτερη αυτονόμηση του, καθώς μέχρι στιγμής ο έλεγχος πραγματοποιείται μόνο μέσω της επεξεργασίας εικόνας της κάμερας του μικροσκοπίου. Για την υλοποίηση του παραπάνω ελέγχου θα πρέπει να γίνει ανάπτυξη προγράμματος οδήγησης της συσκευής αναγνώρισης θέσης.

Έμφαση πρέπει να δοθεί και στην ανάπτυξη ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ δύο ή και περισσότερων ρομπότ με τον Η/Υ έτσι ώστε τα μικρορομπότ να ανταλλάσσουν πληροφορίες δηλώνοντας τη θέση τους. Αυτό γίνεται εφικτό μέσω του επιπέδου με τους οπτικούς αισθητήρες laser καθώς το κάθε μικρορομπότ θα μπορεί ξεχωριστά να αναγνωρίζει τη θέση του στο χώρο εργασίας και η παρέμβαση του ηλεκτρονικού υπολογιστή θα λειτουργεί συμπληρωματικά. Για να μπορέσουν τα μικρορομπότ να ανταλλάξουν πληροφορίες, η τοπολογία του δικτύου καθώς και το πρωτόκολλο επικοινωνίας θα πρέπει να προσαρμοστούν στην επιπλέον ανάγκη της διασύνδεσης των μικρορομπότ.

Από την εξέταση της 2<sup>ης</sup> έκδοση του μικρορομπότ από κατασκευαστικής και τεχνικής πλευράς προέκυψαν κάποιοι λειτουργικοί περιορισμοί που αναφέρονται στην Ενότητα 2. Για την αντιμετώπιση των περιορισμών αυτών θα μπορούσε να γίνει η κατασκευή μιας 3ης έκδοσης του μικρορομπότ, η οποία θα έχει ως στόχο την αναβάθμιση και τη βελτίωση της λειτουργίας του.

Τέλος, ο χώρος και οι δυνατότητες του συνολικού συστήματος επιτρέπουν και μια μελλοντική ανάπτυξη του αισθητηρίου δύναμης που είχε υλοποιηθεί στην [19]. Η προσθήκη αυτή θα μπορούσε εύκολα να ενσωματωθεί στην παρούσα ρομποτική διάταξη καθώς κατά το σχεδιασμό της προβλέφθηκε χώρος στο πρόσθιο τμήμα της βάσης του μικρορομπότ. Η ενσωμάτωση του αισθητηρίου αυτού θα ωθήσει στο σχεδιασμό και στην εκτέλεση πιο απαιτητικών και σύνθετων πειραμάτων.

## 6 Βιβλιογραφία

- [1] 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.
- [2] González J., et al. "Mobile robot localization based on Ultra-Wide-Band ranging: A particle filter approach", *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 57, Issue 5, 31 May 2009, pp. 496-507.
- [3] Martel S., Ph.D "Introduction to the NanoWalker: A miniature autonomous robot capable of various tasks at the molecular and atomic scales", *BioInstrumentation Laboratory Massachusetts Institute of Technology May 2000*.
- [4] Martel S., et al., "Flip chip electronic system assembly process and issues for the NanoWalker: a small wireless autonomous instrumented robot", *Proceedings of SPIE, Microrobotics and Microassembly*, Vol. 3834, Boston, MA, pp. 55-62, Sept. 21-22, 1999.
- [5] Rubenstein M., Nicholas Hoff, Radhika Nagpal "Kilobot: A Low Cost Scalable Robot System for Collective Behaviors", *Technical Report TR-06-11*, June 2011, Harvard University.
- [6] Rubenstein M., Radhika Nagpal. "KiloBot: A Robotic Module for Demonstrating Collective Behaviors" Modular Robotics Workshop, *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, 2012*.
- [7] S. Hellan and F. Storvik, "Using the CC1101 in the European 868 MHz SRD band", *Application Report, AN050–April 2009*
- [8] Sabelhaus P. Andrew, Mirsky Daniel, Hill Maxwell, Nuno C. Martins and Sarah Bergbreiter, "TinyTeRP: A Tiny Terrestrial Robotic Platform with Modular Sensing", *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*
- [9] Susilo E., P. Valdastri, A. Menciassi, P. Dario. "A miniaturized wireless control platform for robotic capsular endoscopy using advanced pseudokernel approach", *Sensors and Actuators A: Physical*, In Press, Corrected Proof.
- [10] Tagliareni F., et al. "Manipulating biological cells with a micro-robot cluster", *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on Volume, Issue, 2-6 Aug. 2005*, pp. 1414 – 1419
- [11] Vartholomeos P., Papadopoulos E., "Analysis and Design of a Novel Mini-platform Employing Vibration Micro-motors", *Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Barcelona, Spain, April 18-22, 2005. p. 3627-3632.

