



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

Διπλωματική Εργασία

**Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ασύρματης Επικοινωνίας Μικροεπεξεργαστών
με Εφαρμογή στην Οδήγηση Μικρορομποτικού Μηχανισμού**

Χρύσανθος Δημητρόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2012

Στην οικογένειά μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ του χρήστη και του μικρορομπότ του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Ε.Μ.Π.. Το βασικό χαρακτηριστικό, το οποίο ξεχωρίζει το μικρορομπότ από άλλες ερευνητικές κατασκευές ίδιας κλίμακας, είναι ο τρόπος κίνησής του. Αυτή, βασίζεται σε πρωτότυπο μηχανισμό κίνησης που εκμεταλλεύεται τη φυγοκεντρική επενέργηση δύο αντιδιαμετρικών εκκεντροφόρων κινητήρων συνεχούς ρεύματος για την εκτέλεση επίπεδης κίνησης. Η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου κίνησης στο μικρορομπότ του επιτρέπει να εκτελεί εργασίες με μικροαντικείμενα με ακρίβεια λίγων μικρομέτρων. Για την εξασφάλιση της επιθυμητής ακρίβειας κρίθηκε αναγκαία η εγκατάσταση ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ του χρήστη και του μικρορομπότ.

Έτσι στα πλαίσια της υλοποίησης της ασύρματης επικοινωνίας, κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη για μία πρώτη εφαρμογή της ασύρματης σύνδεσης μεταξύ μικροεπεξεργαστών παρόμοιων με αυτόν που είναι εγκατεστημένος στο μικρορομπότ. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η διάταξη σε πλατφόρμα η οποία κατασκευάστηκε και προσαρτήθηκε στο πάνω επίπεδο ηλεκτρονικών του μικρορομπότ. Δημιουργήθηκε πρωτόκολλο επικοινωνίας για τον ασύρματο έλεγχο του μικρορομπότ μέσω της χρήσης προσωπικού υπολογιστή. Τέλος πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων για την δοκιμή της εγκατεστημένης ασύρματης σύνδεσης. Τα πειράματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία εκτελέστηκαν με δύο τρόπους. Τα πρώτα πειράματα έγιναν με τον τηλεχειρισμό του μικρορομπότ από τον απτικό μηχανισμό προσομοίωσης του εργαστηρίου, ενώ τα επόμενα με τη χρήση ελέγχου θέσης κλειστού βρόχου, ο οποίος υλοποιήθηκε με επεξεργασία εικόνας που λαμβάνεται από ένα βίντεο-μικροσκόπιο. Και στις δύο περιπτώσεις στόχος των πειραμάτων ήταν η άκρη της βελόνας, που έχει προσαρτηθεί στο μικρορομπότ, να συμπέσει με ένα ορισμένο από το χρήστη σημείο.

ABSTRACT

The aim of the present diploma thesis is the implementation of wireless communications between the user and the CSL's micro robot. The key feature that distinguishes microrobot from other research robots of same scale is the way it moves. Its prototype motion mechanism is based on the interaction of centripetal forces generated by platform mounted vibrating dc micro-motors and friction forces at the base supports. With this method, the microrobot can conduct experiments with tiny objects and with high precision. However, in order to achieve higher levels of precision, a wireless connection was required between the user and the microrobot.

Initially, an experimental setup was built to test a simple trial wireless connection between microprocessors of the same family as that installed on the microrobot. Then, the experimental setup was applied on a platform designed and installed on micro robot's upper level of electronics. Also, a communication protocol was created in order to control the microrobot from any PC with a serial port. Lastly, a series of experiments was conducted to test the function and the reliability of the wireless connection. The experiments to be presented were conducted in two ways. Namely, at the beginning of the experiments, the microrobot was remotely controlled by the haptic device of the lab. For the proceeding experiments, the microrobot was controlled by a closed loop position control receiving feedback images taken by a video-microscope. In both cases, the aim of the experiments was the coincidence of the needle tip, attached to the microrobot, with a point predefined by the user.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της πτυχιακής μου εργασίας Καθηγητή Ευάγγελο Παπαδόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να αναλάβω και να δουλέψω μαζί του πάνω σε ένα από τα πιο απαιτητικά και συνάμα ενδιαφέροντα θέματα. Οι πολύπλευρες γνώσεις και η εμπειρία του αποτέλεσαν έμπνευση για την ενασχόλησή μου με το συγκεκριμένο αντικείμενο και εργαλεία που με καθοδήγησαν έως και την ολοκλήρωση της εργασίας μου. Από την αρχή, η υποστήριξη και η εμπιστοσύνη του προς το πρόσωπό μου υπήρξε καθολική και αισθητή σε κάθε στάδιο της εκπόνησης της διπλωματικής. Παράλληλα, οποτεδήποτε προέκυψαν ανάγκες για τεχνολογικό εξοπλισμό ή λοιπά τεχνικά υλικά φρόντισε ώστε αυτές να καλυφθούν άμεσα, στηρίζοντας την προσπάθειά μου.

Συνεχίζοντας, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω με την ίδια θέρμη το μεταδιδάκτορα Κώστα Βλάχο χωρίς την καθοδήγηση και υποστήριξη του οποίου η εκπόνηση αυτής της εργασίας δε θα ήταν δυνατή. Καθόλη τη διάρκεια της παρουσίας μου στο εργαστήριο στεκόταν δίπλα μου σε κάθε βήμα και συνέβαλλε με τις γνώσεις και την εμπειρία του στην εξέλιξη και ολοκλήρωσή της.

Τέλος, δε θα μπορούσα να μη συμπεριλάβω στις ευχαριστίες μου όλη την ομάδα των ανθρώπων που στελεχώνει το εργαστήριο του Αυτόματου Ελέγχου που, παρ' όλους τους χρονικούς περιορισμούς, υπήρξαν πρόθυμοι και διαθέσιμοι να συνεισφέρουν.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | 5 |
| Κατάλογος Σχημάτων | 9 |
| Κατάλογος Πινάκων | 12 |
| 1. Εισαγωγή | 13 |
| 1.1 Σκοπός Εργασίας | 13 |
| 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση | 14 |
| 1.3 Δομή Εργασίας | 15 |
| 2. Μικρορομπότ και Επικοινωνία | 16 |
| 2.1 Εισαγωγή..... | 16 |
| 2.2 Μικρορομπότ και Μηχανισμοί Μικροκίνησης | 16 |
| 2.2.1 Εισαγωγή..... | 16 |
| 2.2.2 Κινούμενη Μικρορομποτική Διάταξη με Φυγοκεντρικούς Επενεργητές | 19 |
| 2.2.3 Συμπεράσματα | 22 |
| 2.3 Ασύρματη Επικοινωνία | 22 |
| 2.3.1 Εισαγωγή..... | 22 |
| 2.3.2 Ασύρματες Τεχνολογίες | 23 |
| 2.3.3 Συμπεράσματα | 24 |
| 3. Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ασύρματης Πλατφόρμας Δικτύωσης | 25 |
| 3.1 Εισαγωγή..... | 25 |
| 3.2 Επιλογή Ηλεκτρονικών | 25 |
| 3.2.1 Ασύρματος Πομποδέκτης | 25 |
| 3.2.1.1 Χαρακτηριστικά Nordic nrf24l01+ | 25 |
| 3.2.1.2 Έλεγχος Nordic nrf24l01+ | 31 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.2 | Μικροεπεξεργαστές | 33 |
| 3.2.2.1 | Χαρακτηριστικά Μικροεπεξεργαστών..... | 34 |
| 3.2.2.2 | Έλεγχος Μικροεπεξεργαστών | 37 |
| 3.3 | Υλοποίηση Ασύρματης Πλατφόρμας | 38 |
| 3.3.1 | Κατασκευή Πειραματικών Διατάξεων | 38 |
| 3.3.2 | Προγραμματισμός Μικροεπεξεργαστών. | 41 |
| 3.3.2.1 | UART και SPI..... | 44 |
| 3.3.2.2 | PWM | 45 |
| 3.3.3 | Προγραμματισμός nrf24l01+..... | 47 |
| 3.3.4 | Συμπεράσματα | 50 |
| 4. | Σχεδιασμός και Υλοποίηση Κυκλωμάτων Ρομποτικής Διάταξης | 52 |
| 4.1 | Εισαγωγή..... | 52 |
| 4.2 | Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ηλεκτρονικού Κυκλώματος του Μικρορομπότ | 54 |
| 4.3 | Συμπεράσματα | 59 |
| 5. | Υλοποίηση Ασύρματου Ελέγχου του Μικρορομπότ | 60 |
| 5.1 | Εισαγωγή..... | 60 |
| 5.2 | Επικοινωνία Χρήστη-Μικρορομπότ..... | 63 |
| 5.2.1 | Γενικά..... | 63 |
| 5.2.2 | Επικοινωνία Απτικού Μηχανισμού-Μικρορομπότ | 64 |
| 5.2.3 | Επικοινωνία Η/Υ(Matlab)-Μικρορομπότ | 65 |
| 6. | Διεξαγωγή Πειραμάτων | 66 |
| 6.1 | Γενικά..... | 66 |
| 6.2 | Έλεγχος Ανοιχτού Βρόχου με Ασύρματη Αποστολή Δεδομένων | 68 |
| 6.3 | Έλεγχος Κλειστού Βρόχου με Ασύρματη Αποστολή Δεδομένων | 71 |
| 6.4 | Αξιολόγηση των Πειραμάτων. | 74 |
| 7. | Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία..... | 76 |
| 7.1 | Συμπεράσματα | 76 |
| 7.2 | Μελλοντική Εργασία. | 77 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| Βιβλιογραφία | 79 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ | 83 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | | |
|--------------------|---|----|
| Σχήμα 2-1. | (α) MINIMAN, (β) Nanowalker..... | 17 |
| Σχήμα 2-2. | MiCRoN. | 17 |
| Σχήμα 2-3. | Αρχή προσκόλλησης ολίσθησης [13]. | 18 |
| Σχήμα 2-4. | 3-Δ μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας [13]..... | 19 |
| Σχήμα. 2-5. | Απλοποιημένο 2-Δ μοντέλο πλατφόρμας [13]...... | 20 |
| Σχήμα 2-6. | Κάτοψη του μικρορομπότ στο πρόγραμμα σχεδιασμού ProEngineer [13]. | 21 |
| Σχήμα. 2-7 | Φωτογραφική κάτοψη του μικρορομπότ [13]...... | 21 |
| Σχήμα 3-1. | Nrf24l01+ (α) Διάγραμμα ακροδεκτών, (β)Εσωτερική δομή. | 26 |
| Σχήμα 3-2. | Τελική μορφή του πομποδέκτη με ενσωμάτωση του nrf24l01+, της κεραίας, του κρυστάλλου, του ρυθμιστή τάσης και των υπολοίπων ηλεκτρονικών από τη Sparkfun. | 26 |
| Σχήμα 3-3. | Ακροδέκτες του nrf24l01+. | 31 |
| Σχήμα 3-4. | Γραφική απεικόνιση της SPI επικοινωνίας μεταξύ ενός Master και ενός Slave, και για τρεις Slave. | 32 |
| Σχήμα 3-5. | Διαδικασία εγγραφής bit προς bit στον ακροδέκτη εξόδου SPI. | 33 |
| Σχήμα 3-6. | Διαδικασία διαβάσματος δεδομένων SPI. | 33 |
| Σχήμα 3-7. | Διαδικασία εγγραφής δεδομένων SPI. | 33 |
| Σχήμα 3-8. | Διάγραμμα ακροδεκτών του PIC 18F2431 SPDIP και SOIC μορφής [18]. | 35 |
| Σχήμα 3-9. | Διάγραμμα ακροδεκτών του PIC 18F4331 PDIP μορφής [18]...... | 35 |
| Σχήμα 3-10. | Θέση ακροδεκτών MCLR,PGD,PGC του 18F4331 για ICSP Programming[18]...... | 37 |
| Σχήμα 3-11. | Θέση ακροδεκτών MCLR,PGD,PGC του 18F2431 για ICSP Programming[18]...... | 37 |
| Σχήμα 3-12. | Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης του MAX232N με την σειριακή RS-232 [16]...... | 39 |
| Σχήμα 3-13. | Ακροδέκτες του 18F4331 με ειδική λειτουργία για σειριακή επικοινωνία [18]. | 40 |
| Σχήμα 3-14. | Ακροδέκτες του 18F4331 για SPI σύνδεση [18]. | 40 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Σχήμα 3-15. | Φωτογραφική απεικόνιση της υλοποίησης της πειραματικής ασύρματης πλατφόρμας. | 41 |
| Σχήμα 3-16 | Σχηματική απεικόνιση των ακροδεκτών του (α)18F4331 και (β)18F2431 που λειτουργούν ως έξοδοι PWM [18]...... | 45 |
| Σχήμα 3-17. | Καταχωρητές που ρυθμίζουν τη μονάδα Power Control PWM των 182431 και 18F2331 [18]. | 46 |
| Σχήμα 3-18. | Διάγραμμα λειτουργίας της μονάδας Power Control PWM των 182431 και 18F2331 [18]. | 47 |
| Σχήμα 3-19. | Απεικόνιση της ομάδας θυρών C καθώς και της επιλογής συγκεκριμένης θύρας που αντιστοιχεί στη τιμή 0x02 [18]. | 49 |
| Σχήμα 3-20. | Γραφική απεικόνιση της πειραματικής αμφίδρομης επικοινωνίας. | 51 |
| Σχήμα 4-1. | Πάνω όψη πλακετών 2 ^{ου} (α)και 1 ^{ου} (β) επιπέδου με τοποθέτηση εξαρτημάτων κατά τιμή [16]...... | 52 |
| Σχήμα 4-2. | Κάτω όψη του 2 ^{ου} (α) και του 1 ^{ου} (β) επιπέδου ηλεκτρονικών από την πλευρά του χαλκού [16]. | 52 |
| Σχήμα 4-3. | Φωτογραφική απεικόνιση της υλοποίησης των κυκλωμάτων. | 53 |
| Σχήμα 4-4. | 3D σχέδιο με διαστάσεις της διάτρητης πλακέτας(123D autodesk). | 55 |
| Σχήμα 4-5. | Τελική μορφή της δοκιμαστικής πλακέτας έπειτα από επεξεργασία. | 55 |
| Σχήμα 4-6. | Μεγεθυμένη απεικόνιση και αρίθμηση των ακροδεκτών του 2 ^{ου} επιπέδου που είναι υπεύθυνοι για την επέκταση των ηλεκτρονικών σε 3 ^ο επίπεδο. | 56 |
| Σχήμα 4-7. | Καλώδιο μικρού μήκους με προσαρμοσμένο βύσμα για σύνδεση με το nrf24l01+. | 57 |
| Σχήμα 4-8. | Γραφική και φωτογραφική απεικόνιση των ακροδεκτών PGD και PGC του In-circuit Serial Programming..... | 58 |
| Σχήμα 4-9. | Φωτογραφική απεικόνιση της κάτοψης του nrf24l01+. | 58 |
| Σχήμα 4-10. | Τελική μορφή της αποσπώμενης πλατφόρμας του ασύρματου πομποδέκτη. | 59 |
| Σχήμα 4-11. | Η ασύρματη πλατφόρμα συνδεδεμένη με το μικρορομπότ | 59 |
| Σχήμα 5-1. | Ταχύτητα κινητήρα συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας του [13]. . | 63 |
| Σχήμα 5-2. | Το μοντέλο του συστήματος του αππικού τηλεχειρισμού του μικρορομπότ. | 65 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Σχήμα 5-3. | Το μοντέλο του συστήματος ελέγχου θέσης του μικρορομπότ μέσω βίντεο-μικροσκοπίου. | 65 |
| Σχήμα 6-1. | Φωτογραφικό στιγμιότυπο της διεξαγωγής του πειράματος..... | 67 |
| Σχήμα 6-2. | Μεταφορική κίνηση του μοχλού..... | 68 |
| Σχήμα 6-3. | Στροφική κίνηση του κεντρικού μοχλού..... | 68 |
| Σχήμα 6-4. | Γραφική απεικόνιση της δισδιάστατης κίνησης της βελόνας στους άξονες X,Y. | 70 |
| Σχήμα 6-5. | Γραφική απεικόνιση της κίνησης της βελόνας στον άξονα X(α) και Y(β) αντίστοιχα συναρτήσει του χρόνου..... | 70 |
| Σχήμα 6-6. | Γραφική απεικόνιση των τιμών PWM που στέλνονται στους κινητήρες κατά τη διάρκεια του πειράματος..... | 71 |
| Σχήμα 6-7. | Φωτογραφικό στιγμιότυπο των τριών περιοχών κίνησης της βελόνας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. | 72 |
| Σχήμα 6-8. | Διαδοχικά φωτογραφικά στιγμιότυπα της εκτέλεσης του πειράματος..... | 72 |
| Σχήμα 6-9. | Γραφική απεικόνιση της δισδιάστατης κίνησης της βελόνας στους άξονες X,Y. | 73 |
| Σχήμα 6-10. | Γραφική απεικόνιση της κίνησης της βελόνας στον άξονα X(α) και Y(β), αντίστοιχα, συναρτήσει του χρόνου..... | 73 |
| Σχήμα 6-11. | Γραφική απεικόνιση των τιμών PWM που στέλνονται στους κινητήρες κατά τη διάρκεια του πειράματος..... | 74 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 3-1. Καταστάσεις λειτουργίας με τις αντίστοιχες τιμές των καταχωρητών | 28 |
| Πίνακας 3-2. Χρόνοι μετάβασης από λειτουργία σε λειτουργία | 28 |
| Πίνακας 3-3. Αναλυτικός πίνακας καταναλώσεων στις πιο βασικές καταστάσεις λειτουργίας | 29 |
| Πίνακας 3-4. Χαρακτηριστικά μνήμης των PIC 18F4331 και 18F2431 | 34 |
| Πίνακας 3-5. Ρυθμοί αποστολής και σφάλματα στην ασύγχρονη κατάσταση με χρήση 10MHz κρύσταλλο..... | 44 |
| Πίνακας 3-6. Αντιστοιχία θύρας και τιμής καταχωρητή σε δυαδική και δεκαεξαδική μορφή..... | 49 |
| Πίνακας 4-1. Αντιστοίχιση των ακροδεκτών του πομποδέκτη με τους ακροδέκτες του μικροεπεξεργαστή..... | 58 |
| Πίνακας 5-1. Δομή του ολοκληρωμένου πακέτου δεδομένων για τον ασύρματο έλεγχο του μικρορομπότ | 60 |
| Πίνακας 5-2. Αντιστοιχία των ASCII χαρακτήρων των εντολών που δίνει ο χρήστης με την δεκαδική και δεκαεξαδική μορφή τους..... | 62 |
| Πίνακας 6-1. Αναλυτική παρουσίαση των διαγραμμάτων..... | 67 |

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Η τεχνολογία στις επικοινωνίες αναπτύσσεται στις μέρες μας με ραγδαίους ρυθμούς. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην ανάπτυξη της ασύρματης επικοινωνίας, που πια συναντάται σε όλο το φάσμα δραστηριοτήτων του ανθρώπου. Τεχνολογίες όπως, το ψηφιακό σύστημα GSM (Global System for Mobile communications) καθώς και οι εξελιγμένες του μορφές, 3G και 4G που χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το σύστημα εντοπισμού GPS (Global Positioning System), το οποίο επεξεργάζεται ασθενή σήματα των δορυφορικών επικοινωνιών για τον εντοπισμό θέσης καθώς και τεχνολογίες μικρότερης εμβέλειας όπως το WLAN (Wireless Local Area Network), Bluetooth και IrDA είναι κάποια βασικά παραδείγματα της εξέλιξης της ασύρματης επικοινωνίας.

Μια παρόμοια τεχνολογία έχει επιλεγεί [10] για αυτήν την εργασία για την ανάπτυξη και υλοποίηση μίας ασύρματης πλατφόρμας η οποία δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη της να επικοινωνεί ασύρματα με ιδιαίτερα μικρούς σε διαστάσεις ρομποτικούς μηχανισμούς. Στη συγκεκριμένη εργασία ο ρομποτικός μηχανισμός είναι το μικρορομπότ [13] το οποίο έχει κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ. Το μικρορομπότ έχει σχεδιαστεί να εκτελεί μικροσκοπική επίπεδη κίνηση της τάξεως μεγέθους 10 μ m με φυγοκεντρική επενέργηση χάρη σε δύο φυγοκεντρικούς κινητήρες πολύ μικρών διαστάσεων.

Η απαιτούμενη ακρίβεια και ευελιξία του μικρορομπότ καθιστά αναγκαίο τον ασύρματο έλεγχο του από τον χρήστη. Η οδήγηση του ρομπότ έχει πραγματοποιηθεί και ενσύρματα με την χρήση καλωδίων από πηνιόσυρμα, το οποίο έχει διάμετρο 10 μ m. Η τροφοδοσία, οι γέφυρες οδήγησης των κινητήρων καθώς και τα ηλεκτρονικά ήταν τοποθετημένα εκτός ρομπότ. Ωστόσο αυτή η μέθοδος επικοινωνίας και ελέγχου του ρομπότ αποδεικνύεται ασταθής και ανακριβής. Εκτός από τον παράγοντα πηνιόσυρμα, η ασυμμετρία της ρομποτικής πλατφόρμας καθώς και η ασύγχρονη ταχύτητα των κινητήρων αποτελούν βασικά εμπόδια στην εκτέλεση κινήσεων μεγάλης ακρίβειας. Ιδιαίτερα στην περίπτωση του πηνιοσύρματος όταν του ασκείται εφελκυστική τάση από το ρομπότ ασκεί το ίδιο μια τάση επαναφοράς στην αρχική του κατάσταση με αποτέλεσμα να επεμβαίνει στην επιθυμητή κίνηση του ρομπότ. Αυτές οι δυνάμεις διαταραχής είναι αυτές που πρέπει να αποφύγουμε αντικαθιστώντας τα καλώδια από πηνιόσυρμα με ασύρματη σύνδεση.

Βασικά χαρακτηριστικά του μικρορομπότ που θέτουν διάφορους περιορισμούς στην ανάπτυξη και εφαρμογή της ασύρματης πλατφόρμας είναι οι ιδιαίτερα μικρές διαστάσεις του και η περιορισμένη ενεργειακή του αυτονομία.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η βιβλιογραφία που μελετήθηκε για αυτή την εργασία περιλαμβάνει προηγούμενες δημοσιεύσεις πάνω στο μικρορομπότ του εργαστηρίου. Σε αυτές τις δημοσιεύσεις μελετήθηκαν οι αρχές και ο τρόπος λειτουργίας του μικρορομπότ καθώς και η κατασκευαστική του δομή. Συγχρόνως έγινε αναζήτηση για δημοσιεύσεις που υλοποιούν ασύρματα επικοινωνία για ρομποτικούς μηχανισμούς με ιδιαίτερα μικρές διαστάσεις.

Προηγούμενες δημοσιεύσεις που μελετήθηκαν και στις οποίες υλοποιούνταν μικρορομποτικές διατάξεις, με ενσωματωμένη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας είναι αρχικά το Nanowalking robot [5],[6] που αποτέλεσε και την πρώτη προσπάθεια για την κατασκευή αυτόνομου μικρορομπότ και το MiCRoN [1], το οποίο ήταν ένα από τα πιο ολοκληρωμένα και πιο απαιτητικά μικρορομπότ, με ηλεκτρονικά μεγάλης ακρίβειας και απόδοσης. Η ενσωματωμένη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας που έχουν τα δύο αυτά μικρορομπότ είναι τεχνολογίας IrDA (υπερύθρων) και αναλαμβάνει τον ασύρματο έλεγχο τους καθώς και την αποστολή και λήψη πληροφοριών από τα ηλεκτρονικά και τους αισθητήρες τους.

Για την ολοκλήρωση της εργασίας απαιτήθηκε όσον το δυνατόν καλύτερη γνώση του μικρορομπότ καθώς και περιφερειακών που χρησιμοποιούνται στην εκτέλεση πειραμάτων διαφόρων κινήσεων μέσω του τηλεχειρισμού. Έτσι μελετήθηκαν δημοσιεύσεις του εργαστηρίου Αυτόματου Έλεγχου που αφορούσαν τον πρότυπο μηχανισμό κίνησης του Δρ. Π. Βαρθολομαίου με φυγοκεντρικούς επενεργητές [13], [14] καθώς και την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών του από τον Κ. Μουγιάκο [16]. Παράλληλα για την εκτέλεση πειραμάτων τηλεχειρισμού, μελετήθηκαν οι δημοσιεύσεις του Δρ. Κ. Βλάχου [7],[14],[17] στις οποίες το μικρορομπότ ελέγχεται ενσύρματα από το χρήστη μέσω του απτικού μηχανισμού του εργαστηρίου.

Για την υλοποίηση ασύρματης δικτύωσης σε μικρορομποτικές διατάξεις εξετάστηκαν οι δημοσιεύσεις [11],[4],[2],[3] καθώς και η πολύ σημαντική μελέτη [10] που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια μεταπτυχιακής εργασίας στο εργαστήριο του Αυτόματου Ελέγχου του Ε.Μ.Π. και σα σκοπό είχε μια πρώτη προσπάθεια στην υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ χρήστη και μικρορομπότ. Επίσης μελετήθηκε πρόσφατη δημοσίευση [8],[9] υλοποίησης ασύρματου αυτόνομου μικρορομπότ το οποίο βασίσθηκε στις αρχές λειτουργίας κίνησης που αναλύονται στην [13]. Το τελευταίο έχει ενσωματωμένη ασύρματη μονάδα υπερύθρων και ο γενικότερος σκοπός του είναι η μελέτη αλγορίθμων προγραμματισμού σμηνών.

Τέλος, ήταν απαραίτητη η μελέτη των φύλλων δεδομένων των ηλεκτρονικών που επιλέχθηκαν. Πιο συγκεκριμένα των μικροεπεξεργαστών PIC της οικογένειας 18F [18], του πομποδέκτη nrf24l01+ της Nordic [19] και του κυκλώματος RS232[20].

1.3 Δομή Εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει 7 κεφάλαια. Το **πρώτο** κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας και αναφέρεται στο κίνητρο και στο σκοπό της καθώς και στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Το **δεύτερο** παραθέτει σημαντικά στοιχεία θεωρίας σχετικά με το μικρορομπότ του εργαστηρίου και με την ασύρματη τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί. Περιγράφει και αναπτύσσει θεωρητικά τη λειτουργία του μικρορομπότ και της επιλεγμένης ασύρματης τεχνολογίας.

Το **τρίτο** κεφάλαιο αναπτύσσει το σχεδιασμό και την υλοποίηση της ασύρματης πλατφόρμας. Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει δύο κύρια υποκεφάλαια, την επιλογή ηλεκτρονικών και την κατασκευή και προγραμματισμό της ασύρματης πλατφόρμας. Η επιλογή των ηλεκτρονικών επικεντρώνεται στα δύο βασικά στοιχεία του κυκλώματος, τους μικροεπεξεργαστές και τον ασύρματο πομποδέκτη. Το δεύτερο υποκεφάλαιο ασχολείται με την κατασκευή πειραματικής διάταξης και με τον προγραμματισμό των μικροεπεξεργαστών και του ασύρματου πομποδέκτη της Nordic.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο περιγράφεται ο σχεδιασμός και η εφαρμογή της πειραματικής διάταξης στο μικρορομπότ. Ο ασύρματος έλεγχος του μικρορομπότ περιγράφεται στο **πέμπτο** κεφάλαιο. Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται στην αποστολή και λήψη δεδομένων ανάμεσα στο χρήστη και στο μικρορομπότ καθώς επίσης, περιγράφεται η υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας ανάμεσα στον απτικό μηχανισμό [7],[15],[17] του εργαστηρίου και στο μικρορομπότ.

Η διεξαγωγή πειραμάτων καθώς και η αξιολόγησή τους περιγράφονται αναλυτικά στο **έκτο** κεφάλαιο της εργασίας ενώ στο **έβδομο** και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας και η προτεινόμενη μελλοντική εργασία.

2. Μικρορομπότ και Επικοινωνία

2.1 Εισαγωγή

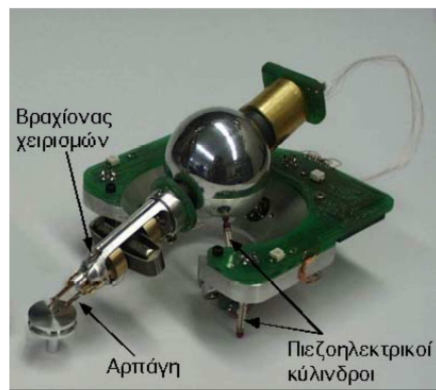
Το παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται σε δύο υποκεφάλαια, το Μικρορομπότ και Μηχανισμοί Μικροκίνησης και την Ασύρματη Επικοινωνία. Σε κάθε υποκεφάλαιο ξεχωριστά παραθέτονται σημαντικά στοιχεία θεωρίας καθώς και πληροφορίες οι οποίες αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την ομαλή ανάγνωση και κατανόηση της εργασίας από τον αναγνώστη. Παρουσιάζεται μια σύντομη και περιεκτική ανασκόπηση του σχεδιασμού και των βασικών αρχών λειτουργίας του μικρορομπότ. Ακόμα αναλύονται περιληπτικά οι πιο συμβατές με την εργασία ασύρματες τεχνολογίες όπως και τα κριτήρια που οδήγησαν στην τελική επιλογή. Μετά την ανάγνωση του παρόντος κεφαλαίου ο αναγνώστης θα μπορεί να χρησιμοποιήσει το θεωρητικό υπόβαθρο στην ανάγνωση της κυρίως εργασίας που επικεντρώνεται στην υλοποίηση ασύρματης πλατφόρμας μεταξύ μικροεπεξεργαστών και εφαρμογή της στο μικρορομπότ.

2.2 Μικρορομπότ και Μηχανισμοί Μικροκίνησης

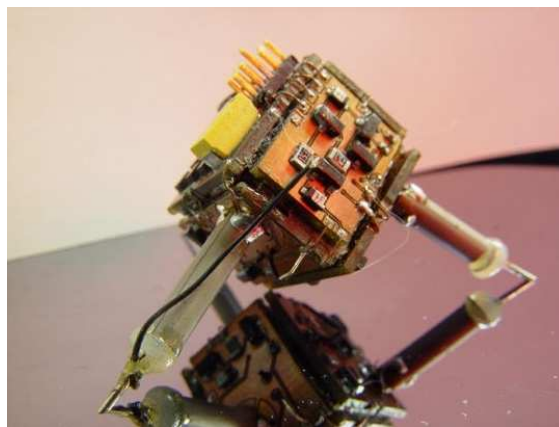
2.2.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας και ειδικότερα την τελευταία δεκαετία η έρευνα στη μικρορομποτική αποτελεί σημαντικό κομμάτι σε πολλά πανεπιστημιακά ερευνητικά προγράμματα. Στόχος, η εξερεύνηση περιοχών και η εκτέλεση εργασιών στις τάξεις της μικρο και νάνο κλίμακας. Ειδικότερα στους τομείς της βιοιατρικής όπου ο μικροχειρισμός κυττάρων απαιτούσε ακριβό εξοπλισμό και ειδικευμένο εξοπλισμό τώρα γίνεται με αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Η πρώτη προσπάθεια για δημιουργία μηχανισμού κίνησης για μικρομετατοπίσεις ήταν ο γραμμικός ρομποτικός μικροεπενεργητής που μελέτησε και σχεδίασε ο Ikuta το 1992. Ο μηχανισμός του εκμεταλλεύεται την αρχή της κρουστικής οδήγησης, χρησιμοποιεί δηλαδή αδρανειακές δυνάμεις τριβής εναλλάξ, οι οποίες δημιουργούνται από πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές τύπου στοίβας σε συνδυασμό με ηλεκτρομαγνήτες.

