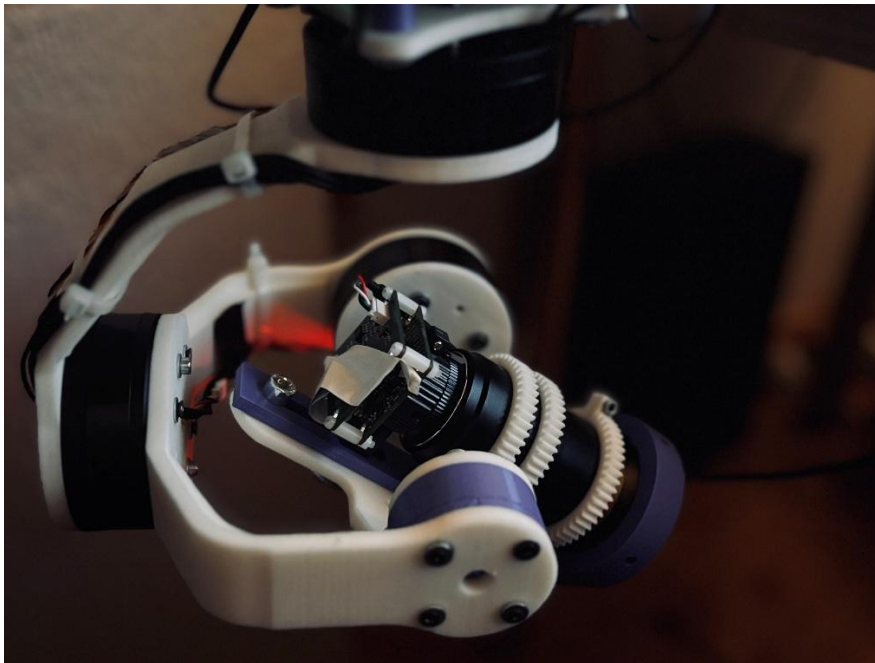


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Ανάπτυξη Gimbal Τριών Αξόνων για Drones με
Υλοποίηση Feedback Ελέγχου»



Του φοιτητή
Πασσιά Κωνσταντίνου
Αρ. Μητρώου: 2019136

Επιβλέπων
Γεώργιος Κοκκώνης
Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία Μάιος 2025

Τίτλος Δ.Ε. Ανάπτυξη Gimbal Τριών Αξόνων για Drones με Υλοποίηση Feedback Ελέγχου

Κωδικός Δ.Ε. 24333

Όνοματεπώνυμο φοιτητή ΠΑΣΣΙΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Όνοματεπώνυμο εισηγητή ΚΟΚΚΩΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 29/12/2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 31/05/2025

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Πασσιά Κωνσταντίνου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Αφιέρωση στα άτομα που αγαπάμε – αγαπήσαμε - θ' αγαπήσουμε»

Πρόλογος

Η επιλογή της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψε από το προσωπικό μου ενδιαφέρον για τα αυτόνομα ιπτάμενα συστήματα και ειδικότερα για την τεχνολογία σταθεροποίησης καμερών μέσω αντίζυγων. Από την αρχή της ακαδημαϊκής μου πορείας, με ενδιέφερε η πρακτική εφαρμογή της μηχανικής (mechatronics) σε πραγματικά προβλήματα και η δημιουργία ενός συστήματος από το μηδέν αποτέλεσε για μένα μια πρόκληση που ήθελα να αντιμετωπίσω.

Η εργασία αυτή μου έδωσε την ευκαιρία να συνδυάσω θεωρητικές γνώσεις από διάφορους τομείς — μηχανολογικός σχεδιασμός, ηλεκτρονικά, έλεγχος συστημάτων και ανάπτυξη λογισμικού— με την πρακτική εφαρμογή τους, μέσα από ένα έργο πλήρως λειτουργικό και τεχνολογικά απαιτητικό. Η διαδικασία με δίδαξε όχι μόνο τεχνικές δεξιότητες αλλά και επιμονή, επίλυση προβλημάτων και την αξία της συνεχούς δοκιμής και ανατροφοδότησης.

Η εμπειρία που αποκόμισα από την υλοποίηση αυτής της εργασίας ξεπερνά κατά πολύ τη θεωρητική μάθηση, προσφέροντάς μου ένα ουσιαστικό εφόδιο για την επαγγελματική μου πορεία στο χώρο της ρομποτικής, των embedded systems και των εφαρμογών drone.

Περίληψη

Αυτή η διατριβή παρουσιάζει το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την αξιολόγηση ενός προσαρμοσμένου συστήματος αντίζυγου τριών αξόνων προσαρμοσμένου για ενσωμάτωση drone, με έμφαση στην επίτευξη σταθεροποίησης σε πραγματικό χρόνο μέσω ελέγχου ανατροφοδότησης. Χτισμένο από το μηδέν, το σύστημα συνδυάζει μηχανική καινοτομία, ενσωμάτωση ηλεκτρονικού υλικού και ανάπτυξη λογισμικού για να δημιουργήσει μια ελαφριά και λειτουργική λύση ικανή να σταθεροποιεί τα συστήματα κάμερας επί του σκάφους κατά τη διάρκεια της πτήσης.

Η δομή του αντίζυγου σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας εργαλεία CAD και κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας υλικό ABS + ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες μέσω 3D εκτύπωσης ακριβείας. Οι κινητήρες GM6208-150T επιλέχθηκαν για την υψηλή ροπή και τη χαμηλή ροπή απόφραξης (cogging torque), κρίσιμη για ομαλή κίνηση. Αυτά συνδυάστηκαν με τον ελεγκτή STorM32 v1.32, μια πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα ικανή να χειρίζεται έλεγχο προσανατολισμού σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας αλγόριθμους PID. Ένα Raspberry Pi 5 χρησιμεύει ως μονάδα επεξεργασίας, εκτελώντας ένα προσαρμοσμένο σενάριο Python για την αποστολή εντολών και τη λήψη σχολίων από τον ελεγκτή μέσω σειριακής επικοινωνίας στα 115200 baud.

Η αρχιτεκτονική ελέγχου χρησιμοποιεί έναν καλά ρυθμισμένο βρόχο PID για να ελαχιστοποιήσει το γωνιακό σφάλμα και να ανταποκριθεί δυναμικά στην κίνηση. Οι δοκιμές έδειξαν ότι το σύστημα επιτυγχάνει ακρίβεια σταθεροποίησης εντός $\pm 0,05$ μοιρών, με ελάχιστο jitter και γρήγορο χρόνο καθίζησης, καθιστώντας το αποτελεσματικό για βασικές εργασίες εναέριας απεικόνισης. Ωστόσο, εντοπίστηκαν περιορισμοί όπως το γωνιακό εύρος $\pm 80^\circ$ και η ανάγκη για περαιτέρω βελτιστοποίηση PID, ιδιαίτερα για επαγγελματική χρήση όπου η ποιότητα και η ακρίβεια της εικόνας είναι κρίσιμης σημασίας.

Μέσω επαναληπτικών δοκιμών, αναθεωρήσεων υλικού και εκτεταμένου εντοπισμού σφαλμάτων, το έργο υπογραμμίζει τόσο τις δυνατότητες όσο και τις προκλήσεις της δημιουργίας ενός αξιόπιστου αντίζυγου από χαμηλού κόστους, προσβάσιμα εξαρτήματα. Το αποτέλεσμα είναι μια ευέλικτη πλατφόρμα σταθεροποίησης που χρησιμεύει ως βάση για μελλοντικές εξελίξεις στον προσαρμοστικό έλεγχο, την αυτόνομη παρακολούθηση και τα συστήματα απεικόνισης που τοποθετούνται σε drone.

«Development of a Three-Axis Gimbal for Drones with Control Feedback Implementation»

«Konstantinos Passias»

Abstract

This thesis presents the design, development, and evaluation of a custom three-axis gimbal system tailored for drone integration, with a focus on achieving real-time stabilization through feedback control. Built from the ground up, the system combines mechanical innovation, electronic hardware integration, and software development to create a lightweight and functional solution capable of stabilizing onboard camera systems during flight.

The gimbal structure was designed using CAD tools and manufactured using high-temperature-resistant ABS+ material through precision 3D printing. Brushless GM6208-150T motors were selected for their high torque and low cogging behavior, critical for smooth motion. These were paired with the STorM32 v1.32 controller, an open-source platform capable of handling real-time orientation control using PID algorithms. A Raspberry Pi 5 serves as the processing unit, running a custom Python script to send commands and receive feedback from the controller via serial communication at 115200 baud.

The control architecture employs a finely tuned PID loop to minimize angular error and respond dynamically to motion. Testing demonstrated that the system achieves stabilization accuracy within ± 0.05 degrees, with minimal jitter and fast settling time, making it effective for basic aerial imaging tasks. However, limitations such as a $\pm 80^\circ$ angular range and the need for further PID optimization were identified, particularly for professional-grade use where image quality and precision are critical.

Through iterative testing, hardware revisions, and extensive debugging, the project highlights both the potential and challenges of building a reliable gimbal from low-cost, accessible components. The outcome is a versatile stabilization platform that serves as a foundation for future developments in adaptive control, autonomous tracking, and drone-mounted imaging systems.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τους ανθρώπους που με στηρίζουν, τον εαυτό μου που δεν τα παρατάει, και εκείνους που αμφέβαλαν — μου δίνουν έναν λόγο παραπάνω να συνεχίσω.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	vi
Περίληψη.....	vii
Abstract	viii
Ευχαριστίες	ix
Περιεχόμενα	x
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Συνομογραφίες.....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Ιστορικό και κίνητρα.....	1
1.2 Δήλωση προβλήματος.....	1
1.3 Στόχοι	2
1.4 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.....	2
Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	3
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.2 Gimbal Συστήματα σε UAVs.....	4
2.2.1 Εξέλιξη και σημασία	4
2.2.2 Τύποι Gimbal.....	4
2.3 Μηχανισμοί ελέγχου ανατροφοδότησης (Feedback control).....	6
2.3.1 Επισκόπηση	6
2.3.2 Μαθηματική Αναπαράσταση	7
2.3.3 Ρύθμιση ελεγκτών PID	7
2.4 Ενσωμάτωση Gimbals και ελέγχου ανατροφοδότησης σε drones	11
2.5 Λειτουργία των Gimbal Motors	12
2.6 Επίλογος.....	24
Κεφάλαιο 3ο: Σχεδίαση, κατασκευή και ανάπτυξη λογισμικού.....	25
3.1 Εισαγωγή.....	25
3.2 Μηχανολογικός Σχεδιασμός.....	25
3.2.1 Στόχοι σχεδιασμού	25
3.2.2 Μοντελοποίηση σε πρόγραμμα CAD.....	25
3.2.3 Διαμόρφωση των αξόνων	27
3.2.4 Τρισδιάστατη εκτύπωση.....	28

3.3	Εξαρτήματα υλικού - Hardware	34
3.3.1	Gimbal Motors.....	34
3.3.2	Ελεγκτής του Gimbal	35
3.3.3	Camera Module	37
3.3.4	Μονάδα επεξεργασίας	38
3.4	Ανάπτυξη Λογισμικού.....	40
3.4.1	Εγκατάσταση λογισμικού Raspberry Pi OS στο Raspberry Pi 5.....	40
3.4.2	Πρωτόκολλο επικοινωνίας	42
3.4.3	Εφαρμογή αλγορίθμου ελέγχου PID	46
3.5	Ενοποίηση συστήματος.....	50
3.6	Δοκιμή και επικύρωση	50
3.7	Επίλογος.....	50
Κεφάλαιο 4ο:	Οπτική Αναγνώριση και Επέκταση Ελέγχου Gimbal με API.....	51
4.1	Εισαγωγή.....	51
4.2	Σύγκριση των YOLO versions για live video object tracking.....	52
4.2.1	Διαφορές μεταξύ των βιβλιοθηκών YOLO	52
4.2.2	Σύγκριση του YOLOv8 με νεότερες εκδόσεις (YOLOv11).....	53
4.3	Αρχιτεκτονική και Λειτουργία της Εφαρμογής	54
4.4	Διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών API	58
4.4.1	Παρακολούθηση αντικειμένων.....	58
4.4.2	Κλείδωμα αντικειμένου	59
4.4.3	Ενσωμάτωση με τον Ελεγκτή Gimbal.....	61
4.5	Ανάλυση Απόδοσης και Περιορισμοί	61
Κεφάλαιο 5ο:	Πειραματική ρύθμιση	64
5.1	Περιβάλλον δοκιμής.....	64
5.2	Μετρήσεις απόδοσης.....	65
Κεφάλαιο 6ο:	Αποτελέσματα και συζήτηση.....	69
6.1	Αξιολόγηση απόδοσης	69
6.2	Προκλήσεις που αντιμετωπίστηκαν	70
6.3	Ανάλυση της απόδοσης του βρόχου ελέγχου	76
Κεφάλαιο 7ο:	Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες.....	77
7.1	Σύνοψη των επιτευγμάτων	77
7.2	Πιθανές βελτιώσεις	78
7.3	Μελλοντικές κατευθύνσεις.....	82
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		85

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 Διαδικασία κατασκευής	33
Σχήμα 2 Αναπαράσταση λειτουργίας API	57
Σχήμα 3 Αναπαράσταση μελλοντικής λειτουργίας API	63
Σχήμα 4 Σύγκριση υλικών νήματος εκτύπωσης σε Δύναμη [67].....	79
Σχήμα 5 Σύγκριση υλικών νήματος εκτύπωσης σε Αντοχή στη Θερμότητα [67]	80
Σχήμα 6 Μελλοντικές βελτιώσεις API.....	84

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Περιγραφή της τάσης σε συνάρτηση με τη κατάσταση PMSM	20
Πίνακας 2 Σημαντικά χαρακτηριστικά GM6208-150T από datasheet [10].....	34
Πίνακας 3 Σημαντικά χαρακτηριστικά GM3506 από datasheet [55].....	35

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
API	Application Programming Interface
BGC	Brushless Gimbal Controller
BLDC	Brushless Direct Current
CAD	Computer-Aided Design
CMD	Command
CRC	Cyclic Redundancy Check
DTR	Data Terminal Ready
EMF	Electromotive Force
FOC	Field Oriented Control
GND	Ground
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HQ	High Quality
HIL	Hardware-in-the-Loop
IMU	Inertial Measurement Unit
IP	Ingress Protection
ISE	Integral of Squared Error
Kp, Ki, Kd	PID Controller Gains (Proportional, Integral, Derivative)
MAVLink	Micro Air Vehicle Link
MPC	Model Predictive Control
PCB	Printed Circuit Board
PID	Proportional-Integral-Derivative
PPM	Pulse Position Modulation
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
PDB	Power Distribution Board
PWM	Pulse Width Modulation

RPi / RPi5	Raspberry Pi / Raspberry Pi 5
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
STL	Stereolithography (3D file format)
SVM	Space Vector Modulation
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
YOLO	You Only Look Once (object detection algorithm)

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό και κίνητρα

Ο πολλαπλασιασμός των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV), κοινώς γνωστών ως drones, έχει φέρει επανάσταση σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της αεροφωτογραφίας, της επιτήρησης, της γεωργίας και της επιθεώρησης υποδομών[1]. Ένα κρίσιμο στοιχείο που ενισχύει τη λειτουργικότητα των drones σε αυτές τις εφαρμογές είναι το σύστημα αντίζυγου. Τα αντίζυγα είναι ζωτικής σημασίας για τη σταθεροποίηση των καμερών, διασφαλίζοντας ότι οι εικόνες και τα βίντεο που τραβήχτηκαν είναι καθαρά και απαλλαγμένα από θολώματα που προκαλούνται από κίνηση, ακόμη και όταν το drone βρίσκεται σε κίνηση ή υπόκειται σε εξωτερικές διαταραχές όπως ο άνεμος. [2][3]

Τα παραδοσιακά συστήματα αντίζυγου έχουν εξελιχθεί από απλές μηχανικές ρυθμίσεις σε εξελιγμένα ηλεκτρονικά συστήματα που ενσωματώνουν προηγμένους αισθητήρες και αλγόριθμους ελέγχου. Η ενσωμάτωση των βρόχων ελέγχου ανάδρασης, ιδιαίτερα των ελεγκτών αναλογικού ολοκληρωμένου παραγώγου (PID), έχει βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των αντίζυγων παρέχοντας προσαρμογές σε πραγματικό χρόνο για την αντιμετώπιση τυχόν ανεπιθύμητων κινήσεων[6].

Το κίνητρο πίσω από αυτό το έργο πηγάζει από την ανάγκη ανάπτυξης ενός οικονομικά αποδοτικού, αποτελεσματικού και προσαρμόσιμου συστήματος αντίζυγου 3 αξόνων που μπορεί να ενσωματωθεί σε drones για διάφορες εφαρμογές. Αξιοποιώντας σύγχρονες τεχνολογίες όπως η εκτύπωση 3D για προσαρμοσμένα εξαρτήματα, υλικό ανοιχτού κώδικα όπως ο ελεγκτής Storm32 και ισχυρές υπολογιστικές πλατφόρμες όπως το Raspberry Pi 5, το έργο αυτό στοχεύει στο σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός συστήματος αντίζυγου που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις σταθερότητας, απόκρισης και προσαρμοστικότητας [9][20].

1.2 Δήλωση προβλήματος

Παρά τη διαθεσιμότητα εμπορικών συστημάτων αντίζυγου, συχνά έρχονται με περιορισμούς όπως υψηλό κόστος, έλλειψη προσαρμογής [2] και ιδιότητα εξαρτήματα που περιορίζουν τις τροποποιήσεις [22]. Αυτοί οι περιορισμοί θέτουν προκλήσεις για τους ερευνητές [23], τους χομπίστες και τους επαγγελματίες που απαιτούν προσαρμοσμένες λύσεις για συγκεκριμένες εφαρμογές.



Εικόνα 1 Επαγγελματικά drone Gimbals [29][30]

Το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός συστήματος αντίζυγου 3 αξόνων που:

- Παρέχει σταθερή και ομαλή κίνηση της κάμερας για την αντιμετώπιση της κίνησης του drone.
- Ενσωματώνει βρόχο ελέγχου ανάδρασης για προσαρμογές σε πραγματικό χρόνο.
- Χρησιμοποιεί άμεσα διαθέσιμα και οικονομικά αποδοτικά εξαρτήματα [9].
- Επιτρέπει την προσαρμογή και την επεκτασιμότητα ώστε να ταιριάζουν σε διάφορες εφαρμογές [12].

1.3 Στόχοι

Οι κύριοι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:

- **Σχεδιασμός και κατασκευή:** Ο σχεδιασμός μια δομής αντίζυγου 3 αξόνων χρησιμοποιώντας λογισμικό CAD (π.χ. SolidWorks) και η κατασκευή εξαρτημάτων χρησιμοποιώντας τεχνολογία εκτύπωσης 3D με νήμα ABS +.
- **Ενσωμάτωση υλικού:** Η ενσωμάτωση των κινητήρων αντίζυγου iPower GM6208-150T με τον ελεγκτή Storm32 v1.32 και η σύνδεση με το σύστημα σε ένα Raspberry Pi 5, το οποίο χρησιμεύει ως κύρια μονάδα επεξεργασίας.
- **Ενσωμάτωση κάμερας:** Η ενσωμάτωση με τη μονάδα κάμερας Raspberry Pi (IMX477) στο σύστημα αντίζυγου, εξασφαλίζοντας ασφαλή τοποθέτηση και βέλτιστη λειτουργικότητα.
- **Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου:** Η ανάπτυξη ενός σεναρίου βασισμένου σε Python που διευκολύνει τη σειριακή επικοινωνία μεταξύ του Raspberry Pi και του ελεγκτή Storm32, επιτρέποντας τον έλεγχο του προσανατολισμού του gimbal σε πραγματικό χρόνο.
- **Εφαρμογή ελέγχου ανάδρασης:** Η εφαρμογή ενός βρόχου ελέγχου ανάδρασης, συγκεκριμένα ενός ελεγκτή PID, για τη διατήρηση του επιθυμητού προσανατολισμού της κάμερας προσαρμόζοντας τη θέση του gimbal ως απόκριση σε εξωτερικές διαταραχές.
- **Δοκιμή και αξιολόγηση:** Διεξαγωγή ολοκληρωμένων δοκιμών της απόδοσης του συστήματος gimbal σε διάφορα σενάρια και αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς του στη σταθεροποίηση της κάμερας κατά τη λειτουργία του drone.

1.4 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τις ακόλουθες πτυχές:

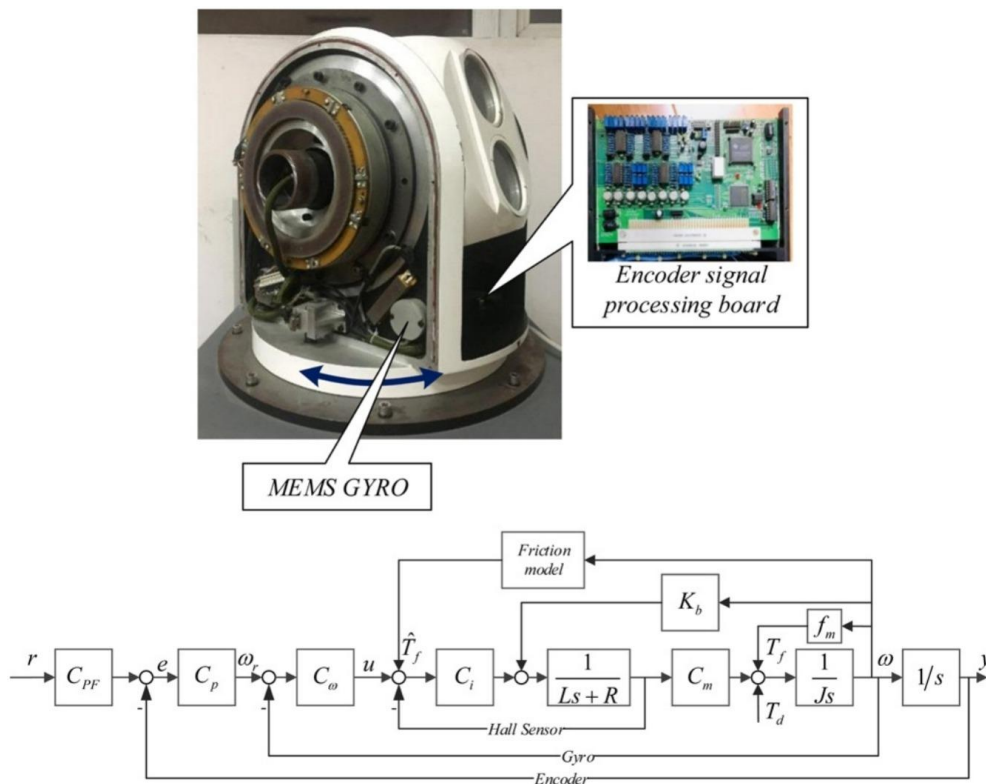
- **Μηχανολογικός σχεδιασμός:** Λεπτομερής σχεδιασμός της δομής του αντίζυγου, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής των κατάλληλων υλικών και μεθόδων κατασκευής.
- **Ηλεκτρική ολοκλήρωση:** Επιλογή και ενσωμάτωση κινητήρων, ελεγκτών και αισθητήρων που είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία του gimbal.
- **Ανάπτυξη λογισμικού:** Προγραμματισμός των αλγορίθμων ελέγχου και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που απαιτούνται για τη λειτουργικότητα του gimbal.
- **Ολοκλήρωση συστήματος:** Συναρμολόγηση των μηχανικών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων σε ένα συνεκτικό σύστημα.
- **Αξιολόγηση απόδοσης:** Δοκιμή του συστήματος αντίζυγου υπό διάφορες συνθήκες για την αξιολόγηση της σταθερότητας, της ανταπόκρισης και της συνολικής απόδοσής του.

Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Η ταχεία πρόοδος των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) έχει φέρει επανάσταση σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της αεροφωτογραφίας, της επιτήρησης, της γεωργίας και των υπηρεσιών επιθεώρησης. Ένα κρίσιμο στοιχείο που ενισχύει τη λειτουργικότητα των drones σε αυτές τις εφαρμογές είναι το σύστημα αντίζυγου. Τα αντίζυγα είναι ζωτικής σημασίας για τη σταθεροποίηση των καμερών, διασφαλίζοντας ότι οι εικόνες και τα βίντεο που τραβήχτηκαν είναι καθαρά και απαλλαγμένα από θολώματα που προκαλούνται από κίνηση, ακόμη και όταν το drone βρίσκεται σε κίνηση ή υπόκειται σε εξωτερικές διαταραχές όπως ο άνεμος.[6]

Τα παραδοσιακά συστήματα αντίζυγου έχουν εξελιχθεί από απλές μηχανικές ρυθμίσεις σε εξελιγμένα ηλεκτρονικά συστήματα που ενσωματώνουν προηγμένους αισθητήρες και αλγόριθμους ελέγχου. Η ενσωμάτωση των βρόχων ελέγχου ανάδρασης, ιδιαίτερα των ελεγκτών αναλογικού ολοκληρωμένου παραγωγού (PID), έχει βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των αντίζυγων παρέχοντας προσαρμογές σε πραγματικό χρόνο για την αντιμετώπιση τυχόν ανεπιθύμητων κινήσεων. [1][8][14]

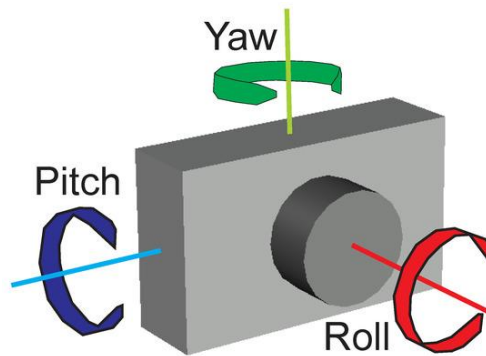


Εικόνα 2 Έρευνα για Gimbal PID [31]

2.2 Gimbal Συστήματα σε UAVs

2.2.1 Εξέλιξη και σημασία

Τα αντίζυγα έχουν εξελιχθεί από απλές μηχανικές συσκευές σε εξελιγμένα ηλεκτρονικά συστήματα. Η κύρια λειτουργία τους είναι να σταθεροποιούν τις κάμερες, εξασφαλίζοντας καθαρές και σταθερές εικόνες. Στις εφαρμογές drone, τα gimbals εξουδετερώνουν τις κινήσεις pitch, roll και yaw του drone, παρέχοντας μια σταθερή πλατφόρμα για κάμερες [22]. Η ενσωμάτωση κινητήρων χωρίς ψήκτρες και προηγμένων αισθητήρων έχει βελτιώσει την απόκριση και την ακρίβεια των σύγχρονων gimbals [1].



Εικόνα 3 Roll, Pitch, και Yaw γωνίες στην κάμερα [32]

Η σημασία των συστημάτων gimbal στα UAVs δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί. Διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο σε διάφορες εφαρμογές:

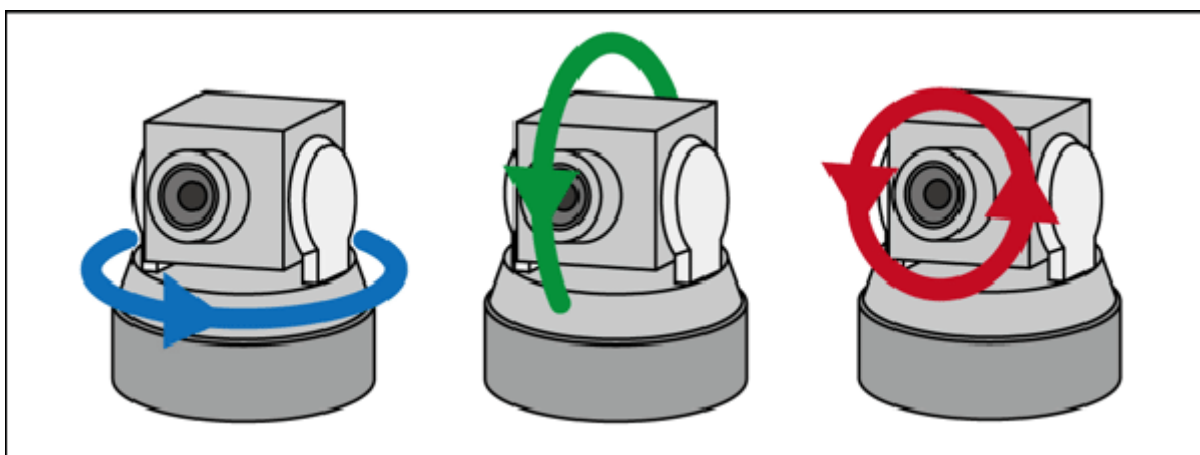
- **Αεροφωτογράφιση και βιντεοσκόπηση:** Τα αντίζυγα διασφαλίζουν ότι οι κάμερες καταγράφουν ομαλά και σταθερά πλάνα, ακόμη και κατά τη διάρκεια δυναμικών κινήσεων drone.
- **Επιτήρηση και ασφάλεια:** Η σταθερή απεικόνιση είναι ζωτικής σημασίας για αποστολές παρακολούθησης και αναγνώρισης.
- **Γεωργική παρακολούθηση:** Οι εικόνες υψηλής ποιότητας είναι απαραίτητες για την ανάλυση των καλλιεργειών και την αξιολόγηση της υγείας [3].
- **Επιθεώρηση υποδομής:** Απαιτούνται σαφείς απεικονίσεις για την επιθεώρηση δομών όπως γέφυρες, ηλεκτροφόρα καλώδια και αγωγοί.[2][3]

2.2.2 Τύποι Gimbal

Στον τομέα της εναέριας απεικόνισης και επιτήρησης, τα συστήματα αντίζυγου διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στη διασφάλιση της σταθερότητας και της σαφήνειας του καταγεγραμμένου υλικού [22]. Αυτά τα μηχανικά συγκροτήματα, σχεδιασμένα για την εξουδετέρωση ανεπιθύμητων κινήσεων, κατηγοριοποιούνται με βάση τον αριθμό των αξόνων που σταθεροποιούν: κυρίως διαμορφώσεις 2 αξόνων και 3 αξόνων.

- Τα αντίζυγα 2 αξόνων παρέχουν σταθεροποίηση κατά μήκος των αξόνων κλίσης και κύλισης [pitch & roll]. Συχνά ευνοούνται σε εφαρμογές όπου το βάρος και η κατανάλωση ενέργειας είναι κρίσιμοι περιορισμοί, όπως σε μικρά drones ή αεροσκάφη σταθερών πτερύγων [23]. Η μειωμένη πολυπλοκότητα αυτών των συστημάτων μεταφράζεται σε μικρότερο βάρος και χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις. Ωστόσο, η απουσία σταθεροποίηση περιστροφής ή μετατόπισης, σημαίνει ότι οι οριζόντιες κινήσεις μπορούν να εισαγάγουν ανεπιθύμητη κίνηση στο βίντεο, θέτοντας ενδεχομένως σε κίνδυνο την ποιότητα της εικόνας σε δυναμικά περιβάλλοντα.
- Επεκτείνοντας τις δυνατότητες των αντίστοιχων 2 αξόνων, τα αντίζυγα 3 αξόνων ενσωματώνουν σταθεροποίηση περιστροφής, παρέχοντας ολοκληρωμένη αντιστάθμιση κίνησης και στους τρεις χωρικούς άξονες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ομαλότερα και πιο σταθερά πλάνα, ιδιαίτερα επωφελή σε σενάρια που περιλαμβάνουν πολύπλοκους ελιγμούς ή ταραχώδεις συνθήκες. Το αντιστάθμισμα, ωστόσο, έγκειται στο αυξημένο βάρος, την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος, παράγοντες που πρέπει να εξισορροπηθούν έναντι των επιθυμητών αποτελεσμάτων απόδοσης.
- Τα αντίζυγα Pan-tilt, ένα υποσύνολο συστημάτων 2 αξόνων, απευθύνονται ειδικά στους άξονες περιστροφή (pan) και κλίση (pitch). Αυτές οι διαμορφώσεις είναι διαδεδομένες σε εφαρμογές επιτήρησης και επιθεώρησης, όπου η δυνατότητα να κατευθύνει την κάμερα οριζόντια και κάθετα είναι υψίστης σημασίας. Παρόλο που μπορεί να μην διαθέτουν σταθεροποίηση κύλισης, η απλότητα σχεδιασμού και ο κατευθυντικός έλεγχος τα καθιστούν κατάλληλα για εργασίες που απαιτούν ακριβή προσανατολισμό της κάμερας χωρίς την ανάγκη πλήρους σταθεροποίησης 3 αξόνων [2].

Όσο αφορά τα ζητήματα εφαρμογής, η επιλογή μεταξύ αντίζυγων 2 αξόνων, 3 αξόνων και κλίσης επηρεάζεται από τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής. Τα drones πολλαπλών ρότορων, που χρησιμοποιούνται συχνά στην κινηματογραφία και την τοπογραφία, επωφελούνται από αντίζυγα 3 αξόνων για να επιτύχουν υψηλής ποιότητας, σταθερές εικόνες. Αντίθετα, τα αεροσκάφη σταθερών πτερύγων, τα οποία συνήθως λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες και υψόμετρα, μπορούν να επιλέξουν αντίζυγα 2 αξόνων ή pan-tilt (PTZ) για εξοικονόμηση βάρους και ισχύος, αποδεχόμενα κάποιο συμβιβασμό στη σταθεροποίηση για εκτεταμένη αντοχή πτήσης.



Εικόνα 4 Pan Tilt Roll [33]

Η επιλογή μεταξύ αντίζυγων 2 αξόνων και 3 αξόνων εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και το επίπεδο σταθεροποίησης που απαιτείται.

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη των αντίζυγων 3 αξόνων έχει αποκτήσει εξέχουσα θέση λόγω της ικανότητάς τους να παρέχουν ανώτερη σταθεροποίηση. Αυτά τα συστήματα είναι ιδιαίτερα επωφελή σε εφαρμογές που απαιτούν απεικόνιση υψηλής ακρίβειας, όπως η επαγγελματική κινηματογράφηση και οι λεπτομερείς έλεγχοι [3].

2.3 Μηχανισμοί ελέγχου ανατροφοδότησης (Feedback control)

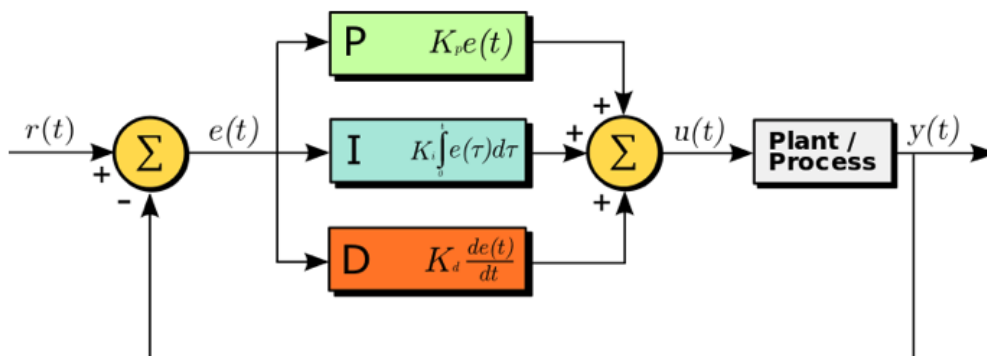
2.3.1 Επισκόπηση

Τα συστήματα ελέγχου ανάδρασης αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της διατήρησης της επιθυμητής απόδοσης των δυναμικών συστημάτων. Στο πλαίσιο των αντίζυγων, ο έλεγχος ανάδρασης διασφαλίζει ότι η κάμερα παραμένει σταθερή παρά τις εξωτερικές διαταραχές. Ο πιο διαδεδομένος μηχανισμός ελέγχου ανάδρασης που χρησιμοποιείται στα αντίζυγα είναι ο ελεγκτής αναλογικός-ολοκληρωτικός-παράγωγος (PID).

Ένας ελεγκτής PID υπολογίζει συνεχώς μια τιμή σφάλματος ως τη διαφορά μεταξύ ενός επιθυμητού σημείου ρύθμισης και μιας μετρούμενης μεταβλητής διεργασίας. Εφαρμόζει μια διόρθωση που βασίζεται σε αναλογικούς, ακέραιους και παράγωγους όρους[5]:

- **Αναλογικός (P - Proportional):** Ανταποκρίνεται αναλογικά στο τρέχον σφάλμα.
- **Ολοκληρωτικός (I - Integral):** Υπολογίζει τα σφάλματα του παρελθόντος, με στόχο την εξάλειψη των υπολειπόμενων σφαλμάτων σταθερής κατάστασης.
- **Παράγωγος (D - Derivative):** Προβλέπει μελλοντικά σφάλματα με βάση το ρυθμό μεταβολής, ενισχύοντας τη σταθερότητα του συστήματος.

Η συνδυασμένη δράση αυτών των τριών όρων επιτρέπει στον ελεγκτή PID να παρέχει ακριβή και σταθερό έλεγχο.[5]



Εικόνα 5 PID σύστημα [40]

2.3.2 Μαθηματική Αναπαράσταση

Ο νόμος ελέγχου PID μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Μαθηματική εξίσωση 1

Όπου:

- $u(t)$ είναι η έξοδος ελέγχου.
- $e(t)$ είναι το σφάλμα μεταξύ του σημείου ρύθμισης και της μεταβλητής διαδικασίας.
- K_p, K_i , και είναι τα αναλογικά, ολοκληρωμένα και παράγωγα κέρδη, αντίστοιχα. K_d

Αυτή η εξίσωση αποτελεί τη βάση για την υλοποίηση ελεγκτών PID σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της σταθεροποίησης αντίζυγου[8].

2.3.3 Ρύθμιση ελεγκτών PID

Ο συντονισμός των ελεγκτών PID διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην επίτευξη σταθερού και αποτελεσματικού ελέγχου σε δυναμικά συστήματα, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν ρύθμιση κίνησης, σταθεροποίησης και ανάδρασης, όπως τα αντίζυγα[6]. Χωρίς σωστό συντονισμό, ακόμη και τα πιο προηγμένα συστήματα ελέγχου μπορεί να υποφέρουν από υπέρβαση, ταλαντώσεις, αργή συμπεριφορά ή αστάθεια, τα οποία θέτουν σε κίνδυνο την απόδοση του συστήματος[7].

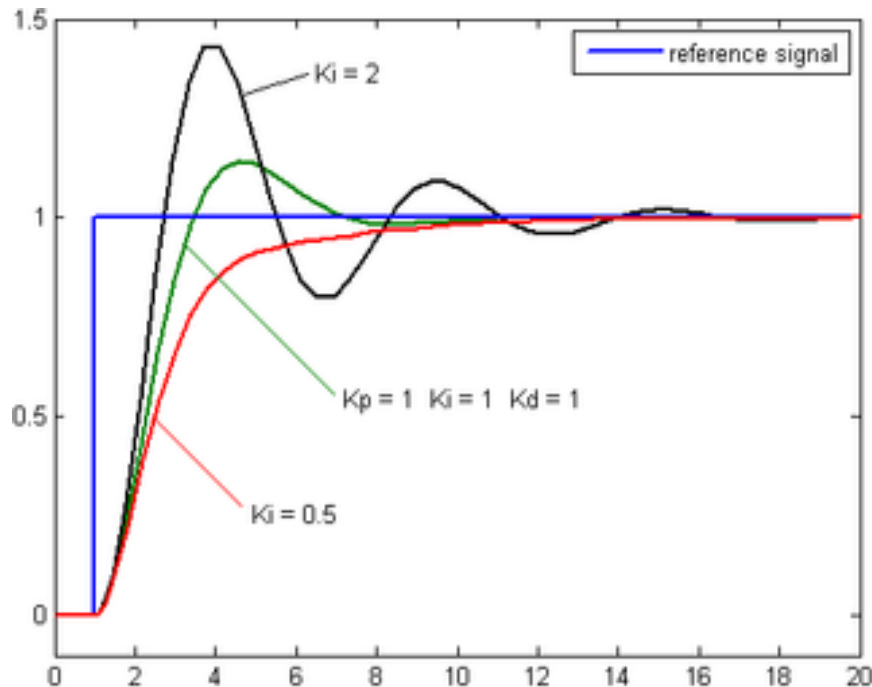
Μεταξύ των πιο γνωστών και ιστορικά σημαντικών προσεγγίσεων συντονισμού είναι η μέθοδος Ziegler-Nichols, η οποία χρησιμεύει ως θεμελιώδης τεχνική στην κλασική μηχανική ελέγχου. Αυτή η εμπειρική μέθοδος ξεκινά ρυθμίζοντας τα κέρδη ολοκληρώματος (K_i) και παραγώγου (K_d) στο μηδέν, αυξάνοντας στη συνέχεια σταδιακά το αναλογικό κέρδος (K_p) έως ότου η έξοδος του συστήματος αρχίσει να ταλαντώνεται με σταθερό πλάτος. Η τιμή του K_p στην οποία συμβαίνει αυτό είναι γνωστή ως το τελικό κέρδος και η περίοδος ταλάντωσης σε αυτό το σημείο είναι η τελική περίοδος [66]. Αυτές οι δύο τιμές χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των K_i και K_d σύμφωνα με προκαθορισμένους τύπους, ανάλογα με το αν το σύστημα δίνει προτεραιότητα στην απόρριψη διαταραχής, στην παρακολούθηση σημείου ρύθμισης ή στην ισορροπία και των δύο.

