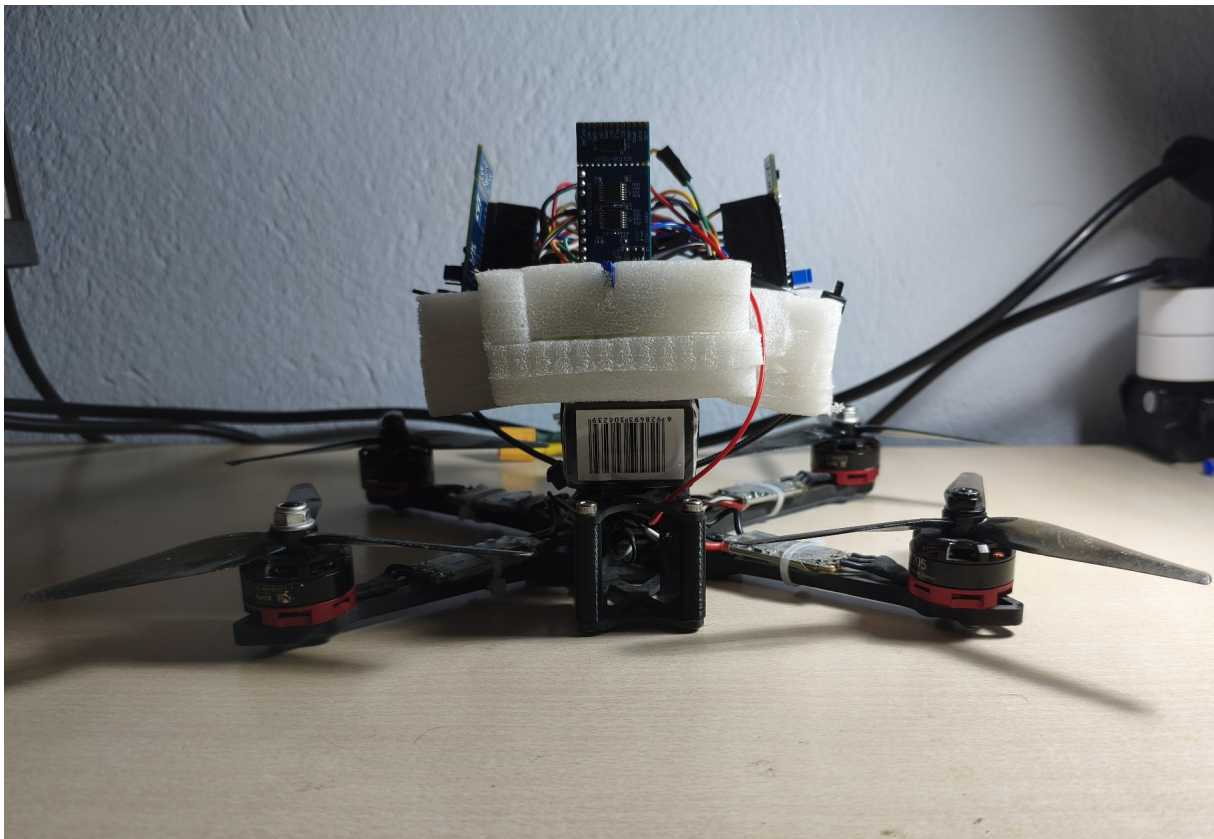


ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Ανάπτυξη συστήματος υποβοηθούμενης και
ασφαλούς πτήσης μη επανδρωμένου αεροσκάφους »



Του φοιτητή
Στυλιανού Τσιόχα
Αρ. Μητρώου: 2019174

Επιβλέπων
Κυριάκος Τσιακμάκης
Βαθμίδα Επίκουρος Καθηγητής

Σεπτέμβρης 2026

Τίτλος Δ.Ε.: Ανάπτυξη συστήματος υποβοηθούμενης και ασφαλούς πτήσης μη επανδρωμένου αεροσκάφους

Κωδικός Δ.Ε. 26218

Ονοματεπώνυμο φοιτητή: Στυλιανός Τσιόχας

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: Κυριάκος Τσιακμάκης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 26-03-2026

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 06-09-2026

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 Στυλιανού Τσιόχα 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.

«Σε όσους επιμένουν να αναζητούν λύσεις εκεί που οι άλλοι βλέπουν μόνο εμπόδια. »

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη σχεδίαση, την ανάπτυξη και την πειραματική αξιολόγηση ενός συστήματος υποβοηθούμενης πτήσης μη επανδρωμένου οχήματος με σκοπό την ασφαλή αποφυγή εμποδίων.

Η υλοποίηση του συστήματος κατέστη ιδιαίτερα απαιτητική, καθώς προϋπέθετε την αρμονική ενσωμάτωση προηγμένων μαθηματικών σχέσεων σε επίπεδο λογισμικού, παράλληλα με τη σύνθετη διασύνδεση λογισμικού και υλικού.

Η επιλογή του θέματος πηγάζει από το ευρύτερο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ενσωματωμένων συστημάτων, της ηλεκτρονικής και της ανάπτυξης λογισμικού, για σύνθετα προβλήματα. Παράλληλα, η ραγδαία εξέλιξη και η ενασχόληση με τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs) αποτέλεσαν βασικό κίνητρο για την εμβάθυνση στο εν λόγω πεδίο.

