

Διπλωματική εργασία

Αυτόματη προσγείωση τετρακόπτερου με χρήση κάμερας

Τζιβάρας Βασίλης
Επιβλέπων: Κ. Κωνσταντίνος Βλάχος

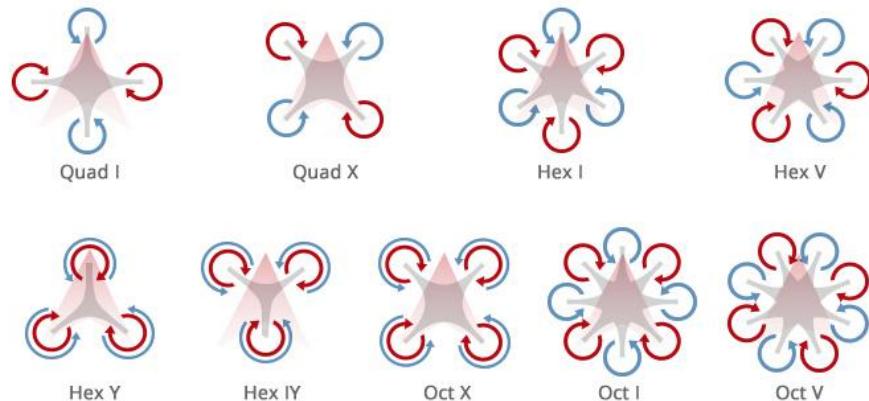
Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής
Ιωάννινα Φεβρουάριος 2018

Περιεχόμενα

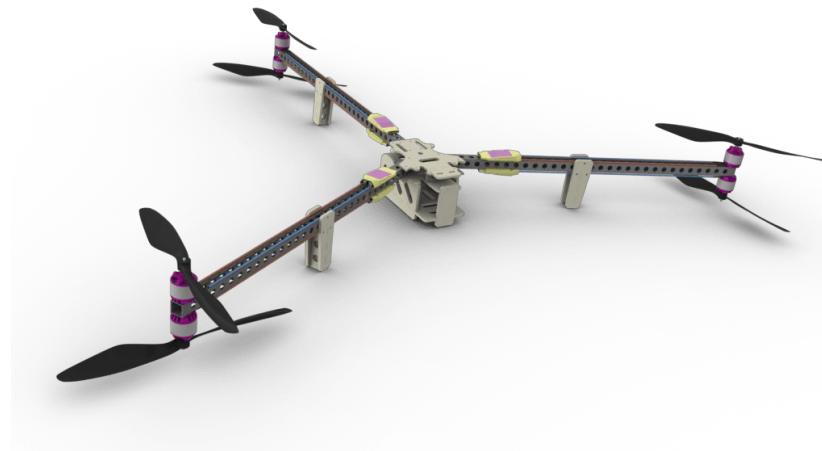
- ❑ Εισαγωγή
 - ❑ Βασική ιδέα
 - ❑ Σχεδιασμός
- ❑ Κινηματική
- ❑ Δυναμική
- ❑ Έλεγχος
 - ❑ Συνδεσμολογία
 - ❑ Σφάλμα
 - ❑ Έλεγχος υψηλού επιπέδου
 - ❑ Έλεγχος χαμηλού επιπέδου
- ❑ Προσομοίωση
 - ❑ Σενάρια
 - ❑ Φάσεις προσγείωσης
- ❑ Αποτελέσματα
- ❑ Πειράματα

Εισαγωγή

- ❑ Εναέρια οχήματα
- ❑ Πλήρης αυτονομία ή επικοινωνία με σταθμό βάσης
- ❑ Ηλεκτροκινητήρες (Η/Κ)
- ❑ 4 μέχρι 6 βαθμοί ελευθερίας (DOF)
 - ❑ 3 μεταφορικές κινήσεις
 - ❑ Μέχρι και 3 περιστροφικές κινήσεις



Hexacopter

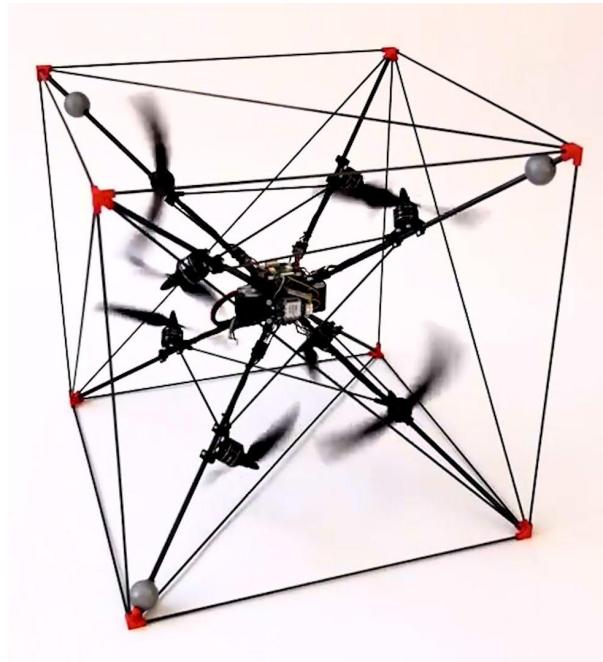


Tricopter



- ❑ 4 βαθμοί ελευθερίας
- ❑ 3 ηλεκτροκινητήρες
 - ❑ 2 σταθεροί
 - ❑ 1 με δυνατότητα περιστροφής

Omnicopter



- 6 βαθμοί ελευθερίας
- 8 ηλεκτροκινητήρες
- Σπατάλη ενέργειας

Quadrotor

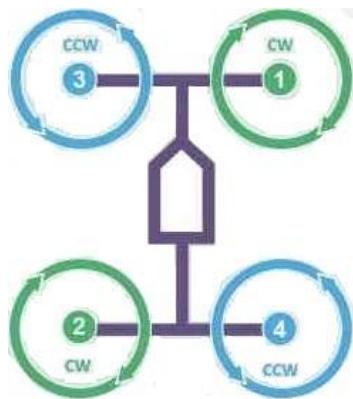


- 4 βαθμοί ελευθερίας
- 4 ηλεκτροκινητήρες
 - 3 μεταφορικές κινήσεις
 - 1 περιστροφική κίνηση

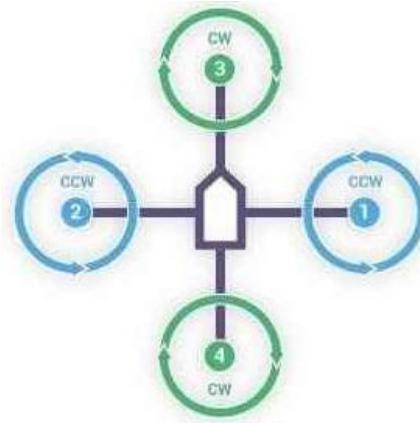
Αντικείμενο ενασχόλησης της εργασίας

Τύποι σκελετού

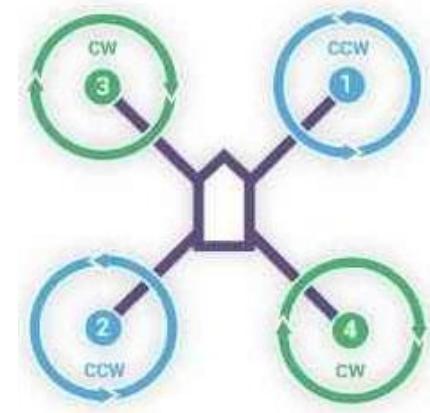
Quad H



Quad +



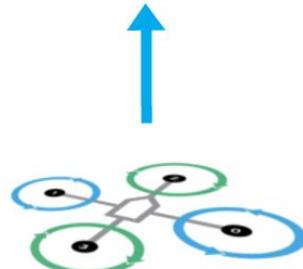
Quad X



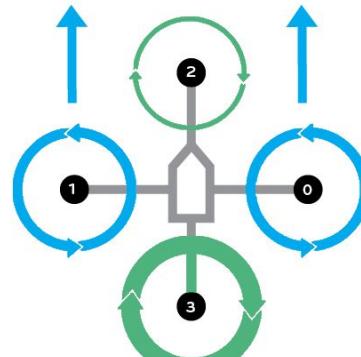
Διαφορετικός συνδυασμός ενεργοποίησης των Η/Κ

Βαθμοί ελευθερίας

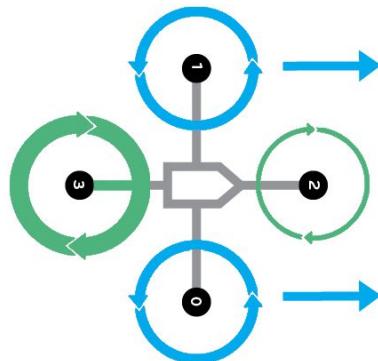
Κατακόρυφη
μεταφορική κίνηση



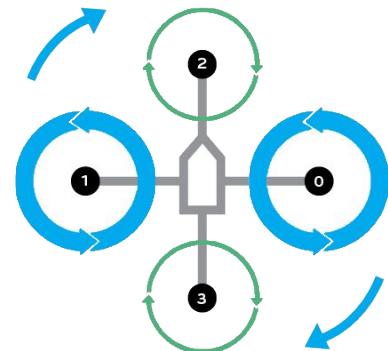
Εμπρόσθια/Οπίσθια
μεταφορική κίνηση



Δεξιά/Αριστερή
μεταφορική κίνηση



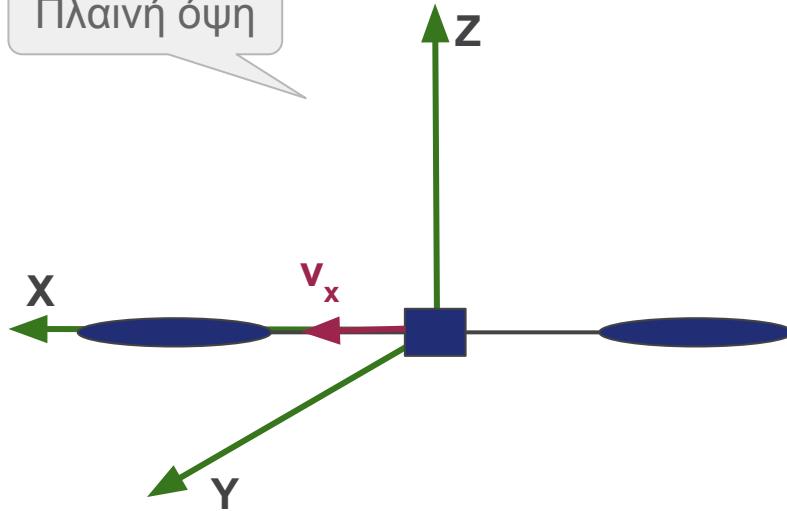
Περιστροφική
κίνηση



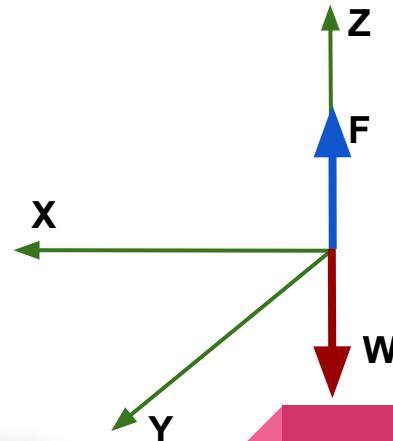
Διαφορετικές στροφές σε κάθε Η/Κ

Υλοποίηση γραμμικής ταχύτητας 1/2

Πλαινή όψη



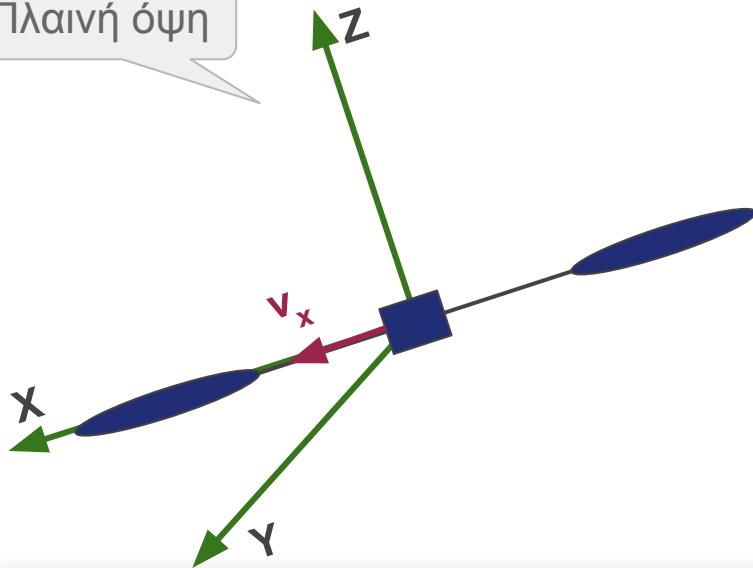
Εφαρμόζουμε ταχύτητα v_x κατά μήκος
του X άξονα



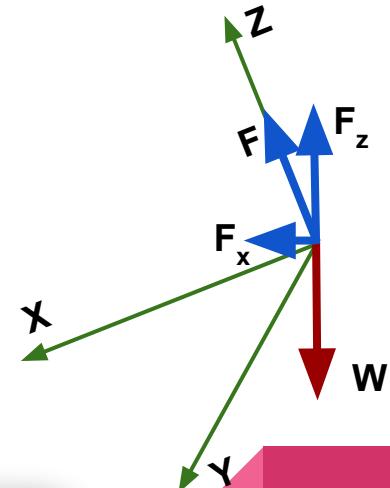
Κατάσταση ισορροπίας με $\Sigma F=0$ και $\Sigma t=0$

Υλοποίηση γραμμικής ταχύτητας 1/2

Πλαινή όψη



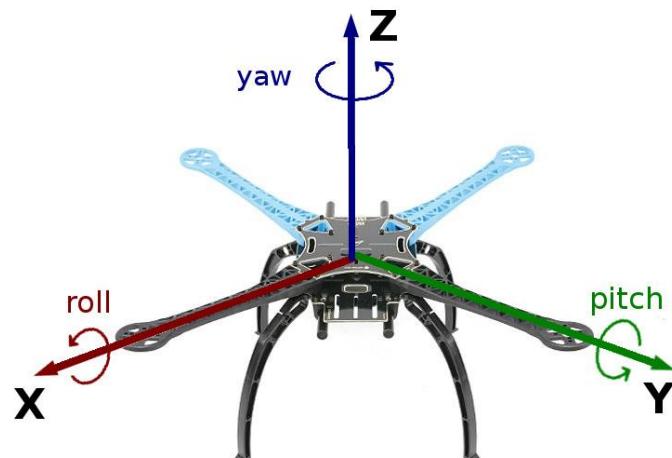
Περιστροφή ως προς τον Y άξονα



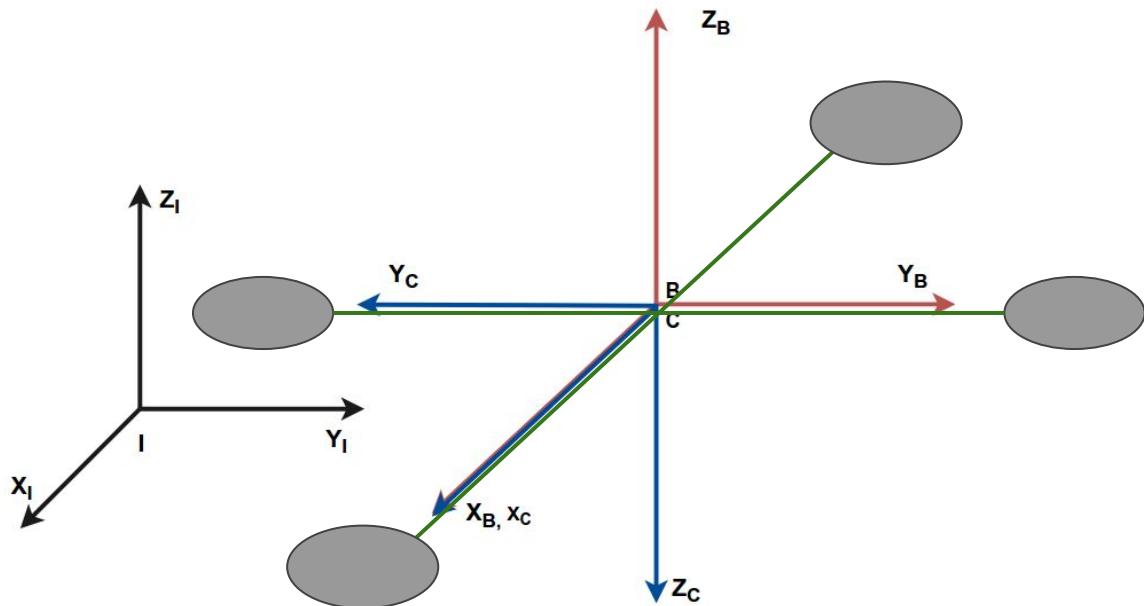
Ανάγκη για νέο ΣΣ για την υλοποίηση των ταχυτήτων

