



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δ.Π.Μ.Σ. Συστήματα Αυτοματισμού

Κατεύθυνση Β:

Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου και Ρομποτικής

Μεταπτυχιακό Μάθημα:

Μηχανοτρονικά Συστήματα

Εργασία Εξαμήνου

Όχημα Αυτόματης Πλοήγησης

Ομάδα 6

Ονόματα Φοιτητών – Α.Μ.:

Γεώργιος Κρομμύδας – 02121208

Λάμπης Παπακώστας – 02121211

ΑΘΗΝΑ,

2023

Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος Σχημάτων.....	4
Κατάλογος Πινάκων.....	6
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	7
1.1. Στόχοι Εργασίας.....	7
1.2. Δομή Εργασίας	8
Κεφάλαιο 2. Μοντελοποίηση και Έλεγχος Αυτόνομου Οχήματος.....	9
2.1. Κινηματική Ανάλυση Τροχοφόρου Ρομπότ.....	9
2.2. Δυναμική Ανάλυση Τροχοφόρου Ρομπότ	12
2.3. Σύστημα Ελέγχου Τροχοφόρου Ρομπότ.....	18
Κεφάλαιο 3. Υλοποίηση Αυτόνομου Οχήματος	23
3.1. Διαστασιολόγηση Επενεργητών Αυτόνομου Οχήματος	23
3.2. Επιλογή Εξαρτημάτων Αυτόνομου Οχήματος.....	29
3.2.1. Σασί.....	29
3.2.2 DC Κινητήρες και Ηλεκτρονικά Οδήγησης.....	30
3.2.3. Αισθητήρες	31
3.2.4. Μικροελεγκτής.....	32
3.2.5. Επικοινωνία.....	33
3.3. Κατασκευή Αυτόνομου Οχήματος	34
3.3.1. Συναρμολόγηση Οχήματος	34
3.3.2. Συνδεσμολογία Ηλεκτρολογικού κυκλώματος	36
3.3.3. Συνολική Διάταξη Οχήματος	37
3.4. Υλοποίηση Λογισμικού Αυτόνομου Οχήματος.....	38
3.4.1. Αρχικοποίηση.....	38
3.4.2. Επικοινωνία Bluetooth.....	38
3.4.3. Έλεγχος Οχήματος	39
Κεφάλαιο 4. Ενσωμάτωση Ρομποτικού Βραχίονα στο Όχημα.....	41
4.1. Κατασκευαστική Ενσωμάτωση.....	41

4.2. Ενσωμάτωση Ηλεκτρονικών	42
4.3. Μελέτη Κατανάλωσης και Εύρεση Μπαταριών	45
4.4 Κατασκευή Χειριστηρίου.....	46
Κεφάλαιο 5. Επίλογος	49
5.1 Δυσκολίες Διαδικασίας Κατασκευής	49
5.2 Συνεργασία Ομάδων	50
5.3 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	51
Βιβλιογραφία.....	52

Κατάλογος Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΑΒΗ ΚΑΡΠΩΝ ΑΠΟ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ.....	7
ΣΧΗΜΑ 2. ΚΑΤΟΨΗ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	9
ΣΧΗΜΑ 3. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΜΕ ΒΗΜΑΤΙΚΗ ΕΙΣΟΔΟ: (Α) ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΟΜΠΟΤ, (Β) ΓΩΝΙΑΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΟΜΠΟΤ.	16
ΣΧΗΜΑ 4. ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ Τ..	17
ΣΧΗΜΑ 5. ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ Τ.	17
ΣΧΗΜΑ 6. ΠΟΡΕΙΑ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ.....	18
ΣΧΗΜΑ 7. ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ.....	20
ΣΧΗΜΑ 8. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ: (Α) ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ. (Β) ΓΩΝΙΑΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ.	21
ΣΧΗΜΑ 9. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟΥ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΡΟΜΠΟΤ.	21
ΣΧΗΜΑ 10. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΡΟΜΠΟΤ.	22
ΣΧΗΜΑ 11. ΠΟΡΕΙΑ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΡΟΜΠΟΤ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.....	22
ΣΧΗΜΑ 12. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ Τ-Ω.	28
ΣΧΗΜΑ 13. ΣΑΣΙ ΚΑΙ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	29
ΣΧΗΜΑ 14. DC ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ.....	30
ΣΧΗΜΑ 15. DRIVER DUAL MOTOR MODULE L298N DC ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ.....	31
ΣΧΗΜΑ 16. ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ DRIVER ΜΕ ΤΟΥΣ DC ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.	31
ΣΧΗΜΑ 17. ENCODER ΚΑΙ Ο ΤΡΟΧΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ	32
ΣΧΗΜΑ 18. ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ HC – SR04.....	32
ΣΧΗΜΑ 19. ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗΣ ARDUINO UNO REV3	32
ΣΧΗΜΑ 20. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΑΚΕΤΑΣ ARDUINO UNO REV3.	33
ΣΧΗΜΑ 21. HC - 05 BLUETOOTH MODULE.....	33
ΣΧΗΜΑ 22. ARDUINO JOYSTICK MODULE.	33
ΣΧΗΜΑ 23. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΤΟ ΣΑΣΙ.....	34
ΣΧΗΜΑ 24. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΗΣ ΡΟΔΑΣ ΣΤΟ ΣΑΣΙ.....	34
ΣΧΗΜΑ 25. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ DRIVER ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΣΤΟ ΣΑΣΙ.	34
ΣΧΗΜΑ 26. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΘΗΚΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.....	35
ΣΧΗΜΑ 27. ΚΑΤΟΨΗ ΚΑΙ ΆΝΟΨΗ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	35
ΣΧΗΜΑ 28. ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΡΟΜΠΟΤ.	37
ΣΧΗΜΑ 29. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ ΡΟΜΠΟΤ.....	37
ΣΧΗΜΑ 30. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ.	40
ΣΧΗΜΑ 31. ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΑΣΙ.....	41

ΣΧΗΜΑ 32. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΝΕΑ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ.	42
ΣΧΗΜΑ 33. ΚΑΤΟΨΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΔΥΟ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΩΝ.	42
ΣΧΗΜΑ 34. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ.	43
ΣΧΗΜΑ 35. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	43
ΣΧΗΜΑ 36. ΤΕΛΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΝΑΝ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ.	44
ΣΧΗΜΑ 37. ΔΙΑΤΑΞΗ ΧΕΙΡΙΣΤΗΡΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.	47

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ.....	15
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΚΕΡΔΗ PID ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΤΟΥ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ.....	19
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	24
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	27
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ DC ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΣΑΣΙ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ DC ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 8. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ DRIVER DUAL MOTOR MODULE L298N.....	31
ΠΙΝΑΚΑΣ 9. ΕΝΤΟΛΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΡΟΜΠΟΤ.....	39

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1. Στόχοι Εργασίας

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας και της ρομποτικής συνέβαλε στην εξέλιξη και την βελτίωση των συνθηκών και των αναγκών για εργασίες οι οποίες είναι δύσκολες και βαριές για τον άνθρωπο. Παράδειγμα τέτοιων εργασιών αποτελούν οι αγροτικές και οι βιομηχανικές. Τα ρομπότ που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι τα τροχοφόρα, καθώς έχουν ευέλικτες κινήσεις στον χώρο και αποτελεί αξιόπιστη λύση για μεταφορά αντικειμένων ή για διεργασίες που αποτελούν δύσκολη/ ή και δύσβατη την παρουσία του ανθρώπου. Συγκεκριμένα, παρατηρείτε στο σχήμα 1 ένα τροχοφόρο ρομπότ το οποίο βρίσκεται σε έναν αμπελώνα και ανιχνεύει τους καρπούς. Στη συνέχεια συλλέγει τους έτοιμους καρπούς για τον άνθρωπο, με γρηγορότερο ρυθμό. Έτσι, ο άνθρωπος θα μπορέσει να επιταχύνει την διαδικασία της εργασίας που έχει να κάνει.



Σχήμα 1. Ανίχνευση και παραλαβή καρπών από αμπελώνες.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιάσει ένα αυτόνομο ρομποτικό όχημα διαφορετικής κίνησης, το οποίο θα δέχεται ασύρματα εντολές και θα αποφεύγει εμπόδια. Συγκεκριμένα το ρομπότ θα αποτελείται από ένα σασί ακρυλικού υλικού για να έχει στιβαρότητα, ώστε να τοποθετηθούν τα ηλεκτρονικά και ηλεκτρολογικά εξαρτήματα. Επίσης, θα τοποθετηθεί και ένας ρομποτικός βραχίονας τεσσάρων βαθμών ελευθερίας, έτσι ώστε να συλλέγει αντικείμενα, κατά την κίνηση του τροχοφόρου. Συνοπτικά, θα σχεδιαστεί και θα κατασκευαστεί ένας κινητός ρομποτικός βραχίονας, ο

οποίος θα σταματά όταν ανιχνεύσει εμπόδια στο πέρασμά του, με την αρπάγη να τα συλλέγει και να τα τοποθετεί σε διαφορετικό σημείο.

1.2. Δομή Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή στο θέμα της εργασίας, θέτοντας τους στόχους και παρουσιάζοντας την δομή της.

Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί την μοντελοποίηση του οχήματος, δηλαδή την παραγωγή των εξισώσεων κίνησης, την δυναμική του ανάλυση και το σύστημα ελέγχου του.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά την κατασκευή και τον προγραμματισμό του οχήματος αυτόνομης πλοήγησης. Αναλυτικότερα παρουσιάζεται η διαστασιολόγηση των κινητήρων και μειωτήρων που επιλέχθηκαν, οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν, ο κεντρικός μικροελεγκτής του οχήματος και τέλος την ολική του συνδεσμολογία και κατασκευή.

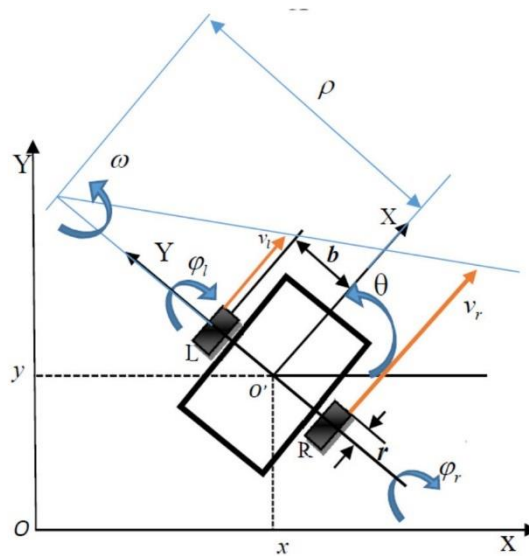
Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελείται από την σύνδεση του οχήματος με τον ρομποτικό βραχίονα τεσσάρων βαθμών ελευθερίας παράλληλης κινηματικής αλυσίδας. Επίσης, γίνεται εκ νέου η ενεργειακή ανάλυση του συνολικού συστήματος, έτσι ώστε η πλατφόρμα και ο βραχίονας να καταναλώνουν την ελάχιστη δυνατή ενέργεια.

Τέλος, το πέμπτο κεφάλαιο αποτελείται από τα συμπεράσματα και την μελλοντική εργασία του παρόντος συστήματος.

Κεφάλαιο 2. Μοντελοποίηση και Έλεγχος Αυτόνομου Οχήματος

2.1. Κινηματική Ανάλυση Τροχοφόρου Ρομπότ

Το όχημα μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με το unicycle model (βλ. σχήμα 2). Το όχημα είναι διαφορικής κίνησης, συνεπώς θα έχουμε τις εξισώσεις που συνδέουν τις ταχύτητες εισόδου με αυτές των τροχών.



Σχήμα 2. Κάτοψη τροχοφόρου διαφορικής κίνησης.

Με βάση το σχήμα 2 θα μοντελοποιήσουμε τις εξισώσεις κίνησης του ρομπότ. Αρχικά, το ρομπότ έχει 3 βαθμούς ελευθερίας (θέση και προσανατολισμός στο επίπεδο). Οπότε, δεδομένου των ταχυτήτων περιστροφής των τροχών και του γεωμετρικών του παραμέτρων, θα υπολογίζεται η ταχύτητα του ρομπότ. Η ευθεία διαφορική κινηματική θα δοθεί από την σχέση (2.1).

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = f(\dot{\phi}_l, \dot{\phi}_r) \quad (2.1)$$

Εν συνεχεία, οι γραμμικές ταχύτητες των τροχών θα δίνονται από τις σχέσεις (2.2) και (2.3).

$$v_l = \dot{\phi}_l r \quad (2.2)$$

$$v_r = \dot{\phi}_r r \quad (2.3)$$

όπου r είναι η ακτίνα των τροχών. Έτσι, η γραμμική ταχύτητα του ρομπότ συναρτήσει των τροχών θα δίνεται από την σχέση (2.4).

$$\begin{aligned} v &= \frac{v_l + v_r}{2} = \frac{r(\dot{\phi}_l + \dot{\phi}_r)}{2} \\ \Rightarrow v &= \frac{r(\dot{\phi}_l + \dot{\phi}_r)}{2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Η περιστροφή του ρομπότ γίνεται σύμφωνα με τον άξονα *ICC* (*Instantaneous Center of Curvature*) και για τους δύο τροχούς.

$$\begin{aligned} \begin{cases} v_l = \omega \rho \\ v_r = \omega(\rho + d) \end{cases} &\Rightarrow v_r - v_l = \omega(\rho + d - \rho) = \omega d \\ \Rightarrow \omega &= \frac{v_r - v_l}{d} \\ \omega &= \frac{v_r - v_l}{d} = \frac{r(\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l)}{d} \\ \Rightarrow \omega &= \frac{r(\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l)}{d} \end{aligned} \quad (2.5)$$

όπου $d = 2b$.

Συνεπώς η περιστροφική του ταχύτητα θα δοθεί από την σχέση (2.5). Στην περίπτωση που οι ταχύτητες των τροχών είναι ίσες και αντίθετες τότε θα ισχύει:

$$v = 0 \text{ και } \omega = \frac{v_r}{d/2}$$

Στην περίπτωση που έχουμε ίσες ταχύτητες με την ίδια κατεύθυνση, τότε θα ισχύει:

$$v = v_r = v_l \text{ και } \omega = 0$$

Επίσης, θα ισχύει ότι:

$$\begin{cases} v_l = \omega \rho \\ v_r = \omega(\rho + d) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{\phi}_l r = \omega \rho \\ \dot{\phi}_r r = \omega(\rho + d) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \omega = \frac{\dot{\phi}_l r}{\rho} \\ \dot{\phi}_r r = \frac{\dot{\phi}_l r}{\rho} (\rho + d) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \dot{\phi}_r = \dot{\phi}_l + \frac{\dot{\phi}_l d}{\rho} \Rightarrow \frac{\dot{\phi}_l d}{\rho} = \dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\dot{\phi}_l}{\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l} d$$

Γενικεύοντας στις συντεταγμένες $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T$ θα προκύψει το γενικό κινηματικό μοντέλο φαίνεται και στην σχέση (2.6):

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (2.6)$$

Η σχέση (2.6) αποτελεί τις γενικευμένες εξισώσεις διαφορικής κίνησης του τροχοφόρου. Ωστόσο, προκύπτει ένας περιορισμός στις γενικευμένες ταχύτητες $\dot{\mathbf{q}}$. Λύνοντας την (2.6α) ως προς την ταχύτητα v και αντικαθιστώντας στην σχέση (2.6b), τότε θα προκύψει η εξής σχέση:

$$\dot{x} \sin(\theta) = \dot{y} \cos(\theta)$$

$$\Rightarrow \dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta) = 0$$

$$\Rightarrow [\sin(\theta) \quad -\cos(\theta) \quad 0] \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = 0$$

$$\Rightarrow A^T(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = 0$$

Κατ' επέκταση η μητρωική μορφή της σχέσης (2.6), θα δοθεί από την (2.7).

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = G(\mathbf{q})\mathbf{v} \quad (2.7)$$

όπου η μήτρα $G(\mathbf{q})$ αποτελεί την ιακωβιανή μήτρα του συστήματος. Επιπλέον, ισχύει και η σχέση:

$$A^T(\mathbf{q})G(\mathbf{q}) = 0$$

Το τελικό βήμα της κινηματικής ανάλυσης είναι να συσχετίσουμε τις γενικευμένες ταχύτητες $\dot{\mathbf{q}}$ με τις ταχύτητες των τροχών. Συνεπώς θα ισχύει ότι:

$$\dot{x} = v \cos(\theta) = \frac{r}{2} \dot{\phi}_l \cos(\theta) + \frac{r}{2} \dot{\phi}_r \cos(\theta)$$

$$\dot{y} = v \sin(\theta) = \frac{r}{2} \dot{\phi}_l \sin(\theta) + \frac{r}{2} \dot{\phi}_r \sin(\theta)$$

$$\dot{\theta} = \omega = \frac{r}{d} \dot{\phi}_r - \frac{r}{d} \dot{\phi}_l$$

Έτσι, σε μητρική μορφή θα προκύψει:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos(\theta) & \frac{r}{2} \cos(\theta) \\ \frac{r}{2} \sin(\theta) & \frac{r}{2} \sin(\theta) \\ -\frac{r}{d} & \frac{r}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_l \\ \dot{\phi}_r \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\Rightarrow \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{f}(\phi_l, \phi_r)$$

Συνοπτικά, η σχέση (2.6) αποτελεί τον μετασχηματισμό από το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων $\Sigma\Sigma\{0\}$ στο σύστημα συντεταγμένων του σωματόδετου $\Sigma\Sigma\{A\}$.