Παρά την απλότητα και την ευκολία εφαρμογής του, το Ziegler-Nichols δεν είναι χωρίς περιορισμούς. Η μέθοδος συχνά οδηγεί σε επιθετικό συντονισμό, ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή υπέρβαση και παρατεταμένο χρόνο καθίζησης - χαρακτηριστικά που είναι ανεπιθύμητα σε ευαίσθητα στην ακρίβεια συστήματα όπως τα αντίζυγα κάμερας [24]. Για το λόγο αυτό, έχουν προκύψει εναλλακτικές μέθοδοι, παρέχοντας πιο λεπτές και προσαρμοστικές προσεγγίσεις[31].

Μια τέτοια εναλλακτική λύση είναι η μέθοδος Cohen-Coon, ιδιαίτερα αποτελεσματική για συστήματα πρώτης τάξης με νεκρό χρόνο. Προσφέρει καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ γρήγορης απόκρισης και ελάχιστης υπέρβασης, αν και βασίζεται επίσης στην ακριβή μοντελοποίηση της απόκρισης βημάτων του συστήματος[66].

Πέρα από τις κλασικές τεχνικές, η δοκιμή και το λάθος (trial and error)[48] παραμένει μια ευρέως χρησιμοποιούμενη στρατηγική συντονισμού, ειδικά σε πειραματικά περιβάλλοντα όπου είναι δυνατές

γρήγορες επαναλήψεις. Αυτή η πρακτική προσέγγιση, αν και χρονοβόρα, μπορεί να αποφέρει εξαιρετικά αποτελέσματα όταν καθοδηγείται από τη διαίσθηση και την ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο από το σύστημα.



Εικόνα 6 Απόκριση σήματος σύμφωνα με το σήμα αναφοράς [40]

Τα τελευταία χρόνια, ο τομέας έχει δει την υιοθέτηση πιο εξελιγμένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, ειδικά σε συστήματα όπου η αναλυτική μοντελοποίηση είναι πολύπλοκη ή ανέφικτη [13]. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO – Particle Swarm Optimization), όπου ένας πληθυσμός υποψήφιων λύσεων συγκλίνει επαναλαμβανόμενα προς τις βέλτιστες τιμές PID μιμούμενος την κοινωνική συμπεριφορά των οργανισμών σμήνους. Ομοίως, οι γενετικοί αλγόριθμοι (GAs – Genetic Algorithms) [24] προσομοιώνουν εξελικτικές διαδικασίες για τον εντοπισμό παραμέτρων ελεγκτή που ελαχιστοποιούν τις μετρήσεις σφάλματος, όπως το Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) ή το Integral of Squared Error (ISE).

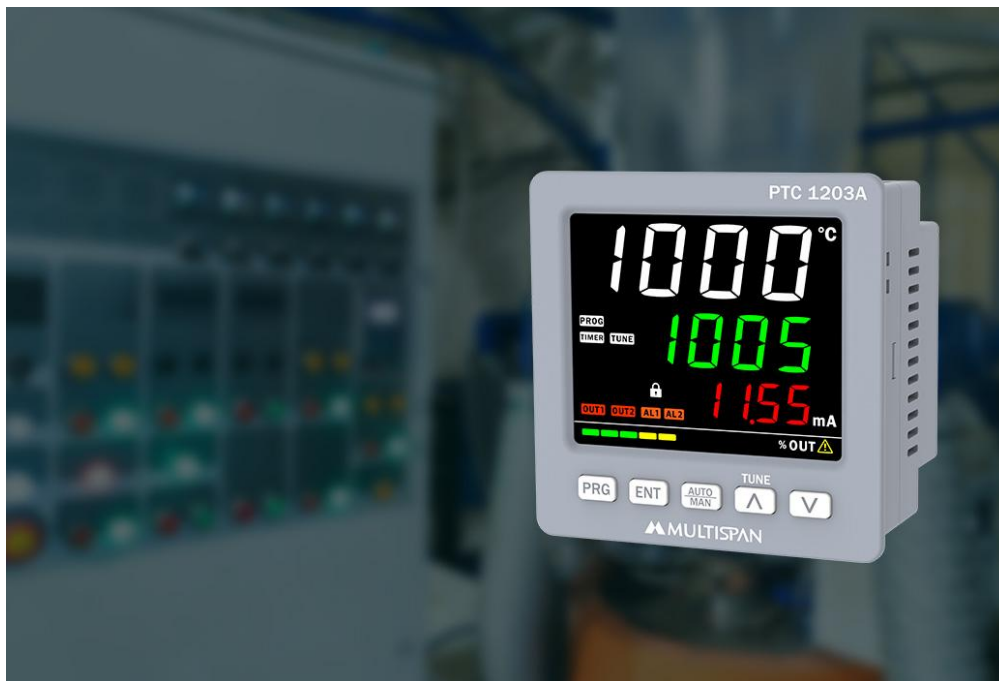
Εκτός από αυτά, τα εργαλεία συντονισμού με τη βοήθεια λογισμικού - συχνά ενσωματωμένα σε περιβάλλοντα ανάπτυξης μικροελεγκτών ή επεξεργαστές ψηφιακού σήματος [36] (DSP) - μπορούν να προσομοιώσουν διάφορα σενάρια συντονισμού, επιτρέποντας στους μηχανικούς να απεικονίσουν τη συμπεριφορά του συστήματος υπό διαφορετικές ρυθμίσεις ελεγκτή. Αυτά τα εργαλεία είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε ενσωματωμένα συστήματα όπως τα αντίζυγα drone, όπου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο αντίκτυπος της καθυστέρησης, του θορύβου του αισθητήρα και των φυσικών διαταραχών κατά τη διάρκεια του συντονισμού.

Επιπλέον, οι προσαρμοστικοί και αυτορυθμιζόμενοι ελεγκτές PID [14] κερδίζουν δημοτικότητα στις σύγχρονες αρχιτεκτονικές ελέγχου. Αυτά τα συστήματα μπορούν να προσαρμόσουν δυναμικά τις τιμές κέρδους τους ανταποκρινόμενα στη μεταβαλλόμενη δυναμική του συστήματος ή στις περιβαλλοντικές συνθήκες [15]. Στα αντίζυγα, για παράδειγμα, ένα αυτορυθμιζόμενο PID θα μπορούσε να προσαρμοστεί

σε διακυμάνσεις ωφέλιμου φορτίου (π.χ. εναλλαγή μεταξύ φακών με διαφορετικά βάρη) ή εξωτερικές δυνάμεις όπως ριπές ανέμου κατά τη διάρκεια της πτήσης.

Η ευρεία υιοθέτηση των ελεγκτών PID σε αμέτρητους τομείς αποτελεί απόδειξη της αξιοπιστίας, της απλότητας και της αποτελεσματικότητάς τους. Η ευελιξία τους τους καθιστά έναν από τους πιο συχνά εφαρμοζόμενους μηχανισμούς ελέγχου [48] τόσο σε βιομηχανικά όσο και σε ενσωματωμένα συστήματα, συμπεριλαμβανομένης της ρομποτικής, του αυτοματισμού, της αεροδιαστημικής και των οργάνων ακριβείας.

Ένας από τους σημαντικότερους τομείς όπου ο έλεγχος PID χρησιμοποιείται εκτενώς είναι ο βιομηχανικός αυτοματισμός. Στις διαδικασίες παραγωγής - όπως η ρύθμιση της θερμοκρασίας στους κλιβάνους, ο έλεγχος πίεσης στους αγωγούς ή ο έλεγχος στάθμης στις δεξαμενές - οι ελεγκτές PID παρέχουν μια αξιόπιστη λύση για τη διατήρηση συνθηκών σταθερής κατάστασης και την αποτελεσματική ανταπόκριση σε διαταραχές. Αυτά τα περιβάλλοντα συχνά περιλαμβάνουν συστήματα με σχετικά αργή δυναμική και σαφώς μετρήσιμα αποτελέσματα, καθιστώντας τα ιδανικά για παραδοσιακές προσεγγίσεις PID.



Εικόνα 7 PID σε βιομηχανικό εξοπλισμό [48]

Στον τομέα του ελέγχου κινητήρων, ο οποίος είναι ιδιαίτερα σχετικός με την παρούσα διατριβή, οι ελεγκτές PID αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της διαχείρισης της θέσης, της ταχύτητας και της ροπής[41] των κινητήρων DC, των κινητήρων BLDC [34] και των PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motors). [15] Ρυθμίζοντας συνεχώς τις εισόδους τάσης με βάση την ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο, οι αλγόριθμοι PID διασφαλίζουν ότι οι κινητήρες ανταποκρίνονται με ακρίβεια στις εισόδους εντολών - είτε αυτό σημαίνει τη διατήρηση του προσανατολισμού μιας κάμερας αντίζυγου [52][53] είτε την οδήγηση ενός ρομποτικού βραχίονα σε γωνία στόχου με ελάχιστη υπέρβαση.

Μια άλλη κρίσιμη εφαρμογή έγκειται στη ρομποτική και τον έλεγχο των drones[6], όπου η ισορροπία, η κατεύθυνση, το υψόμετρο και η ταχύτητα πρέπει να ελέγχονται ταυτόχρονα. Στα drones, για

παράδειγμα, κάθε άξονας περιστροφής (pitch, roll, yaw) διέπεται συνήθως από τον δικό του αποκλειστικό βρόχο PID, που εργάζεται συντονισμένα για τη σταθεροποίηση του οχήματος. Ομοίως, οι ρομποτικοί χειριστές βασίζονται σε διαδοχικούς βρόχους PID για παρακολούθηση κοινής θέσης και τροχιάς[7].



Εικόνα 8 Ρομποτικός βραχίονας [47]

Τα συστήματα αυτοκινήτων ενσωματώνουν επίσης τον έλεγχο PID σε πολλαπλά υποσυστήματα. Το cruise control είναι ένα κλασικό παράδειγμα, όπου το χειριστήριο προσαρμόζει την είσοδο του γκαζιού για να διατηρήσει την ταχύτητα του οχήματος ανεξάρτητα από την κλίση του δρόμου ή τις αλλαγές φορτίου. Σε πιο προηγμένα πλαίσια, το PID εμπλέκεται στον έλεγχο διεύθυνσης[13], στα συστήματα πέδησης (όπως το ABS), ακόμη και στη διαχείριση του κινητήρα.

Σε **μηχανικά συστήματα (mechatronic systems)** όπως τα αντίζυγα [53], ο έλεγχος PID παρέχει σταθεροποίηση σε πραγματικό χρόνο [24] συγκρίνοντας τον επιθυμητό προσανατολισμό της κάμερας με την πραγματική ανάδραση από αδρανειακούς αισθητήρες (IMU) και, στη συνέχεια, εκδίδοντας διορθωτικές εντολές κινητήρα. Αυτό επιτρέπει σταθερά πλάνα χωρίς κραδασμούς[31], ακόμα και όταν τοποθετούνται σε κινούμενες πλατφόρμες, όπως drones ή οχήματα[15].

Στον τομέα του ελέγχου διεργασιών και των συστημάτων HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), οι ελεγκτές PID χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση μεταβλητών όπως η θερμοκρασία, ο ρυθμός ροής και η υγρασία εντός των επιθυμητών ορίων. Αυτά είναι συχνά συστήματα αργής

απόκρισης όπου η ενοποιητική συνιστώσα του PID παίζει κρίσιμο ρόλο στην εξάλειψη σφαλμάτων σταθερής κατάστασης.

Επιπλέον, οι ελεγκτές PID είναι θεμελιώδεις στα επιστημονικά όργανα και τις ιατρικές συσκευές [52]. Σε εργαστηριακό εξοπλισμό όπως φυγοκεντρητές, θερμοκοιτίδες, ακόμη και πλατφόρμες μαγνητικής αιώρησης, η διατήρηση του ελέγχου ακριβείας της κίνησης ή των περιβαλλοντικών μεταβλητών είναι ζωτικής σημασίας. Στους ιατρικούς αναπνευστήρες, για παράδειγμα, οι αλγόριθμοι PID βοηθούν στον έλεγχο της πίεσης και του όγκου της ροής του αέρα για να εξασφαλίσουν ασφαλή και συνεπή υποστήριξη της αναπνοής.

Η δύναμη του PID δεν έγκειται μόνο στο μαθηματικό του πλαίσιο, αλλά σε αυτό που επιτρέπει: την ικανότητα να λαμβάνει ανατροφοδότηση από τον πραγματικό κόσμο από θορυβώδεις, ατελείς αισθητήρες και να τη μετατρέπει σε ακριβή, σταθερή και προσαρμοστική ενεργοποίηση. Όταν ρυθμίζονται κατάλληλα, οι ελεγκτές PID είναι ικανοί να ελαχιστοποιούν τα σφάλματα, να αντισταθμίζουν τις διαταραχές και να αντιδρούν ομαλά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες χωρίς την ανάγκη σύνθετης μοντελοποίησης της δυναμικής του συστήματος[7].

Συνοπτικά, ο συντονισμός PID είναι τόσο τέχνη όσο και επιστήμη. Ενώ μέθοδοι όπως οι Ziegler-Nichols και Cohen-Coon παρέχουν ένα καλό σημείο εκκίνησης, τα συστήματα υψηλής απόδοσης βασίζονται όλο και περισσότερο σε προηγμένες, συχνά αλγοριθμικές προσεγγίσεις για να εξασφαλίσουν τον βέλτιστο συντονισμό[66]. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις απαιτήσεις της εφαρμογής, τη φύση του ελεγχόμενου συστήματος και τους αποδεκτούς συμβιβασμούς μεταξύ πολυπλοκότητας, ταχύτητας απόκρισης και ευρωστίας. Οι ελεγκτές PID παραμένουν η ραχοκοκαλιά των σύγχρονων συστημάτων ελέγχου λόγω της ισορροπίας απλότητας και στιβαρότητάς τους. Οι εφαρμογές τους εκτείνονται από τη βαριά βιομηχανία έως τις συσκευές υψηλής ακρίβειας, από την αυτόνομη ρομποτική έως τα αεροσκάφη. Καθώς οι προκλήσεις ελέγχου γίνονται πιο περίπλοκες, το PID συνεχίζει να χρησιμεύει τόσο ως πρακτική λύση όσο και ως θεμέλιο πάνω στο οποίο μπορούν να οικοδομηθούν πιο προηγμένες στρατηγικές ελέγχου [14].

2.4 Ενσωμάτωση Gimbals και ελέγχου ανατροφοδότησης σε drones

Η ενσωμάτωση των gimbals με συστήματα ελέγχου ανάδρασης στα drones έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες εναέριας απεικόνισης. Αντισταθμίζοντας τις κινήσεις των drones, αυτά τα συστήματα διασφαλίζουν ότι οι κάμερες καταγράφουν σταθερές και καθαρές εικόνες. Η χρήση προηγμένων ελεγκτών, όπως το Storm32, επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των κινήσεων του αντίζυγου, βελτιώνοντας περαιτέρω τη σταθεροποίηση[4][9].

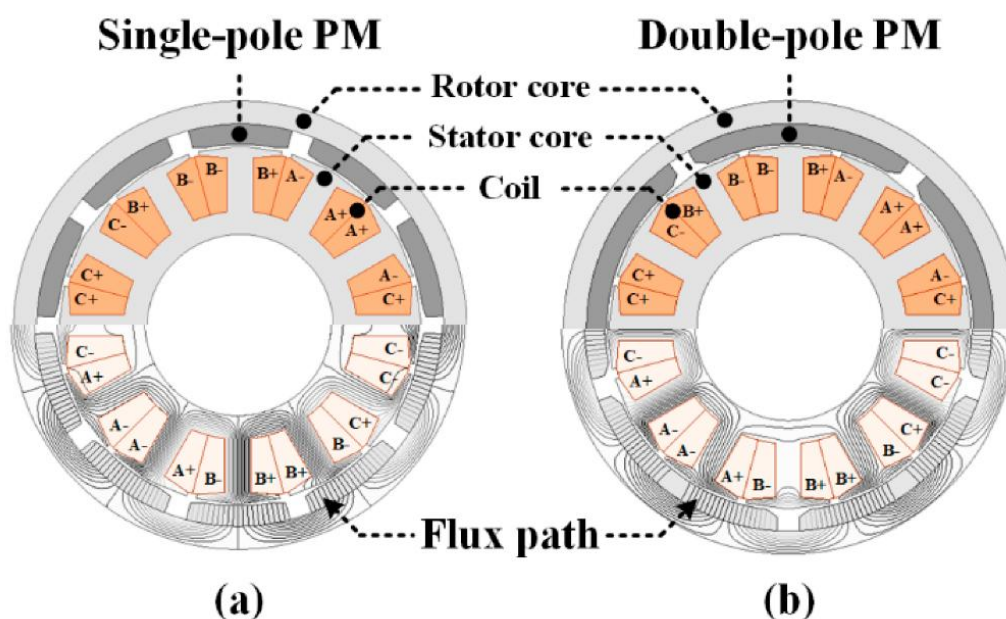
Ο ελεγκτής Storm32, για παράδειγμα, είναι ένας ελεγκτής αντίζυγου 32-bit που υποστηρίζει σταθεροποίηση 3 αξόνων. Προσφέρει λειτουργίες όπως έλεγχο σε πραγματικό χρόνο [19], υποστήριξη για διάφορους αισθητήρες και συμβατότητα με διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Το λογισμικό του ελεγκτή επιτρέπει την προσαρμογή και την ενσωμάτωση με διάφορες πλατφόρμες, καθιστώντας το μια δημοφιλή επιλογή τόσο μεταξύ χομπίστες όσο και μεταξύ επαγγελματιών.

Η ενσωμάτωση μηχανισμών ελέγχου ανάδρασης, όπως ελεγκτές PID, σε συστήματα αντίζυγου έχει οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση σε διάφορες εφαρμογές drone [24]. Για παράδειγμα, στην αεροφωτογραφία, ο συνδυασμός ενός αντίζυγου 3 αξόνων και ενός καλά ρυθμισμένου ελεγκτή PID[12] διασφαλίζει ότι η κάμερα παραμένει σταθερή [53], με αποτέλεσμα εικόνες και βίντεο υψηλής

ποιότητας. Ομοίως, στις εφαρμογές επιτήρησης, η σταθερή απεικόνιση είναι ζωτικής σημασίας για την ακριβή παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων[4].

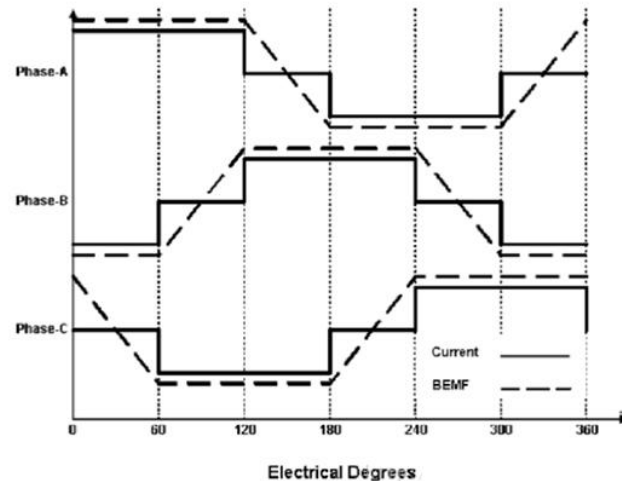
2.5 Λειτουργία των Gimbal Motors

Ο κινητήρας αντίζυγου GM6208-150T αποτελεί παράδειγμα της εφαρμογής κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLDC) σε συστήματα σταθεροποίησης ακριβείας. Χαρακτηρίζεται από τις 24 υποδοχές στάτορα και τους 28 πόλους ρότορα, αυτή η διαμόρφωση κινητήρα έχει βελτιστοποιηθεί για να ελαχιστοποιεί τη ροπή απόφραξης (cogging torque), εξασφαλίζοντας έτσι ομαλή περιστροφική κίνηση απαραίτητη για εφαρμογές απεικόνισης υψηλής ποιότητας [10][18][41].



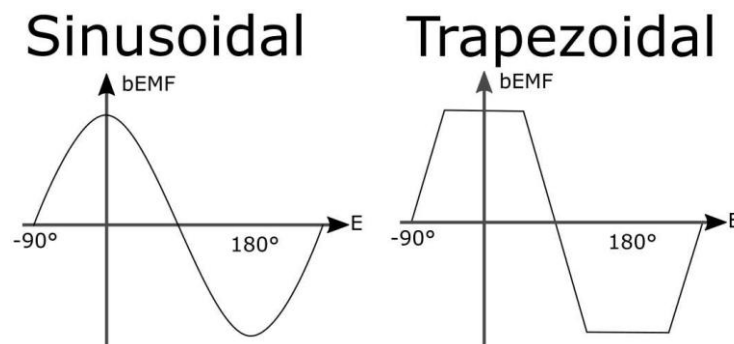
Εικόνα 9 Εξήγηση βασικών χαρακτηριστικών BLDC [41]

Οι κινητήρες BLDC, όπως ο GM6208-150T, λειτουργούν χωρίς τις παραδοσιακές βούρτσες (brushes) [34] και συλλέκτες που βρίσκονται στους συμβατικούς κινητήρες DC. Αντ' αυτού, χρησιμοποιούν ηλεκτρονικούς ελεγκτές για τη διαχείριση της διαδικασίας μετατροπής, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα και μειώνοντας τη μηχανική φθορά. Αυτοί οι κινητήρες εμπίπτουν στην ευρύτερη κατηγορία των σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη (PMSM) [44], μοιράζοντας ομοιότητες στη δομή και τη λειτουργία. Ωστόσο, ενώ οι κινητήρες BLDC εμφανίζουν συνήθως κυματομορφές τραπεζοειδούς πίσω ηλεκτροκινητικής δύναμης (EMF), τα PMSM χαρακτηρίζονται από ημιτονοειδή πίσω ηλεκτροκινητική δύναμη (back EMF), με αποτέλεσμα ομαλότερη απόδοση ροπής [15] και μειωμένο κυματισμό ροπής.



Εικόνα 10 Ρεύμα και B-EMF κυματομορφή ενός BLDC [34]

Η πίσω ηλεκτροκινητική δύναμη (back EMF) είναι μια τάση που παράγεται μέσα σε έναν περιστρεφόμενο ηλεκτροκινητήρα που αντιτίθεται στην εφαρμοζόμενη τάση. Είναι ουσιαστικά μια τάση "αντίδρασης" που προκύπτει από την κίνηση του κινητήρα. Αυτό το back EMF είναι μηδέν όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος και αυξάνεται αναλογικά με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.



Εικόνα 11 PMSM vs BLDC βασισμένο στο back EMF [44]

Χωρίς να έχει τροφοδοσία το μοτέρ παρατηρείται ότι, κατά τη μηχανική κίνηση του ρότορα ενός BLDC παράγει τραπεζοειδή μορφή back EMF όπως φαίνεται στην εικόνα 11. Παρόμοιο δηλαδή με έναν συμβατικό βουρτσισμένο κινητήρα DC (brushed DC). Αντιθέτως αν παράγει ημιτονοειδές back EMF, τότε θεωρείται PMSM [34].

Η λειτουργία των κινητήρων BLDC απαιτεί ακριβή σήματα ελέγχου, συχνά με τη μορφή διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM). Αυτά τα σήματα παράγονται από ηλεκτρονικούς ελεγκτές ταχύτητας (ESCs) που ρυθμίζουν την τάση και το ρεύμα που παρέχεται στις φάσεις του κινητήρα, ελέγχοντας έτσι την ταχύτητα και τη ροπή. Η συχνότητα αυτών των σημάτων PWM επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Για παράδειγμα, η ταχύτητα περιστροφής (RPM) ενός κινητήρα BLDC μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$RPM = \frac{\text{Frequency in Hz} \times 60}{\text{Number of Pole Pairs}}$$

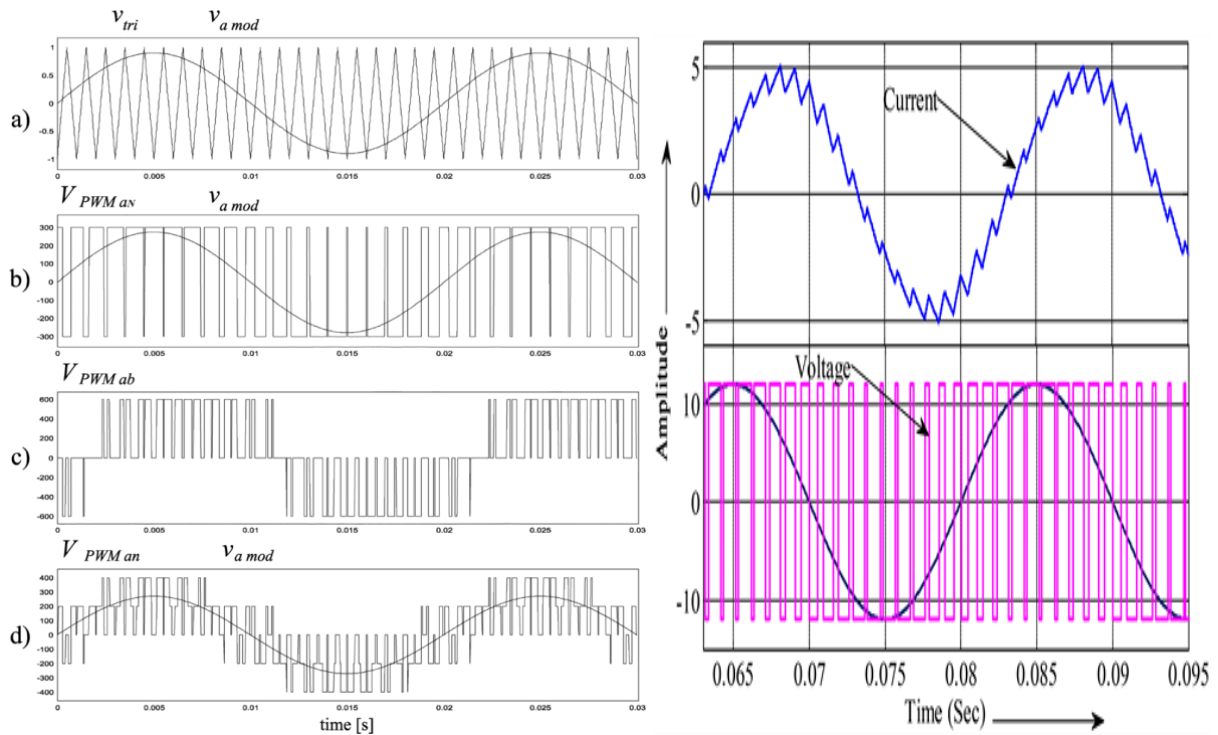
Μαθηματική εξίσωση 2

Αυτή η σχέση υπογραμμίζει τη σημασία του ακριβούς ελέγχου συχνότητας σε εφαρμογές που απαιτούν ακριβή ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα.

Στο πλαίσιο του ελέγχου του κινητήρα gimbal, ιδιαίτερα για μοντέλα όπως το GM6208-150T [10], η εφαρμογή του Pulse Width Modulation (PWM) είναι πιο λεπτή από έναν απλό μηχανισμό μεταγωγής on-off. Ενώ το παραδοσιακό PWM περιλαμβάνει τη μεταβολή του κύκλου λειτουργίας των τετραγωνικών κυμάτων για τον έλεγχο της παροχής ισχύος, οι προηγμένες στρατηγικές ελέγχου κινητήρα χρησιμοποιούν ημιτονοειδή διαμόρφωση πλάτους παλμού (SPWM) και έλεγχο προσανατολισμένο στο πεδίο (FOC) για την επίτευξη ομαλότερης και πιο αποτελεσματικής λειτουργίας του κινητήρα.

- **Ημιτονοειδής διαμόρφωση πλάτους παλμού (sinusoidal pulse width modulation - SPWM)**

Το SPWM είναι μια τεχνική όπου το πλάτος των παλμών PWM διαμορφώνεται με ημιτονοειδή τρόπο. Αυτή η προσέγγιση στοχεύει στην προσέγγιση ενός ημιτονοειδούς κύματος ρυθμίζοντας τον κύκλο λειτουργίας των σημάτων PWM, με αποτέλεσμα μια ομαλότερη κυματομορφή τάσης που εφαρμόζεται στις φάσεις του κινητήρα. Το κύριο πλεονέκτημα του SPWM είναι η ικανότητά του να μειώνει την αρμονική παραμόρφωση και τον κυματισμό ροπής, οδηγώντας σε πιο αθόρυβη και πιο αποτελεσματική απόδοση κινητήρα. Ωστόσο, το SPWM έχει περιορισμούς όσον αφορά τη χρήση διαύλου DC και ενδέχεται να μην εκμεταλλεύεται πλήρως το διαθέσιμο εύρος τάσης, το οποίο μπορεί να είναι κρίσιμο σε εφαρμογές υψηλής απόδοσης.

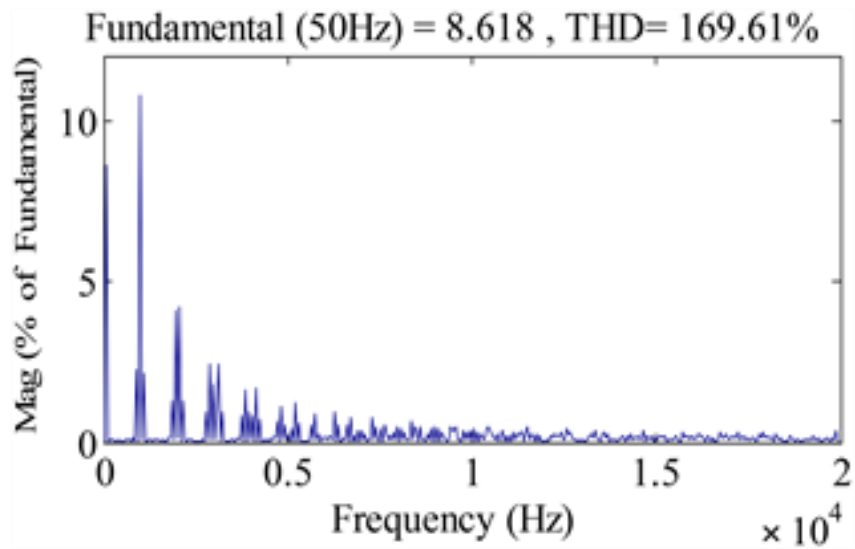


Εικόνα 12 Αναλυτική επεξήγηση SPWM κυματομορφής [35]

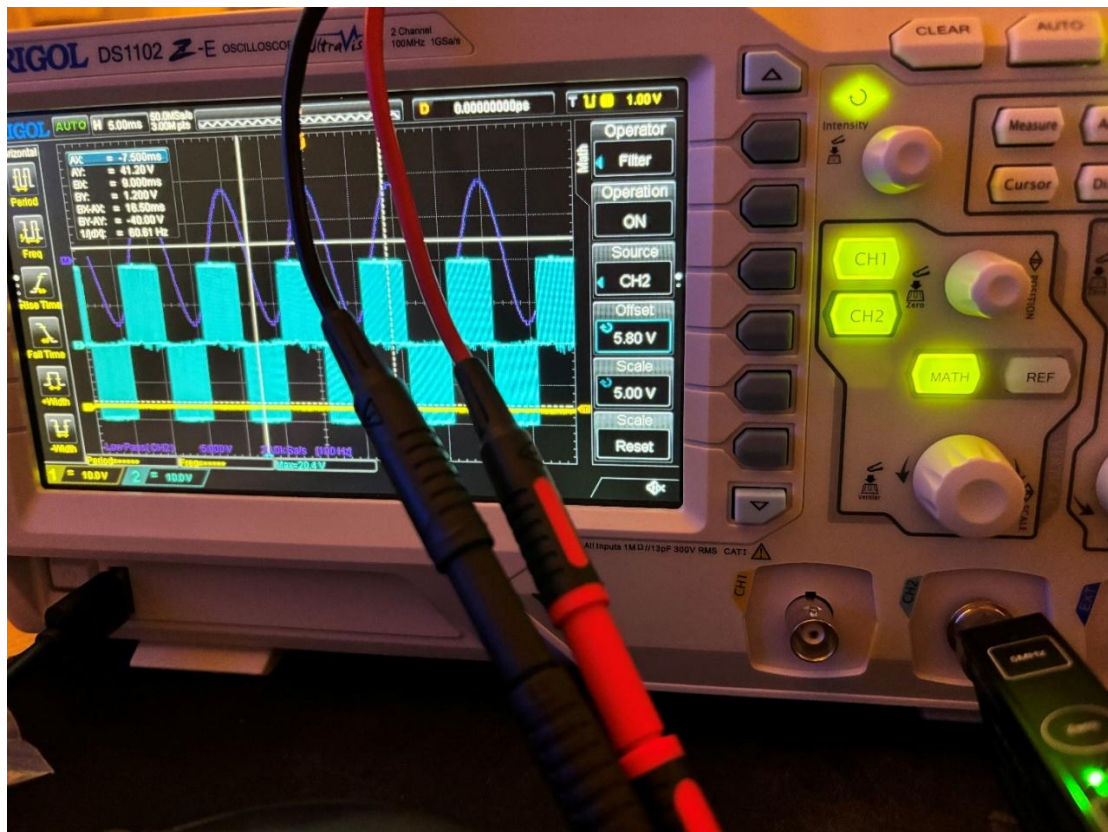
Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για να σχηματιστεί μια κυματομορφή SPWM. Στη δεξιά εικόνα με το ροζ χρώμα παρουσιάζεται ο πιο διαδεδομένος τρόπος δημιουργίας τέτοιου σήματος από DC – AC μετατροπείς και ESC ελεγκτές για διάφορα φορτία και μοτέρ . Αν στο SPWM παρθεί η μέση τιμή κάθε PWM προκύπτει ένα ημίτονο. Το ημίτονο αυτό λέγεται ότι δεν είναι καθαρό δηλαδή έχει υψηλό δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης ή THD (total harmonic distortion) . Για να είναι ένα ημίτονο καθαρό πρέπει να έχει δείκτη THD κοντά στο 0% . Όμως δεν είναι εφικτό σε συστήματα εκλεκτών μοτέρ καθώς το ημίτονο είναι μεταβαλλόμενο καθώς ορίζει την ταχύτητα τους, και συνεπώς ένα χαμηλό περατό φίλτρο (Low pass filter – LPF) δεν θα λειτουργεί σωστά σε όλο το εύρος των συχνοτήτων του ημιτόνου.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1}$$

Μαθηματική εξίσωση 3



Εικόνα 13 Αναπαράσταση αρμονικών σε Fourier [35]

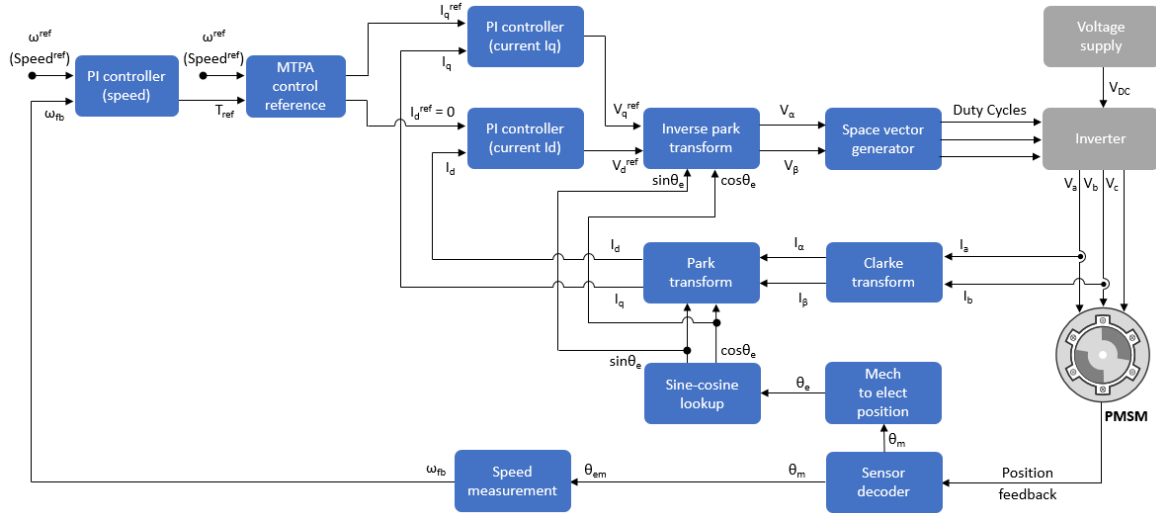


Εικόνα 14 SPWM από 3-Phase Inverter

- Προσανατολισμένο πεδίο ελέγχου (field oriented control - FOC)

Το FOC, γνωστό και ως διανυσματικός έλεγχος, είναι μια εξελιγμένη μέθοδος που αποσυνδέει τα στοιχεία ροπής και ροής του ρεύματος του κινητήρα, επιτρέποντας τον ανεξάρτητο έλεγχο του καθενός.

Μετατρέποντας τα τριφασικά ρεύματα του κινητήρα σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς χρησιμοποιώντας μαθηματικούς μετασχηματισμούς (μετασχηματισμοί Clarke και Park), το FOC επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο του προσανατολισμού του μαγνητικού πεδίου του κινητήρα [36]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένη απόκριση ροπής, υψηλότερη απόδοση και ομαλότερη λειτουργία [15] σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων. Το FOC είναι ιδιαίτερα επωφελές για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή δυναμική απόδοση [37] και ακριβή έλεγχο ταχύτητας.



Εικόνα 15 Σύστημα Field Oriented Control Matlab [36]

Ο μετασχηματισμός Clarke μετατρέπει τριφασικές ποσότητες (a, b, c) σε δύο ορθογώνια συστατικά (α, β) σε ένα σταθερό πλαίσιο αναφοράς. Υποθέτοντας ένα ισορροπημένο σύστημα όπου $a+b+c = 0$, ο μετασχηματισμός είναι:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Μαθηματική εξίσωση 4

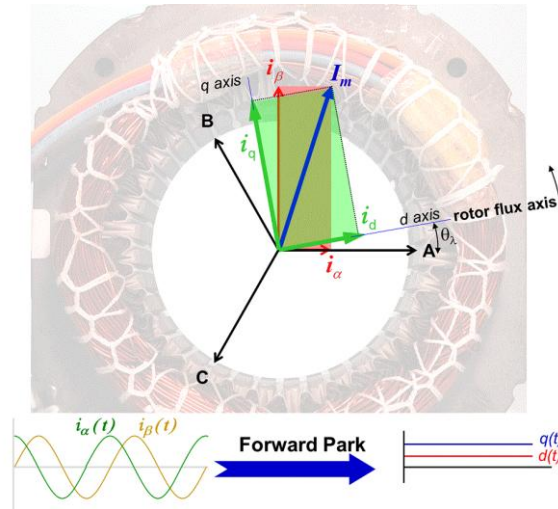
Αυτός ο μετασχηματισμός απλοποιεί το τριφασικό σύστημα σε ένα σύστημα δύο αξόνων, διευκολύνοντας τον ευκολότερο έλεγχο και την ανάλυση.

