



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΔΠΜΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

## Μηχανοτρονικά Συστήματα

Ερπυστριοφόρο όχημα παρακολούθησης  
γραμμής και αποφυγής εμποδίων

Ομάδα 4:

Καραβάς Ευάγγελος ΑΜ: 02123209

Τσικαλάκης Χρήστος ΑΜ: 02123204

ΑΘΗΝΑ

2024

## Contents

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
Κεφάλαιο 2 Υλικά υλοποίησης εργασίας.....	4
2.1 Κοστολόγηση.....	4
2.2 DC κινητήρες .....	6
2.3 Οδηγός για κινητήρες συνεχούς ρεύματος.....	8
2.4 Αισθητήρες .....	10
2.5 Οδήγηση ερπυστριοφόρου μέσω ολίσθησης.....	17
2.6 Μικροελεγκτής .....	17
Κεφάλαιο 3 Υλοποίηση Ερπυστριοφόρου Οχήματος .....	19
3.1 Συνδεσμολογία Ηλεκτρικού Κυκλώματος.....	19
3.2 Κώδικας .....	20
Κεφάλαιο 4 Επίλογος .....	21
4.1 Συνολική Κατασκευή.....	21
4.2 Προβλήματα.....	23
4.3 Μέλλον .....	24
Βιβλιογραφία .....	25

## Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σκοπός της εργασίας είναι η δημιουργία ενός ερπυστριοφόρου οχήματος το οποίο θα παρακολουθεί μια γραμμή ενώ θα μπορεί να αποφεύγει και εμπόδια. Στο όχημα θα βρίσκονται δύο τοποθετημένοι αισθητήρες υπερύθρων καθέτως προκειμένου να μπορούν να εντοπίζουν τη μαύρη γραμμή την οποία θα πρέπει να ακολουθά το όχημα. Η απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων είναι στα 3,5 εκατοστά που σημαίνει ότι η μαύρη γραμμή θα πρέπει να έχει περίπου αυτό το πλάτος προκειμένου να μπορεί να ακολουθήσει απροβλημάτιστα το όχημα τη πορεία που θα έχει καθοριστεί από τη τοποθέτηση της μονωτικής μάρης ταινίας στο χώρο που πρόκειται να κινηθεί το όχημα. Επιπλέον θα βρίσκεται τοποθετημένος άλλος ένας αισθητήρας υπερύθρων μακριάς απόστασης (~1,5m). Μέσω αυτού του αισθητήρα είναι εφικτός ο εντοπισμός εμποδίων που θα βρίσκονται κατά μήκος της προκαθορισμένης πορείας του οχήματος που έχει καθοριστεί από τον εντοπισμό της μαύρης γραμμής μεταξύ των κάθετων IR αισθητήρων. Εν συνεχεία, τα δεδομένα από τους αισθητήρες θα αξιοποιηθούν σε ένα μικροεπεξεργαστή, οποίος εν προκειμένω είναι το Arduino Uno Rev3. Με τη κατάλληλη επεξεργασία, θα εφαρμοσθούν οι κατάλληλες εντολές στα μοτέρ του οχήματος που θα καθορίσουν τη κίνηση του. Η κίνηση θα καθορισθεί από ένα συνδυασμό αλγορίθμων όπου θα αφορούν τις συνθήκες παρακολούθησης γραμμής και της αποφυγής εμποδίων. Ουσιαστικά θα παρουσιασθεί ένα αυτόνομο όχημα το οποίο με την εφαρμογή μόνο αυτών των αλγορίθμων, χωρίς τη παραπάνω διεπαφή του χειριστή το όχημα θα πρέπει να ακολουθήσει τη καθορισμένη πορεία αποφεύγοντας τυχόν εμπόδια που παρεμβάλλονται στη διαδρομή του.

Η χρήση ενός τέτοιου οχήματος, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε πολλούς τομείς όπως για τη μεταφορά φορτίων είτε για σκοπούς αξιοποίησης τους σε περιπτώσεις διαφόρου τύπων ελέγχου σε επικίνδυνο περιβάλλον. Μία πιθανή χρήση θα μπορούσε να είναι σε νοσοκομεία όπου γίνεται χρήση χρωματικών κωδικοποιημένων γραμμών, βοηθώντας ασθενείς προσωπικό και επισκέπτες για τη πλοήγηση τους στο χώρο. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ένα τέτοιου είδους αυτόνομο όχημα με σκοπό την εξυπηρέτηση του προσωπικού για παράδειγμα σε θέματα αρχειοθέτησης ή και για μεταφορά ιατρικού υλικού.



Σχήμα 1: γραμμές στο έδαφος για βοήθεια πλοήγησης σε νοσοκομείο [1]

## Κεφάλαιο 2 Υλικά υλοποίησης εργασίας

### 2.1 Κοστολόγηση

1)	(1) Πλαίσιο οχήματος: Black Gladiator - Tracked Robot Chassis	:25,81 €
2)	(1) Μικροελεγκτής : Arduino Uno Rev 3	:29,90 €
3)	(1) Motor driver: Dual Motor Driver Module L298N	: 4,20 €
4)	(1) Servo motor Waveshare SG90 Micro Servo	: 3,60 €
5)	(2) Αισθητήρας IR: Waveshare Infrared Proximity Sensor	: 8,80 €
6)	(1) Αισθητήρας long range IR : Sharp GP2Y0A02YK0F	:11,90 €
7)	(2) Μπαταρία: Battery Lithium 18650 3.6V 2600mAh	:13,60 €
8)	(1) Φορτιστής μπαταριών:Charger for Li-Ion 2x18650 0.5/1A USB	: 9,90 €
9)	(1) Breadboard: Breadboard Mini – Blue	:1,60 €
10)	(2) Jumper wires 15cm Male to Male Pack of 10	:3.60 €
11)	(1) Jumper wires 15cm Female to Male Pack of10	:1,80 €
12)	(1) Καλώδιο Wire 2x0.35mm2 Red-Black - 1m	:0,50 €
13)	(4) Βίδες Bolt M3 - L10mm DIN912	:0,40 €
14)	(4) Παξιμάδια Nut M3 Metal – Black	:0,20 €
15)	(2) Μονωτική ταινία 15 mm χρώμα:μαύρο 15 μέτρα	:5,7 €
16)	Ταινία διπλής όψεως αφρώδης λευκή 12mm x 10m	:2,25 €
<b><u>Συνολικό κόστος:</u></b>		<b><u>123,76 €</u></b>

Πίνακας 1: περιγραφή υλικών σε ποσότητα, είδος και κόστος

Τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε φαίνονται στη παραπάνω σελίδα ενώ στο πλαίσιο του οχήματος από το kit περιλάμβανε:

Ποσότητα	Είδος
1. (1)	Βάση
2. (2)	Μοτέρ τύπου 33GB-520 DC Motor
3. (2)	Τροχοί κίνησης
4. (2)	Φέροντες τροχοί
5. (2)	Ερπύστρια
6. (1)	Υποδοχή μπαταριών

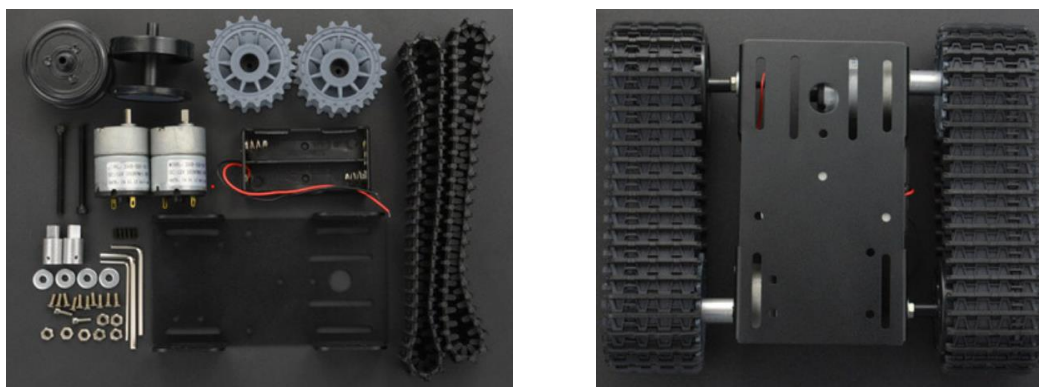
Πίνακας 2: περιγραφή υλικών στο kit Black Gladiator - Tracked Robot Chassis [2]

Το kit που επιλέχθηκε είναι αρκετά οικονομικό ενώ κατά την εγκατάσταση των επιμέρους μερών στο σασί του kit δεν αντιμετωπίστηκαν ιδιαίτερα προβλήματα. Στο μόνο μέρος που υπήρξε μια σχετική δυσκολία ήταν στην κατάλληλη αξιοποίηση του μήκους της ερπύστριας καθώς έπρεπε να αφαιρέσουμε τόσο υλικό ώστε κατά τη τοποθέτηση ανάμεσα στο τροχό κίνησης και στο φέροντα τροχό, η ερπύστρια να είναι πλήρως εκτεταμένη εξασφαλίζοντας με αυτό το τρόπο ομαλή κίνηση.