2.2. Δυναμική Ανάλυση Τροχοφόρου Ρομπότ

Το επόμενο βήμα είναι να γίνει η δυναμική ανάλυση του τροχοφόρου ρομπότ. Στην ουσία θα γίνει η μελέτη της κίνησης με την επίδραση των δυνάμεων στο τροχοφόρο. Ο λόγος ύπαρξης της δυναμικής αποτελεί τον έλεγχο του ρομπότ, καθώς και την προσομοίωση της δυναμικής του συμπεριφοράς. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε κατά την ανάλυση ήταν η *Euler – Lagrange*. Ο λόγος επιλογής της μεθόδου οφείλεται κυρίως στην απλοιοφή των δυνάμεων περιορισμών. Οπότε, για την ανάλυση θα υποθέσουμε ότι έχουμε άκαμπτα σώματα και οι παράμετροι του συστήματος είναι γνωστοί.

Η δυναμική αυτή είναι βασισμένη στις αρχές της ενέργειας. Επίσης, οι θέσεις περιγράφονται από ένα σύνολο ανεξάρτητων γενικευμένων συντεταγμένων \mathbf{q} . Οπότε, θα υπολογίσουμε την κινητική ενέργεια του συστήματος $T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ και την δυναμική του ενέργεια $U(\mathbf{q})$. Η λαγκρανζιανή συνάρτηση θα δοθεί από τον τύπο

$$L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - U(\mathbf{q}) \quad (2.9)$$

Διαφορίζοντας την παραπάνω σχέση θα προκύψει το εξής

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.10)$$

Το Q_i συμβολίζει τις γενικευμένες δυνάμεις που ασκούνται πάνω στις αρθρώσεις του βραχίονα και αντιστοιχούν στις μεταβλητές q_i . Οι γενικευμένες δυνάμεις αντιπροσωπεύουν όλες τις δυνάμεις που ασκούνται εκτός από τις αδρανειακές δυνάμεις και τις δυνάμεις βαρύτητας. Γενικά μπορούμε να θεωρήσουμε την εξίσωση:

$$\mathbf{Q} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}_u^T \mathbf{F}_{ext} - \boldsymbol{\tau}_{friction} \quad (2.11)$$

όπου το $\boldsymbol{\tau}$ συμβολίζει τις ροπές των επενεργητών, το \mathbf{F}_{ext} συμβολίζει τις ροπές/δυνάμεις που ασκούνται και δρουν πάνω στον ρομποτικό μηχανισμό και το $\boldsymbol{\tau}_{friction}$ συμβολίζει τις ροπές/δυνάμεις τριβής που ασκούνται στο σύστημα.

Στο τροχοφόρο ρομπότ θα υπάρχουν δύο δυνάμεις στους τροχούς F_l και F_r . Επιπλέον, στο κέντρο του τροχοφόρου δημιουργείται μία γενικευμένη δύναμη F_Σ και μία ροπή M_Σ ως προς τον κάθετο άξονα του επιπέδου. Άρα, το συνολικό διάνυσμα $\boldsymbol{\tau} = [F_\Sigma \ M_\Sigma]^T$, όπου θα ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$F_\Sigma = F_l + F_r$$

$$M_\Sigma = \frac{F_r - F_l}{b}$$

Άρα, η κινηματική του ενέργεια θα είναι:

$$T = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2$$

και η δυναμική του ενέργεια θα είναι:

$$U = 0$$

καθώς το όχημα βρίσκεται πάνω στο επίπεδο. Οπότε, η συνάρτηση Lagrange θα είναι:

$$L = T = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2$$

Άρα, οι διαφορικές εξισώσεις που θα προκύψουν θα είναι οι εξής:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q + \lambda A(q)$$

όπου ο όρος $\lambda A(q)$ αποτελεί τις δυνάμεις περιορισμών, με τον πίνακα A να είναι ο πίνακας που προέκυψε από την κινηματική ανάλυση. Οπότε, τώρα θα εξετάσουμε για τον κάθε βαθμό ελευθερίας που έχουμε στο σύστημα την διαφορική του σχέση:

- Για $q_1 = x$ ισχύει ότι:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} = \frac{\partial}{\partial \dot{x}} \left(\frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \right) = m\dot{x} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) = m\ddot{x}$$

- Για $q_2 = y$ ισχύει ότι:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} = \frac{\partial}{\partial \dot{y}} \left(\frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \right) = m\dot{y} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right) = m\ddot{y}$$

- Για $q_3 = \theta$ ισχύει ότι:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_3} = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} \left(\frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \right) = I\dot{\theta} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_3} \right) = I\ddot{\theta}$$

Επίσης, ισχύει ότι $\frac{\partial L}{\partial q} = [0 \ 0 \ 0]^T$. Το επόμενο βήμα είναι η εύρεση των

γενικευμένων δυνάμεων που ασκούνται στο τροχοφόρο. Επίσης, στο τροχοφόρο ασκούνται και τριβές κατά την κίνηση του ρομπότ. Η τριβή αυτή ονομάζεται ιξώδης τριβή. Επιπλέον, σε περιόδους στατικότητας δημιουργείται τριβή Coulomb. Έτσι, για κάθε βαθμό ελευθερίας θα υπάρχει και η εξής σχέση

$$Q_1 = F_x - T_x = F_\Sigma \cos(\theta) - (v_1 v \cos(\theta) + c_1 \operatorname{sgn}(v))$$

$$Q_2 = F_y - T_y = F_\Sigma \sin(\theta) - (v_1 v \sin(\theta) + c_2 \operatorname{sgn}(v))$$

$$Q_3 = M_z - M_T = M_\Sigma - (v_3 \omega + c_3 \operatorname{sgn}(\omega))$$

Για τις δυνάμεις περιορισμού έχουμε ότι ισχύει:

$$\lambda A(q) = \lambda \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Οπότε, οι εξισώσεις κίνησης θα γίνουν οι εξής:

$$m\ddot{x} = F_\Sigma \cos(\theta) - (v_1 v \cos(\theta) + c_1 \operatorname{sgn}(v)) + \lambda \sin(\theta)$$

$$m\ddot{y} = F_\Sigma \sin(\theta) - (v_1 v \sin(\theta) + c_2 \operatorname{sgn}(v)) - \lambda \cos(\theta)$$

$$I\ddot{\theta} = M_\Sigma - (v_3 \omega + c_3 \operatorname{sgn}(\omega))$$

Το επόμενο βήμα είναι να απαλείψουμε τον παράγοντα λ . Οπότε ισχύει

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_\Sigma \cos(\theta) - (v_1 v \cos(\theta) + c_1 \operatorname{sgn}(v)) + \lambda \sin(\theta) \\ m\ddot{y} = F_\Sigma \sin(\theta) - (v_1 v \sin(\theta) + c_2 \operatorname{sgn}(v)) - \lambda \cos(\theta) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} m\ddot{x} \cos(\theta) = F_{\Sigma} \cos^2(\theta) - (v_1 v \cos(\theta) + c_1 \operatorname{sgn}(v \cos(\theta))) \cos(\theta) + \lambda \sin(\theta) \cos(\theta) \\ m\ddot{y} \sin(\theta) = F_{\Sigma} \sin^2(\theta) - (v_1 v \sin(\theta) + c_1 \operatorname{sgn}(v \sin(\theta))) \sin(\theta) - \lambda \cos(\theta) \sin(\theta) \end{cases}$$

$$\Rightarrow m\ddot{x} \cos(\theta) + m\ddot{y} \sin(\theta) = F_{\Sigma} - (v_1 v + c_1 \operatorname{sgn}(v))$$

Την σχέση αυτή θα την χρησιμοποιήσουμε για την εξαγωγή των τελικών διαφορικών εξισώσεων. Επίσης, εάν διαφορίσουμε τις σχέσεις της (2.6), τότε θα προκύψει ότι:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \vartheta \Rightarrow \ddot{x} = \dot{v} \cos \vartheta - \omega v \sin \vartheta \\ \dot{y} = v \sin \vartheta \Rightarrow \ddot{y} = \dot{v} \sin \vartheta + \omega v \cos \vartheta \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \ddot{x} \cos \vartheta = \dot{v} \cos^2 \vartheta - \omega v \sin^2 \vartheta \\ \ddot{y} \sin \vartheta = \dot{v} \sin^2 \vartheta + \omega v \cos^2 \vartheta \end{cases}$$

$$\Rightarrow \ddot{x} \cos \vartheta + \ddot{y} \sin \vartheta = \dot{v}$$

Με την χρήση αυτών των δύο αποδείξεων, θα καταλήξουμε στις τελικές διαφορικές εξισώσεις:

$$m\dot{v} = F_{\Sigma} - (v_1 v + c_1 \operatorname{sgn}(v)) \quad (2.12)$$

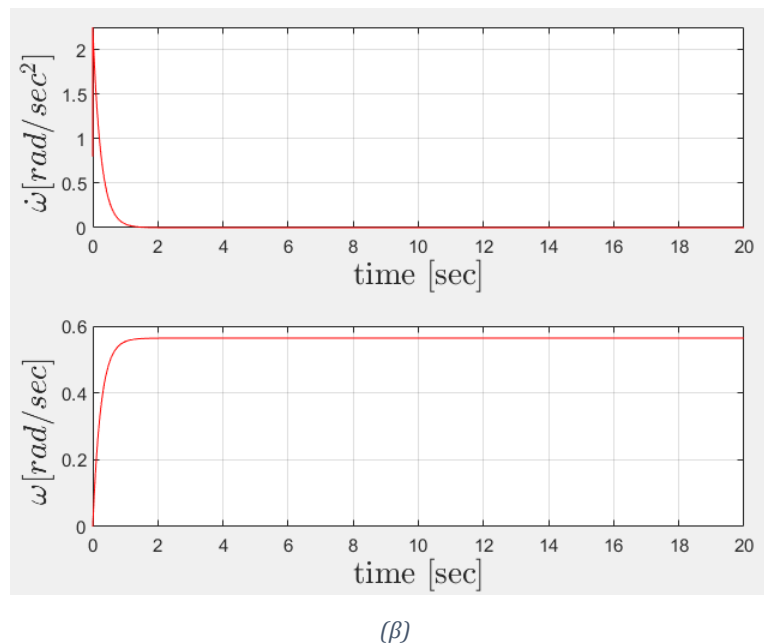
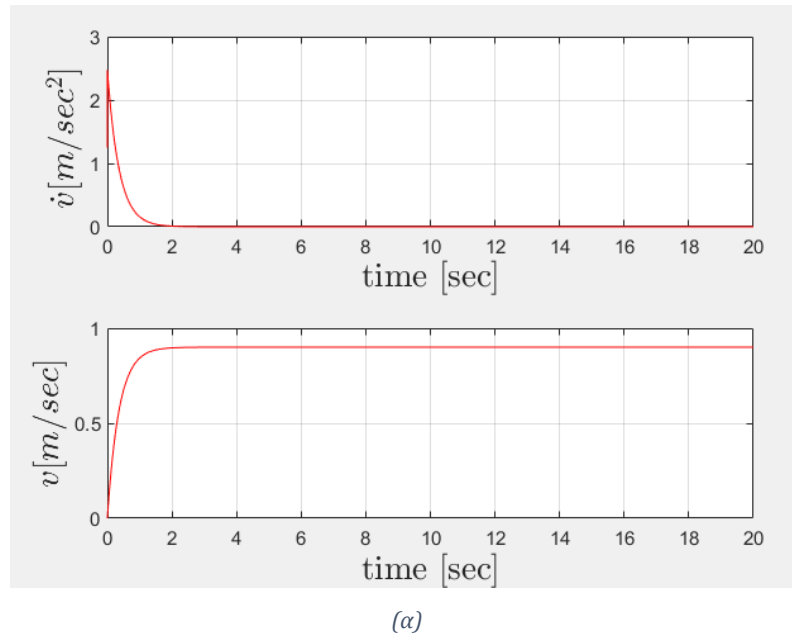
$$I\dot{\omega} = M_{\Sigma} - (v_2 \omega + c_2 \operatorname{sgn}(\omega)) \quad (2.13)$$

Καταλήξαμε στις εξισώσεις κίνησης των σχέσεων (2.12) και (2.13) που ισχύουν από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα. Οπότε τώρα, θα δούμε και κάποιες δυναμικές προσομοιώσεις. Έχοντας ως είσοδο την δύναμη και την ροπή στο σύστημα, θα δούμε πως θα κυμανθεί η γραμμική και γωνιακή ταχύτητα του σώματος. Το επόμενο βήμα είναι να προσομοιώσουμε τις παραπάνω εξισώσεις ώστε να δούμε την σωστή τους δυναμική απόκριση. Έτσι, στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι παράμετροι του τροχοφόρου.

Παράμετρος	Τιμή
m	0.8 kg
I	0.625 kg m^2
v_1	2.2 N sec/m
v_2	2.2 N sec/m
c_1	0.91 N sec/m
c_2	0.91 N sec/m

Πίνακας 1. Παράμετροι τροχοφόρου.

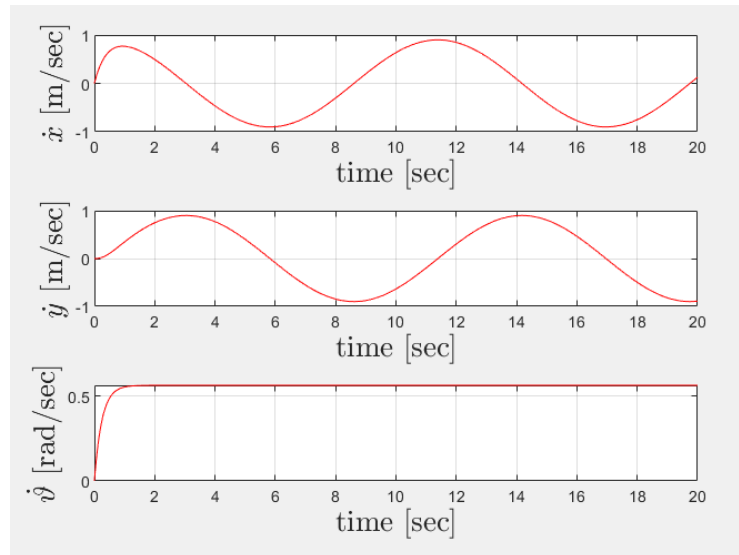
Έστω ότι έχουμε σαν είσοδο το διάνυσμα $\tau = [1.5 \text{ N } 0.5 \text{ Nm}]^T$. Τότε, θα πάρουμε την εξής απόκριση της απόκριση της γραμμικής και της γωνιακής ταχύτητας (βλ. σχήμα 3). Παρατηρούμε πως με την εφαρμογή της δύναμης και της ροπής στο τροχοφόρο, αυτό εκτελεί μετά χρόνο τ ομαλή κυκλική κίνηση γύρω από τον άξονα περιστροφής ICC.



Σχήμα 3. Απόκριση τροχοφόρου ρομπότ με βηματική είσοδο: (α) Γραμμική ταχύτητα ρομπότ, (β) Γωνιακή ταχύτητα ρομπότ.

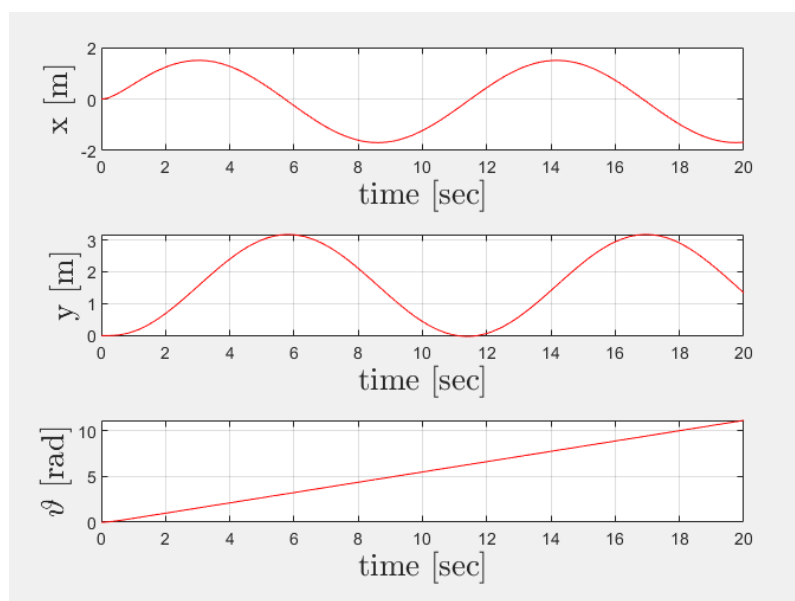
Επίσης, με την εφαρμογή του ευθύ κινηματικού μοντέλου, μπορούμε να προσδιορίσουμε και τις γενικευμένες ταχύτητες του τροχοφόρου (βλ. σχήμα 4).