Κινηματική

- ❑ Συστήματα συντεταγμένων
- ❑ Euler γωνίες για τον προσανατολισμό
- ❑ Περιγραφή των πινάκων περιστροφής



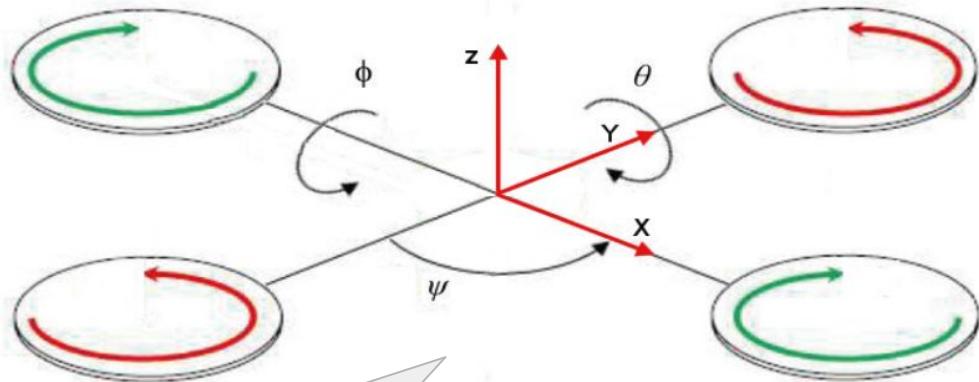
Συστήματα συντεταγμένων ($\Sigma\Sigma$)



I : Αδρανειακό ΣΣ
B : Σωματόδετο ΣΣ
C : ΣΣ της κάμερας

Γωνίες euler

Γωνίες	ϕ	θ	ψ
Άξονας	X	Y	Z
	roll	pitch	yaw

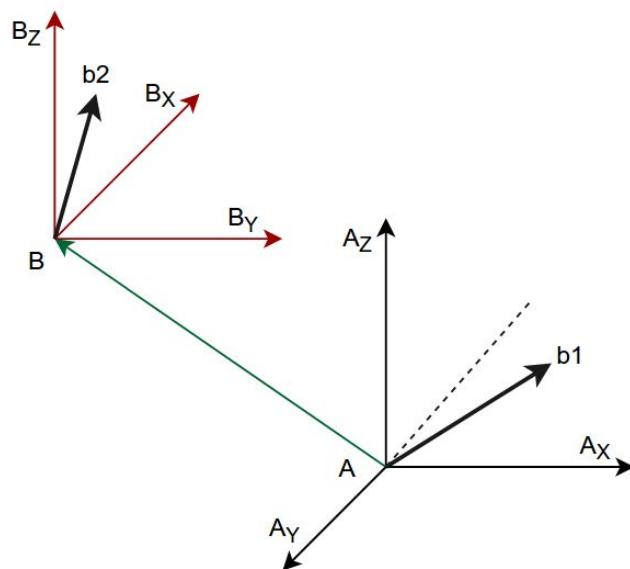


Αναπαράσταση των γωνιών euler στο σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων

Περιγραφή προσανατολισμού

Ορισμός πινάκων περιστροφής

“Ένας πίνακας περιστροφής εκφράζει την περιστροφή ενός συστήματος συντεταγμένων σε σχέση με ένα άλλο”



Έστω b_1 διάνυσμα ορισμένο ως προς το {A} σύστημα συντεταγμένων.

Εκφράζουμε το b_1 ως προς το {B} σύστημα συντεταγμένων:

$${}^B b_2 = {}^B R_A * {}^A b_1$$

Πίνακες περιστροφής 1/2

Πίνακας περιστροφής από το σωματόδετο {B} στο αδρανειακό {I} σύστημα συντεταγμένων

$${}^I R_B = \begin{pmatrix} c(\psi)*c(\theta) - s(\varphi)*s(\psi)*s(\theta) & -c(\varphi)*s(\psi) & c(\psi)*s(\theta) + c(\theta)*s(\varphi)*s(\psi) \\ c(\theta)*s(\psi) + c(\psi)*s(\varphi)*s(\theta) & c(\varphi)*c(\psi) & s(\psi)*s(\theta) - c(\psi)*c(\theta)*s(\varphi) \\ -c(\varphi)*s(\theta) & s(\varphi) & c(\varphi)*c(\theta) \end{pmatrix}$$

όπου,

- ❑ **c** είναι η συνάρτηση $\cos()$
- ❑ **s** είναι η συνάρτηση $\sin()$
- ❑ **φ, ψ, θ** οι γωνίες euler του quadrotor

Πίνακες περιστροφής 2/2

Πίνακας περιστροφής από την κάμερα {C} στο σωματόδετο {B} σύστημα συντεταγμένων

$${}^B R_C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}$$

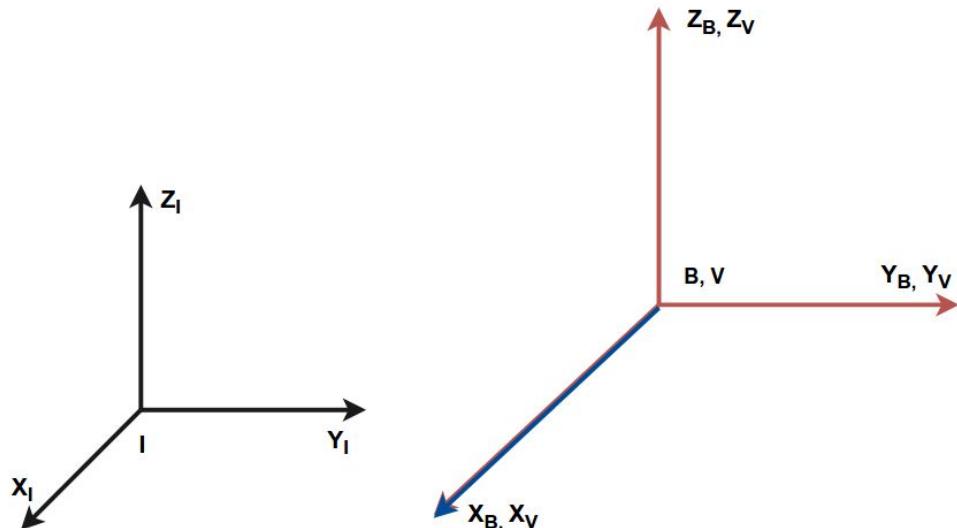
όπου,

- ❑ φ ισούται με 180 μοίρες

Ο Z άξονας του {C} είναι αντίθετος με τον Z άξονα του {B} ΣΣ.

Περιστροφή ως προς X άξονα κατά 180 μοίρες

$\Sigma\Sigma$ της ταχύτητας 1/2



- Η αρχή αξόνων του $\{V\}$ ταυτίζεται με το $\{B\}$
- Μετακινείται όπως και το $\{B\}$
- Περιστρέφεται μόνο στον Z άξονα

ΣΣ της ταχύτητας 2/2

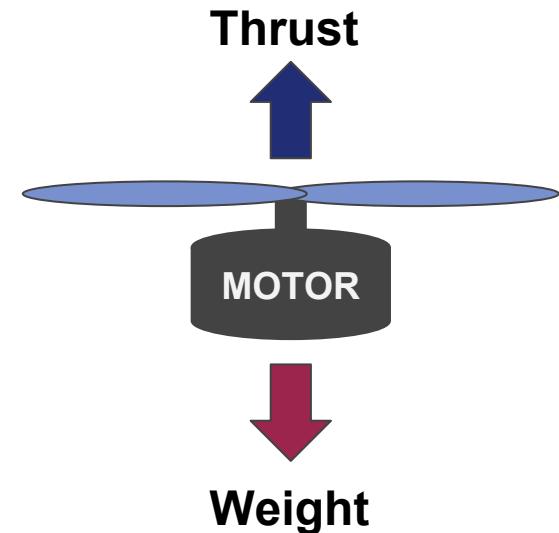
Πίνακας περιστροφής από το σωματόδετο {B} στο αδρανειακό {I} σύστημα συντεταγμένων

$${}^I R_v = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

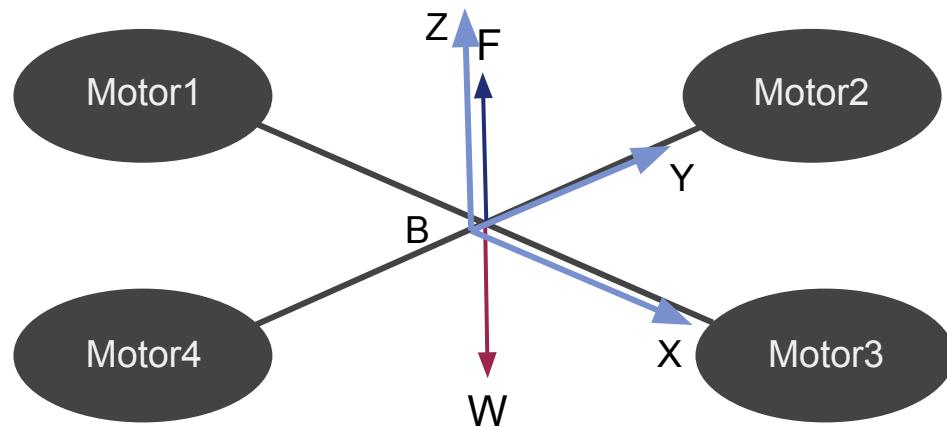
Περιστροφή ως προς Ζ áξονα κατά ψ γωνία (yaw)

Δυναμική

- ❑ Μελέτη των δυνάμεων που ασκούνται στο quadrotor
- ❑ Μελέτη των ροπών που ασκούνται στο quadrotor



Θεμελιώδης νόμοι



Θεμελιώδης νόμος της μηχανικής

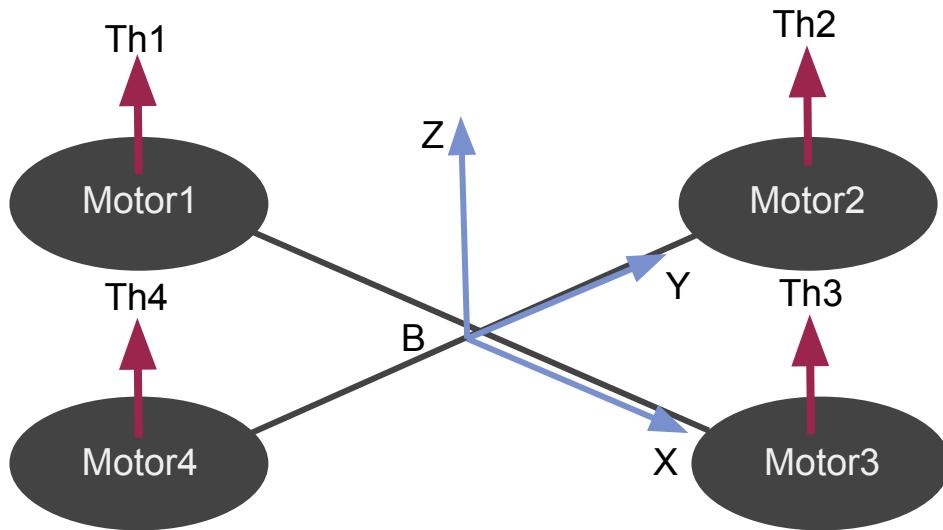
$$m^* \dot{v} = m^* \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} + {}^I R_B {}^B F$$

Θεμελιώδης νόμος της στροφικής κίνησης

$$I \dot{\omega} = -\omega \times I \omega + \tau$$

Οι δυνάμεις και ροπές εκφράζονται ως προς το {B} ΣΣ

Συνολική δύναμη



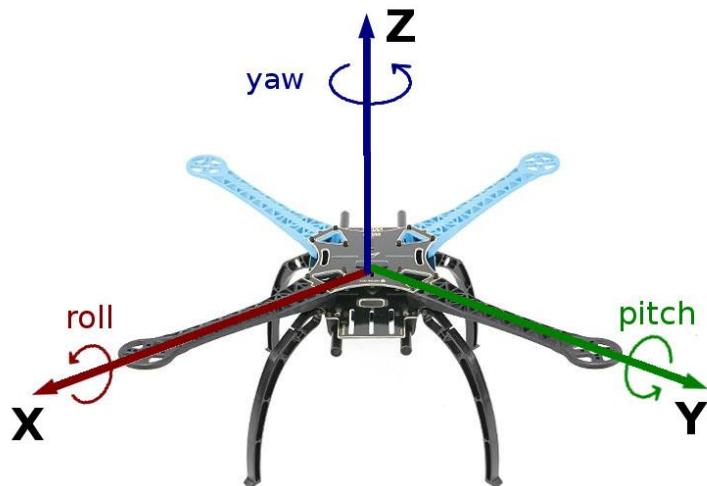
Συνολική δύναμη του quadrotor :

$$F = \sum_{i=1}^4 |Th_i| = c_T \left(\sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \right)$$

όπου,

- c_T είναι συντελεστής ώθησης που εξαρτάται από την γεωμετρία του Η/Κ και έλικας
- ω_i είναι η γωνιακή ταχύτητα του i Η/Κ

Ροπές στον Χ και Υ άξονα (pitch & roll)



Η ροπή στον Χ και Υ άξονα υπολογίζεται ως εξής:

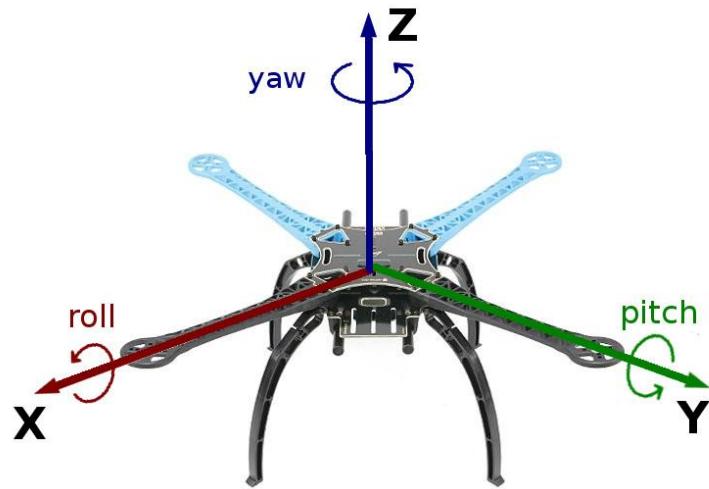
$$\tau_x = c_T * \sum_{i=1}^4 d_i \sin(\varphi) \omega_i^2$$

$$\tau_y = -c_T * \sum_{i=1}^4 d_i \sin(\theta) \omega_i^2$$

όπου,

- d_i είναι η απόσταση του i Η/Κ από το κέντρο μάζας

Ροπή στον Ζ άξονα (yaw)