Ενώ παρακάτω παρουσιάζονται οι προδιαγραφές του kit από την εταιρία κατασκευής: DFROBOT.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ	
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	19.3*16.3*6cm(L*W*H)
ΚΑΘΑΡΟ ΒΑΡΟΣ	0,47kg
ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	Κράμα αλουμινίου 2mm
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ	Οξείδωση με αμμοβολή
ΥΛΙΚΟ ΕΡΠΥΣΤΡΙΑΣ	Πλαστικό μηχανικής
ΥΛΙΚΟ ΤΡΟΧΩΝ	Πλαστικό

Πίνακας 3: χαρακτηριστικά στο σασί από τη κατασκευάστρια εταιρεία[2]



Σχήμα 2: από αριστερά το κιτ με τα επιμέρους υλικά και από δεξιά συναρμολογημένο[2]

## 2.2 DC κινητήρες

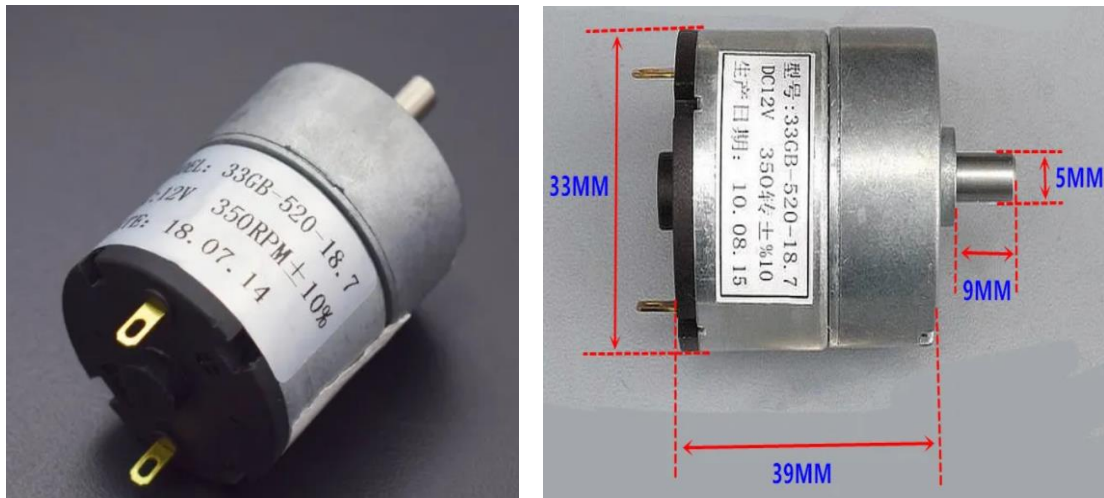
Για την εργασία μας, οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για τη κίνηση του ερπυστριοφόρου ήταν αυτοί που περιελάμβανε το κιτ και πιο συγκεκριμένα ήταν δύο κινητήρες με ονομασία:

33GB-520 DC Motor. Η ενσωμάτωση τους στο εν λόγω σερβοκιβώτιο ήταν αρκετά βοηθητικό υπό την έννοια ότι παρέχονταν οι κατάλληλες εσοχές στο σασί και τα υλικά για τη προσάρτηση τους στο σασί. Παρόλο που αναζητήθηκε στο διαδίκτυο το φυλλάδιο προδιαγραφών, δεν ήταν εφικτή η εύρεση του. Από τη κατασκευάστρια εταιρία του σερβοκιβωτίου προέρχονται οι παρακάτω προδιαγραφές στο πίνακα 4.

Χαρακτηριστικά κινητήρα	
Ονομαστική τάση	12V
Τάση	6-12V
Μεταγωγέας	ψήκτρες
Αποδοτικότητα	IE4
Βάρος	100g
Ισχύς εξόδου	170 RPM-350 RPM/Min
Τύπος	Κινητήρας DC
Ρεύμα χωρίς φορτίο	100mA

Πίνακας 4: χαρακτηριστικά κινητήρα 33GB-520 DC Motor[3]

Ενώ στο παρακάτω σχήμα αποτυπώνεται ο κινητήρας καθώς και με τις διαστάσεις αποτυπωμένες.

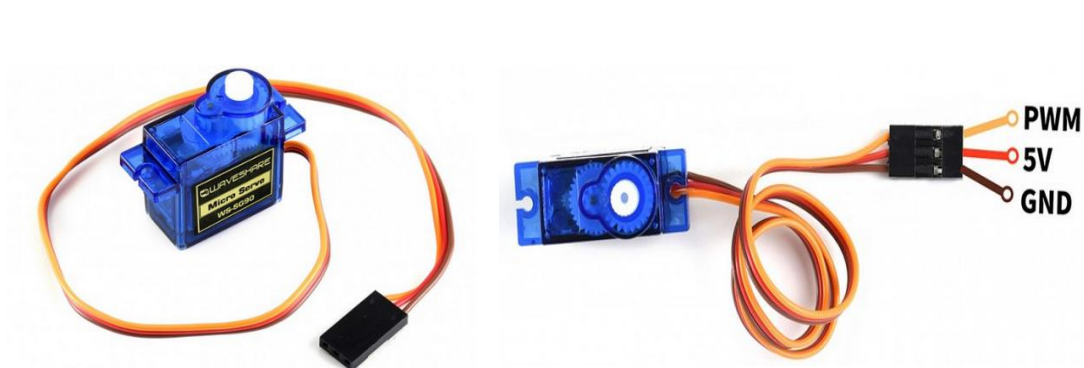


Σχήμα 3: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος 33GB-520[3]

Εκτός από αυτούς τους κινητήρες χρησιμοποιήθηκε επιπλέον ένας κινητήρας micro servo της εταιρίας Waveshare με ονομασία SG90. Από την εταιρία κατασκευής προκύπτουν οι ακόλουθες προδιαγραφές:

Προδιαγραφές Waveshare SG90	
Τάση Λειτουργίας	4,8~6V
Ροπή(4,8V)	2.0 kg/cm
Ταχύτητα(4,8V)	0.09s/60°
Γωνία περιστροφής	180°
Βάρος	10,5g
Διαστάσεις	22.8mm x 12.2mm x 28.5mm
Servo standar	25T (Futaba/Feetech)

Πίνακας 5: χαρακτηριστικά micro servo Waveshare SG90[4]



Σχήμα 4: Κινητήρας micro servo Waveshare SG90 με τις ενδείξεις συνδεσμολογίας(4)

Ο σκοπός χρήσης του συγκεκριμένου κινητήρα είναι για την ενσωμάτωση σε αυτόν μέσω μιας βάσης του αισθητήρα Infrared Proximity Sensor (IR) της εταιρίας Sharp προκειμένου να μπορεί να περιστρέφεται ο αισθητήρας για τον εντοπισμό τυχόν εμποδίων εκατέρωθεν της πορείας του για τη διαμόρφωση της σωστής απόφασης στην αποφυγή αυτών μέσω κατάλληλου αλγορίθμου.

## 2.3 Οδηγός για κινητήρες συνεχούς ρεύματος

Στη συνέχεια παρουσιάζεται με αναλυτικό τρόπο το ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο αποτέλεσε τον οδηγό για την οδήγηση των δύο κινητήρων που τοποθετήθηκαν. Πρόκειται για το Dual Motor Driver Module L298N. Ο σκοπός χρήσης του είναι για τον έλεγχο της ταχύτητας των κινητήρων, ουσιαστικά δηλαδή για τη παροχή της απαιτούμενης ροπής για τη κατάλληλη κίνηση του οχήματος.