Ο μετασχηματισμός Park μετατρέπει περαιτέρω τα σταθερά εξαρτήματα α-β σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς ευθυγραμμισμένο με το μαγνητικό πεδίο του ρότορα, με αποτέλεσμα άμεσες (d - direct) και τετραγωνικές (q - quadrature) συνιστώσες:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Μαθηματική εξίσωση 5

Εδώ, το θ αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική γωνία του ρότορα. Ευθυγραμμίζοντας το πλαίσιο αναφοράς με το μαγνητικό πεδίο του ρότορα, η συνιστώσα d αντιστοιχεί στο ρεύμα που παράγει ροή, ενώ η συνιστώσα q αντιστοιχεί στο ρεύμα παραγωγής ροπής[57].



Εικόνα 16 Οπτική απεικόνιση FOC [37]

Για τη μετατροπή των σημάτων ελέγχου πίσω στο τριφασικό σύστημα για εφαρμογή στον κινητήρα, χρησιμοποιούνται αντίστροφοι μετασχηματισμοί:

Ανίστροφος μετασχηματισμός Clarke:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$$

Μαθηματική εξίσωση 6

Αντίστροφος μετασχηματισμός Park:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}$$

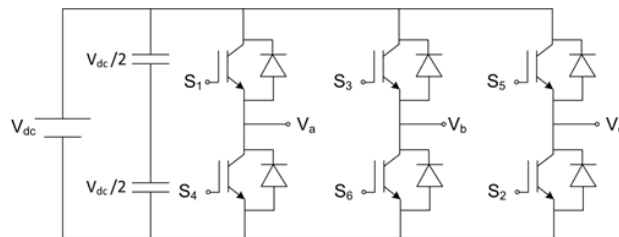
Μαθηματική εξίσωση 7

Αυτοί οι αντίστροφοι μετασχηματισμοί διασφαλίζουν ότι τα σήματα ελέγχου αντιστοιχίζονται κατάλληλα στο τριφασικό σύστημα για αποτελεσματική λειτουργία του κινητήρα.

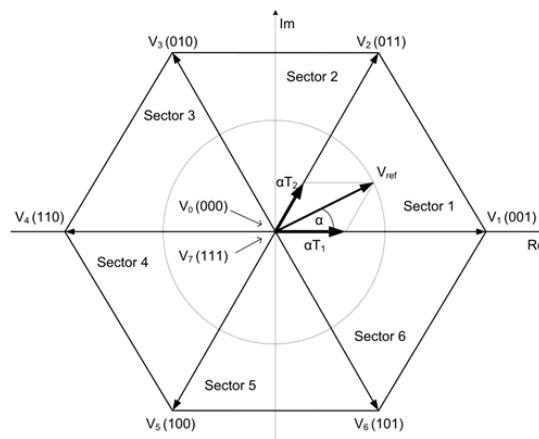
Το Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) αντιπροσωπεύει μία από τις πιο αποτελεσματικές [38] και μαθηματικά κομψές τεχνικές για τον έλεγχο τριφασικών μετατροπέων πηγής τάσης, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπως κινητήρες και συστήματα σταθεροποίησης αντίζυγου. Σε αντίθεση με τις

παραδοσιακές μεθόδους διαμόρφωσης, όπως το ημιτονοειδές PWM ή ο τραπεζοειδής έλεγχος, το SVPWM λειτουργεί αντιμετωπίζοντας τις τριφασικές τάσεις εξόδου ως ένα ενιαίο περιστρεφόμενο διάνυσμα στο σύνθετο δισδιάστατο επίπεδο. Αυτή η διανυσματική προσέγγιση επιτρέπει τη βέλτιστη χρήση τάσης, μειωμένη αρμονική παραμόρφωση και ομαλότερη λειτουργία του κινητήρα - κρίσιμα χαρακτηριστικά σε συστήματα υψηλής ακρίβειας όπως τα αντίζυγα.

Στον πυρήνα του SVPWM βρίσκεται η έννοια της σύνθεσης ενός επιθυμητού διανύσματος τάσης εξόδου με γρήγορη εναλλαγή μεταξύ διακριτών καταστάσεων τάσης του μετατροπέα. Ένας τυπικός τριφασικός μετατροπέας μπορεί να δημιουργήσει οκτώ πιθανές καταστάσεις μεταγωγής, έξι από τις οποίες αντιστοιχούν σε ενεργά διανύσματα και δύο έως μηδενικά διανύσματα (όπου όλα τα άνω ή όλα τα κάτω τρανζίστορ είναι ενεργοποιημένα)[56]. Αυτά τα διανύσματα, όταν σχεδιάζονται στο επίπεδο α - β (επίσης γνωστό ως επίπεδο μετασχηματισμού Clarke), σχηματίζουν ένα κανονικό εξάγωνο. Ο μετατροπέας λειτουργεί επιλέγοντας τα κατάλληλα δύο γειτονικά ενεργά διανύσματα και ένα μηδενικό διάνυσμα σε κάθε περίοδο δειγματοληψίας για την προσέγγιση της κατεύθυνσης και του μεγέθους του επιθυμητού διανύσματος τάσης.



Εικόνα 17 DC-AC Τριφασικός μετατροπέας [38]



Εικόνα 18 Οπτική απεικόνιση SVM [38]

State	S1	S3	S5	V _{an}	V _{bn}	V _{cn}	V
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{3V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2}{3}V_{dc} < 0$
2	0	1	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{2}{3}V_{dc} < 60$
3	0	1	0	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2}{3}V_{dc} < 120$
4	1	1	0	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2}{3}V_{dc} < 180$
5	1	0	0	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{2}{3}V_{dc} < 240$
6	1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2}{3}V_{dc} < 300$
7	1	1	1	0	0	0	0

Πίνακας 1 Περιγραφή της τάσης σε συνάρτηση με τη κατάσταση PMSM

- **Αναπαράσταση τριφασικών τάσεων ως διανυσματικός χώρος – Space Vector.**

Δεδομένων των τριφασικών τάσεων V_a , V_b και V_c , το χωρικό διάνυσμα V ορίζεται ως:

$$V = \frac{2}{3} (V_a + V_b e^{\frac{j2\pi}{3}} + V_c e^{\frac{j4\pi}{3}})$$

Μαθηματική εξίσωση 8

Αυτή η πολύπλοκη αναπαράσταση απλοποιεί την ανάλυση και τον έλεγχο των τριφασικών συστημάτων ενοποιώντας τα σε ένα δισδιάστατο επίπεδο.

- **Προσδιορισμός Τομέα και Χρόνων Μεταγωγής – Switching Times**

Το επίπεδο α - β χωρίζεται σε έξι τομείς, καθένας από τους οποίους εκτείνεται σε 60 μοίρες. Για ένα δεδομένο διάνυσμα τάσης αναφοράς V_{ref} , προσδιορίζεται ο τομέας στον οποίο βρίσκεται. Εντός αυτού του τομέα, το V_{ref} συντίθεται με χρονικά σταθμισμένο μέσο όρο των δύο γειτονικών ενεργών διανυσμάτων και του μηδενικού διανύσματος.

Οι χρόνοι μεταγωγής T_1 , T_2 και T_0 (για τα δύο ενεργά διανύσματα και το μηδενικό διάνυσμα, αντίστοιχα) υπολογίζονται με βάση το μέγεθος και τη γωνία του V_{ref} :

$$T_1 = T_s * \frac{|V_{ref}|}{V_{dc}} * \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$$

Μαθηματική εξίσωση 9

$$T_2 = T_s * \frac{|V_{ref}|}{V_{dc}} * \sin(\theta)$$

Μαθηματική εξίσωση 10

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2$$

Μαθηματική εξίσωση 11

Όπου :

T_s είναι η περίοδος δειγματοληψίας.

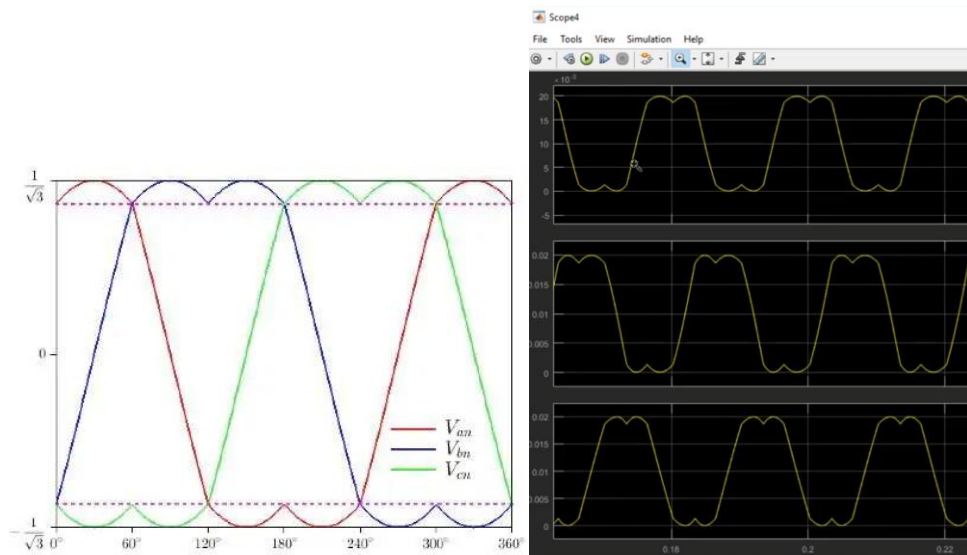
V_{dc} είναι η τάση διαύλου DC.

θ είναι η γωνία του V_{ref} εντός του τομέα.

Αυτοί οι χρόνοι καθορίζουν τη διάρκεια για την οποία κάθε διάνυσμα εφαρμόζεται μέσα σε έναν κύκλο PWM, κατασκευάζοντας αποτελεσματικά το επιθυμητό διάνυσμα τάσης εξόδου.

Αυτό που διακρίνει το SVPWM από άλλες μεθόδους είναι η ικανότητά του να χρησιμοποιεί πιο αποτελεσματικά τη διαθέσιμη τάση διαύλου DC. Ενώ το συμβατικό ημιτονοειδές PWM (SPWM) μπορεί να επιτύχει μόνο περίπου το 78% της τάσης σύνδεσης DC (γνωστό ως όριο γραμμικής διαμόρφωσης), το SVPWM μπορεί να το ωθήσει σε περίπου 90,6%, παρέχοντας ισχυρότερη παροχή τάσης στον κινητήρα. Αυτό μεταφράζεται σε βελτιωμένη απόδοση ροπής και καλύτερη δυναμική απόκριση - κλειδί για συστήματα αντίζυγου που στοχεύουν σε γρήγορες, αλλά σταθερές, ρυθμίσεις.

Από την άποψη της υλοποίησης, το SVPWM βασίζεται σε μετασχηματισμούς συντεταγμένων για να μετατρέψει τα τριφασικά σήματα αναφοράς σε ένα δισδιάστατο διάνυσμα. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως μέσω μετασχηματισμών Clarke και Park, οι οποίοι απλοποιούν το σύστημα σε ορθογώνια εξαρτήματα. Μόλις προσδιοριστεί το διάνυσμα αναφοράς, ο αλγόριθμος υπολογίζει τους κατάλληλους χρόνους παραμονής για κάθε κατάσταση μεταγωγής, καθορίζοντας πόσο καιρό ο μετατροπέας πρέπει να παραμείνει σε κάθε κατάσταση κατά τη διάρκεια ενός κύκλου PWM. Αυτές οι διάρκειες στη συνέχεια μετατρέπονται σε σήματα μεταγωγής για τα τρανζίστορ του μετατροπέα.



Εικόνα 19 Κυματογραφή SVM φιλτραρισμένο [39]

Σε πρακτικές εφαρμογές, ειδικά στον επιτόπιο έλεγχο (FOC) κινητήρων όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αντίζυγου, το SVPWM βελτιώνει τη συνολική απόδοση ελαχιστοποιώντας τον κυματισμό ροπής, μειώνοντας τον ακουστικό θόρυβο και μειώνοντας τη θερμική καταπόνηση στα ηλεκτρονικά. Η συμμετρία και η ισοροπημένη χρήση όλων των καταστάσεων μετατροπέα συμβάλλουν επίσης στην πιο ομοιόμορφη παροχή ισχύος και στη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων.

Ωστόσο, το SVPWM εισάγει κάποια πολυπλοκότητα όσον αφορά τις υπολογιστικές απαιτήσεις. Η ανάγκη για μετασχηματισμούς σε πραγματικό χρόνο και ακριβή χρονισμό σημαίνει ότι οι σύγχρονοι μικροελεγκτές ή επεξεργαστές ψηφιακού σήματος (DSP) είναι συχνά απαραίτητοι για την αποτελεσματική εφαρμογή του. Αλλά με τις σημερινές δυνατότητες επεξεργασίας και την αυξανόμενη διαθεσιμότητα βιβλιοθηκών [39] ελέγχου κινητήρα ανοιχτού κώδικα, η ενσωμάτωση του SVPWM σε συστήματα αντίζυγου είναι πιο προσιτή από ποτέ.

Συμπερασματικά, η κυματομορφή διανυσματικού χώρου ξεχωρίζει ως μια εξελιγμένη τεχνική διαμόρφωσης που ενισχύει σημαντικά την απόδοση του τριφασικού ελέγχου κινητήρα. Η ικανότητά του να εξάγει τη μέγιστη τάση, να μειώνει τις αρμονικές και να παρέχει ομαλή και σταθερή συμπεριφορά κινητήρα το καθιστά ιδανική επιλογή για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, όπως αντίζυγα κάμερας, όπου ακόμη και τα παραμικρά σφάλματα κίνησης μπορεί να είναι οπτικά ενοχλητικά.

▪ Εφαρμογή στα Gimbal Motors

Σε συστήματα αντίζυγου που χρησιμοποιούν κινητήρες όπως το GM6208-150T, η εφαρμογή FOC περιλαμβάνει τη χρήση αισθητήρων ή τεχνικών εκτίμησης χωρίς αισθητήρες για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του ρότορα. Αυτές οι πληροφορίες είναι ζωτικής σημασίας για την κατάλληλη ευθυγράμμιση του διανύσματος ρεύματος στάτορα για την επίτευξη του επιθυμητού ελέγχου ροπής και κίνησης. Ο αλγόριθμος ελέγχου υπολογίζει τα απαιτούμενα διανύσματα τάσης, τα οποία στη συνέχεια συντίθενται χρησιμοποιώντας τεχνικές PWM για να οδηγήσουν τις φάσεις του κινητήρα. Αξιοποιώντας

το FOC, τα συστήματα αντίζυγου μπορούν να επιτύχουν ανώτερη απόδοση σταθεροποίησης, απαραίτητη για εφαρμογές στη φωτογραφία, τη βιντεοσκόπηση και τα όργανα ακριβείας.

Η εσωτερική δομή των κινητήρων BLDC περιλαμβάνει έναν στάτορα και έναν ρότορα. Ο στάτορας περιέχει περιελίξεις που, όταν ενεργοποιούνται, παράγουν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Ο ρότορας, ενσωματωμένος με μόνιμους μαγνήτες, ακολουθεί αυτό το περιστρεφόμενο πεδίο, με αποτέλεσμα την κίνηση. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου του στάτορα και των μαγνητών του ρότορα παράγει ροπή. Ωστόσο, αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί επίσης να οδηγήσει σε ροπή απόφραξης (cogging torque) - ένα φαινόμενο όπου ο ρότορας βιώνει αντίσταση λόγω της ευθυγράμμισης των μαγνητών του με τα δόντια του στάτορα. Η ροπή απόφραξης είναι ανεπιθύμητη, καθώς προκαλεί ανομοιόμορφη κίνηση, ιδιαίτερα σε χαμηλές ταχύτητες. Για να μετριάσουν αυτό, οι σχεδιαστές κινητήρων χρησιμοποιούν στρατηγικές όπως η βελτιστοποίηση του συνδυασμού υποδοχής / πόλου, οι υποδοχές στάτορα στρέβλωσης ή η διαμόρφωση των μαγνητών για να εξασφαλίσουν ομαλότερη λειτουργία.



Εικόνα 20 Αναπαράσταση του στάτορα και ρότορα [44]

Συνοπτικά, ο κινητήρας αντίζυγου GM6208-150T, ως εκπρόσωπος των κινητήρων BLDC [18], παρουσιάζει την ενσωμάτωση προηγμένων στρατηγικών σχεδιασμού και ελέγχου κινητήρα για την επίτευξη ακριβούς, ομαλού και αποτελεσματικού ελέγχου κίνησης. Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της δομής του κινητήρα, των σημάτων ελέγχου και των λειτουργικών παραμέτρων είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία.

Κεφάλαιο 3ο: Σχεδίαση, κατασκευή και ανάπτυξη λογισμικού

3.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός συστήματος gimbal 3 αξόνων για drones απαιτεί μια διεπιστημονική προσέγγιση, ενσωματώνοντας τη μηχανολογία, την ηλεκτρονική, τα συστήματα ελέγχου και την ανάπτυξη λογισμικού. Αυτό το κεφάλαιο αποσαφηνίζει την ολοκληρωμένη διαδικασία που έχει αναληφθεί για την ανάπτυξη ενός λειτουργικού και αποτελεσματικού συστήματος αντίζυγου, που περιλαμβάνει μηχανικό σχεδιασμό, επιλογή υλικού, ανάπτυξη λογισμικού και ολοκλήρωση συστήματος.

3.2 Μηχανολογικός Σχεδιασμός

3.2.1 Στόχοι σχεδιασμού

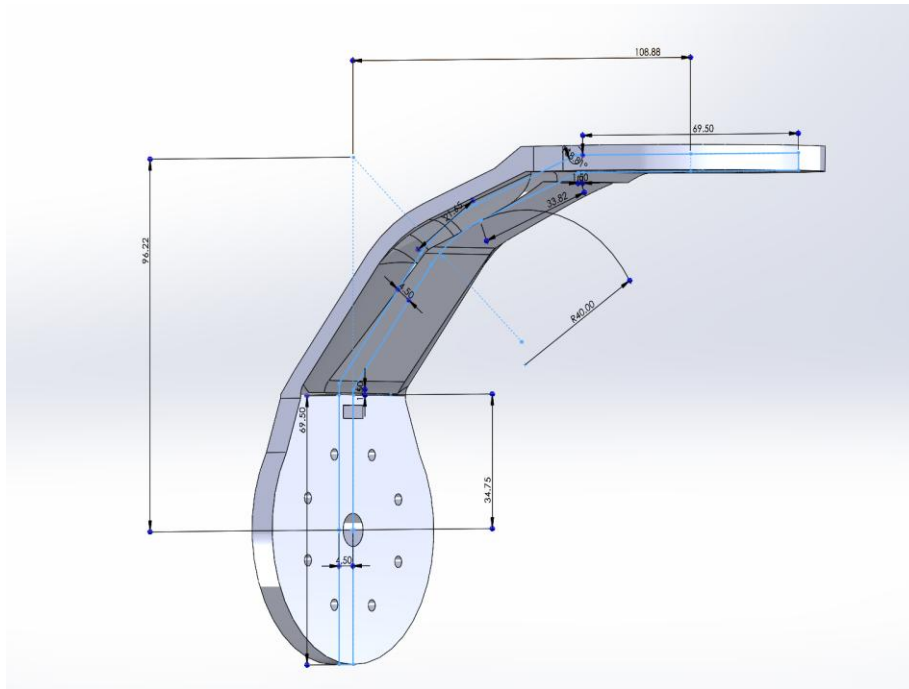
Οι πρωταρχικοί στόχοι στη φάση του μηχανολογικού σχεδιασμού ήταν:

- **Η εξασφάλιση της δομικής ακαμψίας ελαχιστοποιώντας παράλληλα το βάρος.**
- **Η ομαλή και απεριόριστη κίνηση και στους τρεις άξονες.**
- **Η τοποθέτηση της επιλεγμένης κάμερας module με ασφάλεια.**
- **Η ευκολία συναρμολόγησης και συντήρησης**

3.2.2 Μοντελοποίηση σε πρόγραμμα CAD

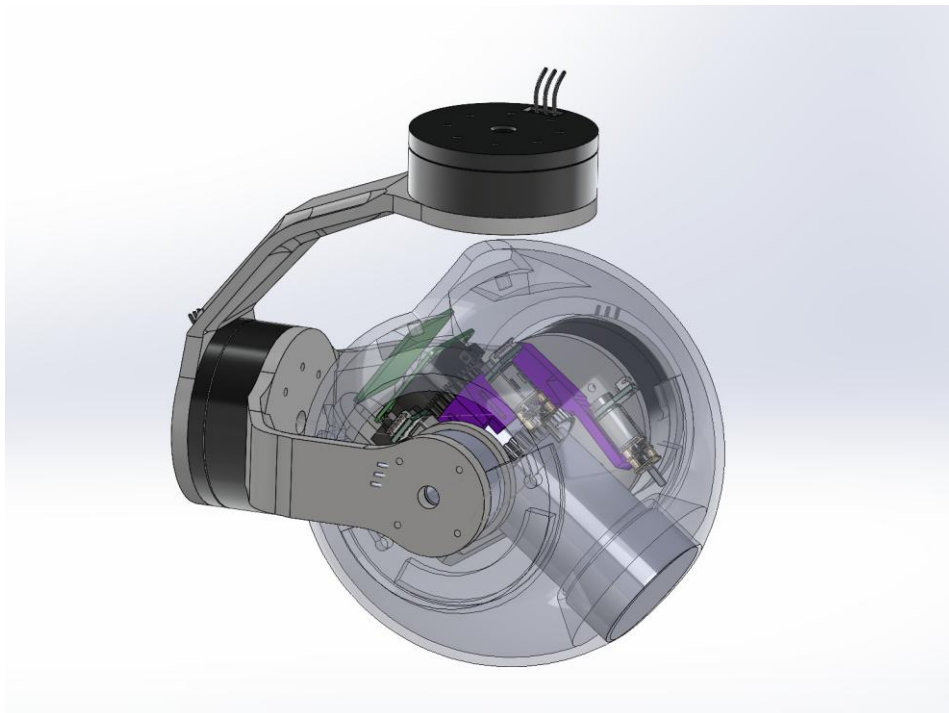
Χρησιμοποιώντας το SolidWorks for students, αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο 3D μοντέλο του αντίζυγου. Ο σχεδιασμός ενσωμάτωσε αρθρωτά εξαρτήματα για κάθε άξονα, επιτρέποντας ανεξάρτητη κίνηση και ευκολία συναρμολόγησης.

Κάθε κομμάτι σχεδιάστηκε λεπτομερώς ώστε να ταιριάζει με τα gimbal motors GM6208, να έχει κατάλληλες υποδοχές είτε για βίδες είτε για ένθετα θερμότητας με σπείρωμα, να έχει την απαραίτητη σταθερότητα σε συνάρτηση με το χαμηλό βάρος. Επιπλέον, οι αποστάσεις μετρήθηκαν με καταλληλά εργαλεία στο δέκατο χιλιοστού ώστε το gimbal να γίνει όσο πιο μικρό γίνεται για τις προδιαγραφές της κάμερας σε συνδυασμό με φακό υψηλού εστιακού βάρους (focal length) για μακρινή εστίαση.

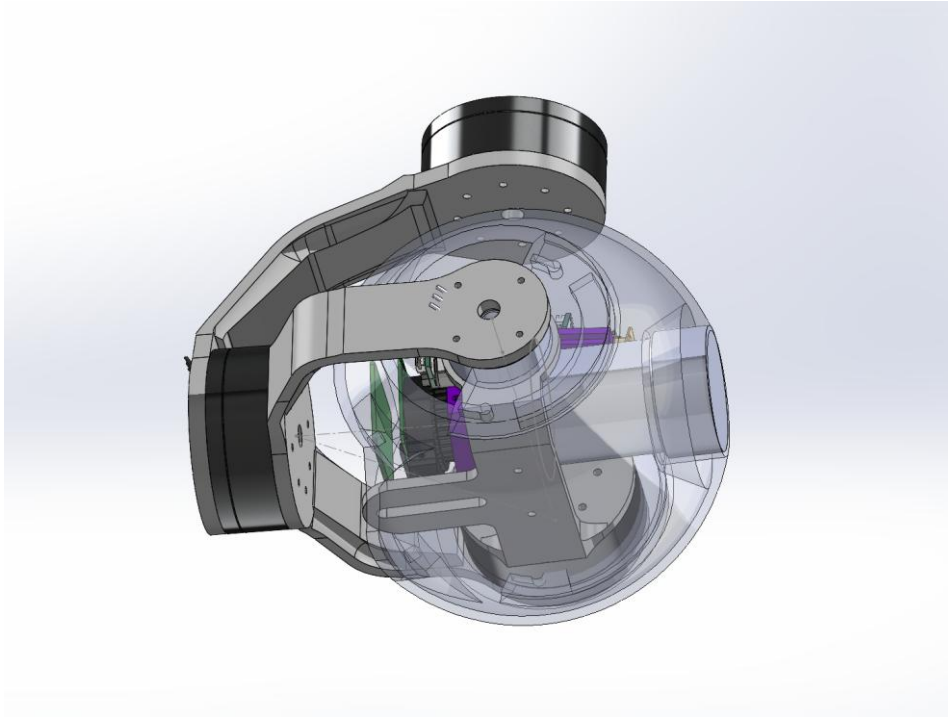


Εικόνα 22 Σχεδιασμός κομματιού στο CAD

Τα μοντέλα έχουν μέγιστη ακρίβεια διαστάσεων προσφέροντας ισορροπία στο φορτίο και χαμηλές δονήσεις. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκαν ιδιαίτερες κοπές στο modeling όπως λοξότμηση (chamfer) και φιλετάρισμα (fillet) προσφέροντας αεροδυναμική σχεδίαση με μικρές απώλειες δύναμης του υλικού και αύξηση της ελαστικότητας .



Εικόνα 23 Συγκρότηση τελικού gimbal

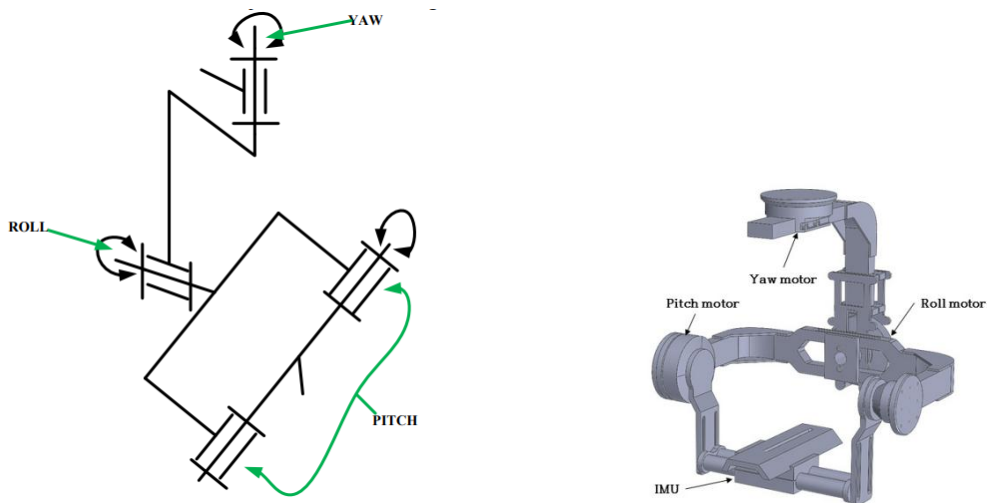


Εικόνα 24 Συγκρότηση gimbal από διαφορετική οπτική γωνία

3.2.3 Διαμόρφωση των αξόνων

Το αντίζυγο σχεδιάστηκε με τρεις άξονες περιστροφής:

- **Άξονας περιστροφής (Yaw Axis):** Επιτρέπει την περιστροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, επιτρέποντας στην κάμερα να μετακινείται αριστερά και δεξιά.
- **Άξονας κλίσης (Pitch Axis):** Επιτρέπει την κλίση της κάμερας προς τα πάνω και προς τα κάτω.
- **Άξονας κύλισης (Roll Axis):** Διευκολύνει την ισοπέδωση της κάμερας, αντισταθμίζοντας τις κινήσεις ρολών drone.



Εικόνα 25 Gimbal Kinematics με 3 περιστροφικές αρθρώσεις [24][25]

Κάθε άξονας ήταν εξοπλισμένος με έναν ειδικό τριφασικό κινητήρα χωρίς ψήκτρες για να παρέχει ακριβή και ανταποκρινόμενο έλεγχο.

3.2.4 Τρισδιάστατη εκτύπωση

Τα πέντε βασικά κομμάτια που εκτυπώθηκαν για την κατασκευή του gimbal:

1. Το κομμάτι εκτυπωμένο σε ABS+, που κρατάει από την πάνω μεριά το storm32 v1.32 board και συνδέεται με τέσσερις M5 βίδες με το drone. Παράλληλα από την κάτω πλευρά είναι συνδεδεμένο με οκτώ βίδες M3 με τον στάτη του πρώτου μοτέρ.
2. Το yaw κομμάτι εκτυπωμένο σε ABS+, το οποίο συνδέεται στον ρότορα του πρώτου μοτέρ με και από την άλλη υποδοχή με τον στάτη του δεύτερου μοτέρ .
3. Το roll κομμάτι εκτυπωμένο σε ABS+, το οποίο συνδέεται με τον ρότορα του δεύτερου μοτέρ και από την άλλη υποδοχή με τον στάτη του τρίτου μοτέρ. Επιπλέον κατέχει μια υποδοχή για ρουλεμάν από την απέναντί πλευρά του τρίτου μοτέρ ώστε να συνδέεται με το pitch κομμάτι και να προσφέρει ισορροπία στην κάμερα.
4. Το pitch κομμάτι εκτυπωμένο σε ABS+, το οποίο συνδέεται με τον ρότορα του τρίτου μοτέρ. Κατέχει μια ειδική, προσαρμόσιμη θέση για την κάμερα και ακόμη μια βοηθητική υποδοχή για σταθερότητα, η οποία συνδέεται μέσω ενός ρουλεμάν στο roll κομμάτι.
5. Περίβλημα ρουλεμάν εκτυπωμένο σε PLA+ (χρώματος μοβ) , βρίσκεται αναμεσά στο roll και στο pitch κομμάτι , έχει την ιδιότητα ενός παθητικού μοτέρ. Δηλαδή δεν προσφέρει κίνηση αλλά έχει μια σταθερή πλευρά ενωμένη με το roll κομμάτι ως στάτορας και μια κινουμένη πλευρά ενωμένη με το pitch ως ρότορας.

Σημειώνεται ότι στους στάτορες και τους ρότορες των μοτέρ χρησιμοποιήθηκαν σε όλες πλην της 1^{ης} περίπτωσης , από έξι βίδες M3.

Ακόμα οι αναθυμιάσεις του ABS - acrylonitrile butadiene styrene ή στα ελληνικά ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο δεν θεωρούνται τοξικές αλλά είναι δυσάρεστες για τους περισσότερους χρήστες. Καθώς το υλικό θερμαίνεται σε έναν 3D εκτυπωτή, δημιουργεί αέρια και μικροσκοπικά σωματίδια κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Συνεπώς μπορεί να προκαλέσει σωματική δυσφορία όπως υπνηλία, ερεθισμό των ματιών, ναυτία και πονοκεφάλους[58].

Τα σωματίδια και τα αέρια που παράγονται μπορεί συχνά να είναι ρύποι που στη συνέχεια διασκορπίζονται γύρω από τον αέρα που περιβάλλει το σύστημα. Οι αναθυμιάσεις από το πλαστικό είναι συχνά καρκινογόνες και μπορούν να προκαλέσουν οξύ ερεθισμό στο αναπνευστικό σύστημα. Εάν το υλικό υποβληθεί σε επεξεργασία υπό παρατεταμένη έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία ή φλόγα, μπορεί να εμφανιστούν θερμικά εγκαύματα στο δέρμα[58].

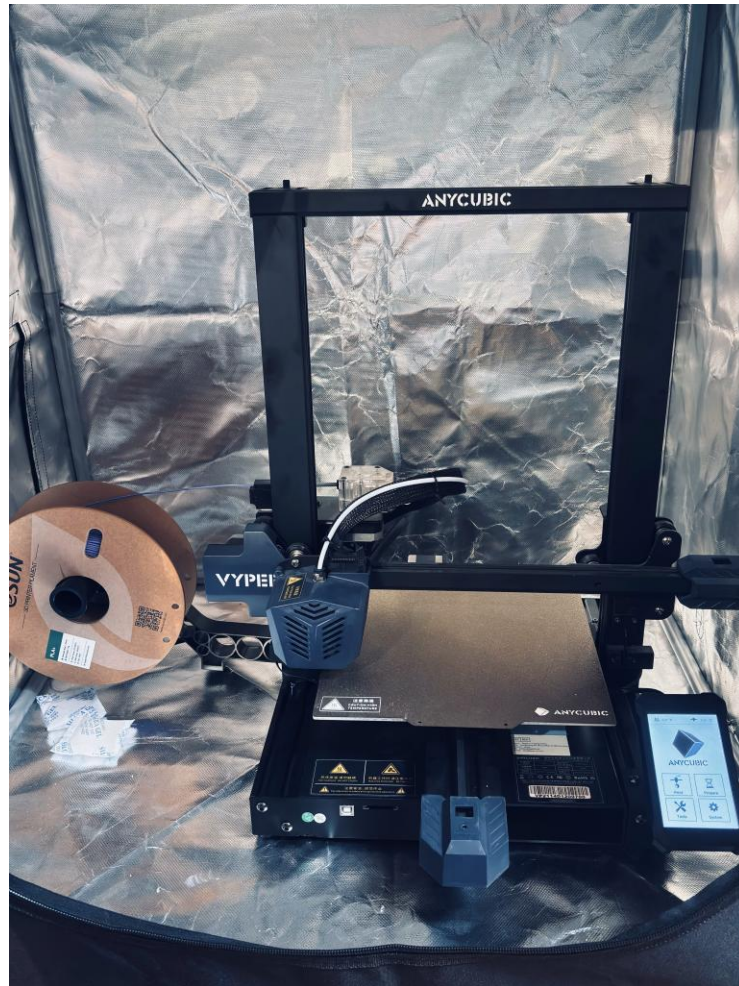
Συνιστάτε ιδιαίτερη προσοχή στην εκτύπωση αυτού του υλικού, όπως ιδιική μάσκα, καλό εξαερισμό , έγκλειστο αερίων με φίλτρα αέρα στον εκτυπωτή.



Εικόνα 26 Ειδική μάσκα τοξικών αερίων που χρησιμοποιήθηκε

Τα προαναφερθείσα κομμάτια του gimbal εκτυπώθηκαν σε τρισδιάστατο εκτυπωτή (3d printer) . Συγκεκριμένα στο Anycubic Vyper , γνωστή εταιρίας κυρίως για εκτυπωτές ρητίνης όχι νήματος. Με την βοήθεια ενός έγκλειστου θαλάμου (enclosure chamber) για σταθερό περιβάλλον θερμοκρασίας και υγρασίας . Τα νήματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής :

- **eSUN ABS+ λευκού χρώματος**
- **eSUN PLA+ μωβ χρώματος**

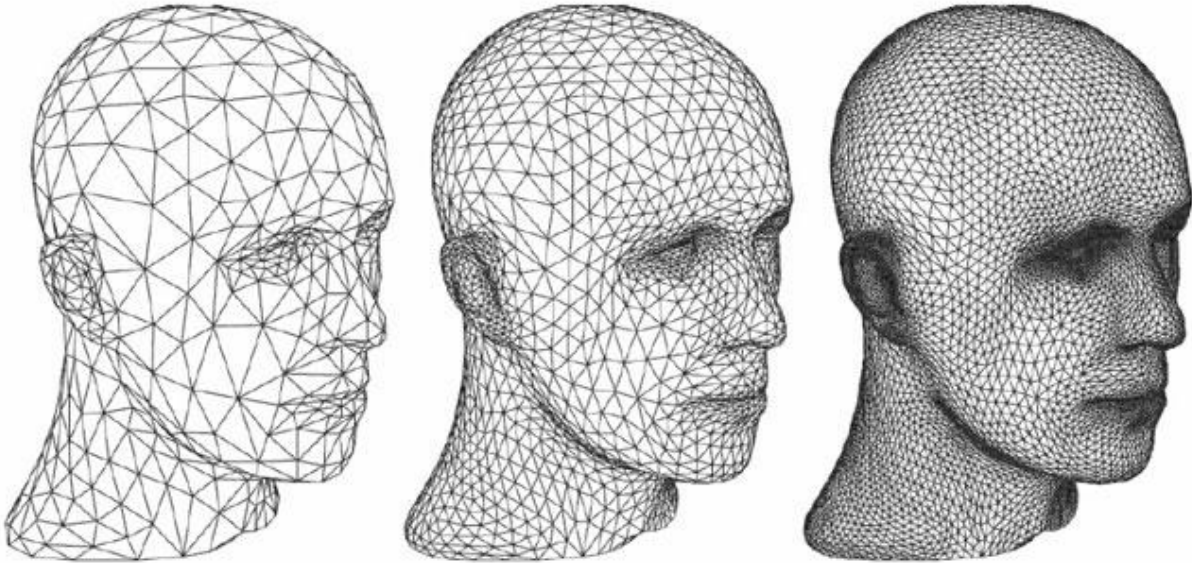


Εικόνα 27 Anycubic Vyper 3D printer

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι για την χρήση του 3D printer απαιτείται ειδική μορφή αρχείου (format) ονομαζόμενο gcode.

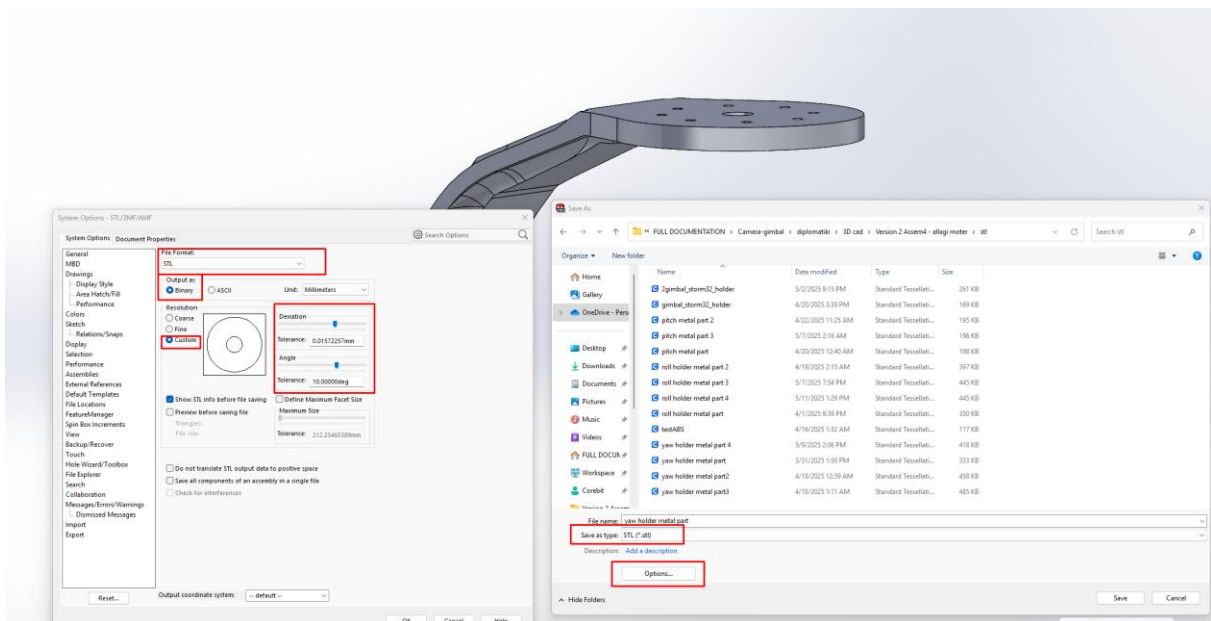
Στον τομέα της 3D εκτύπωσης, ο μετασχηματισμός ενός ψηφιακού σχεδιασμού σε ένα απτό αντικείμενο περιλαμβάνει μια σειρά κρίσιμων βημάτων, καθένα από τα οποία βασίζεται σε συγκεκριμένες μορφές αρχείων και εργαλεία λογισμικού. Αυτή η διαδικασία ξεκινά συνήθως με τη δημιουργία ενός μοντέλου 3D σε λογισμικό σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD), όπως το SolidWorks. Μόλις ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός, πρέπει να εξαχθεί σε μορφή κατάλληλη για εκτύπωση 3D, συνήθως τη μορφή STL (Standard Tessellation Language).