Παρατηρούμε πως οι ταχύτητες στον x άξονα και στον y άξονα είναι περιοδικές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως με την σταθερή γωνιακή ταχύτητα και γραμμική ταχύτητα που εφαρμόζεται στο σώμα, αυτό θα εκτελεί μία ομαλή κυκλική κίνηση. Έτσι αντικρίζεται η περιοδικότητα στις γενικευμένες γραμμικές ταχύτητες.



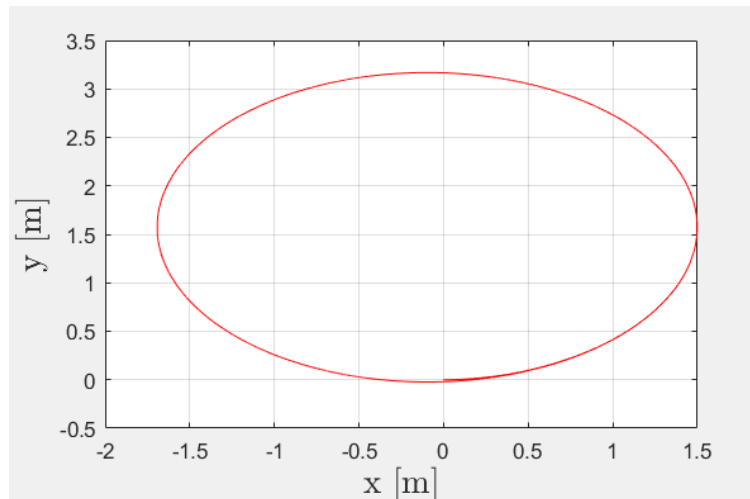
Σχήμα 4. Γενικευμένες ταχύτητες τροχοφόρου κατά την εφαρμογή του διανύσματος τ .

Με την χρήση της αριθμητικής ολοκλήρωσης κατά **Euler** μπορούμε να εκτιμήσουμε την θέση του τροχοφόρου κάθε χρονική στιγμή και να δούμε πως εξελίσσεται η τροχιά του στους αντίστοιχους άξονες (βλ. σχήμα 5). Παρατηρούμε πως ο προσανατολισμός του εξελίσσεται γραμμικά στον χρόνο, πράγμα το οποίο ισχύει διότι περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα.



Σχήμα 5. Θέση και προσανατολισμός τροχοφόρου ρομπότ κατά την εφαρμογή του σταθερού διανύσματος τ .

Επίσης, όσο αφορά την χρονική εξέλιξη της θέσης του στο επίπεδο είναι περιοδική ως προς τους αντίστοιχους άξονες. Σύμφωνα με τις κινηματικές εξισώσεις του μοντέλου, οι ταχύτητες \dot{x} και \dot{y} εξαρτώνται από τον προσανατολισμό. Συνεπώς, και η θέση του στον άξονα x και y θα εξαρτάται από τον προσανατολισμό του τροχοφόρου. Έτσι, δικαιολογείται η περιοδικότητα της των σημάτων. Τέλος, στο σχήμα 6 παρατηρούμε την κυκλική κίνηση που κάνει το τροχοφόρο με την εφαρμογή μιας σταθερής γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας.



Σχήμα 6. Πορεία τροχοφόρου ρομπότ στον χώρο.

2.3. Σύστημα Ελέγχου Τροχοφόρου Ρομπότ

Με την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης (κινηματική, δυναμική ανάλυση) μπορούμε να σχεδιάσουμε και να αναπτύξουμε το σύστημα ελέγχου του τροχοφόρου. Ο ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο παράλληλος **PID** (*Proportional Integral Derivative*). Αποτελεί την απλούστερη δομή ελέγχου με αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα σήματα ελέγχου που παράγονται από τον συγκεκριμένο ελεγκτή έχουν την μορφή της σχέσης (2.14).

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}_P(\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) + \mathbf{K}_I \int_0^t (\mathbf{q}_d - \mathbf{q})dt + \mathbf{K}_D(\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) \quad (2.14)$$

Δεχόμενος μιας επιθυμητής τιμή \mathbf{q}_d , ο ελεγκτής προσπαθεί να την εφαρμόσει στο δυναμικό σύστημα, έτσι ώστε να την εκτελέσει. Για να εκτελεστεί σωστά την εντολή το σύστημα, θα πρέπει να αναδρά κάθε χρονική στιγμή την έξοδο του στον controller, έτσι ώστε αυτός να δέχεται στην ουσία την διαφορά της επιθυμητής από την πραγματική τιμή. Αυτή η διαφορά ονομάζεται σφάλμα και ο σκοπός του ελεγκτή είναι να το μηδενίσει.

Έτσι, θα μπορέσει το πραγματικό σύστημα να εκτελέσει μια επιθυμητή κίνηση. Όπως παρατηρούμε και από την σχέση (2.14), υπάρχουν τρεις όροι πολλαπλασιασμένοι με έναν όρο που ονομάζεται κέρδος. Τα κέρδη στην ουσία λειτουργούν ως ενισχυτές των σημάτων ώστε να μην φθίνουν με την πάροδο του χρόνου.

Στην περίπτωση του τροχοφόρου χρησιμοποιήθηκαν δύο PID ελεγκτές για την γραμμική και την γωνιακή ταχύτητα, τις οποίες θα εφαρμόζουμε στο σύστημα. Με την δημιουργία των κατάλληλων σημάτων που θα λειτουργούν σαν ροπές/δυνάμεις στο σύστημα, θα μετακινείται το τροχοφόρο. Έτι, θα έχουμε τις παρακάτω εξισώσεις ελέγχου για το σύστημα.

$$F_{\Sigma} = K_{P_1}(v_d - v) + K_{I_1} \int_0^t (v_d - v)dt + K_{D_1}(\dot{v}_d - \dot{v})$$

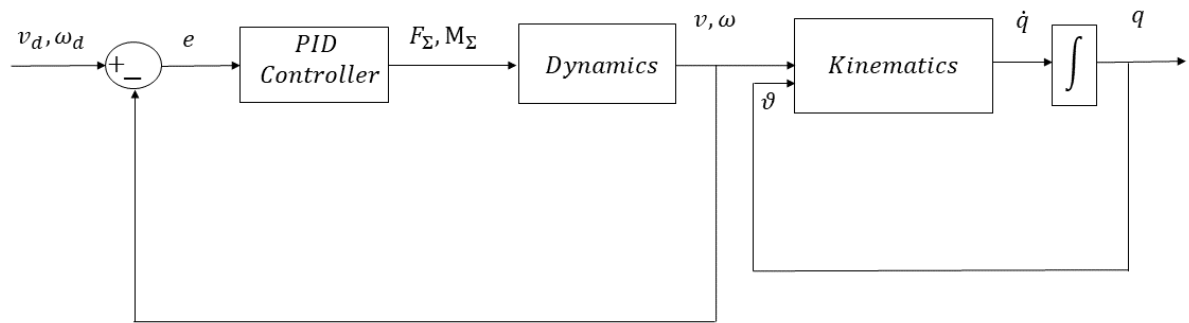
$$M_{\Sigma} = K_{P_2}(\omega_d - \omega) + K_{I_2} \int_0^t (\omega_d - \omega)dt + K_{D_2}(\dot{\omega}_d - \dot{\omega})$$

Με την εφαρμογή αυτών των τύπων θα μπορέσουμε να ελέγξουμε το τροχοφόρο με επιθυμητές εντολές ταχύτητας. Μέσω προσομοιώσεων βρέθηκαν τα κατάλληλα κέρδη ώστε να μην υπάρχουν υπερψώσεις στο σύστημα ούτε να έχουμε αργή σύγκλιση. Οι τιμές παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στον πίνακα 2.

Παράμετρος	Τιμή
K_{p_1}	5
K_{p_2}	4
K_{i_1}	5
K_{i_2}	3.5
K_{d_1}	0.615
K_{d_2}	0.425

Πίνακας 2. Κέρδη PID ελεγκτών του τροχοφόρου.

Επίσης, στο σχήμα 7 εμφανίζεται το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος κλειστού βρόχου. Με την εφαρμογή των επιθυμητών ταχυτήτων, θα εισάγεται το σφάλμα στον ελεγκτή για να δημιουργεί τα κατάλληλα σήματα δύναμης και ροπής, τα οποία θα εισαχθούν στο δυναμικό μοντέλο. Οι ταχύτητες του μοντέλου που προκύπτουν θα αποτελούν ως είσοδο στο κινηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό των γενικευμένων ταχυτήτων. Τέλος, με χρήση της αριθμητικής ολοκλήρωση κατά Euler θα μπορέσουμε να βρούμε και την θέση του τροχοφόρου στο επίπεδο.



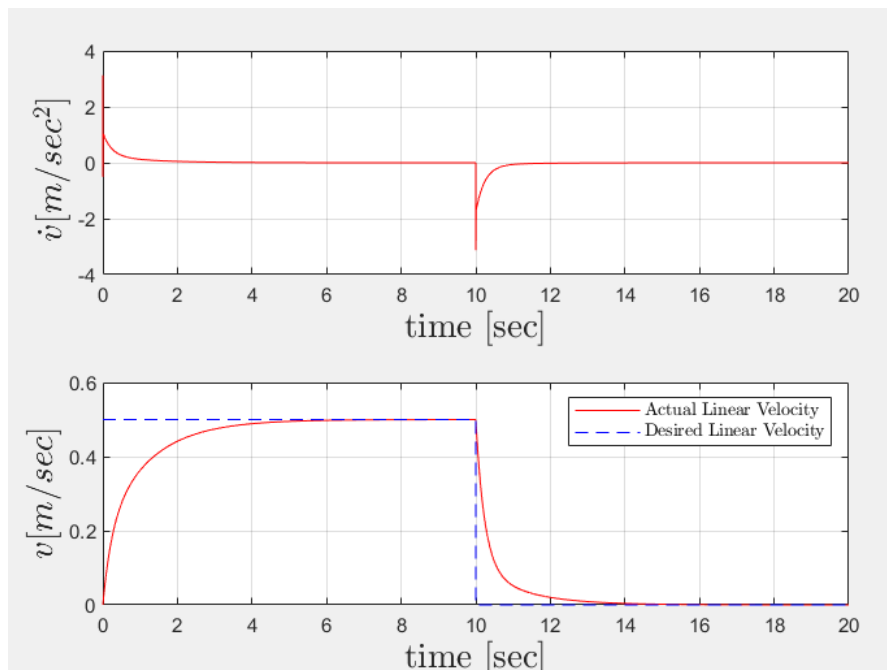
Σχήμα 7. Μπλοκ διάγραμμα συστήματος κλειστού βρόχου.

Ως είσοδο στο σύστημα θα εισάγουμε τις δύο ταχύτητες ω_d και v_d .

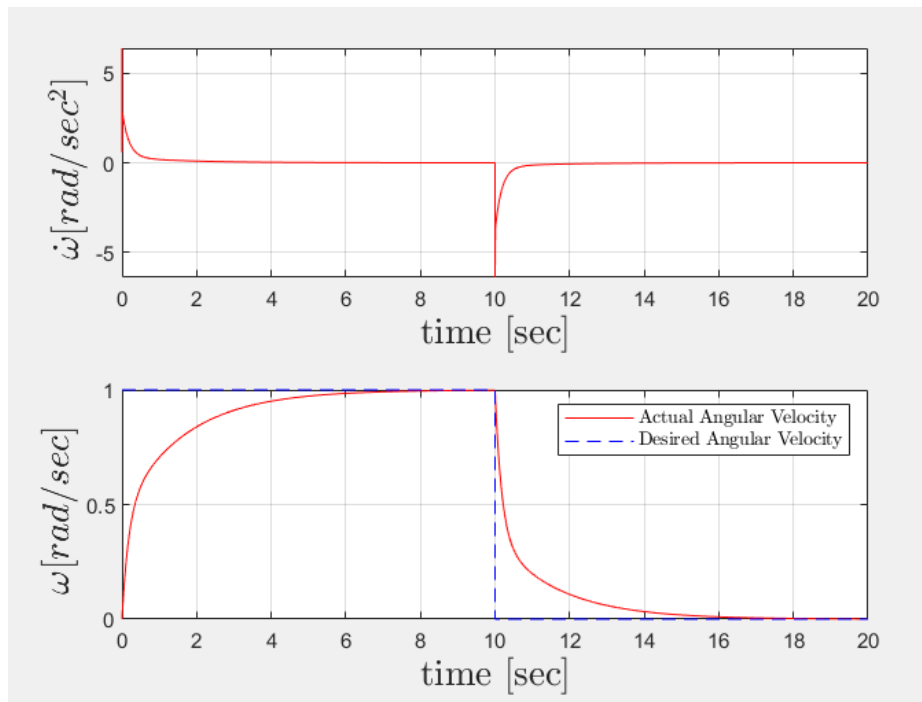
$$v_d = \begin{cases} 0.5, & 0 \leq t \leq 10 \text{ sec} \\ 0, & 10 < t \leq 20 \text{ sec} \end{cases}$$

$$\omega_d = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 10 \text{ sec} \\ 0, & 10 < t \leq 20 \text{ sec} \end{cases}$$

Κατά την προσομοίωση του ελεγκτή διαπιστώθηκε πως με τα κέρδη του πίνακα 2 έχουμε γρήγορη σύγκλιση χωρίς ταλαντώσεις για τις ταχύτητες. Αυτό το διαπιστώνουμε και στο σχήμα 8. Παρατηρούμε πως ο ελεγκτής εφαρμόζει σωστά τα σήματα στο σύστημα, με την έξοδο να μην παρουσιάζει υπερύψωση.



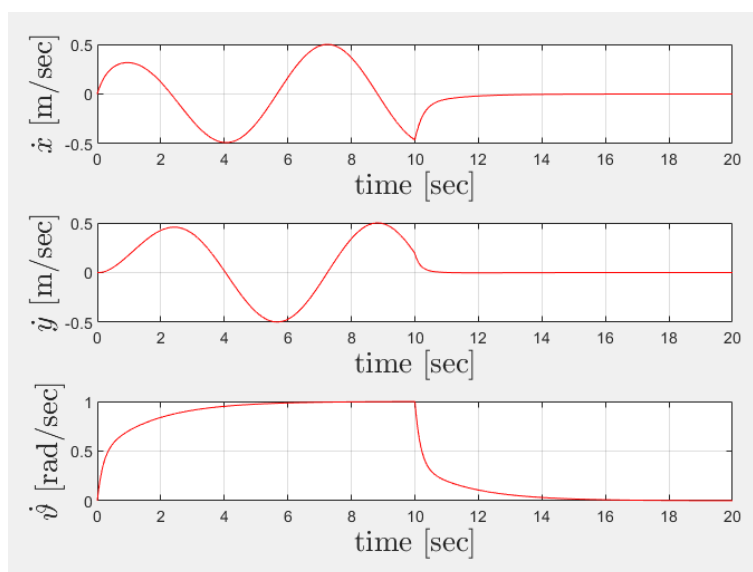
(α)



(β)

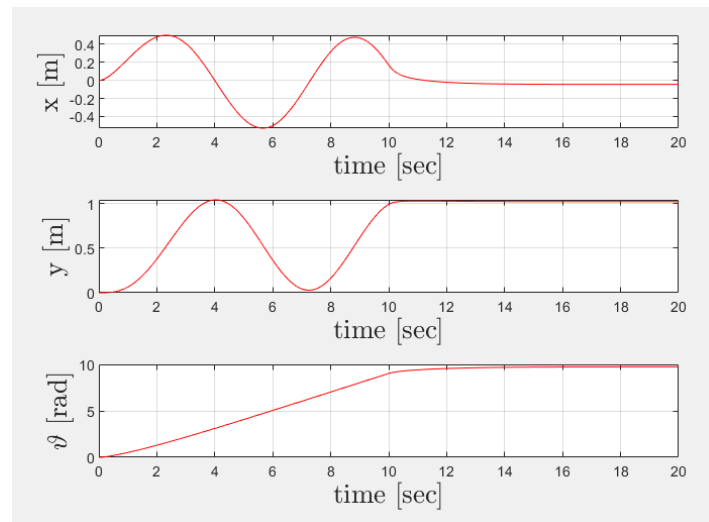
Σχήμα 8. Απόκριση συστήματος κλειστού βρόχου: (α) Γραμμική ταχύτητα κλειστού βρόχου. (β) Γωνιακή ταχύτητα κλειστού βρόχου.

Οι ταχύτητες \dot{x} και \dot{y} παρατηρούμε πως είναι περιοδικές για ένα χρονικό διάστημα (βλ. σχήμα 9). Αυτό συμβαίνει λόγω της γωνιακής ταχύτητας που εφαρμόζεται στο τροχοφόρο για τα πρώτα 10 sec. Εν συνεχεία παρατηρούμε πως αποσβένουν καθώς δεν δίνονται εντολές, έτσι ώστε να σταματήσει το τροχοφόρο.