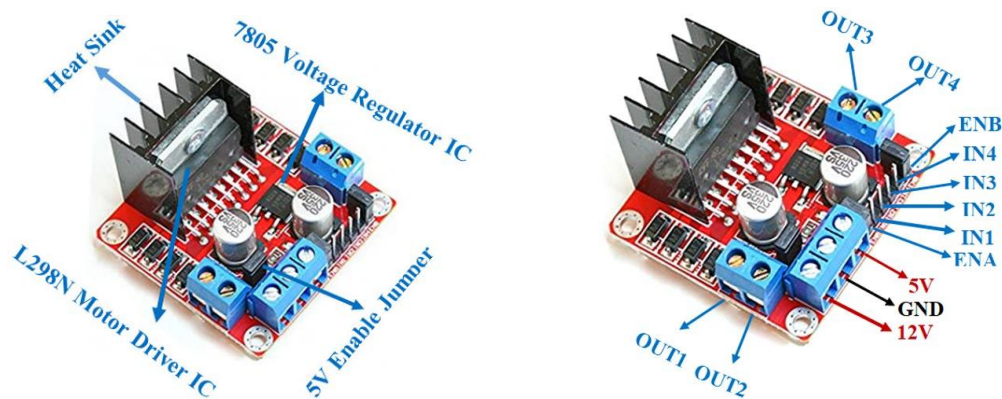
Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του οδηγού από το κατασκευαστή:

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΔΗΓΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	
ΤΑΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ	5V~35V
ΜΕΓΙΣΤΟ ΡΕΥΜΑ	2A
ΛΟΓΙΚΗ ΤΑΣΗ	5V
ΛΟΓΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	0mA-36mA
ΜΕΓΙΣΤΗ ΙΣΧΥΣ	25W
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	43 x 43 x 26mm

Πίνακας 6: χαρακτηριστικά κινητήρα οδηγού L298N Dual H-Bridge[5]

Ο σκοπός αυτού του ολοκληρωμένου είναι για τον ανεξάρτητο έλεγχο δύο κινητήρων μέχρι 2A και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ενώ επιπλέον υπάρχει ενσωματωμένος ρυθμιστής τάσης 5V όπως και δίοδοι προστασίας του ηλεκτρονικού. Όταν η τάση παροχής είναι μικρότερη ή ίση των 12V τότε το εσωτερικό κύκλωμα θα τροφοδοτείται από τον ρυθμιστή τάσης και η ακίδα των 5V θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ακίδα εξόδου για τη τροφοδοσία του μικροελεγκτή. Προκειμένου να ελεγχθεί η ταχύτητα των κινητήρων A και B αξιοποιούνται αντίστοιχα οι ακίδες ENA και ENB. Αν θέλουμε να ελέγξουμε τη κατεύθυνση για τους δύο κινητήρες τότε χρησιμοποιούνται οι ακίδες IN1 & IN2 και IN3 & IN4. Παρακάτω παρουσιάζεται ο οδηγός με τα μέρη του.



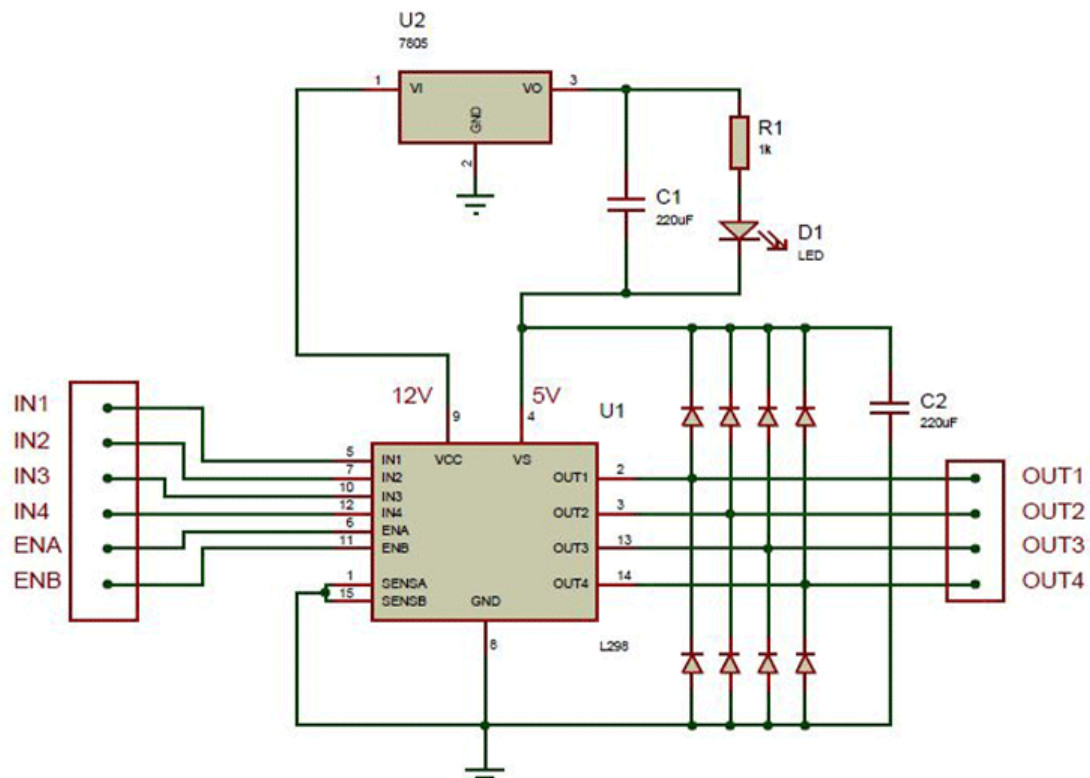


Σχήμα 5: Μέρη και συνδεσμολογίες του οδηγού L298N[5]

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ PINS ΤΟΥ L298N DUAL H BRIDGE	
Όνομα pin	Περιγραφή
IN1 & IN2	Ακίδες εισόδου κινητήρα A. Χρήση για τον έλεγχο της κατεύθυνσης περιστροφής του κινητήρα A.
IN3 & IN4	Ακίδες εισόδου κινητήρα B. Χρήση για τον έλεγχο της κατεύθυνσης περιστροφής του κινητήρα B.
ENA	Ενεργοποιεί το σήμα PWM για τον κινητήρα A
ENB	Ενεργοποιεί το σήμα PWM για τον κινητήρα B
OUT1 & OUT2	Ακίδες εξόδου για το κινητήρα A
OUT3 & OUT4	Ακίδες εξόδου για το κινητήρα B
12V	Είσοδος 12V από Πηγή ρεύματος DC
5V	Παρέχει τάση για το λογικό κύκλωμα μεταγωγής μέσα στο IC L298N
GND	Ακίδα γείωσης

Πίνακας 7: περιγραφή των ακίδων του οδηγού L298N Dual H-Bridge [5]

Τέλος για αυτόν τον οδηγό παρουσιάζεται το διάγραμμα εσωτερικού κυκλώματος για τον οδηγό οδήγησης.



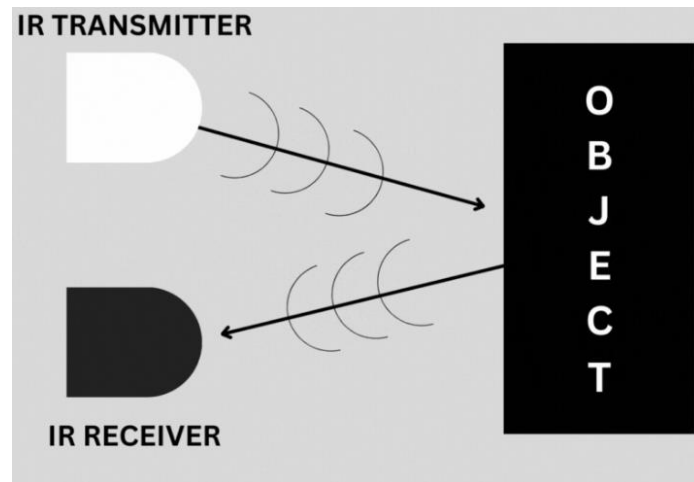
Σχήμα 6: Διάγραμμα εσωτερικού κυκλώματος οδηγού οδήγησης[5]

## 2.4 Αισθητήρες

Στη συνέχεια έπρεπε να γίνει η επιλογή των αισθητήρων προκειμένου το ερπυστριοφόρο όχημα να μπορεί αφενός να ανιχνεύσει την μαύρη γραμμή για τη παρακολούθηση γραμμής, αφετέρου τον εντοπισμό εμποδίων στη πορεία του. Η επιλογή των αισθητήρων για το πρώτο και το δεύτερο μέρος του σκοπού μας είναι της τεχνολογίας IR.