Περίληψη

Η εργασία παρουσιάζει τη σχεδίαση και την υλοποίηση ενός συστήματος υποβοηθούμενης πλοήγησης και αποφυγής εμποδίων για τετρακόπτερο. Το σύστημα βασίζεται στη φιλοσοφία του συνεργατικού ελέγχου: ο χειριστής διατηρεί τη βασική καθοδήγηση του σκάφους μέσω του τηλεχειριστηρίου, ενώ ένας ενδιάμεσος μικροελεγκτής επιβλέπει τις εντολές σε πραγματικό χρόνο. Όταν το αεροσκάφος πλησιάζει επικίνδυνα σε εμπόδιο, ο μικροελεγκτής παρεμβαίνει αυτόνομα, τροποποιώντας τις εντολές του χειριστή πριν τις προωθήσει στον ελεγκτή πτήσης, ώστε να διατηρηθεί το επιθυμητό περιθώριο ασφαλείας.

Η αντίληψη του περιβάλλοντος υλοποιείται με τρεις πολυζωνικούς αισθητήρες Time-of-Flight, τοποθετημένους σε γωνίες 0° , -90° και $+90^\circ$ ως προς τη μύτη του αεροσκάφους, καθένας από τους οποίους μετράει 64 αποστάσεις έως 4 m σε ένα $45^\circ \times 45^\circ$ τετραγωνικό οπτικό πεδίο.

Οι μετρήσεις επεξεργάζονται από ένα φίλτρο Kalman σταθερής ταχύτητας, το οποίο εκτελεί πρόβλεψη και διόρθωση σε ένα διάλυσμα κατάστασης δύο μεγεθών, εκτιμώντας ταυτόχρονα την απόσταση και την ταχύτητα προσέγγισης προς το εμπόδιο. Οι φιλτραρισμένες εκτιμήσεις τροφοδοτούν στη συνέχεια τον βρόχο ελέγχου.

Ο βρόχος ελέγχου υλοποιεί τη μέθοδο των φραγμένων συναρτήσεων. Κάθε μέτρηση παράγει έναν γραμμικό περιορισμό στο επίπεδο των εντολών ταχύτητας. Η τελική εντολή προκύπτει από την επίλυση ενός τετραγωνικού προβλήματος δύο μεταβλητών — της εμπρόσθιας και της πλάγιας ταχύτητας —, το οποίο επιστρέφει το πλησιέστερο επιτρεπτό σημείο στην εντολή του χειριστή, εξασφαλίζοντας ελάχιστη παρέμβαση.

Η πειραματική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω δοκιμαστικών πτήσεων σε εσωτερικό χώρο. Τα δεδομένα των αισθητήρων αποστέλλονταν σε πραγματικό χρόνο μέσω τηλεμετρίας και αποθηκεύονταν σε σταθμό εδάφους, επιτρέποντας στη συνέχεια την προσομοίωση, ανάλυση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου πάνω στα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα.

Development of an assisted and safe flight system for an unmanned aerial vehicle

«Stylianos Tsiochas»

Abstract

This thesis presents the design and implementation of an assisted navigation and obstacle avoidance system for a quadrotor. The system is based on a shared control architecture: the operator retains high-level manual guidance of the aircraft via the radio control receiver, while an intermediate co-processor monitors steering commands in real time. When the quadrotor approaches an obstacle beyond a safe threshold, the co-processor intervenes autonomously, dynamically modifying the control inputs before forwarding them to the flight controller to guarantee a prescribed safety margin.

Environmental perception is accomplished using three VL53L8CX multizone Time-of-Flight (ToF) sensors placed at 0° , -90° , and $+90^\circ$ relative to the nose of the aircraft, each measuring distances up to four meters across an 8×8 zone grid.

Sensor measurements are processed using a constant-velocity Kalman filter, which performs state prediction and correction on a two-dimensional state vector to simultaneously estimate the distance and approach velocity relative to obstacles. The filtered state estimates are subsequently fed into the control loop.

The control loop implements Control Barrier Functions. Each zone measurement yields a linear constraint in the velocity command space. The finalized control input is computed by solving a two-variable quadratic program—over pitch and roll velocity commands—which yields the admissible control input closest to the operator's intent, thereby ensuring minimal intervention.

Experimental evaluation was conducted through indoor test flights. Sensor telemetry was streamed in real time and logged at a ground station, enabling subsequent simulation, analysis, and performance validation of the algorithm using the real-world flight data.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους γονείς, τους φίλους και τους συναδέλφους μου, για την αμέριστη συμπαράσταση, την κατανόηση και την ανεξάντλητη υπομονή που επέδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη.....	v
Abstract.....	vi
Ευχαριστίες.....	vii
Περιεχόμενα.....	viii
Κατάλογος Σχημάτων.....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Συντομογραφίες.....	xiii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή και στόχοι της Εργασίας.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Πεδίο Εφαρμογής και κίνητρο.....	1
1.3 Διατύπωση του προβλήματος.....	1
1.4 Δομή της εργασίας.....	2
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο.....	3
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.2 Εκτίμηση και φιλτράρισμα μετρήσεων.....	3
2.2.1 Ιστορική αναδρομή και εφαρμογές του φίλτρου Kalman.....	3
2.2.2 Επεξήγηση του διακριτού φίλτρου Kalman.....	4
2.3 Αλγόριθμοι αποφυγής εμποδίων.....	5
2.3.1 Τεχνητά δυναμικά πεδία (APF).....	5
2.3.2 Δομική ασυμβατότητα APF με την ημιαυτόνομη υποβοήθηση.....	6
2.3.3 Εναλλακτικές προσεγγίσεις.....	6
2.3.4 Εισαγωγή στις Συναρτήσεις Φραγμού.....	7
2.3.5 Συναρτήσεις Φραγμού Μεθοδολογία.....	7
2.3.6 Βελτιστοποίηση μέσω Τετραγωνικού Προγραμματισμού (CBF-QP).....	8
Κεφάλαιο 3ο: Τοπολογία διασύνδεσης και υλικό πρωτοτύπου.....	10
3.1 Εισαγωγή.....	10
3.2 Πλατφόρμα τετρακοπτέρου και λογισμικό πτήσης.....	10
3.2.1 Σασί, προπέλες και μπαταρία.....	11
3.2.2 Ελεγκτής πτήσης και λειτουργικό Betaflight.....	13
3.2.3 Μοτέρ και έλεγχος μέσω ελεγκτών ταχύτητας.....	14
3.3 Σύστημα τηλεχειρισμού και ασύρματα ζεύξη ELRS.....	16
3.3.1 Το σειριακό πρωτόκολλο CRSF.....	17

