

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Κατασκευή τετρακόπτερου Drone με έξυπνη κάμερα
ανίχνευσης αντικειμένων

Του φοιτητή.
Βασιλειάδη Παντελεήμων
Αρ. Μητρώου: 2019014

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο Κοκκώνης
Γεώργιος
Βαθμίδα Αναπληρωτής Καθηγητής

Ημερομηνία 16/04/2026

Τίτλος Δ.Ε. Κατασκευή τετρακόπτερου Drone με έξυπνη κάμερα ανίχνευσης αντικειμένων

Κωδικός Δ.Ε. 25332

Όνοματεπώνυμο φοιτητή/τών Βασιλειάδης Παντελεήμων

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Κοκκώνης Γεώργιος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 21/10/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 31/05/2026

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 Βασιλειάδη Παντελεήμων 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»

Αφιερώνω την παρούσα διπλωματική εργασία στους γονείς μου, για την αμέριστη στήριξη, την υπομονή και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η βοήθειά τους, η ηθική τους συμπαράσταση και η συνεχής τους παρουσία αποτέλεσαν σημαντικό στήριγμα σε κάθε στάδιο αυτής της προσπάθειας.

Την αφιερώνω επίσης στους φίλους μου, οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου με κατανόηση, ενθάρρυνση και θετική διάθεση, ιδιαίτερα στις πιο απαιτητικές στιγμές της εκπόνησης της εργασίας. Η συμβολή τους, άμεση ή έμμεση, υπήρξε πολύτιμη και συνέβαλε ουσιαστικά στην ολοκλήρωση αυτής της διαδρομής.

Πρόλογος

Αυτό το ερευνητικό έργο ξεκίνησε με τη σύνδεση τριών τομέων που με ενδιαφέρουν (τεχνολογία μη επανδρωμένων αεροσκαφών, ενσωματωμένα συστήματα και υπολογιστική όραση) και την κατασκευή ενός λειτουργικού τετρακόπτερο drone με τη χρήση μιας έξυπνης κάμερας ανίχνευσης αντικειμένων. Η συναρμολόγηση ενός τετρακόπτερο drone εξοπλισμένου με μια έξυπνη κάμερα ανίχνευσης αντικειμένων αποτελεί έναν πρακτικό τρόπο να συνδυάσω τις γνώσεις μου στην ηλεκτρονική, τον προγραμματισμό, τα δίκτυα, τη μηχανική συναρμολόγηση και την επεξεργασία εικόνας. Από όλους αυτούς τους τομείς, το πιο σημαντικό ήταν να δημιουργήσω μια φυσική εφαρμογή (μια εφαρμογή του «πραγματικού κόσμου»), αντί να μελετήσω απλώς κάτι θεωρητικά. Έτσι, αυτή η εφαρμογή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως βάση για πειραματική ανάπτυξη στο μέλλον. Κατά τη διάρκεια αυτού του έργου, απέκτησα εκτεταμένη εμπειρία στην ενσωμάτωση υλικού και λογισμικού, στη διαμόρφωση ενός συστήματος ελέγχου πτήσης, στο σχεδιασμό συστημάτων τροφοδοσίας που χρησιμοποιούν μπαταρίες LiPo και στην ανάπτυξη εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο σε ένα Raspberry Pi. Το πιο σημαντικό είναι ότι, μέσω αυτής της εργασίας, ανέπτυξα μια κατανόηση των σχεδιαστικών αποφάσεων και των τεχνικών συμβιβασμών που απαιτούνται για την ανάπτυξη μιας συσκευής ενεργειακά αποδοτικής, ελαφριάς, αξιόπιστης και με υπολογιστική ικανότητα.

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή περιγράφει τόσο την ανάπτυξη όσο και την κατασκευή ενός τετρακόπτερου drone FPV (First Person View) εξοπλισμένου με ένα έξυπνο σύστημα κάμερας ικανό να ανιχνεύει αντικείμενα και πρόσωπα σε πραγματικό χρόνο. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε μια εμπορική πλατφόρμα FPV που περιλαμβάνει ένα πλαίσιο iFlight Titan XL5, κινητήρες χωρίς ψήκτρες iFlight XING, ένα σύστημα ελέγχου πτήσης Sologood F722, μια μπαταρία LiPo 4S και έναν υπολογιστή μονού πίνακα (Raspberry Pi 5). Η ροή βίντεο που καταγράφεται από μια μονάδα Raspberry Pi Camera V2 υποβάλλεται σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας το OpenCV και έναν ταξινομητή Haar Cascade που εκτελείται τοπικά στο RPi5. Οι ροές βίντεο με σχολιασμό αποστέλλονται πίσω μέσω Wi-Fi μέσω μιας ροής MJPEG που παρέχεται από μια ελαφριά εφαρμογή Flask. Ο στόχος αυτής της διατριβής είναι να αποδείξει ότι ένα εμπορικά διαθέσιμο drone FPV χαμηλού κόστους μπορεί να μετατραπεί σε ένα ενσωματωμένο σύστημα όρασης κατάλληλο για πειραματικά αυτόνομα εναέρια συστήματα. Ως εκ τούτου, εξετάστηκαν η μηχανική ενσωμάτωση των εξαρτημάτων και η σύνδεσή τους μεταξύ τους, η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε όλα τα εξαρτήματα, η ρύθμιση του ελεγκτή πτήσης, η συνολική αρχιτεκτονική λογισμικού του συστήματος, η επεξεργασία εικόνας από την είσοδο της κάμερας, οι πιθανές καθυστερήσεις κατά τη μετάδοση σημάτων βίντεο και τα πιθανά όρια της αντοχής πτήσης. Οι μελέτες δείχνουν ότι είναι δυνατή η ανίχνευση προσώπων σε πραγματικό χρόνο στο ενσωματωμένο RPi5 χωρίς πρόσθετες υπολογιστικές μονάδες. Επιπλέον, το τρέχον σύστημα αποτελεί μια ευέλικτη βάση για περαιτέρω εξελίξεις (π.χ. παρακολούθηση αντικειμένων κλειστού βρόχου, ανίχνευση αντικειμένων με χρήση αλγορίθμων βαθιάς μάθησης, εντοπισμός θέσης με τη βοήθεια GPS κ.λπ.), καθώς και για βελτιστοποιημένη κατανάλωση ενέργειας.

«Construction of a quadcopter drone with a smart object detection camera»

«Panteleimon Vasileiadis»

Abstract

The present dissertation describes both the development and construction of a quadcopter FPV (First Person View) drone equipped with an intelligent camera system capable of detecting objects and faces in real time. For this purpose, a commercial FPV platform was used which includes an iFlight Titan XL5 frame, iFlight XING brushless motors, a Sologood F722 flight controller stack, a 4S LiPo battery and a single-board computer (Raspberry Pi 5). The video stream captured by a Raspberry Pi Camera V2 module is processed using OpenCV and a Haar Cascade classifier running locally on the RPi5. Annotated video streams are sent back via Wi-Fi through an MJPEG stream provided by a lightweight Flask application. The goal of this dissertation is to prove that a commercially available low cost FPV drone may be converted into an embedded vision system suitable for experimental autonomous aerial systems. Therefore, the mechanical integration of components and their connection to each other, the electric power supply to all components, the setup of the flight controller, the overall software architecture of the system, the image processing from the camera input, the possible latencies when transmitting video signals and potential limits of the flight endurance were examined. The studies show that it is possible to detect faces in real-time on the onboard RPi5 without additional computing units. Moreover, the current system represents a flexible base for further developments (e.g., closed loop object tracking, object detection using deep learning algorithms, GPS assisted localization etc.) as well as optimized energy consumption.

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, η οποία με στήριξε απόλυτα σε όλη την διάρκεια της φοίτησής μου καθώς και τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Κοκκώνη που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πρώην φοιτητή Χατζηιωαννίδη Δανιήλ που με βοήθησε με το κομμάτι του soldering των boards.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	v
Περίληψη	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xi
Συνομογραφίες	xii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	
1.1 Επισκόπηση του έργου	1
1.2 Κίνητρα & Ιστορικό	1
1.3 Στόχοι	2
1.4 Πεδίο εφαρμογής & Περιορισμοί	3
1.5 Οργάνωση	4
Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφική ανασκόπηση και σχετικές εργασίες	
2.1 Ιστορία των μη Επανδρωμένων Σκαφών	5
2.2 Υπολογιστική Όραση σε Ενσωματωμένο Υλικό	6
2.3 Αλγόριθμοι για Ανιχνευτές Προσώπων	7
2.4 Συστήματα Όρασης UAV στη Βιβλιογραφία	9
2.5 Τεχνολογία Μπαταριών Λιθίου Πολυμερούς που Χρησιμοποιείται σε Uav	11
2.6 Τεχνητή Νοημοσύνη για UAV	13
2.7 Σύντηξη Αισθητήρων και Αυτόνομη Αντίληψη σε Συστήματα UAV	15
2.8 Συστήματα Επικοινωνίας και Μετάδοση Δεδομένων σε Πλατφόρμες UAV	18
2.9 Συμπεράσματα	19
Κεφάλαιο 3ο: Αρχιτεκτονική Συστήματος	
3.1 Επισκόπηση Συστήματος	22
3.2 Μηχανικό πλαίσιο: iFlight Titan XL5	24
3.3 Πρόωση: Κινητήρες iFlight XING	25
3.4 Ελεγκτής πτήσης/ESC: Sologood F722 Stack	26
3.5 Συσκευασία μπαταρίας: Tattu R-Line 1550mAh 4S LiPo	29
3.6 Ενσωματωμένος υπολογιστής: Raspberry Pi 5	30

3.7	Αισθητήρας όρασης: Κάμερα Raspberry Pi V2	32
Κεφάλαιο 4ο: Μηχανική Σχεδίαση και Συναρμολόγηση		
4.1	Ανασκόπηση συναρμολόγησης Σκελετού Drone	35
4.2	Εγκατάσταση των Μοτέρ	36
4.3	Εγκατάσταση Flight Controller Stack	37
4.4	Διανομή Ρεύματος και Βάση Μπαταρίας	38
4.5	Ενσωμάτωση Raspberry Pi 5	39
4.6	Εγκατάσταση Camera	40
4.7	Ανάλυση Βάρους	40
Κεφάλαιο 5ο: Ηλεκτρολογικό Σύστημα		
5.1	Αρχιτεκτονική Συστήματος Ρεύματος	42
5.2	Διάγραμμα Συνδεσιμότητας και Καλωδίωση	44
5.3	Ανάλυση Αναγκών Ενέργειας	45
5.4	Διαχείριση Μπαταρίας και Ασφάλεια	46
Κεφάλαιο 6ο: Αρχικοποίηση του Flight Controller		
6.1	Λογισμικό Betaflight	47
6.2	Αρχική ρύθμιση με το Betaflight Configurator	47
6.3	Ρύθμιση PID	48
6.4	Προφίλ Πτήσης και Οπλισμός	49
Κεφάλαιο 7ο: Αρχιτεκτονική Λογισμικού		
7.1	Προεπισκόπηση Συστήματος Λογισμικού	52
7.2	Picamera2 Βιβλιοθήκη και libcamera	53
7.3	Βρόχος Αναγνώρισης Προσώπου	56
7.4	Στρατηγική πτώσης Καρέ και Διαχείριση Καθυστερήσης	58
7.5	MJPEG Streaming Server – Αρχιτεκτονική και Υλοποίηση	60
7.6	Αρχιτεκτονική Threading και Συγχρονισμός Νημάτων	62
7.7	Απαιτήσεις Λογισμικού και Ρύθμιση περιβάλλοντος	63
Κεφάλαιο 8ο: Εκτίμηση Απόδοσης		
8.1	Μεθοδολογία Εκτίμησης Απόδοσης	66
8.2	Ανάλυση αποτελεσμάτων και τεχνικές συμβιβαστικές λύσεις	67
8.3	Ανάλυση καθυστέρησης και στρατηγικές βελτιστοποίησης	68

8.4	Απόδοση μετάδοσης Δεδομένων μέσω δικτύου	70
8.5	Αντοχή Πτήσης	70
Κεφάλαιο 9ο: Τηλεχειριστήριο FlySky FS-i6		
9.1	Εισαγωγή και επιλογή τηλεχειριστηρίου	71
9.2	Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Αρχιτεκτονική του Τηλεχειριστηρίου FlySky FS-i6	71
9.3	Σχεδίαση Χειρισμού και Λειτουργικά Στοιχεία του FlySky FS-i6	72
9.4	Αναβάθμιση Υλικολογισμικού FlySky FS-i6 σε 10 Κανάλια	73
9.5	Παραμετροποίηση Καναλιών RC και Ρύθμιση στο Betaflight Configurator	75
9.6	Δοκιμές σε Περιβάλλον Simulation	76
9.7	Αποτελέσματα Δοκιμών και Αξιολόγηση	78
9.8	Συμπεράσματα Δοκιμών	79
Κεφάλαιο 10ο: Αρχιτεκτονική Λογισμικού		
10.1	Αποτελέσματα	80
10.2	Κλειστός Κύκλος Face Tracking	81
10.3	Deep Learning Εντοπισμός Αντικειμένων	83
10.4	GPS and Αυτόνομη Πλοήγηση	85
10.5	Βελτιστοποίηση Κατανάλωσης Ενέργειας	86
10.6	Θέματα Ασφαλείας και κανονισμοί	88
10.7	Ηθικές πτυχές και επιπτώσεις στην προστασία ιδιωτικότητας	89
10.8	Προτεινόμενος χάρτης πορείας για μελλοντική ανάπτυξη	90
10.9	Περίληψη συμβολής και ακαδημαϊκή σημασία	92
Κεφάλαιο 11ο: Συμπεράσματα		
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας Tracking		98

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Εξέλιξη των Drone	2
Σχήμα 2.1: Μη επανδρωμένα αεροσκάφη με τεχνητή νοημοσύνη	15
Σχήμα 2.2: Αυτόνομο σύστημα εντοπισμού UAV βασισμένο σε σύντηξη πολλαπλών αισθητήρων	16
Σχήμα 2.3: Σύστημα επικοινωνίας βασισμένο σε UAV	19
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα Αρχιτεκτονικής drone	23
Σχήμα 3.2: iFlight Titan XL5 Frame	25
Σχήμα 3.3: iFlight XING Drone motor	26
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα Flight Controller	27
Σχήμα 3.5: Sologood F722 ESC+FC stack	28
Σχήμα 3.6: Uart Ports	29
Σχήμα 3.7: Δομή Μπαταρίας	29
Σχήμα 3.8: Raspberry Pi 5	31
Σχήμα 3.9: Raspberry Pi Camera V2 module	33
Σχήμα 4.1: Drone Motor Εγκατάσταση και Περιστροφή	37
Σχήμα 4.2: Γυροσκόπιο Drone Betaflight	38
Σχήμα 5.1: Μπαταρία από εφαρμογή Betaflight	42
Σχήμα 5.2: Schematic of Official SoloGood Diagram of ESC	44
Σχήμα 6.1: Betaflight Software	47
Σχήμα 6.2: PID Tuning Tab	48
Σχήμα 6.3: BlackBox Tab	49
Σχήμα 6.4: Sensors Tab	51
Σχήμα 7.1: Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας και Μετάδοσης Δεδομένων μέσω Wi-Fi	62
Σχήμα 9.1: Πρόσοψη του τηλεχειριστηρίου FlySky FS-i6 με ανατομία των κύριων στοιχείων χειρισμού	73
Σχήμα 9.2: Καλώδιο δεδομένων FS-i6	74
Σχήμα 9.3: Liftoff FPV Racing Simulator	77
 Κατάλογος Πινάκων	
Πίνακας 3.1: Κύρια εξαρτήματα υλικού και λογισμικού	23
Πίνακας 3.2: Προδιαγραφές για το πλαίσιο iFlight Titan XL5	25
Πίνακας 3.3: Προδιαγραφές για τον κινητήρα iFlight XING	26
Πίνακας 3.4: Προδιαγραφές για τον ελεγκτή πτήσης/ESC Sologood F722	28
Πίνακας 3.5: Προδιαγραφές για την μπαταρία Tattu R-Line	30
Πίνακας 3.6: Προδιαγραφές του Raspberry Pi 5	32
Πίνακας 3.7: Προδιαγραφές του Raspberry Pi Camera V2 module	33
Πίνακας 4.1: Εκτιμώμενη κατανομή βάρους του πλήρους συγκροτήματος του drone	40
Πίνακας 5.1: Εκτιμώμενος ενεργειακός προϋπολογισμός σε συνθήκες αιώρησης	45
Πίνακας 7.1: Απαιτήσεις λογισμικού και εντολές εγκατάστασης	65
Πίνακας 8.1: Μετρικές απόδοσης της ροής επεξεργασίας εικόνας	68
Πίνακας 9.1: Τεχνικές προδιαγραφές του εκπομπού FlySky FS-i6	71
Πίνακας 9.2: Αντιστοίχιση καναλιών του FS-i6 μετά την αναβάθμιση σε 10 κανάλια	75

Συνομογραφίες

FC	Flight Controller
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
FPV	First Person View
SBC	Single Board Computer
FC	Flight Controller
ESC	Electronic Speed Controller
IMU	Inertial Measurement Unit
PID	Proportional-Integral-Derivative
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
DSP	Digital Signal Processor
FPGA	Field-Programmable Gate Array
CNN	Convolutional Neural Network
RPM	Revolutions Per Minute
BEC	Battery Eliminator Circuit
LiPo	Lithium Polymer

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Επισκόπηση του έργου

Τα τελευταία 20 χρόνια, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV), γνωστά ως drones, έχουν εξελιχθεί από μεγάλα και ακριβά στρατιωτικά μέσα σε μικρές, οικονομικά προσιτές και ευέλικτες τεχνολογικές μονάδες που χρησιμοποιούνται σε τομείς όπως η αεροφωτογράφιση και οι επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης, αλλά και η γεωργία ακριβείας και η παράδοση δεμάτων. Αυτό συνέβη λόγω διαφόρων παραγόντων που συνέβαλαν στη σημαντική βελτίωση των drones, όπως η σμίκρυνση του υπολογιστικού υλικού, η επέκταση του διαθέσιμου λογισμικού ανοιχτού κώδικα για τον έλεγχο πτήσης και η βελτίωση των αλγορίθμων υπολογιστικής όρασης που μπορούν να λειτουργούν σε ενσωματωμένα συστήματα.

Το παρόν έργο θα αναπτύξει ένα πλήρως αυτόνομο drone που ανιχνεύει πρόσωπα. Εκτός από το σχεδιασμό και την κατασκευή του drone, θα υλοποιήσουμε επίσης το λογισμικό του ενσωματωμένου υπολογιστή. Θα χρησιμοποιήσουμε ένα πλαίσιο αγώνων Iflight Titan XL5 με τέσσερις κινητήρες χωρίς ψήκτρες, έναν ελεγκτή πτήσης Sologood F722, έναν υπολογιστή μονού πίνακα Raspberry Pi 5 και μια κάμερα Raspberry Pi v2. Ο υπολογιστής που βρίσκεται επί του drone καταγράφει εικόνες από την κάμερα και χρησιμοποιεί το OpenCV [3] για να εφαρμόσει έναν αλγόριθμο ανίχνευσης προσώπου που ονομάζεται Viola Jones Haar Cascade. Μόλις ανιχνευθεί ένα πρόσωπο, προσθέτει μια περιγραφή στην εικόνα με ένα πλαίσιο γύρω από το ανιχνευθέν πρόσωπο. Η εικόνα με τις επισημάνσεις

μεταδίδεται στη συνέχεια από το drone μέσω WiFi χρησιμοποιώντας έναν ελαφρύ διακομιστή flask http.

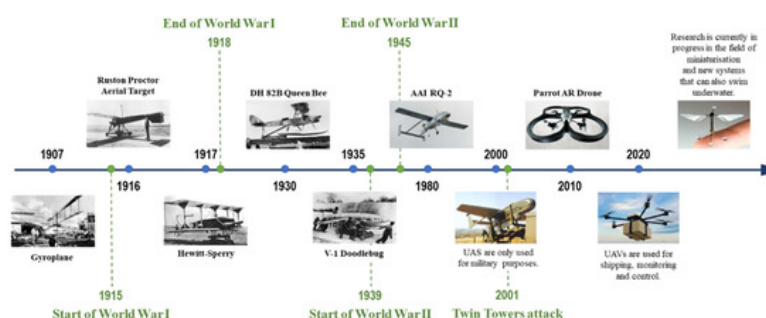
Τελικά, αυτό το έργο δείχνει ότι μπορείτε να κατασκευάσετε μια ισχυρή πλατφόρμα ρομποτικής όρασης από εύκολα διαθέσιμα εξαρτήματα με σχετικά χαμηλό κόστος. Επιπλέον, αυτό το έργο συνδέει τα drone αγώνων FPV για ερασιτέχνες με αυτόνομα ρομπότ πτήσης υψηλών προδιαγραφών και παρέχει μια αναπαραγώγιμη βάση για την ανάπτυξη πρόσθετων λειτουργιών, όπως παρακολούθηση κλειστού βρόχου, σημεία αναφοράς GPS και ανίχνευση αντικειμένων βασισμένη στο deep learning.

1.2 Κίνητρα & Ιστορικό

Υπήρχαν τρία αλληλένδετα ενδιαφέροντα που ενέπνευσαν αυτό το έργο: η δημοκρατικοποίηση του υλικού των drones μέσω της κοινότητας αγώνων FPV, η διαθεσιμότητα ισχυρών SBC όπως το Raspberry Pi 5 και η ωριμότητα των βιβλιοθηκών υπολογιστικής όρασης ανοιχτού κώδικα. Η έρευνα σχετικά με τα αυτόνομα drones απαιτούσε παραδοσιακά είτε ακριβές πλατφόρμες ειδικά σχεδιασμένες είτε πολύ ιδιόκτητες λύσεις. Από την άλλη πλευρά, το οικοσύστημα των drones FPV παρείχε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον για την παραγωγή εξαρτημάτων υψηλής ποιότητας αλλά πολύ ελαφρών/υψηλής απόδοσης, τα οποία, όταν συνδυάζονταν σωστά, οδηγούσαν σε ένα λειτουργικό ερευνητικό όχημα σε σημαντικά χαμηλότερη τιμή από ό,τι ήταν συνηθισμένο στις προηγούμενες μεθόδους.

Η ανίχνευση προσώπου αποτελεί μια εξαιρετική περίπτωση δοκιμής για ένα ενσωματωμένο σύστημα όρασης, καθώς απαιτεί επαρκή υπολογιστική ισχύ για να ωθήσει τα όρια της επεξεργαστικής σας ροής, αλλά έχει μελετηθεί αρκετά ώστε να επιτρέψει την ανάπτυξη μιας αποδεκτής λύσης με δημοσιευμένους αλγόριθμους. Αν και αναπτύχθηκε πριν από περισσότερες από δύο δεκαετίες, ο ανιχνευτής Viola-Jones cascade παραμένει μία από τις καλύτερες επιλογές για ανίχνευση προσώπου σε πραγματικό χρόνο μόνο σε CPU, καθώς είναι εξαιρετικά βελτιστοποιημένος και διατίθεται μαζί με το OpenCV [2].

Ενώ αυτό το έργο αντιμετωπίζει άμεσα ένα μικρότερο πρόβλημα (πώς να γεφυρωθεί αποτελεσματικά ο βρόχος αντίληψης/ενεργοποίησης σε μια περιορισμένη αερομεταφερόμενη πλατφόρμα), αντιμετωπίζει επίσης έμμεσα ένα ευρύτερο ερώτημα στη ρομποτική: Πώς επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση του βρόχου αντίληψης/ενεργοποίησης σε μια περιορισμένη αερομεταφερόμενη πλατφόρμα; Κάθε επιπλέον γραμμάριο στο drone μειώνει την πτήση, και κάθε bat υπολογιστικής ισχύος μειώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Έτσι, πολλές από τις τεχνικές συμβιβαστικές λύσεις που εξετάζονται εδώ (π.χ. επιλογή καρτέ, χημεία μπαταρίας, διεπαφή κάμερας, επίπεδο συμπίεσης jpeg, συχνότητα ανίχνευσης) έχουν σημασία που υπερβαίνει κατά πολύ τις συγκεκριμένες επιλογές που έγιναν.



Σχήμα 1.1: Εξέλιξη των Drones [33]

1.3 Στόχοι

Οι κύριοι στόχοι αυτού του έργου είναι:

- Σχεδιασμός και κατασκευή ενός αξιόπιστου, ιπτάμενου τετρακόπτερο χρησιμοποιώντας εμπορικά διαθέσιμα εξαρτήματα FPV.
- Ενσωμάτωση ενός Raspberry Pi 5 ως ενσωματωμένου υπολογιστή αποστολής χωρίς να υποβαθμίζεται η αξιοπιστία πτήσης.
- Ανάπτυξη ενός συστήματος ανίχνευσης προσώπου σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας το OpenCV και τον ανιχνευτή Haar Cascade σε ένα Raspberry Pi 5.
- Ροή βίντεο MJPEG με σχολιασμό μέσω Wi-Fi χρησιμοποιώντας έναν απλό διακομιστή HTTP που υλοποιείται με το Flask και είναι ορατός σε οποιονδήποτε τυπικό πρόγραμμα περιήγησης ιστού.
- Αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος σε σχέση με την καθυστέρηση ανίχνευσης, τα fps και τη διάρκεια της πτήσης.
- Τεκμηρίωση όλων των πτυχών του υλικού, του λογισμικού και της ενσωμάτωσης, ώστε άλλοι να μπορούν να αναπαράγουν ή να επεκτείνουν αυτό το έργο.

1.4 Πεδίο εφαρμογής & Περιορισμοί

Το πεδίο εφαρμογής αυτού του έργου περιλαμβάνει μόνο το υποσύστημα αντίληψης/ροής ενός drone παρακολούθησης προσώπου. Δεν υπάρχει επί του παρόντος εφαρμοσμένος νόμος ελέγχου κλειστού βρόχου που να στέλνει εντολές στον ελεγκτή πτήσης με βάση το σημείο όπου ανιχνεύεται το πρόσωπο. Η εφαρμογή ενός τέτοιου νόμου ελέγχου θα απαιτούσε την καθιέρωση επικοινωνίας μεταξύ του Raspberry Pi και του ελεγκτή πτήσης μέσω του σειριακού πρωτοκόλλου MAVLink ή MSP και την εφαρμογή κάποιας μορφής ελέγχου PID ή προγνωστικού μοντέλου. Τέτοιες υλοποιήσεις συζητούνται ως μελλοντική εργασία στο κεφάλαιο εννέα.

Οι περιορισμοί περιλαμβάνουν: Χρήση μίας μόνο κάμερας που βλέπει προς τα εμπρός (χωρίς στερεοσκοπικό βάθος [30])· χρήση Wi-Fi 2,4 GHz για ροή βίντεο (υπόκειται σε παρεμβολές σε πολυσύχναστες περιοχές)· η έλλειψη δυνατότητας διατήρησης θέσης μέσω GPS ή οπτικής ροής σημαίνει ότι το drone πρέπει να πετάει χειροκίνητα ενώ λειτουργεί το σύστημα όρασης.

Επιπλέον, υπάρχει σημαντική ευαισθησία τόσο στον προσανατολισμό του προσώπου όσο και στις συνθήκες φωτισμού. Εάν τα πρόσωπα έχουν προσανατολισμό πέραν των 30 μοιρών από το μέτωπο ή βρίσκονται σε φωτισμό υψηλής αντίθεσης, πιθανότατα δεν θα ανιχνευθούν αξιόπιστα. Ανιχνευτές βασισμένοι σε βαθιά μάθηση (όπως η ανίχνευση προσώπου YOLO ή MediaPipe) θα μπορούσαν ενδεχομένως να επιλύσουν αυτό το ζήτημα, ωστόσο με σημαντικά αυξημένο υπολογιστικό φορτίο.

1.5 Οργάνωση

Η παρούσα έκθεση είναι οργανωμένη ως εξής. Το κεφάλαιο 2 συνοψίζει την υπάρχουσα βιβλιογραφία και προηγούμενες εργασίες σε τομείς που σχετίζονται με την αυτονομία των UAV, τα ενσωματωμένα συστήματα όρασης και την ανίχνευση προσώπου. Το Κεφάλαιο 3 περιγράφει την πλήρη αρχιτεκτονική υλικού, συμπεριλαμβανομένων όλων των εξαρτημάτων και των προδιαγραφών τους. Το Κεφάλαιο 4 περιγράφει το μηχανικό σχεδιασμό και τη διαδικασία συναρμολόγησης. Το Κεφάλαιο 5 περιγράφει λεπτομερώς το ηλεκτρικό σύστημα, συμπεριλαμβανομένης της διανομής ισχύος και της καλωδίωσης. Το Κεφάλαιο 6 εξηγεί τον τρόπο διαμόρφωσης του ελεγκτή πτήσης. Το Κεφάλαιο 7 εξηγεί τη συνολική αρχιτεκτονική λογισμικού, καθώς και τους συγκεκριμένους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση προσώπων και τη ροή mjpeg. Το Κεφάλαιο 8 θα αξιολογήσει τους δείκτες απόδοσης για ολόκληρο το σύστημα. Το Κεφάλαιο 9 παρουσιάζει την αναβάθμιση του τηλεχειριστηρίου FlySky FS-I6 καθώς και την χρήση του σε simulation. Το Κεφάλαιο 10 περιγράφει πιθανές εξελίξεις του project με σκοπό την αναβάθμιση του. Τέλος, το Κεφάλαιο 11 παρουσιάζει συμπεράσματα και θα συζητήσει πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις.

Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφική ανασκόπηση και σχετικές εργασίες

2.1 Ιστορία των μη Επανδρωμένων Σκαφών

Η ανάπτυξη των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) ξεκίνησε πριν από εκατό χρόνια με τη χρήση αεροσκαφών-στόχων σε στρατιωτικές ασκήσεις και μεταπολεμικές εκπαιδεύσεις κατά τον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Το «Kettering Bug», το οποίο κατασκευάστηκε το 1918, θεωρείται ένα από τα πρώτα αυτόνομα αεροσκάφη που σχεδιάστηκαν για να πετούν αυτόνομα προς έναν προκαθορισμένο στόχο, χρησιμοποιώντας μια πρώιμη έκδοση συστήματος αυτόματου πιλότου που περιελάμβανε τόσο γυροσκόπιο όσο και βαρομετρικό υψόμετρο. Η περίοδος που ακολούθησε τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο συνέχισε την κυριαρχία της ανάπτυξης των UAV, καλύπτοντας κυρίως στρατιωτικές ανάγκες. Τα στρατιωτικά UAV δημιουργήθηκαν για πολυάριθμες χρήσεις κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών, συμπεριλαμβανομένου του μη επανδρωμένου αεροσκάφους-στόχου Radioplane OQ-2 του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και της πλατφόρμας αναγνώρισης UAV με κινητήρα τζετ Ryan Firebee, η οποία ολοκλήρωσε πάνω από 300 αποστολές μάχης κατά τη διάρκεια του Πολέμου του Βιετνάμ. Οι αρχικοί περιορισμοί στην υπολογιστική ισχύ των συστημάτων UAV περιόριζαν την ικανότητά τους να λειτουργούν ανεξάρτητα από προγραμματισμένες διαδρομές και να χρησιμοποιούν πληροφορίες από ενσωματωμένους αισθητήρες, έως ότου υπήρξαν επαρκείς εξελίξεις στις ικανότητες ψηφιακής επεξεργασίας για την υποστήριξη αυξημένων επιπέδων αυτονομίας.

Τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα δεκτών παγκοσμίου δορυφορικού εντοπισμού θέσης (GPS) στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και στις αρχές της δεκαετίας του 2000, κατέστησαν εμπορικά βιώσιμα και επέτρεψαν φθηνές και συμπαγείς δυνατότητες προσδιορισμού θέσης, ανεξάρτητες από επίγεια βοηθήματα ραδιοπλοήγησης. Οι εξελίξεις στις τεχνολογίες ανίχνευσης αδράνειας βασισμένες σε μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών επιταχυνσιομέτρων MEMS και γυροσκοπίων MEMS, έγιναν επίσης εμπορικά βιώσιμες, επιτρέποντας μετρήσεις στάσης που εξασφαλίζουν αυτόνομη σταθερότητα χωρίς την ανάγκη για μεγάλα και ακριβά γυροσκόπια δακτυλίου λέιζερ ή γυροσκόπια οπτικών ινών. Επιπλέον, οι τεχνολογίες ψηφιακών επεξεργαστών σήματος (DSP) και μικροελεγκτών ωρίμασαν και έγιναν εμπορικά διαθέσιμες, επιτρέποντας την εκτέλεση αλγορίθμων συγχώνευσης αισθητήρων και ελέγχου σε πραγματικό χρόνο [29]. Αυτές οι εξελίξεις στις τεχνολογίες GPS, MEMS, DSP και MCU επέτρεψαν τελικά τη δημιουργία της πρώτης γενιάς εμπορικά προσβάσιμων πλατφορμών τετρακόπτερων, όπως το Parrot AR.Drone (2010) και το DJI Phantom (2013), τα οποία κατέστησαν ουσιαστικά δυνατή τη συμμετοχή ατόμων χωρίς τεχνικές δεξιότητες στην αεροφωτογράφιση. Αυτές οι πλατφόρμες συνέβαλαν στη δημιουργία της κοινότητας αγώνων FPV που σχηματίστηκε γύρω στο 2014–15.

Όπως εξελίχθηκαν τα ρυθμιστικά πλαίσια για τις εμπορικές πτήσεις με drones, παράλληλα με τις εξελίξεις στην τεχνολογία που ρυθμίζουν, έτσι και αυτά γενικά υστερούσαν χρονικά. Πριν από το 2019 δεν υπήρχε ενιαία ρύθμιση που να διέπει τη χρήση πολιτικών drones εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αντ' αυτού, καθεμία από τις 27 διαφορετικές Εθνικές Αρχές Πολιτικής Αεροπορίας των κρατών μελών της ΕΕ ρύθμιζε το δικό της τμήμα της χρήσης πολιτικών drones, με αποτέλεσμα ασυνεπείς και ενίοτε αντικρουόμενες ρυθμίσεις που εμπόδιζαν την ανάπτυξη των εμπορικών υπηρεσιών με drones. Στις 13 Ιουνίου 2019, οι κανονισμοί της ΕΕ 2019/945 και 2019/947 τέθηκαν σε ισχύ ως μέρος ενός νέου ενιαίου ρυθμιστικού πλαισίου βασισμένου στον κίνδυνο, το οποίο κατηγοριοποιεί τις πτήσεις με drones σε τρεις κατηγορίες (Ανοιχτή, Ειδική και Πιστοποιημένη) με βάση το επίπεδο κινδύνου που συνδέεται με κάθε πτήση. Ως αποτέλεσμα αυτού του νέου ρυθμιστικού πλαισίου που εφαρμόζεται ομοιόμορφα και στα 27 κράτη μέλη της ΕΕ, είναι πλέον ευκολότερο για

τους χρήστες που σκοπεύουν να πραγματοποιήσουν πτήσεις με drones μικρής κλίμακας κάτω των 25 κιλών σε χαμηλό υψόμετρο σε μη κατοικημένες περιοχές να συμμορφωθούν με τις κανονιστικές απαιτήσεις. Επιπλέον, απαιτούνται νέες πιστοποιήσεις για πτήσεις με drones υψηλότερου κινδύνου. Μέχρι σήμερα, το U-Space (παρόμοιο με τη Διαχείριση Μη Επανδρωμένης Κυκλοφορίας UTM στην Ευρώπη), το οποίο θεσπίστηκε μέσω του Εκτελεστικού Κανονισμού (ΕΕ) 2021/664 της Επιτροπής, συνεχίζει να εξελίσσεται και θα παρέχει πρόσθετα εργαλεία για την ασφαλή ενσωμάτωση των πτητικών λειτουργιών με drones στον κοινόχρηστο εναέριο χώρο μέσω ψηφιακών καταχωρίσεων, γεωχωρικής επίγνωσης και υπηρεσιών επίλυσης συγκρούσεων.

Καθώς διάφοροι τύποι Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) συνεχίζουν να προχωρούν προς την πρακτική εφαρμογή σε συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών για πολιτικούς σκοπούς παραδείγματα περιλαμβάνουν τις υπηρεσίες παράδοσης δεμάτων Amazon Prime Air/Wing, τις υπηρεσίες επιθεώρησης υποδομών της Skydio και τις υπηρεσίες γεωργικής παρακολούθησης της σειράς Agras της DJI οι ρυθμιστικοί φορείς που είναι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη προτύπων που διέπουν ζητήματα ασφάλειας σχετικά με την τεχνητή νοημοσύνη, έχουν ξεκινήσει προσπάθειες για την ανάπτυξη συμπληρωματικών κατευθυντήριων γραμμών σχετικά με τις αλγοριθμικές διαδικασίες λήψης αποφάσεων για εφαρμογές υψηλού κινδύνου. Συγκεκριμένα, ο νόμος της ΕΕ για την ΤΝ, ο οποίος τέθηκε σε ισχύ το 2024, προσδιορίζει τα συστήματα drones που λειτουργούν σε δημόσιους χώρους ως συστήματα ΤΝ υψηλού κινδύνου τα οποία υπόκεινται σε υποχρεωτικές αξιολογήσεις συμμόρφωσης, απαιτήσεις τεχνικής τεκμηρίωσης και μηχανισμούς ανθρώπινης εποπτείας. Ως εκ τούτου, οι μελλοντικές εκδόσεις του συστήματος που περιγράφεται στο παρόν θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη εξηγήσεις για αποφάσεις που παράγονται από αυτόνομα συστήματα drones, ελέγχους για μεροληψία και μηχανισμούς ασφαλείας σε περίπτωση βλάβης, σε σύγκριση με το τρέχον ερευνητικό πρωτότυπο.

2.2 Υπολογιστική Όραση σε Ενσωματωμένο Υλικό

Τα ενσωματωμένα συστήματα όρασης όπως οι πλατφόρμες λήψης και επεξεργασίας εικόνων που χρησιμοποιούνται σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους, όπως κινητά ρομπότ, βιομηχανικά συστήματα επιθεώρησης και συστήματα μη επανδρωμένων οχημάτων βιώνουν μια εξέλιξη άνευ προηγουμένου τα τελευταία δέκα χρόνια. Τρεις βασικοί παράγοντες έχουν συμβάλει σε αυτή την εξέλιξη: οι εκθετικά αυξανόμενες υπολογιστικές δυνατότητες των επεξεργαστών εφαρμογών βασισμένων σε ARM (οι οποίες ακολούθησαν μια πορεία παρόμοια με τον νόμο του Moore μέχρι το 2018, και στη συνέχεια με πιο αργό ρυθμό), η ενσωμάτωση εξειδικευμένου υλικού επιτάχυνσης νευρωνικών δικτύων σε καταναλωτικά συστήματα, σε τσιπ (SoC) για καταναλωτές (Μονάδες Νευρωνικής Επεξεργασίας, NPU) και η πρόοδος των μεθόδων συμπίεσης μοντέλων (όπως κβαντοποίηση, κλάδεμα, απόσταξη γνώσης) που επιτρέπουν σε μεγάλα μοντέλα νευρωνικών δικτύων να λειτουργούν αποτελεσματικά σε υλικό με περιορισμένους πόρους.

Τα πρώιμα ενσωματωμένα συστήματα όρασης που χρησιμοποιούνταν κυρίως από ρομποτολόγους, περιλάμβαναν αρχιτεκτονικές βασισμένες σε FPGA. Τα πλεονεκτήματα των αρχιτεκτονικών βασισμένων σε FPGA ήταν η ικανότητά τους να εκτελούν επεξεργασία εικόνας με υψηλό βαθμό παραλληλισμού και πολύ χαμηλή καθυστέρηση· ωστόσο, είχαν το μειονέκτημα ότι ήταν δύσκολο να αναπτυχθούν και δεν ήταν ευέλικτα όσον αφορά την πραγματοποίηση αλλαγών στους αλγόριθμους μετά την ανάπτυξη του προϊόντος. Μερικά παραδείγματα προϊόντων από αυτή την περίοδο περιλαμβάνουν τη σειρά CMUcam (1998-2010), η οποία αποτελείται από μια σειρά μονάδων (καθεμία μικρότερη από ένα τυπικό USB flash drive) που επέτρεπαν στους χρήστες να δημιουργούν αυτόνομα κινητά ρομπότ με παρακολούθηση χρωμάτων, και το Pixy (CMUcam5, 2013), το οποίο

χρησιμοποιούσε έναν επεξεργαστή Freescale iMXRT (ARM Cortex-M4) μαζί με κάποιο ειδικά κατασκευασμένο υλικό βασισμένο στον επεξεργαστή CORDIC για μετατροπή χρωματικού χώρου, επιτρέποντας την παρακολούθηση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο με 50 καρέ ανά δευτερόλεπτο, ενώ λειτουργούσε με ισχύ 40 mW. Αν και αυτά τα συστήματα απέδειξαν την ικανότητα να παρέχουν χρήσιμες οπτικές πληροφορίες σε εξαιρετικά περιορισμένους πόρους υλικού, ήταν περιορισμένα όσον αφορά την παροχή γενικεύσιμης αναπαράστασης αντικειμένων. Ως αποτέλεσμα, ήταν περιορισμένα όσον αφορά το εύρος των περιβαλλόντων στα οποία μπορούσαν να λειτουργήσουν.

Η χρήση εμπορικά διαθέσιμων υπολογιστών μονού πίνακα (SBC) γενικής χρήσης με επιτάχυνση μονάδας επεξεργασίας γραφικών (GPU) για ρομποτολόγους άνοιξε μια νέα κατηγορία ενσωματωμένων συστημάτων όρασης ικανά να εκτελούν τυπικές ροές συμπερασμάτων βαθιάς μάθησης σε πρακτικούς ρυθμούς καρέ. Η πρώτη γενιά SBC για ρομποτολόγους αντιπροσωπεύεται από το NVIDIA Jetson TK1 (2014) και τις επόμενες γενιές (τα TX1, TX2, Xavier και Orin). Το Jetson Nano (2019), με GPU Maxwell 128 πυρήνων και επεξεργαστή ARM Cortex-A57 τεσσάρων πυρήνων που λειτουργεί στα 5–10 W, έδειξε ότι ήταν δυνατή η ανίχνευση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο με YOLOv3-Tiny [22] ή MobileNetV2-SSD [21] σε πλατφόρμες που τροφοδοτούνται με μπαταρία επιτρέποντας την πρακτική ανάπτυξη αντίληψης βασισμένης στο βαθύ μάθημα σε μικρά μη επανδρωμένα οχήματα. Ωστόσο, εξακολουθούσαν να υπάρχουν περιορισμοί όσον αφορά την πρακτική εφαρμογή λόγω της μάζας των 136 g, της μέτριας κατανάλωσης ισχύος και του κόστους των 99 δολαρίων ΗΠΑ (χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι πλακέτες φορέα) του Jetson Nano. Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη με στόχο εναλλακτικά συστήματα μικρότερου βάρους και χαμηλότερης κατανάλωσης ισχύος.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στο σχεδιασμό λύσεων ενσωματωμένης όρασης, αντιμετωπίζουν άμεσα τους υπάρχοντες περιορισμούς για την εφαρμογή συστημάτων αντίληψης βασισμένων στο deep learning μέσω στενής ενσωμάτωσης NPU σε SoC καταναλωτικών προϊόντων.

Για παράδειγμα, τα chipset της σειράς A της Apple (που χρησιμοποιούνται σε επεξεργαστές iPhone και iPad από το A11 Bionic το 2017) είναι ένα από τα πρώτα παραδείγματα σχεδιασμών SoC για καταναλωτές που ενσωματώνουν μια NPU (ένα Neural Engine 16 πυρήνων ικανό για 600 GOPS (A11) έως 38 TOPS (A17 Pro)) εντός ενός ενεργειακού πλαισίου 3–6 W. Παρόμοια ενσωμάτωση NPU έχει επίσης παρατηρηθεί σε άλλα σχέδια SoC, όπως το RockChip RK3588 (που χρησιμοποιείται σε διάφορα Orange Pi5 και παρόμοια SBC), το AmLogic A311D και το Raspberry Pi AI HAT+ (Hailo-8L, 13 TOPS). Με βάση τις τρέχουσες τάσεις και εξελίξεις, φαίνεται πιθανό ότι τα μελλοντικά συστήματα εναέριας όρασης θα βασίζονται όλο και περισσότερο στην επιτάχυνση NPU για να επιτρέπουν αποτελεσματική εξαγωγή συμπερασμάτων βαθιάς μάθησης και ενδέχεται τελικά να είναι σε θέση να επιτύχουν ακρίβεια ανίχνευσης ισοδύναμη με εκείνη που επιτυγχάνεται από νευρωνικά δίκτυα μεγαλύτερης κλίμακας, με επίπεδα καθυστέρησης και κατανάλωσης ισχύος ισοδύναμα με τις προσεγγίσεις Haar Cascade που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή [20].

2.3 Αλγόριθμοι για Ανιχνευτές Προσώπων

Η μέθοδος Viola-Jones αποτέλεσε το αντικείμενο ενός πρωτοποριακού άρθρου με τίτλο «Rapid object detection using a boosted cascade of simple features» (Γρήγορη ανίχνευση αντικειμένων με τη χρήση ενισχυμένης αλυσιδωτής δομής απλών χαρακτηριστικών), των Paul Viola και Michael Jones, CVPR 2001 [1]. Ήταν μια επαναστατική στιγμή στον τομέα της υπολογιστικής όρασης. Το 2000, η ανίχνευση προσώπων σε πραγματικό χρόνο θεωρούνταν πολύ δύσκολη για να επιτευχθεί σε υπολογιστές. Αυτό που έκανε το Viola-Jones τόσο επιτυχημένο, ωστόσο, δεν ήταν μία καινοτομία,

αλλά μάλλον ο τρόπος με τον οποίο η συνέργεια τριών σημαντικών εννοιών μπορούσε να παράγει μια βιώσιμη μέθοδο ανίχνευσης ικανή να λειτουργεί με 15 καρέ/δευτερόλεπτο σε έναν επεξεργαστή Pentium III, 700 MHz το οποίο ένα σημείο αναφοράς απόδοσης που θα χρειαζόταν άλλη μια δεκαετία για να φτάσουν άλλοι αλγόριθμοι υπολογιστικής όρασης βασισμένοι σε νευρωνικά δίκτυα (π.χ. BlazeFace, 2019).

Μία από αυτές τις έννοιες ήταν η ολοκληρωτική εικόνα (ή πίνακας αθροιστικής επιφάνειας). Η τεχνική αυτή αφορά έναν υπολογισμό του συνολικού αθροίσματος των εικονοστοιχείων σε οποιοδήποτε ορθογώνιο μιας εικόνας με ακριβώς τρεις προσθέσεις, ανεξάρτητα από τις διαστάσεις αυτού του ορθογωνίου. Η χρονική πολυπλοκότητα του υπολογισμού του συνολικού αθροίσματος των εικονοστοιχείων σε οποιοδήποτε ορθογώνιο μιας εικόνας μέσω μιας ολοκληρωτικής εικόνας είναι $O(1)$, ή σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι μόλις δημιουργηθεί η ολοκληρωτική εικόνα, μπορεί να εκτελεστεί το άθροισμα των τιμών των εικονοστοιχείων σε εκατοντάδες χιλιάδες ορθογώνια διαφόρων μεγεθών, δίχως ανησυχία για τον αριθμό των εικονοστοιχείων στην εικόνα που επηρεάζει τη συνολική χρονική πολυπλοκότητα της επεξεργασίας.

Μια άλλη έννοια που χρησιμοποίησαν οι Viola-Jones ήταν το AdaBoost (συντομογραφία του Adaptive Boosting). Το AdaBoost επέτρεψε στους Viola και Jones να επιλέξουν από έναν μεγάλο αριθμό πιθανών χαρακτηριστικών (πάνω από 180.000) που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη διάκριση μεταξύ περιοχών προσώπου και μη προσώπου στη διαδικασία ανίχνευσής τους. Μόλις επέλεξαν τα χαρακτηριστικά που θα χρησιμοποιούσαν (περίπου 200 χαρακτηριστικά επιλέχθηκαν στην αρχική έκδοση του Viola-Jones), κατασκεύασαν έναν ισχυρό ταξινομητή συνδυάζοντας αυτά τα χαρακτηριστικά μέσω μιας σταθμισμένης ψηφοφορίας. Οι συντελεστές στάθμισης που αποδόθηκαν σε κάθε αδύναμο ταξινομητή (ένα χαρακτηριστικό) βασίστηκαν στην απόδοσή του κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Αυτή η διαδικασία εξάλειψε την ανάγκη οι άνθρωποι να σχεδιάσουν χειροκίνητα το καλύτερο δυνατό σύνολο χαρακτηριστικών εικόνας. Αντ' αυτού, χρειάστηκε απλώς να εκπαιδεύσουν ένα επισημασμένο σύνολο δεδομένων, και τα χαρακτηριστικά που λειτουργούσαν καλύτερα θα αναδύονταν αυτόματα.

Μια απίστευτη καινοτομία που χρησιμοποίησαν οι Viola-Jones ήταν η αρχιτεκτονική καταρράκτη. Αυτή η καινοτομία αύξησε σημαντικά την υπολογιστική αποδοτικότητα του αλγορίθμου δημιουργώντας ένα μοντέλο ταξινόμησης πολλαπλών σταδίων όπου κάθε στάδιο χρησιμοποιεί προοδευτικά πιο σύνθετους ταξινομητές. Κάθε διαδοχικό στάδιο σχεδιάστηκε για να εξαλείφει γρήγορα (με υψηλή εμπιστοσύνη) τις περιοχές που δεν είναι πρόσωπα, διατηρώντας παράλληλα την ικανότητα ανίχνευσης (με υψηλή ανάκληση) των περιοχών προσώπου. Οι συγγραφείς περιέγραψαν την αρχιτεκτονική καταρράκτη τους ως μια σειρά «σταδίων προσοχής». Εάν ένα παράθυρο ανίχνευσης απέτυχε σε οποιοδήποτε συγκεκριμένο στάδιο προσοχής, τότε απορρίπτεται ως μη πρόσωπο χωρίς περαιτέρω ανάλυση σε μεταγενέστερα στάδια. Επειδή η συντριπτική πλειοψηφία (>99,9%) όλων των πιθανών παραθύρων ανίχνευσης σε μια τυπική εικόνα δεν περιέχει πρόσωπο, πολλά παράθυρα θα αποτύχουν σε ένα από τα δύο πρώτα στάδια (τα οποία ελέγχουν μόνο τα πιο διακριτικά χαρακτηριστικά). Κατά συνέπεια, ο μέσος υπολογιστικός φόρτος για την ανίχνευση προσώπων σε μια εικόνα είναι κατά τάξεις μεγέθους μικρότερος από ό,τι θα ήταν εάν όλα τα χαρακτηριστικά ελέγχονταν για κάθε παράθυρο. Ο μηχανισμός κασκάδας παραλληλίζει τον μηχανισμό κασκάδας δέντρου αποφάσεων, αλλά είναι ειδικά βελτιστοποιημένος για εργασίες υπολογιστικής όρασης.

Παρά τις καινοτομίες αυτές, υπάρχουν γνωστοί περιορισμοί στην εφαρμογή του Viola-Jones σε μη ελεγχόμενα σενάρια. Αν και το Viola-Jones αποδίδει πολύ καλά στην ανίχνευση προσώπων που βλέπουν μπροστά, η ικανότητά του να ανιχνεύει πρόσωπα των οποίων η κατεύθυνση διαφέρει κατά περισσότερο από περίπου 30 μοίρες μειώνεται δραματικά. Τα πρόσωπα που βλέπονται από ψηλά (μια συνηθισμένη διάταξη όταν βλέπουμε πρόσωπα από drones που πετούν πάνω από το κεφάλι μας σε σημαντικά ύψη) είναι σχεδόν πάντα μη ανιχνεύσιμα, επειδή η τοπολογία του προσώπου που ανιχνεύεται από ψηλά, δεν συμπεριλαμβάνεται στα δεδομένα εκπαίδευσης. Επιπλέον, το Viola-Jones βασίζεται σε διαφορές έντασης (χαρακτηριστικά τύπου Haar) και, ως εκ τούτου, αποδίδει ανεπαρκώς υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού. Όταν τα πρόσωπα φωτίζονται από τα πλάγια ή από κάτω, δημιουργούνται σκιές που επηρεάζουν τα μοτίβα έντασης που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του προσώπου (π.χ., τα μάτια φαίνονται πιο σκούρα από το μέτωπο, η μύτη ρίχνει σκιά στο άνω χείλος κ.λπ.). Σκιές όπως αυτές μειώνουν σημαντικά το ποσοστό ανίχνευσης του Viola-Jones. Για τους λόγους αυτούς, οι ερευνητές αναζητούν νέες προσεγγίσεις για την ανίχνευση προσώπων που χρησιμοποιούν τεχνικές μηχανικής μάθησης (όπως το MediaPipe BlazeFace [23] ή το MTCNN [24]), οι οποίες εκπαιδεύονται σε πολύ μεγαλύτερα και πολύ πιο ποικίλα σύνολα δεδομένων και μαθαίνουν αναλλοίωτες αναπαραστάσεις για τα πρόσωπα σε σχέση τόσο με τη γωνία θέασης όσο και με την κατεύθυνση του φωτισμού.

2.4 Συστήματα Όρασης UAV στη Βιβλιογραφία

Τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη των συστημάτων όρασης των UAV (Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών) έχει αλλάξει ριζικά, μεταβαίνοντας από μια απλή επίδειξη ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους ικανού να πετά αυτόνομα σε ένα εξελιγμένο ρομποτικό σύστημα που αξιοποιεί την αντίληψη για να πλοηγείται σε απαιτητικά και απρόβλεπτα περιβάλλοντα. Οι εξελίξεις στα ενσωματωμένα υπολογιστικά συστήματα, οι μικροσκοπικοί αισθητήρες, οι βελτιωμένοι αλγόριθμοι υπολογιστικής όρασης και οι προηγμένες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας έχουν συνδυαστεί ώστε να καταστεί δυνατή η χρήση ενσωματωμένης νοημοσύνης σε UAV με μεγαλύτερες δυνατότητες από ποτέ.

Η πρώτη γενιά ερευνητικών πλατφορμών UAV (δηλαδή το Draganflyer και το τετρακόπτερο Hummingbird που σχεδιάστηκαν από ερευνητές του ETH Ζυρίχης) χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ως πλατφόρμες απόδειξης της ιδέας για την επίδειξη των δυνατοτήτων αυτόνομου ελέγχου πτήσης και σταθεροποίησης. Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα κατασκευάζονταν κατά παραγγελία και ήταν πολύ δαπανηρά, ενώ διέθεταν περιορισμένη υπολογιστική ισχύ επί του σκάφους. Ως εκ τούτου, σχεδόν όλες οι λειτουργίες αντίληψης, εντοπισμού θέσης και λήψης αποφάσεων εκτελούνταν εξ αποστάσεως σε σταθμούς εδάφους. Αν και αυτή η προσέγγιση ήταν επαρκής για την επίδειξη της σκοπιμότητας των συστημάτων UAV υπό ελεγχόμενες συνθήκες σε εργαστηριακό περιβάλλον, παρουσίαζε πολλές σοβαρές προκλήσεις κατά την προσπάθεια ανάπτυξης συστημάτων UAV σε πραγματικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων υψηλών καθυστερήσεων, κακής επεκτασιμότητας και χαμηλής ανθεκτικότητας.