Η τεχνολογία IR ή αισθητήρες εγγύτητας υπέρυθρων όπου πρόκειται για ηλεκτρονικά στοιχεία όπου εντοπίζουν συγκεκριμένα κύματα ακτινοβολίας. Με αυτό το τρόπο οι αισθητήρες υπέρυθρων επιτρέπουν στα συστήματα να ανιχνεύουν το περιβάλλον τους και να ανταποκρίνονται κατάλληλα. Τέτοιου τύπου αισθητήρες συναντώνται στη καθημερινότητα μας στις τηλεοράσεις. Πιο συγκεκριμένα εκεί χρησιμοποιείται από τις τηλεοράσεις προκειμένου για την αποκωδικοποίηση των σημάτων από τα τηλεχειριστήρια.

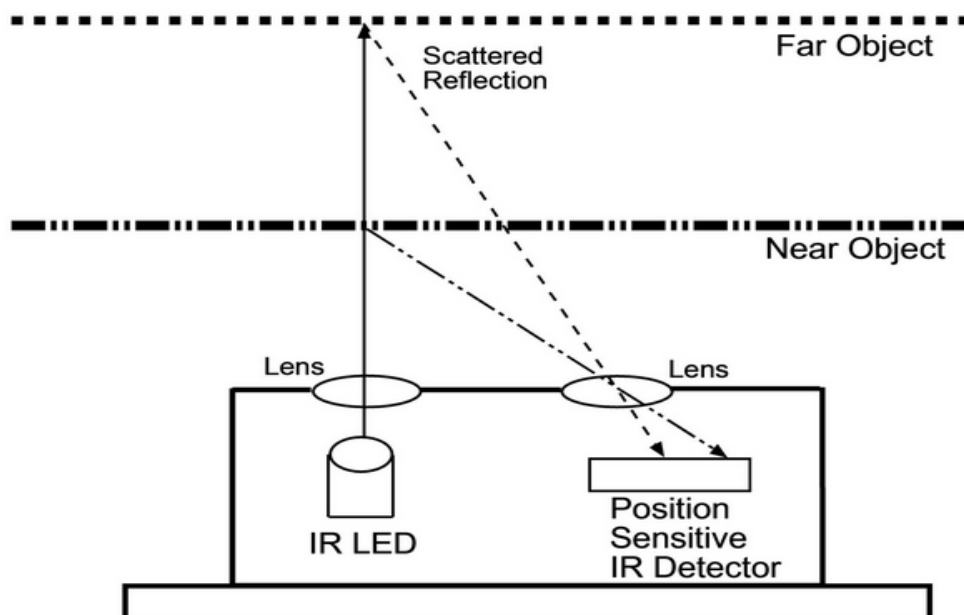
Πιο συγκεκριμένα για τη λειτουργία τους. Τα σήματα IR είναι μη ανιχνεύσιμα για τον άνθρωπο, ενώ στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα η ακτινοβολία IR μπορεί να βρεθεί είτε στην ορατή περιοχή είτε στη περιοχή των μικροκυμάτων. Είναι δηλαδή μια συσκευή μέσω της οποίας ανιχνεύεται η υπέρυθρη ακτινοβολία στο περιβάλλον της και παράγεται ένα ηλεκτρικό σήμα.[6]



Σχήμα 7: Λειτουργία αισθητήρα υπέρυθρων[6]

Η κατηγορία στην οποία ανήκουν οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ενεργοί αισθητήρες υπέρυθρων, δηλαδή εντοπίζουν κίνηση και απόσταση εκπέμποντας και λαμβάνοντας υπέρυθρη ακτινοβολία.

Η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή του τριγωνισμού μέσω μέτρησης της απόστασης με βάση τη γωνία της ανακλώμενης δέσμης. Πιο συνοπτικά η λειτουργία τους παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 8: Λειτουργία αισθητήρα υπέρυθρων μέσω τριγωνισμού[7]

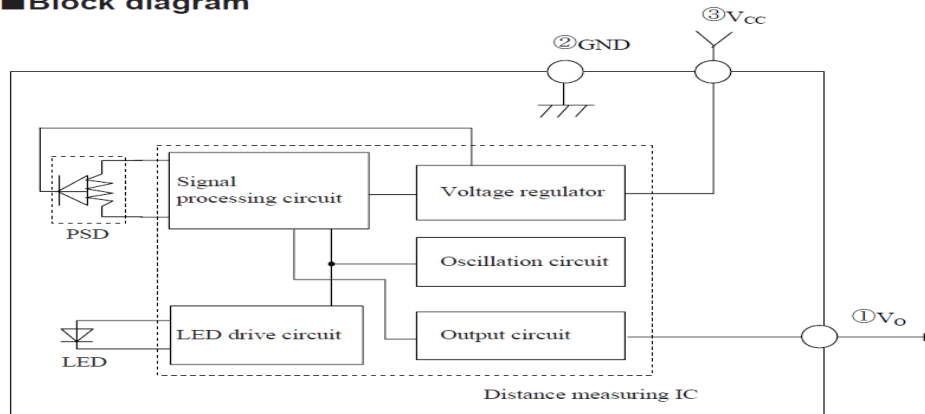
Υπέρυθρο φως εκπέμπεται από την IR LED πομπό. Η δέσμη φωτός χτυπάει το αντικείμενο P1 και ανακλάται υπό μια ορισμένη γωνία. Το ανακλώμενο φως θα φτάσει στο δέκτη PSD. Ενώ ο ίδιος αισθητήρας PSD θα καθορίσει τη θέση, απόσταση του ανακλαστικού αντικειμένου.

Πιο συγκεκριμένα για την εργασία μας χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας IR της εταιρίας Sharp ο οποίος είναι για μακρινές αποστάσεις με εύρος από 20 εκατοστά μέχρι 1,5 μέτρο. Ο αισθητήρας είναι ο Sharp GP2Y0A02YK0F (long range) και στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι προδιαγραφές από το φύλλο τεχνικών προδιαγραφών του κατασκευαστή.

<b>Προδιαγραφές Sharp IR (long range) GP2Y0A02YK0F</b>	
Τυπική τάση εισόδου	4,5-5,5V
Εύρος μέτρησης απόστασης	20-150cm
Τύπος εξόδου	Αναλογική
Ρεύμα λειτουργίας	33mA
Μικτό βάρος	0,006kg

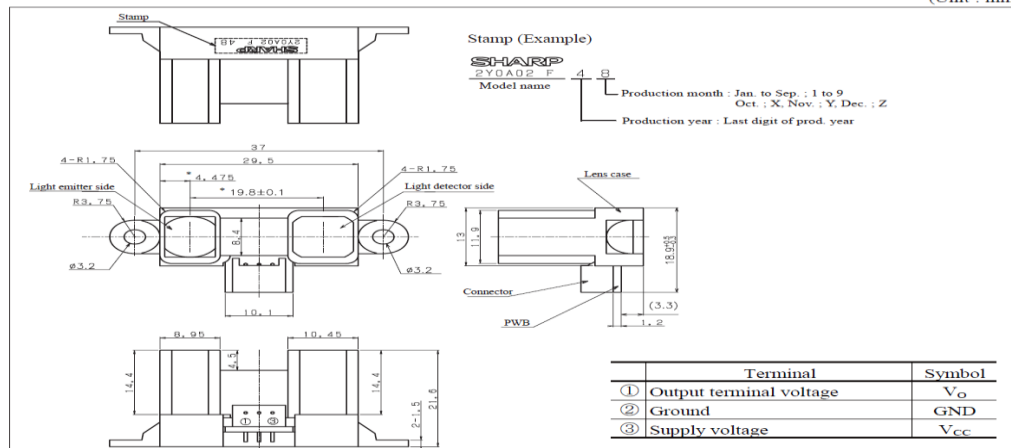
*Πίνακας 8: Τεχνικές προδιαγραφές Sharp IR GP2Y0A02YK0F[8]*