3.3.2 Αντιστοίχιση δεδομένων τηλεχειρισμού σε ταχύτητες αναφοράς.....	18
3.4 Ο ρόλος του ενδιάμεσα μικροελεγκτή (STM32G474RE).....	20
3.5 Πολυζωνικοί αισθητήρες πτήσης (ToF).....	22
Κεφάλαιο 4ο: Προσαρμογή των μαθηματικών μοντέλων στο σύστημα αποφυγής.....	24
4.1 Εισαγωγή.....	24
4.2 Γεωμετρική επεξεργασία των μετρήσεων.....	24
4.2.1 Γεωμετρία του πλέγματος ζωνών.....	24
4.2.2 Ανάλυση σε Καρτεσιανές Συνιστώσες.....	25
4.2.3 Μετάβαση στο σύστημα αναφοράς του αεροσκάφους.....	26
4.3 Διαλογή και αναγωγή δεδομένων.....	27
4.3.1 Έλεγχος εγκυρότητας.....	27
4.3.2 Κατακόρυφη πύλη.....	28
4.3.3 Οριοθέτηση πλάτους ασφαλείας.....	29
4.3.4 Ανάγνωση ανά στήλη.....	29
4.4 Εκτίμηση απόστασης και ταχύτητας προσέγγισης.....	30
4.4.1 Διαμόρφωση του μοντέλου κατάστασης.....	30
4.4.2 Ασύμμετρη πύλη σφάλματος πρόβλεψης.....	33
4.4.3 Μηχανισμοί προστασίας από απόκλιση του μοντέλου.....	33
4.5 Αλγόριθμος ελέγχου μέσω συναρτήσεων φραγμού.....	34
4.5.1 Η συνάρτηση φραγμού και η αναλλοιωτότητα του ασφαλούς συνόλου.....	35
4.5.2 Από τη συνθήκη στον γραμμικό περιορισμό.....	35
4.5.3 Ανάδραση της μετρούμενης ταχύτητας.....	36
4.5.4 Το κατώφλι της απαιτούμενης υποχώρησης.....	37
4.5.5 Η διπλομέτρηση της ταχύτητας του αεροσκάφους.....	37
4.6 Ο τετραγωνικός προγραμματισμός.....	38
4.6.1 Διατύπωση ελάχιστης παρέμβασης.....	38
4.6.2 Ακριβής επίλυση βάσει γεωμετρικού ελέγχου των υποψηφίων.....	38
4.6.3 Διαχείριση μη επιλύσιμων προβλημάτων και διαβαθμισμένη υποβάθμιση.....	39
4.6.4 Ο ρόλος και η θέση του κορεσμού στον υπολογισμό.....	40
Κεφάλαιο 5ο: Αξιολόγηση του συστήματος.....	42
5.1 Εισαγωγή.....	42
5.1.1 Κριτήρια εγκυρότητας καταγραφών.....	42
5.1.2 Καταγραφόμενα μεγέθη.....	42
5.1.3 Οι πειραματικές διατάξεις.....	42
5.2 Αξιολόγηση του φίλτρου Kalman.....	43

5.2.1 Δεδομένα και κριτήρια αξιολόγησης.....	43
5.2.2 Ακρίβεια πρόβλεψης.....	45
5.2.3 Αξιολόγηση Συνέπειας του Φίλτρου (NIS).....	46
5.2.4 Συστηματική απόκλιση και δομή των σφαλμάτων.....	46
5.2.5 Συνολική Αξιολόγηση και Σύγκριση Αισθητήρων.....	48
5.3 Αξιολόγηση της αποφυγής (CBF+QP).....	49
5.3.1 Στατικά εμπόδια.....	50
5.3.2 Κινούμενο εμπόδιο.....	51
5.3.3 Διέλευση από στενό πέρασμα και μη επιλύσιμοι κύκλοι εκτέλεσης.....	52
5.4 Σύγκριση με τη μέθοδο τεχνητών δυναμικών πεδίων.....	55
Κεφάλαιο 6ο: Τελικά συμπεράσματα και προτάσεις περαιτέρω ανάπτυξης του συστήματος.....	57
6.1 Συμπεράσματα.....	57
6.2 Σύγκριση με συναφή εργασία.....	58
6.3 Μελλοντικές επεκτάσεις.....	58
6.4 Επίλογος.....	59
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	60