Η μορφή αρχείου STL αντιπροσωπεύει τη γεωμετρία επιφάνειας ενός αντικειμένου 3D χρησιμοποιώντας ένα δικτύωμα διασυνδεδεμένων τριγώνων. Κάθε τρίγωνο ορίζεται από τις κορυφές του και ένα κανονικό διάνυσμα, το οποίο δείχνει την προς τα έξω πλευρά της επιφάνειας. Τα αρχεία STL μπορούν να αποθηκευτούν είτε σε ASCII είτε σε δυαδικές μορφές, με το δυαδικό να είναι πιο συμπαγές και να χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη[59]. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα αρχεία STL δεν περιέχουν πληροφορίες σχετικά με το χρώμα, την υφή ή τις ιδιότητες του υλικού. Περιγράφουν μόνο το σχήμα του αντικειμένου.



Εικόνα 28 STL ανάλυση οπτική απεικόνιση [43]

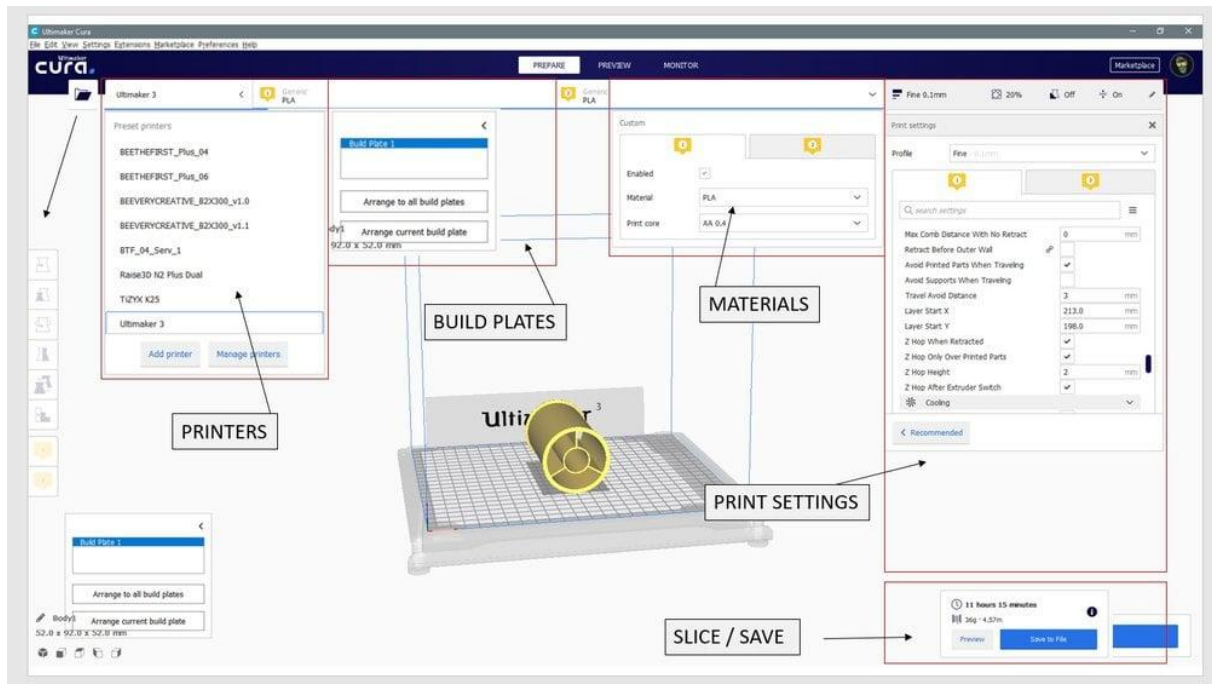
Κατά την εξαγωγή ενός μοντέλου από το SolidWorks σε STL, η ανάλυση του πλέγματος μπορεί να ρυθμιστεί για να εξισορροπήσει τις λεπτομέρειες και το μέγεθος του αρχείου. Οι ρυθμίσεις υψηλότερης ανάλυσης έχουν ως αποτέλεσμα ένα λεπτότερο δικτύωμα που αντιπροσωπεύει με μεγαλύτερη ακρίβεια καμπύλες επιφάνειες, αλλά και αυξάνει το μέγεθος του αρχείου. Για να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα, οι χρήστες μπορούν να προσαρμόσουν τις ρυθμίσεις εξαγωγής προσαρμόζοντας παραμέτρους όπως απόκλιση και γωνία, διασφαλίζοντας ότι το εξαγόμενο αρχείο STL διατηρεί το επιθυμητό επίπεδο λεπτομέρειας για εκτύπωση.



Εικόνα 29 Αποθήκευση ως STL αρχείο με συγκεκριμένη ανάλυση

Κεφάλαιο 3

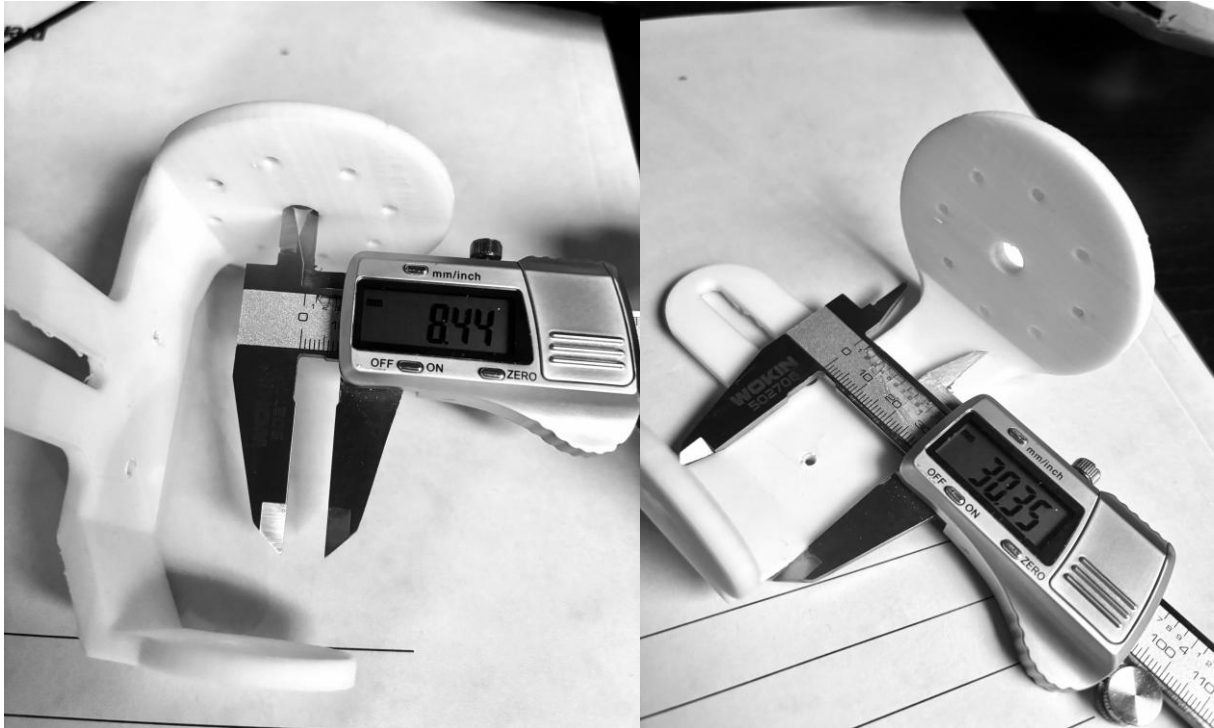
Μετά τη λήψη του αρχείου STL, το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τη μετατροπή του σε Gcode, τη γλώσσα που κατανοούν οι εκτυπωτές 3D για την εκτέλεση της διαδικασίας εκτύπωσης. Αυτή η μετατροπή πραγματοποιείται με λογισμικό τεμαχισμού, με το Ultimaker Cura 5.3.1 να είναι μια από τις πιο δημοφιλείς επιλογές. Το Cura παίρνει το αρχείο STL και τεμαχίζει (slicing) το μοντέλο 3D σε οριζόντια επίπεδα, δημιουργώντας ένα αρχείο Gcode που περιέχει οδηγίες για τις κινήσεις, τους ρυθμούς εξώθησης, τις θερμοκρασίες και άλλες ρυθμίσεις του εκτυπωτή.



Εικόνα 30 Περιβάλλον του Cura Ultimate

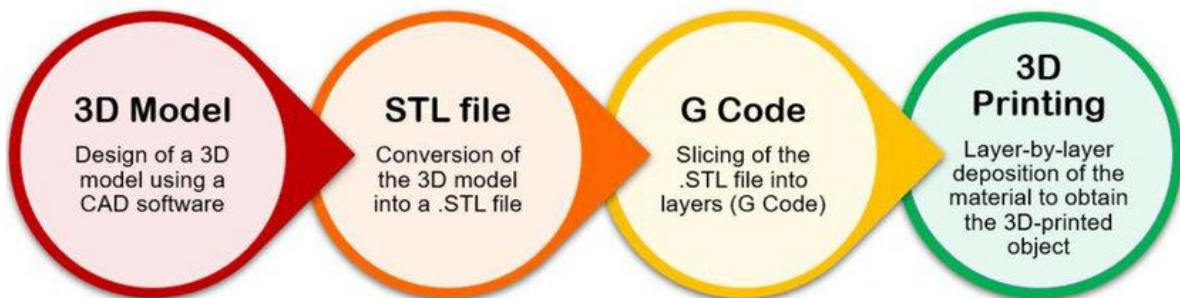
Στο Cura, οι χρήστες μπορούν να διαμορφώσουν διάφορες ρυθμίσεις εκτύπωσης για να προσαρμόσουν τη διαδικασία εκτύπωσης σε συγκεκριμένες απαιτήσεις. Αυτές οι ρυθμίσεις περιλαμβάνουν ύψος στρώματος, ταχύτητα εκτύπωσης, πυκνότητα πλήρωσης, δομές στήριξης και μεθόδους πρόσφυσης όπως γείσα ή σχεδίες. Ρυθμίζοντας λεπτομερώς αυτές τις παραμέτρους, οι χρήστες μπορούν να βελτιστοποιήσουν την ποιότητα εκτύπωσης, την αντοχή και τη χρήση υλικού. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία τεμαχισμού, η Cura δημιουργεί το αρχείο Gcode, το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί στον εκτυπωτή 3D μέσω κάρτας SD, USB ή άμεσης σύνδεσης.

Ο εκτυπωτής 3D διαβάζει το αρχείο Gcode και ακολουθεί τις οδηγίες για την κατασκευή του αντικειμένου στρώμα προς στρώμα, εναποθέτοντας υλικό ακριβώς όπως υπαγορεύεται από τον κώδικα. Αυτή η διαδικασία κατασκευής προσθέτων συνεχίζεται μέχρι να κατασκευαστεί ολόκληρο το αντικείμενο, με αποτέλεσμα τη φυσική υλοποίηση του αρχικού ψηφιακού σχεδιασμού.



Εικόνα 31 Ακριβή μέτρηση των εκτυπωμένων κομματιών

Συνοπτικά, το ταξίδι από ένα μοντέλο SolidWorks σε ένα 3D-εκτυπωμένο αντικείμενο περιλαμβάνει την εξαγωγή του σχεδίου ως αρχείο STL με κατάλληλες ρυθμίσεις ανάλυσης, τον τεμαχισμό του αρχείου STL στην Cura για τη δημιουργία Gcode και, τέλος, τη χρήση του Gcode για την καθοδήγηση του εκτυπωτή 3D στη δημιουργία του φυσικού αντικειμένου. Κάθε βήμα είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ακρίβειας, της ποιότητας και της επιτυχίας της διαδικασίας εκτύπωσης 3D.



Σχήμα 1 Διαδικασία κατασκευής

3.3 Εξαρτήματα υλικού - Hardware

3.3.1 Gimbal Motors

Τα iPower GM6208-150T brushless gimbal τριφασικά μοτεράκια επιλέχθηκαν για την υψηλή ροπή και την ομαλή λειτουργία τους. Αυτοί οι κινητήρες έχουν σχεδιαστεί ειδικά για εφαρμογές αντίζυγου, προσφέροντας ελάχιστο γρανάζι και υψηλή ακρίβεια, απαραίτητα για τη σταθεροποίηση της κάμερας. Σημαντικές δυνατότητες που έχουν απαραίτητα για το συγκεκριμένο gimbal είναι η υψηλή ροπή, πολλαπλά και σταθερά βήματα (steps) λόγω των είκοσι οκτώ πόλων, η χαμηλή κατανάλωση και το ικανοποιητικό βάρος τους.

Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

Περιγραφή	Εύρος	Μονάδα μέτρησης
<i>Μέγιστη κατανάλωση τάσης με φορτίο</i>	20	V
<i>Μέγιστη κατανάλωση ρεύματος με φορτίο</i>	1.2	A
<i>Μέγιστη κατάλυση ισχύς</i>	≤ 20	W
<i>Ροπή με φορτίο</i>	2600-3600	g/cm
<i>Βάρος</i>	249 ± 0.5	g
<i>Αυλακώσεις – υποδοχές [Slots]</i>	24	
<i>Πόλοι [Poles] σε ζευγάρια</i>	28	
<i>Ταχύτητα χωρίς φορτίο</i>	209-231	rpm

Πίνακας 2 Σημαντικά χαρακτηριστικά GM6208-150T από datasheet [10]

Συγκριτικά με μικρότερα μοτέρ GM3506 που δοκιμαστήκαν σε πρωταρχική φάση της ίδιας εταιρίας power αποδείχθηκαν πολύ πιο αδύναμα για τη συγκεκριμένη κατασκευή. Καθώς το φορτίο είναι μεγάλο και σε μεγάλη απόσταση συνεπώς απαιτούνταν μεγαλύτερη ροπή (βλέπε Εικόνα [46](#)).

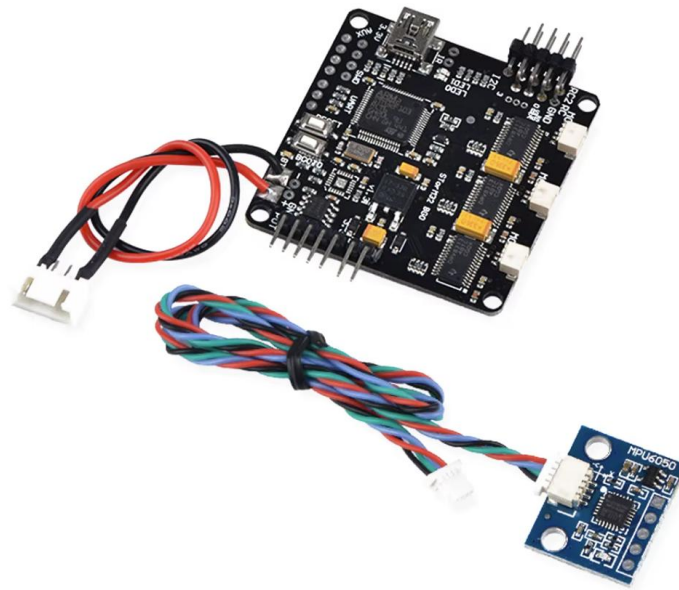
Περιγραφή	Εύρος	Μονάδα μέτρησης
<i>Μέγιστη κατανάλωση τάσης με φορτίο</i>	12	V
<i>Μέγιστη κατανάλωση ρεύματος με φορτίο</i>	1	A
<i>Μέγιστη κατάλυση ισχύς</i>	≤ 25	W
<i>Ροπή με φορτίο</i>	600-1000	g/cm
<i>Βάρος</i>	64 ± 0.2	g
<i>Αυλακώσεις – υποδοχές [Slots]</i>	24	
<i>Πόλοι [Poles] σε ζευγάρια</i>	22	
<i>Ταχύτητα χωρίς φορτίο</i>	2149-2375	rpm

Πίνακας 3 Σημαντικά χαρακτηριστικά GM3506 από datasheet [55]

3.3.2 Ελεγκτής του Gimbal

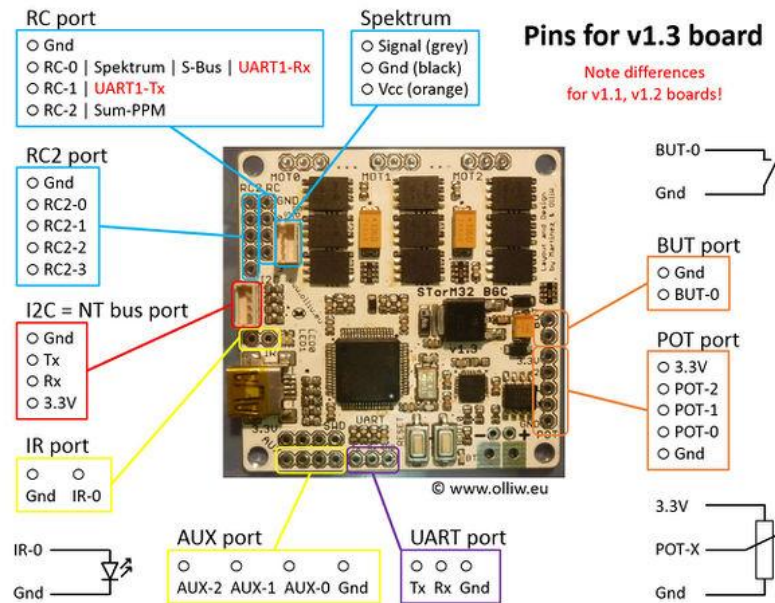
Ο ελεγκτής αντίζυγου χωρίς ψήκτρες (brushless) STorM32 v1.32 ξεχωρίζει στον τομέα των συστημάτων σταθεροποίησης κάμερας, ιδιαίτερα για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και προσαρμοστικότητα [2]. Αναπτύχθηκε από την OlliW, αυτός ο ελεγκτής αξιοποιεί έναν μικροελεγκτή STM32 32-bit για την αποτελεσματική διαχείριση της σταθεροποίησης 3 αξόνων. Το υλικολογισμικό (firmware) ανοιχτού κώδικα (open-source), o323BGC, προσφέρει στους χρήστες την ευελιξία να προσαρμόσουν και να ενσωματώσουν τον ελεγκτή με διάφορους αισθητήρες και πρωτόκολλα επικοινωνίας, ενισχύοντας την ευελιξία του σε διαφορετικές πλατφόρμες[9].

Ένα από τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά του STorM32 v1.32 είναι η υποστήριξή του για μια δεύτερη IMU, είτε επί του σκάφους είτε εξωτερική. Αυτή η διπλή διαμόρφωση IMU επεκτείνει το εύρος γωνίας και βελτιώνει την ακρίβεια, παρέχοντας απόλυτη σταθερότητα ακόμη και σε λειτουργίες μετατόπισης. Το υλικολογισμικό (firmware) περιλαμβάνει προσαρμοστική διόρθωση επιτάχυνσης για την ελαχιστοποίηση της μετατόπισης του ορίζοντα κατά τη διάρκεια ελιγμών υψηλής g και καθορίζει αυτόματα την κατεύθυνση του κινητήρα, απλοποιώντας τη διαδικασία ρύθμισης, ειδικά για τον άξονα περιστροφής. Επιπλέον, η μονάδα IMU/MPU6050 μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε από τους 24 πιθανούς προσανατολισμούς, με το γραφικό περιβάλλον να διευκολύνει την εύκολη διαμόρφωση.



Εικόνα 32 Storm32 v1.32 με IMU

Η συμβατότητα του χειριστηρίου με διάφορες μεθόδους εισόδου, όπως PWM, sum-PPM και joysticks, επιτρέπει τον ακριβή εξωτερικό έλεγχο του προσανατολισμού της κάμερας και στους τρεις άξονες. Οι χρήστες μπορούν να προσαρμόσουν τα όρια ταχύτητας και επιτάχυνσης ώστε να ταιριάζουν στις συγκεκριμένες ανάγκες της εφαρμογής. Επιπλέον, το STORM32 v1.32 υποστηρίζει λειτουργίες τηλεχειρισμού IR LED, συμπεριλαμβανομένης της απελευθέρωσης κλείστρου και της εναλλαγής βίντεο, και μπορεί να ενσωματωθεί με εντολές τύπου MAVLink για απομακρυσμένο έλεγχο κάμερας μέσω εφαρμογών.



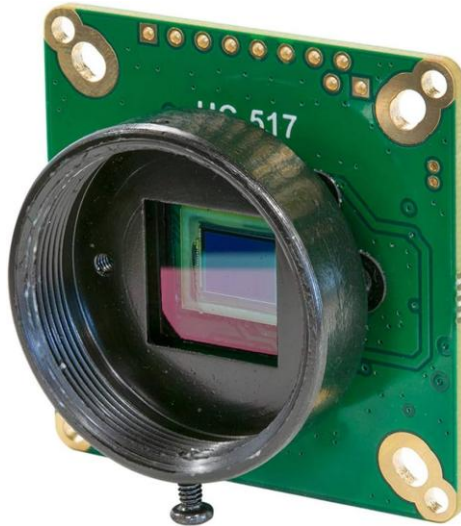
Εικόνα 33 Storm32 v1.32 pinout

Όσον αφορά το υλικό, το STorM32 v1.32 χρησιμοποιεί DRV8313 οδηγούς κινητήρων[17], οι οποίοι είναι γνωστοί για την αξιοπιστία και την απόδοσή τους. Η πλακέτα λειτουργεί με εύρος τροφοδοσίας 9-25V (3-6S), φιλοξενώντας διάφορες διαμορφώσεις ισχύος. Ο σχεδιασμός του περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως προστασία αντίστροφης τάσης και ισχυρό ρυθμιστή τάσης, εξασφαλίζοντας σταθερή λειτουργία υπό διαφορετικές συνθήκες.

Σε σύγκριση με άλλους ελεγκτές αντίζυγου, όπως τα συστήματα AlexMos / BaseCam, το STorM32 v1.32 προσφέρει μια οικονομικά αποδοτική λύση χωρίς συμβιβασμούς στην απόδοση. Η φύση του ανοιχτού κώδικα προωθεί μια προσέγγιση με γνώμονα την κοινότητα για την ανάπτυξη και την αντιμετώπιση προβλημάτων, παρέχοντας στους χρήστες πληθώρα πόρων και υποστήριξης. Η προσαρμοστικότητα του χειριστηρίου το καθιστά κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από αεροφωτογραφίες με drones έως ρυθμίσεις σταθεροποίησης κάμερας χειρός.

3.3.3 Camera Module

Η κάμερα υψηλής ποιότητας (HQ) του Raspberry Pi, που διαθέτει τον αισθητήρα IMX477 της Sony, αντιπροσωπεύει μια σημαντική πρόοδο στις δυνατότητες απεικόνισης για το οικοσύστημα του Raspberry Pi. Με ανάλυση 12,3 megapixel και μορφή αισθητήρα 1/2,3", προσφέρει βελτιωμένη ποιότητα εικόνας, ειδικά σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους pixel 1,55μm × 1,55μm [11].



Εικόνα 34 Arducam IMX477 12.3MP [45]

Σχεδιασμένη με γνώμονα την ευελιξία, η κάμερα HQ υποστηρίζει εναλλάξιμους φακούς μέσω βάσεων C και CS, ικανοποιώντας ένα ευρύ φάσμα φωτογραφικών απαιτήσεων. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στους χρήστες να επιλέγουν φακούς που ταιριάζουν καλύτερα στις συγκεκριμένες εφαρμογές τους, είτε πρόκειται για μακρο-φωτογραφία, ευρυγώνιες λήψεις ή τηλεφακό. Η ρυθμιζόμενη πίσω εστίαση της κάμερας ενισχύει περαιτέρω την προσαρμοστικότητά της, εξασφαλίζοντας ακριβή εστίαση σε διάφορους τύπους φακού.

Σε πρακτικές εφαρμογές, η κάμερα HQ υπερέχει σε σενάρια που απαιτούν απεικόνιση υψηλής ανάλυσης και προσαρμοστικότητα. Η συμβατότητά του με το οικοσύστημα του Raspberry Pi το καθιστά κατάλληλο για έργα που κυμαίνονται από βιομηχανικό αυτοματισμό και επιστημονική έρευνα έως δημιουργική φωτογραφία και βιντεοσκόπηση. Η ικανότητα της φωτογραφικής μηχανής να καταγράφει εικόνες RAW παρέχει στους χρήστες μεγαλύτερο έλεγχο της μετα-επεξεργασίας, απαραίτητη για εξόδους επαγγελματικής ποιότητας.

Για χρήστες που αναζητούν πρόσθετα χαρακτηριστικά, παραλλαγές όπως η Arducam 12MP Motorised Focus IMX477 HQ Camera προσφέρουν μηχανοκίνητο έλεγχο εστίασης, επιτρέποντας δυνατότητες απομακρυσμένης και ακριβούς εστίασης[11]. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα επωφελής σε εφαρμογές όπου η χειροκίνητη ρύθμιση εστίασης δεν είναι πρακτική.

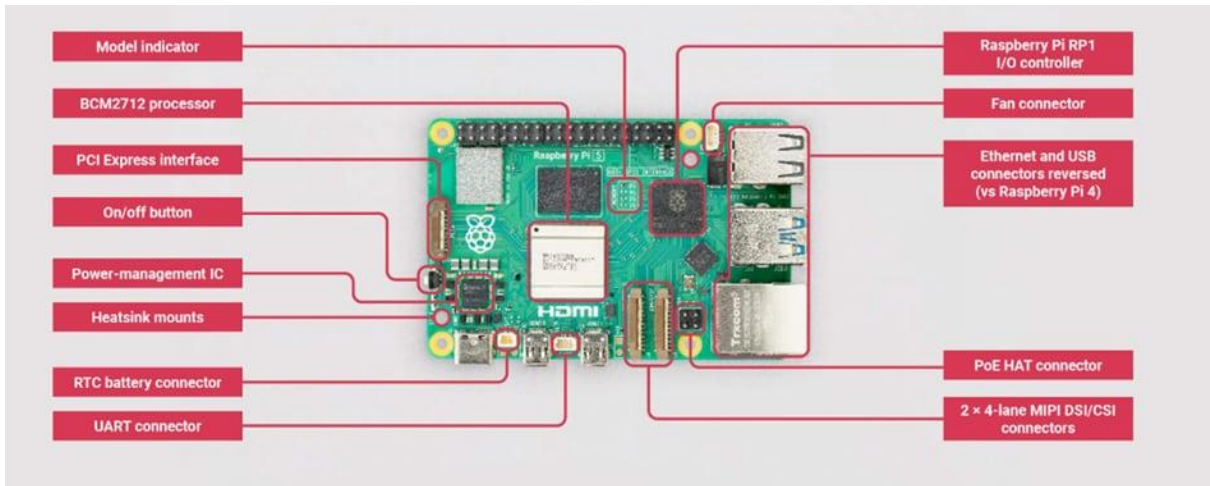
Συμπερασματικά, η κάμερα Raspberry Pi HQ με τον αισθητήρα IMX477 παρέχει μια ισχυρή και ευέλικτη λύση απεικόνισης, συνδυάζοντας δυνατότητες υψηλής ανάλυσης με την προσαρμοστικότητα που απαιτείται για πολλές εφαρμογές. Η ενσωμάτωσή του στην πλατφόρμα Raspberry Pi δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να αναπτύξουν εξελιγμένα έργα απεικόνισης με σχετική ευκολία.

3.3.4 Μονάδα επεξεργασίας

Το Raspberry Pi 5 αντιπροσωπεύει μια σημαντική εξέλιξη στη σειρά Raspberry Pi, προσφέροντας βελτιωμένη απόδοση και χαρακτηριστικά που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Βελτιωμένη απόδοση και αρχιτεκτονική

Στον πυρήνα του, το Raspberry Pi 5 τροφοδοτείται από έναν τετραπύρηνο επεξεργαστή Arm Cortex-A76 64-bit που λειτουργεί στα 2.4GHz, παρέχοντας αύξηση 2-3× στην απόδοση της CPU σε σύγκριση με τον προκάτοχό του, το Raspberry Pi 4. Αυτή η σημαντική ώθηση συμπληρώνεται από μια GPU VideoCore VII 800MHz, βελτιώνοντας την απόδοση γραφικών και υποστηρίζοντας διπλή έξοδο οθόνης 4Kp60 μέσω HDMI. Η ενσωμάτωση του τσιπ ελεγκτή εισόδου/εξόδου RP1, που έχει σχεδιαστεί εσωτερικά, βελτιστοποιεί περαιτέρω την απόδοση δεδομένων και την περιφερειακή συνδεσιμότητα[20].



Εικόνα 35 Raspberry pi 5 προδιαγραφές [46]

Συνδεσιμότητα και επέκταση

Το Raspberry Pi 5 εισάγει αρκετές βελτιώσεις συνδεσιμότητας, όπως:

- Δύο θύρες USB 3.0 και δύο θύρες USB 2.0 για ευέλικτες περιφερειακές συνδέσεις.
- Gigabit Ethernet με υποστήριξη PoE+ για αξιόπιστη συνδεσιμότητα δικτύου.
- Wi-Fi διπλής ζώνης 802.11ac και Bluetooth 5.0 για ασύρματη επικοινωνία.
- Δύο πομποδέκτες MIPI τεσσάρων λωρίδων για διεπαφές κάμερας και οθόνης.
- Διασύνδεση PCIe 2.0 μονής λωρίδας για πρόσθετη επεκτασιμότητα.

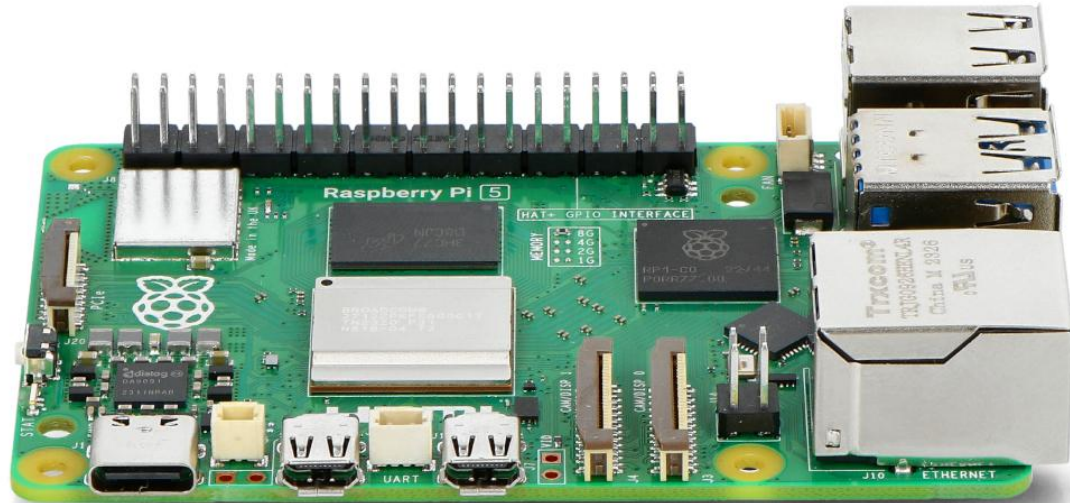
Φιλικά προς το χρήστη χαρακτηριστικά

Ανταποκρινόμενο στα σχόλια των χρηστών, το Raspberry Pi 5 ενσωματώνει ένα ενσωματωμένο ρολόι σε πραγματικό χρόνο (RTC) και ένα κουμπί ενεργοποίησης/απενεργοποίησης, ενισχύοντας τη χρηστικότητα για διάφορες εφαρμογές. Το RTC επιτρέπει στο σύστημα να διατηρεί ακριβή χρονομέτρηση, ακόμη και όταν είναι απενεργοποιημένο, υπό την προϋπόθεση ότι είναι συνδεδεμένη μια εξωτερική μπαταρία. Η προσθήκη ενός κουμπιού λειτουργίας απλοποιεί τη διαδικασία ασφαλούς τερματισμού λειτουργίας ή επανεκκίνησης του συστήματος [46].

Ευελιξία στις εφαρμογές

Με την ισχυρή απόδοση και το εκτεταμένο σύνολο χαρακτηριστικών, το Raspberry Pi 5 είναι κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως:

- Επιτραπέζιοι υπολογιστές (desktop) και κέντρα πολυμέσων.
- Έργα IoT και συστήματα οικιακού αυτοματισμού.
- Εκπαιδευτικά εργαλεία και πλατφόρμες προγραμματισμού.
- Συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου.
- Ανάπτυξη ρομποτικής και ενσωματωμένων συστημάτων.



Εικόνα 36 Raspberry pi 5 [20]

Είναι σημαντικό ότι η αυξημένη υπολογιστική ισχύς του Raspberry Pi 5 εισάγει νέους θερμικούς περιορισμούς. Σε αντίθεση με τους προκατόχους του, ο συνεχής φόρτος εργασίας μπορεί να οδηγήσει σε θερμικό στραγγαλισμό, εκτός εάν παρέχεται ενεργή ψύξη (π.χ. ψύκτρες, ανεμιστήρες). Επιπλέον, το νέο σύστημα παροχής ισχύος της πλατφόρμας επιβάλλει υψηλότερη βαθμολογία ρεύματος - συνήθως 5V στα 5A - απαιτώντας μια συμβατή πηγή τροφοδοσίας USB-C για να διασφαλιστεί η σταθερότητα του συστήματος υπό πλήρες φορτίο.

Η συμβατότητά του με τα υπάρχοντα αξεσουάρ και HAT του Raspberry Pi εξασφαλίζει μια απρόσκοπτη μετάβαση για τους χρήστες που αναβαθμίζουν από προηγούμενα μοντέλα.

3.4 Ανάπτυξη Λογισμικού

3.4.1 Εγκατάσταση λογισμικού Raspberry Pi OS στο Raspberry Pi 5

Το Raspberry Pi 5, ως η τελευταία έκδοση της ευρέως υιοθετημένης πλατφόρμας Raspberry Pi, προσφέρει σημαντικές εξελίξεις στην απόδοση, τη συνδεσιμότητα και την επέκταση της διεπαφής. Για να αξιοποιηθούν αυτές οι δυνατότητες, πρέπει να αναπτυχθεί ένα σταθερό και συμβατό λειτουργικό σύστημα — συνήθως, το επίσημα υποστηριζόμενο λειτουργικό σύστημα Raspberry Pi, μια διανομή Linux που βασίζεται στο Debian ειδικά βελτιστοποιημένη για την αρχιτεκτονική υλικού των συσκευών Raspberry Pi.

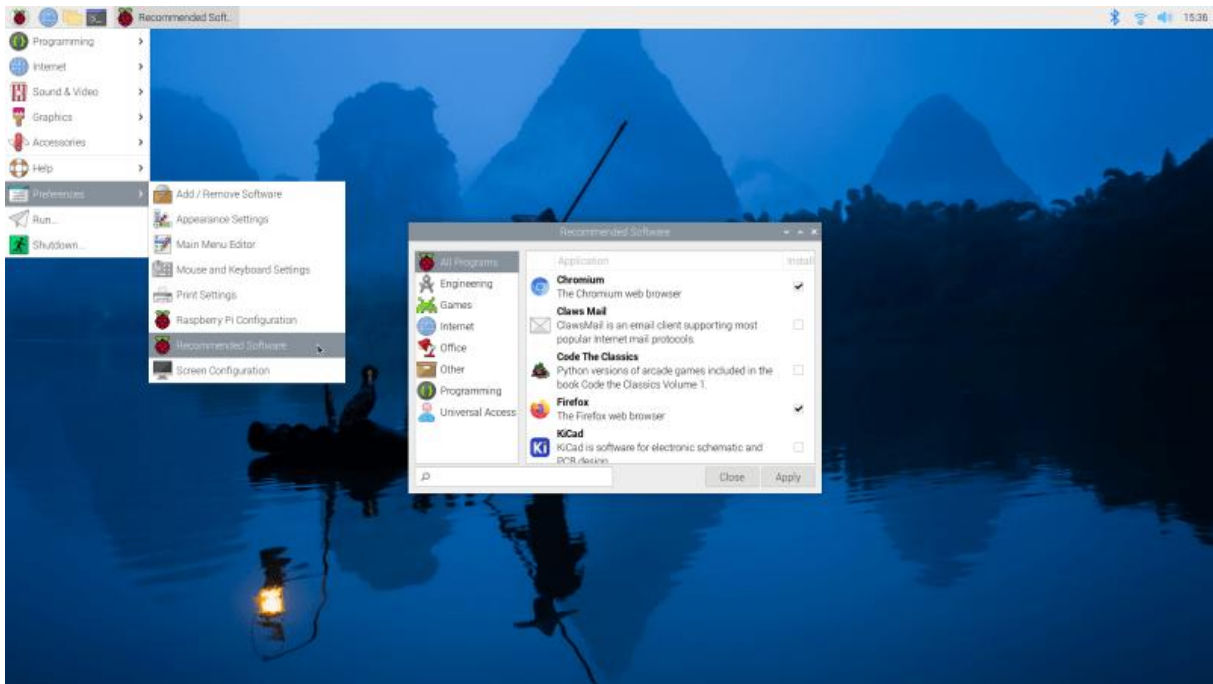
Η ανάπτυξη του λειτουργικού συστήματος στο Raspberry Pi 5 περιλαμβάνει μια προπαρασκευαστική φάση όπου μια εικόνα συστήματος με δυνατότητα εκκίνησης γράφεται σε μια κάρτα microSD υψηλής ταχύτητας. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα μοντέλα, το Raspberry Pi 5 εισάγει αρκετές αρχιτεκτονικές αλλαγές που απαιτούν ενημερωμένο υλικολογισμικό (firmware), υποστήριξη πυρήνα και θερμική διαχείριση. Ως εκ τούτου, η επιλογή μιας έκδοσης λειτουργικού συστήματος που υποστηρίζει πυρήνα Linux 6.1 ή νεότερη έκδοση είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση πλήρους συμβατότητας υλικού, ειδικά για στοιχεία όπως περιφερειακά που βασίζονται σε PCIe, ενημερωμένη διαχείριση ενέργειας και εισόδου/εξόδου υψηλής ταχύτητας [20].

Για τον εξορθολογισμό αυτής της διαδικασίας ανάπτυξης, το Raspberry Pi Foundation παρέχει ένα επίσημο βοηθητικό πρόγραμμα επιφάνειας εργασίας — το Raspberry Pi Imager — το οποίο περιλαμβάνει την επιλογή λειτουργικού συστήματος, τη μορφοποίηση κάρτας, τη ρύθμιση χρήστη και τις επιλογές προ-διαμόρφωσης (π.χ. ρυθμίσεις δικτύου και πρόσβαση SSH). Αυτή η σύγχρονη ροή εργασίας αντικαθιστά τις μεθόδους παλαιού τύπου που περιλαμβάνουν μη αυτόματη αναλαμπή εικόνας και διαμόρφωση μετά την εγκατάσταση, βελτιώνοντας την αναπαραγωγικότητα και την προσβασιμότητα, ιδιαίτερα για απομακρυσμένες ή ακέφαλες αναπτύξεις [46].



Εικόνα 37 Raspberry pi Imager

Μόλις αναπτυχθεί το image και τροφοδοτηθεί η συσκευή, το σύστημα υποβάλλεται σε μια ακολουθία αρχικοποίησης, κατά την οποία εκτελεί επέκταση συστήματος αρχείων, διαμόρφωση τοπικών ρυθμίσεων και ρύθμιση υπηρεσίας συστήματος. Στο λειτουργικό σύστημα Raspberry Pi με γραφική διεπαφή (Interphase), αυτό περιλαμβάνει ένα διαδραστικό βοηθητικό πρόγραμμα ενσωμάτωσης που καθοδηγεί τους χρήστες μέσω της ρύθμισης Wi-Fi, της δημιουργίας χρηστών και των ενημερώσεων λογισμικού. Στις εκδόσεις headless ή Lite, η διαμόρφωση συνήθως προχωρά μέσω πρόσβασης τερματικού, συχνά μέσω SSH, ειδικά σε ενσωματωμένα περιβάλλοντα όπως η ρομποτική ή τα υποσυστήματα UAV.