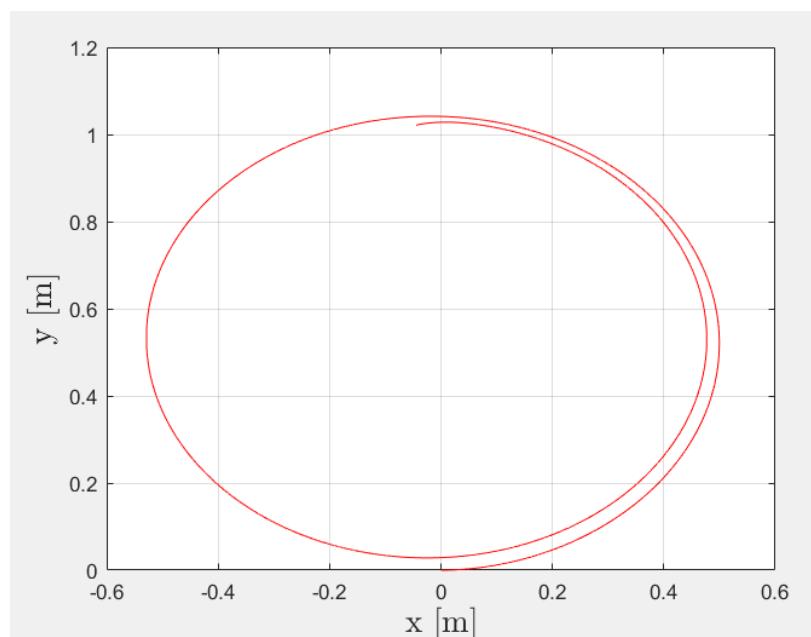
Σχήμα 9. Απόκριση γενικευμένου διανύσματος ταχυτήτων τροχοφόρου ρομπότ.

Σε κάθε χρονική στιγμή ολοκληρώνεται το γενικευμένο διάνυσμα ταχυτήτων και παράγεται το διάνυσμα θέσης και προσανατολισμού του ρομπότ. Λόγω της εφαρμογής μιας γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας στο σύστημα, αυτό θα εκτελεί κυκλική κίνηση καθώς κινείται γύρω από τον άξονα ICC . Έτσι, εξηγείται η περιοδικότητα των κινήσεων στον x και y άξονα (βλ. σχήμα 10).



Σχήμα 10. Απόκριση θέσης και προσανατολισμού τροχοφόρου ρομπότ.

Τέλος, στο σχήμα 11 βλέπουμε την πορεία που διαγράφει στο επίπεδο, μέχρι να σταματήσει να δέχεται εντολές. Παρατηρούμε πως η κίνησή του αντικατοπτρίζει τις εντολές που του δόθηκαν να προσομοιώσει. Έτσι, με αυτά τα αποτελέσματα, το επόμενο βήμα είναι να κατασκευαστεί και να προσομοιωθεί η κίνησή του στην πράξη.



Σχήμα 11. Πορεία τροχοφόρου ρομπότ στο επίπεδο.

Κεφάλαιο 3. Υλοποίηση Αυτόνομου Οχήματος

3.1. Διαστασιολόγηση Επενεργητών Αυτόνομου Οχήματος

Ένα σημαντικό ζήτημα πριν την αγορά και την κατασκευή του αυτόνομου οχήματος καθώς και των απαιτούμενων αισθητήρων και επενεργητών είναι η κατάλληλη διαστασιολόγηση ως προς την απαιτούμενη ροπή που πρέπει να παράγουν οι κινητήρες του και έπειτα, την απαιτούμενη τροφοδοσία για την συνολική διάταξη. Για την επιλογή του κατάλληλου DC κινητήρα καθώς και του αντίστοιχου drive, πρέπει να επιληφθούν οι παρακάτω παράγοντες για τον προσδιορισμό της μέγιστης ροπής

- Μικτό βάρος οχήματος (Gross Vehicle Weight)
- Αντίσταση κύλισης (Rolling Resistance)
- Βαρυτική Αντίσταση (Grade Resistance)
- Δύναμη Επιτάχυνσης (Acceleration Force)

Το μικτό βάρος οχήματος ορίζεται ως το ολικό βάρος του οχήματος (σασί, τροχοί, κινητήρες, κλπ) μαζί με τα επιμέρους components (αισθητήρες, παροχή ρεύματος, μικροεπεξεργαστή, κλπ).

Η αντίσταση κύλισης αποτελεί την αντίθετη δύναμη την οποία το όχημα πρέπει να ξεπεράσει εξαιτίας την στρωφικής κίνησης μεταξύ της επιφάνειας κίνησης του οχήματος και το σημείο πρόσφυσης των ελαστικών. Η αντίσταση κύλισης εξαρτάται από τον συντελεστή περιστροφικής τριβής (rolling friction coefficient) που μεταβάλλεται αναλόγως το υλικό κατασκευής των ελαστικών και την σκληρότητα/τραχύτητα της επιφάνειας κίνησης.

$$RR = GVW \cdot C_{rr} \quad (3.1)$$

όπου GVW το μικτό βάρος οχήματος και C_{rr} ο συντελεστή περιστροφικής τριβής.

Contact Surface	C_r
Concrete(good/fair/poor)	0.010/0.015/0.020
Asphalt(good/fair/poor)	0.012/0.017/0.022
Macadam(good/fair/poor)	0.015/0.022/0.037
Snow(2 inch/4 inch)	0.025/0.037
Dirt(smooth/sandy)	0.025/0.037
Mud(firm/medium/soft)	0.037/0.090/0.150
Grass(firm/soft)	0.055/0.075
Sand(firm/soft/dune)	0.060/0.150/0.300

Πίνακας 3. Συντελεστές περιστροφικής τριβής ανάλογα της επιφάνειας.

Η βαρυτική αντίσταση αποτελεί μια μορφή βαρυτικής δύναμης που τείνει να τραβήξει το όχημα πίσω κατά την άνοδο του σε κεκλιμένη επιφάνεια.

$$GR = GVW \cdot \sin(\theta) \quad (3.2)$$

όπου GVW το μικτό βάρος οχήματος και θ η μέγιστη γωνία κλίσης του κεκλιμένου επιπέδου.

Η δύναμη επιτάχυνσης βοηθάει το όχημα να φτάσει στην προκαθορισμένη ταχύτητα από την αδράνεια του σε κάποιο προκαθορισμένο χρονικό διάστημα και έχει άμεση σχέση με την ροπή του κινητήρα καθώς όσο πιο ικανοποιητική είναι η παραγόμενη ροπή, τόσο ελαττώνεται το χρονικό διάστημα για την απόκτηση της επιθυμητής ταχύτητας.

$$FA = \alpha \cdot \frac{GVW}{g} \quad (3.3)$$

όπου α είναι η απαιτούμενη επιτάχυνση και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η συνολική ροπή που χρειάζεται ο τροχός για να κινηθεί είναι ταυτόσημος με την ροπή που χρειάζεται να παραχθεί από τον κινητήρα, για τις αντίστοιχες προδιαγραφές και η εξίσωσή της είναι:

$$\tau = R_f \cdot RR + GR + FA \cdot r_{wheel} \quad (3.4)$$

όπου r_{wheel} είναι η ακτίνα της ρόδας και R_f ο συντελεστής αντίστασης με τυπικές τιμές 1.1 έως 1.5. Ο συντελεστής αντίστασης εκφράζει της απώλειες λόγω τριβής καθώς και διάφορες απώλειες λόγω των ρουλεμάν στον άξονα του κινητήρα.

Το άθροισμα των παραπάνω δυνάμεων αποτελεί την οριζόντια δύναμη που ασκείται από τους τροχούς στο έδαφος και απαιτείται για την κίνηση του οχήματος, για

συγκεκριμένες προδιαγραφές. Στην περίπτωση που ο σχεδιασμός έχει 2 τροχούς, η δύναμη που ασκείται από τον κάθε τροχό (για ευθύγραμμη κίνηση) ισούται με το ήμισυ της υπολογισμένης δύναμης.

Η απαιτούμενη ροπή μπορεί να επιτευχθεί είτε με την τοποθέτηση ενός κινητήρα μαζί με την αντίστοιχη οδήγηση κατευθείαν, στον τροχό, είτε με την χρήση κάποιας βοηθητικής μετάδοσης πολλαπλασιάζοντας μια μικρότερη ροπή έως ότου φτάσει στην απαιτούμενη.

Εν συνέχεια, γνωρίζοντας την απαιτούμενη ροπή και θεωρώντας την σταθερή, χρειάζεται να προσδιορίσουμε:

- Τις ηλεκτρικές απαιτήσεις (ρεύμα, τάση και απαιτούμενη ισχύ)
- Ύπαρξη και προσδιορισμός λόγου διάδοσης μειωτήρα
- Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής - ταχύτητας

Η ταχύτητα περιστροφής ενός DC κινητήρα είναι ανάλογη με την τάση που εφαρμόζεται στον ρότορα. Επιπλέον, η ισχύς που παράγεται από τον κινητήρα είναι ανάλογη με την τάση πολλαπλασιασμένη με το ρεύμα που διαρρέει τον ρότορα.

$$P = V I = T \omega \quad (3.5)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτει ότι για να αυξηθεί η ισχύς του κινητήρα, πρέπει να αυξηθεί είτε η τάση είτε η παροχή του ρεύματος. Συνήθως, κατά την διαστασιολόγηση DC κινητήρα παρέχεται η μέγιστη τάση που είναι σχεδιασμένος να αντέξει καθώς πολλά components έχουν περιορισμένη ανοχή στο ρεύμα που τα διαρρέει.

Η ύπαρξη μειωτήρα επιτρέπει στον κινητήρα να παράγει μεγαλύτερη ροπή, προσφέροντας μείωση στην ταχύτητα περιστροφής καθώς ο άξονας περιστροφής του είναι μικρότερος από τον άξονα του κινητήρα. Στους περισσότερους DC κινητήρες, υπάρχει μειωτήρας καθώς έχουν μεγάλο rpm και μικρή ροπή.

$$n \geq \frac{\sqrt{R_a P_\phi / \eta}}{K_T \omega_\phi} \quad (3.6)$$

όπου για κάποιο επίπεδο ισχύος, ο λόγος $\frac{\sqrt{R_a}}{K_T}$ είναι σταθερός και ίσος με 60 και **η** ο συντελεστής απόδοσης ισχύος. Τέλος, για την παρούσα διαστασιολόγηση, θα κάνουμε τις εξής παραδοχές:

Παραδοχή 1

Για την αρχική επιλογή των κινητήρων, υποθέτουμε ότι υπάρχει αρκετή τριβή μεταξύ των τροχών και της επιφάνειας, οπότε το όχημα δεν θα ολισθήσει. Καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις, οι περισσότεροι τροχοί σπινάρουν καθώς το ρομποτικό όχημα ξεκινάει με την μέγιστη ταχύτητα, η πιθανή λύση είναι η σταδιακή αύξηση της ταχύτητας του κινητήρα αντί για την παροχή της μέγιστης ταχύτητας.

Παραδοχή 2

Κατά την εύρεση κατάλληλων κινητήρων, λαμβάνουμε υπόψιν την ύπαρξη θορύβων και αστοχιών στα εκάστοτε datasheet. Κάποια παραδείγματα είναι:

- Το μέγιστο βάρος που προτείνει ο κατασκευαστής μπορεί να αποκλίνει από εκείνο που αντέχει ο άξονας του κινητήρα.
- Παρουσία ηλεκτρικού θορύβου στο εσωτερικό κύκλωμα του κινητήρα.
- Απόκλιση από την ονομαστική ροπή που προσφέρει ο κινητήρας στον μειωτήρα που μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του.

Παραδοχή 3

Για την ηλεκτρική παροχή του συστήματος κατά την λειτουργία του, θα χρησιμοποιηθούν μπαταρίες λιθίου (εμπορίου) για ευκολία στην ανάπτυξη του λογισμικού και των διαφόρων πειραμάτων. Με αυτή την παραδοχή, η επιλογή παροχής τάσης καθώς και η αυτονομία του οχήματος θα είναι πεπερασμένη.

Παραδοχή 4

Για την επιλογή των μηχανικών εξαρτημάτων, λόγω της έλλειψης των απαιτούμενων εργαλείων καθώς και της αντίστοιχης τεχνογνωσίας, θα χρησιμοποιήσουμε σασί ή/και ρόδες με αρκετό χώρο ή κατάλληλη μηχανική πρόσδεση των διάφορων εξαρτημάτων (μπαταριών, μικροεπεξεργαστών, breadboard), αποφεύγοντας την παραμετροποίηση του.

Οι προδιαγραφές του συστήματος για την σχεδιασμό και την κατασκευή φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Χαρακτηριστικά Συστήματος	Τιμές
Βάρος του οχήματος [kg]	1.5 kg
Βάρος ρόδας [kg]	2 g
Ακτίνα Ρόδας [m]	50 mm
Επιθυμητή Μέγιστη Ταχύτητα [m/s]	0.6 m/sec
Επιθυμητή Μέγιστη Επιτάχυνση [m/s^2]	2 m/sec^2
Μέγιστη γωνία κλίσης [deg]	2 deg
Χειρότερη επιφάνεια πρόσφυσης	Τσιμέντο (μέτριο)

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά Αυτόνομου Οχήματος.

Με βάση τις παραπάνω προδιαγραφές έχουμε ότι

$$Total\ Force = RR + GR + FA = 1.5 \cdot 0.015 + 1.5 \cdot \sin(2^\circ) + 1 \cdot \frac{1.5}{9.81}$$

$$Total\ Force = 0.380\ N$$

Για την επιλογή του μεγαλύτερου συντελεστή $R_f = 1.5$, η ροπή που απαιτεί ο κάθε κινητήρας είναι:

$$\tau = r_{wheel} \cdot Total\ Force \cdot 1.5 = 1.5 \cdot 0.380 \cdot 0.05 = 0.0285\ Nm$$

Καθώς η επιθυμητή (γραμμική) ταχύτητα είναι ίση με 0.1 m/s , η επιθυμητή γωνιακή ταχύτητα θα είναι:

$$\omega = \frac{0.6}{0.05} = 12\ rad/s = 115\ rpm$$

Η μέγιστη απαίτηση ισχύος θα είναι:

$$P = T \cdot \omega = 0.0285 \cdot 12 = 0.342\ W$$

Θεωρώντας ως ελάχιστη τάση που προσφέρεται από την μπαταρία $V = 5\ V$, το μέγιστο ρεύμα που θα διαπερνάει τους κινητήρες θα είναι:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{0.342}{5} = 0.0684\ A = 68.4\ mA$$

Καθώς θέλουμε να κρατήσουμε το οικονομικό κόστος της διάταξης και η ροπή που θέλουμε να παράγει ο κινητήρας να είναι μικρή, ο λόγος διάδοσης από τον μειωτήρα θα πρέπει να ικανοποιεί την σχέση, για απόδοση $\eta = 0.5$

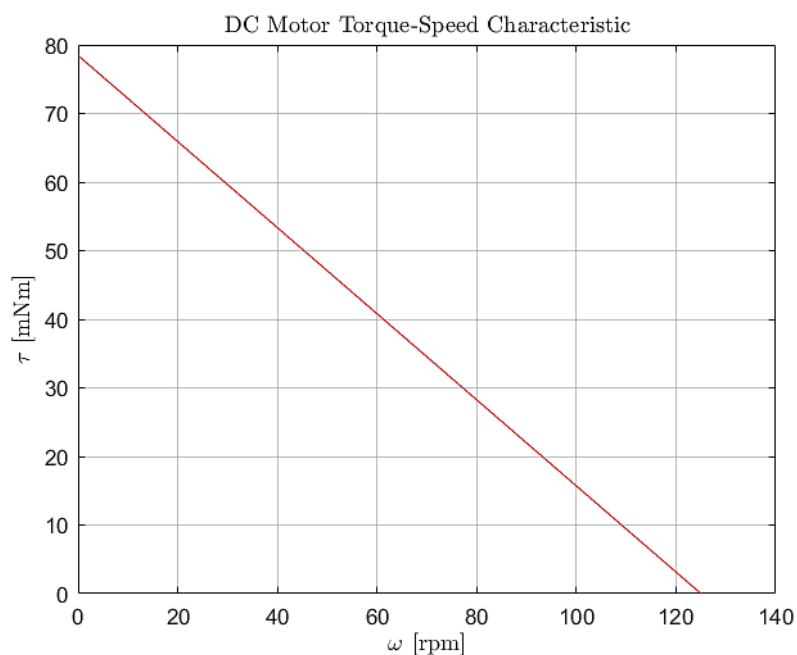
$$n \geq \frac{\sqrt{\frac{R_a P_\varphi}{\eta}}}{K_T \omega_\varphi} = \frac{60}{12} \sqrt{\frac{0.342}{0.5}} = 4.135$$

Άρα ψάχνουμε για κινητήρες που να ικανοποιούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά

Χαρακτηριστικά Μεγέθη	Τιμές
Ροπή	28.5 mNm
Γωνιακή ταχύτητα	115 rpm (χωρίς λόγο διάδοσης)
Ρεύμα	114 mA
Λόγο Διάδοσης	5

Πίνακας 5. Ελάχιστα χαρακτηριστικά επιλογής DC κινητήρα.