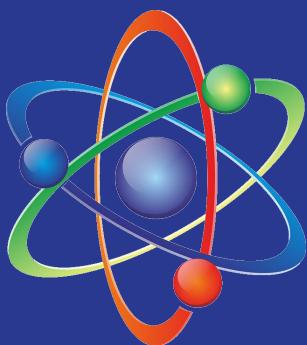
Η ροπή στον Ζ άξονα υπολογίζεται ως εξής:

$$\tau_z = c_Q * \sum_{i=1}^4 \sigma_i \omega_i^2$$

όπου,

- c_Q είναι συντελεστής ώθησης που εξαρτάται από την γεωμετρία του Η/Κ και έλικας
- σ_i ορίζει την διεύθυνση και ανήκει στο $\{-1, 1\}$

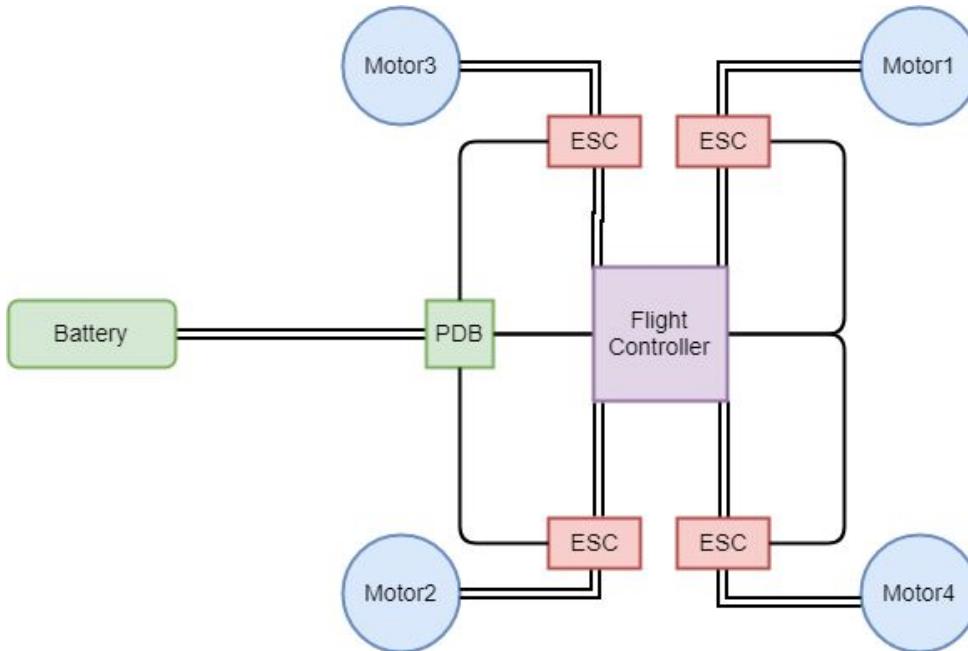
Έλεγχος



“Ο έλεγχος αφορά τον υπολογισμό των επιθυμητών τιμών ώστε να ελαχιστοποιηθεί κάποιο κατάλληλο σφάλμα”

- ❑ Συνδεσμολογία
- ❑ Σφάλμα απόστασης
- ❑ 2 επίπεδα ελέγχου (υψηλό & χαμηλό)
- ❑ PID ελεγκτές

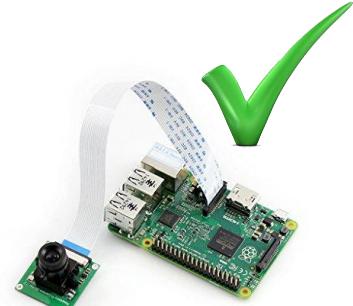
Συνδεσμολογία



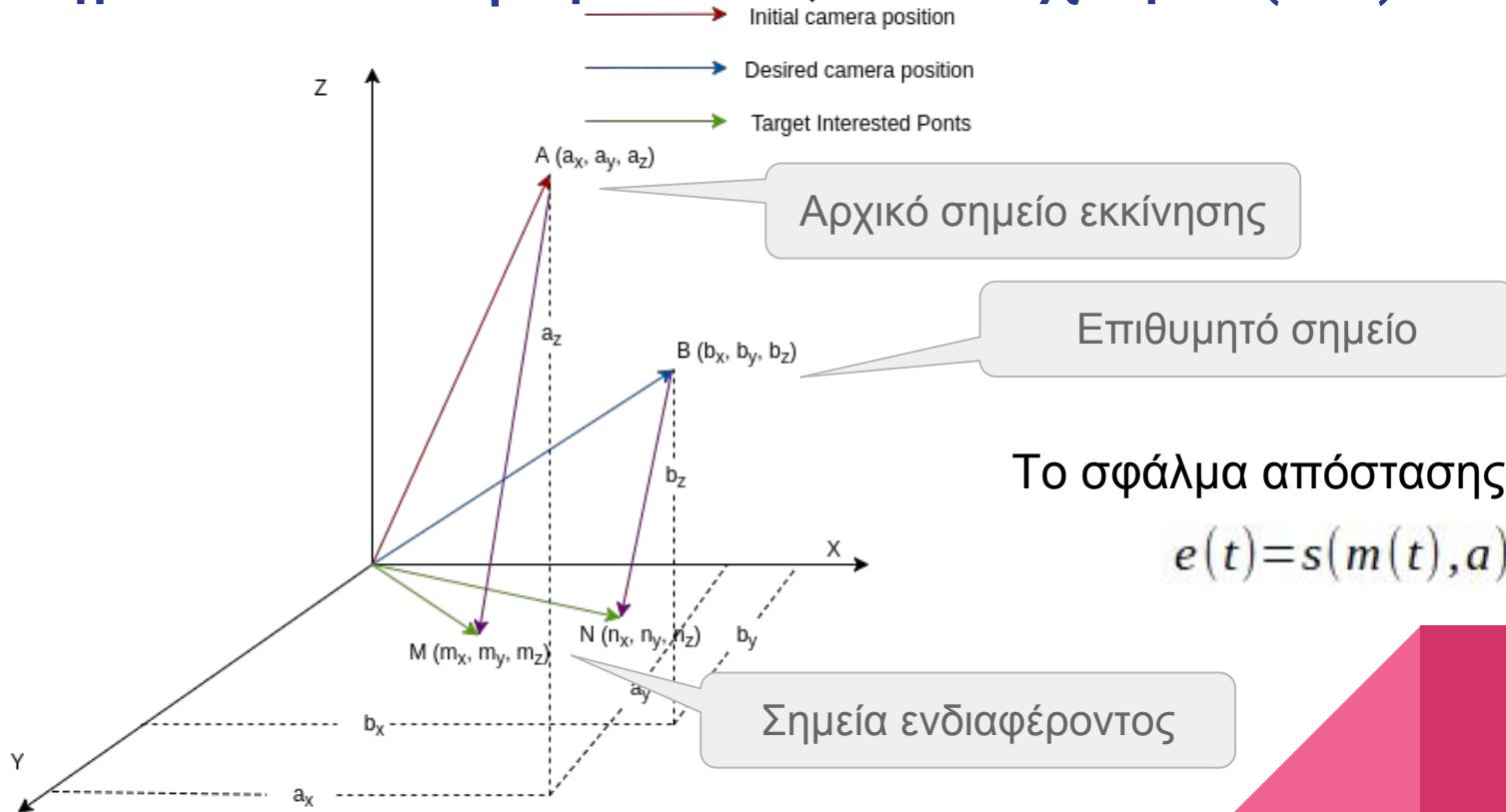
- Ηλεκτροκινητήρες (Motor)
- Ελεγκτές ταχύτητας (ESC)
 - Υλοποίηση των στοφών των Η/Κ
- Ελεγκτής πτήσης (FC)
 - Επεξεργασία εισόδου και υπολογισμός στροφών Η/Κ
- Μπαταρία
- Πλακέτα διαμοιρασμού ρεύματος (PDB)

Στόχος

“Μελέτη της διαδικασίας προσγείωσης με
αποκλειστική χρήση κάμερας”



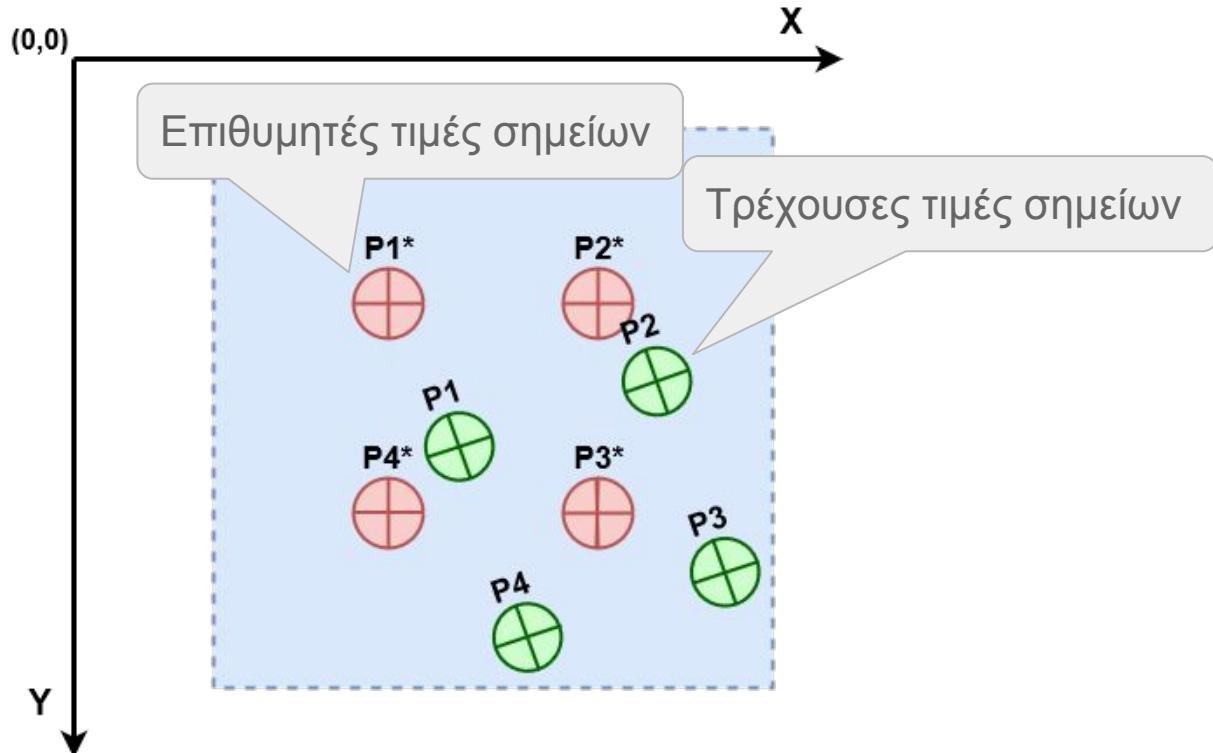
Σημεία ενδιαφέροντος στον χώρο (3D)



Το σφάλμα απόστασης ορίζεται ως:

$$e(t) = s(m(t), a) - s_{des}$$

Σημεία ενδιαφέροντος στην κάμερα (2D)



$$P_1 = [x_1, y_1]^T$$

$$P_2 = [x_2, y_2]^T$$

$$P_3 = [x_3, y_3]^T$$

$$P_4 = [x_4, y_4]^T$$

$$P_1^* = [x_{1*}, y_{1*}]^T$$

$$P_2^* = [x_{2*}, y_{2*}]^T$$

$$P_3^* = [x_{3*}, y_{3*}]^T$$

$$P_4^* = [x_{4*}, y_{4*}]^T$$

Ορισμός σφάλματος απόστασης

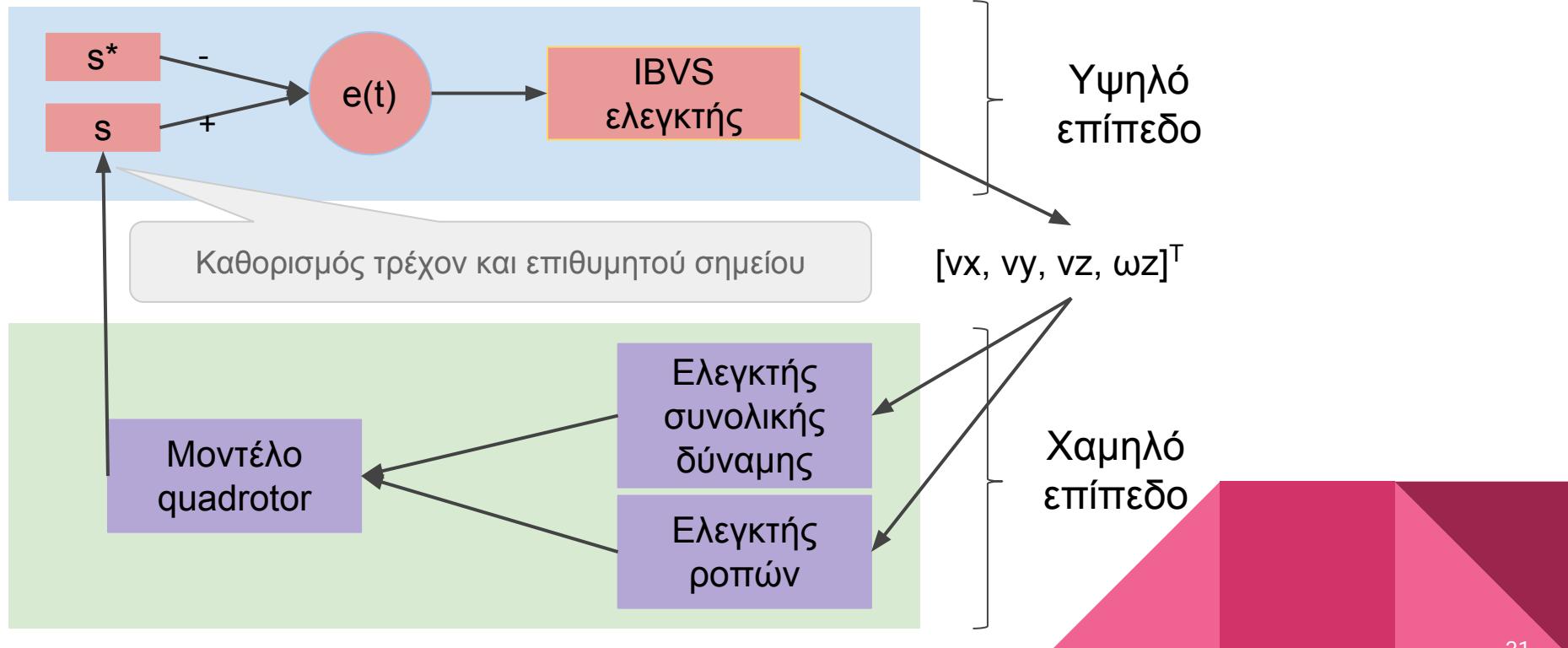
Ορίζουμε τα παρακάτω διανύσματα s και s^* βάση των συντεταγμένων τους ως προς το $\Sigma\Sigma$ της κάμερας.