- [12] Vartholomeos P., and Papadopoulos E., "Analysis, Design and Control of a Planar Micro-robot Driven by Two Centripetal-Force Actuators," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '06)*, May 2006, Orlando, FL, USA, pp. 649-654.
- [13] Vincent Chan, Steve Underwood, Mars Leung, Roc Yu, "CC430-Based Simple Wireless Mesh Network Mains Switch", *Application Report*, SLAA487–April 2011.
- [14] Δημητρόπουλος Χρύσανθος, «Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ασύρματης Επικοινωνίας Μικροεπεξεργαστών με Εφαρμογή στην Οδήγηση Μικρορομποτικού Μηχανισμού». *Διπλωματική Εργασία Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ 2012*, ΑΘΗΝΑ.
- [15] Δημητρόπουλος Χρύσανθος, «Κατασκευή και προγραμματισμός αναβαθμισμένου αυτόνομου μικρορομπότ με φυγοκεντρική επενέργηση». *Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΠ 2014*, ΑΘΗΝΑ.
- [16] Καλλίσης Π. Νικόλαος, «Σχεδιασμός και υλοποίηση συστήματος οπτικών αισθητήρων για τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού σώματος», *Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ 2011*, ΑΘΗΝΑ.
- [17] Μαχαιράς Κωνσταντίνος, «Σχεδιασμός και υλοποίηση ηλεκτρικού/ ηλεκτρονικού υποσυστήματος, και προγραμματισμός πραγματικού χρόνου ρομπότ διαστημικού εξομοιωτή», *Διπλωματική Εργασία Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ 2013*, ΑΘΗΝΑ.
- [18] Μουγιάκος Κωνσταντίνος, «Υλοποίηση Συστήματος Ελέγχου Αυτόνομου Μικρορομπότ με Μικροελεγκτή PIC». *Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΠ 2007*, ΑΘΗΝΑ.
- [19] Παναγιώτης Βαρθολομαίος, «Μοντελοποίηση και Έλεγχος Μικρορομποτικών Συστημάτων». *Διδακτορική Διατριβή ΕΜΠ 2007*, ΑΘΗΝΑ.
- [20] Σούλης Γεράσιμος, «Σχεδιασμός και Υλοποίηση κυκλωμάτων ασύρματης επικοινωνίας, οδήγησης και ελέγχου αυτόνομης μικρορομποτικής πλατφόρμας». *Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «Συστήματα Αυτοματισμού» ΕΜΠ 2009*, ΑΘΗΝΑ.

## 7 Παράρτημα Α: «Datasheets»

- [21] A3901, Dual Full Bridge Low Voltage Motor Driver.
- [22] ADNS-7550 Integrated molded lead-frame DIP Sensor.
- [23] CC430 Family User's Guide (Rev. E).
- [24] CC430F613x, CC430F612x, CC430F513x MSP430 SoC With RF Core (Rev.H), Sep 2013.
- [25] LTC1540 - Nanopower Comparator with Reference.
- [26] TPS65721EVM, User's Guide SLVU339–February 2010.
- [27] TPS780xxEVM-301, Mar 2008.
- [28] Pico Vibe™ 4mm Vibration Motor - 10mm Type.



## 8 Παράρτημα Β: «Πρωτόκολλο SPI»

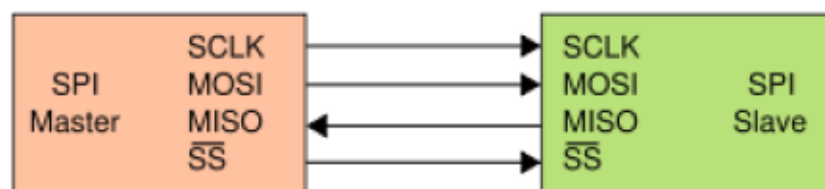
Το SPI(Serial Peripheral Interface), αναπτύχθηκε με σκοπό την εύκολη επικοινωνία μεταξύ ολοκληρωμένων και τον καλύτερο τρόπο διασύνδεσης των περιφερειακών μονάδων και των μικροελεγκτών μεταξύ τους.

