

Σχεδίαση και Υλοποίηση ενός Μίνι-Ρομποτικού Συστήματος

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΠΑΝΤΩΝΙΟΥ – ΧΑΤΖΗΓΙΩΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΩΣΤΑΣ ΒΛΑΧΟΣ

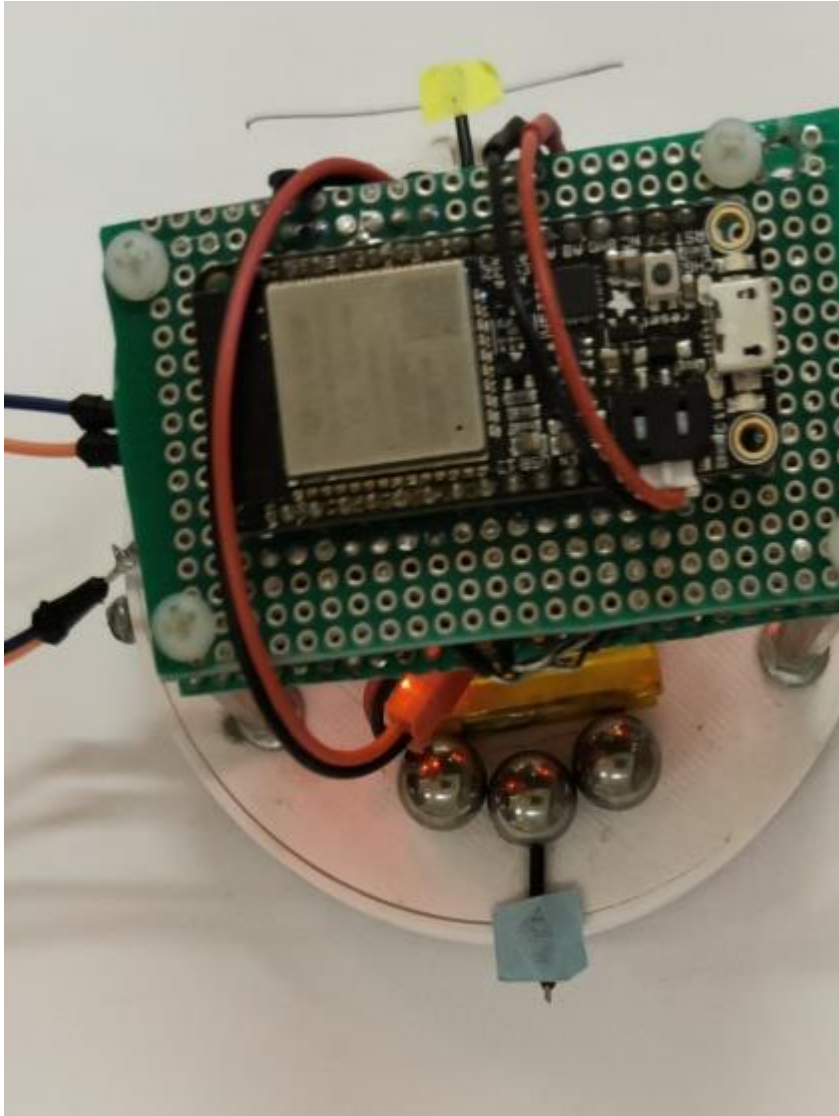


ΤΜΗΜΑ ΜΗΧ. Η/Υ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & ENGINEERING

UNIVERSITY OF IOANNINA



Το τελικό mini-robot

Μίνι – Ρομπότ με βάση Φυγοκεντρικές Δυνάμεις

•Σκοπός:

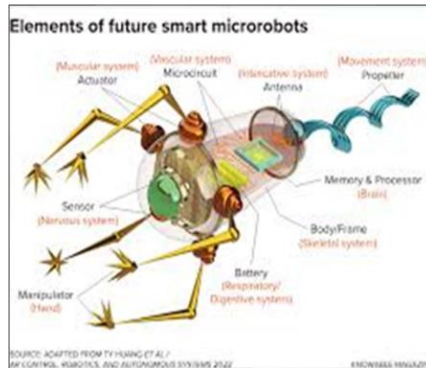
- Σχεδίαση και ανάπτυξη καινοτόμου ρομποτικού συστήματος διαστάσεων εκατοστών βασισμένων σε κίνηση με δονήσεις.
- Αξιοποίηση φυγοκεντρικών δυνάμεων για απλούστευση και μείωση κόστους σε σχέση με συμβατικές μεθόδους.
- Κίνηση σε κλίμακα μικρομέτρων.

•Σχεδίαση & Υλοποίηση:

- Ολοκληρωμένη διαδικασία: μαθηματική μοντελοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή του ρομπότ.
- Πειραματική αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος.

Η Σημασία της Μικρο-ρομποτικής

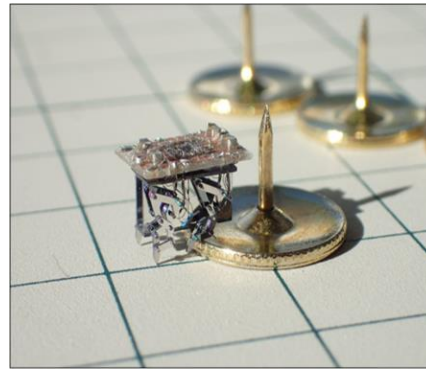
Εφαρμογές



Ιατρικό μικρο-ρομπότ¹

- Βιοϊατρικές Εφαρμογές
- Μικρο-συναρμολόγηση
- Περιβαλλοντική τεχνολογία

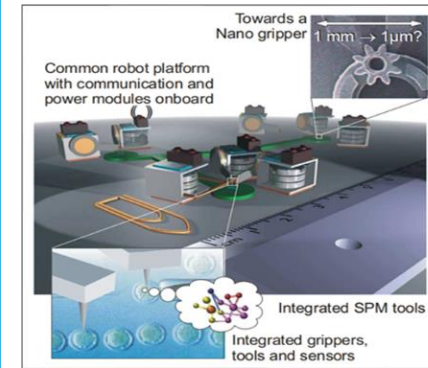
Προκλήσεις



Μικρο-ρομπότ²

- Πολυπλοκότητα Μηχανισμών Κίνησης
- Υψηλή Κατανάλωση Ενέργειας
- Υψηλό Κόστος

Ανάγκη



MICRON Έρευνα³

- Μειωμένη Πολυπλοκότητα και Χαμηλή Κατανάλωση
- Λειτουργία σε μη-ιδανικό περιβάλλον
- Αυτόνομη κίνηση

1. <https://www.thehindubusinessline.com/business-tech/medical-micro-bots-cruising-towards-reality/article67665445.ece>

2. <https://www.openaccessgovernment.org/a-millimetre-sized-microrobot-with-an-artificial-brain/99886/>

3. MICRON: Small Autonomous Robot for Cell Manipulation Applications

Μικρο-ρομποτική με Δονήσεις



MICRON ROBOT III

Εναλλακτική κίνηση με δόνηση σε σχέση με παραδοσιακές.

Πλεονεκτήματα:

- Απλοποιημένος σχεδιασμός και κατασκευή.
- Δυνατότητα λειτουργίας χωρίς πολύπλοκους μηχανισμούς κίνησης.
- Ικανότητα μετακίνησης σε δύσκολα ή περιορισμένα περιβάλλοντα.

Πιεζοηλεκτρικά Συστήματα και Σφιγκτήρες

Πρώτο Παράδειγμα Δονητικής Μικρορομποτικής:

❖ Βάση Λειτουργίας:

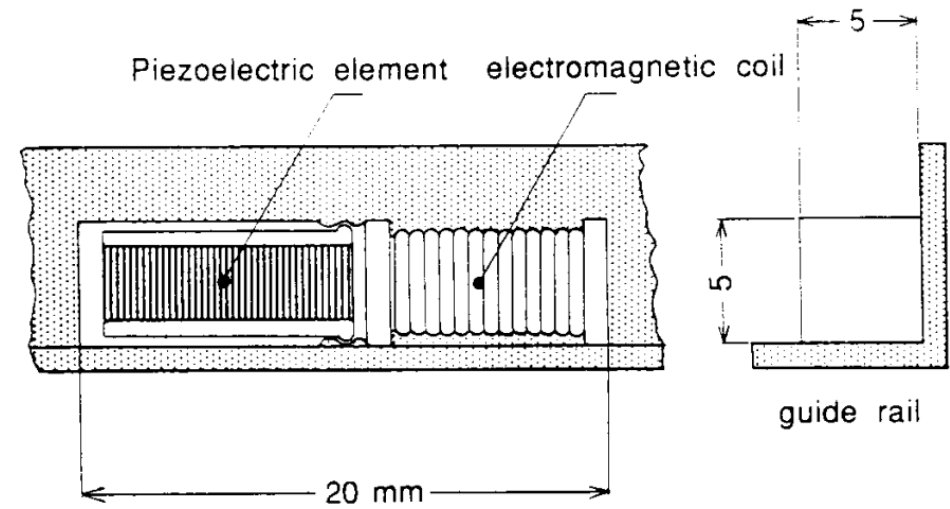
- **Πιεζοηλεκτρικά:** Υλικά που μεταβάλλουν το μέγεθος με ηλεκτρικό πεδίο.
- **Ηλεκτρομαγνητικοί σφιγκτήρες:** Σταθεροποίηση του ρομπότ για ώθηση σε συγκεκριμένο άξονα.

❖ Μετατροπή Δόνησης σε Μετατόπιση:

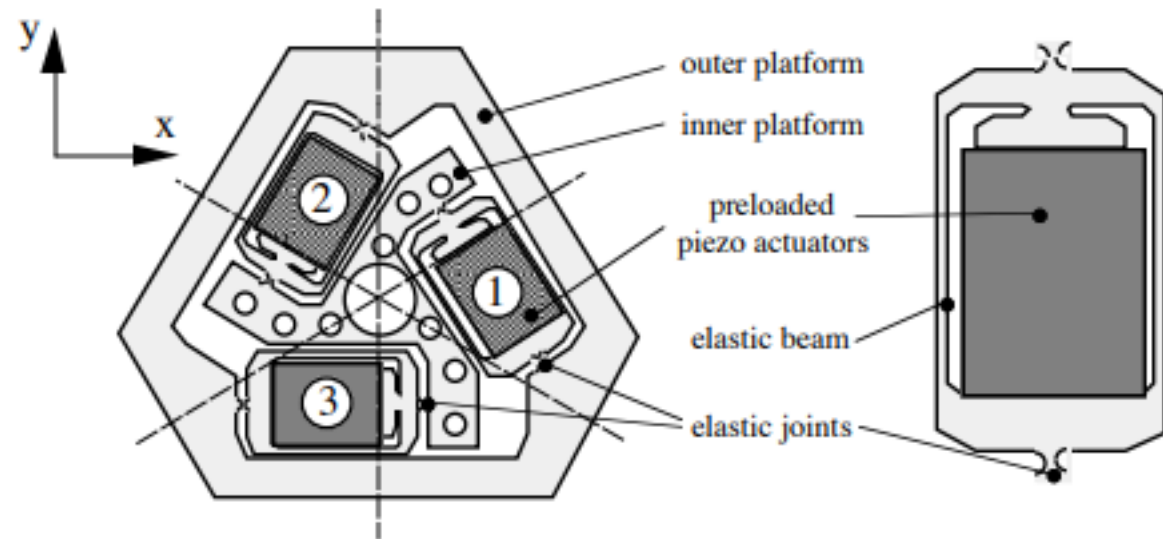
- **Συγκρατημένη Κίνηση:** Εναλλασσόμενη ενεργοποίηση για διαδοχικά μικρά βήματα.
- **Αποτέλεσμα:** Καθαρή μετατόπιση.