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3.1: Σασί 5”.....	12
Σχήμα 3.2: Μπαταρία LiPo.....	13
Σχήμα 3.3: Ελεγκτής πτήσης.....	14
Σχήμα 3.4: Το λογισμικό Betaflight.....	14
Σχήμα 3.5: Μηχανικά μέρη ενός μοτέρ.....	15
Σχήμα 3.6: Δέκτης και πομπός ELRS.....	17
Σχήμα 3.7: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος.....	21
Σχήμα 4.1: Γεωμετρία του πλέγματος ζωνών. (α) Η διάταξη 8×8 και η θέση του οπτικού άξονα. (β) Η γωνιακή κατανομή των στηλών εντός του οπτικού πεδίου των 45°	25
Σχήμα 5.1: Διαγνωστικά διαγράμματα φίλτρου Kalman.....	44
Σχήμα 5.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων και των τριών αισθητήρων.....	48
Σχήμα 5.3: Σύνοψη πτήσης με στατικά εμπόδια.....	50
Σχήμα 5.4: Στιγμιότυπο προσέγγισης εμποδίου σε ακίνητο αεροσκάφος.....	51
Σχήμα 5.5: Στιγμιότυπο προσέγγισης κινούμενου εμποδίου σε κινούμενο αεροσκάφος.....	52
Σχήμα 5.6: Χρονική κατανομή των ενεργών περιορισμών και των μη επιλύσιμων κύκλων εκτέλεσης.....	53
Σχήμα 5.7: Στιγμιότυπο διέλευσης από στενό πέρασμα.....	53
Σχήμα 5.8: Διέλευση αεροσκάφους από στενό πέρασμα.....	54
Σχήμα 5.9: Αντιπαραβολή νόμων ελέγχου επί των ίδιων δεδομένων.....	56

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: BoM.....	10
Πίνακας 3.2: Συμβολισμοί μετατροπής ticks.....	18
Πίνακας 3.3: Μετατροπή ticks σε m/s.....	19
Πίνακας 3.4: Μετατροπή m/s σε ticks.....	19
Πίνακας 3.5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του STM32G474RE.....	21
Πίνακας 4.1: Πίνακας κωδικών κατάστασης του αισθητήρα VL53L8CX [19, Πίν. 4].....	27
Πίνακας 5.1: Πειραματική διάταξη.....	42
Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δύο πτήσεων.....	55

Συντομογραφίες

APF	Artificial Potential Field — Τεχνητό Δυναμικό Πεδίο
BLE	Bluetooth Low Energy
BOM	Bill of Materials — Πίνακας Υλικών
CBF	Control Barrier Function — Συνάρτηση Φραγμού
CRC	Cyclic Redundancy Check — Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού
CRSF	Crossfire Serial Protocol
CS	Chip Select — Επιλογή Ολοκληρωμένου
DMA	Direct Memory Access — Άμεση Προσπέλαση Μνήμης
DWA	Dynamic Window Approach
ELRS	ExpressLRS
EMF	Electromotive Force — Ηλεκτρεγερτική Δύναμη
ESC	Electronic Speed Controller — Ηλεκτρονικός Ρυθμιστής Στροφών
FC	Flight Controller — Ελεγκτής Πτήσης
FoV	Field of View — Οπτικό Πεδίο
FPV	First Person View — Πτήση με Οπτική Πρώτου Προσώπου
GNSS	Global Navigation Satellite System - Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης
GPIO	General Purpose Input/Output
GPP	Global Path Planning
GPS	Global Positioning System — Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης
HAL	Hardware Abstraction Layer
IMU	Inertial Measurement Unit — Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης
ISR	Interrupt Service Routine — Ρουτίνα Εξυπηρέτησης Διακοπής
KV	Motor Velocity Constant — Σταθερά Στροφών Κινητήρα (rpm/V)
LiDAR	Light Detection and Ranging — Ανίχνευση και Μέτρηση Απόστασης με Φως
LiPo	Lithium Polymer - Μπαταρία Πολυμερών Λιθίου
MPC	Model Predictive Control — Προβλεπτικός Έλεγχος Μοντέλου
NIS	Normalized Innovation Squared — Κανονικοποιημένο Τετραγωνικό Σφάλμα Καινοτομίας
OSD	On Screen Display — Ένδειξη επί της Οθόνης
PDB	Power Distribution Board — Πλακέτα Διανομής Ισχύος

PID	Proportional–Integral–Derivative — Αναλογικός–Ολοκληρωτικός–Διαφορικός Ελεγκτής
QP	Quadratic Program — Τετραγωνικός Προγραμματισμός
RISC	Reduced Instruction Set Computer — Υπολογιστής Περιορισμένου Συνόλου Εντολών
RRT	Rapidly-exploring Random Trees — Ταχέως Εξερευνώντα Τυχαία Δέντρα
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping — Ταυτόχρονος Εντοπισμός και Χαρτογράφηση
SPAD	Single Photon Avalanche Diode
SPI	Serial Peripheral Interface
ToF	Time of Flight — Χρόνος Πτήσης
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle — Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα
ULD	Ultra Lite Driver (οδηγός λογισμικού της STMicroelectronics)
VFH	Vector Field Histogram
VO	Velocity Obstacles — Εμπόδια Ταχύτητας

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή και στόχοι της Εργασίας

1.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο οριοθετεί το πρόβλημα που πραγματεύεται η διπλωματική εργασία και τεκμηριώνει το κίνητρο πίσω από την επιλογή του θέματος. Στη συνέχεια, διατυπώνεται ο κεντρικός σκοπός μαζί με τους επιμέρους μετρήσιμους στόχους της υλοποίησης, ενώ συνοψίζεται η πρωτότυπη συνεισφορά της έρευνας.

1.2 Πεδίο Εφαρμογής και κίνητρο

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση τετρακοπτέρων έχει επεκταθεί ραγδαία σε εφαρμογές όπως οι εσωτερικές επιθεωρήσεις βιομηχανικών εγκαταστάσεων, η διαχείριση αποθηκών και η επιτήρηση κρίσιμων έργων υποδομής. Σε αυτά τα περιβάλλοντα, η πλοήγηση καθίσταται ιδιαίτερα απαιτητική λόγω της απουσίας σήματος GNSS. Σε περιπτώσεις ημιαυτόνομης ή αυτόνομης πτήσης σε στενούς χώρους, ένα ενδεχόμενο σφάλμα χειρισμού και η επακόλουθη σύγκρουση εγκυμονούν σοβαρούς κινδύνους: άμεσες υλικές ζημιές στον εξοπλισμό του τετρακοπτέρου, κίνδυνο τραυματισμού του παρευρισκόμενου προσωπικού και δυνητική απώλεια κρίσιμων δεδομένων της εκάστοτε αποστολής.