Το Πρωτόκολλο **SPI** ή **Serial Peripheral Interface Bus** επιτρέπει την σειριακή σύγχρονη επικοινωνία μεταξύ ολοκληρωμένων σε πλήρη αμφίδρομη επικοινωνία. Οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους σε mode Master/Slave. Ο Master του διαύλου είναι το ολοκληρωμένο που παράγει το frame των δεδομένων και το μεταδίδει προς τα ολοκληρωμένα slave. Μπορούν σε έναν SPI δίαυλο να διασυνδεθούν περισσότερες από μία συσκευές slave χρησιμοποιώντας της γραμμές Chip Select. Το SPI επιτρέπει σε δεδομένα των 8-bits να αποστέλλονται σύγχρονα και ταυτόχρονα να λαμβάνονται σύγχρονα δεδομένα με ταχύτητα που φτάνει το 1Mbps.

Για να επιτευχθεί επικοινωνία το SPI χρησιμοποιεί 4 ακροδέκτες,:

1. Τον ακροδέκτη SDO(Σειριακά δεδομένα εξόδου)
2. Τον ακροδέκτη SDI(Σειριακά δεδομένα εισόδου)
3. Το σειριακό ρολόι (SCK)

Επιπρόσθετα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένας τέταρτος ακροδέκτης στην λειτουργία slave: Επιλογή slave (SS') βλ. Σχήμα 8-1. Σε όλες τις μεταφορές στο SPI το ψηφίο υψηλότερης αξίας στέλνεται πρώτο. Όταν αρχικοποιείται το SPI, πρέπει να καθοριστούν ορισμένα

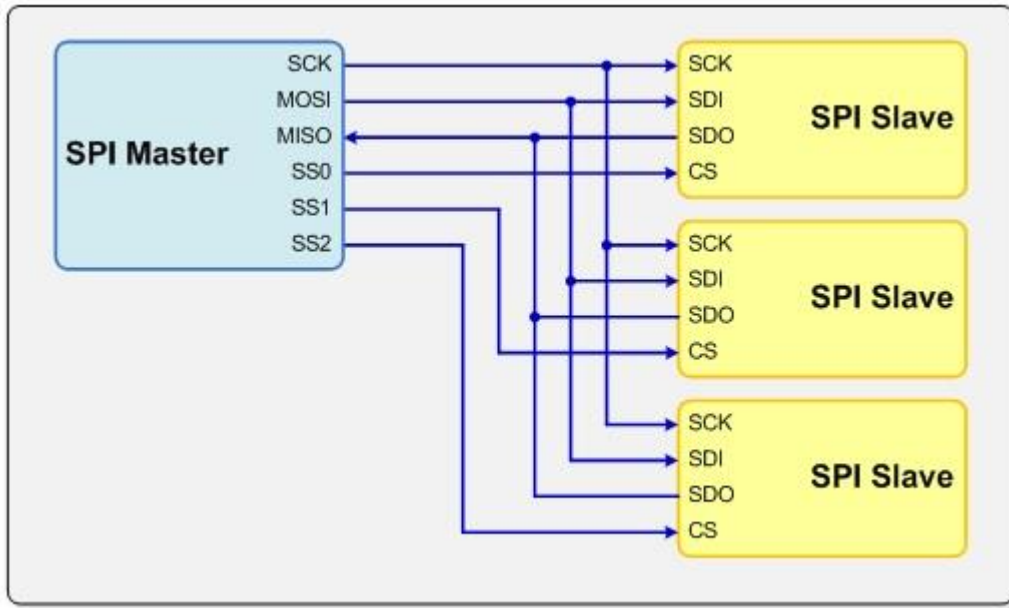


**Σχήμα 8-1.** Τρόπος σύνδεσης master-slave ολοκληρωμένων στο SPI.

χαρακτηριστικά.

Τα χαρακτηριστικά του SPI είναι τα ακόλουθα:

1. Επιτρέπει την σύγχρονη επικοινωνία.
2. Είναι σειριακό.
3. Είναι πλήρως αμφίδρομο (full-duplex).
4. Δεν είναι plug-and-play.
5. Υπάρχει ένας και μόνο ένας Master στον δίαυλο, ενώ μπορεί να υπάρξουν ένας ή περισσότεροι Slaves βλ. Σχήμα 8-2.