## Block diagram



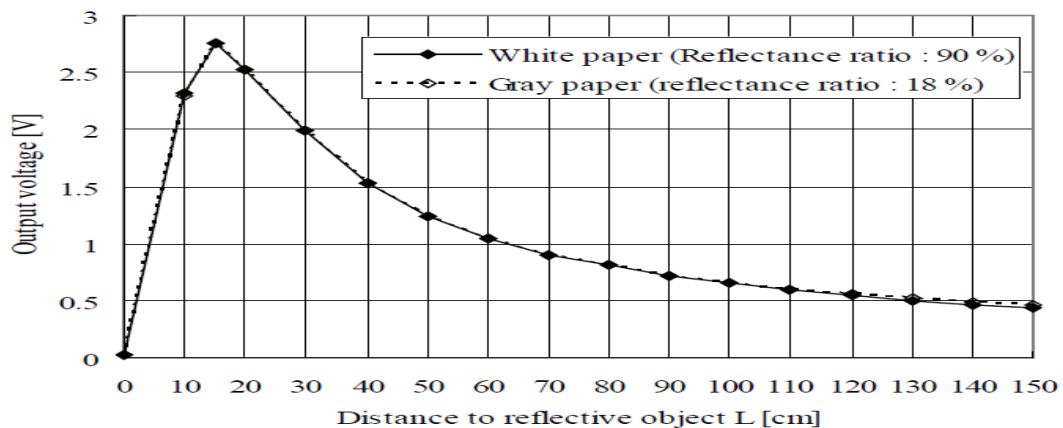
## Outline Dimensions

(Unit : mm)



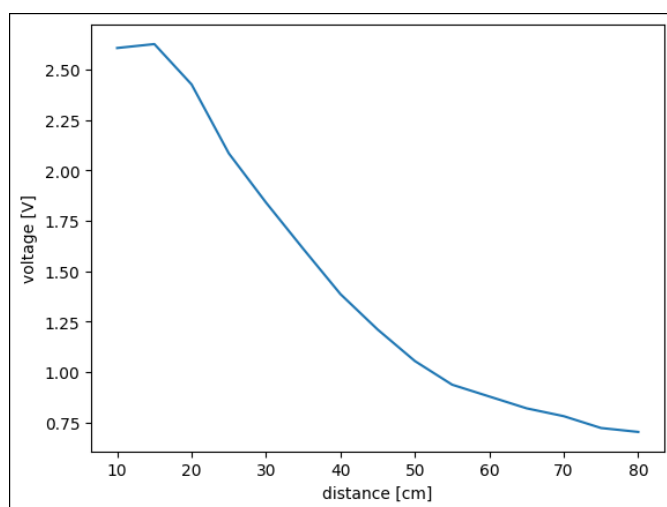
Σχήμα 9: Μπλοκ διάγραμμα και διαστάσεις του αισθητήρα Sharp IR GP2Y0A02YK0F[8]

Ο κύριος σκοπός των αισθητήρων απόστασης είναι η μέτρηση της απόστασης από εμπρός του αισθητήρα μέχρι την επιφάνεια του αντικειμένου. Παρόλα αυτά που ειπώθηκε προηγουμένως οι αισθητήρες δε μετράνε απευθείας την απόσταση. Μετράνε τη τάση και η μετρώμενη τάση αντιστοιχεί σε ορισμένη απόσταση. Για το συγκεκριμένο αισθητήρα η συνάρτηση που συσχετίζει την απόσταση με τη τάση έχει το ακόλουθο σχήμα όπως φαίνεται στο παράδειγμα που παραθέτει ο κατασκευαστής.



Σχήμα 10: Συσχέτιση τάσης με απόσταση σύμφωνα με παράδειγμα κατασκευαστή[8]

Επομένως εμείς αυτό που κάναμε ήταν να δημιουργήσουμε πειραματικά τη καμπύλη του κατασκευαστή, όταν λειτουργεί δηλαδή ο αισθητήρας και για τη τιμή που δίνει σε τάση μέσω της καμπύλης να βρίσκεται η απόσταση. Αυτό δηλαδή που έγινε ήταν η μέτρηση της τάσης τοποθετώντας μπροστά από τον αισθητήρα και μετρώντας τη τάση παίρνουμε τιμές συσχέτισης μεταξύ της τάσης και της απόστασης. Σε αυτά τα στοιχεία μέτρησης θα πρέπει να ταιριάζει μια καμπύλη της ανάλογης μορφής με το παράδειγμα του κατασκευαστή.[9] Επομένως θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για να επιτευχθεί αυτό. Οι μετρήσεις μας ξεκινήσανε από απόσταση 10 εκατοστών μέχρι 80 εκατοστών με αύξηση ανά 5 εκατοστά. Καταγράψαμε τα σημεία και σε επόμενο βήμα θα πρέπει με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων να σχεδιασθεί η καμπύλη που θα ταιριάζει στα σημεία.



Σχήμα 11: Συσχέτιση τάσης με απόσταση σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι παρόλο που ξεκινήσαμε τις μετρήσεις στα 10cm, θα δεχθούμε τις μετρήσεις από τα 20cm και έπειτα καθώς στα 3,2 Volt έχει το ανώτατο σημείο η καμπύλη που αντιστοιχεί στα 20cm και στη συνέχεια φθίνει συνεχώς. Στο ακόλουθο εύρος 20 με 80 εκατοστά η συνάρτηση τάσης-απόστασης θα προσεγγιστεί μέσω της συνάρτησης:

$$v = k_1 d^{k_2}$$

Όπου οι  $k_1$ ,  $k_2$  αποτελούν πραγματικές σταθερές που χρειάζεται να εκτιμηθούν,  $v$  είναι η τάση και  $d$  είναι η απόσταση. Τη παραπάνω σχέση θα πρέπει να μετατραπεί λόγω της μη γραμμικότητας της σε μια πιο απλή μορφή:

$$\ln v = \ln k_1 + k_2 \ln d$$

Κάνοντας την υπόθεση ότι  $y = \ln v$ ,  $c_1 = \ln k_1$ ,  $c_2 = k_2$ ,  $x = \ln d$ , τότε η προηγούμενη σχέση γράφεται ως:

$$y = c_1 + c_2 x$$

Συγκεντρώνεται στη συνέχεια το πλήθος των μετρήσεων, όπου  $y_i = \ln v_i$  όπου  $v_i$  αντιστοιχεί στην  $i$  μέτρηση για απόσταση  $d_i$ . Συνεπώς, προκύπτει  $x_i = \ln d_i$ . Η

συγκέντρωση των μετρήσεων η σε πλήθος γίνεται στο ακόλουθο συμβολικό πίνακα, εκφράζοντας με αυτό το τρόπο όλες τις μετρήσεις τάσης με απόσταση.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}}_{\mathbf{y}} \approx \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_N \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}}$$

Όμως οι σταθερές του διανύσματος  $\mathbf{c}$  εκτιμώνται λύνοντας το ακόλουθο πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων.

$$\min_{\mathbf{c}} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{c}\|_2^2$$

Η λύση δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{\mathbf{c}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y}$$

Έπειτα υπολογίζονται οι σταθερές  $k_1, k_2$  ως

$$\hat{k}_1 = e^{\hat{c}_1}$$

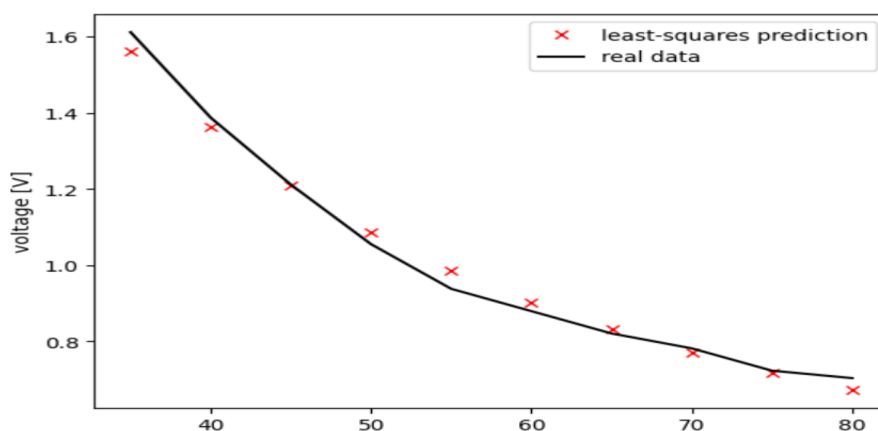
$$\hat{k}_2 = \hat{c}_2$$

Οι εκτιμώμενες τιμές προέκυψαν ως  $k_1=58.382$ ,  $k_2=-1.0187$ . Έχοντας υπολογίσει πλέον τις σταθερές, αντιστρέφοντας τη συνάρτηση προκύπτει:

$$d = (v/k_1)^{1/k_2}$$

Στη συνέχεια τη σχέση για την εύρεση του  $d$  την εφαρμόζουμε σε κώδικα Arduino προκειμένου να έχουμε σε πραγματικό χρόνο την απόσταση από τη τάση.[9]

Ενώ στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η απόδοση της πρόβλεψης σε σχέση με τα δεδομένα εκτίμησης.