Μετά την εισαγωγή εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων UAV (π.χ. τα DJI Phantom και Matrice), η ερευνητική κοινότητα μετέφερε το ενδιαφέρον της στη χρήση τυποποιημένων συστημάτων που διατίθενται στο εμπόριο. Αυτή η μετάβαση ενίσχυσε σημαντικά τη δυνατότητα αναπαραγωγής αποτελεσμάτων εντός της ερευνητικής κοινότητας και μείωσε τα εμπόδια εισόδου τόσο για τον ακαδημαϊκό όσο και για τον βιομηχανικό τομέα. Δυστυχώς, αν και οι πρώτες υλοποιήσεις βασίζονταν σε τυποποιημένα εξαρτήματα του εμπορίου, συνέχισαν να βασίζονται σε υπολογιστική ισχύ εκτός του

σκάφους. Συγκεκριμένα, οι ροές βίντεο και/ή άλλα δεδομένα αισθητήρων που παράγονταν από το UAV αποστέλλονταν σε έναν ή περισσότερους σταθμούς εδάφους για επεξεργασία. Αυτή η αρχιτεκτονική επηρεάστηκε σοβαρά από τα περιορισμένα εύρη ζώνης ασύρματης επικοινωνίας, τις πιθανές πηγές παρεμβολών και την εξάρτηση από συνεχείς συνδέσεις επικοινωνίας.

Οι περιορισμοί που επιβλήθηκαν από τον υπολογισμό εκτός σκάφους οδήγησαν σε μια σταδιακή μετάβαση προς την επεξεργασία επί του σκάφους και την αυτονομία βασισμένη στην άκρη. Τα σύγχρονα συστήματα UAV δίνουν έμφαση στην εκτέλεση επί του σκάφους της αντίληψης, του εντοπισμού θέσης και της λήψης αποφάσεων. Η μετάβαση προς την ενσωματωμένη επεξεργασία και την αυτονομία βασισμένη στην άκρη κατέστη δυνατή χάρη στις εξελίξεις στους ενσωματωμένους επεξεργαστές γραφικών (GPU), στις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας (CPU) χαμηλής κατανάλωσης και στους εξειδικευμένους επιταχυντές τεχνητής νοημοσύνης (AI) (δηλαδή NPU). Έτσι, τα σημερινά UAV δεν θεωρούνται πλέον απλώς οχήματα τηλεπισκόπησης, αλλά όλο και περισσότερο αυτόνομοι ευφυείς παράγοντες ικανοί να ερμηνεύουν το περιβάλλον τους σε πραγματικό χρόνο.

Ο κύριος τομέας εστίασης των συστημάτων όρασης UAV περιλαμβάνει την ανίχνευση και αποφυγή εμποδίων σε πραγματικό χρόνο. Ιστορικά, οι περισσότεροι ερευνητές χρησιμοποιούσαν παραδοσιακές μεθόδους που βασίζονται στην υπολογιστική όραση, συμπεριλαμβανομένης της οπτικής ροής, των χειροποίητων χαρακτηριστικών και των γεωμετρικών μοντέλων. Ενώ ήταν αποτελεσματικές σε ορισμένους τομείς λειτουργίας, ήταν λιγότερο αποτελεσματικές σε περιβάλλοντα με ακαταστασία/δυναμική/χαμηλού φωτισμού. Πρόσφατες εξελίξεις περιλαμβάνουν τη χρήση βαθιάς μάθησης για τη βελτίωση της ανίχνευσης αντικειμένων και της σημασιολογικής τμηματοποίησης που παρέχει βελτιωμένη απόδοση σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ωστόσο, οι υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις που σχετίζονται με αυτά τα μοντέλα παρουσιάζουν προκλήσεις κατά την προσπάθεια ανάπτυξής τους σε περιορισμένους πόρους που είναι διαθέσιμοι σε τυπικά εναέρια οχήματα.

Ένας εξίσου σημαντικός ερευνητικός τομέας είναι αυτός της οπτικής-αδρανειακής πλοήγησης, όπου οι πληροφορίες από την κάμερα και τον αισθητήρα IMU συνδυάζονται για την εκτίμηση τόσο της τοποθεσίας όσο και του προσανατολισμού. Η VIO και η SLAM είναι δύο από τις κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα για να δημιουργήσουν μια αίσθηση κατανόησης του περιβάλλοντος από το drone, καθώς και για την εκτίμηση της κίνησης, ώστε το drone να μπορεί να διατηρήσει τη σταθερότητα.

Η παρακολούθηση και η ανίχνευση ανθρώπων/αντικειμένων αποτελούν άλλα κρίσιμα στοιχεία των συστημάτων όρασης UAV. Υπάρχουν αρκετές εφαρμογές όπου απαιτείται αξιόπιστη αναγνώριση και παρακολούθηση στόχων, για παράδειγμα: επιτήρηση, SAR και επιθεωρήσεις κτιρίων. Αρχικά, οι ερευνητές εφάρμοσαν παραδοσιακές μεθοδολογίες, όπως Haar cascades/φίλτρο Kalman για την παρακολούθηση αντικειμένων/ανίχνευση ανθρώπων. Οι σημερινοί ερευνητές χρησιμοποιούν κυρίως αρχιτεκτονικές βαθιάς μάθησης, συμπεριλαμβανομένων CNN, μετασχηματιστών κ.λπ. Αν και είναι εξαιρετικά ακριβή, αυτά τα μοντέλα παρουσιάζουν δυσκολίες όταν πληρούν τις απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο με περιορισμένους πόρους υλικού.

Οι μέθοδοι μετάδοσης βίντεο είναι ένα άλλο βασικό στοιχείο που εμπλέκεται στο σχεδιασμό συστημάτων UAV. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι πρωτοκόλλων μετάδοσης βίντεο που χρησιμοποιούνται συνήθως σήμερα: RTSP/WebRTC (για χαμηλή καθυστέρηση) και MJPEG-over-HTTP (λόγω της απλότητας και της συμβατότητάς του με εφαρμογές προγράμματος περιήγησης). Συνήθως, η επιλογή ενός τύπου πρωτοκόλλου έναντι ενός άλλου εξαρτάται από την

ισορροπία μεταξύ της αποτελεσματικότητας συμπίεσης, της υπολογιστικής επιβάρυνσης και της συνολικής πολυπλοκότητας ανάπτυξης. Οι ερευνητές προτιμούν το MJPEG επειδή δεν υπάρχει απαίτηση για υποστήριξη αγωγών με κωδικοποίηση υλικού.

Συνοψίζοντας, τα συστήματα όρασης UAV φαίνεται να τείνουν προς μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα που συνδυάζει και τις τρεις πτυχές της πληροφορικής: επεξεργασία, αντίληψη και έλεγχο. Τα συστήματα όρασης UAV αναπτύσσονται τώρα με έμφαση στην ελαχιστοποίηση του μεγέθους, του βάρους, της κατανάλωσης ενέργειας (SWaP-C) ενώ παράλληλα μεγιστοποιείται η λειτουργικότητα. Ως αποτέλεσμα, αναδύονται ενσωματωμένα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης και επιταχυντές υλικού που είναι ειδικά για την ανάπτυξη υπολογιστικών συστημάτων edge-computing.

Συνοψίζοντας, τα συστήματα όρασης UAV έχουν μεταβεί από τηλεχειριζόμενες πειραματικές πλατφόρμες σε ανεξάρτητες αυτόνομες πλατφόρμες edge-intelligence. Ως αποτέλεσμα της συνεχιζόμενης ενσωμάτωσης της τεχνολογίας βαθιάς μάθησης και των ενσωματωμένων συστημάτων και της ρομποτικής, τα UAV θα συνεχίσουν να αυξάνουν την ικανότητά τους να λειτουργούν αυτόνομα σε πολύπλοκα σενάρια πραγματικού κόσμου.

2.5 Τεχνολογία Μπαταριών Λιθίου Πολυμερούς που Χρησιμοποιείται σε Uav

Το πιο σημαντικό στοιχείο που επιτρέπει την ανάπτυξη των σύγχρονων συστημάτων μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) σήμερα είναι η τεχνολογία μπαταριών λιθίου-πολυμερούς (LiPo). Οι ιδιότητες των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας αντιπροσωπεύουν τον κύριο περιορισμό της αντοχής, της ασφάλειας και της απόδοσης ενός UAV. Τα UAV υπόκεινται μοναδικά σε αυστηρές αναλογίες βάρους προς ισχύ. Μόνο μικρές διακυμάνσεις στα χαρακτηριστικά ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να οδηγήσουν σε δραστικές επιπτώσεις στη διάρκεια πτήσης, την ευελιξία και το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο που μπορεί να μεταφέρει ένα UAV.

Οι μπαταρίες LiPo έχουν γίνει κυρίαρχη επιλογή στις εφαρμογές UAV λόγω της μεγάλης ενεργειακής τους πυκνότητας, της ευελιξίας στον συντελεστή μορφής και της ικανότητάς τους να παρέχουν πολύ υψηλά ρεύματα. Οι ενεργειακές πυκνότητες που σχετίζονται με τις τυπικές μπαταρίες LiPo είναι της τάξης των 100–265 Wh/kg, καθιστώντας τις πολύ ανώτερες από τις παλαιότερες χημικές τεχνολογίες με βάση το νικέλιο που χρησιμοποιούνταν σε προηγούμενες γενιές κινητής ρομποτικής. Η ευέλικτη μορφή θύλακα-κελιού των μπαταριών LiPo επιτρέπει στον κατασκευαστή να προσαρμόζει γεωμετρικά κάθε τύπο κελιού σε κάθε μεμονωμένο σχεδιασμό ατράκτου και έτσι να βελτιώνει την ογκομετρική απόδοση αυτών των μονάδων, επιτρέποντας παράλληλα τη βέλτιστη συσκευασία εντός του περιορισμένου όγκου που διατίθεται σε πλαίσια πολυκόπτερων.

Ένα λειτουργικό πλεονέκτημα των στοιχείων LiPo είναι το σχετικά επίπεδο χαρακτηριστικό τάσης εκφόρτισης. Τα τυπικά στοιχεία LiPo έχουν ονομαστική τάση 3,7 V. Όταν είναι πλήρως φορτισμένα, φτάνουν περίπου τα 4,2 V, ενώ οι ασφαλείς τάσεις αποκοπής κυμαίνονται από 3,0–3,5 V, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Η σταθερή φύση του χαρακτηριστικού τάσης είναι επωφελής κατά τη λειτουργία ενός UAV, καθώς τόσο ο ελεγκτής ταχύτητας κινητήρα όσο και οι αλγόριθμοι ελέγχου πτήσης χρησιμοποιούν προβλέψιμες τιμές τάσης για τη διατήρηση σταθερής ώσης.

Οι πτώσεις τάσης που προκαλούνται από υψηλά φορτία ρεύματος κατά τη διάρκεια επιθετικών ελιγμών πτήσης αποτελούν σημαντική ανησυχία σχεδιασμού, καθώς τα υψηλά παροδικά ρεύματα μπορούν να προκαλέσουν προσωρινές μειώσεις στην τάση των στοιχείων, επηρεάζοντας έτσι αρνητικά τη σταθερότητα και την απόκριση των χειριστηρίων πτήσης.

Οι ευέλικτοι πολυκόπτεροι, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που χρησιμοποιούνται για αγώνες FPV και συστήματα UAV υψηλής απόδοσης, απαιτούν μπαταρίες με υψηλές δυνατότητες αξιολόγησης C. Η αξιολόγηση C υποδεικνύει τον μέγιστο ρυθμό συνεχούς εκφόρτισης σε σχέση με τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Για παράδειγμα, μια μπαταρία 1550 mAh με ονομαστική ισχύ 120C παρέχει θεωρητικά τη δυνατότητα πολύ υψηλών ρευμάτων εξόδου, ωστόσο οι πραγματικοί ρυθμοί λειτουργίας είναι γενικά χαμηλότεροι λόγω θερμικών και χημικών περιορισμών. Οι μπαταρίες υψηλής αξιολόγησης C παρέχουν το απαραίτητο περιθώριο για παροδικές απαιτήσεις ισχύος, κυρίως κατά τη διάρκεια επιταχύνσεων, επιβραδύνσεων και μεταβατικών φαινομένων.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα που σχετίζονται με την ενεργειακή πυκνότητα και τις δυνατότητες εκφόρτισης, υπάρχουν και μειονεκτήματα που σχετίζονται με την αύξηση της χωρητικότητας των μπαταριών LiPo, και συγκεκριμένα το αυξημένο συνολικό βάρος του συστήματος. Το αυξημένο βάρος οδηγεί σε υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος για τα συστήματα πρόωσης. Λόγω της μη γραμμικής σχέσης μεταξύ βάρους, αποθήκευσης ενέργειας και κατανάλωσης ισχύος, προκύπτει ένα στενά συζυγμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης στον σχεδιασμό UAV. Επομένως, οι σχεδιαστές UAV πρέπει να λαμβάνουν ταυτόχρονα υπόψη τις παραμέτρους αποθήκευσης ενέργειας, την απόδοση πρόωσης και τις απαιτήσεις αποστολής. Σε πολλές περιπτώσεις, καλούνται να επιλέξουν μεταξύ προτεραιότητας στην αντοχή ή στην ευελιξία, ιδιαίτερα όταν ενσωματώνονται πρόσθετα ωφέλιμα φορτία όπως κάμερες, αισθητήρες ή ενσωματωμένο υπολογιστικό υλικό για εργασίες υπολογιστικής όρασης.

Η θερμική διαχείριση και η ασφάλεια αποτελούν βασικές παραμέτρους κατά τη χρήση μπαταριών λιθίου-πολυμερούς (LiPo). Λόγω της χημικής τους πτητικότητας, αυτές οι μπαταρίες μπορεί να υποφέρουν από θερμική διαφυγή που προκύπτει από υπερβολική φόρτιση, πολύ βαθιά εκφόρτιση, φυσική ζημιά ή υπερβολική θερμότητα. Οι συνέπειες της θερμικής διαφυγής περιλαμβάνουν ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας, απελευθέρωση αερίου και πιθανή ανάφλεξη. Επομένως, τα περισσότερα συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) χρησιμοποιούν διάφορα επίπεδα προστασίας, όπως ελεγκτές ταχύτητας (Ηλεκτρονικοί Ελεγκτές Ταχύτητας – ESC), οθόνες τάσης μπαταρίας και ελεγκτές πτήσης με συναγερμούς προειδοποίησης χαμηλής τάσης μπαταρίας ή λειτουργία αυτόματης επιστροφής στην αρχική θέση.

Για βέλτιστη φόρτιση και αποθήκευση μπαταριών LiPo, η εξισορροπημένη φόρτιση επιτρέπει σε κάθε στοιχείο μέσα σε μια συστοιχία πολλαπλών στοιχείων να διατηρείται σε ίσες τάσεις. Αυτό μειώνει τον κίνδυνο ανισορροπίας των στοιχείων κατά τη διάρκεια εκτεταμένης χρήσης και παρατείνει τη διάρκεια ζωής κάθε στοιχείου. Κατά την αποθήκευση μπαταριών LiPo, αυτές θα πρέπει γενικά να διατηρούνται σε περίπου 3,8 V/στοιχείο. Σε αυτό το επίπεδο, η χημική καταπόνηση στα στοιχεία είναι ελάχιστη, γεγονός που συμβάλλει στην παράταση της διάρκειας ζωής τους.

Η διαχείριση της μπαταρίας θεωρείται υποσύστημα από πολλούς επαγγελματίες που χειρίζονται UAV. Περιλαμβάνει κύκλους παρακολούθησης του αριθμού φορτίσεων που ολοκληρώνει μια μπαταρία, της ηλεκτρικής αντίστασης σε όλο το σύστημα και τυχόν καταγεγραμμένων μεταβολών της θερμοκρασίας που υφίσταται η μπαταρία.

Οι ερευνητές έχουν πρόσφατα διερευνήσει έξυπνα συστήματα διαχείρισης μπαταριών (BMS) για UAV χρησιμοποιώντας μεθοδολογίες μηχανικής μάθησης, με στόχο τη βελτίωση των εκτιμήσεων Κατάστασης Φόρτισης (SoC) και Κατάστασης Υγείας (SoH). Οι βελτιωμένες εκτιμήσεις SoC/SoH επιτρέπουν καλύτερη πρόβλεψη του υπολειπόμενου χρόνου πτήσης και έγκαιρη αναγνώριση σημείων υποβάθμισης της μπαταρίας πριν επηρεαστεί η ασφάλεια της αποστολής ενός UAV ή η αποτελεσματικότητά ενός στόλου UAV.

Ενώ οι εξελίξεις στις δυνατότητες υπολογισμού και αντίληψης των UAV έχουν σε μεγάλο βαθμό καθοδηγηθεί από τη βελτίωση του ενσωματωμένου υλικού επεξεργασίας Τεχνητής Νοημοσύνης (AI), αντίστοιχες εξελίξεις στην τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας έχουν προχωρήσει με σχετικά βραδύτερο ρυθμό. Ως εκ τούτου, οι σχεδιαστές UAV πρέπει να δίνουν ολοένα και μεγαλύτερη έμφαση σε ενεργειακά αποδοτικές πρακτικές υπολογισμού. Οι αλγόριθμοι που έχουν σχεδιαστεί για να μεγιστοποιούν τόσο την ακρίβεια και την ταχύτητα εκτέλεσης όσο και την ενεργειακή απόδοση αποτελούν κρίσιμο στοιχείο του μελλοντικού σχεδιασμού UAV.

Συνολικά, η τεχνολογία μπαταριών LiPo αποτελεί το θεμέλιο των σύγχρονων λειτουργιών UAV και επηρεάζει όλα τα στοιχεία τους, συμπεριλαμβανομένης της απόδοσης, της ασφάλειας και της συνολικής διαμόρφωσης του συστήματος. Η μπαταρία LiPo προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα μέσω της ικανότητάς της να παρέχει υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης και υψηλές ενεργειακές πυκνότητες, καθιστώντας την σχεδόν απαραίτητη για εφαρμογές υψηλής απόδοσης σε εναέρια ρομποτικά συστήματα. Ωστόσο, επειδή οι μπαταρίες LiPo περιέχουν εγγενώς ευαίσθητα και δυνητικά επικίνδυνα υλικά και παρουσιάζουν μη γραμμικά χαρακτηριστικά απόδοσης, οι μηχανικοί πρέπει να αξιολογούν προσεκτικά τις επιλογές και τις παραμέτρους σχεδιασμού τους. Οι μελλοντικές εξελίξεις στα συστήματα UAV θα εξακολουθήσουν να εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις εξελίξεις στη χημεία των μπαταριών LiPo, στα συστήματα BMS και σε άλλες τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας.

2.6 Τεχνητή νοημοσύνη για τα UAV

Η εισαγωγή της Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) στα Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAV) αντιπροσωπεύει μια θεμελιώδη παραδειγματική μετατόπιση τόσο όσον αφορά τη λειτουργικότητα όσο και το εύρος εφαρμογών των σύγχρονων εναέριων ρομπότ. Τα UAV έχουν εξελιχθεί από τηλεχειριζόμενα οχήματα που ελέγχονταν είτε εξ ολοκλήρου από τον πιλότο είτε πλήρως από το πρόγραμμα σε συστήματα που βασίζονται στην αντίληψη και έχουν την ικανότητα να λαμβάνουν αποφάσεις αυτόνομα σε πραγματικό χρόνο σε δυναμικά, απρόβλεπτα περιβάλλοντα. Αυτός ο μετασχηματισμός οφείλεται κυρίως σε βελτιώσεις στη μηχανική μάθηση, την επιτάχυνση υλικού των ενσωματωμένων συσκευών και τους αλγόριθμους όρασης υπολογιστή σε πραγματικό χρόνο.

Η υπολογιστική άκρη, η οποία περιλαμβάνει την εκτέλεση επεξεργασίας δεδομένων σε ένα εναέριο όχημα αντί της μετάδοσης δεδομένων σε απομακρυσμένους επίγειους σταθμούς ή διακομιστές cloud, αποτελεί μια σημαντική πτυχή της τρέχουσας έξυπνης λειτουργίας των UAV. Η υπολογιστική άκρη έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθοδολογίες επεξεργασίας δεδομένων όταν εφαρμόζεται σε UAV, ιδίως σε κανάλια επικοινωνίας χαμηλού εύρους ζώνης, χαμηλές καθυστερήσεις επικοινωνίας και σε αυξημένη ανθεκτικότητα σε περιπτώσεις όπου ενδέχεται να μην υπάρχει συνδεσιμότητα. Η επεξεργασία συμπερασμάτων και η λήψη αποφάσεων σε τοπικό επίπεδο επιτρέπει στα UAV να ανταποκρίνονται γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντός τους, με αποτέλεσμα ταχύτερους χρόνους απόκρισης και βελτιωμένη ασφάλεια.

Οι σύγχρονοι αγωγοί τεχνητής νοημοσύνης UAV αποτελούνται από πολλαπλές ενότητες, οι οποίες περιλαμβάνουν την αντίληψη, τον εντοπισμό, τον σχεδιασμό και τον έλεγχο. Η αντίληψη είναι ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους ενοτήτων στους σύγχρονους αγωγούς TN UAV και είναι υπεύθυνη για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από ακατέργαστα δεδομένα αισθητήρων από πηγές όπως κάμερες RGB, αισθητήρες βάθους και συστήματα θερμικής απεικόνισης. Η ανίχνευση αντικειμένων, η σημασιολογική τμηματοποίηση και η παρακολούθηση αντικειμένων αποτελούν

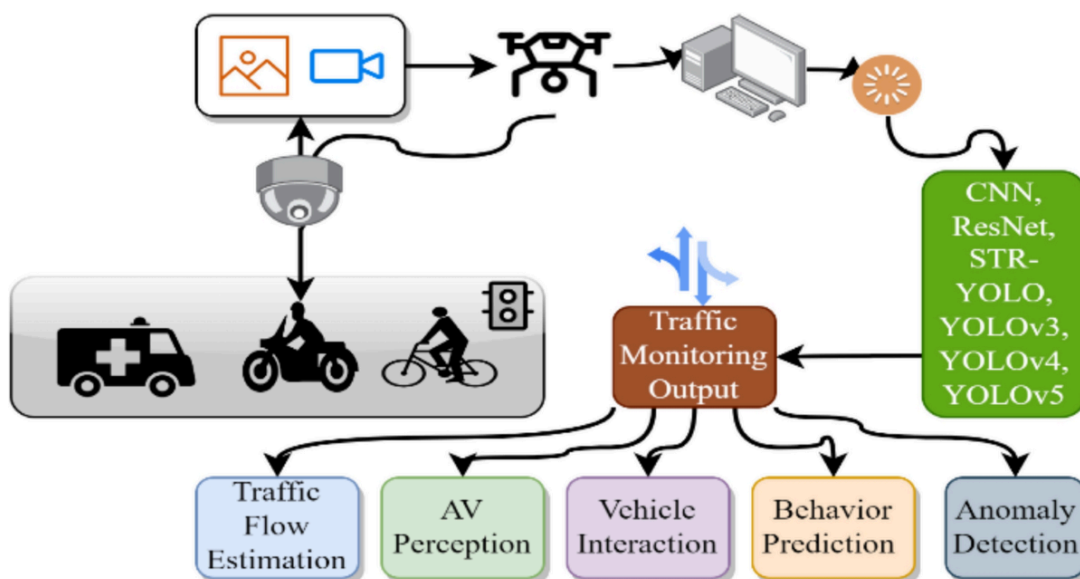
χαρακτηριστικά παραδείγματα λειτουργιών που περιλαμβάνονται στο επίπεδο αντίληψης. Ο εντοπισμός καθορίζει τη θέση και τον προσανατολισμό του UAV, με τεχνικές όπως η οπτική-αδρανειακή οδομετρία (VIO) και η ταυτόχρονη τοποθέτηση και χαρτογράφηση (SLAM). Ο σχεδιασμός δημιουργεί πιθανές διαδρομές, ενώ ο έλεγχος εκτελεί αυτές τις διαδρομές μέσω βρόχων ανάδρασης, διασφαλίζοντας σταθερή πτήση.

Τα μοντέλα βαθιάς μάθησης αποτελούν τον προτιμώμενο τύπο μοντέλου για εργασίες αντίληψης σε πολλές σύγχρονες υλοποιήσεις UAV. Τα μοντέλα που βασίζονται σε CNN είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα για ανίχνευση αντικειμένων και ανάλυση σκηνής. Ωστόσο, αυτά τα μοντέλα απαιτούν σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους τόσο για εκπαίδευση όσο και για συμπερασματολογία. Κατά συνέπεια, σημαντικός όγκος έρευνας έχει επικεντρωθεί στη μείωση του υπολογιστικού φορτίου τους, ώστε να μπορούν να εκτελούνται αποδοτικά σε ενσωματωμένα συστήματα με περιορισμένους πόρους. Τεχνικές όπως η κβαντοποίηση, το pruning και η απόσταξη γνώσης επιχειρούν να μειώσουν την πολυπλοκότητα των μοντέλων διατηρώντας ικανοποιητική απόδοση.

Η παρούσα διατριβή χρησιμοποίησε ένα ενσωματωμένο σύστημα βασισμένο στο Raspberry Pi 5 ως κύρια μονάδα υπολογιστικής άκρης. Τα ενσωματωμένα συστήματα προσφέρουν έναν ισορροπημένο συμβιβασμό μεταξύ υπολογιστικής ισχύος και κατανάλωσης ενέργειας, καθιστώντας το Raspberry Pi 5 κατάλληλο για εκτέλεση συμπερασμάτων σε πραγματικό χρόνο σε μικρά UAV συστήματα. Με την τοπική επεξεργασία ροών βίντεο, εξαλείφεται η ανάγκη συνεχούς αποστολής ακατέργαστων δεδομένων σε εξωτερικό διακομιστή. Μόνο οι έξοδοι υψηλού επιπέδου (όπως πλαίσια οριοθέτησης, ετικέτες ανίχνευσης ή σχολιασμένα καρέ) αποστέλλονται στη διεπαφή χρήστη, μειώνοντας σημαντικά τη χρήση εύρους ζώνης και ενισχύοντας την αυτονομία του συστήματος.

Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα της επεξεργασίας δεδομένων σε επίπεδο drone είναι η καλύτερη διατήρηση της ιδιωτικότητας. Τα μοντέλα που βασίζονται στο cloud μεταδίδουν όλα τα πρωτότυπα δεδομένα βίντεο εκτός του οργανισμού. Συνεπώς, υπάρχουν κίνδυνοι ασφαλείας, όπως μη εξουσιοδοτημένη παρακολούθηση ή/και παραβίαση ιδιωτικών δεδομένων. Τα μοντέλα UAV που βασίζονται σε edge computing διατηρούν το πιο ευαίσθητο βίντεο στην άκρη (στο drone). Συνεπώς, η αποστολή των δεδομένων από το drone σε έναν διακομιστή ή σε ένα μοντέλο που βασίζεται στο cloud θα περιλάμβανε μόνο μια αφαίρεση των δεδομένων που συλλέγονται από το UAV. Η ιδιωτικότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν χρησιμοποιούνται μοντέλα UAV για την παρακολούθηση δημόσιων χώρων, την επιτήρηση υποδομών ή τη συλλογή δεδομένων κατά την παρατήρηση ανθρώπων.

Ένας σημαντικός τομέας έρευνας για την ενσωματωμένη τεχνητή νοημοσύνη σε drones περιλαμβάνει την ανάπτυξη μοντέλων νευρωνικών δικτύων χαμηλής ισχύος για χρήση σε υλικό UAV. Έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα όπως το MobileNet, το NanoDet και οι παραλλαγές YOLO-tiny, τα οποία δημιουργήθηκαν για να επιτρέψουν χαμηλότερη καθυστέρηση σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους υλικού. Πολλοί ερευνητές συνδυάζουν αυτά τα μοντέλα με επιταχυντές υλικού, συμπεριλαμβανομένων μονάδων επεξεργασίας γραφικών (GPU), μονάδων νευρωνικής επεξεργασίας (NPU) και επεξεργαστών ψηφιακού σήματος (DSP) ενσωματωμένων σε πολλά σύγχρονα SoC. Λόγω των εξελίξεων στο υλικό NPU που ενσωματώνεται σε πολλές σύγχρονες καταναλωτικές συσκευές, έχει καταστεί δυνατή η εκτέλεση βαθιάς μάθησης σε πραγματικό χρόνο σε πολλά μικρά UAV.



Σχήμα 2.1: Μη επανδρωμένα αεροσκάφη με τεχνητή νοημοσύνη [46]

Η Τεχνητή Νοημοσύνη χρησιμοποιείται για κάτι περισσότερο από την απλή ικανότητα «όρασης» και αναγνώρισης του τι βλέπει ένα UAV. Οι ερευνητές εφαρμόζουν πλέον την ΤΝ ώστε να επιτρέπεται στα UAV να λαμβάνουν αποφάσεις πέρα από την απλή αντίληψη. Μερικά παραδείγματα περιλαμβάνουν αυτόνομο σχεδιασμό αποστολών, αυτόνομη πλοήγηση σε νέο ή άγνωστο έδαφος, συντονισμό μεταξύ πολλαπλών UAV και πρόβλεψη της συμπεριφοράς κινούμενων αντικειμένων. Όταν πολλά UAV συνεργάζονται μέσω ΤΝ για την εκτέλεση συντονισμένων αποστολών, όπως χαρτογράφηση, επιτήρηση και επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης, μπορούν να επιτύχουν στόχους που θα ήταν δύσκολοι ή αδύνατοι για μεμονωμένα UAV.

Η μελλοντική ανάπτυξη της νοημοσύνης των UAV αναμένεται να συνεχίσει να θολώνει τη γραμμή μεταξύ αντίληψης και ελέγχου. Ενώ οι προσεγγίσεις μάθησης από άκρο σε άκρο (end-to-end learning), όπου ένα νευρωνικό δίκτυο μαθαίνει απευθείας από αισθητηριακές εισόδους σε εντολές ελέγχου, είναι πολλά υποσχόμενες για τη βελτίωση της απόδοσης των UAV, ζητήματα ασφάλειας και ερμηνευσιμότητας αποτελούν επί του παρόντος σημαντικά εμπόδια για πρακτική εφαρμογή σε εφαρμογές υψηλού κινδύνου. Παράλληλα με την τεχνική πρόοδο, οι ρυθμιστικοί φορείς αρχίζουν να καθορίζουν κανόνες και κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με τη διαφάνεια, τη λογοδοσία και την ανθρώπινη εποπτεία για συστήματα UAV με τεχνητή νοημοσύνη, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλού κινδύνου.

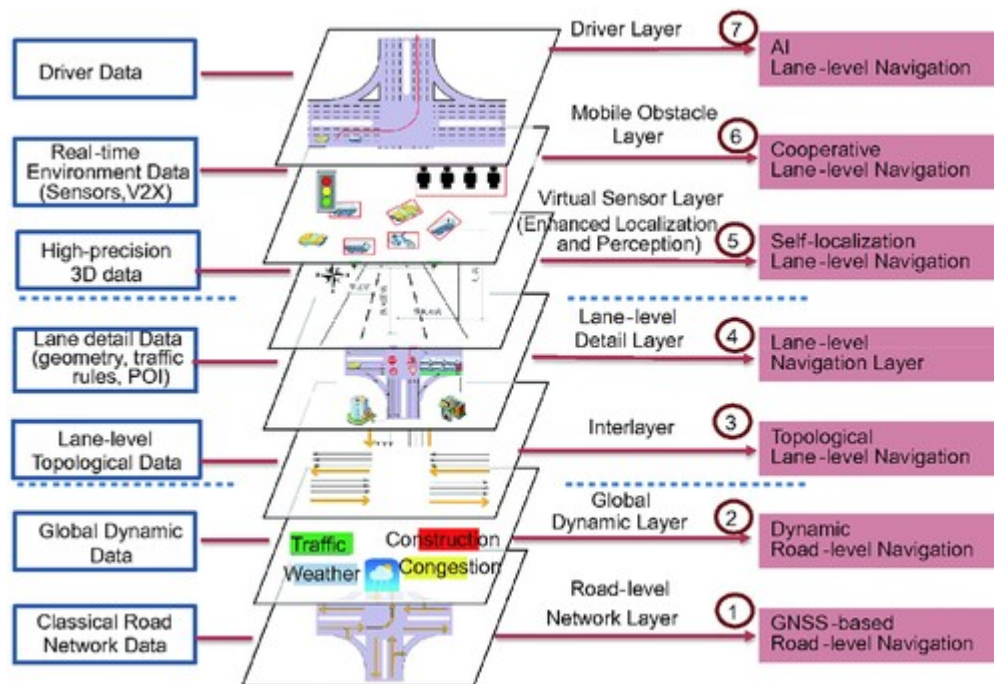
Συνολικά, η Τεχνητή Νοημοσύνη έχει γίνει βασική τεχνολογία που οδηγεί την εξέλιξη των σύγχρονων UAV από απλές αυτόνομες μηχανές σε εξαιρετικά εξελιγμένους, προσαρμοστικούς και ευφυείς πράκτορες. Οι μελλοντικές εξελίξεις στο υλικό και στους αλγόριθμους ΤΝ θα συνεχίσουν να ενισχύουν την ικανότητα των μη επανδρωμένων συστημάτων να λειτουργούν με ασφάλεια και αξιοπιστία σε ολοένα και πιο πολύπλοκα περιβάλλοντα.

2.7 Σύντηξη Αισθητήρων και Αυτόνομη Αντίληψη σε Συστήματα UAV

Υπάρχει ανάγκη για αυτόνομη λειτουργία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV), η οποία απαιτεί τόσο την ικανότητα επεξεργασίας μεμονωμένων μετρήσεων αισθητήρων όσο και την

ικανότητα δημιουργίας μιας κοινής εικόνας του κόσμου χρησιμοποιώντας δεδομένα από διάφορους τύπους αισθητήρων. Η σύντηξη αισθητήρων είναι το όνομα που δίνεται σε αυτή τη διαδικασία. Στην τεχνολογία UAV σήμερα, η σύντηξη αισθητήρων γίνεται όλο και πιο ευρέως αποδεκτή ως μέρος της συνήθους πρακτικής. Έχει γίνει απαραίτητη για την σύγχρονη ανάπτυξη UAV επειδή κανένας μεμονωμένος αισθητήρας δεν παρέχει επαρκείς και αξιόπιστες πληροφορίες ανά πάσα στιγμή. Κάθε τύπος αισθητήρα που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία UAV έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, οι κάμερες προσφέρουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τις υφές, το χρώμα, το σχήμα του αντικειμένου και τη χωρική δομή των σκηνών. Ωστόσο, τα δεδομένα της κάμερας θα επηρεαστούν αρνητικά εάν υπάρχει σημαντική κίνηση ή μεταβαλλόμενα επίπεδα φωτός. Τα δεδομένα από αδρανειακές μονάδες μέτρησης (IMU) όπως τα επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια παρέχουν εκτιμήσεις υψηλής ποιότητας της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του οχήματος. Ωστόσο, αυτές οι εκτιμήσεις υποβαθμίζονται γρήγορα λόγω σφαλμάτων συσσώρευσης με την πάροδο του χρόνου. Ο συνδυασμός των δυνατών σημείων των συστημάτων που βασίζονται σε κάμερες με αδρανειακά συστήματα δημιουργεί τη βάση των Οπτικών-Αδρανειακών Συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται σε πολλά εμπορικά έτοιμα drones σήμερα.

Η σύντηξη αισθητήρων χρησιμοποιείται στην Οπτική-Αδρανειακή Οδομετρία (VIO) για να επιτρέψει στα συστήματα πλοήγησης UAV να προσδιορίζουν με ακρίβεια την τοποθεσία και τον προσανατολισμό τους σε σχέση με το περιβάλλον. Το VIO χρησιμοποιεί αδρανειακές μετρήσεις μαζί με χαρακτηριστικά εικόνας που ανιχνεύονται σε καρέ που λαμβάνονται από ενσωματωμένες κάμερες. Το κύριο πλεονέκτημα των συστημάτων VIO έναντι των συστημάτων GPS είναι ότι δεν βασίζονται σε δορυφόρους GPS. Επομένως, τα συστήματα VIO μπορούν να λειτουργήσουν σε περιοχές όπως δασικές περιοχές, αστικά φαράγγια, εσωτερικούς χώρους κ.λπ., όπου η ισχύς του σήματος GPS είναι χαμηλή ή ανύπαρκτη. Οι εφαρμογές που απαιτούν χρήση VIO περιλαμβάνουν αυτόνομη επιθεώρηση, αποστολές έρευνας και διάσωσης και εργασίες πλοήγησης σε εσωτερικούς χώρους.



Σχήμα 2.2: Ένα αυτόνομο σύστημα εντοπισμού UAV βασισμένο σε σύντηξη πολλαπλών αισθητήρων[45]

Ένας άλλος μεγάλος τομέας έρευνας για την αυτονομία UAV περιλαμβάνει συστήματα Ταυτόχρονης Εντοπισμού και Χαρτογράφησης (SLAM). Τα συστήματα SLAM επιτρέπουν σε ένα UAV να δημιουργήσει έναν χάρτη ενός άγνωστου περιβάλλοντος, ενώ ταυτόχρονα προσδιορίζει τη δική του τοποθεσία. Επειδή το SLAM περιλαμβάνει δύο αλληλένδετα προβλήματα - τον εντοπισμό και τη δημιουργία ενός χάρτη - παρουσιάζει δύσκολες προκλήσεις. Για παράδειγμα, οι ανακρίβειες στον εντοπισμό μπορούν να οδηγήσουν σε χάρτες κακής ποιότητας. Αντίθετα, οι χάρτες κακής ποιότητας μπορούν να οδηγήσουν σε ανακριβή εντοπισμό. Οι βελτιώσεις στην υπολογιστική ισχύ και οι τεχνικές βελτιστοποίησης έχουν επιτρέψει στους ερευνητές να εφαρμόσουν συστήματα SLAM που εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο σε μικρές ενσωματωμένες πλατφόρμες. Ως εκ τούτου, τα τεχνικά εμπόδια στην ανάπτυξη συστημάτων SLAM σε πρακτικά περιβάλλοντα συνεχίζουν να μειώνονται.

Στη βιβλιογραφία υπάρχει μια ποικιλία τύπων SLAM, συμπεριλαμβανομένου του οπτικού SLAM, του Lidar SLAM και διαφόρων μορφών οπτικού-αδρανειακού SLAM. Το οπτικό SLAM βασίζεται κυρίως στην εξαγωγή χαρακτηριστικών χρησιμοποιώντας εικόνες από ροές βίντεο. Το Lidar SLAM βασίζεται στην εξαγωγή τρισδιάστατων σημείων από ένα νέφος σημείων που παράγεται από ροές Lidar. Ως εκ τούτου, το οπτικό-αδρανειακό SLAM είναι σε θέση να επωφεληθεί τόσο από οπτικές όσο και από αδρανειακές εισόδους για να βελτιώσει την ανθεκτικότητα όταν μία από αυτές τις πηγές αποτύχει προσωρινά.

Λόγω αυτής της εξάρτησης από τις συγκεκριμένες ανάγκες μιας εφαρμογής, του περιβάλλοντος, των δυνατοτήτων επεξεργασίας και των ορίων βάρους ενός αεροσκάφους, η επιλογή μιας συγκεκριμένης μεθόδου SLAM ήταν ιστορικά κάπως υποκειμενική.

Οι πιθανοτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται συνήθως για τον συνδυασμό δεδομένων από διάφορους αισθητήρες σε συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV). Συγκεκριμένα, πολλά UAV χρησιμοποιούν φίλτρα Kalman, τα οποία παρέχουν πιθανοτικές μεθόδους για την εκτίμηση καταστάσεων δεδομένων θορυβωδών μετρήσεων από πολλαπλούς αισθητήρες. Πολλά συστήματα ελέγχου πτήσης και συστήματα πλοήγησης UAV περιλαμβάνουν φίλτρα Kalman που εκτιμούν τη θέση, την ταχύτητα και τη στάση χρησιμοποιώντας θορυβώδη δεδομένα από πολλαπλούς αισθητήρες και προγνωστικά μοντέλα.

Η σύντηξη αισθητήρων είναι επίσης σημαντική πέρα από την απλή πλοήγηση και τον εντοπισμό. Τα συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για την αποφυγή εμποδίων συνήθως χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό μεθόδων ανίχνευσης για να προσδιορίσουν μια καλύτερη κατανόηση του περιβάλλοντός τους. Ένα παράδειγμα θα ήταν μια κάμερα που παρέχει πληροφορίες σχετικά με αντικείμενα, όπως η αναγνώρισή τους, ενώ ένα lidar παρέχει ακριβείς μετρήσεις απόστασης. Ένα άλλο παράδειγμα είναι οι θερμικές κάμερες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια επιχειρήσεων τη νύχτα ή σε καιρικές συνθήκες χαμηλής ορατότητας. Η χρήση πολλαπλών μεθόδων ανίχνευσης βελτιώνει την αξιοπιστία και μειώνει τις βλάβες σε σύγκριση με τη χρήση μόνο ενός τύπου αισθητήρα.

Στο μέλλον, η σύντηξη αισθητήρων αναμένεται να παραμείνει κρίσιμη για να επιτρέψει σε αξιόπιστα αυτόνομα UAV να λειτουργούν σε σύνθετα περιβάλλοντα. Τα αναμενόμενα επόμενα βήματα πιθανότατα θα περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση αλγορίθμων σύντηξης αισθητήρων με την Τεχνητή Νοημοσύνη, έτσι ώστε τα UAV να μην συνδυάζουν απλώς δεδομένα αισθητήρων, αλλά να μπορούν να ερμηνεύουν το πλαίσιο και να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους ανάλογα με τις ανάγκες. Τελικά, η σύντηξη αισθητήρων θα αποτελέσει έναν βασικό τεχνολογικό παράγοντα για την ανάπτυξη

ασφαλών, αποτελεσματικών και ευφύων εναέριων συστημάτων ικανών να λειτουργούν σε πραγματικά περιβάλλοντα.

2.8 Συστήματα Επικοινωνίας και Μετάδοση Δεδομένων σε Πλατφόρμες UAV

Η ικανότητα επικοινωνίας των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργικότητά τους, καθώς επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ του UAV, του/των χειριστή/ών του, του/των επίγειου/ων σταθμού/ών και πιθανώς άλλων αυτόνομων συστημάτων. Η αξιοπιστία αυτής της επικοινωνίας όχι μόνο θα επιτρέψει την αξιόπιστη μετάδοση σημάτων ελέγχου, αλλά θα υποστηρίξει επίσης την τηλεμετρία, τα δεδομένα αισθητήρων, τη ροή βίντεο, τις ενημερώσεις πλοήγησης και τη συνεργατική λήψη αποφάσεων.

Καθώς τα UAV αρχίζουν να λειτουργούν αυτόνομα και βασίζονται περισσότερο στη συλλογή και ανάλυση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων, τα παραδοσιακά συστήματα επικοινωνίας UAV έχουν μεταβεί από απλές επικοινωνίες τύπου τηλεχειρισμού από σημείο σε σημείο RF σε σύνθετα δίκτυα πολλαπλών επιπέδων.

Παραδοσιακά, τα συστήματα επικοινωνίας UAV βασίζονταν σε έναν μόνο τύπο σύνδεσης ραδιοσυχνοτήτων "από σημείο σε σημείο". Αυτός ο μοναδικός τύπος σύνδεσης χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για την παροχή εισόδου ελέγχου από έναν χειριστή στο UAV, ενώ επέστρεφε πολύ βασικά δεδομένα τηλεμετρίας, όπως τάση μπαταρίας, υψόμετρο, ταχύτητα και ισχύς σήματος. Αν και αυτοί οι τύποι συστημάτων ήταν επαρκείς για ψυχαγωγικές λειτουργίες UAV και πρώιμα ερευνητικά έργα, πολλές σύγχρονες εφαρμογές UAV απαιτούν πλέον πολύ μεγαλύτερους όγκους δεδομένων για συνεχή μεταφορά και με χαμηλή καθυστέρηση.

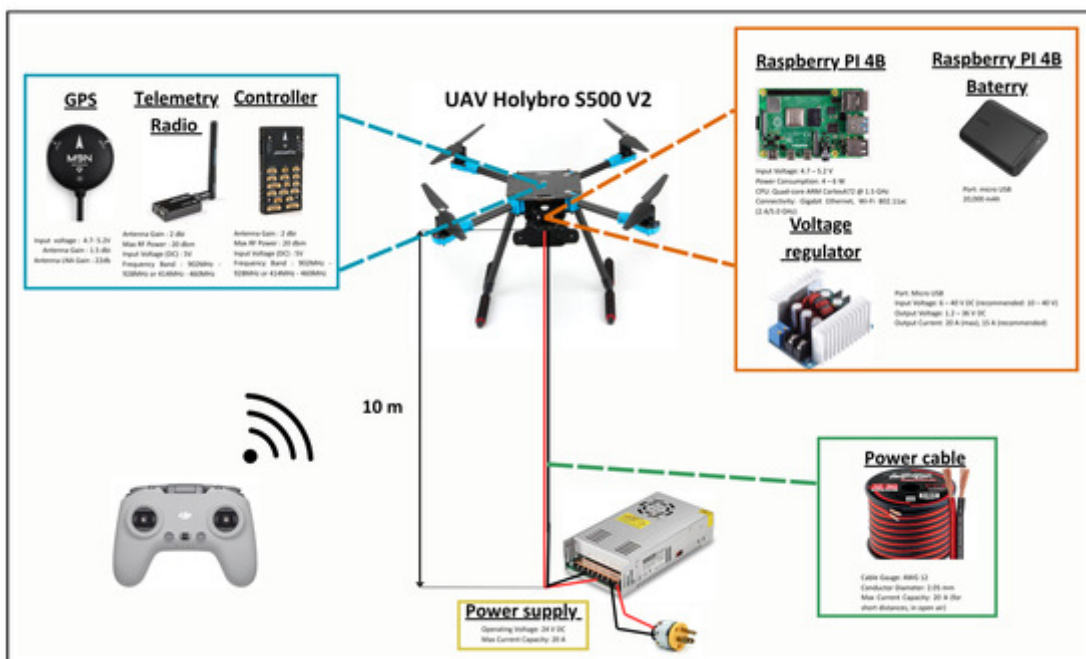
Η μετάδοση βίντεο είναι μία από τις κύριες μορφές επικοινωνίας που απαιτούνται στα περισσότερα συστήματα UAV που βασίζονται σε όραση. Τα περισσότερα UAV εξοπλισμένα με κάμερα παράγουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων εικόνας, τα οποία πρέπει να αποστέλλονται είτε σε έναν χειριστή είτε σε ένα σύστημα επεξεργασίας σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Εκτός από την αποστολή μεταδόσεων βίντεο, τα συστήματα επικοινωνίας UAV πρέπει να λαμβάνουν υπόψη πολλαπλούς συμβιβασμούς κατά το σχεδιασμό συστημάτων επικοινωνίας για UAV. Μερικά παραδείγματα περιλαμβάνουν: εύρος ζώνης, καθυστέρηση, αξιοπιστία, κατανάλωση ενέργειας και αποτελεσματική απόσταση μετάδοσης.

Εκτός από τις προαναφερθείσες παραμέτρους συμβιβασμού, μια άλλη σημαντική παράμετρος για τις εφαρμογές UAV είναι η καθυστέρηση. Η καθυστέρηση μπορεί να επηρεάσει άμεσα τόσο την απόκριση των χειριστηρίων ενός UAV όσο και τελικά να επηρεάσει τη συνολική επιχειρησιακή ασφάλεια του UAV. Ένα κλασικό παράδειγμα του πώς η καθυστέρηση επηρεάζει την απόδοση του UAV παρατηρείται στα συστήματα πτήσης First-Person View (FPV). Οι μικρές καθυστερήσεις στα συστήματα πτήσης FPV μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές μειώσεις στην απόδοση του πιλότου λόγω καθυστερημένης οπτικής ανάδρασης. Τα αυτόνομα συστήματα πλοήγησης αντιμετωπίζουν επίσης μειωμένη απόδοση όταν υπάρχουν σημαντικές καθυστερήσεις στην επικοινωνία των αποφάσεων ελέγχου που λαμβάνονται από έναν εξωτερικό υπολογιστή στο UAV.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για ασύρματη επικοινωνία με UAV. Αυτές οι μέθοδοι συνήθως περιλαμβάνουν τη χρήση συνδέσμων τηλεμετρίας ραδιοσυχνοτήτων (RF) που λειτουργούν εντός συγκεκριμένων περιοχών συχνοτήτων όπως 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz και 2,4 GHz. Τα κύρια χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη χρήση συνδέσμων τηλεμετρίας RF για

λειτουργίες διοίκησης και ελέγχου των UAV είναι η αξιοπιστία και η εμβέλεια. Ωστόσο, αυτοί οι σύνδεσμοι τηλεμετρίας RF δεν παρέχουν υψηλό εύρος ζώνης σε σχέση με άλλες διαθέσιμες επιλογές επικοινωνίας. Παραδείγματα άλλων επιλογών ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται με UAV περιλαμβάνουν συστήματα που βασίζονται σε Wi-Fi που λειτουργούν σε συχνότητες 2,4 GHz ή 5 GHz. Αυτοί οι τύποι επιλογών ασύρματης επικοινωνίας προσφέρουν υψηλότερες δυνατότητες εύρους ζώνης από τους συνδέσμους τηλεμετρίας RF, αλλά συνήθως προσφέρουν μικρότερη εμβέλεια από τους συνδέσμους τηλεμετρίας RF.

Οι σύγχρονες επικοινωνίες μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) χρησιμοποιούν ολοένα και περισσότερο μεθόδους αποστολής δεδομένων που βασίζονται σε IP. Η χρήση μετάδοσης βίντεο και αισθητήρων μέσω δικτύων μπορεί να αξιοποιήσει πολλούς τύπους πρωτοκόλλων μετάδοσης που βασίζονται σε IP, όπως MJPEG-over-HTTP, WebRTC και Real Time Streaming Protocol (RTSP). Το RTSP είναι ένα παράδειγμα πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση βίντεο σε πολύ χαμηλές καθυστερήσεις. Το RTSP χρησιμοποιεί πολλές διαφορετικές συμπιέσεις. Το WebRTC είναι ένα άλλο παράδειγμα πρωτοκόλλου που παρέχει επικοινωνία Peer-to-Peer χρησιμοποιώντας Adaptive Bandwidth Management. Αυτό επιτρέπει την υλοποίηση μιας ποικιλίας εφαρμογών όπου επιδιώκονται χαμηλές καθυστερήσεις μετάδοσης. Το MJPEG-over-HTTP συνεχίζει να χρησιμοποιείται σε πρωτότυπα συστήματα UAV λόγω της ευκολίας υλοποίησης και της συμβατότητας με τα περισσότερα προγράμματα περιήγησης ιστού.



Σχήμα 2.3: Σύστημα επικοινωνίας βασισμένο σε UAV[48]

Εκτός από την άμεση επικοινωνία από UAV προς τους χειριστές τους, οι ερευνητές συνεχίζουν να μελετούν την αρχιτεκτονική δικτύου UAV. Οι αρχιτεκτονικές Flying Ad-Hoc Network (FANET) αντιπροσωπεύουν έναν εξειδικευμένο τύπο κινητού ad-hoc δικτύου (MANET) που αναπτύσσεται ειδικά για τις ανάγκες των εναέριων συστημάτων. Στα FANET, δεν υπάρχει κεντρική υποδομή που απαιτείται για την επικοινωνία των UAV μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα, τα FANETS επιτρέπουν μια ευρεία ποικιλία συνεργατικών δράσεων, όπως συνεργατική χαρτογράφηση, κατανομημένη ανίχνευση, επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης και πτήσεις σχηματισμού.

Η επικοινωνία σε περιβάλλοντα UAV θα δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα. Οι αλλαγές στην τοπολογική δομή που προκαλούνται από τη δυναμική κίνηση των οχημάτων μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια και υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος. Επιπλέον, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί (κτίρια, εμπόδια εδάφους, καιρικές συνθήκες κ.λπ.) μπορούν να προκαλέσουν υποβάθμιση του σήματος και απώλεια επικοινωνίας. Η αύξηση της απόστασης της σύνδεσης επικοινωνίας συνήθως οδηγεί σε αύξηση των απαιτήσεων ισχύος για την επίτευξη αυτής της αυξημένης απόστασης, επηρεάζοντας έτσι τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του οχήματος και τη συνολική διάρκεια πτήσης.

Η σημασία της ασφάλειας έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια στο πλαίσιο των συστημάτων επικοινωνίας UAV. Οι ασύρματες συνδέσεις ενδέχεται να είναι ευάλωτες σε υποκλοπές, πλαστογράφηση σήματος, επιθέσεις άρνησης υπηρεσίας και απόπειρες μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης. Επομένως, οι τεχνικές κρυπτογράφησης, οι μηχανισμοί ασφαλούς ελέγχου ταυτότητας και οι μηχανισμοί προστασίας επικοινωνίας ενσωματώνονται όλο και περισσότερο στις σύγχρονες αρχιτεκτονικές UAV για την προστασία από κακόβουλες δραστηριότητες, διατηρώντας παράλληλα την ακεραιότητα των δεδομένων και διασφαλίζοντας την ασφαλή λειτουργία.

Αναμένεται ότι τα μελλοντικά συστήματα UAV θα εξαρτηθούν σε μεγάλο βαθμό από προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνίας, όπως τα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας 5ης γενιάς (5G) και τελικά 6ης γενιάς (6G). Προβλέπεται ότι αυτές οι επόμενες γενιές ασύρματης επικοινωνίας θα παρέχουν σημαντικά μεγαλύτερο εύρος ζώνης από τις προηγούμενες γενιές, χαμηλότερες δυνατότητες καθυστέρησης και υποστήριξη για μεγάλης κλίμακας αναπτύξεις διασυνδεδεμένων αυτόνομων εναέριων συστημάτων. Έτσι, αυτές οι εξελίξεις μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για επεξεργασία με τη βοήθεια cloud σε πραγματικό χρόνο, συνεργατική νοημοσύνη σμήνους και εξαιρετικά καλά συντονισμένες αυτόνομες αποστολές που ενσωματώνουν πολυάριθμες πλατφόρμες UAV που λειτουργούν ταυτόχρονα.

2.9 Συμπεράσματα

Η βιβλιογραφική επισκόπηση που παρέχεται στο παρόν παρακολουθεί την ανάπτυξη των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) σε πολλαπλούς, σχετικούς τομείς. Αυτοί οι τομείς καταδεικνύουν μια συνεχή τάση προς αυξανόμενα επίπεδα αυτονομίας, νοημοσύνης και αυξημένης αποτελεσματικότητας.