Αν και η βιομηχανία προσφέρει εμπορικές λύσεις αποφυγής εμποδίων που βασίζονται σε στερεοσκοπικές κάμερες ή αισθητήρες LiDAR, τα συστήματα αυτά κρίνονται δυσανάλογα βαριά, ενεργοβόρα και υψηλού κόστους. Λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς και φυσικούς περιορισμούς του υλικού, η ανάπτυξη ενός συστήματος υποβοήθησης του χειριστή αναδεικνύεται ως απαραίτητο πρώτο στάδιο, πριν από την επίτευξη πλήρους αυτονομίας. Η παρούσα εργασία θέτει τα θεμέλια πάνω στα οποία θα βασιστεί η μελλοντική ανάπτυξη πλήρους αυτονομίας, αξιοποιώντας συνδυασμό αισθητήρων και διατηρώντας χαμηλό κόστος υλοποίησης.

1.3 Διατύπωση του προβλήματος

Η ανάπτυξη ενός συστήματος αποφυγής εμποδίων σε ένα τετρακόπτερο αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα, το οποίο δεν πηγάζει μόνο από τον σχεδιασμό του κατάλληλου αλγορίθμου, αλλά και από τους περιορισμούς της αρχιτεκτονικής του υλικού, καθώς και την ιδιαίτερη κινηματική φύση του οχήματος. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το σύστημα υποβοήθησης κλήθηκε να αντιμετωπίσει τέσσερις βασικές προκλήσεις :

- **Τον πεπερασμένο χαρακτήρα της αισθητηριακής κάλυψης και τη γεωμετρική παραμόρφωσή της:** Οι αισθητήρες απόστασης διαθέτουν περιορισμένο οπτικό πεδίο και εμβέλεια, ενώ ταυτόχρονα ακολουθούν υποχρεωτικά την κλίση του οχήματος κατά την πτήση. Αυτό καθιστά αναγκαία τόσο την πολυκατευθυντική τοποθέτηση μονάδων, όσο και την εφαρμογή αυστηρών γεωμετρικών πυλών για την απόρριψη ψευδών εμποδίων που εμφανίζονται λόγω της κλίσης, όπως το δάπεδο.
- **Τον θόρυβο κατά την εκτίμηση της ταχύτητας προσέγγισης:** Η ταχύτητα του εμποδίου δεν μετράται άμεσα, αλλά εξάγεται μέσω της μεταβολής της απόστασης, διαδικασία που ενισχύει τον θόρυβο και προκαλεί σπασμωδικές, βίαιες διορθώσεις. Η πρόκληση αυτή αντιμετωπίστηκε με τον σχεδιασμό ενός ασύμμετρου φίλτρου Kalman, το οποίο εξομαλύνει τις ενδείξεις ενώ ταυτόχρονα αποδέχεται ακαριαία κάθε μέτρηση που υποδεικνύει ραγδαία προσέγγιση.

- **Την απουσία πρόσβασης στα δεδομένα κατάστασης του ελεγκτή πτήσης:** Η διάταξη λειτουργεί ως αυτόνομο σύστημα παρεμβολής στη ζεύξη, χωρίς να λαμβάνει εσωτερική εκτίμηση κατάστασης από τον FC, αναγκάζομενη να βασιστεί αποκλειστικά στις δικές της μετρήσεις.
- **Τις συγκρούσεις περιορισμών στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης:** Σε στενούς χώρους, η ενεργοποίηση πολλαπλών αισθητήρων δημιουργεί αντιφατικές απαιτήσεις ελέγχου. Αυτό απαιτεί τη μοντελοποίηση του προβλήματος μέσω Συναρτήσεων Φραγμού(CBF) και την επίλυσή του με Τετραγωνικό Προγραμματισμό (QP), ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη ασφαλής εντολή ακόμα και σε οριακές καταστάσεις.

Το σύνολο των παραπάνω περιορισμών καθορίζει τον τεχνικό πυρήνα της παρούσας διπλωματικής, βασική επιδίωξη της οποίας αποτελεί η αποτελεσματική αντιμετώπισή τους. Συγκεκριμένα, η εργασία θέτει ως πρωταρχικούς, μετρήσιμους στόχους τη διατήρηση ελάχιστης απόστασης 30 cm από κάθε ανιχνευτόμενο εμπόδιο και την πλήρη διατήρηση του ελέγχου από τον χειριστή, χωρίς καμία αλγοριθμική παρέμβαση, όταν ο χώρος είναι ελεύθερος.

1.4 Δομή της εργασίας

Η διπλωματική εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το πλαίσιο της εργασίας, οι προκλήσεις που αντιμετωπίζονται και οι στόχοι της προτεινόμενης λύσης. Στο Κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά την εκτίμηση μεγεθών από θορυβώδεις μετρήσεις με το διακριτό φίλτρο Kalman και ολοκληρώνεται με τη θεωρία των συναρτήσεων φραγμού και τη διατύπωσή τους ως πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού.