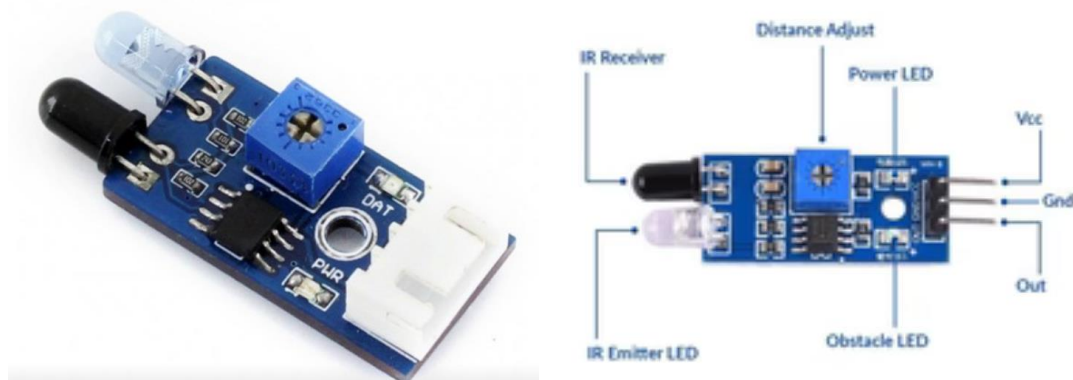
Σχήμα 12: Απόδοση πρόβλεψης από τα πειραματικά δεδομένα

Έπειτα για τις ανάγκες του πρώτου σκέλους της εργασίας που αφορά στην παρακολούθηση γραμμής επιλέχθηκαν δύο αισθητήρες IR μικρής εμβέλειας (2-30cm) της εταιρίας Waveshare. Ο σκοπός είναι η μαύρη γραμμή να βρίσκεται ανάμεσα στους δύο αισθητήρες οι οποίοι απέχουν 4cm επομένως η μαύρη γραμμή που θα προκύψει από την εφαρμογή της μαύρης μονωτικής ταινίας θα πρέπει να έχει πλάτος κοντά στα 3cm εφαρμόζοντας δηλαδή διπλή ταινία στο έδαφος κατά την εφαρμογή της καθορισμένης τροχιάς. Οι προδιαγραφές από την εταιρία παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

<b>Προδιαγραφές Waveshare Infrared Proximity Sensor</b>	
Τάση λειτουργίας	3,3-5V
Εύρος ανίχνευσης	2-30cm(ανάλογα χρώμα εμποδίου)
Γωνία ανίχνευσης	35°
Ρεύμα λειτουργίας	30Ma
Προτεινόμενο περιβάλλον	Εσωτερικά, αποφυγή ηλιοφάνειας
Μικτό βάρος	0,006kg
Διαστάσεις	39mm x 15.5mm

Πίνακας 9: προδιαγραφές Waveshare IR sensor[10]

Στη παρακάτω εικόνα όπως αποτυπώνεται ο αισθητήρας με τα στοιχεία και την αντιστοιχία των ακροδεκτών του.



Σχήμα 13: Περιγραφή αισθητήρα Waveshare IR [10],[11]

Ως προς τη λειτουργία όταν η κατεύθυνση ανίχνευσης συναντά ένα εμπόδιο, το υπέρυθρο φως αντανακλάται πίσω για να ληφθεί από το δέκτη, αφού ο συγκριτής LM393 επεξεργαστεί ένα ψηφιακό σήμα, καθώς ανάβει η πράσινη ένδειξη, η απόσταση ανίχνευσης μπορεί να ρυθμιστεί με κατσαβίδι μέσω του ποτενσιόμετρου.



## 2.5 Οδήγηση ερπυστριοφόρου μέσω ολίσθησης

Υπάρχει μια ειδοποιός διαφορά στην οδήγηση μεταξύ των οχημάτων με τροχούς και στα ερπυστριοφόρα. Τα πρώτα δεν επιτρέπεται να ολισθαίνουν στην επιφάνεια ενώ στα ερπυστριοφόρα αποτελεί τη μορφή κίνησης τους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του επαναπροσανατολισμού του ρομπότ περιστρέφοντας τους τροχούς που βρίσκονται στην ίδια επιφάνεια σε διαφορετικές ταχύτητες ή σε αντίθετες κατευθύνσεις. Λόγω της μεγάλης έκτασης επαφής με το έδαφος μέσω των ερπύστριων έχουν την ικανότητα τέτοιου είδους ρομπότ για καλύτερους ελιγμούς σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα με τροχούς.

Υπάρχει όμως ένα μείζον μειονέκτημα σε τέτοιου είδους οχήματα. Λόγω της μεγάλης ολίσθησης κατά τη διάρκεια της στροφής είναι δύσκολο να προβλεφθεί το ακριβές κέντρο περιστροφής του ρομπότ ενώ η αλλαγή σε θέση και προσανατολισμό θα εξαρτάται σημαντικά από τη τριβή του εδάφους που βρίσκεται. Επομένως αν και επιτυγχάνεται η αρκετά καλή πραγματοποίηση ελιγμών, η ύπαρξη σε επιφάνεια υψηλής τριβής, οι κινητήρες που είναι τοποθετημένοι δε θα είναι σε θέση να εξασφαλίσουν επαρκή ροπή. Άρα η αξιοποίηση τέτοιου είδους ρομπότ είναι σε περιβάλλον με χαμηλή τριβή εδάφους.[12]

## 2.6 Μικροελεγκτής

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε τον μικροελεγκτή Arduino Uno Rev 3. Η πλακέτα αυτή είναι η καλύτερη επιλογή, με πλεονεκτήματα την ευκολία στον προγραμματισμό, την εύκολη σύνδεση επενεργητών και αισθητήρων, και τη τεράστια κοινότητα που βοηθάει στην εκμάθηση του. Αυτός ο μικροελεγκτής, είναι αρκετός για την κατασκευή μας, αφού καλύπτει τις ανάγκες μας με τους αισθητήρες (εμπρόσθιο και πλαϊνούς) και τον σερβοκινητήρα.



Σχήμα 14: Arduino Uno Rev3

Επίσης, στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή, τα οποία τον έκαναν μια καλή λύση για την κατασκευή του ερπιστροφόρου.

- 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 15: Χαρακτηριστική πλακέτας Arduino

## Κεφάλαιο 3 Υλοποίηση Ερπυστριοφόρου Οχήματος

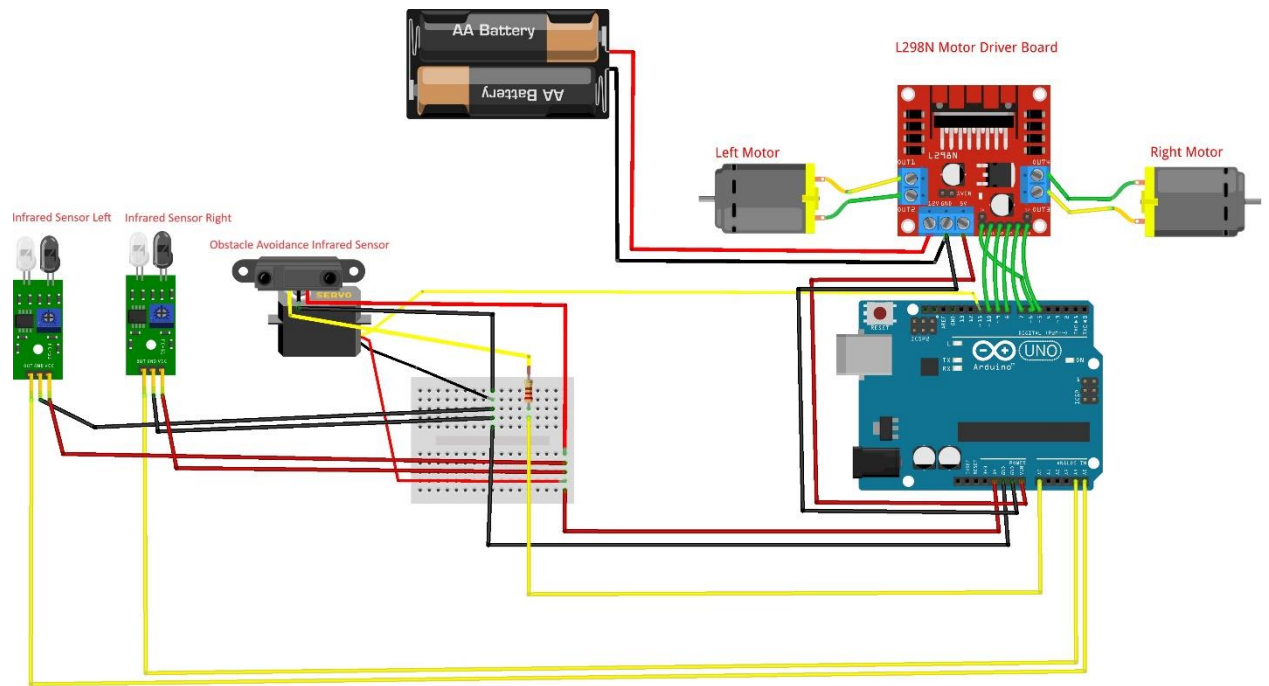
### 3.1 Συνδεσμολογία Ηλεκτρικού Κυκλώματος