$$s = \begin{bmatrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x1 \\ y1 \\ x2 \\ y2 \\ x3 \\ y3 \\ x4 \\ y4 \end{bmatrix}$$
$$s^* = \begin{bmatrix} P1^* \\ P2^* \\ P3^* \\ P4^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x1^* \\ y1^* \\ x2^* \\ y2^* \\ x3^* \\ y3^* \\ x4^* \\ y4^* \end{bmatrix}$$

Το σφάλμα απόστασης ορίζεται ως:

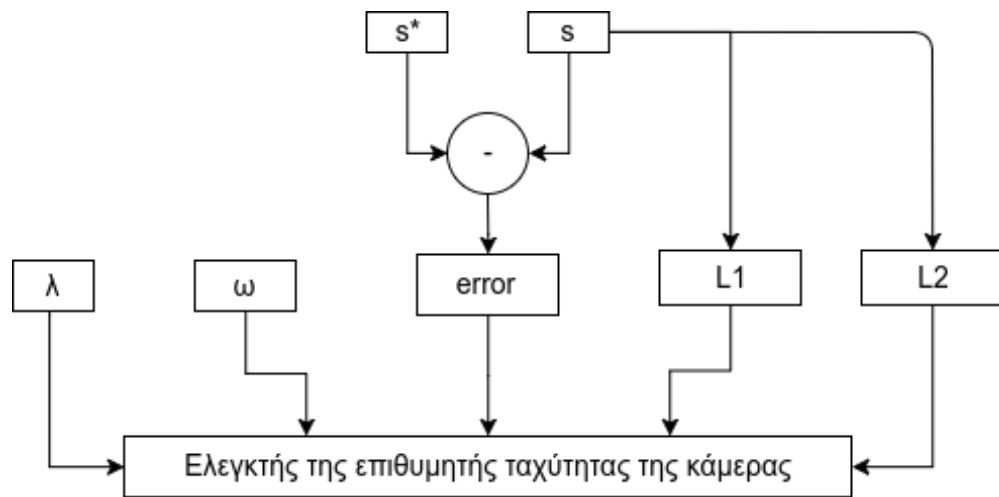
$$e(t) = s - s^*$$

Επίπεδα ελέγχου



Έλεγχος υψηλού επιπέδου

Ελεγκτής επιθυμητής ταχύτητας: $v_{cam} = (-\lambda * L_1^T * error) - (L_1^T * L_2 * \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix})$



Κέρδος: $\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 \end{pmatrix}$

Έλεγχος υψηλού επιπέδου

Πίνακες αλληλεπίδρασης $Lx1$ και $Lx2$ για το σημείο $P(x, y)$:

Με Z είναι η εκτίμηση του βάθους της κάμερας

$$L_{x1} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & \frac{x}{Z} \\ \frac{-1}{Z} & \frac{-1}{Z} & \frac{y-x}{Z} \\ 0 & \frac{1}{Z} & \frac{y}{Z} \end{pmatrix} \quad L_{x2} = \begin{pmatrix} x^*y & -(1+x^2) \\ 1+(y^2)-(x^*y) \end{pmatrix}$$

Ο $L1$ και ο $L2$ αφορούν 4 σημεία ενδιαφέροντος.

$$L1 = \begin{bmatrix} Lx1_1 \\ Lx1_2 \\ Lx1_3 \\ Lx1_4 \end{bmatrix} \quad L2 = \begin{bmatrix} Lx2_1 \\ Lx2_2 \\ Lx2_3 \\ Lx2_4 \end{bmatrix}$$

Έλεγχος για την συνολική δύναμη

$$F_{des} = m * g + k1_{thrust} * (v_{rob}^{des} - v_{rob}) - k2_{thrust} * (\dot{v}_{rob}) + k3_{thrust} * \int (v_{rob}^{des} - v_{rob})$$

Εξισορρόπηση
της βαρύτικής
δύναμης

Σφάλμα
ταχυτήτων

Παράγωγος του
σφάλματος

Ολοκλήρωση του
σφάλματος

Εκφράζουμε τις ταχύτητες ως προς το
σύστημα συντεταγμένων της
ταχύτητας:

$${}^V \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_z \end{bmatrix} = {}^V R_I * {}^I R_B * {}^B R_C * {}^C \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

Έλεγχος για ροπή στον Z άξονας

Συμβολίζουμε με psi, phi, theta τις γωνίες euler του quadrotor και ορίζουμε τον W

$$W = \begin{bmatrix} 0 \cos(\psi) - \cos(\phi) * \sin(\psi) \\ 0 \sin(\psi) \cos(\phi) * \cos(\psi) \\ 1 \quad 0 \quad \sin(\phi) \end{bmatrix}$$

Επιθυμητός ρυθμός μεταβολής της γωνίας yaw: $\dot{\theta}_{rob}^{des} = inv(W) * \omega_{rob}$

Επιθυμητή ροπή στον Z άξονα: $\tau_z = k_{trqz} * (\dot{\theta}_{rob}^{des} - \dot{\theta}_{rob})$

Έλεγχος για ροπή στους X και Y άξονες

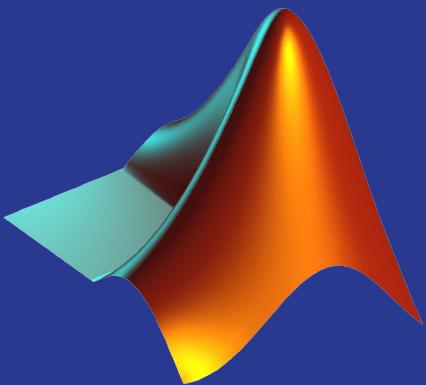
Επιθυμητή γωνία pitch: $\theta_x^{des} = k_{\theta x des} * \left(\frac{m}{thrust_{des}} \right) * (v_x^{des} - v_x)$

Επιθυμητή γωνία roll: $\theta_y^{des} = k_{\theta y des} * \left(\frac{m}{thrust_{des}} \right) * (v_y^{des} - v_y)$

Επιθυμητές ροπές: $\tau_x = k_{trqyp} * (\theta_p^{des} - \theta_p) - k_{trqyd} * (\dot{\theta}_d) + k_{trqyi} * \int (\theta_p^{des} - \theta_p)$

$$\tau_y = k_{trqyp} * (\theta_p^{des} - \theta_p) - k_{trqyd} * (\dot{\theta}_d) + k_{trqyi} * \int (\theta_p^{des} - \theta_p)$$

Προσομοίωση



MATLAB

“Σχεδιασμός και έλεγχος της διαδικασίας
προσγείωσης”

- ❑ Σενάρια υλοποίησης
- ❑ Φάσεις προσγείωσης

Σενάρια Υλοποίησης

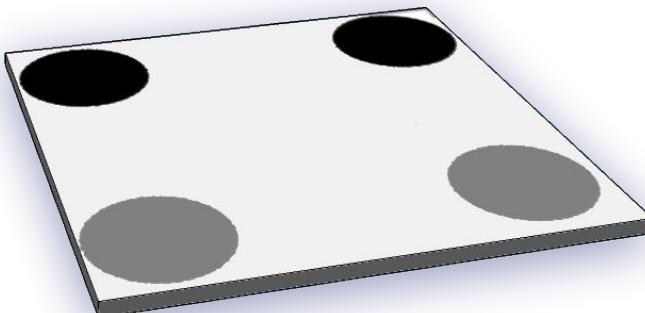
Σταθερού στόχου

- Έλεγχος υψηλού επιπέδου
- Έλεγχος χαμηλού επιπέδου
- Σταθερά σημεία ενδιαφέροντος**

Κινούμενου στόχου

- Έλεγχος υψηλού επιπέδου
- Έλεγχος χαμηλού επιπέδου
- Κινούμενα σημεία ενδιαφέροντος**

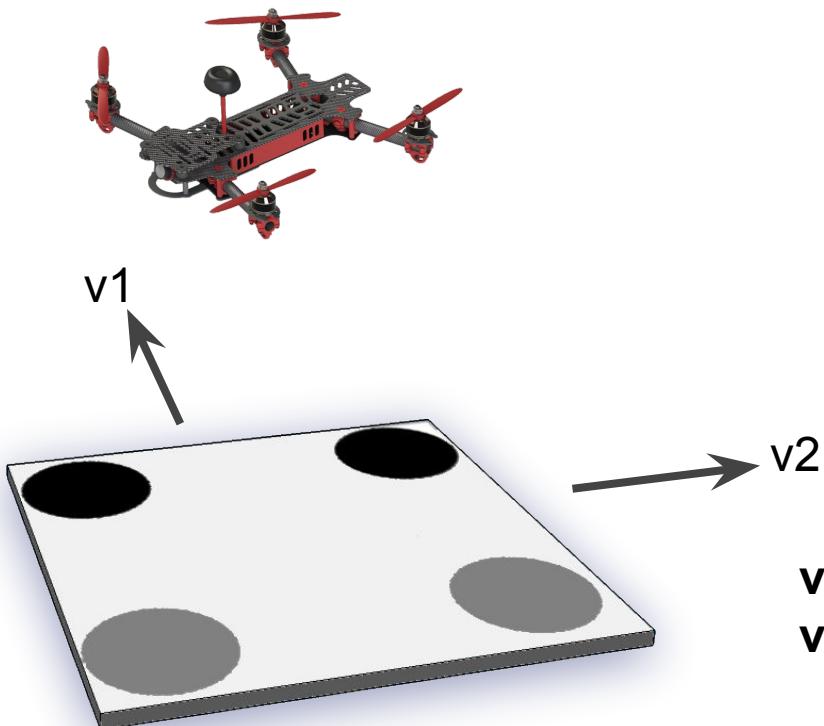
Σενάριο “Σταθερού στόχου”



Η πλατφόρμα προσγείωσης:

- ❑ Μηδενική γραμμική ταχύτητα
- ❑ Μηδενική περιστροφική ταχύτητα

Σενάριο “Κινούμενου στόχου”



Η πλατφόρμα προσγείωσης:

- Σταθερή γραμμική ταχύτητα μετακίνησης στο επίπεδο X-Y

$$v_p < \max(v_q)$$

v_p : ταχύτητα πλατφόρμας
 v_q : ταχύτητα quadrotor

Φάσεις προσγείωσης

Φάση 1 :

Προσέγγιση του στόχου



Φάση 2 :

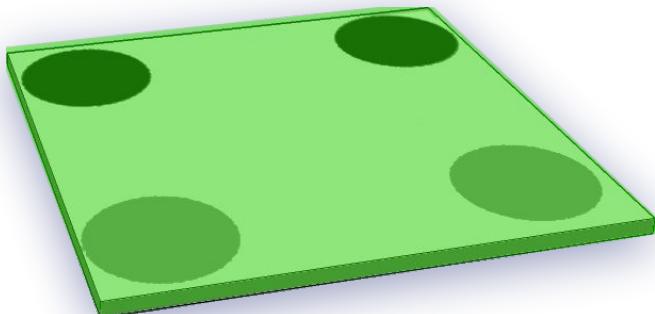
Τυφλή προσγείωση



Φάση 3 :

Κατάσταση αδράνειας

Φάση 1 : Προσέγγιση του στόχου

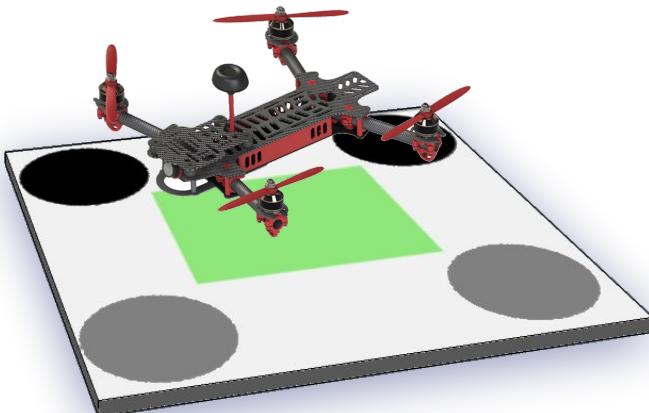


Βήματα αλγορίθμου προσγείωσης:

1. Αναγνώριση των σημείων
2. Υπολογισμός σφάλματος απόστασης
3. Υπολογισμός επιθυμητών ταχυτήτων
4. Υπολογισμός απαραίτητων δυνάμεων και ροπών
5. Εφαρμογή δυνάμεων και ροπών και επανάληψη διαδικασίας

Φάση 2 : Τυφλή προσγείωση

Βήματα αλγορίθμου προσγείωσης:

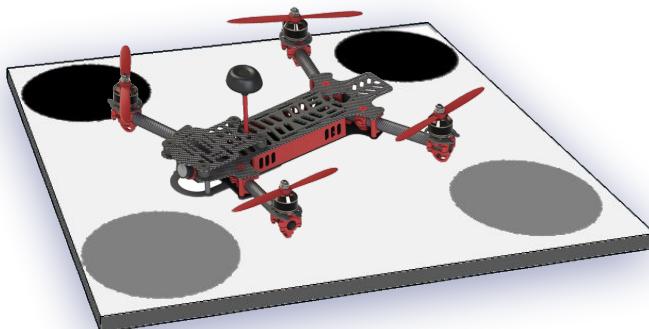


1. Καθορισμός σταθερής ταχύτητας προσγείωσης
2. Υπολογισμός απαραίτητων δυνάμεων και ροπών
3. Εφαρμογή δυνάμεων και ροπών και επανάληψη διαδικασίας

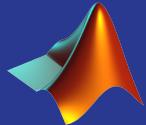
Φάση 3 : Κατάσταση αδράνειας

Βήματα αλγορίθμου προσγείωσης:

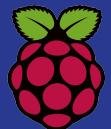
1. Μηδενισμός των στροφών των Η/Κ
2. Τέλος προσγείωσης