Εικόνα 38 Raspberry pi OS Επιφάνεια εργασίας και διεπαφή χρήστη

Από την άποψη της ανάπτυξης, το πρόσφατα εγκατεστημένο λειτουργικό σύστημα Raspberry Pi χρησιμεύει ως βάση για περαιτέρω προσαρμογή, συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης βιβλιοθηκών ελέγχου, προγραμμάτων οδήγησης υλικού και περιβαλλόντων χρόνου εκτέλεσης που είναι απαραίτητα για εφαρμογές όπως ο έλεγχος αντίζυγου, η ενσωμάτωση αισθητήρων ή τα συστήματα παρακολούθησης που βασίζονται στην όραση. Με πλήρη υποστήριξη για Python, C / C ++ και άλλα τυπικά εργαλεία, το λειτουργικό σύστημα επιτρέπει την ταχεία ανάπτυξη και δοκιμή τόσο σε αυτόνομα όσο και σε δικτυωμένα περιβάλλοντα.

3.4.2 Πρωτόκολλο επικοινωνίας

Ένα σενάριο βασισμένο σε Python αναπτύχθηκε για να διευκολύνει τη σειριακή επικοινωνία μεταξύ του Raspberry Pi και του ελεγκτή Storm32. Αυτό το σενάριο στέλνει εντολές ελέγχου και λαμβάνει δεδομένα ανατροφοδότησης, επιτρέποντας προσαρμογές σε πραγματικό χρόνο στον προσανατολισμό του gimbal. Επιτρέπει στους χρήστες να ορίζουν γωνίες στόχου για roll, pitch, yaw, ροή γωνιών PID σε πραγματικό χρόνο και επανεκκίνηση του χειριστηρίου. Το σενάριο αξιοποιεί το σειριακό πρωτόκολλο STorM32, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα την εντολή CMD_SETANGLES (αναγνωριστικό εντολής 0x11), για την αποστολή εντολών γωνίας στο gimbal.

▪ Διαχείριση σειριακής θύρας

```
# List available serial ports
def list_ports() -> list:
    ports = serial.tools.list_ports.comports()
    devices = []
    print("Available ports:")
    for i, port in enumerate(ports):
        print(f" {i}: {port.device} ({port.description})")
        devices.append(port.device)
    return devices

# Choose a port
def choose_port(ports):
    while True:
        try:
            return ports[int(input("Select port index: "))]
        except (ValueError, IndexError):
            print("Invalid index, try again.")

# Connect to serial
def connect(port, baudrate=115200, timeout=1):
    return serial.Serial(port, baudrate=baudrate, timeout=timeout)
```

Function: list_ports()

Αυτή η λειτουργία απαριθμεί όλες τις διαθέσιμες σειριακές θύρες στο κεντρικό σύστημα χρησιμοποιώντας το `serial.tools.list_ports.comports()`. Εκτυπώνει το ευρετήριο, το όνομα συσκευής και την περιγραφή κάθε θύρας, επιστρέφοντας μια λίστα ονομάτων συσκευών για επιλογή χρήστη.

Function: choose_port(ports)

Ζητά από το χρήστη να επιλέξει μια σειριακή θύρα εισάγοντας το αντίστοιχο ευρετήριο. Χειρίζεται μη έγκυρες εισόδους εντοπίζοντας `ValueError` και `IndexError`, προτρέποντας τον χρήστη μέχρι να γίνει έγκυρη επιλογή.

Function: connect(port, baudrate=115200, timeout=1)

Δημιουργεί μια σειριακή σύνδεση στην καθορισμένη θύρα με προεπιλεγμένο ρυθμό baud 115200 bps και χρονικό όριο 1 δευτερολέπτου. Επιστρέφει μια σειρά. Σειριακό αντικείμενο που αντιπροσωπεύει τη σύνδεση.

▪ Χειρισμός πακέτων και αποδικοποίηση γωνίας

```
# Read exactly Length bytes, handling timeouts
def read_exact(ser, Length):
    data = b''
    while len(data) < Length:
        chunk = ser.read(Length - len(data))
        if not chunk:
            continue
        data += chunk
    return data

# Read fixed-length packet for PID angles: 64-byte payload + 2 CRC + 'o'
def read_packet(ser):
    packet = read_exact(ser, 67)
    if packet[-1:] != b'o':
        raise IOError("Invalid terminator: missing 'o'")
    return packet

# Decode PID angles from payload indices 16,17,18 (0.01° units)
def decode_pid_angles(packet):
    payload = packet[:64]
    pitch_raw = struct.unpack_from('<h', payload, 16*2)[0]
    roll_raw = struct.unpack_from('<h', payload, 17*2)[0]
    yaw_raw = struct.unpack_from('<h', payload, 18*2)[0]
    return pitch_raw / 100.0, roll_raw / 100.0, yaw_raw / 100.0
```

Function: read_exact(ser, length)

Διαβάζει έναν ακριβή αριθμό byte (μήκος) από τη σειριακή θύρα ser. Συνεχίζει την ανάγνωση μέχρι να ληφθεί ο επιθυμητός αριθμός byte, χειριζόμενος πιθανά χρονικά όρια με βρόχο μέχρι την ολοκλήρωση.

Function: read_packet(ser)

Διαβάζει ένα πακέτο σταθερού μήκους από τη σειριακή θύρα, αναμένοντας 67 byte: ωφέλιμο φορτίο 64 byte, CRC 2 byte και τερματιστή 1 byte ('o'). Επικυρώνει το πακέτο ελέγχοντας τον τερματιστή και εμφανίζει ένα IOError εάν ο τερματιστής λείπει ή είναι λανθασμένος.

Function: decode_pid_angles(packet)

Εξάγει και αποκωδικοποιεί τις γωνίες κλίσης, κύλισης και περιστροφής από το ωφέλιμο φορτίο του πακέτου. Χρησιμοποιεί struct.unpack_from για να διαβάσει υπογεγραμμένους ακεραίους 16-bit από συγκεκριμένες μετατοπίσεις (δείκτες 16, 17 και 18) στο ωφέλιμο φορτίο, διαιρώντας το καθένα με το 100,0 για μετατροπή από βαθμούς εκατοντάδων σε μοίρες.

▪ **Μετάδοση εντολών - Command Transmission**

```
# CRC-16 X25 for setangles
def crc_x25(buf: bytes) -> int:
    crc = 0xFFFF
    for b in buf:
        crc ^= b << 8
        for _ in range(8):
            if crc & 0x8000:
                crc = (crc << 1) ^ 0x1021
            else:
                crc <<= 1
        crc &= 0xFFFF
    return crc ^ 0xFFFF

# Send CMD_SETANGLES (#17)
def send_set_angles(ser, pitch, roll, yaw):
    payload = struct.pack('<fffBB', pitch, roll, yaw, 0, 0)
    header = bytes([0xFA, len(payload), 0x11])
    crc = crc_x25(bytes([len(payload), 0x11]) + payload)
    ser.write(header + payload + struct.pack('<H', crc))

# Send 'xx' then toggle DTR to restart controller
def restart_board(ser):
    print("Sending 'xx' and restarting controller...")
    ser.write(b'xx')
    time.sleep(0.1)
    ser.dtr = False
    time.sleep(0.1)
    ser.dtr = True
    time.sleep(0.1)
    print("Restart controller... DONE!")
```

Function: crc_x25(buf: bytes) -> int

Υπολογίζει το άθροισμα ελέγχου CRC-16 X.25 για το δεδομένο buf buffer byte. Αυτό το άθροισμα ελέγχου χρησιμοποιείται για τη διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων στην εντολή CMD_SETANGLES, ευθυγραμμιζόμενο με τις απαιτήσεις του πρωτοκόλλου STorM32.

Function: send_set_angles(ser, pitch, roll, yaw)

Κατασκευάζει και στέλνει την εντολή CMD_SETANGLES (command ID 0x11) στο gimbal. Συσκευάζει τις γωνίες κλίσης, κύλισης και περιστροφής ως επιπλέον 32-bit, προσθέτει δύο μηδενικά byte (δεσμευμένα) και υπολογίζει το CRC πάνω από το ωφέλιμο φορτίο. Το πλήρες μήνυμα, συμπεριλαμβανομένης της κεφαλίδας, του ωφέλιμου φορτίου και του CRC, εγγράφεται στη σειριακή θύρα.

Function: restart_board(ser)

Στέλνει την εντολή 'xx' στον ελεγκτή αντίζυγου και εναλλάσσει τη γραμμή Data Terminal Ready (DTR) για να ξεκινήσει μια επαναφορά υλικού. Αυτή η ακολουθία επιτρέπει την απομακρυσμένη επανεκκίνηση του ελεγκτή χωρίς χειροκίνητη παρέμβαση.

▪ Ροή γωνίας σε πραγματικό χρόνο - Real-Time Angle Streaming

```
# Thread to stream PID angles via read_packet
class AnglePrinter(threading.Thread):
    def __init__(self, ser, stop_event):
        super().__init__(daemon=True)
        self.ser = ser
        self.stop_event = stop_event

    def run(self):
        print("Streaming PID angles. Type 'sangles' to stop.")
        while not self.stop_event.is_set():
            try:
                self.ser.reset_input_buffer()
                self.ser.write(b'd')
                packet = read_packet(self.ser)
                pitch, roll, yaw = decode_pid_angles(packet)
                print(f"PID → Pitch: {pitch:.2f}°, Roll: {roll:.2f}°, Yaw: {yaw:.2f}°")
            except Exception:
                time.sleep(0.1)
            time.sleep(0.1)
        print("Stopped PID angle streaming.")

if __name__ == '__main__':
    ports = list_ports()
    if not ports:
        print("No serial ports found.")
        exit(1)
    port = choose_port(ports)
    ser = connect(port)
    print(f"Connected to {port} at 115200 baud.")

    target = {'pitch': 0.0, 'roll': 0.0, 'yaw': 0.0}
    angle_event = threading.Event()
    angle_thread = None
```

Class: AnglePrinter(threading.Thread)

Μια κλάση νήματος δαίμονα (daemon thread) που διαβάζει και εμφανίζει συνεχώς τις γωνίες PID του gimbal.

- **__init__(self, ser, stop_event):** Προετοιμάζει το νήμα με το ser σειριακής σύνδεσης και ένα συμβάν νήματος stop_event για τον έλεγχο της εκτέλεσης του νήματος.
- **run(self):** Σε βρόχο, στέλνει την εντολή 'd' για να ζητήσει δεδομένα PID, διαβάζει το πακέτο απόκρισης, αποκωδικοποιεί τις γωνίες και τις εκτυπώνει. Ο βρόχος συνεχίζεται μέχρι να ρυθμιστεί stop_event, επιτρέποντας τον χαριτωμένο τερματισμό.

▪ **Κύρια ροή εκτέλεσης – Main execution flow**

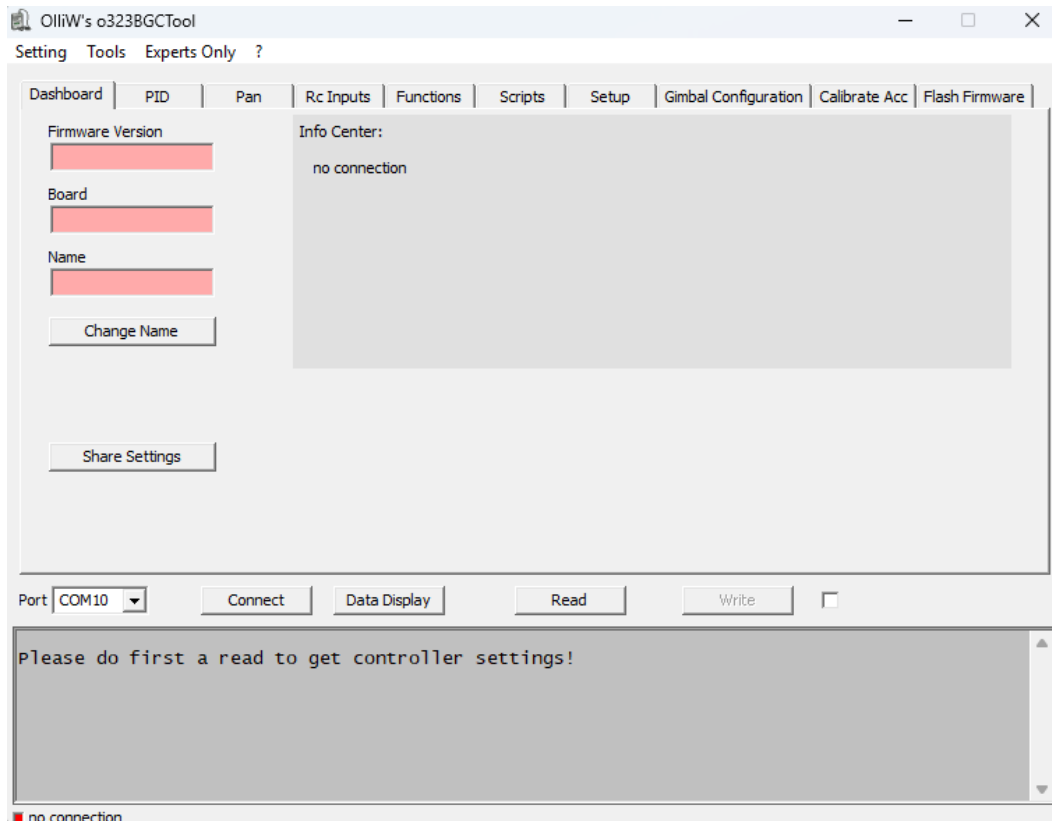
Κατά την εκτέλεση, το σενάριο παραθέτει τις διαθέσιμες σειριακές θύρες και ζητά από το χρήστη να επιλέξει μία. Στη συνέχεια δημιουργεί μια σύνδεση με την επιλεγμένη θύρα και εισέρχεται σε έναν βρόχο εντολών, αποδεχόμενο εισόδους χρηστών για τον έλεγχο του gimbal:

- **r<pitch>, p<roll>, y<yaw>**: Ορίζει τον αντίστοιχο άξονα στην καθορισμένη γωνία.
- **000**: Επαναφέρει όλους τους άξονες σε 0 μοίρες.
- **angles**: Ξεκινά τη ροή γωνιών PID σε πραγματικό χρόνο.
- **sangles**: Διακόπτει τη ροή γωνίας PID σε πραγματικό χρόνο.
- **custom**: Εισέρχεται σε μια κατάσταση όπου ο χρήστης μπορεί να στείλει προσαρμοσμένες εντολές απευθείας στο gimbal.
- **restart**: Επανεκκινεί τον ελεγκτή αντίζυγου.
- **q**: Έξοδος από το πρόγραμμα.

Το σενάριο αναλύει εντολές πολλαπλών γωνιών χρησιμοποιώντας κανονικές εκφράσεις, επιτρέποντας στους χρήστες να εισάγουν πολλαπλές ρυθμίσεις γωνίας σε μία γραμμή (π.χ. p30 r15 y45). Διασφαλίζει ότι γίνεται επεξεργασία μόνο έγκυρων εντολών και παρέχει σχόλια για μη έγκυρες εισόδους.

3.4.3 Εφαρμογή αλγορίθμου ελέγχου PID

Στον τομέα της σταθεροποίησης του αντίζυγου, ο ελεγκτής αναλογικού-ολοκληρωματικού-παραγώγου (proportional integral derivative - PID) χρησιμεύει ως ακρογωνιαίος λίθος για την επίτευξη ακριβούς και ανταποκρινόμενου ελέγχου σε κάθε άξονα – pitch roll yaw . Κάθε άξονας λειτουργεί με το δικό του βρόχο PID, ρυθμίζοντας συνεχώς τις εξόδους του κινητήρα για να ελαχιστοποιήσει την ασυμφωνία μεταξύ του επιθυμητού προσανατολισμού (σημείο ρύθμισης) και της πραγματικής θέσης (μεταβλητή διαδικασίας)[8]. Ο ελεγκτής PID υπολογίζει τις διορθωτικές ενέργειες με βάση τρεις διακριτές συνιστώσες: τον αναλογικό όρο (K_p), ο οποίος αντιμετωπίζει το παρόν σφάλμα. ο ακέραιος όρος (K_i), ο οποίος αντιπροσωπεύει τη συσσώρευση σφαλμάτων του παρελθόντος. και τον παράγωγο όρο (K_d), ο οποίος προβλέπει μελλοντικές τάσεις σφάλματος με βάση τον τρέχοντα ρυθμό μεταβολής.



Εικόνα 39 OlliW's Storm32 BGC software

Η προσαρμογή της παραμέτρου K_p επηρεάζει την ανταπόκριση του συστήματος στα τρέχοντα σφάλματα. Μια υψηλότερη τιμή K_p οδηγεί σε μια πιο επιθετική διόρθωση, οδηγώντας ενδεχομένως σε ταχύτερη σταθεροποίηση αλλά και αυξάνοντας τον κίνδυνο υπέρβασης και ταλαντώσεων. Αντίθετα, ένα χαμηλότερο K_p μπορεί να αποφέρει μια πιο σταθερή αλλά υποτονική απόκριση. Η παράμετρος K_i διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην εξάλειψη σφαλμάτων σταθερής κατάστασης ενσωματώνοντας προηγούμενες αποκλίσεις με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, το υπερβολικό K_i μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα, οδηγώντας σε συνεχείς ταλαντώσεις. Η παράμετρος K_d παρέχει ένα αποτέλεσμα απόσβεσης λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό με τον οποίο αλλάζει το σφάλμα, προβλέποντας έτσι μελλοντικά σφάλματα. Ενώ ένα κατάλληλο K_d μπορεί να ενισχύσει τη σταθερότητα του συστήματος και να μειώσει την υπέρβαση, ένα υπερβολικά υψηλό K_d μπορεί να εισαγάγει ευαισθησία στο θόρυβο και ακανόνιστη συμπεριφορά.

Η βαθμονόμηση των παραμέτρων PID ενός gimbal περιλαμβάνει μια συστηματική προσέγγιση για τη ρύθμιση αυτών των τριών στοιχείων για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης. Μια κοινή μέθοδος ξεκινά με τη ρύθμιση όλων των κερδών PID στο μηδέν και, στη συνέχεια, αυξάνοντας σταδιακά το K_p έως ότου το σύστημα παρουσιάσει μια συμπεριφορά απόκρισης χωρίς υπερβολική υπέρβαση. Στη συνέχεια, το K_i προσαρμόζεται για να εξάλειψει τυχόν υπολειπόμενο σφάλμα σταθερής κατάστασης, διασφαλίζοντας ότι το αντίζυγο διατηρεί την προβλεπόμενη θέση του με την πάροδο του χρόνου. Τέλος, το K_d είναι ρυθμισμένο για να αμβλύνει τυχόν ταλαντώσεις και να βελτιώσει την απόκριση του συστήματος σε γρήγορες κινήσεις ή διαταραχές [6]. Καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, είναι σημαντικό να παρακολουθείτε στενά τη συμπεριφορά του gimbal, κάνοντας σταδιακές προσαρμογές και παρατηρώντας τις επιπτώσεις στη σταθερότητα, την ανταπόκριση και την ακρίβεια [7].

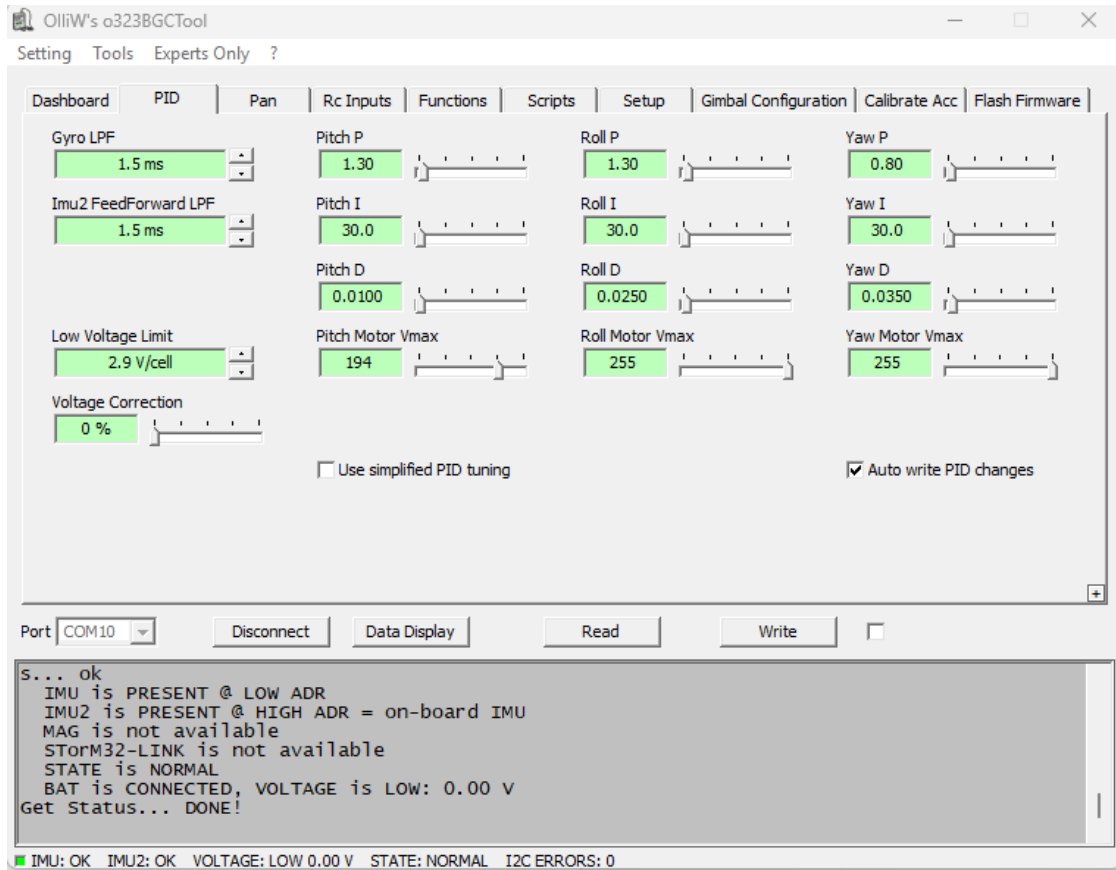
Αναλυτικότερα τα προτεινόμενα βήματα που χρησιμοποιούνται για την εύρεση των βέλτιστων μεταβλητών K_p K_i K_d από τον κατασκευαστή του storm32 είναι [12] :

- a. **Εξασφάλιση σωστής μηχανικής ισορροπίας:** Πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε διαδικασία ρύθμισης PID, είναι ουσιαστικής σημασίας να διασφαλιστεί ότι το gimbal είναι σωστά ισορροπημένο. Αυτό περιλαμβάνει τη σωστή τοποθέτηση της κάμερας, έτσι ώστε το κέντρο βάρους της να ευθυγραμμίζεται με τους άξονες περιστροφής. Η σωστή εξισορρόπηση μειώνει την καταπόνηση των κινητήρων και συμβάλλει σημαντικά στη σταθερή λειτουργία του συστήματος.
- b. **Αρχικοποίηση παραμέτρων PID:** Η διαδικασία συντονισμού ξεκινά με τις παραμέτρους PID να τίθενται είτε στο μηδέν είτε σε τιμές που προτείνονται από τον κατασκευαστή. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει ένα ασφαλές σημείο εκκίνησης και επιτρέπει πιο ελεγχόμενες ρυθμίσεις κατά την πορεία.
- c. **Προσαρμογή του κέρδους παραγώγου (D):** Σε αυτό το στάδιο, η τιμή της παραμέτρου D αυξάνεται σταδιακά. Ο όρος αυτός βοηθά στον περιορισμό των ταλαντώσεων, καθώς "προβλέπει" πώς εξελίσσεται το σφάλμα. Η αύξηση συνεχίζεται μέχρι να εμφανιστούν σημάδια υπερβολικού θορύβου ή γρήγορων κραδασμών, οπότε και γίνεται μια μικρή μείωση για να εξομαλυνθεί η λειτουργία.
- d. **Ρύθμιση του αναλογικού κέρδους (P):** Αφού σταθεροποιηθεί το D, προχωρά η ρύθμιση του P. Η παράμετρος αυτή επηρεάζει την άμεση αντίδραση του συστήματος στο σφάλμα. Η αύξηση της τιμής του P οδηγεί σε ταχύτερη απόκριση, αλλά αν παρατηρηθούν ταλαντώσεις ή υπερβάσεις, μια ελαφριά μείωση μπορεί να εξισορροπήσει τη συμπεριφορά του gimbal.
- e. **Ορισμός του ακέραιο κέρδους (I):** Το I συμβάλλει στη διόρθωση σταθερών αποκλίσεων που παραμένουν με το πέρασμα του χρόνου. Η αύξηση της τιμής του πρέπει να γίνεται με προσοχή, αφού υπερβολικά υψηλές τιμές μπορεί να προκαλέσουν καθυστερημένες αντιδράσεις ή ακόμη και αστάθεια.
- f. **Δοκιμή και επανάληψη:** Αφού έχουν ρυθμιστεί όλες οι παράμετροι, η συμπεριφορά του gimbal αξιολογείται κατά την κίνησή του σε πραγματικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης γίνονται λεπτομερείς παρατηρήσεις και τυχόν μικρορυθμίσεις, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή απόδοση.
- g. **Επανάληψη για κάθε άξονα:** Κάθε άξονας (pitch, roll, yaw) ρυθμίζεται ανεξάρτητα. Αυτή η πρακτική αποτρέπει αλληλεπιδράσεις μεταξύ των αξόνων και διασφαλίζει πιο ακριβή και σταθερό έλεγχο.
- h. **Αποθήκευση τη διαμόρφωση:** Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία και οι ρυθμίσεις είναι ικανοποιητικές, καταχωρούνται μόνιμα στον ελεγκτή του gimbal. Με αυτόν τον τρόπο, η ρύθμιση παραμένει σταθερή και δεν χάνεται με επανεκκινήσεις ή αλλαγές λειτουργίας.

Στην πράξη, η διαδικασία συντονισμού μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τη χρήση εργαλείων λογισμικού ή διεπαφών υλικολογισμικού (firmware) που παρέχονται από κατασκευαστές αντίζυγου, επιτρέποντας προσαρμογές και ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο. Αυτά τα εργαλεία προσφέρουν συχνά οπτικοποίηση των μετρήσεων απόδοσης του gimbal, βοηθώντας στον προσδιορισμό των βέλτιστων ρυθμίσεων PID. Επιπλέον, ορισμένα προηγμένα συστήματα ενδέχεται να ενσωματώνουν προσαρμοστικούς ή αυτορυθμιζόμενους αλγόριθμους PID που προσαρμόζουν αυτόματα τις

παραμέτρους ως απόκριση στις μεταβαλλόμενες συνθήκες ή ωφέλιμα φορτία, ενισχύοντας περαιτέρω την ευελιξία και την απόδοση του gimbal [48].

Στην προκειμένη περίπτωση του Storm32 ο κατασκευαστής έχει open source δικό του firmware για την διευκόλυνση των χρηστών στη άμεση διαμόρφωση του PID συστήματος του εκαστου άξονα.



Εικόνα 40 Olliw's Storm32 BGC software PID tab

Στην παραπάνω επισυναπτόμενη εικόνα διακρίνονται οι μεταβλητές P, I, D κατακόρυφα του κάθε άξονα που αντιστοιχούν στα κέρδη K_p , K_i , K_d του συστήματος. Επιπλέον, παρατηρείται ότι για το κάθε μοτέρ έχει οριστεί ένα offset μέγιστης τάσης Motor Vmax οπότε 255 θεωρείται η μέγιστη τιμή τάσης της κυματογραφής SPWM ή SVPWM. Ακόμα για μεγαλύτερη διευκόλυνση του χρήστη έχει την επιλογή για Auto-write αυτόματης εναλλαγής του PID με κάθε αλλαγή τιμής ή μπάρας των μεταβλητών p, i, d, vmax.

Ο έλεγχος του συντονισμού PID για συστήματα αντίζυγου απαιτεί ισορροπία μεταξύ θεωρητικής κατανόησης και πρακτικού πειραματισμού. Αναλύοντας διεξοδικά τα αποτελέσματα κάθε στοιχείου PID και προσαρμόζοντας μεθοδικά τις παραμέτρους, μπορεί κανείς να επιτύχει ένα καλά ρυθμισμένο αντίζυγο που παρέχει ομαλό, σταθερό και ακριβή έλεγχο κίνησης σε όλους τους άξονες.

3.5 Ενοποίηση συστήματος

Η ενσωμάτωση μηχανικών, ηλεκτρικών και λογισμικών εξαρτημάτων πραγματοποιήθηκε σχολαστικά για να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία. Το Raspberry Pi διαμορφώθηκε για εκκίνηση του python script ελέγχου κατά την εκκίνηση, δημιουργώντας επικοινωνία με τον ελεγκτή Storm32 και ξεκινώντας τη διαδικασία σταθεροποίησης. Η διανομή ισχύος κατάφερε να παρέχει κατάλληλες τάσεις στον ελεγκτή αντίζυγίου και τους κινητήρες, ενώ το raspberry pi πειραματικά έχει δικό του τροφοδοτικό. Σε μελλοντική ανάπτυξη ο μικρό υπολογιστής αυτός είναι ικανός να τροφοδοτηθεί από ένα Πίνακα Διανομής Ισχύος (Power Distribution Board - PDB) συνδεδεμένο με μπαταρία, μέσω των pin 5V και έως 5A συνολικά 25W [20], ώστε να λειτουργεί σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Αντίστοιχα, το storm32 μπορεί να προμηθευτεί απευθείας την τάση από είτε από μπαταρία 2S με 4S, δηλαδή έως 16.8V στη μέγιστη φόρτιση, είτε σταθερή και προτιμητέα τάση 18V επίσης από τον Πίνακα Διανομής Ισχύος.

3.6 Δοκιμή και επικύρωση

Το συναρμολογημένο σύστημα αντίζυγιο υποβλήθηκε σε αυστηρές δοκιμές για να αξιολογηθεί η απόδοσή του. Η αποτελεσματικότητα της σταθεροποίησης αξιολογήθηκε υποβάλλοντας το drone σε διάφορες κινήσεις και παρατηρώντας την ικανότητα της κάμερας να διατηρεί σταθερό προσανατολισμό. Το σύστημα επέδειξε ικανοποιητική απόδοση, αντισταθμίζοντας αποτελεσματικά τις κινήσεις του drone και διατηρώντας τη σταθερότητα της κάμερας.

Η σύνδεση με τον υπολογιστή μέσω Serial ήταν ακαριαία και λειτουργική από την πρώτη στιγμή. Η επικοινωνία μεταξύ τους είναι άριστη και πλήρως ελεγχόμενη από τον υπολογιστή μέσω του python script. Ο χρήστης είναι σε θέση να τερματίσει οποιαδήποτε στιγμή κάποια λανθασμένη διαταγή εκτέλεσης, να σταματήσει το gimbal σε περίπτωση βλάβης.

Το python script είναι πλήρης στη βασική λειτουργία, δηλαδή την αλλαγή των γωνιών του αντίζυγιο και το διάβασμα των πραγματικών γονιών μέσω της ανάδρασης. Διαθέτει επιπλέον χαρακτηριστικά για αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων, ρυθμίσεις για προχωρημένους και την επανεκκίνηση του.

3.7 Επίλογος

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει λεπτομερώς την ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδιασμού και εφαρμογής ενός συστήματος αντίζυγιο 3 αξόνων για drones. Μέσω προσεκτικής επιλογής εξαρτημάτων, σχολαστικού μηχανικού σχεδιασμού και ισχυρής ανάπτυξης λογισμικού, υλοποιήθηκε ένα λειτουργικό και αποτελεσματικό σύστημα αντίζυγιο. Η ενσωμάτωση αυτών των στοιχείων κορυφώθηκε σε ένα σύστημα ικανό να παρέχει σταθερή και υψηλής ποιότητας απεικόνιση σε δυναμικά εναέρια περιβάλλοντα.

Κεφάλαιο 4ο: Οπτική Αναγνώριση και Επέκταση Ελέγχου Gimbal με API

4.1 Εισαγωγή

Καθώς τα συστήματα σταθεροποίησης τύπου gimbal εξελίσσονται, δεν περιορίζονται πλέον μόνο στην παθητική εξομάλυνση κραδασμών ή στη διατήρηση μιας προκαθορισμένης γωνιακής θέσης. Στη σύγχρονη εποχή της υπολογιστικής όρασης και της τεχνητής νοημοσύνης, η δυνατότητα ενός gimbal να ανταποκρίνεται δυναμικά σε δεδομένα οπτικής αναγνώρισης, ανοίγει νέους ορίζοντες στις εφαρμογές του — ιδιαίτερα σε μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (UAVs) και αυτόνομα συστήματα επιτήρησης.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, υλοποιήθηκε μία εφαρμογή διεπαφής προγραμματισμού (API), η οποία συνδυάζει σε πραγματικό χρόνο δυνατότητες εντοπισμού αντικειμένων με την άμεση απόκριση του μηχανισμού σταθεροποίησης του gimbal. Η ανάπτυξη αυτής της λειτουργίας αποσκοπεί στην επίδειξη μίας προηγμένης μορφής αλληλεπίδρασης, όπου ο χειριστής ή ένα αυτόνομο υποσύστημα μπορεί να επιλέξει και να “κλειδώσει” ένα αντικείμενο ενδιαφέροντος — όπως, για παράδειγμα, ένα διερχόμενο όχημα ή έναν άνθρωπο — και το gimbal να προσαρμόζει αυτόματα τη θέση του ώστε το αντικείμενο να παραμένει σταθερά στο κέντρο του οπτικού πεδίου[49], ακόμη και όταν αυτό μετακινείται.

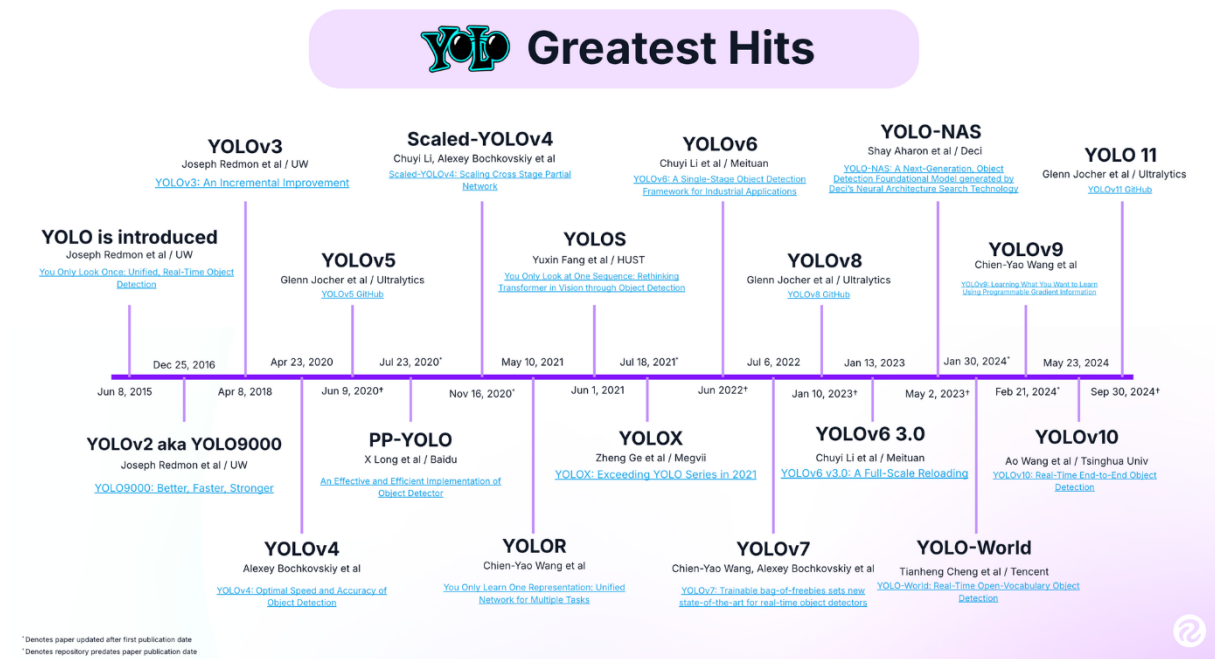
Η συγκεκριμένη δυνατότητα στόχευσης και αυτόματης παρακολούθησης έχει πρακτική εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων, όπως η εναέρια καταγραφή βίντεο, η ασφάλεια και επιτήρηση περιοχών, καθώς και επιχειρήσεις εντοπισμού και διάσωσης. Ο συνδυασμός της ακρίβειας του μηχανικού ελέγχου του gimbal με τη λειτουργία αναγνώρισης μέσω υπολογιστικής όρασης αναβαθμίζει σημαντικά την ικανότητα του συστήματος να παρακολουθεί και να συλλέγει οπτικά δεδομένα με υψηλή ευκρίνεια και ταχύτητα[50].

Η παρούσα ενότητα περιγράφει την επέκταση του συστήματος μέσω της ενσωμάτωσης αυτής της λειτουργίας, εστιάζοντας στην αρχιτεκτονική του API, τον τρόπο λειτουργίας του, τις μεθόδους παρακολούθησης και στόχευσης αντικειμένων, και, τέλος, στην ενσωμάτωσή του με τον ελεγκτή του gimbal. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στην ανάλυση των περιορισμών και των προκλήσεων που ανακύπτουν από την αλληλεπίδραση οπτικής πληροφορίας και μηχανικής απόκρισης[6], προσφέροντας μια συνολική εικόνα της επεκτασιμότητας και της προοπτικής του συστήματος[23].

Η επέκταση αυτή δεν αντικαθιστά τη θεμελιώδη λειτουργία του συστήματος ελέγχου ανατροφοδότησης, αλλά λειτουργεί ως ένα συμπληρωματικό επίπεδο υψηλότερης λογικής, που επιτρέπει την αυτόνομη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Μέσα από αυτή τη σύζευξη αναδεικνύεται η πραγματική δυναμική του gimbal ως "έξυπνου" μηχανισμού προσαρμοστικής παρακολούθησης[22].

4.2 Σύγκριση των YOLO versions για live video object tracking

Κατά την εφαρμογή παρακολούθησης αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο, η επιλογή της καταλληλότερης παραλλαγής YOLO (You Only Look Once) επηρεάζει σημαντικά την αποδοτικότητα και την απόδοση του συστήματος. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα διερευνηθούν διεξοδικά οι αποχρώσεις μεταξύ των διαφόρων βιβλιοθηκών YOLO, ιδιαίτερα των YOLOv8, YOLOv8n και μεταγενέστερων εκδόσεων όπως το YOLOv11. Ακόμα, αφορά συγκεκριμένα τον λανθάνοντα χρόνο, την υπολογιστική απόδοση και τη χρήση ενέργειας, ιδιαίτερα σε σενάρια που περιλαμβάνουν ζωντανές ροές βίντεο.



Εικόνα 41 Όλες οι εκδόσεις της βιβλιοθήκης YOLO [60]

4.2.1 Διαφορές μεταξύ των βιβλιοθηκών YOLO

Το YOLO, που εισήχθη αρχικά από τον Joseph Redmon et al. [62], έφερε ριζική επανάσταση στην ανίχνευση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο με την επεξεργασία εικόνων σε ένα μόνο πέρασμα προς τα εμπρός, μειώνοντας δραστικά την υπολογιστική επιβάρυνση. Καθώς το YOLO εξελίχθηκε μέσω εκδόσεων όπως οι YOLOv3, YOLOv4 και YOLOv5, επιτεύχθηκαν σημαντικές εξελίξεις στην ταχύτητα, την ακρίβεια και την ευκολία εφαρμογής[63].