Καθώς έχουν τοποθετηθεί πάνω στο σασί οι αισθητήρες (εμπρόσθιος IR, και 2 πλαϊνοί IR), ο σερβοκινητήρας, ο μικροελεγκτής, το breadboard, και το drive (L298N) πρέπει να κάνουμε τις συνδέσεις των καλωδίων.

Αρχικά, παίρνουμε ρεύμα από τις μπαταρίες και το στέλνουμε στο drive (L298n), όπου και δίνουμε ενέργεια στο Arduino. Στη συνέχεια, έχουμε συνδέσει το Drive με το Arduino με τις θύρες in<sub>1-4</sub> στις θέσεις PWM: 7-10 όπου τα Pin:7,8 είναι για τον δεξιό κινητήρα και πιο συγκεκριμένα με το Pin:7 έχουμε δεξιόστροφη κίνηση και με το Pin:8 αριστερόστροφη, ενώ με τα Pin:9,10 έχουμε στον αριστερό κινητήρα αντίστοιχα δεξιόστροφη κίνηση (Pin:9) και αριστερόστροφη κίνηση (Pin:10). Τα enA και enB του drive στις θύρες PWM: 5,6 αντίστοιχα υπάρχουν για τη δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας των κινητήρων. Από το output του drive έχουμε συνδέσει τον αριστερό κινητήρα στο output 1,2 και τον δεξιό κινητήρα στο output 3,4. Μετά, έχουμε συνδέσει στο Arduino τον μπροστινό αισθητήρα υπέρυθρων για την αποφυγή εμποδίων με το Analog Pin: 0. Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την απόσταση από το μπροστινό αντικείμενο και τον αισθητήρα χρησιμοποιήσαμε τον τύπο που είχαμε λάβει παραπάνω  $d = \left(\frac{V}{k_1}\right)^{\frac{1}{k_2}}$  με τα  $k_1 = 58.3823$  και  $k_2 = -1.0186$ , όπου  $V = Voltage$ . Στη συνέχεια, συνδέσαμε και τους πλάγιους αισθητήρες IR (υπέρυθρων) με τα Analog Pin: 4 για τον αριστερά και Analog Pin:5 για τον δεξιά. Μετά, συνδέσαμε τα Ground και  $V_{in}$  των αισθητήρων στο breadboard το οποίο έπαιρνε παροχή από τα 5V και Ground του Arduino.

Τέλος το Servo έχει συνδεθεί επίσης με το Ground και  $V_{in}$  του breadboard και στο PWN pin: 11, με σκοπό όταν βλέπει κάποιο εμπόδιο μπροστά ο αισθητήρας υπέρυθρων, ο σερβοκινητήρας να γυρνάει αριστερά και δεξιά για να ελέγξει αν υπάρχουν εμπόδια. Αν υπάρχουν μόνο μπροστά εμπόδια, τότε δίνει την εντολή να στρίψει δεξιά, αν υπάρχουν εμπόδια και μπροστά και αριστερά τότε στρίβει δεξιά, αν έχει εμπόδια μπροστά και δεξιά, τότε στρίβει αριστερά, ενώ αν έχει εμπόδια και μπροστά και αριστερά και δεξιά τότε το όχημα θα πρέπει να κάνει όπισθεν και να κάνει μεγαλύτερη στροφή στα δεξιά για να το αποφύγει.

Παρακάτω φαίνονται στο σχεδιάγραμμα όλες οι συνδεσμολογίες του ηλεκτρικού κυκλώματος που χρειάστηκαν για να υλοποιηθεί το ερπυστριοφόρο όχημα



Σχήμα 16: Ηλεκτρικό κύκλωμα κατασκευής

### 3.2 Κώδικας

Ο κώδικας που υλοποιήσαμε για την ολοκλήρωση της κατασκευής έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Arduino IDE (C++). Σκοπός του κώδικα είναι να ελέγχει το ρομπότ με δύο κύριες λειτουργίες:

- Ακολουθώντας γραμμή: Το ρομπότ χρησιμοποιεί δύο αισθητήρες υπέρυθρων για να ακολουθήσει μια μαύρη γραμμή. Εάν και οι δύο αισθητήρες ανιχνεύσουν λευκό (δείχνοντας ότι η γραμμή δεν υπάρχει), κινείται προς τα εμπρός. Εάν κάποιος αισθητήρας εντοπίσει μαύρο, προσαρμόζει την κατεύθυνσή του ανάλογα, ενώ αν και οι δύο αισθητήρες εντοπίσουν μαύρο τότε σταματάει το όχημα.
- Αποφυγή εμποδίων: Το ρομπότ χρησιμοποιεί έναν μπροστινό αισθητήρα υπέρυθρων για να ανιχνεύσει εμπόδια. Εάν ένα εμπόδιο εντοπιστεί σε μια απόσταση των 20εκ., αποφασίζει να στρίψει αριστερά ή δεξιά με βάση τις μετρήσεις από την αριστερή και δεξιά μεριά που στρίβει με τον σερβο από την συνάρτηση `check_side` και μετά αποφασίζει εάν το όχημα θα στρίψει αριστερά ή δεξιά με τη συνάρτηση `compareDistance`.