Ιστορικά, τα UAV έχουν εξελιχθεί από απλούς στόχους ραδιοελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια στρατιωτικών ασκήσεων στις αρχές του εικοστού αιώνα σε σύγχρονες εξελιγμένες αυτόνομες πλατφόρμες ικανές για αντίληψη και λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Αυτές οι εξελίξεις κατέστησαν δυνατές χάρη στην εισαγωγή διαφόρων βασικών παραγόντων. Αυτοί περιλαμβάνουν δέκτες GPS, αδρανειακούς αισθητήρες βασισμένους σε MEMS και βελτιώσεις στην επεξεργασία ψηφιακού σήματος. Συνολικά, αυτές οι εξελίξεις μείωσαν τα εμπόδια εισόδου τόσο για εμπορικούς όσο και για ερευνητικούς χρήστες.

Στον τομέα της ενσωματωμένης υπολογιστικής όρασης, η μετάβαση από συστήματα βασισμένα σε FPGA σε ARM SoCs με ενσωματωμένες NPU έχει βελτιώσει σημαντικά τους τύπους λειτουργιών αντίληψης που μπορούν να επιτευχθούν σε ένα UAV, διατηρώντας παράλληλα αποδεκτούς περιορισμούς κατανάλωσης ενέργειας και βάρους. Οι τεχνικές συμπίεσης μοντέλων (π.χ., κβαντοποίηση και απόσταξη γνώσης) έχουν επίσης επιτρέψει την εφαρμογή μοντέλων βαθιάς μάθησης για υλικό με περιορισμούς πόρων, παρέχοντας έτσι μεγαλύτερη δυνατότητα για

ενσωματωμένη επεξεργασία τεχνητής νοημοσύνης. Για τους αλγόριθμους ανίχνευσης προσώπου, αν και η μέθοδος Viola-Jones είναι ένα πρωτοποριακό έργο για την επίδειξη της δυνατότητας επίτευξης αποτελεσματικού υπολογισμού χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένες εικόνες, επιλογή χαρακτηριστικών AdaBoost και αρχιτεκτονική cascade, έχει αποδειχθεί ότι οι ανεπάρκειες σε διαφορετικές οπτικές γωνίες και συνθήκες φωτισμού παρακινούν τη χρήση πιο πρόσφατων μεθόδων που βασίζονται στη μηχανική μάθηση (BlazeFace και MTCNN), οι οποίες παρέχουν καλύτερη απόδοση σε μια ποικιλία συνθηκών λειτουργίας στον πραγματικό κόσμο.

Μια ευρεία αρχιτεκτονική τάση που παρατηρείται στη βιβλιογραφία σχετικά με τα συστήματα όρασης UAV είναι η απομάκρυνση από την εξάρτηση από την επεξεργασία που εξαρτάται από επίγειους σταθμούς προς την υπολογιστική άκρη. Η υπολογιστική άκρη μειώνει τις καθυστερήσεις επικοινωνίας, αυξάνει τη συνολική ανθεκτικότητα του συστήματος και παρέχει μεγαλύτερη ιδιωτικότητα χρήστη. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά την παρατήρηση μεμονωμένων ατόμων σε δημόσιους χώρους.

Οι μπαταρίες πολυμερούς λιθίου εξακολουθούν να είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας για πλατφόρμες UAV. Οι μπαταρίες LiPo είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και υψηλού ρυθμού που σχετίζονται με τα εναέρια ρομπότ. Αν και έχει επιτευχθεί σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη μπαταριών LiPo, η σχετικά βραδύτερη πρόοδος στην ανάπτυξη μπαταριών σε σύγκριση με την ανάπτυξη υλικού συνεχίζει να θέτει πρόσθετες απαιτήσεις στους προγραμματιστές συστημάτων για την ανάπτυξη αλγοριθμικών λύσεων και αρχιτεκτονικών χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

Οι δυνατότητες της Τεχνητής Νοημοσύνης εκτείνονται πολύ πέρα από την απλή αντίληψη για τα UAV. Περιλαμβάνουν τον εντοπισμό μέσω οπτικής-αδρανειακής οδομετρίας και τον ταυτόχρονο εντοπισμό και χαρτογράφηση (SLAM), τον σχεδιασμό διαδρομής, τον συντονισμό πολλαπλών ρομπότ και την αυτόνομη εκτέλεση αποστολών. Επιπλέον, η σύντηξη αισθητήρων (ειδικά η σύντηξη οπτικών και αδρανειακών δεδομένων) έχει αποδειχθεί κρίσιμη για την αξιόπιστη πλοήγηση σε περιβάλλοντα χωρίς πρόσβαση GPS.

Τα συστήματα επικοινωνίας για τα UAV έχουν εξελιχθεί σημαντικά από απλές συνδέσεις RF από σημείο σε σημείο σε πολυεπίπεδα δίκτυα IP που διευκολύνουν ροές βίντεο υψηλού εύρους ζώνης και συνεργατικές λειτουργίες. Νέα αναδυόμενα πρότυπα, όπως το 5G και η ρυθμιστική δομή του U-space, πιθανότατα θα διευκολύνουν την ανάπτυξη UAV σε μεγάλη κλίμακα με συντονισμένο τρόπο σε κοινόχρηστο εναέριο χώρο.

Κεφάλαιο 3ο: Αρχιτεκτονική συστήματος

3.1 Επισκόπηση Συστήματος

Το σύστημα αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως δύο στενά συνδεδεμένα υποσυστήματα που λειτουργούν ταυτόχρονα. Το ένα είναι το υποσύστημα πτήσης, στο οποίο ασκείται ο έλεγχος της πτήσης, ώστε να επιτυγχάνεται και να σταθεροποιείται μια σταθερή κατάσταση πτήσης. Το άλλο υποσύστημα είναι το υποσύστημα όρασης, στο οποίο καταγράφονται και επεξεργάζονται πληροφορίες βίντεο.

Αυτά τα δύο συστήματα έχουν κοινή πηγή τροφοδοσίας (την μπαταρία LiPo 4S). Ωστόσο, λόγω της ξεχωριστής λειτουργίας τους, υπάρχει σημαντικό επίπεδο αυτονομίας τόσο στο υποσύστημα πτήσης όσο και στο υποσύστημα όρασης. Ως εκ τούτου, προς το παρόν το σύστημα όρασης δεν έχει τη δυνατότητα να στέλνει σήματα εντολών στον ελεγκτή πτήσης (δηλαδή, προς το παρόν πρόκειται για ένα αεροσκάφος ανοιχτού βρόχου που λειτουργεί μόνο με αντίληψη).

Το υποσύστημα πτήσης βασίζεται στο Sologood F722 Flight Controller Stack. Αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή STM32F722 [14] 32-bit, μια μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU) ICM-42688-P και τέσσερις ηλεκτρονικούς ελεγκτές ταχύτητας (ESC) σε ένα ενιαίο μικρό συγκρότημα. Το F722 χρησιμοποιεί το υλικολογισμικό Betaflight 4.x, το οποίο περιέχει έναν διαδοχικό βρόχο ελέγχου PID που λειτουργεί έως και 8 kHz στα δεδομένα του γυροσκοπίου, προκειμένου να παρέχει τις συγκεκριμένες οδηγίες ροπής σε κάθε κινητήρα που απαιτούνται για τη διατήρηση της σταθερότητας του drone.

Κάθε ένας από τους τέσσερις κινητήρες iFlight XING 2207 Brushless τροφοδοτείται μέσω του κεντρικού 4 σε 1 ESC χρησιμοποιώντας ψηφιακό σήμα DSHOT600, το οποίο παρέχει τηλεμετρία χωρίς θόρυβο και ακρίβεια ανάλυσης γκαζιού σε σύγκριση με τις προηγούμενες αναλογικές μεθόδους PWM.

Το υποσύστημα όρασης περιλαμβάνει τον υπολογιστή μονού πίνακα (SBC) Raspberry Pi 5, τη μονάδα κάμερας Raspberry Pi V2 (αισθητήρας Sony IMX219, 8MP) και την απαιτούμενη σουίτα λογισμικού. Το Raspberry Pi 5 καταναλώνει περίπου 3 – 5W ισχύος από την έξοδο 5V BEC που παρέχεται από τη στοίβα ESC ενώ εκτελεί ενεργά επεξεργασία βίντεο. Η μονάδα κάμερας συνδέεται με το Raspberry Pi μέσω καλωδίου κορδέλας CSI 22 ακίδων, επιτρέποντας τη γρήγορη μεταφορά ακατέργαστων εικόνων με αμελητέο φορτίο CPU σε σχέση με τις κάμερες USB.

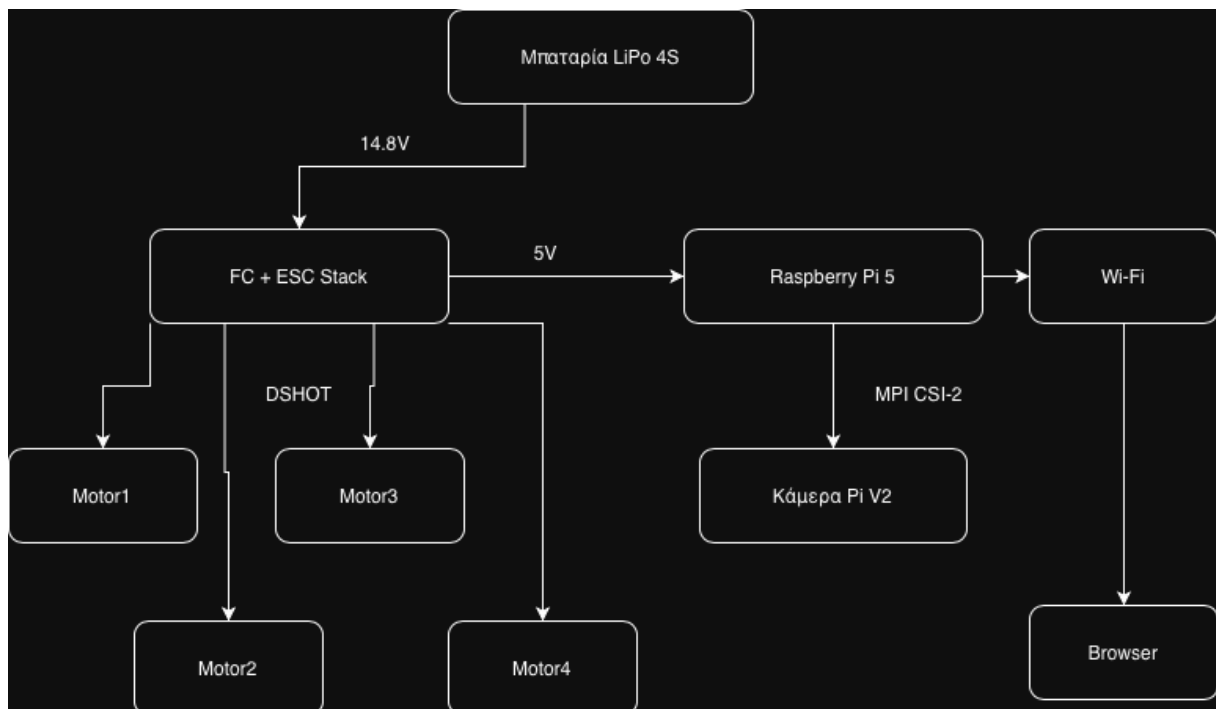
Όλες οι εργασίες επεξεργασίας εικόνας από την λήψη καρέ, τον μετασχηματισμό χρωματικού χώρου, την αναγνώριση προσώπου, τον σχολιασμό, την συμπίεση JPEG και την ροή HTTP εκτελούνται στους τέσσερις πυρήνες ARM Cortex-A76 που βρίσκονται εντός του SoC BCM2712 με ρυθμό μεταξύ 28 – 32 καρέ ανά δευτερόλεπτο.

Κατά το σχεδιασμό αυτής της αρχιτεκτονικής συστήματος, μια βασική απόφαση που ελήφθη ήταν αν όλη η επεξεργασία εικόνας θα πρέπει να πραγματοποιείται επί του UAV (Edge Computing) ή αν θα πρέπει να αποστέλλεται ακατέργαστο βίντεο σε έναν σταθμό εδάφους για επεξεργασία. Επιλέγοντας το Edge Computing αντί της αποστολής ακατέργαστου βίντεο σε σταθμό εδάφους, καταφέρα να μειώσω το απαιτούμενο ασύρματο εύρος ζώνης από περίπου 50 – 100 Mbps (μη συμπίεμένο βίντεο 720p @ 30 FPS) σε λιγότερο από 5 Mbps (βίντεο με σχολιασμό συμπίεμένο σε MJPG), να αυξήσω την πρακτική απόσταση στην οποία μπορούν να πραγματοποιηθούν επικοινωνίες Wi-Fi, να μειώσω

τους χρόνους καθυστέρησης επικοινωνίας από άκρο σε άκρο και να διασφαλίσω ότι θα μπορώ να χρησιμοποιήσω αυτό το σύστημα σε περιβάλλοντα με κακή ή διακοπτόμενη ασύρματη επικοινωνία.

Component	Specification
Airframe	iFlight Titan XL5 (true-X, 5-inch)
Motors (x4)	iFlight XING 2207 brushless
Flight Controller	Sologood F722 (STM32F722)
ESC	Sologood 4-in-1 (part of stack)
Battery	Tattu R-Line 1550mAh 120C 4S LiPo
Onboard Computer	Raspberry Pi 5 (16 GB RAM)
Camera	Raspberry Pi Camera V2 (Sony IMX219)
OS	Raspberry Pi OS (64-bit, Bookworm)
Vision Library	OpenCV 4.x
Web Framework	Flask (Python 3)

Πίνακας 3.1: Κύρια εξαρτήματα υλικού και λογισμικού



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα Αρχιτεκτονικής του Drone

3.2 Μηχανικό πλαίσιο του drone: iFlight Titan XL5

Όλα τα βασικά εξαρτήματα υλικού επιλέχθηκαν με βάση τις επιμέρους τεχνικές και οικονομικές τους ιδιότητες. Το πλαίσιο iFlight Titan XL5 διαθέτει σχεδιασμό με γεωμετρία εκτεταμένων βραχιόνων, μειώνοντας την καθοδική ροή αέρα μεταξύ των ροτόρων που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση της αιώρησης, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας όταν προστίθεται το επιπλέον βάρος του ωφέλιμου φορτίου Raspberry Pi 5. Η στοίβα Sologood F722 τοποθετήθηκε απευθείας στο μοτίβο στήριξης 30,5 mm × 30,5 mm (από κέντρο σε κέντρο) της άνω πλάκας, διευκολύνοντας τη μηχανική ενσωμάτωση. Το σύνθετο υλικό από ανθρακονήματα (υφασμένο 3K) του πλαισίου παρέχει πολύ υψηλή αναλογία ακαμψίας προς βάρος, η οποία ελαχιστοποιεί την παραμόρφωση όταν εκτίθεται σε δόνηση παραγόμενη από τους τέσσερις περιστρεφόμενους ρότορες.

Η σειρά κινητήρων iFlight XING 2207 επιλέχθηκε λόγω του συνδυασμού του υψηλού KV του κινητήρα (1800 KV στα 4S), της χρήσης μαγνητών νεοδυμίου N52 για την επίτευξη υψηλής πυκνότητας μαγνητικής ροής και των αξόνων από ανοξείδωτο χάλυβα με μηχανική κατεργασία ακριβείας που αντέχουν στην κάμψη όταν υποβάλλονται στην πρόσκρουση της έλικας. Σε τάση 4S (ονομαστικά 14,8 V), ένας κινητήρας 1800 KV παράγει περίπου 26.640 RPM σε πλήρη επιτάχυνση. όταν χρησιμοποιείται έλικας με σχεδιασμό δύο πτερυγίων διαμέτρου περίπου 5 ιντσών, ο συνδυασμός μπορεί να παράγει περίπου 900 g ώσης ανά κινητήρα για συνολική αναλογία ώσης προς βάρος για το συνολικό σύστημα περίπου 3,5:1 με πλήρες φορτίο κατά την εκτόξευση· αυτό είναι επαρκές για σταθερή και ελεγχόμενη πτήση.

Ο κύριος λόγος για την επιλογή του Sologood F722 stack ήταν ο επεξεργαστής STM32F722, καθώς διαθέτει τις δυνατότητες υπολογισμών κινητής υποδιαστολής που απαιτούνται για την εκτέλεση του βρόχου γυροσκοπίου του Betaflight στα 8 kHz. Επιπλέον, το ICM-42688-P IMU που χρησιμοποιεί αυτό το stack έχει πυκνότητα θορύβου γυροσκοπίου περίπου 2,8 mdps/ $\sqrt{\text{Hz}}$, η οποία είναι σημαντικά χαμηλότερη από τον παλαιότερο αισθητήρα MPU-6000 που χρησιμοποιείται στους περισσότερους φθηνούς ελεγκτές πτήσης. Το χαμηλότερο επίπεδο θορύβου του αισθητήρα επιτρέπει μεγαλύτερη σταθερότητα του βρόχου PID, περιορίζοντας έτσι τη μεγάλη εξάρτηση από το επιθετικό ψηφιακό φίλτράρισμα χαμηλής διέλευσης που δημιουργεί καθυστέρηση στον βρόχο ελέγχου.

Κατά τη σύγκριση του Raspberry Pi 5 με άλλα SBC (όπως το Orange Pi 5, το NVIDIA Jetson Nano ή το Google Coral Dev Board), το Raspberry Pi 5 προσέφερε την καλύτερη ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής απόδοσης, ωριμότητας του οικοσυστήματος λογισμικού και έκτασης της υποστήριξης από την κοινότητα. Υπάρχουν επιλογές σημαντικά υψηλότερης απόδοσης με πλατφόρμες συμπερασμού επιταχυνόμενες από GPU, όπως το Jetson Nano. Ωστόσο, ο παραδοσιακός αλγόριθμος Haar Cascade που χρησιμοποιείται για αυτό το έργο δεν επωφελείται από την επιτάχυνση GPU και λειτουργεί καλά στους πυρήνες CPU ARM Cortex-A76. Το Ίδρυμα Raspberry Pi έχει δημιουργήσει μια πλήρη βιβλιοθήκη Picamera2 Python που υποστηρίζει πλήρως τον αισθητήρα IMX219 της μονάδας Camera V2, γεγονός που συνέβαλε στην επιλογή του Raspberry Pi 5 ως πλατφόρμας για την παροχή δυνατοτήτων όρασης.



Σχήμα 3.2: iFlight Titan XL5 Frame [34]

Parameter	Value
Material	3K carbon fibre composite
Motor-to-motor diagonal	~220 mm
Propeller size	5 inch (127 mm)
Stack mount	30.5 x 30.5 mm and 20 x 20 mm
Bottom plate thickness	3 mm
Top plate thickness	2 mm
Arm thickness	3 mm
Frame weight (without hardware)	~95 g
Layout	True-X quadrotor
Maximum payload	~200 g (estimated)

Πίνακας 3.2: Προδιαγραφές για το πλαίσιο iFlight Titan XL5

3.3 Πρόωση: Κινητήρες iFlight XING

Τέσσερις κινητήρες DC χωρίς ψήκτρες της σειράς iFlight XING θα χρησιμεύσουν ως σύστημα πρόωσης, ένας σε κάθε βραχίονα. Σχεδιασμένοι ειδικά για εφαρμογές FPV υψηλής απόδοσης, αυτοί οι κινητήρες διαθέτουν: Μαγνήτες Νεοδυμίου N52, Πολύκλωνη Περιέλιξη Χαλκού, Άξονες από Ανοξειδωτο Χάλυβα με Μηχανική Κατεργασία Ακριβείας. Οι διαστάσεις του στάτη του κινητήρα

(ύψος και διάμετρος) που εκφράζονται ως AABB (π.χ. 2207) περιγράφουν την απόδοση του κινητήρα (χαρακτηριστικά ισχύος εξόδου/ροπής/ονομαστική τιμή KV).

Η ονομαστική τιμή KV ενός κινητήρα ορίζεται ως η ταχύτητα χωρίς φορτίο (σε RPM) ανά εφαρμοζόμενη τάση. Όταν χρησιμοποιούνται έλικες 5 ιντσών με μπαταρία λιθίου πολυμερούς 4 κυψελών (ονομαστική τάση: 14,8 βολτ), οι τυπικές ονομαστικές τιμές KV για κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε drones κυμαίνονται στο εύρος 1700-2750 RPM/Volt. Οι κινητήρες με υψηλότερο KV περιστρέφουν τα μικρότερα/ελαφρύτερα έλικα πιο γρήγορα, ενώ οι κινητήρες με χαμηλότερο KV παρέχουν μεγαλύτερη ροπή και, ως εκ τούτου, είναι πιο κατάλληλοι για χρήση με μεγαλύτερα/βαρύτερα έλικα και χαμηλότερες ταχύτητες. Επομένως, οι χρήστες πρέπει να επιλέξουν ένα μοντέλο XING που ταιριάζει καλύτερα στο επιθυμητό στυλ πτήσης και στην επιλογή βήματος/διαμέτρου του έλικα.

Οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πολυρότορα ελέγχονται από τριφασικούς ηλεκτρονικούς ελεγκτές ταχύτητας (ESC) που μεταβάλλουν (εναλλάσσουν) τις περιελίξεις του κινητήρα χρησιμοποιώντας διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM). Ο ESC διαβάζει τις πληροφορίες γκαζιού – σε σύγχρονα σχέδια ένα ψηφιακό σήμα πρωτοκόλλου DSHOT – και παράγει τα κατάλληλα ρεύματα φάσης αναλόγως. Το DSHOT (Digital Shot) αναπτύχθηκε για να εξαλείψει τα προβλήματα αναλογικού συγχρονισμού που σχετίζονται με τα παραδοσιακά πρωτόκολλα PWM και να επιτρέψει την αμφίδρομη επικοινωνία για τηλεμετρία κινητήρα.



Σχήμα 3.3: Drone motors iFlight XING [35]

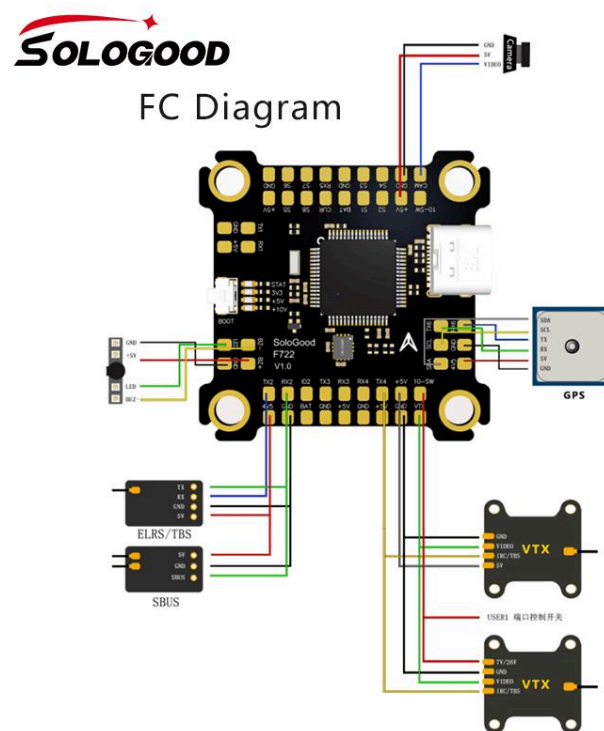
Parameter	Value
Stator size	2207 (22 mm diameter, 7 mm height)
Magnet material	N52 neodymium
KV rating (typical)	2750 KV
Recommended propeller	5040 to 5148 (3 or 4 blade)

Maximum continuous current	~30 A
Peak current	~40 A
Motor weight	~32 g (without wire)
Shaft diameter	3 mm (M3 thread)
Mounting pattern	16 x 16 mm (M3)
Protocol support	DSHOT150/300/600, PWM, OneShot

Πίνακας 3.3: Προδιαγραφές για τον κινητήρα iFlight XING

3.4 Ελεγκτής πτήσης/ESC: Sologood F722 Stack

Ένα Sologood F722 Stack περιλαμβάνει μία πλακέτα ελεγκτή πτήσης συνδυασμένη με μία πλακέτα ESC τεσσάρων σε ένα, τοποθετημένες σε κάθετη στοιβάζ. Η κάθετη στοιβάζξη γίνεται όλο και πιο δημοφιλής μεταξύ των σύγχρονων ενθουσιωδών του FPV, επειδή μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της καλωδίωσης, μειώνει το βάρος και χωράει στον πολύ περιορισμένο εσωτερικό χώρο που υπάρχει στα περισσότερα πλαίσια 5 ιντσών. Οι δύο πλακέτες συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός συνδετήρα JST ή απευθείας σημείων συγκόλλησης που μεταφέρουν γραμμές τροφοδοσίας, γείωσης, σήματος ESC και σειριακές συνδέσεις UART.

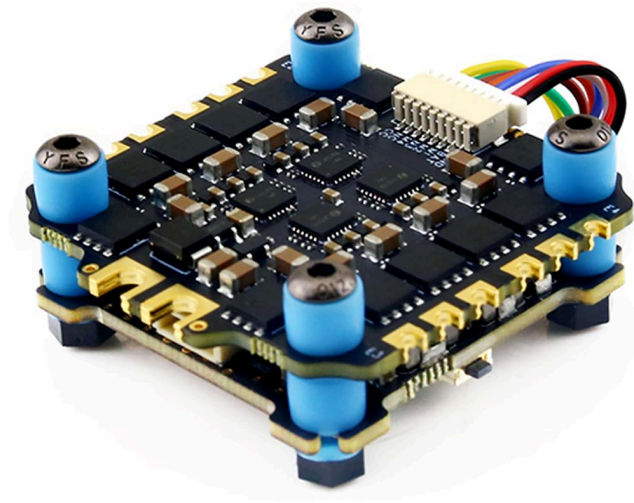


Σχήμα 3.4: Διαγραμμα FC [44]

Ο ελεγκτής πτήσης είναι κατασκευασμένος γύρω από έναν μικροεπεξεργαστή STM32F722 που παράγεται από την STMicroelectronics. Ο STM32F722 είναι ένας επεξεργαστής ARM Cortex-M7 που λειτουργεί σε συχνότητα ρολογιού 216 MHz, εξοπλισμένος με μονάδα κινητής υποδιαστολής (FPU), 256 KB μνήμης RAM και 512 KB μνήμης Flash. Λειτουργεί με το λογισμικό ανοιχτού κώδικα Betaflight για ελεγκτές πτήσης, εφαρμόζοντας συνένωση αισθητήρων, έλεγχο PID στάσης και διαχείριση τρόπων πτήσης. Ο F722 προσφέρει άφθονες δυνατότητες επεξεργασίας για τη λειτουργία

του Betaflight σε ρυθμό βρόχου γυροσκοπίου 8 kHz, με τη χρήση του επεξεργαστή να παραμένει κάτω από το 100%.

Μια ενσωματωμένη μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU) MPU-6000 ή ICM-42688-P παρέχει δεδομένα επιταχυνσιόμετρου και γυροσκοπίου με ρυθμούς δειγματοληψίας έως 32 kHz. Το firmware Betaflight χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό φίλτρων χαμηλής διέλευσης PT1 και Biquad για την καταστολή των πλατών θορύβου υψηλής συχνότητας που προστίθενται από τα γυροσκόπια πριν από την εφαρμογή τους σε αλγόριθμους ελέγχου PID που ελέγχουν τη στάση. Ορισμένες πλακέτες F722 υποστηρίζουν επίσης αισθητήρες βαρομετρικού υψομέτρου και μαγνητόμετρα.



Σχήμα 3.5: Sologood F722 ESC+FC Stack [36]

Parameter	Value
MCU	STM32F722 (ARM Cortex-M7, 216 MHz)
IMU	MPU-6000 / ICM-42688-P (6-axis)
ESC topology	4-in-1 integrated
ESC current rating	45 A per channel (continuous)
Input voltage	3S-6S LiPo (9.9 V – 25.2 V)
5 V BEC output	~3 A (for Raspberry Pi 5)
UART ports	6
Motor outputs	8 (M1-M8)
Firmware	Betaflight 4.x
Stack mounting	30.5 x 30.5 mm M3

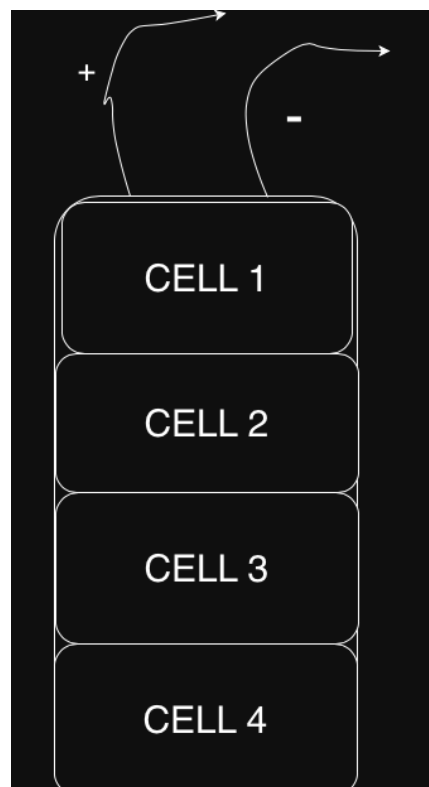
Πίνακας 3.4: Προδιαγραφές για τον ελεγκτή πτήσης/ESC Sologood F722

Identifier	Configuration/MSP	Serial Rx	Telemetry Output		Sensor Input		Peripherals	
USB VCP	<input checked="" type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled	AUTO	Disabled	57600	Disabled	115200
UART1	<input type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled	AUTO	Disabled	57600	Disabled	115200
UART2	<input type="checkbox"/> 115200	<input checked="" type="checkbox"/>	Disabled	AUTO	Disabled	57600	Disabled	115200
UART3	<input type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled	AUTO	Disabled	57600	Disabled	115200
UART4	<input type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled	AUTO	Disabled	57600	Disabled	115200
UART5	<input type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled	AUTO	Disabled	57600	Disabled	115200
UART6	<input type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled	AUTO	Disabled	57600	Disabled	115200

Σχήμα 3.6: UART ports που χρησιμοποιήθηκαν για το receiver [43]

3.5 Συσκευασία μπαταρίας: Tattu R-Line 1550mAh 4S LiPo

Η αποθήκευση ενέργειας για το drone παρέχεται από ένα πακέτο μπαταριών λιθίου πολυμερούς Tattu R-Line 1550mAh [8] 120C 4S. Κάθε ένα από τα τέσσερα στοιχεία λιθίου πολυμερούς που περιλαμβάνονται στο πακέτο είναι συνδεδεμένο σε σειρά, παράγοντας ονομαστική τάση 14,8 βολτ ($4 * 3,7 V$) και τάση πλήρους φόρτισης 16,8 βολτ ($4 * 4,2 V$). Με ρυθμό εκφόρτισης 120 C, η θεωρητική ικανότητα συνεχούς ρεύματος της μπαταρίας παρέχεται ως 186 αμπέρ ($1,55 AH * 120 C$). Αυτό υπερβαίνει σαφώς οποιοδήποτε κανονικές συνθήκες λειτουργίας για την κατανάλωση ρεύματος από αυτό το drone.



Σχήμα 3.7: Δομή μπαταρίας

Η ενεργειακή περιεκτικότητα της μπαταρίας υπολογίζεται ως εξής: Συνολική ενέργεια = χωρητικότητα x ονομαστική τάση = 22,94 WH (1,55 AH x 14,8 V). αν και η διαθεσιμότητα ενέργειας μειώνεται ελαφρώς λόγω πτώσεων τάσης κατά τη διάρκεια λειτουργιών εκφόρτισης υψηλού ρεύματος και λόγω των Ελάχιστων Τάσεων Ασφαλούς Εκφόρτισης, τα υποθετικά εύρη Χρησιμοποιήσιμης Κατάστασης Φόρτισης των μεμονωμένων κυψελών μπορούν να προσεγγιστούν ως κυμαινόμενα μεταξύ 3,5 V - 4,2 V ανά κυψέλη, παρέχοντας μια κατά προσέγγιση Αποτελεσματική Διαθεσιμότητα Ενέργειας που κυμαίνεται μεταξύ 18-20 WH.

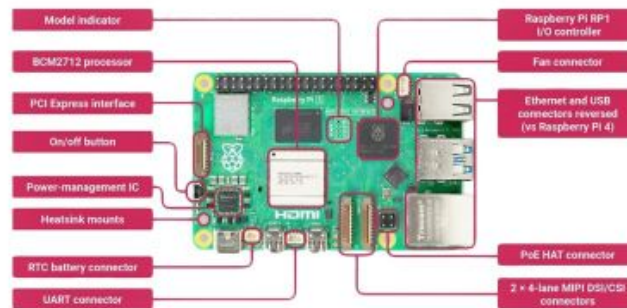
Οι μπαταρίες Tattu R-Line είναι βελτιστοποιημένες για σκοπούς αγώνων FPV, εστιάζοντας κυρίως στην ελαχιστοποίηση της εσωτερικής αντίστασης εντός των κυψελών και στη διασφάλιση της αντιστοίχισης των κυψελών. Με αυτόν τον τρόπο, οι μπαταρίες χαμηλής εσωτερικής αντίστασης ελαχιστοποιούν την πτώση τάσης κατά τη διάρκεια μεταβατικών περιόδων υψηλής κατανάλωσης ρεύματος και επιτρέπουν στους κινητήρες να διατηρούν τον έλεγχο κατά τη διάρκεια γρήγορων ελιγμών. Τα μεμονωμένα στοιχεία είναι μονωμένα ξεχωριστά με τη χρήση θερμοσυστελλόμενου μανικιού, το οποίο προστατεύει από ζημιές που προκαλούνται από περιβαλλοντικές επιδράσεις, ενώ συνδέονται με ένα βύσμα τροφοδοσίας XT60 και ένα καλώδιο εξισορρόπησης JST-XH που διευκολύνει τις λειτουργίες φόρτισης.

Parameter	Value
Capacity	1550 mAh
Cell configuration	4S1P (4 cells in series)
Nominal voltage	14.8 V
Fully charged voltage	16.8 V
Minimum safe voltage	14.0 V (3.5 V/cell)
Energy content	22.94 Wh
Continuous discharge rate	120C (186 A)
Peak discharge rate	240C (372 A, 10 s)
Connector	XT60 (power) + JST-XH (balance)
Approximate weight	~155 g
Dimensions (approx.)	75 x 35 x 32 mm

Πίνακας 3.5: Προδιαγραφές για την μπαταρία Tattu R-Line

3.6 Ενσωματωμένος υπολογιστής: Raspberry Pi 5

Το Raspberry Pi 5 είναι η τελευταία (πέμπτη) γενιά του μονοπλακέ υπολογιστή Raspberry Pi, ο οποίος κυκλοφόρησε τον Οκτώβριο του 2023 από το Ίδρυμα Raspberry Pi [4]. Χρησιμοποιεί τον επεξεργαστή εφαρμογών BCM2712 [17], ο οποίος έχει σχεδιαστεί με διαδικασία κατασκευής FinFET 16 nm. Αυτός ο επεξεργαστής εφαρμογών περιλαμβάνει τέσσερις πυρήνες επεξεργασίας ARM Cortex-A76 [15] που μπορούν να λειτουργούν σε ταχύτητες έως 2,4 GHz. Ο Cortex-A76 είναι ένας πυρήνας Out of Order Superscalar με μεγάλο buffer αναδιάταξης και προηγμένη πρόβλεψη διακλάδωσης. Ως εκ τούτου, μπορεί να παρέχει περίπου διπλάσιες εντολές ανά κύκλο ρολογιού σε σύγκριση με τον Cortex-A72 που χρησιμοποιείται στο Raspberry Pi 4.



Σχήμα 3.8: Raspberry pi 5 [37]

Εκτός από αυτές τις δυνατότητες επεξεργασίας, η πλακέτα που επέλεξα για χρήση σε αυτό το έργο διαθέτει επίσης 16 GB μνήμης RAM LPDDR4X. Ο τύπος μνήμης LPDDR4x είναι πολύ ταχύτερος από τους τύπους μνήμης DDR3 (και επομένως σημαντικά ταχύτερος από το Raspberry Pi Model B+ που είναι πιο ευρέως γνωστό). Με τόσο μεγάλο διαθέσιμο όγκο μνήμης, θα υπάρχει πάντα αρκετή μνήμη για το λειτουργικό σύστημα, καθώς και για όλες τις πρόσθετες βιβλιοθήκες που απαιτούνται από το πλαίσιο λογισμικού OpenCV και τον διακομιστή ιστού Flask βασισμένο σε Python, συν οποιαδήποτε άλλα στοιχεία απαιτούνται για τη δημιουργία της ροής επεξεργασίας εικόνας.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι προβολής εικόνων/βίντεο από το Raspberry Pi. Η πρώτη είναι μέσω HDMI και η δεύτερη μέσω μιας διεπαφής βίντεο που παρέχεται από μια σύνδεση MIPI CSI-2 διπλής λωρίδας. Αυτό επιτρέπει τη συμβατότητα με τη μονάδα Raspberry Pi Camera v2. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ροή επεξεργασίας εικόνας που χρησιμοποιείται σε αυτό το έργο λειτουργεί αποκλειστικά στους πυρήνες της CPU και όχι στη μονάδα επεξεργασίας γραφικών VideoCore VI. Η μονάδα επεξεργασίας γραφικών, ωστόσο, υποστηρίζει τόσο την αποκωδικοποίηση HEVC με επιτάχυνση υλικού όσο και το OpenGL ES 3.1, αλλά καμία από αυτές τις λειτουργίες δεν χρησιμοποιείται σε αυτό το συγκεκριμένο έργο.

Όταν είναι φορτωμένο, η συνολική κατανάλωση ισχύος του Raspberry Pi 5 εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 5W έως 8W, ανάλογα με τη χρήση της CPU. Όταν παρέχεται τροφοδοσία 5V DC, αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα DC 1A ή 1,6A.

Το Sologood F722 Stack [9] παρέχει μια ρυθμιζόμενη έξοδο BEC 5V ικανή να παράγει περίπου 3 Amps ρεύματος. Αυτό θα πρέπει να παρέχει περισσότερο από αρκετή ισχύ για το Raspberry Pi 5 όταν λειτουργεί κανονικά.

Τέλος, περιλαμβάνεται ένας σύνδεσμος USB-C που επιτρέπει τη μεταφορά της τάσης εξόδου BEC στο Pi.

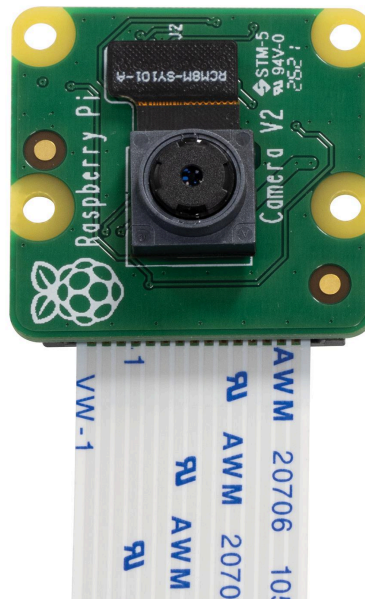
Parameter	Value
SoC	BCM2712 (Broadcom)
CPU cores	4x ARM Cortex-A76 @ 2.4 GHz
RAM	16 GB LPDDR4X
GPU	VideoCore VII
Storage	microSD (Raspberry Pi OS)
Camera interface	2x MIPI CSI-2 (4-lane)
USB	2x USB 3.0, 2x USB 2.0
Network	Gigabit Ethernet, Wi-Fi 802.11ac (2.4/5 GHz)
GPIO	40-pin header (backward compatible)
Power input	5 V via USB-C
Typical power draw	5-8 W under load
Board dimensions	85 x 56 mm
Weight	~51 g

Πίνακας 3.6: Προδιαγραφές του Raspberry Pi 5

3.7 Αισθητήρας όρασης: Κάμερα Raspberry Pi V2

Η κάμερα Raspberry Pi v2 είναι μια μονάδα κάμερας 8 megapixel που χρησιμοποιεί τον αισθητήρα εικόνας Sony IMX219 [5]. Η σύνδεση με το Raspberry Pi 5 πραγματοποιείται μέσω ενός επίπεδου εύκαμπτου καλωδίου (FFC) δεκαπέντε ακίδων μέσω ενός διαύλου MIPI CSI-2.

Αυτό παρέχει μια σύνδεση υψηλού εύρους ζώνης απευθείας μεταξύ του αισθητήρα εικόνας και του ISP (επεξεργαστή σήματος εικόνας) του System-On-Chip. Αντίθετα, οι τυπικοί δίαυλοι USB παρέχουν κοινόχρηστες συνδέσεις επικοινωνίας που περιλαμβάνουν πολλά επιπλέον κόστη και καθυστερήσεις σε σύγκριση με την άμεση πρόσβαση.



Σχήμα 3.9: Raspberry pi v2 camera [38]

Ο Sony IMX219 είναι ένας αισθητήρας εικόνας CMOS με οπίσθιο φωτισμό, όπου οι συστοιχίες φωτοδίοδων βρίσκονται κάτω από τα στρώματα μεταλλικής καλωδίωσης, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση συλλογής φωτός και μειώνοντας τον θόρυβο σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

Ο Sony IMX219 υποστηρίζει διάφορες μορφές εξόδου, όπως:

- 8MP @ 15FPS
- 1080P @ 30FPS
- 720P @ 60FPS

Για αυτή την εφαρμογή, η κάμερα έχει ρυθμιστεί να καταγράφει σε ανάλυση 1280x720 pixel σε μορφή XRGB8888, παρέχοντας μια λογική ισορροπία μεταξύ ανάλυσης, οπτικού πεδίου και ρυθμού καρέ.

Η μονάδα κάμερας συνδέεται με ένα ειδικά κατασκευασμένο βραχίονα (ή έναν εκτυπωμένο με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής) και στερεώνεται στο μπροστινό τμήμα του drone, παρέχοντας κάλυψη του περιβάλλοντος προς τα εμπρός. Το βάρος της ίδιας της μονάδας είναι σχετικά μικρό (περίπου 3 g) και, ως εκ τούτου, η συνολική επίδραση της στερέωσης είναι ελάχιστη όσον αφορά την επίδραση στο κέντρο βάρους του drone και δεν απαιτείται αντίβαρο.

Parameter	Value
Image sensor	Sony IMX219 (BSI CMOS)
Resolution	8 megapixels (3280 x 2464)
Video modes	1080p30, 720p60, 480p90
Interface	MIPI CSI-2 (15-pin FFC)
Pixel size	1.12 μm
Optical format	1/4 inch

Horizontal field of view	~62.2°
Vertical field of view	~48.8°
Fixed focus	Infinity (adjustable)
Module dimensions	25 x 23 x 9 mm
Weight	~3 g
Operating voltage	3.3 V (via CSI connector)

Πίνακας 3.7: Προδιαγραφές του Raspberry Pi Camera V2 module

Κεφάλαιο 4ο: Μηχανική Σχεδίαση και Συναρμολόγηση

4.1 Ανασκόπηση συναρμολόγησης Σκελετού Drone

Η διαδικασία της μηχανικής συναρμολόγησης χωρίστηκε σε τέσσερα βασικά στάδια: την προετοιμασία του σκελετού, την εγκατάσταση του συστήματος πρόωσης, την τοποθέτηση του συγκροτήματος του ελεγκτή πτήσης και, τέλος, την τοποθέτηση του βοηθητικού ωφέλιμου φορτίου (Raspberry Pi). Αυτά τα τέσσερα στάδια καθορίστηκαν με βάση την προηγούμενη εμπειρία σχετικά με τον βέλτιστο τρόπο διατήρησης της ροής εργασίας με ελάχιστες επαναλήψεις, καθώς και για να παρέχουν ένα σταθερό πλαίσιο για την επίτευξη δομικής αξιοπιστίας σε κάθε στάδιο.

Χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό kit πλαισίου iFlight Titan XL5 [6]. Αυτό το kit αποτελείται από πέντε τεμάχια από ανθρακονήματα και πέντε τεμάχια από αλουμίνιο. Το πρώτο βήμα στην προετοιμασία του πλαισίου για τη συναρμολόγηση ήταν η επιθεώρηση κάθε τεμαχίου από ανθρακονήματα για τυχόν ενδείξεις αποκόλλησης, σπασίματος στις άκρες ή ρωγμών στην επιφάνεια. Οποιαδήποτε τέτοια ελαττώματα θα μπορούσαν πιθανώς να εξελιχθούν σε μεγαλύτερα προβλήματα λόγω της επαναλαμβανόμενης κυκλικής φόρτισης από τους τέσσερις περιστρεφόμενους κινητήρες. Αφού ολοκληρώθηκε αυτή η επιθεώρηση, η κάτω πλάκα προετοιμάστηκε για συναρμολόγηση. Στην κάτω πλάκα υπάρχουν τέσσερις οπές με σπείρωμα για τη στερέωση των σωλήνων των βραχιόνων. Ο σωλήνας του βραχίονα στερεώνεται στην κάτω πλάκα μέσω μιας βίδας M3 x 10 mm, μία ανά οπή. Οι τέσσερις σωλήνες των βραχιόνων εισήχθησαν στις αντίστοιχες οπές και στη συνέχεια στερεώθηκαν στην κάτω πλάκα χρησιμοποιώντας βίδες τιτανίου M3 x 10 mm. Μια επιπλέον απαίτηση για αυτό το βήμα είναι η εφαρμογή Loctite 243 (ή παρόμοιου προϊόντος) στα σπειρώματα κάθε δομικού συνδετήρα. Λόγω των δυνάμεων δόνησης που δημιουργούνται από τους τέσσερις κινητήρες που περιστρέφονται (σε ταχύτητες άνω των 20.000 RPM), εάν δεν εφαρμοστεί Loctite 243 (ή παρόμοιο προϊόν) στα σπειρώματα των συνδετήρων, αυτοί θα χαλαρώσουν με την πάροδο του χρόνου και τελικά θα πέσουν.

Στη συνέχεια προχώρησε η εγκατάσταση των κινητήρων. Υπάρχουν τέσσερις κινητήρες iFlight XING 2207 εγκατεστημένοι σε ένα τετρακόπτερο. Κάθε κινητήρας συνδέεται στον αντίστοιχο βραχίονα του με τέσσερις βίδες M3x6mm. Δύο από αυτές τις βίδες περνούν μέσα από τον κύκλο βιδών διαμέτρου 16mm που βρίσκεται στο άκρο κάθε κινητήρα και εισέρχονται σε ένα μικρό μπλοκ από ανθρακονήματα (περίπου 1 cm³) που βρίσκεται στη βάση κάθε βραχίονα. Οι υπόλοιπες δύο βίδες περνούν μέσα από έναν ξεχωριστό κύκλο βιδών διαμέτρου 16mm και συνδέονται απευθείας στην κάτω πλευρά κάθε βραχίονα. Όλες οι βίδες σφίχτηκαν με ροπή που κυμαίνεται μεταξύ 0,5 – 0,6 Nm. Μια ροπή μικρότερη από 0,5 Nm μπορεί να επιτρέψει κάποια κίνηση στον κινητήρα λόγω των γυροσκοπικών ροπών που προκύπτουν κατά τη διάρκεια έντονων ελιγμών κλίσης και κύλισης· ωστόσο, μπορεί να προκαλέσει φθορά στα σπειρώματα M3 στο μαλακό σύνθετο υλικό άνθρακα 3k.

Η μηχανική αποσύνδεση της μονάδας κάμερας από το πλαίσιο είναι απαραίτητη λόγω των ιδιαίτερων μηχανικών προκλήσεων που δεν υπάρχουν στα παραδοσιακά επίγεια ρομπότ. Το περιβάλλον δόνησης ενός τετρακόπτερου ενώ βρίσκεται στον αέρα αποτελείται από υψηλά επίπεδα ευρυζωνικής ενέργειας δόνησης που υπάρχει στη θεμελιώδη ταχύτητα του ρότορα (περίπου 330 Hz σε κατάσταση αιώρησης χρησιμοποιώντας έναν κινητήρα 1800 KV που λειτουργεί στα 14,8 V με έλικες 5 ιντσών) και τις σχετικές αρμονικές της. Αυτές οι δονήσεις προστίθενται στη δομική συντονισμένη δόνηση χαμηλής συχνότητας του πλαισίου που προκαλείται από ατμοσφαιρικές αναταράξεις και αεροδυναμική μεταξύ της ροής του κινητήρα και των δομικών στοιχείων του πλαισίου. Εάν αυτές οι δονήσεις μεταφέρονταν απευθείας στη μονάδα κάμερας, θα είχαν ως αποτέλεσμα θόλωση των καταγεγραμμένων εικόνων και υποβάθμιση της ποιότητας της ανίχνευσης προσώπου. Στο πρωτότυπο που παρουσιάζεται σε αυτό το άρθρο, το Raspberry Pi 5 και η μονάδα κάμερας έχουν αποσυνδεθεί μηχανικά από το κύριο δομικό στοιχείο του πλαισίου μέσω ενός συνδυασμού αποστατών από νάιλον (αυτοί επιτρέπουν κάποια

ευελιξία στον κατακόρυφο άξονα κάθετο προς το δομικό επίπεδο του πλαισίου) και αποσβεστήρων από σιλικόνη που βρίσκονται μέσα σε κάθε οπή των βραχιόνων στήριξης. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου απόσβεσης κραδασμών έχει αποδειχθεί μέσω της σύγκρισης των μέσων ρυθμών επεξεργασίας ανίχνευσης προσώπου ανά δευτερόλεπτο και της σταθερότητας του πλαισίου οριοθέτησης που μετρήθηκε σε βίντεο που καταγράφηκε τόσο υπό συνθήκες απόσβεσης όσο και χωρίς απόσβεση. Η απόσβεση είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της διακύμανσης του πλαισίου οριοθέτησης (η τυπική απόκλιση του πλάτους του πλαισίου οριοθέτησης που ανιχνεύθηκε με την πάροδο του χρόνου για ένα ακίνητο πρόσωπο) κατά περίπου 40%.

Η μονάδα Pi Camera V2 είναι τοποθετημένη σε ένα ειδικά κατασκευασμένο βραχίονα που κατασκευάστηκε με μεθόδους προσθετικής κατασκευής. Αυτός ο βραχίονας τοποθετεί τον φακό της κάμερας έτσι ώστε να είναι στο ίδιο επίπεδο με την εμπρόσθια επιφάνεια της πλάκας στήριξης του Raspberry Pi 5. Επιπλέον, ο φακός είναι τοποθετημένος σε γωνία κλίσης 45 μοιρών κάτω από την οριζόντια, ώστε να παρέχει καλή εμπρόσθια όραση του εδάφους κάτω από το τετρακόπτερο σε τυπικά ύψη λειτουργίας που κυμαίνονται από ένα έως τρία μέτρα. Το καλώδιο κορδέλα που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση της μονάδας κάμερας με το Raspberry Pi 5 δρομολογείται κατά μήκος μιας καμπύλης διαδρομής για να αντισταθμίσει την κίνηση μεταξύ του βραχίονα της κάμερας και του PCB του Raspberry Pi 5 που προκύπτει από τη χρήση εύκαμπτων στηριγμάτων. Η καλωδιωταινία συγκρατείται στη θέση του σε τρία σημεία χρησιμοποιώντας αυτοκόλλητα κλιπ καλωδίων για να αποφευχθεί η επαφή είτε με τους αγωγούς φάσης των κινητήρων είτε με τις περιστρεφόμενες έλικες κατά τη λειτουργία.

Όλα τα εξειδικευμένα εξαρτήματα κατασκευάστηκαν με τη χρήση τεχνικών προσθετικής κατασκευής με υλικό PETG και πυκνότητα γεμίσματος 40% σε μορφή γυροειδούς. Αυτό παρέχει έναν κατάλληλο συμβιβασμό μεταξύ αποδεκτών ιδιοτήτων αντοχής σε περίπτωση αναγκαστικής προσγείωσης (μεγαλύτερες από αυτές που εμφανίζονται κατά τη χρήση PLA) και κατασκευαστικής ευκολίας (μεγαλύτερη από αυτή που εμφανίζεται κατά τη χρήση ABS).

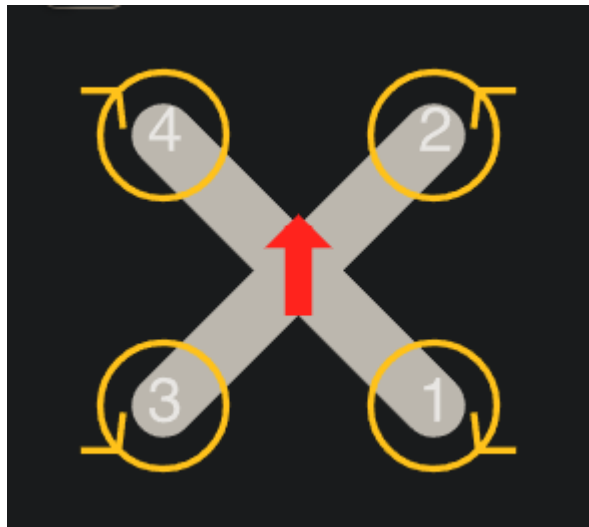
4.2 Εγκατάσταση των Μοτέρ

Κάθε ένας από τους κινητήρες χωρίς ψήκτρες είναι τοποθετημένος κάτω από τον αντίστοιχο βραχίονά του χρησιμοποιώντας τέσσερις βίδες από ανοξείδωτο χάλυβα M3 × 6 mm. Αυτές στερεώνονται χρησιμοποιώντας Loctite 243 ή άλλη κόλλα ασφάλισης σπειρωμάτων. Η τοποθέτηση των κινητήρων απαιτεί ένα πλέγμα 16 mm × 16 mm, το οποίο συμπίπτει με ακρίβεια με τα σημεία τοποθέτησης που δημιουργούνται στους βραχίονες του drone. Η σωστή τοποθέτηση είναι απαραίτητη όχι μόνο από την άποψη της δομικής σταθερότητας του drone, αλλά και από την άποψη της γενικής σταθερότητας πτήσης του, καθώς οι χαλαροί κινητήρες μπορούν να οδηγήσουν σε κραδασμούς και κακή απόδοση.

Ο φακός της κάμερας έχει σχεδιαστεί για σταθερή εστίαση. Δηλαδή, έχει ρυθμιστεί στο άπειρο από προεπιλογή. Συνεπώς, η βέλτιστη χρήση της κάμερας είναι δυνατή σε απόσταση περίπου δύο έως δέκα μέτρων. Για τους σκοπούς της παρατήρησης αντικειμένων εν πτήση ή πλοήγησης, δεν θα απαιτηθούν προσαρμογές, καθώς η κάμερα θα καταγράφει εικόνες επαρκώς εντός αυτού του εύρους απόστασης. Ωστόσο, εάν υπάρχει ανάγκη για λήψη εικόνας σε μικρότερες αποστάσεις, για παράδειγμα, λιγότερο από ένα μέτρο, αναμένεται κάποια απώλεια στην ποιότητα.

Ενώ είναι πράγματι εφικτό να τροποποιήσετε χειροκίνητα το περίβλημα του φακού, ώστε να βελτιώσετε την ευκρίνεια της εικόνας κατά τη βιντεοσκόπηση κοντινών αντικειμένων, αυτό θα οδηγήσει σε ακύρωση της εγγύησης. Ως εκ τούτου, οποιαδήποτε τροποποίηση του φακού πρέπει να προσεγγίζεται προσεκτικά, ώστε να αποφεύγονται τυχόν προβλήματα και να γίνεται μόνο εάν είναι απολύτως απαραίτητο από λειτουργικής άποψης. Επιπλέον, θα πρέπει να είστε προσεκτικοί σχετικά με τη γωνία τοποθέτησης της κάμερας, καθώς οι κραδασμοί θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά τις εικόνες που καταγράφονται από αυτήν.