Αποτελέσματα



MATLAB



Raspberry Pi

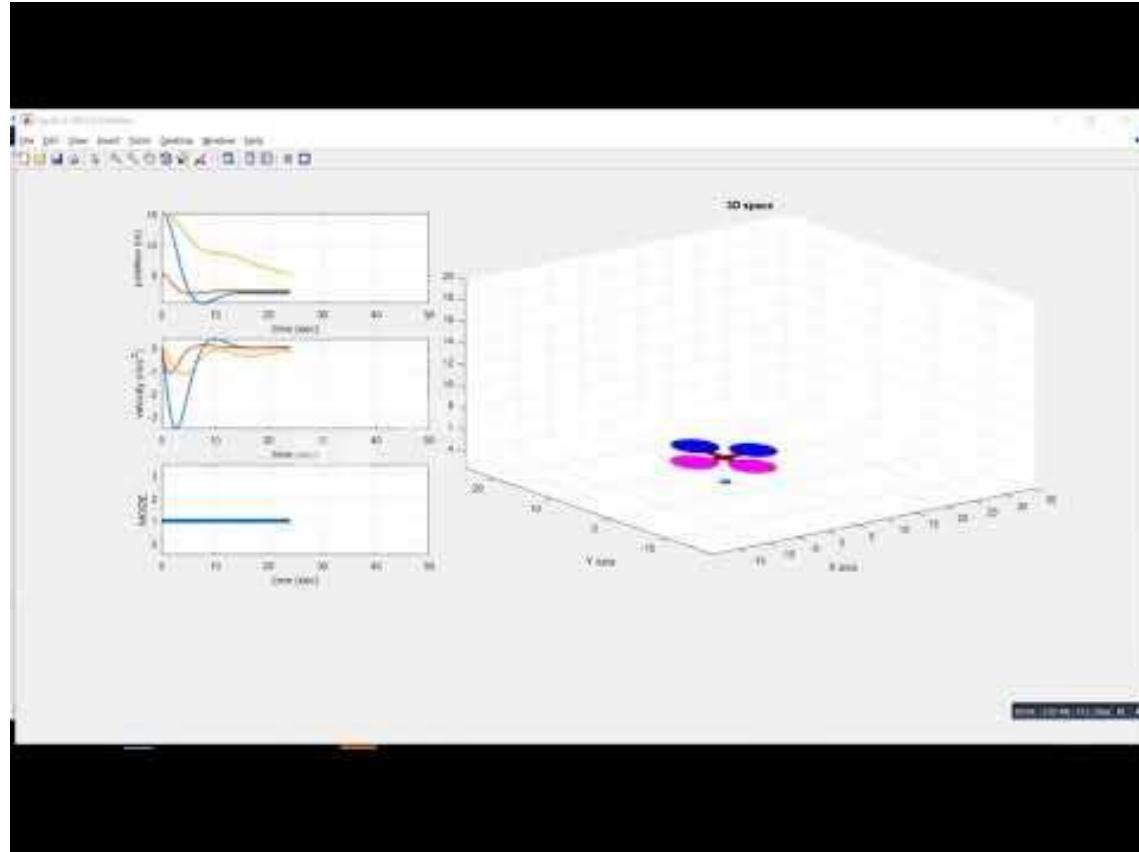


Συνθήκες προσομοίωσης

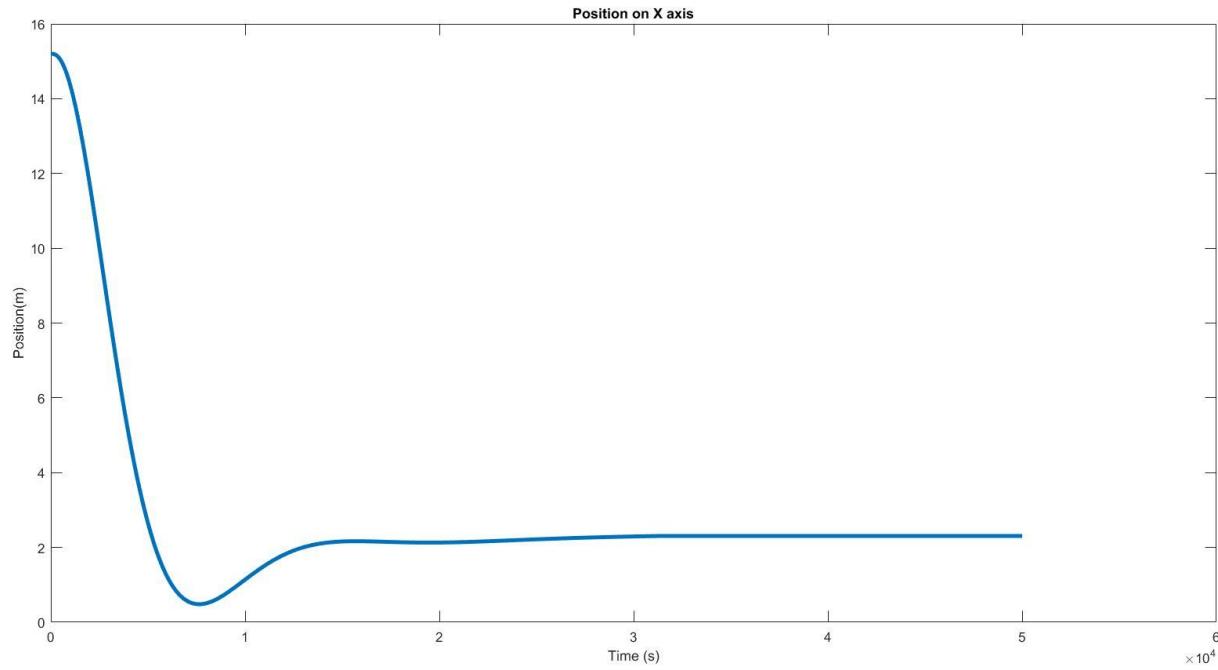
- ❑ Αρχική γωνία (yaw): 25 μοίρες
- ❑ Τελική γωνία (yaw): 0 μοίρες
- ❑ Αρχική θέση: [15.2, 5.3, 15]
- ❑ Επιθυμητή θέση: [2.5, 2.5, 3.4]
- ❑ Ταχύτητα πλατφόρμας: [0, 0, 0]
- ❑ Θόρυβος ανέμου: OXI