Το YOLOv8, που αναπτύχθηκε από την Ultralytics, εισήγαγε σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με προηγούμενες επαναλήψεις. Οι βελτιώσεις του περιελάμβαναν πιο ισχυρές διαδικασίες εκπαίδευσης, βελτιστοποιημένες αρχιτεκτονικές και εκτεταμένο συντονισμό υπερπαραμέτρων, βελτιώνοντας την ακρίβεια ανίχνευσης χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η απόδοση σε πραγματικό χρόνο[61]-[64].

Το YOLOv8n, η μικρότερη έκδοση μοντέλου της σειράς YOLOv8, είναι ειδικά βελτιστοποιημένο για χαμηλή καθυστέρηση και ελάχιστες υπολογιστικές απαιτήσεις. Αυτό το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν παρακολούθηση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο με ελάχιστη καθυστέρηση, όπως ζωντανή ανάλυση βίντεο drone, συστήματα επιτήρησης και αυτόνομες εργασίες πλοήγησης[61].

Το κρίσιμο πλεονέκτημα της χρήσης του YOLOv8n έγκειται στην ελαφριά αρχιτεκτονική του. Όταν συνδυάζεται με επιτάχυνση CUDA μέσω GPU NVIDIA, το YOLOv8n μειώνει σημαντικά τον λανθάνοντα χρόνο, διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία εφαρμογών επεξεργασίας βίντεο σε πραγματικό χρόνο[61]-[64]. Η ενσωμάτωση του CUDA αξιοποιεί τις δυνατότητες παράλληλης επεξεργασίας GPU, μειώνοντας δραματικά τους χρόνους συμπερασμάτων σε σύγκριση με τις διαμορφώσεις μόνο CPU.

Η δική μου εφαρμογή στα πλαίσια μελλοντικής βελτίωσης του gimbal, το αποδεικνύει αποτελεσματικά. Λειτουργώντας απομακρυσμένα από τοπικό υπολογιστή ως Επίγειος Σταθμός Ελέγχου (Ground Control Station) για το drone-gimbal, με έναν επεξεργαστή Intel i7 13700K, μνήμη RAM 32GB και GPU GTX 4070, έχω αναπτύξει με επιτυχία ένα API χρησιμοποιώντας το YOLOv8n με CUDA. Αυτή η ρύθμιση επεξεργάζεται και παρακολουθεί αξιόπιστα αντικείμενα σε βίντεο ζωντανής ροής χωρίς αξιοσημείωτο λανθάνοντα χρόνο ή αναποτελεσματικότητα ισχύος. Η επιτάχυνση GPU που παρέχεται από την GPU GTX 4070 εξασφαλίζει γρήγορους χρόνους συμπερασμάτων, συνήθως εντός χιλιοστών του δευτερολέπτου, καθιστώντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο εξαιρετικά πρακτική[61].

Η κατανάλωση ενέργειας του YOLOv8n παραμένει σχετικά χαμηλή λόγω της βελτιστοποιημένης δομής του, διευκολύνοντας την παρατεταμένη ανάπτυξη σε σενάρια όπου η ενεργειακή απόδοση είναι κρίσιμη, όπως drones ή σταθμοί απομακρυσμένης παρακολούθησης[61].

4.2.2 Σύγκριση του YOLOv8 με νεότερες εκδόσεις (YOLOv11)

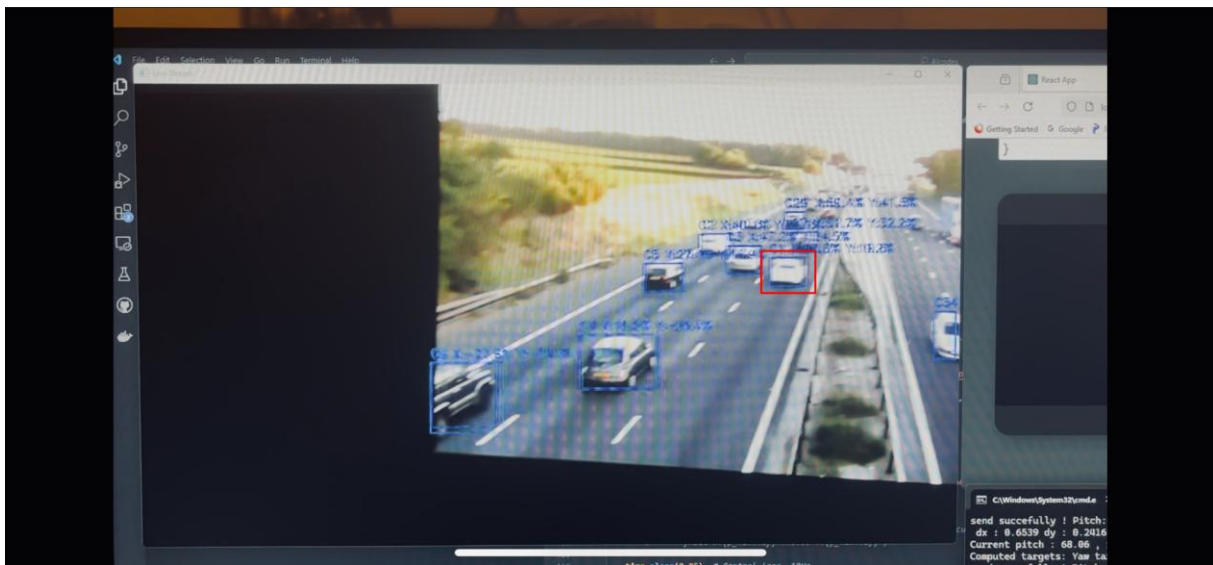
Οι πρόσφατες εξελίξεις έχουν οδηγήσει σε νεότερες επαναλήψεις όπως το YOLOv11, οι οποίες στοχεύουν στην περαιτέρω ενίσχυση της ακρίβειας και της ευρωστίας. Ωστόσο, αυτές οι βελτιώσεις συνήθως συνοδεύονται από αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα, αυξάνοντας ενδεχομένως τον λανθάνοντα χρόνο και μειώνοντας την καταλληλότητα για εργασίες ευαίσθητες στην καθυστέρηση[64].

Το YOLOv11, για παράδειγμα, εισάγει βαθύτερα δίκτυα και πρόσθετες υπολογιστικές μονάδες σχεδιασμένες για να βελτιώσουν σημαντικά την ακρίβεια ανίχνευσης. Παρ' όλα αυτά, αυτές οι βελτιώσεις αυξάνουν εγγενώς τους χρόνους συμπερασμάτων, περιορίζοντας έτσι δυνητικά τη χρησιμότητά τους σε περιβάλλοντα εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης[64].

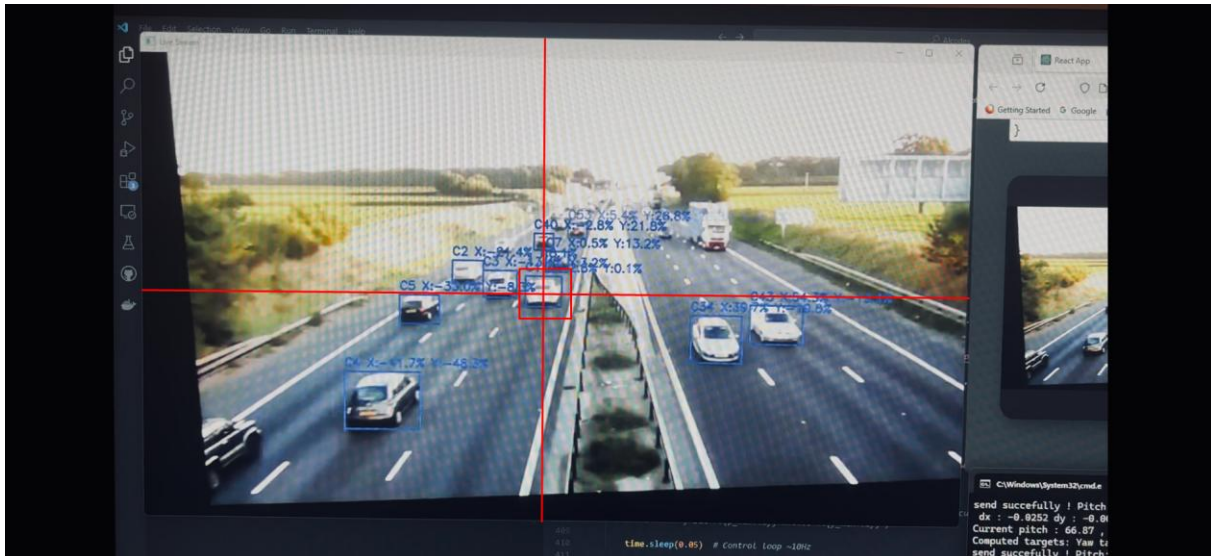
Λαμβάνοντας υπόψη μια ενημέρωση από YOLOv8 σε YOLOv11 πρέπει να καθοριστούν οι συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής. Εάν η προτεραιότητα παραμένει ελάχιστη καθυστέρηση και απόκριση σε πραγματικό χρόνο, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα ροής βίντεο, συνιστάται η παραμονή στο YOLOv8n. Αντίθετα, εάν η ακρίβεια υπερτερεί των ανησυχιών καθυστέρησης, το YOLOv11 θα μπορούσε να είναι επωφελές, αν και με το κόστος της πρόσθετης υπολογιστικής επιβάρυνσης[64].

εκπαιδευτεί να αναγνωρίζει και να διακρίνει μεταξύ συγκεκριμένων κατηγοριών - κυρίως ατόμων και αυτοκινήτων - μέσα σε κάθε εισερχόμενο καρέ βίντεο. Σε κάθε αντικείμενο που ανιχνεύεται εκχωρείται ένα μοναδικό αναγνωριστικό και αναπαρίσταται οπτικά στην οθόνη χρησιμοποιώντας πλαίσια οριοθέτησης, τα οποία ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο καθώς τα αντικείμενα κινούνται εντός του οπτικού πεδίου.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της εφαρμογής είναι η δυνατότητα διαδραστικής στόχευσης. Ο χρήστης διαθέτει μια διεπαφή μέσω της οποίας μπορεί να επιλέξει ένα αντικείμενο ενδιαφέροντος αναφέροντας το αναγνωριστικό παρακολούθησης. Κατά την επιλογή, το σύστημα "κλειδώνει" σε αυτό το αντικείμενο και παρακολουθεί συνεχώς τη θέση του σε σχέση με το κέντρο του πλαισίου. Αυτός ο μηχανισμός κλειδώματος διασφαλίζει ότι ακόμη και όταν το αντικείμενο κινείται εντός του οπτικού πεδίου της κάμερας, η θέση του αξιολογείται συνεχώς σε σχέση με ένα εικονικό σημείο αναφοράς - συνήθως το οπτικό κέντρο του πλαισίου.



Εικόνα 43 Κλείδωμα στόχου και διαδικασία αυτόματης μετατόπισης απο video frame

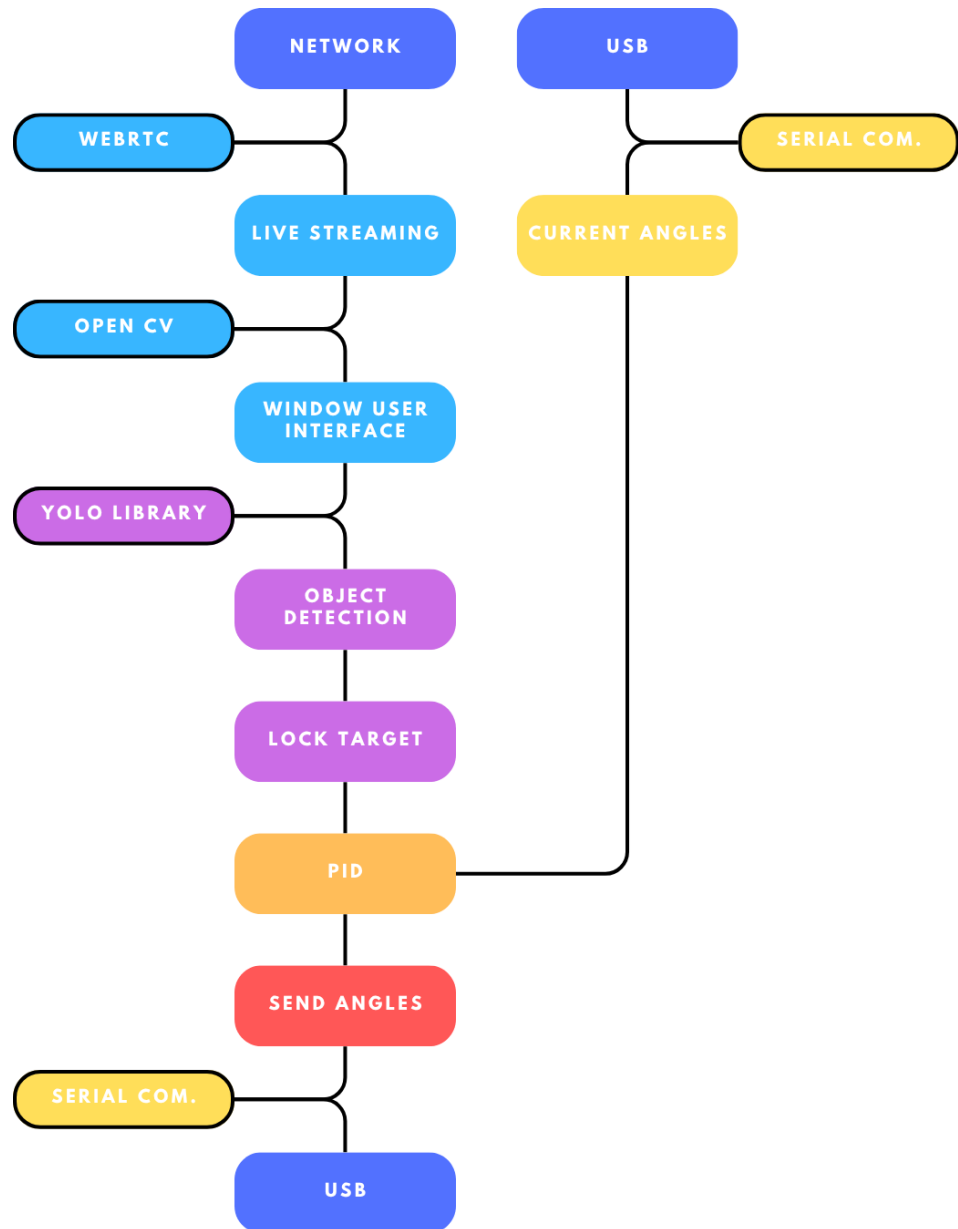


Εικόνα 44 Κεντράρισμα έπειτα από αυτόματη μετατόπιση. (Οι κόκκινες γραμμές προστέθηκαν μετέπειτα στην εικόνα για τονισμό του κεντραρίσματος)

Το βασικό λειτουργικό βήμα έγκειται στη μετάφραση της σχετικής μετατόπισης εικονοστοιχείων του κλειδωμένου αντικειμένου σε σχετικές γωνιακές διορθώσεις. Αυτές οι γωνίες υπολογίζονται με βάση το γνωστό οπτικό πεδίο (FOV) της κάμερας και την ανάλυση της ροής βίντεο, επιτρέποντας μια αξιόπιστη χαρτογράφηση από τις συντεταγμένες της οθόνης έως τις αλλαγές προσανατολισμού του πραγματικού κόσμου. Αυτός ο μετασχηματισμός λαμβάνει υπόψη τόσο τις οριζόντιες όσο και τις κατακόρυφες μετατοπίσεις και δημιουργεί τις αντίστοιχες ρυθμίσεις περιστροφής και κλίσης που απαιτούνται για την εκ νέου επικέντρωση του αντικειμένου που βλέπεται.

Αυτές οι υπολογισμένες γωνίες αποστέλλονται στη συνέχεια στον ελεγκτή αντίζυγου STOrM32 v1.32 μέσω σειριακής σύνδεσης επικοινωνίας, όπως περιγράφηκε προηγουμένως στο [Κεφάλαιο 3.4.2](#). Το πρωτόκολλο επικοινωνίας περιλαμβάνει μορφοποιημένες εντολές που ο ελεγκτής ερμηνεύει ως ακριβείς γωνιακές κινήσεις, επιτρέποντας στο αντίζυγο να επανατοποθετείται συνεχώς για να διατηρεί το αντικείμενο που παρακολουθείται κεντραρισμένο, ανεξάρτητα από την κίνησή του κατά μήκος του πλαισίου.

Αυτό που προκύπτει από αυτή την αρχιτεκτονική δεν είναι απλώς ένας αγωγός αντίδρασης και απόκρισης, αλλά ένα ανταποκρινόμενο σύστημα κλειστού βρόχου όπου η οπτική ανάδραση ενημερώνει τη φυσική κίνηση σε πραγματικό χρόνο. Ο σχεδιασμός δίνει έμφαση στην αρθρωτή δομή, επιτρέποντας σε κάθε στοιχείο - ροή βίντεο, αναγνώριση αντικειμένων, αλληλεπίδραση χρήστη και ενεργοποίηση αντίζυγου - να λειτουργεί ανεξάρτητα αλλά σε συγχρονισμό με το υπόλοιπο σύστημα.



Σχήμα 2 Αναπαράσταση λειτουργίας API

Αυτή η προσέγγιση υπογραμμίζει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης της έξυπνης οπτικής συμπεριφοράς απευθείας στη δομή ελέγχου των συστημάτων αντίζυγου. Δείχνει επίσης πώς τα ελαφριά μοντέλα, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο και οι βιβλιοθήκες ανοιχτού κώδικα μπορούν να ενσωματωθούν αποτελεσματικά για τη δημιουργία ανταποκρινόμενων και ημιαυτόνομων πλατφορμών σταθεροποίησης που υπερβαίνουν την παθητική αντιστάθμιση κίνησης.

4.4 Διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών API

4.4.1 Παρακολούθηση αντικειμένων

Η λειτουργία παρακολούθησης αντικειμένων χρησιμεύει ως το πρώτο στάδιο του διαδραστικού μηχανισμού ελέγχου, υπεύθυνος για τον εντοπισμό, την ανίχνευση και τη συνεχή παρακολούθηση επιλεγμένων στόχων εντός της ροής βίντεο. Αυτό το σύστημα σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει τη ζωντανή αναγνώριση συγκεκριμένων κατηγοριών αντικειμένων - δηλαδή **ατόμων** και **αυτοκινήτων** - και να εκχωρήσει σε καθεμία μια μόνιμη ταυτότητα που παραμένει συνεπής σε όλα τα πλαίσια.

Στο κέντρο αυτής της λειτουργικότητας βρίσκεται το **μοντέλο YOLOv8n**, ένα ελαφρύ συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο ικανό για εξαγωγή συμπερασμάτων σε πραγματικό χρόνο ακόμη και σε συμπαγείς πλατφόρμες όπως το Raspberry Pi 5. Αυτό το μοντέλο δημιουργείται και συγχωνεύεται κατά την εκκίνηση, όπως φαίνεται στο παρακάτω απόσπασμα:

```
137 model = YOLO('yolov8n.pt').to("cuda:0" if torch.cuda.is_available() else "cpu")
138 model.fuse()
139 device = "cuda:0" if torch.cuda.is_available() else "cpu"
```

Μόλις ληφθεί η ζωντανή ροή βίντεο μέσω WebRTC και αποκωδικοποιηθεί μέσω OpenCV, κάθε καρέ περνά μέσω της διοχέτευσης ανίχνευσης του μοντέλου. Η ανίχνευση περιλαμβάνει πρόβλεψη κλάσης και χωρικό εντοπισμό κάθε αντικειμένου στο πλαίσιο. Για να διατηρήσει την ταυτότητα σε όλα τα καρέ, το σύστημα αξιοποιεί τον **αλγόριθμο ByteTrack** με μια προκαθορισμένη διαμόρφωση ιχνηλάτη, επιτρέποντας την παρακολούθηση πολλαπλών αντικειμένων σε σκηνές πλούσιες σε κίνηση.

```
140 TRACKER_CFG = "bytrack.yaml"
```

```
163
164 res = model.track(frame, conf=0.3, persist=True,
165                  classes=[0,2], tracker=TRACKER_CFG,
166                  device=device, verbose=False)
```

Για κάθε ανίχνευση, ο αλγόριθμος εξάγει τόσο το πλαίσιο οριοθέτησης όσο και το μοναδικό αναγνωριστικό κομματιού που έχει εκχωρηθεί σε αυτό το αντικείμενο. Κάθε αναγνωριστικό αντιστοιχίζεται σε μια ετικέτα σύντομης μορφής, όπως P03 για ένα άτομο ή C01 για ένα αυτοκίνητο, η οποία απλοποιεί την αναγνώριση του χρήστη κατά τη φάση επιλογής. Αυτή η αντιστοίχιση διατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης, χρησιμοποιώντας εσωτερικά λεξικά όπως `track_to_rel` και `last_pos`.

```
167 r = res[0]
168 if r.bboxes.id is not None:
169     now = time.time()
170     for (x1,y1,x2,y2), gid, cls in zip(
171         r.bboxes.xyxy.cpu().numpy(),
172         r.bboxes.id.cpu().numpy().astype(int),
173         r.bboxes.cls.cpu().numpy().astype(int)
174     ):
175         nm = 'person' if cls==0 else 'car'
176         if gid not in track_to_rel:
177             track_to_rel[gid] = (nm, next_rel[nm])
178             next_rel[nm] = (next_rel[nm] + 1) % 100
179         rid = track_to_rel[gid][1]
```

Η συνάρτηση `compute_offset` υπολογίζει τη θέση του αντικειμένου σε σχέση με το κέντρο της εικόνας, εκφράζοντάς την ως ποσοστιαία μετατόπιση και στους δύο άξονες. Αυτή η αναπαράσταση είναι απαραίτητη για τη λογική στόχευσης και τη γωνιακή διόρθωση.

```

110 def compute_offset(x1,y1,x2,y2,w,h):
111     cx, cy = w/2, h/2
112     bx, by = (x1+x2)/2, (y1+y2)/2
113     return (bx-cx)/cx*100, (cy-by)/cy*100

```

Σε πραγματικό χρόνο, κάθε αντικείμενο που παρακολουθείται απεικονίζεται με ένα πλαίσιο οριοθέτησης και μια ετικέτα που υποδεικνύει τόσο τον τύπο όσο και τη μετατόπιση θέσης, βοηθώντας τον χρήστη να κατανοήσει και επιτρέποντας το χειροκίνητο κλείδωμα. Ο χειρισμός της απεικόνισης γίνεται εξ ολοκλήρου στο OpenCV χρησιμοποιώντας `cv2.rectangle` και `cv2.putText`.

Ο μηχανισμός παρακολούθησης ενσωματώνει επίσης έλεγχο ανανέωσης. Εάν ένα αντικείμενο δεν έχει εντοπιστεί για πάνω από 2 δευτερόλεπτα, το αναγνωριστικό του θεωρείται παλιό και αφαιρείται από το σύστημα παρακολούθησης και κλειδώματος. Αυτό εμποδίζει ξεπερασμένους ή άσχετους στόχους να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του συστήματος, ειδικά σε ταχέως μεταβαλλόμενες σκηνές.

Συνοπτικά, το σύστημα παρακολούθησης ανιχνεύει αξιόπιστα και επισημαίνει κινούμενα πρόσωπα και οχήματα με υψηλή χρονική συνοχή, σχηματίζοντας το επίπεδο αντίληψης του συνολικού βρόχου ελέγχου. Σκοπός του είναι να μετατρέψει τα ακατέργαστα οπτικά δεδομένα σε δομημένες πληροφορίες παρακολούθησης - θέση, ταυτότητα και επιμονή - που μπορούν να αξιοποιηθούν για αποφάσεις ελέγχου υψηλότερου επιπέδου, συμπεριλαμβανομένου του κλειδώματος αντικειμένων και της αυτοματοποιημένης επανατοποθέτησης αντίζυγου.

4.4.2 Κλείδωμα αντικειμένου

Πέρα από την παθητική παρακολούθηση, το σύστημα περιλαμβάνει έναν διαδραστικό **μηχανισμό κλειδώματος αντικειμένων**, επιτρέποντας στον χρήστη να ορίσει έναν στόχο - όπως ένα αυτοκίνητο ή ένα άτομο - για συνεχή εστίαση. Μόλις κλειδωθεί, το σύστημα ενεργοποιεί μια συμπεριφορά κλειστού βρόχου, μεταφράζοντας τη θέση του αντικειμένου στην τροφοδοσία βίντεο σε διορθώσεις περιστροφής και κλίσης (pitch and yaw) σε πραγματικό χρόνο για το gimbal. Αυτή η διαδικασία μετατρέπει το αντίζυγο σε ένα ημιαυτόνομο σύστημα παρακολούθησης που αναπροσανατολίζεται ενεργά για να διατηρήσει το αντικείμενο στο κέντρο του πλαισίου.

Το κλείδωμα καθοδηγείται από το χρήστη. Κατά τη διάρκεια μιας ζωντανής συνεδρίας, σε κάθε ανιχνευμένο αντικείμενο δίνεται μια συντομογραφία (π.χ. C01 για ένα αυτοκίνητο, P02 για ένα άτομο) με βάση τον τύπο και το αναγνωριστικό του. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει χειροκίνητα ποιο αντικείμενο θα κλειδώσει εισάγοντας μια εντολή όπως:

```

lp3 # Locks onto person with ID 3
lc0 # Locks onto car with ID 0

```

Εσωτερικά, η εντολή αντιστοιχίζεται στο αντίστοιχο αναγνωριστικό ιχνηλάτη που είναι αποθηκευμένο στο λεξικό `track_to_rel`. Εάν βρεθεί μια έγκυρη αντιστοιχία, το αντικείμενο προστίθεται στο σύνολο `locked_gids`, το οποίο σηματοδοτεί το νήμα ελέγχου για να ξεκινήσει η παρακολούθηση της μετατόπισης αυτού του αντικειμένου με την πάροδο του χρόνου.

```

240     if cmd.startswith('l') and len(cmd)>=3 and cmd[1] in ('c','p'):
241         r1 = int(cmd[2:])
242         gid = next((g for g,(n,r) in track_to_rel.items()
243                   if r==r1 and ((cmd[1]=='c' and n=='car') or (cmd[1]=='p' and n=='person'))), None)
244         if gid is None:
245             print("No such lock.")

```

Μόλις κλειδωθεί ένα αντικείμενο, το σύστημα παρακολουθεί συνεχώς τη θέση του μέσα στο πλαίσιο βίντεο. Χρησιμοποιώντας την προηγούμενος υπολογισμένη μετατόπιση (βλ. `compute_offset`), η σχετική μετατόπιση από το κέντρο ερμηνεύεται ως οπτικό σφάλμα. Αυτό το σφάλμα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ποσού που πρέπει να περιστραφεί το αντίζυγο για να κεντράρει ξανά τον στόχο.

Ο βασικός μετασχηματισμός συμβαίνει εδώ:

```

130 def compute_target(dx, dy, yaw_c, pitch_c):
131     tx = yaw_c - dx*(FOV_X/2)
132     ty = pitch_c - dy*(FOV_Y/2)
133     return tx, ty

```

Στην ουσία, η λειτουργία παίρνει `compute_target` την κανονικοποιημένη μετατόπιση (`dx`, `dy`) και τη μεταφράζει σε γωνιακά δέλτα (`tx`, `ty`) προβάλλοντάς την πάνω από το γνωστό οριζόντιο και κατακόρυφο οπτικό πεδίο (`FOV_X`, `FOV_Y`) της κάμερας. Αυτές οι γωνίες στόχου αντιπροσωπεύουν το σημείο όπου πρέπει να κινηθεί το αντίζυγο για να ευθυγραμμιστεί εκ νέου το αντικείμενο με το οπτικό κέντρο.

Για να αποφευχθεί η νευρικότητα ή η υπέρβαση - ειδικά όταν συμβαίνουν μικρές διακυμάνσεις λόγω θορύβου ανίχνευσης - χρησιμοποιείται ένα PID σύστημα. Ο έλεγχος PID είναι αποδοτικός σε σενάρια αντίδρασης, όπως η αναζήτηση αντικειμένων ή η γρήγορη ανακατεύθυνση.

Οι υπολογισμένες τιμές περιστροφής και κλίσης τελικά συσφίγγονται σε ασφαλή όρια λειτουργίας και αποστέλλονται σειριακά στον ελεγκτή αντίζυγου STorM32:

```
send_set_angles(ser, p_new, θ, y_new)
```

Εάν το κλειδωμένο αντικείμενο δεν είναι πλέον ορατό (π.χ. εξέρχεται από το πλαίσιο ή αποφράσσεται), εφαρμόζεται λήξη βάσει χρόνου. Εάν ένα αντικείμενο δεν έχει παρατηρηθεί για πάνω από 2 δευτερόλεπτα, αφαιρείται αυτόματα από το `locked_gids` και το αντίζυγο παύει να το ακολουθεί, αποτρέποντας ακανόνιστες κινήσεις ή κυνηγώντας ξεπερασμένες θέσεις.

Αυτός ο μηχανισμός κλειδώματος και κέντρου γεφυρώνει αποτελεσματικά τα επίπεδα αντίληψης και ελέγχου του συστήματος. Επιτρέπει στο αντίζυγο όχι μόνο να σταθεροποιεί παθητικά την κάμερα αλλά και να διατηρεί ενεργά ένα θέμα ενδιαφέροντος στο κέντρο του οπτικού πεδίου, με βάση τις αποφάσεις των χρηστών ή την αυτοματοποιημένη λογική. Η αρθρωτή προσέγγιση που χρησιμοποιείται διασφαλίζει ότι οι μελλοντικές επεκτάσεις - όπως η προγνωστική παρακολούθηση, η ιεράρχηση πολλαπλών στόχων ή οι ειδοποιήσεις βάσει όρασης - μπορούν να ενσωματωθούν χωρίς δομικό επανασχεδιασμό.

4.4.3 Ενσωμάτωση με τον Ελεγκτή Gimbal

Το τελικό στάδιο του συστήματος παρακολούθησης και κλειδώματος αντικειμένων περιλαμβάνει τη μετάδοση των υπολογιζόμενων γωνιών στόχου στον ελεγκτή αντίζυγου. Όπως περιγράφεται λεπτομερώς στο [τιμήμα 3.4.2](#), αυτή η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω σειριακής σύνδεσης (Serial Communication) στα 115200 baud, χρησιμοποιώντας ένα προσαρμοσμένο δυαδικό πρωτόκολλο που κωδικοποιεί τιμές pitch, yaw και roll με έλεγχο σφαλμάτων.

Μόλις ένα αντικείμενο κλειδωθεί, το σύστημα αξιολογεί συνεχώς τη θέση του σε σχέση με το κέντρο του πλαισίου και υπολογίζει τις απαραίτητες γωνιακές διορθώσεις. Αυτές οι διορθωμένες τιμές κλίσης και περιστροφής στη συνέχεια μορφοποιούνται και αποστέλλονται στον ελεγκτή αντίζυγου, ο οποίος τις ερμηνεύει ως ενημερωμένες εντολές προσανατολισμού. Αυτή η διαδικασία συμβαίνει σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στο αντίζυγο να ακολουθεί ομαλά το επιλεγμένο αντικείμενο με ελάχιστη καθυστέρηση.

Προς το παρόν, η μετάδοση γίνεται αποκλειστικά μέσω της σειριακής διεπαφής. Ωστόσο, οι μελλοντικές επαναλήψεις του συστήματος θα ενσωματώνουν υποστήριξη για την αποστολή αυτών των εντολών ελέγχου απευθείας μέσω του πρωτοκόλλου WebRTC, επιτρέποντας πλήρως απομακρυσμένη και ανεξάρτητη από πλατφόρμα λειτουργία χωρίς εξάρτηση από σειριακή επικοινωνία.

4.5 Ανάλυση Απόδοσης και Περιορισμοί

Η ενσωμάτωση της ανίχνευσης αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο με τον έλεγχο του αντίζυγου προσφέρει σημαντική λειτουργικότητα, μετατρέποντας ένα παθητικό σύστημα σταθεροποίησης σε έναν διαδραστικό, καθοδηγούμενο από την όραση μηχανισμό. Ωστόσο, όπως συμβαίνει με όλα τα πολύπλοκα συστήματα που συνδυάζουν την αντίληψη με την ενεργοποίηση, μια ολοκληρωμένη ανάλυση της απόδοσης είναι απαραίτητη για την κατανόηση τόσο των τρεχουσών δυνατοτήτων όσο και των υφιστάμενων περιορισμών της υλοποίησης.

Από λειτουργική άποψη, το σύστημα λειτουργεί αποτελεσματικά σε περιβάλλοντα με μέτρια κίνηση και καθαρή ορατότητα αντικειμένων. Το μοντέλο ανίχνευσης αντικειμένων (YOLOv8n) λειτουργεί με συνέπεια σε ταχύτητες πραγματικού χρόνου, διατηρώντας αξιόπιστη αναγνώριση και παρακολούθηση ανθρώπων και οχημάτων. Τα εκχωρημένα αναγνωριστικά αντικειμένων παραμένουν σταθερά σε διαδοχικά καρέ, επιτρέποντας τη μόνιμη αναγνώριση και την ομαλή αλληλεπίδραση του χρήστη για την επιλογή προορισμών.

Μόλις ένα αντικείμενο κλειδωθεί, η μετάφραση της θέσης του σε γωνιακές διορθώσεις είναι ακριβής μέσα σε ένα εύρος ανοχών που εξασφαλίζει οπτική κεντράρισμα. Το αντίζυγο ανταποκρίνεται γρήγορα στις εντολές που λαμβάνονται μέσω της σειριακής σύνδεσης, συνήθως χωρίς ορατή καθυστέρηση όταν λειτουργεί σε σταθερή σύνδεση επικοινωνίας. Ο συντονισμός μεταξύ της κίνησης του αντικειμένου στη ροή βίντεο και του μηχανικού αναπροσανατολισμού της κάμερας είναι ρευστός υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι εξομάλυνσης ή έλεγχος PID για απόσβεση μετάβασης.

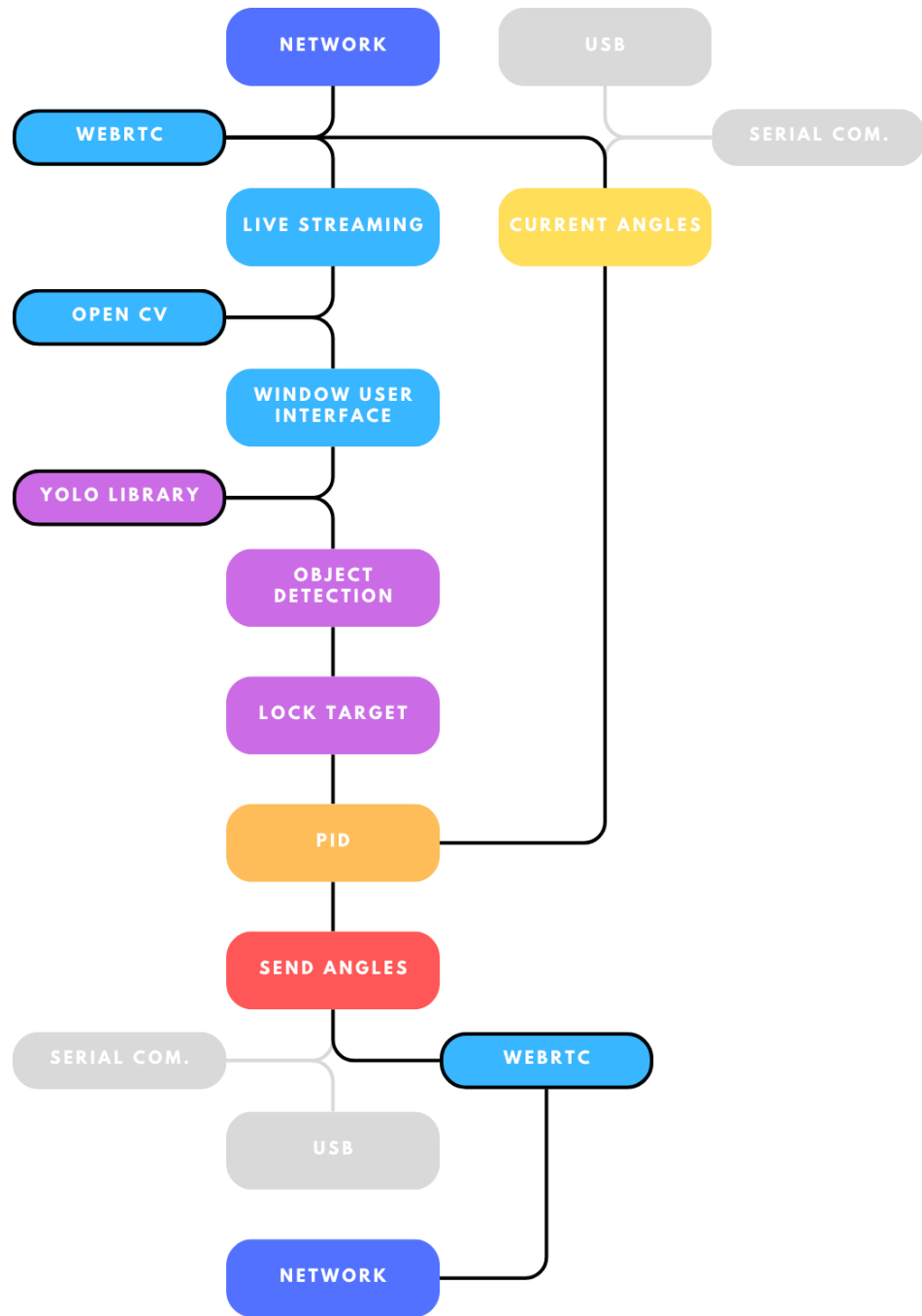
Παρ' όλα αυτά, το σύστημα αντιμετωπίζει ορισμένες προκλήσεις και περιορισμούς:

- **Ευαισθησία καθυστέρησης:** Ενώ ο βρόχος ανίχνευσης και ελέγχου είναι γενικά γρήγορος, οποιαδήποτε καθυστέρηση στην αποκωδικοποίηση καρέ, την εξαγωγή συμπερασμάτων ή τη σειριακή μετάδοση μπορεί να προκαλέσει αισθητή καθυστέρηση, ειδικά κατά την

παρακολούθηση αντικειμένων που κινούνται γρήγορα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το αντίζυγο μπορεί να ακολουθεί ελαφρώς πίσω από τον στόχο, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια απότομων αλλαγών κατεύθυνσης.

- **Ακρίβεια ανίχνευσης σε χαμηλή ανάλυση:** Δεδομένου ότι το σύστημα επεξεργάζεται συμπιεσμένα πλαίσια (συνήθως 640×480 ή 720p), το μοντέλο ανίχνευσης μπορεί να δυσκολευτεί με μικρά ή μακρινά αντικείμενα, οδηγώντας σε περιστασιακή εσφαλμένη ταξινόμηση ή ασυνεπή τοποθέτηση πλαισίου οριοθέτησης, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει την ακρίβεια παρακολούθησης.
- **Περιβαλλοντική εξάρτηση:** Η αξιοπιστία ανίχνευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες φωτισμού, το θάμπωμα κίνησης και τις αποφράξεις. Σε εξωτερικούς χώρους ή περιβάλλοντα με χαμηλό φωτισμό, οι βαθμολογίες εμπιστοσύνης αντικειμένων μειώνονται και η σταθερότητα κλειδώματος μπορεί να υποβαθμιστεί.
- **Κλείδωμα σταθερότητας με την πάροδο του χρόνου:** Παρόλο που τα χρονικά όρια εφαρμόζονται για την αφαίρεση ανενεργών στόχων, οι ξαφνικές πτώσεις στην εμπιστοσύνη παρακολούθησης μπορούν να ξεκλειδώσουν πρόωρα έναν στόχο ή να προκαλέσουν νευρική ελάττωση εάν το αντικείμενο αποφραχθεί στιγμιαία.
- **Νεκρές ζώνες μονού άξονα:** Δεδομένου ότι μόνο η περιστροφή και το βήμα ελέγχονται ενεργά, η σημαντική κατακόρυφη μετατόπιση μπορεί μερικές φορές να οδηγήσει σε μετατόπιση άκρων, ειδικά εάν το κατακόρυφο οπτικό πεδίο της κάμερας είναι στενό. Αυτό μετριάζεται εν μέρει με εντολές σύσφιξης σε γωνιακά όρια.
- **Περιορισμοί επεκτασιμότητας:** Η τρέχουσα ρύθμιση υποστηρίζει ένα κλείδωμα ενός αντικειμένου κάθε φορά. Η παρακολούθηση πολλαπλών στόχων ταυτόχρονα - ή η δυναμική ιεράρχησή τους - θα απαιτούσε σημαντικές αρχιτεκτονικές αλλαγές και πρόσθετους υπολογιστικούς πόρους.
- **Συμφόρηση αλληλεπίδρασης χρήστη:** Η επιλογή στόχου εξακολουθεί να βασίζεται στην είσοδο γραμμής εντολών, η οποία ενώ είναι λειτουργική, δεν είναι ιδανική για χρήση δυναμικού πεδίου ή μη τεχνικούς χειριστές. Ένα εργαλείο γραφικής επιλογής ή αυτοματοποιημένη ιεράρχηση προτεραιοτήτων θα μπορούσε να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις χρηστικότητας.