Από τότε τρία πολύ σημαντικά ερευνητικά προγράμματα έχουν ασχοληθεί με τη δημιουργία κινούμενων μικρορομποτικών συστημάτων με διαστάσεις μερικών κυβικών εκατοστών. Αυτά είναι τα MINIMAN, MiCRoN και NanoWalker (βλ. Σχήματα 2-1, 2-2).



(α)



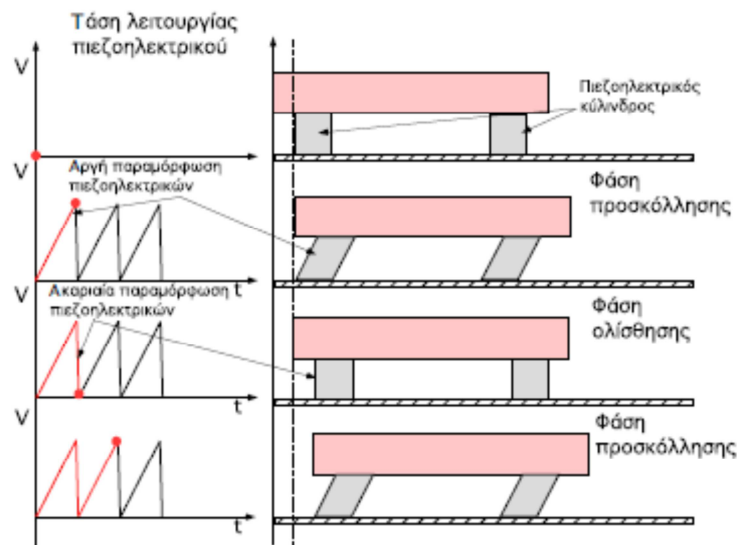
(β)

Σχήμα 2-1. (α) MINIMAN, (β) Nanowalker.



Σχήμα 2-2. MiCRoN.

Και τα τρία αποτελούν πανεπιστημιακές έρευνες και πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια τετραετούς συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών ομάδων. Κύρια ιδέα ήταν η κατασκευή αυτόνομης κινούμενης πλατφόρμας με μικρομετρική ακρίβεια και έχοντας εγκαταστήσει πάνω της μετρητικά συστήματα, συστήματα επικοινωνίας, επενέργησης, τροφοδοσίας και ελέγχου. Και στις τρεις περιπτώσεις ο μηχανισμός κίνησης χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. Στα συγκεκριμένα προγράμματα, με μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους, η αρχή λειτουργίας του μηχανισμού κίνησης τους ονομάζεται, αρχή προσκόλλησης-ολίσθησης (βλ. Σχήμα 2-3).



Σχήμα 2-3. Αρχή προσκόλλησης ολίσθησης [13].

Ωστόσο αυτό το κοινό σύστημα κίνησης και των τριών μικρορομπότ χαρακτηρίζεται από την εξαιρετικά μεγάλη πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών διατάξεων, καθώς χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. Για την χρήση των συγκεκριμένων επενεργητών κρίνονται απαραίτητα περίπλοκα ηλεκτρονικά οδήγησης που αποτελούνται από μετατροπείς τάσης που μετασχηματίζουν χαμηλές τάσεις τροφοδοσίας (5V-3.3V) σε τάσεις της τάξης των 150V. Επίσης τα υλικά κατασκευή τους είναι πολύ ακριβά, εξεζητημένα και αρκετά από αυτά κατασκευάστηκαν έπειτα από ειδικές παραγγελίες.

Για να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί μελετήθηκε και κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Αυτόματου Έλεγχου της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, μια μικρορομποτική διάταξη με διαφορετική φιλοσοφία κίνησης και με βασικά χαρακτηριστικά την απλότητα κατασκευής, το χαμηλό κόστος κτίσης και την αξιοπιστία λειτουργίας. Αυτή η διάταξη σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να εκτελεί εργασίες σε επίπεδο μικροσκοπίου με μικρομετρική ακρίβεια. Με την κατασκευή του μικρορομπότ δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιηθούν βασικά πειράματα σε μικροκλίμακα, όπως η έγχυση σε ωάρια ή μετακίνηση μικροδειγμάτων με τη χρήση κατάλληλων εργαλείων (ιατρική βελόνα, μικροσκοπικός βραχίονας)

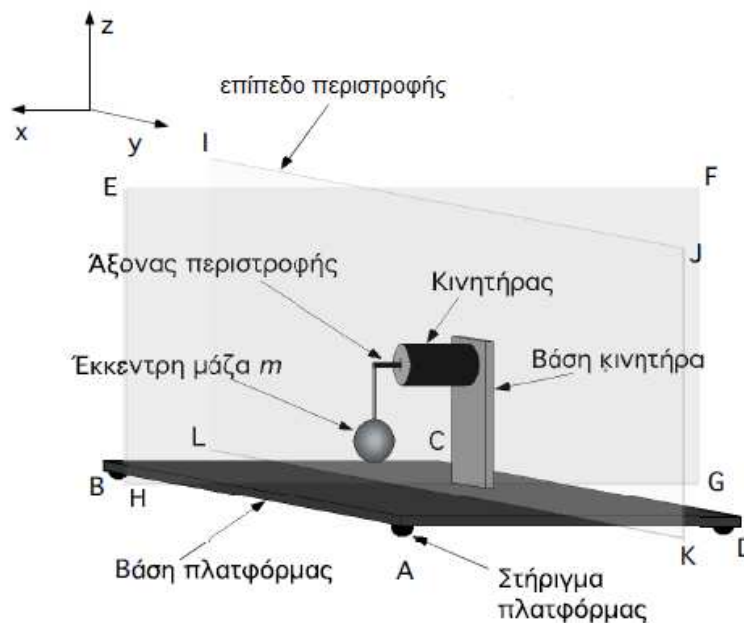
2.2.2 Κινούμενη Μικρορομποτική Διάταξη με Φυγοκεντρικούς Επενεργητές

Το ρομπότ του εργαστηρίου αποτελείται από μια κυλινδρική πλατφόρμα από Plexiglas στην οποία έχουν τοποθετηθεί αντιδιαμετρικά δύο μικροκινητήρες, των οποίων ο άξονας είναι συζευγμένος με έκκεντρη μάζα, καθώς και μία διάταξη για εκτέλεση πειραμάτων, αποτελούμενη από μια ιατρική βελόνα και έναν αισθητήρα δύναμης προσαρμοσμένο πάνω της με κύριο στόχο την πειραματική καταγραφή της ανάδρασης κατά την έγχυση ουσιών σε ωάρια. Πάνω στην πλατφόρμα έχουν τοποθετηθεί οι κυψέλες τροφοδοσίας και οι ηλεκτρονικές πλακέτες υπεύθυνες για την οδήγησή του μικρορομπότ. Η επαφή του μικρορομπότ με την επιφάνεια εργασίας γίνεται μέσω τριών μικροσκοπικών σφαιρών με διάμετρο 2mm των οποίων η γεωμετρία τοποθέτησή τους είναι οι κορυφές ενός ισόπλευρου τριγώνου.

Αρχές λειτουργίας κίνησης

Η ανάλυση και η μελέτη του θεωρητικού μοντέλου κίνησης του μικρορομπότ πραγματοποιήθηκε εξολοκλήρου στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Δρ. Π. Βαρθολομαίου [13]. Στην εργασία του ανέπτυξε ένα μοντέλο κίνησης το οποίο εφαρμόζεται σε δονούμενη πλατφόρμας που φέρει εκκεντροφόρους κινητήρες.

Οι βασικές αρχές λειτουργίας αυτού του μοντέλου περιγράφονται περιληπτικά στη συνέχεια. Για την ανάλυση και τη μελέτη του μοντέλου κίνησης δημιούργησε μία βασική πλατφόρμα που αντιστοιχεί στο σώμα του μικρορομπότ (βλ. Σχήμα 2-4).



Σχήμα 2-4. 3-Δ μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας [13].

Στο αντίστοιχο δισδιάστατο απλοποιημένο μοντέλο της πλατφόρμας (βλ. Σχήμα 2-5) αναλύουμε τις δυνάμεις για σύστημα με 1 β.ε.. Θεωρούμε ότι το φορτίο μάζας m , το οποίο αντιστοιχεί στις πραγματικές συνθήκες με το έκκεντρο του κινητήρα, περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από το O και ότι η πλατφόρμα θα κινηθεί κατά τον άξονα y . Από την ανάλυση δυνάμεων προκύπτουν οι εξής τύποι:

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

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

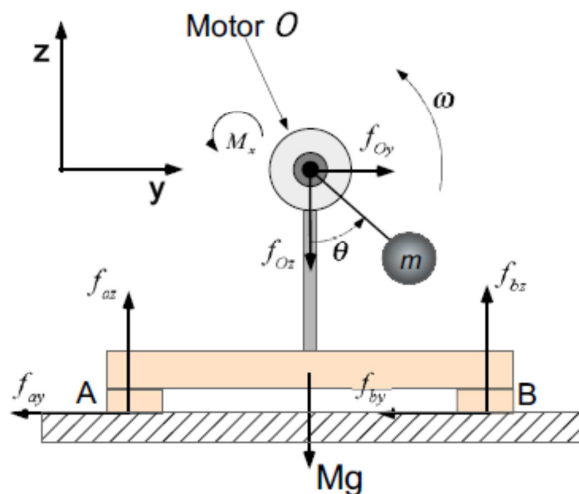
Όπου οι δυνάμεις f_{Oy}, f_{Ox} εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ω και ονομάζονται φυγοκεντρικές δυνάμεις επενέργησης. Στο σημείο επαφής της πλατφόρμας με το έδαφος αναπτύσσονται τριβές. Για αυτές τις τριβές υιοθετείται μοντέλο τριβής Coulomb με μέγιστο συντελεστή στατικής τριβής ίσο με το συντελεστή τριβής ολίσθησης. Για την κίνηση της πλατφόρμας κατά την διεύθυνση του άξονα y οι εξισώσεις κίνησης γράφονται:

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

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

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

Όπου: μ ο συντελεστής τριβής, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και M η μάζα της πλατφόρμας



Σχήμα. 2-5. Απλοποιημένο 2-Δ μοντέλο πλατφόρμας [13].

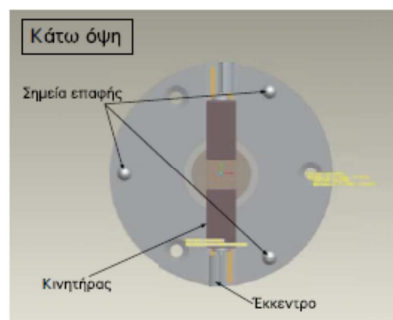
Οι φυγοκεντρικές δυνάμεις επενέργησης σε συνδυασμό με τις δυνάμεις τριβής είναι υπεύθυνες για την κίνηση της πλατφόρμας. Πιο συγκεκριμένα η μονόπλευρη μετατόπιση της πλατφόρμας οφείλεται στη διαφορά φάσης $\pi/2$

μεταξύ των δυνάμεων f_{oy} και N και στον τρόπο που αυτές μεταβάλλονται καθώς το έκκεντρο διαγράφει πλήρη κύκλο λειτουργίας.

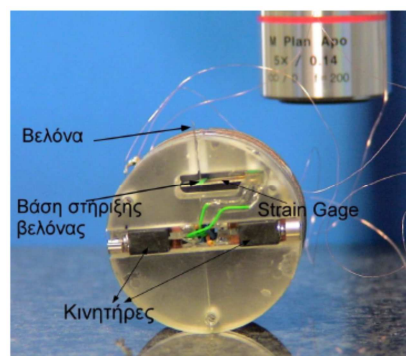
Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Βάση

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η βάση του ρομπότ είναι κυλινδρική και κατασκευασμένη από Plexiglas. Έχει μια κεντρική οπή στην οποία έχουν τοποθετηθεί οι δύο μικροκινητήρες [21] καθώς και μία μικρότερη στην οποία έχει εγκατασταθεί η βελόνα και ο αισθητήρας δύναμης (βλ. Σχήμα 2-7). Τέλος στις κορυφές εγγεγραμμένου ισόπλευρου τριγώνου έχουν τοποθετηθεί τρεις μικροσκοπικές σφαίρες ώστε η επαφή της πλατφόρμας με την επιφάνεια εργασίας να γίνεται σε τρία σημεία. Στο Σχήμα 2-8 φαίνονται καθαρά οι τρεις χαλύβδινες σφαίρες που συνιστούν τα τρία σημεία επαφής της πλατφόρμας



Σχήμα 2-6. Κάτοψη του μικρορομπότ στο πρόγραμμα σχεδιασμού ProEngineer [13].



Σχήμα. 2-7 Φωτογραφική κάτοψη του μικρορομπότ [13].

Μπαταρίες τροφοδοσίας

Πάνω στη βάση έχουν τοποθετηθεί οι δύο μπαταρίες οι οποίες τροφοδοτούν τα ηλεκτρονικά και τους κινητήρες. Τα ηλεκτρονικά λειτουργούν με ανοχή τάσης από 4-5 V, έτσι έχουν επιλεγθεί σε σύνδεση σε σειρά τέσσερις μπαταρίες Ni-MH τάσης 1.2 V και χωρητικότητας 16 mAh. Για την τροφοδοσία των κινητήρων έχει επιλεγθεί μία μπαταρία Li-ion, τάσης 1.2 V και χωρητικότητας 550 mAh.

PCB πλακέτες ηλεκτρονικών

Το τελευταίο κατασκευαστικό κομμάτι του μικρορομπότ είναι τα δύο επίπεδα ηλεκτρονικών. Το πρώτο επίπεδο είναι μια PCB πλακέτα αποτελούμενη από τρεις γέφυρες οδήγησης των κινητήρων. Οι γέφυρες είναι αρχιτεκτονικής H-Bridge και έχουν δημιουργηθεί από διακριτά ηλεκτρονικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα η κάθε μια γέφυρα οδήγησης αποτελείται από τέσσερα NPN τρανζίστορ, ισάριθμες διόδους Zener και αντιστάσεις. Ως εισόδους τα τρανζίστορ παίρνουν εντολές PWM από τον PIC και γείωση και τροφοδοσία από την μπαταρία των 550 mAh.

Το δεύτερο επίπεδο ηλεκτρονικών είναι και αυτό μια PCB πλακέτα στην οποία έχουν τοποθετηθεί ο μικροεπεξεργαστής PIC 18F2431, τεχνολογίας SMT, καθώς και όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά για την ομαλή λειτουργία του. Ακόμα έχει τοποθετηθεί και ένας αντιστροφέας παλμών (Schmitt Trigger), ο οποίος έχει ως εισόδους τα σήματα από τα προβλεπόμενα φωτοτρανζίστορ ανάδρασης στροφών. Τέλος έχουν προσαρμοστεί τέσσερις ακίδες για τον προγραμματισμό ICSP του μικροεπεξεργαστή όπως και έξι επιπλέον ακίδες για προβλεπόμενη επέκταση των ηλεκτρονικών σε τρίτο επίπεδο.

2.2.3 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρθηκε ο τρόπος κίνησης του μικρορομπότ σε θεωρητικό επίπεδο ο οποίος βασίζεται στη φυσική αρχή της φυγοκεντρικής επενέργησης. Παρουσιάστηκε ένα σύντομο παράδειγμα θεωρητικής ανάλυσης της αρχής αυτής για πλατφόρμα με ένα φυγοκεντρικό επενεργητή και ένα βαθμό ελευθερίας. Τέλος περιγράφηκε αναλυτικά η κατασκευή του μικρορομπότ με παρουσίαση όλων των κομματιών που το αποτελούν όπως και των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που έχουν τοποθετηθεί στις πλακέτες του. Σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο, επιβάλλεται ο ασύρματος χειρισμός του μικρορομπότ καθώς οποιαδήποτε μικροδιαταραχή ή παρεμβολή στις δυνάμεις που ασκούνται στο μικρορομπότ πέρα από τις προαναφερόμενες προκαλεί πρόβλημα στη μοντελοποίηση της κίνησης. Ακόμα κρίνοντας από την κατασκευαστική δομή του μικρορομπότ μπορεί κάποιος να συμπεράνει σαν μια πρώτη απαίτηση για την ασύρματη πλατφόρμα να είναι οι περιορισμένες διαστάσεις της.

2.3 Ασύρματη Επικοινωνία

2.3.1 Εισαγωγή

Η επικοινωνία, είτε ασύρματη είτε ενσύρματη, αποτελεί βασικό κομμάτι στο τομέα της τεχνολογίας. Και οι δύο κατηγορίες αναπτύσσονται και εξελίσσονται με ραγδαίο ρυθμό καθώς συμβαδίζουν με την εξέλιξη στον τομέα των ηλεκτρονικών. Έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα το ψηφιακό ασύρματο κομμάτι των επικοινωνιών προσφέροντας πολλές τεχνολογικές λύσεις που βασίζονται στην αποστολή και λήψη ραδιοκυμάτων και ικανοποιούν ανάγκες οποιασδήποτε εμβέλειας, μεγάλης ή μικρής. Πλεονέκτημα σημαντικό του ψηφιακού σήματος έναντι του αναλογικού είναι ότι δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη θορύβου στο σήμα καθώς πριν την κωδικοποίησή του μπορεί και περνά από φιλτράρισμα χωρίς να

αλλοιώνεται το αρχικό του μοτίβο. Όσον αφορά την μικρορομποτική και γενικά την ρομποτική και τον αυτόματο έλεγχο στα πλαίσια εργαστηρίων οι απαιτήσεις στην εμβέλεια της ασύρματης επικοινωνίας είναι μικρές. Σε *μικρής εμβέλειας* (short-range) ασύρματη μεταφορά δεδομένων αναφερόμαστε κυρίως για αποστάσεις μικρότερες από 100 μέτρα. Πιο συγκεκριμένα για το μικρορομπότ του εργαστηρίου οι απαιτήσεις πέρα από την μικρή εμβέλεια συνίστανται στη χαμηλή κατανάλωση έτσι ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική ενεργειακή αυτονομία, στο μέγεθος κατασκευής λόγω περιορισμένων διαστάσεων και τέλος στον όγκο αποστολής και λήψης δεδομένων.

2.3.2 Ασύρματες Τεχνολογίες

Οι υποψήφιες ασύρματες τεχνολογίες στο χώρο των ραδιοπομποδεκτών που ικανοποιούν τις παραπάνω απαιτήσεις που θέτει το μικρορομπότ του εργαστηρίου είναι οι: Bluetooth, Wi-fi, IR, Zigbee και τέλος πομποδέκτες με δικό τους πρωτόκολλο.

Bluetooth

Είναι ίσως το πιο διαδεδομένο ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας αφού συναντάται στην πλειοψηφία των ηλεκτρονικών συσκευών καθημερινής χρήσης. Συσκευές όπως οι προσωπικοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα, χειριστήρια και πληκτρολόγια, ακουστικά, εκτυπωτές κ.α., είναι κάποια παραδείγματα γενικευμένης χρήσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Το Bluetooth λειτουργεί στη συχνότητα 2.4 GHz και μπορεί να λειτουργήσει σε ιδιαίτερα θορυβώδες περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων καθώς χρησιμοποιεί την τεχνολογία frequency hopping spread spectrum (FHSS) κατά την οποία ο πομποδέκτης αλλάζει σε τακτά ορισμένο χρονικό διάστημα συχνότητα αποστολής και λήψης δεδομένων, επιλέγοντας μία από τις 79 συνολικά διαθέσιμες συχνότητες στις οποίες μπορεί να εκπέμψει για να διατηρήσει την ακεραιότητα της σύνδεσης. Η εμβέλεια αποστολής και λήψης ανέρχεται σε 10 μέτρα και η ταχύτητα σε 1 Mbps. Για μεγαλύτερη απόσταση εμβέλειας επιβάλλεται χρήση ειδικού ενισχυτή. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της χρήσης FHSS είναι η σχετικά υψηλή κατανάλωση καθώς ο πομποδέκτης πρέπει να αλλάζει συνέχεια συχνότητα για να μπορεί να ανιχνεύσει καινούργιο πακέτο δεδομένων.

Wi-fi

Το Wi-fi είναι το εμπορικό σήμα της Wifi Alliance, εταιρία που προωθεί την Wireless LAN τεχνολογία, καθώς και η εμπορική ονομασία των προϊόντων που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο 802.11x της IEEE. Το Wi-fi δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN). Λειτουργεί στη συχνότητα 2.4 GHz και όπως και το Bluetooth είναι ευρέως διαδεδομένο και ενσωματώνεται σε μία ευρεία γκάμα ηλεκτρικών συσκευών παρόμοια με αυτήν του Bluetooth. Ωστόσο η εμβέλεια της είναι πολύ μεγαλύτερη (32-100 m) όπως και η ταχύτητα αποστολής και λήψης, η οποία είναι ιδιαίτερα υψηλή 54-108 Mbps. Ως επακόλουθο της μεγάλης εμβέλειας και της υψηλής ταχύτητας η κατανάλωση ενέργειας κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η πολυπλοκότητα ενσωμάτωσης τόσο σε επίπεδο hardware όσο και software.

IrDA

Η επικοινωνία αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός πομποδέκτη ο οποίος ανταλλάσει δεδομένα με μήκος κύματος 800-900 nm στο φάσμα των υπεριώθρων. Αν και θεωρείται ξεπερασμένη τεχνολογία συνεχίζει να αναπτύσσεται και να χρησιμοποιείται καθώς για χρήσεις εμβέλειας μικρότερης του ενός μέτρου είναι η πλέον ενδεικνυόμενη. Τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας είναι μεγαλύτερα από την τεχνολογία Zigbee ενώ η ταχύτητα ανταλλαγής δεδομένων μικρότερη.

Zigbee

Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτελείται από ένα σύνολο πρωτοκόλλων επικοινωνίας υψηλού επιπέδου, τα οποία ενσωματώνονται σε πομποδέκτες με σκοπό να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Η εκπομπή των ραδιοκυμάτων γίνεται στη συχνότητα των 2.4 GHz και βασίζεται στο πρωτόκολλο επικοινωνίας της IEE 802.15.4-2003 για τη δημιουργία προσωπικών ασύρματων δικτύων (WPAN). Πέρα από τη χαμηλή κατανάλωση η πολυπλοκότητα ενσωμάτωσής του σε επίπεδο hardware και software είναι αρκετά χαμηλή πράγμα το οποίο επιτρέπει τη χρήση της σε συστήματα περιορισμένων διαστάσεων και ενεργειακής αυτονομίας. Στα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας προστίθεται η σχετικά μεγάλη εμβέλεια (10-100 m) και η δυνατότητα δημιουργίας διαφορετικών τοπολογιών δικτύων. Σε σύγκριση με τη Bluetooth και τη Wi-fi η ταχύτητα ανταλλαγής δεδομένων είναι αρκετά χαμηλότερη (250 Kbps).

Επικοινωνία στα 2.4GHz με ιδιωτικό πρωτόκολλο

Πέρα από την τεχνολογία Zigbee κατασκευάστηκαν από πολλές εταιρίες πομποδέκτες με δικό τους πρωτόκολλο επικοινωνίας μη συμβατό με το standard που έθεσε η Zigbee Alliance. Με αυτόν τον τρόπο έχουν καταφέρει να κρατήσουν μια ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση ενώ ταυτόχρονα το ιδιωτικό τους πρωτόκολλο είναι προσιτό και παραμετροποιήσιμο. Ακόμα έχουν καταφέρει να αυξήσουν σημαντικά την ταχύτητα επικοινωνίας ακόμα και 10 φορές περισσότερο από την standard Zigbee.

2.3.3 Συμπεράσματα

Από τις πέντε πιο ικανές ασύρματες τεχνολογίες για χρήση και ενσωμάτωση στο μικρορομποτική πλατφόρμα του εργαστηρίου έχει επιλεγεί η τελευταία [10] καθώς ικανοποιεί σε μεγάλο μέρος τις απαιτήσεις που θέτει το ίδιο το μικρορομπότ. Πιο συγκεκριμένα έχει επιλεγεί ο ασύρματος πομποδέκτης, της Nordic, nrf24l01+. Το nrf24l01+ πέρα από το μικρό του μέγεθος καταναλώνει ιδιαίτερα χαμηλή ισχύ για τις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του ενώ το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιεί είναι εύκολα παραμετροποιήσιμο. Επίσης μπορεί να λειτουργεί σε ταχύτητα επικοινωνίας έως 2 Mbps, ταχύτητα ικανοποιητική για τις απαιτήσεις της εργασίας, και αποτελεί και οικονομική λύση. Την ενσωμάτωσή του σε κύκλωμα και την διάθεσή του στην αγορά την έχει αναλάβει η αμερικάνικη Sparkfun.

3. Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ασύρματης Πλατφόρμας Δικτύωσης

3.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια του σχεδιασμού της ασύρματης πλατφόρμας καταρχάς αναλύονται και περιγράφονται τα δύο βασικά ηλεκτρονικά που θα χρησιμοποιηθούν στην πειραματική διάταξη της ασύρματης πλατφόρμας. Το πρώτο από τα δύο είναι ο πομποδέκτης ο οποίος έχει επιλεγθεί με κριτήρια και περιορισμούς που τα ορίζει η κατασκευαστική δομή του μικρορομπότ καθώς και οι επιθυμητές εργασίες που έχει να εκτελέσει. Το δεύτερο βασικό ηλεκτρονικό είναι ο μικροεπεξεργαστής, ο οποίος και αυτός έχει επιλεγθεί με βάση τον υπάρχον μικροεπεξεργαστή του μικρορομπότ. Ο πομποδέκτης και ο μικροεπεξεργαστής θεωρούνται βασικά στοιχεία της ασύρματης πλατφόρμας διότι αυτά ορίζουν τις δυνατότητες του ασύρματου ελέγχου του μικρορομπότ. Μέτα την εκτενή αναφορά στα δύο αυτά ηλεκτρονικά στοιχεία, περιγράφεται μια πρώτη πειραματική υλοποίηση της ασύρματης πλατφόρμας σε μεγαλύτερη κλίμακα διαστάσεων από αυτή του μικρορομπότ και με τη χρήση δοκιμαστικής πλακέτας. Το τελευταίο κομμάτι του κεφαλαίου είναι ο προγραμματισμός του πομποδέκτη και του μικροεπεξεργαστή, μια διαδικασία που παραμετροποιεί τα ηλεκτρονικά και τους προσδιορίζει τη επιθυμητή λειτουργία.

3.2 Επιλογή Ηλεκτρονικών

3.2.1 Ασύρματος Πομποδέκτης

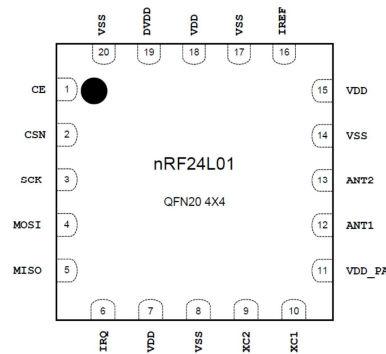
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως έπειτα από μελέτη [10] επιλέχθηκε ως κατάλληλος πομποδέκτης για την πλατφόρμα το nrf24l01+ της νορβηγικής εταιρίας Nordic (βλ. Σχήμα 3-1). Η ενσωμάτωση του πομποδέκτη σε κύκλωμα έχει γίνει από την αμερικάνικη Sparkfun η οποία πρόσθεσε κάποια βασικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται αναλυτικά στη συνέχεια.

3.2.1.1 Χαρακτηριστικά Nordic nrf24l01+

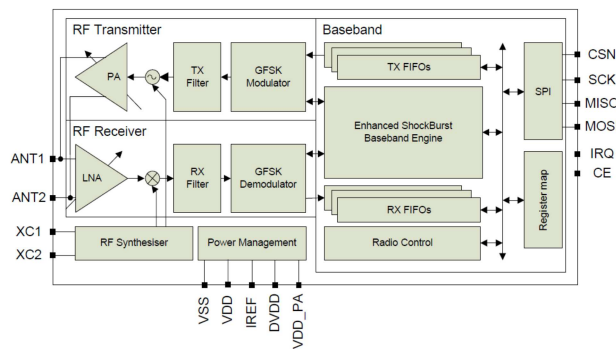
Ο συγκεκριμένος πομποδέκτης της Nordic λειτουργεί στο φάσμα των 2.4GHz και έχει ενσωματωμένο ειδικό πρωτόκολλο, το Enhanced ShockBurst™, κατάλληλο για ασύρματες εργασίες με εξαιρετικά χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Ο πομποδέκτης μπορεί να λειτουργήσει στο εύρος συχνοτήτων 2.400-2.4835GHz* σύμφωνα με το ISM (industrial, scientific and medical radio bands). Ακόμα δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να το παραμετροποιήσει ως προς την

* το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του είναι 2.4-2.525 GHz αλλά σύμφωνα με το ISM περιορίζεται στο εύρος 2.4-2.485 GHz

επιλογή συγκεκριμένης συχνότητας (2.4-2.4835 GHz), την ισχύς του σήματος (-18-0 dB) καθώς και την ταχύτητα αποστολής (250 kbps, 1 Mbps, 2 Mbps). Την τελική μορφή του πομποδέκτη τη δίνει η εταιρεία Sparkfun, η οποία του προσδίδει τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ώστε να μπορεί να λαμβάνει και να αποστέλλει δεδομένα (βλ. Σχήμα 3-2).

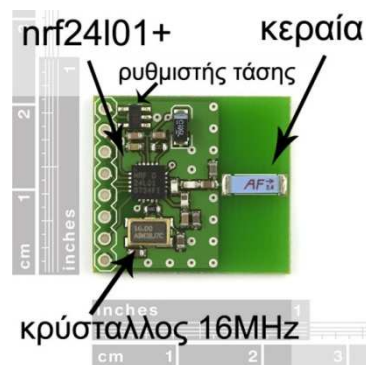


(α)



(β)

Σχήμα 3-1. Nrf24l01+ (α) Διάγραμμα ακροδεκτών, (β)Εσωτερική δομή.



Σχήμα 3-2. Τελική μορφή του πομποδέκτη με ενσωμάτωση του nrf24l01+, της κεραίας, του κρυστάλλου, του ρυθμιστή τάσης και των υπολοίπων ηλεκτρονικών από τη Sparkfun.

Βασικά χαρακτηριστικά

Γραμμικός ρυθμιστής τάσης συνεχούς ρεύματος

Η τελική μορφή του πομποδέκτη περιλαμβάνει εκτός από τον εσωτερικό ρυθμιστή τάσης και έναν εξωτερικό συνεχούς ρεύματος ο οποίος έχει ως είσοδο εύρος τάσης από 3.3 V έως 7 V και ως έξοδο 3.3 V. Γενικά το chip nrf24l01+ έχει εύρος τάσης λειτουργίας 1.6-3.3 V. Οπότε ο ρυθμιστής λειτουργεί και σαν προστασία καθώς η τάση λειτουργίας των ηλεκτρονικών στο μικρορομπότ είναι 4.8 V.