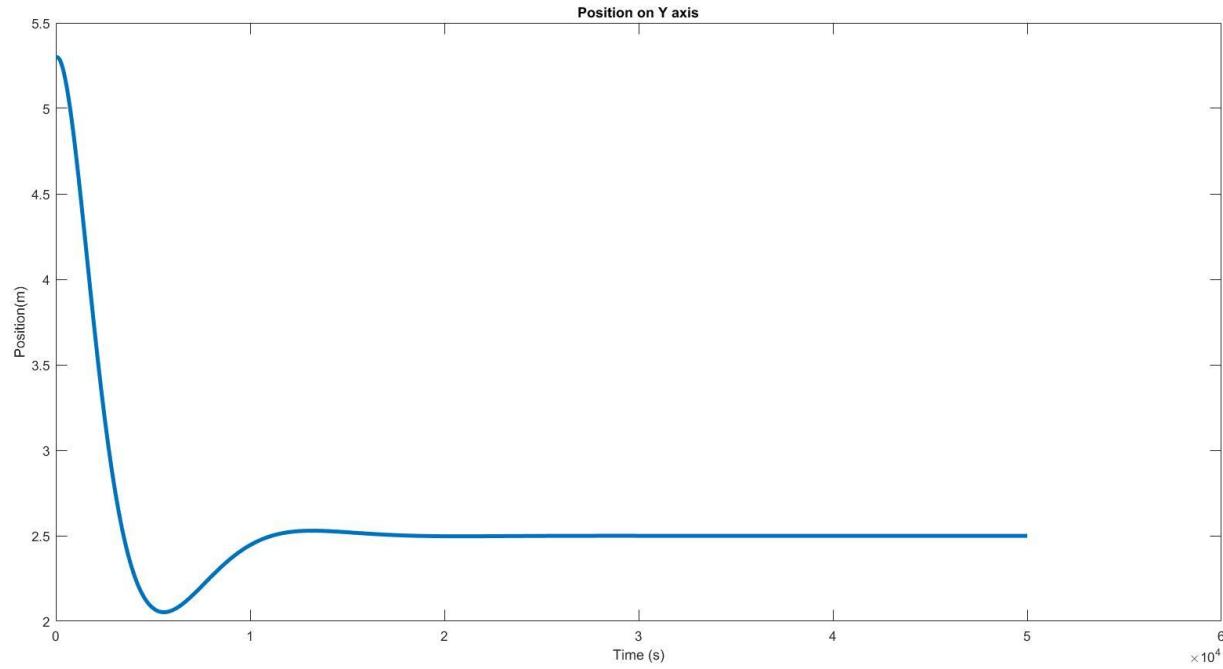
Σενάριο σταθερού στόχου



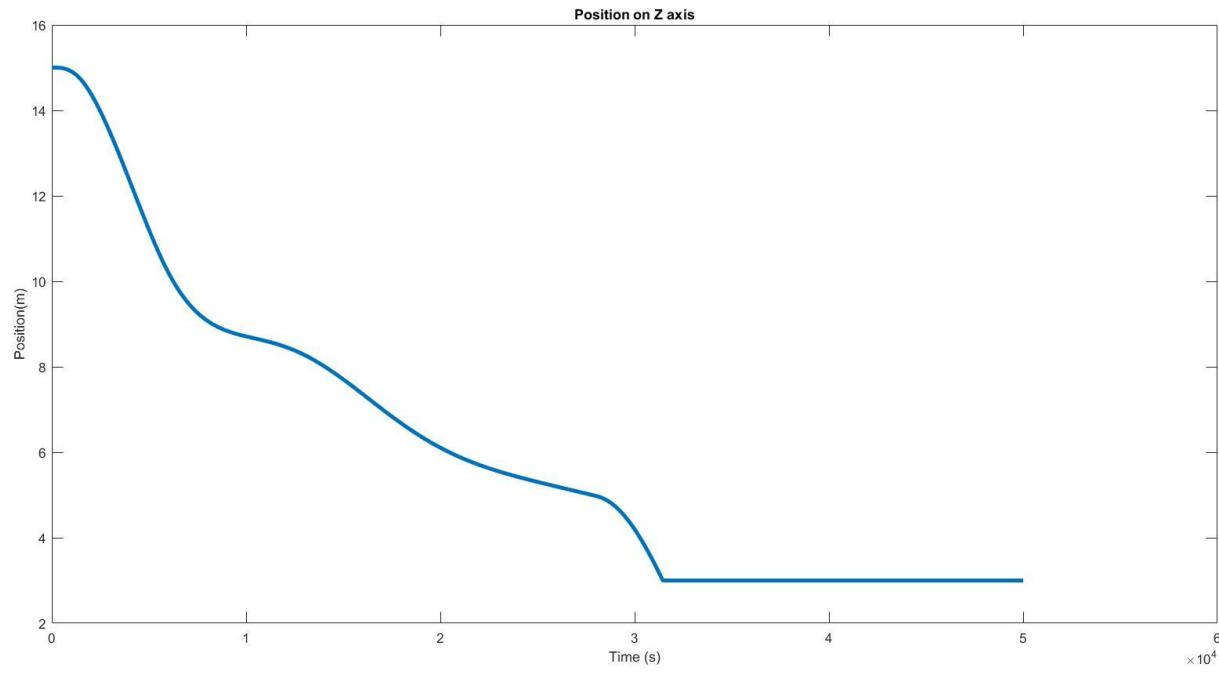
Διάγραμμα Θέσης-Χρόνου στον X άξονα



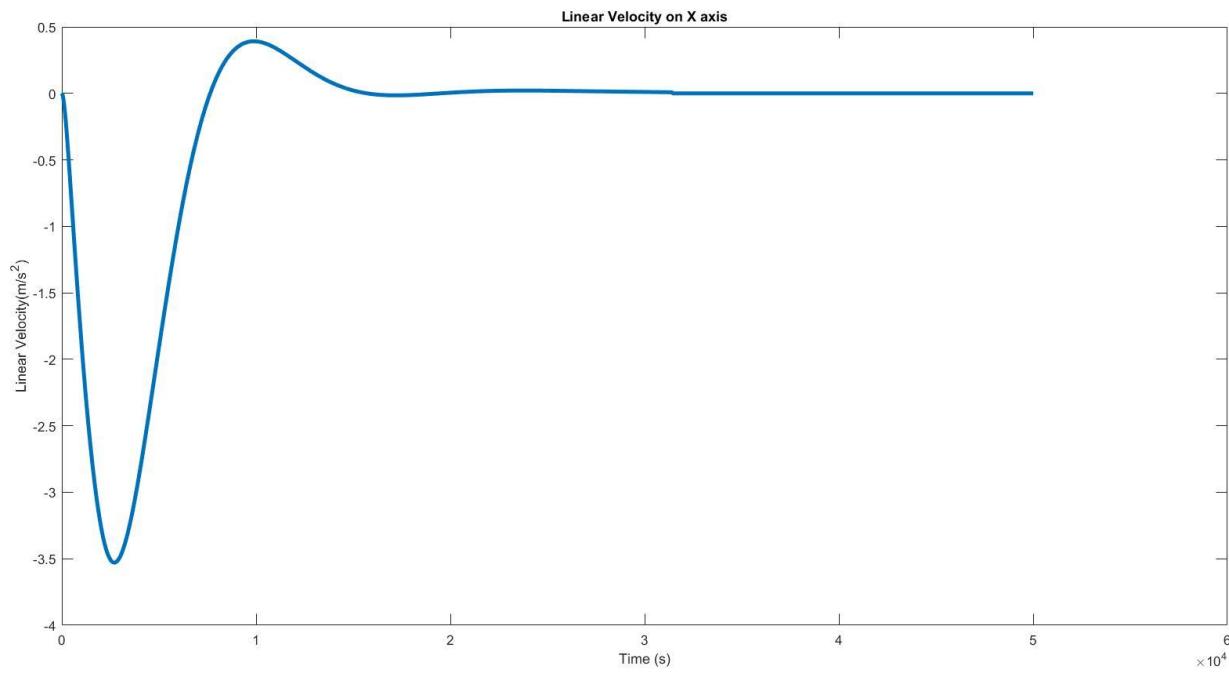
Διάγραμμα Θέσης-Χρόνου στον Υ άξονα



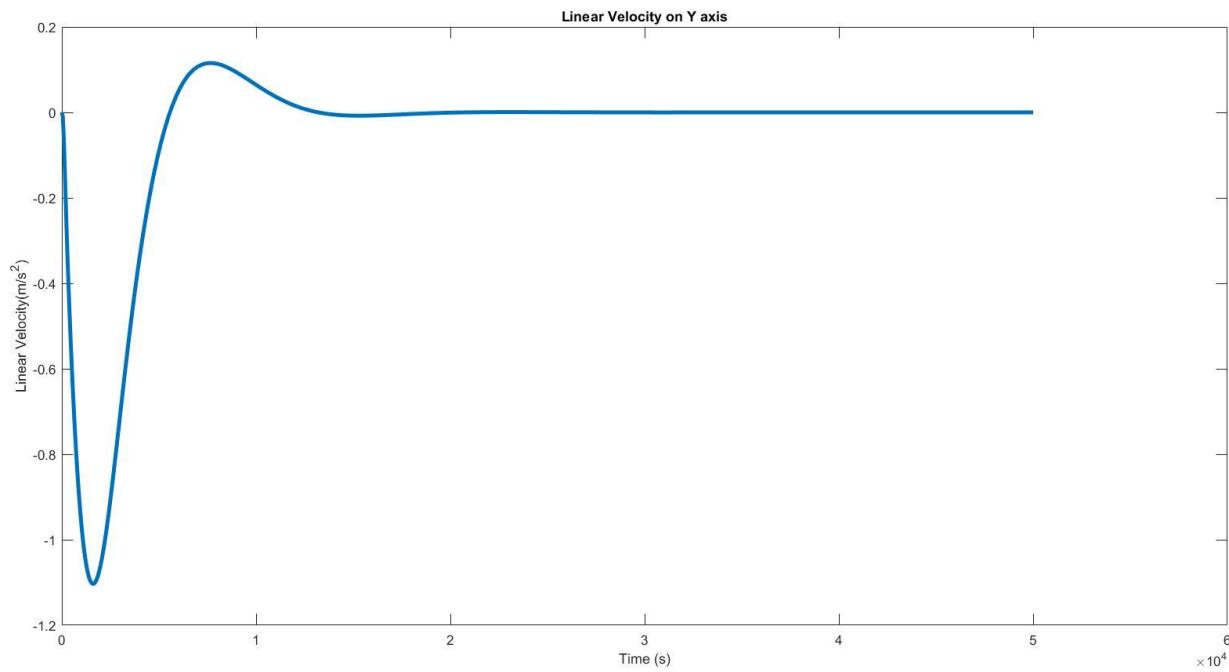
Διάγραμμα Θέσης-Χρόνου στον Z άξονα



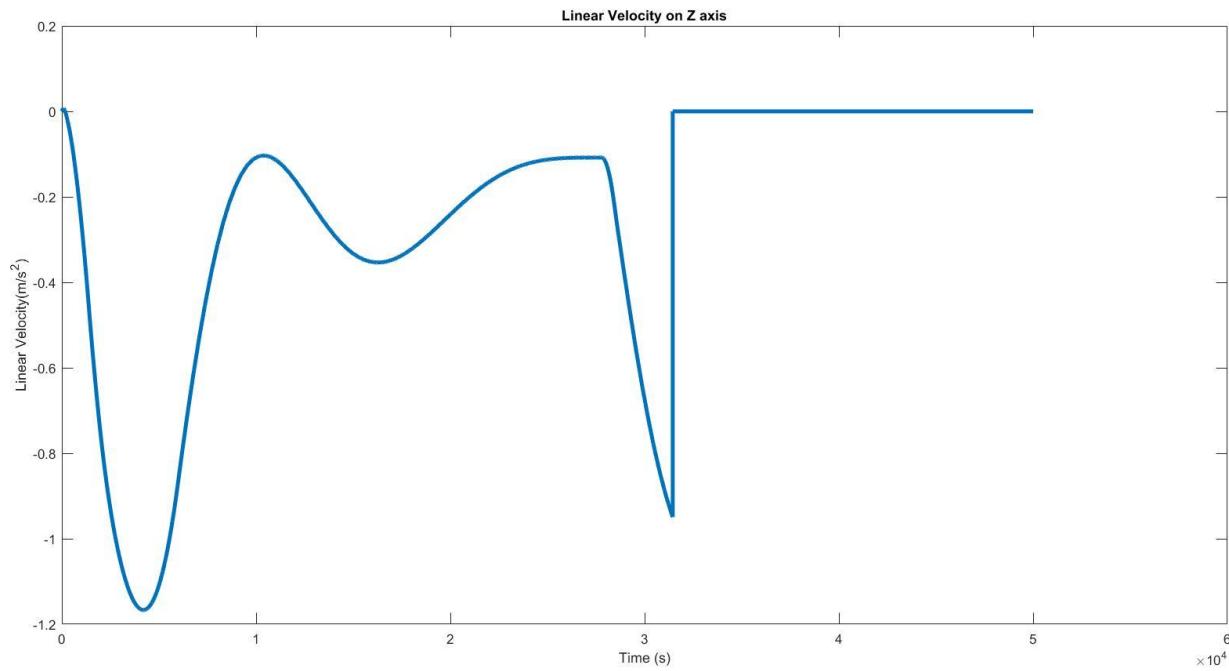
Διάγραμμα Ταχύτητας-Χρόνου στον X άξονα



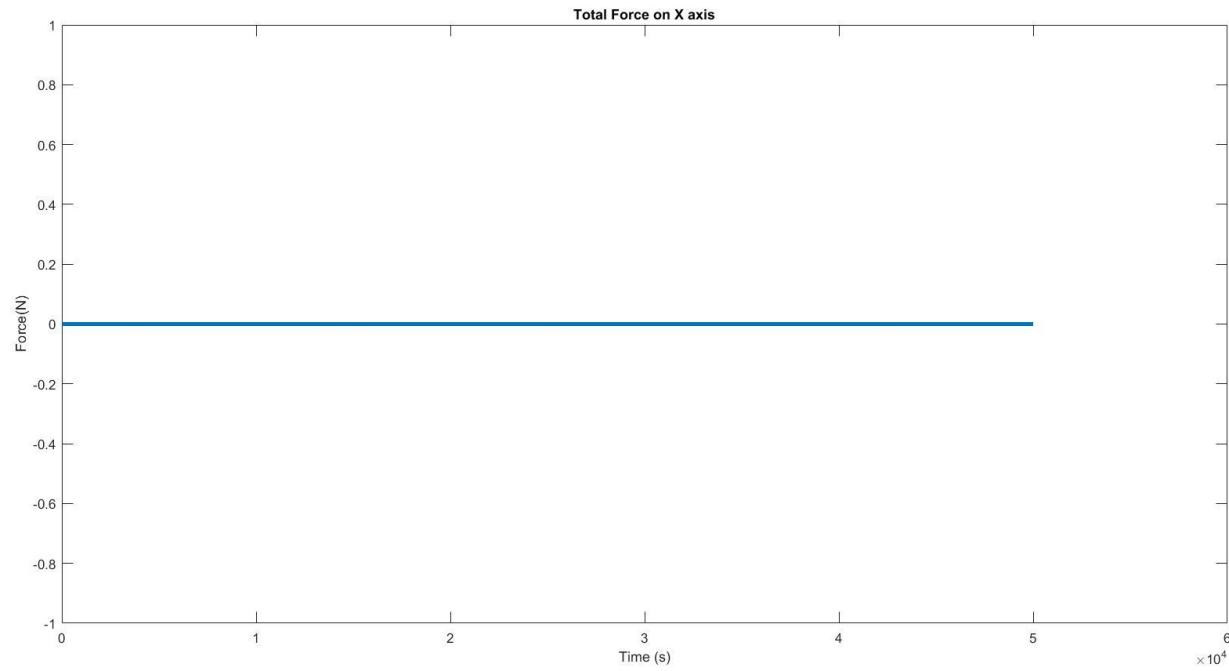
Διάγραμμα Ταχύτητας-Χρόνου στον Υ άξονα



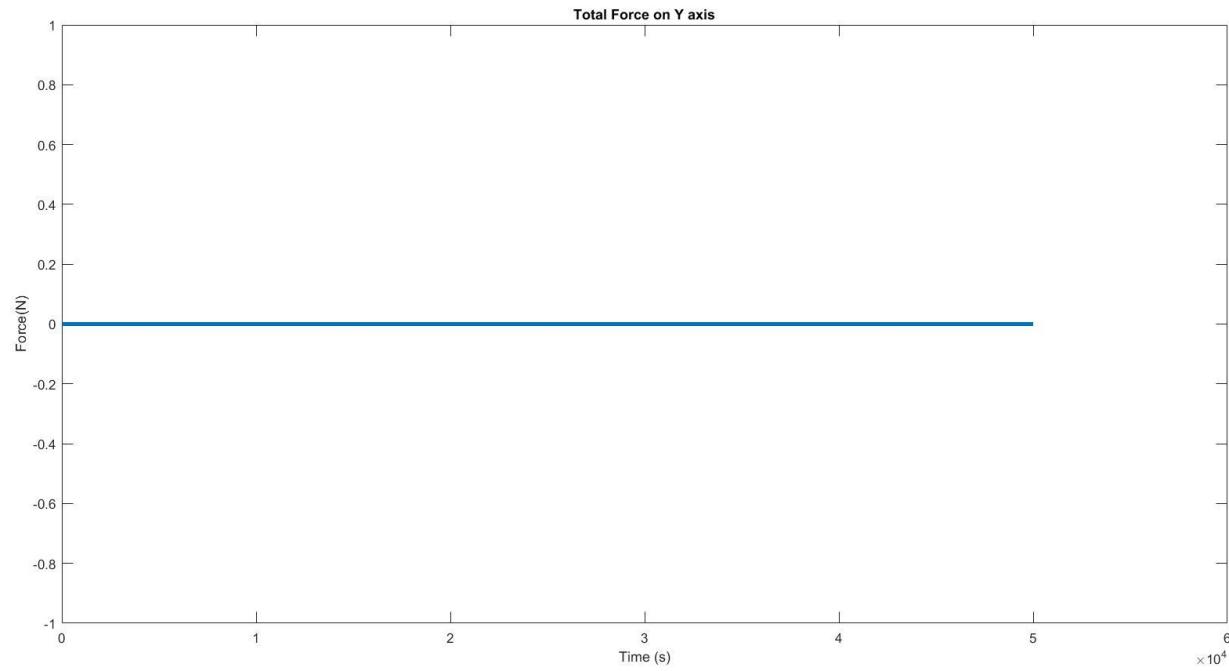
Διάγραμμα Ταχύτητας-Χρόνου στον Z άξονα



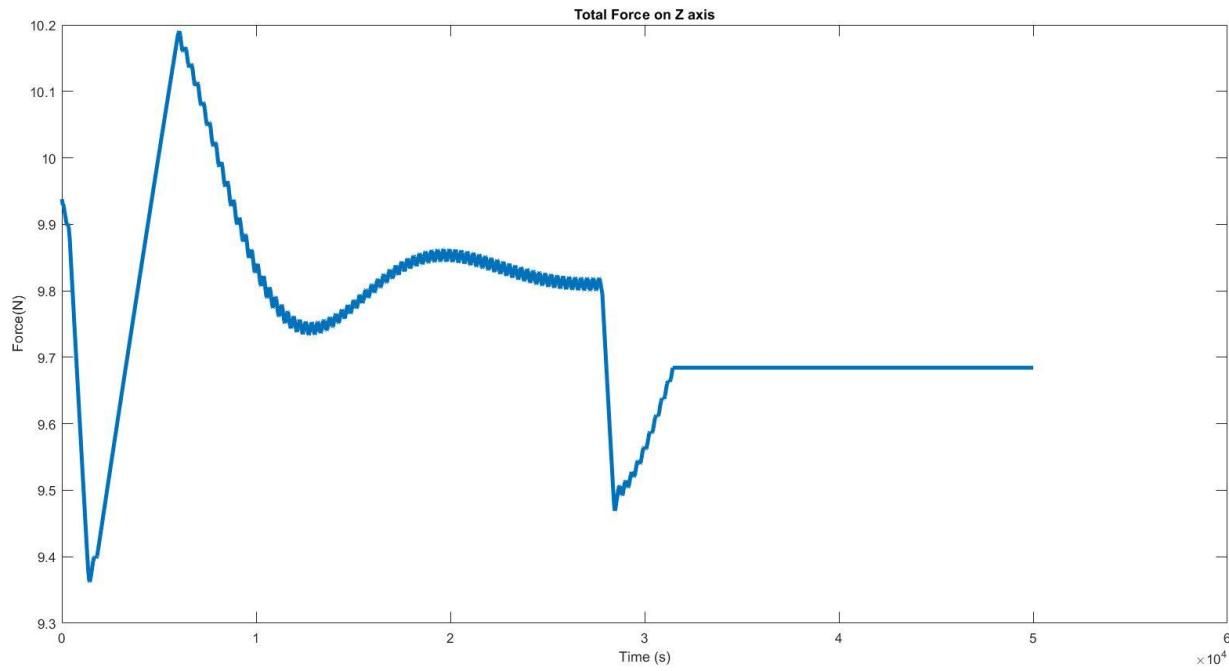
Διάγραμμα Δύναμης-Χρόνου στον Χ άξονα