❖ Περιορισμοί:

- **Υψηλό κόστος:** Λόγο απαιτήσεων σε υψηλή τάση και υλοποίηση.
- **Ασυνεχής κίνηση:** Διακριτή και όχι ομαλή μεταφορά.
- **Πολυπλοκότητα:** Δύσκολη μαθηματική μοντελοποίηση για πρόβλεψη κίνησης.

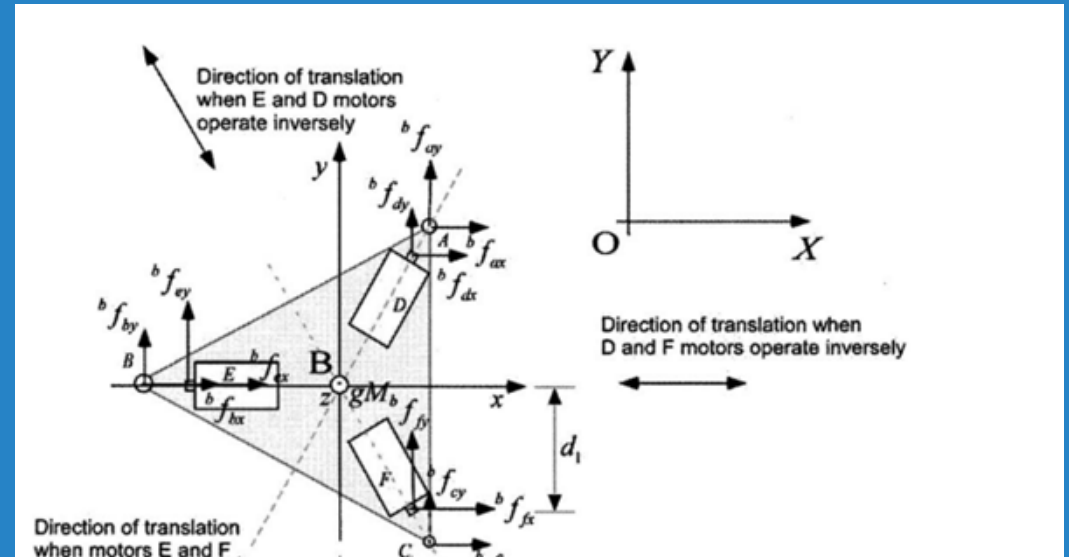


Πιεζοηλεκτρικός Κινητήρας⁴



Αναλυτικό Σχέδιο του Επενεργητή για πιεζοηλεκτρικο μηχανισμό⁴

Περιστρεφόμενοι Κινητήρες Δόνησης



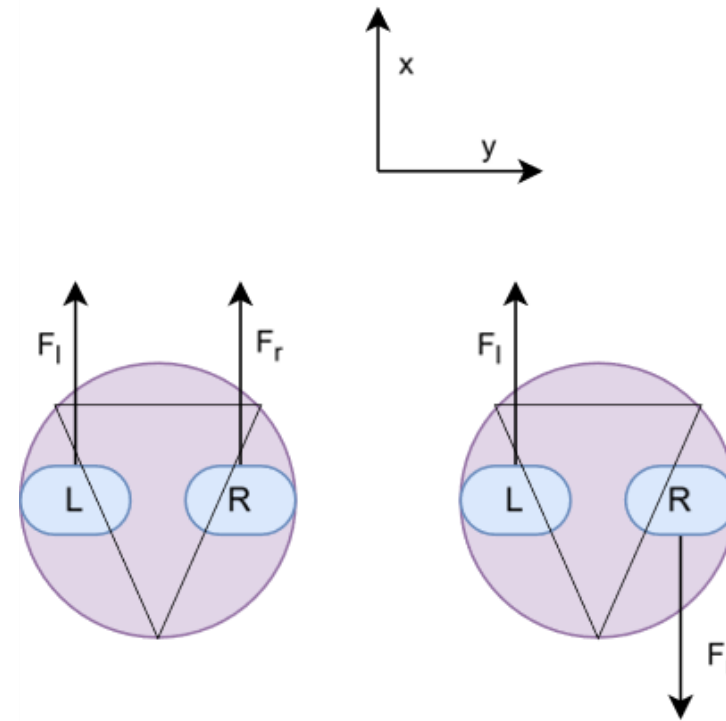
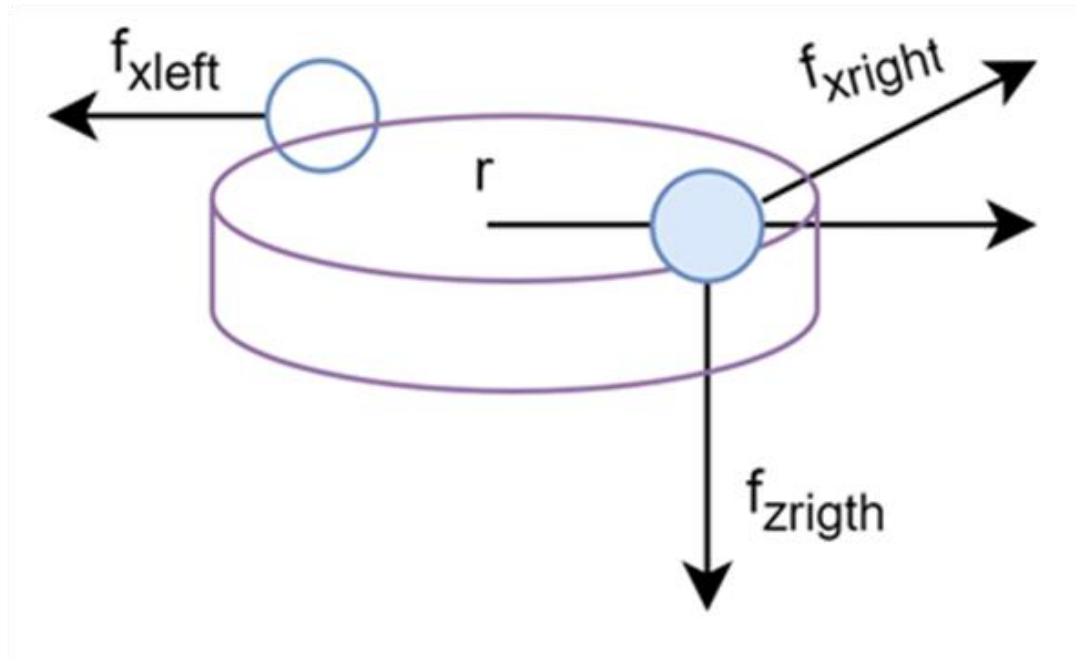
Επενεργητές και δυνάμεις που ασκούνται σε πλατφόρμα⁵

Λειτουργία:

- ❑ Περιστρεφόμενες μάζες προκαλούν δόνηση.
- ❑ Χρήση πολλών κινητήρων για αύξηση βαθμών ελευθερίας με συνεχή τρόπο.

Λύσεις στους Περιορισμούς των Πιεζοηλεκτρικών:

- ❑ Χαμηλότερη τάση λειτουργίας.
- ❑ Παρέχουν πιο συνεχή και ελεγχόμενη κίνηση.
- ❑ Απλούστερη και φθηνότερη κατασκευή.



Η ιδέα της κίνησης

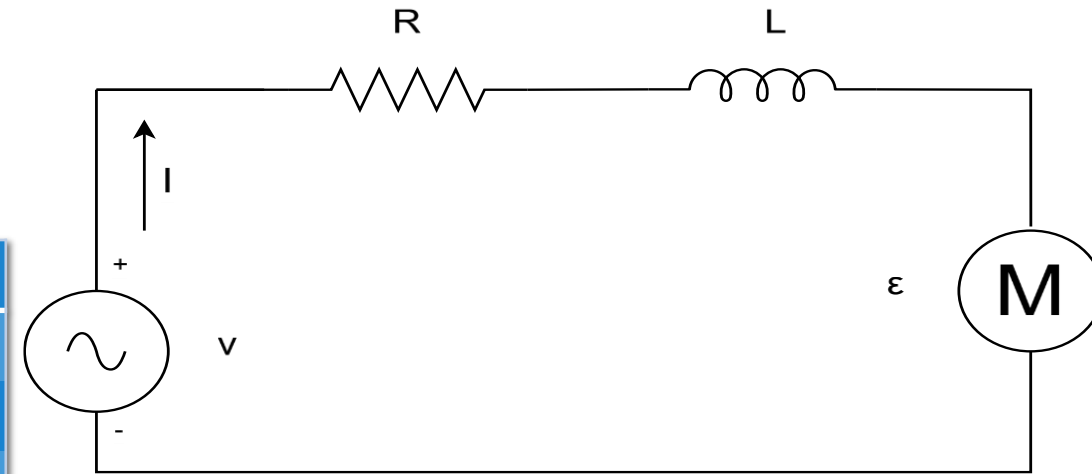
Ηλεκτρικό Μοντέλο DC Κινητήρα Δόνησης

Ηλεκτρικό Κύκλωμα Κινητήρα

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την τάση σε σχέση με την ροή του ρεύματος:

$$V = \varepsilon + IR + L \frac{dI}{dt}$$

Παράμετρος	Σημασία
V	Εφαρμοζόμενη τάση
ε	Ηλεκτρεγερτική δύναμη
I	Ρεύμα
R	Αντίσταση του κυκλώματος
L	Αυτεπαγωγή του κυκλώματος
t	Χρόνος
K_ε	Ηλεκτρική σταθερά κινητήρα
ω	Γωνιακή συχνότητα περιστροφής

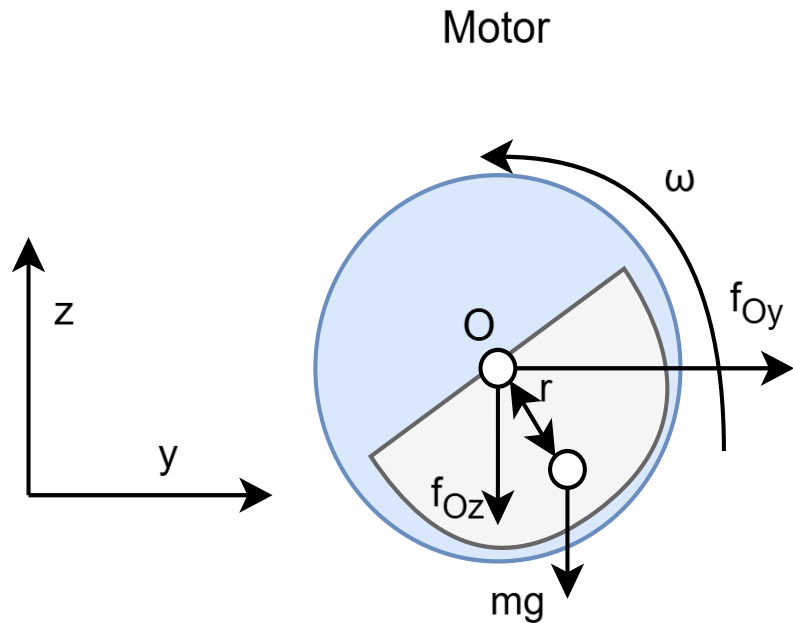


Κύκλωμα DC κινητήρα

Με την χρήση της ηλεκτρικής σταθεράς:

$$\varepsilon = K_\varepsilon \omega$$

Ηλεκτρικό Μοντέλο DC Κινητήρα Δόνησης



Σχέδιο κινητήρα και δυνάμεων

Σταθερές κινητήρα μέσω πειραμάτων και μαθηματικών μοντέλων⁶:

1. Σταθερά Ροπής του Κινητήρα
 - $K_T = \frac{1}{\omega_{ss}} (V_s - R i_{ss})$
2. Ιξώδης τριβή
 - $b = \frac{1}{\omega_{ss}} (i_{ss} K_T - c \operatorname{sgn} \omega_{ss})$
3. Σταθερά Αδράνειας Έκκεντρου
 - $J = \frac{1}{2} m r^2$
4. Συντελεστής Τριβής Κινητήρα
 - $c = i_s K_t$

Σταθερά	Περιγραφή
$g[m/s^2]$	Επιτάχυνση βαρύτητας
$r [mm]$	Ακτίνα έκκεντρου
$m [g]$	Μάζα έκκεντρου
$i_{ss} [A]$	Ρεύμα λειτουργίας
$i_s [A]$	Ρεύμα εκκίνησης
$\omega_{ss} [rad/s]$	Γωνιακή ταχύτητα
$\theta[rad]$	Γωνιακή θέση

Προσομοίωση Μοντέλου Κινητήρα

Τελική Εξίσωση Κίνησης Κινητήρα:
Δύναμη:

Φυγόκεντρο

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{K_t V}{JR} - \frac{bR + K_t^2}{JR} \frac{d\theta}{dt} - \frac{mgr \sin(\theta)}{J} - \frac{c \operatorname{sign}\left(\frac{d\theta}{dt}\right)}{J}, \quad f = m\omega^2 r \sin\theta$$

Η επίλυση της διαφορικής με μέθοδο Runge – Kutta 4^{ης} τάξης:

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

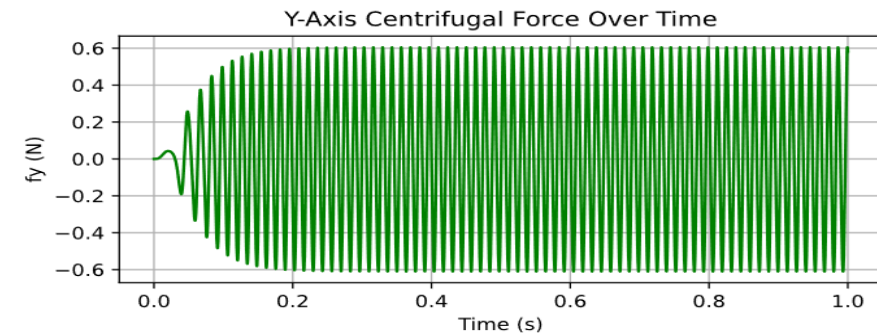
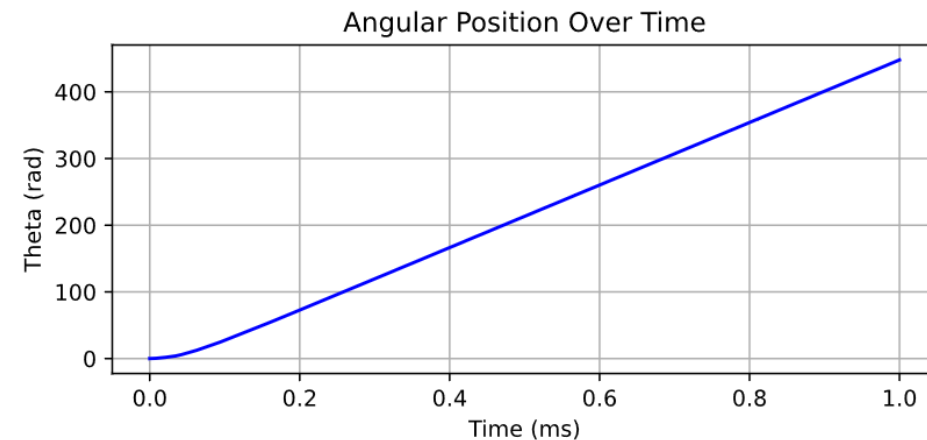
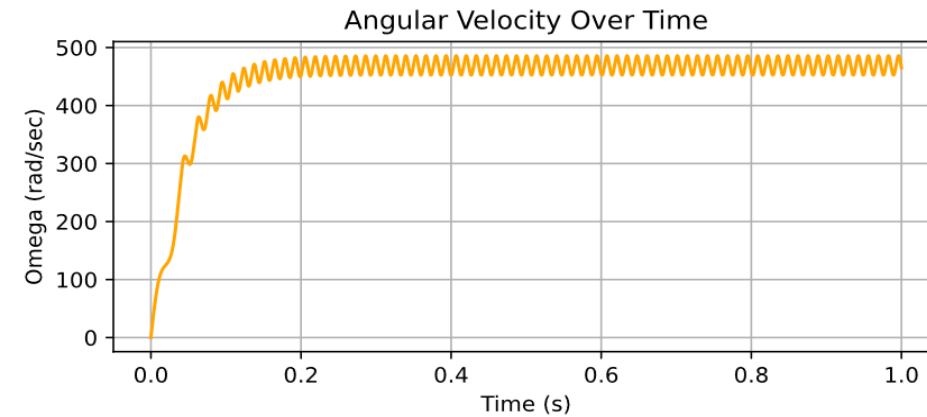
$$\omega_{n+1} = \omega_n + \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4)$$

Λογισμικό:

☐ C++

☐ Python

Σταθερά	Πειραματική τιμή
R [Ω]	10.71
K _t [Nm/A]	8.373×10 ⁻⁴
c [Nm]	1.17222×10 ⁻⁵
b [Ns/m]	2.61675×10 ⁻⁸
J [kgm ²]	3.4375×10 ⁻⁹
r [mm]	2.5
m [g]	1.1
i _{ss} [A]	0.05
i _s [A]	0.014
V[volt]	0.65



Δυναμική Πλατφόρμας

Για τον οριζόντιο άξονα (y) :

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = f_{Oy} - f_{fr} = m\omega^2 r \sin\theta - f_{fr}$$

Για τον κατακόρυφο άξονα (z):

$$0 = f_{az} + f_{bz} - (Mg - f_{oz})$$

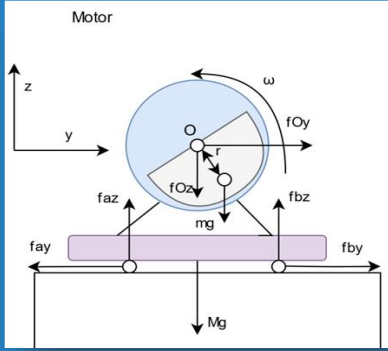
$$f_{fr} = \begin{cases} f_c \operatorname{sgn}\left(\frac{dy}{dt}\right), & y \neq 0 \\ f_{oy}, & \|f_{oy}\| < f_c, \frac{dy}{dt} = 0, \frac{d^2y}{dt^2} = 0 \\ f_c \operatorname{sgn}(f_{oy}), & \|f_{oy}\| > f_c, \frac{dy}{dt} = 0, \frac{d^2y}{dt^2} \neq 0 \end{cases}$$

$$f_c = (Mg - f_{Oz})\mu$$

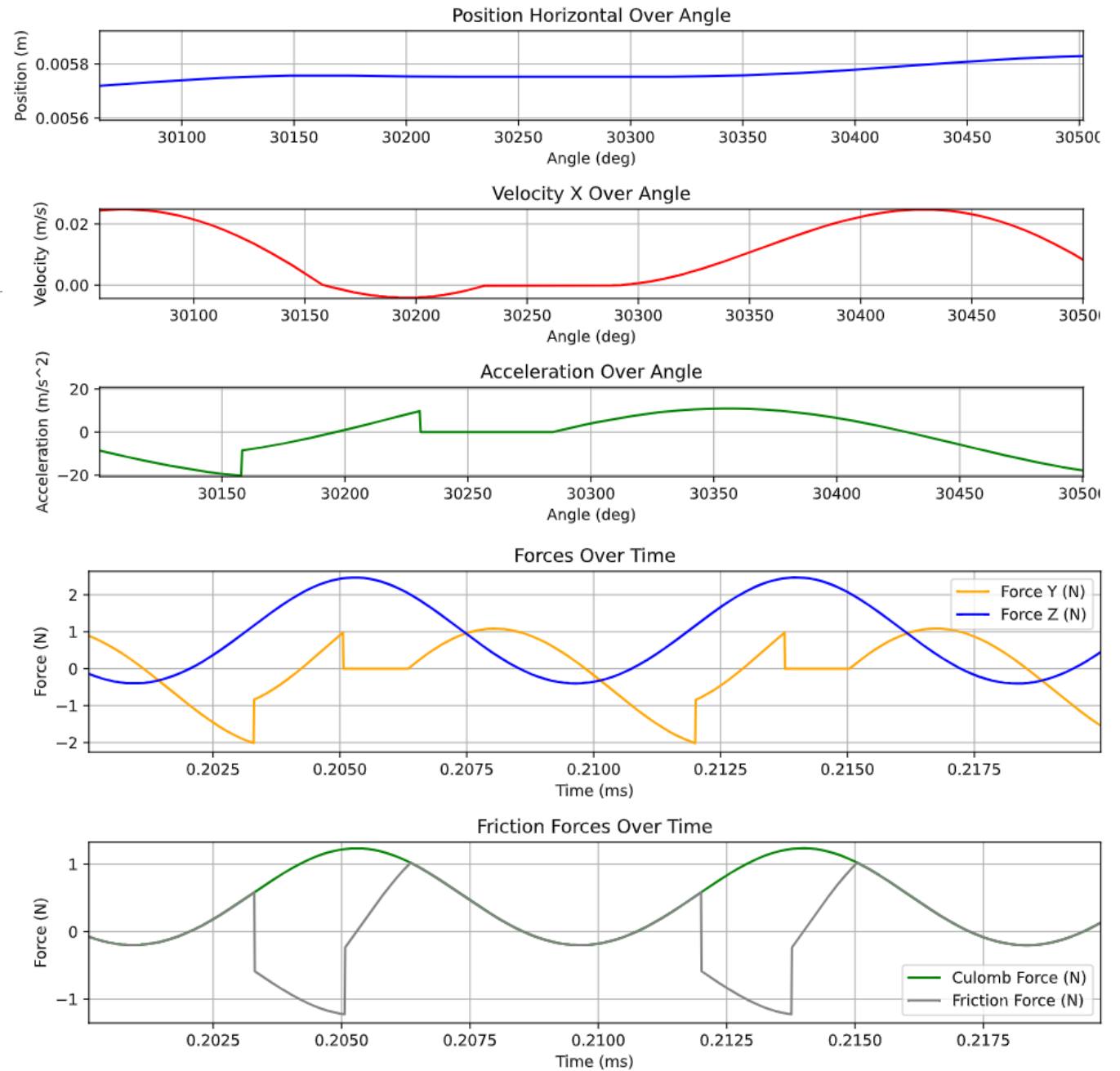
Θέση: $x_{n+1} = x_n + v_n dt + \frac{1}{2} a_n dt^2$

Ταχύτητα: $v_{n+1} = v_n + a_n dt$

$$\text{Επιτάχυνση: } a = \frac{f_{oy} - f_{fr}}{M}$$



Πλατφόρμα 1DOF κίνηση



Συνολική Δυναμική: Η Κίνηση του Ρομπότ 1.