Όσον αφορά τη μελλοντική επέκταση, μια πολλά υποσχόμενη οδός έγκειται στην εκφόρτωση εντολών ελέγχου μέσω του ίδιου καναλιού επικοινωνίας WebRTC που χρησιμοποιείται για ροή βίντεο. Αυτό θα εξαλείψει την εξάρτηση από την τοπική σειριακή επικοινωνία και θα επιτρέψει πλήρως απομακρυσμένη λειτουργία αντίζυγο, ιδανική για συστήματα τοποθετημένα σε drone ή αναπτύξεις που βασίζονται σε δίκτυο.



Σχήμα 3 Αναπαράσταση μελλοντικής λειτουργίας API

Συμπερασματικά, το σύστημα επιδεικνύει ισχυρή βασική λειτουργικότητα, επιτυγχάνοντας αξιόπιστη ανίχνευση αντικειμένων και παρακολούθηση αντίζυγου σε ελεγχόμενα σενάρια. Ωστόσο, οι περιορισμοί που συνδέονται με περιορισμούς σε πραγματικό χρόνο, περιβαλλοντική μεταβλητότητα και σχεδιασμό διεπαφής υποδηλώνουν αρκετές ευκαιρίες βελτίωσης. Αυτές οι εκτιμήσεις καθοδηγούν τις προτεραιότητες ανάπτυξης για τα επόμενα στάδια, όπου η βελτίωση της λογικής ελέγχου και της ανθεκτικότητας του συστήματος θα είναι ζωτικής σημασίας για τη διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής του συστήματος.

Κεφάλαιο 5ο: Πειραματική ρύθμιση

5.1 Περιβάλλον δοκιμής

Το αντίζυγο υποβλήθηκε σε δοκιμές σε ελεγχόμενο εσωτερικό περιβάλλον, διασφαλίζοντας ότι εξωτερικοί παράγοντες όπως ο άνεμος, οι ακραίες θερμοκρασίες ή οι βροχοπτώσεις δεν επηρέασαν τα αποτελέσματα. Για να προσομοιώσει συνθήκες παρόμοιες με αυτές που βιώνει ένα drone σταθερών πτερύγων, το αντίζυγο τοποθετήθηκε ανάποδα σε μια ξύλινη πλατφόρμα, σταθεροποιημένη πλευρικά για να μιμηθεί την αερομεταφερόμενη σταθερότητα. Αυτή η ρύθμιση επέτρεψε την ακριβή αξιολόγηση της απόδοσης του gimbal στη διατήρηση του προσανατολισμού και της σταθερότητας.

Για την τροφοδοσία, χρησιμοποιήθηκε ένα τροφοδοτικό πάγκου Longwei LW-K3010D, διαμορφωμένο ώστε να παρέχει σταθερή έξοδο 18V με μέγιστο όριο ρεύματος 1.5A. Αυτή η διαμόρφωση παρέχει άφθονη ισχύ για τους τρεις κινητήρες του gimbal, εξασφαλίζοντας σταθερή απόδοση κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Το LW-K3010D είναι γνωστό για την αξιόπιστη ρύθμιση τάσης και ρεύματος, καθιστώντας το κατάλληλο για ακριβείς ηλεκτρονικές εφαρμογές.



Εικόνα 45 LW-K3010D τροφοδοτικό πάγκου

Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας δοκιμών, η απόκριση του gimbal σε διάφορες κινήσεις και προσαρμογές παρατηρήθηκε σχολαστικά. Το ελεγχόμενο περιβάλλον και η σταθερή τροφοδοσία διευκόλυναν μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των δυνατοτήτων σταθεροποίησης του gimbal, θέτοντας τις βάσεις για περαιτέρω βελτιώσεις και πιθανές δοκιμές πεδίου υπό πιο μεταβλητές συνθήκες.

5.2 Μετρήσεις απόδοσης

Κριτήρια αξιολόγησης της απόδοσης (ακρίβεια, χρόνος απόκρισης σταθεροποίησης, jitter, λανθάνων χρόνος).

Το αντίζυγο επέδειξε μια ισχυρή ικανότητα να υποστηρίζει το βάρος της κάμερας, διατηρώντας τη σταθερότητα και την ισορροπία καθ' όλη τη φάση δοκιμών. Η λειτουργία αυτόματης ισοστάθμισης λειτουργούσε με υψηλή ακρίβεια, διασφαλίζοντας ότι η κάμερα παρέμενε οριζόντια ευθυγραμμισμένη ακόμη και όταν υποβλήθηκε σε σκόπιμες διαταραχές. Οι κινήσεις σε όλους τους άξονες ήταν ιδιαίτερα ομαλές, γρήγορες και ακριβείς, με το σύστημα να διορθώνει με συνέπεια τις αποκλίσεις εντός 0,05 μοιρών πριν επιτύχει μια σταθερή κατάσταση με μηδενικό σφάλμα, όπως διέπεται από τον αλγόριθμο ελέγχου PID.

Ωστόσο, αυτό το ελάχιστο υπολειπόμενο σφάλμα 0,05 μοιρών, ενώ ήταν αμελητέο σε πολλά σενάρια, έγινε αντιληπτό όταν χρησιμοποιήθηκε φακός με εστιακό βάθος (focal length) 14 mm σε κάμερα με μέγεθος περικοπής βίντεο 1280x720. Τα στενά οριζόντια και κατακόρυφα οπτικά πεδία που είναι εγγενή σε αυτή τη διαμόρφωση ενίσχυσαν την ορατότητα μικρών αποκλίσεων, ιδιαίτερα κατά τη λήψη θεμάτων κοντινής εμβέλειας. Αυτή η παρατήρηση υπογραμμίζει τη σημασία της εξέτασης συνδυασμών φακών και αισθητήρων σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια σταθεροποίησης.



Εικόνα 46 Δοκιμή PID σε κατάσταση Hold Yaw 90 μοιρών χωρίς φορτίο-κάμερα

Ο ελεγκτής Storm32 παρουσίασε αξιόπιστη απόδοση, διατηρώντας σταθερή λειτουργία χωρίς σφάλματα υπό τυπικές συνθήκες. Παρ' όλα αυτά, παρατηρήθηκαν περιπτώσεις νευρικότητας (jitter), που μοιάζουν με ταλαντώσεις, που αποδίδονται σε μη βέλτιστες ρυθμίσεις παραμέτρων PID. Αυτά τα περιστατικά υπογραμμίζουν την ευαισθησία του συστήματος στη ρύθμιση PID, όπου ακόμη και μικρές λανθασμένες διαμορφώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αισθητή υποβάθμιση της απόδοσης.

Το τρέχον προφίλ PID επιτυγχάνει μια αξιόπαινη ισορροπία μεταξύ απόκρισης και σταθερότητας, ωστόσο το υπολειπόμενο σφάλμα υποδεικνύει περιθώρια βελτίωσης. Η βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων απαιτεί μια επαναληπτική διαδικασία δοκιμής και σφάλματος, που περιλαμβάνει συστηματικές προσαρμογές και παρατηρήσεις σε πραγματικό χρόνο για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαμόρφωσης. Η χρήση διεπαφής USB για ρύθμιση παραμέτρων διευκολύνει την άμεση υλοποίηση αλλαγών, βελτιώνοντας τη διαδικασία βαθμονόμησης και μειώνοντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας.

Η ενσωμάτωση ενός σεναρίου ελέγχου που βασίζεται σε Python με τον ελεγκτή αντίζυγου STorM32 έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματική, προσφέροντας μια απρόσκοπτη και ανταποκρινόμενη διεπαφή για διαχείριση αντίζυγου σε πραγματικό χρόνο. Χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη PySerial, το σενάριο επικοινωνεί με το αντίζυγο μέσω μιας σειριακής σύνδεσης διαμορφωμένης με ρυθμό baud 115200 bps, η οποία είναι η προεπιλεγμένη ρύθμιση για σειριακές θύρες STorM32, συμπεριλαμβανομένου του USB σε πλακέτες v1.3. Αυτή η διαμόρφωση εξασφαλίζει γρήγορη μετάδοση δεδομένων, επιτρέποντας την άμεση εκτέλεση εντολών χωρίς αισθητή καθυστέρηση.

Η αρχιτεκτονική του σεναρίου Python διευκολύνει την άμεση έκδοση εντολών στο gimbal, επιτρέποντας τον ακριβή έλεγχο των λειτουργιών του. Η ανταπόκριση του συστήματος είναι ιδιαίτερα επωφελής κατά τη ρύθμιση των παραμέτρων PID, όπου η ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης σταθεροποίησης. Οι προσαρμογές που γίνονται μέσω του σεναρίου αντικατοπτρίζονται στιγμιαία στη συμπεριφορά του gimbal, απλοποιώντας τη διαδικασία βαθμονόμησης και μειώνοντας το χρόνο που απαιτείται για επαναληπτικές δοκιμές.

Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του ελεγκτή STorM32 που αναδεικνύει το Python script είναι η «προσαρμοσμένη λειτουργία», η οποία παρέχει πρόσβαση σε προηγμένες επιλογές διαμόρφωσης πέρα από τις τυπικές λειτουργικές παραμέτρους. Μέσω αυτής της λειτουργίας, οι χρήστες μπορούν να τελειοποιήσουν διάφορες πτυχές της απόδοσης του gimbal, όπως ρυθμίσεις ισχύος κινητήρα, κέρδη βρόχου ελέγχου και καμπύλες απόκρισης. Το σενάριο Python αξιοποιεί αυτή τη δυνατότητα στέλνοντας συγκεκριμένες σειριακές εντολές που προσαρμόζουν αυτές τις ρυθμίσεις on-the-fly, προσφέροντας υψηλό βαθμό προσαρμογής για να καλύψει τις απαιτήσεις εξειδικευμένων εφαρμογών.

Ο συνδυασμός του σεναρίου Python και της ευέλικτης αρχιτεκτονικής υλικολογισμικού (firmware) του STorM32 έχει ως αποτέλεσμα ένα ισχυρό σύνολο εργαλείων για τον έλεγχο του αντίζυγου. Η σειριακή επικοινωνία υψηλής ταχύτητας στα 115200 bps διασφαλίζει ότι οι είσοδοι εντολών υποβάλλονται σε επεξεργασία χωρίς καθυστέρηση, ενώ η «Προσαρμοσμένη λειτουργία (custom)» επεκτείνει το εύρος των ελεγχόμενων παραμέτρων, επιτρέποντας προσαρμοσμένες προσαρμογές απόδοσης. Αυτή η ρύθμιση είναι ιδιαίτερα επωφελής για προγραμματιστές και ερευνητές που απαιτούν ένα προγραμματιζόμενο και προσαρμόσιμο σύστημα αντίζυγου για ενσωμάτωση σε σύνθετα έργα ή πειραματικές πλατφόρμες.

Το υλικό ABS+ που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του gimbal άντεξε τις θερμικές απαιτήσεις λειτουργίας χωρίς πρόβλημα, επιδεικνύοντας επαρκή αντοχή στη θερμότητα. Δομικά, το υλικό παρείχε επαρκή αντοχή για να υποστηρίξει το σύστημα κάμερας. Ωστόσο, όπως συμβαίνει με πολλά πλαστικά, το ABS + παρουσιάζει ευθραυστότητα κατά την πρόσκρουση, δημιουργώντας κίνδυνο κατάγματος εάν υποβληθεί σε ξαφνικούς κραδασμούς ή συγκρούσεις. Αυτό το χαρακτηριστικό απαιτεί προσεκτικό χειρισμό και εξέταση των προστατευτικών μέτρων σε σενάρια ανάπτυξης.



Εικόνα 47 Τυπωμένο ABS+ μέρος του gimbal

Ο σχεδιασμός του gimbal επιτρέπει την απλή ενσωμάτωση με διάφορες πλατφόρμες drone ή σταθερές ρυθμίσεις, προσφέροντας ευελιξία στην εφαρμογή. Η ευκολία τοποθέτησης και η συμβατότητα με διαφορετικά συστήματα ενισχύουν τη χρησιμότητά του σε μια σειρά περιπτώσεων χρήσης. Συνολικά, το σύστημα gimbal επιδεικνύει υψηλό επίπεδο απόδοσης, με ακριβείς δυνατότητες σταθεροποίησης και φιλικές προς το χρήστη διαδικασίες βαθμονόμησης, καθιστώντας το ένα πολύτιμο εργαλείο για εφαρμογές που απαιτούν σχολαστικό έλεγχο της κάμερας.

Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα και συζήτηση

6.1 Αξιολόγηση απόδοσης

Η ακρίβεια σταθεροποίησης και ο χρόνος απόκρισης του συστήματος gimbal αξιολογήθηκαν κάτω από διάφορα επιχειρησιακά σενάρια για να εκτιμηθεί η απόδοσή του για διαφορετικές εφαρμογές.

Μετρήσεις ακρίβειας σταθεροποίησης

Σε ελεγχόμενες δοκιμές εσωτερικού χώρου, το αντίζυγο πέτυχε σταθερά ακρίβεια σταθεροποίησης εντός $\pm 0,05$ μοιρών σε όλους τους άξονες. Αυτό το επίπεδο ακρίβειας είναι ικανοποιητικό για περιπτώσεις γενικής χρήσης, όπως περιστασιακή βιντεοσκόπηση ή εφαρμογές όπου είναι αποδεκτές μικρές αποκλίσεις. Ωστόσο, για την παραγωγή βίντεο επαγγελματικής ποιότητας, όπου ακόμη και μικρές κινήσεις μπορεί να είναι αισθητές, αυτή η ακρίβεια μπορεί να μην αρκεί. Ο περιορισμός γίνεται πιο εμφανής όταν χρησιμοποιείτε ευρυγώνιους φακούς (π.χ. 14mm) σε κάμερες με αισθητήρα περικοπής 1280x720, καθώς το στενό οπτικό πεδίο ενισχύει τυχόν υπολειπόμενο jitter, ειδικά κατά τη λήψη κοντινών σκηνών.

Χρόνος απόκρισης σε διάφορα σενάρια

Το αντίζυγο επέδειξε αξιόπαινη ανταπόκριση, με ταχεία σταθεροποίηση μετά από διαταραχές. Σε τυπικά σενάρια, το σύστημα εγκαταστάθηκε σε σταθερή κατάσταση μέσα σε ένα κλάσμα του δευτερολέπτου, εξασφαλίζοντας ομαλές μεταβάσεις και ελάχιστη καθυστέρηση. Αυτή η γρήγορη απόκριση αποδίδεται στον αποτελεσματικό συντονισμό του ελεγκτή PID, ο οποίος διορθώνει αποτελεσματικά τις αποκλίσεις προσαρμόζοντας τις εξόδους του κινητήρα με βάση την ανάδραση σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, κάτω από πιο απαιτητικές συνθήκες, όπως ξαφνικές κινήσεις ή εξωτερικές δονήσεις, ο χρόνος απόκρισης αυξήθηκε ελαφρώς, υποδεικνύοντας περιθώρια βελτιστοποίησης στις παραμέτρους ελέγχου.

Ζητήματα για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας

Ενώ οι τρέχουσες μετρήσεις απόδοσης είναι επαρκείς για τυπικές λειτουργίες, ενδέχεται να υπολείπονται σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Το σύστημα ελέγχου του gimbal, που περιορίζεται στις ± 80 μοίρες ανά άξονα, ενδέχεται να μην εξυπηρετεί το πλήρες εύρος κίνησης που απαιτείται σε ορισμένα σενάρια. Επιπλέον, οι υπάρχουσες παράμετροι PID, αν και αποτελεσματικές σε γενικές συνθήκες, ενδέχεται να χρειαστούν περαιτέρω βελτίωση για να χειριστούν πιο δυναμικά περιβάλλοντα ή παραλλαγές ωφέλιμου φορτίου. Η επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης σε τέτοιες περιπτώσεις θα απαιτούσε εκτεταμένες δοκιμές και επαναληπτική ρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου, μια διαδικασία που μπορεί να είναι χρονοβόρα και απαιτεί εξειδικευμένη τεχνογνωσία.



Εικόνα 48 Gimbal με τροφοδοσία σε κανονική κατάσταση

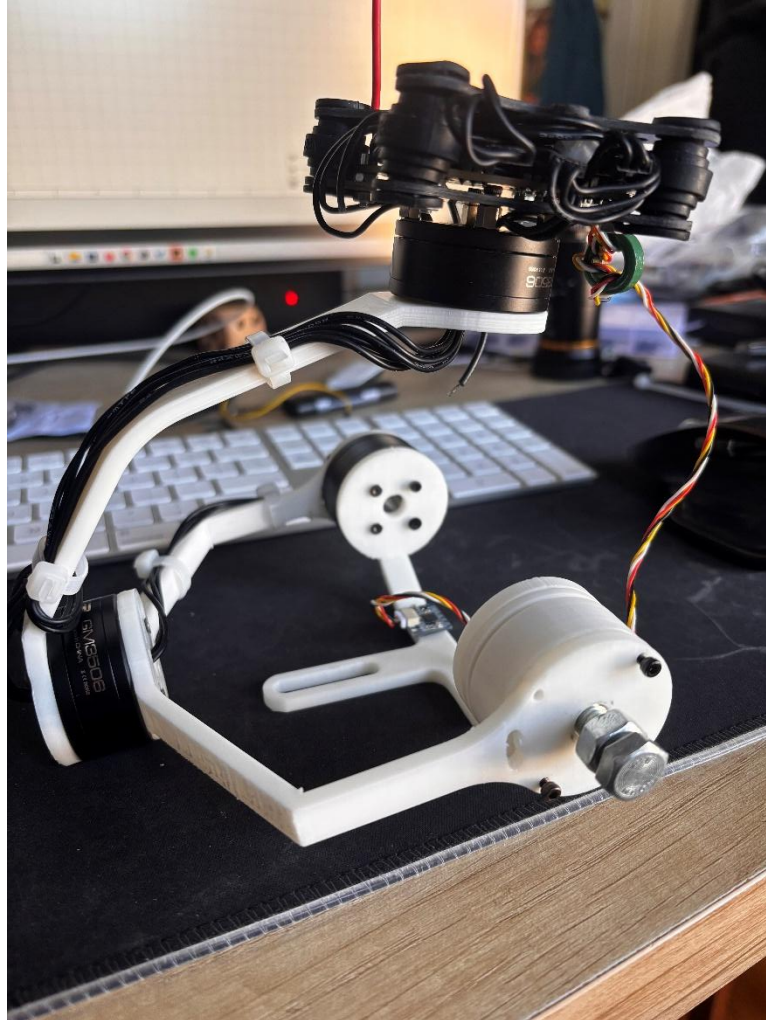
Συμπερασματικά, το σύστημα gimbal παρουσιάζει αξιόπιστη ακρίβεια σταθεροποίησης και γρήγορους χρόνους απόκρισης κατάλληλους για μια σειρά τυποποιημένων εφαρμογών. Ωστόσο, για επαγγελματικές ρυθμίσεις που απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια και προσαρμοστικότητα, συνιστώνται περαιτέρω βελτιώσεις στους αλγορίθμους ελέγχου και στις διαμορφώσεις του συστήματος.

6.2 Προκλήσεις που αντιμετωπίστηκαν

Το ταξίδι ανάπτυξης του συστήματος gimbal έχει σηματοδοτηθεί από μια σειρά μηχανικών προκλήσεων και προκλήσεων λογισμικού, καθεμία από τις οποίες συμβάλλει στη βαθύτερη κατανόηση των περιπλοκών που εμπλέκονται στη δημιουργία μιας αξιόπιστης πλατφόρμας σταθεροποίησης.

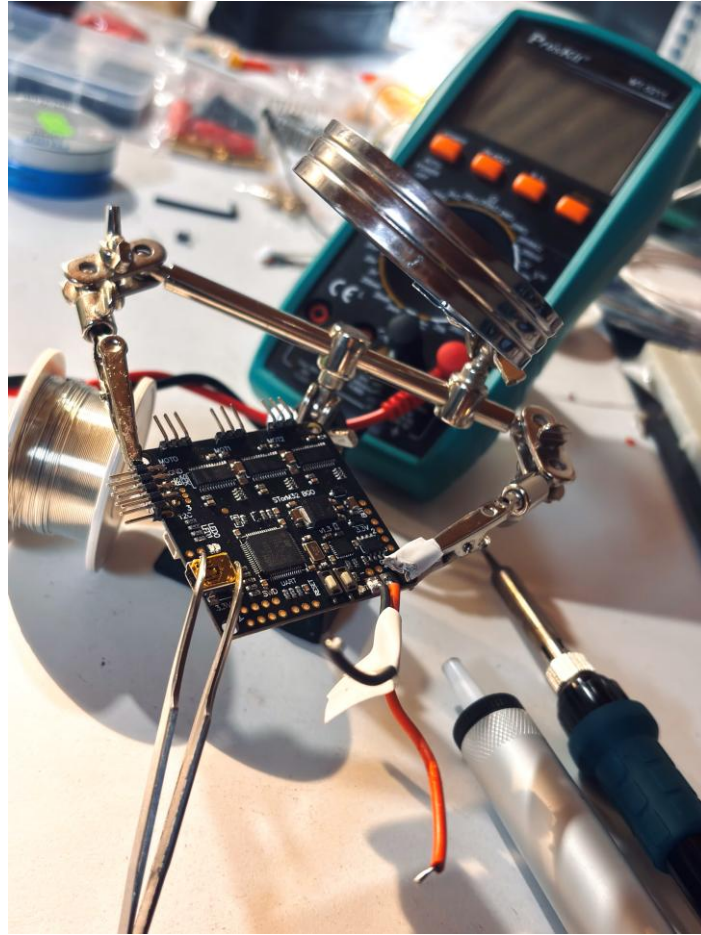
Μηχανικές προκλήσεις και δομικές εκτιμήσεις

Το αρχικό πρωτότυπο ενσωμάτωσε κινητήρες GM3506 από την iPower, οι οποίοι, παρά το σχετικά μικρό βάρος του συστήματος - περίπου 50-60% ελαφρύτεροι από την τρέχουσα προσέγγιση - αποδείχθηκαν ανεπαρκείς για την παροχή της απαραίτητης ροπής για αποτελεσματική σταθεροποίηση. Αυτό το έλλειμμα απαιτούσε την αναβάθμιση σε πιο ισχυρούς κινητήρες ικανούς να χειριστούν τις αυξημένες απαιτήσεις του συστήματος.



Εικόνα 49 Αρχικό version gimbal PLA+ με παραμόρφωση από υψηλές θερμοκρασίες

Παρουσιάστηκε σημαντική μηχανική βλάβη με μια πλακέτα ελεγκτή STorM32 v1.32. Ένα παξιμάδι ασφάλισης ήρθε ακούσια σε επαφή με έναν πυκνωτή στον οδηγό του κινητήρα DRV8313, οδηγώντας σε βραχυκύκλωμα. Αυτό το περιστατικό είχε ως αποτέλεσμα μια ορατή σπίθα και το κάψιμο της θηλυκής κεφαλίδας (female header) του συνδέσμου MOT2 (Yaw motor), καθιστώντας την πλακέτα εκτός λειτουργίας. Ένα τέτοιο γεγονός υπογραμμίζει τη σημασία της σχολαστικής συναρμολόγησης υλικού και μόνωσης για την πρόληψη ηλεκτρικών ατυχημάτων.



Εικόνα 50 Διάγνωση και επισκευή Storm32 v1.32

Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ανάπτυξης, αρκετά εξαρτήματα απέτυχαν να αντέξουν τις λειτουργικές καταπονήσεις, ιδιαίτερα υπό συνθήκες πρόσκρουσης. Αυτές οι αστοχίες υπογράμμισαν την ανάγκη για υλικά που εξισορροπούν την αντοχή και το βάρος, οδηγώντας σε επαναξιολόγηση των δομικών στοιχείων για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας χωρίς να διακυβεύεται η συνολική μάζα του συστήματος.



Εικόνα 51 Πολλαπλά κομμάτια που απέτυχαν ή χάλασαν

Η αντικραδασμική πλατφόρμα, αρχικά σχεδιασμένη με τέσσερα ελαστικά ελατήρια, απέτυχε να απομονώσει αποτελεσματικά το αντίζυγο από κραδασμούς, ειδικά όταν προσομοιώνει κινήσεις drone. Αυτή η ανεπάρκεια οδήγησε στο σχεδιασμό και την κατασκευή μιας πλατφόρμας προσαρμοσμένης στις συγκεκριμένες δυναμικές απαιτήσεις του συστήματος.



Εικόνα 52 Αντικραδασμική πλατφόρμα από ανθρακόνημα (carbon fiber)

Η διαχείριση καλωδίων παρουσίασε το δικό της σύνολο προκλήσεων. Η διασφάλιση ότι οι διαδρομές καλωδίωσης δεν παρεμβαίνουν στα κινούμενα μέρη απαιτούσε προσεκτικό σχεδιασμό και εκτέλεση. Αυτή η σχολαστική προσέγγιση στην καλωδίωση όχι μόνο βελτίωσε την αξιοπιστία του συστήματος, αλλά διευκόλυνε επίσης την ευκολότερη συντήρηση και αντιμετώπιση προβλημάτων.

Πολυπλοκότητα εντοπισμού σφαλμάτων και συντονισμού λογισμικού

Στο μέτωπο του λογισμικού, επενδύθηκε σημαντικός χρόνος στον εντοπισμό σφαλμάτων πρωτοκόλλων επικοινωνίας, ιδιαίτερα στην κωδικοποίηση μηνυμάτων με κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (CRC) πριν από τη μετάδοση στον ελεγκτή STorM32 v1.32. Η διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων στις μεταδόσεις εντολών ήταν κρίσιμη για την αξιόπιστη λειτουργία του αντίζυγου.

Η απουσία σταθερής βάσης κατά τη διάρκεια των αρχικών ακολουθιών ενεργοποίησης οδήγησε σε δυσκολίες στην επίτευξη σωστής ισοπέδωσης, τονίζοντας την ανάγκη για μια ασφαλή και σταθερή πλατφόρμα κατά τη βαθμονόμηση και τη λειτουργία. Αυτή η υλοποίηση ενημέρωσε τις μεταγενέστερες τροποποιήσεις του σχεδιασμού για να διευκολύνει πιο αξιόπιστες διαδικασίες αρχικοποίησης.

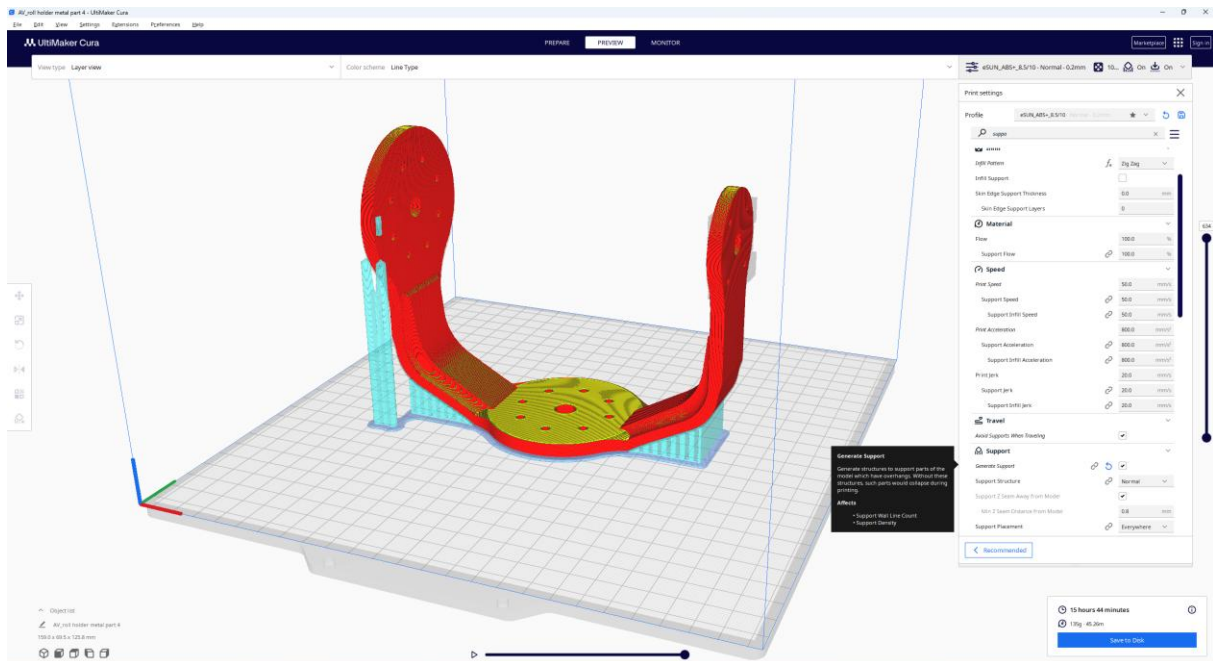
Η διαμόρφωση των αξόνων του gimbal περιελάμβανε πολυάριθμες δοκιμές, συμπεριλαμβανομένης της ρύθμισης ορισμένων αξόνων σε αντίστροφους και της βαθμονόμησης των αδρανειακών μονάδων μέτρησης (IMU). Κάθε ρύθμιση απαιτούσε προσεκτική παρατήρηση και επαναληπτικό συντονισμό για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση σταθεροποίησης.

Η ρύθμιση των παραμέτρων Analogal-Integral-Derivatives (PID) αποδείχθηκε πολύπλοκη εργασία, με κάθε προσαρμογή παραμέτρων να επηρεάζει την ανταπόκριση και τη σταθερότητα του συστήματος. Η επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης απαιτούσε εκτεταμένες δοκιμές και τελειοποίηση, μια διαδικασία που ήταν χρονοβόρα και τεχνικά απαιτητική.

Ένα περιστατικό που αφορούσε έναν κατεστραμμένο σύνδεσμο κινητήρα (dupont header), που πιθανότατα προέκυψε από προηγούμενο ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα, απαιτούσε την απόκτηση ενός

εργαλείου πτύωσης και συνδέσμων αντικατάστασης. Η εμπειρία αυτή ανέδειξε τη σημασία των ισχυρών ηλεκτρικών συνδέσεων και την ανάγκη για κατάλληλα εργαλεία για τη διατήρηση της ακεραιότητας του συστήματος.

Η επαναληπτική φύση της διαδικασίας ανάπτυξης οδήγησε σε πολλαπλές αναθεωρήσεις των στοιχείων του συστήματος. Η ενίσχυση της δομικής αντοχής συχνά οδήγησε σε αυξημένο βάρος και αλλοιωμένες διαστάσεις, απαιτώντας εκτεταμένους επανασχεδιασμούς για να διασφαλιστεί η συμβατότητα των εξαρτημάτων και η ισορροπία του συστήματος.



Εικόνα 53 Πολυπλοκότητα στις ρυθμίσεις του Slicer για ABS+

Συνολικά, προμηθεύτηκαν τρεις πλακέτες STorM32 v1.32, με το σωρευτικό κόστος να υπερβαίνει τις αρχικές προβλέψεις του προϋπολογισμού. Το απρόβλεπτο κόστος οφειλόταν κυρίως σε αποτυχίες υλικού και στην μεγάλη δυσκολία κατανόησης που σχετίζεται με την ανάπτυξη του συστήματος.

Πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη μελέτη και ανάλυση του ελεγκτή STorM32 v1.32 για τη διάγνωση και την επίλυση λειτουργικών προβλημάτων. Αυτό περιελάμβανε τη δοκιμή των ορίων του συστήματος χρησιμοποιώντας τροφοδοτικό, τη μέτρηση ηλεκτρικών παραμέτρων με πολύμετρο, την αξιολόγηση της ακεραιότητας των εξαρτημάτων με μετρητή LCR και την ανάλυση συμπεριφορών σήματος με παλμογράφο. Οι προσπάθειες αυτές ήταν καθοριστικές για τον εντοπισμό σφαλμάτων και την εφαρμογή αποτελεσματικών λύσεων.

Το αποκορύφωμα αυτών των προκλήσεων μηχανικής και λογισμικού ήταν μια ολοκληρωμένη κατανόηση της πολυπλοκότητας που εμπλέκεται στην ανάπτυξη ενός συστήματος αντίζυγου υψηλής απόδοσης. Κάθε εμπόδιο που συναντούσε παρείχε πολύτιμες γνώσεις, συμβάλλοντας στη φινέτσα και τη στιβαρότητα του τελικού σχεδιασμού.

6.3 Ανάλυση της απόδοσης του βρόχου ελέγχου

Ο ελεγκτής PID διαμορφώθηκε και τελειοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το επίσημο λογισμικό o323BGCTool που παρέχεται από τον Olliw, τον προγραμματιστή του υλικολογισμικού (firmware) STorM32 v1.32. Μέσω αυτού του ειδικού περιβάλλοντος συντονισμού, οι παράμετροι PID προσαρμόστηκαν επαναληπτικά μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητική ισορροπία μεταξύ απόκρισης και σταθερότητας. Αυτές οι βελτιστοποιημένες παράμετροι επιτρέπουν στο αντίζυγο να διατηρεί τον προσανατολισμό στόχου με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, ακόμη και όταν υποβάλλεται σε ξαφνικές αλλαγές στη θέση ή τον προσανατολισμό του drone. Είτε το σύστημα αντισταθμίζει παθητικές διαταραχές είτε εκτελεί ενεργά εντολές θέσης, ο βρόχος ελέγχου κρατά σταθερά τις γωνίες του gimbal με ακρίβεια.

Στις πρακτικές δοκιμές, όταν το αντίζυγο έχει εντολή να περιστραφεί σε μια συγκεκριμένη γωνία στόχου - όπως κατά τη διάρκεια αυτοματοποιημένων κινήσεων μετατόπισης ή παρακολούθησης - η απόκλιση από την ελεγχόμενη θέση φτάνει αρχικά περίπου 0,05 μοίρες. Μέσα σε περίπου 3 έως 4 δευτερόλεπτα, το σφάλμα συγκλίνει στο μηδέν, αποδεικνύοντας ότι ο βρόχος ελέγχου ανταποκρίνεται και είναι ικανός για λεπτή διόρθωση θέσης. Αυτό το επίπεδο ακρίβειας είναι εντυπωσιακό για τις περισσότερες γενικές εφαρμογές, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη τη φύση της σταθεροποίησης σε πραγματικό χρόνο.

Ωστόσο, για να επιτευχθεί ακόμη υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας, ιδίως για εφαρμογές όπως η επαγγελματική κινηματογράφηση ή η υψηλής δυναμικής εναέρια απεικόνιση, προτείνεται περαιτέρω βελτίωση. Ο συντονισμός PID είναι εγγενώς μια επαναληπτική και χρονοβόρα εργασία που επωφελείται σε μεγάλο βαθμό από επαναλαμβανόμενες δοκιμές υπό διαφορετικά σενάρια και φορτία. Πρόσθετες βελτιώσεις θα μπορούσαν να γίνουν με τη βελτίωση των προφίλ επιτάχυνσης και ταχύτητας κατά τη διάρκεια γωνιακών μεταβάσεων. Με τη σταδιακή ρύθμιση των ρυθμών αύξησης και επιβράδυνσης του κινητήρα, μπορούν να επιτευχθούν ομαλότερες κινήσεις και μειωμένη υπέρβαση.

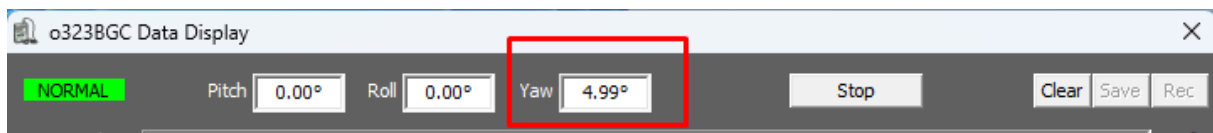
Οι μελλοντικές βελτιώσεις θα πρέπει επίσης να λαμβάνουν υπόψη την ενσωμάτωση προσαρμοστικής ή δυναμικής λογικής PID, όπου τα κέρδη προσαρμόζονται με βάση το προφίλ κίνησης ή τις συνθήκες φορτίου. Αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να μειώσει την ανάγκη για χειροκίνητο επανασυντονισμό όταν αλλάζουν τα ωφέλιμα φορτία ή υπό ποικίλες περιβαλλοντικές πιέσεις. Συνοπτικά, ενώ η τρέχουσα απόδοση του βρόχου ελέγχου είναι σταθερή και λειτουργική, μια βαθύτερη εστίαση στη δυναμική προσαρμογή παραμέτρων και στη ρύθμιση του προφίλ κίνησης θα μπορούσε να ανυψώσει το σύστημα σε επίπεδο κατάλληλο για πιο απαιτητικές και επαγγελματικές εργασίες.

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες

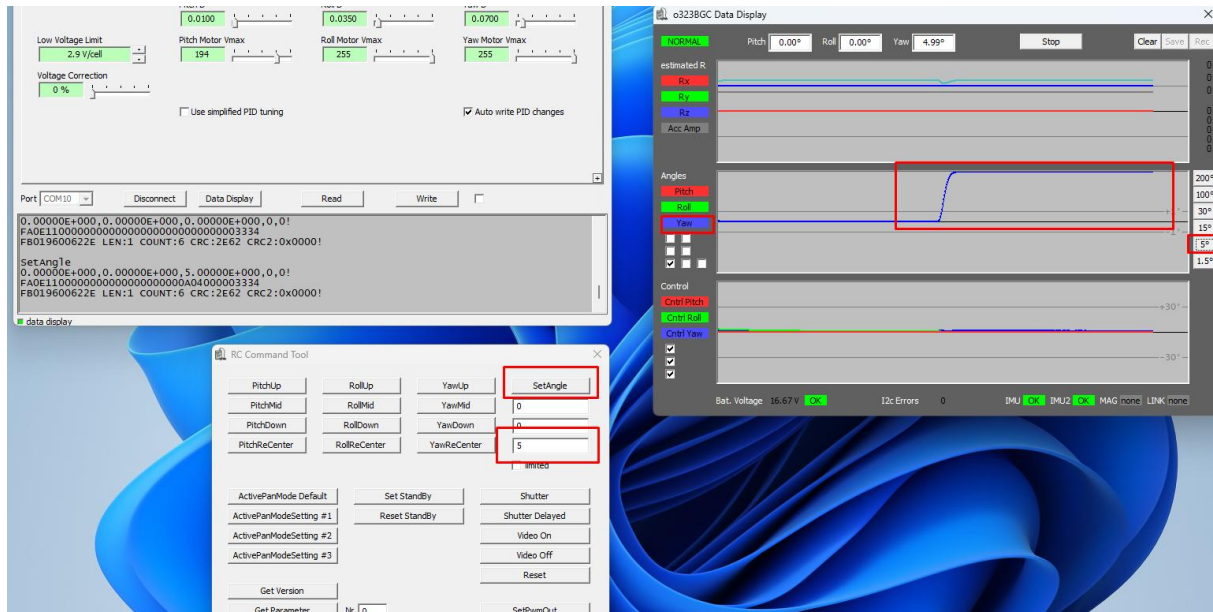
7.1 Σύνοψη των επιτευγμάτων

Αυτή η διατριβή οδήγησε με επιτυχία στην πλήρη ανάπτυξη ενός συστήματος αντίζυγου τριών αξόνων προσαρμοσμένου για ενσωμάτωση με πλατφόρμες drone, χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό ελεγχόμενο από ανατροφοδότηση για την ενίσχυση της ακρίβειας σταθεροποίησης. Ξεκινώντας από το μηδέν, ο σχεδιασμός ενσωμάτωσε τα πάντα, από τη μηχανική μοντελοποίηση έως την ηλεκτρονική ολοκλήρωση και τον έλεγχο λογισμικού. Ένα από τα κύρια ορόσημα ήταν ο σχεδιασμός και η 3D εκτύπωση ενός δομικά υγιούς αλλά ελαφρού πλαισίου χρησιμοποιώντας υλικό ABS+, ειδικά σχεδιασμένο για να αντέχει στις φυσικές καταπονήσεις που αντιμετωπίζουν οι εφαρμογές που τοποθετούνται σε drone.