Επιπλέον, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η κάμερα να τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην εμποδίζεται το οπτικό της πεδίο. Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα πλαίσια, το σύστημα προσγείωσης, τα καλώδια, η τοποθέτηση του Raspberry Pi και άλλοι παράγοντες κατά την εγκατάσταση της κάμερας. Η σωστή τοποθέτηση εξασφαλίζει καλύτερη επίγνωση της κατάστασης, ενεργοποιεί το λογισμικό όρασης υπολογιστή και προσθέτει στη λειτουργικότητα του drone γενικότερα.



Σχήμα 4.1: Drones motor εγκατασταση και περιστροφή[43]

4.3 Εγκατάσταση Flight Controller Stack

Η στοίβα του ελεγκτή πτήσης είναι μια ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου του drone, η οποία εγκαθίσταται στο μεσαίο τμήμα του πλαισίου Titan XL5 χρησιμοποιώντας το τυπικό μοτίβο οπών στερέωσης 30,5 mm × 30,5 mm M3. Ο ελεγκτής πτήσης Sologood F722 είναι τοποθετημένος πάνω από την πλακέτα ESC σε διαμόρφωση στοίβας, η οποία είναι μια τυπική πρακτική για ισχυρά drones πολλαπλών ρότορων. Ένας τέτοιος σχεδιασμός όχι μόνο εξοικονομεί καλωδίωση, αλλά επιτρέπει σε κάποιον να συγκεντρώσει όλα τα ηλεκτρονικά σε ένα μπλοκ, προκειμένου να διατηρήσει το κέντρο βάρους κοντά στο γεωμετρικό κέντρο του πλαισίου.

Οι αντικραδασμικές ροδέλες ή οι δακτύλιοι στερέωσης εγκαθίστανται πρώτα στις οπές στερέωσης του πλαισίου πριν από την εγκατάσταση των στηριγμάτων. Αυτός ο σχεδιασμός απομονώνει τον ελεγκτή πτήσης από τη δομή του πλαισίου από ανθρακονήματα, ελαχιστοποιώντας τη μεταφορά των κραδασμών που παράγονται από κινητήρες και έλικες. Καθώς η IMU του ελεγκτή πτήσης είναι πολύ ευαίσθητη στους κραδασμούς, είναι απαραίτητο να μονωθεί από τις επιπτώσεις των κραδασμών για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των γυροσκοπίων και, επομένως, η σωστή λειτουργία του βρόχου ελέγχου. Διαφορετικά, ακόμη και μια μικρή ταλάντωση μπορεί να παραμορφώσει τον υπολογισμό της στάσης και να οδηγήσει σε απρόβλεπτη κίνηση του αεροσκάφους.

Η πλακέτα ESC τοποθετείται στο κάτω μέρος της στοίβας χρησιμοποιώντας βάσεις πλαισίου, μετά τις οποίες ο ελεγκτής πτήσης τοποθετείται από πάνω της χρησιμοποιώντας βάσεις από νάιλον ή αλουμίνιο 7-8 mm. Η σύνδεση μεταξύ των δύο πλακετών γίνεται είτε μέσω ενός καλωδίου ταινίας είτε μέσω ενός συνδέσμου JST που είναι ήδη τοποθετημένος σε αυτές. Ο σωστός προσανατολισμός των δύο πλακετών είναι σημαντικός. Το βέλος που είναι τυπωμένο στον ελεγκτή πτήσης πρέπει να

είναι προσανατολισμένο προς το μπροστινό μέρος του drone, συνήθως προς την μπροστινή πλευρά της κάμερας στο πλαίσιο, για να διασφαλιστεί ο σωστός προσανατολισμός του υλικολογισμικού που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του drone.

Η μη σωστή τοποθέτηση της πλακέτας μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη ερμηνεία των αξόνων από το ενσωματωμένο υλικολογισμικό, προκαλώντας προβλήματα όπως κακή σταθεροποίηση ή κακή αντιστάθμιση κίνησης. Επομένως, είναι απαραίτητο να εκτελέσετε έναν οπτικό έλεγχο για να επαληθεύσετε τη σωστή τοποθέτηση της πλακέτας, τη σωστή ευθυγράμμιση των συνδετήρων και τις συνδέσεις των καλωδίων. Μόλις αυτό γίνει με επιτυχία, η τοποθέτηση της στοίβας ελεγκτών πτήσης διασφαλίζει τη σωστή σταθεροποίηση του αεροσκάφους.



Σχήμα 4.2: Γυροσκόπιο Drone απο το betafight[42]

4.4 Διανομή Ρεύματος και Βάση Μπαταρίας

Το σύστημα διανομής ισχύος του Titan XL5 είναι ενσωματωμένο απευθείας στην πλακέτα ESC 4 σε 1. Αυτή η πλακέτα παρέχει μεγάλα μαξιλαράκια συγκόλλησης στα οποία συνδέονται οι θετικοί και αρνητικοί ακροδέκτες του καλωδίου της μπαταρίας. Το κύριο καλώδιο της μπαταρίας συνδέει τη θηλυκή υποδοχή μπαταρίας XT60 του drone με την είσοδο τροφοδοσίας ESC, επιτρέποντας την αποτελεσματική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και στα τέσσερα κανάλια του κινητήρα και στα ηλεκτρονικά του οχήματος. Επειδή το σύστημα πρόωσης μπορεί να αντλεί σημαντικό ρεύμα κατά την απογείωση, την επιτάχυνση και τις γρήγορες αλλαγές γκαζιού, είναι απαραίτητη μια στιβαρή και χαμηλής αντίστασης διαδρομή ισχύος.

Συνιστάται ένα καλώδιο σιλικόνης υψηλού διαμετρήματος, συνήθως 16-18 AWG, για το κύριο καλώδιο της μπαταρίας. Η μόνωση σιλικόνης προτιμάται επειδή παραμένει εύκαμπτη, ανθεκτική στη θερμότητα και εύκολη στη δρομολόγηση μέσα στο πλαίσιο, ακόμη και σε συμπαγείς εγκαταστάσεις. Η επιλογή διαμέτρου καλωδίου είναι ιδιαίτερα σημαντική επειδή οι αγωγοί μικρού μεγέθους μπορούν

να προκαλέσουν υπερβολική αντίσταση, πτώση τάσης και τοπική θέρμανση. Αυτά τα ζητήματα όχι μόνο μειώνουν την ηλεκτρική απόδοση, αλλά μπορούν επίσης να μειώσουν τη διάρκεια ζωής της καλωδίωσης και των σχετικών συνδέσεων.

Ένας ή δύο ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές με χωρητικότητα έως 1000 μF και ονομαστικές τιμές έως 35 βολτ μπορούν να προστεθούν κοντά στα μαξιλαράκια της μπαταρίας ESC. Αυτοί οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται κοντά στην είσοδο τροφοδοσίας για να φιλτράρουν τις διακυμάνσεις τάσης που προκύπτουν από τις γρήγορες αλλαγές στην ταχύτητα των κινητήρων. Το φίλτράρισμα των τάσεων μπορεί να βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση του ηλεκτρικού θορύβου και να παρέχει προστασία σε άλλα ευαίσθητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Τα drones υψηλής απόδοσης απαιτούν σωστή τοποθέτηση των πυκνωτών, καθώς οι απότομες ρυθμίσεις του γκαζιού μπορεί να οδηγήσουν σε ηλεκτρικές καταπονήσεις.

Η μπαταρία θα στερεωθεί στην κάτω πλευρά του αεροσκάφους χρησιμοποιώντας ταινίες διπλής όψης. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει την γρήγορη τοποθέτηση διαφόρων μπαταριών διαφορετικών διαστάσεων χωρίς τη χρήση συνδετήρων. Η σωστή τοποθέτηση των μπαταριών είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή προβλημάτων όπως η μετατόπιση του κέντρου βάρους του drone και η δημιουργία κινδύνων ασφαλείας. Επιπλέον, οι κραδασμοί που προκαλούνται από την κίνηση της μπαταρίας μπορούν να προκαλέσουν περαιτέρω ζημιές.

4.5 Ενσωμάτωση του Raspberry Pi 5

Η ενσωμάτωση του Raspberry Pi 5 στο σώμα του drone είναι ίσως μια από τις πιο περίπλοκες μηχανικές εργασίες ολόκληρου του συστήματος λόγω του σημαντικού μεγέθους των 85 x 56 mm. Αυτό το μέγεθος είναι μεγαλύτερο από τη χωρητικότητα του εσωτερικού πολλών σωμάτων drone 5 ιντσών. Επομένως, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην τοποθέτηση του Raspberry Pi σε μια κατάλληλη θέση ή σε μια ειδικά σχεδιασμένη βάση στήριξης. Σε αυτήν τη συγκεκριμένη περίπτωση, το Raspberry Pi μπορεί να τοποθετηθεί στο πάνω μέρος του πλαισίου χρησιμοποιώντας είτε ειδικά σχεδιασμένες τρισδιάστατα εκτυπωμένες βάσεις είτε ένα περίβλημα αλουμινίου με κολλητική ταινία.

Το Raspberry Pi 5 στερεώνεται στο μεταλλικό του περίβλημα μέσω βιδών μεγέθους M2.5, που εφαρμόζουν στις τυπικές οπές στήριξης 58 x 49 mm με απόσταση 2,5 mm. Η επιλεγμένη διαμόρφωση επιτρέπει όχι μόνο αξιόπιστη σύνδεση αλλά και εύκολη αφαίρεση εάν απαιτείται για εργασίες συντήρησης ή ανάπτυξης. Λόγω του γεγονότος ότι το Raspberry Pi δεν χρησιμεύει ως βασικό στοιχείο του συστήματος ελέγχου πτήσης, αλλά είναι μάλλον ένας συμπληρωματικός υπολογιστής, η τοποθεσία θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την επίδραση της προστιθέμενης μάζας στη θέση του κέντρου βάρους ολόκληρης της κατασκευής.

Η μάζα του Raspberry Pi 5, περίπου 51 g, αποτελεί σημαντικό παράγοντα, λαμβάνοντας υπόψη το μικρό μέγεθος του drone. Επομένως, όσο πιο μακριά από το κέντρο βρίσκεται η συσκευή, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μετατόπιση του κέντρου βάρους. Ως αποτέλεσμα, ο ελεγκτής πτήσης θα πρέπει να καταβάλει πρόσθετη προσπάθεια για να αντισταθμίσει την απόκλιση, μειώνοντας την απόδοση του drone. Επομένως, συνιστάται η τοποθέτηση του υπολογιστή σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από 30 mm από το κέντρο της πλατφόρμας.

Το σύστημα θερμικής διαχείρισης χρησιμοποιεί τη ροή αέρα που παρέχεται από τις έλικες κατά την πτήση. Ενώ βρίσκεται στις λειτουργίες αιώρησης και πτήσης, ο αέρας που ρέει προς τα κάτω είναι συνήθως επαρκής για να ψύξει το Raspberry Pi 5, αλλά σε περίπτωση που οι δοκιμές εδάφους απαιτούν μεγάλη διάρκεια και δεν υπάρχει αρκετή ροή αέρα για να διαχέει οποιαδήποτε θερμότητα, τότε προκύπτει το πρόβλημα του θερμικού στραγγαλισμού. Για να αποφευχθεί αυτό, παρέχεται μια

μικρή ψύκτρα στο BCM2712 SoC. Έτσι, το Raspberry Pi 5 γίνεται μια αποτελεσματική ενσωματωμένη υπολογιστική μονάδα κατάλληλη για σκοπούς όρασης και επικοινωνίας.

4.6 Εγκατάσταση Κάμερας

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι κατά την εγκατάσταση της κάμερας θα πρέπει να δοθεί προσοχή τόσο στη φυσική θέση της κάμερας όσο και στις παραμέτρους δρομολόγησης των καλωδίων. Όσον αφορά τη δρομολόγηση των καλωδίων, το καλώδιο που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση της κάμερας με το Raspberry Pi θα πρέπει να είναι επίπεδο εύκαμπτο καλώδιο (FFC). Το καλώδιο πρέπει να τοποθετείται έτσι ώστε να μην υπάρχει καμία κίνηση και επίσης να προστατεύεται από ζημιές από κινούμενα μέρη. Αυτό μπορεί να σημαίνει μόνο ότι το καλώδιο πρέπει να προστατεύεται καλά από έλικες, καθώς οποιαδήποτε επαφή μεταξύ αυτών των δύο μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφική βλάβη.

Αυτή η κάμερα διαθέτει φακό σταθερής εστίασης. Η εργοστασιακή προεπιλογή της είναι ρυθμισμένη στο άπειρο, πράγμα που σημαίνει ότι αυτή η κάμερα μπορεί να αποδώσει άριστα όταν προσπαθείτε να παρατηρήσετε οτιδήποτε σε μεσαίες έως μεγάλες αποστάσεις. Συγκεκριμένα, η κάμερα έχει βέλτιστη εμβέλεια παρατήρησης από δύο έως δέκα μέτρα για οποιεσδήποτε εργασίες εναέριας παρατήρησης και πλοήγησης που μπορεί να έχετε. Εάν ο σκοπός σας δεν είναι να τραβήξετε εικόνες σε απόσταση μικρότερη από ένα μέτρο, τότε ενδέχεται να αντιμετωπίσετε ελαφρώς χαμηλότερη ποιότητα εικόνας.

Μπορεί να είναι τεχνικά δυνατή η φυσική τροποποίηση του ίδιου του φακού της κάμερας, αλλά αυτό θα μπορούσε να τον κάνει να υπόκειται σε ακύρωση της εγγύησης. Σε αυτήν την περίπτωση, η τροποποίηση της κάμερας θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά και να δικαιολογείται μόνο από τις λειτουργικές απαιτήσεις που απαιτούν την τροποποίηση. Επιπλέον, είναι σημαντικό να τοποθετηθεί η κάμερα σε μια θέση στην οποία η γωνία θέασης διατηρείται σταθερή, ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν θα επηρεάζεται από κραδασμούς η κάμερα και, κατά συνέπεια, η ποιότητα της εικόνας της.

Όσον αφορά την τοποθέτηση της κάμερας, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η θέση τοποθέτησης θα πρέπει να επιτρέπει πλήρη μετωπική θέαση χωρίς παρεμβολές από μέρη του πλαισίου, συστήματα προσγείωσης, καλώδια, ακόμη και από έναν υπολογιστή Raspberry Pi. Αυτό θα κάνει την πλατφόρμα πιο λειτουργική, επειδή μια σωστά εγκατεστημένη κάμερα εξασφαλίζει καλύτερη επίγνωση της κατάστασης.

4.7 Ανάλυση Βάρους

Μια πλήρης ανάλυση βάρους για ολόκληρο το σύστημα παρέχεται παρακάτω στον πίνακα 4.1. Το βάρος είναι κρίσιμο, καθώς καθορίζει τόσο τις αναλογίες ώσης προς βάρος και τις επιδόσεις πτήσης όσο και την αντοχή. Για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα και ο έλεγχος κατά τη διάρκεια της πτήσης, είναι απαραίτητο οι αναλογίες ώσης προς βάρος να διατηρούνται σε 2:1 ή υψηλότερα. Ωστόσο, προτιμάται να είναι τουλάχιστον 3:1 ή υψηλότερες για εφαρμογές υψηλής απόδοσης/αεροβατικών/ταχείας απόκρισης.

Component	Weight
iFlight Titan XL5 frame	~95 g
iFlight XING motors (x4)	~128 g
Propellers (x4 + spares)	~30 g

Sologood F722 stack	~35 g
Raspberry Pi 5 (16 GB)	~51 g
Raspberry Pi Camera V2	~3 g
Wiring, connectors, capacitors	~25 g
Mounting hardware, grommets	~15 g
3D-printed brackets	~10 g
FPV camera (optional)	~10 g
Tattu R-Line 1550mAh 4S	~155 g
TOTAL (estimated AUW)	~557 g

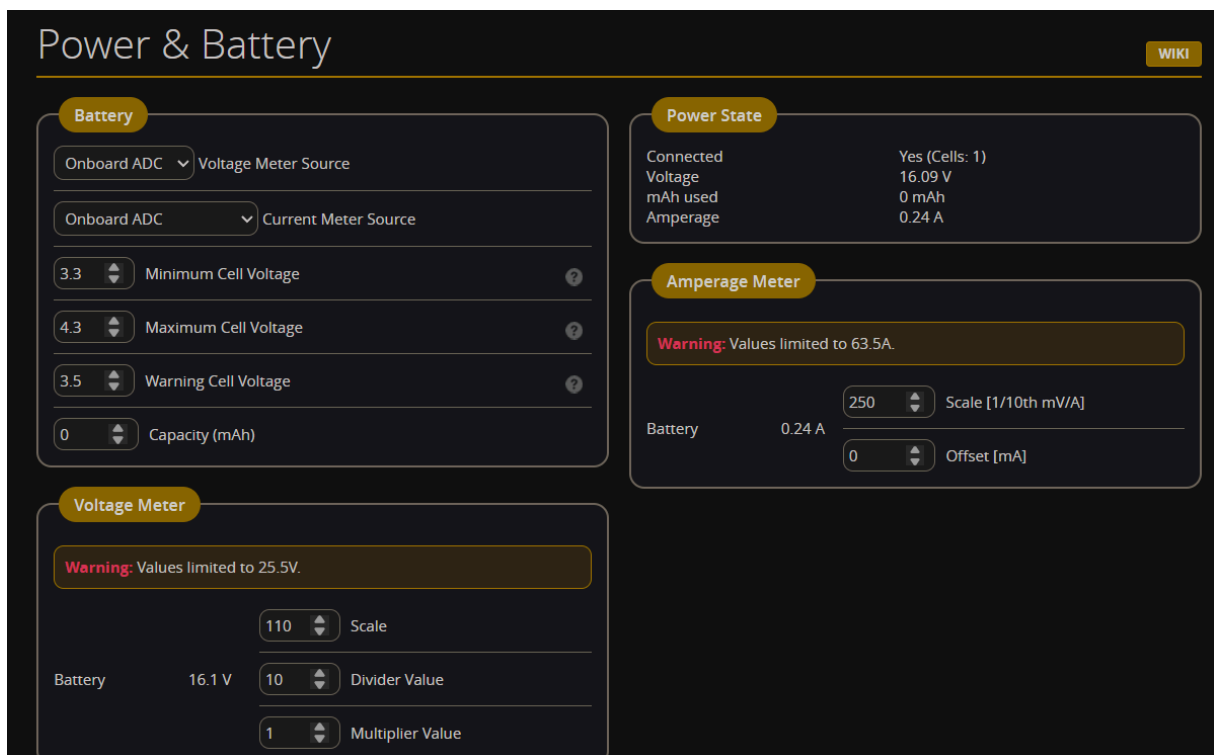
Πίνακας 4.1: Εκτιμώμενη κατανομή βάρους του πλήρους συγκροτήματος του drone.

Κεφάλαιο 5ο: Ηλεκτρολογικό Σύστημα

5.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος Ρεύματος

Σκοπός είναι η σχεδίαση της ηλεκτρικής διάταξης αυτού του τετρακόπτερου έτσι ώστε να τροφοδοτείται το σύνολο του συστήματος από μία μόνο μπαταρία LiPo 4S (ονομαστική τάση 14,8 V, τάση φόρτισης 16,8 V). Το PWD έχει δομή παράλληλου διαύλου. Και τα τέσσερα ESC, τα κυκλώματα εξόδου 5V BEC του FC Stack και τα κυκλώματα τηλεμετρίας/δέκτη συνδέονται παράλληλα στους ακροδέκτες + και - της μπαταρίας χρησιμοποιώντας την Κύρια Πλακέτα Διανομής Ισχύος (PDB) ως μέρος του Sologood F722 ESC.

Με βάση την εξαιρετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, τον πολύ υψηλό ρυθμό συνεχούς εκφόρτισης και την εξαιρετικά χαμηλή τιμή IR, επέλεξα την μπαταρία LiPo Tattu R-Line 1550 mAh 4S 120C για τη χρήση μου. Η μπαταρία έχει ονομαστική συνεχή εκφόρτιση στα θεωρητικά 186A ($1,55 \text{ AH} \times 120 \text{ C} = 186 \text{ A}$), η οποία είναι πολύ υψηλότερη από αυτή που απαιτεί το συγκεκριμένο σύστημα (περίπου 60-80A κατά τη λειτουργία και των 4 κινητήρων σε συνθήκες πλήρους γκαζιού). Πρέπει να σημειωθεί ότι η σημασία της ύπαρξης τόσο υψηλού C-Rating οφείλεται στην εξαιρετικά χαμηλή εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας: Μια τιμή IR που είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή άλλων μπαταριών θα έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη πτώση τάσης όταν υποβάλλεται σε αιχμή ζήτησης ρεύματος, με αποτέλεσμα να παρέχεται πιο σταθερή τάση στους ESC και στον ελεγκτή πτήσης κατά την εκτέλεση επιθετικών ελιγμών.



Σχήμα 5.1: Μπαταρία από την εφαρμογή betaflight [43]

Χρησιμοποιώντας τόσο μετρήσεις όσο και υπολογισμούς, έχω καθορίσει τον προϋπολογισμό ισχύος για αυτό το σύστημα. Με βάση μετρήσεις που έγιναν με τους τέσσερις κινητήρες iFlight XING 2207 [7] (οι οποίοι οδηγούν 5" Bi-Blades σε Hover Throttle [περίπου 40-50% του Max]) στα περίπου 8-10 A ο καθένας. Επομένως, σε επίπεδα γκαζιού αιώρησης, το συνολικό ρεύμα κινητήρα θα είναι 32-40A και η συνολική ισχύς που καταναλώνουν οι κινητήρες θα είναι 474-592 W στην ονομαστική τάση μπαταρίας των 14,8 βολτ. Με αυτό το επίπεδο χρήσης, η μπαταρία 1550 mAh (22,94 WH) θα

μπορούσε να παρέχει περίπου 2,3-2,9 λεπτά αντοχής αιώρησης. Επιπλέον, αυτό συνάδει με την αναμενόμενη διάρκεια πτήσης μεικτού γκαζιού 3-4 λεπτών που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Τέλος, η προσθήκη του υποσυστήματος όρασης Raspberry Pi 5 θα προσθέσει περίπου 0,27-0,34 A @ 14,8 V (περίπου 4-5 W) στον προϋπολογισμό ισχύος, κάτι που θα μειώσει την αναμενόμενη διάρκεια πτήσης κατά περίπου 5-8%.

Η τροφοδοσία 5 V για το Raspberry Pi 5 παρέχεται από το ενσωματωμένο BEC (κύκλωμα εξάλειψης μπαταρίας) στο Sologood F722 ESC Stack. Οι προδιαγραφές απαιτούν το BEC να παρέχει έως 3 A @ 5V (15W ρυθμιζόμενη ισχύ), κάτι που είναι επαρκές για το κανονικό εύρος λειτουργίας περίπου 3-5 W για το Raspberry Pi 5. Η έξοδος BEC συνδέεται με την είσοδο τροφοδοσίας USB-C του Raspberry Pi 5 μέσω ενός κοντού θωρακισμένου καλωδίου. Ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής 100 uF τοποθετείται παράλληλα με την έξοδο BEC, κοντά στην είσοδο τροφοδοσίας του Raspberry Pi 5. Ο σκοπός αυτού του πυκνωτή είναι να μειώσει τις διακυμάνσεις τάσης που δημιουργούνται από την εναλλαγή PWM στο κύκλωμα BEC και να αποτρέψει τις παροδικές αιχμές τάσης από το να επηρεάσουν το IC διαχείρισης ισχύος του Raspberry Pi 5.

Ο σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής διανομής ισχύος του drone iFlight Titan XL5, που χρησιμοποιεί ένα σετ Sologood F722, βασίζεται σε μια κεντρική διάταξη PDB. Όλες οι διαδρομές υψηλού ρεύματος (Battery + προς κάθε ESC, Battery - πίσω προς την μπαταρία) θα διοχετεύονται μέσω του PDB (πλακέτα διανομής ισχύος) που είναι ενσωματωμένο στην πλακέτα του ESC. Η χρήση αυτού του τύπου διαμόρφωσης θα βοηθήσει στον περιορισμό του αριθμού των συγκολλήσεων που απαιτούνται για τις διαδρομές υψηλού ρεύματος (με κάθε σύνδεση να αποτελεί πιθανό αδύναμο σημείο και/ή αιτία αντίστασης που παράγει θερμότητα). Θα επιτρέψει επίσης την τοποθέτηση του αγωγού με τη μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ρεύματος στην περιοχή της κατασκευής όπου μπορεί να ψυχθεί καλύτερα. Το μέγιστο σταθερό ρεύμα που μπορεί να περάσει μέσω των κύριων καλωδίων εισόδου ισχύος (ο σύνδεσμος XT60 από/προς την μπαταρία προς την πλακέτα ESC) είναι περίπου 60 A κατά την αιώρηση και έως 140 A για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα σε πλήρη ισχύ. Προκειμένου να επιτρέψουμε επαρκείς συνδέσεις χαμηλής αντίστασης και ασφαλείς αυξήσεις θερμοκρασίας κατά τη χρήση του καλωδίου με μόνωση σιλικόνης 12 AWG για τις κύριες συνδέσεις τροφοδοσίας, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε μήκος καλωδίου περίπου 5 mΩ/100 mm. Ο σύνδεσμος XT60H που βρίσκεται στον ακροδέκτη της μπαταρίας έχει ονομαστική τιμή ρεύματος 60 A και μέγιστη τιμή 120 A. Επειδή αυτό είναι ελαφρώς μικρότερο από τη μέγιστη ροή ρεύματος αιχμής μας, θα πρέπει να γίνουν αναβαθμίσεις σε έναν συνδετήρα XT90 (ονομαστική ροή σταθερού ρεύματος = 90A, ονομαστική ροή ρεύματος αιχμής = 120A) για πρόσθετο συντελεστή ασφάλειας υπό ακραίες συνθήκες γκαζιού.

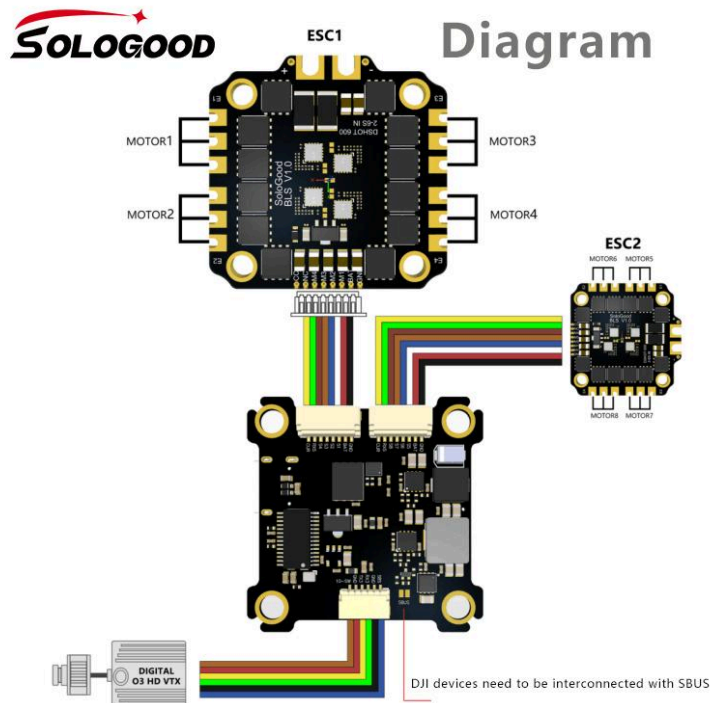
Για να διασφαλιστεί ότι οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) δεν επηρεάζουν τη λειτουργία του drone, στο σχεδιασμό συμπεριλήφθηκε θωράκιση EMI. Υπάρχουν δύο κύρια σημεία ανησυχίας σχετικά με τις EMI. Πρώτον, υπάρχουν ακτινοβολούμενες EMI που παράγονται από τις μεταβατικές καταστάσεις μεταγωγής του ESC (που συνήθως εμφανίζονται στη συχνότητα μεταγωγής PWM του ESC (δηλ. 24-48 kHz) και στις αρμονικές συχνότητες τους). Εάν αυτές οι μεταβατικές τάσεις συζευχθούν με τον αισθητήρα IMU της πλακέτας ελέγχου πτήσης, μπορούν να προκαλέσουν υποβαθμισμένες μετρήσεις για τα γυροσκόπια. Δεύτερον, υπάρχει αγωγή ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή που παράγεται από την έξοδο BEC (ένας ρυθμιστής μεταγωγής που λειτουργεί στα περίπου 500 kHz) η οποία συζεύγεται με την είσοδο τροφοδοσίας του Raspberry Pi 5 και ενδεχομένως προκαλεί αστάθεια στο IC διαχείρισης ισχύος (PMIC) του PI. Και οι δύο αυτοί τύποι ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής μετριάζονται με την ενσωμάτωση εξαρτημάτων στο σχεδιασμό. Όσον αφορά την ακτινοβολούμενη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, δεδομένου ότι τόσο οι πλακέτες ESC όσο και οι πλακέτες ελεγκτή πτήσης βρίσκονται σε φυσική εγγύτητα (ελαχιστοποιώντας έτσι την περιοχή βρόχου του ρεύματος μεταγωγής υψηλής συχνότητας), είναι απίθανο να συζευχθούν σημαντικές ποσότητες ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής στους αισθητήρες IMU. Επιπλέον, οι κεραμικοί πυκνωτές αποσύνδεσης 100nF στις ράγες εισόδου ισχύος του ESC παρέχουν ένα μέσο για

την καταστολή των αιχμών τάσης υψηλής συχνότητας πριν αυτές διαδοθούν κατά μήκος των διαδρομών τροφοδοσίας. Όσον αφορά τις αγώγιμες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI), ο πυκνωτής χύδην 100uF στην είσοδο τροφοδοσίας του Raspberry Pi 5 παρέχει παρόμοιες λειτουργίες καταστολής και απομόνωσης για την έξοδο BEC. Ο τελικός τρόπος αντιμετώπισης αυτού του ζητήματος είναι η δρομολόγηση της εξόδου BEC μακριά από την κεραία του δέκτη RC που λειτουργεί στην ίδια περιοχή συχνοτήτων (2,4 GHz) με τη διεπαφή Wi-Fi για ροή βίντεο.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για την ελαχιστοποίηση της καλωδίωσης σημάτων στα σχέδια. Μία μέθοδος είναι η αξιοποίηση προϋπάρχουσας καλωδίωσης, όπως το καλώδιο κορδέλα μεταξύ κάθε ESC και ελεγκτή πτήσης που παρέχεται στο Sologood F722 stack. Ο δέκτης ELRS ή Crossfire συνδέεται επί του παρόντος μέσω UART σε μια περιφερειακή συσκευή που είναι τοποθετημένη έξω από το stack, οπότε είναι ένα από τα λίγα εξωτερικά καλώδια που συνδέουν μια περιφερειακή συσκευή είτε με τον ελεγκτή πτήσης είτε με ένα ξεχωριστό module. Δεδομένου ότι το καλώδιο κορδέλα CSI που συνδέει τις κάμερες βρίσκεται εξ ολοκλήρου εντός του οικοσυστήματος καταγραφής και επεξεργασίας βίντεο που βασίζεται στο Raspberry Pi 5, είναι δυνατό να κρατηθεί μακριά από τα καλώδια φάσης των κινητήρων (για την αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών) καθώς δρομολογείται σε όλη την κατασκευή.

5.2 Διάγραμμα Συνδεσιμότητας και Καλωδίωση

Η κύρια καλωδίωση τροφοδοσίας περιλαμβάνει δύο καλώδια που συνδέουν τον συνδετήρα XT60 της μπαταρίας με τους ακροδέκτες μπαταρίας του ESC: ένα κόκκινο καλώδιο 16 AWG (θετικό) και ένα μαύρο καλώδιο 16 AWG (αρνητικό). Είναι επιθυμητό να διατηρηθεί όλη αυτή η καλωδίωση όσο το δυνατόν πιο σύντομη, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τόσο η αντίσταση όσο και η επαγωγή.



Σχήμα 5.2: Schematic of official SoloGood diagram of ESC.[41]

Μια συστοιχία πυκνωτών που αποτελείται από δύο ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές 1000 uF @ 35 V σε παράλληλη σύνδεση είναι τοποθετημένη απευθείας στα σημεία σύνδεσης μπαταρίας του ESC

χρησιμοποιώντας πολύ μικρά μήκη καλωδίων, ώστε να εξασφαλιστεί η χαμηλότερη δυνατή ESR στις εισόδους του ESC.

Οι διαδρομές σήματος μεταξύ του ελεγκτή πτήσης και κάθε ενός από τα ESC περιέχονται εντός του συνδετήρα στοίβας. Επομένως, δεν θα χρειαστεί να προστεθεί επιπλέον καλωδίωση σήματος για τα σήματα κινητήρα/ESC. Οι πρόσθετες συνδέσεις περιλαμβάνουν την καλωδίωση σήματος ραδιοελέγχου σε μία από τις θύρες UART ή σειριακές θύρες του ελεγκτή πτήσης και το καλώδιο τροφοδοσίας USB-C από το BEC στο Raspberry Pi 5. Για την υλοποίηση μιας σύνδεσης τηλεμετρίας τάσης (ώστε να σταλεί η τάση της μπαταρίας πίσω στο Betaflight), τότε ένας διαιρέτης τάσης μπορεί να συνδέσει τη θετική ακροδέκτη της μπαταρίας με μια είσοδο ADC στον ελεγκτή πτήσης.

5.3 Ανάλυση Αναγκών Ενέργειας

Προκειμένου να εκτιμήσουμε τη συνολική ποσότητα ρεύματος που καταναλώνουν όλα τα εξαρτήματα του drone, πρέπει να κάνουμε μια ανάλυση ισοζυγίου ισχύος. Αυτός ο τύπος ανάλυσης θα μας επιτρέψει να υπολογίσουμε πόσο αναμένεται να διαρκέσει η πτήση μας. Όπως φαίνεται παραπάνω, εκτός από το ότι οι κινητήρες είναι οι μεγαλύτεροι καταναλωτές ρεύματος, αντλούν επίσης το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματός τους όταν λειτουργούν σε αιώρηση. Σε αιώρηση, κάθε κινητήρας XING 2207 καταναλώνει περίπου 5-8 αμπέρ στα 14,8 βολτ. Έτσι, σε αιώρηση, τέσσερις κινητήρες θα καταναλώναν περίπου 20-32 αμπέρ. Από την άλλη πλευρά, το Raspberry Pi 5 καταναλώνει περίπου 1-1,6 αμπέρ στα 5 βολτ μέσω του BEC. Ωστόσο, αν ληφθεί υπόψη τις απώλειες που σχετίζονται με το BEC (το BEC χάνει μέρος της ισχύος εξόδου του λόγω αναποτελεσματικότητας), τότε θα ήταν δυνατό να εκφραστεί η κατανάλωση ισχύος του Raspberry Pi 5 σε αμπέρ που καταναλώνονται στην τάση της μπαταρίας.

Όσον αφορά τα αμπέρ που καταναλώνονται στην τάση της μπαταρίας, μπορεί να ειπωθεί ότι το Raspberry Pi 5 καταναλώνει περίπου 0,4-0,7 αμπέρ. Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει μια σύνοψη του εκτιμώμενου ενεργειακού προϋπολογισμού μας κατά την αιώρηση.

Power Consumer	Estimate
4x XING motors at hover (per motor ~6A)	24 A @ 14.8 V = 355 W
Raspberry Pi 5 (via BEC, 90% efficiency)	~0.6 A @ 14.8 V = 8.9 W
Flight controller + ESC overhead	~0.2 A @ 14.8 V = 3 W
Camera + misc	~0.1 A @ 14.8 V = 1.5 W
Total estimated hover current	~25 A @ 14.8 V
Battery capacity	1550 mAh = 1.55 Ah
Estimated hover endurance (80% DoD)	$1.55 \times 0.8 / 25 \times 60 \approx 3.0$ min
With partial throttle (avg 18 A)	~4.1 min

Πίνακας 5.1: Εκτιμώμενος ενεργειακός προϋπολογισμός σε συνθήκες αιώρησης.

Ένα drone FPV 5 ιντσών, όπως περιγράφεται παραπάνω, έχει αναμενόμενη διάρκεια πτήσης περίπου 3-4 λεπτών, ενώ φέρει και το επιπλέον βάρος ενός Raspberry Pi 5. Χωρίς το Raspberry Pi, ο ίδιος συνδυασμός drone/μπαταρίας μπορεί γενικά να προσφέρει περίπου 5-7 λεπτά συνεχούς πτήσης υπό διάφορες συνθήκες.

Εάν χρειάζεστε το drone FPV σας να πετάξει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ό,τι συνήθως, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε μια μπαταρία μεγαλύτερης χωρητικότητας (όπως μια 2200 mAh 4S) με αντάλλαγμα κάποιο επιπλέον βάρος στο drone. Αυτό θα αντισταθμίσει κάπως τα οφέλη που παρέχει η αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας.

5.1 Διαχείριση Μπαταρίας και Ασφάλεια

5.4.1 Ασφάλεια κατά τη χρήση μπαταριών Lipo

Οι μπαταρίες Lipo είναι επικίνδυνες κατά το χειρισμό τους. Το λογισμικό Betaflight παρέχει μια σειρά από επιλογές για την παρακολούθηση της κατάστασης των μπαταριών. Συγκεκριμένα, μπορεί να ρυθμιστεί ένα επίπεδο τάσης «προειδοποίησης» (ανά κυψέλη) που θα ενεργοποιεί έναν προειδοποιητικό βομβητή όταν η συνολική τάση όλων των κυψελών πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο σημείο (στην περίπτωση αυτή 3,5 V/κυψέλη ή 14,0 V συνολικά για μια διαμόρφωση 4S). Όταν ληφθεί η προειδοποίηση, συνίσταται η εκκίνηση της διαδικασίας προσγείωσης. Εάν αποφορτιστούν οι μπαταρίες Lipo κάτω από τα 3,0 V/κύτταρο (ή 12,0 V συνολικά για μια διαμόρφωση 4S), ενδέχεται να χαθεί μόνιμα η χωρητικότητα σε ένα ή περισσότερα από τα κύτταρα, ή μπορεί ακόμη και να καταστραφούν ανεπανόρθωτα.

Προκειμένου να αποφευχθούν ζημιές από την εξάντληση της μπαταρίας, θα εφαρμοστεί ένα σενάριο παρακολούθησης που μπορεί να διαβάσει την τάση που αναφέρεται από το betaflight μέσω του πρωτοκόλλου MSP (μέσω ενός προσαρμογέα uart-to-usb) και να κλείσει το Raspberry Pi ομαλά πριν φτάσει σε κρίσιμα επίπεδα τάσης.

Αυτό είναι σημαντικό επειδή η διακοπή της τροφοδοσίας στο Raspberry Pi κατά τη διάρκεια μιας λειτουργίας εγγραφής μπορεί να καταστρέψει τα δεδομένα στην κάρτα SD του.

5.4.2 Επαναφόρτιση της μπαταρίας LiPo

Κατά τη φόρτιση της μπαταρίας LiPo, ΠΡΕΠΕΙ να χρησιμοποιηθεί φορτιστής εξισορρόπησης. Εκτός από την παροχή ακριβών πληροφοριών ρεύματος και τάσης, αυτοί οι φορτιστές θα διασφαλίσουν ότι κάθε ένα από τα τέσσερα στοιχεία της μπαταρίας φορτίζεται στο ίδιο επίπεδο. Συνίσταται η χρήση του χαμηλότερου δυνατού ρυθμού φόρτισης για τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Οι περισσότερες μπαταρίες LiPo έχουν μέγιστο ρυθμό φόρτισης C/2, αλλά οι μπαταρίες της σειράς R έχουν ονομαστική τιμή έως 5C. Ενώ η ταχύτερη φόρτιση μειώνει τον συνολικό χρόνο φόρτισης, μειώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

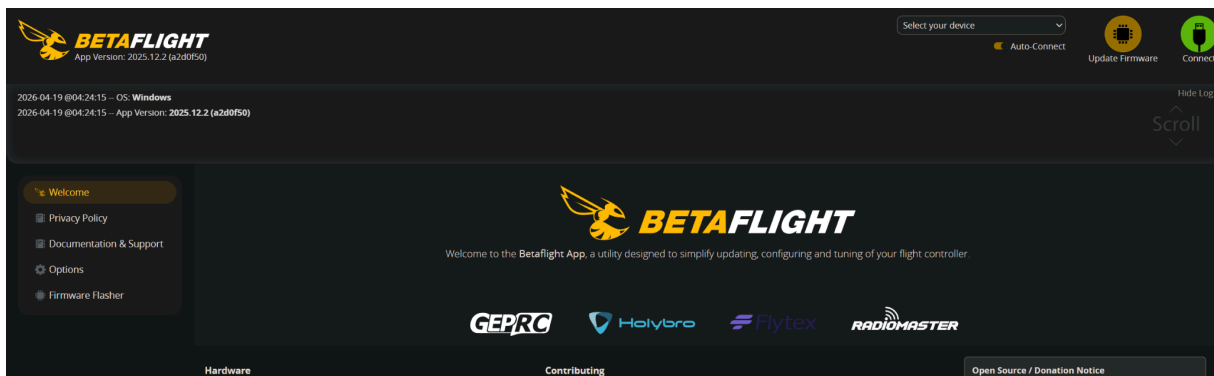
Ανεξάρτητα από το πόσο χρόνο χρειάζεται, σημαντικό είναι να αποθηκεύονται πάντα οι μπαταρίες LiPo στο επίπεδο φόρτισης αποθήκευσης (δηλ. 3,8 V/κύτταρο) εάν δεν χρησιμοποιηθούν για 24-48 ώρες.

Κεφάλαιο 6ο: Αρχικοποίηση του Flight Controller

6.1 Λογισμικό BETAFLIGHT

Το Betaflight είναι ένα λογισμικό ελεγκτή πτήσης ανοιχτού κώδικα για drone, το οποίο αναπτύχθηκε από το Cleanflight Project το 2016. Το firmware υποστηρίζεται από μια μεγάλη ομάδα προγραμματιστών και παρέχει υποστήριξη σε διάφορους ελεγκτές πτήσης μέσω διαμορφώσεων στόχων. Ως μέρος ενός drone, το Betaflight περιέχει όλες τις βασικές λειτουργίες που απαιτούνται για σταθερή πτήση:

- μετρήσεις αισθητήρων
- φίλτράρισμα noise
- προσδιορισμός στάσης
- έλεγχος PID
- μίξη κινητήρων
- τρόποι πτήσης και ενεργοποίηση/απενεργοποίηση.



Σχήμα 6.1: Λογισμικό Betaflight [43]

Το Betaflight χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική διπλού βρόχου. Αυτή περιλαμβάνει έναν εσωτερικό γρήγορο βρόχο (βρόχο γυροσκοπίου), ο οποίος διαβάζει τα δεδομένα IMU και ελέγχει τον ελεγκτή PID με ταχύτητες που κυμαίνονται από 1-8 kHz, και έναν εξωτερικό αργό βρόχο (προγραμματιστή εργασιών), όπου χειρίζεται εισόδους από ραδιόφωνα, τηλεμετρία, ενημερώσεις OSD κ.λπ., οι οποίες μπορούν να γίνουν με χαμηλότερη προτεραιότητα. Ο επεξεργαστής Cortex-M7 με μονάδα κινητής υποδιαστολής στο F722 μπορεί να εκτελέσει τον βρόχο γυροσκοπίου στα 8 kHz με περίπου 40-50% χρήση.

6.2 Αρχική ρύθμιση με το Betaflight Configurator

Η ρύθμιση του Betaflight γίνεται μέσω του Betaflight Configurator. Αυτό το λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις πλατφόρμες (Windows, MacOS κ.λπ.) ως εφαρμογή για επιτραπέζιους υπολογιστές. Για παράδειγμα, για να χρησιμοποιήσετε το Betaflight Configurator με τον ελεγκτή πτήσης Sologood F722, θα πρέπει να συνδεθεί σε έναν υπολογιστή μέσω καλωδίου USB. Μόλις συνδεθεί στον υπολογιστή, ο ελεγκτής πτήσης εμφανίζεται ως εικονική θύρα COM (CDC ACM), μέσω της οποίας το Betaflight Configurator θα επικοινωνεί με τον ελεγκτή πτήσης μέσω MSP (MultiWii Serial Protocol).

Τα πρώτα πράγματα που πρέπει να γίνουν κατά τη ρύθμιση ενός νέου ελεγκτή πτήσης είναι:

- εγκατάσταση firmware για τον ελεγκτή πτήσης Sologood F722

- ρύθμιση την περιστροφής/προσανατολισμού των πλακετών(απαιτείται διόρθωση περιστροφής αν ο ελεγκτής πτήσης δεν είναι τοποθετημένος κάθετα προς τα κάτω από το μπροστινό μέρος του τετρακόπτερου)
- επιλογή πρωτοκόλλου ESC (συνιστάται DSHOT600 για το 4-in-1 ESC Stack)
- διαμόρφωση ρυθμίσεων τάσης μπαταρίας (αριθμός κυψελών: 4s, τάση προειδοποίησης ανά κυψέλη: 3,5 V, κρίσιμη τάση ανά κυψέλη: 3,3 V)

6.3 Ρύθμιση PID

Η διαδικασία ρύθμισης PID για τον έλεγχο της στάσης αεροσκαφών πολλαπλών ελίκων είναι η μέθοδος εύρεσης των κατάλληλων συντελεστών αναλογικού (P), ολοκληρωτικού (I) και διαφορικού (D) ελέγχου για καθέναν από τους τρεις ανεξάρτητους ελεγκτές PID που ρυθμίζουν τη στάση σε κύλιση, κλίση και στροφή, έτσι ώστε το drone να πετά σταθερά και να ανταποκρίνεται γρήγορα στις εντολές ελέγχου χωρίς να παρουσιάζει ταλαντώσεις. Το BetaFlight χρησιμοποιεί έναν ελεγκτή PID διακριτού χρόνου που λαμβάνει τη διαφορά μεταξύ της γωνιακής ταχύτητας που ζητά ο χειριστής (μοίρες/δευτερόλεπτο) και της πραγματικής γωνιακής ταχύτητας που ανιχνεύεται από το IMU και χρησιμοποιεί αυτές τις τιμές για να δημιουργήσει μια έξοδο κινητήρα μέσω του πίνακα μίξης κινητήρων, ο οποίος μετατρέπει τις επιθυμητές ροπές κύλισης/κλίσης/στροφής σε μεμονωμένες εντολές ισχύος κινητήρα [28].



Σχήμα 6.2: PID tuning tab[43]

Η διαδικασία ρύθμισης PID που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη περιελάμβανε μια οργανωμένη επαναληπτική διαδικασία χωρισμένη σε τέσσερα στάδια. Το πρώτο στάδιο φορτώθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές PID του BetaFlight που είναι κατάλληλες για ένα τετρακόπτερο πέντε ιντσών ως αρχικές ρυθμίσεις. Ως βάση, αυτές οι ρυθμίσεις ($P = 45$, $I = 80$, $D = 30$ για κύλιση και κλίση· $P = 47$, $I = 84$, $D = 34$ για στροφή στις εσωτερικές μονάδες του BetaFlight) παρείχαν μια σταθερή πλατφόρμα, αλλά ήταν ανεπαρκώς ρυθμισμένες. Στο δεύτερο στάδιο, τα κέρδη P για το roll και το pitch αυξήθηκαν σε βήματα των πέντε μονάδων έως ότου το drone άρχισε να εμφανίζει ορατή ταλάντωση λόγω του ρεύματος αέρα από τους έλικες που προκαλείται από γρήγορες κατακόρυφες πτήσεις προς τα εμπρός. Σε αυτό το σημείο, το κέρδος P είχε φτάσει στο πρακτικό του όριο. Η τελευταία ρύθμιση του κέρδους P ήταν 10 τοις εκατό χαμηλότερη από αυτό το όριο ταλάντωσης.

Το τρίτο στάδιο συνίστατο στην αύξηση των κερδών D για τη μείωση της υπέρβασης και της δόνησης που παρατηρήθηκαν στα ίχνη του γυροσκοπίου που καταγράφηκαν από το μαύρο κουτί κατά τη διάρκεια ελιγμών απόκρισης βήματος. Η υψηλή απολαβή D θα βοηθήσει στην εξάλειψη των ταλαντώσεων συντονισμού που δημιουργούνται από την ταχεία απόκριση της απολαβής P σε

Αρχικοποίηση του Flight Controller

ξαφνικές αλλαγές του σημείου ρύθμισης. Ωστόσο, η υψηλή απολαβή D θα ενισχύσει τον θόρυβο υψηλής συχνότητας του αισθητήρα προκαλώντας υπερθέρμανση του κινητήρα. Για την παρούσα έρευνα, οι απολαβές D βελτιστοποιήθηκαν ώστε να βρίσκονται στην υψηλότερη δυνατή τιμή, έτσι ώστε να μην οδηγούν σε θερμοκρασίες κινητήρα που υπερβαίνουν τους 50°C μετά από εξήντα δευτερόλεπτα επιθετικής πτήσης, όπως προσδιορίστηκε με άμεση επαφή με τον στάτορα του κινητήρα κατά την προσγείωση. Οι τελικές τιμές για το D ήταν 30 για το roll και για το pitch D ήταν 34.

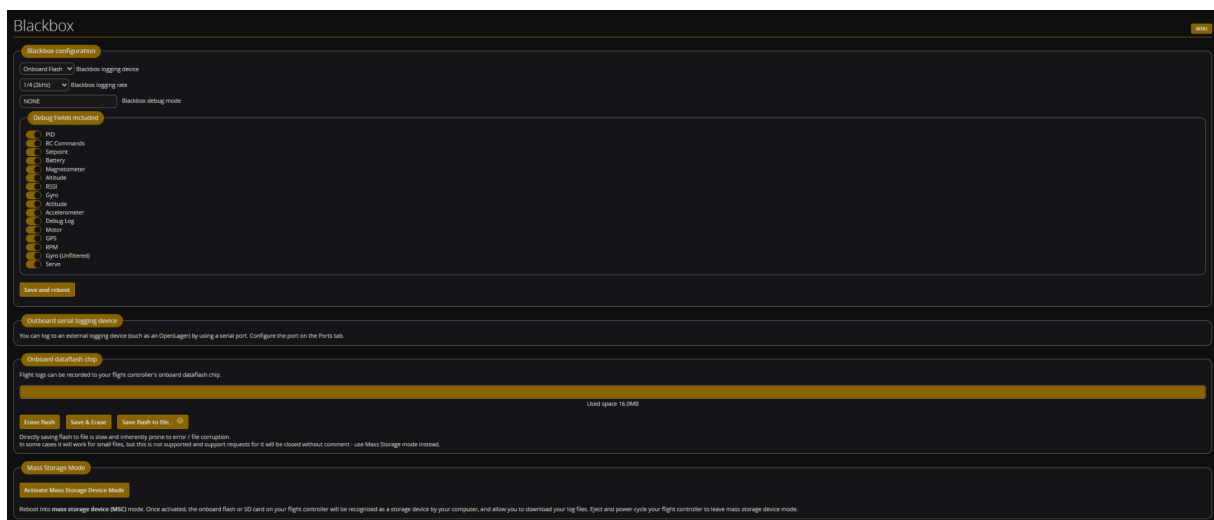
Κατά τη διάρκεια του τέταρτου σταδίου, τα κέρδη I επιβεβαιώθηκαν αξιολογώντας εάν το drone μπορούσε να διατηρήσει οριζόντια πτήση με σταθερές συνθήκες αιώρησης χρησιμοποιώντας λειτουργία hands-off. Η αδυναμία διατήρησης σταθερής αιώρησης θα υποδήλωνε ανεπαρκές κέρδος. Οι αργές ταλαντώσεις είτε στο roll είτε στο pitch υποδηλώνουν υπερβολικό κέρδος I. Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπήρχε μεγάλη ανάγκη προσαρμογής των κερδών I από τις εργοστασιακές συνιστώμενες ρυθμίσεις.

Το βοηθητικό πρόγραμμα BlackBox Explorer του BetaFlight χρησιμοποιήθηκε για όλη την ανάλυση δεδομένων του Black Box. Το εργαλείο δημιουργεί διάφορα χρήσιμα διαγράμματα στο πεδίο του χρόνου, συμπεριλαμβανομένων:

Γωνιακές ταχύτητες γυροσκοπίου και τιμές SetPoint έναντι χρόνου (η απόκριση βήματος). Από το διάγραμμα μπορεί να εκτιμηθεί πόσο γρήγορα σταθεροποιείται το drone και πόσο υπερβαίνει την επιθυμητή τιμή.

Φάσμα συχνοτήτων του σήματος γυροσκοπίου: Μέσω αυτού του γραφήματος μπορεί να προσδιοριστεί αν υπάρχουν δομικοί συντονισμοί στο σκελετό που θα πρέπει να αντισταθμιστούν μέσω φίλτρarisματος Notch.

Συνεισφορές όρων PID: Με την χρήση αυτού του γραφήματος μπορεί να αξιολογηθεί το ποσοστό της συνεισφοράς κάθε όρου PID (αναλογικός, ολοκληρωτικός και παραγωγικός) στην έξοδο του κινητήρα και να επαληθεύσουμε ότι κανένας από αυτούς δεν κυριαρχεί σε ακατάλληλα επίπεδα. Η τελική ρύθμιση PID είχε ως αποτέλεσμα ένα σταθερό χρόνο απόκρισης βήματος περίπου 35 ms για την κλίση με υπέρβαση μικρότερη του 8%· αποτελέσματα που συνάδουν με αυτά που αναφέρονται στη δημοσιευμένη βιβλιογραφία για καλά ρυθμισμένα τετρακόπτερα αγώνων 5 ιντσών.



Σχήμα 6.3: Blackbox tab[43]

6.4 Προφίλ Πτήσης και Οπλισμός

Η λειτουργία γωνίας (γνωστή και ως αυτόματη ισοστάθμιση) είναι πιθανώς η καλύτερη λειτουργία πτήσης για τη ρύθμιση και τη δοκιμή του τετρακόπτερου. Όταν πετάει σε λειτουργία γωνίας, ο ελεγκτής πτήσης χρησιμοποιεί συνεχώς πληροφορίες από τα επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια σας για να προσδιορίσει τον προσανατολισμό του αεροσκάφους στον χώρο. Ταυτόχρονα, προσπαθεί να διατηρήσει το drone σε οριζόντια στάση (σύμφωνα με τα όρια κλίσης) και να επαναφέρει το τετρακόπτερο στην ουδέτερη κατάστασή του όταν τα χειριστήρια αφηθούν πίσω στις κεντρικές τους θέσεις. Αυτό σημαίνει ότι δεν χρειάζεται να ρυθμιστούν χειροκίνητα οι γωνίες κύλισης και κλίσης κάθε δευτερόλεπτο, όπως θα γινόταν στη λειτουργία Acro. Αντ' αυτού, ο ελεγκτής πτήσης ορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία κλίσης και προσπαθεί να διατηρήσει μια επίπεδη, οριζόντια θέση.