Με βάσει τα χαρακτηριστικά που προέκυψαν από το από τον πίνακα 5, μπορούμε να επιλέξουμε τον κινητήρα **Gear Motor TT**, καθώς έχει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά. Επίσης, μπορούμε να δούμε και από την χαρακτηριστική καμπύλη $T - \omega$ του σχήματος 12.



Σχήμα 12. Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας $T-\omega$.

3.2. Επιλογή Εξαρτημάτων Αυτόνομου Οχήματος

Με βάση τις απαιτήσεις, την διαστασιολόγηση καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας εργασίας, για την κατασκευή και την υλοποίηση του αυτόνομου οχήματος, η επιλογή των επενεργητών, των αισθητήρων και των διαφόρων μηχανοτρονικών εξαρτημάτων (σασί, τροχοί, μπαταρίες, καλωδιώσεις, κλπ.) θα πρέπει να πληρούν τις ανωτέρω προϋποθέσεις.

3.2.1. Σασί

Επιλέξαμε το **Robot Smart Car 2WD** καθώς αποτελεί μια οικονομική, απλή (από μηχανολογικής άποψης) και εύκολα επεκτάσιμη κατασκευή, επιτρέποντας την εύκολη εγκατάσταση των επιμέρους εξαρτημάτων. Επιπροσθέτως, παρέχει εξάρτημα για την τοποθέτηση μπαταριών για την τροφοδοσία, απλοποιώντας κατά αυτό τον τρόπο την κατασκευή του. Οι προδιαγραφές από τον κατασκευαστή είναι:

<i>Χαρακτηριστικά Σασί</i>	<i>Τιμές</i>
Διαστάσεις	0.22 x 0.147 m
Ακτίνα Τροχού	65 mm
Μικτό Βάρος	0.25 kg
Ωφέλιμο Φορτίο	1 kg
Υλικό (Σασί)	Plexi-Glass
Υλικό (Τροχοί)	Rubber

Πίνακας 6. Προδιαγραφές Σασί Οχήματος.



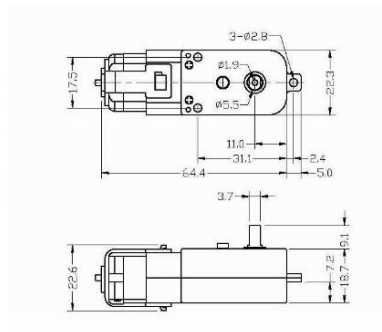
Σχήμα 13. Σασί και εξαρτήματα τροχοφόρου οχήματος.

3.2.2 DC Κινητήρες και Ηλεκτρονικά Οδήγησης

Οι DC κινητήρες που χρησιμοποιήσαμε είναι οι **DC Gear Motor TT** καθώς ήταν ενσωματωμένοι στο με την αγορά του kit, απλουστεύοντας την προσάρτηση τους στο σωματόδετο του οχήματος. Οι προδιαγραφές από τον κατασκευαστή είναι:

Χαρακτηριστικά Κινητήρων	Τιμές
Τάση Λειτουργίας	5 V
Ρεύμα	80 ~ 100 mA
Ταχύτητα Περιστροφής	125 rpm
Λόγος Απόσβεσης	1 : 48
Ροπή Εξόδου	0.8 kg cm
Διαστάσεις Άξονα	8 mm x 5.4 mm (διάμετρος)
Βάρος	17 gr

Πίνακας 7. Προδιαγραφές DC κινητήρα.



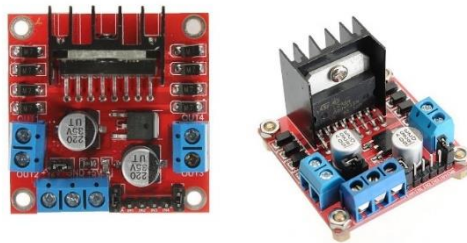
Σχήμα 14. DC κινητήρας με τις διαστάσεις του.

Επιπλέον, για τον έλεγχο ταχύτητας των κινητήρων και ως συνέπεια την παροχή ροπής, χρησιμοποιήσαμε τον **Dual Motor Driver Module L298N** που αποτελεί ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα για κινητήρες μεταξύ 5 ~ 35 V (DC).

Οι προδιαγραφές του κατασκευαστή για το συγκεκριμένο προϊόν είναι:

Χαρακτηριστικά Driver	Τιμές
Τάση Παροχής	5 ~ 35 V
Μέγιστο Ρεύμα	2 A
Μέγιστη Απαγωγή Ισχύος	20 W (για $T = 75^{\circ}\text{C}$)
Λογικά Επίπεδα (Τάση)	5 ~ 7 V (Για $V > 7.0\text{ V}$, χρησιμοποιείται regulator εντός της πλακέτας)
Λογικά Επίπεδα (Ρεύμα)	0 ~ 36 mA

Πίνακας 8. Προδιαγραφές Driver Dual Motor Module L298N.



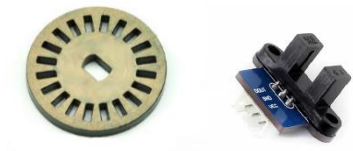
Σχήμα 15. Driver Dual Motor Module L298N DC Κινητήρων.



Σχήμα 16. Συνδεσμολογία Driver με τους DC κινητήρες.

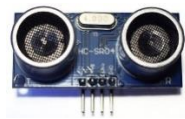
3.2.3. Αισθητήρες

Για την δημιουργία επαναληπτικού βρόχου ελέγχου, χρειάζεται η πληροφορία της ταχύτητας του εκάστοτε κινητήρα στο πλαίσιο της ανατροφοδότησης. Χρησιμοποιήσαμε για κάθε κινητήρα τον **Waveshare Encoder** (οπτικό κινητήρα στροφών) και τον αντίστοιχο πλαστικό τροχό για την μέτρηση (μέσω φωτός) τους. Επίσης, ο συγκεκριμένος οπτικός κωδικοποιητής μετράει την γωνιακή ταχύτητα.



Σχήμα 17. Encoder και ο τροχός για την μέτρηση των στροφών

Για την εντοπισμό εμποδίων και την ανίχνευση τους από το τροχοφόρο, ο αισθητήρας υπερήχων **HC-SR04** χρησιμοποιήθηκε. Ο αισθητήρας μπορεί να υπολογίσει την απόσταση από 2 ~ 400 cm με ακρίβεια εκατοστού.



Σχήμα 18. Αισθητήρας Υπερήχων HC – SR04.

Οι ανωτέρω αισθητήρες για την λειτουργία τους απαιτούν τάση 3 ~ 5 V.

3.2.4. Μικροελεγκτής

Για την επικοινωνία και τον έλεγχο της συνολικής διάταξης, η καλύτερη επιλογή αποτελεί η πλακέτα **Arduino Uno Rev3** καθώς χρησιμοποιείται σε πληθώρα διαφόρων project με το συγκεκριμένο. Κάποια από τα πλεονεκτήματά του είναι η ποικιλία του σε αισθητήρες/επενεργητές, η ευκολία στον προγραμματισμό του καθώς και το μεγάλο community για την εκμάθηση και την κατανόηση του.



Σχήμα 19. Μικροελεγκτής Arduino Uno Rev3

Στο σχήμα 19 εμφανίζονται και τα χαρακτηριστικά που έχει ο παρών μικροελεγκτής, κάνοντας τον ευέλικτο και μια αξιόπιστη λύση για την λειτουργία του συνολικού συστήματος του οχήματος.

- Μικτό Βάρος: 0.048kg
- Χώρα Προέλευσης: Ιταλία
- Μικροελεγκτής: ATmega328
- Τάση λειτουργίας: 5V
- Τάση εισόδου: 7-12V
- Τάση εισόδου (limits): 6-20V
- Ψηφιακά I/O Pins: 14
- Αναλογικές εισόδους: 6
- PWM εισόδους: 6
- DC Ρεύμα ανά I/O Pin: 20 mA
- DC Ρεύμα για 3.3V Pin: 50mA
- Μνήμη Flash: 32 KB
- Μνήμη SRAM: 2 KB (ATmega328)
- Μνήμη EEPROM: 1 KB (ATmega328)
- Ταχύτητα (Clock Speed): 16 MHz

Σχήμα 20. Χαρακτηριστικά πλακέτας Arduino Uno Rev3.

3.2.5. Επικοινωνία

Για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ του τροχοφόρου και του μοχλού τηλεκατεύθυνσης, χρησιμοποιήθηκε το **HC-05 Bluetooth module** για την λήψη και την αποστολή των εντολών από τα γεγονότα της τηλεκατεύθυνσης στον μικροελεγκτή μέσω πρωτοκόλλου σειριακής UART.



Σχήμα 21. HC - 05 Bluetooth Module.

Τέλος, για τον τηλεχειρισμό του οχήματος, χρησιμοποιήθηκε ένα **Arduino Joystick Shield** με 2 αναλογικούς μοχλούς.



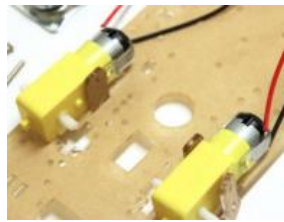
Σχήμα 22. Arduino Joystick Module.

3.3. Κατασκευή Αυτόνομου Οχήματος

3.3.1. Συναρμολόγηση Οχήματος

Για την συναρμολόγηση του οχήματος, χρειάζονται τα παρακάτω βήματα:

- Την εγκατάσταση των κινητήρων και των encoder στις αντίστοιχες θέσεις, χρησιμοποιώντας τις βάσεις στήριξης που παρέχονται από το kit. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν και οι τροχοί στον άξονα κάθε κινητήρα.



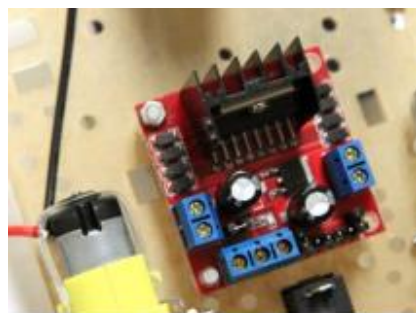
Σχήμα 23. Τοποθέτηση κινητήρων στο σασί.

- Την τοποθέτηση της βοηθητικής ρόδας στις αντίστοιχες οπές με χρήση αποστατών και βιδών, στην ίδια μεριά με τους κινητήρες.



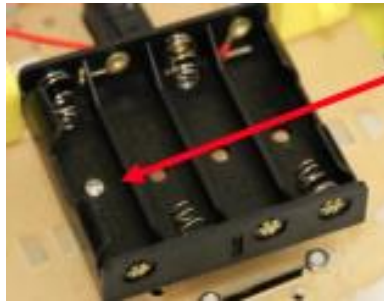
Σχήμα 24. Τοποθέτηση βοηθητικής ρόδας στο σασί.

- Εγκατάσταση του διακόπτη για την ηλεκτρική παροχή στους κινητήρες καθώς και του driver, χρησιμοποιώντας M3 αποστάτες και παξιμάδια για την πάκτωση τους. Σχετικά με την τοποθέτηση του driver χρησιμοποιήθηκε και θερμοσυστελλόμενη κόλλα ώστε να κολλήσει στο κάτω μέρος του σασί.



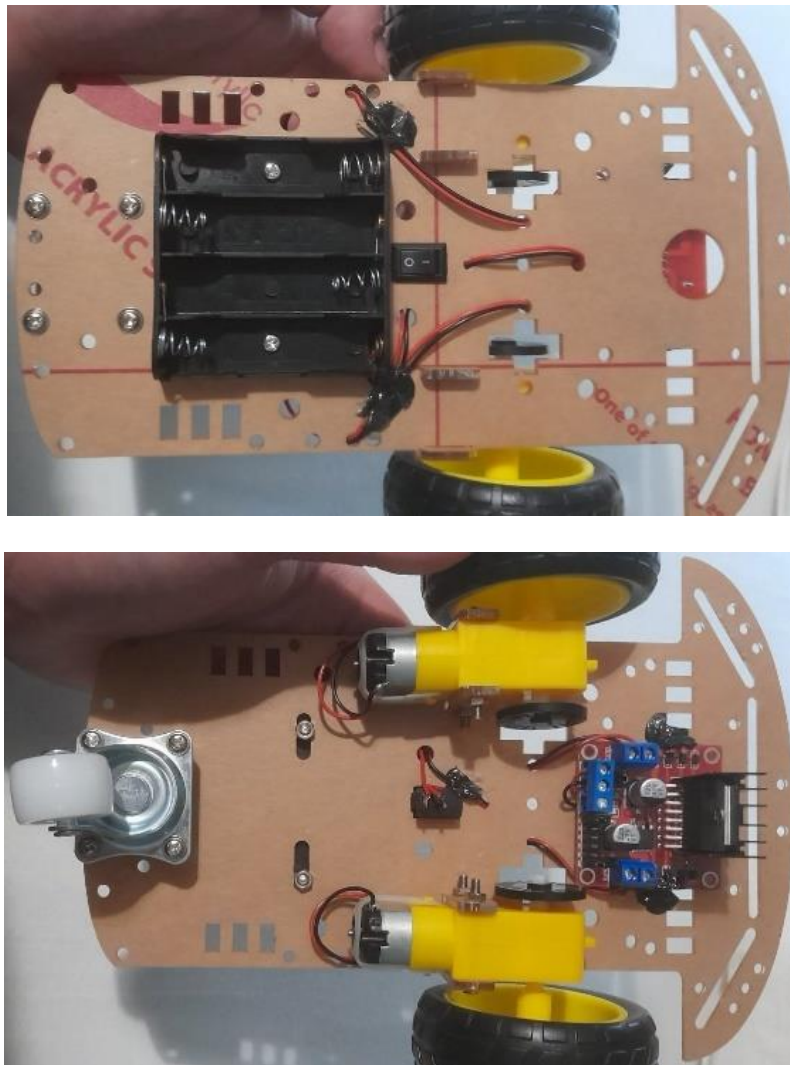
Σχήμα 25. Τοποθέτηση του Driver και του διακόπτη στο σασί.

- Εγκατάσταση της θήκης μπαταρίας, βιδώνοντας την στις απαραίτητες οπές



Σχήμα 26. Τοποθέτηση θήκης μπαταρίας.

Η ολοκληρωμένη κάτοψη του οχήματος φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 27. Κάτοψη και Άνοψη τροχοφόρου οχήματος.

3.3.2. Συνδεσμολογία Ηλεκτρολογικού κυκλώματος

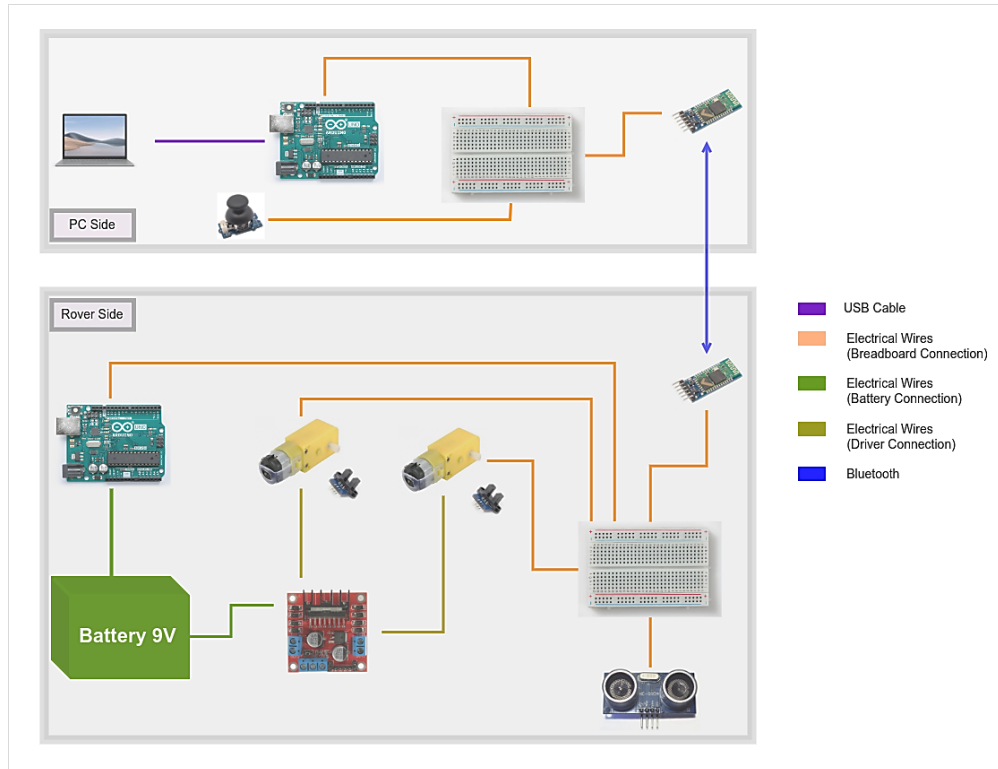
Καθώς έχουν τοποθετηθεί οι κινητήρες, ο διακόπτης και το drive στο σασί, το επόμενο βήμα είναι να τοποθετηθούν τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά πάνω στο όχημα. Με την τοποθέτηση του μικροελεγκτή Arduino θα μπορέσουμε να ελέγξουμε όλο το σύστημα. Η παροχή του Arduino γίνεται μέσω ενός καλωδίου female jack 3.5mm, το οποίο τα άκρα του είναι συνδεδεμένα στις θύρες τροφοδοσίας του driver. Το Arduino θα συνδεθεί με τον driver των κινητήρων, έτσι ώστε να μπορεί να στέλνει *PWM* σήματα και με τις μπαταρίες, ώστε να δίνει παροχή σε όλο το σύστημα. Οι θύρες 3 και 11 της πλακέτας συνδέονται με τις θύρες EnA και EnB αντίστοιχα. Έτσι θα μπορέσουν να παραχθούν αυτά τα κατάλληλα σήματα για να κινηθούν οι κινητήρες. Επίσης, οι θύρες 2,4,5,6 συνδέονται με τον driver για να παρέχουν τον τρόπο με τον οποίο θα κινείται το όχημα. Δηλαδή, με τον κατάλληλο συνδυασμό αυτών των σημάτων, το τροχοφόρο θα εκτελεί τις διαθέσιμες κινήσεις ("F", "B", "L", "R").