Μοντελοποίηση δύο βαθμών ελευθερίας και των δυνάμεων στο σύστημα

Δύναμη:

$$F_x(t) = -m\omega_{right}^2 r \sin(\theta_{right}) + m\omega_{left}^2 r \sin(\theta_{left})$$

$$F_z(t) = -2mg - m\omega_{right}^2 r \cos(\theta_{right}) - m\omega_{left}^2 r \cos(\theta_{left})$$

Ροπή:

$$M_x(t) = -dm\omega_{right}^2 r \cos(\theta_{right}) + dm\omega_{left}^2 r \cos(\theta_{left})$$

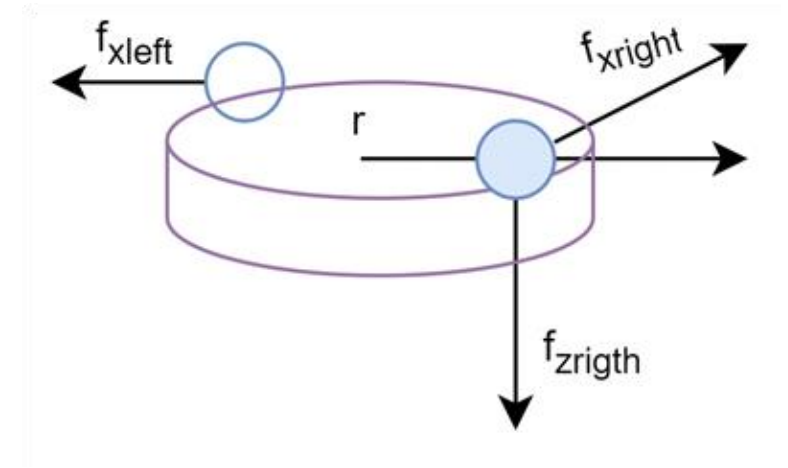
$$M_z(t) = -dm\omega_{right}^2 r \sin(\theta_{right}) - dm\omega_{left}^2 r \sin(\theta_{left})$$

Μεταφορική Κίνηση:

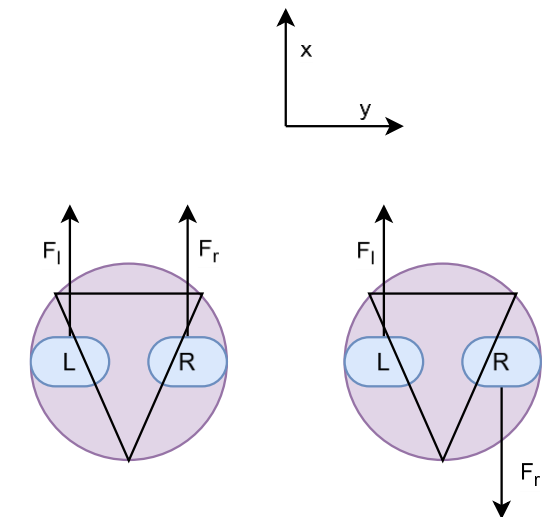
$$a_x = \frac{F_x(t) - f_{fr,A} \cdot \cos(\theta_A) - f_{fr,B} \cdot \cos(\theta_B) - f_{fr,C} \cdot \cos(\theta_C)}{M}, \quad v_{n+1}^x = v_n^x * \cos(\theta_n) - v_n^y * \sin(\theta_n)$$

$$a_y = \frac{-f_{fr,A} \cdot \sin(\theta_A) - f_{fr,B} \cdot \sin(\theta_B) - f_{fr,C} \cdot \sin(\theta_C)}{M}, \quad v_{n+1}^y = v_n^x * \sin(\theta_n) + v_n^y * \cos(\theta_n)$$

$$x_{n+1} = x_n + v_n^x dt - \frac{1}{2} a_n^x dt^2, \quad y_{n+1} = y_n + v_n^y dt - \frac{1}{2} a_n^y dt^2$$



Δράση δυνάμεων στην πλατφόρμα



Κάτοψη πλατφόρμας

Συνολική Δυναμική: Η Κίνηση του Ρομπότ 2.

Περιστροφική:

$$a = \frac{M_z(t) - r_A \cdot f_{fr,A} \cdot \sin(\theta_A) - r_B \cdot f_{fr,B} \cdot \sin(\theta_B) - r_C \cdot f_{fr,C} \cdot \sin(\theta_C)}{I}$$

$$\omega_{n+1} = \omega_n + a_n \cdot dt$$

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \omega_n \cdot dt + \frac{1}{2} a_n \cdot dt^2$$

Τριβή στα σημεία επαφής:

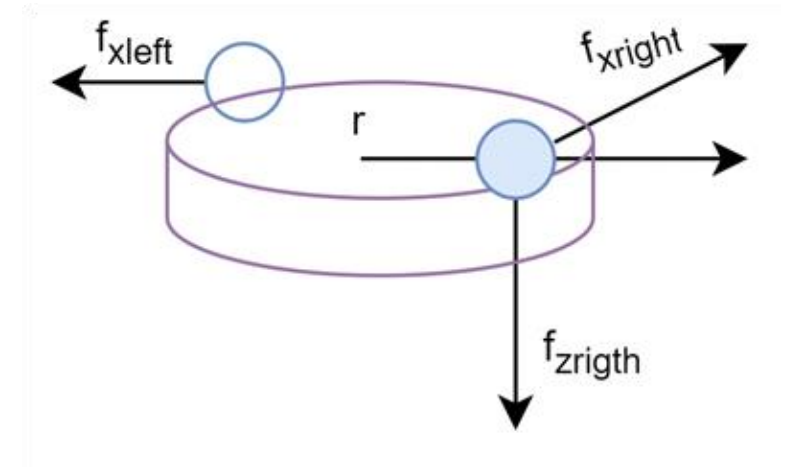
$$N_A = \frac{Mg - f_{oz}}{3} + \frac{M_X \cdot r \cdot \cos(\theta_A)}{3 \cdot r}$$

$$N_B = \frac{Mg - f_{oz}}{3} + \frac{M_X \cdot r \cdot \cos(\theta_B)}{3 \cdot r}$$

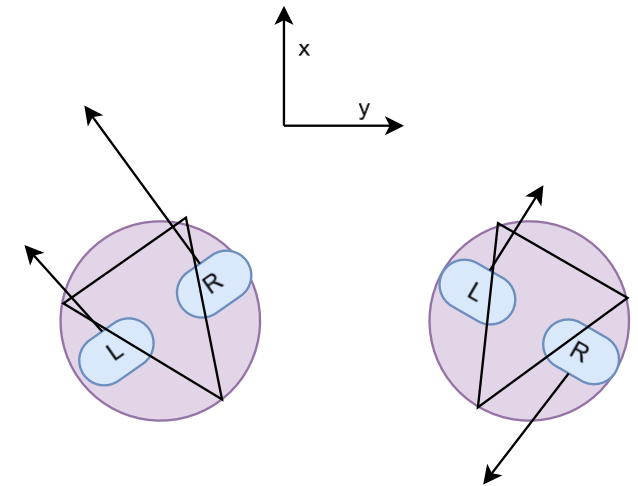
$$N_C = \frac{Mg - f_{oz}}{3} + \frac{M_X \cdot r \cdot \cos(\theta_C)}{3 \cdot r}$$

Τοπική ταχύτητα στα σημεία περιστροφής

$$v_i = v_n^{Ax} \cos(\theta_i) + v_n^{Ay} \cos(\theta_i), i=\{A,B,C\}$$



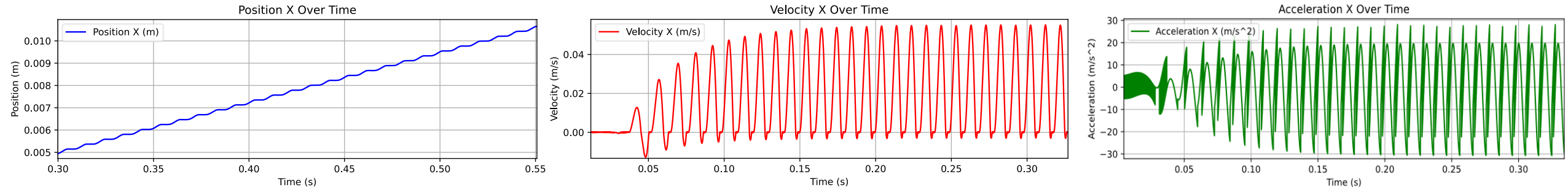
Δράση δυνάμεων στην πλατφόρμα



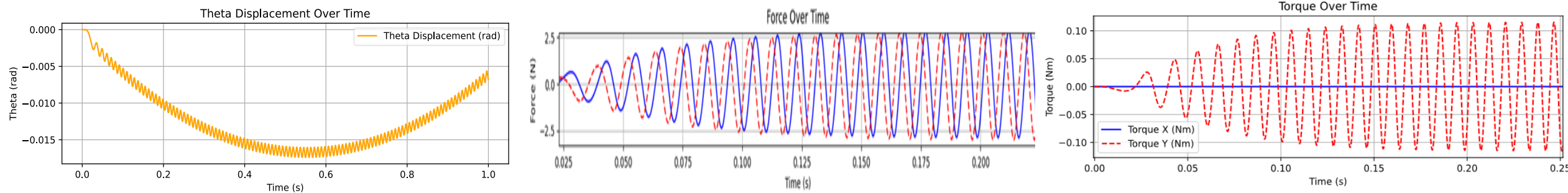
Κάτοψη πλατφόρμας

Προσομοίωση συνολικής κίνησης: Σύγχρονη

μεταφορική κίνηση 720 rad/s:

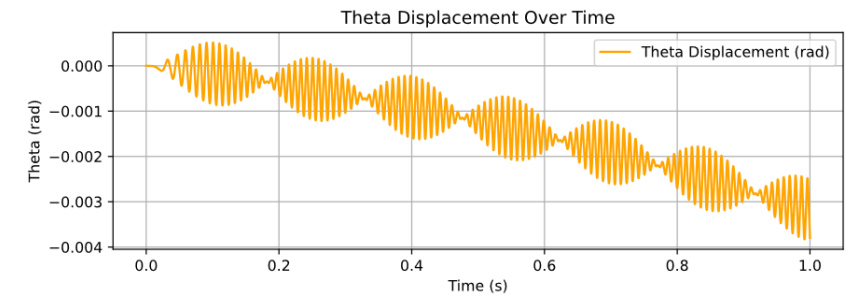
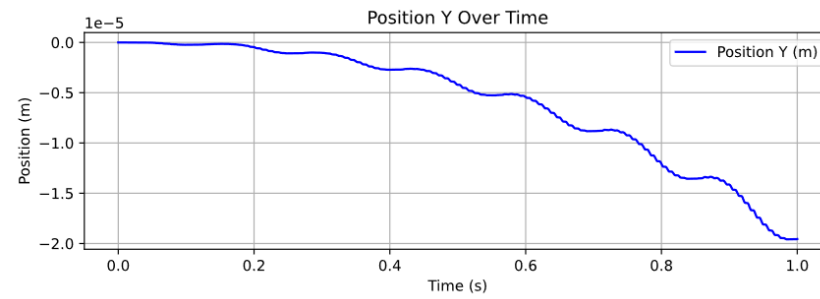
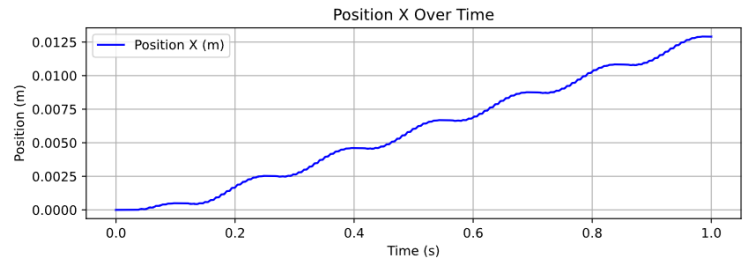