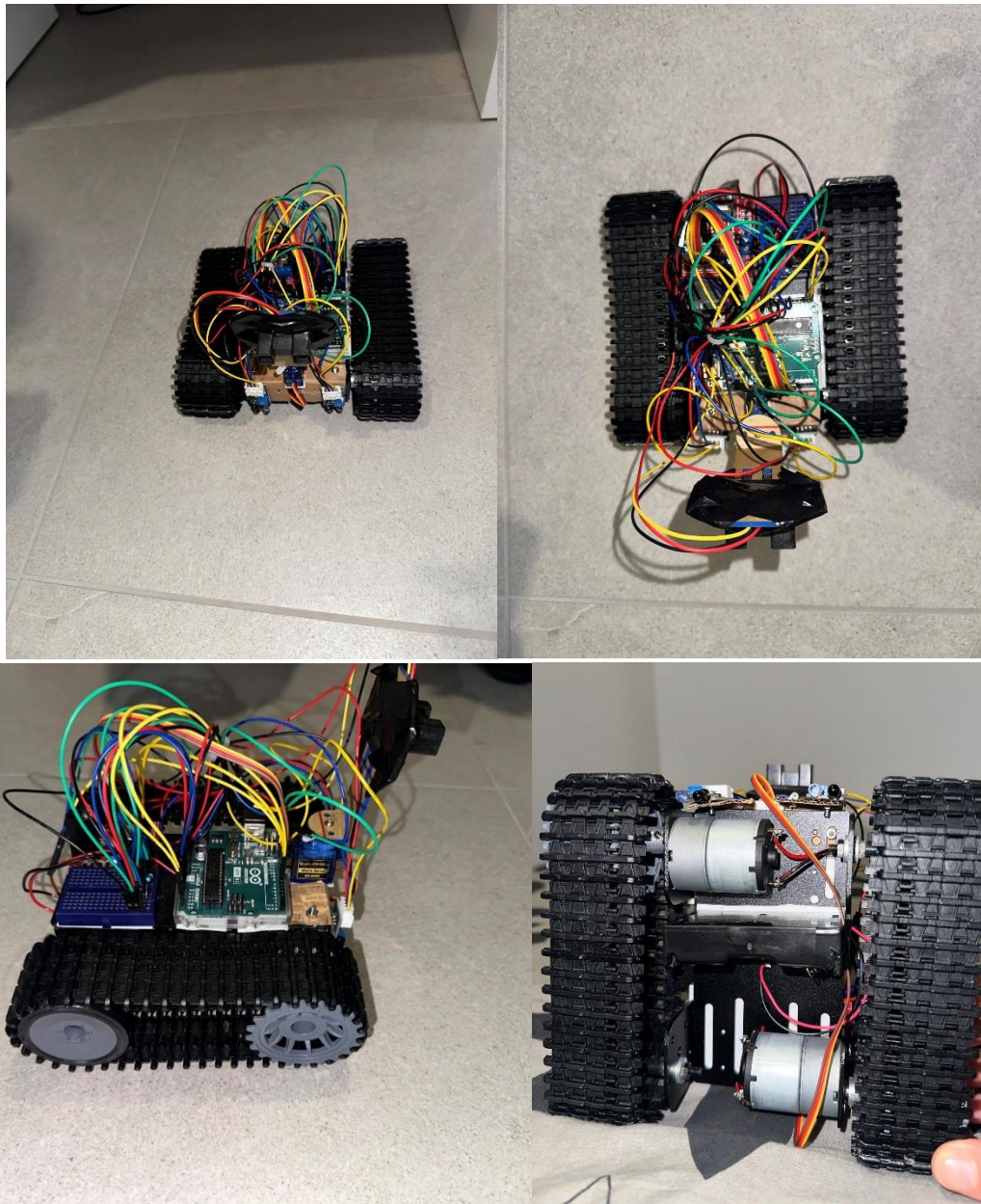
- Η κίνηση του ρομπότ και για τις δύο λειτουργίες ελέγχεται ρυθμίζοντας την ταχύτητα και την κατεύθυνση του αριστερού και του δεξιού μοτέρ μέσω της συνάρτησης `rotateMotor`, η οποία δέχεται τιμές από 0 έως 255. Για την κίνηση πάνω στη μαύρη γραμμή έχουμε δώσει ταχύτητα 190, ενώ για τις στροφές έχουμε δώσει ταχύτητα 200. Τέλος υπάρχει ο κεντρικός βρόγχος επανάληψης ο οποίος ελέγχει συνεχώς τις μετρήσεις των αισθητήρων και αποφασίζει για την επόμενη ενέργεια του ρομπότ.

## Κεφάλαιο 4 Επίλογος

### 4.1 Συνολική Κατασκευή

Τελικά, η κατασκευή του ερπυστριοφόρου ολοκληρώθηκε επιτυχώς ολοκληρώνοντας και τους δύο στόχους, την αποφυγή εμποδίων, και ακολουθώντας τη μαύρη γραμμή. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η συνολική κατασκευή:





Σχήμα 17: Ολοκληρωμένη κατασκευή ερπυστριοφόρου

Επιπλέον, φαίνονται στις παρακάτω εικόνες, στιγμιότυπα από πειράματα που κάναμε για τη σωστή πλοήγηση του οχήματος.



Σχήμα 18: Το όχημα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων

Στις παραπάνω εικόνες βλέπουμε το όχημα να προσπερνάει ένα εμπόδιο (Εικ. 1), στη συνέχεια να επανέρχεται στη μαύρη γραμμή (Εικ. 2), ενώ στην Εικ. 3 το βλέπουμε να ακολουθάει τη μαύρη γραμμή σε μια δεξιόστροφη πορεία. Τέλος, το βλέπουμε να σταματάει μπροστά από ένα εμπόδιο και να ελέγχει με τον σερβοκινητήρα αν υπάρχουν εμπόδια αριστερά ή δεξιά του οχήματος.

## 4.2 Προβλήματα

Κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας εμφανίστηκαν διάφορα προβλήματα, όπως η σωστή τοποθέτηση των μαύρων γραμμών ώστε το ερπυστριοφόρο όχημα να μπορεί να την παρακολουθεί χωρίς να τη χάσει. Δηλαδή, εάν έχουμε τοποθετήσει

τη μαύρη γραμμή να διαγράφει μια απότομη στροφή τότε μπορεί το όχημα λόγω της ταχύτητάς του να ξεπεράσει τη γραμμή και να μην στρίψει με αποτέλεσμα να ξεπεράσει τη μαύρη γραμμή.

Επιπλέον, ένα πρόβλημα που έπρεπε να επιλυθεί ήταν ο σωστός προγραμματισμός μέσω του Arduino ώστε το όχημα να μπορεί να επανέλθει πάνω στη μαύρη γραμμή αφού αποφύγει το εμπόδιο το οποίο είχε βρει μπροστά του. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι το όχημα δεν μπορεί να εντοπίσει εμπόδια τα οποία είναι κοντά στη μαύρη γραμμή, όπου θα χτύπαγε το όχημα αλλά ο μπροστινός αισθητήρας δε θα έπαιρνε μέτρηση ότι υπάρχει κοντά κάποιο εμπόδιο.

### 4.3 Μέλλον

Για το παρόν πρότζεκτ, θα μπορούσε μελλοντικά να τοποθετηθεί διαφορετικός αισθητήρας από τον Infrared (υπέρυθρων) ο οποίος μας δίνει τιμές για μόνο ένα συγκεκριμένο σημείο, αλλά ένας αισθητήρας αποφυγής εμποδίων με μεγαλύτερη προβολή δίνοντας μας τη δυνατότητα να εντοπίζουμε ευκολότερα τα εμπόδια και να καταλαβαίνει για το μέγεθος των εμποδίων που πρέπει να περάσει. Ένας ακόμη τρόπος βελτίωσης είναι να τοποθετηθεί ένας μικροεπεξεργαστής τύπου Raspberry Pi για να παρέχει περισσότερη υπολογιστική ισχύ, και την δυνατότητα χρήσης περισσότερων αισθητήρων για πιο αποδοτική παρακολούθηση γραμμής. Επίσης, με τη χρήση πλαϊνών αισθητήρων το όχημα θα μπορεί να κρατήσει απόσταση από τα εμπόδια τα οποία πρέπει να αποφύγει αλλά και να καταλάβει το πότε τα έχει ξεπεράσει πλήρως ώστε να επιστρέψει πίσω στη μαύρη γραμμή.



## Βιβλιογραφία

1) Ιστοσελίδα άντλησης εικόνας

<https://www.flickr.com/photos/hugovk/11726255524>

2) Ιστοσελίδα εταιρίας σασί του ρομπότ <https://www.dfrobot.com/product-1860.html>

3) Ιστοσελίδα πληροφοριών κινητήρα DC  
<https://componentslibrary.com/33gb-520-18-7-motor-datasheet.html>

4) Ιστοσελίδα εταιρίας με πληροφορίες για micro servo  
<https://www.waveshare.com/sg90-servo.htm>

5) Ιστοσελίδα τεχνικών χαρακτηριστικών L298N  
<https://components101.com/modules/l293n-motor-driver-module>

6) Ιστοσελίδα επεξήγησης λειτουργίας IR αισθητήρων  
<https://robocraze.com/blogs/post/ir-sensor-working>

7) Ιστοσελίδα επεξήγησης αρχή λειτουργίας IR αισθητήρων  
<https://www.seeedstudio.com/blog/2019/12/23/distance-sensors-types-and-selection-guide/>

8) Ιστοσελίδα τεχνικών προδιαγραφών αισθητήρα IR Sharp  
<https://www.sparkfun.com> › Sensors › Infrared

9) Ιστοσελίδα επεξήγησης βαθμονόμησης του αισθητήρα Sharp  
<https://aleksandarhaber.com/noise-reduction-and-calibration-of-distance-sensors-sharp-infrared-sensors/>

10) Ιστοσελίδα προδιαγραφών Wavshare IR  
[https://www.waveshare.com/wiki/Infrared\\_Proximity\\_Sensor](https://www.waveshare.com/wiki/Infrared_Proximity_Sensor)

11) Ιστοσελίδα άντλησης εικόνας IR  
<https://robocraze.com/products/ir-proximity-sensor-1>

12) Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh, Βιβλίο: Introduction to Autonomous Mobile Robots, 2004 Massachusetts Institute of Technology