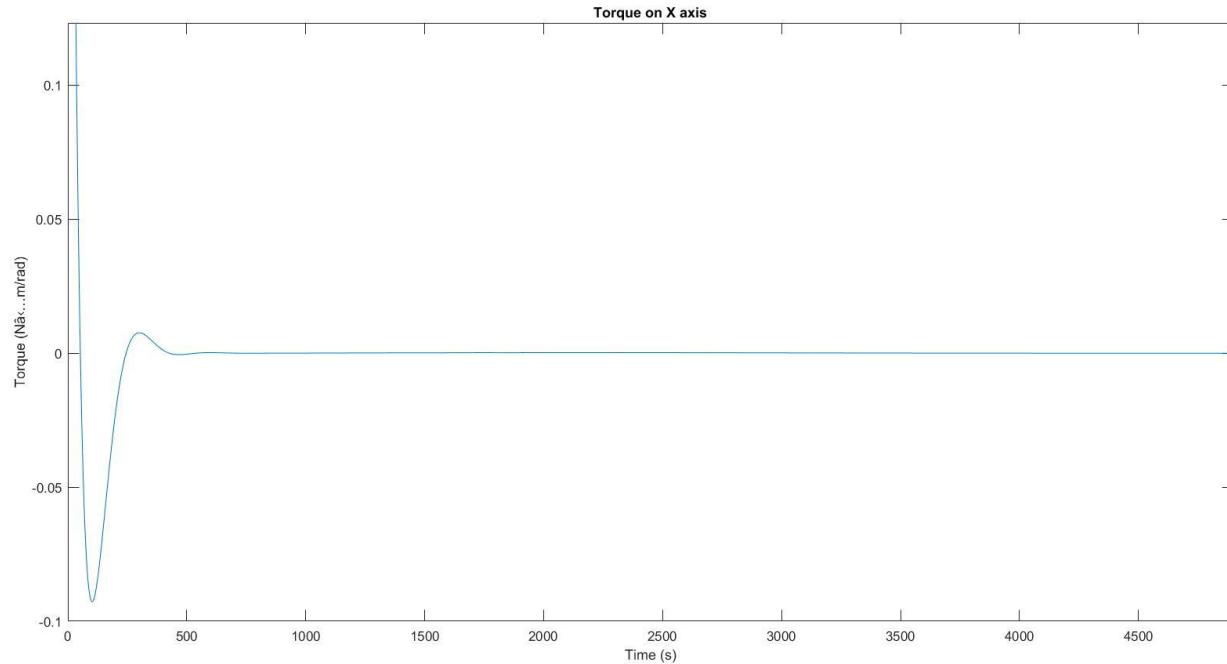
Διάγραμμα Δύναμης-Χρόνου στον Υ άξονα



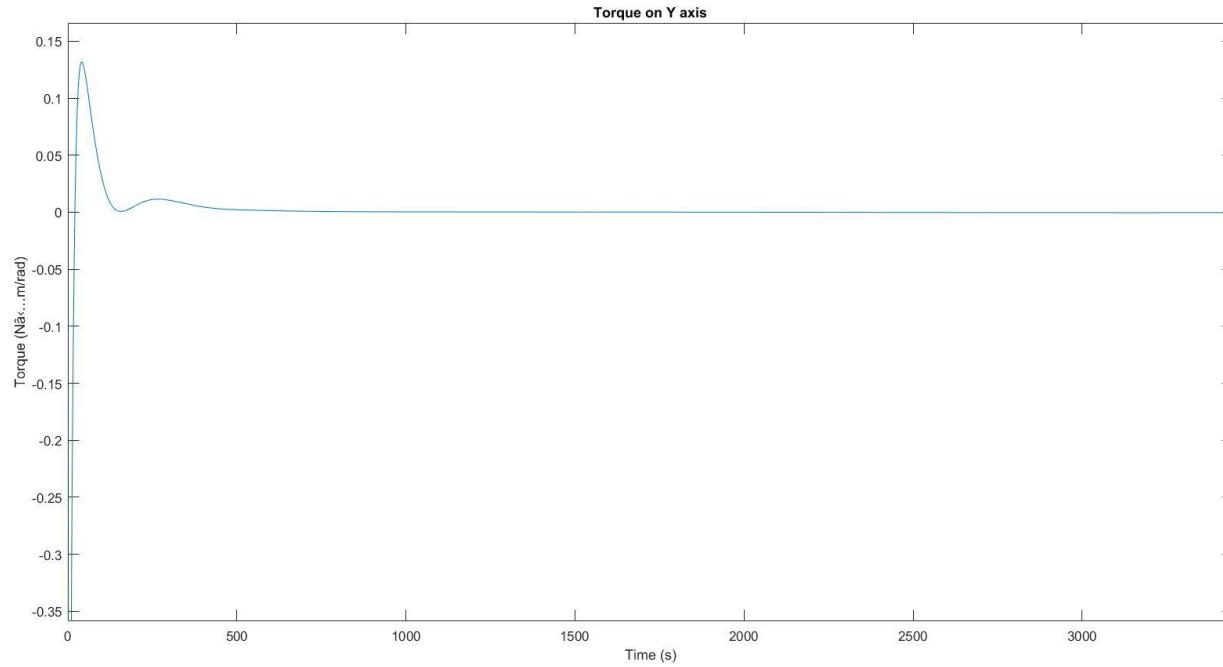
Διάγραμμα Δύναμης-Χρόνου στον Ζ άξονα



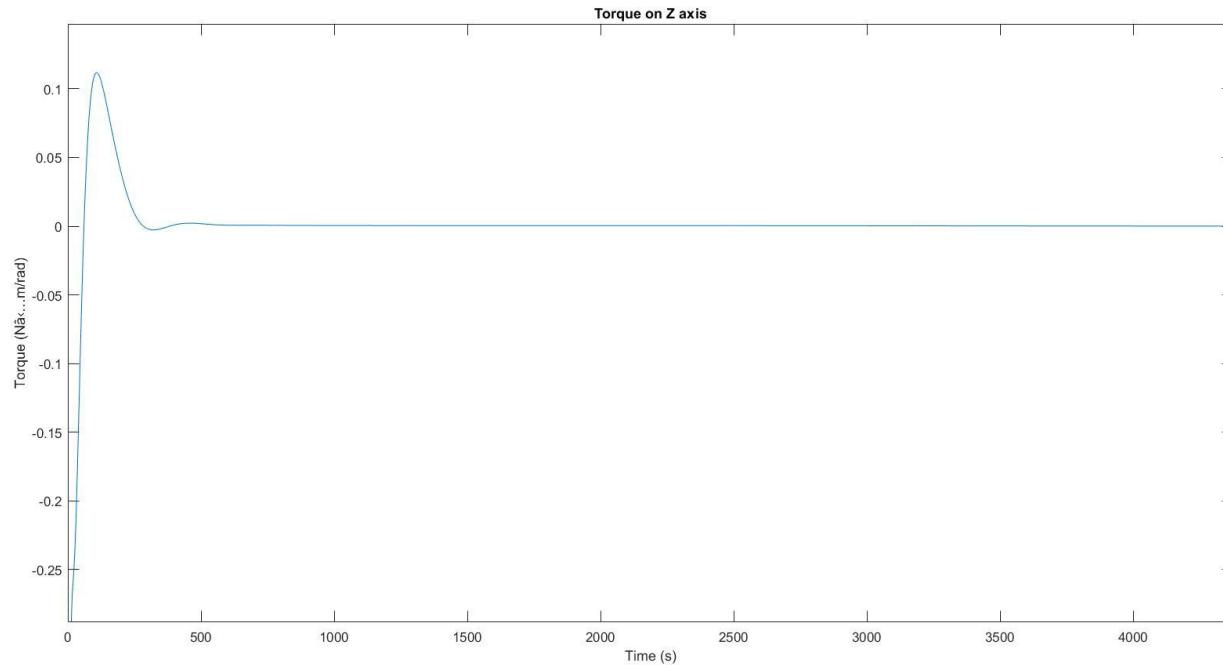
Διάγραμμα Ροπής-Χρόνου στον Χ άξονα



Διάγραμμα Ροπής-Χρόνου στον Υ άξονα



Διάγραμμα Ροπής-Χρόνου στον Z άξονα

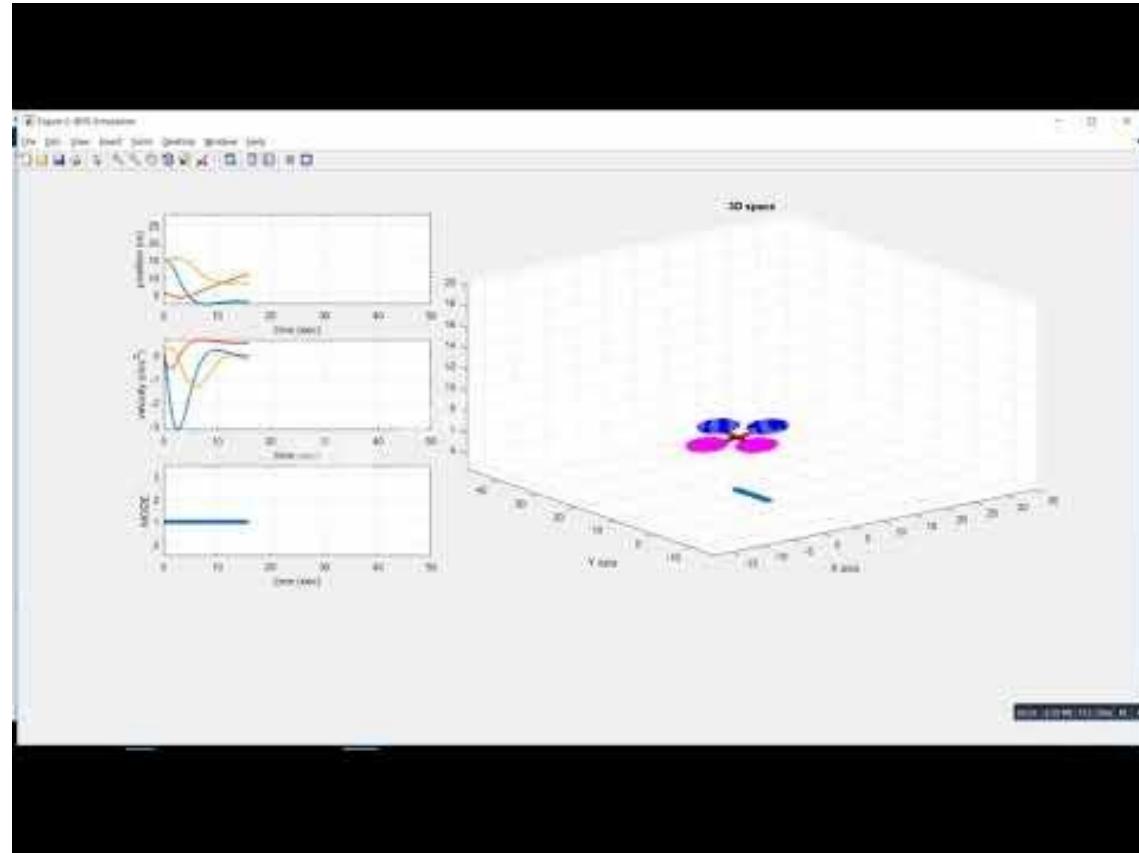


Συνθήκες προσομοίωσης

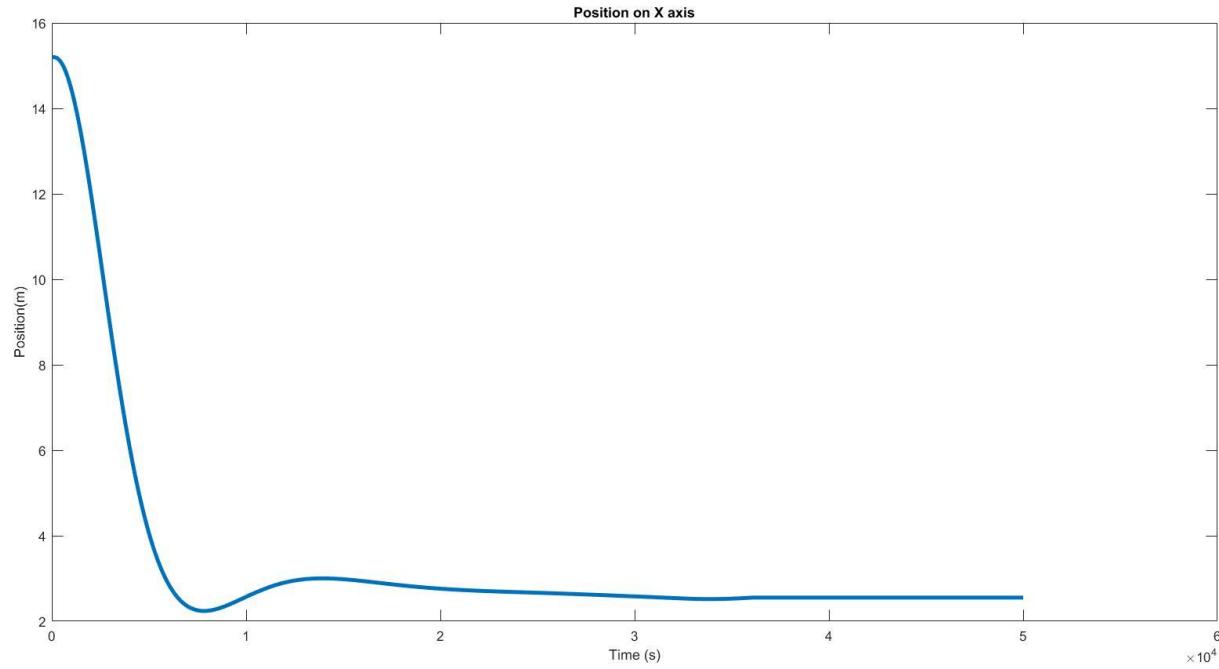
- Αρχική γωνία (yaw): 25 μοίρες
- Τελική γωνία (yaw): 0 μοίρες
- Αρχική θέση: [15.2, 5.3, 15]
- Επιθυμητή θέση: [2.5, _, 3.4]
- **Ταχύτητα πλατφόρμας: [0, 0.5, 0]**
- Θόρυβος ανέμου: ΝΑΙ