Περιστροφική 720 rad/s:

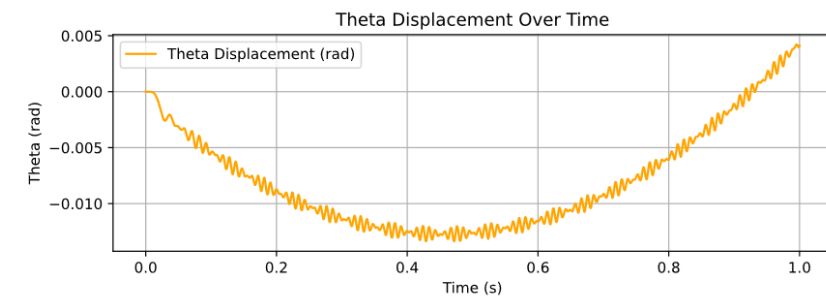
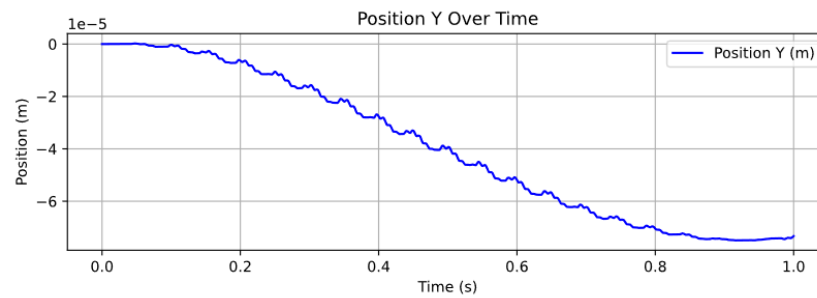
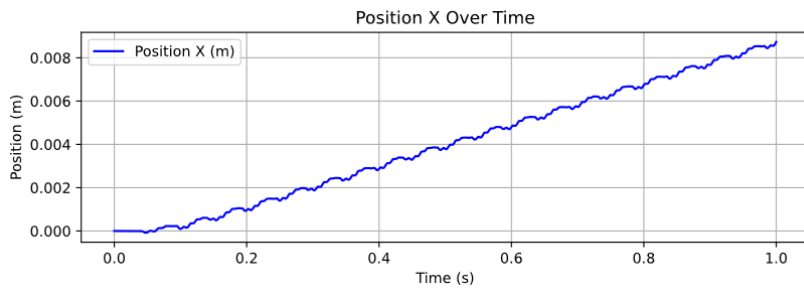


Προσομοίωση συνολικής κίνησης: Ασύγχρονη

Ασύγχρονη 720 – 680 rad/s έμφαση στη μεταφορική κίνηση:



Ασύγχρονη 720 – 600 rad/s έμφαση στη περιστροφή:





ESP32-WROOM-32E: Εγκέφαλος του Μικρορομπότ

Κύριες Λειτουργίες:

- ❑ Κεντρική μονάδα ελέγχου κινητήρων & αισθητήρων
- ❑ Επεξεργασία σημάτων ανάδρασης για αλγόριθμους κλειστού ελέγχου
- ❑ Ασύρματη επικοινωνία μέσω Wi-Fi/Bluetooth

Ηλεκτρικά:

- ❑ Τάση λειτουργίας: 3.3 V
- ❑ Τάση λειτουργίας μέχρι και 5V με σύνδεση από εξωτερική τροφοδοσία από τις **USB** ή **BAT** θήρες.
- ❑ Κατανάλωση: έως και 250mA σύνολο (τα μισά καταναλώνονται από τον επεξεργαστή)
- ❑ GPIO: max 40mA high, 28mA low

Προγραμματισμός σε **C++** μέσω **Arduino framework** ή **PlatformIO**

Οδηγοί Κινητήρων (DC Motor 21 Click & H-Bridge)

❖ Λειτουργικός Ρόλος:

- Ενισχυτές ρεύματος για λειτουργία κινητήρων.
- Αποφυγή υπερφόρτωσης του μικροελεγκτή και προστασία από αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (Back - EMF).

❖ Κυκλωματική Αρχή – H-Bridge:

Το **H-Bridge** αποτελείται από 4 τρανζίστορ που επιτρέπουν:

- Δεξιόστροφη / Αριστερόστροφη κίνηση
- Αδράνεια, Φρενάρισμα, ή Βραχυκύκλωση

Ελέγχεται μέσω συνδυασμού σημάτων **S1-S4**

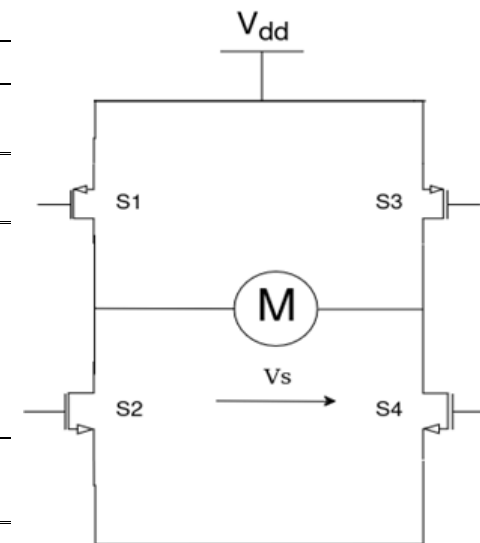
❖ Συμβατότητα & Χαρακτηριστικά:

- Τάση λειτουργίας: 3.3V – 5V
- Μέγιστο ρεύμα εξόδου: ~500 mA ανά κινητήρα
- Υποστήριξη PWM σημάτων για έλεγχο ταχύτητας μέσω ESP32



Οδηγός DC Motor 21 Click & H-Bridge⁷

S1	S2	S3	S4	Λειτουργία
1	0	0	1	Δεξιόστροφη κίνηση
0	1	1	0	Αριστερόστροφη κίνηση
0	0	0	0	Αδράνεια κινητήρα
1	0	0	0	
0	1	0	0	
0	0	1	0	Βραχυκύκλωση κινητήρα
0	0	0	1	
1	1	X	X	
X	X	1	1	Φρενάρισμα κινητήρα
1	0	1	0	
0	1	0	1	



H-Bridge

DC Motors

Τύπος & Λειτουργία

- Κινητήρες συνεχόμενου ρεύματος
- Έκκεντρα παράγουν φυγόκεντρο δύναμη με την περιστροφή τους

Χαρακτηριστικά

- **Τάση λειτουργίας:** ~1.5V
- **Στροφές χωρίς φορτίο:** ~11,000 RPM
- **Μέση κατανάλωση ρεύματος:** ~ 50mA
- **Ελάχιστη κατανάλωση για την εκκίνηση περιστροφής:** ~14mA

Έλεγχος & Επικοινωνία

- Η ταχύτητα της περιστροφής του έκκεντρου ελέγχεται με ακρίβεια μέσω σήματα PWM
- Η Κατεύθυνση της περιστροφής εξαρτάται από την πόλωση του κινητήρα



DC Κινητήρας Δόνησης

Μπαταρία LiPo & Αισθητήρας Hall

❖ LiPo – 3.7V 550mAh

- Σταθερή τάση και συνεχές ρεύμα για το σύστημα.
- Επαρκή χωρητικότητα για περίπου 1 ώρα ασύρματης λειτουργίας.
- Ασφαλής τροφοδοσία (δεν υπερβαίνει τα 5V).

❖ Πειραματική Προσέγγιση Μέτρησης Ταχύτητας

- **Μαθηματικές προσεγγίσεις** με βάση την τάση και το φορτίο του κινητήρα.
- **Back-EMF ανάλυση** στην λειτουργία και ενσωμάτωσή της στα μαθηματικά μοντέλα.

❖ Τελική Λύση – Μαγνητικοί Αισθητήρες Hall + Μαγνήτης

- Χρήση Hall αισθητήρων σε συνδυασμό με μαγνήτες κολλημένους στα εκκεντρικά βάρη.
- Κάθε περιστροφή παράγει παλμούς που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση γωνιακής ταχύτητας.
- Επιλογή που προσφέρει αξιοπιστία, ακρίβεια και ενσωμάτωση σε αλγόριθμους κλειστού βρόγχου.



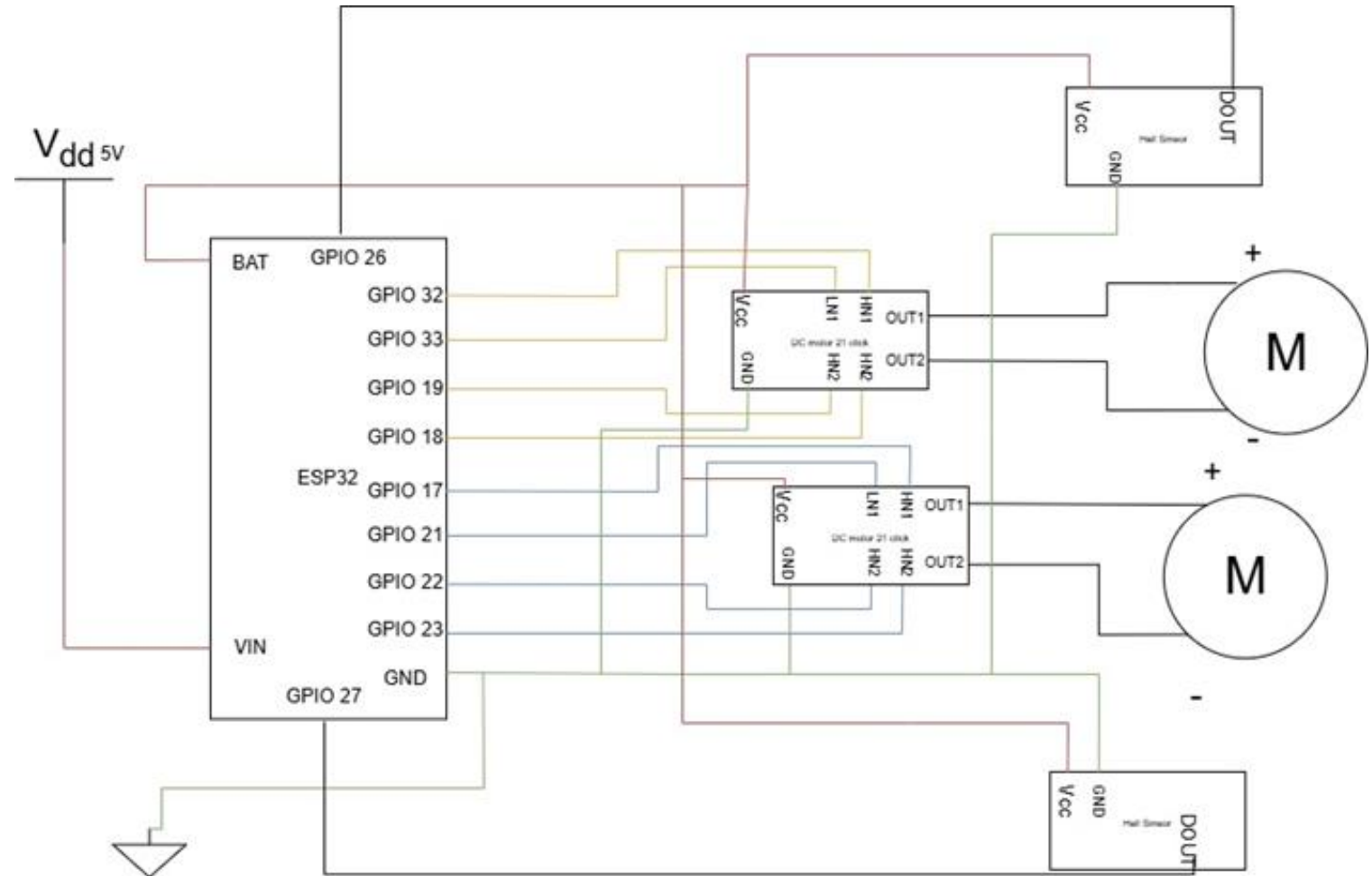
Μπαταρία Λιθίου - 3.7v 550mAh



Hall Sensor

Τελική Συνδεσμολογία

- ESP32 → Driver (x2): 4 PIN (x2)
- Driver → Κινητήρας (x2): 2 PIN (x2)
- ESP32 → Hall Sensors (x2): 1 PIN (x2)
- Μπαταρία → Όλο το κύκλωμα: 5 PIN
- Γειώσεις (GND): 5 PIN