Κεραμική κεραία 2.4 GHz

Η Nordic κατασκευάζει μόνο το nrf24l01+ το οποίο ουσιαστικά είναι το μυαλό του πομποδέκτη. Η κεραία ενσωματώνεται στο τελικό στάδιο από την Sparkfun, είναι κεραμική και εκπέμπει στα 2.4 GHz.

Ρυθμός αποστολής και λήψης

Ο ρυθμός αποστολής/ λήψης μπορεί πάρει τρεις διαφορετικές τιμές ανάλογα με την ανάγκη του χρήστη. Αυτές είναι 250 kbps, 1 Mbps, 2 Mbps και μάλιστα η τελευταία και μεγαλύτερη τιμή είναι αυτή που χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία. Στη μικρότερη τιμή των 250 kbps η εμβέλεια του πομποδέκτη μπορεί να φτάσει τα 100 m.

Καταστάσεις λειτουργίας

Power Down mode: Ο πομποδέκτης ουσιαστικά είναι απενεργοποιημένος και καταναλώνει την ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Όλοι οι καταχωρητές είναι διαθέσιμοι και μπορούν να ενεργοποιηθούν από την SPI. Η κατάσταση ενεργοποιείται βάζοντας στο καταχωρητή **PWR_UP** bit την τιμή **0**.

Standby-I mode: Η συγκεκριμένη κατάσταση επιλέγεται όταν θέλει ο χρήστης να μειώσει την κατανάλωση του nrf24l01+ στην κατάσταση αναμονής αλλά συγχρόνως να διατηρήσει τους χαμηλούς χρόνους ενεργοποίησης σε RX και TX mode. Σε αυτήν την κατάσταση ένα μέρος του χρονισμού του κρυστάλλου είναι ενεργοποιημένο. Ενεργοποιείται βάζοντας στο καταχωρητή **PWR_UP** bit την τιμή **1**. Σε αυτήν την κατάσταση επιστρέφει ο πομποδέκτης από RX,TX mode άμα ο **CE** πάρει την τιμή **0**.

Standby-II mode: Αυτή η κατάσταση είναι παρόμοια με την Standby-I ωστόσο καταναλώνει περισσότερη ενέργεια καθώς είναι ενεργοποιημένο μεγαλύτερο κομμάτι buffer του ρολογιού. Η Standby-II ενεργοποιείται όταν ο **CE** έχει την τιμή **1** και η συσκευή είναι σε κατάσταση PTX αλλά με άδειο TX FIFO.

RX mode: Είναι η ενεργή κατάσταση στη οποία ο πομποδέκτης λειτουργεί ως δέκτης. Για να μπει σε αυτήν τη λειτουργία ο **PWR_UP** πρέπει να έχει την τιμή **1** όπως και οι **PRIM_RX,CE**.

TX mode: Είναι η ενεργή κατάσταση στη οποία ο πομποδέκτης λειτουργεί ως πομπός. Για να μπει σε αυτήν τη λειτουργία ο **PWR_UP** πρέπει να έχει την τιμή **1**

ενώ ο **PRIM_RX** την τιμή **0**. Αντιθέτως ο **CE** πρέπει να κρατήσει την τιμή του στο **1** για τουλάχιστον 10 μ s.

Ακολουθούν συνοπτικά οι πίνακες των καταστάσεων λειτουργίας με τους αντίστοιχους καταχωρητές καθώς και οι χρόνοι μετάβασης λειτουργίας:

Πίνακας 3-1. Καταστάσεις λειτουργίας με τις αντίστοιχες τιμές των καταχωρητών.

| Καταστάσεις λειτουργίας | PWR_UP | PRIM_RX | CE |
|----------------------------|--------|---------|----|
| RX mode | 1 | 1 | 1 |
| TX mode | 1 | 0 | 1 |
| Standby-II | 1 | 0 | 1 |
| Standby-I | 1 | - | 0 |
| Power Down | 0 | - | - |

Πίνακας 3-2. Χρόνοι μετάβασης από λειτουργία σε λειτουργία.

| Όνομα | Μεταβάσεις λειτουργίας | Max | Min | Σχόλια |
|-----------|--|-------------|------------|------------------------|
| Tpd2stby | Power Down → Standby mode | 1.5 ms | | Με εσωτερικό κρύσταλλο |
| Tpd2stby | Power Down → Standby mode | 150 μ s | | Με εξωτερικό κρύσταλλο |
| Tstby2a | Standby modes → TX/RX mode | 130 μ s | | |
| Thce | Minimum CE high | | 10 μ s | |
| Tpece2csn | Delay from CE pos. edge to CSN low | | 4 μ s | |

Κατανάλωση

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου πομποδέκτη, το οποίο αποτελεί σημαντικό κριτήριο για την επιλογή του, είναι η πολύ χαμηλή κατανάλωση. Μπορεί για κάθε μία διαφορετική κατάσταση λειτουργίας του (βλ. Πίνακα 3-3) να καταναλώνει πολύ χαμηλό ρεύμα, χαρακτηριστικό, που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη μέσω, προγραμματισμού και μόνο, να επιτύχει πολύ χαμηλές καταναλώσεις και υψηλή αυτονομία.

Πίνακας 3-3. Αναλυτικός πίνακας καταναλώσεων στις πιο βασικές καταστάσεις λειτουργίας.

| Καταστάσεις Λειτουργίας | Τυπικές τιμές | Μονάδες |
|------------------------------|---------------|---------|
| Power Down | 900 | nA |
| Standby-I | 26 | μA |
| Standby-II | 320 | μA |
| Αποστολή 0 dB | 11.3 | mA |
| « » -6 dB | 9.0 | mA |
| « » -12 dB | 7.5 | mA |
| « » -18 dB | 7.0 | mA |
| « » -6 dB σε Enh.Shockburst™ | 0.12 | mA |
| Αλλαγή από RX σε TX | 8.0 | mA |
| Λήψη 2 Mbps | 13.5 | mA |
| « » 1 Mbps | 13.2 | mA |
| « » 250 kbps | 12.6 | mA |

Λειτουργία Enhanced Shockburst™

Η λειτουργία αυτή είναι μία από τις πιο σημαντικές για τον πομποδέκτη, καθώς αποτελεί ένα αυτοματοποιημένο πρωτόκολλο διαχείρισης δεδομένων (αποστολή και λήψη) μέσω ειδικών πακέτων. Περιλαμβάνει επιπλέον δυνατότητες όπως την αυτόματη δημιουργία των πακέτων δεδομένων καθώς και των πακέτων αναγνώρισης και αναμετάδοσης. Είναι γενικά ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του

nrf24l01+ το οποίο ουσιαστικά υλοποιεί την εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση καθώς και την υψηλών επιδόσεων επικοινωνία μεταξύ χαμηλού κόστους μικροεπεξεργαστών.

Κύρια χαρακτηριστικά:

- 1-32 bytes δυναμικό μήκος πακέτου δεδομένων
- Αυτοματοποιημένη διαχείριση πακέτων
- Αυτοματοποιημένη διαχείριση της συναλλαγής δεδομένων μεταξύ TX-RX
 - Αυτόματο πακέτο αναγνώρισης
 - Αυτόματη αναμετάδοση πακέτου δεδομένων
- Δυνατότητα επικοινωνία αστέρα μεταξύ 1-6 δικτύων μέσω του MultiCeiver™

Μία συναλλαγή πακέτων Enhanced Shockburst™ ουσιαστικά είναι μία ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ πομποδεκτών στην οποία ο ένας είναι ο βασικός Πομπός (**Primary Transmitter PTX**) ενώ ο άλλος βασικός Δέκτης (**Primary Receiver PRX**).

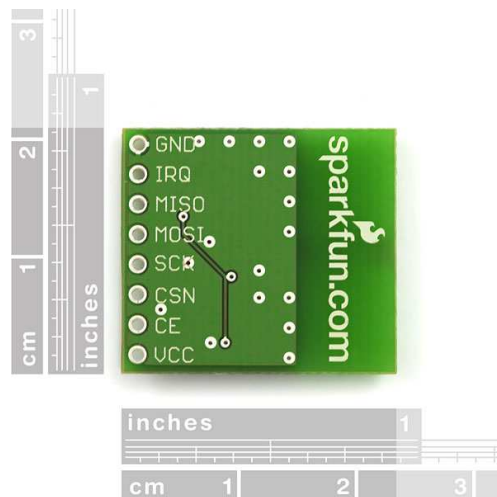
Η διαδικασία γίνεται ως εξής (αυτοματοποιημένα και χωρίς επέμβαση από το χρήστη):

- Ο χρήστης εκκινεί την διαδικασία με το να στείλει ένα πακέτο δεδομένων από το PTX στον PRX. Το ES (Enhanced Shockburst™) αναλαμβάνει αυτόματα να αλλάξει τον PTX σε λειτουργία λήψης για να περιμένει το πακέτο αναγνώρισης (**acknowledgement packet ACK**)
- Αν το πακέτο ληφθεί από τον PRX, το ES αυτόματα δημιουργεί και αποστέλλει ένα ACK πακέτο στον PTX πριν μεταβεί ξανά στην λειτουργία λήψης
- Αν ο PTX δεν λάβει το ACK πακέτο μέσα σε ένα χρονικό περιθώριο καθορισμένο και από το χρήστη τότε το ES θα αποστείλει ξανά αυτόματα το αρχικό πακέτο δεδομένων του χρήστη και θα αλλάξει τον PTX σε λειτουργία λήψης για να περιμένει το ACK πακέτο.

Ο PRX μπορεί να στείλει μαζί με το ACK πακέτο και δεδομένα του χρήστη ενεργοποιώντας έτσι μια αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ PTX και PRX. Γενικά το ES είναι πλήρως παραμετροποιήσιμο. Είναι δυνατόν να ρυθμιστούν παράμετροι όπως ο μέγιστος αριθμός αναμεταδόσεων και η καθυστέρηση μεταξύ αποστολής και λήψης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διαχείριση της επικοινωνίας γίνεται εξολοκλήρου από το ES, χωρίς παρέμβαση του χρήστη μέσω του μικροεπεξεργαστή.

3.2.1.2 Έλεγχος Nordic nrf24l01+

Ο έλεγχος και γενικά η πρόσβαση του χρήστη στις λειτουργίες του nrf24l01+ γίνεται μέσω των παρακάτω ακροδεκτών που μπορούν να δεχτούν τάση έως 5V:



Σχήμα 3-3. Ακροδέκτες του nrf24l01+.

- IRQ - ψηφιακή έξοδος (έχει λογική τιμή 0 και ελέγχεται από τρεις πηγές interrupt)
- CE - ψηφιακή είσοδος (έχει λογική τιμή 1 και χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του πομποδέκτη σε RX ή TX λειτουργία)
- CSN - ψηφιακή είσοδος (χρησιμοποιείται στην επικοινωνία SPI)
- MOSI - ψηφιακή είσοδος (χρησιμοποιείται στην επικοινωνία SPI)
- MISO - ψηφιακή έξοδος (χρησιμοποιείται στην επικοινωνία SPI)
- SCK - ψηφιακή είσοδος (χρησιμοποιείται στην επικοινωνία SPI)

Χαρακτηριστικά SPI

- Ειδικές SPI εντολές για γρήγορη πρόσβαση στις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες λειτουργίες του πομποδέκτη
- Ταχύτητες ανταλλαγής δεδομένων 0-8 Mbps με χρήση τεσσάρων εισόδων και εξόδων
- δομή εντολών 8 bit
- Εύκολα προγραμματιζόμενος register map
- Πλήρης FIFO (First In - First Out) τριών επιπέδων και για την TX και για την RX κατεύθυνση

Λειτουργία SPI

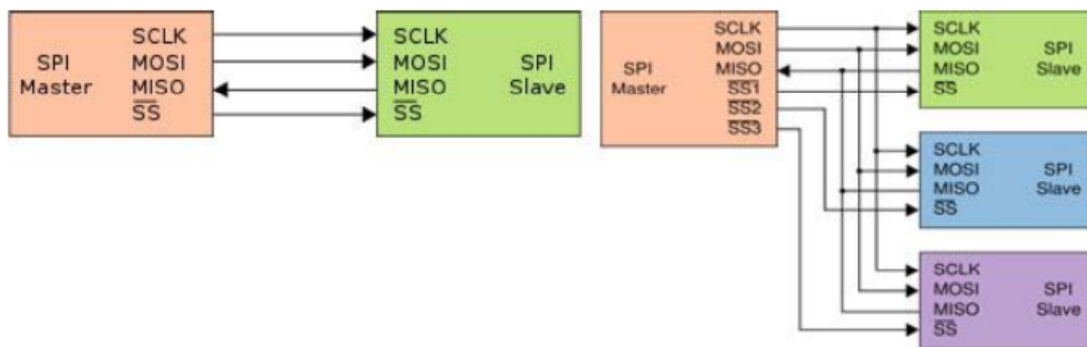
Η επικοινωνία μεταξύ του μικροεπεξεργαστή και του πομποδέκτη γίνεται μέσω της θύρας SPI και πιο συγκεκριμένα μέσω των τεσσάρων ακροδεκτών του nrf24l01+ (MOSI, MISO, SCK, CSN), οι οποίοι αντιστοιχίζονται με τις αντίστοιχες θύρες SPI του μικροεπεξεργαστή. Για την δημιουργία της επικοινωνίας πρέπει ορισθεί η μία συσκευή (μικροεπεξεργαστής) ως Master (κύρια συσκευή) ενώ η άλλη (πομποδέκτης) ως Slave (βλ. Σχήμα 3-4).

Ο CSN (chip select NOT) ακροδέκτης ελέγχεται από την κύρια μονάδα και κάθε νέα SPI εντολή που δίνεται, εκτελείται όταν το CSN μεταβεί από λογική τιμή 1 σε λογική τιμή 0.

Ο SCK (SPI clock) ακροδέκτης παίρνει ως είσοδο από τον Master την παλμοδότηση του ρολογιού.

Ο MOSI (Master output Slave input) ακροδέκτης παίρνει ως είσοδο τα δεδομένα που του στέλνει ο Master μέσω ψηφιακού σήματος.

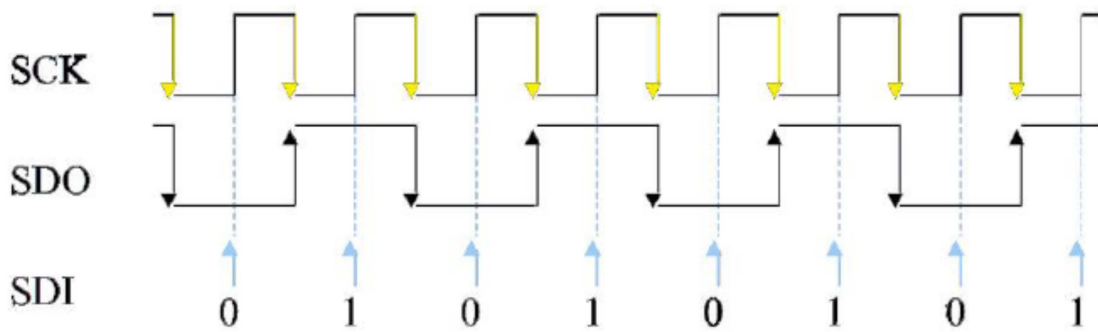
Ο MISO (Master input Slave output) ακροδέκτης στέλνει τα δεδομένα μέσω ψηφιακού σήματος από τον Slave στον Master.



Σχήμα 3-4. Γραφική απεικόνιση της SPI επικοινωνίας μεταξύ ενός Master και ενός Slave, και για τρεις Slave.

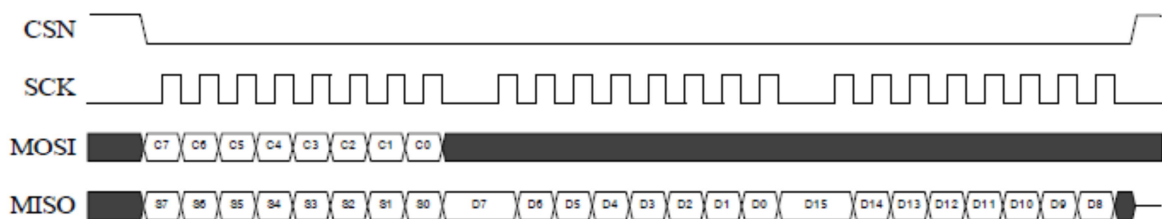
Η έναρξη της επικοινωνίας γίνεται με το που δώσει ο Master την παλμοδότηση χρονισμού και ταυτόχρονα μέσω του ακροδέκτη CSN ορίσει με ποια συσκευή Slave θέλει ο χρήστης να επικοινωνήσει. Την παλμοδότηση του ρολογιού τη δίνει ο Master έτσι ώστε να συγχρονιστούν οι συσκευές και να μπορέσουν να ανταλλάξουν δεδομένα. Με τον συγχρονισμό αυτόν μπορεί και ελέγχεται ο χρόνος ανταλλαγής των δεδομένων.

Η επικοινωνία SPI είναι αμφίδρομη, που σημαίνει ότι η αποστολή και λήψη δεδομένων από κάθε συσκευή γίνεται ταυτόχρονα. Έτσι κάθε καινούργια αποστολή προϋποθέτει το διάβασμα πρώτα των εισερχόμενων δεδομένων αλλιώς η επικοινωνία καθίσταται αδύνατη. Σε κάθε παλμό ρολογιού που δίνεται από τον Master η εγγραφή του bit γίνεται είτε στην άνοδο του παλμού είτε στην κάθοδο (βλ. Σχήμα 3-5).

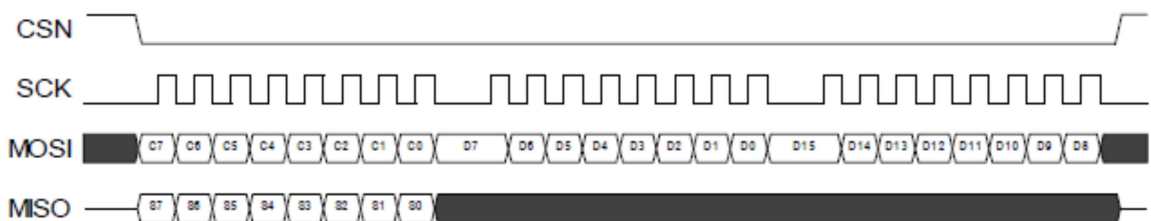


Σχήμα 3-5. Διαδικασία εγγραφής bit προς bit στον ακροδέκτη εξόδου SPI.

Παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια της αποστολής και λήψης, το CSN έχει την λογική τιμή 0, ενώ ταυτόχρονα με την αποστολή-λήψη γίνεται συγχρόνως και αποστολή ενός πακέτου (βλ. Σχήμα 3-6, 3-7.)



Σχήμα 3-6. Διαδικασία διαβάσματος δεδομένων SPI.



Σχήμα 3-7. Διαδικασία εγγραφής δεδομένων SPI.

Οι εντολές εγγραφής και ανάγνωσης της SPI ανέρχονται σε δώδεκα και με αυτές ο χρήστης έχει πρόσβαση στο κατάλογο των καταχωρητών οι οποίες καθορίζουν και τις λειτουργίες του πομποδέκτη. Ο κατάλογος καταχωρητών περιλαμβάνει 26 κύριους προγραμματιζόμενους καταχωρητές και μόνο τρεις για διαδικασίες ελέγχου.

3.2.2 Μικροεπεξεργαστές

Το μικρορομπότ καθώς και όλες οι πειραματικές διατάξεις που έχουν δημιουργηθεί χρησιμοποιούν μικροεπεξεργαστές PIC [18] της εταιρίας Microchip. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται οι 18F4331/ 18F2331/ 18F2431. Και οι τρεις ανήκουν στην ίδια οικογένεια μικροεπεξεργαστών με μικρές διαφορές και έχουν το

ίδιο εγχειρίδιο λειτουργίας. Η συγκεκριμένη οικογένεια μικροεπεξεργαστών έχει επιλεχθεί καθώς έχει ενσωματωμένες λειτουργίες ειδικά για οδήγηση κινητήρων με χρήση παλμών PWM.

Θα χρησιμοποιηθούν δύο μικροεπεξεργαστές, ένας για τον έλεγχο του πομπού και ένας δεύτερος για τον έλεγχο των λειτουργιών του μικρορομπότ καθώς και του ασύρματου δέκτη. Πιο συγκεκριμένα για την πειραματική διάταξη και τον έλεγχο του πομπού θα χρησιμοποιηθεί ο 18F4331 ενώ στο μικρορομπότ έχει ενσωματωθεί ο 18F2431.

3.2.2.1 Χαρακτηριστικά Μικροεπεξεργαστών

Η συγκεκριμένη οικογένεια χαρακτηρίζεται από την υψηλή υπολογιστική της δύναμη που συνδυάζεται με το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος. Επιπλέον φέρουν υψηλής αντοχής Flash μνήμη καθώς και υψηλής ταχύτητας 10-bit A/D Converter.

Βασικά χαρακτηριστικά

- **Ενισχυμένη μνήμη**

Τα ενισχυμένα κελιά μνήμης και για την μνήμη προγραμματισμού και δεδομένων EEPROM προσφέρουν μέχρι και 100.000 κύκλους επαναπρογραμματισμού για τη μνήμη προγράμματος καθώς και 1.000.000 κύκλους για την EEPROM.

Πίνακας 3-4. Χαρακτηριστικά μνήμης των PIC 18F4331 και 18F2431.

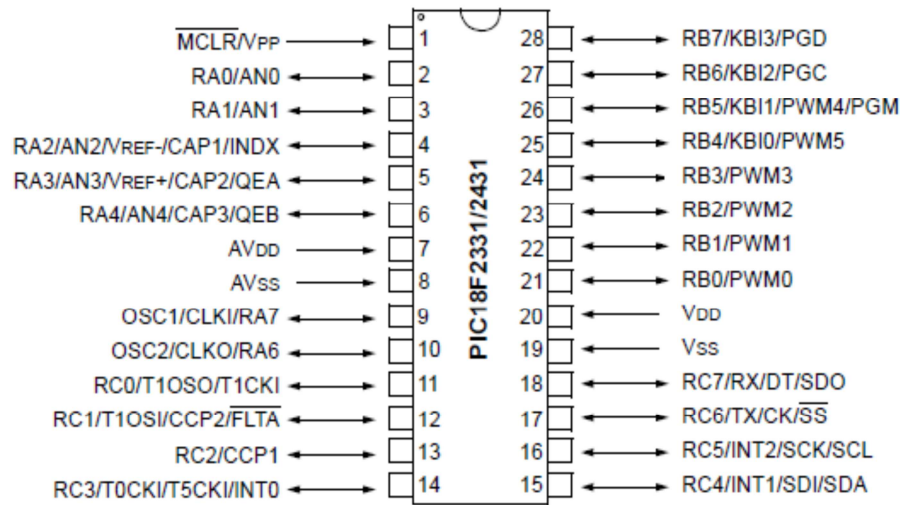
| Χαρακτηριστικά μνήμης (bytes) | 18F4331 | 18F2431 |
|---------------------------------|---------|---------|
| Μνήμη προγράμματος | 8192 | 16384 |
| Εντολές εκτέλεσης κύκλου | 4096 | 8192 |
| Στατική μνήμη δεδομένων(EEPROM) | 256 | 256 |
| Βοηθητική μνήμη(SRAM) | 768 | 768 |

- **Υψηλή συχνότητα λειτουργίας**

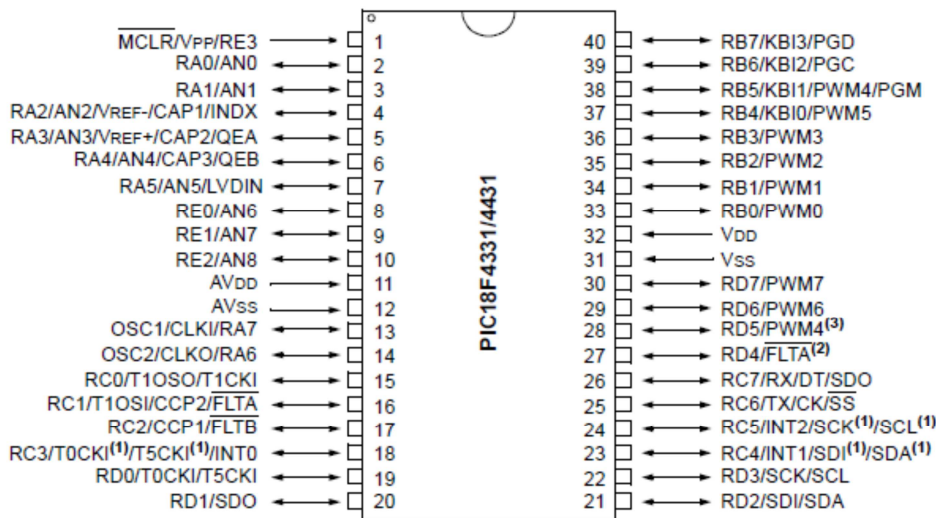
Μπορούν να λειτουργήσουν με συχνότητα λειτουργίας έως 40MHz και χρόνο εκτέλεσης εντολών έως 100 ns. Ακόμα έχουν τη δυνατότητα πολλαπλασιασμού της συχνότητας με τη μέθοδο PLL (Phase Locked Loop) έτσι ώστε ο χρήστης να χρησιμοποιεί χαμηλή συχνότητα κρυστάλλου, αλλά και να χρονίζει το μικροεπεξεργαστή στην υψηλότερα δυνατή συχνότητα (40 MHz).

- **Προγραμματιζόμενοι ακροδέκτες I/O**

Ο 18F4331 έχει 36 προγραμματιζόμενους ακροδέκτες γενικών λειτουργιών ενώ ο 18F2431, 23 (βλ. Σχήμα 3-8, 3-9).



Σχήμα 3-8. Διάγραμμα ακροδεκτών του PIC 18F2431 SPDIP και SOIC μορφής [18].



Σχήμα 3-9. Διάγραμμα ακροδεκτών του PIC 18F4331 PDIP μορφής [18].

- **Μονάδα ελέγχου ισχύος PWM για οδήγηση κινητήρων**

Οι μικροεπεξεργαστές μπορούν να προσφέρουν στο χρήστη 1, 2 ή και 4 εξόδους PWM για τον έλεγχο μισής ή και ολόκληρης γέφυρας οδήγησης.

- **Ενισχυμένη προσπελάσιμη USART και SPI, IC2**

Η λειτουργία σειριακής επικοινωνίας είναι ικανή να χειριστεί τη γνωστή RS-232 καθώς και περιλαμβάνει αυτόματη αναγνώριση του baud rate καθώς και γεννήτρια baud rate 16-bit για βελτιωμένη ανάλυση. Συγχρόνως υποστηρίζει επικοινωνία SPI και IC2.

- **Ανάδραση κίνησης**

Η ανάδραση κίνησης που προσφέρει αυτή η οικογένεια μικροεπεξεργαστών περιλαμβάνει τις λειτουργίες Quadrature Encoder (QEI) καθώς και Input Capture (IC). Η τελευταία έχει ως χαρακτηριστικά τρία κανάλια ανεξάρτητων εισόδων οι οποίες χρησιμοποιούν ως χρονική βάση τον Timer 5 καθώς και έναν Special Event Trigger για διάφορες περιπτώσεις ενεργοποίησης όπως και φίλτρο θορύβου για κάθε μία είσοδο.

- **Χρονιστές (timers) και Interrupts**

Και οι δύο μικροεπεξεργαστές περιλαμβάνουν τέσσερις χρονιστές (timers), έναν 8-bit (timer0), δύο 16-bit (timer1, timer2) και έναν 16-bit ειδικά για την μονάδα ανάδρασης κίνησης (timer5). Επίσης ο 18F4331 προσφέρει πηγές 22 interrupt ενώ ο 18F2431, 14,.

- **Προγραμματισμός ICSP (In Circuit Serial Programming)**

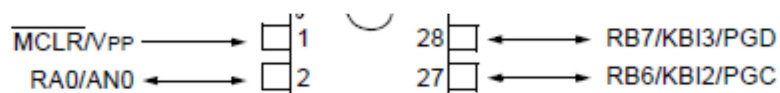
Το χαρακτηριστικό αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να προγραμματίζει τους μικροεπεξεργαστές χωρίς να χρειάζεται να τους αφαιρεί από το κύκλωμα στο οποίο λειτουργούν και με τη χρήση μόνο τριών ακροδεκτών MCLR, PGD,PGC.

3.2.2.2 Έλεγχος Μικροεπεξεργαστών

Ο έλεγχος των μικροεπεξεργαστών και γενικότερα ο προγραμματισμός τους γίνεται μέσω τριών ακροδεκτών MCLR (Master clear), PGD (Programming Data line), PGC (Programming Clock line) (βλ. Σχήμα 3-10, 3-11).



Σχήμα 3-10. Θέση ακροδεκτών MCLR,PGD,PGC του 18F4331 για ICSP Programming[18].



Σχήμα 3-11. Θέση ακροδεκτών MCLR,PGD,PGC του 18F2431 για ICSP Programming[18].

Ο ακροδέκτης *MCLR* προσφέρει στο χρήστη δύο συγκεκριμένες λειτουργίες την Device reset και την Device Programming/ Debugging. Στην Device Reset ο μικροεπεξεργαστής κρατείται σε κατάσταση Reset όσο η τάση στον ακροδέκτη είναι 0 V. Αντιθέτως περνάει σε λειτουργία Device Programming/ Debugging δηλαδή σε κατάσταση προγραμματισμού και ελέγχου όταν δοθεί τάση στον ακροδέκτη ίση με 12 V.

Ο ακροδέκτης *PGD* χρησιμοποιείται για την αποστολή προγράμματος λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή σειριακά, ενώ ο *PGC* δίνει τον χρονισμό κατά την αποστολή των δεδομένων έτσι ώστε να γίνει σωστά η κωδικοποίησή τους από τον μικροεπεξεργαστή.

Η γραφή του προγράμματος γίνεται στη γλώσσα *C* και τη μετάφρασή του σε γλώσσα μηχανής, που θα αποκωδικοποιεί ο μικροεπεξεργαστής, αναλαμβάνει ο μεταφραστής της *Hitech*.

3.3 Υλοποίηση Ασύρματης Πλατφόρμας

3.3.1 Κατασκευή Πειραματικών Διατάξεων

Για τη σχεδίαση και υλοποίηση της ασύρματης πλατφόρμας που θα χρησιμοποιηθεί στο μικρορομπότ πρώτα δημιουργήθηκε μια μεγεθυμένη πειραματική διάταξη κατάλληλη για μια αρχική ενσωμάτωση της ασύρματης μονάδας *nrf24l01+*. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η σύνδεση που θα εφαρμοστεί σε μικρότερη κλίμακα θα προσφέρει την απαραίτητη σταθερότητα αφού πρώτα θα έχει δοκιμαστεί πειραματικά.