Αυτή η πτυχή του drone επιλέχθηκε ειδικά επειδή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο ως πλατφόρμα αγώνων ή freestyle, αλλά και ως βάση για μια ποικιλία συστημάτων όρασης. Επειδή αυτά τα συστήματα όρασης απαιτούν ένα πολύ σταθερό και προβλέψιμο μοτίβο πτήσης για να λειτουργούν καλά, η υπερβολική κίνηση κύλισης/κλίσης/στροφής θα μπορούσε να προκαλέσει μια σειρά προβλημάτων στην ποιότητα της μεταδιδόμενης εικόνας. Η σταθεροποιημένη πτήση παρέχει μια καλύτερη ευκαιρία στην κάμερα Raspberry Pi να καταγράφει καθαρότερη εικόνα του περιβάλλοντος, κάτι που με τη σειρά του διευκολύνει τους αλγόριθμους που εκτελούνται στο σύστημα κάμερας να ανιχνεύουν πρόσωπα. Έτσι, για τη δοκιμή συστημάτων ανίχνευσης με βάση την κάμερα, η λειτουργία Angle είναι ένας πολύ πιο αξιόπιστος τρόπος για να ξεκινήσετε πριν πραγματοποιηθούν δοκιμές πτήσης σε άλλες λειτουργίες.

Από την άλλη πλευρά, όταν πετάει σε λειτουργία Acro, ο χρήστης έχει λεπτομερή έλεγχο του drone. Ενώ αυτό είναι εξαιρετικό για ευέλικτους ελιγμούς και συχνά προτιμάται από επαγγελματίες πιλότους FPV, απαιτεί συνεχή χειροκίνητη εισαγωγή και λεπτομερή έλεγχο. Δεδομένου ότι αυτό το πρωτότυπο φέρει τόσο ένα σύστημα πρόωσης υψηλής ισχύος όσο και επιπλέον ενσωματωμένα ηλεκτρονικά εξαρτήματα (όπως το Raspberry Pi 5 και τη μονάδα κάμερας), μια λειτουργία αυτόματης ισοστάθμισης είναι προτιμότερη για τις αρχικές πτήσεις ρύθμισης, βαθμονόμησης και επικύρωσης. Οι λειτουργίες αυτόματης ισοστάθμισης βοηθούν στη μείωση της πιθανότητας ταχείας απώλειας σταθερότητας και επιτρέπουν την παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος όρασης με λιγότερη ανησυχία για τη σταθεροποίηση του τετρακόπτερου..

Πριν απογειωθεί στο Betaflight, πρέπει να οπλιστεί το drone. Ο οπλισμός ενός drone Betaflight σημαίνει ουσιαστικά να ενεργοποιηθούν οι κινητήρες ώστε να ανταποκρίνονται στις εντολές του γκαζιού. Υπάρχουν μερικοί λόγοι για τους οποίους το Betaflight έχει ενσωματώσει πολλαπλά επίπεδα προστασίας στον οπλισμό. Ένας από αυτούς είναι η αποφυγή τυχαίας εκκίνησης των κινητήρων, η οποία θα μπορούσε να είναι επικίνδυνη για τον πιλότο, τον κοντινό εξοπλισμό ή το ίδιο το drone. Το Betaflight αποτρέπει την εκκίνηση των κινητήρων απαιτώντας να κατεβεί εντελώς ο μοχλός γκαζιού πριν από την ενεργοποίηση. Εφόσον πληρείται η προϋπόθεση αυτή, μπορεί να ενεργοποιηθεί το drone είτε μέσω ενός προσαρμοσμένου βοηθητικού κουμπιού στον πομπό είτε εκτελώντας μια ειδική εντολή μοχλού, ανάλογα με τις ρυθμίσεις του δέκτη και του Betaflight.

Όταν το Betaflight λαμβάνει ένα αίτημα ενεργοποίησης, πραγματοποιεί πολλαπλούς εσωτερικούς ελέγχους πριν επιτραπεί ο οπλισμός του drone. Αυτοί οι έλεγχοι περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό του εάν η τιμή του γκαζιού είναι κάτω από το ελάχιστο που απαιτείται για την ενεργοποίηση, την επικύρωση ότι το επιταχυνσιόμετρό βαθμονομήθηκε με επιτυχία πριν από την ενεργοποίηση, τη διασφάλιση ότι το γυροσκόπιο αναφέρει σταθερή κατάσταση και δεν οχι ασυνήθιστη κίνηση, τον έλεγχο για τυχόν κρίσιμα σφάλματα διαμόρφωσης και τη διασφάλιση ότι ο προσανατολισμός της πλακέτας έχει ρυθμιστεί σωστά. Μια λανθασμένη τοποθέτηση/προσανατολισμός του ελεγκτή πτήσης

θα μπορούσε να προκαλέσει τον βρόχο σταθεροποίησης να στείλει αντικρουόμενες οδηγίες στους κινητήρες, προκαλώντας άμεση απώλεια σταθερότητας μετά την απογείωση.



Σχήμα 6.4: Sensors Tab[43]

Μια τελευταία σημαντική προϋπόθεση για την ενεργοποίηση είναι ότι όλες οι συνδέσεις των κινητήρων (μεταξύ του ελεγκτή πτήσης και των ESC) πρέπει να είναι σωστές. Με αυτό το συγκεκριμένο drone να χρησιμοποιεί διαμόρφωση τεσσάρων κινητήρων, κάθε έξοδος κινητήρα από τον ελεγκτή πτήσης πρέπει να δρομολογείται σωστά μέσω μιας ενιαίας μονάδας 4-σε-1 ESC. Κάθε κανάλι ESC πρέπει να λαμβάνει το σωστό σήμα ελέγχου από τον ελεγκτή πτήσης και κάθε κινητήρας πρέπει αντίστοιχα να είναι καλωδιωμένος σύμφωνα με την αντιστοίχιση κινητήρων του Betaflight. Εάν ένας κινητήρας περιστρέφεται αντίστροφα ή ανταποκρίνεται ακατάλληλα λόγω λανθασμένης καλωδίωσης ή εσφαλμένης διαμόρφωσης του ESC, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να χαθεί ο έλεγχος του drone μόλις απογειωθεί. Λόγω αυτού του κινδύνου, ελέγχθηκε διπλά η κατεύθυνση/σειρά των κινητήρων και επιβεβαιώθηκε ότι τοποθετήθηκαν σωστά οι έλικες πριν πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε δοκιμή ενεργοποίησης με τοποθετημένες τους έλικες.

Οι προσαπίες ενεργοποίησης αποτελούν ένα σημαντικό χαρακτηριστικό ασφαλείας κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης. Προστατεύουν από την ακούσια ενεργοποίηση του drone ενώ βρίσκεται ακόμη σε διαδικασία διαμόρφωσης στον πάγκο εργασίας, συνδεδεμένο με έναν υπολογιστή ή υπό φυσική επιθεώρηση. Με ένα πρόσθετο σύστημα πρόωσης υψηλής ισχύος και ενσωματωμένο υπολογιστικό σύστημα, οι ασφαλείς συμπεριφορές ενεργοποίησης είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή δοκιμή της κάμερας και βαθμονόμηση του ελεγκτή πτήσης. Ως εκ τούτου, οι διαδικασίες ενεργοποίησης παρέχουν όχι μόνο ένα θεμελιώδες λειτουργικό βήμα, αλλά και έναν σημαντικό παράγοντα της συνολικής ασφαλείας και αξιοπιστίας του συστήματός.

Κεφάλαιο 7ο: Αρχιτεκτονική Λογισμικού

7.1 Προεπισκόπηση Συστήματος Λογισμικού

Η αρχιτεκτονική λογισμικού του συστήματος οπτικής ανίχνευσης έχει σχεδιαστεί γύρω από τρεις κύριους στόχους: χαμηλή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο μεταξύ της λήψης και της προβολής βίντεο (σε πραγματικό χρόνο), αξιόπιστη ανίχνευση προσώπου περίπου στο ίδιο χρονικό πλαίσιο με το προβαλλόμενο βίντεο και σταθερή λειτουργία υπό τους περιορισμένους πόρους του Raspberry Pi 5. Αυτές οι απαιτήσεις διαμορφώνουν σχεδόν κάθε απόφαση σχεδιασμού σε όλο το σύστημα, από την επιλογή γλώσσας/μορφής προγραμματισμού έως τη χρήση νημάτων, buffering και streaming http. Λόγω του περιορισμένου πόρου της πλατφόρμας, πρέπει να υπάρχει μια ισορροπία υλοποίησης μεταξύ υπολογιστικού κόστους, απόκρισης και ευκολίας συντήρησης.

Ενώ η θεωρητική κομψότητα δεν θα ήταν ασήμαντη σε οποιαδήποτε εφαρμογή ενσωματωμένης όρασης, ένας σχεδιασμός που περιλαμβάνει περιττή buffering, μεγάλες καθυστερήσεις επεξεργασίας ή περίπλοκο συγχρονισμό δεν θα κάλυπτε τις ανάγκες των εφαρμογών ενσωματωμένης όρασης σε πραγματικό χρόνο.

Το σύστημα υλοποιείται χρησιμοποιώντας Python 3.11 κυρίως επειδή η Python προσφέρει μια ευρύτερη βάση υποστήριξης βιβλιοθήκης από τις περισσότερες άλλες γλώσσες για όραση υπολογιστή, επεξεργασία εικόνας, δικτύωση και ταυτόχρονη λειτουργία. Σε αυτό το έργο, οι πιο σημαντικές βιβλιοθήκες που χρησιμοποιούνται είναι η picamera2 για πρόσβαση στην/στις κάμερα/ες που είναι ενσωματωμένες στο `pi5`, η `opencv` για όλες τις λειτουργίες επεξεργασίας εικόνας και ανίχνευσης προσώπου, η `NumPy` για την αναπαράσταση πίνακα και η `Flask` για την εξυπηρέτηση τόσο της κύριας σελίδας HTML όσο και του τελικού σημείου ροής MJPEG. Ενώ η Python μπορεί συνήθως να μην είναι η ταχύτερη γλώσσα όσον αφορά τους υπολογισμούς χαμηλού επιπέδου, μεγάλο μέρος της βαριάς εργασίας που γίνεται σε αυτό το σύστημα ανατίθεται σε βελτιστοποιημένες βιβλιοθήκες `c` & `c++` κάτω από το επίπεδο Python. Επομένως, ο κώδικας Python χρησιμεύει περισσότερο ως επίπεδο συντονισμού που ενορχηστρώνει τη ροή δεδομένων μεταξύ της/των κάμερας/ών, του αλγορίθμου ανίχνευσης και του διακομιστή δικτύου.

Από άποψη αρχιτεκτονικού επιπέδου, η εφαρμογή ακολουθεί ένα μοντέλο παραγωγού-καταναλωτή. Το νήμα λήψης κάμερας λειτουργεί ως ο παραγωγός, αποκτώντας συνεχώς καρέ από την Raspberry Pi Camera v2, τα επεξεργαζόμενο, ανιχνεύοντας πρόσωπα και συμπιέζοντας τις προκύπτουσες σχολιασμένες εικόνες σε μορφή `jpeg`. Το νήμα ροής `http` λειτουργεί ως ο καταναλωτής που παρέχει συνεχώς το πιο πρόσφατο διαθέσιμο καρέ σε έναν ή περισσότερους πελάτες προγράμματος περιήγησης. Αυτός ο διαχωρισμός παρέχει προστασία από μια αργή ή προσωρινά μπλοκαρισμένη σύνδεση δικτύου από παρεμβολές στην λήψη καρέ και την ανάλυση προσώπου. Με άλλα λόγια, ανεξάρτητα από το αν ένας πελάτης προγράμματος περιήγησης καθυστερεί, αποσυνδέεται ή είναι απασχολημένος με την απόδοση προηγούμενου περιεχομένου - ο αγωγός της κάμερας θα συνεχίσει να λειτουργεί.

Έγινε μια βασική επιλογή σχεδιασμού όσον αφορά τη χρήση ενός `buffer` κοινόχρηστου πλαισίου μίας θέσης αντί των παραδοσιακών ουρών `FIFO`. Αυτό αντικατοπτρίζει άμεσα τη φύση της εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο. Σε σχέδια που βασίζονται σε ουρές, τα πλαίσια συσσωρεύονται κάθε φορά που παράγονται γρηγορότερα από ό,τι καταναλώνονται μέσω του δικτύου. Αυτό δημιουργεί αυξανόμενες καθυστερήσεις μεταξύ των σκηνών που καταγράφονται και εκείνων που εμφανίζονται στα προγράμματα περιήγησης. Ενώ μια τέτοια προσωρινή αποθήκευση μπορεί να είναι αποδεκτή για εργασίες επιτήρησης ή μετεπεξεργασίας - μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα για εφαρμογές τηλεχειρισμού και οπτικής ανατροφοδότησης όπου οι χρήστες επιθυμούν να δουν την τρέχουσα κατάσταση της σκηνής αντί για συσσωρευμένες παρωχημένες πληροφορίες. Ένα `buffer` μίας θέσης αποφεύγει εντελώς αυτό το πρόβλημα, διασφαλίζοντας ότι ανεξάρτητα από το πόσα πλαίσια έχουν

μεταδοθεί από την τελευταία ενημέρωση - μόνο το πιο πρόσφατο πλαίσιο θα αποσταλεί στους πελάτες του προγράμματος περιήγησης.

Το νήμα λήψης κάμερας έχει υλοποιηθεί ως νήμα daemon, έτσι ώστε να τερματίζεται αυτόματα κατά την έξοδο από την κύρια εφαρμογή. Αυτό διευκολύνει τον καθαρισμό και διασφαλίζει ότι το κλείσιμο του συστήματος γίνεται με ελεγχόμενο τρόπο χωρίς να απαιτείται περίπλοκη λογική διαχείρισης νημάτων. Το νήμα καταγραφής κάμερας εκτελείται συνεχώς - καταγράφοντας ακατέργαστα καρτέκια από κάμερες ενσωματωμένες στο `gri5`, μετατρέποντάς τα σε μορφές κατάλληλες για `opencv` και εκτελώντας περιοδική ανίχνευση προσώπου (αντί να γίνεται αυτό σε κάθε καρτέ). Η συχνότητα ανίχνευσης μειώθηκε σκόπιμα επειδή η ανίχνευση προσώπου είναι το ακριβό στοιχείο της διαδικασίας. Η μείωση της συχνότητας ανίχνευσης επιτρέπει στο σύστημα να μειώσει το φορτίο επεξεργασίας διατηρώντας παράλληλα την οπτική συνέχεια μεταξύ των καρτέ.

Μόλις σχολιαστεί κάθε καρτέ, κωδικοποιείται σε `jpeg` σε μέτρια ποιότητα. Η συμπίεση `Jpeg` είναι μια πρακτική επιλογή επειδή μειώνει δραματικά τις ποσότητες δεδομένων που απαιτούνται για μετάδοση μέσω ασύρματων δικτύων, διατηρώντας παράλληλα αρκετές λεπτομέρειες για γενική παρακολούθηση/σκοπό και αναγνώριση προσώπου. Μόλις κωδικοποιηθεί και συμπιεστεί, το καρτέ `jpeg` γράφεται σε ένα κοινόχρηστο `buffer` και σηματοδοτείται στο νήμα καταναλωτή μέσω πρωτόγονων συγχρονισμού.

Το νήμα καταναλωτή εκθέτει κάθε καρτέ μέσω μιας ροής `http MJPEG`. Οι πελάτες του προγράμματος περιήγησης μπορούν να αποδίδουν ροές απευθείας χωρίς να χρειάζονται εξειδικευμένο λογισμικό, πρόσθετα ή λογική αποκωδικοποίησης από την πλευρά του πελάτη.

Το `Flask` επιλέχθηκε ως πλαίσιο διακομιστή επίσης με βάση σκόπιμες επιλογές. Οι υλοποιήσεις `socket` χαμηλότερου επιπέδου θα μπορούσαν ενδεχομένως να μειώσουν ελαφρώς την επιβάρυνση, αλλά το `Flask` προσφέρει καθαρή δομή για την εξυπηρέτηση τόσο της κύριας σελίδας `HTML` όσο και του τελικού σημείου της ροής `MJPEG`. Επειδή ο ρόλος του διακομιστή είναι ελαφρύς και ως επί το πλείστον συνδεδεμένος με είσοδο/έξοδο - η απλότητα και η αναγνωσιμότητα που παρέχονται από το `Flask` αξίζουν μικρότερα κέρδη απόδοσης που μπορεί να προκύψουν από την προσαρμοσμένη υλοποίηση `http`.

Συνολικά, η αρχιτεκτονική λογισμικού αντιπροσωπεύει έναν ρεαλιστικό συμβιβασμό: είναι αρκετά απλή για να διατηρηθεί αλλά και αρκετά αποτελεσματική για να επιτύχει τους στόχους ενός συστήματος πραγματικού χρόνου χρησιμοποιώντας μέτριο υλικό.

7.2 Picamera2 Βιβλιοθήκη and libcamera

Η απόδοση και τα βασικά χαρακτηριστικά της κάμερας εξαρτώνται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνονται οι εικόνες από το υποσύστημα της κάμερας. Κάθε βήμα στην επακόλουθη διαδικασία επεξεργασίας θα εξαρτάται τόσο από την ποιότητα όσο και από την επικαιρότητα της αποκτώμενης εικόνας. Επομένως, η επιλογή μιας αποτελεσματικής και αξιόπιστης πλατφόρμας κάμερας θεωρείται κρίσιμη. Σε αυτό το έργο, επιλέχθηκε η υλοποίηση της λήψης εικόνας με τη χρήση της `Raspberry Pi Camera V2` μαζί με τη βιβλιοθήκη λογισμικού `Picamera2` και το πλαίσιο `libcamera` χαμηλότερου επιπέδου. Μαζί, αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν μια μέθοδο αιχμής για την απόκτηση άμεσης πρόσβασης στο υλικό της κάμερας, ενώ παράλληλα παρέχεται συμβατότητα με το λειτουργικό σύστημα `Raspberry Pi` και όλο το συνοδευτικό περιβάλλον λογισμικού του.

Η `Raspberry Pi Camera v2` περιέχει έναν αισθητήρα εικόνας `Sony CMOS 8 MP`, ο οποίος συνδέεται απευθείας με το `Raspberry Pi 5` μέσω ενός διαύλου `MIPI CSI-2`. Σε αντίθεση με τις κάμερες `USB`, μέσω των οποίων οι εικόνες αποστέλλονται μέσω του υποσυστήματος `USB` και το εύρος ζώνης μοιράζεται με πολλά άλλα περιφερειακά, η `MIPI CSI-2` αποτελεί έναν υψηλής ταχύτητας, αποκλειστικό δίαυλο επικοινωνίας, ο οποίος είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για τη μεταφορά εικόνων. Από τη `MIPI CSI-2` παρέχονται πολλά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλότερη καθυστέρηση επικοινωνίας,

λιγότερη χρήση CPU λόγω μειωμένων διακοπών και μεγαλύτερο εύρος ζώνης για την αποστολή μεγαλύτερων ποσοτήτων δεδομένων (όπως μεγάλος αριθμός εικόνων υψηλής ευκρίνειας).

Από το MIPI CSI-2 αποστέλλονται ακατέργαστα δεδομένα εικόνας από τον αισθητήρα εικόνας στον Επεξεργαστή Σήματος Εικόνας (ISP) του Broadcom BCM2712 SoC, όπου εκτελούνται πολυάριθμες βελτιώσεις και βήματα προεπεξεργασίας στα ακατέργαστα δεδομένα. Ο ISP αποτελεί ένα προσαρμοσμένο μπλοκ υλικού, το οποίο είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση πολλών από τα υπολογιστικά δαπανηρά βήματα επεξεργασίας που απαιτούνται για τη βελτίωση μιας εικόνας πριν από την παράδοση αυτής της βελτιωμένης εικόνας σε προγράμματα λογισμικού που εκτελούνται στον χώρο χρήστη. Τα βήματα επεξεργασίας περιλαμβάνουν την απομωσαϊκή επεξεργασία, την αυτόματη εξισορρόπηση λευκού, τη διόρθωση έκθεσης, τη μείωση θορύβου, την ευκρίνεια και τις διορθώσεις χρώματος, τα οποία αποτελούν παραδείγματα τέτοιων βημάτων επεξεργασίας. Ως αποτέλεσμα της εκτέλεσης όλων αυτών των βελτιώσεων από τον ISP εσωτερικά, δεν απαιτείται σχεδόν τόσος υπολογισμός από τα επίπεδα λογισμικού για την επίτευξή τους. Όταν η εφαρμογή των ίδιων αυτών βημάτων επεξεργασίας επιχειρείται μόνο σε επίπεδο λογισμικού, καταναλώνονται τεράστιες ποσότητες κύκλων CPU και αφήνεται ελάχιστος έως καθόλου χώρος για εργασίες επεξεργασίας υψηλότερου επιπέδου, όπως η ανίχνευση προσώπου και η μετάδοση βίντεο. Έτσι, από τη χρήση του ISP υλικού επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση της αποτελεσματικότητας της κατανομής υπολογιστικών πόρων και υποστηρίζεται η επίτευξη του στόχου απόδοσης σε πραγματικό χρόνο.

Προκειμένου να αξιοποιηθεί αυτή η δυνατότητα κάμερας, χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη Picamera2. Η Picamera2 λειτουργεί ως ένα επίπεδο αφαίρεσης υψηλότερου επιπέδου πάνω από το πλαίσιο libcamera χαμηλότερου επιπέδου. Σε παλαιότερες εποχές, τα συστήματα Raspberry Pi χρησιμοποιούσαν την αρχική βιβλιοθήκη Picamera μαζί με ιδιόκτητο κώδικα προγράμματος οδήγησης κάμερας. Δυστυχώς, η αρχική αρχιτεκτονική τελικά καταργήθηκε λόγω έλλειψης ευελιξίας και εξάρτησης από παλαιότερα στοιχεία λογισμικού.

Από το πλαίσιο libcamera παρέχεται μια νεότερη αρχιτεκτονική που βασίζεται σε προσαρμοσμένες ροές επεξεργασίας εικόνας. Αντί να παρέχεται απλώς μια αφαίρεση συσκευής βίντεο παρόμοια με αυτήν που προσφερόταν από την αρχική βιβλιοθήκη picamera, στο libcamera παρουσιάζονται οι λειτουργίες της κάμερας ως διαδοχικά σύνολα αιτημάτων εικόνας/σταδίων επεξεργασίας. Από αυτόν τον σχεδιασμό παρέχεται στις εφαρμογές πολύ μεγαλύτερος έλεγχος στον τρόπο με τον οποίο ζητούνται οι εικόνες, ενώ παράλληλα προσφέρεται υποστήριξη συμβατή με παλαιότερες εκδόσεις για διάφορους αισθητήρες κάμερας και διαμορφώσεις υλικού.

Από τη βιβλιοθήκη Picamera2 αφαιρείται μεγάλο μέρος της πολυπλοκότητας που εμπλέκεται στην αλληλεπίδραση με την υποκείμενη στοίβα καμερών, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης των παραμέτρων της κάμερας, της κατανομής μνήμης για την αποθήκευση εικόνων και της επικοινωνίας με την ίδια τη στοίβα libcamera. Ως εκ τούτου, από τους προγραμματιστές εφαρμογών επιτρέπεται πλέον η αλληλεπίδραση με πολύ υψηλού επιπέδου αφαιρέσεις, όπως αντικείμενα και μέθοδοι που αναπαριστούν κάμερες, ροές βίντεο και λήψη εικόνας, αντί να απαιτείται αλληλεπίδραση με σύνθετα API πυρήνα ή ρυθμίσεις που αφορούν συγκεκριμένα υλικό.

Για τη διαμόρφωση λήψης βίντεο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το έργο, επιλέχθηκε ανάλυση καρέ 1280 x 720 pixel και χρησιμοποιήθηκε η μορφή pixel XRGB8888. Αυτές οι επιλογές έγιναν αφού λήφθηκε υπόψη μια αντιστάθμιση μεταξύ της ποιότητας της εικόνας και του υπολογιστικού κόστους λήψης εικόνων. Μια υψηλότερη ανάλυση θα παρείχε καλύτερη αναπαράσταση των προσώπων στις εικόνες, γεγονός που θα διευκόλυνε την ανίχνευση προσώπων ακόμη και αν αυτά φαίνονται μικρά σε μια εικόνα (δηλαδή, πρόσωπα που βρίσκονται κοντά στις άκρες της εικόνας), ωστόσο, οι υψηλότερες αναλύσεις απαιτούν μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ. Περισσότερα pixel πρέπει να μετατραπούν από χρωματικό χώρο σε χώρο κλίμακας του γκρι, να αναλυθούν για πρόσωπα και να σχολιαστούν, καθώς και να συμπιεστούν χρησιμοποιώντας αλγόριθμους συμπίεσης JPEG. Οι χαμηλότερες αναλύσεις έχουν χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος, αλλά παρέχουν λιγότερο λεπτομερείς αναπαραστάσεις των

προσώπων, επομένως εάν η ανάλυση γίνει πολύ χαμηλή, τότε η ανίχνευση προσώπων μπορεί να καταστεί αναξιόπιστη. Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση ανάλυσης 1280x720 παρέχει μια καλή αντιστάθμιση μεταξύ αυτών των δύο ανταγωνιστικών παραγόντων. Καταφέρνεται να διατηρηθούν αρκετές λεπτομέρειες στα ανιχνευμένα πρόσωπα, ενώ ταυτόχρονα διατηρούνται ταχύτητες επεξεργασίας περίπου 30 καρέ/δευτ. στο υλικό Raspberry Pi 5.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι μορφές XRGB8888 αντιπροσωπεύουν κάθε pixel ως ομάδα 4 byte. Ένα byte αγνοείται επειδή είναι συμπλήρωση· ένα byte αντιστοιχεί στην ένταση κόκκινου, ένα byte στην ένταση πράσινου και ένα byte στην ένταση μπλε. Με κάθε byte να έχει ακέραια τιμή 8 bit που κυμαίνεται από 0 έως 255, δημιουργείται μια εσωτερική αναπαράσταση της καταγεγραμμένης εικόνας ως πίνακας NumPy διαστάσεων 720 x 1280 x 4 και τύπου uint8. Η χρήση πινάκων NumPy προσφέρει σημαντικά οφέλη, καθώς οι λειτουργίες που περιλαμβάνουν ολόκληρες περιοχές της εικόνας μπορούν να εκτελεστούν παράλληλα (δηλαδή διανυσματικές λειτουργίες) και να υλοποιηθούν σε εξαιρετικά βελτιστοποιημένο κώδικα C κάτω από το επίπεδο της Python. Σε αντίθεση με την απαίτηση μεμονωμένης επανάληψης σε κάθε pixel σε κώδικα Python, οι διανυσματικές λειτουργίες επιτρέπουν την εφαρμογή λειτουργιών σε ολόκληρες περιοχές εικόνας ταυτόχρονα.

Ενώ το XRGB8888 είναι κατάλληλο για τη λήψη εικόνων, το OpenCV αναμένει ότι οι εικόνες θα ταξινομούνται σε μορφή BGR (σε αντίθεση με το RGB), επομένως το καταγεγραμμένο καρέ πρέπει να μετατρέπεται σε μορφή BGR πριν από οποιαδήποτε περαιτέρω επεξεργασία. Αφαιρείται το αχρησιμοποίητο κανάλι X και αναδιατάσσονται τα κανάλια ώστε να είναι σε μορφή BGR. Μετά τη μετατροπή, προκύπτει εικόνα διαστάσεων 720 x 1280 x 3, η οποία είναι σωστά μορφοποιημένη σύμφωνα με τις προσδοκίες του OpenCV για όλες τις επόμενες ρουτίνες.

Ενώ αυτό φαίνεται φαινομενικά μικρή λεπτομέρεια, η εσφαλμένη ερμηνεία καναλιών μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στην κατάντη αλυσίδα επεξεργασίας. Πριν από την υλοποίηση των χαρακτηριστικών του έργου, εκτελέστηκαν δοκιμαστικές περιπτώσεις που κατέδειξαν ότι η επεξεργασία των δεδομένων XRGB ως BGR προκάλεσε παραμορφωμένα χρώματα και μη βέλτιστα αποτελέσματα ανίχνευσης προσώπου. Ενώ η ανίχνευση με βάση το Haar βασίζεται κυρίως σε πληροφορίες έντασης που προέρχονται από αναπαραστάσεις εικόνας σε κλίμακα του γκρι, το OpenCV εκτελεί ενδιάμεσα βήματα επεξεργασίας που βασίζονται στη σωστή ερμηνεία χρωμάτων.

Αξιοποιούνται επίσης οι εσωτερικές βελτιστοποιήσεις εντός του OpenCV που σχετίζονται με τις διαδικασίες μετατροπής. Όπως ακριβώς αξιοποιούνται οι εντολές SIMD που είναι διαθέσιμες στους επεξεργαστές ARM Cortex-A76 που βρίσκονται στο υλικό Raspberry Pi 5 για τη βελτιστοποίηση της μετατροπής χρωμάτων, αξιοποιούνται επίσης από το OpenCV οι εντολές SIMD που είναι διαθέσιμες στους επεξεργαστές ARM Cortex-A76 για την επιτάχυνση των μετατροπών χρωμάτων. Λόγω της διαθεσιμότητας συνόλου εντολών SIMD στους επεξεργαστές ARM Cortex-A76 που βρίσκονται στο υλικό Raspberry Pi 5, πολλές ταυτόχρονες λειτουργίες μπορούν να εκτελεστούν παράλληλα κατά την εκτέλεση μετατροπών χρωμάτων, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον χρόνο επεξεργασίας και επιτρέποντας τη συνέχιση της επίτευξης του στόχου για ρυθμούς καρέ σε πραγματικό χρόνο.

Ένα άλλο εξαιρετικό χαρακτηριστικό των Picamera2 και libcamera είναι ότι υποστηρίζεται η δυναμική τροποποίηση των παραμέτρων της κάμερας κατά την εκτέλεση εφαρμογών. Από τις εφαρμογές μπορούν να καθορίζονται ιδιότητες όπως χρόνος έκθεσης, ισορροπία λευκού, συντελεστής κέρδους, ρυθμός καρέ, συμπεριφορά εστίασης, φωτεινότητα, αντίθεση και ευκρίνεια. Ενώ η τρέχουσα εφαρμογή μας βασίζεται κυρίως στη χρήση προεπιλεγμένων αυτόματων τιμών, αναμένεται η επέκταση αυτής της δυνατότητας σε μελλοντικές επαναλήψεις αυτού του έργου. Για παράδειγμα, εάν ένα drone λειτουργούσε σε εξωτερικό χώρο (και υπόκειται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού καθώς κινείται μεταξύ ηλιόλουστων και σκιασμένων περιοχών), θα μπορούσε ενδεχομένως να επιτευχθεί βελτιωμένη συνέπεια εικόνας και αξιοπιστία ανίχνευσης μέσω της προσαρμογής του

ελέγχου έκθεσης. Ομοίως, εάν η λειτουργία πραγματοποιείται σε εσωτερικό χώρο και σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, θα μπορούσε να αυξηθεί προσαρμοστικά το κέρδος του αισθητήρα ή να προσαρμοστούν οι έλεγχοι έκθεσης. Η ευελιξία που προσφέρεται από τη libcamera παρέχει όχι μόνο άμεσα πλεονεκτήματα όσον αφορά τη λειτουργία, αλλά και πιθανά μακροπρόθεσμα πλεονεκτήματα όσον αφορά την επεκτασιμότητα.

Τέλος, μια άλλη σημαντική πτυχή απόδοσης του υποσυστήματος της κάμερας σχετίζεται με το DMA (Άμεση Πρόσβαση Μνήμης). Από το DMA επιτρέπεται η άμεση μεταφορά δεδομένων μεταξύ εξαρτημάτων υλικού και μνήμης χωρίς ενεργή συμμετοχή της CPU. Χωρίς υποστήριξη DMA, θα υπήρχε συνεχής συμμετοχή της CPU στην αντιγραφή κάθε νέου καρέ δεδομένων βίντεο σε μνήμες buffer. Λαμβάνοντας υπόψη μια συνεχή ροή καρέ βίντεο πλήρους ανάλυσης σε περίπου 30 FPS, θα καταναλώνονταν τεράστιες ποσότητες πόρων της CPU. Αντ' αυτού, οι μεταφορές DMA πραγματοποιούνται σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητα από τη δραστηριότητα της CPU, επιτρέποντας στις CPU να παραμένουν διαθέσιμες για εργασίες όπως ανίχνευση προσώπου, συμπίεση JPEG και μετάδοση δικτύου.

Μαζί, μέσω του συνδυασμού της χρήσης της Raspberry Pi Camera v2, του Picamera2, του Libcamera, της επεξεργασίας ISP υλικού, της επιτάχυνσης SIMD και των μεταφορών μνήμης που βασίζονται σε DMA, δημιουργείται ένας αποτελεσματικός αγωγός απόκτησης, κατάλληλος για εφαρμογές Υπολογιστικής Όρασης σε πραγματικό χρόνο που λειτουργούν υπό περιορισμένα περιβάλλοντα πόρων CPU, όπως αυτά που είναι κοινά στα ενσωματωμένα συστήματα υλικού.

7.3 Βρόχος Αναγνώρισης Προσώπου

Σε υψηλότερο επίπεδο, ο βρόχος λειτουργεί ως ένας διαδοχικός κύκλος που εκτελείται συνεχώς: καταγράφει το τελευταίο καρέ από το υποσύστημα της κάμερας· μετατρέπει/προεπεξεργάζεται την εικόνα σε μορφή συμβατή με το openv (π.χ., μετατρέπει το rgb σε bgr) εκτιμά μετρήσεις απόδοσης (π.χ. καρέ ανά δευτερόλεπτο) εκτελεί υπό όρους ανίχνευση προσώπου· επαναχρησιμοποιεί προηγούμενα αποτελέσματα ανίχνευσης όταν είναι απαραίτητο· αποδίδει γραφικές σχολιασμούς· συμπίεζει το καρέ σε μορφή jpeg· δημοσιεύει το κωδικοποιημένο αποτέλεσμα σε κοινόχρηστο buffer για ροή. Ενώ κάθε στάδιο συμβάλλει στο συνολικό υπολογιστικό φορτίο, το καθένα πρέπει να εξισορροπείται προσεκτικά με τους περιορισμούς του συστήματος.

Μια βασική απόφαση σχεδιασμού σε αυτόν τον βρόχο είναι ο διαχωρισμός μεταξύ της συχνότητας λήψης εικόνας και της συχνότητας ανίχνευσης προσώπου. Το σύστημα εκτελεί την ανίχνευση περιοδικά, συνήθως μία φορά κάθε τέσσερα καρέ. Η στρατηγική πίσω από αυτήν την προσέγγιση βασίζεται στην παρατήρηση ότι τα καρέ βίντεο συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό χρονικά, ειδικά σε σενάρια όπου υπάρχει αργή κίνηση του θέματος/κάμερας. Σε τέτοιες συνθήκες, η εκτέλεση πλήρους ανίχνευσης σε κάθε καρέ θα εισήγαγε περιττή επιβάρυνση τόσο όσον αφορά τους υπολογιστικούς πόρους όσο και τον χρόνο χωρίς να βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα της εξόδου.

Εκτός από τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου, η αξιοποίηση του χρονικού πλεονασμού επιτρέπει στο σύστημα να παρέχει μια οπτική συνέχεια. Όταν ανιχνεύεται ένα πρόσωπο σε ένα δεδομένο καρέ, οι συντεταγμένες του πλαισίου οριοθέτησης αποθηκεύονται σε μια προσωρινή δομή cache. Σε επόμενα καρέ όπου η ανίχνευση παραλείπεται, οι αποθηκευμένες συντεταγμένες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σχεδίαση ορθογώνιων πλαισίων οριοθέτησης γύρω από περιοχές ενδιαφέροντος. Έτσι, το σύστημα δημιουργεί μια ελαφριά συμπεριφορά που μοιάζει με παρακολούθηση χωρίς να εφαρμόζει έναν πλήρη αλγόριθμο παρακολούθησης αντικειμένων. Επομένως, το σύστημα επιτυγχάνει μια ισορροπία μεταξύ αποτελεσματικότητας και οπτικής συνέχειας, διασφαλίζοντας ότι τα ανιχνευόμενα πρόσωπα παραμένουν σταθερά επισημασμένα ακόμη και όταν η ανίχνευση δεν εκτελείται ενεργά.

Η μείωση του αριθμού των κλήσεων χρησιμεύει επίσης για τη σταθεροποίηση της χρήσης της CPU. Η ανίχνευση προσώπου χρησιμοποιώντας ταξινομητές Haar Cascade είναι σχετικά αποτελεσματική σε σύγκριση με τις σύγχρονες προσεγγίσεις βαθιάς μάθησης. Ωστόσο, εξακολουθεί να περιλαμβάνει την αξιολόγηση πολλαπλών κλιμάκων και χαρακτηριστικών σε συρόμενα παράθυρα. Μειώνοντας τον αριθμό των κλήσεων ανίχνευσης, το σύστημα αποτρέπει τις περιοδικές αιχμές στη χρήση της CPU και διατηρεί πιο προβλέψιμα χαρακτηριστικά απόδοσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ενσωματωμένα περιβάλλοντα όπου οι θερμικοί και οι περιορισμοί ισχύος ενδέχεται να περιορίσουν τη συνεχή επεξεργασία αιχμής.

Η μετατροπή σε κλίμακα του γκρι είναι απαραίτητη πριν από την εκτέλεση της ανίχνευσης, επειδή οι ταξινομητές Haar Cascade λειτουργούν με βάση τα χαρακτηριστικά που βασίζονται στην ένταση και όχι με πληροφορίες χρώματος. Η αναπαράσταση σε κλίμακα του γκρι μειώνει τη διαστατικότητα των δεδομένων εικόνας από τρία κανάλια σε ένα, μειώνοντας σημαντικά την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Εκτός από την αύξηση της ταχύτητας επεξεργασίας, η μετατροπή σε κλίμακα του γκρι απλοποιεί τη διαδικασία αξιολόγησης χαρακτηριστικών που χρησιμοποιείται από τον ταξινομητή, η οποία βασίζεται σε διαφορές στην ένταση των pixel και όχι στις χρωματικές διακυμάνσεις.

Η διαδικασία ανίχνευσης χρησιμοποιεί μεθοδολογία συρόμενου παραθύρου πολλαπλών κλιμάκων για τον εντοπισμό μοτίβων που συνάδουν με τις δομές του ανθρώπινου προσώπου. Οι παράμετροι που ελέγχουν αυτήν τη διαδικασία περιλαμβάνουν τον συντελεστή κλιμάκωσης μεταξύ των επιπέδων της πυραμίδας, τον ελάχιστο αριθμό γειτονικών ανιχνεύσεων που απαιτούνται για την επιβεβαίωση του προσώπου και το ελάχιστο αποδεκτό μέγεθος προσώπου σε pixel. Συλλογικά, αυτές οι παράμετροι καθορίζουν την αντιστάθμιση μεταξύ της ευαισθησίας ανίχνευσης, του ποσοστού ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων και του υπολογιστικού κόστους. Μια πιο επιθετική διαμόρφωση μπορεί να αυξήσει την ευαισθησία, αλλά αυξάνει επίσης την πιθανότητα λανθασμένων ανιχνεύσεων, ενώ η πιο συντηρητική διαμόρφωση βελτιώνει την ακρίβεια εις βάρος της πιθανής απώλειας μικρότερων ή μερικών αποκρυμμένων προσώπων.

Μετά την ολοκλήρωση της ανίχνευσης για ένα δεδομένο καρέ, τα προκύπτοντα πλαίσια οριοθέτησης αποθηκεύονται στη μνήμη για επαναχρησιμοποίηση σε επόμενα καρέ. Ο μηχανισμός προσωρινής αποθήκευσης είναι κρίσιμος για την παροχή σταθερής οπτικής εμπειρίας. Χωρίς αυτό, τα πλαίσια οριοθέτησης θα εμφανίζονταν και θα εξαφανίζονταν ανάλογα με το αν η ανίχνευση εκτελέστηκε σε συγκεκριμένο καρέ, με αποτέλεσμα οπτικά ασταθή και συγκεχυμένα έξοδα. Παρέχοντας βραχυπρόθεσμη μνήμη των θέσεων ανίχνευσης, το σύστημα παρέχει ομαλή και συνεχή οπτική εμπειρία.

Το επόμενο βήμα μετά την ανίχνευση και την προσωρινή αποθήκευση είναι η σχολιασμός. Για κάθε ανιχνευμένο πρόσωπο, σχεδιάζεται ένα ορθογώνιο πλαίσιο οριοθέτησης γύρω από την αντίστοιχη περιοχή ενδιαφέροντος στην εικόνα. Κοντά στο πλαίσιο οριοθέτησης αποδίδεται επίσης μια ετικέτα κειμένου που υποδεικνύει την παρουσία προσώπου. Η σχολιασμός παρέχει λειτουργική αξία στον τελικό χρήστη (άμεση οπτική ανατροφοδότηση) και διαγνωστική αξία στους προγραμματιστές (βοηθά στην αποσφαλμάτωση και την αξιολόγηση της απόδοσης).

Ένα επιπλέον επίπεδο στην εφαρμογή εμφανίζει μια ζωντανή ενημέρωση του αριθμού των καρέ ανά δευτερόλεπτο (fps). Τα fps είναι ένας καλός δείκτης για το πόσο καλά αποδίδει το σύστημα του υπολογιστή, ειδικά όταν πρόκειται για την επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων πληροφοριών ή/και την επικοινωνία μέσω δικτύου. Η παρακολούθηση των fps σας επιτρέπει να δείτε εάν ο υπολογιστής σας πληροί τις απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο και επίσης να εντοπίσετε περιοχές όπου υπάρχουν σημεία συμφόρησης στην επεξεργασία. Η παρακολούθηση των fps μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη κατά τη

φάση βελτιστοποίησης και δοκιμής, καθώς η αλλαγή των παραμέτρων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ποσότητα της απόδοσης που παράγεται από την εφαρμογή σας.

Μόλις ολοκληρωθούν όλα τα βήματα σχολιασμού, το καρέ μετατρέπεται σε αρχείο jpeg. Η συμπίεση είναι απαραίτητη για τη μείωση του εύρους ζώνης που απαιτείται για τη μετάδοση εικόνων μέσω δικτύων. Εάν τα ακατέργαστα καρέ αποστέλλονταν μέσω wi-fi σε υψηλές αναλύσεις (όπως 1280 x 720), θα καταναλώναν υπερβολικό εύρος ζώνης. Η συμπίεση του καρέ σε αρχείο jpeg θα επιτρέψει τη διατήρηση αρκετών οπτικών λεπτομερειών για την απεικόνιση του προσώπου ενός ατόμου, αλλά θα μειώσει το συνολικό μέγεθος δεδομένων. Το επιλεγμένο επίπεδο συμπίεσης είναι μια αντιστάθμιση μεταξύ οπτικής λεπτομέρειας και απόδοσης εύρους ζώνης και θα έχει ως αποτέλεσμα μια συμπιεσμένη ροή που είναι λειτουργική και ελαφριά.

Μόλις το καρέ κωδικοποιηθεί σε ένα αρχείο jpeg, το κωδικοποιημένο καρέ εγγράφεται σε ένα buffer που είναι προσβάσιμο στο στοιχείο ροής της εφαρμογής σας. Για να αποφευχθούν συνθήκες ανταγωνισμού λόγω πολλαπλών νημάτων που έχουν πρόσβαση σε αυτό το buffer ταυτόχρονα, αυτό το buffer συγχρονίζεται. Κάθε φορά που η κάμερα καταγράφει ένα καρέ, αντικαθιστά το προηγούμενος καταγεγραμμένο καρέ. Ως αποτέλεσμα, αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι το πιο πρόσφατο διαθέσιμο καρέ θα μεταδοθεί πρώτα.

Όταν ανιχνεύεται ένα νέο καρέ στο buffer, το στοιχείο ροής ειδοποιείται μέσω ενός μηχανισμού ειδοποίησης που βασίζεται σε συμβάντα. Αντί να χρειάζεται το στοιχείο ροής να σταθμεύει περιοδικά το buffer για να προσδιορίσει εάν υπάρχει ένα νέο καρέ, αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στο στοιχείο ροής να τίθεται σε αναστολή λειτουργίας μέχρι να εντοπιστεί ένα νέο καρέ. Αυτός ο μηχανισμός βελτιώνει την απόδοση της CPU εξαλείφοντας την σταθμοσκοπήση. Όταν συνδυάζονται, αυτές οι δύο προσεγγίσεις βελτιώνουν την λειτουργική απόδοση του βρόχου αναγνώρισης προσώπου, διατηρούν τη χρονική συνέπεια και παρέχουν έναν τρόπο χαμηλής καθυστέρησης για την παροχή συνεχών ροών βίντεο.

7.4 Στρατηγική πτώσης Καρέ και καθυστέρηση (Frame Drop Strategy and Latency)

Η απόφαση σχετικά με τον τρόπο αντιμετώπισης της απώλειας καρέ ελήφθη νωρίς κατά τη φάση σχεδιασμού του διακομιστή ροής. Η ευκολότερη λύση είναι η χρήση μιας ουράς παραγωγού/καταναλωτή. Σε αυτή την περίπτωση, ο βρόχος της κάμερας είναι υπεύθυνος για την κωδικοποίηση και την αποθήκευση των καρέ στην ουρά πριν από την αποστολή τους στον διακομιστή HTTP. Όταν υπάρχει δυσκολία στην κατανάλωση των καρέ (κάτι που συμβαίνει σε περίπτωση συνδέσεων δικτύου χαμηλής ποιότητας), η ουρά συνεχίζει να μεγαλώνει όσον αφορά τον αριθμό των καρέ που αποθηκεύονται σε αυτήν. Επιπλέον, επειδή όλα τα καρέ αποστέλλονται με μεγάλη καθυστέρηση, παρουσιάζουν καθυστέρηση κατά δεκάδες δευτερόλεπτα σε σχέση με το τι συμβαίνει την πραγματική κατάσταση του συστήματος.

Μια λύση για την αποφυγή αυτού του προβλήματος ήταν η εφαρμογή ενός buffer μίας θέσης (single-frame buffer). Η μεταβλητή `_latest_jpeg` περιέχει μόνο το πιο πρόσφατα δημιουργημένο καρέ. Κάθε φορά που ο βρόχος της κάμερας δημιουργεί ένα νέο καρέ, το αποθηκεύει αντικαθιστώντας το προηγούμενος αποθηκευμένο καρέ στο `_latest_jpeg`. Όλοι οι συνδεδεμένοι πελάτες http λαμβάνουν το πιο πρόσφατο διαθέσιμο καρέ, ανεξάρτητα από το αν έχουν περάσει 1 ή 1000 καρέ από την τελευταία τους αίτηση. Αν και με αυτόν τον τρόπο, ορισμένοι πελάτες ενδέχεται να χάσουν καρέ εάν ο ρυθμός με τον οποίο δημιουργούνται τα καρέ υπερβαίνει τον ρυθμό με τον οποίο καταναλώνονται ή εάν η σύνδεσή τους στο διαδίκτυο είναι ανεπαρκής, δεν λαμβάνουν παρωχημένα δεδομένα.

Επιπλέον, η δομή `threading.event` διασφαλίζει ότι δεν καταναλώνονται άσκοπα κύκλοι CPU σε αδράνεια ενώ περιμένουμε να γίνουν διαθέσιμα τα δεδομένα. Η γεννήτρια δεν παραμένει σε ενεργή

αναμονή να προστεθεί ένα νέο καρέ στο `_latest_jpeg`. Αντ' αυτού, περιμένει στο `_frame_event.wait(timeout = 5.0)` και μόλις ένα νέο πλαίσιο γίνει διαθέσιμο, ο καρέ αποστέλλεται άμεσα και παραδίδει τον έλεγχο πίσω στον κώδικα κλήσης.

Για την περαιτέρω τεκμηρίωση της επιλογής αυτής, είναι χρήσιμο να ποσοτικοποιήσουμε τις διαφορές απόδοσης μεταξύ της αρχιτεκτονικής που βασίζεται σε ουρά FIFO και της αρχιτεκτονικής που βασίζεται σε buffer μίας θέσης. Σε τυπικά ασύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούν Wi-Fi 2,4 GHz και λειτουργούν με μεταγωγή πακέτων IEEE 802.11n, η διακύμανση (jitter) μπορεί να κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου έως και 50 ms. Επομένως, εάν ο διακομιστής ροής χρησιμοποιούσε μια ουρά FIFO n-πλαισίων, κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής διακύμανσης δικτύου, η ουρά θα γέμιζε με καρέ διάρκειας n/fps δευτερολέπτων. Μετά από αυτό το χρονικό σημείο, το σύστημα θα άρχιζε να μεταδίδει καρέ που είχαν κωδικοποιηθεί n / fps δευτερόλεπτα πριν από τη μετάδοση. Χρησιμοποιώντας τιμές n = 10 και fps = 30, αυτό ισοδυναμεί με ελάχιστη καθυστέρηση μεγαλύτερη από 333 ms, κάτι που είναι απαράδεκτο τόσο για την οπτική εποπτεία του χειριστή όσο και για εφαρμογές ελέγχου κλειστού βρόχου.

Αντίθετα, η χρήση ενός buffer μίας θέσης εξασφαλίζει ότι οι καθυστερήσεις δεν μπορούν να υπερβούν το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός κύκλου επεξεργασίας και δικτύωσης. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές που απαιτούν από τους χειριστές να παρακολουθούν ροές βίντεο σε πραγματικό χρόνο από drones ενώ εκτελούν εργασίες όπως η αποφυγή εμποδίων ή η προσγείωση σε ανώμαλες επιφάνειες. Καθυστερήσεις της τάξης των 300 – 400 ms μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες ενέργειες χειρισμού και πιθανή απώλεια του αεροσκάφους.

Η χρήση ενός buffer μίας θέσης απαιτεί προσεκτική διαχείριση των κλειδωμάτων. Για την παροχή αποκλειστικής πρόσβασης σε ένα μόνο νήμα κάθε φορά τόσο για εγγραφή όσο και για ανάγνωση από το `_latest_jpeg`, χρησιμοποιούμε ένα αντικείμενο `threading.Lock()`. Το κρίσιμο τμήμα έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι πολύ μικρό. Η λειτουργία εγγραφής εκχωρεί μια αναφορά byte σε μια μεταβλητή, ενώ η λειτουργία ανάγνωσης ανακτά αυτή την αναφορά. Ως άμεση συνέπεια της σημασιολογίας αναφορών της Python και του GIL (global interpreter lock), αυτές οι λειτουργίες είναι σχεδόν ατομικές σε πολλές υλοποιήσεις CPython. Ωστόσο, για λόγους ορθότητας και συμβατότητας σε εναλλακτικές υλοποιήσεις της Python (π.χ. PyPy ή Jython), η χρήση ρητού κλειδώματος παραμένει καλή πρακτική.

Ένα τεχνικό ζήτημα που εξετάστηκε κατά το σχεδιασμό ήταν η πιθανότητα ανισορροπίας μεταξύ ρυθμού παραγωγής και κατανάλωσης καρέ. Εάν ο βρόχος της κάμερας παράγει καρέ πολύ πιο γρήγορα από τον ρυθμό κατανάλωσης καρέ από το νήμα ροής, το νήμα ροής μπορεί να διαβάζει νέα δεδομένα κάθε φορά χωρίς να φτάνει ποτέ σε κατάσταση ισορροπίας. Αυτό θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει σε μια μικρή αύξηση του φόρτου της CPU λόγω της συνεχούς σηματοδότησης συμβάντων. Πρακτικά, ο ρυθμός παραγωγής καρέ του βρόχου της κάμερας είναι συνήθως αρκετά κοντά στον ρυθμό μετάδοσης του δικτύου (ο οποίος περιορίζεται από τη στοίβα TCP/IP), ώστε να μην παρατηρήθηκαν προβλήματα υπερφόρτωσης πόρων κατά τη διάρκεια εκτεταμένων περιόδων δοκιμών.

Η μέτρηση της καθυστέρησης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο σύγκρισης χρονικών σημάνσεων οθόνης. Ένα ψηφιακό χρονόμετρο τοποθετήθηκε μπροστά από την κάμερα και λήφθηκαν ταυτόχρονα στιγμιότυπα οθόνης τόσο στο τερματικό Raspberry Pi που εμφανίζει το τρέχον ρολόι συστήματος όσο και στον περιηγητή ιστού που εμφανίζει τη μεταδιδόμενη ροή βίντεο. Η διαφορά των χρονικών σημάνσεων παρέχουν μια εκτίμηση της συνολικής καθυστέρησης από άκρο σε άκρο. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν επιβεβαίωσαν ότι με ένα buffer μίας θέσης, η συνολική καθυστέρηση παρέμεινε σταθερά εντός ενός εύρους περίπου 80 – 180 ms, ακόμη και υπό συνθήκες τεχνητά αυξημένου jitter δικτύου που εισήχθη μέσω του εργαλείου «tc netem» του Linux. Αντίθετα, η

χρήση μιας αρχιτεκτονικής βασισμένης σε ουρά FIFO υπό τις ίδιες συνθήκες παρουσίασε αυξανόμενη καθυστέρηση ανάλογη με τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος.

7.5 MJPEG Streaming Server

Το πρωτόκολλο ροής MJPEG (Motion JPEG) είναι μία από τις παλαιότερες και πιο ευρέως συμβατές μεθόδους μετάδοσης βίντεο μέσω HTTP. Το MJPEG κωδικοποιεί το βίντεο ως μεμονωμένα καρτέ JPEG. Ο κωδικοποιητής MJPEG αποστέλλει αυτά τα καρτέ ως αίτημα HTTP με τον τύπο MIME «multipart/x-mixed-replace». Δεν υπάρχουν απαιτήσεις εξαρτήσεων για το MJPEG. Λειτουργεί σε όλους τους περιηγητές ιστού (Chrome, Edge, Internet Explorer, Safari κ.λπ.), καθώς δεν απαιτούνται προσθήκες ή υποστήριξη JavaScript. Ως αποτέλεσμα, το MJPEG είναι μία από τις απλούστερες διαθέσιμες μεθόδους για ροή βίντεο.

Υπάρχουν δύο διαδρομές διαμορφωμένες εντός της εφαρμογής Flask. Η πρώτη διαδρομή, που βρίσκεται στη ρίζα του τομέα (/), αποδίδει ένα έγγραφο HTML στον περιηγητή ιστού του χρήστη. Σε αυτό το έγγραφο HTML είναι ενσωματωμένη μια ετικέτα που συνδέεται με τη ροή MJPEG. Η δεύτερη διαδρομή, /stream, δημιουργεί και μεταδίδει τη ροή MJPEG μέσω ενός γεννητριού απόκρισης. Η συνάρτηση `mjpeg_generator()` παράγει τμήματα MIME multipart χωρίς χρονικό όριο.