Αναλυτικό Σχέδιο Κυκλώματος

Ασύρματος Επικοινωνία με Ελαχιστοποίηση Καθυστέρησης

BLUETOOTH ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ

Το Bluetooth Classic (ή BLE) προσφέρει:

- **Πλεονεκτήματα:**
 - Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
 - Εύκολη σύζευξη με φορητούς υπολογιστές
 - Εύκολη χρήση μέσω απλών εφαρμογών (putty)
 - Απλό πρωτόκολλο
- **Μειονεκτήματα:**
 - Χαμηλό bitrate (~1 Mbps BLE)
 - Υψηλότερο latency για real-time επικοινωνία (συνήθως ~20ms)
 - Μειωμένη αξιοπιστία σε πολυπλοκότερες εφαρμογές κλειστού ελέγχου

WI-FI UDP ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ

Το ESP32 προσφέρει επικοινωνία Wi-Fi μέσω πρωτοκόλλων UDP. Επιλέχθηκε το UDP για τις δοκιμές λόγω:

- **Πλεονεκτήματα:**
 - Υψηλό bitrate (μέχρι 54 Mbps, θεωρητικά)
 - Ελάχιστο latency (~5ms σε ίδιες συνθήκες)
 - Υποστήριξη real-time ανανέωσης τιμών ελέγχου (π.χ. θέση, ταχύτητα)
- **Μειονεκτήματα:**
 - Ελαφρώς αυξημένη κατανάλωση ισχύος σε σύγκριση με BLE
 - Απαιτεί χειροκίνητη διαχείριση αποσυνδέσεων και ασφαλείας
 - Απαιτεί εγκαθίδρυση επικοινωνίας μέσω προγραμματισμού για επικοινωνία με udp.

Τελική Επιλογή: Wi-Fi (UDP)

Τελική Συναρμολόγηση & Κατασκευή του Ρομπότ

➤ Σχεδιασμός & Εκτύπωση Πλατφόρμας

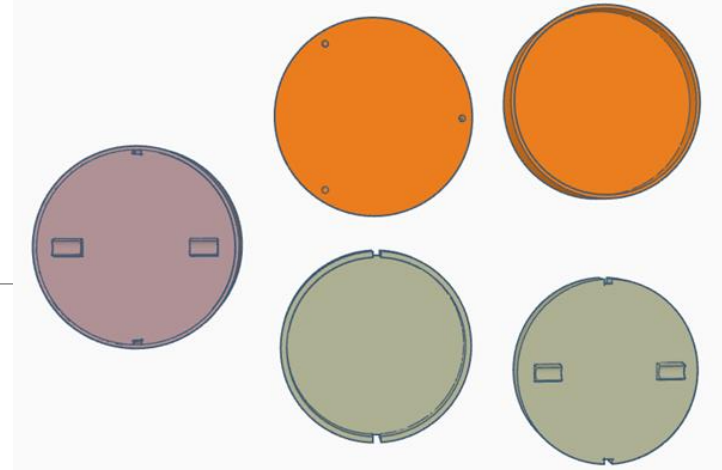
- Σχεδιάστηκε με **TinkerCAD**.
- Υλοποιήθηκε με **3D εκτύπωση (Creality CR-10s Pro, PLA)**
- Στόχος: επεκτάσιμη και στιβαρή βάση

➤ Διαδικασία Συναρμολόγησης

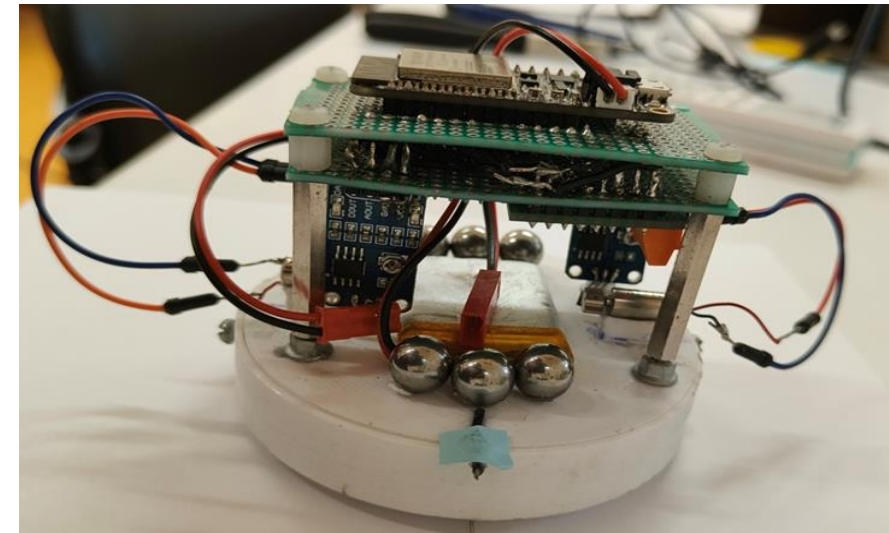
- **Ηλεκτρική σύνδεση**: κόλληση καλωδίων με καλάι, αισθητήρων, drivers
- **Μηχανική στερέωση**: χρήση αποστατών & βιδών M3 για δομική σταθερότητα
- Κεντρική τοποθέτηση **μπαταρίας** για ισορροπημένο κέντρο βάρους
- 3 ατσάλινες σφαίρες για σημεία επαφής

➤ Πρόβλημα & Λύση στην Κίνηση

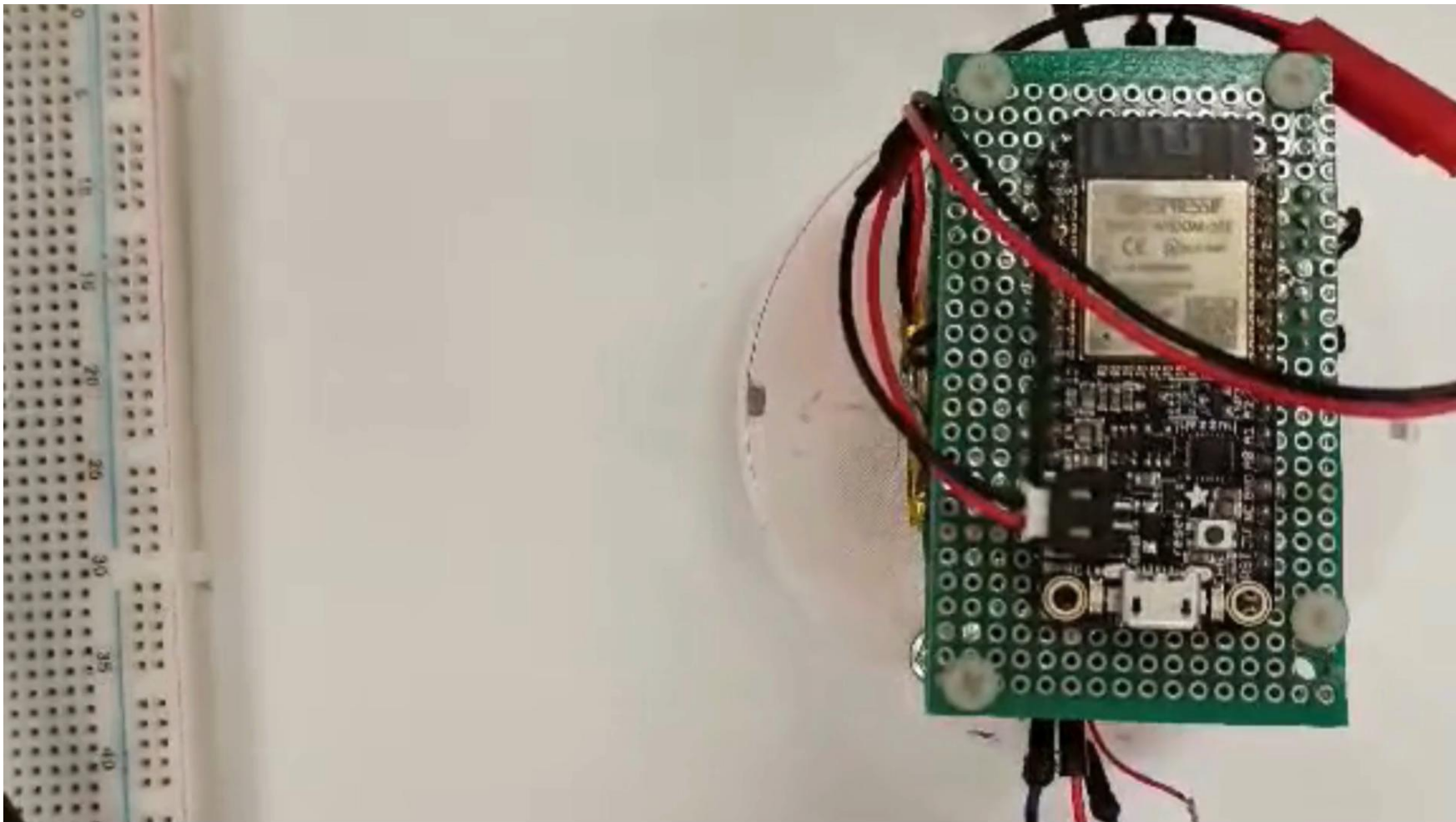
- Αστάθεια κίνησης και εκτροπή
- Προσθήκη **6 βαριδιών** συμμετρικά → σταθερότητα, χαμηλό κέντρο βάρους



CAD σχεδίαση πλατφόρμας, αριστερά το κάτω μέρος δεξιά το επάνω, τέλος ο συνδυασμός



Τελική Μορφή Ρομπότ



Ελεύθερη κίνηση ρομπότ

Κλειστός Βρόχος Ελέγχου με PI για ταχύτητα του κινητήρα

Τι είναι ο PI ελεγκτής;

- Αναλογικός (P).
- Ολοκληρωτικός (I όρος).
- Ελέγχει το σφάλμα μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής τιμής.
- Χρήση σε ρομποτικά και αυτοματισμούς.