Κατά την περιστροφή των κινητήρων έχουμε την δυνατότητα να υπολογίζουμε τον ρυθμό με τον οποίο περιστρέφονται. Η ανάγνωση γίνεται με την χρήση των encoders. Οι encoders είναι συνδεδεμένοι με το breadboard της πλατφόρμας, όπου από εκεί υπάρχουν καλώδια ώστε τα σήματα αυτά να πηγαίνουν στον μικροελεγκτή. Έτσι, θα έχουμε την βασική ανάδραση του συστήματος, στο οποίο χρησιμοποιείται ο έλεγχος. Δίνοντας τα κατάλληλα σήματα ταχύτητας, θα κινείται ομαλά μέχρι να φτάσει τον στόχο. Οι encoders είναι συνδεδεμένοι στις θύρες 12 και 13 του Arduino.

Κατά την κίνησή του, μπορεί να βρει εμπόδια στο μονοπάτι του. Έτσι, το sonar θα ανιχνεύσει την απόσταση μεταξύ των εμποδίων και στέλνει τα σήματα στο Arduino. Το sonar είναι συνδεδεμένο με τις θύρες A4 και A5 της πλακέτας. Τέλος, από την πλευρά του τροχοφόρου υπάρχει και ένα bluetooth το οποίο δέχεται εντολές ταχύτητας και τα προωθεί στον μικροελεγκτή για να τις εκτελέσει. Τα T_x , R_x του bluetooth είναι συνδεδεμένα με τις θύρες 7 και 8 της πλακέτας.

Οι εντολές αυτές θα στέλνονται μέσω ενός άλλου bluetooth, εγκαθιδρύοντας μια ασύρματη επικοινωνία μέσω του πρωτοκόλλου **UART**. Το δεύτερο bluetooth είναι συνδεδεμένο με ένα άλλο Arduino, στο οποίο έχει τοποθετηθεί ένα joystick με δύο μοχλούς. Τέλος, το δεύτερο Arduino είναι συνδεδεμένο με την χρήση ενός usb καλωδίου με έναν υπολογιστή. Το Arduino του χειριστηρίου θα δίνει εντολές ταχύτητας από τους μοχλούς και τα σήματα αυτά θα μεταφέρονται στο Arduino του οχήματος μέσω των δύο bluetooth. Έτσι, έχουμε ένα σύστημα *Master – Slave* όπου ο *Master* είναι το χειριστήριο,

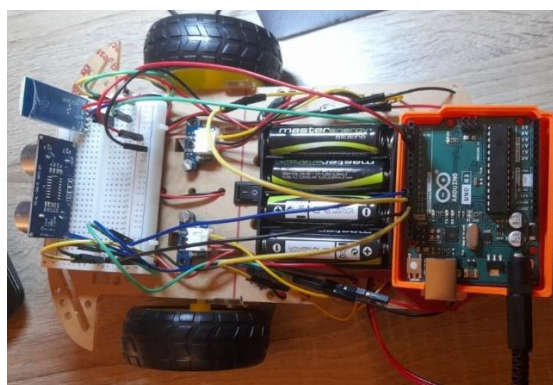
καθώς θα παράγει τις απαραίτητες εντολές ταχύτητας και ο *Slave* θα είναι το όχημα, το οποίο θα δέχεται τις εντολές με στόχο να τις εκτελέσει. Όλη αυτή την περιγραφή της συνδεσμολογίας μπορεί να αποτυπωθεί και στο κύκλωμα το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 28.



Σχήμα 28. Ηλεκτρολογικό κύκλωμα τροχοφόρου ρομπότ.

3.3.3. Συνολική Διάταξη Οχήματος

Με την κατασκευή του μηχανολογικού υποσυστήματος, του ηλεκτρολογικού υποσυστήματος και του ηλεκτρονικού υποσυστήματος, η συνολική κατασκευή έχει ολοκληρωθεί. Αυτή φαίνεται συνολικά και στο σχήμα 29.



Σχήμα 29. Συνολική διάταξη τροχοφόρου ρομπότ.

Η διάταξη ξεκινάει την λειτουργία του με το κλείσιμο του διακόπτη. Έτσι, θα παρέχεται ρεύμα από την μπαταρία σε όλο το σύστημα. Το σύστημα για να λειτουργήσει χρειάζεται και το απαραίτητο λογισμικό που θα επεξεργάζεται τις εντολές που παρέχονται από το joystick. Η συγγραφή και η λειτουργία του λογισμικού θα αναλυθεί στην ενότητα 3.4.

3.4. Υλοποίηση Λογισμικού Αυτόνομου Οχήματος

3.4.1. Αρχικοποίηση

Κατά την αρχικοποίηση του προγράμματος ελέγχου του μικροεπεξεργαστή, ενεργοποιούνται τα Rx και Tx pin ως εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Έπειτα, αρχικοποιείται η σειριακή επικοινωνία μεταξύ τηλεχειριστηρίου και οχήματος και τέλος, ορίζονται τα pin εισόδου για τους αισθητήρες και τα pin εξόδου για τους επενεργητές.

3.4.2. Επικοινωνία Bluetooth

Για την τηλεκατεύθυνση του οχήματος, η αποστολή των επιθυμητών εντολών γίνεται μέσω ασύρματης επικοινωνίας με το **HC-05 Bluetooth Module**. Το προσαρτημένο bluetooth στο joystick λειτουργεί ως πομπός εντολών ενώ το αντίστοιχο εξάρτημα στο rover λαμβάνει τις εντολές από το τηλεχειριστήριο μέσω μιας σειριακής εξόδου UART.

Καθώς τα Pin του Arduino Rx και Tx που είναι υπεύθυνα για την επικοινωνία του Arduino χρησιμοποιούνται για την διεπαφή με τον υπολογιστή, η σύνδεση με την πλακέτα θα γίνει μέσω της βιβλιοθήκης "SoftwareSerial" ,[12]. Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη επιτρέπει την σειριακή επικοινωνία με την χρήση διαφορετικών digital pins αντιγράφοντας την ίδια λειτουργικότητα (Rx, Tx) προγραμματιστικά.

Κατά την αποστολή δεδομένων, η πλακέτα δέχεται 8 byte δεδομένων εκ των οποίων 2 byte (στις θέσεις 1 και 2) αντιστοιχίζουν τα γεγονότα του τηλεχειριστηρίου στην αντίστοιχη εντολή κίνησης στο επίπεδο και 1 byte (στην θέση 7) που ενεργοποιεί την λειτουργία του οχήματος για την λήψη εντολών. Έτσι, σε κάθε επανάληψη ελέγχεται η λήψη των 8 byte από την σειριακή του bluetooth και γίνεται η αποκωδικοποίηση της πληροφορίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η λήψη και η εκτέλεση περιορίζεται στην μία εντολή ανά επανάληψη. Η αντιστοίχιση των εντολών γίνεται με την μετατροπή των ληφθέντων byte σε χαρακτήρες μέσω του παρακάτω πίνακα:

Εντολές Ταχύτητας Οχήματος	
"L"	Στροφή του οχήματος αριστερά
"R"	Στροφή του οχήματος δεξιά
"F"	Κίνηση οχήματος μπροστά
"B"	Κίνηση οχήματος πίσω

Πίνακας 9. Εντολές κατεύθυνσης ρομπότ.

3.4.3. Έλεγχος Οχήματος

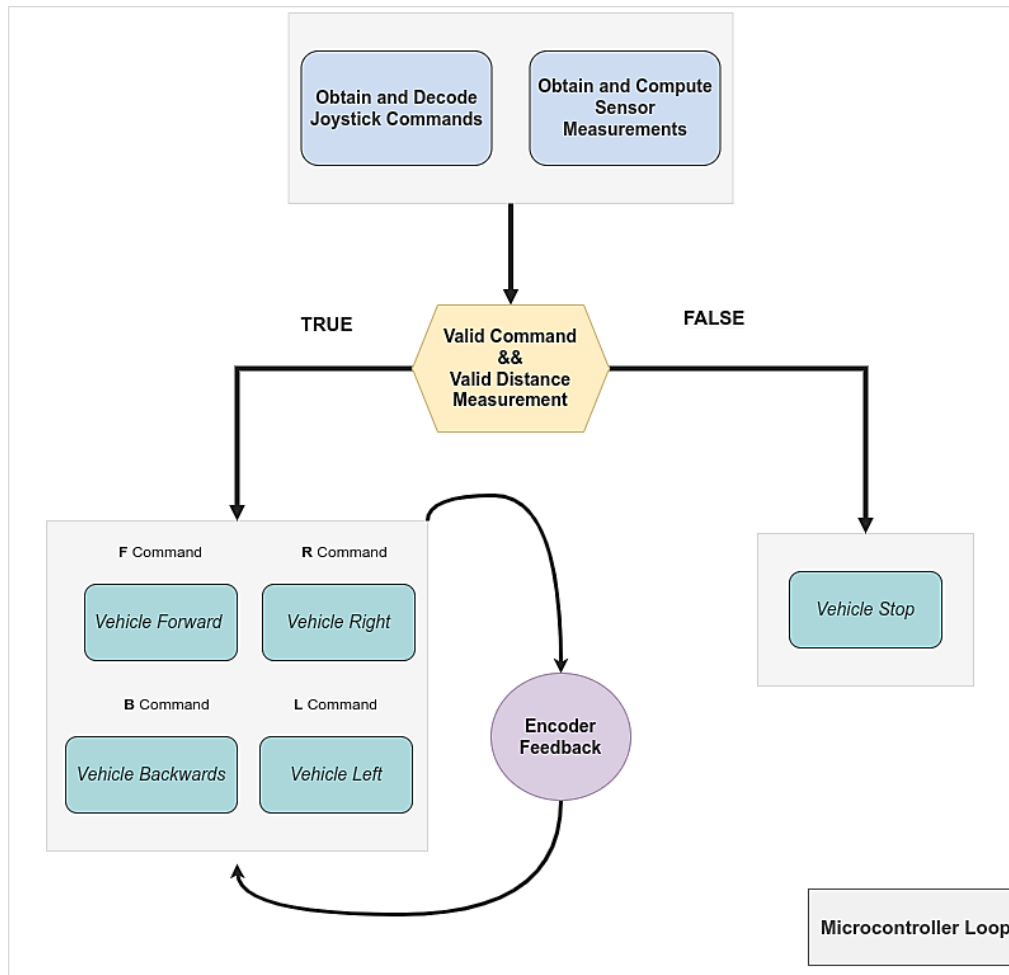
Καθώς η μοντελοποίηση είναι βασισμένη στην διαφορική οδήγηση (differential drive), η κίνηση του οχήματος είναι συνυφασμένη με την διαφορά στις ταχύτητες των τροχών. Οπότε, για την κίνηση του οχήματος προς τα εμπρός/όπισθεν, παρέχεται η ίδια ταχύτητα στους τροχούς με την ίδια φορά ενώ για την επιτόπια στροφή του κατά αριστερά/δεξιά απαιτείται η αντίθετη φορά περιστροφή μεταξύ των δύο τροχών.

Μετά την λήψη της εντολής προς εκτέλεση, ο αλγόριθμος ελέγχου επιλέγει την αντίστοιχη κίνηση. Όταν ληφθεί η εντολή "F", δίνονται στα pin των τροχών λογικό HIGH μέσω της εντολής `digitalWrite()` και παρέχεται ταχύτητα στα pin του drive για την εκτέλεση της κίνησης μέσω της εντολής `analogWrite()`. Κατά τον ίδιο τρόπο, μόλις λάβει εντολή "B", υλοποιείται η ίδια διαδικασία με μόνη διαφορά την παροχή του λογικού LOW. Αντίθετα, όταν μια εντολή στροφής ("R" ή "L"), παρέχεται λογικό LOW/HIGH στο ένα τροχό ανάλογα την εντολή και αντίστοιχα, η αντίθετη πολικότητα στον άλλο τροχό. Μετά από κάθε εντολή, υλοποιείται μια καθυστέρηση **DELAY** στο ρουτίνα της τάξεως των *millisecond* για την εκτέλεση της ζητούμενης κίνησης από το τροχοφόρο. Σε περίπτωση που δεν λάβει κάποια από τις εντολές "R", "L", "F" ή "B" μετά την αποκωδικοποίηση της σειριακής, παρέχονται και στους δύο κινητήρες λογικό LOW.

Για την εγγύτητα της κίνησης, λαμβάνουμε ανατροφοδότηση από τους encoders μέσω της εντολής `analogRead()` οι οποίες αποθηκεύονται σε global μεταβλητές για κάθε έναν από τους κινητήρες. Η εκτέλεση της εκάστοτε εντολής τερματίζει με επιτυχία εάν ο μέσος όρος των ενδείξεων των ταχυτήτων κατά την διάρκεια **DELAY** ισούται με την επιθυμητή τιμή.

Τέλος, το πρόγραμμα διαβάζει την μέτρηση από τον υπέρηχο αισθητήρα και μέσω της διάρκειας του ηχητικού παλμού, υπολογίζει την απόσταση από το ανιχνεύσιμο

αντικείμενο. Εάν η απόσταση είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλι που έχει ορισθεί, δεν επιτρέπει στο όχημα την κίνηση προς τα εμπρός.



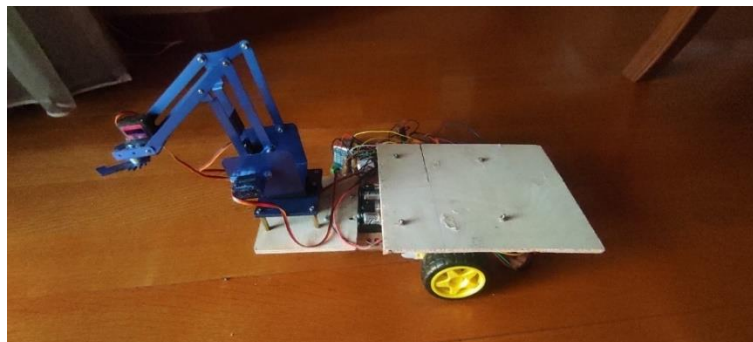
Σχήμα 30. Διάγραμμα ροής λειτουργίας λογισμικού.

Κεφάλαιο 4. Ενσωμάτωση Ρομποτικού Βραχίονα στο Όχημα

4.1. Κατασκευαστική Ενσωμάτωση

Για την προσαρμογή του ρομπότ στο Rover χρειάστηκε να παρέμβουμε με τους εξής τρόπους:

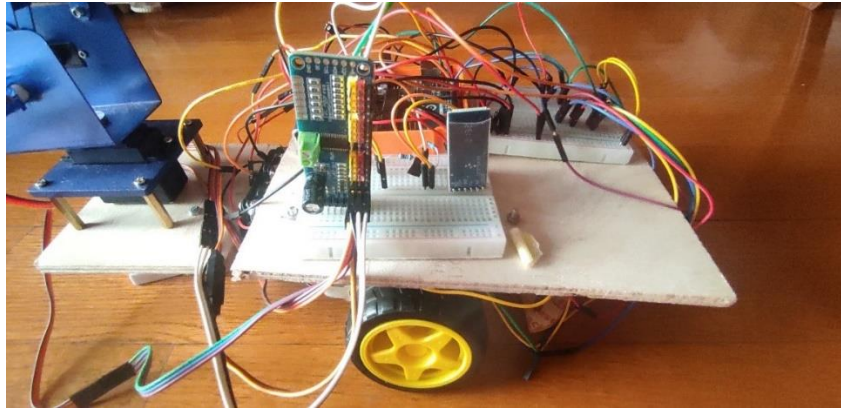
Η ελεύθερη επιφάνεια του rover δεν ήταν αρκετή. Με τη χρήση αποστατών στη διάτρητη ακριλική πλακά του rover, τοποθετήθηκε πλατφόρμα από ναυτικό κόντρα πλακέ 4mm σε κατάλληλες διαστάσεις και με κατάλληλες οπές για την στερέωση του βραχίονα. Ακόμα μια τέτοια πλατφόρμα τοποθετήθηκε στο rover για την πρόσδεση των ηλεκτρονικών και των μπαταριών, μιας και η διαθέσιμη επιφάνεια του rover κρίθηκε ανεπαρκής.