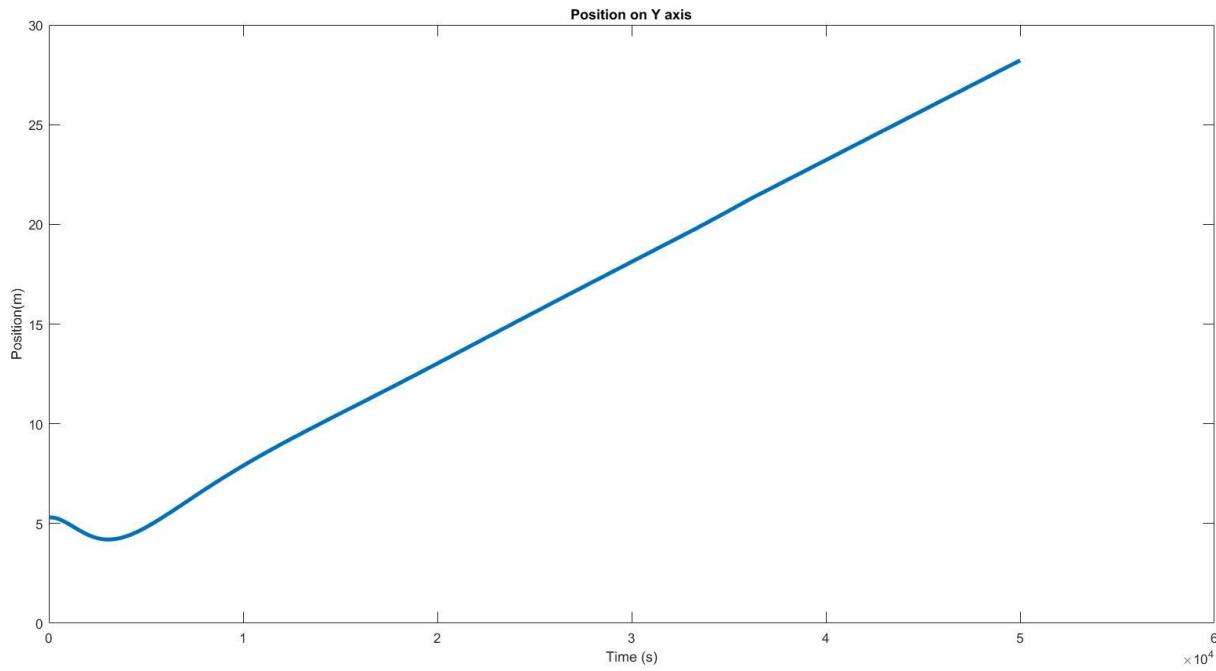
Σενάριο κινούμενου στόχου



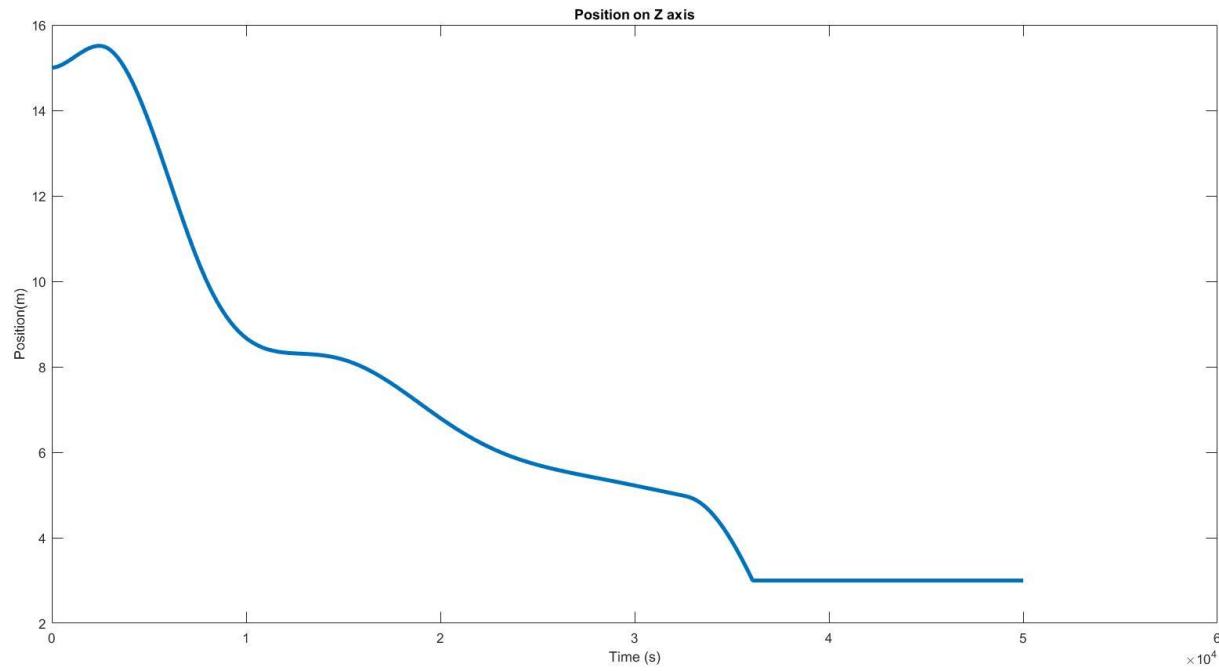
Διάγραμμα Θέσης-Χρόνου στον X άξονα



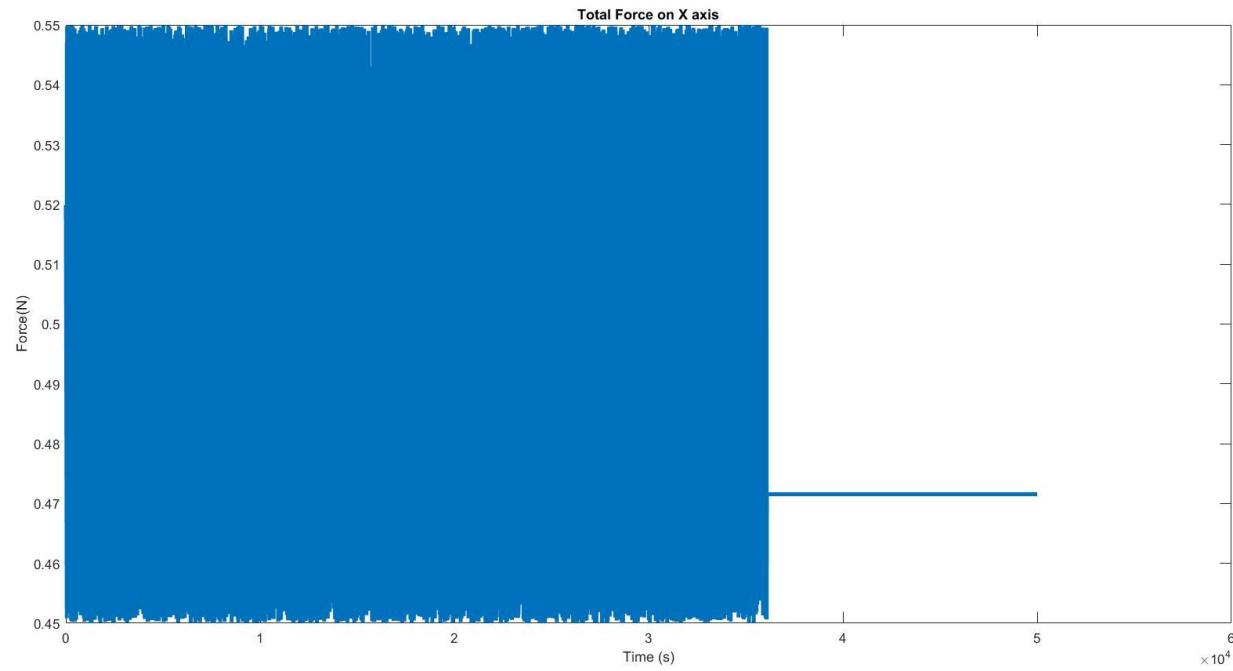
Διάγραμμα Θέσης-Χρόνου στον Υ άξονα



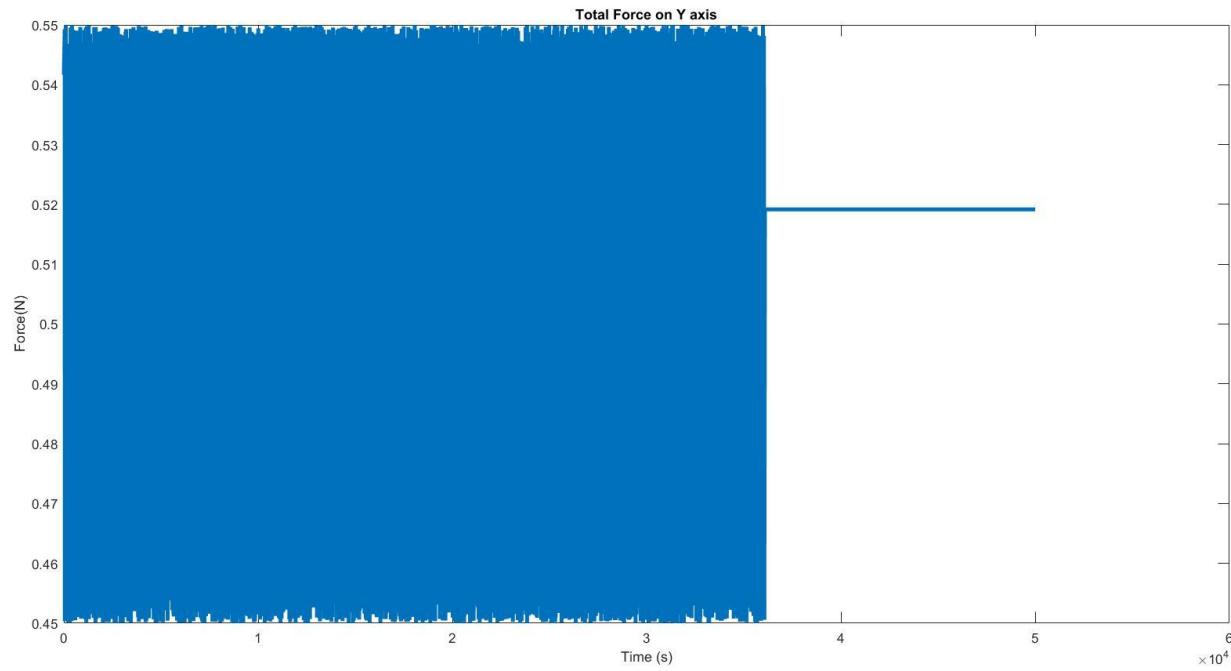
Διάγραμμα Θέσης-Χρόνου στον Z άξονα



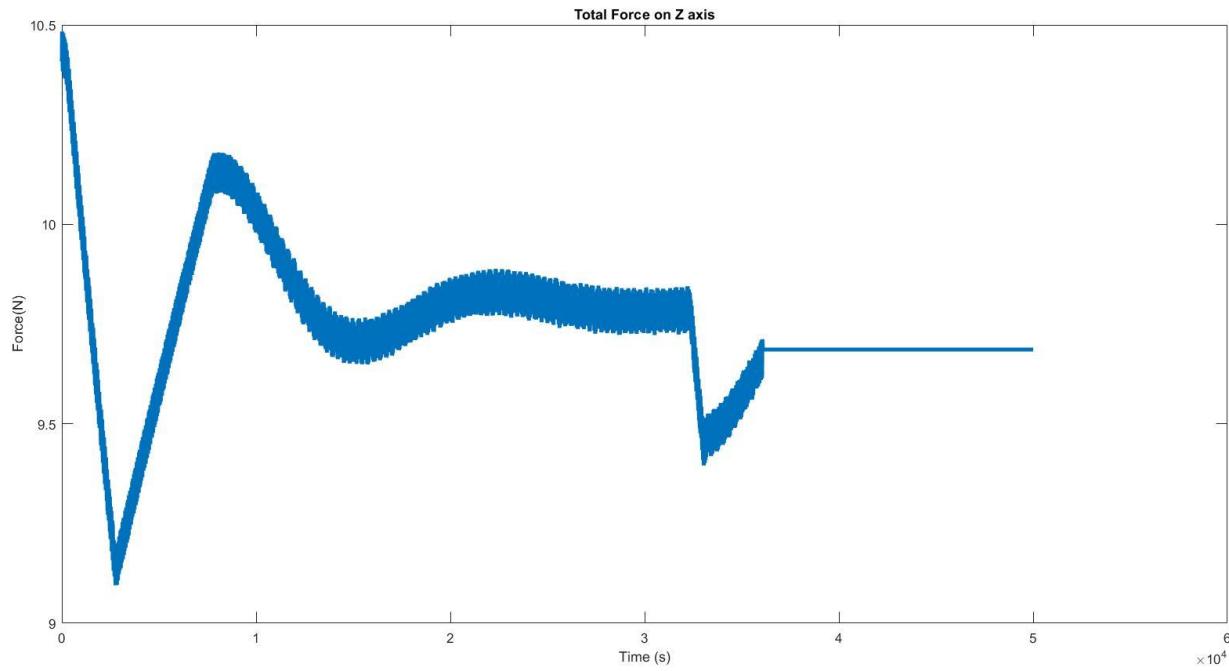
Διάγραμμα Δύναμης-Χρόνου στον Χ άξονα



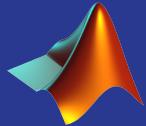
Διάγραμμα Δύναμης-Χρόνου στον Υ άξονα



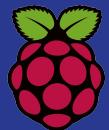
Διάγραμμα Δύναμης-Χρόνου στον Ζ άξονα



Πειράματα

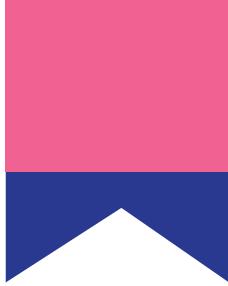


MATLAB



Raspberry Pi



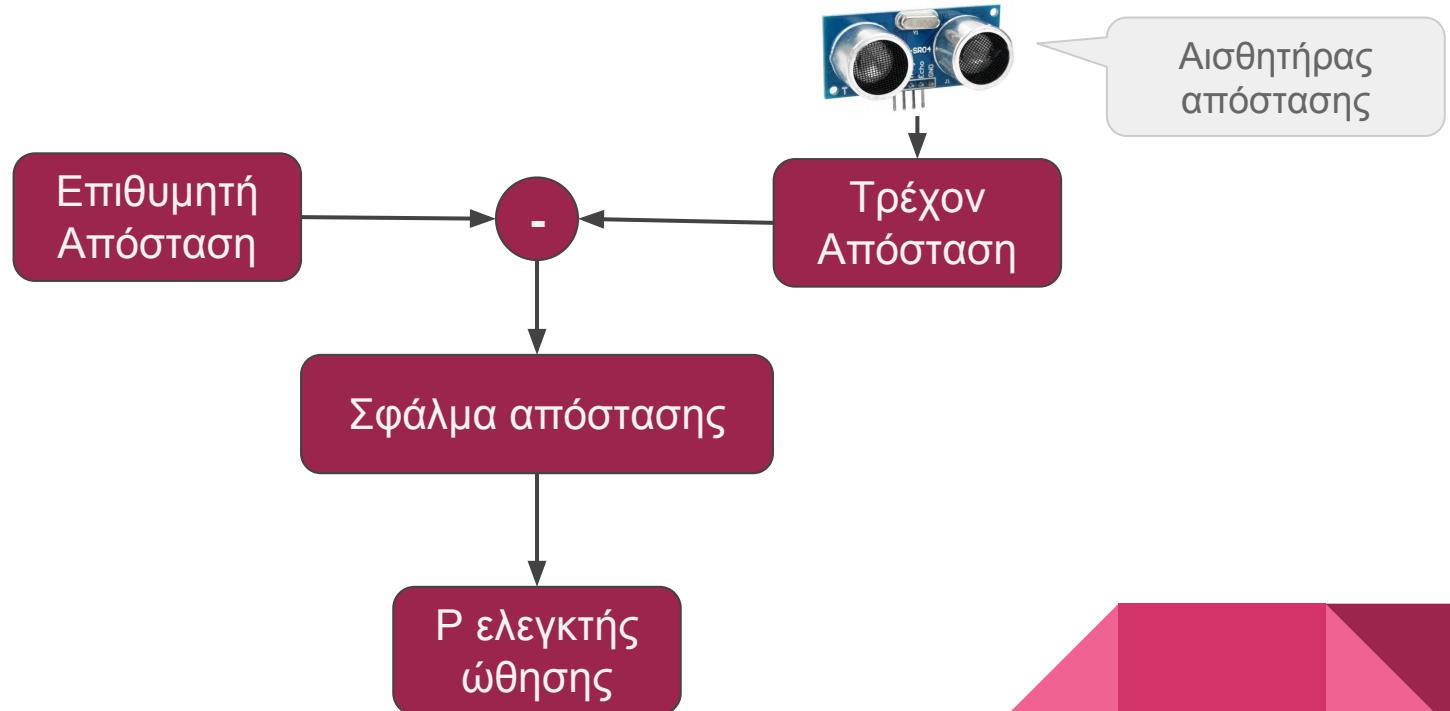


Προσγείωση με χρήση αισθητήρα απόστασης

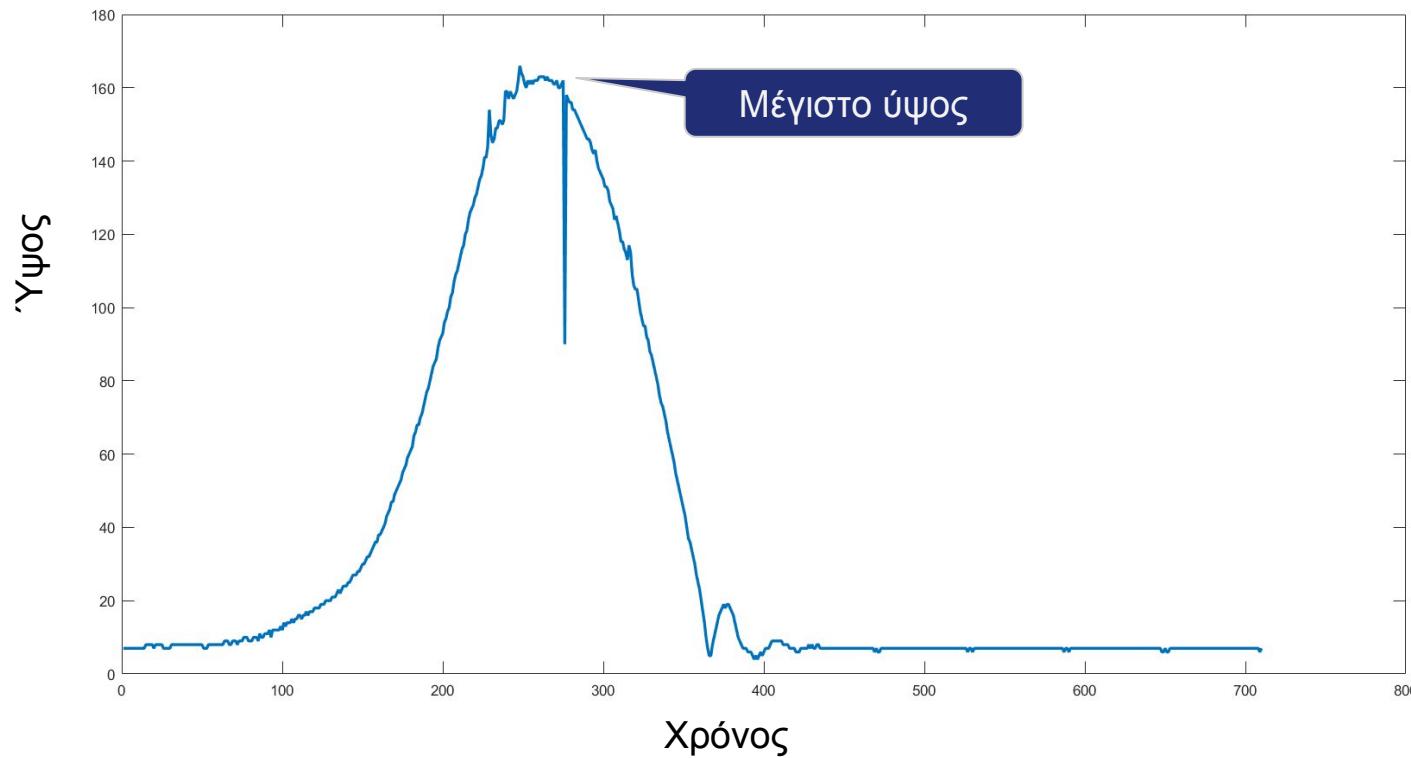


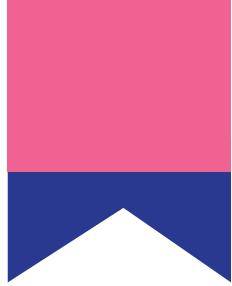
Υλοποίηση των φάσεων προσγείωσης στο φυσικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας αισθητήρα απόστασης.

Δομικό διάγραμμα προσγείωσης

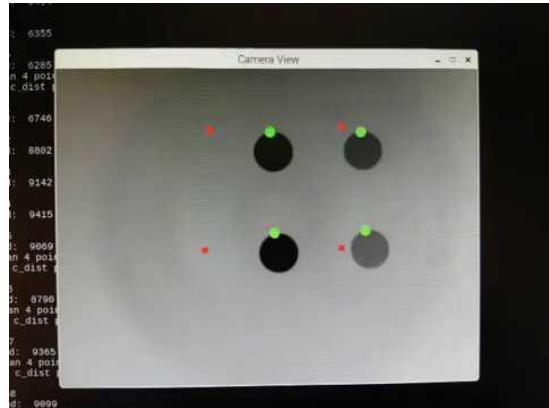


Διάγραμμα Απόστασης- Χρόνου

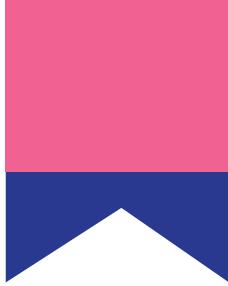




Εντοπισμός σημείων ενδιαφέροντος



Η υλοποίηση του
αλγορίθμου εντοπισμού 4
σημείων έγινε στο Raspberry
Pi με την βιβλιοθήκη
OpenCV



Μελλοντικά θέματα

- Αναγνώριση σημείου-στόχου
- Μοντελοποίηση των Η/Κ
- Δημιουργία αναλυτικού μοντέλου θορύβου

Τέλος

Σας ευχαριστώ θερμά για
την προσοχή σας!



vtzivaras@gmail.com



<http://vasiliszivaras.gr/>