Τύπος εξίσωσης:

$$e = \omega_{ref} - \omega \qquad u = -K_p \omega + K_i \int e \, dt$$

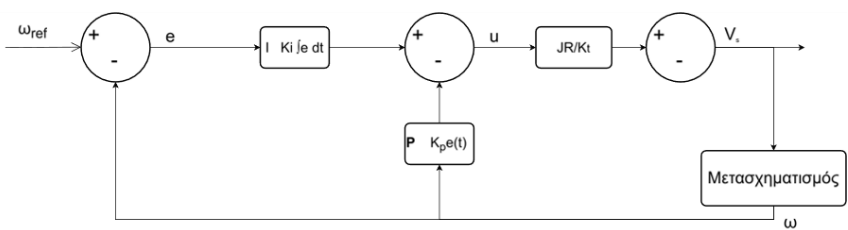
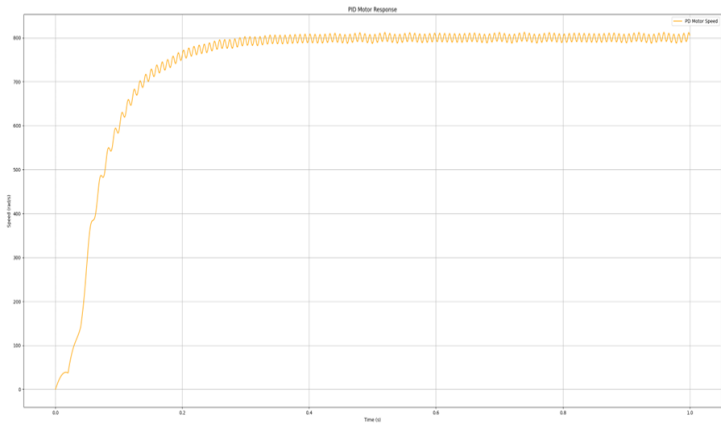
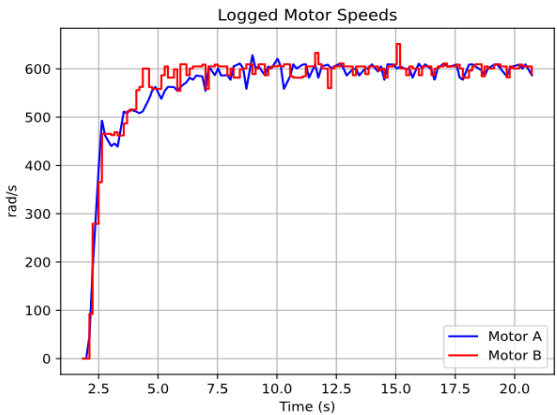
Εύρεση παραμέτρων με ανάλυση της συνάρτησης μεταφοράς και μετασχηματισμού στο πεδίο της συχνότητας από βιβλιογραφία:

$$\ddot{\omega} + K_p \dot{\omega} + K_i \omega = K_i \omega_{ref}, \qquad G(s) = \frac{\Omega(s)}{\Omega_{ref}(s)} = \frac{K_i}{s^2 + K_p s + K_i}$$
$$K_i = \omega_n^2 = \frac{36}{t_s^2}, \qquad K_p = 2\omega_n = \frac{12}{t_s}$$

Settling time: $t_s \sim 0.27 \, s$

Αμελητέο overshoot, ελάχιστο steady-state error ακόμα και σε πολύ μικρές γωνιακές ταχύτητες.

- Διάγραμμα – Προσομοίωση εφαρμογής του ελέγχου ταχύτητας 800rad/s.
- Διάγραμμα – Εφαρμογή ελέγχου ταχύτητας στο φυσικό μοντέλο με δύο κινητήρες 600rad/s.

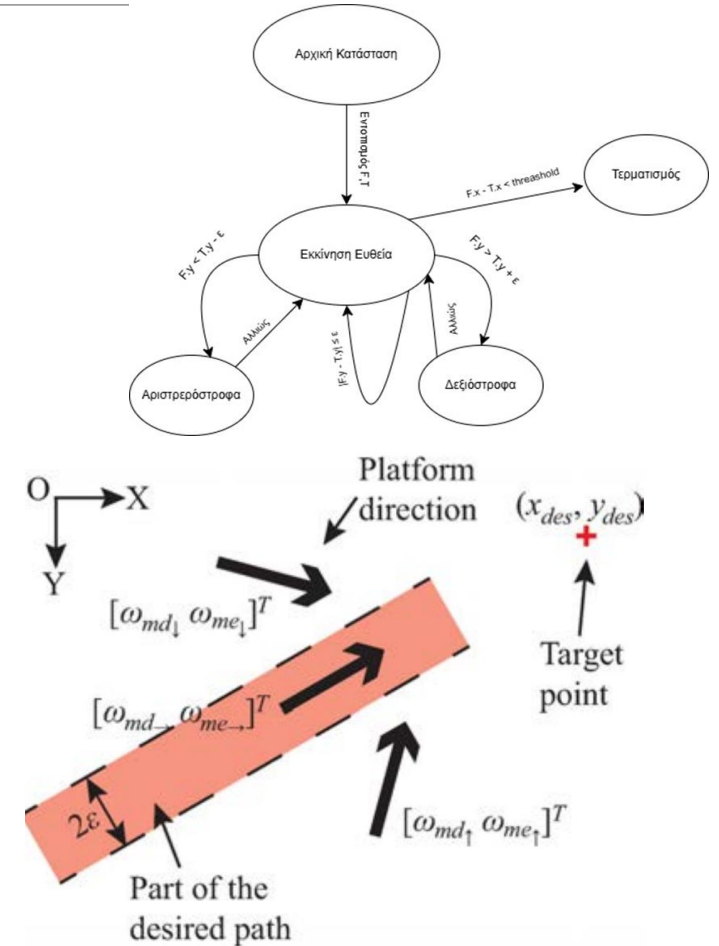


PI ελεγκτής

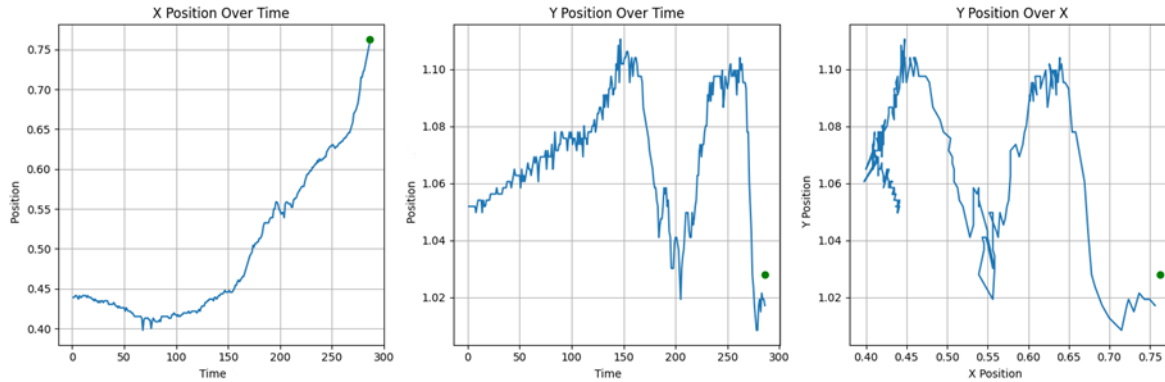
Η Λογική της Πλοήγησης: Μηχανή Καταστάσεων

Αλγόριθμος 2: Finite State Machine

- 1: Είσοδοι:
- 2: $F.y = y$ συντεταγμένη εμπρόσθιου μέρους ρομπότ
- 3: $T.y = y$ συντεταγμένη στόχου
- 4: $\epsilon =$ αποδεκτό όριο σφάλματος κίνησης, $\sigma =$ αποδεκτό σφάλμα σταματημού
- 5: $D = F.x - T.x$
- 6: Κατάσταση = 'Αρχική Κατάσταση'
- 7: Ενώ Εντοπίζεται F,T:
- 8: Κατάσταση = 'Εκκίνηση Ευθεία'
- 9: Αν $F.y < T.y - \epsilon$:
- 10: Κατάσταση = 'Αριστερόστροφη'
- 11: Αλλιώς αν $|F.y - T.y| \leq \epsilon$:
- 12: Κατάσταση = 'Εκκίνηση Ευθεία'
- 13: Αλλιώς:
- 14: Κατάσταση = 'Δεξιόστροφη'
- 15: Αν Κατάσταση == 'Εκκίνηση Ευθεία'
- 16: Αν Κατάσταση == 'Αριστερόστροφη'
- 17: Στείλε εντολή: αύξησε ταχύτητα δεξιού κινητήρα, μείωσε του αριστερού
- 18: Αλλιώς αν Κατάσταση == 'Δεξιόστροφη'
- 19: Στείλε εντολή: αύξησε ταχύτητα αριστερού κινητήρα, μείωσε του δεξιού
- 20: Αν $D < \sigma$:
- 21: Στείλε εντολή: σταμάτα και τους δύο κινητήρες
- 22: Κατάσταση = 'Τερματισμός'
- 23: Στείλε εντολή: Κίνηση με τις τωρινές ταχύτητες των κινητήρων
- 24: Αν Κατάσταση == 'Τερματισμός':
- 25: Διέκοψε τον βρόχο



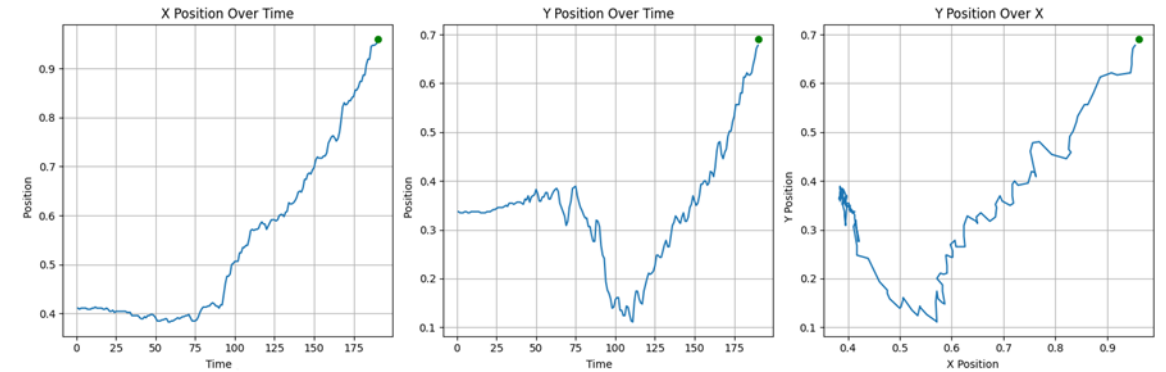
Πειραματικά Αποτελέσματα: Μικροσκοπική Κίνηση