Το Κεφάλαιο 3 περιγράφει την πλατφόρμα του τετρακοπτέρου και την τοπολογία διασύνδεσης, δηλαδή τον ελεγκτή πτήσης, το σύστημα τηλεχειρισμού και την ασύρματη ζεύξη, τους πολυζωνικούς αισθητήρες χρόνου πτήσης και τον ρόλο του ενδιάμεσου μικροελεγκτή που παρεμβάλλεται στη ζεύξη δέκτη-ελεγκτή πτήσης. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται η προσαρμογή των μαθηματικών μοντέλων στο συγκεκριμένο σύστημα, ακολουθώντας τη σειρά με την οποία επεξεργάζεται την πληροφορία ο βρόχος ελέγχου. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής αξιολόγησης επί πραγματικών δεδομένων πτήσης, τόσο για τον εκτιμητή όσο και για τον αλγόριθμο αποφυγής, μαζί με τη σύγκριση έναντι της μεθόδου των τεχνητών δυναμικών πεδίων, ενώ στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα συμπεράσματα και προτείνονται πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου συστήματος υποβοήθησης και αποφυγής εμποδίων απαιτεί τη σύνθεση τεχνικών από τέσσερις διακριτούς μαθηματικούς τομείς: τη στοχαστική εκτίμηση, τη γεωμετρία, τον μη γραμμικό έλεγχο και τη μαθηματική βελτιστοποίηση.

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η θεωρητική προσέγγιση για την επίλυση τριών βασικών προκλήσεων. Αρχικά, προσεγγίζεται το ζήτημα της αξιόπιστης αντίληψης του περιβάλλοντος και του φιλτραρίσματος του θορύβου των μετρήσεων, αξιοποιώντας τη θεωρία εκτίμησης κατάστασης (Φίλτρο Kalman). Στη συνέχεια, εξετάζεται η λήψη αποφάσεων αποφυγής. Ιστορικά η αποφυγή εμποδίων προσεγγίστηκε μέσω των Τεχνητών Δυναμικών Πεδίων (APF), τα οποία όμως πάσχουν από εγγενείς περιορισμούς όπως ο εγκλωβισμός σε τοπικά ελάχιστα [1]. Για τον λόγο αυτό, αναλύονται οι Συναρτήσεις Φραγμού (CBF), οι οποίες προσφέρουν αυστηρές μαθηματικές εγγυήσεις ασφαλείας, βασισμένες στη θεωρία των αναλλοίωτων συνόλων [2]. Τέλος, αναλύεται η βελτιστοποίηση αυτών των αποφάσεων εντός αυστηρών χρονικών και χωρικών ορίων μέσω της μεθόδου Τετραγωνικού Προγραμματισμού (QP).

2.2 Εκτίμηση και φιλτράρισμα μετρήσεων

Θεμελιώδης προϋπόθεση για τη λειτουργία κάθε αυτόνομου ρομποτικού συστήματος αποτελεί η ικανότητα ακριβούς αντίληψης του περιβάλλοντος, αξιοποιώντας τα δεδομένα των αισθητήρων που φέρει. Σε πραγματικές συνθήκες αυτό μπορεί να αποδειχθεί πρόβλημα καθώς δημιουργείται “θόρυβος” στις μετρήσεις από φυσικούς περιορισμούς του υλικού, έντονες μηχανικές δονήσεις και δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος. Λογικό επακόλουθο χρήσης αυτών των ακατέργαστων δεδομένων είναι η κακή λήψη αποφάσεων του συστήματος.

Παραδοσιακά, για την εξομάλυνση του θορύβου χρησιμοποιούνται απλά φίλτρα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, όπως τα βαθυπερατά φίλτρα (Low-pass filters) και τα φίλτρα κινητού μέσου όρου (Moving Average). Παρότι τα φίλτρα αυτά μειώνουν αποτελεσματικά τη διακύμανση του θορύβου, πάσχουν από μια κρίσιμη μαθηματική αδυναμία: εισάγουν αναπόφευκτη χρονική υστέρηση (phase lag) στο σήμα εξόδου [3]. Σε συστήματα αποφυγής εμποδίων όπου το όχημα κινείται με υψηλή ταχύτητα, η χρονική υστέρηση αποβαίνει καταστροφική, προκαλώντας καθυστερημένη αντίδραση στον έλεγχο και οδηγεί στη σύγκρουση.

2.2.1 Ιστορική αναδρομή και εφαρμογές του φίλτρου Kalman

Για την επίλυση του προβλήματος της χρονικής υστέρησης, η θεωρία ελέγχου αξιοποιεί μεθοδολογίες εκτίμησης κατάστασης, οι οποίες βασίζονται σε προγνωστικά κινηματικά μοντέλα. Μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος προς αυτή την κατεύθυνση είναι το φίλτρο Kalman, το οποίο αποτελεί έναν αναδρομικό αλγόριθμο βέλτιστης εκτίμησης για γραμμικά δυναμικά συστήματα [4].

Το φίλτρο Kalman, υιοθετήθηκε από την αεροδιαστημική βιομηχανία, διαδραματίζοντας κρίσιμο ρόλο στο πρόγραμμα Apollo και αποτέλεσε επανάσταση στις τεχνολογίες ραντάρ, συνδυάζοντας το κινηματικό μοντέλο των στόχων με τις αβέβαιες ηχώ των αισθητήρων [5]. Στον τομέα της ρομποτικής, η ενσωμάτωση του αλγορίθμου, έγινε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και απέδειξε θεωρητικά ότι το φίλτρο Kalman μπορεί να διαχειριστεί με βέλτιστο τρόπο την αβεβαιότητα ως προς τη θέση ενός ρομπότ στον χώρο, εισάγοντας τη θεμελιώδη έννοια της στοχαστικής χαρτογράφησης [6].