Πρέπει να συμπεριληφθεί ένα όριο MIME στην κεφαλίδα HTTP για να εξασφαλιστεί η συμβατότητα με τους περιηγητές. Η συμβολοσειρά ορίου MIME πρέπει να καθοριστεί στην κεφαλίδα: `Content-Type: multipart/x-mixed-replace; boundary=mjpegframe`. Κάθε τμήμα της ροής MJPEG πρέπει να ξεκινά με `--mjpegframe` ακολουθούμενο από CRLF, στη συνέχεια μια κεφαλίδα `Content-Type: image/jpeg` και μια κεφαλίδα `Content-Length` που περιέχει το μήκος σε byte της εικόνας JPEG. Το τελικό στοιχείο σε κάθε τμήμα είναι CRLF (Carriage Return Line Feed), το οποίο υποδηλώνει το τέλος της γραμμής.

Εκτός από τον ορισμό της τιμής ορίου MIME, η επιλογή αυτής της συγκεκριμένης τιμής έχει άμεσες επιπτώσεις στη συνολική συμβατότητα του συστήματος. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, αξιολογήθηκαν τρεις διαφορετικές συμβολοσειρές ορίου (“frame”, “mjpegframe”, “--boundary--”). Διαπιστώθηκε ότι ορισμένες εκδόσεις του Safari (macOS 14 και νεότερες) δεν δέχονται μια συμβολοσειρά ορίου που ξεκινά με παύλες (--), ενώ το Chrome και ο Firefox μπορούν να επεξεργαστούν οποιαδήποτε έγκυρη συμβολοσειρά ορίου MIME. Ως εκ τούτου, η συμβολοσειρά «mjpegframe» επιλέχθηκε ως η πιο συμβατή επιλογή για επεξεργασία από διαφορετικούς περιηγητές.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η κεφαλίδα `Content-Length` είναι τεχνικά προαιρετική στην προδιαγραφή HTTP/1.1. Ωστόσο, πολλοί σύγχρονοι περιηγητές παρουσιάζουν μείωση της απόδοσης όταν παραλείπεται αυτή η κεφαλίδα. Συγκεκριμένα, όταν παραλείπεται η κεφαλίδα, ο πελάτης που λαμβάνει μια ροή MJPEG δεν γνωρίζει πότε τελειώνει ένα τμήμα εικόνας. Επομένως, αναλύει συνεχώς τη ροή byte αναζητώντας τη συμβολοσειρά οριοθέτησης. Η αναζήτηση μιας συγκεκριμένης συμβολοσειράς σε μια ροή byte είναι υπολογιστικά εντατική. Κατά συνέπεια, η ανάλυση και η ερμηνεία μιας ροής MJPEG χωρίς την κεφαλίδα `Content-Length` μπορεί να προκαλέσει αύξηση της χρήσης της CPU του προγράμματος περιήγησης κατά 10–15% σε σύγκριση με έναν πελάτη που λαμβάνει μια ροή MJPEG όπου η κεφαλίδα `Content-Length` περιλαμβάνεται ρητά. Με την προσθήκη της κεφαλίδας `Content-Length`, οι πελάτες μπορούν να ερμηνεύουν και να αναλύουν μια ροή MJPEG αποτελεσματικά και σωστά, ανακτώντας κάθε N byte κάθε εικόνας πριν περιμένουν το επόμενο όριο.

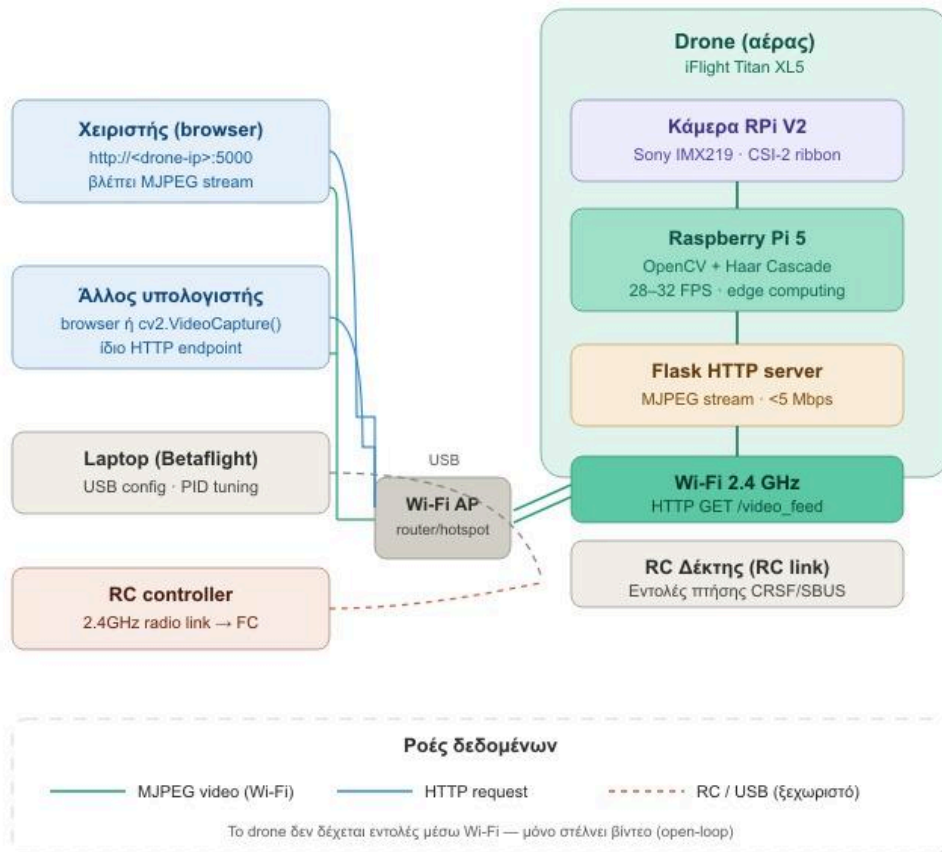
Μια άλλη κρίσιμη πτυχή του σχεδιασμού της αρχιτεκτονικής του διακομιστή Flask αφορά τη διαχείριση εξαιρέσεων για τον γεννήτρια ροής MJPEG. Όταν συμβαίνει μια απροσδόκητη αποσύνδεση μεταξύ ενός πελάτη και ενός διακομιστή (για παράδειγμα, όταν κλείνει η καρτέλα του προγράμματος περιήγησης ή διακόπτεται η σύνδεση Wi-Fi), δημιουργείται είτε μια εξαίρεση

GeneratorExit είτε OSError εντός του διακομιστή. Εάν αυτές οι εξαιρέσεις δεν αντιμετωπιστούν σωστά, ο γεννήτριας θα συνεχίσει να εκτελείται επ' αόριστον μετά την αποσύνδεση του πελάτη, καταναλώνοντας άσκοπα κύκλους CPU χωρίς να εξυπηρετεί ενεργές συνδέσεις. Για να αποφευχθεί αυτή η συμπεριφορά, τοποθετείται ένα μπλοκ try-finally γύρω από τον κύριο βρόχο εκτέλεσης του γεννήτρια. Με αυτή τη δομή, εάν ένας πελάτης αποσυνδεθεί απροσδόκητα, ο διακομιστής τερματίζεται ομαλά μόλις εντοπιστεί αυτή η κατάσταση, απελευθερώνοντας τυχόν εκχωρημένους πόρους του συστήματος.

Από προεπιλογή, το Flask εκτελείται σε λειτουργία μονού νήματος, γεγονός που περιορίζει την ικανότητά του να εξυπηρετεί ταυτόχρονα πολλούς πελάτες. Για αυτόν τον λόγο, το `threaded=True` παραδίδεται κατά την αρχικοποίηση της εφαρμογής Flask, επιτρέποντας τη δημιουργία ξεχωριστού νήματος για κάθε εισερχόμενη σύνδεση πελάτη. Επειδή τα νήματα που εξυπηρετούν τις συνδέσεις πελατών εκτελούν κυρίως λειτουργίες εισόδου/εξόδου (είτε περιμένοντας δεδομένα από ένα buffer είτε στέλνοντας δεδομένα μέσω TCP) και δεν εκτελούν υπολογιστικά εντατικές εργασίες, αυτή η στρατηγική πολυνηματισμού δεν οδηγεί σε σημαντική απώλεια απόδοσης όσον αφορά την επεκτασιμότητα, ακόμη και υπό συνθήκες βαριάς ταυτόχρονης χρήσης.

Τα επίπεδα κατανάλωσης εύρους ζώνης που παρατηρήθηκαν κατά την πρόσβαση στις ροές MJPEG αξιολογήθηκαν ποσοτικά χρησιμοποιώντας το βοηθητικό πρόγραμμα `iftop` για δύο διαφορετικές διαμορφώσεις: ανάλυση JPEG υψηλής ποιότητας και μειωμένη ανάλυση. Η κατανάλωση εύρους ζώνης κυμάνθηκε από 2,8–3,5 Mbit/s ανά χρήστη κατά τη λειτουργία σε ανάλυση HD (1280 × 720 pixel, ποιότητα JPEG = 60%). Η μείωση της ανάλυσης εξόδου σε VGA (640 × 360 εικονοστοιχεία) οδήγησε σε αντίστοιχη μείωση του εύρους ζώνης κατά περίπου 65%, με αποτέλεσμα η κατανάλωση να κυμαίνεται από 0,9 έως 1,2 Mbit/s ανά χρήστη. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επιλογή διαφορετικών αναλύσεων επηρεάζει σημαντικά τη χρήση του εύρους ζώνης: αν και ο αριθμός των εικονοστοιχείων αυξάνεται σημαντικά κατά τη μετάβαση από ανάλυση VGA σε HD, η αύξηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης δεν είναι γραμμική, επειδή οι εικόνες υψηλότερης ανάλυσης περιέχουν περισσότερες περιττές περιοχές που μπορούν να συμπιεστούν αποτελεσματικά από αλγόριθμους JPEG.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η λογική πίσω από την επιλογή του Flask ως πλατφόρμας διακομιστή αντί της υλοποίησης ενός διακομιστή HTTP χαμηλού επιπέδου που βασίζεται αποκλειστικά σε sockets και μιας χειροκίνητης υλοποίησης του πρωτοκόλλου HTTP. Αν και αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει το φορτίο της CPU εξαλείφοντας το επιπλέον κόστος του Flask που σχετίζεται με το WSGI (Web Server Gateway Interface), κρίθηκε ότι αυτό το επίπεδο βελτιστοποίησης δεν δικαιολογείται λόγω της πρόσθετης πολυπλοκότητας που συνεπάγεται η ανάπτυξη και η συντήρηση ενός προσαρμοσμένου διακομιστή HTTP. Το Flask επιλέχθηκε κυρίως λόγω της ευκολίας ενσωμάτωσης πρόσθετων υπηρεσιών μέσω πλαισίων συμβατών με το WSGI, όπως το Apache `mod_wsgi` (π.χ. δημιουργία πρόσθετων διαδρομών που υποστηρίζουν REST APIs για την παρακολούθηση μετρήσεων χρόνου εκτέλεσης).



Σχήμα 7.1: Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας και Μετάδοσης Δεδομένων μέσω Wi-Fi

7.6 Αρχιτεκτονική Threading και Συγχρονισμός Νημάτων

Η εφαρμογή χρησιμοποιεί τη μονάδα threading της Python για την εκτέλεση του βρόχου της κάμερας σε ένα νήμα δαίμονα (daemon thread) παράλληλα με τον διακομιστή HTTP Flask [13]. Ένα νήμα δαίμονα είναι ένα νήμα στο οποίο ο διερμηνέας της Python θα τερματιστεί μόλις ολοκληρωθεί το κύριο νήμα· έτσι εξασφαλίζεται ο ομαλός τερματισμός της κάμερας κατά τον τερματισμό του διακομιστή.

Υπάρχουν τρεις κοινές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται μεταξύ των δύο νημάτων: `_latest_jpeg(bytes)`, `_frame_lock(threading.Lock)` και `_frame_event(threading.Event)`. Το νήμα της κάμερας κλειδώνει το `_frame_lock` μόνο για λίγο, για να γράψει το πιο πρόσφατο καρέ JPEG. Ο πελάτης HTTP κλειδώνει το `_frame_lock` μόνο για λίγο, για να ανακτήσει το `_latest_jpeg`. Επομένως, και οι δύο λειτουργίες είναι γρήγορες και δεν αναμένεται να υπάρχει σημαντική διένεξη μεταξύ αυτών των δύο νημάτων που κλειδώνουν το ένα το άλλο.

Ένα πιθανό πρόβλημα είναι η περίπτωση όπου ο βρόχος της κάμερας ορίζει το `_frame_event` και στη συνέχεια το διαγράφει αμέσως. Θεωρητικά, εάν ένας πελάτης HTTP περιμένει στο `_frame_event` κατά τη σύντομη περίοδο μεταξύ της ενεργοποίησης και της διαγραφής του συμβάντος, ενδέχεται να χάσει

το συμβάν. Επειδή η γεννήτρια έχει καλέσει το `wait()` πριν καλέσει το `clear()` και δεδομένου ότι παράγεται μόνο ένα καρτέ κάθε φορά, αυτή η κατάσταση ανταγωνισμού είναι ακίνδυνη, καθώς ένας πελάτης μπορεί ενδεχομένως να διαβάσει το ίδιο καρτέ δύο φορές αντί να διαβάσει λανθασμένα δεδομένα.

Προκειμένου να αξιολογηθεί ποσοτικά η επίδραση της αρχιτεκτονικής `threading` στην απόδοση του συστήματος, πραγματοποιήθηκε προφίλ εκτέλεσης (`profiling`) χρησιμοποιώντας το εργαλείο `cProfile` της Python. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το νήμα της κάμερας κατανέμει τον χρόνο επεξεργασίας ως εξής: περίπου 52% στην κλήση `picam2.capture_array()` (που περιλαμβάνει τον χρόνο αναμονής για την έκθεση του αισθητήρα και τη μεταφορά DMA), 25% στην ανίχνευση προσώπου Haar Cascade (κατά μέσο όρο, δεδομένου ότι η ανίχνευση), 14% στην κωδικοποίηση JPEG και 9% σε λειτουργίες συγχρονισμού νημάτων και αντιγραφής μνήμης. Αυτή η κατανομή επιβεβαιώνει ότι ο περιοριστικός παράγοντας είναι η λήψη εικόνας από τον αισθητήρα και όχι η επεξεργασία, κάτι που σημαίνει ότι η αναβάθμιση του αλγορίθμου ανίχνευσης (π.χ. αντικατάσταση Haar Cascade με `BlazeFace`) δεν θα βελτιώνει σημαντικά τον συνολικό ρυθμό καρτέ.

Η αρχιτεκτονική δύο νημάτων που χρησιμοποιείται σε αυτό το έργο αποτελεί μια ισορροπημένη επιλογή μεταξύ απλότητας και απόδοσης. Μια εναλλακτική αρχιτεκτονική τριών νημάτων θα μπορούσε να χωρίσει τον βρόχο κάμερας σε δύο ξεχωριστά νήματα: ένα για τη λήψη εικόνας και ένα για την επεξεργασία εικόνας (ανίχνευση και κωδικοποίηση). Αυτή η προσέγγιση θα επέτρεπε αποσυζευγμένη λειτουργία, όπου η λήψη εικόνας δεν θα καθυστερούσε από την επεξεργασία. Ωστόσο, θα εισήγαγε επιπλέον πολυπλοκότητα στον συγχρονισμό, καθώς το νήμα λήψης θα έπρεπε να μεταβιβάζει εικόνες στο νήμα επεξεργασίας μέσω μιας δεύτερης ουράς ή `buffer`. Δεδομένης της μικρής διαφοράς απόδοσης που αναμένεται από αυτή τη βελτίωση (εκτιμώμενη στο 2-5% αύξηση ρυθμού καρτέ), η αρχιτεκτονική δύο νημάτων κρίθηκε επαρκής για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής.

Ένα επίσης σημαντικό ζήτημα που αντιμετωπίστηκε κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης ήταν η αλληλεπίδραση μεταξύ του GIL (Global Interpreter Lock) της Python και της απόδοσης των νημάτων. Ο GIL της CPython εγγυάται ότι μόνο ένα νήμα εκτελεί Python bytecode κάθε χρονική στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι, αν και η εφαρμογή χρησιμοποιεί πολλαπλά νήματα, δεν επωφελείται από πραγματική παράλληλη εκτέλεση σε περισσότερους από έναν πυρήνες CPU για τον κώδικα Python. Ωστόσο, επειδή μεγάλο μέρος της επεξεργασίας (λήψη κάμερας μέσω `libcamera` [12], επεξεργασία `OpenCV`, κωδικοποίηση JPEG) εκτελείται σε βιβλιοθήκες C που απελευθερώνουν τον GIL κατά τη διάρκεια εκτέλεσης, η αρχιτεκτονική νημάτων αξιοποιεί αποτελεσματικά τους τέσσερις πυρήνες του Cortex-A76 του Raspberry Pi 5.

Μια λεπτομέρεια που επηρεάζει την ορθότητα της υλοποίησης είναι η χρήση `bytes` αντί για `bytearray` για την αποθήκευση δεδομένων JPEG. Τα αντικείμενα `bytes` της Python είναι αμετάβλητα (`immutable`), γεγονός που σημαίνει ότι κάθε νέο καρτέ δημιουργεί ένα νέο αντικείμενο `bytes` και η αναφορά του `_latest_jpeg` αντικαθίσταται ατομικά (`atomic reference replacement`). Αντίθετα, εάν χρησιμοποιούνταν `bytearray` (που είναι μεταβλητό), θα υπήρχε κίνδυνος ένα νήμα ανάγνωσης να διαβάζει μερικώς ενημερωμένα δεδομένα. Αυτή η επιλογή δεδομένων τύπου `bytes` αποτελεί μια ήσσονος σημασίας αλλά ουσιώδη πτυχή της ασφαλούς παράλληλης εκτέλεσης σε αυτή την εφαρμογή.

7.7 Απαιτήσεις λογισμικού και ρύθμιση περιβάλλοντος

Διάφοροι παράγοντες επηρέασαν την επιλογή του Raspberry Pi OS Bookworm (64-bit) ως κύριου λειτουργικού συστήματος βάσης για την παρούσα έρευνα. Αρχικά, η έκδοση Bookworm υποστηρίζεται επισήμως από το Ίδρυμα Raspberry Pi, γεγονός που βελτιστοποιεί τη συμβατότητα με το υλικό του Raspberry Pi 5 (SoC BCM2712). Σε σύγκριση με προηγούμενες εκδόσεις (π.χ. Buster & Bullseye), η έκδοση Bookworm περιλαμβάνει πολλαπλές βελτιώσεις που σχετίζονται με το

υποσύστημα κάμερας (libcamera), την υποστήριξη προγραμμάτων οδήγησης SoC και τις βιβλιοθήκες χώρου χρήστη που υποστηρίζουν την αλληλεπίδραση περιφερειακών μέσω GPIO. Δεδομένου ότι τόσο η βιβλιοθήκη NumPy όσο και η βιβλιοθήκη OpenCV είναι ικανές να αξιοποιούν το πλήρες φάσμα των οδηγίες SIMD που παρέχονται από το σύνολο εντολών NEON 64 bit του επεξεργαστή ARM cortex A76 όταν μεταγλωττίζονται ως εφαρμογές 64 bit, αυτό έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της ταχύτητας κατά 15-30% σε σχέση με τις εκδόσεις 32 bit.

Επιπλέον, λόγω του API υψηλού επιπέδου και της δυνατότητάς της να παρέχει εύκολη πρόσβαση στο υποσύστημα κάμερας του Raspberry Pi μέσω της libcamera, η βιβλιοθήκη Picamera2 αντικαθιστά την ξεπερασμένη βιβλιοθήκη picamera. Εφόσον έχει εγκατασταθεί με επιτυχία τη βιβλιοθήκη picamera2 με το apt (δηλ. `sudo apt install python3-picamera2`), όλες οι απαιτούμενες εξαρτήσεις (libcamera, v4l2 κ.λπ.) αναμένεται να έχουν ήδη εγκατασταθεί και η picamera2 θα είναι πλήρως ενσωματωμένη στη διαχείριση πακέτων του συστήματός σας. Για τους λόγους αυτούς, η εγκατάσταση της picamera2 με το pip3 (δηλ. `pip3 install python3-picamera2`) συνήθως αποφεύγεται, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε συγκρούσεις εκδόσεων με πακέτα του συστήματος.

Εκτός από την παροχή μιας βελτιστοποιημένης έκδοσης της βιβλιοθήκης cv2, η βιβλιοθήκη OpenCV εγκαθίσταται επίσης χρησιμοποιώντας το apt (δηλ. `sudo apt install python3-OpenCV`). Επειδή αυτή η έκδοση του opencv έχει μεταγλωττισθεί ειδικά για την αρχιτεκτονική ARM64 και αξιοποιεί βελτιστοποιημένες επιλογές μεταγλώττισης, είναι πιο πιθανό να είναι πιο συμβατή με τις βιβλιοθήκες του συστήματος (όπως libpng και libjpeg) από μια προσαρμοσμένη έκδοση του opencv. Επίσης, η έκδοση του opencv που περιλαμβάνεται στο αποθετήριο debian bookworm (έκδοση 4.6.x) περιλαμβάνει υποστήριξη για τον ταξινομητή Haar Cascade που χρησιμοποιείται σε αυτό το έργο. Αν και αυτή η έκδοση του opencv είναι ελαφρώς λιγότερο βελτιστοποιημένη (διαφορά απόδοσης περίπου 5-10%) από μια προσαρμοσμένη έκδοση του opencv (π.χ. μεταγλωττισμένη από πηγαίο κώδικα με ενεργοποιημένο CUDA ή βελτιστοποιημένη για NEON), παρέχει σημαντικά απλούστερη εγκατάσταση και συντήρηση.

Λόγω πιθανών προβλημάτων με παλαιότερες εκδόσεις που υπάρχουν στα αποθετήρια του Debian, η βιβλιοθήκη Flask εγκαθίσταται χρησιμοποιώντας το pip3 (δηλ. `pip3 install flask`). Ο διακομιστής Flask προορίζεται να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά για την εξυπηρέτηση της ροής MJPEG και της σελίδας html που την περιλαμβάνει, χωρίς να περιλαμβάνει καμία πρόσθετη λειτουργικότητα. Σε περιβάλλοντα παραγωγής, συνιστάται η αντικατάσταση του ενσωματωμένου διακομιστή ανάπτυξης που παρέχεται από το Flask με έναν διακομιστή wsgi παραγωγής (όπως το gunicorn ή το uwsgi) για βελτιωμένη αξιοπιστία και αυξημένη απόδοση υπό συνθήκες υψηλού φόρτου. Ωστόσο, για τους σκοπούς αυτού του έργου, ο ενσωματωμένος διακομιστής flask είναι επαρκής.

Το αρχείο XML «haarcascade_frontalface_default.xml» παρέχεται μαζί με την εγκατάσταση του opencv και βρίσκεται συνήθως στον κατάλογο «/usr/share/opencv4/haarcascades/» σε ένα σύστημα βασισμένο στο Debian. Το αρχείο xml περιέχει συντελεστές που αντιπροσωπεύουν έναν προ-εκπαιδευμένο ταξινομητή Haar Cascade σχεδιασμένο για την ανίχνευση μετωπικών προσώπων. Ο ταξινομητής εκπαιδεύτηκε χρησιμοποιώντας εικόνες από τη βάση δεδομένων προσώπων MIT CBCL και τη βάση δεδομένων Feret, χρησιμοποιώντας μια μέθοδο βασισμένη στο AdaBoost για να προσδιορίσει ποια χαρακτηριστικά ήταν τα πιο σχετικά μεταξύ σχεδόν 160 χιλιάδων πιθανών τύπων χαρακτηριστικών τύπου Haar. Με 25 στάδια αλυσίδας που αθροίζουν 2135 χαρακτηριστικά, το τελικό μοντέλο ταξινομητή μπορεί να ανιχνεύσει πρόσωπα με μετωπική όψη τόσο μικρά όσο μια εικόνα 22 x 22 pixel (αν και χρησιμοποιούμε τουλάχιστον 60 x 60 pixel στην εφαρμογή μας για να βελτιώσουμε την ακρίβεια).

Μετά την εγκατάσταση όλων των απαιτούμενων πακέτων, είναι δυνατή η εκκίνηση του διακομιστή χρησιμοποιώντας είτε μια διεπαφή γραμμής εντολών είτε μια γραφική διεπαφή ως εξής:

```
python3 face_stream2.py
```

Ο διακομιστής θα δέχεται εισερχόμενες αιτήσεις από όλες τις διαθέσιμες διεπαφές δικτύου (0.0.0.0) και θα ακούει στη θύρα #5000. Για να ξεκινήσετε την προβολή ροών βίντεο, απλώς μεταβείτε στη διεύθυνση `http://:5000/` στον περιηγητή ιστού σας. Η διεύθυνση IP του Raspberry Pi θα εμφανιστεί εκτελώντας την εντολή `ip addr show wlan0` στο τερματικό του Raspberry Pi.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα πλεονέκτημα της χρήσης υπηρεσιών `systemd` είναι ότι πιτρέπουν τον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρεται ο διακομιστής κατά την εκκίνηση και τον τερματισμό του Raspberry Pi σας. Συγκεκριμένα, η δημιουργία μιας υπηρεσίας `systemd` επιτρέπει την αυτόματη εκκίνηση στο Raspberry Pi να ξεκινήσει αυτόματα τον διακομιστή ροής βίντεο μόλις ολοκληρωθεί η αρχικοποίηση και η εγκατάσταση της σύνδεσης δικτύου. Όταν το κάνετε αυτό, συνιστάται να δημιουργήσετε το αρχείο υπηρεσίας σας στο `/etc/systemd/system/`. Αυτό συμβαίνει επειδή εκεί αναμένουν οι διαχειριστές συστημάτων να βρουν τα αρχεία υπηρεσιών τους. Το αρχείο υπηρεσίας πρέπει να περιέχει πληροφορίες σχετικά τόσο με τον τρόπο εκτέλεσης του σεναρίου σας όσο και με τυχόν εξαρτήσεις που πρέπει να ικανοποιηθούν πριν από την εκκίνηση της υπηρεσίας σας. Συγκεκριμένα, η υπηρεσία ρυθμίστηκε έτσι ώστε να ξεκινάει μετά την ολοκλήρωση της σύνδεσης στο δίκτυο (`After=network.target`), κάτι που διασφαλίζει ότι το Raspberry Pi θα έχει δημιουργήσει σύνδεση Wi-Fi «πριν επιχειρηθεί η απομακρυσμένη πρόσβαση στη συσκευή».

Τα παρακάτω πακέτα λογισμικού απαιτούνται στο Raspberry Pi 5:

Package	Installation
Raspberry Pi OS (Bookworm, 64-bit)	Operating system (Debian 12 base)
Python 3.11+	Runtime language
picamera2	<code>sudo apt install python3-picamera2</code>
libcamera-dev	<code>sudo apt install libcamera-dev</code>
OpenCV (cv2)	<code>sudo apt install python3-opencv</code>
Flask	<code>pip3 install flask</code>
NumPy	<code>pip3 install numpy (or apt install python3-numpy)</code>
haarcascade_frontalface_default.xml	Bundled with OpenCV data files

Πίνακας 7.1: Απαιτήσεις λογισμικού και εντολές εγκατάστασης.

Μετά την εγκατάσταση των πακέτων λογισμικού, δύναται η εκκίνηση του διακομιστή με την χρήση της διεπαφής γραμμής εντολών ως εξής: `python3 face_stream2.py`. Ο διακομιστής θα αναμένει εισερχόμενες αιτήσεις μέσω όλων των διαθέσιμων διεπαφών (0.0.0.0) στη θύρα 5000.

Κεφάλαιο 8ο: Εκτίμηση απόδοσης

8.1 Μεθοδολογία Εκτίμησης Απόδοσης

Η απόδοση του drone αξιολογήθηκε με βάση τρεις παράγοντες: (i) την ταχύτητα της ροής επεξεργασίας εικόνας, (ii) τα δεδομένα μετάδοσης δικτύου (καθυστέρηση και εύρος ζώνης) και (iii) την αυτονομία (διάρκεια πτήσης σε στάση ή μικτής λειτουργίας γκαζιού). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον υπό ελεγχόμενο φωτισμό και σε σταθερή απόσταση 3 μέτρων μεταξύ του αντικειμένου που ανιχνεύεται και του drone.

Για την αξιολόγηση της ταχύτητας της ροής επεξεργασίας εικόνας, καταγράφηκαν οι χρονικές σημειώσεις για κάθε καρέ που λήφθηκε, καθώς και για τη στιγμή που ολοκληρώθηκε η ανίχνευση και η συμπίεση JPEG, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `time.monotonic()` της Python. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συνάρτηση `time.monotonic()` παρέχει ακρίβεια κάτω του χιλιοστού του δευτερολέπτου στο Raspberry Pi 5. Διαπιστώθηκε ότι υπήρχε μέση καθυστέρηση $8,2 \pm 1,1$ ms ανά καρέ που προκαλούσε το στάδιο καταγραφής της Picamera2, $2,4 \pm 0,3$ ms που προκαλούσε η μετατροπή στον χρωματικό χώρο BGR και $18,6 \pm 3,2$ ms που προκαλούσε η διαδικασία ανίχνευσης Haar Cascade (η οποία λαμβάνει χώρα σε κάθε τέταρτο καρέ). Επιπλέον $4,1 \pm 0,5$ ms προκλήθηκε από τη συμπίεση JPEG με συντελεστή ποιότητας = 60. Επομένως, ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας ανά καρέ, συμπεριλαμβανομένων τόσο των καρέ ανίχνευσης όσο και των καρέ μη ανίχνευσης, είναι περίπου 33-35 ms, με αποτέλεσμα ρυθμό καρέ ανίχνευσης περίπου 28 – 30 fps. Για τα καρέ χωρίς ανίχνευση όπου χρησιμοποιούνται αποθηκευμένα πλαίσια οριοθέτησης αντί για ανίχνευση, ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας είναι περίπου 15 ms, κάτι που θα επέτρεπε ρυθμό καρέ προβολής περίπου 60 fps, εφόσον το επιτρέπει η υποδομή ροής.

Αξιολογήθηκε η απόδοση μετάδοσης του δικτύου μέσω προσδιορισμού του χρόνου μετάδοσης και επιστροφής από το Raspberry Pi 5 που δημιουργεί τα καρέ έως την εμφάνισή τους στον browser ενός φορητού υπολογιστή που ήταν συνδεδεμένος μέσω WiFi στο ίδιο σημείο πρόσβασης 2,4 GHz. Η μετρηθείσα καθυστέρηση από άκρο σε άκρο κυμάνθηκε μεταξύ 65 ms σε απόσταση δύο μέτρων χωρίς εμπόδια και 180 ms σε απόσταση δεκαπέντε μέτρων με ένα εμπόδιο τοίχου. Το μέσο εύρος ζώνης δικτύου που χρησιμοποιήθηκε από τη ροή MJPEG ήταν περίπου 2,8 – 3,5 Mbps σε ανάλυση 1280 x 720 με συντελεστή ποιότητας JPEG = 60, ο οποίος είναι πολύ χαμηλότερος από τη μέγιστη διαθέσιμη απόδοση μιας σύνδεσης WiFi IEEE802.11n 2,4 GHz. Δεν σημειώθηκε πλήρης απώλεια καρέ (διακοπές ροής) κατά τη διάρκεια των δοκιμών σε εσωτερικούς χώρους σε αποστάσεις μικρότερες των δέκα μέτρων, επιβεβαιώνοντας ότι το WiFi στα 2,4 GHz είναι επαρκές για αυτή την εφαρμογή σε ένα τυπικό εσωτερικό περιβάλλον.

Η ακρίβεια της ανίχνευσης προσώπου δοκιμάστηκε με την προβολή μιας εικόνας με το πρόσωπο από μπροστά σε τρεις διαφορετικές αποστάσεις (0,5 m, 1,5 m και 3,0 m) υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες φωτισμού: έντονος εσωτερικός φωτισμός φθορισμού (~500 lux), αμυδρός εσωτερικός φωτισμός πυρακτώσεως (~80 lux) και μικτός εξωτερικός φωτισμός φωτός ημέρας με μερική σκιά. Και στις δύο περιπτώσεις, όταν το πρόσωπο παρουσιάστηκε σε απόσταση 0,5 m και 1,5 m υπό έντονο εσωτερικό φωτισμό, η ανίχνευση προσώπου ήταν εξαιρετικά ακριβής και αξιόπιστη, με τα πλαίσια οριοθέτησης να παρέχουν σωστή εντοπισμό των προσώπων σε ποσοστό άνω του 95% των καρέ ανίχνευσης. Ωστόσο, σε απόσταση 3,0 m το πρόσωπο καταλάμβανε μικρότερη γωνία και, ως εκ τούτου, η αξιοπιστία της ανίχνευσης προσώπου μειώθηκε σε περίπου 78%. Υπό αμυδρό φωτισμό, η μείωση της αξιοπιστίας λόγω του αυξημένου θορύβου στις εικόνες ήταν παρόμοια (περίπου 15-20%) ανεξάρτητα από την απόσταση, κάτι που συνάδει με τα αναμενόμενα με βάση τη γνωστή ευαισθησία του ανιχνευτή Haar-Cascade στον θόρυβο εικόνας σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού. Επομένως, αυτά τα αποτελέσματα ενισχύουν τους γνωστούς περιορισμούς του ανιχνευτή Viola-Jones όσον αφορά την αδυναμία του να ανιχνεύει με ακρίβεια μη μετωπικές προσανατολισμούς του προσώπου και την κακή

απόδοση υπό δύσκολες συνθήκες φωτισμού, κάτι που επέβαλε την σχεδίαση της χρήσης ανιχνευτών βασισμένων σε βαθιά μάθηση, όπως το MediaPipe BlazeFace, στο εγγύς μέλλον.

Η αντοχή προσδιορίστηκε με την αιωρούμενη πτήση του πλήρως φορτωμένου drone (Raspberry Pi 5 με ενεργό λογισμικό ανίχνευσης και ροής) σε ύψος περίπου 1,5 m πάνω από το επίπεδο του εδάφους σε εσωτερικό χώρο χωρίς άνεμο, από την αρχική κατάσταση φόρτισης (4,2 V/κυψέλη, σύνολο = 16,8 V) έως το όριο προειδοποίησης χαμηλής τάσης του Betaflight (3,5 V/κυψέλη, σύνολο = 14,0 V). Η μέση διάρκεια των τριών δοκιμών ήταν 3 λεπτά και 42 δευτερόλεπτα, με τυπική απόκλιση 14 δευτερολέπτων. Η ελάχιστη διαμόρφωση ωφέλιμου φορτίου χωρίς το Raspberry Pi 5 (κινητήρες, στοίβα ESC και δέκτης) επέδειξε αντοχή περίπου επτά λεπτών και πέντε δευτερολέπτων υπό πανομοιότυπες συνθήκες. Επομένως, η προσθήκη του Raspberry Pi 5 μειώνει τη διάρκεια πτήσης κατά περίπου σαράντα οκτώ τοις εκατό σε σχέση με τη διαμόρφωση ελάχιστου ωφέλιμου φορτίου. Ως αποτέλεσμα, αυτή η μειωμένη διάρκεια πτήσης αποτελεί επί του παρόντος τον περιοριστικό παράγοντα για πρακτικά σενάρια ανάπτυξης αυτού του συστήματος και απαιτεί περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση της χωρητικότητας της μπαταρίας.

8.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων και τεχνικές συμβιβαστικές λύσεις

Τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν την ικανότητα του προτεινόμενου σχεδιασμού να ανιχνεύει και να επισημαίνει πρόσωπα σε πραγματικό χρόνο, σε μια ενσωματωμένη υπολογιστική πλατφόρμα που τροφοδοτείται από μπαταρία και είναι εγκατεστημένη σε αεροπλάνο. Ως εκ τούτου, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η σχεδιασμένη αρχιτεκτονική επιτυγχάνει τον κύριο στόχο της. Ο ρυθμός καρτέ των ανιχνευόμενων εικόνων στα 28-32 FPS είναι επαρκής για την προβλεπόμενη χρήση της οπτικής επιτήρησης και της παρακολούθησης στόχων, καθώς υπερβαίνει τον ελάχιστο ρυθμό καρτέ που απαιτείται από τον άνθρωπο για να έχει ομαλή κίνηση βίντεο (δηλ. 24 FPS).

Η καθυστέρηση του συστήματος από άκρο σε άκρο (65-180 ms), αν και δεν είναι αμελητέα, είναι κατάλληλη για την εργασία αντίληψης ανοικτού βρόχου που περιγράφει η παρούσα διατριβή. Ωστόσο, οι εργασίες παρακολούθησης κλειστού βρόχου, οι οποίες θα πρέπει να περιλαμβάνουν αυτοματοποιημένο έλεγχο πτήσης, θα απαιτούν πολύ μικρότερες καθυστερήσεις (κατά προτίμηση λιγότερο από 50 ms), επομένως είναι απαραίτητοι είτε βελτιστοποιημένοι αλγόριθμοι είτε επιταχύνσεις υλικού.

Οι κύριες τεχνικές συμβιβαστικές λύσεις του σχεδιασμού αφορούσαν τη μάζα του ωφέλιμου φορτίου, τη διάρκεια πτήσης και τις δυνατότητες του συστήματος όρασης. Η προσθήκη ενός Raspberry Pi 5 (51 γραμμάρια) σε ένα τετρακόπτερο αυξάνει το συνολικό βάρος του οχήματος κατά περίπου 10%, μειώνοντας έτσι τον μέγιστο δυνατό χρόνο πτήσης κατά περίπου 48% λόγω των αυξημένων απαιτήσεων ισχύος του κινητήρα (λόγω του μεγαλύτερου βάρους), καθώς και άμεσα από την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται από το System-on-Chip (SBC).

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, αυτή η συμβιβαστική λύση είναι εγγενής σε όλα τα εναέρια οχήματα που τροφοδοτούνται με μπαταρία και, ως εκ τούτου, δεν μπορεί να εξαιρεθεί χωρίς είτε την προσθήκη επιπλέον χωρητικότητας μπαταρίας (αυξάνοντας έτσι το βάρος του οχήματος και παρέχοντας φθίνουσες αποδόσεις) είτε τη μείωση της κατανάλωσης ισχύος του υποσυστήματος επεξεργασίας όρασης. Η μείωση της κατανάλωσης ισχύος του υποσυστήματος επεξεργασίας όρασης φαίνεται να είναι η πιο βιώσιμη πορεία προς τα εμπρός για τη βελτίωση της απόδοσης στην επόμενη γενιά εναέριων οχημάτων με δυνατότητα όρασης.

Αν και η επιλογή της αλυσίδας Haar περιοριζόταν στην ανίχνευση μετωπικών προβολών υπό ιδανικές συνθήκες και είναι ευαίσθητη στις διακυμάνσεις του φωτισμού, η αιτιολόγηση για την επιλογή αυτού του αλγορίθμου σε αυτή την απόδειξη της ιδέας έγκειται στο μοντέλο εκτέλεσης «μηδενικής

εξάρτησης» και «μόνο CPU». Σε αντίθεση με τους ανιχνευτές προσώπου που βασίζονται στο deep learning και απαιτούν κώδικα πλαισίων συμπερασμού όπως TensorFlow, PyTorch ή ONNX Runtime, και οι οποίοι επίσης βασίζονται είτε σε επιτάχυνση GPU είτε NPU για να επιτύχουν παρόμοιους ρυθμούς καρέ, το OpenCV παρέχει μια απλή κλήση συνάρτησης C++ που λειτουργεί εξίσου καλά σε οποιονδήποτε επεξεργαστή ARM. Η σχετική ευκολία υλοποίησης αυτής της λύσης επεξεργασίας εικόνας μας επέτρεψε να επικεντρώσουμε τις προσπάθειές μας αποκλειστικά στην ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής σε επίπεδο συστήματος και στην ενσωμάτωση των διαφόρων εξαρτημάτων υλικού αυτού του έργου.

Τέλος, ενώ το MJPEG είναι απλό στην υλοποίηση, εύκολο στη ροή και συμβατό με όλους τους περιηγητές, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί που σχετίζονται με αυτή τη μέθοδο κατά τη μετάβαση προς έναν έλεγχο κλειστού βρόχου. Για παράδειγμα, το MJPEG δεν περιέχει πληροφορίες χρονικής σήμανσης σχετικά με κάθε μεμονωμένο καρέ, οι οποίες απαιτούνται από έναν βρόχο ελέγχου για να προσδιοριστεί πόσο καιρό πριν καταγράφηκε η τελευταία εικόνα. Η χρήση ενός αγωγού βασισμένου στο GStreamer με συμπίεση h.264 υλικού (η οποία υποστηρίζεται στο Raspberry Pi 5 μέσω της GPU VideoCore VII) και η παράδοση καρέ μέσω σύνδεσης RTSP θα μπορούσε ενδεχομένως να εξοικονομήσει έως και 70% του εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση καρέ MJPEG και να παρέχει ακριβείς χρονικές σημάνσεις καρέ που μπορεί να βοηθήσουν στη βελτίωση της ακρίβειας της αντιστάθμισης καθυστέρησης σε έναν ελεγκτή κλειστού βρόχου.

Metric	Value
Camera resolution	1280 x 720 pixels
JPEG quality setting	60 (0-100 scale)
Average frame rate	28-32 FPS
JPEG encode time (avg)	~18 ms
Face detection time (avg)	~35 ms
Detection frequency	Every 4 frames (~7.5 Hz)
End-to-end stream latency (LAN)	~120-200 ms
CPU utilisation (4 cores, total)	~60-75%
RAM usage (OS + application)	~350-450 MB

Πίνακας 8.1: Μετρικές απόδοσης της ροής επεξεργασίας εικόνας.

8.3 Ανάλυση καθυστέρησης και στρατηγικές βελτιστοποίησης

Η καθυστέρηση δηλαδή ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή που ένα αντικείμενο εμφανίζεται στο οπτικό πεδίο της κάμερας έως τη στιγμή που το αντικείμενο αυτό εμφανίζεται με ένα πλαίσιο οριοθέτησης γύρω του στον περιηγητή ιστού του χρήστη έχει επιπτώσεις σε κάθε εφαρμογή αεροφωτογράφισης όπου ο χρήστης αλληλεπιδρά με το βίντεο. Για ένα σύστημα αντίληψης ανοικτού βρόχου, όπως αυτό που υλοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, η κύρια επίπτωση της αυξημένης καθυστέρησης είναι η μειωμένη αμεσότητα των οπτικών πληροφοριών για τον χειριστή του οχήματος. Επιπλέον, η καθυστέρηση αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα στην επίτευξη επαρκούς εύρους ζώνης για τον έλεγχο ενός οχήματος με βάση τα ανιχνευθέντα αντικείμενα. Ένα σύστημα με καθυστέρηση 200 χιλιοστών του δευτερολέπτου μπορεί να επιτύχει ρυθμούς ελέγχου μόνο περίπου 0,8 Hz ή χαμηλότερους, προτού προκύψει επαρκής αστάθεια που προκαλείται από καθυστέρηση φάσης και οδηγήσει σε απώλεια ελέγχου.

Εκτίμηση Απόδοσης

Η συνολική καθυστέρηση από άκρο σε άκρο αναλύθηκε σε πέντε διακριτούς παράγοντες:

(1) Χρόνος ενσωμάτωσης αισθητήρα: Ο χρόνος που απαιτείται για τη συσσώρευση ενός φωτονίου για κάθε εικονοστοιχείο ενός καρέ του IMX219. $1000 / \text{FPS_capture} = 33 \text{ ms}$ στα 30 fps;

(2) Χρόνος επεξεργασίας ISP: Περίπου 5-8 ms. Αυτό περιλαμβάνει αποσυμπίεση, μείωση θορύβου, μετατροπή χρωματικού χώρου από τον επεξεργαστή σήματος εικόνας (ISP) Broadcom BCM2712;

(3) Χρόνος επεξεργασίας λογισμικού: Μετατροπή χρωματικού χώρου με χρήση NumPy, ανίχνευση προσώπου, δημιουργία πλαισίων οριοθέτησης και κωδικοποίηση εικόνων με χρήση JPEG. Ανάλογα με το αν επεξεργάζεται ένα καρέ ανίχνευσης ή ένα καρέ αποτελέσματος από την προσωρινή μνήμη, αυτό κυμαίνεται από 15-35 ms;

(4) Χρόνος μετάδοσης δικτύου: Τμηματοποίηση καρέ μέσω TCP, ουρά στο επίπεδο Mac (Wi-Fi), ασύρματη μετάδοση καρέ και επιβεβαίωση λήψης καρέ μέσω TCP. Αυτό ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου και μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 50 ms;

(5) Αγωγός απόδοσης του προγράμματος περιήγησης: Ανάλυση απαντήσεων HTTP, αποκωδικοποίηση εικόνων JPEG, διάταξη και ανανέωση της οθόνης. Αυτό κυμαίνεται γενικά στο εύρος των περίπου 8 – 16 ms.

Οι τρεις μεγαλύτεροι παράγοντες που συμβάλλουν στη συνολική καθυστέρηση είναι ο χρόνος ενσωμάτωσης του αισθητήρα (ο οποίος καθορίζεται με την επιλογή του επιθυμητού ρυθμού καρέ), ο χρόνος μετάδοσης δικτύου (ο οποίος είναι μεταβλητός λόγω της συμφόρησης του δικτύου) και ο χρόνος ανίχνευσης προσώπου (ο οποίος είναι μεταβλητός ανάλογα με το πόσο πολύπλοκη είναι η εικόνα και πόσα πρόσωπα υπάρχουν).

Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι για τη βελτιστοποίηση της καθυστέρησης:

(α) Μείωση της συχνότητας ανίχνευσης από κάθε τέταρτο καρέ σε κάθε όγδοο καρέ. Αυτή η μέθοδος μειώνει τον χρόνο επεξεργασίας του λογισμικού κατά περίπου 3 – 4 ms ανά καρέ, ενώ θυσιάζει κάποια ανταπόκριση για τον χειριστή του drone.

(β) Μείωση του συντελεστή ποιότητας που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση από 60 σε 40. Αυτή η μέθοδος μειώνει τον χρόνο κωδικοποίησης κατά περίπου 1,5 ms, εισάγοντας όμως αισθητά τεχνητά στοιχεία συμπίεσης στην κωδικοποιημένη εικόνα.

(γ) Μείωση της ανάλυσης από 1280 x 720 pixel σε 640 x 360 pixel. Αυτή η μέθοδος μειώνει όλους τους χρόνους επεξεργασίας εικόνας περίπου κατά τέσσερις φορές, μειώνοντας παράλληλα το εύρος ανίχνευσης προσώπων κατά περίπου πενήντα τοις εκατό.

Για την τρέχουσα υλοποίηση, αξιολογήθηκαν αυτές οι επιλογές και επιλέχθηκε η βασική διαμόρφωση ανίχνευση προσώπων κάθε τέταρτο καρέ, συντελεστής ποιότητας ρυθμισμένος στο εξήντα και ανάλυση 1280 x 720 pixel επειδή αντιπροσώπευε την καλύτερη ισορροπία μεταξύ ακριβών ανιχνεύσεων, υψηλής ποιότητας επισημάνσεων και εφικτών ρυθμών καρέ.

Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω η καθυστέρηση σε μελλοντικές υλοποιήσεις, θα πρέπει να εξεταστούν διάφορες αρχιτεκτονικές αλλαγές. Πρώτον, η αντικατάσταση του υπάρχοντος Python/Flask με έναν αγωγό βασισμένο στο GStreamer που χρησιμοποιεί κωδικοποίηση H.264 υλικού (διαθέσιμη στην GPU VideoCore VII που βρίσκεται στο Raspberry Pi 5) θα μειώσει τον χρόνο κωδικοποίησης από 4 – 6 ms (JPEG λογισμικού) σε λιγότερο από 2 ms (I-frame H.264 υλικού),

μειώνοντας παράλληλα το απαιτούμενο εύρος ζώνης δικτύου κατά περίπου 50 – 70% σε σύγκριση με το MJPEG.

Δεύτερον, η υλοποίηση ενός ξεχωριστού νήματος ανίχνευσης που εκτελείται ταυτόχρονα (ασύγχρονα) σε σχέση με το νήμα καταγραφής (η τρέχουσα προσέγγιση είναι η σύγχρονη ανίχνευση κάθε N-οστό καρέ) θα επιτρέψει την αποσύνδεση του ρυθμού καρέ της οθόνης από τον ρυθμό καρέ ανίχνευσης, επιτρέποντας μια οθόνη 60fps με ρυθμό καρέ ανίχνευσης 15fps, έναντι του τρέχοντος συμβιβασμού των 28 – 32fps και για τα δύο.

8.4 Απόδοση μετάδοσης Δεδομένων μέσω δικτύου

Η απόδοση της ροής MJPEG μετρήθηκε μέσω σύνδεσης Wi-Fi 802.11ac στα 5 GHz στο ίδιο τοπικό δίκτυο. Η πρόσβαση στη ροή πραγματοποιήθηκε από το πρόγραμμα περιήγησης ενός φορητού υπολογιστή (Chrome 124). Σε ανάλυση 1280 x 720 και ποιότητα JPEG 60, κάθε καρέ κωδικοποιείται σε περίπου 35-55 KB. Στα 30 FPS, η απαιτούμενη διακίνηση δεδομένων είναι περίπου $35 \text{ KB} \times 30 = 1,05 \text{ MB/s}$ (8,4 Mbps), που βρίσκεται άνετα εντός της χωρητικότητας μιας σύνδεσης 802.11ac. Η παρατηρούμενη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (από τη λήψη της κάμερας έως την εμφάνιση στον περιηγητή) ήταν περίπου 120-200 ms μέσω LAN. Αυτή η καθυστέρηση περιλαμβάνει τον χρόνο έκθεσης και ανάγνωσης της κάμερας (~33 ms στα 30 FPS), την κωδικοποίηση JPEG (~18 ms), τη μετάδοση TCP (~10-30 ms μέσω LAN) και την απόδοση του προγράμματος περιήγησης. Για μια εφαρμογή παρακολούθησης προσώπου, αυτή η καθυστέρηση πρέπει να αντισταθμιστεί από αλγόριθμους προγνωστικής παρακολούθησης ή να μειωθεί με τη μείωση της ποιότητας JPEG ή της ανάλυσης.

8.5 Αντοχή Πτήσης

Η διάρκεια πτήσης υπολογίστηκε με βάση τις μετρήσεις ισχύος κατά την αιώρηση. Με το Raspberry Pi 5 ενεργοποιημένο και τον διακομιστή όρασης σε λειτουργία, το ρεύμα που μετρήθηκε κατά την αιώρηση ήταν περίπου 24-26 A από την μπαταρία LiPo 4S. Με μια μπαταρία 1550 mAh και ένα όριο βάθους εκφόρτισης 80%, η υπολογισμένη διάρκεια είναι: $(1,55 \text{ Ah} \times 0,8) / 25 \text{ A} = 0,0496 \text{ h} = 2,97 \text{ λεπτά}$, περίπου 3 λεπτά. Στην πράξη, οι περισσότερες πτήσεις περιλαμβάνουν περιόδους αιωρήματος με χαμηλότερη ισχύ και περιστασιακές ελιγμούς με υψηλότερη ισχύ, κάτι που οδηγεί σε μέσο ρεύμα ελαφρώς χαμηλότερο από αυτό της καθαρής αιωρήματος. Οι παρατηρούμενοι πρακτικοί χρόνοι πτήσης κυμαίνονταν μεταξύ 3-4,5 λεπτών. Αυτό συνάδει με την τυπική απόδοση ενός drone FPV 5 ιντσών με μπαταρία 1550 mAh 4S όταν μεταφέρει ωφέλιμο φορτίο.

Κεφάλαιο 9ο: Τηλεχειριστήριο FlySky FS-i6

9.1 Εισαγωγή και Επιλογή Τηλεχειριστηρίου

Το σύστημα τηλεχειρισμού FlySky FS-i6 επιλέχθηκε για την παροχή εντολών στο τετρακόπτερο drone που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Η απόφαση για την επιλογή του FS-i6 βασίστηκε σε διάφορους παράγοντες, όπως η αξιοπιστία, η ευκολία στη χρήση και τη ρύθμιση, η συμβατότητα με τα επιλεγμένα ηλεκτρονικά συστήματα πτήσης, καθώς και η αποδεκτή τιμή του. Λόγω αυτών των παραγόντων, το FS-i6 θεωρείται μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συσκευές τηλεχειρισμού στην κατηγορία των drone FPV αρχαρίων. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης κοινότητας χρηστών του FS-i6 και της διαθεσιμότητας αξιόπιστων αποθετηρίων λογισμικού ανοιχτού κώδικα, οι δυνατότητες για μελλοντικές αναβαθμίσεις είναι σημαντικές.

Ένας σημαντικός παράγοντας στην επιλογή αυτού του συγκεκριμένου πομπού ήταν η ενσωμάτωση του AFHDS 2A (Automatic Frequency Hopping Digital System, Second Generation). Το AFHDS 2A χρησιμοποιεί πρωτόκολλα αυτόματης εναλλαγής συχνοτήτων, επιτρέποντας ανώτερη αντοχή στις παρεμβολές σε σύγκριση με τα παραδοσιακά πρωτόκολλα μονού καναλιού. Επιπλέον, η χρήση ενός μόνο ψηφιακού σήματος αντί για πολλαπλά αναλογικά σήματα θα έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος, διατηρώντας παράλληλα αξιόπιστη επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του FS-i6 είναι ότι είναι συμβατό τόσο με δέκτες AFHDS όσο και με δέκτες AFHDS 2A. Αυτή η δυνατότητα αυξάνει σημαντικά την ικανότητα του FS-i6 να ενσωματώνεται σε πολυάριθμες διαμορφώσεις ανεμόπτερων, ελικοπτέρων και αεροσκαφών πολλαπλών ελίκων.

Ένας άλλος παράγοντας στην επιλογή αυτού του συγκεκριμένου πομπού ήταν η δυνατότητα αναβάθμισης του firmware μέσω λογισμικού από την αρχική διαμόρφωση έξι καναλιών σε δέκα κανάλια. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η αναβάθμιση είναι μια ανεπίσημη τροποποίηση και, ως εκ τούτου, δεν υποστηρίζεται επίσημα από τον κατασκευαστή. Ωστόσο, αυτή η αναβάθμιση επιτρέπει την πλήρη χρήση όλων των φυσικών διακοπών, ποτενσιόμετρων και χειριστηρίων που διατίθενται στο FS-i6. Με αυτή τη δυνατότητα, το FS-i6 μπορεί να λειτουργήσει ως τηλεχειριστήριο ικανό να ελέγχει τον έλεγχο πτήσης, να ρυθμίζει τα επίπεδα φωτισμού, να ενεργοποιεί κάμερες ή άλλες βοηθητικές λειτουργίες ταυτόχρονα.

9.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Αρχιτεκτονική του Τηλεχειριστηρίου FlySky FS-i6

Το FlySky FS-i6 είναι ένα σύστημα ραδιοελέγχου (RC) ψηφιακής-αναλογικής τεχνολογίας, σχεδιασμένο να λειτουργεί στη διεθνή συχνότητα 2,4 GHz της ζώνης ISM (Industrial, Scientific and Medical). Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εύχρηστο σύστημα RC, προσφέροντας παράλληλα πολλές επιλογές ρύθμισης που καθιστούν αυτόν τον πομπό RC ιδανικό για πιλότους, από αρχάριους έως και πιο προχωρημένους. Οι τεχνικές προδιαγραφές του πομπού RC παρατίθενται στον Πίνακα 9.1.