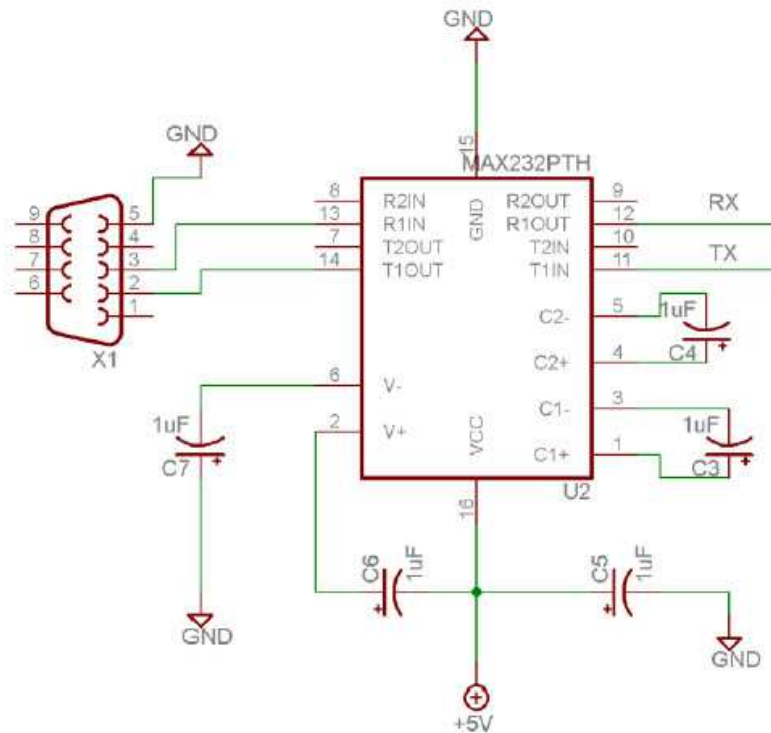
Τα βασικά στοιχεία για την υλοποίηση της πειραματικής διάταξης είναι δύο δοκιμαστικές πλακέτας (*breadboard*) πάνω στα οποία θα τοποθετηθούν τα ηλεκτρονικά, οι δύο μικροεπεξεργαστές *18F4331* και τα δύο *nrf24l01+*, τα οποία θα αποτελέσουν τους δύο πομποδέκτες της ασύρματης επικοινωνίας, οι δύο κρύσταλλοι των *10 MHz* και τέλος όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία (πυκνωτές, αντιστάσεις, δίοδοι, φωτοδίοδοι) καθώς και μονόκλινα καλώδια διαφόρων χρωμάτων. Η τροφοδοσία για κάθε διάταξη (*nrf24l01+* με *PIC*) γίνεται από δύο τροφοδοτικά *DC*.

Ο αρχικός στόχος ήταν να γίνει η σύνδεση του μικροεπεξεργαστή *18F4331* πρώτα σειριακά με τον υπολογιστή μέσω *UART* και στη συνέχεια μέσω της θύρας *SPI* του *PIC* με το *nrf24l01+* το οποίο αναλαμβάνει την αποστολή των δεδομένων. Γενικά το πρώτο κομμάτι της σύνδεσης, το οποίο φέρει τον *PTX* της ασύρματης επικοινωνίας μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικά κομμάτια: την σύνδεση *PIC* με προσωπικό υπολογιστή μέσω της σειριακής και την σύνδεση *PIC* με *nrf24l01+*.

Επικοινωνία *PC* με *18F4331* μέσω σειριακής *RS-232*

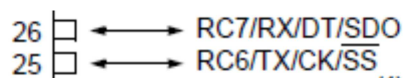
Η επικοινωνία μεταξύ του μικροεπεξεργαστή και του προσωπικού υπολογιστή αποτελεί το πρώτο κομμάτι της ασύρματης πλατφόρμας. Ο υπολογιστής θα χρησιμοποιηθεί στο αρχικό αυτό στάδιο για την εισαγωγή των δεδομένων προς αποστολή. Η σύνδεση του *PIC* με τον υπολογιστή γίνεται σειριακά μέσω ενός μετατροπέα από *USB* σε *RS-232*. Σειριακά σημαίνει ότι τα δεδομένα θα αποστέλλονται ένα *bit* τη φορά. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται τρεις έξοδοι του καλωδίου, μία για την αποστολή, μία για τη λήψη και τέλος μία τρίτη για τη κοινή γείωση, η οποία είναι απαραίτητη όταν έχουμε δύο ξεχωριστά κυκλώματα για να ενεργοποιηθεί η ροή του ρεύματος. Ο μικροεπεξεργαστής όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως υποστηρίζει περιφερειακά τη χρήση σειριακής επικοινωνίας ωστόσο δεν μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τον μετατροπέα *RS-232*

καθώς στη RS-232 η λογική τιμή 1 είναι ίση με -12 V ενώ η λογική τιμή 0 με +12 V. Για αυτό το λόγο χρειάζεται μία ηλεκτρονική διάταξη που θα μετατρέπει τις τιμές της RS-232 σε τιμές 0 - 5 V που θα καταλαβαίνει ο PIC. Το chip που θα χρησιμοποιηθεί είναι το MAX232N από τη Maxim Semiconductors. Το συγκεκριμένο chip παίρνει ως εισόδους τα εισερχόμενα σήματα από PC και PIC αντίστοιχα και τα μετατρέπει σε κατάλληλης μορφής σήματα ώστε να μπορούν οι υπολογιστικές μονάδες να τα διαβάσουν. Για να λειτουργήσει το chip χρειάζεται να προστεθούν στο κύκλωμά του πέντε πυκνωτές του 1 μF ως ακολούθως:



Σχήμα 3-12. Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης του MAX232N με την σειριακή RS-232 [17].

Για να επιβεβαιωθεί η σωστή συνδεσμολογία άρα και η σωστή λειτουργία της σειριακής πριν συνδεθεί με τον PIC μπορεί να γίνει ένα απλό δοκιμαστικό με χρήση του προγράμματος-τερματικού HyperTerminal και με την σύνδεση των ακροδεκτών R1OUT με τον T1IN. Έτσι γράφοντας/στέλνοντας ένα χαρακτήρα στο τερματικό και εάν είναι σωστή η σύνδεση, τότε θα επιστρέψει και θα εμφανιστεί στην οθόνη του υπολογιστή. Η σύνδεση του MAX232N με τον PIC γίνεται μέσω της σύνδεσης των ακροδεκτών R1OUT του MAX232N με τον αντίστοιχο ακροδέκτη που υποστηρίζει σειριακή σύνδεση, τον RC7/RX και με τη σύνδεση του T1IN με τον RC6/TX του PIC. Ο RX ακροδέκτης λειτουργεί ως ψηφιακή είσοδο της σειριακής ενώ ο TX ως ψηφιακή έξοδος.



Σχήμα 3-13. Ακροδέκτες του 18F4331 με ειδική λειτουργία για σειριακή επικοινωνία [18].

Επικοινωνία 18F4331 με nrf24l01+ μέσω SPI

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 3.2.1.2 για τη λειτουργία του nrf24l01+ πρέπει να συνδεθούν οι πέντε ακροδέκτες του με πέντε ακροδέκτες του μικροεπεξεργαστή. Πιο συγκεκριμένα οι ακροδέκτες MOSI, MISO και SCK οι οποίοι είναι ουσιαστικά υπεύθυνοι για την αποστολή, λήψη δεδομένων καθώς και για τον χρονισμό της σύνδεσης SPI πρέπει να συνδεθούν με τους αντίστοιχους τρεις ακροδέκτες του 18F4331 που υποστηρίζουν SPI σύνδεση. Ο συγκεκριμένος PIC έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει δύο δυνατούς συνδυασμούς ακροδεκτών ειδικά για SPI επικοινωνία. Επειδή όμως στην εργασία αυτή τα δεδομένα του χρήστη θα εισέρχονται πρώτα από την σειριακή ο μοναδικός συνδυασμός που δε θα παρεμβάλλεται με τη σειριακή σύνδεση είναι αυτός με ακροδέκτες RD1/SDO, RD2/SDI και RD3/SCK. Ο ακροδέκτης RD1 λειτουργεί ως ψηφιακή έξοδος για τον PIC και συνδέεται με τον ακροδέκτη MOSI του πομποδέκτη, αντίστοιχα ο RD2 λειτουργεί ως ψηφιακή είσοδος και συνδέεται με τον MISO. Ο RD3, τέλος, που δίνει τον χρονισμό της σύνδεσης συνδέεται με τον ακροδέκτη SCK του πομποδέκτη.



Σχήμα 3-14. Ακροδέκτες του 18F4331 για SPI σύνδεση [18].

Οι υπόλοιποι τρεις ακροδέκτες (IRQ, CSN, CE) του πομποδέκτη μπορούν να συνδεθούν σε όποιο ακροδέκτη του PIC θέλει ο χρήστης. Ειδικά όμως ο IRQ που αποτελεί πηγή interrupt πρέπει να συνδεθεί σε μία ψηφιακή είσοδο ώστε να μπορεί ο PIC να ενημερώνεται μέσω των σημάτων που θα στέλνει ο IRQ. Για την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη επιλέχθηκε ο ακροδέκτης RC3/INTO ο οποίος έχει ενσωματωμένη μονάδα interrupt. Για τους άλλους δύο ακροδέκτες CE και CSN έχουν επιλεγθεί οι απλές ψηφιακές εξοδοί των ακροδεκτών RB7 και RB6 αντίστοιχα.

Το δεύτερο κομμάτι της σύνδεσης αποτελεί τον PTX της ασύρματης επικοινωνίας και υλοποιείται ακριβώς όπως η παραπάνω σύνδεση PIC 18F4341 με τον πομποδέκτη nrf24l01+.

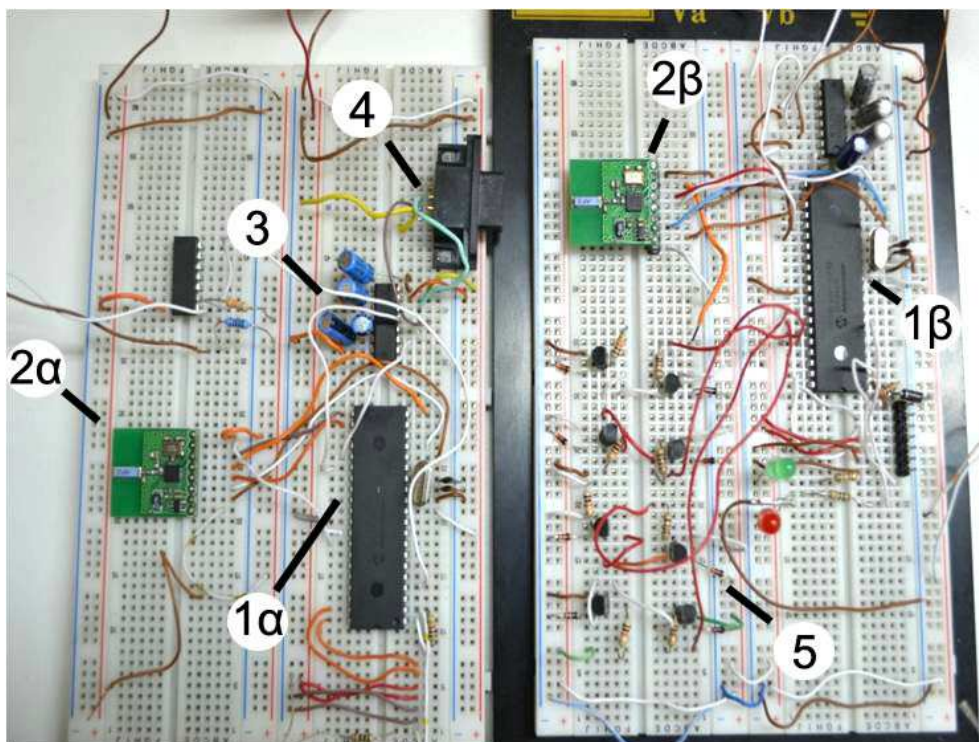
Η τελική μορφή της ασύρματης πλατφόρμας επικοινωνίας μαζί με τα πιο σημαντικά στοιχεία της πλατφόρμας απεικονίζονται στο Σχήμα 3-15 όπου:

1α. Μικροεπεξεργαστής 18F4331 (TX).

1β. Μικροεπεξεργαστής 18F4331 (RX).

2α. Πομποδέκτης nrf24l01+ (TX).

- 2β. Πομποδέκτης nrf24l01+ (RX).
3. MAX232N.
4. Θύρα RS-232.
5. Γέφυρα H-Bridge (δοκιμαστική διάταξη).



Σχήμα 3-15. Φωτογραφική απεικόνιση της υλοποίησης της πειραματικής ασύρματης πλατφόρμας.

3.3.2 Προγραμματισμός Μικροεπεξεργαστών.

Για τον προγραμματισμό των μικροεπεξεργαστών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα αποσφαλμάτωσης και προγραμματισμού της Microchip, Mplab, ο συνοδευόμενος προγραμματιστής IDE ICD2 και ο μεταγλωττιστής της Hi-tech C για την οικογένεια των μικροεπεξεργαστών PIC 18.

Η σύνταξη του προγράμματος γίνεται στη προγραμματιστική γλώσσα C και μεταφράζεται από τον μεταγλωττιστή σε γλώσσα μηχανής κατανοητή από τον μικροεπεξεργαστή. Για να ξεκινήσει να λειτουργεί ο μικροεπεξεργαστής, ο χρήστης πρέπει πρώτα να προγραμματίσει τους καταχωρητές διαμόρφωσης.

Οι καταχωρητές διαμόρφωσης ουσιαστικά ρυθμίζουν το μικροεπεξεργαστή και ενεργοποιούν τα διάφορα χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Χωρίς αυτούς το πιο πιθανό είναι να παρατηρηθεί απρόβλεπτη ή και καθόλου λειτουργία.

Οι καταχωρητές διαμόρφωσης ρυθμίζουν τα εξής χαρακτηριστικά-λειτουργίες του μικροεπεξεργαστή:

- Επιλογή κρυστάλλου
 - LP χαμηλής ενέργειας κρύσταλλος(<1 MHz)
 - XT κρύσταλλος(<=4 MHz)
 - HS υψηλής ταχύτητας κρύσταλλος(>4 MHz)
 - HSPLL υψηλής ταχύτητας κρύσταλλος με ενεργοποιημένη τη λειτουργία PLL
 - RC εξωτερική αντίσταση/πυκνωτής με $F_{OSC}/4$ στον ακροδέκτη RA6
 - INTIO1 εσωτερικός κρύσταλλος με $F_{OSC}/4$, έξοδο στον RA6 και I/O στον RA7
 - INTIO2 εσωτερικός κρύσταλλος με ψηφιακές εισόδους/εξόδους στον RA6 στον RA7
 - EC εξωτερικό ρολόι με $F_{OSC}/4$ έξοδο
 - ECIO εξωτερικό ρολόι με I/O στον RA6
- Διάφορες καταστάσεις επαναφοράς (Resets)
 - Power-on Reset (POR)

Ο μικροεπεξεργαστής παραμένει σε κατάσταση επαναφοράς και ενεργοποιείται όταν η τάση τροφοδοσίας V_{DD} συμπέσει σε ένα καθορισμένο επιτρεπτό όριο.
 - Brown-out Reset (BOR)

Η συγκεκριμένη κατάσταση επαναφοράς ενεργοποιείται όταν η τάση τροφοδοσίας V_{DD} του μικροεπεξεργαστή πέσει κάτω από ένα καθορισμένο όριο λειτουργίας V_{BOR} για ένα χρονικό διάστημα T_{BOR} που καθορίζεται από το χρήστη.
- Χρονιστές καταστάσεων επαναφοράς (Reset Timers)
 - Power-up Timer (PWRT)

Όσο ο χρονιστής είναι ενεργοποιημένος η συσκευή βρίσκεται σε κατάσταση επαναφοράς.
 - Oscillator Start-up Timer (OST)

Ο χρονιστής παρέχει μία καθυστέρηση 1024 κύκλων αφού απενεργοποιηθεί ο PWRT ώστε να δώσει χρονικό περιθώριο στον κρύσταλλο του μικροεπεξεργαστή να σταθεροποιηθεί .

- Χρονιστής Watchdog (WDT)

Ο χρονιστής WDT δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επαναφέρει το μικροεπεξεργαστή από την κατάσταση αδρανοποίησης στην ενεργή με περίοδο αδρανοποίησης που κυμαίνεται από τα 4 ms έως 2.18 min. Ο WDT χρησιμοποιείται κυρίως για την επίτευξη όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα αυτονομίας.

- Fail-Safe Clock Monitor

Η λειτουργία αυτή επιτρέπει στον μικροεπεξεργαστή, σε περίπτωση δυσλειτουργίας του εξωτερικού κρυστάλλου, να συνεχίσει κανονικά τη λειτουργία του, με την αυτόματη αλλαγή του ρολογιού συστήματος από τον εξωτερικό στον εσωτερικό κρύσταλλο.

- Two-Speed Start-up

Με τη λειτουργία αυτή ενεργοποιημένη ο μικροεπεξεργαστής ξεκινά την εκτέλεση του κώδικα με όσο δυνατόν λιγότερη καθυστέρηση από τη στιγμή που θα ενεργοποιηθεί.

- Code Protection

Ρυθμίζεται η επεξεργασία και η προσπέλαση του κώδικα του μικροεπεξεργαστή από άλλους χρήστες.

- ID Location

Όταν έχει ενεργοποιηθεί η προστασία του κώδικα ο μικροεπεξεργαστής παρέχει θέσεις μνήμης για αποθήκευση αριθμών που βοηθούν στην ταυτοποίηση του κώδικα.

- In-Circuit Serial Programming™

Καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας του In-Circuit Serial Programming.

Μόλις ρυθμιστούν οι καταχωρητές διαμόρφωσης πρέπει να αρχικοποιηθεί η λειτουργία των ακροδεκτών του μικροεπεξεργαστή. Όλοι οι ακροδέκτες εκτός της σειράς A μπορούν να λειτουργήσουν ως ψηφιακοί είσοδοι ή έξοδοι, η σειρά A μπορεί να λειτουργήσει και σαν αναλογική είσοδος αλλά και σαν ψηφιακή είσοδος/έξοδος. Όμως για να ορίσουμε ακριβώς την λειτουργία της πρέπει να προγραμματίσουμε τον επιπλέον καταχωρητή ANSLE0. Γενικά ο τρόπος προγραμματισμού τους παραθέεται στο παράρτημα όπου υπάρχουν τα προγράμματα των μικροεπεξεργαστών. Στην πειραματική διάταξη όπως περιγράφηκε στη ενότητα 3.3.1 για να λειτουργήσει η επικοινωνία $pc \rightarrow PIC \rightarrow nrf24l01+$ πρέπει να ορισθούν οι ψηφιακές είσοδοι/έξοδοι των ακροδεκτών για τη σειριακή και για την SPI και να παραμετροποιηθούν οι λειτουργίες τους. Τέλος μένει να παραμετροποιηθεί η λειτουργία της μονάδας

PWM του μικροεπεξεργαστή που συνδέεται με το nr24l01+(PRX) αφού αυτός αργότερα θα στέλνει τους επιθυμητούς παλμούς PWM για να οδηγή τους δύο μικροκινητήρες.

3.3.2.1 UART και SPI

UART

Για την σειριακή επικοινωνία υπολογιστή και μικροεπεξεργαστή πρέπει να γίνει παραμετροποίηση στη μονάδα που είναι υπεύθυνη για τη σειριακή επικοινωνία του 18F4331. Αυτό μπορεί να γίνει είτε κατευθείαν προγραμματίζοντας τους καταχωρητές TXSTA, RCSTA, BAUDCON και SPBRG είτε καλώντας τη συνάρτηση OpenUSART και επιλέγοντας τις επιθυμητές τιμές της. Σε κάθε περίπτωση η λειτουργία της σειριακής πρέπει να έχει ρυθμιστεί ώστε να είναι:

- Ενεργοποιημένη η λειτουργία μετάδοσης δεδομένων
- Μετάδοση 8-bit
- Ασύγχρονη κατάσταση λειτουργίας
- Ενεργοποιημένη η υψηλής ταχύτητας γεννήτρια δεδομένων

Τέλος πρέπει να δοθεί τιμή στον καταχωρητή SPBRG οποίος ορίζει πότε θα επαναφέρεται ο χρονιστής της γέφυρας. Στόχος είναι η τιμή που θα δοθεί να επιφέρει και το μικρότερο σφάλμα στην επικοινωνία. Για κρύσταλλο 10 MHz και ενεργοποιημένο το BRGH, η τιμή που πρέπει να πάρει ο SPBRG είναι 64 (βλ. Πίνακα 3-5).

Πίνακας 3-5. Ρυθμοί αποστολής και σφάλματα στην ασύγχρονη κατάσταση με χρήση 10MHz κρύσταλλο.

| SYNC = 0, BRGH =1, BRG16 = 0, F_{OSC} =10 MHz | | | |
|---|-------------|---------|-------|
| Baud rate (kbps) | Actual rate | % Error | SPBRG |
| 2.4 | 2.441 | 1.73 | 255 |
| 9.6 | 9.615 | 0.16 | 64 |
| 19.2 | 19.531 | 1.73 | 31 |
| 57.6 | 56.818 | -1.36 | 10 |
| 115.2 | 125.000 | 8.51 | 4 |

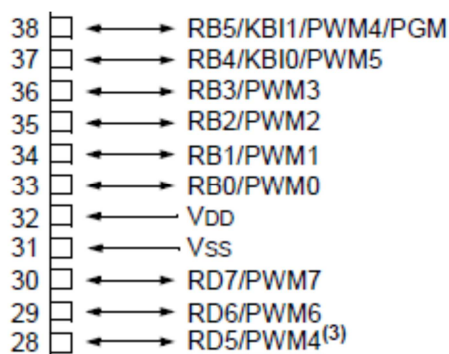
Παρατηρούμε ότι το μικρότερο σφάλμα 0.16% για τον συγκεκριμένο κρύσταλλο το πετυχαίνουμε για ρυθμό αποστολής 9.6 Kbps και SPBRG=64.

SPI

Για τη ρύθμιση της SPI λειτουργίας του PIC χρειάζεται η παραμετροποίηση δύο καταχωρητών, των SSPCON και SSTAT. Οι βασικές ρυθμίσεις που πρέπει να ορισθούν από αυτούς τους καταχωρητές είναι :ενεργοποίηση της θύρας spi καθώς και των ακροδεκτών SDO, SDI, SCK, η αποστολή δεδομένων να γίνεται σε κάθε παλμό ανόδου και τέλος ο ορισμός της συχνότητα $F_{OSC}/4$.

3.3.2.2 PWM

Για την οδήγηση των κινητήρων θα χρησιμοποιηθεί η μονάδα Power Control PWM του μικροεπεξεργαστή PIC 18F4331. Η συγκεκριμένη μονάδα απλοποιεί σημαντικά την διαδικασία της παραγωγής πολλαπλών και συγχρονισμένων PWM (Pulse-Width Modulated) εξόδων για τη χρήση τους σε έλεγχο κινητήρων και εφαρμογές μετατροπής ενέργειας. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της μονάδας Power Control είναι ότι υποστηρίζει την οδήγηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες. Η μονάδα, για τον PIC 18F4331 που χρησιμοποιούμε στην πειραματική πλατφόρμα, προσφέρει τέσσερις γεννήτριες PWM και οκτώ κανάλια, ενώ για τον μικροεπεξεργαστή του μικρορομπότ, PIC 18F2431, δύο γεννήτριες και τέσσερα κανάλια (βλ. Σχήμα 3-16).



(α)



(β)

Σχήμα 3-16. Σχηματική απεικόνιση των ακροδεκτών του (α)18F4331 και (β)18F2431 που λειτουργούν ως έξοδοι PWM [18].

Για την ρύθμιση της μονάδας Power Control PWM module χρειάζεται να παραμετροποιηθούν οι καταχωρητές του Σχήματος 3-17.

| Name | Bit 7 | Bit 6 | Bit 5 | Bit 4 | Bit 3 | Bit 2 | Bit 1 | Bit 0 |
|-------------------------|---|----------------------|------------------------|---|----------------------|---------|---------|--------|
| INTCON | GIE/GIEH | PEIE/GIEL | TMR0IE | INT0IE | RBIE | TMR0IF | INT0IF | RBIF |
| IPR3 | — | — | — | PTIP | IC3DRIP | IC2QEIP | IC1IP | TMR5IP |
| PIE3 | — | — | — | PTIE | IC3DRIE | IC2QEIE | IC1IE | TMR5IE |
| PIR3 | — | — | — | PTIF | IC3DRIF | IC2QEIF | IC1IF | TMR5IF |
| PTCON0 | PTOPS3 | PTOPS2 | PTOPS1 | PTOPS0 | PTCKPS1 | PTCKPS0 | PTMOD1 | PTMOD0 |
| PTCON1 | PTEN | PTDIR | — | — | — | — | — | — |
| PTMRL ⁽¹⁾ | PWM Time Base Register (lower 8 bits) | | | | | | | |
| PTMRH ⁽¹⁾ | UNUSED | | | PWM Time Base Register (upper 4 bits) | | | | |
| PTPERL ⁽¹⁾ | PWM Time Base Period Register (lower 8 bits) | | | | | | | |
| PTPERH ⁽¹⁾ | UNUSED | | | PWM Time Base Period Register (upper 4 bits) | | | | |
| SEVTCMPL ⁽¹⁾ | PWM Special Event Compare Register (lower 8 bits) | | | | | | | |
| SEVTCMPH ⁽¹⁾ | UNUSED | | | PWM Special Event Compare Register (upper 4 bits) | | | | |
| PWMCON0 | — | PWMEN2 | PWMEN1 | PWMEN0 | PMOD3 ⁽²⁾ | PMOD2 | PMOD1 | PMOD0 |
| PWMCON1 | SEVOPS3 | SEVOPS2 | SEVOPS1 | SEVOPS0 | SEVTDIR | — | UDIS | OSYNC |
| DTCON | DTPS1 | DTPS0 | DT5 | DT4 | DT3 | DT2 | DT1 | DT0 |
| FLTCONFIG | BRFEN | FLTBS ⁽²⁾ | FLTBMOD ⁽²⁾ | FLTBEN ⁽²⁾ | FLTCON | FLTAS | FLTAMOD | FLTAEN |
| OVDCOND | POVD7 ⁽²⁾ | POVD6 ⁽²⁾ | POVD5 | POVD4 | POVD3 | POVD2 | POVD1 | POVD0 |
| OVDCONS | POUT7 ⁽²⁾ | POUT6 ⁽²⁾ | POUT5 | POUT4 | POUT3 | POUT2 | POUT1 | POUT0 |
| PDC0L ⁽¹⁾ | PWM Duty Cycle #0L Register (lower 8 bits) | | | | | | | |
| PDC0H ⁽¹⁾ | UNUSED | | | PWM Duty Cycle #0H Register (upper 6 bits) | | | | |
| PDC1L ⁽¹⁾ | PWM Duty Cycle #1L register (lower 8 bits) | | | | | | | |
| PDC1H ⁽¹⁾ | UNUSED | | | PWM Duty Cycle #1H Register (upper 6 bits) | | | | |
| PDC2L ⁽¹⁾ | PWM Duty Cycle #2L Register (lower 8 bits) | | | | | | | |
| PDC2H ⁽¹⁾ | UNUSED | | | PWM Duty Cycle #2H Register (upper 6 bits) | | | | |
| PDC3L ^(1,2) | PWM Duty Cycle #3L Register (lower 8 bits) | | | | | | | |
| PDC3H ^(1,2) | UNUSED | | | PWM Duty Cycle #3H Register (upper 6 bits) | | | | |

Σχήμα 3-17. Καταχωρητές που ρυθμίζουν τη μονάδα Power Control PWM των 182431 και 18F2331 [18].

Η ρύθμιση των ακροδεκτών PWM του μικροεπεξεργαστή γίνεται από τον καταχωρητή PWMCON0 και στη συνέχεια η συχνότητα και η ανάλυση των παλμών από τους καταχωρητές PTCON0 (prescale/postscale bits), PTCON1 (ενεργοποιεί τον ενσωματωμένο χρονιστή). Η συχνότητα και η ανάλυση των παλμών δίνεται από τους τύπους:

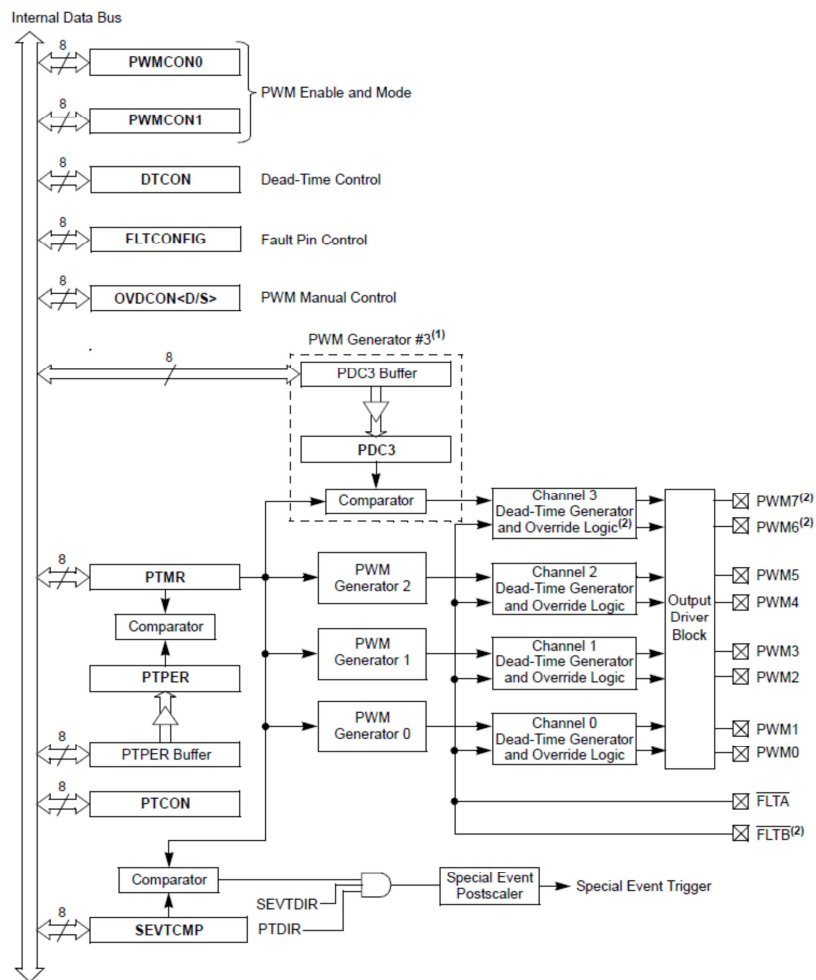
$$T_{PWM} = \frac{(PTPER+1)*PTMRPS}{\frac{F_{OSC}}{4}} \quad (3-1)$$

$$Frequency_{PWM} = \frac{1}{T_{PWM}} \quad (3-2)$$

$$Resolution_{PWM} = \frac{\log(\frac{F_{OSC}}{F_{PWM}})}{\log 2} \quad (3-3)$$

Γενικά, συχνότητα μεγαλύτερη των 5 kHz είναι αποδεκτή καθώς η ανάλυση που δίνει, προσφέρει γρηγορότερη και ομαλότερη αλλαγή ταχύτητας από τον χρήστη.