2.2.2 Επεξήγηση του διακριτού φίλτρου Kalman

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά φίλτρα, τα οποία επεξεργάζονται τις μετρήσεις αγνοώντας τη φυσική προέλευση του σήματος, το διακριτό Φίλτρο Kalman ενσωματώνει τους φυσικούς και κινηματικούς κανόνες που διέπουν το ίδιο το σύστημα στη διαδικασία εκτίμησης. Ουσιαστικά, το φίλτρο «γνωρίζει» εκ των προτέρων πώς αναμένεται να συμπεριφερθεί μαθηματικά το σύστημα από τη μία χρονική στιγμή στην άλλη.

Για να αποδοθεί αυτό αυστηρά, η συνολική τρέχουσα εικόνα του συστήματος κωδικοποιείται σε ένα διάνυσμα, το οποίο ονομάζεται διάνυσμα κατάστασης x_k . Το διάνυσμα αυτό συγκεντρώνει όλες τις εσωτερικές μεταβλητές που είναι απολύτως αναγκαίες για την πλήρη περιγραφή του συστήματος τη δεδομένη χρονική στιγμή. Η εξέλιξη αυτού του διανύσματος από το προηγούμενο χρονικό βήμα $k-1$ στο επόμενο βήμα k δεν είναι τυχαία, αλλά υπακούει σε ένα διακριτό γραμμικό μοντέλο [5]. Η μετάβαση αυτή εκφράζεται μέσω της εξίσωσης κατάστασης:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + W_{k-1} \quad (2.1)$$

ενώ η μέτρηση του αισθητήρα σχετίζεται με το διάνυσμα κατάστασης μέσω της εξίσωσης:

$$z_k = Hx_k + u_k \quad (2.2)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, A είναι ο πίνακας μετάβασης της κατάστασης, B ο πίνακας ελέγχου, z_k το διάνυσμα μέτρησης και H ο πίνακας παρατήρησης. Οι όροι w_k και u_k αναπαριστούν τον θόρυβο διαδικασίας (process noise) και τον θόρυβο μέτρησης (measurement noise) αντίστοιχα, οι οποίοι θεωρούνται λευκοί θόρυβοι, με κανονική κατανομή και πίνακες συνδιακύμανσης Q και R [5].

Η λειτουργία του φίλτρου εκτελείται σε δύο αναδρομικά στάδια:

1. Στάδιο Πρόβλεψης: Το φίλτρο προβάλλει την κατάσταση και την αβεβαιότητα (πίνακας συνδιακύμανσης σφάλματος P) στο τρέχον χρονικό βήμα k , πριν ληφθεί η νέα μέτρηση:

$$\hat{x}_{k|k-1} = A\hat{x}_{k-1|k-1} \quad (2.3)$$

$$P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q \quad (2.4)$$

2. Στάδιο Διόρθωσης: Μόλις γίνει διαθέσιμη η νέα μέτρηση z_k , υπολογίζεται το κέρδος Kalman K_k . Το κέρδος αυτό ρυθμίζει την ισορροπία ανάμεσα στην πρόβλεψη του μοντέλου και την πραγματική μέτρηση του αισθητήρα. :

$$K_k = P_{k|k-1}H^T(H P_{k|k-1}H^T + R)^{-1} \quad (2.5)$$

Τέλος, η διορθωμένη εκτίμηση της κατάστασης και η υπολειπόμενη αβεβαιότητα του συστήματος υπολογίζονται ως εξής:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k|k-1}) \quad (2.6)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H)P_{k|k-1} \quad (2.7)$$

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ταυτόχρονη εξαγωγή μη παρατηρήσιμων μεταβλητών της κατάστασης, ελαχιστοποιώντας μαθηματικά τη διακύμανση του σφάλματος εκτίμησης, χωρίς την εισαγωγή χρονικής υστέρησης στο σύστημα.

2.3 Αλγόριθμοι αποφυγής εμποδίων

Έχοντας εξασφαλίσει έγκυρες και καθαρές εκτιμήσεις του χώρου, το επόμενο στάδιο αφορά τον σχεδιασμό του αλγορίθμου αποφυγής εμποδίων. Στο πλαίσιο της αυτόνομης πλοήγησης, η αποφυγή συγκρούσεων αντιμετωπίζεται σε δύο επίπεδα της αρχιτεκτονικής ελέγχου: στο επίπεδο του καθολικού σχεδιασμού (Global Path Planning) και στο επίπεδο της τοπικής, αντιδραστικής αποφυγής (Reactive Avoidance).

Στο επίπεδο του καθολικού σχεδιασμού, τεχνικές όπως οι αλγόριθμοι A*, τα δέντρα RRT (Rapidly-exploring Random Trees) και οι αρχιτεκτονικές SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) χρησιμοποιούνται για την αποφυγή γνωστών, χαρτογραφημένων εμποδίων μέσω της παραγωγής ασφαλών μονοπατιών σε κλίμακα ολόκληρης της διαδρομής. Μολονότι οι μέθοδοι αυτές προσφέρουν βέλτιστες λύσεις σε αυτό το επίπεδο, απαιτούν τη συνεχή διατήρηση και αναζήτηση χαρτών του περιβάλλοντος, εισάγοντας υψηλό υπολογιστικό φόρτο [7].

Ως εκ τούτου, για τον σχεδιασμό ενός συστήματος άμεσης παρέμβασης, η επιλογή περιορίζεται αυστηρά στις αντιδραστικές μεθόδους. Οι αλγόριθμοι αυτοί δεν αναζητούν συνολική διαδρομή, αλλά παρακολουθούν απευθείας τα δεδομένα των αισθητήρων και παράγουν ακαριαίες εντολές ελέγχου.