**Σχήμα 8-2.** Τρόπος σύνδεσης master-πολλαπλών slave ολοκληρωμένων στο SPI.

## 9 Παράρτημα Γ: «Κυρίως πρόγραμμα μικρορομπότ και chronos»

Το κυρίως πρόγραμμα που χρησιμοποιεί ο *μικροελεγκτής* του μικρορομπότ για την ασύρματη επικοινωνία του με το ρολόι chronos είναι το ακόλουθο:

```
//
*****
*****
// Initialization and control of application.
//
*****
*****

//
*****
*****
// Include section
/* Include cc430 library */
#include "project.h"

/*Include peripheral drivers */
#include "system_init.h"
#include "robot_init.h"
#include "motors.h"
#include "mtr_speed_msr.h"

/*Macro definitions*/
#define test 1

//
*****
*****
// Prototypes section
//
*****
*****
// External function declarations
//
*****
*****
// Global Variable section

// Variable holding system internal flags
unsigned char overflow_cntrl;
extern SPD_tag SPD;
SPD_tag * ptrSPD;
s16 dxtemp,dytemp;
u16 squal1,squal2;
//
*****
*****
// @fn      main
// @brief   Main routine
// @param   none
// @return  none
```

```

//
*****
*****
int main(void)
{
    // Init MCU - disable charging - Reset-Initialize Radio
    system_init();

    //Initialize Logger with Transmit wireless function
    Logger_init(Transmit);
    LOG(("MicroBot System Initialized %d\n\n",1));

    if(test)
    {
        DELAY_SEC(1U);
        robot_init();
        P4OUT |= LSR_SS_L;
        /***** MAIN PROG *****/
        while(1)
        {
            //WIRELESS COMMUNICATION DEBUG
            LOG(("Heart Beat - \n\n"));
            DELAY_SEC(1U);
            /***** SPI DEBUG *****/
            u8 retval;
            SPIB0_read_write(0xAE);
            DELAY_MSEC(500U);*/
        }
    }
}

```

Το κυρίως πρόγραμμα που χρησιμοποιεί το ρολόι *chronos* για την ασύρματη επικοινωνία του με το μικρορομπότ είναι το ακόλουθο:

```

//
*****
*****
// Initialization and control of application.
//
*****
*****

//
*****
*****
// Include section

/* Include cc430 library */
#include "project.h"

/*Include peripheral drivers */
#include "system_init.h"
#include "RF1A.h"
#include "ports.h"
#include "pmm.h"
#include "radio.h"

```

```

#include "display.h"
#include "wireless.h"
#include "serial.h"
#include "system.h"

/*Macro definitions*/
#define test 1
//
*****
*****
/* external function declarations*/
//
*****
*****

// Global Variable section
char buf='a';
extern unsigned char transmit_sMSG;

// Function pointers for LINE1 and LINE2 display function
void (*fptr_lcd_function_line1)(u8 line, u8 update);
void (*fptr_lcd_function_line2)(u8 line, u8 update);

//
*****
*****
// @fn          main
// @brief       Main routine
// @param       none
// @return      none
//
*****
*****
int main(void)
{
    // Init application - Reset-Initialize Radio
    system_init();

    /*Initialize Logger with UART TX function*/
    Logger_init(UART0_TX);
    DELAY_SEC(3U);
    LOG(("Micro Watch System initialised...\n"));

    if(test)
    {
        DELAY_SEC(2);
        display_chars(LCD_SEG_L2_5_0, " TEST", SEG_ON);
        display_symbol(LCD_ICON_BEEPER1, SEG_ON_BLINK_ON);
        display_symbol(LCD_ICON_BEEPER2, SEG_ON_BLINK_ON);
        display_symbol(LCD_ICON_BEEPER3, SEG_ON_BLINK_ON);

        while(1)
        {
            if (transmit_sMSG)
            {
                clear_line(LINE2);
                transmit_sMSG=0;
                ReceiveOff();
                receiving=0;
            }
        }
    }
}

```

```

        display_chars(LCD_SEG_L2_5_0, " REC", SEG_ON);
        Transmit( (unsigned char*)TxBuffer, sizeof TxBuffer);
        transmitting=1;
    }
    if (packetReceived)
    {
        LOG(("Packet received...\n"));
        snprintf(RxBuffer,buffer_size,"%s",RxBuffer);
        LOG(("R2W:%s\n",RxBuffer));
        packetReceived = 0;
    }
    if (transmitting == 0)
    {
        receiving=1;
    }
}
}
}

```

ΤΕΛΟΣ ΚΕΙΜΕΝΟΥ