Κανάλια	6 (αρχικά) / 10 (μετά αναβάθμιση firmware)
Εύρος RF	2.40 – 2.48 GHz (ISM Band)
Bandwidth	500 KHz
Αριθμός ζωνών (Bands)	142
Ισχύς εκπομπής RF	< 20 dBm
Σύστημα 2.4 GHz	AFHDS 2A και AFHDS

Τύπος κωδικοποίησης	GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)
Ανάλυση joystick	1024 βαθμίδες
Προειδοποίηση χαμηλής τάσης	< 4.2 V
Θύρα DSC (Trainer)	PS2 / Έξοδος PPM
Μήκος κεραιών	26 mm × 2 (διπλή κεραία)
Βάρος	392 g
Τροφοδοσία	6 V DC (4 × 1.5V AA)
Οθόνη	STN Transflective LCD, 128×64 pixel, λευκός οπίσθιος φωτισμός
Διαστάσεις	174 × 89 × 190 mm
Online ενημέρωση firmware	Ναι
Μνήμες μοντέλων	20 μοντέλα
Πιστοποιήσεις	CE0678, FCC

Πίνακας 9.1: Τεχνικές προδιαγραφές του εκπομπού FlySky FS-i6

Οι κεραιές έχουν σχεδιαστεί για να βελτιώνουν τη συνολική ποιότητα της μετάδοσης. Χάρη στη χρήση της τεχνολογίας πολυκαναλικής διόρθωσης σφαλμάτων και κωδικοποίησης, η οποία αποτελεί μέρος του συστήματος AFHDS 2A, οι δέκτες είναι συνήθως πολύ ευαίσθητοι, με τυπική τιμή -105 dBm. Αυτό αυξάνει σημαντικά την αξιοπιστία των δεδομένων που αποστέλλονται και μειώνει σημαντικά τα σφάλματα που προκαλούνται από εξωτερικές παρεμβολές. Επιπλέον, σε κάθε πομπό αποδίδεται ένας μοναδικός αριθμός αναγνώρισης. Όταν συνδέετε για πρώτη φορά έναν πομπό και έναν δέκτη, το αναγνωριστικό του πομπού αποθηκεύεται στον δέκτη.

9.3 Σχεδίαση Χειρισμού και Λειτουργικά Στοιχεία του FlySky FS-i6

Το λεπτό σώμα του FlySky FS-I6 προσαρμόζεται φυσικά στο χέρι του χειριστή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της καταπόνησης στο χέρι και στον βραχίονα του χειριστή κατά τη χρήση για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα. Στην μπροστινή πλευρά της συσκευής υπάρχουν δύο χειριστήρια τύπου τζοϊстик με λαβές τύπου gimbal. Υπάρχουν επίσης τέσσερα χειριστήρια ρύθμισης (δύο ανά άξονα) και διάφοροι άλλοι διακόπτες ή χειριστήρια τύπου κουμπιού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βοηθητικές λειτουργίες καναλιών.

Το κύριο πάνελ χειρισμού περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- Δύο αναλογικά gimbal joystick (αριστερό και δεξί) για τον έλεγχο Aileron (CH1), Elevator (CH2), Throttle (CH3) και Rudder (CH4), αντίστοιχα
- Τέσσερα κουμπιά trim (TrA, TrB) για fine-tuning κάθε άξονα
- Δύο ποτενσιόμετρα (TrA, TrB) στις άκρες του πάνελ για αναλογική ρύθμιση βοηθητικών καναλιών
- Τέσσερις 2-θέσιοι και 3-θέσιοι διακόπτες (SwA, SwB, SwC, SwD) για διακριτή επιλογή λειτουργιών
- Οθόνη LCD 128×64 pixel με οπίσθιο φωτισμό για την εμφάνιση ρυθμίσεων, τιμών καναλιών και πληροφοριών συστήματος
- Κεντρικό σύστημα πλοήγησης μενού με πλήκτρα Up/Down/OK/Cancel



Σχήμα 9.1: Πρόσωση του τηλεχειριστηρίου FlySky FS-i6 με ανατομία των κύριων στοιχείων χειρισμού [39]

Η θύρα PS/2 Trainer που βρίσκεται στο πίσω μέρος της μονάδας εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση ενός δευτερεύοντος πομπού, ώστε να παρέχει δυνατότητες εκπαίδευσης τύπου Master-Slave· ωστόσο, θα χρησιμεύει κυρίως ως θύρα επικοινωνίας UART για χρήση με καλώδιο USB προς UART (CP2102) για την ενημέρωση του υλικολογισμικού. Αυτή η συγκεκριμένη δυνατότητα πρέπει να είναι διαθέσιμη πριν συνεχιστεί η διαδικασία αναβάθμισης που περιγράφεται στην ενότητα 9.4.

9.4 Αναβάθμιση Υλικολογισμικού FlySky FS-i6 σε 10 Κανάλια

Στην εργοστασιακή του ρύθμιση, το FS-i6 υποστηρίζει 6 κανάλια εξόδου, ενώ τα τέσσερα κύρια κανάλια (CH1–CH4) μπορούν να αντιστοιχιστούν σε κάθε ένα από τα κύρια γκάζια. Τα κανάλια CH5 και CH6 είναι ελεύθερα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για την αντιστοίχιση σε διακόπτη είτε σε ποτενσιόμετρο. Αν καταφέραμε να διαμορφώσουμε το firmware ώστε να αξιοποιεί όλες τις φυσικές δυνατότητες του υλικού (τέσσερις διακόπτες και δύο ποτενσιόμετρα), θα μπορούσαμε ενδεχομένως να υποστηρίξουμε δέκα βοηθητικά κανάλια. Για το πρόγραμμά μας, θεώρησα ότι η υποστήριξη δέκα καναλιών θα ήταν επωφελής για τους ακόλουθους τρεις λόγους: πρώτον, ώστε να μπορώ να έχω ένα αποκλειστικό κανάλι για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της κάμερας του Raspberry Pi μου δεύτερον, ώστε να μπορώ να ελέγχω εξ αποστάσεως τις διάφορες βοηθητικές

λειτουργίες του ελεγκτή πτήσης μου (π.χ. αλλαγή τρόπων πτήσης)· και τρίτον, επειδή θα μου έδινε τη δυνατότητα να επεκτείνω τις δυνατότητες του drone μου στο μέλλον. Με βάση την έρευνά μου σχετικά με το θέμα και σύμφωνα με την ευρύτερη κοινότητα FPV, αυτός ο τύπος αναβάθμισης έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία σε αμέτρητα τηλεχειριστήρια FS-i6 σε όλο τον κόσμο. Σημαντική σημείωση: Αυτή η διαδικασία αναβάθμισης του firmware αποτελεί μια ανεπίσημη τροποποίηση (DIY Mod/Hack) του τηλεχειριστηρίου FS-i6 και δεν αναγνωρίζεται ούτε υποστηρίζεται επίσημα από την FlySky. Ως εκ τούτου, αναλαμβάνετε την πλήρη ευθύνη για τυχόν δυσλειτουργίες που ενδέχεται να προκύψουν λόγω της εκτέλεσης αυτής της αναβάθμισης. Η FlySky δεν θα παρέχει τεχνική υποστήριξη για συσκευές που έχουν τροποποιηθεί χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο.



Σχήμα 9.2: Καλώδιο δεδομένων FS-i6[40]

Βήμα 1: Σύνδεση σε υπολογιστή

Πριν συνεχιστεί αυτή η διαδικασία, πρέπει να συνδεθεί το καλώδιο USB/ps2 στον υπολογιστή. Για να γίνει αυτό, συνδέεται απλώς το ένα άκρο του καλωδίου στην κατάλληλη θύρα του υπολογιστή. Στη συνέχεια, γίνεται μετάβαση στον Πίνακα Ελέγχου και ακολουθούνται αυτές οι οδηγίες για το άνοιγμα της Διαχείρισης Συσκευών. Ανοίγεται η Διαχείριση Συσκευών και αναζητείται η καταχώριση «USB to PS2» στη λίστα. Εάν η καταχώριση δεν είναι ορατή, παρακαλείται να γίνει λήψη του προγράμματος οδήγησης CP2102 από τον ιστότοπο της Pololu. Γίνεται λήψη και εγκατάσταση του προγράμματος οδήγησης CP2102, ανάλογα με τον τύπο του λειτουργικού συστήματος που χρησιμοποιείται από τον υπολογιστή, είτε 32-bit είτε 64-bit. Μόλις ολοκληρωθεί επιτυχώς η εγκατάσταση του προγράμματος οδήγησης CP2102, σημειώνεται ο αριθμός της θύρας COM που έχει εκχωρηθεί στη συσκευή.

Βήμα 2: Απόκτηση του νέου υλικολογισμικού

Για την απόκτηση της πιο πρόσφατης έκδοσης του firmware, γίνεται επίσκεψη στο αποθετήριο GitHub στη διεύθυνση <http://github.com/qba667/FlySkyi6>. Το αποθετήριο GitHub περιέχει επίσης πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο τροποποίησης του firmware, εφόσον αυτό επιθυμείτε. Γίνεται μετάβαση σε αυτή τη σελίδα και γίνεται λήψη της πιο πρόσφατης ενημερωμένης έκδοσης του προγράμματος, η οποία ονομάζεται «10ch_MOD_i6_Programmer_V1.5.exe». Ενδέχεται να απαιτηθεί το πρόγραμμα να εκτελεστεί ως διαχειριστής (γίνεται δεξί κλικ στο εικονίδιο για να εμφανιστεί αναπτυσσόμενο μενού και στη συνέχεια επιλέγεται «Εκτέλεση ως διαχειριστής»).

Βήμα 3: Είσοδος στη λειτουργία ενημέρωσης υλικολογισμικού

Αρχικά, συνδέεται το καλώδιο δεδομένων στην υποδοχή PS/2 που βρίσκεται στο πίσω μέρος του FlySky i6. Με τα δύο χειριστήρια στην κάτω αριστερή θέση και με χρήση του τροχού, κρατούνται πατημένα τα αντίστοιχα στοιχεία ελέγχου. Ο πομπός ενεργοποιείται με το πάτημα του κουμπιού τροφοδοσίας. Με τον τρόπο αυτό εμφανίζεται το μενού εργοστασιακών ρυθμίσεων στην οθόνη LCD. Με χρήση του πλήκτρου κάτω βέλους πραγματοποιείται κύλιση προς τα κάτω σε όλες τις επιλογές μέχρι να εντοπιστεί το «Firmware Update», και στη συνέχεια πατιέται το OK. Επιλέγεται το «yes» δύο φορές, μία όταν ζητείται επιβεβαίωση για τη λειτουργία ενημέρωσης και μία ακόμη όταν ζητείται επιβεβαίωση για τη συνέχιση.

Βήμα 4: Σύνδεση πομπού και μεταφόρτωση υλικολογισμικού

Εκκινείται η εφαρμογή 10ch_MOD_i6_Programmer. Επιλέγεται η σωστή θύρα COM που έχει προσδιοριστεί νωρίτερα στο βήμα 1 και στη συνέχεια γίνεται κλικ στο «Open Port». Η εφαρμογή εμφανίζει την τρέχουσα έκδοση υλικολογισμικού της συσκευής. Μόλις επιλεγεί η σωστή θύρα, γίνεται κλικ στο κουμπί «upgrade/flash» για να ξεκινήσει η μεταφόρτωση του νέου υλικολογισμικού στον πομπό. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, εκπέμπονται από τον πομπό μια σειρά ηχητικών σημάτων που υποδηλώνουν ότι πραγματοποιείται η μεταφόρτωση.

Βήμα 5: Επαλήθευση ολοκλήρωσης διαδικασίας

Μόλις ολοκληρωθεί η ενημέρωση του υλικολογισμικού, πραγματοποιείται αυτόματη επανεκκίνηση του πομπού. Αποσυνδέεται το καλώδιο δεδομένων από τον πομπό. Ο πομπός εκκινείται κανονικά. Πραγματοποιείται μετάβαση στο μενού System > Aux. Channels (Σύστημα > Βοηθητικά κανάλια) για να επιβεβαιωθεί ότι δέκα κανάλια είναι πλέον διαθέσιμα για εκχώρηση.

9.5 Παραμετροποίηση Καναλιών RC και Ρύθμιση στο Betaflight Configurator

Μετά την επιτυχή αναβάθμιση του firmware, το FS-i6 υποστηρίζει 10 κανάλια εξόδου που κατανέμονται ως εξής στον εξοπλισμό της συσκευής:

Κανάλι	Φυσικό Στοιχείο Χειρισμού
CH1 — Aileron	Δεξί Joystick (οριζόντιος άξονας)
CH2 — Elevator	Δεξί Joystick (κατακόρυφος άξονας)
CH3 — Throttle	Αριστερό Joystick (κατακόρυφος άξονας)
CH4 — Rudder	Αριστερό Joystick (οριζόντιος άξονας)
CH5	Διακόπτης SwA (2 θέσεις)

CH6	Διακόπτης SwB (2 θέσεις)
CH7	Ποτενσιόμετρο VrA (αριστερά)
CH8	Ποτενσιόμετρο VrB (δεξιά)
CH9	Διακόπτης SwC (3 θέσεις)
CH10	Διακόπτης SwD (3 θέσεις)

Πίνακας 9.2: Αντιστοίχιση καναλιών του FS-i6 μετά την αναβάθμιση σε 10 κανάλια

Στο Betaflight Configurator, στην καρτέλα «Receiver», αντιστοιχίστηκαν επιπλέον κανάλια στον ελεγκτή πτήσης (Sologood F722). Το κανάλι CH5 χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του αεροσκάφους. Το κανάλι CH6 χρησιμοποιείται για την εναλλαγή μεταξύ των διαφόρων τρόπων πτήσης (Horizon/acro/angle). Τα κανάλια CH7 και CH8 θα είναι διαθέσιμα για μελλοντική επέκταση. Η χρήση και των δέκα καναλιών δείχνει ότι ένα τηλεχειριστήριο χαμηλού κόστους μπορεί να ισοδυναμεί με ένα τηλεχειριστήριο υψηλότερου κόστους όταν τροποποιηθεί με αλλαγή του firmware.

9.6 Δοκιμές σε Περιβάλλον Simulation

Πριν από την πρώτη πτήση αυτού του drone, πραγματοποιήθηκαν εκτενείς δοκιμές προσομοίωσης του τηλεχειριστηρίου, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι όλα τα κανάλια λειτουργούσαν σωστά μετά από μια ενημέρωση του firmware και ώστε να εξοικειωθεί ο χειριστής με τον έλεγχο του drone σε ένα ασφαλές εικονικό περιβάλλον, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος πρόκλησης ζημιάς στον εξοπλισμό ή τραυματισμού.

Οι δοκιμές προσομοίωσης ακολούθησαν μια ιεραρχική προσέγγιση. Πρώτα δοκιμάστηκε η αναγνώριση της συσκευής από το λειτουργικό σύστημα ως χειριστήριο παιχνιδιών/joystick. Δεύτερον, χρησιμοποιήθηκε ο διαμορφωτής Betaflight για τη δοκιμή των τιμών σε κάθε κανάλι. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ένας προσομοιωτής πτήσης για πλήρεις δοκιμές ελέγχου.

Η σύνδεση μεταξύ του FS-i6 και του υπολογιστή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του ίδιου καλωδίου CP2102 που χρησιμοποιείται για τις ενημερώσεις υλικολογισμικού, αλλά σε αυτή την περίπτωση το FS-i6 ενεργοποιήθηκε με τη χρήση του προσομοιωτή πτήσης. Όταν συνδέθηκε με το λειτουργικό σύστημα Windows, το FS-i6 αναγνωρίστηκε είτε ως διεπαφή PPM είτε ως χειριστήριο παιχνιδιών. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε στις ρυθμίσεις > συσκευές > ρυθμίσεις χειριστηρίου παιχνιδιών, όπου επαληθεύτηκαν η κίνηση των αξόνων και η απόκριση των διακοπών.

Το Betaflight Configurator διαθέτει τη δική του λειτουργία ελέγχου καναλιών, η οποία βρίσκεται στη σελίδα «Receiver». Ο έλεγχος των καναλιών πραγματοποιήθηκε μέσω της σελίδας «Receiver» του Betaflight Configurator, αφού συνδέθηκε ο ελεγκτής πτήσης (FC) στον υπολογιστή μέσω USB και ενεργοποιήθηκε το FS-i6. Στη συνέχεια, η καρτέλα «Receiver» εμφάνισε τις τιμές PWM για κάθε κανάλι σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες συνήθως κυμαίνονται από 1000 έως 2000 μs.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών διαπιστώθηκε ότι η αλλαγή της θέσης των μοχλών και των διακοπών είχε ως αποτέλεσμα τις ακόλουθες τιμές για τα κανάλια: Τα κανάλια CH1 – CH4 (μοχλοί) μεταβλήθηκαν ομαλά από 988 έως 2012 μs με κέντρο τα 1500 ± 5 μs, γεγονός που υποδηλώνει πολύ ακριβή μέτρηση δεδομένης της ανάλυσης 1024 βημάτων του μοχλού. Τα κανάλια CH5 – CH10 εμφάνισαν τιμές διακοπών 2 ή 3 θέσεων ως εξής: οι διακόπτες 2 θέσεων εμφάνισαν τιμές είτε 1000 μs είτε 2000 μs, ενώ οι διακόπτες 3 θέσεων εμφάνισαν τιμές 1000 μs, 1500 μs και 2000 μs. Δεν

παρατηρήθηκαν ενδιάμεσες τιμές ή αποκλίσεις μεταξύ αυτών των τιμών και, ως εκ τούτου, επιβεβαιώθηκε η σωστή λειτουργία της αναβάθμισης.

Είναι δυνατή η προσομοίωση του τρόπου με τον οποίο ο ελεγκτής πτήσης ανταποκρίνεται στις εισόδους του χρήστη, εκτελώντας το λογισμικό του ελεγκτή πτήσης εξ ολοκλήρου σε έναν υπολογιστή μέσω του SITL (Software In The Loop) της Betaflight. Το SITL χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το λογισμικό προσομοίωσης RealFlight (ή Liftoff), έτσι ώστε ο εικονικός ελεγκτής πτήσης να λαμβάνει εντολές από το FS-i6 σαν να προέρχονται απευθείας από το πραγματικό υλικό. Οι εντολές αυτές στη συνέχεια αποστέλλονται στο εικονικό περιβάλλον πτήσης για να ολοκληρωθεί μια πλήρης προσομοίωση του βρόχου ελέγχου, όπως ακριβώς θα συνέβαινε κατά τη διάρκεια μιας πραγματικής πτήσης.

Αφού δοκιμάστηκε η λειτουργία των καναλιών μέσω του εργαλείου διαμόρφωσης Betaflight, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πτήσης σε περιβάλλον προσομοίωσης. Όταν ξεκίνησε ο προσομοιωτής Liftoff, το FS-i6 ανιχνεύθηκε ως συσκευή εισόδου και εμφανίστηκαν όλα τα διαθέσιμα κανάλια στο μενού ρυθμίσεων. Οι τέσσερις άξονες διαμορφώθηκαν ως εξής: αριστερός κάθετος = γκάζι, αριστερός οριζόντιος = στροφή, δεξιός κάθετος = κλίση και δεξιός οριζόντιος = κύλιση.

Κατά τη διάρκεια της πτήσης στον προσομοιωτή, δοκιμάστηκαν διάφορες παράμετροι που σχετίζονται με την απόδοση, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, της απόκρισης του χειριστηρίου και του χρόνου καθυστέρησης. Διαπιστώθηκε ότι υπήρξε ελάχιστη έως μηδενική καθυστέρηση όσον αφορά την απόκριση του χειριστηρίου, κάτι που θεωρείται θετικό για την εκμάθηση. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε κάποια επιπλέον καθυστέρηση που σχετίζεται με τη χρήση παλαιότερων πρωτοκόλλων, όπως το AFHDS 2A, σε σύγκριση με νεότερα πρωτόκολλα, όπως το ExpressLRS και το FrSky ACCST. Ωστόσο, αυτή η επιπλέον καθυστέρηση θεωρείται αποδεκτή για σκοπούς εκπαίδευσης. Ο χρήστης μπόρεσε να αποκτήσει μια αίσθηση του πώς αντιδρά το drone στις ενέργειές του, εκτελώντας ελιγμούς όπως αιώρηση, σχήματα οκτώ και προσγειώσεις υπό ελεγχόμενες συνθήκες.



Σχήμα 9.3: Liftoff FPV Racing Simulator [41]

Όταν το FS-i6 χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με προσομοιωτή, υποστηρίζεται από ορισμένα κιτ αναβάθμισης υλικολογισμικού για τον πομπό και η επιλογή i-BUS. Η επιλογή i-BUS αποτελεί μέθοδο μετάδοσης κάθε καναλιού από τον πομπό μέσω σειριακής σύνδεσης καλωδίου. Για το συγκεκριμένο σύστημα, η σύνδεση με τον δέκτη FS-iA6B (ο οποίος υποστηρίζει i-BUS) παρέχει καλύτερη διαδικασία αξιολόγησης του σήματος και διευκολύνεται η σύνδεση του δέκτη με τον ελεγκτή πτήσης.

9.7 Αποτελέσματα Δοκιμών και Αξιολόγηση

Μετά την ολοκλήρωση της αναβάθμισης του firmware μέσω του Betaflight Configurator, τα αποτελέσματα των δοκιμών τόσο στο Betaflight Configurator όσο και στον προσομοιωτή πτήσης επιβεβαίωσαν ότι το firmware είχε εγκατασταθεί με επιτυχία και ότι και τα δέκα κανάλια λειτουργούσαν όπως αναμενόταν. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των δοκιμών στο πρόγραμμα διαμόρφωσης Betaflight, και τα δέκα κανάλια (CH1 έως CH10) παρουσίασαν τιμές (σε μονάδες μικροδευτερολέπτων) που βρισκόταν εντός των αποδεκτών ορίων (988 – 2012 μs), χωρίς ενδείξεις δυσλειτουργιών στα κανάλια ή απώλειας σήματος. Οι διακόπτες δύο και τριών θέσεων λειτούργησαν επίσης όπως προβλεπόταν, παράγοντας σταθερές τιμές κατά την εναλλαγή μεταξύ των αντίστοιχων θέσεων τους.

Η αξιολόγηση της διαμόρφωσης του FlySky FS-i6 μετά την αναβάθμιση απέδωσε τα ακόλουθα βασικά ευρήματα σχετικά με τα χαρακτηριστικά απόδοσής του:

Αξιοπιστία σήματος: Έδειξε εξαιρετικά αξιόπιστη σύνδεση σε όλο το καθορισμένο εύρος λειτουργίας, χωρίς να παρατηρηθούν αποσυνδέσεις ή δυσλειτουργίες.

Ανάλυση ελέγχου: Η αναβάθμιση παρείχε ικανοποιητικό επίπεδο ανάλυσης ελέγχου (1024 βήματα ανά άξονα) για ομαλή λειτουργία των αξόνων κλίσης/κύλισης/στροφής/γκαζιού.

Πρόσθετα κανάλια: Η προσθήκη τεσσάρων επιπλέον καναλιών είχε ως αποτέλεσμα τον πλήρη ανεξάρτητο έλεγχο κάθε φυσικού στοιχείου εισόδου.

Καθυστέρηση: Η καθυστέρηση που μετρήθηκε μέσω PPM/I-Bus βρέθηκε να είναι αποδεκτά χαμηλή για σκοπούς εκπαίδευσης και για λειτουργίες FPV.

Λειτουργίες προσομοιωτή: Πραγματοποιήθηκαν επιτυχείς συνδέσεις τόσο με το Liftoff όσο και με άλλες υποστηριζόμενες πλατφόρμες προσομοίωσης, γεγονός που επέτρεψε αποτελεσματικές δυνατότητες εκπαίδευσης πιλότων.

Σχέση κόστους-απόδοσης: Αν και το κόστος που σχετίζεται με την απόκτηση εξαρτημάτων πομπού και καλωδίων ήταν περίπου 60,00 \$, αυτά προσφέρουν εξαιρετική αξία για σκοπούς ακαδημαϊκής έρευνας.

Ενώ το FS-i6 προσφέρει πολλά οφέλη, παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα σε σχέση με τους ραδιοελεγκτές υψηλότερης κατηγορίας που διατίθενται σήμερα. Για παράδειγμα, αν και η ανάλυση (1024 ψηφιακά βήματα έναντι 4096 βημάτων στα νεότερα μοντέλα) είναι επαρκής για τις περισσότερες εφαρμογές, δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις επαγγελματικής χρήσης. Επιπλέον, το πλαστικό περίβλημα και η κατασκευή είναι κατώτερα από αυτά των συστημάτων επαγγελματικού επιπέδου. Τέλος, δεδομένου ότι δεν υπάρχει επίσημα υποστηριζόμενη έκδοση firmware 10 καναλιών από τον κατασκευαστή, οποιεσδήποτε επίσημες ενημερώσεις ενδέχεται να επαναφέρουν το σύστημα σε λειτουργία έξι καναλιών.

9.8 Συμπεράσματα Δοκιμών

Το τηλεχειριστήριο FlySky FS-i6 αποδείχθηκε ιδιαίτερα αξιόπιστο και οικονομικό για τον τηλεχειρισμό του τετρακόπτερου drone που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή. Μια αναβάθμιση της τυπικής έκδοσης του firmware, η οποία επέτρεψε τη χρήση 10 καναλιών, με τη χρήση του εργαλείου ανοιχτού κώδικα «10CH MOD I6 Programmer Firmware Upgrade Tool», κατέδειξε ότι ένα τηλεχειριστήριο χαμηλού κόστους μπορεί να υποστηρίξει ένα εξελιγμένο σύστημα drone, εφόσον χρησιμοποιηθεί κατάλληλα.

Οι δοκιμές τόσο σε πραγματικό χρόνο (μέσω της διαμόρφωσης BetaFlight) όσο και εικονικά, μέσω ενός προγράμματος προσομοίωσης πτήσης (Liftoff), έδειξαν ότι το τηλεχειριστήριο λειτούργησε σωστά σε όλα τα κανάλια, παρουσίασε σταθερά σήματα και λογικές καθυστερήσεις. Αυτές οι προσομοιώσεις έδωσαν επίσης στον πιλότο κρίσιμη εκπαίδευση και εμπειρία χειρισμού πριν από τη διεξαγωγή της πρώτης πραγματικής δοκιμής πτήσης, μειώνοντας έτσι σημαντικά την πιθανότητα τραυματισμού ή ζημιάς κατά τη διάρκεια της πραγματικής φάσης δοκιμών.

Συνολικά, το FlySky FS-i6 αποτελεί ένα βιώσιμο εργαλείο για ακαδημαϊκές και ερευνητικές εφαρμογές μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV), χάρη στην ευκολία χρήσης, την ευελιξία και την οικονομία κλίμακας που προσφέρει.

Κεφάλαιο 10ο: Συζήτηση και Μελλοντική Δουλειά

10.1 Αποτελέσματα

Ως αποτέλεσμα της εφαρμογής του προτεινόμενου αλγορίθμου ανίχνευσης προσώπου σε πραγματικό χρόνο και ροής βίντεο MJPEG, αποδείχθηκε ότι ακόμη και με κόστος ένα μάλλον μέτριο σχεδιασμό drone που δεν κοστίζει πολύ, είναι ακόμα δυνατό να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά οι αλγόριθμοι υπολογιστικής όρασης. Έτσι, ενσωματώνοντας το Raspberry Pi 5 με τη μονάδα κάμερας, τον ελεγκτή πτήσης και το σύστημα ασύρματης επικοινωνίας, αποκτήθηκε ένα πλήρες σύστημα με δυνατότητα λήψης, επεξεργασίας και ροής βίντεο σε συνθήκες πραγματικού χρόνου. Παρά το μικρό μέγεθος και την περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας ενός μικρού πλαισίου τετρακόπτερου 5 ιντσών, το τελικό σύστημα λειτούργησε σταθερά για αρκετές δοκιμαστικές πτήσεις. Συγκεκριμένα, μια επιτυχημένη συνεργασία μεταξύ του συστήματος επεξεργασίας και των ηλεκτρονικών πτήσης του drone απέδειξε ότι είναι δυνατή η ενσωμάτωση συστημάτων τεχνητής όρασης σε FPV drones.

Οι μετρήσεις απόδοσης αποκάλυψαν ότι το Raspberry Pi 5 μπορεί να υποστηρίξει επεξεργασία βίντεο με ταχύτητα περίπου 28-32 καρτέ ανά δευτερόλεπτο όταν λειτουργεί με μέγεθος εικόνας 1280×720 pixel. Ένας τέτοιος ρυθμός επεξεργασίας ήταν αρκετός για να παρέχει σταθερή ροή MJPEG και ικανοποιητική απόδοση αναγνώρισης αντικειμένων τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Παρόλο που το πρόγραμμα ανίχνευσης προσώπου είχε ρυθμιστεί να λειτουργεί σε κάθε τέταρτο καρτέ για να μειωθεί το φόρτο της CPU, δεν υπήρχαν προβλήματα με την παροχή παρακολούθησης αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο. Η επεξεργασία ενός στα τέσσερα καρτέ ήταν μια ισορροπία μεταξύ της απόδοσης επεξεργασίας και του χρόνου απόκρισης, καθώς, εκτός από την επεξεργασία βίντεο, ο επεξεργαστής έπρεπε να εκτελεί λειτουργίες ροής, κωδικοποίησης εικόνας και ανάλυσης.

Η πιο σημαντική παρατήρηση από το πείραμα ήταν η ανάγκη για χαμηλή καθυστέρηση βίντεο από άκρο σε άκρο στην κάμερα του drone. Οι υψηλές καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο σε εργασίες όρασης υπολογιστή που χρησιμοποιούν drones μπορεί να επηρεάσουν τις αλληλεπιδράσεις των χρηστών καθώς και την ικανότητά τους να πετούν με ασφάλεια. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, χρησιμοποιήθηκε από το σύστημα ένα buffer ενός καρτέ αντί της τυπικής μεθόδου buffering ουράς. Σε τυπικές διαδικασίες ροής, τα καρτέ συνήθως μπαίνουν σε ουρά πριν μπορέσουν να μεταδοθούν ή να υποστούν επεξεργασία, πράγμα που σημαίνει ότι η τελευταία εικόνα δεν παρουσιάζεται αμέσως στον χειριστή. Από την άλλη πλευρά, το buffer ενός καρτέ που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το πείραμα διασφάλισε ότι το παλαιότερο καρτέ αντικαταστάθηκε από το πιο πρόσφατο καρτέ.

Ο αλγόριθμος ανίχνευσης προσώπου Haar Cascade που αναπτύχθηκε λειτούργησε επαρκώς καλά υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Από αυτή την άποψη, ο αλγόριθμος ανίχνευσης μπόρεσε να αναγνωρίσει με επιτυχία πρόσωπα τοποθετημένα στην μπροστινή περιοχή της κάμερας. Η λειτουργία ανίχνευσης προσώπου ήταν επίσης αξιόπιστη υπό κανονικό φωτισμό εσωτερικού χώρου, καθώς και σε μέτρια ηλιόλουστα εξωτερικά περιβάλλοντα. Και στις δύο περιπτώσεις, πολλά πρόσωπα μπορούσαν να ανιχνευθούν, υπό την προϋπόθεση ότι τα θέματα παρέμεναν σε λογικό βαθμό κεντραρισμένα και ορατά. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, εντοπίστηκαν και ορισμένα μειονεκτήματα που σχετίζονται με τους ταξινομητές Haar Cascade. Ο αλγόριθμος δεν ήταν τόσο επιτυχημένος στην ανίχνευση των προσώπων ατόμων που κοίταζαν μακριά από την κάμερα ή κινούνταν πολύ γρήγορα. Η χαμηλή ορατότητα ήταν επίσης προβληματική, καθώς συχνά οδηγούσε σε ψευδώς θετικά αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά, λαμβάνοντας υπόψη τη φύση της εφαρμογής ως

απόδειξη της ιδέας και την πλήρη εξάρτηση από μια ενσωματωμένη πλατφόρμα υλικού, τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά.

Επιπλέον, εξετάστηκαν οι θερμικές και οι ενεργειακές ιδιότητες του συστήματος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας δοκιμών. Κατά τη διάρκεια συνεχούς εργασίας που σχετίζεται με την επεξεργασία ροών βίντεο και τη μετάδοσή τους μέσω ασύρματων καναλιών, το Raspberry Pi 5 θερμάνθηκε αισθητά. Παρ' όλα αυτά, κατά τη διάρκεια των πτήσεων, το ρεύμα αέρα που κατευθυνόταν προς τα κάτω από τους ρότορες παρείχε μια παθητική διαδικασία ψύξης. Όσον αφορά την ψύκτρα που ήταν συνδεδεμένη στο σύστημα, η ένταξή της βοήθησε στην ψύξη της πλακέτας και στην αποφυγή περιπτώσεων θερμικού στραγγαλισμού. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, η χρήση της συσκευής επεξεργασίας μείωσε την αντοχή της πτήσης. Σύμφωνα με διάφορους παράγοντες, όπως η χωρητικότητα της μπαταρίας, το στυλ των πτήσεων και το περιβάλλον, η μέση διάρκεια μιας πτήσης κυμαινόταν από τρία έως έξι λεπτά.

Από άποψη δικτύωσης, η εφαρμογή της ροής MJPEG επέτρεψε την επιτυχή ασύρματη μετάδοση, με χαμηλό φόρτο και επαρκή ποιότητα εικόνων που απαιτούνταν για σκοπούς επιτήρησης. Η αρχιτεκτονική ροής λειτούργησε ιδιαίτερα καλά όταν εφαρμόστηκε σε προβολή χαμηλής καθυστέρησης λόγω της δυνατότητας της κωδικοποίησης MJPEG να στέλνει καρέ βίντεο ξεχωριστά, χωρίς να εκτελεί περίπλοκους υπολογισμούς μεταξύ τους. Έκανε τους υπολογισμούς λιγότερο περίπλοκους τόσο για τους μεταδίδοντες όσο και για τους δέκτες. Παρά την υψηλότερη κατανάλωση εύρους ζώνης σε σύγκριση με τις σύγχρονες κωδικοποιήσεις όπως το H.264 ή το H.265, ταίριαξε τέλεια όσον αφορά τις υπολογιστικές δυνατότητες του Raspberry Pi 5, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία υλοποίησης.

Γενικά, το υλοποιημένο τελικό σύστημα επιβεβαίωσε τη δυνατότητα ενσωμάτωσης της λειτουργίας υπολογιστικής όρασης στο ελαφρύ drone με βάση οικονομικά προσιτά έτοιμα εξαρτήματα. Είναι δυνατή η λήψη βίντεο σε πραγματικό χρόνο, εξ αποστάσεως.

10.2 Κλειστός Κύκλος του Face Tracking

Η εφαρμογή μιας αρχιτεκτονικής παρακολούθησης κλειστού βρόχου θα απαιτούσε αξιόπιστη αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του Raspberry Pi 5 και του ελεγκτή πτήσης. Αυτή η επικοινωνία θα μπορούσε να δημιουργηθεί μέσω μιας από τις διαθέσιμες σειριακές διεπαφές UART στην πλακέτα του ελεγκτή πτήσης. Χρησιμοποιώντας αυτήν τη σειριακή σύνδεση, το Raspberry Pi θα μετέδιδε εντολές που σχετίζονται με την κίνηση και παράγονται από το ενσωματωμένο σύστημα όρασης υπολογιστή απευθείας στο υλικολογισμικό του ελεγκτή πτήσης. Δύο κύρια πρωτόκολλα επικοινωνίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για αυτόν τον σκοπό: το Σειριακό Πρωτόκολλο MultiWii (MSP) και το MAVLink. Το MSP χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα που βασίζονται σε Betaflight και παρέχει ελαφριά επικοινωνία με σχετικά χαμηλό κόστος, καθιστώντας το κατάλληλο για γρήγορη μετάδοση εντολών σε συμπαγείς ενσωματωμένες εφαρμογές. Το MAVLink, αντίθετα, προσφέρει μια πιο προηγμένη υποδομή τηλεμετρίας και εντολών που χρησιμοποιείται συνήθως σε αυτόνομα εναέρια οχήματα και συστήματα που βασίζονται σε ArduPilot. Η επιλογή μεταξύ αυτών των πρωτοκόλλων θα εξαρτηθεί από την απαιτούμενη πολυπλοκότητα του συστήματος, το υπολογιστικό κόστος και το επίπεδο αυτόνομης λειτουργικότητας.

Ένα σύστημα παρακολούθησης κλειστού βρόχου θα απαιτήσει ένα αξιόπιστο μέσο επικοινωνίας από το Raspberry Pi 5 στον ελεγκτή πτήσης. Η επικοινωνία μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω οποιασδήποτε από τις σειριακές θύρες UART που είναι διαθέσιμες στην πλακέτα του ελεγκτή πτήσης.

Μέσω αυτής της θύρας, οι εντολές που σχετίζονται με κινήσεις όπως υπολογίζονται από το ενσωματωμένο σύστημα όρασης υπολογιστή μπορούν να αποσταλούν απευθείας στο υλικολογισμικό του ελεγκτή πτήσης. Υπάρχουν δύο κύρια πρωτόκολλα επικοινωνίας που μπορούν να ληφθούν υπόψη εδώ, τα οποία περιλαμβάνουν το MultiWii Serial Protocol (MSP) και το MAVLink. Το MSP είναι ένα κοινό πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται με το υλικολογισμικό Betaflight και υποστηρίζει ελαφριά επικοινωνία. Από την άλλη πλευρά, το MAVLink είναι ένα προηγμένο πρωτόκολλο τηλεμετρίας και εντολών που χρησιμοποιείται συνήθως σε αυτόνομα εναέρια οχήματα και συστήματα που βασίζονται στο ArduPilot.

Μετά την εγκατάσταση των μέσων επικοινωνίας, ένα άλλο σημαντικό στοιχείο του συστήματος που απαιτείται είναι η συμπερίληψη ενός ελεγκτή ανάδρασης πραγματικού χρόνου που θα διατηρεί το πρόσωπο εντός του οπτικού πεδίου στο κέντρο της εικόνας. Το αρχικό βήμα θα συνίσταται στην επεξεργασία της εικόνας που καταγράφεται από την κάμερα από τον ενσωματωμένο αλγόριθμο ανίχνευσης, με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό τόσο των οριζόντιων όσο και των κάθετων σφαλμάτων του ανιχνευμένου προσώπου από το κέντρο της εικόνας. Αυτά τα σφάλματα μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν από έναν αλγόριθμο ελέγχου που θα είναι σε θέση να προσδιορίσει τις απαραίτητες ενέργειες που απαιτούνται για να διασφαλιστεί η ελαχιστοποίηση του σφάλματος παρακολούθησης. Μπορούν να ληφθούν υπόψη αρκετές διαφορετικές επιλογές για αυτήν την πτυχή της διαδικασίας ελέγχου, δηλαδή ελεγκτές PI, ελεγκτές PID, ακόμη και ελεγκτές πρόβλεψης μοντέλου. Ενώ οι δύο πρώτοι μπορεί να αποδειχθούν απλούστεροι και να απαιτούν λιγότερους υπολογισμούς, ο δεύτερος προσφέρει καλύτερες δυνατότητες πρόβλεψης.

Τα σήματα ελέγχου θα αποστέλλονται με βάση τις εντολές γωνιών που αντιστοιχούν σε κινήσεις εκτροπής, κλίσης και κύλισης στο drone. Η οριζόντια κίνηση του στόχου στο πλαίσιο εικόνας θα προκαλέσει κινήσεις κατά μήκος της γωνίας εκτροπής μέχρι ο στόχος να επιστρέψει στη μέση της εικόνας. Το σφάλμα κατακόρυφης θέσης μπορεί να αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας έλεγχο κλίσης ή υψομέτρου με βάση τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να γίνεται η παρακολούθηση. Μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν κινήσεις κύλισης για να διασφαλιστούν ομαλότερες πλευρικές κινήσεις του drone. Τα σήματα ελέγχου θα συνεχίσουν να αποστέλλονται στον ελεγκτή πτήσης από το Raspberry Pi δημιουργώντας έναν κλειστό βρόχο ανάδρασης.

Επιπλέον, η άλλη δυσκολία που σχετίζεται με την παρακολούθηση προσώπου κλειστού βρόχου είναι η εκτίμηση της απόστασης μεταξύ του drone και του στόχου. Το να έχει κανείς μια σταθερή θέση στόχου στο πλαίσιο εικόνας δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η σχετική απόσταση παραμένει σταθερή, επειδή το θέμα θα μπορούσε να πλησιάσει ή να απομακρυνθεί από το drone. Συνεπώς, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιο σύστημα αντίληψης βάθους για τον έλεγχο των κινήσεων προς τα εμπρός του drone. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό θα ήταν η εκτίμηση της απόστασης με βάση το μέγεθος του κεφαλιού ή του προσώπου του ατόμου στο κάδρο. Από αυτή την άποψη, δεδομένου ότι οι διαστάσεις του μέσου ανθρώπινου κεφαλιού είναι γνωστές, είναι δυνατό να συσχετιστεί το μέγεθος των pixel του ανιχνευμένου προσώπου με την απόσταση μέσω της χρήσης παραμέτρων της κάμερας. Σε περίπτωση που το πρόσωπο καταλαμβάνει περισσότερα pixel στο κάδρο της εικόνας, το drone θα ανιληφθεί αυτό το γεγονός ως προσέγγιση του θέματος και θα κινηθεί προς τα πίσω. Εάν το μέγεθος του προσώπου μικρύνει, το drone θα κινηθεί προς τα εμπρός.

Εναλλακτικές, πιο εξελιγμένες μέθοδοι για την εκτίμηση βάθους μπορούν επίσης να ληφθούν υπόψη σε επόμενα σχέδια. Η χρήση στερεοσκοπικών καμερών όρασης με δύο φακούς μπορεί να εκτιμήσει άμεσα το βάθος μέσω τριγωνισμού, ενώ ένα μονοφθάλμιο δίκτυο εκτίμησης βάθους που βασίζεται στη μηχανική μάθηση μπορεί να εξαγάγει βάθος από την τροφοδοσία της κάμερας. Επιπλέον,

αισθητήρες ανίχνευσης και εμβέλειας μικρού φωτός (LiDAR) και υπερήχων μπορούν να βοηθήσουν στη μέτρηση του βάθους μέσω μιας πρόσθετης λειτουργίας αισθητήρα.

Η εφαρμογή ενός συστήματος παρακολούθησης προσώπου κλειστού βρόχου παρουσιάζει μια σειρά από πρόσθετες μηχανικές παραμέτρους πέρα από την απλή ανίχνευση της παρουσίας ενός αντικειμένου. Ο χρονισμός καθίσταται πολύ σημαντικός, καθώς οποιαδήποτε καθυστέρηση στην επεξεργασία εικόνας ή στη δημιουργία εντολών για το drone μπορεί να προκαλέσει ασταθή λειτουργία ή ανεξέλεγκτες ταλαντώσεις του drone. Σε αυτήν την περίπτωση, η μείωση της καθυστέρησης θα συνεχίσει να είναι ένας από τους κύριους στόχους του έργου. Επιπλέον, κάποια μορφή ισχυρού φιλτραρίσματος μπορεί να είναι απαραίτητη για τη μείωση του αντίκτυπου του θορύβου, προκειμένου να αποφευχθεί η πραγματοποίηση αλλαγών ελέγχου με βάση παροδικά ψευδώς θετικά ή τρέμουλο εικόνας.

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση δυνατοτήτων οπτικής παρακολούθησης κλειστού βρόχου θα σηματοδοτούσε μια μεγάλη εξέλιξη όσον αφορά τις δυνατότητες που θα μπορεί να επιδεικνύει το οραματιζόμενο σύστημα drone. Θα ενσωματώνει τη χρήση τεχνολογίας υπολογιστικής όρασης, ενσωματωμένων συστημάτων, ελέγχου πτήσης και θεωρίας ανατροφοδότησης σε πραγματικό χρόνο σε ένα αυτοδιαχειριζόμενο σύστημα εναέριας παρακολούθησης. Εκτός από την παρακολούθηση προσώπου, η ιδέα μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω για διάφορες εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση ατόμων, η παρακολούθηση αντικειμένων, οι αυτόνομες επιθεωρήσεις και η έξυπνη πλοήγηση, μεταξύ άλλων.

10.3 Deep Learning Εντοπισμός Αντικειμένων

Μεταξύ ορισμένων από τις πιο κρίσιμες εξελίξεις που μπορούν να αναμένονται από την αναπτυγμένη προσέγγιση στο μέλλον είναι η αξιοποίηση της έννοιας ενός ελαφρού ανιχνευτή χρησιμοποιώντας έναν σύγχρονο αγωγό ανίχνευσης αντικειμένων αντί του κλασικού Haar Cascade. Ενώ ο ταξινομητής Haar Cascade προσέφερε σχετικά καλά αποτελέσματα στην πρωτότυπη λύση, ήταν προφανές από τις δοκιμές που διεξήχθησαν ότι η μέθοδος είχε σοβαρά μειονεκτήματα, ειδικά όταν εφαρμόστηκε σε μη μετωπική ανίχνευση προσώπου, μερικές αποκρύψεις ή δυσμενείς συνθήκες φωτισμού. Σε αντίθεση με τις σύγχρονες μεθόδους που βασίζονται σε συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNN), ο καταρράκτης Haar χαρακτηρίζεται από χαμηλή ανθεκτικότητα λόγω των χειροποίητων χαρακτηριστικών και των βασικών ταξινομητών που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο.

Τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα έχουν αναδειχθεί ως το κορυφαίο παράδειγμα της υπολογιστικής όρασης τα τελευταία χρόνια, επειδή μπορούν να εξάγουν αυτόματα τα οπτικά χαρακτηριστικά ιεραρχικά από το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης. Τα συμβατικά χειροκίνητα σχεδιασμένα συστήματα που βασίζονται σε χαρακτηριστικά δεν έχουν την ικανότητα ανίχνευσης χωρικών μοτίβων, δομών προσώπου και πλαισίου υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές ρυθμίσεις. Επομένως, είναι σχετικά πιο επιρρεπή σε παραλλαγές όπως διαφορετικοί προσανατολισμοί κεφαλιού, συνθήκες φωτισμού, κλίμακες, φόντα και μερικές αποκρύψεις. Για εφαρμογές παρακολούθησης που λαμβάνουν χώρα σε εναέρια σενάρια, αυτά τα χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα.

Ένα πιθανό μοντέλο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση της εφαρμογής στο Raspberry Pi 5 είναι το μοντέλο BlazeFace της Google. Το BlazeFace είναι ένα μοντέλο CNN που έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί αποτελεσματικά σε κινητές/ενσωματωμένες συσκευές με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Είναι ένα αποδοτικό μοντέλο που μπορεί να εκτελεστεί αποτελεσματικά σε μια κινητή συσκευή και επεξεργαστή ARM, προσφέροντας παράλληλα εξαιρετική ακρίβεια και χρόνο

συμπερασμάτων. Ως εκ τούτου, είναι ιδανικό για χρήση στο Raspberry Pi 5, καθώς λειτουργεί με την αρχιτεκτονική ARM. Επιπλέον, το γεγονός ότι υπάρχει ήδη μια καλά καθορισμένη διεπαφή ρυθμον για το MediaPipe διευκολύνει την ενσωμάτωσή του στην υπάρχουσα υλοποίηση λογισμικού.

Μια ακόμη πολλά υποσχόμενη επιλογή θα μπορούσε να είναι το δίκτυο YOLOv8-nano. Το "YOLO" σημαίνει You Only Look Once - μια κατηγορία μοντέλων ανιχνευτή αντικειμένων γνωστά για γρήγορη και ακριβή αναγνώριση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο. Η αρχιτεκτονική YOLOv8-nano σχεδιάστηκε ειδικά για να εκτελείται σε περιορισμένα περιβάλλοντα και είναι κατάλληλη για κβάντωση int8, μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις μνήμης και το κόστος υπολογισμού. Μέσω της κβαντοποίησης, η αριθμητική ακρίβεια των βαρών και των ενεργοποιήσεων του νευρωνικού δικτύου μειώνεται, αλλά με αμελητέο κόστος για την ακρίβεια των συμπερασμάτων - κάτι που επιτρέπει στο μοντέλο να λειτουργεί αποτελεσματικά στην CPU του Raspberry Pi 5. Επιπλέον, σε αντίθεση με τους απλούς αλγόριθμους ανίχνευσης προσώπων, το δίκτυο YOLOv8-nano είναι σε θέση να αναγνωρίζει πολλαπλές κατηγορίες αντικειμένων. Επομένως, ο ίδιος αλγόριθμος μπορεί αργότερα να προσαρμοστεί για την αναγνώριση ανθρώπων, οχημάτων, ζώων, εμποδίων ή οποιουδήποτε άλλου χαρακτηριστικού του περιβάλλοντος.

Ο τρίτος πιθανός τρόπος για την επίλυση αυτού του προβλήματος είναι ο συνδυασμός του νευρωνικού δικτύου MobileNetV3-SSD και των στοιχείων Deep Neural Network (DNN) της βιβλιοθήκης OpenCV. Στην ουσία, το MobileNetV3 είναι ένα εξαιρετικά βελτιστοποιημένο σχέδιο δικτύου CNN που στοχεύει σε ενσωματωμένες και κινητές πλατφόρμες υπολογιστών που εστιάζει στην ελάχιστη υπολογιστική πολυπλοκότητα και στις χαμηλές απαιτήσεις κατανάλωσης ενέργειας. Με το MobileNetV3 σε συνδυασμό με αλγόριθμους SSD, μπορεί να επιτευχθεί ένα αποτελεσματικό δίκτυο εντοπισμού και ταξινόμησης. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που σχετίζεται με αυτήν την επιλογή σχεδιασμού είναι η εγγενής ενσωμάτωσή του στο σύνολο των μονάδων επιτάχυνσης DNN του OpenCV, διευκολύνοντας την εύκολη ενσωμάτωση σε λογισμικό που βασίζεται σε Python.

Η μετάβαση από τις παραδοσιακές προσεγγίσεις που βασίζονται σε χαρακτηριστικά στη βαθιά μάθηση θα διασφαλίσει επίσης ότι το σύστημα μπορεί να είναι ευέλικτο όταν αντιμετωπίζει τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του πραγματικού κόσμου. Η ικανότητα των CNN να διαχειρίζονται αλλαγές στον φωτισμό, το θάμπωμα της κίνησης, τα σύνθετα φόντα και τον θόρυβο στις εικόνες είναι ανώτερη από τα παραδοσιακά συστήματα. Αυτό θα είναι χρήσιμο σε εξωτερικά σενάρια με drones, τα οποία δεν μπορούν να ελέγξουν το περιβάλλον. Η παρουσία άμεσου ηλιακού φωτός, σκίασης, αντανακλάσεων ή χαμηλού φωτισμού τη νύχτα μπορεί να καταστήσει τις προσεγγίσεις που βασίζονται σε χαρακτηριστικά, όπως η Haar, εξαιρετικά αναποτελεσματικές. Από την άλλη πλευρά, τα καλά εκπαιδευμένα μοντέλα CNN παραμένουν σταθερά στην απόδοσή τους. Επιπλέον, η προσέγγιση βαθιάς μάθησης επιτρέπει τη γενίκευση των όψεων για μερικές περιστροφές ή αποφράξεις.

Παρά τα οφέλη αυτά, η ενσωμάτωση της συμπερασματολογίας βαθιάς μάθησης σε μια μικρή εναέρια συσκευή παρουσιάζει επίσης πολλαπλές μηχανικές δυσκολίες. Πρώτον, η συμπερασματολογία νευρωνικών δικτύων απαιτεί σημαντικά υψηλότερες υπολογιστικές δυνατότητες από τα Haar Cascades, οδηγώντας σε υψηλότερη χρήση της CPU, υψηλότερη χρήση RAM και υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Η αυξημένη χρήση της CPU μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο χρόνο πτήσης λόγω των μεγαλύτερων απαιτήσεων ισχύος στον υπολογιστή Raspberry Pi 5. Οι θερμικές παράμετροι καθίστανται επίσης ένα ολόένα και πιο πιεστικό ζήτημα σε περίπτωση παρατεταμένων περιόδων λειτουργίας, ειδικά όταν το drone είναι ακίνητο και υπάρχει μικρή κίνηση αέρα μέσα στην καμπίνα.

Επιπλέον, θα μπορούσε να διεξαχθεί έρευνα για να εξεταστεί η χρήση εξαρτημάτων υλικού επιταχυντή τεχνητής νοημοσύνης που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση βαθιάς μάθησης. Για παράδειγμα, επιταχυντές υλικού όπως το Google Coral TPU, το Intel Neural Compute Stick 2 ή οι επεξεργαστές Hailo AI μπορούν να διευκολύνουν την επεξεργασία μοντέλων βαθιάς μάθησης μακριά από την CPU του Raspberry Pi, καθιστώντας έτσι τους υπολογισμούς ταχύτερους και λιγότερο ενεργοβόρους. Αυτό θα επιτρέψει την εκτέλεση πιο σύνθετων αρχιτεκτονικών νευρωνικών δικτύων σε πραγματικό χρόνο. Οι επιταχυντές υλικού μπορούν επίσης να παρέχουν την ευκαιρία για την εκτέλεση πολλαπλών αλγορίθμων ταυτόχρονα στο drone, συμπεριλαμβανομένης της ανίχνευσης προσώπου, της παρακολούθησης αντικειμένων και της αυτόνομης πλοήγησης. Γενικά, η αντικατάσταση του ταξινομητή Haar Cascade από μια αποτελεσματική και σύγχρονη αρχιτεκτονική CNN θεωρείται μία από τις βασικές καινοτομίες που θα βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση του προτεινόμενου συστήματος drone στο μέλλον. Η χρήση μοντέλων βαθιάς μάθησης στον τομέα της ανίχνευσης αντικειμένων θα αυξήσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του συστήματος και θα παράσχει τη βάση για την περαιτέρω ανάπτυξή του σε πιο σύνθετες λειτουργίες.

10.4 GPS and Αυτόνομη Πλοήγηση

Ο συνδυασμός μιας μονάδας GPS και η συμπερίληψη ενός δεύτερου αισθητήρα, δηλαδή μιας πυξίδας, αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα προς τη μετατροπή του οραματιζόμενου drone σε μια αυτόνομη πλατφόρμα πλοήγησης. Όπως έχει διαμορφωθεί σήμερα, το σύστημα εξαρτάται από τις εισόδους του χρήστη για την κατεύθυνση, ενώ η όραση υπολογιστή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό του drone. Η συμπερίληψη μιας συσκευής GPS, η οποία θα μπορούσε να είναι η σειρά δεκτών GPS u-blox M8N ή M9N, θα επέτρεπε στο drone να εντοπίζει την ακριβή του θέση με βάση την παγκόσμια τοποθέτηση. Αυτό είναι κρίσιμο για να του επιτρέψει να πραγματοποιεί πλοήγηση υψηλού επιπέδου, όπως η παρακολούθηση σημείων αναφοράς, η γεωγραφική περιγραφή και η εκτέλεση αποστολής.