Το Σχήμα 3-18 παρουσιάζει το διάγραμμα λειτουργίας της συγκεκριμένης μονάδας στο οποίο περιλαμβάνονται όλοι οι καταχωρητές και ο τρόπος λειτουργίας των γεννητριών PWM και των αντίστοιχων καναλιών τους.



Σχήμα 3-18. Διάγραμμα λειτουργίας της μονάδας Power Control PWM των 182431 και 18F2331 [18].

3.3.3 Προγραμματισμός rf24I01+

Ο προγραμματισμός του πομποδέκτη γίνεται μέσα στο πρόγραμμα του μικροεπεξεργαστή. Για το σκοπό αυτό, ο χρήστης αρκεί να εισάγει τα απαραίτητα αρχεία nrf24I01.h και nrf24I01.c, στα οποία γίνεται η αρχικοποίηση των ακροδεκτών του μικροεπεξεργαστή που συνδέονται στον πομποδέκτη και περιλαμβάνουν τις συναρτήσεις που ορίζουν όλες τις λειτουργίες του πομποδέκτη.

Στο 3.3.2 περιγράφηκε ο τρόπος παραμετροποίησης των ακροδεκτών του μικροεπεξεργαστή όσον αφορά τις λειτουργίες της μονάδας SPI καθώς και των ψηφιακών εισόδων και εξόδων. Αυτό όμως από μόνο του δεν αρκεί. Η παραμετροποίηση και ουσιαστικά η ανάθεση λειτουργιών στους ακροδέκτες του μικροεπεξεργαστή πρέπει να γίνει και στο αρχείο header nrf24l01.h. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης αποφεύγει τη χρήση αριθμών για τους καταχωρητές του πομποδέκτη και τους προσδιορίζει ως ονομαστικούς καταχωρητές, τρόπος πιο προσιτός και κατανοητός. Η παραμετροποίηση αυτή γίνεται μόνο για τον έλεγχο των CSN, CE και IRQ καθώς οι MOSI, MISO και SCK ελέγχονται αυτόματα από την μονάδα SPI του μικροεπεξεργαστή και του πομποδέκτη. Η γενική μορφή της εντολής είναι:

```
#define nrf24l01_{ }_IOREGISTER      IOPORT
```

Όπου {} ένας από τους ακροδέκτες CSN,CE και IRQ, και IOPORT η ψηφιακή θύρα του μικροεπεξεργαστή που θα συνδεθεί με τον αντίστοιχο ακροδέκτη του πομποδέκτη. Η συγκεκριμένη εντολή μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε το όνομα και όχι τον αριθμό του καταχωρητή για την αντίστοιχη θύρα.

Το δεύτερο κομμάτι της παραμετροποίησης έχει γενική μορφή:

```
#define nrf24l01_{ }_PINMASK        0xFF
```

Όπου {} ένας από τους ακροδέκτες CSN, CE και IRQ, και IOPORT η ψηφιακή θύρα του μικροεπεξεργαστή που θα συνδεθεί με τον αντίστοιχο ακροδέκτη του πομποδέκτη. Η εντολή αυτή προσδιορίζει ποιος είναι ακριβώς ακροδέκτης της θύρας που έχει επιλεγεί διότι οι περισσότεροι μικροεπεξεργαστές που έχουν πολλούς ακροδέκτες ορίζουν ομάδες θυρών με ίδια ονομασία (π.χ. PORTA) και για αυτό πρέπει να ορισθεί συγκεκριμένος ακροδέκτης από την ομάδα αυτή.

Ακολουθεί παράδειγμα:

```
#define nrf24l01_CE_IOREGISTER      PORTC      (1)
```

```
#define nrf24l01_CE_PINMASK        0x02      (2)
```

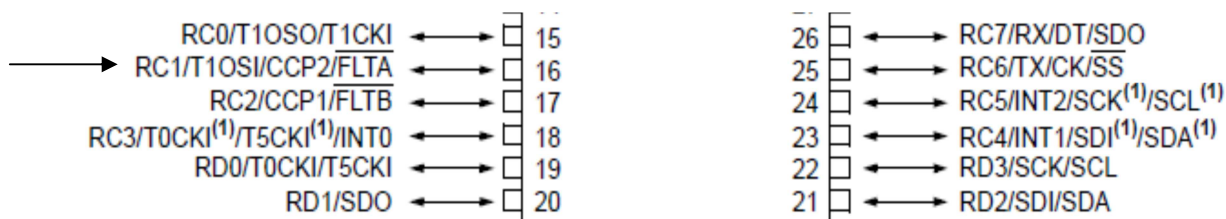
Επεξήγηση:

(1): Με την εντολή αυτή προσδιορίζει ως ακροδέκτη CE έναν ακροδέκτη από την ομάδα ψηφιακών I/O θυρών C του μικροεπεξεργαστή και τον ονομάζει nrf24l01_CE_IOREGISTER.

(2): Στη συνέχεια προσδιορίζει ποιος ακριβώς ακροδέκτης είναι αυτός που θα χρησιμοποιηθεί από την ομάδα C. Οι μικροεπεξεργαστές που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή έχουν ομάδες ψηφιακών θυρών που αποτελούνται από 8 ακροδέκτες και μήκος I/O 8-bit που σημαίνει ότι προσδιορίζονται από καταχωρητή 8-bit. Έτσι η τιμή 0x02 που δίνεται στην εντολή 2 μετατρέποντάς την σε δυαδική μορφή γίνεται 0b00000010 σημαίνει ότι επιλέγεται η θύρα RC1 για την σύνδεσή της ως CE (βλ. Πίνακα 3-6 και Σχήμα 3-19).

Πίνακας 3-6. Αντιστοιχία θύρας και τιμής καταχωρητή σε δυαδική και δεκαεξαδική μορφή.

| Θύρες | Δυαδική τιμή | Δεκαεξαδική τιμή |
|-------|--------------|------------------|
| Rx7 | 0b10000000 | 0x80 |
| Rx6 | 0b01000000 | 0x40 |
| Rx5 | 0b00100000 | 0x20 |
| Rx4 | 0b00010000 | 0x10 |
| Rx3 | 0b00001000 | 0x08 |
| Rx2 | 0b00000100 | 0x04 |
| Rx1 | 0b00000010 | 0x02 |
| Rx0 | 0b00000001 | 0x01 |



Σχήμα 3-19. Απεικόνιση της ομάδας θυρών C καθώς και της επιλογής συγκεκριμένης θύρας που αντιστοιχεί στη τιμή 0x02 [18].

Στη συνέχεια παραθέτονται οι βασικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της λειτουργίας του πομποδέκτη. Με αυτές ο χρήστης μπορεί να αποστείλει, να λάβει δεδομένα καθώς και να επιλέξει την λειτουργία Enhanced ShockBurst™.

Βασικές συναρτήσεις

nrf24l01_initialize_debug()

Αποτελεί βασική συνάρτηση και ουσιαστικά ενεργοποιεί τον πομποδέκτη. Ορίζει την λειτουργία του ως βασικό πομπό ή δέκτη, θέτει το μέγεθος του πακέτου δεδομένων και τέλος ενεργοποιεί την λειτουργία Enhanced ShockBurst™. Η συνάρτηση παίρνει τρία ορίσματα τα οποία ρυθμίζουν ακριβώς τις παραπάνω τρεις λειτουργίες. Για τις υπόλοιπες λειτουργίες ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τη χρήση της συνάρτησης nrf24l01_initialize().

nrf24l01_write_tx_payload()

Εκτελεί τη λειτουργία W_TX_PAYLOAD δηλαδή την αποστολή πακέτου δεδομένων. Και αυτή η συνάρτηση παίρνει τρία ορίσματα. Το πρώτο είναι μορφή χαρακτήρα και είναι το δεδομένο που στέλνεται, το δεύτερο είναι το μήκος του πακέτου αποστολής και τέλος το τρίτο είναι η επιλογή να χρησιμοποιηθεί η nrf24l01_transmit() για την αποστολή.

nrf24l01_read_rx_payload()

Εκτελεί τη λειτουργία W_TX_PAYLOAD δηλαδή την λήψη του πακέτου δεδομένων. Η συνάρτηση παίρνει δύο ορίσματα. Το πρώτο είναι μορφή χαρακτήρα και είναι το δεδομένο που λαμβάνεται και το δεύτερο είναι το μήκος του πακέτου λήψης.

nrf24l01_irq_clear_all()

Με τη συγκεκριμένη εντολή ο χρήστης ουσιαστικά επαναφέρει στην αρχική κατάσταση τον ακροδέκτη IRQ έτσι στο αμέσως επόμενο συμβάν (αποστολή /λήψη) να ενεργοποιηθεί και η interrupt του πομποδέκτη. Γενικά η εντολή χρησιμοποιείται αμέσως μετά την nrf24l01_read_rx_payload() και την nrf24l01_write_tx_payload()

3.3.4 Συμπεράσματα

Ο κύριος σκοπός της κατασκευής της πειραματικής διάταξης είναι η δημιουργία και λειτουργία αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ των πομποδεκτών (βλ. Σχήμα 3-20). Η αμφίδρομη επικοινωνία είναι δυνατή διότι οι πομποδέκτες nrf24l01+ μπορούν μέσω της διαδικασίας του προγραμματισμού τους να μεταβούν από τη λειτουργία πομπού στη λειτουργία δέκτη και το αντίστροφο.

Δημιουργώντας τη συγκεκριμένη αμφίδρομη σύνδεση, σαν πρώτη πειραματική δοκιμή, εκτελείται ένα πρόγραμμα στο οποίο ο χρήστης στέλνει ένα δεδομένο μέσω του προσωπικού υπολογιστή και της σειριακής RS-232 και το επιστρέφει στην οθόνη του υπολογιστή αφού έχει αποσταλεί πρώτα ασύρματα από τον PXT(1) στον PRX(2), στη συνέχεια από τον PRX(2) στον PTX(1) και πίσω στην σειριακή.

Αποστολή

PC-HyperTerminal: Ο χρήστης μέσω του τερματικού HyperTerminal στέλνει έναν χαρακτήρα σε μορφή ASCII από το πληκτρολόγιο του προσωπικού υπολογιστή στη σειριακή RS-232.

RS-232: Η σειριακή αφού πρώτα έχει ρυθμιστεί να λειτουργεί στα 9600 bit ανά δευτερόλεπτο, 8 bit δεδομένων, 1bit διακοπής και χωρίς έλεγχο ροής στέλνει το δεδομένο στον PIC 18f4331 ο οποίος με τη σειρά του μέσω SPI το εισάγει στον πομποδέκτη.

Nrf24l01+(1): Ο πομποδέκτης αφού πρώτα έχει ρυθμιστεί να λειτουργεί ως βασικός πομπός (PXT) στέλνει ασύρματα το δεδομένο (1 byte) στον δέκτη (PRX) και ρυθμίζεται με την αντίστοιχη

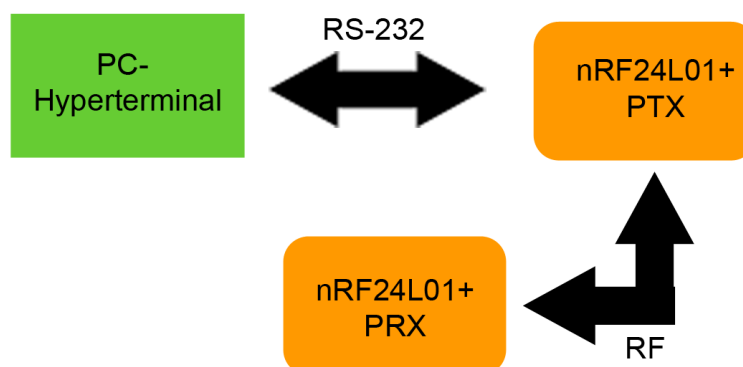
εντολή `nrf24l01_set_as_rx(true)` να μεταβεί από πομπός σε δέκτης.

Λήψη

Nrf24l01+(2): Ο δέκτης με το που λάβει το δεδομένο μεταβαίνει από τη λειτουργία του δέκτη στη λειτουργία του πομπού και αναλαμβάνει να αποστείλει πίσω ασύρματα τον χαρακτήρα που είχε εισάγει ο χρήστης. Έπειτα επανέρχεται στην αρχική του λειτουργία και περιμένει το νέο πακέτο δεδομένων.

Nrf24l01+(1): Με το που λάβει ασύρματα πίσω το δεδομένο το στέλνει μέσω SPI στον PIC ο οποίος αναλαμβάνει μέσω της σειριακής θύρας του να το επιστρέψει πίσω στον υπολογιστή. Στη συνέχεια επιστρέφει στη αρχική του λειτουργία (PTX) και περιμένει νέο δεδομένο από τη σειριακή.

PC-HyperTerminal: Με τη προϋπόθεση ότι η αποστολή/ λήψη έχει λειτουργήσει σωστά, ο χαρακτήρας, που είχε εισάγει αρχικά ο χρήστης στο HyperTerminal, εμφανίζεται στην οθόνη και ολοκληρώνεται η επικοινωνία.



Σχήμα 3-20. Γραφική απεικόνιση της πειραματικής αμφίδρομης επικοινωνίας.

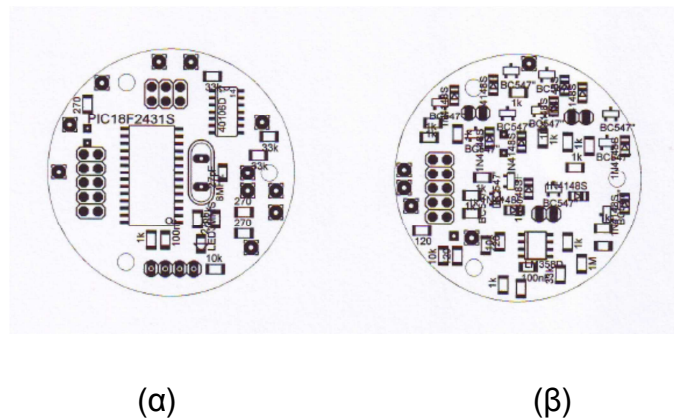
Με αυτόν τον τρόπο έχει πειραματικώς εξασφαλισθεί ότι η ασύρματη πλατφόρμα, τουλάχιστον σε μεγεθυμένη κλίμακα, λειτουργεί και μπορεί να ανταλλάσει δεδομένα ώστε να μπορεί εφαρμοστεί και στο μικρορομπότ.

Μετά την ολοκλήρωση της αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ των δύο μικροεπεξεργαστών στην πειραματική πλατφόρμα των breadboard, στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο επανασχεδιασμός, η υλοποίηση και εφαρμογή νέας πλατφόρμας στο μικρορομπότ.

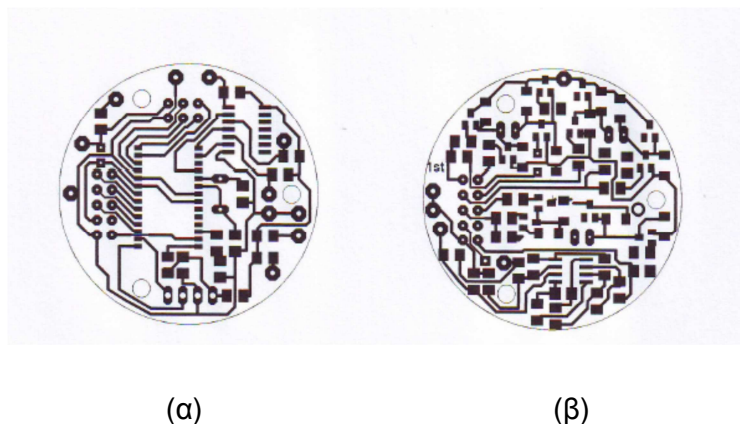
4. Σχεδιασμός και Υλοποίηση Κυκλωμάτων Ρομποτικής Διάταξης

4.1 Εισαγωγή

Η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο αποτελεί μια ολοκληρωμένη μορφή προσομοίωσης της ασύρματης σύνδεσης που θα εφαρμοστεί και στο μικρορομπότ. Το μικρορομπότ, όπως έχει αρχικά αναφερθεί, αποτελείται από την κύρια βάση που φέρει τους φυγοκεντρικούς κινητήρες και τον αισθητήρα δύναμης καθώς και από δύο επίπεδα ηλεκτρονικών. Τα επίπεδα αυτά περιλαμβάνουν την γέφυρα οδήγησης των κινητήρων, τον μικροεπεξεργαστή και τα συνοδευόμενα ηλεκτρονικά του καθώς και κάποια ενσωματωμένα ηλεκτρονικά για την λειτουργία των φωτοτρανζίστορ και του αισθητήρα δύναμης. Όλα αυτά τα ηλεκτρονικά είναι ενσωματωμένα σε κυκλικά τυπωμένα κυκλώματα που έχουν σχεδιαστεί και μελετηθεί σε προηγούμενες εργασίες (βλ. Σχήματα 4-1, 4-2).

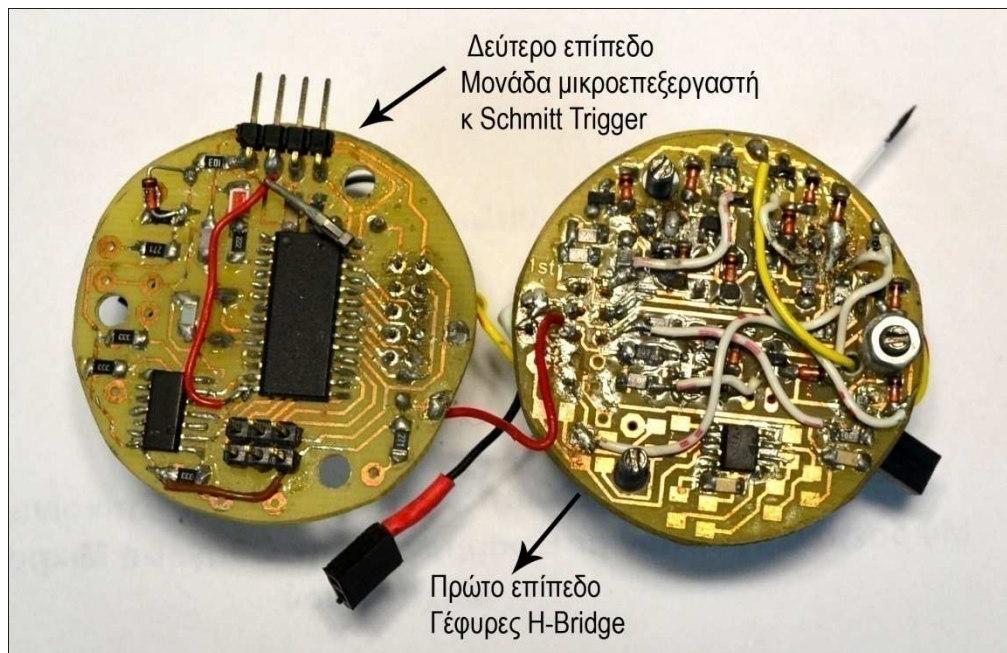


Σχήμα 4-1. Πάνω όψη πλακετών 2^{ου} (α) και 1^{ου} (β) επιπέδου με τοποθέτηση εξαρτημάτων κατά τιμή [16].



Σχήμα 4-2. Κάτω όψη του 2^{ου} (α) και του 1^{ου} (β) επιπέδου ηλεκτρονικών από την πλευρά του χαλκού [16].

Το Σχήμα 4-3 παρουσιάζει την υλοποίηση και την τελική μορφή των δύο επιπέδων ηλεκτρονικών του μικρορομπότ.



Σχήμα 4-3. Φωτογραφική απεικόνιση της υλοποίησης των κυκλωμάτων.

Κατά το σχεδιασμό τους έχει προβλεφτεί και η ενσωμάτωση μιας ασύρματης μονάδας στο μέλλον μέσω της τοποθέτησης ακροδεκτών στο δεύτερο επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα να προστεθεί ένα τρίτο επίπεδο στο οποίο μπορεί να ενσωματωθεί η ασύρματη μονάδα.

Η αρχική ιδέα ήταν να σχεδιαστεί και να τυπωθεί ηλεκτρονικό κύκλωμα για το τρίτο επίπεδο. Ωστόσο επειδή η εκτύπωση κυκλώματος χρειάζεται χρόνο και επιπλέον κόστος, ειδικά άμα κατασκευαστεί εκτός εργαστηρίου και επειδή ένα τρίτο επίπεδο θα αύξανε αρκετά το ύψος του μικρορομπότ αποφασίστηκε η κατασκευή μιας εξειδικευμένης μονάδας με μηδενικό κόστος. Η μονάδα αυτή, σχεδιάστηκε έτσι ώστε να ενσωματώνει τον ασύρματο πομποδέκτη και κατασκευάστηκε από απλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα που βρίσκονται στο εργαστήριο.

Το δεύτερο κομμάτι για την υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ χρήστη και μικρορομπότ απαιτεί το σχεδιασμό και τη κατασκευή της πλατφόρμας του βασικού πομπού, που θα χρησιμοποιηθεί για να στέλνει και να λαμβάνει δεδομένα από και προς το μικρορομπότ. Και σε αυτήν την περίπτωση θα μπορούσε να σχεδιαστεί και να τυπωθεί κύκλωμα με ενσωματωμένο τον πομποδέκτη αλλά επιλέχθηκε η χρήση της δοκιμαστικής πλακέτας της πειραματικής διάταξης του προηγούμενου κεφαλαίου.

4.2 Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ηλεκτρονικού Κυκλώματος του Μικρορομπότ

Για το σχεδιασμό της εξειδικευμένης πλατφόρμας πρέπει να τεθούν τρεις σημαντικοί περιορισμοί-προαπαιτήσεις. Και οι τρεις είναι κατασκευαστικής φύσεως και προκύπτουν από τον τρόπο λειτουργίας και χρήσης του μικρορομπότ.

- **Ύψος πλατφόρμας**

Μετά την εφαρμογή της πλατφόρμας στο μικρορομπότ, το συνολικό του ύψος του δεν πρέπει να αποτελεί εμπόδιο στην κίνηση του μικρορομπότ κάτω από το μικροσκόπιο. Έτσι η κατασκευή της ασύρματης πλατφόρμας πρέπει να έχει όσο μικρότερες διαστάσεις (πλάτος x μήκος x ύψος) γίνεται.

- **Αποσπώμενη πλατφόρμα**

Η ύπαρξη δύο διαφορετικών επιπέδων ηλεκτρονικών για την λειτουργία του μικρορομπότ δίνει τη δυνατότητα, σε περίπτωση βλάβης σε μια από της δύο, να αντικατασταθούν ή και να επισκευαστούν εύκολα χωρίς να χρειάζεται η αντικατάσταση και των δύο. Επιπροσθέτως, για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας των ηλεκτρονικών και ιδιαίτερα του μικροεπεξεργαστή κρίνεται απαραίτητη η χρήση του παλμογράφου για συχνό έλεγχο για τυχόν προβλήματα. Ιδιαίτερα, η μονάδα PWM καθώς και η μονάδα ελέγχου ταχύτητας των κινητήρων μπορεί να ελεγχθεί εύκολα με τη χρήση του ακροδέκτη του παλμογράφου, δυνατότητα που προϋποθέτει την εύκολη πρόσβαση της ακίδας του ακροδέκτη στους ακροδέκτες του μικροεπεξεργαστή. Με αυτό το σκεπτικό θεωρήθηκε καλό η ασύρματη πλατφόρμα που θα σχεδιαστεί και θα υλοποιηθεί να μπορεί να αποσπάται από το κυρίως σώμα του μικρορομπότ αφήνοντας και ελεύθερη την πάνω επιφάνεια του δεύτερου επιπέδου.

- **Αξιόπιστη σύνδεση**

Η λειτουργία κίνησης του μικρορομπότ βασίζεται στην φυγοκεντρική επενέργηση των δύο αντιδιαμετρικών μικροκινητήρων. Η επενέργηση προκαλεί έντονη δόνηση, φαινόμενο το οποίο μπορεί να προκαλέσει φθορά και αστάθεια στις κολλήσεις των ηλεκτρονικών αλλά και στα ίδια τα ηλεκτρονικά. Μια απλή λύση θα ήταν η πλατφόρμα να κολληθεί πάνω στο δεύτερο επίπεδο των ηλεκτρονικών κάτι όμως που θα ήταν αντίθετο με τη δεύτερη απαίτηση του σχεδιασμού της πλατφόρμας. Συνεπώς με κάποιο τρόπο πρέπει όλες οι συνδέσεις να είναι όσο πιο σταθερές και αξιόπιστες γίνεται καθώς και να δίνουν τη δυνατότητα στην πλατφόρμα να αποσπάται από το μικρορομπότ.

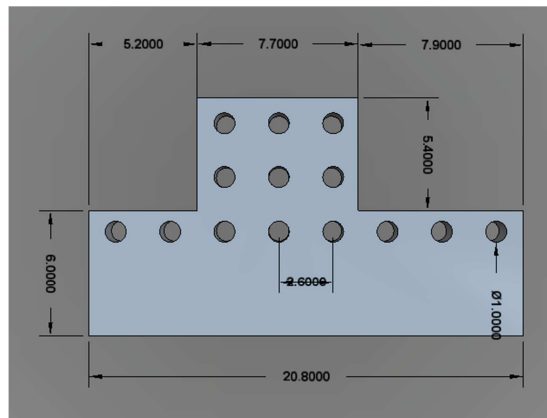
Για την υλοποίηση της ασύρματης πλατφόρμας χρησιμοποιήθηκαν εξαρτήματα και υλικά που βρίσκονται στο εργαστήριο του Αυτόματου Ελέγχου. Τα συγκεκριμένα υλικά και εξαρτήματα μπορεί κάποιος να τα προμηθευτεί σε διάφορα καταστήματα σε πολύ χαμηλή τιμή.

Κατασκευή

Για την κατασκευή της Εξειδικευμένης πλατφόρμας χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά:

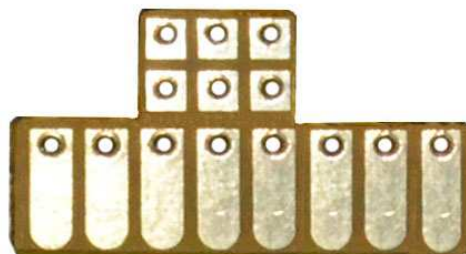
- μία διάτρητη δοκιμαστική πλακέτα
- μία σειρά από pin headers με δεξιά γωνία (8 pins)
- μία σειρά από box headers (3x3)
- καλώδια
- θερμοσυστελλόμενα

Αρχικά σχεδιάστηκε η μορφή της δοκιμαστικής πλακέτας που θα αποτελέσει τη βάση της πλατφόρμας. Η πλακέτα πρέπει αποτελείται από μια εξάδα υποδοχών (3x3) μέσω των οποίων θα συνδεθούν οι ακροδέκτες επέκτασης του 2^{ου} επιπέδου καθώς και μια σειρά 8 υποδοχών για τη σύνδεση του πομποδέκτη Η πλακέτα χρειάστηκε διαμόρφωση και επεξεργασία συμφώνα με το σχέδιο του Σχήματος 4-4.



Σχήμα 4-4. 3D σχέδιο με διαστάσεις της διάτρητης πλακέτας(123D autodesk).

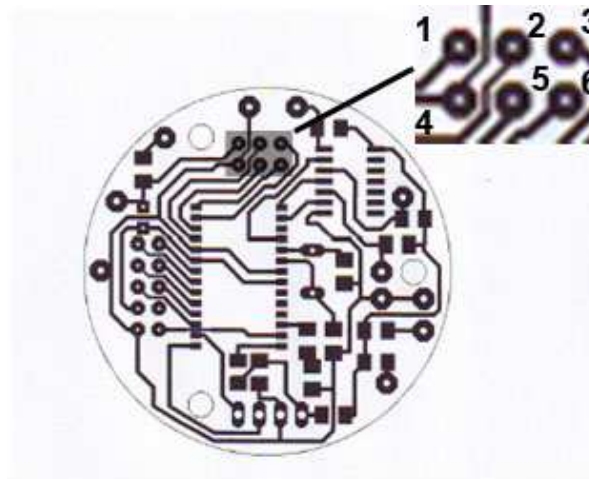
Η διαμόρφωση της πλακέτας έγινε με τη χρήση της πριονοκορδέλλας PROXXON mbs 240/E του εργαστηρίου και η τελική της μορφή παρουσιάζεται με φωτογραφικό στιγμιότυπο στη Σχήμα 4-5.



Σχήμα 4-5. Τελική μορφή της δοκιμαστικής πλακέτας έπειτα από επεξεργασία.

Συνδεσμολογία

Με μια πρώτη προσεκτική εξέταση μπορεί κάποιος να παρατηρήσει ότι οι ακροδέκτες του 2^{ου} επιπέδου που έχουν τοποθετηθεί για μελλοντική επέκταση των ηλεκτρονικών σε 3^ο επίπεδο είναι έξι. Δυο από αυτούς δίνουν την τροφοδοσία των ηλεκτρονικών και οι υπόλοιποι συνδέονται με το μικροεπεξεργαστή.



Σχήμα 4-6. Μεγεθυμένη απεικόνιση και αρίθμηση των ακροδεκτών του 2^{ου} επιπέδου που είναι υπεύθυνοι για την επέκταση των ηλεκτρονικών σε 3^ο επίπεδο.

Κάθε ακροδέκτης αποτελεί επέκταση συγκριμένων ακροδεκτών του μικροεπεξεργαστή:

1.Vdd (Τροφοδοσία των ηλεκτρονικών 5V)

2.RC7/SDO (Ψηφιακή εισοδος-εξοδος του μικροεπεξεργαστή, έξοδος των ψηφιακών δεδομένων της SPI)

3.RC5/SCK (Ψηφιακή εισοδος-εξοδος του μικροεπεξεργαστή, δίνει το χρονισμό στην SPI)

4.Vss (Γείωση των ηλεκτρονικών)

5.RC6 (Ψηφιακή εισοδος-εξοδος του μικροεπεξεργαστή)

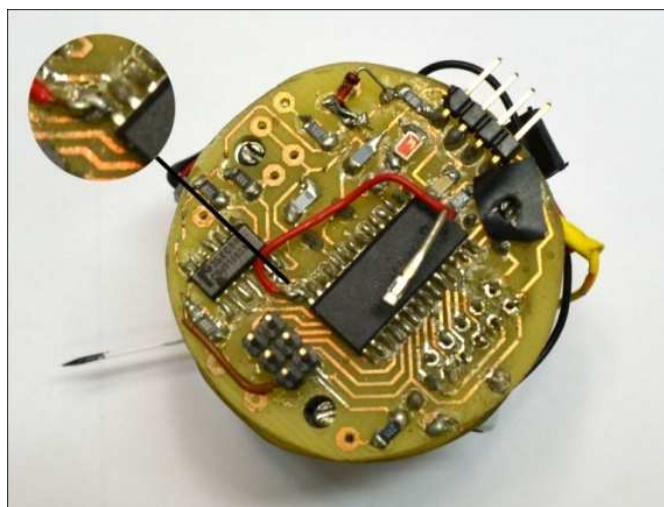
6.RC4/SDI (Ψηφιακή εισοδος-εξοδος του μικροεπεξεργαστή, είσοδος των ψηφιακών δεδομένων της SPI)

Για την σύνδεση και λειτουργία του nrf24l01+ απαιτούνται οκτώ ακροδέκτες (βλ.Κεφ.3.2.1.2), δύο για την τροφοδοσία του (Vdd, Vss), και έξι για τις υπόλοιπες λειτουργίες του (IRQ, MOSI, MISO, SCK, CSN, CE). Συνεπώς θα χρειαστούν

άλλοι δύο ακροδέκτες για τη σύνδεση του πομποδέκτη στο μικρορομπότ. Όσον αφορά τους υπάρχοντες ακροδέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι: 1, 4 (για την τροφοδοσία του πομποδέκτη) και 2, 3, 6 (για την επικοινωνία SPI).