Σχήμα 31. Διάταξη συνολικού συστήματος με την επέκταση του σασί.

Τα καλώδια για τη μεταφορά των σημάτων και του ρεύματος τροφοδοσίας επεκτάθηκαν κατάλληλα και έγινε στοιχειώδης διαχείρισή τους, ώστε να βεβαιωθούμε ότι δεν θα δυσκόλευαν τον χειρισμό του βραχίονα ή του rover.

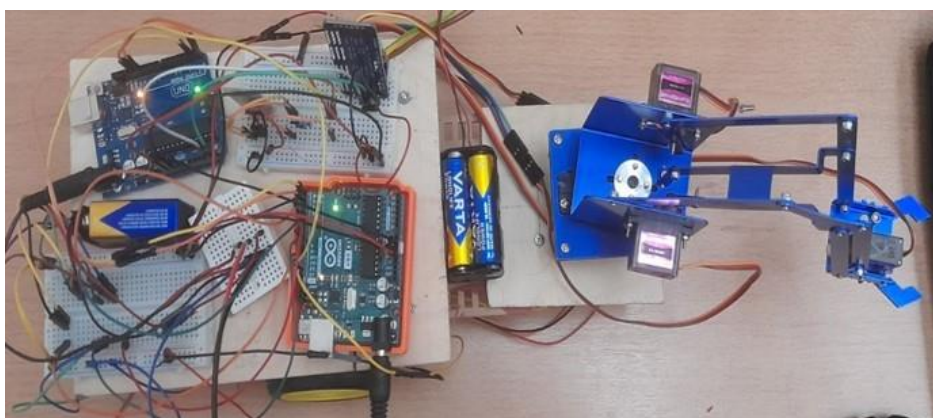
Μέριμνα υπήρξε επίσης και για την κατανομή των βαρών ώστε να εξασφαλίσουμε την μη ανατροπή του Rover κατά το χειρισμό. Οι μπαταρίες και τα πιο βαριά στοιχεία του εξοπλισμού τοποθετήθηκαν σαν αντίβαρα, αντιδιαμετρικά από τον βραχίονα για την επίτευξη καλύτερης ισορροπίας του συνολικού συστήματος.



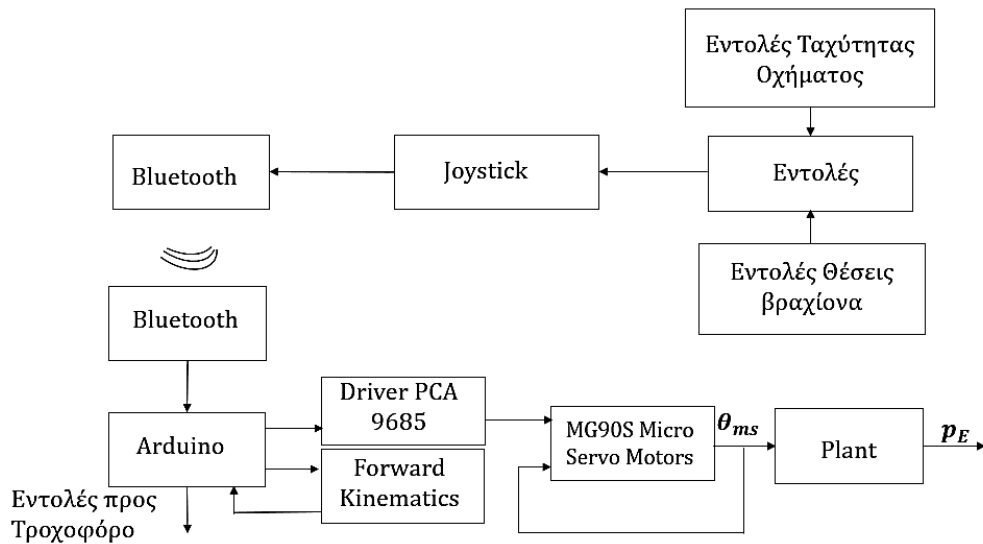
Σχήμα 32. Τοποθέτηση ηλεκτρονικών στην νέα πλατφόρμα.

4.2. Ενσωμάτωση Ηλεκτρονικών

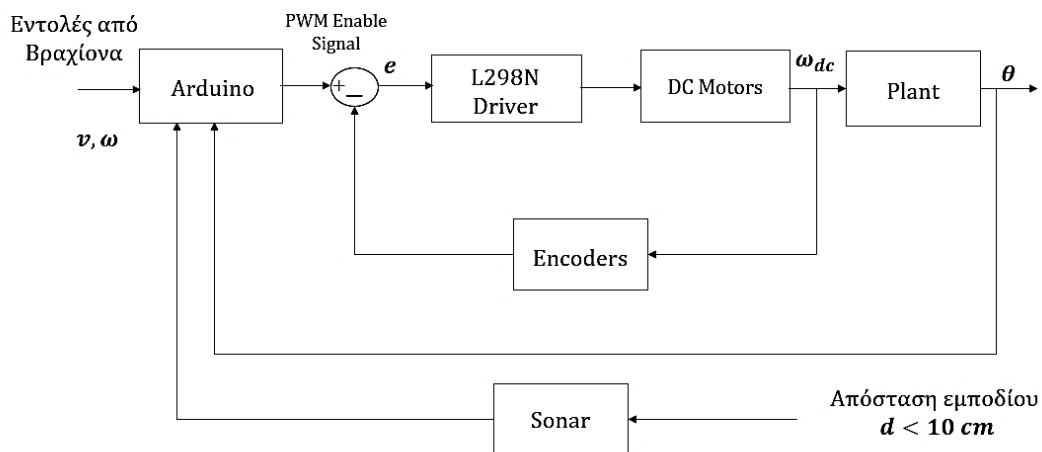
Έχοντας αναπτύξει τα δύο συστήματα ξεχωριστά, για την ενσωμάτωση των δύο συστημάτων αρχικά προτάθηκε η τοποθέτηση και των δύο διαφορετικών πλακετών **Arduino** επάνω στο συνολικό σύστημα. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί τις θύρες του υλικού σειριακής επικοινωνίας στα **Pin 0,1** των δύο πλακετών για την μετάδοση της εισαχθέντας πληροφορίας από το ένα **Arduino** στο άλλο. Η επικοινωνία γίνεται σύμφωνα με το πρωτόκολλο **UART** και προϋποθέτει σύνδεση του Tx της πρώτης πλακέτας στο Rx της δεύτερης πλακέτας και αντίστοιχα του Tx της δεύτερης πλακέτας στο Rx της πρώτης. Η συγκεκριμένη συγκεντρωτική ιδέα παρουσιάζεται στα Σχήματα 34 και 35, όπου παρουσιάζεται η συνένωση των δύο συστημάτων και του ελέγχου του Joystick με τις δύο πλακέτες.



Σχήμα 33. Κάτοψη συστήματος με την χρήση δύο μικροελεγκτών.



Σχήμα 34. Αρχιτεκτονική ρομποτικού βραχίονα.

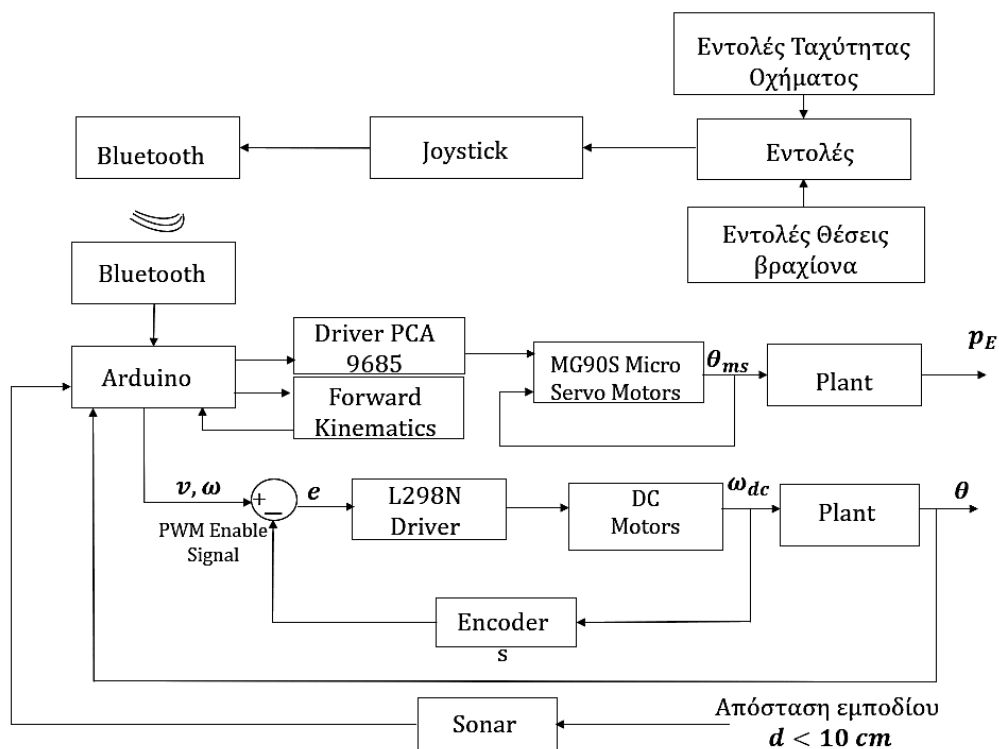


Σχήμα 35. Αρχιτεκτονική ρομποτικού οχήματος διαφορικής κίνησης.

Η παραπάνω υλοποίηση όμως δεν κατάφερε να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές που αφορούν τον χρόνο απόκρισης του συστήματος στις εντολές χειρισμού. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε μία μεγάλη χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στις εντολές ελέγχου του Rover από το χειριστήριο και την υλοποίηση της κίνησης. Έτσι, έγινε η επιλογή συνένωσης των κωδίκων των δύο συστημάτων σε μία πλακέτα Arduino. Η επιλογή αυτή κατάφερε να διορθώσει την χρονική καθυστέρηση ανάμεσα σε εντολές χειρισμού και υλοποίηση κίνησης.

Η συνένωση των δύο κωδίκων μπορούσε να γίνει εύκολα με την χρήση τεχνικών αντικειμενοστραφή προγραμματισμού. Η πιο απαιτητική τροποποίηση ήταν η ενοποίηση των εξόδων των δύο πλακετών σε μία, το οποίο ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί λόγω της οδήγησης των περισσότερων κινητήρων μέσω επικοινωνίας με το ανάλογο drive. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι πριν την υλοποίηση της αρχιτεκτονική της μίας συνολικής πλακέτας έγινε έλεγχος των διαθέσιμων εξόδων. Ο έλεγχος των εξόδων αποτελεί ένα βήμα ελέγχου των διαθέσιμων ικανοτήτων του υλικού (*Hardware*) και της αξιολόγησης αυτού για την εφαρμογή. Σε περίπτωση όπου δεν επαρκούσαν οι ικανότητες της πλακέτας για την εφαρμογή, θα ήταν απαραίτητη η αλλαγή της σε μία πλακέτα περισσότερων εξόδων όπως το *Arduino Mega*.

Διάγραμμα της τελική αρχιτεκτονική του συστήματος σύμφωνα με την αρχιτεκτονική μίας πλακέτας παρουσιάζεται στην Εικόνα #, ενώ το πραγματικό σύστημα εμφανίζεται στην Εικόνα #.



Σχήμα 36. Τελική αρχιτεκτονική συστήματος με έναν μικροελεγκτή.

4.3. Μελέτη Κατανάλωσης και Εύρεση Μπαταριών

Κατά την διαδικασία ενσωμάτωσης του ρομποτικού βραχίονα στην κινούμενη ρομποτική διάταξη παρουσιάστηκε το πρόβλημα της τροφοδοσίας των κινητήρων και των ηλεκτρονικών διατάξεων που χρησιμοποιεί μέσω φορητής πηγής. Μέχρι την φάση της ενσωμάτωσης των δύο διατάξεων, η διάταξη οδήγησης των κινητήρων του βραχίονα τροφοδοτούταν με τροφοδοτικό γραφείου, ικανό να δώσει ρεύματα της τάξης των 10 Ampere, ενώ το Arduino τροφοδοτούταν μέσω του καλωδίου USB που χρησιμοποιούταν για τον προγραμματισμό του. Έτσι, αποτελεί αναγκαία μία μελέτη των καταναλώσεων των κινητήρων και των διατάξεων.

Κατά την τροφοδοσία ηλεκτρονικών διατάξεων και κινητήρων είναι πολύ πιθανή η προβληματική λειτουργία της παροχής ρεύματος μίας μπαταρίας. Κάτι τέτοιο συμβαίνει λόγω των σύντομου χρονικού διαστήματος υψηλών ρευμάτων που μπορεί να απαιτούν οι κινητήρες. Τα υψηλά αυτά ρεύματα πολλές φορές υποβιβάζουν την τάση μίας μπαταρίας, με αποτέλεσμα την επαναφορά (*Reset*) των ηλεκτρονικών διατάξεων όταν η τάση της μπαταρίας πέσει κάτω από ένα όριο. Για την αποφυγή αυτών των μεταβατικών φαινομένων μπορεί να γίνει χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων (*Regulators*) ή ο διαχωρισμός των παροχών ανάλογα με τις απαιτήσεις τους. Στην παρούσα εργασία έγινε η επιλογή της δεύτερης λύσης.

Για την επιλογή της μπαταρίας με την οποία θα τροφοδοτηθεί το Arduino και η διάταξη επικοινωνίας Bluetooth

Για την διαστασιολόγηση της μπαταρίας τροφοδοσίας των κινητήρων χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω στοιχεία:

1. Πλήθος κινητήρων τύπου MG90S: 3

- Ο κάθε κινητήρας μπορεί να καταναλώσει έως και 400 mA στην περίπτωση όπου βρει εμπόδιο στην κίνηση του (*Stall Current*)

2. Πλήθος κινητήρων τύπου MG996R: 1

- Ο κινητήρας αυτός έχει ρεύμα λειτουργίας 500-900 mA κατά την λειτουργία των 6Volt αλλά μπορεί να καταναλώσει έως και 2.5 A στην περίπτωση όπου βρει εμπόδιο στην κίνηση του (*Stall Current*) και τροφοδοτείται με 6 Volt.

3. Πλήθος κινητήρων τύπου DC: 2

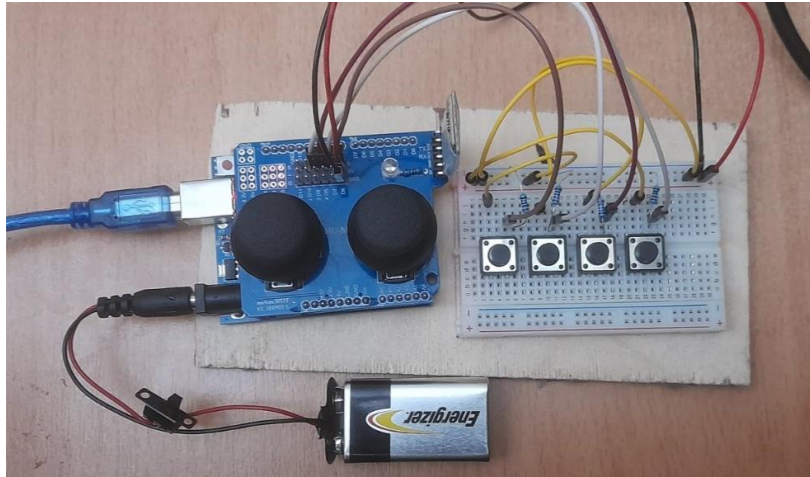
- Ο κινητήρας αυτός έχει ρεύμα λειτουργίας 80 – 100 mA κατά την λειτουργία των 3V. Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να καταναλώσει ο ένας κινητήρας είναι τα 100 mA (*Stall Current*) με τροφοδοσία τα 3V σε περίπτωση που υπάρξει εμπόδιο στην κίνησή του.