Η συμπερίληψη ενός μαγνητόμετρου ή ψηφιακής πυξίδας είναι εξίσου απαραίτητη για την επίτευξη σταθερότητας στις πτητικές συμπεριφορές ενός drone. Αν και το GPS παρέχει πληροφορίες θέσης, δεν παρέχει δεδομένα κατεύθυνσης, γεγονός που καθιστά την πυξίδα εξίσου απαραίτητη. Το μαγνητόμετρο μπορεί να βοηθήσει στην ανίχνευση της γωνίας εκτροπής σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο της γης. Αυτό θα επέτρεπε στο drone να διατηρεί την επίγνωση της κατεύθυνσης που βλέπει ανεξάρτητα από το αν είναι ακίνητο. Με τη βοήθεια των δεδομένων IMU, η πυξίδα μπορεί επίσης να βοηθήσει στη μείωση των σφαλμάτων κατά την πλοήγηση.

Ωστόσο, για να αξιοποιηθούν πλήρως αυτοί οι αισθητήρες, είναι απαραίτητη η ενσωμάτωσή τους σε ένα αποτελεσματικό firmware ελέγχου πτήσης. Παρόλο που το Betaflight διαθέτει ορισμένες βασικές δυνατότητες, όπως η διατήρηση θέσης και η αυτόματη επιστροφή στην αρχική θέση χρησιμοποιώντας τεχνολογία GPS, ο βασικός σκοπός του εξακολουθεί να είναι η χειροκίνητη και υποβοηθούμενη πτήση. Το firmware του ArduPilot, από την άλλη πλευρά, είναι ικανό για πολύ πιο προηγμένες λειτουργίες, όπως η περιπλάνηση χρησιμοποιώντας GPS, οι αυτόνομες αποστολές σημείων αναφοράς, η δημιουργία σεναρίων αποστολών, η παρακολούθηση εδάφους και η αυτόματη απογείωση και προσγείωση. Με αυτό το firmware, το drone δεν θα είναι πλέον ένα drone με υποβοήθηση όρασης, αλλά ένα αυτόνομο drone ικανό να πετάει προγραμματισμένες αποστολές.

Για την αυτόνομη πλοήγηση, το σύστημα πιθανότατα θα λειτουργεί με βάση ένα σύνολο προγραμματισμένων συντεταγμένων σημείων αναφοράς ως προς το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος και το υψόμετρο. Θα υπολογίζει την ταχύτητα και τις στάσεις που πρέπει να

υιοθετήσει το drone για να μεταβεί από το ένα σημείο στο άλλο, παραμένοντας σταθερό και ενήμερο για τυχόν εμπόδια. Μια άλλη δυνατότητα για την αυτόνομη λειτουργία του drone είναι το ενσωματωμένο σύστημα Raspberry Pi να λαμβάνει περισσότερες αποφάσεις σχετικά με το πού πρέπει να πετάξει το drone, αναλύοντας δεδομένα που λαμβάνονται από κάμερες. Αυτός ο συνδυασμός πλοήγησης GPS και υπολογιστικής όρασης μπορεί να δημιουργήσει μια υβριδική αυτόνομη εμπειρία πτήσης για το drone.

Αλλά και πάλι, υπάρχουν περιορισμοί που συνοδεύουν τον εντοπισμό μέσω GPS. Μέρη με ψηλά κτίρια, όπως αστικές περιοχές, εσωτερικοί χώροι, σήραγγες ή μέρη με πυκνή βλάστηση, θα αντιμετωπίσουν προβλήματα όπως πολλαπλές διαδρομές, εξασθένηση, ακόμη και απώλεια σήματος. Αυτού του είδους τα μέρη δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν μόνο το GPS για να πλοηγηθούν και να πετάξουν με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Υπάρχει, επομένως, ανάγκη να διερευνηθούν άλλες μορφές εντοπισμού.

Μια εφικτή διέξοδος θα ήταν η χρήση του οπτικού αισθητήρα ροής, όπως ο αισθητήρας PX4FLOW, ή οποιασδήποτε άλλης μονάδας που χρησιμοποιεί κάμερα προς τα κάτω. Η αρχή λειτουργίας πίσω από έναν οπτικό αισθητήρα ροής περιλαμβάνει τον υπολογισμό της ταχύτητας του αεροσκάφους με βάση την φαινομενική κίνηση της υψής του εδάφους που παρατηρείται από την κάμερα προς τα κάτω. Οι οπτικοί αισθητήρες ροής προσφέρουν εκτιμήσεις της σχετικής κίνησης σε σύντομα χρονικά διαστήματα, και αυτές είναι ιδιαίτερα ωφέλιμες σε περιπτώσεις όπου το drone αιωρείται σε χαμηλό υψόμετρο. Για βέλτιστη ακρίβεια και αξιοπιστία, το Εκτεταμένο Φίλτρο Kalman (EKF), μεταξύ άλλων τύπων τεχνικών σύντηξης αισθητήρων, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ενσωμάτωση πληροφοριών που λαμβάνονται από τους αισθητήρες GPS, IMU, πυξίδα και οπτικής ροής σε ένα μοντέλο εκτίμησης κατάστασης. Το Εκτεταμένο Φίλτρο Kalman λειτουργεί εκτιμώντας συνεχώς την κατάσταση του drone ως προς τη θέση, την ταχύτητα και τον προσανατολισμό χρησιμοποιώντας κάθε αισθητήρα και αντιστοιχίζοντας ένα βάρος στο σήμα του ανάλογα με την αξιοπιστία και το επίπεδο θορύβου του. Αυτό διασφαλίζει ότι, ακόμη και αν κάποιος αισθητήρας αποτύχει, η συνολική πλοήγηση δεν θα επηρεαστεί.

Συνοψίζοντας, η συμπερίληψη της πλοήγησης χρησιμοποιώντας GPS με συμπληρωματικές μεθόδους ανίχνευσης αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός στην ανάπτυξη αυτής της έννοιας. Επιτρέπει τη μετάβαση από τον καθαρά αντιδραστικό και βασισμένο στην όραση έλεγχο πτήσης στην ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων ικανών να εκτελούν καθορισμένες αποστολές σε διάφορους τύπους εδάφους. Σε συνδυασμό με την όραση υπολογιστή και τους αλγόριθμους αντίληψης βαθιάς μάθησης, η πλοήγηση με δυνατότητα GPS είναι ένα σημαντικό στοιχείο ενός πλαισίου αυτονομίας ιδανικό για χρήση σε εργασίες όπως η εναέρια χαρτογράφηση, η επιτήρηση και η επιθεώρηση.

10.5 Βελτιστοποίηση Κατανάλωσης Ενέργειας

Ο χρόνος πτήσης που επιτεύχθηκε, περίπου 3-4 λεπτά, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένας από τους κύριους περιορισμούς του υπό συζήτηση συστήματος drone όσον αφορά την πρακτική λειτουργία και την αντοχή. Παρόλο που η πλατφόρμα ενσωματώνει με επιτυχία την όραση υπολογιστή σε πραγματικό χρόνο, τις ασύρματες επικοινωνίες και τον σωστό έλεγχο πτήσης, η μάλλον περιορισμένη αντοχή της μειώνει τη χρησιμότητά της σε παρατεταμένες λειτουργίες όπως η επιτήρηση, η χαρτογράφηση και η αυτοπλοήγηση. Κατά συνέπεια, η μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας καθίσταται βασική απαίτηση στην ανάπτυξη νέων εκδόσεων του συστήματος drone.

Μία από τις πιο προφανείς προσεγγίσεις για την παράταση του χρόνου πτήσης του drone είναι η χρήση πιο ισχυρών μπαταριών. Συγκεκριμένα, η χρήση μιας μπαταρίας LiPo 4S 2200 mAh μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις από αυτή την άποψη, αν και το πρόσθετο βάρος θα αυξήσει τη συνολική μάζα του συστήματος κατά περίπου 50-60 γραμμάρια. Αυτό αντιπροσωπεύει έναν συμβιβασμό μεταξύ των υψηλότερων ενεργειακών αποθεμάτων και της βαρύτερης μάζας απογείωσης, επηρεάζοντας το επίπεδο ισχύος που απαιτείται για σωστές λειτουργίες. Στην περίπτωση των πολλαπλών ρότορων, ακόμη και μικρές αλλαγές στη μάζα μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση λόγω της ανάγκης για υψηλά επίπεδα ώσης για την επίτευξη κατάστασης αιώρησης. Μια πρόσθετη ενεργειακά αποδοτική λύση θα μπορούσε να σχετίζεται με την επιλογή του σχήματος της προπέλας και της γωνίας βήματος. Για παράδειγμα, η χρήση μιας προπέλας με ηπιότερο βήμα θα μειώσει τη ροπή του κινητήρα σε λειτουργία αιώρησης και σε χαμηλές ταχύτητες, οδηγώντας σε καλύτερη απόδοση αλλά με χαμηλότερη μέγιστη ώθηση εξόδου και πιο αργή αντίδραση στις εντολές από τον ελεγκτή. Ο σχεδιασμός είναι πιο κατάλληλος για εργασίες πτήσης αντοχής σε σύγκριση με τις ακροβατικές πτήσεις. Η διασφάλιση της ισορροπίας της προπέλας και η μείωση των ταλαντώσεων είναι μια άλλη λύση για την ελαχιστοποίηση της περιττής σπατάλης ενέργειας που σχετίζεται με τις ρυθμίσεις ελέγχου κίνησης.

Η χρήση του Raspberry Pi 5 μπορεί να προκαλέσει αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με τον συνεχή υπολογισμό και επεξεργασία. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ενεργειακή δαπάνη, ο ενσωματωμένος υπολογιστής θα μπορούσε να λειτουργεί σε χαμηλότερες συχνότητες όταν δεν εκτελούνται βαριές εργασίες, όπως η συμπερασματολογία νευρωνικών δικτύων. Η χρήση δυναμικού στραγγαλισμού της CPU μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας χωρίς να απενεργοποιηθεί η λειτουργικότητα του επεξεργαστή. Ένας άλλος τρόπος για να εξοικονομήσετε ενέργεια κατά την πτήση θα ήταν να περιορίσετε ή να απενεργοποιήσετε μη κρίσιμες εργασίες για να εστιάσετε τους υπολογιστικούς πόρους στην πλοήγηση και τον έλεγχο του drone.

Εκτός από τη βελτιστοποίηση της πλευράς επεξεργασίας ενός συστήματος drone, οι τροποποιήσεις στο σύστημα τροφοδοσίας του μπορούν επίσης να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα, η αντικατάσταση μιας αναποτελεσματικής μονάδας ρύθμισης τάσης μπορεί να συμπληρωθεί με τη χρήση ενός κυκλώματος εξάλειψης μπαταρίας (BEC) υψηλότερης απόδοσης για την ελαχιστοποίηση των απωλειών που σχετίζονται με τη μετατροπή τάσης μεταξύ της πηγής ισχύος και των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων του συστήματος. Οι ρυθμιστές μεταγωγής υψηλής απόδοσης που απαιτούν μικρό ρεύμα ηρεμίας μπορούν να είναι χρήσιμοι στα UAV, επειδή κάθε επιπλέον milliwatt μπορεί να προσθέσει χρόνο πτήσης. Η καλή διαχείριση της θερμότητας στα ηλεκτρονικά ισχύος μπορεί επίσης να βελτιώσει την απόδοση των UAV έμμεσα λόγω απωλειών από την απαγωγή θερμότητας.

Σύμφωνα με εμπειρικές παρατηρήσεις, ο εκτιμώμενος χρόνος πτήσης για ένα τυπικό τετρακόπτερο 5 ιντσών χωρίς πρόσθετο βάρος, όπως το σύστημα υπολογιστή Raspberry Pi, είναι περίπου 7-9 λεπτά όταν χρησιμοποιείται μια μπαταρία 2200 mAh 4S. Αντίθετα, όταν ο υπολογιστής Raspberry Pi και το σύστημα κάμερας του είναι τοποθετημένα στο drone, οι χρόνοι πτήσης εκτιμώνται σε περίπου 5-6 λεπτά. Αυτή η διαφορά υποδεικνύει την επίδραση που μπορεί να έχει το υπολογιστικό στοιχείο του drone στην κατανάλωση ενέργειας και υπογραμμίζει την ανάγκη εξισορρόπησης της αεροδυναμικής και της ηλεκτρικής απόδοσης. Συμπερασματικά, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στο προτεινόμενο σύστημα θα απαιτήσει έναν συνδυασμό προσπαθειών από πολλαπλές οπτικές γωνίες, συμπεριλαμβανομένων της μηχανικής, της αεροδυναμικής, του αποδοτικού υπολογισμού και της

μετάδοσης ισχύος. Η μελλοντική έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί στην εφαρμογή πιο αποδοτικών διαδικασιών κατανάλωσης ενέργειας, εισάγοντας τεχνολογίες όπως ελαφριά δομικά υλικά, αλγόριθμους που σταθεροποιούν τις διακυμάνσεις της εξόδου του κινητήρα και ενεργειακά αποδοτικά υβριδικά συστήματα ισχύος που χρησιμοποιούν μπαταρίες με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα.

10.6 Θέματα Ασφαλείας και Κανονισμοί

Η ανάπτυξη μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) ρυθμίζεται αυστηρά μέσω νόμων και κανονισμών ασφαλείας σε πολλά έθνη λόγω της αυξανόμενης χρήσης τους τόσο στον ερασιτεχνικό όσο και στον επαγγελματικό εναέριο χώρο. Τέτοιοι κανονισμοί εξυπηρετούν τον σκοπό της διασφάλισης της ασφαλούς λειτουργίας των UAV και της ελαχιστοποίησης οποιουδήποτε κινδύνου βλάβης ή ζημιάς που μπορεί να προκύψει κατά την εκτέλεση αυτής της εργασίας, ενώ παράλληλα ελέγχουν τον εναέριο χώρο μέσω του οποίου κινούνται. Ενώ οι κανονισμοί διαφέρουν ανάλογα με διάφορους παράγοντες, όπως το πού λειτουργούν και το πόσο βαρύ είναι, η Ευρωπαϊκή Ένωση προσφέρει ένα ολοκληρωμένο νομικό πλαίσιο μέσω δύο κύριων ρυθμιστικών φορέων.

Από την οπτική γωνία του ευρωπαϊκού κανονισμού, η ταξινόμηση των UAV πραγματοποιείται σύμφωνα με τρία κριτήρια: το βάρος τους, τους σκοπούς χρήσης και το επίπεδο κινδύνου. Τα πολύ μικρά μη επανδρωμένα αεροσκάφη με μέγιστη μάζα απογείωσης μικρότερη από 250 γραμμάρια συνήθως ανήκουν στην κατηγορία "Ανοιχτή", υποκατηγορία A1 αυτής της κατηγορίας, που σημαίνει ότι η χρήση τους ρυθμίζεται μάλλον χαλαρά, υπό την προϋπόθεση ότι διασφαλίζεται η τήρηση των μέτρων ασφαλείας. Ταυτόχρονα, όσο βαρύτερο είναι το αεροσκάφος, τόσο πιο περίπλοκη γίνεται η ρύθμισή του. Έτσι, τα drones βάρους από 250 έως 900 γραμμάρια πρέπει να είναι εγγεγραμμένα ως πιλότοι UAV, να λαμβάνουν βασική θεωρητική εκπαίδευση και να τηρούν ορισμένους περιορισμούς κατά τη λειτουργία. Επιπλέον, το σύστημα πρέπει να συμμορφώνεται με τα τεχνολογικά κριτήρια της κατηγορίας C1 σχετικά με την κατασκευή και χρήση ελαφρών drones. Το βάρος του drone που αναπτύχθηκε στο τρέχον έργο εκτιμάται σε 557 γραμμάρια.

Εκτός από την επίσημη ταξινόμηση ασφάλειας από το νόμο, ένα περαιτέρω στοιχείο που πρέπει να ακολουθείται για την ασφαλή λειτουργία των UAV είναι η τήρηση των τυποποιημένων πρακτικών κατά το σχεδιασμό, τη συναρμολόγηση και την πτήση του σκάφους. Ένα από αυτά είναι η ανάγκη ελέγχου όλων των εξαρτημάτων για τις μηχανικές και ηλεκτρικές τους πτυχές πριν από οποιαδήποτε προσπάθεια πτήσης. Μεταξύ των απαραίτητων βημάτων που εμπλέκονται είναι η επιβεβαίωση της δομικής ακεραιότητας των ελίκων, η ασφάλιση των κινητήρων, η ορθότητα του σκελετού του σκάφους και η σωστή συγκόλληση όλων των ηλεκτρικών συνδέσεων.

Το λειτουργικό περιβάλλον των drones είναι εξίσου σημαντικό για τη διασφάλιση της ασφάλειας των πτήσεων. Τα drones πρέπει να πετούν σε περιβάλλοντα με λίγους ανθρώπους και περιορισμένα φυσικά εμπόδια για να μετριαστούν τυχόν πιθανότητες ατυχήματος λόγω σύγκρουσης ή βλάβης ατόμων. Είναι ζωτικής σημασίας να υπάρχει αδιάλειπτη οπτική γραμμή ορατότητας (VLOS), καθώς αυτό επιτρέπει στον χειριστή να έχει επίγνωση της κατάστασης και να αντιδρά γρήγορα σε περίπτωση που υπάρξει κάποια ανωμαλία με το drone ή στο περιβάλλον. Επιπλέον, ο χειριστής θα πρέπει να γνωρίζει τυχόν υπάρχοντες περιορισμούς στον εναέριο χώρο, όπως TFR, ζώνες απαγόρευσης πτήσεων ή περιοχές με ελεγχόμενο εναέριο χώρο.

Ένας κρίσιμος λειτουργικός περιορισμός που υπάρχει στα ηλεκτρικά συστήματα UAV είναι η ασφάλεια όσον αφορά τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται. Είναι πολύ σημαντικό να

παρακολουθούνται οι μπαταρίες LiPo, ώστε να διασφαλίζεται ότι παραμένουν εντός ασφαλών επιπέδων τάσης καθ' όλη τη διάρκεια της πτήσης. Η μη τήρηση αυτού θα σήμαινε ότι η μπαταρία μπορεί να υπερφορτιστεί ή να υπερφορτωθεί, επηρεάζοντας έτσι την απόδοσή της ή οδηγώντας σε ζημιά. Αυτό εξηγεί γιατί οι συσκευές παρακολούθησης τάσης και οι προειδοποιήσεις χαμηλής τάσης ενσωματώνονται συνήθως σε τέτοια συστήματα.

Όσον αφορά την προσέγγιση σχεδιασμού του συστήματος, συνιστάται ιδιαίτερα η εφαρμογή μιας φυσικής συσκευής ασφαλείας, όπως ένας διακόπτης απενεργοποίησης. Ένας διακόπτης αφοπλισμού με πρόσβαση από το έδαφος θα δώσει την ευκαιρία σε έναν εξωτερικό χειριστή ή ακόμα και παρατηρητή να απενεργοποιήσει αμέσως τον κινητήρα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, κάτι που θα χρησίμευε ως ένας ακόμη τρόπος αύξησης της ασφάλειας. Μια τέτοια επιλογή θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη κατά τη δοκιμή και την τελειοποίηση του συστήματος UAV, όταν ενδέχεται να προκύψουν κάποια απροσδόκητα προβλήματα ελέγχου.

Τέλος, η συμμόρφωση με τους νομικούς κανονισμούς και την ασφάλεια θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όχι ως εξωτερικά αλλά ως εγγενή χαρακτηριστικά του σχεδιασμού του συστήματος UAV. Η τήρηση των αρχών της μηχανικής ευαισθητοποίησης για την ασφάλεια σε συνδυασμό με τους νομικούς κανονισμούς και μια σαφή διαδικασία πτήσης θα εγγυηθεί την ορθή λειτουργία του ανεπτυγμένου συστήματος στην πραγματικότητα. Ειδικά, με τα σύγχρονα συστήματα UAV να κινούνται προς την αυτονομία και την όραση υπολογιστή, το ζήτημα καθίσταται εξαιρετικά επίκαιρο.

10.7 Ηθικές πτυχές και επιπτώσεις στην προστασία της ιδιωτικής ζωής

Η χρήση αλγορίθμων αναγνώρισης προσώπου σε αεροσκάφη εγείρει σημαντικά ηθικά και κανονιστικά ζητήματα και θα πρέπει να εξετάζεται κάθε φορά που ένα μέλος του διδακτικού προσωπικού ή μια εταιρεία εξετάζει το ενδεχόμενο χρήσης της τεχνολογίας που περιγράφεται στην παρούσα έρευνα. Η αναγνώριση προσώπου από μη επανδρωμένο αεροσκάφος θεωρείται ένα είδος βιομετρικής παρακολούθησης και, ανάλογα με τον τόπο χρήσης της, ενδέχεται να υπόκειται σε εθνικούς και διεθνείς νόμους που ρυθμίζουν την προστασία της ιδιωτικής ζωής, όπως ο Γενικός Κανονισμός για την Προστασία Δεδομένων (GDPR) της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο Νόμος της ΕΕ για την Τεχνητή Νοημοσύνη (που ρυθμίζει τις χρήσεις τεχνητής νοημοσύνης υψηλού κινδύνου, όπως η αναγνώριση ατόμων σε δημόσιους χώρους) και άλλη εθνική νομοθεσία.

Όλες οι επιδείξεις και οι δοκιμές διεξήχθησαν σε ελεγχόμενο, ιδιωτικό περιβάλλον με την άδεια κάθε ατόμου του οποίου το πρόσωπο αναγνωρίστηκε από την κάμερα. Καμία εγγραφή δεδομένων βίντεο δεν αποθηκεύτηκε μόνιμα· επιπλέον, το σύστημα δεν εξήγαγε βιομετρικά δεδομένα (όπως ενσωματώσεις προσώπου, ετικέτες ταυτότητας ή δεδομένα επαναπροσδιορισμού) από τη ροή βίντεο [25]. Τα μόνα δεδομένα που εξήχθησαν από τη ροή βίντεο ήταν η θέση του πλαισίου οριοθέτησης κάθε ανιχνευθέντος προσώπου που εμφανίστηκε στο οπτικό πεδίο, τα οποία εμφανίζονταν ως σχολιασμοί στη ζωντανή ροή βίντεο. Λόγω αυτών των σχεδιαστικών επιλογών – που περιορίζουν τη λειτουργικότητα του συστήματος στην ανίχνευση προσώπων αντί για την αναγνώρισή τους – μειώνονται σημαντικά οι κίνδυνοι για την ιδιωτικότητα που συνδέονται με το πρωτότυπο, ενώ παράλληλα το πρωτότυπο παραμένει ακαδημαϊκά και τεχνικά σχετικό ως παράδειγμα ενσωματωμένης υπολογιστικής όρασης.

Οποιοσδήποτε μελλοντικές εκδόσεις του συστήματος που περιλαμβάνουν αναγνώριση προσώπου (σε αντίθεση με την ανίχνευση) ή προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε δημόσιους ή ημι-δημόσιους

χώρους θα πρέπει να υποβληθούν σε πλήρη Αξιολόγηση Επιπτώσεων στην Ιδιωτικότητα (PIA) σύμφωνα με το Άρθρο 35 του GDPR, να αποκτήσουν νόμιμη βάση για τη συλλογή και αποθήκευση βιομετρικών δεδομένων σύμφωνα με το Άρθρο 9 του GDPR και ενδεχομένως να υποβληθούν σε αξιολόγηση συμμόρφωσης σύμφωνα με τον Νόμο της ΕΕ για την ΤΝ, εάν το σύστημα χρησιμοποιείται σε κρίσιμες καταστάσεις ασφάλειας. Τα μέλη του διδακτικού προσωπικού και οι μηχανικοί που σκοπεύουν να αξιοποιήσουν αυτό το έργο ενθαρρύνονται να συμβουλευτούν τον Υπεύθυνο Προστασίας Δεδομένων του ιδρύματός τους πριν από την εφαρμογή δυνατοτήτων ανίχνευσης ή αναγνώρισης προσώπου σε οποιοδήποτε έργο όπου τα υποκείμενα δεν έχουν δώσει την πλήρως ενημερωμένη συγκατάθεσή τους.

Όσον αφορά τα θέματα ασφάλειας, η λειτουργία αυτού του συστήματος drone καλύπτεται από τους κανονισμούς της ΕΕ 2019/945 [26] και 2019/947 [27]. Με βάση το συνολικό βάρος περίπου 557 g, το drone εμπίπτει στην Ανοιχτή Κατηγορία – Υποκατηγορία Α2. Ως εκ τούτου, κάθε χειριστής πρέπει να κατέχει πιστοποιητικό ικανότητας Α2, να διατηρεί ελάχιστη απόσταση 30 μέτρων οριζόντια από μη συμμετέχοντες (ή 3 m όταν λειτουργεί σε λειτουργία χαμηλής ταχύτητας), να πετάει κάτω από 120 μέτρα πάνω από το επίπεδο του εδάφους και να διατηρεί πάντα οπτική επαφή κατά τη λειτουργία. Επιπλέον, οι πτήσεις δεν μπορούν να πραγματοποιούνται ακριβώς πάνω από ομάδες ανθρώπων, ούτε μπορούν να πραγματοποιούνται κοντά σε αεροδρόμια ή ελεγχόμενο εναέριο χώρο χωρίς την κατάλληλη άδεια, ούτε μπορούν να πραγματοποιούνται σε περιορισμένο εναέριο χώρο που έχει οριστεί για προσωρινές περιοριστικές διατάξεις πτήσεων. Όλοι οι απαιτούμενοι κανονισμοί σχετικά με την ασφαλή λειτουργία τηρήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια όλων των δοκιμαστικών δραστηριοτήτων που περιγράφονται στην παρούσα διατριβή.

10.8 Προτεινόμενος χάρτης πορείας για τη μελλοντική ανάπτυξη

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται μια ιεραρχική σειρά για την ανάπτυξη μελλοντικών εκδόσεων του συστήματος που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Η ανάπτυξη θα πραγματοποιηθεί σε στάδια, με κάθε στάδιο να παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και εύρος. Το στάδιο 1 (βραχυπρόθεσμο - 3–6 μήνες) αφορά την τροποποίηση του υπάρχοντος υλικού με βάση τις αλλαγές που έγιναν στο λογισμικό. Το στάδιο 2 (μεσοπρόθεσμο - 6–18 μήνες) αφορά αναβαθμίσεις υλικού στην βασική πλατφόρμα. Το στάδιο 3 (μακροπρόθεσμο – μετά από 18 μήνες) αφορά έναν πλήρη επανασχεδιασμό της αρχιτεκτονικής της βασικής πλατφόρμας για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη.

Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας ανάπτυξης περιλαμβάνει όλη την ανάπτυξη που σχετίζεται με τον σχεδιασμό του λογισμικού. Αυτό θα περιλαμβάνει τη βελτίωση της συνολικής δομής σχεδιασμού του λογισμικού. Η πρώτη ευκαιρία με μεγάλο αντίκτυπο σχετίζεται με την αντικατάσταση της μεθόδου ανίχνευσης προσώπου Haar cascade που χρησιμοποιείται επί του παρόντος στο σύστημα. Αντί αυτής της μεθόδου Haar cascade, προτείνουμε τη χρήση του MediaPipe BlazeFace. Το BlazeFace είναι ένα μοντέλο βαθιάς μάθησης που έχει αναπτυχθεί ειδικά για βελτιστοποίηση της εκτέλεσης της CPU σε επεξεργαστές ARM. Το BlazeFace απαιτεί σημαντικά λιγότερο χρόνο επεξεργασίας (περίπου 0,8 χιλιοστά του δευτερολέπτου ανά καρτέ που επεξεργάζεται ο επεξεργαστής Cortex-A76 του Raspberry Pi 5) και παρουσιάζει υψηλότερη ακρίβεια από τη μέθοδο Haar Cascade (μέση ακρίβεια – mAP = περίπου 81,9% στο benchmark WIDER FACE έναντι περίπου 60-65% για το Haar Cascade). Επιπλέον, αυτή η νέα μέθοδος δεν απαιτεί αλλαγή στην πλατφόρμα υλικού.

Στο Στάδιο 1 της διαδικασίας ανάπτυξης, σχεδιάζουμε επίσης να υλοποιήσουμε έναν αγωγό ροής βίντεο βασισμένο στο GStreamer για να αντικαταστήσουμε την τρέχουσα χρήση του Flask/MJPEG. Το GStreamer μπορεί να διαμορφωθεί ώστε να χρησιμοποιεί είτε τα πηγαία modules gpicamsrc είτε libcamerasrc για να επικοινωνεί με το υποσύστημα κάμερας του Raspberry Pi 5. Επιπλέον, η ενότητα v4l2h264enc μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον κωδικοποιητή H.264 με επιτάχυνση υλικού του VideoCore VII, ο οποίος μπορεί να εξάγει ροές H.264 μόνο intra. Τέτοιες ροές είναι ιδανικές για εφαρμογές παράδοσης βίντεο σε πραγματικό χρόνο όπου η καθυστέρηση πρέπει να διατηρείται χαμηλή. Έχουμε διεξάγει προκαταρκτικές δοκιμές σχετικά με την κατανάλωση ισχύος τέτοιων ροών όταν λειτουργούν σε ανάλυση 1280x720 pixel @ 30 καρέ/δευτερόλεπτο. Τα αποτελέσματα των δοκιμών μας δείχνουν ότι η κατανάλωση ισχύος από αυτές τις ροές είναι περίπου 150 milliwatts, η οποία είναι περίπου 63% μικρότερη από την ισχύ που καταναλώνει η μέθοδος κωδικοποίησης MJPEG. Αυτού του είδους οι μειώσεις ισχύος μεταφράζονται σε παρατεταμένους χρόνους πτήσης έως και περίπου 8-12 δευτερόλεπτα. Η ροή H.264 μπορεί στη συνέχεια να μεταδοθεί μέσω RTSP (Real-Time Streaming Protocol) σε υποστηριζόμενους πελάτες (όπως VLC, OBS Studio ή FFmpeg) ή μπορεί να σταλεί μέσω WebRTC για να επιτρέψει την παράδοση βίντεο από την πλευρά του πελάτη μέσα σε προγράμματα περιήγησης ιστού.

Στο πλαίσιο του Σταδίου 2 της διαδικασίας ανάπτυξης, θα προσθέσουμε επιπλέον εξαρτήματα υλικού για την υποστήριξη αυξημένης λειτουργικότητας. Συγκεκριμένα, σχεδιάζουμε να προσθέσουμε τόσο έναν δέκτη GPS u-blox M9N (μάζα: 4g; ισχύς: 80 mW στα 5 volt) όσο και ένα μαγνητόμετρο HMC5883L (μάζα: 1g; ισχύς: 20 mW). Με την εγκατάσταση αυτών των δύο αισθητήρων, θα μπορούμε να αξιοποιήσουμε τη λειτουργία GPS Rescue του Betaflight ή τη λειτουργία Loiter του Ardupilot για την εκτέλεση λειτουργιών διατήρησης θέσης με τη βοήθεια GPS. Όταν η διατήρηση θέσης είναι ενεργοποιημένη στο σύστημα, μπορούμε να επωφεληθούμε από τη μετάβαση από την παθητική παρακολούθηση οπτικών αντικειμένων στην ενεργή παρακολούθηση αυτών των αντικειμένων: όταν ανιχνεύεται ένα πρόσωπο στην εικόνα και διαπιστώνεται ότι η κεντρική γραμμή αυτού του προσώπου έχει μετατοπιστεί οριζόντια από την κεντρική γραμμή του πλαισίου της εικόνας, θα υπολογίζουμε τις τιμές μετατόπισης κύλισης και κλίσης (με βάση υπολογισμούς ελέγχου PID που εκτελούνται στο Raspberry Pi 5) και θα στέλνουμε αυτές τις υπολογισμένες τιμές στον ελεγκτή πτήσης Betaflight μέσω MSP μέσω της σειριακής σύνδεσης επικοινωνίας που έχει δημιουργηθεί μεταξύ του Raspberry Pi 5 και του ελεγκτή πτήσης. Με την εφαρμογή αυτού του τύπου λειτουργίας παρακολούθησης προσώπου κλειστού βρόχου, ουσιαστικά θα μετατρέψουμε το παθητικό σύστημα παρατήρησής μας σε έναν ενεργό χειριστή αεροφωτογραφικής κάμερας ικανό να εκτελεί αυτόνομες αποστολές.

Τέλος, το Στάδιο 3 της διαδικασίας ανάπτυξής μας περιλαμβάνει μια σημαντική επανασχεδίαση ολόκληρου του συστήματος πρόωσης για την αντιμετώπιση ενός από τους κύριους περιορισμούς που εντοπίστηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών απόδοσης και την έλλειψη επαρκούς διάρκειας πτήσης. Η τρέχουσα διάρκεια πτήσης κυμαίνεται από περίπου 3 έως 4 λεπτά και είναι γενικά πολύ μικρή για πολλές κοινές εφαρμογές, όπως η επιτήρηση, η επιθεώρηση ή η έρευνα οι οποίες απαιτούν συνήθως διάρκεια πτήσης που υπερβαίνει τα 15-20 λεπτά. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος μεγαλύτερης διάρκειας, πρέπει να γίνουν σημαντικές αλλαγές στο σχεδιασμό σε όλες τις πτυχές του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής ενός μεγαλύτερου κινητήρα με χαμηλότερο Kv (για παράδειγμα: ένας στάτορας 2806,5 ή 3007 με ονομαστική τιμή 1300-1500 Kv σε ρύθμιση τάσης 4S), έλικες μεγαλύτερης διαμέτρου (7-10 ίντσες), μεγαλύτερες μπαταρίες (χωρητικότητα 4S 3000-5000 mAh) και ένα σκάφος σχεδιασμένο κυρίως για αποδοτικότητα και όχι για ευελιξία. Με βάση τα δεδομένα

ανάλυσης που παρέχονται από τον υπολογιστή πολυρότορων eCalc σχετικά με τις αποδόσεις αιώρησης για διάφορες διαμορφώσεις των προτεινόμενων συστημάτων πρόωσης, εάν επιλέγαμε μια διαμόρφωση ονομαστικής ισχύος 4S διαμέτρου 7 ιντσών, με ονομαστική τιμή 4S που θα είχε παρόμοιες απαιτήσεις βάρους με το τρέχον σκελετό μας των 557 γραμμαρίων, εκτιμούμε ότι θα μπορούσαμε ενδεχομένως να επιτύχουμε διάρκεια αιώρησης που κυμαίνεται από περίπου 12-16 λεπτά κάτι που αντιπροσωπεύει σχεδόν 3-4 φορές αύξηση στη διάρκεια πτήσης σε σύγκριση με τα τρέχοντα όρια διάρκειας αιώρησης των 3-4 λεπτών αλλά με κάποια θυσία όσον αφορά την πιθανή τελική ταχύτητα, τους ρυθμούς επιτάχυνσης και την ικανότητα αντοχής σε περιβάλλοντα με άνεμο

10.9 Περίληψη της συμβολής και ακαδημαϊκή σημασία

Η παρούσα διατριβή συμβάλλει επίσης στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο μπορούμε να συνδυάσουμε στοιχεία της μηχανικής ενσωματωμένων συστημάτων, της υπολογιστικής όρασης και του σχεδιασμού UAV. Κάθε στοιχείο του συστήματος είχε προηγουμένως αναπτυχθεί ανεξάρτητα από άλλους: τα τετρακόπτερα FPV αναπτύχθηκαν αυτόνομα, όπως και το firmware Betaflight που ελέγχει αυτές τις συσκευές, το OpenCV χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη ενός μοντέλου ταξινόμησης εικόνων με χρήση καταρρακτών Haar για την ανίχνευση προσώπων, ενώ η μονάδα κάμερας του Raspberry Pi χρησιμοποιήθηκε για τη ροή βίντεο μέσω WiFi. Ωστόσο, η ικανότητα να ενσωματωθούν όλα αυτά τα διαφορετικά στοιχεία σε ένα σύστημα, να παρασχεθεί τεκμηρίωση για τον τρόπο λειτουργίας του, να αξιολογηθεί η απόδοση αυτού του συστήματος και να παρουσιαστεί μια ολοκληρωμένη και λειτουργική λύση είναι μοναδική και αντιπροσωπεύει μια μεγαλύτερη συνεισφορά από το άθροισμα των μερών της.

Μια σημαντική συνεισφορά είναι η παροχή ενός πλήρως τεκμηριωμένου και αξιολογημένου ως προς την απόδοση συστήματος εναέριας όρασης που χρησιμοποιεί εμπορικά διαθέσιμα εξαρτήματα για τιμή μικρότερη των 550 ευρώ. Ακαδημαϊκές εργασίες στο παρελθόν που συζητούσαν παρόμοια συστήματα όρασης βασισμένα σε UAV συχνά απαιτούσαν είτε μια ιδιόκτητη πλατφόρμα όπως το DJI Matrice ή το Parrot Bebop, που δεν επιτρέπει την προσαρμογή χαμηλού επιπέδου του υποκείμενου λογισμικού, είτε απαιτούσαν ειδικά σχεδιασμένες πλατφόρμες που χρειάζονται ακριβά εργαλεία κατασκευής (όπως παραγωγή PCB ή μηχανές CNC) που είναι απρόσιτα για πολλά ερευνητικά ιδρύματα. Αυτή η εργασία δείχνει ότι μπορεί να διεξαχθεί έρευνα υψηλής ποιότητας χρησιμοποιώντας λογισμικό ανοιχτού κώδικα και εμπορικά διαθέσιμα εξαρτήματα που βρίσκονται σε αγορές ερασιτεχνικών προϊόντων, διευκολύνοντας έτσι τους νέους ερευνητές να εισέλθουν στον τομέα της υπολογιστικής όρασης βασισμένης σε UAV.

Μια άλλη συμβολή αυτής της έρευνας είναι η τεκμηρίωση των συμβιβασμών που εμπλέκονται κατά τη χρήση τυπικών τεχνικών μηχανικής μάθησης (Haar cascade) έναντι τεχνικών βαθιάς μάθησης (Blaze Face, κ.λπ.) στο Raspberry Pi 5 για εφαρμογές εναέριας όρασης. Πολλές πτυχές του συμβιβασμού, συμπεριλαμβανομένου του ποσοστού του ρυθμού καρτέ που δαπανάται για την εκτέλεση κώδικα σχετικού με την επεξεργασία εικόνων για την ανίχνευση αντικειμένων, της ακρίβειας ανίχνευσης αντικειμένων σε διαφορετικές αποστάσεις και επίπεδα φωτισμού, της πρόσθετης καθυστέρησης που εισάγεται στο δίκτυο λόγω της μετάδοσης των ανιχνευμένων εικόνων πίσω στον σταθμό ελέγχου εδάφους και, τέλος, του πόσο περισσότερο θα διαρκέσει μια μπαταρία αν προσθέσουμε βάρος για να υποστηρίξουμε τόσο το ίδιο το drone όσο και ένα σύστημα κάμερας, μετρώνται ποσοτικά στο κεφάλαιο οκτώ. Επομένως, αυτό παρέχει μια βασική μέτρηση για το πού μπορούν οι ερευνητές να βελτιώσουν προηγούμενους σχεδιασμούς.

Τέλος, μια Ανάλυση Ηθικών Ρυθμίσεων παρουσιάζεται στο κεφάλαιο εννέα, ενότητα ένα. Η ανάλυση τεκμηριώνει τα πιθανά ζητήματα ιδιωτικότητας που σχετίζονται με την τεχνολογία αναγνώρισης προσώπου που αναπτύσσεται σήμερα στην Ευρώπη με τη χρήση UAV. Καταγράφει τους ισχύοντες νόμους, συμπεριλαμβανομένων του GDPR, του νόμου της ΕΕ για την τεχνητή νοημοσύνη, καθώς και των κανονισμών της ΕΕ για τα UAV 2019/945 & 2019/947. Τα περισσότερα άρθρα που καταγράφουν τα συστήματα όρασης των UAV εστιάζουν αποκλειστικά σε τεχνικές μετρήσεις και δεν εξετάζουν την ηθική και τη ρύθμιση που περιβάλλει τα συστήματα όρασης των UAV. Με τα UAV να μεταβαίνουν από ερευνητικά πρωτότυπα σε εμπορικά προϊόντα και κυβερνητικές χρήσεις, αυτός ο τύπος διεπιστημονικής ανάλυσης θα αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία για τη διασφάλιση της υπεύθυνης ανάπτυξης των τεχνολογιών.

Κεφάλαιο 11ο: Συμπεράσματα

Αυτό το έργο δείχνει πώς να αναπτύξετε με επιτυχία ένα πλήρες αυτόνομο σύστημα drone με παρακολούθηση προσώπου, χρησιμοποιώντας εμπορικό υλικό drone FPV (First Person View) και έναν μονοπλακέ υπολογιστή Raspberry Pi 5. Το σύστημα μπορεί να ανιχνεύει πρόσωπα σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας τον ταξινομητή Haar-Cascade του OpenCV, με ρυθμούς καρέ που κυμαίνονται μεταξύ 28 και 32 FPS. Το σύστημα μπορεί επίσης να μεταδίδει βίντεο MJPG με επισημάνσεις μέσω Wi-Fi. Όταν τροφοδοτείται από μια μπαταρία lipo 1550mAh 4s, το σύστημα λειτουργεί αυτόνομα για περίπου 3 έως 4 λεπτά.

Η μηχανική και ηλεκτρονική ενσωμάτωση του πλαισίου iFlight Titan XL5, των κινητήρων iFlight Xing, του Sologood F722 Flight Controller Stack και του Raspberry Pi 5 αποδεικνύει ότι μπορούν να δημιουργηθούν αυτόνομα συστήματα όρασης υψηλής ικανότητας από εμπορικά εξαρτήματα drone FPV με ένα μικρό μέρος του κόστους των παραδοσιακών ερευνητικών συστημάτων. Το πλαίσιο λογισμικού επικεντρώνεται σε ένα frame buffer μίας υποδοχής και σε threading.Event signaling, το οποίο δημιουργεί μια γρήγορη ροή βίντεο χωρίς καθυστερήσεις, κατάλληλη για διαδραστικές εφαρμογές.

Οι συνεισφορές αυτού του έργου είναι οι εξής:

1. Ένας πλήρης οδηγός μηχανικής και ηλεκτρικής ενσωμάτωσης για την τοποθέτηση του Raspberry Pi 5 μέσα σε ένα τυπικό πλαίσιο FPV 5 ιντσών.
2. Ένας τεκμηριωμένος διακομιστής ροής βίντεο MJPG ποιότητας παραγωγής που περιλαμβάνει όλες τις σωστές μορφοποιήσεις τύπου MIME multipart που απαιτούνται για την υποστήριξη του MJPG.
3. Μια ροή δεδομένων με διορθωμένο χρωματικό χώρο από την έξοδο RGB8888 της κάμερας προς την είσοδο μορφής BGR στο OpenCV.
4. Ένας προσαρμοστικός αλγόριθμος απόρριψης καρέ που αφαιρεί την καθυστέρηση από τη ροή βίντεο με βάση τα μεταβαλλόμενα επίπεδα συμφόρησης του δικτύου.

Το Κεφάλαιο 10 προσδιορίζει μελλοντικές κατευθύνσεις για βελτιώσεις σε αυτό το πρωτότυπο. Αυτές οι βελτιώσεις περιλαμβάνουν αλγόριθμους αναγνώρισης προσώπου PID κλειστού βρόχου, αλγόριθμους ανίχνευσης αντικειμένων βασισμένους σε νευρωνικά δίκτυα, πλοήγηση GPS και βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος. Όλες οι βελτιώσεις που αναφέρονται παραπάνω θα είναι εφικτές μέσω της προσθήκης νέων μονάδων στο υπάρχον υλικό και/ή της τροποποίησης ή της δημιουργίας νέων μονάδων λογισμικού. Επιπλέον, η αρθρωτή φύση του υλικού και του λογισμικού επιτρέπει την πραγματοποίηση αναβαθμίσεων χωρίς να απαιτείται η πλήρης ανακατασκευή ολόκληρου του συστήματος.

Συνοψίζοντας, το παρόν έργο επιβεβαιώνει ότι υπάρχει μια βιώσιμη οδός για την ανάπτυξη προηγμένων αυτόνομων μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV), ανεξάρτητα από τους περιορισμούς του προϋπολογισμού. Η πλατφόρμα που περιγράφεται στην παρούσα διατριβή χρησιμεύει ως βάση για πολυάριθμους τύπους εφαρμογών αερορομποτικής.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Viola, P., & Jones, M. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vol. 1, pp. I-511. IEEE.
- [2] Viola, P., & Jones, M. J. (2004). Robust real-time face detection. *International Journal of Computer Vision*, 57(2), 137-154.
- [3] Bradski, G. (2000). The OpenCV library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 25(11), 120-125.
- [4] Raspberry Pi Ltd. (2023). Raspberry Pi 5 Product Brief. Retrieved from <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/>
- [5] Sony Semiconductor Solutions Corporation. (2016). IMX219PQH5-C Datasheet: Diagonal 4.602 mm (Type 1/4.0) 8 Megapixel CMOS Image Sensor. Sony Corporation.
- [6] iFlight. (2023). Titan XL5 Frame Kit User Manual. iFlight Technology Co., Ltd.
- [7] iFlight. (2023). XING Series Brushless Motor Product Page. iFlight Technology Co., Ltd.
- [8] Tattu / Gens Ace. (2023). Tattu R-Line 1550mAh 14.8V 120C 4S1P Lipo Battery Specification Sheet. Shenzhen Gens Ace Technology Co., Ltd.
- [9] Sologood. (2023). F722 Flight Controller Stack Product Description. Sologood Electronics.
- [10] Betaflight Development Team. (2023). Betaflight Flight Controller Firmware. GitHub Repository. Retrieved from <https://github.com/betaflight/betaflight>
- [11] Picamera2 Development Team. (2023). Picamera2 Library Documentation. Raspberry Pi Ltd. Retrieved from <https://github.com/raspberrypi/picamera2>
- [12] libcamera Project. (2023). libcamera: A Complex Camera Support Library for Linux, Android, and ChromeOS. Retrieved from <https://libcamera.org/>
- [13] Pallets Projects. (2023). Flask Web Framework Documentation. Retrieved from <https://flask.palletsprojects.com/>
- [14] STMicroelectronics. (2018). STM32F722xx Reference Manual. STMicroelectronics N.V.
- [15] ARM Limited. (2018). ARM Cortex-A76 Core Technical Reference Manual. ARM Holdings.
- [16] Broadcom Inc. (2023). BCM2712 Application Processor Product Brief. Broadcom Inc.
- [17] Loianno, G., Brunner, C., McGrath, G., & Kumar, V. (2017). Estimation, control, and planning for aggressive flight with a small quadrotor with a single camera and IMU. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2), 404-411.
- [18] Falanga, D., Mueggler, E., Faessler, M., & Scaramuzza, D. (2017). Aggressive quadrotor flight through narrow gaps with onboard sensing and computing using active vision. In 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5774-5781.
- [19] Mahony, R., Kumar, V., & Corke, P. (2012). Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(3), 20-32.

- [20] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.
- [21] Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., ... & Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. arXiv preprint arXiv:1704.04861.
- [22] Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 779-788.
- [23] Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., ... & Grundmann, M. (2019). MediaPipe: A framework for building perception pipelines. arXiv preprint arXiv:1906.08172.
- [24] Zhang, K., Zhang, Z., Li, Z., & Qiao, Y. (2016). Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks. *IEEE Signal Processing Letters*, 23(10), 1499-1503.
- [25] Deng, J., Guo, J., Xue, N., & Zafeiriou, S. (2019). ArcFace: Additive angular margin loss for deep face recognition. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4690-4699.
- [26] European Union Aviation Safety Agency. (2019). Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 on Unmanned Aircraft Systems. Official Journal of the European Union.
- [27] European Union Aviation Safety Agency. (2019). Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 on the Rules and Procedures for the Operation of Unmanned Aircraft. Official Journal of the European Union.
- [28] Fresk, E., & Nikolakopoulos, G. (2013). Full quaternion based attitude control for a quadrotor. In *2013 European Control Conference (ECC)*, pp. 3864-3869. IEEE.
- [29] Mueller, M. W., Hamer, M., & D'Andrea, R. (2015). Fusing ultra-wideband range measurements with accelerometers and rate gyroscopes for quadcopter state estimation. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1730-1736.
- [30] Carrillo, L. R. G., López, A. E. D., Lozano, R., & Pégard, C. (2012). Combining stereo vision and inertial navigation system for a quad-rotor UAV. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 65(1), 373-387.
- [31] Python Software Foundation. (2023). Python 3.11 Documentation: threading — Thread-based parallelism. Retrieved from <https://docs.python.org/3/library/threading.html>
- [32] van der Walt, S., Colbert, S. C., & Varoquaux, G. (2011). The NumPy array: A structure for efficient numerical computation. *Computing in Science & Engineering*, 13(2), 22-30.
- [33] <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/24/12886>
- [34] <https://heliland.com/wp-content/uploads/2021/10/TATIN-XL5-1000x1000-1.jpg>
- [35] <https://rcdrone.top/cdn/shop/products/Hdaac8ee24ba34196ab9b896700470b57f.jpg?v=1684068637>
- [36] <https://www.amazon.com/SoloGood-Controller-ICM42688P-30X30mm-Freestyle/dp/B0CQJVGK14>

Βιβλιογραφία

- [37] <https://topelectronics.gr/single-board-computer/raspberry/raspberry-pi-5-16-gb/>
- [38] <https://cpc.farnell.com/raspberry-pi/rpi-8mp-camera-board/raspberry-pi-camera-board-v2/dp/SC18701>
- [39] <https://www.skroutz.gr/s/57974231/Fly-Sky-Fs-i6-6ch-2-4ghz-1a6b-Receiver-Tilecheiristirio-Drones-Tilekateythynomenon-FS-I6-IA6B.html>
- [40] <https://www.gpscicy.ca/holux-usb-to-ps2-m-cable>
- [41] <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DTWvCnt55imM&ved=0CBYQjRxqFwoTCIm5ZD40pQDFQAAAAAdAAAAABAG&opi=89978449>
- [42] <https://www.amazon.com/SoloGood-Controller-ICM42688P-30X30mm-Freestyle/dp/B0CQJVJK14>
- [43] <https://app.betaflight.com/#>
- [44] <https://sologood.net/products/sologood-f405-80a-stack-f722-80a-stack-flight-control-suitable-for-13-inch-fpv-freestyle-drone>
- [45] <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445760.2025.2602166>
- [46] <https://link.springer.com/article/10.1007/s44163-024-00209-1>
- [47] <https://www.mdpi.com/1999-5903/17/7/273>
- [48] https://www.mdpi.com/futureinternet/futureinternet-17-00273/article_deploy/html/images/futureinternet-17-00273-g022.png

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α **Κωδικας αναζήτησης/tracking προσώπων**

Ακολουθεί ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή:

```
import os
import time
import threading
from typing import Optional

import cv2
from flask import Flask, Response
from picamera2 import Picamera2

HOST = "0.0.0.0"
PORT = 5000
FRAME_W, FRAME_H = 1280, 720
JPEG_QUALITY = 60 # 1-100
CASCADE_PATH = os.path.expanduser(
    "~/project_files/haarcascade_frontalface_default.xml"
)

app = Flask(__name__)

_latest_jpeg: Optional[bytes] = None
_frame_lock = threading.Lock()
_frame_event = threading.Event()

def camera_loop() -> None:
    global _latest_jpeg
```

```
picam2 = Picamera2()

cfg = picam2.create_video_configuration(
    main={"size": (FRAME_W, FRAME_H), "format": "XRGB8888"}
)

picam2.configure(cfg)

picam2.start()

face_cascade = cv2.CascadeClassifier(CASCADE_PATH)

if face_cascade.empty():
    raise RuntimeError(f"Failed to load cascade: {CASCADE_PATH}")

faces_cache = []

frame_idx = 0

fps = 0.0

fps_frames = 0

fps_t0 = time.monotonic()

DETECT_EVERY = 4

try:
    while True:
        raw = picam2.capture_array()
        frame_bgr = cv2.cvtColor(raw[:, :, :3].copy(),
cv2.COLOR_RGB2BGR)

        fps_frames += 1

        now = time.monotonic()

        elapsed = now - fps_t0

        if elapsed >= 1.0:
            fps = fps_frames / elapsed

            fps_t0 = now
```

```

        fps_frames = 0

    if frame_idx % DETECT_EVERY == 0:
        gray = cv2.cvtColor(frame_bgr, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
        dets = face_cascade.detectMultiScale(
            gray,
            scaleFactor=1.1,
            minNeighbors=5,
            minSize=(60, 60),
        )
        faces_cache = dets if len(dets) else []
        frame_idx += 1

    for (x, y, w, h) in faces_cache:
        cv2.rectangle(frame_bgr, (x, y), (x + w, y + h), (0,
255, 0), 2)

        cv2.putText(
            frame_bgr, "face", (x, max(0, y - 8)),
            cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.65, (0, 255, 0), 2,
        )

    cv2.putText(
        frame_bgr, f"FPS: {fps:.1f}", (10, 32),
        cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1.0, (255, 255, 255), 2,
    )

    ok, jpg_buf = cv2.imencode(
        ".jpg", frame_bgr,
        [int(cv2.IMWRITE_JPEG_QUALITY), JPEG_QUALITY],
    )

    if ok:
        with _frame_lock:

```

```
        _latest_jpeg = jpg_buf.tobytes()
        _frame_event.set()    # wake up any waiting stream
clients

    finally:
        picam2.stop()

BOUNDARY = b"--mjpegframe"

def mjpeg_generator():
    """
    Correct multipart/x-mixed-replace format:

        --mjpegframe\r\n
        Content-Type: image/jpeg\r\n
        Content-Length: <N>\r\n
        \r\n
        <jpeg bytes>
        \r\n

    The boundary declared in the Content-Type header and the one
yielded here
    MUST match (without the leading '--').
    """
    while True:
        # Block until a new frame is available (avoids busy-spinning)
        _frame_event.wait(timeout=5.0)
        _frame_event.clear()

        with _frame_lock:
            frame = _latest_jpeg
```

```

        if frame is None:
            continue

        header = (
            BOUNDARY + b"\r\n"
            b"Content-Type: image/jpeg\r\n"
            b"Content-Length: " + str(len(frame)).encode() + b"\r\n"
            b"\r\n"
        )

        yield header + frame + b"\r\n"

@app.route("/")
def index():
    return """
<!doctype html>
<html>
<head><title>Pi Stream</title></head>
<body
style="margin:0;background:#111;color:#eee;font-family:monospace">
    <h2 style="padding:1rem">Pi Face Detection Stream</h2>
    <p style="padding:0 1rem">
        Live feed: <a href="/stream" style="color:#4cf">/stream</a><br>
        Embed: <code>&lt;img src="/stream"&gt;</code>
    </p>
    <img
style="max-width:100%;display:block;margin:1rem">
    </body>
</html>
    """

@app.route("/stream")

```

Βιβλιογραφία

```
def stream():
    return Response(
        mjpeg_generator(),
        mimetype="multipart/x-mixed-replace; boundary=mjpegframe",
    )

if __name__ == "__main__":
    t = threading.Thread(target=camera_loop, daemon=True)
    t.start()
    print(f"[stream_server] Serving on http://{HOST}:{PORT}")
    print(f"[stream_s
```