Οι υπόλοιποι ακροδέκτες του nrf24l01+ :

IRQ: Ο συγκεκριμένος ακροδέκτης ελέγχεται από τρεις πηγές interrupt, που σημαίνει ότι θα πρέπει να συνδέεται με μια ψηφιακή είσοδο του μικροεπεξεργαστή. Αυτή η είσοδος θα μπορούσε να ήταν και η RC6, ωστόσο επιλέχθηκε η RC3/INT0 η οποία έχει ενσωματωμένη μονάδα εξωτερικού interrupt με flag bit το INT0IF και μπορεί να παραμετροποιηθεί πιο αποτελεσματικά από μια απλή ψηφιακή είσοδο. Για τη χρήση της εξόδου RC3 δεν υπάρχει ακροδέκτης επέκτασης οπότε επιλέχθηκε να κολληθεί εξωτερικό βύσμα (βλ. Σχήμα 4-7) το οποίο θα συνδέεται απευθείας με την ασύρματη πλατφόρμα (βλ. Σχήμα 4-8).

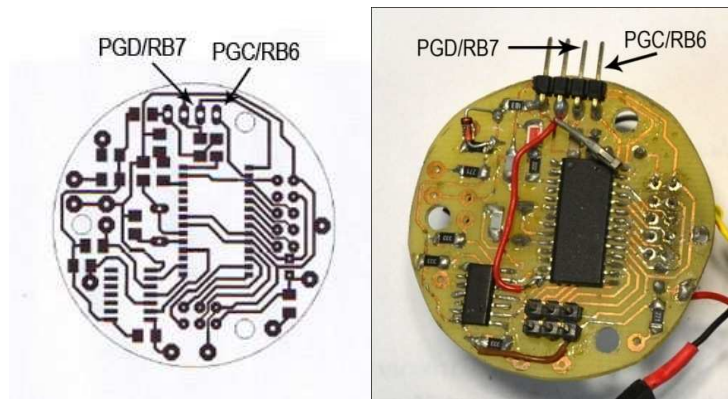


Σχήμα 4-7. Καλώδιο μικρού μήκους με προσαρμοσμένο βύσμα για σύνδεση με το nrf24l01+.

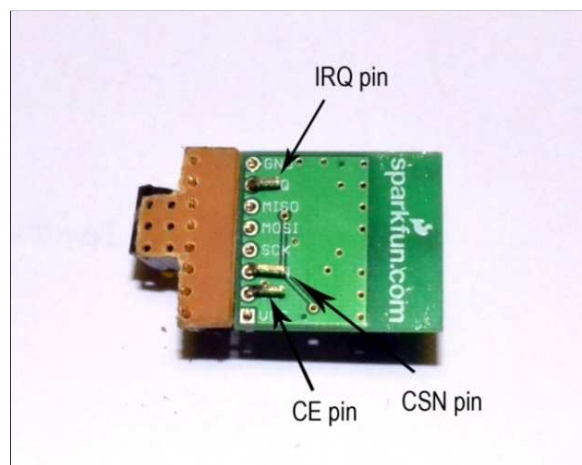
CSN: Ο ακροδέκτης CSN χρησιμοποιείται για την επικοινωνία SPI του μικροεπεξεργαστή με τον πομποδέκτη. Παίρνει λογικές τιμές (0,1) από μια ψηφιακή έξοδο του μικροεπεξεργαστή και αναλόγως την τιμή, ενεργοποιεί και απενεργοποιεί την επικοινωνία μεταξύ PIC και nrf24l01+.

CE: Ο ακροδέκτης αυτός, όπως και ο CSN, παίρνει λογικές τιμές από μια ψηφιακή έξοδο του μικροεπεξεργαστή και μαζί με κάποια άλλα registers (βλ. Κεφ. 3.2.1.1) ρυθμίζουν το mode στο οποίο θα λειτουργήσει το nrf24l01+.

Όπως και ο ακροδέκτης IRQ, έτσι και οι CSN, CE θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν τον ακροδέκτη RC6 του μικροεπεξεργαστή. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν οι ακροδέκτες του In-circuit Serial Programming και πιο συγκεκριμένα οι PGD και PGC, οι οποίες αποτελούν και ψηφιακές εξοδοί (βλ. Σχήματα 4-8, 4-9). Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε επιπλέον κολλήσεις εξωτερικών καλωδίων. Χρησιμοποιώντας μάλιστα και μια καλωδιοταινία με δυο βύσματα στις άκρες τις η σύνδεση γίνεται πολύ απλά και αξιόπιστα.



Σχήμα 4-8. Γραφική και φωτογραφική απεικόνιση των ακροδεκτών PGD και PGC του In-circuit Serial Programming.



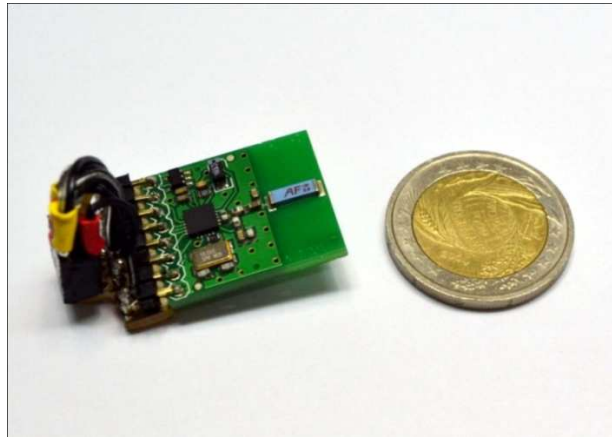
Σχήμα 4-9. Φωτογραφική απεικόνιση της κάτοψης του nrf24l01+.

Η τελική αντιστοίχιση των ακροδεκτών του μικροεπεξεργαστή με τον πομποδέκτη παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1. Αντιστοίχιση των ακροδεκτών του πομποδέκτη με τους ακροδέκτες του μικροεπεξεργαστή.

| nrf24l01+ | | PIC 18f2431 |
|-----------|---|-------------|
| MOSI | → | RC7 |
| MISO | → | RC4 |
| SCK | → | RC5 |
| IRQ | → | RC3 |
| CSN | → | RB6 |
| CE | → | RB5 |

Έπειτα από τις τελικές κολλήσεις καλωδίων και την προσαρμογή θερμοσυστελλόμενων η υλοποιημένη πλατφόρμα μαζί με την καλωδιοταινία έχει βάρος 5 γραμμάρια και μέγιστο ύψος 1,6 cm.



Σχήμα 4-10. Τελική μορφή της αποσπώμενης πλατφόρμας του ασύρματου πομποδέκτη.



Σχήμα 4-11. Η ασύρματη πλατφόρμα συνδεδεμένη με το μικρορομπότ

4.3 Συμπεράσματα

Η επιλογή για το σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας εξειδικευμένης πλατφόρμας για τον πομποδέκτη αποτέλεσε μια αρκετά συμβατή και αποτελεσματική λύση. Η υλοποίησή της αποδείχτηκε πιο οικονομική και λιγότερο χρονοβόρα από αυτής της δημιουργίας 3^{ου} επιπέδου με χρήση τυπωμένου κυκλώματος. Επιπλέον ικανοποιεί και τις τρεις προαπαιτήσεις που τέθηκαν στον αρχικό σχεδιασμό. Πιο συγκεκριμένα η τελική μορφή της πλατφόρμας μπορεί να αποσυνδεθεί πλήρως από το μικρορομπότ, η σύνδεση της είναι αρκετά αξιόπιστη καθώς με την χρήση των pin και box headers η αντοχή των συνδέσεων στη δόνηση αποδείχτηκε πολύ ικανοποιητική και τέλος, αν εξαιρεθεί το σημείο των συνδέσεων (περίπου 10% της συνολικής επιφάνειας της πλατφόρμας) το ύψος έχει κυμανθεί σε πολύ μικρά μεγέθη. Το ελάχιστο ύψος της πλατφόρμας σε 90% της επιφάνειας της είναι 4mm ενώ το μέγιστο 16mm.

5. Υλοποίηση Ασύρματου Ελέγχου του Μικρορομπότ

5.1 Εισαγωγή

Η ασύρματη επικοινωνία ανάμεσα στο χρήστη και στο μικρορομπότ πέρα από το σχεδιασμό και την υλοποίηση της εξειδικευμένης πλατφόρμας που θα προσαρμοστεί το nrf24l01+ προϋποθέτει και τη δημιουργία ενός κατάλληλου πρωτόκολλου επικοινωνίας. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι απαραίτητο για την αποκωδικοποίηση των δεδομένων που στέλνονται ασύρματα. Με λίγα λόγια χωρίς αυτό ο μικροεπεξεργαστής του μικρορομπότ δε θα μπορεί να χρησιμοποιήσει τα δεδομένα που του στέλνει ο χειριστής και να εκτελέσει τις επιθυμητές εντολές.

Πρωτόκολλο επικοινωνίας

Ορισμός :

Πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι ένα σύστημα ψηφιακών δεδομένων από κανόνες και διαμορφώσεις, οι οποίες καθορίζουν την ανταλλαγή των δεδομένων μεταξύ υπολογιστικών και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Για τη διαχείριση της αποστολής και της λήψης των δεδομένων μεταξύ των πομποδεκτών nrf24l01+ η Nordic έχει ενσωματώσει το δικό της πρωτόκολλο επικοινωνίας, Enhanced Shockburst™(βλ.Κεφ.3.2.1.1). Το πρωτόκολλο αυτό ουσιαστικά αναλαμβάνει την μετάδοση των δεδομένων και εξασφαλίζει ότι όλα τα δεδομένα που θα στείλει ο πομπός θα ληφθούν από τον αντίστοιχο δέκτη. Επιπλέον επιτυγχάνει εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση σε συνδυασμό με εξαιρετικές επιδόσεις.

Ωστόσο αυτό το πρωτόκολλο δεν φτάνει από μόνο του ώστε να καταστήσει την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των μικροεπεξεργαστών επιτυχημένη. Πρέπει τα δεδομένα τα οποία θα ληφθούν να αξιολογηθούν ως προς το περιεχόμενό τους. Αυτό γίνεται μέσω ενός συνόλου από κανόνες που ορίζει το πρωτόκολλο και αποτελούν το συντακτικό της επικοινωνίας. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο πρέπει να δημιουργηθεί εξολοκλήρου από την αρχή.

Πακέτα δεδομένων

Όταν ο χειριστής του μικρορομπότ στέλνει τις εντολές ασύρματα, ο μικροεπεξεργαστής αναλαμβάνει να τις μεταφράσει και να κινήσει το μικρορομπότ. Αυτές οι εντολές περιλαμβάνονται σε ένα πακέτο δεδομένων το οποίο έχει την παρακάτω δομή:

Η αποστολή των δεδομένων γίνεται όπως έχει προαναφερθεί, αρχικά, σειριακά στο PTX και έπειτα ασύρματα στον PRX ένα byte τη φορά. Αυτό σημαίνει ότι συνολικά για ένα ολοκληρωμένο πακέτο δεδομένων θα αποσταλούν συνολικά 8 bytes (βλ.Πιν.5-1).

Πίνακας 5-1. Δομή του ολοκληρωμένου πακέτου δεδομένων για τον ασύρματο έλεγχο του μικρορομπότ

| | | | | | |
|--------------------|---------------|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| Κινητήρας 1 | | space | Κινητήρας 2 | | enter |
| Dir 1 | PWM 1 | | Dir 2 | PWM 2 | |
| 8 bit | 16 bit | 8 bit | 8 bit | 16 bit | 8 bit |

Κινητήρας 1:

Το πακέτο Κινητήρας 1 χωρίζεται σε δύο κατώτερα πακέτα το Dir 1 και το PWM 1. Το πρώτο δίνει αρχικά την φορά περιστροφής του κινητήρα και έχει μέγεθος 8 bit. Ο χρήστης μπορεί στέλνοντας τα σύμβολα + και – να δώσει δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη φορά στον κινητήρα 1. Το δεύτερο δίνει το duty cycle, σε ποσοστό επί τις εκατό, του παλμού PWM του κινητήρα 1 και έχει μέγεθος 1-2 bytes ανάλογα με τον αν το ποσοστό του duty cycle είναι διψήφιος ή μονοψήφιος αριθμός (ο τρόπος αποστολής και η μορφή των δεδομένων αναλύονται στη συνέχεια).

space:

Η εντολή έχει μέγεθος 1 byte και διαχωρίζει την εντολή του κινητήρα 1 από αυτήν του κινητήρα 2 έτσι ώστε σε τυχόν αποστολή «άχρηστων» δεδομένων να μπορεί ο μικροεπεξεργαστής να τα διαχωρίσει χωρίς να επηρεαστεί ο χειρισμός των δύο κινητήρων.

Κινητήρας 2:

Το πακέτο είναι όμοιο με τον Κινητήρας 1 καθώς και αυτό έχει μέγεθος 2-3 bytes και δίνει την φορά περιστροφής καθώς και το duty cycle του παλμού PWM του κινητήρα 2.

enter:

Η εντολή αυτή δίνεται όταν η αποστολή και των δύο πακέτων δεδομένων που έχουν να κάνουν με τους δύο κινητήρες, Κινητήρας 1 και Κινητήρας 2, έχει ολοκληρωθεί. Αποτελεί το βασικό κριτήριο για το μικροεπεξεργαστή έτσι ώστε να δώσει την τελική εντολή με την οποία θα οδηγηθούν οι δύο κινητήρες.

Και τα τέσσερα πακέτα δεδομένων δίνονται σε χαρακτήρες ASCII. Οι εντολές space και enter αποτελούν κώδικες ελέγχου της ASCII και εισάγονται είτε από το πληκτρολόγιο πατώντας το space και το enter του πληκτρολογίου είτε μέσω των αντίστοιχων εντολών της γλώσσας c.

Η ASCII (American Standard Code for Information Interchange) έχει αναπτυχθεί από το 1960 ως ένας βασικός 7-bit κώδικας για αναγνωρίζονται

γράμματα, αριθμοί, σύμβολα και ειδικοί χαρακτήρες στην αγγλική γλώσσα. Ο ASCII κώδικας περιλαμβάνει 128 χαρακτήρες, από το 0 έως το 127^{οι} οποίοι μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω υποκατηγορίες:

0-31,127: κώδικες ελέγχου (null, backspace κτλ)

32-47, 58-64,81-86,123-126: Σημεία στίξης, μαθηματικά (και άλλα) σύμβολα

65-80: Κεφαλαία γράμματα από το A μέχρι το Z

87-122: Μικρά γράμματα από το a μέχρι το z

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο Πίνακας 5-2 δείχνει αναλυτικά τις τιμές που παίρνει η κάθε εντολή σε ASCII καθώς και η αντίστοιχη τιμή τους σε δεκαδική και δεκαεξαδική μορφή.

Πίνακας 5-2. Αντιστοιχία των ASCII χαρακτήρων των εντολών που δίνει ο χρήστης με την δεκαδική και δεκαεξαδική μορφή τους.

| Δεδομένα | Τιμές ASCII* | Δεκαδικές | Δεκαεξαδικές |
|----------|-------------------|-----------|--------------|
| Dir 1 | +,- | 43,45 | 0x2B,0x2D |
| PWM 1 | 0-99 | 48-57 | 0x(30-39) |
| PWM 2 | 0-99 | 48-57 | 0x(30-39) |
| Space | (space) | 32 | 0x20 |
| Enter | (carriage return) | 13 | 0xD |

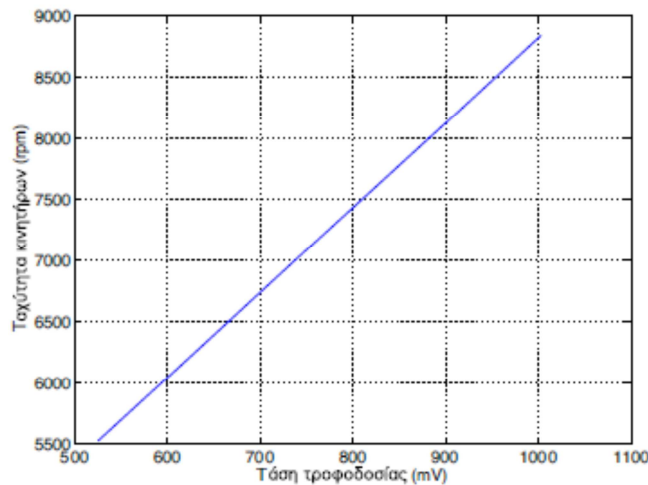
Ο χρήστης μπορεί να στέλνει την επιθυμητή τιμή duty cycle η οποία μέσω της γέφυρας H-bridge μεταφράζεται σε τιμή τάσης ανάλογης του ποσοστού duty cycle.

$$V_{motor} = V_{DC} * dc\% \quad (5-1)$$

Μάλιστα η μοντελοποίηση των κινητήρων [13] έχει δείξει ότι η ταχύτητά τους είναι γραμμικά ανάλογη της τάσης τροφοδοσίας τους. Το manual του κινητήρα δίνει ως μέγιστη ταχύτητα, στην ονομαστική τάση τροφοδοσίας 1.5 V, 10000 RPM στα 130 mA. Αυτό το χαρακτηριστικό του κινητήρα δίνει τη δυνατότητα να μπορεί ο χρήστης να δίνει το ποσοστό duty cycle και να το μεταφράζει σε rpm αναλογικά. Λόγω της μεγάλης τιμής της ταχύτητας το σφάλμα της μετατροπής αυτής είναι εξαιρετικά μικρό. Έτσι, στέλνοντας μια τιμή duty cycle σε ASCII μπορεί ο

* οι τιμές όταν είναι διψήφιος (>9) στέλνονται σαν δύο μονοψήφιος τιμές ASCII (0-9)

μικροεπεξεργαστής σχετικά πολύ απλά να την αντιστοιχίζει σε RPM. Βασιζόμενη σε αυτή την παρατήρηση, η σύνταξη του πρωτοκόλλου επικοινωνίας είναι σχετικά απλή και εύκολα επεξεργάσιμη.



Σχήμα 5-1. Ταχύτητα κινητήρα συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας του [13].

5.2 Επικοινωνία Χρήστη-Μικρορομπότ

5.2.1 Γενικά

Οι μικροεπεξεργαστές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία προσφέρουν ενισχυμένη μονάδα USART (Universal synchronous asynchronous receiver/ transmitter). Η μονάδα αυτή υποστηρίζει τρεις τύπους σειριακής επικοινωνίας, RS-232, RS-485, LIN/J2602. Το χαρακτηριστικό αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επικοινωνεί με τον μικροεπεξεργαστή με οποιαδήποτε ηλεκτρονική συσκευή ή διάταξη που περιλαμβάνει θύρα σειριακής επικοινωνίας καθώς και τα απαιτούμενα ηλεκτρονικά που την υποστηρίζουν.

Στο αρχικό πειραματικό στάδιο της λειτουργίας του μικρορομπότ, ο έλεγχος του από τον χρήστη γινόταν ενσύρματα με τη χρήση μιας εξωτερικής πλατφόρμας. Η πλατφόρμα περιλάμβανε έναν μικροεπεξεργαστή, μια διάταξη με το ενσωματωμένο κύκλωμα MAX-232, για τη λειτουργία της σειριακής, και μίας γέφυρας, αρχιτεκτονικής H-Bridge, για την οδήγηση των κινητήρων. Η τάση που έδινε η γέφυρα στους κινητήρες δίνονταν μέσω πηνιοσύρματος. Οι εντολές στέλνονταν από τη σειριακή θύρα ενός υπολογιστή. Είτε μέσω ενός κοινού προσωπικού υπολογιστή είτε ενός υπολογιστικού συστήματος PC-104, από τη στιγμή στην οποία είχαν ενσωματωμένη σειριακή θύρα, ο χρήστης μπορούσε να επικοινωνήσει με το μικρορομπότ μέσω του εξωτερικού μικροεπεξεργαστή. Ο μικροεπεξεργαστής, έχοντας ενσωματωμένη τη μονάδα USART, λάμβανε τα δεδομένα από τον υπολογιστή και έπειτα ενσύρματα, έστελνε τους επιθυμητούς παλμούς PWM κατευθείαν στη γέφυρα και κατά επέκταση στους κινητήρες του μικρορομπότ.

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιείται μία εκδοχή του μικρορομπότ στην οποία όλα τα ηλεκτρονικά είναι ενσωματωμένα πάνω στο κύριο σώμα του. Έτσι με την προσαρμογή ενός ασύρματου πομποδέκτη, στην περίπτωση μας του nrf24l01+, καθώς και την κατασκευή μίας πλατφόρμας που φέρει τον δεύτερο πομποδέκτη και συνδέεται με τον υπολογιστή μπορεί πια ο χρήστης να ελέγξει το μικρορομπότ ασύρματα.

Είτε ασύρματα είτε ενσύρματα, ο έλεγχος θέσης του μικρορομπότ μπορεί να γίνει με ανοιχτό αλλά και με κλειστό βρόχο. Με ανοιχτό βρόχο έχει υλοποιηθεί πειραματικά με διάφορους τρόπους στα πλαίσια και της διδακτορικής εργασίας του Δρ. Π. Βαρθολομαίου [13] αλλά και της μεταπτυχιακής του Κ. Μουγιάκου [16]. Και οι δύο εργασίες εκμεταλλεύτηκαν πλήρως τη δυνατότητα που τους έδινε ο μικροεπεξεργαστής για επικοινωνία μέσω σειριακής θύρας με υπολογιστή. Σαν πρώτη εφαρμογή αναπτύχθηκε ένα στοιχειώδες interface το οποίο υλοποιήθηκε με τη χρήση φόρμας με Visual Basic. Στη συνέχεια συγκροτήθηκε πρωτόκολλο εντολών ανάμεσα στον Η/Υ και τον μικροεπεξεργαστή για την επίτευξη απλών κινήσεων του ρομπότ. Σαν δεύτερη εφαρμογή, πιο σύνθετη, χρησιμοποιήθηκε ο απτικός μηχανισμός του εργαστηρίου οποίος αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Δρ. Κ. Βλάχου [7], [15], [17].

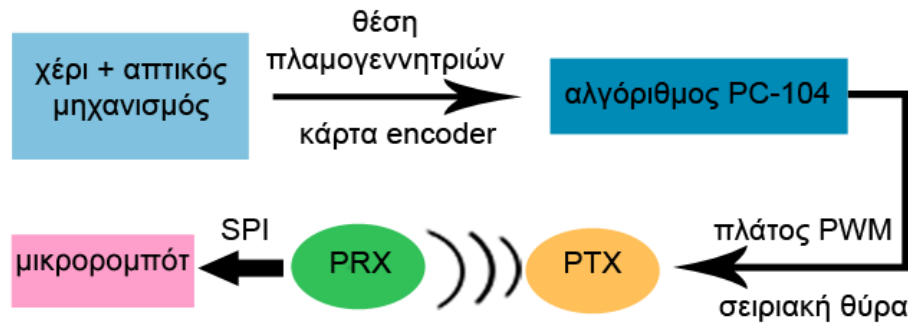
Από την άλλη πλευρά, έλεγχος κλειστού βρόχου δεν είχε υλοποιηθεί στις προηγούμενες εργασίες πάνω στην κίνηση του μικρορομπότ. Αυτό που είχε επιτευχθεί ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ελεγκτή ο οποίος περιλαμβάνει εσωτερικό βρόχο για τον έλεγχο ταχύτητας των επενεργειών.

Στην παρούσα εργασία θα εφαρμοστούν και τα δύο είδη ελέγχου στα οποία θα δοκιμασθεί η ασύρματη λειτουργία της πλατφόρμας που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για το μικρορομπότ. Για τον ανοιχτό βρόχο θα χρησιμοποιηθεί ο απτικός μηχανισμός του εργαστηρίου, για τον χειρισμό του μικρορομπότ και το PC-104 για την εισαγωγή των δεδομένων. Στον κλειστό βρόχο θα γίνει έλεγχος θέσης με επεξεργασία της εικόνας που θα λαμβάνει κάμερα προσαρμοσμένη σε μικροσκόπιο. Ο έλεγχος θα τρέχει εξωτερικά σε περιβάλλον matlab σε Η/Υ. Και στις δύο εφαρμογές τα πακέτα δεδομένων θα στέλνονται μέσω σειριακής στην πλατφόρμα που έχει ενσωματωμένο τον πομποδέκτη που χρησιμοποιείται ως RTX και με τη σειρά της θα τα στέλνει ασύρματα στο μικρορομπότ.

5.2.2 Επικοινωνία Απτικού Μηχανισμού-Μικρορομπότ

Ο απτικός μηχανισμός του εργαστηρίου του Αυτόματου Έλεγχου αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της Δρ Κ. Βλάχου και αποτελεί έναν εξομοιωτή ουρολογικών επεμβάσεων ο οποίος μπορεί και αναπαράγει ασθενείς δυνάμεις. Η εκτέλεση του λογισμικού που χειρίζεται τον μηχανισμό γίνεται σε δύο διαφορετικά συστήματα. Το λογισμικό που ελέγχει τους κινητήρες, διαβάζει τη θέση του απτικού μηχανισμού και ενημερώνει το εικονικό μοντέλο ιστών του εξομοιωτή για τη θέση και την ταχύτητα του εξομοιωτή εκτελείται σε έναν πύργο καρτών ενσωματωμένου ελέγχου PC104. Στο συγκεκριμένο υπολογιστικό σύστημα τρέχει το λειτουργικό πραγματικού χρόνου QNX. Το PC104 προσφέρει σειριακή πόρτα η οποία χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μικρορομπότ-απτικού μηχανισμού. Μέσω αυτής μπορεί ο χρήστης χρησιμοποιώντας τον απτικό μηχανισμό να ελέγχει το μικρορομπότ στέλνοντας τιμές PWM σε πραγματικό χρόνο(βλ. Σχήμα 5-2).

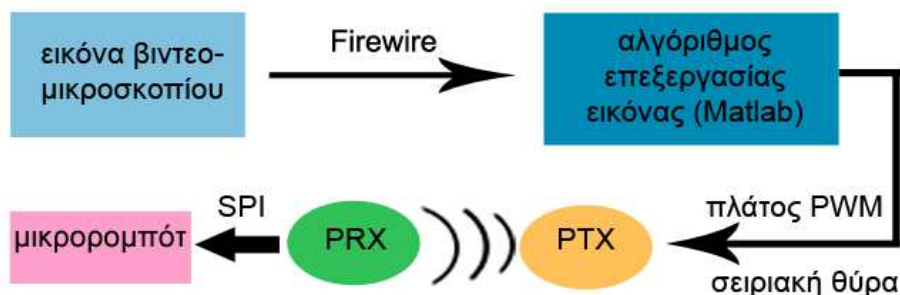
Η μορφή των εντολών PWM, που αποστέλλονται μέσω της σειριακής, περιγράφονται αναλυτικά στο 5.1. Ο χρήστης, όπως σε έναν οποιοδήποτε Η/Υ που φέρει σειριακή θύρα, έτσι και στο PC104 μπορεί να ρυθμίσει την ταχύτητα σύνδεσης (110-921600 bps), τον αριθμό bit των δεδομένων (5-8 bit), τα bits διακοπής καθώς και τον έλεγχο ροής.



Σχήμα 5-2. Το μοντέλο του συστήματος του απτικού τηλεχειρισμού του μικρορομπότ.

5.2.3 Επικοινωνία Η/Υ(Matlab)-Μικρορομπότ

Στον έλεγχο θέσης κλειστού βρόχου, όπως προαναφέρθηκε, θα χρησιμοποιηθεί επεξεργασία εικόνας που λαμβάνεται από βίντεο-μικροσκόπιο και θα εκτελείται σε περιβάλλον Matlab σε Η/Υ. Σε αυτήν την περίπτωση ο χρήστης μέσω της Matlab και χρησιμοποιώντας συναρτήσεις και απλό προγραμματισμό εκτελεί διάφορες λειτουργίες για τον έλεγχο του μικρορομπότ από τον Η/Υ. Πιο συγκεκριμένα παραμετροποιεί τη λειτουργία της σειριακής θύρας του Η/Υ και στη συνέχεια, μέσω του αλγορίθμου που έχει γραφτεί σε Matlab για τον έλεγχο θέσης, στέλνει τις τιμές PWM στο μικρορομπότ (βλ. Σχήμα 5-3). Η διαμόρφωση του πακέτου δεδομένων είναι ίδια με αυτήν του Πίνακα 5-1.



Σχήμα 5-3. Το μοντέλο του συστήματος ελέγχου θέσης του μικρορομπότ μέσω βίντεο-μικροσκοπίου

6. Διεξαγωγή Πειραμάτων

6.1 Γενικά

Σε κάθε εργαστηριακή έρευνα στην οποία αναπτύσσεται ένα θεωρητικό μοντέλο είναι απαραίτητη η επαλήθευσή του με τη διεξαγωγή σειράς πειραμάτων. Το μικρορομπότ αποτελεί το βασικό στοιχείο στην διαδικασία της επαλήθευσης. Σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε για να εκτελεί βασικές κινήσεις που επιβεβαιώνουν την θεωρία. Για τη χρήση και τον έλεγχο του ωστόσο πρέπει να εγκατασταθεί ένα είδος επικοινωνίας μεταξύ του χρήστη και του μικρορομπότ.

Στα αρχικά πειραματικά στάδια το μικρορομπότ ελέγχθηκε και μέσω της επικοινωνίας απτικού μηχανισμού-μικρορομπότ αλλά και μέσω της Η/Υ (PC104)-μικρορομπότ. Και στις δύο εφαρμογές ο μικροεπεξεργαστής και η γέφυρα οδήγησης των κινητήρων ήταν εγκατεστημένα σε εξωτερική πλατφόρμα και η διεπαφή ανάμεσα στη ρομποτική πλατφόρμα και την εξωτερική γίνονταν ενσύρματα με χρήση πηνιοσύρματος. Γενικά, ενώ τα πειράματα επαλήθευσαν όλα τα θεωρητικά μοντέλα που καταστρώθηκαν κατά τη φάση της ανάλυσης και του σχεδιασμού [13], έδειξαν ότι με ανοιχτό βρόχο η κίνηση του ρομπότ παρουσίαζε σφάλματα τα οποία δεν επέτρεπαν την επίτευξη επιθυμητής κίνησης με μεγάλη ακρίβεια. Σε αυτό συνέβαλλε σημαντικά και η χρήση πηνιοσύρματος το οποίο όπως έχει προαναφερθεί ανέπτυξε τάσεις που διατάρασαν την ομαλή κίνηση του ρομπότ.

Η παρούσα εργασία στα πειράματα που διεξάγονται:

χρησιμοποιεί:

- την ενσωματωμένη (on-board) πλατφόρμα των ηλεκτρονικών αντί για την εξωτερική (off board).