Στόχος μπροστά από το ρομπότ



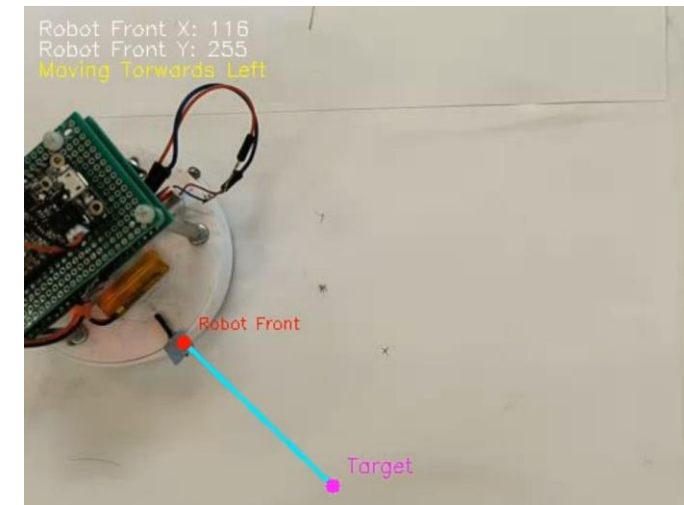
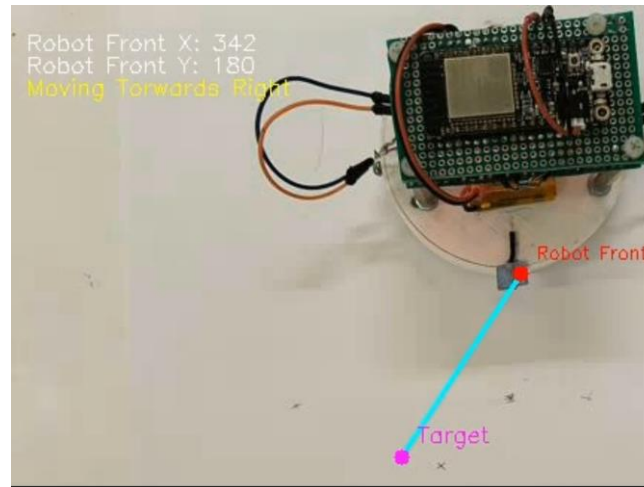
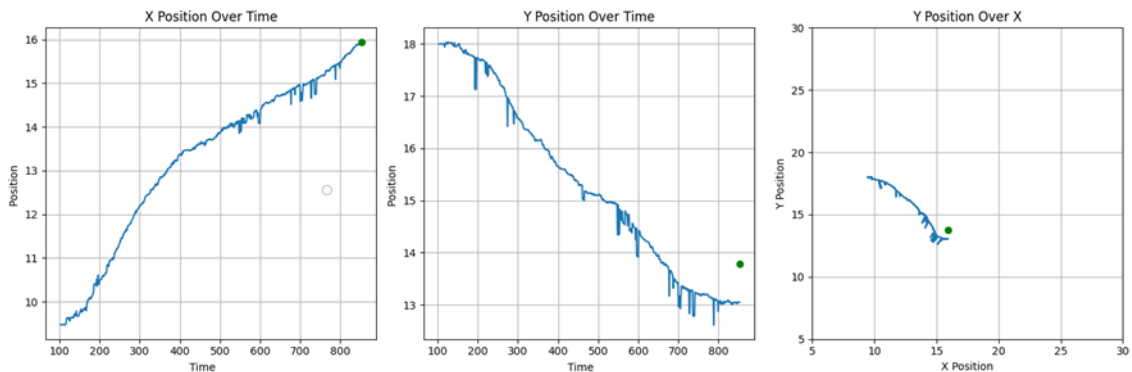
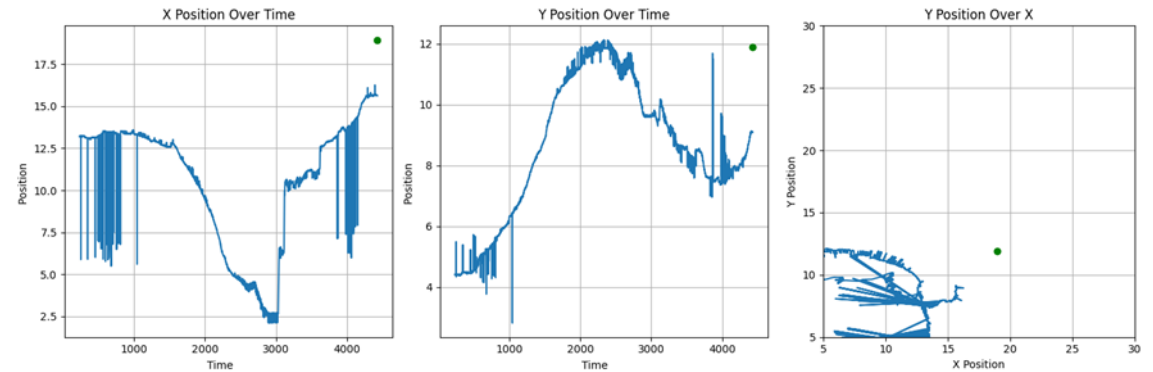
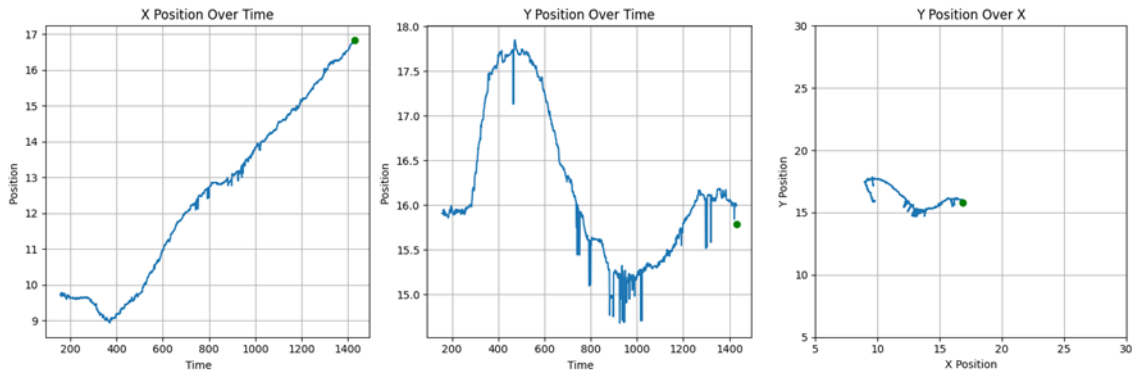
Στόχος με μεγαλύτερη ακρίβεια

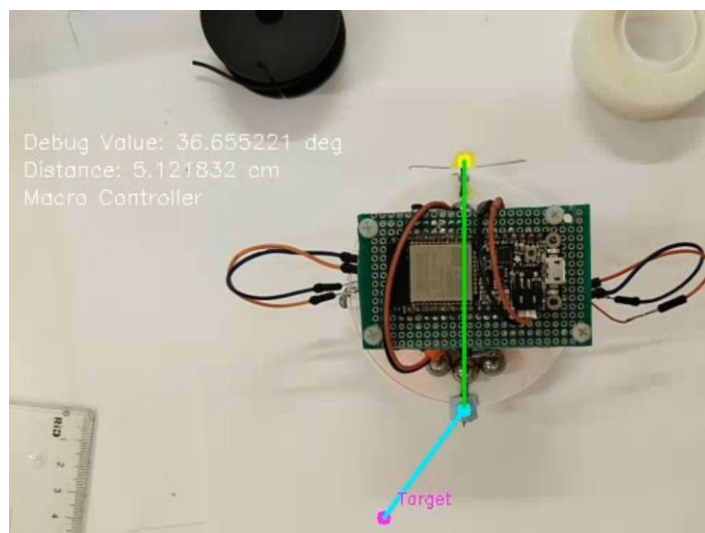
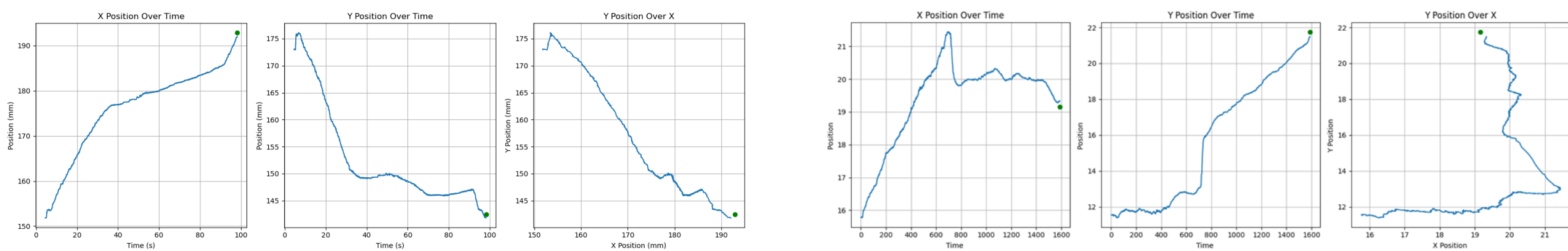


Στόχος εκτός της ευθείας του ρομπότ

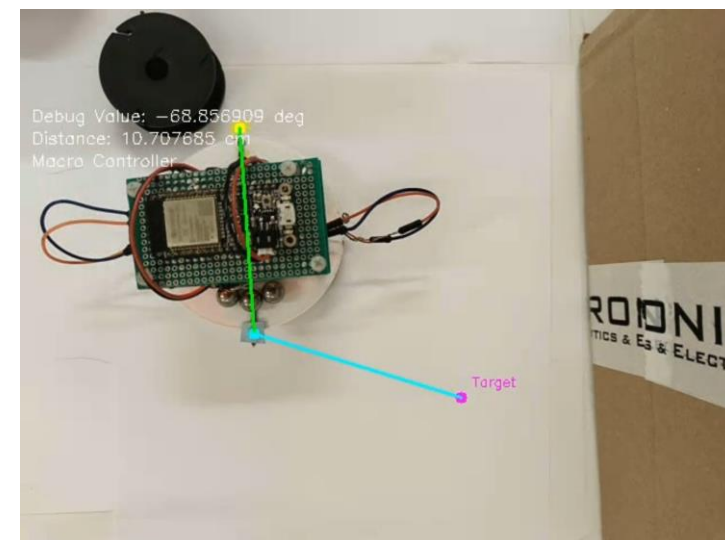


Πειραματικά Αποτελέσματα: Μακροσκοπική Κίνηση





- ❖ Δύο σημεία στο ρομπότ για προσανατολισμό.
- ❖ Εντός $|10|$ deg γωνία με τον στόχο, ευθεία
- ❖ Αλλιώς περιστροφή προς την αντίστοιχη πλευρά



Βελτιωμένος Αλγόριθμος Πλοήγησης

Συμπεράσματα

- ❖ Επιβεβαίωση της δυνατότητας σχεδίασης, κατασκευής και πειραματικής επικύρωσης ενός αυτόνομου μικρο-ρομπότ χαμηλού κόστους (~50€).
- ❖ Εγκυρότητα των μαθηματικών μοντέλων, ομοιότητα στην προσομοίωση με τα πειραματικά αποτελέσματα.
- ❖ Επίτευξη υψηλής ακρίβειας (εκατοντάδων μm σε μικροσκοπική, χιλιοστών σε μακροσκοπική κίνηση) με περιορισμένα μέσα (απλή κάμερα κινητού).

Μελλοντική Εργασία

ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ & ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

- Γενική Βελτίωση Hardware & Εργαλείων Παρακολούθησης.
- Ανάπτυξη πιο ανεπτυγμένων Αλγορίθμων Ελέγχου και Πλοήγησης.
- Ενσωματωμένοι νέοι Αισθητήρες για Αυξημένη Αυτονομία

Ευχαριστώ για την προσοχή σας!