Με βάση τα παραπάνω, καταλήγουμε ότι ο βραχίονας κατά την λειτουργία του θα χρειαστεί παροχή της τάξης των 1.5 A, ενώ στην ακραία περίπτωση μπλοκαρίσματος θα χρειαστεί παροχή της τάξης των 3.7 A. Αντίστοιχα, το Rover καταναλώνει ρεύμα της τάξης των 0.5A στην περίπτωση μπλοκαρίσματος. Με βάση αυτές τις καταναλώσεις εκτιμάται ότι η διάταξη μπορεί να λειτουργήσει με παροχή ρεύματος της τάξης του 1A, ενώ πρέπει να διαθέτει την ικανότητα παροχής 4.5-5A κατά την κατάσταση μπλοκαρίσματος. Θεωρώντας επιπλέον ότι η διάταξη μας θα πρέπει να λειτουργεί για διάστημα τουλάχιστον μισής ώρας, αναζητούμε μία μπαταρία με χωρητικότητα μεγαλύτερη των 2000 mAh, με ικανότητα υποστήριξης των 5A για στιγμιαίο ρεύμα εξόδου. Επιπλέον, είναι απαραίτητο η τελική συστοιχία των μπαταριών να διαθέτει τάση μεγαλύτερη των 5V. Στην δική μας κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν 4 μπαταρίες των 1.5V, ακόμα και αν η βέλτιστη λύση θεωρούμε ότι θα ήταν η χρήση δύο μπαταριών λιθίου (18650) των 3.6V και η χρήση σταθεροποιητή τάσης στα 5V.

4.4 Κατασκευή Χειριστηρίου

Για τον έλεγχο της συνολικής διάταξης δημιουργήθηκε ένα συνολικό χειριστήριο, το οποίο προσφέρει έλεγχο της θέσης του βραχίονα, της ταχύτητας του τροχοφόρου και των διαφορετικών επιλογών (*mode*) ελέγχου. Για την δημιουργία αυτού χρησιμοποιήθηκε μία ξεχωριστή πλακέτα *Arduino* στην οποία συνδέθηκε ένα *shield* το οποίο διαθέτει έξοδο για ένα *Bluetooth HC-05* και έχει ενσωματωμένα δύο χειριστήρια τύπου Joystick. Λόγω των επιπλέον απαιτήσεων προστέθηκε επάνω στο χειριστήριο ένα μικρό *Breadboard* με τέσσερα κουμπιά και τις απαραίτητες αντιστάσεις και συνδέσεις. Το χρησιμοποιούμενο *shield* παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.

Για λόγους φορητότητας, έγινε η επιλογή χρήσης μπαταρίας των 9V για την παροχή της πλακέτας και των χρησιμοποιούμενων περιφερειακών της. Η διάταξη του χειριστηρίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 18.



Σχήμα 37. Διάταξη χειριστηρίου ελέγχου ρομποτικής διάταξης.

Για την λειτουργία του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν τα τέσσερα εικονιζόμενα κουμπιά, τα οποία είναι υπεύθυνα για την αλλαγή του ελέγχου ανάμεσα σε έλεγχο καρτεσιανό και αρθρώσεων για τον βραχίονα και την εναλλαγή ανάμεσα σε έλεγχο βραχίονα και rover. Πατώντας το ένα από τα κουμπιά γίνεται η εναλλαγή ανάμεσα σε έλεγχο καρτεσιανού χώρου και χώρου αρθρώσεων για τον βραχίονα ενώ πατώντας το δεύτερο κουμπί επιλέγεται ο έλεγχος βραχίονα ή rover. Τα δύο τελευταία κουμπιά χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία ενός συστήματος αποθήκευσης θέσης και αναπαραγωγής τους, το οποίο παρουσίασε προβλήματα και δεν επεκτάθηκε στην τελική έκδοχή της εργασίας. Κατά την αρχικοποίηση το σύστημα βρίσκεται στην επιλογή χώρου αρθρώσεων του βραχίονα.

Τα δύο χειριστήρια τύπου *Joystick* χρησιμοποιούνται για την μεταβολή εντολών κίνησης τόσο στον βραχίονα όσο και στο rover. Κατά την επιλογή χρήση του βραχίονα τα δύο χειριστήρια μεταβάλλουν την γωνία ή την θέση x, y, z ανάλογα με τον χώρο ελέγχου του βραχίονα ενώ ανοίγουν ή κλείνουν την αρπάγη. Πιο αναλυτικά, η κίνηση πάνω ή κάτω του αριστερού *Joystick* αυξάνει ή μειώνει αντίστοιχα την επιθυμητή γωνία της δεύτερης άρθρωσης ή της μεταβλητής x . Με όμοιο τρόπο, η κίνηση αριστερά ή δεξιά του αριστερού *Joystick* αυξάνει ή μειώνει αντίστοιχα την επιθυμητή γωνία της τρίτης άρθρωσης ή της μεταβλητής y και η κίνηση πάνω ή κάτω του δεξιού *Joystick* αυξάνει ή μειώνει αντίστοιχα την επιθυμητή γωνία της πρώτης άρθρωσης ή της μεταβλητής z . Τέλος, η κίνηση αριστερά ή δεξιά του δεξιού *Joystick* ανοίγει ή κλείνει την αρπάγη και στους δύο τρόπους ελέγχου.

Κατά την επιλογή χρήσης του rover τα δύο χειριστήρια είναι υπεύθυνα για την αποστολή εντολών που αφορούν την κατεύθυνση κίνησης. Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση

πάνω ή κάτω του αριστερού *Joystick* δίνει την εντολή κίνησης μπροστά και πίσω. Η κίνηση γίνεται για προκαθορισμένο χρονικό διάστημα λίγων δευτερολέπτων. Αντίστοιχα, η κίνηση δεξιά ή αριστερά του δεξιού *Joystick* δίνει την εντολή στροφής προς τα δεξιά και αριστερά. Και αυτή η κίνηση γίνεται για προκαθορισμένο χρονικό διάστημα λίγων δευτερολέπτων. Σε περίπτωση όπου σε αυτό το χρονικό διάστημα η εντολή παραμένει, ο χρόνος κίνησης ανανεώνεται, δημιουργώντας μία ομαλή κίνηση χωρίς διακοπές.

Με βάση τις παραπάνω ενέργειες, το χειριστήριο ανανεώνει τις μεταβλητές τις οποίες στέλνει μέσω Bluetooth επαναληπτικά, ενώ στέλνει ένα νέο σήμα κάθε ένα δευτερόλεπτο. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του συστήματος καθώς δεν μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα όπως υπερβολικά μεγάλη αλλαγή στις εντολές κίνησης βραχίονα και rover ή μπλοκάρισμα της επικοινωνίας λόγω υπερχείλισης του Buffer επικοινωνίας. Το δεύτερο πρόβλημα παρουσιάστηκε κατά την δοκιμή της επικοινωνίας και για την επίλυση του έγιναν δοκιμές επάνω στην περίοδο με την οποία γίνεται αποστολή νέων δεδομένων.

Κεφάλαιο 5. Επίλογος

5.1 Δυσκολίες Διαδικασίας Κατασκευής

Κατά την εκπόνηση του παρόντος πρότζεκτ εμφανίστηκαν προβλήματα τοποθέτησης των ηλεκτρονικών πάνω στο όχημα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος τοποθετήθηκε πάνω από το σασί του οχήματος μια ξύλινη πλάκα στην οποία τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρονικά.

Στην αρχική συλλογική κατασκευή υπήρξε πρόβλημα με την παροχή των κατάλληλων εντολών ταχύτητας από το χειριστήριο προς το όχημα και τον βραχίονα. Το πρόβλημα αυτό δημιουργήθηκε από την σειριακή επικοινωνία μεταξύ των δύο μικροελεγκτών Arduino και των σημάτων T_x, R_x . Έτσι, ως λύση ήταν να αφαιρεθεί ο ένας μικροελεγκτής και να υπάρχει μόνο μία πλακέτα που θα διαχειρίζεται όλη την πληροφορία και τον έλεγχο των εξαρτημάτων. Έτσι, με την χρήση μόνο ενός Arduino λύθηκε αυτό το πρόβλημα, ωστόσο όχι πλήρως. Υπάρχουν θέματα αξιοπιστίας του Bluetooth κατά την εκπομπή των ασύρματων σημάτων, με αποτέλεσμα να χάνεται η επικοινωνία μεταξύ του Bluetooth του συνολικού συστήματος και του Bluetooth του χειριστηρίου.

Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας δυσκολίας αποτελούσε η μεγάλη κατανάλωση των μπαταριών. Καθώς το σύστημα αποτελείται από δύο DC κινητήρες και τέσσερις RC Servo, χρειαζόταν μεγάλα ποσά ισχύος, το οποίο αποτέλεσε πρόβλημα, διότι η αντοχή των μπαταριών στο σύστημα διαρκούσε μισή ώρα.

Μια πρόκληση ηλεκτρολογικής φύσεως που παρουσιάστηκε κατά την υλοποίηση αφορούσε την παροχή ισχύος του συστήματος. Η πρόκληση αυτή παρουσιάστηκε κατά την συνένωση των δύο επιμέρους συστημάτων, καθώς μέχρι εκείνη την στιγμή η παροχή του βραχίονα γινόταν μέσω επιτραπέζιου τροφοδοτικού, ενώ η τροφοδοσία του Rover επαρκούσε για τις μέχρι εκείνη την στιγμή απαιτήσεις ισχύος του. Η πρόκληση αυτή παρουσιάστηκε αρχικά ως πρόβλημα της λειτουργίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του συνολικού συστήματος, είτε σε μορφή αδυναμίας επικοινωνίας, είτε σε μορφή αδυναμίας οδήγησης των κινητήρων. Έπειτα από διερεύνηση του συστήματος, έγινε μέτρηση των μπαταριών που είχαν χρησιμοποιηθεί και εντοπίστηκε σημαντική πτώση τάσης. Έτσι, καταλήξαμε στο συμπέρασμα, ότι τα προβλήματα που εντοπίστηκαν στα ηλεκτρονικά του συστήματος οφείλονταν στις μπαταρίες, οι οποίες εξασθενούσαν με

γρήγορο ρυθμό. Η παραπάνω πρόκληση τόνισε σε εμάς ότι η σχεδίαση του κατάλληλου συστήματος τροφοδοσίας είναι ιδιαίτερης σημασίας σε φορητά και αυτόνομα συστήματα, ενώ η σταθερή και επαρκής παροχή ισχύος επηρεάζει την απόδοση και την ορθή λειτουργία των κινητήρων και των ηλεκτρονικών συστημάτων.

5.2 Συνεργασία Ομάδων

Ως μία ομαδική εργασία δύο ομάδων, η συνεργασία ανάμεσα σε όλα τα μέλη αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την επίτευξη των στόχων και τη δημιουργία του συνολικού συστήματος. Για την επίτευξη ομαλής και γόνιμης συνεργασίας, έγιναν αρχικά συνολικές συζητήσεις από τα μέλη και των δύο ομάδων για το συνολικό σύστημα, δημιουργώντας συνολικά μία αρχική ιδέα για τις απαιτήσεις του συστήματος. Κάθε ομάδα ανέπτυξε επιπλέον ιδέες για το δικό της μέρος όσον αφορά τις επιμέρους δυνατότητες του κάθε συστήματος, ακολουθώντας πάντα την κεντρική ιδέα του τηλεχειριζόμενου συστήματος. Και οι δύο διαδικασίες διεξήχθησαν χωρίς πρόβλημα, καθώς όλα τα μέλη πρότειναν τις ιδέες τους οι οποίες συζητήθηκαν μέχρι να αποφασιστεί και από τις δύο ομάδες η κεντρική ιδέα.

Ως δεύτερο μέρος της μελέτης, έγινε η επιμέρους υλοποίηση κάθε συστήματος έχοντας ως γνώμονα την βασική ιδέα επικοινωνίας των δύο συστημάτων και κάθε ομάδα λειτούργησε μεμονωμένα για την επίτευξη των επιμέρους στόχων που είχαν οριστεί για την κάθε κατασκευή ξεχωριστά. Κατά αυτό το στάδιο και στις δύο ομάδες έγινε διαχωρισμός των καθηκόντων ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε κατασκευής (θεωρητική μελέτη, κατασκευή-σχεδιασμός, προγραμματισμός). Τα καθήκοντα ανατέθηκαν σε πρώτο βήμα σε ένα άτομο και έπειτα από μία αρχική προμελέτη τέθηκαν στο σύνολο της ομάδας για την επίτευξη και υλοποίηση. Κατά το στάδιο αυτό ιδιαίτερα βοήθησε η χρήση εφαρμογών τύπου cloud όπου κάθε μέλος αποθήκευε την δουλειά του για να είναι προσβάσιμη από όλα τα μέλη και των δύο ομάδων.

Έχοντας φτάσει τα δύο συστήματα σε ικανοποιητικό επίπεδο, ως τρίτο μέρος της υλοποίησης ξεκίνησε η ένωση των κατασκευών τόσο σε κατασκευαστικό όσο και σε προγραμματιστικό επίπεδο. Όμοια με το προηγούμενο στάδιο, έγινε διαχωρισμός των καθηκόντων πλέον στο σύνολο και των δύο ομάδων, με μέλη και των δύο ομάδων να παρεμβαίνουν σε κάθε επιμέρους αρμοδιότητα. Για την παραπάνω διαδικασία έγιναν συναντήσεις δια ζώσης, αλλά και ατομική δουλειά κάθε μέλους πριν την συνάντηση.

Με τα παραπάνω βήματα και τον σωστό διαχωρισμό καθηκόντων εργάστηκαν όλα τα μέλη και των δύο ομάδων σε όλα τα τμήματα κάθε επιμέρους εργασίας. Σε συνδυασμό με την προθυμία όλων των μελών να συνδράμουν στο τελικό αποτέλεσμα, η δημιουργία του συστήματος στέφτηκε με επιτυχία.

5.3 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μελετήθηκε και κατασκευάστηκε ένα ημιαυτόνομο τροχοφόρο σύστημα το οποίο δέχεται εντολές ταχύτητες στον κεντρικό του ελεγκτή, με αποτέλεσμα αυτός να τις μεταδίδει σε όλο το σύστημα έτσι ώστε να κινηθεί. Ως πρώτο βήμα ήταν να μοντελοποιηθεί το όχημα με το *Unicycle Model*, καθώς αποτελείται από δύο τροχούς. Με κατάλληλες εντολές ταχύτητας v , ω μπορεί να κινηθεί εντός του χώρου εργασίας. Στη συνέχεια ενσωματώθηκε πάνω το ο ρομποτικός βραχίονας 4 DoF, και με κατάλληλη τοποθέτηση των εξαρτημάτων παράχθηκε ένα συνολικό λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιείται για **Pick and Place** διεργασίες. Επίσης, σε περίπτωση που ανιχνεύσει ο αισθητήρας κάποιο εμπόδιο σε απόσταση μικρότερη των 10 cm, τότε δίνεται εντολή από τον μικροελεγκτή να σταματήσει η κίνηση του οχήματος.

Για το παρών πρότζεκτ αυτό που θα μπορεί να γίνει είναι αρχικά να τοποθετηθεί ένας μικροεπεξεργαστής τύπου *ARM*, έτσι ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, καθώς και τοποθέτηση περισσότερων αισθητήρων γύρω από το όχημα για πιο σωστό *navigation*. Με την τοποθέτηση αισθητήρων απόστασης στο πλάι, να συλλέγεται όλη η πληροφορία και με διαδικασίες *fusion* των δεδομένων, να κρατάει μια μέση απόσταση από τα εμπόδια και τους τοίχους. Έτσι, το τροχοφόρο δεν θα χρειάζεται να δέχεται εντολές τερματισμού κίνησης. Επιπλέον, οι μπαταρίες που μπορούν να τοποθετηθούν να είναι επαναφορτιζόμενες με μεγαλύτερη χωρητικότητα ενέργειας, ώστε να αυξηθεί η ώρα λειτουργίας του συστήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] W. Bolton, *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, Sixth Edition, Pearson Publications, 2015.
- [2] R. H. Bishop, *Mechatronic System Control, Logic, and Data Acquisition*, The Mechatronics Handbook, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.
- [3] J. D. Warren, J. Adams, and A. Molle, *Arduino Robotics*, Apress, 2011.
- [4] F. Fahimi, *Autonomous Robots: Modelling, Path Planning, and Control*, Springer, 2009.
- [5] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Third Edition, Pearson Education Limited, 2014.
- [6] Ilene J. Busch-Vishniac, *Electromechanical Engineering*, Mechanical Engineering Series, Springer, 2012.
- [7] Chai, H.D., *Electromechanical Motion Devices*, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [8] Karnopp, D., Margolis, D.L., Rosenberg, R.C., *System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*, 3rd edition Wiley-Interscience, 2000.
- [9] Tomkison, D. and Horne, J., *Mechatronics Engineering*, McGraw Hill, New York, NY, 1996.
- [10] Alciatore, D.G. and Hstand, M.B., *Mechatronics*, McGraw-Hill, New York, NY, 2003.
- [11] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, *Robotics: Modeling, Planning and Control*, Springer, 2009.
- [12] Software Serial Library, <https://docs.arduino.cc/learn/built-in-libraries/software-serial>
- [13] HC – SR04 User’s Manual, Cytron Technologies, May 2013.
- [14] L298N Dual Full-Bridge Driver Datasheet.