αντικαθιστά:

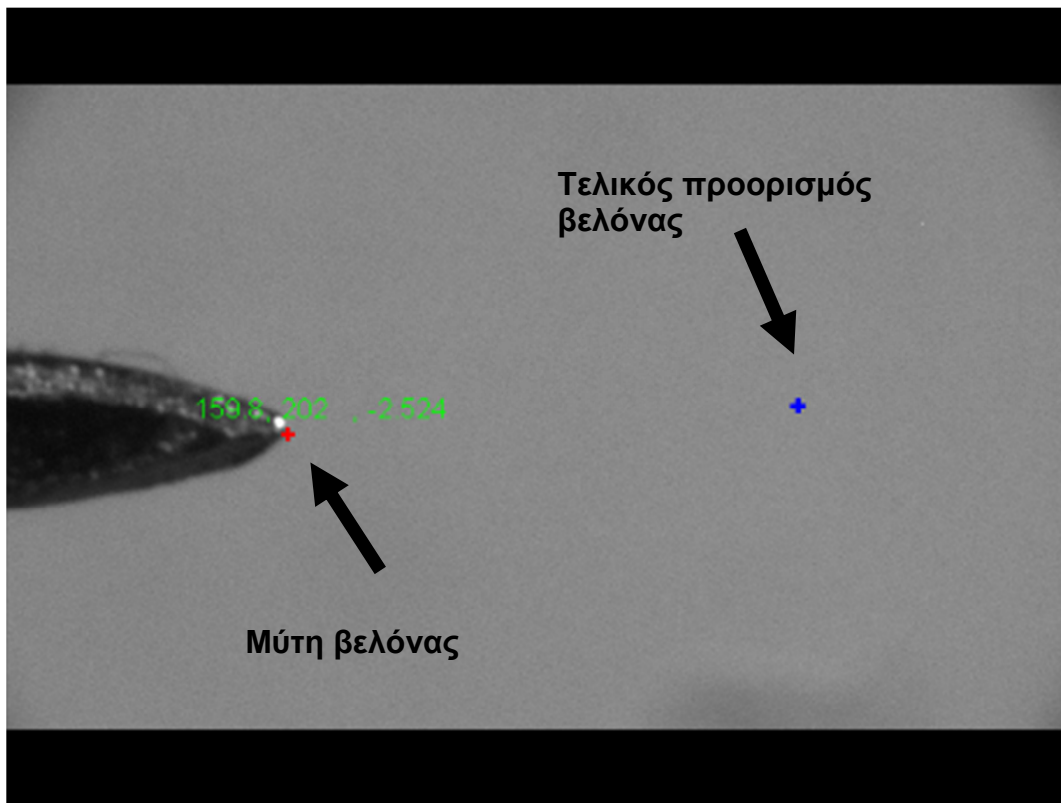
- την ενσύρματη επικοινωνία που έχει υλοποιηθεί με το πηνιόσυρμα, με την ασύρματη με χρήση των πομποδεκτών nrf24l01+

Με αυτές τις δύο αλλαγές γίνεται μια σημαντική προσπάθεια στην εξάλειψη των παραγόντων που αλλοιώνουν την κίνηση του μικρορομπότ. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων και την ανάλυση της κίνησης ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία. Η καταγραφή της κίνησης και ανάλυση της θέσης της γίνεται μέσω βίντεο-μικροσκοπίου. Μια κάμερα προσαρμοσμένη στο μικροσκόπιο καταγράφει την κίνηση μίας ιατρικής βελόνας που είναι πακτωμένη στο μικρορομπότ. Στη συνέχεια τα δεδομένα στέλνονται από την κάμερα στον Η/Υ και στη συνέχεια εισάγονται στο πρόγραμμα που έχει αναπτυχθεί στη Matlab. Το πρόγραμμα αναλαμβάνει την καταγραφή της κίνησης του μικρορομπότ με την αποτύπωσή της σε έξι διαγράμματα.

Πίνακας 6-1. Αναλυτική παρουσίαση των διαγραμμάτων.

| Διαγράμματα | X (τετμημένη) | Ψ (τεταγμένη) |
|-------------|-------------------------------|------------------------|
| Διαγ.1 | θέση ως προς X (pixel) | χρόνος (second) |
| Διαγ.2 | θέση ως προς Ψ (pixel) | χρόνος (second) |
| Διαγ.3 | προσ/λισμος βελόνας (degrees) | χρόνος (second) |
| Διαγ.4 | θέση ως προς X(pixel) | θέση ως προς Ψ (pixel) |
| Διαγ.5 | έξοδος PWM | χρόνος (second) |
| Διαγ.6 | χρόνος βρόχου (second) | frames |

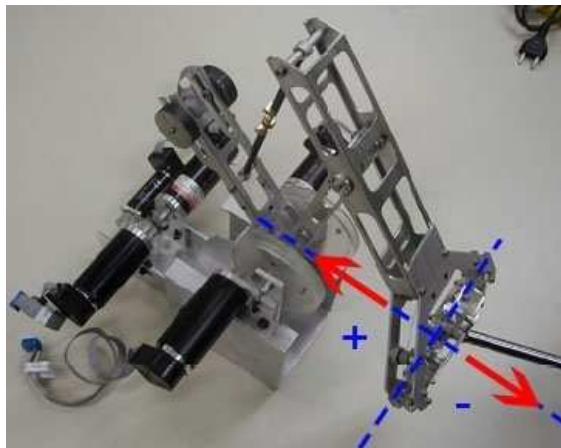
Παράλληλα με τα διαγράμματα, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να καταγράψει και να αποθηκεύσει το βίντεο του πειράματος και να το επεξεργαστεί μετέπειτα. Και στα δύο είδη ελέγχου στόχος των πειραμάτων είναι η μύτη της μεταλλικής βελόνας να κινηθεί ευθύγραμμα προς το σημείο που έχει ορισθεί από τον χρήστη και να σταματήσει όταν συμπέσει η μύτη με το σημείο (βλ. Σχήμα 6-1). Με τα συγκεκριμένα πειράματα θα δοκιμασθούν οι δυνατότητες της ασύρματης επικοινωνίας ενώ παράλληλα θα επιβεβαιωθεί η βελτίωση της κίνησης του μικρορομπότ με την αντικατάσταση της ενσύρματης επικοινωνίας με την ασύρματη.



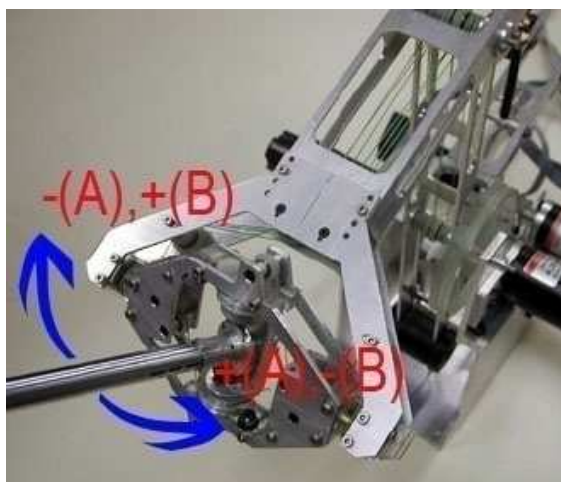
Σχήμα 6-1. Φωτογραφικό στιγμιότυπο της διεξαγωγής του πειράματος.

6.2 Έλεγχος Ανοιχτού Βρόχου με Ασύρματη Αποστολή Δεδομένων

Ο έλεγχος ανοιχτού βρόχου υλοποιείται με την χρήση του αππικού μηχανισμού του εργαστηρίου. Ο χρήστης χρησιμοποιώντας 2 μεταφορικές κινήσεις του μηχανισμού (μπροστά- πίσω) καθώς και τη στροφική κίνηση του κεντρικού μοχλού της σφαιρικής άρθρωσης (αριστερά- δεξιά) μπορεί να αυξομειώνει ταυτόχρονα τις τιμές του πλάτους PWM των δύο κινητήρων. Όταν χρησιμοποιείται μόνο η μεταφορική κίνηση τότε οι τιμές PWM των δύο κινητήρων αυξομειώνονται με το ίδιο πλάτος (βλ. Σχήμα 6-2). Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μόνο η στροφική κίνηση του κεντρικού μοχλού αυξομειώνει κάθε φορά το πλάτος PWM του ενός κινητήρα ενώ την ίδια στιγμή γίνεται το ίδιο και στο πλάτος PWM του άλλου κινητήρα αλλά αντίστροφα (βλ. Πίνακα 6-1), ανάλογα με ποια φορά στρέφεται (βλ. Σχήμα 6-3). Αριστερόστροφα αυξάνεται το πλάτος PWM του αριστερού κινητήρα του μικρορομπότ, ενώ δεξιόστροφα του δεξιού. Τέλος υπάρχει και η συνδυαστική κίνηση με την οποία ο χρήστης χρησιμοποιώντας και τα δύο είδη κινήσεων του μηχανισμού μπορεί και ελέγχει σε πραγματικό χρόνο και τους δύο κινητήρες επιτυγχάνοντας τον έλεγχο του κάθε κινητήρα ξεχωριστά.



Σχήμα 6-2. Μεταφορική κίνηση του μοχλού



Σχήμα 6-3. Στροφική κίνηση του κεντρικού μοχλού

Η κίνηση του αππικού μηχανισμού μέσω του αλγορίθμου που τρέχει στο περιβάλλον QNX και είναι φορτωμένο στο PC104, μεταφράζεται σε πλάτος PWM για κάθε ένα από τους δύο κινητήρες. Αναλόγως με τη θέση του μοχλού το πλάτος αυτό μπορεί να είναι θετικό, αρνητικό ή και αρνητικό για τον έναν κινητήρα και θετικό για τον άλλον. Στην πρώτη περίπτωση οι κινητήρες στρέφονται με τη φορά που προκαλεί την εμπρόσθια κίνηση του μικρορομπότ, στη δεύτερη με τη φορά της οπίσθιας κίνησης και στη τελευταία το μικρορομπότ κάνει περιστροφική κίνηση. Το πλάτος δίνεται σε ποσοστό επί τις εκατό duty cycle και σε κλίμακα από 0 έως +99 και από 0 έως -99.

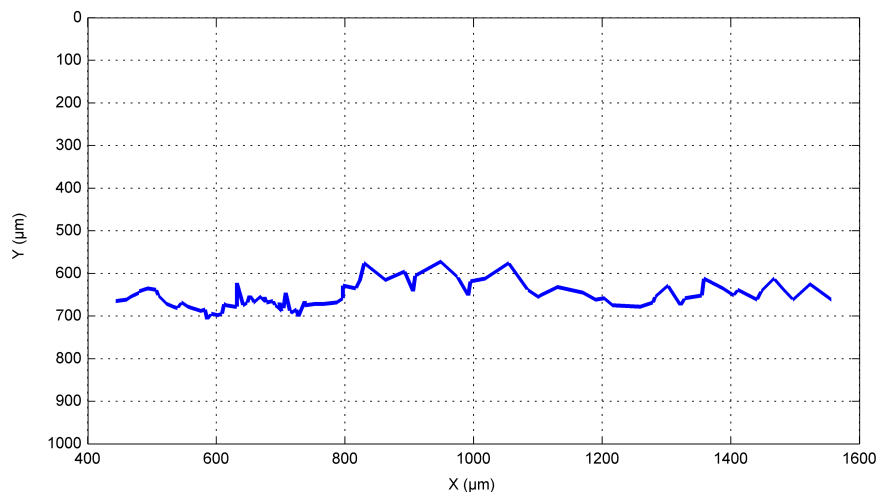
Η αποστολή αυτών τιμών γίνεται αρχικά σειριακά στον PTX και στη συνέχεια ασύρματα μέσω των nrf24l01+ στον PRX, ο οποίος είναι το ίδιο ο μικρορομπότ. Κάθε ολοκληρωμένη αποστολή τερματίζει με την αποστολή του return. Ο χρήστης πέρα από την παραμετροποίηση του πακέτου δεδομένων μπορεί να παραμετροποιήσει και τη σειριακή σύνδεση του PC104 με τον PTX ρυθμίζοντας και τον ρυθμό αποστολής των πακέτων. Στην σειρά των πειραμάτων που εκτελέστηκαν επιλέχθηκε η αποστολή των πακέτων να γίνεται κάθε 0,1 s. Για να επιτευχθεί η ορθή αποστολή των δεδομένων πρέπει να ελεγχτεί ότι η ταχύτητα της σειριακής καθώς και της ασύρματης σύνδεσης μπορεί να λειτουργήσει σε ταχύτητες τέτοιες που να μπορεί να ολοκληρωθεί η αποστολή και λήψη ολόκληρου του πακέτου σε 0,1 s.

Για τα συγκεκριμένα πειράματα η ταχύτητα της σειριακής ρυθμίστηκε στα 9600bps. Η ταχύτητα αυτή είναι ικανοποιητική καθώς τα πακέτα δεδομένων έχουν συνολικό μέγεθος 64 bits τα οποία πρέπει να στέλνονται κάθε 0,1s. Έτσι κάθε δευτερόλεπτο πρέπει η σειριακή να μπορεί να στέλνει συνολικά 640 bits μέγεθος αρκετά μικρότερο από την επιλεγμένη ταχύτητα. Όσον αφορά την ασύρματη επικοινωνία, η ταχύτητά της είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτής της σειριακής, συνεπώς μπορεί να αποστείλει όλα τα δεδομένα στο επιθυμητό χρονικά διάστημα.

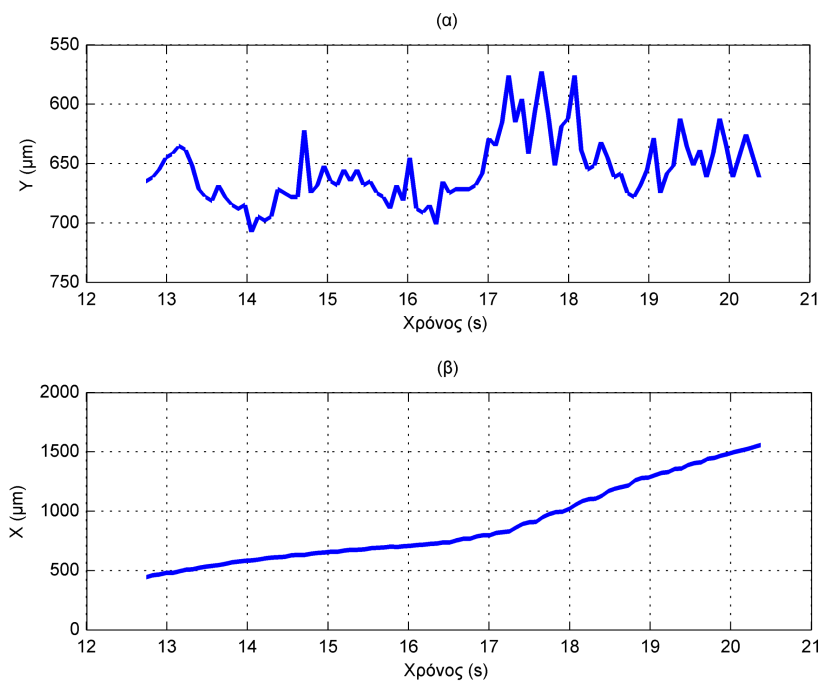
Πρωταρχικός στόχος του πειράματος είναι να συμπέσει η άκρη της βελόνας στο επιλεγμένο από το χρήστη σημείο στο χώρο. Η κίνηση που πρέπει να εκτελέσει η βελόνα πρέπει να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα την γραμμική. Ο χειρισμός του μικρορομπότ γίνεται ασύρματα, χρησιμοποιώντας τον αππικό μηχανισμό και παρακολουθώντας το βίντεο που προβάλλεται σε πραγματικό χρόνο στην οθόνη του PC.

Κρίνοντας από τα αποτελέσματα του πειράματος (βλ. Σχήματα 6-4, 6-5) και συγκρίνοντάς τα με αυτά παλαιότερων ερευνών [13], συμπεραίνεται ότι το σφάλμα της παρασιτικής κίνησης στον άξονα Y παραμένει στα 30 μm , μέγεθος το οποίο είχε καταγραφεί και στα αρχικά πειράματα, ενώ η κίνηση στον άξονα X εμφανίζει την επιθυμητή γραμμικότητα. Αυτό το σφάλμα εξακολουθεί να επηρεάζει την κίνηση και μαζί με την ασύγχρονη ταχύτητα των κινητήρων και την ασύμμετρη κατασκευή του μικρορομπότ δεν επιτρέπει την μεγίστη δυνατή ακρίβεια στην οδήγησή του. Η έντονη παρασιτική συμπεριφορά που παρατηρείται από τα 17,5 δευτερόλεπτα μέχρι τα 18,5 δευτερόλεπτα είναι αποτέλεσμα μίας μικροδιόρθωσης στη κίνηση του μικρορομπότ από τον χρήστη μέσω του αππικού μηχανισμού. Αυτή η μικροδιόρθωση είχε ως σκοπό την επαναφορά της βελόνας στη νοητή οριζόντια ευθεία που ορίζει το τελικό σημείο. Για την αλλαγή αυτήν έπρεπε να η βελόνα να κινηθεί ελαφρά διαγώνια προς τα πάνω. Δεδομένου ότι για τη σχετικά ευθεία κίνηση του μικρορομπότ χρειάζεται να σταλεί εντολή PWM 50% d.c. για τον

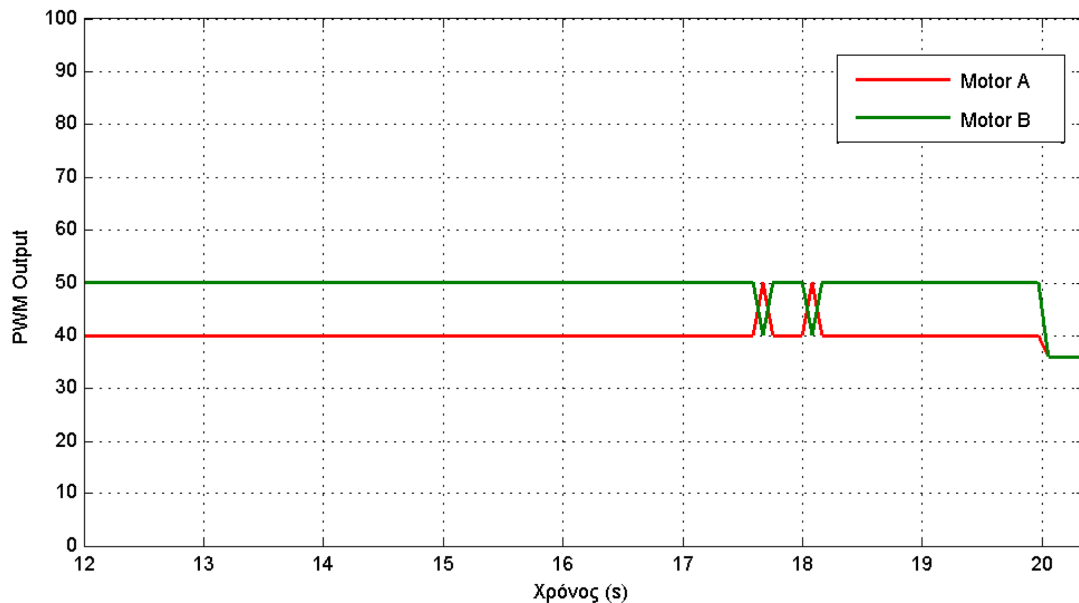
αριστερό κινητήρα και 40% d.c. για το δεξί, για τη διαγώνια κίνηση οι τιμές αυτές έπρεπε να αλλάξουν. Επιλέχθηκε να δοθούν οι αντίστροφες ώστε το μικρορομπότ να αρχίσει να κινείται προς τα αριστερά. Η αλλαγή αυτή όπως και έχει αποτυπωθεί στα Σχήματα 6-5 (β) και 6-6 είναι αρκετά έντονη με αποτέλεσμα να παρουσιαστεί και έντονη παρασιτική συμπεριφορά με σφάλμα. Στη συνέχεια με το που η βελόνα συμπέσει στη νοητή ευθεία οι τιμές PWM επαναφέρονται στις αρχικές με τον απτικό μηχανισμό.



Σχήμα 6-4. Γραφική απεικόνιση της δισδιάστατης κίνησης της βελόνας στους άξονες X,Y.



Σχήμα 6-5. Γραφική απεικόνιση της κίνησης της βελόνας στον άξονα X(α) και Y(β) αντίστοιχα συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 6-6. Γραφική απεικόνιση των τιμών PWM που στέλνονται στους κινητήρες κατά τη διάρκεια του πειράματος.

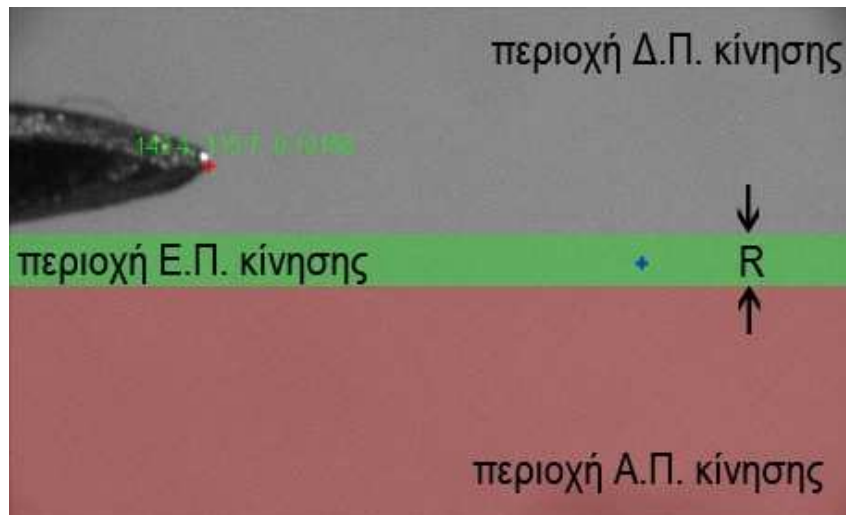
6.3 Έλεγχος Κλειστού Βρόχου με Ασύρματη Αποστολή Δεδομένων

Ο έλεγχος κλειστού βρόχου υλοποιείται μέσω του βίντεο-μικροσκοπίου και ενός αλγορίθμου επεξεργασίας εικόνας που τρέχει στο PC και είναι γραμμένο στο περιβάλλον στη Matlab. Επίσης χρησιμοποιείται συγκεκριμένη εργαλειοθήκη της Matlab για επεξεργασία εικόνας. Ο έλεγχος θέσης που πραγματοποιείται δεν είναι ικανός να εξαλείψει τελείως την παρασιτική συμπεριφορά της κίνησης του μικρορομπότ αλλά μπορεί ελέγξει πολύ αποτελεσματικά το μικρορομπότ και να μειώσει σημαντικά το σφάλμα στη κίνησή του.

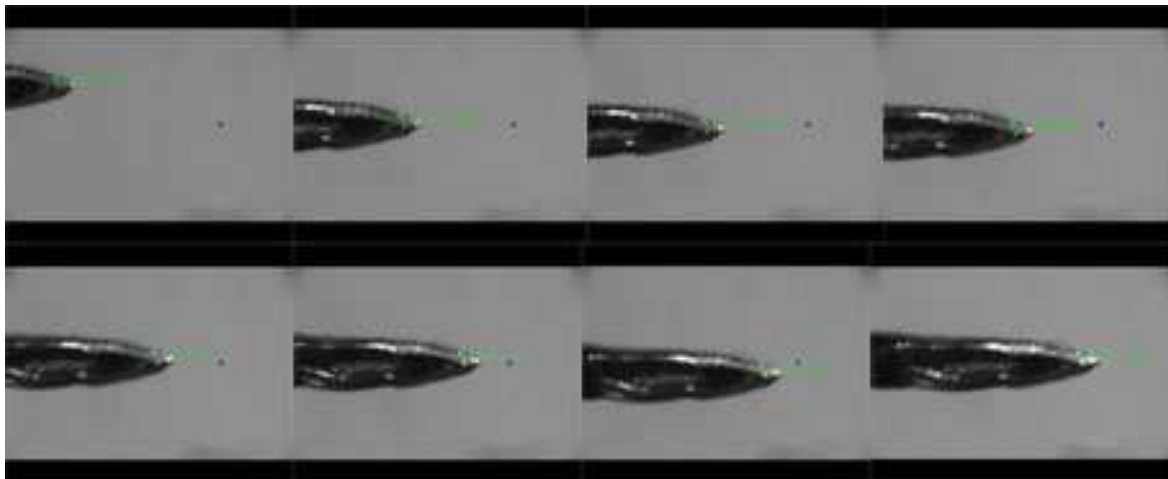
Η λογική του έλεγχου είναι σχετικά απλή. Αρχικά ορίζεται μια περιοχή κίνησης στην οποία η βελόνα θα εκτελεί ευθύγραμμη προωθητική κίνηση. Ο ορισμός αυτής της περιοχής γίνεται μέσω της μεταβλητής R στην οποία θέτει ο χρήστης πόσα rixel πάχος θέλει να έχει. Στην συνέχεια ορίζονται οι περιοχές πάνω και κάτω από τη περιοχή R στις οποίες η βελόνα θα κινείται διαγώνια και με δεξιό προσανατολισμό και διαγώνια με αριστερό προσανατολισμό ώστε σε κάθε περίπτωση να προσπαθεί να εισέλθει στην περιοχή R (βλ. Σχήμα 6-7). Όσο μικρότερη τεθεί η R τόσο πλησιέστερα θα προσεγγίσει η άκρη της βελόνας το τελικό σημείο. Τέλος για κάθε περιοχή κίνησης ορίζονται και συγκεκριμένες τιμές PWM οι οποίες στέλνονται στους κινητήρες για να πετυχαίνεται η επιθυμητή κίνηση. Όταν η μύτη της βελόνας συμπέσει με το τελικό σημείο ή ξεπεράσει τα όρια της εικόνας τότε το πρόγραμμα στέλνει στο μικρορομπότ την τιμή +10% d.c. ώστε οι κινητήρες να σταματήσουν να κινούνται. Η αποστολή αυτών των δεδομένων από το PC στο μικρορομπότ γίνεται ασύρματα με τον τρόπο που αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια. Ο βρόχος κλείνει κάθε 0,1 δευτερόλεπτο που σημαίνει ότι η σύνδεση πρέπει να είναι ικανή να αποστέλλει τα δεδομένα

επιτυχώς σε αυτό το χρονικό διάστημα κάτι το οποίο όμως έχει επιτευχθεί και στο πείραμα ανοιχτού βρόχου.

Ακολουθούν οι σχηματικές απεικονίσεις της υλοποίησης του πειράματος καθώς και παράθεση των διαγράμματος που αποτελούν τα αποτελέσματα της κίνησης του μικρορομπότ.



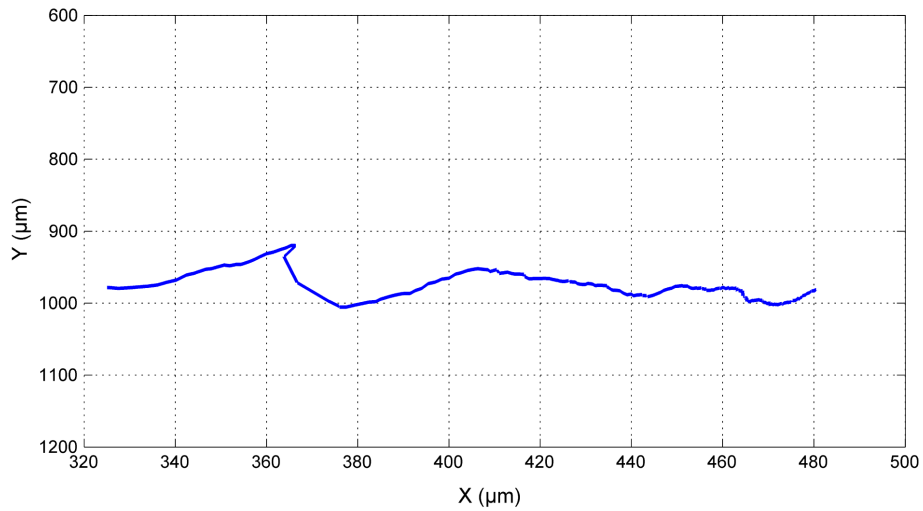
Σχήμα 6-7. Φωτογραφικό στιγμιότυπο των τριών περιοχών κίνησης της βελόνας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



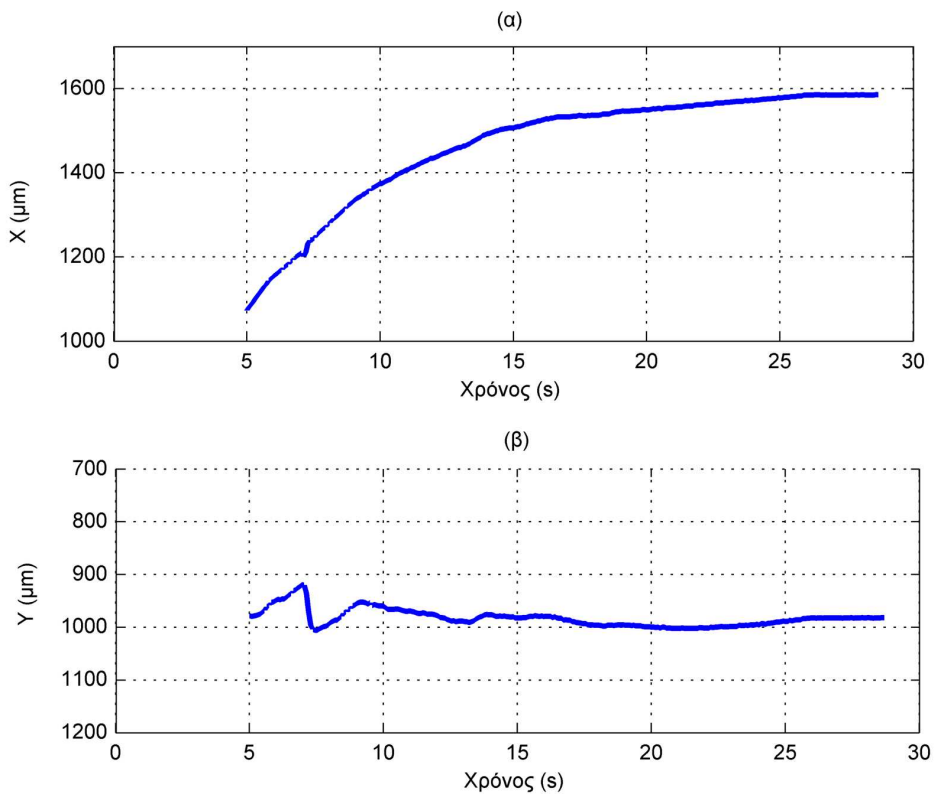
Σχήμα 6-8. Διαδοχικά φωτογραφικά στιγμιότυπα της εκτέλεσης του πειράματος.