Η ενσωμάτωση των κινητήρων GM6208-150T, σε συνδυασμό με τον ελεγκτή αντίζυγου STorM32 v1.32 και υποστηριζόμενη από προσαρμοσμένα σενάρια Python, επέτρεψε τον ακριβή έλεγχο προσανατολισμού σε πραγματικό χρόνο. Ο βρόχος ελέγχου βελτιώθηκε περαιτέρω μέσω της εφαρμογής ενός ελεγκτή PID, βελτιστοποιημένου μέσω της διεπαφής o323BGCTool του OlliW, επιτρέποντας στο αντίζυγο να ανταποκρίνεται γρήγορα σε εντολές θέσης και εξωτερικές διαταραχές. Παρά τις αρχικές αποτυχίες υλικού, όπως οι κατεστραμμένοι ελεγκτές και η ανεπαρκής ροπή του κινητήρα σε προηγούμενα πρωτότυπα, το τελικό σύστημα πέτυχε αξιόπιστη απόδοση, διατηρώντας τον προσανατολισμό εντός περιθωρίου $\pm 0,05^\circ$ και διορθώνοντας σφάλματα με ομαλές μεταβάσεις.



Εικόνα 54 Απόκλιση 0.01 μοίρας



Εικόνα 55 Απόκριση συστήματος σε μεταβολές γωνιών RC

Η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μέσω σειριακής σύνδεσης στα 115200 baud, μαζί με τις ισχυρές δυνατότητες επεξεργασίας του Raspberry Pi 5, ολοκλήρωσαν την αρχιτεκτονική του συστήματος. Οι δοκιμές επαλήθευσαν την ικανότητα του gimbal να σταθεροποιεί μια τοποθετημένη κάμερα, επιδεικνύοντας τις δυνατότητές του σε περιβάλλοντα εναέριας απεικόνισης όπου η σταθερότητα είναι κρίσιμη. Αυτό το επίτευγμα παρέχει μια ισχυρή πλατφόρμα για μελλοντικές επεκτάσεις, ειδικά σε περιβάλλοντα έρευνας και ανάπτυξης.

Ως μέρος της ευρύτερης ανάπτυξης του συστήματος, μία από τις βασικές επεκτάσεις ήταν η υλοποίηση ενός API παρακολούθησης αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο, που παρουσιάστηκε στο [Κεφάλαιο 3.4.2](#). Αυτό το στοιχείο εισήγαγε ένα υψηλότερο επίπεδο νοημοσύνης στο gimbal, επιτρέποντάς του να ανταποκρίνεται δυναμικά σε οπτικά ερεθίσματα. Με την ενσωμάτωση της ανίχνευσης που βασίζεται στο YOLO με μια ζωντανή ροή βίντεο και επιτρέποντας στον χρήστη να κλειδώσει σε συγκεκριμένους στόχους, το σύστημα πέτυχε όχι μόνο σταθεροποίηση αλλά και ενεργό αντικείμενο που ακολουθεί. Η ικανότητα μετάφρασης των θέσεων των αντικειμένων σε γωνιακές εντολές και η εκτέλεσή τους μέσω του ελεγκτή αντίζυγου υπογράμμισε τη δυνατότητα συνδυασμού όρασης και ελέγχου σε μια συνεκτική δομή ανάδρασης. Αυτό σηματοδότησε ένα κρίσιμο ορόσημο προς την εξέλιξη του αντίζυγου από έναν παθητικό σταθεροποιητή σε μια ημιαυτόνομη πλατφόρμα παρακολούθησης.

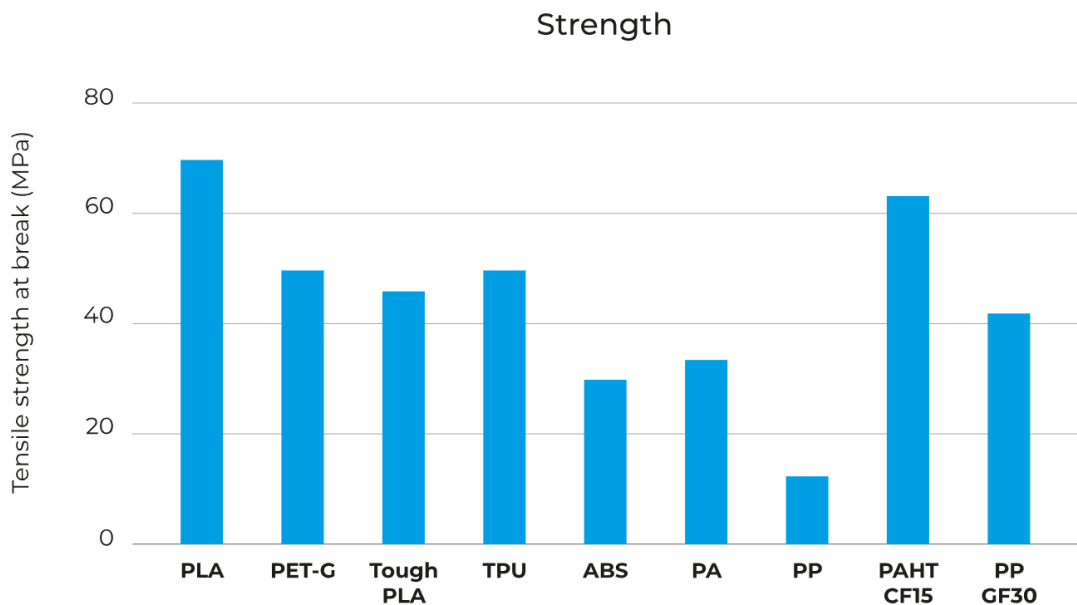
7.2 Πιθανές βελτιώσεις

Ενώ το τρέχον σύστημα επιδεικνύει σταθερή λειτουργικότητα για γενικές εργασίες σταθεροποίησης, έχουν εντοπιστεί αρκετοί τομείς όπου οι αναβαθμίσεις θα μπορούσαν να βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση, ειδικά για επαγγελματικές και εμπορικές εφαρμογές. Από την άποψη του υλικού, περαιτέρω βελτιώσεις στη δομική ακαμψία χωρίς να θυσιάζεται το βάρος θα μπορούσαν να επιτευχθούν με τη μετάβαση από πλαστικά εξαρτήματα σε ελαφριά μέταλλα ή σύνθετα υλικά.

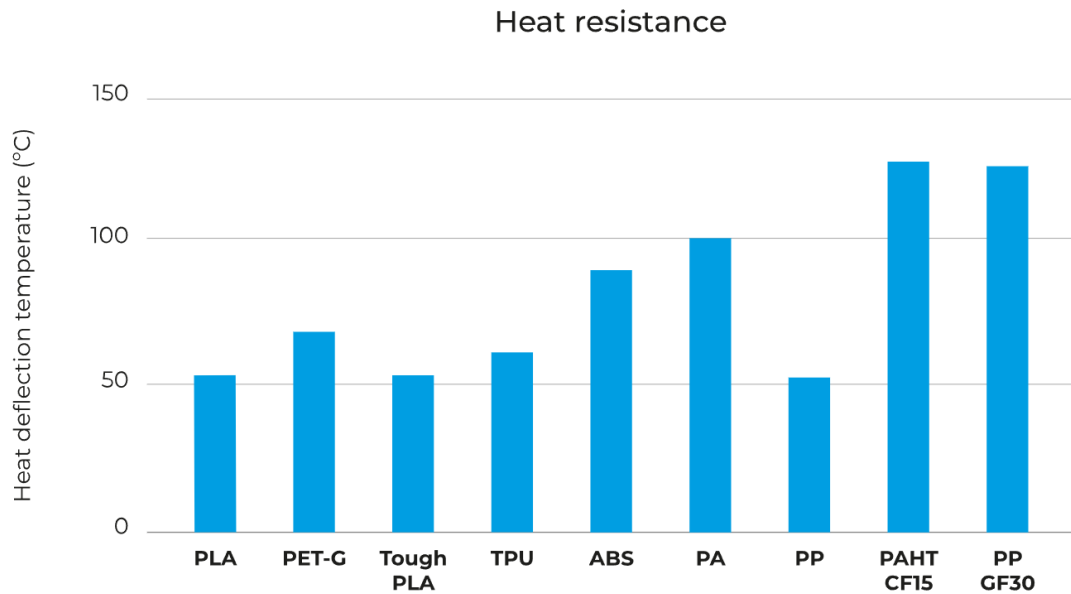
Ένας υποψήφιος αντικαταστάτης είναι το ABS ενισχυμένο με ίνες άνθρακα, το οποίο συνδυάζει την ευκολία κατασκευής μέσω 3D εκτύπωσης με αυξημένη ακαμψία και μειωμένη παραμόρφωση υπό

φορτίο. Επιπλέον, η χρήση καθαρού ανθρακονήματος ή CNC κατεργασμένου αλουμινίου για βασικά φέροντα μέρη θα μπορούσε να ενισχύσει περαιτέρω τη θερμική διαχείριση του συστήματος, αποτρέποντας τη συσσώρευση θερμότητας σε κρίσιμα σημεία, όπως κοντά στους κινητήρες ή τον ελεγκτή. Το αλουμίνιο, πέραν της θερμικής του αγωγιμότητας, προσφέρει και εξαιρετική αντοχή σε κραδασμούς, μειώνοντας τη μετάδοση ταλαντώσεων στους ευαίσθητους αισθητήρες του gimbal.

Εναλλακτικά, υλικά όπως το ενισχυμένο νάιλον (nylon+carbon) μπορούν να προσφέρουν έναν ισορροπημένο συνδυασμό ευκαμψίας, χαμηλού βάρους και δομικής σταθερότητας, καθιστώντας το σύστημα πιο ανθεκτικό σε επαναλαμβανόμενους μηχανικούς καταπονήσεις κατά τη διάρκεια της πτήσης. Η μετάβαση σε τέτοιες επιλογές υλικών δεν στοχεύει μόνο στην ενίσχυση της μηχανικής αντοχής, αλλά και στη βελτίωση της διάρκειας ζωής του gimbal, τη μείωση των απαιτήσεων συντήρησης και τη βελτίωση της συνολικής θερμικής αξιοπιστίας σε απαιτητικά περιβάλλοντα. Παράλληλα, η μείωση του συνολικού βάρους μέσω αυτών των υλικών προσφέρει επιπλέον πλεονεκτήματα στην εμβέλεια πτήσης και στην κατανάλωση ισχύος του UAV.



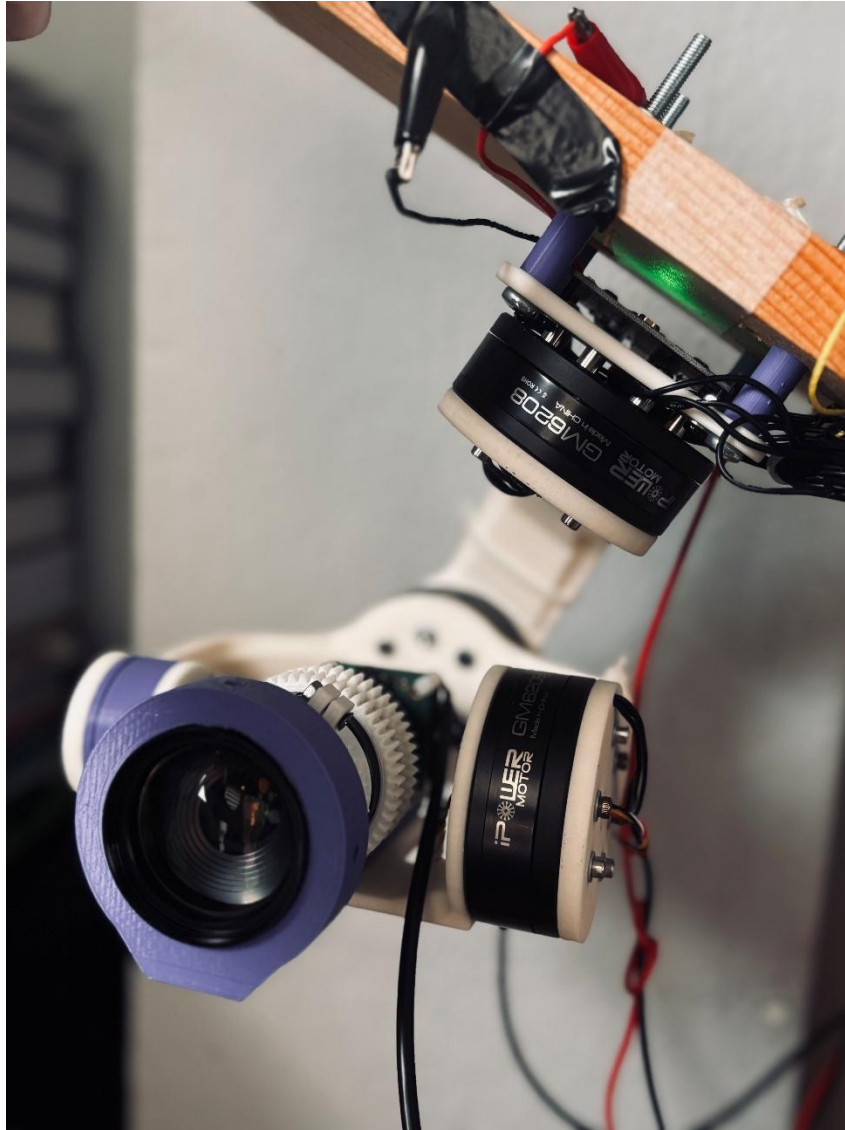
Σχήμα 4 Σύγκριση υλικών νήματος εκτύπωσης σε Δύναμη [67]



Σχήμα 5 Σύγκριση υλικών νήματος εκτύπωσης σε Αντοχή στη Θερμότητα [67]

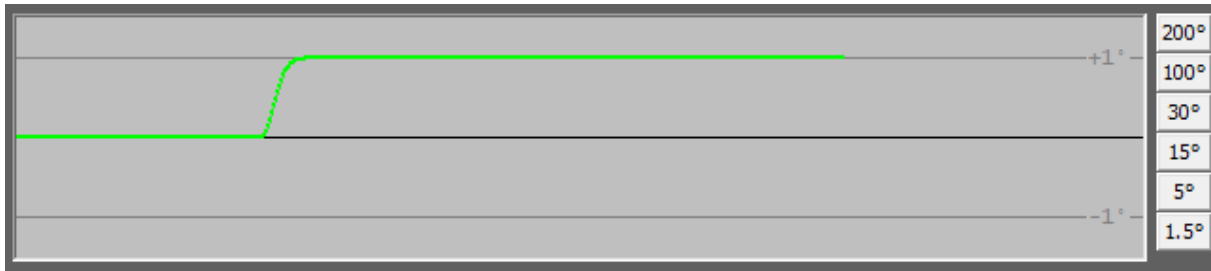
Επιπλέον, η ενίσχυση της αντικραδασμικής βάσης με πιο ανθεκτικούς αποσβεστήρες ή προηγμένα ελαστομερή υλικά θα εξασφάλιζε καλύτερη απορρόφηση κραδασμών, ειδικά κατά τη διάρκεια πτήσης ή προσομοιωμένων αναταράξεων.

Στο ηλεκτρονικό μέτωπο, εναλλακτικοί ελεγκτές αντίζυγου με πιο εξελιγμένους αλγόριθμους σύντηξης αισθητήρων και υποστήριξη για κινητήρες υψηλότερης ροπής θα μπορούσαν να προσφέρουν πιο άμεση και ακριβή συμπεριφορά. Οι περιορισμοί που επιβάλλονται από το εύρος $\pm 80^\circ$ σε κάθε άξονα στην τρέχουσα ρύθμιση περιορίζουν τη χρήση του σε δυναμικούς ή επιθετικούς ελιγμούς drone. Η επέκταση αυτών των ορίων, είτε μέσω διαφορετικών μηχανικών διαμορφώσεων είτε μέσω επαναπροσδιορισμού λογισμικού, θα διεύρυνε τη χρησιμότητα του gimbal.



Εικόνα 56 Gimbal σε κατάσταση κλήσης με Hold προσανατολισμού

Η βελτιστοποίηση λογισμικού παρουσιάζει επίσης έναν τομέα ώριμο για πρόοδο. Ενώ ο τρέχων βρόχος PID λειτουργεί επαρκώς, η εφαρμογή προσαρμοστικού συντονισμού PID (adaptive tuning) - πιθανώς χρησιμοποιώντας μηχανική μάθηση ή ευρετικούς αλγόριθμους - θα επέτρεπε στο αντίζυγο να αυτοπροσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο με βάση το ωφέλιμο φορτίο ή τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι βελτιωμένες διεπαφές GUI για συντονισμό και οπτικοποίηση μετρήσεων απόδοσης θα μπορούσαν επίσης να εξορθολογίσουν τη διαδικασία εντοπισμού σφαλμάτων και διαμόρφωσης τόσο για προγραμματιστές όσο και για χρήστες.



Εικόνα 57 Απόκριση PID συστήματος

Αν και το σύστημα ανίχνευσης και παρακολούθησης αντικειμένων αποδείχθηκε λειτουργικά άρτιο, το [Κεφάλαιο 3.6](#) αποκάλυψε επίσης αρκετούς τομείς για βελτίωση. Η σταθερότητα κλειδώματος και η ακρίβεια κεντραρίσματος, ενώ είναι αποδεκτές στη γενική χρήση, μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω μέσω αλγοριθμικής βελτίωσης και βελτιστοποίησης υλικού. Η ενσωμάτωση εξυπνότερων μεθόδων επιλογής, η ενίσχυση της ανίχνευσης υπό δύσκολες συνθήκες και η μείωση της καθυστέρησης στις απαντήσεις ελέγχου θα ωφελήσουν σημαντικά την ανταπόκριση του συστήματος. Επιπλέον, η βελτίωση της οπτικής διεπαφής για την επιλογή αντικειμένων και η μείωση της εξάρτησης από εισόδους γραμμής εντολών θα καθιστούσε το API πιο φιλικό προς το χρήστη και προσβάσιμο για πραγματικές αναπτύξεις.

Τέλος, η βελτίωση της θερμικής διαχείρισης και της αρθρωτότητας των εξαρτημάτων θα συμβάλει στη μακροζωία του συστήματος και στην ευκολότερη συντήρηση. Καθώς πολλά εξαρτήματα υπέστησαν ζημιά κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, η βελτίωση της επισκευασιμότητας και της ανθεκτικότητας μέσω αρθρωτού σχεδιασμού θα μπορούσε να μειώσει το κόστος και το χρόνο διακοπής λειτουργίας σε πραγματική χρήση.

7.3 Μελλοντικές κατευθύνσεις

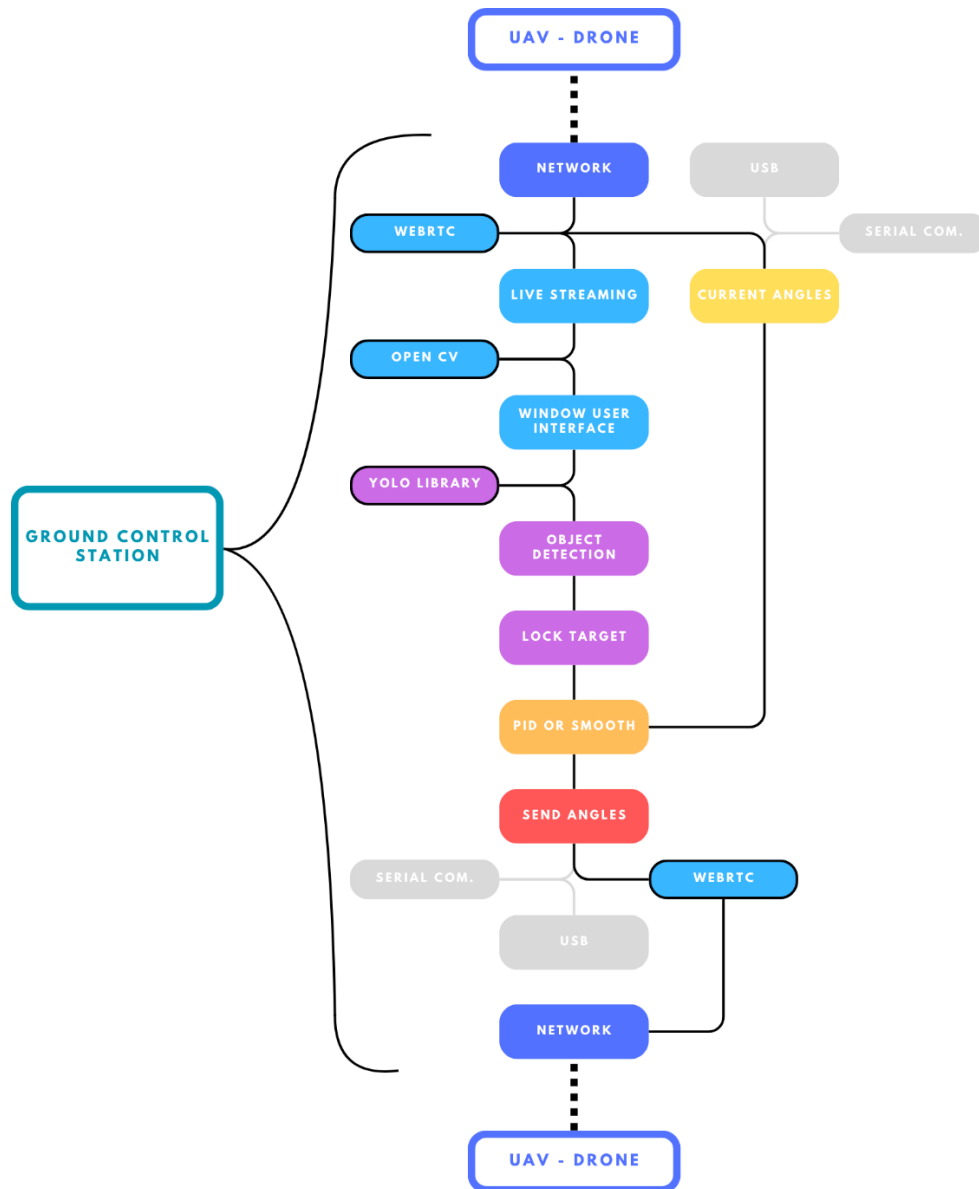
Με βάση τα γερά θεμέλια που θέτει αυτή η διατριβή, μπορούν να επιδιωχθούν αρκετές μελλοντικές οδοί για την εξέλιξη του τρέχοντος συστήματος αντίζυγου σε μια πιο εκλεπτυσμένη και ευέλικτη πλατφόρμα. Μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση είναι η πλήρης ένταξη της ενσωματωμένης επεξεργασίας βίντεο και της παρακολούθησης αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο. Αξιοποιώντας την υπολογιστική ισχύ του Raspberry Pi 5 ή παρόμοιων SoC, είναι εφικτή η εφαρμογή αλγορίθμων όρασης σε πραγματικό χρόνο, όπως η ανίχνευση προσώπου ή αντικειμένου, και η χρήση της εξόδου τους για τον δυναμικό έλεγχο του προσανατολισμού του gimbal, επιτρέποντας έτσι την έξυπνη παρακολούθηση.

Μια άλλη πολύτιμη οδός είναι η ασύρματη επικοινωνία και ο απομακρυσμένος συντονισμός. Η ενσωμάτωση μονάδων 4G LTE ή 5G ή Starlink θα μπορούσε να διευκολύνει τον συντονισμό παραμέτρων εντός πεδίου χωρίς φυσική σύνδεση, ενισχύοντας την ευελιξία κατά την ανάπτυξη. Αυτό θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο σε μεγάλης κλίμακας ή απομακρυσμένες εναέριες αποστολές, όπου η άμεση πρόσβαση στο αντίζυγο είναι περιορισμένη.

Για την ανάπτυξη σε εμπορικά μη επανδρωμένα αεροσκάφη ή βιομηχανικές επιθεωρήσεις, η συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφάλειας και αξιοπιστίας θα είναι ζωτικής σημασίας. Οι μελλοντικές εργασίες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν το σχεδιασμό περιβλημάτων που πληρούν τις αξιολογήσεις προστασίας εισόδου (IP), καθώς και τη δοκιμή του συστήματος υπό εκτεταμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένης της υγρασίας, του ανέμου και των ακραίων θερμοκρασιών.

Από ερευνητική άποψη, η διερεύνηση της χρήσης της σύντηξης αισθητήρων συνδυάζοντας πολλαπλές IMU, μαγνητόμετρα και δεδομένα GPS θα μπορούσε να προσφέρει ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια προσανατολισμού. Σε συνδυασμό με προηγμένες τεχνικές ελέγχου όπως το Model Predictive Control (MPC), το σύστημα θα μπορούσε να μεταβεί από ένα πρωτότυπο καταναλωτικού επιπέδου σε ένα εξαιρετικά ισχυρό και έξυπνο εργαλείο για κρίσιμες λειτουργίες.

Κοιτάζοντας μπροστά, το API παρέχει μια ισχυρή βάση για την επέκταση σε πλήρως αυτόνομα συστήματα παρακολούθησης κάμερας. Μια βασική κατεύθυνση είναι η μετάβαση από τον σειριακό έλεγχο στον έλεγχο βάσει δικτύου, επιτρέποντας τη μετάδοση γωνιακών εντολών απευθείας μέσω του πρωτοκόλλου WebRTC. Αυτό θα υποστήριζε απομακρυσμένες αναπτύξεις και στενότερη ενοποίηση με συστήματα ροής. Επιπλέον, η επέκταση των δυνατοτήτων αναγνώρισης αντικειμένων, η ενσωμάτωση ανίχνευσης προσώπου ή η εφαρμογή λογικής λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο μπορεί να ωθήσει το σύστημα πιο κοντά σε προηγμένες εφαρμογές επιτήρησης drone ή ρομποτικής. Αυτή η ενότητα ανοίγει ένα μονοπάτι για έξυπνο έλεγχο αντίζυγου, όπου η οπτική είσοδος όχι μόνο παρατηρείται, αλλά καθοδηγεί ενεργά τον προσανατολισμό σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 6 Μελλοντικές βελτιώσεις API

Συμπερασματικά, το σύστημα gimbal ως έχει παρέχει ένα ικανό και προσαρμόσιμο σημείο εκκίνησης. Με πρόσθετες μηχανολογικές βελτιώσεις και εξερεύνηση στον έξυπνο έλεγχο, έχει τη δυνατότητα να εξελιχθεί σε μια λύση υψηλής απόδοσης κατάλληλη για απαιτητικές εφαρμογές όπως, στην εναέρια λήψη βίντεο από drone, την επιτήρηση, ακόμη και τη ρομποτική.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] AZoM. (2023). Drone Technology: Optical Systems and Stabilization. Retrieved from <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=23768>
- [2] Unmanned Systems Technology. Custom Drone Gimbals for Inspection Drones. Retrieved from <https://www.unmannedsystemstechnology.com/feature/custom-drone-gimbals-for-inspection-drones/>
- [3] Renishaw. Drones and gimbals - encoders elevating aerial precision. Retrieved from <https://info.renishaw.com/Encoders-Drone>
- [4] Fly Eye. Flight Control Systems in Drones. Retrieved from <https://www.flyeye.io/drone-technology-flight-control-systems/>
- [5] Wikipedia. Closed-loop controller. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Closed-loop_controller
- [6] O. Ohazurike and S. Anwansedo, "UAV Gimbal Position Control Using PID Compensator," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 123-130, 2023. https://www.researchgate.net/publication/368335988_UAV_Gimbal_Position_Control_Using_PID_Compensator
- [7] M. Sahin, "Gimbal Axes Control with PID Controllers," *DergiPark*, vol. 11, no. 1, pp. 143-152, 2023. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gujsc/article/1243119>
- [8] "Proportional–integral–derivative controller," *Wikipedia*. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Proportional%E2%80%93integral%E2%80%93derivative_controller
- [9] "STorM32 Gimbal Controller," *ArduPilot Documentation*. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-storm32-gimbal.html>.
- [10] "GM6208-150T Gimbal Motor," *iFlight Shop*. Available: <https://shop.iflight.com/ipower-motor-gm6208-150t-brushless-gimbal-motor-pro208>.
- [11] "Arducam IMX477 High Quality Camera," *Amazon*, [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Arducam-Raspberry-Camera-Sensitivity-Adapter/dp/B09YHN5DBY>.
- [12] Tuning recipe, olliw.eu, https://www.olliw.eu/storm32bgc-wiki/Tuning_Recipe
- [13] Aws Abdulsalam Najm, Ibraheem Kasim Ibraheem, Nonlinear PID controller design for a 6-DOF UAV quadrotor system, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 22, Issue 4, 2019, Pages 1087-1097, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.02.005>.
- [14] J. Han, "From PID to Active Disturbance Rejection Control," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 900-906, March 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2011621.
- [15] Y. X. Su, C. H. Zheng and B. Y. Duan, "Automatic disturbances rejection controller for precise motion control of permanent-magnet synchronous motors," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 814-823, June 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.847583.
- [16] TDK InvenSense. (2015). MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4.
- [17] Texas Instruments. (2012). DRV8313: 2.5-A Triple 1/2-H Bridge Driver Datasheet (Rev. D).
- [18] iPower Motors. GM6208-150T Brushless Gimbal Motor..
- [19] OlliW. (n.d.). Storm32 Boards, olliw.eu, https://www.olliw.eu/storm32bgc-wiki/STorM32_Boards.
- [20] Raspberry Pi Foundation. (2025). Raspberry Pi 5 Technical Specifications.
- [21] Drone Dojo. (2019). *Raspberry Pi Drone: The Ultimate Project Drone*. .
- [22] DroneBlog. (2023). *What Is a Gimbal in Drones? Explained for Beginners*, <https://www.droneblog.com/drone-gimbal/>.
- [23] Oosthuizen, C., Djouani, K. D., & Du, S. (2023). *Modelling and stabilizing control of a two-axis gimbal for an unmanned aerial vehicle*. *World Journal of Advanced Engineering Technology and*

- Sciences, 9(2), 251–275, <https://wjaets.com/content/modelling-and-stabilizing-control-two-axis-gimbal-unmanned-aerial-vehicle> .
- [24] R. J. Rajesh and P. Kavitha, "Camera gimbal stabilization using conventional PID controller and evolutionary algorithms," *2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4)*, Indore, India, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/IC4.2015.7375580
- [25] M. Kim, G.-S. Byun, and G.-H. Kim, "Gimbal System Control for Drone for 3D Image," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 11. Korea Institute of Information and Communication Engineering (Nurimedia), pp. 2107–2112, 30-Nov-2016.
- [26] Cong Danh, Nguyen, The Stability of a Two-Axis Gimbal System for the Camera, *The Scientific World Journal*, 2021, 9958848, 8 pages, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9958848>
- [27] Gašparović M, Jurjević L. Gimbal Influence on the Stability of Exterior Orientation Parameters of UAV Acquired Images. *Sensors*. 2017; 17(2):401. <https://doi.org/10.3390/s17020401>
- [28] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis and M. Debbah, "Communications and Control for Wireless Drone-Based Antenna Array," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 1, pp. 820-834, Jan. 2019, doi: 10.1109/TCOMM.2018.2871453.
- [29] Defense Advancement – Gimbal Application Image, <https://www.defenseadvancement.com/news/new-stabilized-ao-ir-gimbal-unveiled-for-small-drones/>
- [30] Viewpro Gimbal Product Page , <https://www.viewproonline.com/collections/package-delivery>
- [31] Qianwen Duan, Xi Zhou, Qionong He, Xinglong Chen, Wansheng Liu, Yao Mao, Pointing control design based on the PID type-III control loop for two-axis gimbal systems, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 331, 2021, 112923, ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112923>.
- [32] Inocencio, L.C.; Veronez, M.R.; da Silveira, L.G., Jr.; Tognoli, F.M.W.; de Souza, L.V.; Bonato, J.; Diniz, J.L. 3-D Reconstruction of Rock Samples via Structure-From-Motion for Virtual Reality Applications: A Methodological Proposal. *Geosciences* 2023, 13, 5. <https://doi.org/10.3390/geosciences13010005>
- [33] From Sign Recognition to Automatic Sign Language Understanding : Addressing the Non-Conventionalized Units - Scientific Figure on ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Camera-angles-pan-tilt-roll_fig17_347528033
- [34] BLDC Motor Principles , <https://www.blcdmotor.org/principle-of-controlling-sensorless-blcd-motor-with-back-emf.html>
- [35] Alam, A. , Monem, M. and Islam, K. (2023) Optimized Design and Analysis of Single-Phase and Three-Phase Inverters for Efficient Power Conversion: A Comparative Study. *Journal of Computer and Communications*, 11, 71-95. doi: [10.4236/jcc.2023.118006](https://doi.org/10.4236/jcc.2023.118006).
- [36] Mathworks, Field-Oriented Control (FOC) - MATLAB & Simulink <https://www.mathworks.com/help/mcb/gs/implement-motor-speed-control-by-using-field-oriented-control-foc.html>
- [37] Field-oriented control by the numbers , *This article originally appeared as a series of blogs in EE Times. It is replicated here in its entirety for the convenience of the EDN community* <https://www.edn.com/field-oriented-control-by-the-numbers/>
- [38] Space Vector Modulation Theory , *pscad.com* , https://www.pscad.com/webhelp/Master_Library_Models/HVDC_and_FACTS/Space_Vector_Modulation/SVM_Theory.htm
- [39] Painless MCU implementation of space vector modulation for electric motor systems , *embedded.co* , <https://www.embedded.com/painless-mcu-implementation-of-space-vector-modulation-for-electric-motor-systems/>
- [40] Proportional–integral–derivative controller , *Wikipedia* https://en.wikipedia.org/wiki/Proportional%E2%80%93integral%E2%80%93derivative_controller
- [41] Shin, Hyo-Seob & Jang, Gang-Hyeon & Jung, Kyung-Hun & Cho, Seong-Kook & Choi, Jang-Young & Shin, Hyeon-Jae. (2021). *Optimal Design of Double-Pole Magnetization BLDC Motor and Comparison with Single-Pole Magnetization BLDC Motor in Terms of Electromagnetic Performance*. *Machines*. 9. 18. [10.3390/machines9010018](https://doi.org/10.3390/machines9010018).

- [42] The Dangers of ABS Filament Fumes, purex.com.uk <https://www.purex.co.uk/resources/insights/the-dangers-of-abs-filament-fumes>
- [43] Εικόνα What is an STL file?, sculpteo.com, <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/create-3d-file/what-is-an-stl-file/>
- [44] Why most hobby grade BLDC out runners are actually permanent magnet synchronous motors (PMSM) , things-in-motion.blogspot.com , <https://things-in-motion.blogspot.com/2018/12/why-most-hobby-grade-blcdc-out-runners.html>
- [45] Arducam IMX477 HQ Camera Board for Jetson, 12.3MP Camera Board Compatible with Nvidia Jetson Board, Raspberry Pi CM 3/3+ and CM 4, <https://www.amazon.com/Arducam-Jetson-IMX477-Raspberry-Compute/dp/B08NVH44HB?th=1>
- [46] Mouser – Raspberry Pi 5 Technical Overview, <https://gr.mouser.com/new/raspberry-pi/raspberry-pi-5-sbc/>
- [47] Industrial Robot Arm 3D model , 3dmodels.org, <https://3dmodels.org/3d-models/industrial-robot-arm/>
- [48] PID Controller: Types, Working and its Application, multispanindia.com, <https://multispanindia.com/blog-detail.php/pid-controller-types-working-and-its-application>
- [49] P. Kumar, S. Sonkar, A. K. Ghosh and D. Philip, "Real-time vision-based tracking of a moving terrain target from Light Weight Fixed Wing UAV using gimbal control," *2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, Prague, Czech Republic, 2020, pp. 154-159, doi: 10.1109/CoDIT49905.2020.9263896.
- [50] C. Lei, T. Yang and Z. Li, "Foggy Weather Traffic Detection System Based on UAV Gimbal Camera," *2022 IEEE 4th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*, Dali, China, 2022, pp. 686-691, doi: 10.1109/ICCASIT55263.2022.9986944.
- [51] Khodadadi, H., Motlagh, M. R. J. and Gorji, M., "Robust control and modeling a 2-DOF Inertial Stabilized Platform", *Int. Conf. on Elec., Cont. and Comp. Eng. (INECCE)*, 223-228, 2011.
- [52] Kim, S. B., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., "Robust Control for a Two-Axis Gimballed Sensor System with Multivariable Feedback Systems", *IET Cont. Theory & Appl.*, Vol. 4(4), 2010, p 539– 551.
- [53] Kim, M., Byun, G.-S., Kim, G.-H. and Choi, M.-H., "The Stabilizer Design for a Drone-Mounted Camera Gimbal System Using Intelligent-PID Controller and Tuned Mass Damper", *Int. J. of Cont. and Automat.*, 9(5):387-394, 2016.
- [54] Stojcsics, D. and Molnar, A., "Fixed-Wing Small-Size UAV Navigation Methods with HIL Simulation for AERObot Autopilot", *IEEE 9th Int. Symp. on Intel. Sys. and Inf. (SISY)*, 241-245, 2011.
- [55] GM3506 Gimbal Motor," *iFlight Shop*. Available: https://shop.iflight.com/ipower-motor-gm3506-brushless-gimbal-motor-pro967?srsId=AfmBOop2-IDToJG4iFVsv_FGzNmEv2f987ffs1mcZS6BnQYxsXzLmWp5
- [56] Lei Ming, Rende Zhao, Jinkui He and Zhen Xin, "A novel SVPWM method with periodically-balanced zero-sequence voltage impulse for three-phase three-level photovoltaic inverters," *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)*, Kaohsiung, 2017, pp. 1991-1996, doi: 10.1109/IFEEC.2017.7992356.
- [57] Akin, Bilal, Manish Bhardwaj, and Jon Warriner. "Sensorless field oriented control of 3-phase permanent magnet synchronous motors." *Texas Instruments, Application Notes 2* (2013).
- [58] CIRI Research. (2023). "CIRI research raises health concerns over 3D printing emissions." 3D Printing Industry. <https://3dprintingindustry.com/news/ciri-research-raises-health-concerns-over-3d-printing-emissions-226978/>
- [59] STL (file format) , Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format))
- [60] What is YOLO? The Ultimate Guide [2025] , blog.roboflow.com, <https://blog.roboflow.com/guide-to-yolo-models/>
- [61] Jocher, G. (2023). YOLOv8 Official Documentation. Ultralytics. <https://docs.ultralytics.com/>
- [62] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 779-788, doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [63] Bochkovskiy, Alexey, Chien-Yao Wang, and Hong-Yuan Mark Liao. "Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection." *arXiv preprint arXiv:2004.10934* (2020).

- [64] Ultralytics GitHub Repository, YOLOv8. <https://github.com/autogyro/yolo-V8>
- [65] Ultralytics GitHub Repository, YOLOv11 <https://github.com/ultralytics/ultralytics>
- [66] Joseph, E. A., and O. O. Olaiya. "Cohen-coon PID tuning method; A better option to Ziegler Nichols-PID tuning method." *ENginerring Research* 2.11 (2017): 141-145.
- [67] Discover the extensive guide to the properties of 3D printing FFF filaments, bcn3d.com, <https://www.bcn3d.com/guide-to-filament-properties/>