Ήδη κανείς παρατηρώντας το Σχήμα 6-9 μπορεί να διακρίνει την εμφανή μείωση της παρασιτικής κίνησης. Η κίνηση φαίνεται πιο ομαλή και με μεγαλύτερη γραμμικότητα. Ιδιαίτερα αν εξαιρεθεί το πρώτο χρονικό κομμάτι του πειράματος (0-10 s), στο οποίο η κίνηση είναι πιο απότομη διότι το η άκρη της βελόνας προσπαθεί γρήγορα να βρεθεί και να παραμείνει στην Ε.Π. περιοχή, στο υπόλοιπο κομμάτι το Σχήμα 6-10 (β) δείχνει ότι το σφάλμα της παρασιτικής κίνησης στον άξονα Y περιορίζεται κάτω από τα 10 μm . Με το που βρεθεί η βελόνα στην Ε.Π. περιοχή κινείται χωρίς μεγάλο σφάλμα και σε αυτό συμβάλλει ο

έλεγχος θέσης ο οποίος δεν την αφήνει να εκτελέσει παρασιτική κίνηση διορθώνοντάς την κάθε φορά που ξεφεύγει από το άνω και κάτω όριο της περιοχής.

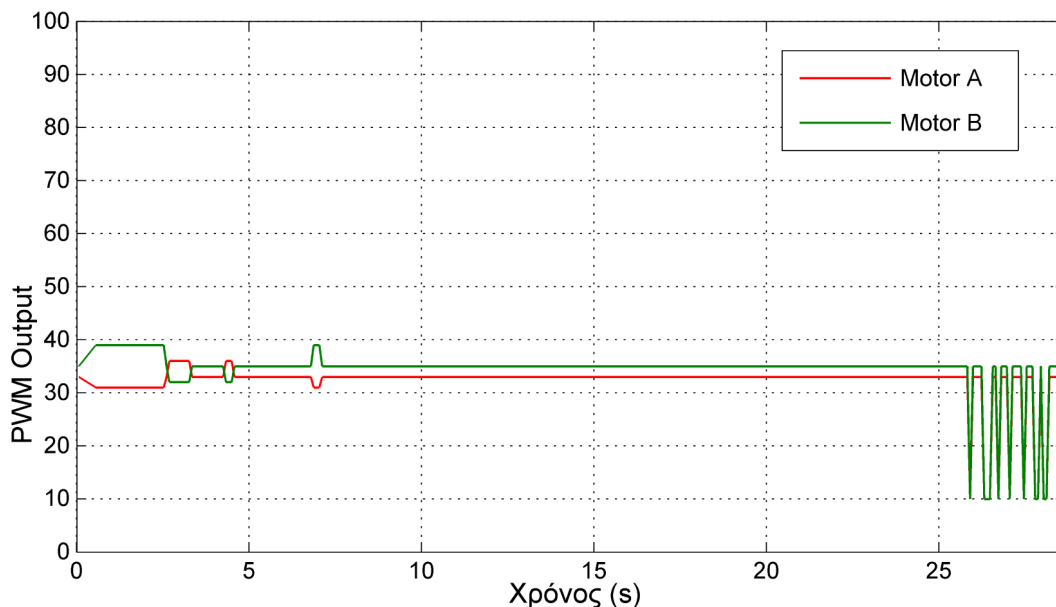


Σχήμα 6-9. Γραφική απεικόνιση της δισδιάστατης κίνησης της βελόνας στους άξονες X,Y.



Σχήμα 6-10. Γραφική απεικόνιση της κίνησης της βελόνας στον άξονα X(α) και Y(β), αντίστοιχα, συναρτήσει του χρόνου.

Στο Σχήμα 6-11 αποτυπώνεται η ουσιαστικά η επέμβαση του ελέγχου στην κίνηση του μικρορομπότ. Στα πρώτα πέντε δευτερόλεπτα ο έλεγχος ενεργεί ώστε η άκρη της βελόνας να βρεθεί στην Ε.Π. περιοχή. Από τη στιγμή που εισέλθει στην περιοχή αυτή το πρόγραμμα στέλνει τις τιμές PWM 36% d.c. και 34% d.c. στους δύο κινητήρες ώστε να κινηθεί ευθύγραμμα. Η επόμενη επέμβαση του ελέγχου γίνεται στα έξι δευτερόλεπτα όπου η βελόνα εισέρχεται στην Δ.Π. περιοχή στην οποία εκτελεί δεξιόστροφη προωθητική κίνηση ώστε να επαναφερθεί στη Ε.Π. περιοχή. Τέλος η διαταραχή που παρατηρείται στα τελευταία δευτερόλεπτα (26-28) ουσιαστικά πρόκειται για τον τερματισμό του πειράματος καθώς όταν συμπέσει η άκρη της βελόνας με το τελικό σημείο το πρόγραμμα δίνει εντολή να σταλεί η τιμή 10% d.c. ώστε να σταματήσει. Ωστόσο η αναγνώριση του σημείου της άκρης της βελόνας δεν σταθεροποιείται με αποτέλεσμα το πρόγραμμα να προσπαθεί να το πλησιάσει όσο πλησιέστερα γίνεται στο τελικό σημείο.



Σχήμα 6-11. Γραφική απεικόνιση των τιμών PWM που στέλνονται στους κινητήρες κατά τη διάρκεια του πειράματος.

6.4 Αξιολόγηση των Πειραμάτων.

Η εργασία αυτή προχώρησε ένα βήμα παραπάνω στη πειραματική μελέτη της κίνησης του μικρορομπότ καθώς εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά λειτουργίες που τελικό στόχο είχαν την βελτίωση της ακρίβειας κίνησης του μικρορομπότ. Η βασική λειτουργία που προστέθηκε στο μικρορομπότ είναι η ασύρματη με την οποία αντικαθιστά τα πηνιοσύρματα και εξαλείφει κάθε εξωτερική ροπή και δύναμη που μπορεί να δημιουργήσει σφάλματα στη κίνηση. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ένας βασικός έλεγχος θέσης κλειστού βρόχου που σε συνδυασμό με την ασύρματη επικοινωνία που εγκαταστάθηκε μεταξύ του χρήστη

και του μικρορομπότ μπορούν πλέον να επιτευχθούν οι μικροσκοπικές κινήσεις που προβλέπει η θεωρία.

Πιο συγκεκριμένα, ο ασύρματος τηλεχειρισμός του μικρορομπότ κράτησε κάτω από τα 30 μm το παρασιτικό σφάλμα της κίνησης του μικρορομπότ κάτι όμως που δεν είναι αρκετό σε σχέση με την επιθυμητή ακρίβεια που ορίζεται στην τάξη του ενός μm . Ο τηλεχειρισμός εφαρμόστηκε κυρίως σαν πρώτη δοκιμασία της λειτουργίας της ασύρματης πλατφόρμας και τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν (βλ. Σχήματα 6-4,6-5) αποδείχθηκαν αρκετά ενθαρρυντικά. Στα πλαίσια του συγκεκριμένου πειράματος πραγματοποιήθηκε και η κίνηση του μικρορομπότ από ένα αρχικό σημείο προς ένα τελικό που είχε ορισθεί από το χρήστη.

Στη δεύτερη κατά σειρά πειραματική δοκιμασία, ο έλεγχος θέσης που χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με την ασύρματη αποστολή των δεδομένων από το PC στο μικρορομπότ μείωσε το σφάλμα της παρασιτικής κίνησης κάτω από 10 μm και σε κάποιες χρονικές στιγμές το βήμα της κίνησης προσέγγισε το 1 μm . Η καταγραφή και ανάλυση της κίνησης του μικρορομπότ έγινε και σε αυτήν την πειραματική δοκιμασία κατά την κίνηση του από ένα αρχικό σημείο προς ένα τελικό, ορισμένο από το χρήστη.

Από τις πειραματικές μετρήσεις και στα δύο είδη πειραμάτων τα σφάλματα της παρασιτικής κίνησης δεν εξαλείφτηκαν τελείως. Για να γίνει δυνατόν κάτι τέτοιο πρέπει να αφαιρεθούν όλες οι πηγές σφαλμάτων που και από προηγούμενες πειραματικές και θεωρητικές μελέτες έχουν αποδειχτεί ότι είναι η ασυμμετρία της πλατφόρμας και ανομοιόμορφη κατανομή της μάζας της καθώς και η ασύγχρονη λειτουργία των κινητήρων.

7. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.

7.1 Συμπεράσματα

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη και η κατασκευή μίας εξειδικευμένης ασύρματης πλατφόρμας καθώς και η ενσωμάτωσή της στο μικρορομπότ του εργαστήριου Αυτομάτου Ελέγχου της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Η πλατφόρμα φέρει τον ασύρματο πομποδέκτη nrf24l01+ της Nordic που σε συνδυασμό με έναν δεύτερο ίδιο πομποδέκτη καθιστά το μικρορομπότ πλήρως αυτόνομο όσον αφορά το έλεγχο και την επικοινωνία με τον χρήστη και τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η αυτονομία που επιτυγχάνεται συμβάλει στην απαλοιφή σημαντικού ποσοστού σφαλμάτων στην κίνηση του μικρορομπότ καθώς αντικαθίσταται το πρωταρχικό μέσο επικοινωνίας, το πηνιόσυρμα, το οποίο προκαλούσε εξωτερικές δυνάμεις και ροπές. Η εξάλειψη αυτών ροπών και δυνάμεων στοχεύει στην μείωση της παρασιτικής κίνησης που αποτελεί παράγοντας σημαντικού σφάλματος στην ακρίβεια της κίνησης του μικρορομπότ.

Η υλοποίηση της πλατφόρμας έγινε από βασικά εξαρτήματα και υλικά ηλεκτρονικών του εργαστηρίου και η ανάπτυξή της βασίσθηκε σε τρία κριτήρια. Η πλατφόρμα έπρεπε να είναι αποσπώμενη, το ύψος και το βάρος της να κρατηθεί σε χαμηλά επίπεδα και τέλος η ενσωμάτωσή του να γίνει με όσο πιο αξιόπιστο τρόπο διότι η δόνηση που προκαλείται από την επενέργεια των φυγοκεντρικών κινητήρων μπορεί να προκαλέσει βλάβες και αστάθεια στις ενώσεις της πλατφόρμας με τα ηλεκτρονικά του μικρορομπότ.

Παράλληλα με την κατασκευή της πλατφόρμας και την ενσωμάτωσή της στο μικρορομπότ αναπτύχθηκε μία δεύτερη πλατφόρμα η οποία αναλαμβάνει να στείλει ασύρματα τα δεδομένα στο μικρορομπότ από οποιοδήποτε ηλεκτρονικό υπολογιστή που έχει εγκαταστημένη σειριακή θύρα,. Αυτές οι δύο πλατφόρμες ουσιαστικά αποτελούν τον πομπό και τον δέκτη της επικοινωνίας ανάμεσα σε υπολογιστή και μικρορομπότ αντίστοιχα αλλά δίνουν και τη δυνατότητα μέσω του προγραμματισμού των πομποδεκτών nrf24l01+και των μικροεπεξεργαστών PIC 18F4331 και 18F2431 να εναλλάσσουν το ρόλο του πομπού και του δέκτη καθιστώντας δυνατή και την αποστολή δεδομένων από το μικρορομπότ στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Για την ανταλλαγή αυτών των δεδομένων δημιουργήθηκε ένα βασικό πρωτόκολλο επικοινωνίας. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο είναι έτσι δομημένο ώστε να μπορεί αξιοποιεί τα διάφορα δεδομένα που παίρνει από τον χρήστη και να τα μεταφράζει σε ποσοστό duty cycle για τους δύο κινητήρες ξεχωριστά, καθώς και σε αριστερόστροφη και δεξιόστροφη κίνηση. Το πρωτόκολλο έχει συνταχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολα παραμετροποιήσιμο από τον χρήστη. Παράλληλα με την σύνταξη του πρωτοκόλλου έγινε και φιλτράρισμα των δεδομένων και στις δύο πλευρές της επικοινωνίας ώστε κάθε λανθασμένο δεδομένο που ανταλλάσσεται να μην μπορεί να επηρεάσει τον έλεγχο του μικρορομπότ.

Τέλος με την εφαρμογή όλων των παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν σειρά πειραμάτων με σκοπό τη δοκιμή της ασύρματης επικοινωνίας παράλληλα με την εφαρμογή δύο διαφορετικών τρόπων ελέγχου του μικρορομπότ. Ο πρώτος ήταν ο τηλεχειρισμός του μικρορομπότ από το χρήστη μέσω του απτικού μηχανισμού. Ο συγκεκριμένος έλεγχος ανοιχτού βρόχου δεν μείωσε σημαντικά το σφάλμα παρασιτικής κίνησης αλλά με αυτόν κατέστη δυνατή η μετακίνηση της βελόνας από ένα αρχικό σημείο σε ένα τελικό, ορισμένο από το χρήστη, με σημαντική ακρίβεια. Ο δεύτερος τρόπος ελέγχου του μικρορομπότ ήταν ο έλεγχος θέσης κλειστού βρόχου μέσω επεξεργασίας εικόνας. Αυτή τη φορά το σφάλμα μειώθηκε εντυπωσιακά και η κίνηση του μικρορομπότ απόκτησε μεγάλη ακρίβεια.

Και στις δύο πειραματικές διαδικασίες η ασύρματη σύνδεση αποδείχτηκε αρκετά σταθερή. Ωστόσο δεν έλειψαν χρονικές στιγμές στις οποίες η σύνδεση χανόταν με αποτέλεσμα να γινόταν αδύνατος ο έλεγχος του μικρορομπότ. Κάποιες από αυτές τις διακοπές λειτουργίας εξαλείφθηκαν αλλάζοντας το πρόγραμμα λειτουργίας και κάποιες βελτιώνοντας την κατασκευή της πλατφόρμας στη οποία είναι εγκατεστημένη η ασύρματη μονάδα. Σε κάθε περίπτωση οι διακοπές αυτές δεν εμπόδισαν την ομαλή διεξαγωγή των πειραμάτων.

7.2 Μελλοντική Εργασία.

Με την ολοκλήρωση των πειραματικών διαδικασιών στην παρούσα εργασία τέθηκαν ορισμένα ζητήματα που χρήζουν μελλοντική βελτιστοποίηση. Ένα σημαντικό ζήτημα αποτελεί η κατασκευαστική δομή του μικρορομπότ που σε επίπεδο ηλεκτρονικών αλλά και σε επίπεδο υλικών παραμένει σε αρκετά πρώιμο στάδιο. Γενικότερα τα πιο κρίσιμα σημεία στα οποία θα πρέπει να δοθεί έμφαση σε μελλοντικές εργασίες είναι:

- Επανασχεδιασμός της ρομποτικής πλατφόρμας σε επίπεδο ηλεκτρονικών πλακετών, τροφοδοσίας και ασύρματου. Για βέλτιστη διάταξη χώρου, βάρους και διαστάσεων προτείνεται η εκτύπωση πλακετών διπλής όψης καθώς και ενσωμάτωση του ασύρματου πομποδέκτη στην πλακέτα των ηλεκτρονικών. Με αυτό τον τρόπο η πλατφόρμα των ηλεκτρονικών θα είναι ενιαία και πιο ανθεκτική στις δονήσεις των επενεργητών.
- Αντικατάσταση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (μικροεπεξεργαστές, γέφυρες H-Bridge κτλ) με νέα, λιγότερο ενεργειακά και πιο αποδοτικά.
- Αντικατάσταση των δύο ξεχωριστών μπαταριών τροφοδοσίας με μία μεγαλύτερης χωρητικότητας αλλά εξίσου μικρής σε διαστάσεις και βάρος.

Πέρα από τον κατασκευαστικό τομέα, βελτιώσεις και αλλαγές πρέπει να γίνουν και στην ασύρματη επικοινωνία. Πιο συγκεκριμένα:

- Αντικατάσταση της ασύρματης πλατφόρμας που είναι συνδεδεμένη με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η βάση της, που είναι η δοκιμαστική πλακέτα, θα αντικατασταθεί από τυπωμένη πλακέτα στην οποία θα ενσωματωθεί ο ασύρματος πομποδέκτης.
- Δημιουργία καινούργιου πρωτοκόλλου επικοινωνίας, πιο σύνθετου για καλύτερη διαχείριση των δεδομένων. Παράλληλα πρέπει να προβλεφθεί και

η εναλλαγή του PTX με τον PRX έτσι ώστε να μπορεί και το μικρορομπότ να στέλνει πληροφορίες στο χρήστη.

Τέλος, για την επιπλέον βελτίωση της ακρίβειας κίνησης του μικρορομπότ πρέπει να ενσωματωθούν στο μικρορομπότ οπτικοί ανακλαστήρες μέτρησης της ταχύτητας των κινητήρων, έτσι ώστε να γίνει δυνατός ο έλεγχος ταχύτητας. Οι παραπάνω μελλοντικές βελτιώσεις θα συμβάλλουν στον ακριβέστερο έλεγχο του μικρορομπότ καθώς και στην πραγματοποίηση πιο σύνθετων και απαιτητικών πειραμάτων.

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
Page(s): 844 –849.
- [2] Fitch R., R. Lal, "Experiments with a zigbee wireless communication system for self-reconfiguring modular robots", *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA 2009), 2009 Presented at IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA 2009), Kobe, Japan, 12 - 17 May. 2009*
- [3] 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, Pages 496-507.
- [4] Macera C., Philip H. Goodman, Frederick C. Harris Jr., Rich Drewes, James B. Maciokas, "Remote-neocortex control of robotic search and threat identification". *Robotics and Autonomous Systems* 46(2): 97-110 (2004)
- [5] 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.*
- [6] 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.*
- [7] Papadopoulos E., Vlachos K., and Mitropoulos D., “Design of a 5-dof Haptic Simulator for Urological Operations,” *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’02)*, May 11-15, 2002, Washington, DC, pp. 2079-2074.
- [8] 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.
- [9] Rubenstein M., Radhika Nagpal. “KiloBot: A Robotic Module for Demonstrating Collective Behaviors” Modular Robotics Workshop, *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation* , 2012.
- [10] Σούλης Γεράσιμος, «Σχεδιασμός και Υλοποίηση κυκλωμάτων ασύρματης επικοινωνίας, οδήγησης και ελέγχου αυτόνομης μικρορομποτική πλατφόρμας». Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «Συστήματα Αυτομάτου ελέγχου» 2009, ΕΜΠ, ΑΘΗΝΑ.
- [11] 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*.
- [12] 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 Page(s): 1414 – 1419.*

- [13] Vartholomeos P., Papadopoulos E., "Analysis and Design of a Novel Miniplatform Employing Vibration Micro-motors", *Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Barcelona, Spain, April 18-22, 2005.*
- [14] 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.*
- [15] Vartholomeos, P., Vlachos, K., and Papadopoulos, E., "On the Force Capabilities of Centripetal Force-actuated Microrobotic Platforms," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '07), May 2007, Rome, Italy.*
- [16] Vartholomeos P, . Mougias, K. and Papadopoulos, E. "Driving Principles and Hardware Integration of Microrobots Employing Vibration Micromotors," *Proc. 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Systems (AIM '07), September 4-7, 2007, ETH Zurich, Switzerland.*
- [17] Vlachos K., Vartholomeos P., and Papadopoulos E., "A Haptic Tele-Manipulation Environment for a Vibration-Driven Micromechatronic Device," *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Systems (AIM '07), Sep. 4-7, 2007, ETH Zurich, Switzerland.*

Datasheets

[18] Microchip PIC18F2331/2431/4331/4431 Datasheet, DS39616B,
www.microchip.com.

[19] Nordic nRF24L01 Product Specification v2.0.

[20] Maxim MAX232 Datasheet.

[21] Part No. Z4TH9A0300061 Vibramotor Datasheet.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Οι ακόλουθοι κώδικες γράφτηκαν σε γλώσσα C. Στη συνέχεια ανέλαβε ο μεταγλωττιστής της Hi-tech για τους μικροεπεξεργαστές PIC 18F 2431/4331 να μεταφράσει τους κώδικες σε γλώσσα μηχανής. Ο συγκεκριμένος μεταγλωττιστής τρέχει στο προγραμματιστικό περιβάλλον, για μικροεπεξεργαστές, MPLab, και αναλαμβάνει να προγραμματίσει τους μικροεπεξεργαστές και τους πομποδέκτες του μικρορομπότ συνεπώς και τις λειτουργίες του ανάλογα με επιθυμίες του χρήστη.

Τα δύο κύρια προγράμματα που τρέχουν στον PTX και στον PRX είναι το PTXlocal.c και το PRXremote.c αντίστοιχα. Το πρώτο τρέχει στο μικροεπεξεργαστή PIC 18F4331 που είναι συνδεδεμένο με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και το δεύτερο στο μικρορομπότ. Και στα δύο ρυθμίζεται η ασύρματη λειτουργία των πομποδεκτών μέσω της SPI λειτουργίας των δύο μικροεπεξεργαστών που χρησιμοποιούνται.

Παράλληλα με τα δύο προγράμματα που φέρουν την κύρια ρουτίνα του κώδικα έχουν συμπεριληφθεί στο CD και τα εξής απαραίτητα προγράμματα για την ομαλή λειτουργία του κώδικα:

Usart.c

Nrf24l01.h

Delay.h

Στη συνέχεια παραθέτονται με σχολιασμό τα προγράμματα PTXlocal.c και PRX.remote.c

Ο κώδικας PTXlocal.c ρυθμίζει όλες τις λειτουργίες του PTX(PIC 18F4331,nrf24l01+). Σε αυτές περιλαμβάνεται οι συνδέσεις SPI,UART,το πρωτόκολλο επικοινωνίας καθώς και διάφοροι χρονιστές και interrupts.

PTXlocal.c

```
#include <htc.h>
#include <stdio.h>
#include "usart.c"
#include <peripheral/usart.h>
#include <peripheral/spi.h>
#include "delay.h"
#include "nrf24l01.h"
#define _XTAL_FREQ 1000000
```

```
__CONFIG(1,0x0200);
__CONFIG(2,0x2001);
__CONFIG(3,0x0000);
__CONFIG(4,0x0080);
__CONFIG(5,0xC00F);
__CONFIG(6,0xFFFF);
__CONFIG(7,0xFFFF);

void Initialize(void);
void InitializeIO(void);

void ToggleLED(void); //toggle the current state of the on-board
LED
void ToggleLED2(void); //toggle the current state of the on-board
LED2

//main routine
void main(void){
unsigned char data; //register to hold letter sent and received
unsigned int count; //counter for lfor loop

Initialize(); //initialize IO, UART, SPI, set up nRF24L01 as TX
while(1)
{
    if (RCIF)
    { data=getch(); //get data from UART

if(((data>=48)&&(data<=57))||(data==13)||(data==32)||
(data==45)||(data==43))

        { //filter the incoming data

            nrf24l01_write_tx_payload(&data, 1, true); //transmit
received char over RF

            while(!(nrf24l01_irq_pin_active() &&
(nrf24l01_irq_tx_ds_active() ||
nrf24l01_irq_max_rt_active()))); //wait until the packet has
been sent or the maximum number of retries has been reached
```

```
        if(!nrf24l01_irq_max_rt_active()) //char has been sent
        successfully
        {
            nrf24l01_irq_clear_all(); //clear all interrupts in the
            24L01

            ToggleLED2(); //toggle the on-board LED2 as visual
            indication that the char          has been sent

        }
        else
        {
            nrf24l01_flush_tx(); //get the unsent character out of
            the TX FIFO

            nrf24l01_irq_clear_all(); //clear all interrupts

        }

        ToggleLED(); //toggle the on-board LED as visual
        indication that the loop has completed

    }

    RCIF=0; //clear RCIF interrupt

}

}

}

//initialize routine
void Initialize(void)
{
    InitializeIO(); //set up IO (directions and functions)

    OpenUSART (USART_TX_INT_OFF & USART_RX_INT_OFF &
    USART_ASYNC_MODE & USART_EIGHT_BIT & USART_CONT_RX &
    USART_BRGH_HIGH, 64); //open UART

    SSPCON= 0b00100000; // SPI control register

    SSPSTAT=0b01000000; // SPI status register

    nrf24l01_initialize_debug(false, 1, true); //initialize the
    24L01 to the debug          configuration as TX, 1 data byte, and
    auto-ack enabled

}
```

```

//initialize IO pins
void InitializeIO(void)
{
    ANSEL0=0; //disable AD converter functionality on PORTA
    TRISA = 0; //make PORT A0 an output to control LED
    RA0 = 1; //turn on LED
    TRISB = 0b00000001; //PORTB0 is input since it is IRQ pin
    TRISD=0b00000100;//SDI
    TRISC = 0b10000000; //make CSN, CE, SCK, MOSI (SDO), and TX
    outputs
    PORTC = 0b00000100; //set CSN bit
}

//toggles on-board LED
void ToggleLED(void)
{
    RA0 = ~RA0; //invert the bit that controls the LED
}
void ToggleLED2(void)
{
    RA1 = ~RA1; //invert the bit that controls the LED
}

```

Ο κώδικας PRXlocal.c ρυθμίζει όλες τις λειτουργίες του PRX(PIC 18F2431,nrf24l01+). Σε αυτές περιλαμβάνεται οι συνδέσεις SPI,το πρωτόκολλο επικοινωνίας, διάφοροι TIMERS και interrupts και η ρύθμιση της λειτουργίας της βασικής μονάδας PWM του μικροεπεξεργαστή.

PRXremote.c

```

#include <htc.h>
#include <stdlib.h>

```

```
#include <stdio.h>
#include "usart.c"
#include <peripheral/usart.h>
#include <peripheral/spi.h>
#include "delay.h"
#include "nrf24l01.h"
#define _XTAL_FREQ 1000000
__CONFIG(1,0x0200);
__CONFIG(2,0x2001);
__CONFIG(3,0x1D00);
__CONFIG(4,0x0080);
__CONFIG(5,0xC00F);
__CONFIG(6,0xFFFF);
__CONFIG(7,0xFFFF);

void Initialize(void);
void InitializeIO(void);
void ToggleLED2(void);
void ToggleLED(void); //toggle the current state of the on-board
LED
unsigned char data_in[4];
unsigned char dir;
unsigned char dir2;
unsigned char input;
unsigned char input2;
unsigned char i=0;
unsigned char j=0;
unsigned int e=0;
unsigned int k=0;
unsigned int vel_ref = 512;
```

```
unsigned int vel_ref2 = 512;
unsigned int vel_fb = 0;
unsigned int pwm_command = 0;
unsigned int pwm_command2 = 0;
unsigned char flag;
unsigned char data;

void set_pwm(unsigned int rpm,unsigned int vel_ref2,unsigned char
dir,unsigned char dir2);

//main routine
void main(void)
{
    unsigned char data; //register to hold letter received and sent

    Initialize(); //initialize PLL, IO, SPI, set up nRF24L01 as RX
    PDC0L = 0b00000000;
    PDC0H = 0b00000000;
    PDC1L = 0b00000000;
    PDC1H = 0b00000000;

    while(1)
    {

    }
}

//initialize routine
void Initialize(void)
{
    InitializeIO(); //set up IO (directions and functions)
    SSPCON=0b00100000; // SPI control register

    SSPSTAT=0b01000000; // SPI status register
```



```
nrf24l01_initialize_debug(true, 1, true); //initialize the 24L01
to the debug configuration as TX, 1 data byte, and auto-ack
enabled
}

//initialize IO pins
void InitializeIO(void)
{
    ANSEL0 = 0x0; //disable AD converter functionality on PORTA
    PORTA = 0b00000000;
    TRISA = 0b00011100; //make PORT A0 an output to control LED
    RA0 = 1; //turn on LED

    TRISB = 0b00000000; //make sure that PORTB0 is input since it is
    IRQ pin
    RB6=1;

    TRISC = 0b00011000; //make CSN, CE, SCK, and MOSI (SDO) outputs
    PORTC = 0; //set CSN bit

    //POWER CONTROL MODULE
    PTCON0 = 0b00000000; // PWM Timer control register 0
    PTCON1 = 0b10000000; // PWM timer control register 1

    PWMCON0 = 0b00111111; // PWM Control register 0, set active PWM0,
    PWM1, PWM2, PWM3, PWM4 and PWM5 and independent
    PWMCON1 = 0b00000000; // PWM Control register 1
    OVDCOND = 0b00001010; // Output override control register
    OVDCONS = 0b00000101; // Output State register
    FLTCONFIG = 0b00000000; // Fault configuration register
    PTPERL = 0xFF ; // Time base period register low byte
    PTPERH = 0x00 ; // Time base period register high byte

    //set up Timer2 with 1ms period
    T2CON = 0b00000111;
    PR2=0x9C;
    INTCON=0b01110000;
    INTCON2 = 0b10000100;
```

```
T5CON=0b00001101;

PR5H=0xFF;

PR5L=0xFF;

PIE3 = 0b00000110;

IPR3 = 0b00000110;

PIE1=0b00100010;

ei();//enable interrupts
}

//toggles on-board LED
void ToggleLED(void)
{
    RA1 = ~RA1;
}

void ToggleLED2(void)
{
    RA0 = ~RA0;
}

void set_pwm(unsigned int vel_ref,unsigned int vel_ref2,unsigned
char dir,unsigned char dir2)
{
    if ((dir2==43)&&(dir==43)) //forward movement
    {
        OVDCOND = 0b11111010; // Output override control register
        OVDCONS = 0b00000101; // Output State register
    }
    else if ((dir2==45)&&(dir==45)) //backward movement
    {
        OVDCOND = 0b11110101; // Output override control register
        OVDCONS = 0b00001010; // Output State register
    }
    else if ((dir2==43)&&(dir==45))
```

```
{
    OVDCOND = 0b11110110; // Output override control register
    OVDCONS = 0b00001001; // Output State register
}
else if ((dir2==45)&&(dir==43))
{
    OVDCOND = 0b11111001; // Output override control register
    OVDCONS = 0b00000110; // Output State register
}
    //convert 10-bit PWM command to 16-bit PWM DUTY CYCLE
register
for motor 1
    pwm_command=1023-vel_ref;
PDC0L = ((pwm_command<<2)&(0b11111100))
PDC0H = pwm_command>>6;
    //convert 10-bit PWM command to 16-bit PWM DUTY CYCLE
register for motor 2
    pwm_command2=1023-vel_ref2;
PDC1L = ((pwm_command2<<2)&(0b11111100))
PDC1H = pwm_command2>>6;
return;
}
void interrupt my_isr(void)
{
    // Timer 2 interrupt used for sending data serially every 1 ms.
    if(TMR2IE==1 && TMR2IF==1)
    {
        set_pwm(vel_ref,vel_ref2,dir,dir2);
        TMR2IF=0;
    }
    //incoming data, IRQ interrupt
    if ((INT0IE)&&(INT0IF))
```

```
{
    ToggleLED();

    nrf24l01_read_rx_payload(&data, 1); //read the packet into
data
    nrf24l01_irq_clear_all(); //clear all interrupts in the
24L01

    input=data; // get 1 byte per loop

    if ((input!=13)&&(input!=32)) //if the incoming data is
number or +,-
    {
        data_in[i]=input;

        i++;

    }
    else if(input==32)
    {
        e(((data_in[1]-48)*100)+((data_in[2]-48)*10)); //convert
ascii to dec
        dir=data_in[0];

        i=0;

    }
    else if(input==13)
    {
        k(((data_in[1]-48)*100)+((data_in[2]-48)*10));
//convert ascii to dec
        dir2=data_in[0];

        vel_ref=k;

        vel_ref2=e;

        i=0;

    }

    INT0IF=0; //clear flag of IRQ interrupt
}
}
```