2.3.1 Τεχνητά δυναμικά πεδία (APF)

Μία από τις πλέον διαδεδομένες αντιδραστικές προσεγγίσεις είναι τα Τεχνητά Δυναμικά Πεδία (Artificial Potential Fields - APF) [8]. Η μέθοδος μοντελοποιεί το όχημα ως ένα σωματίδιο που κινείται υπό την επίδραση ενός ελκτικού πεδίου με κατεύθυνση τον στόχο και ενός απωστικού πεδίου από τα εμπόδια. Στην παρούσα εφαρμογή υλοποιείται αποκλειστικά η απωστική συνιστώσα, καθώς τον ελκτικό ρόλο επιτελεί η ίδια η εντολή του χειριστή.

Παρά την υπολογιστική της απλότητα, η μέθοδος παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς. Ο πρώτος και ευρύτερα τεκμηριωμένος είναι ο εγκλωβισμός του συστήματος σε τοπικά ελάχιστα, όπου η απωστική συνιστώσα εξισορροπεί την ελκτική και το όχημα ακινητοποιείται χωρίς να έχει φτάσει στον στόχο [1]. Ο δεύτερος αφορά την εμφάνιση ταλαντώσεων κατά τη διέλευση από στενά περάσματα, όπου οι απωστικές συνιστώσες από αντικείμενα εκατέρωθεν εναλλάσσονται σε κυριαρχία και παράγουν επαναλαμβανόμενες αντίρροπες διορθώσεις [1].

Επιπρόσθετα, κατά την πρακτική εφαρμογή, αναδεικνύεται ένα σχεδιαστικό δίλημμα ως προς τη μαθηματική μορφή της απωστικής δύναμης. Η χρήση συνάρτησης με ανώτατο όριο περιορίζει το μέγεθος της απώθησης σε προκαθορισμένη τιμή, με αποτέλεσμα η μέγιστη διαθέσιμη πέδηση να αντιστοιχεί, στην καλύτερη περίπτωση, στον μηδενισμό της εντολής. Επειδή όμως, μηδενική εντολή δεν συνεπάγεται μηδενική ταχύτητα σε όχημα με αδράνεια και πεπερασμένη σταθερά χρόνου απόκρισης, το σύστημα εξακολουθεί να διανύει σημαντική απόσταση μετά τον μηδενισμό και η σύγκρουση παραμένει εφικτή. Η χρήση μη φραγμένων συναρτήσεων, όπως το κλασικό αντιστρόφως τετράγωνο της απόστασης $1/d^2$, αίρει μεν τον περιορισμό αυτό, εισάγει όμως ισχυρή ενίσχυση του θορύβου στις μετρήσεις ακριβώς στην περιοχή όπου ο θόρυβος είναι μεγαλύτερος, παράγοντας βίαιες εντολές που υποβαθμίζουν την ευστάθεια του κλειστού βρόχου.

2.3.2 Δομική ασυμβατότητα APF με την ημιαυτόνομη υποβοήθηση

Πέραν των παραπάνω αδυναμιών, η μέθοδος των δυναμικών πεδίων παρουσιάζει θεμελιώδη δομική ασυμβατότητα με εφαρμογές ημιαυτόνομης υποβοήθησης. Η αδυναμία αυτή εστιάζεται σε τρία κρίσιμα σημεία:

- **Αγνόηση Πρόθεσης και Κινηματικής Κατάστασης:** Ο απωστικός νόμος δρα αφαιρετικά επί της εντολής του χειριστή και εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση του εμποδίου. Εφόσον αγνοεί πλήρως την τρέχουσα ταχύτητα προσέγγισης, επιβάλλει αναπόφευκτα συμβιβασμούς στη ρύθμιση του κέρδους ελέγχου. Ειδικότερα, ένα κέρδος απόθησης ικανό να εξασφαλίσει την ασφάλεια του συστήματος σε υψηλές ταχύτητες, καθίσταται υπερβολικά παρεμβατικό στις χαμηλές ταχύτητες, και αντίστροφα.
- **Παραγωγή Ανεπιθύμητης Κίνησης:** Επειδή η δράση του APF εξαρτάται μόνο από την απόσταση, το πεδίο επιβάλλει κίνηση ακόμη και όταν η εντολή του χειριστή είναι μηδενική και το εμπόδιο δεν πλησιάζει, δημιουργώντας ανεπιθύμητη ολίσθηση.
- **Απουσία Εγγυήσεων Ασφαλείας:** Η ασφάλεια στα APF προκύπτει εμπειρικά, εκ των υστέρων, μέσω της ρύθμισης των κερδών (heuristic tuning), και δεν αποτελεί εγγενή ιδιότητα του κλειστού βρόχου. Δεν υφίσταται καμία αυστηρή μαθηματική εγγύηση για την αποτροπή της σύγκρουσης.

2.3.3 Εναλλακτικές προσεγγίσεις

Εναλλακτικές μεθοδολογίες αντιδραστικής πλοήγησης, όπως ο Δυναμικός Χώρος Αναζήτησης (Dynamic Window Approach - DWA) [9] και τα Εμπόδια Ταχύτητας (Velocity Obstacles - VO) [10], επιχειρούν επίσης να εξάγουν ασφαλείς εντολές ταχύτητας, προσφέροντας βελτιωμένη διαχείριση κινούμενων εμποδίων συγκριτικά με τα δυναμικά πεδία. Μολονότι πλεονεκτούν σε ορισμένα σενάρια, η ενσωμάτωσή τους σε συστήματα ελέγχου υψηλής συχνότητας συναντά θεωρητικούς και υπολογιστικούς φραγμούς.

Αφενός, προσεγγίσεις όπως ο αλγόριθμος DWA βασίζονται στη διακριτοποίηση του εφικτού χώρου ταχυτήτων και στην πρόβλεψη μελλοντικών τροχιών, προκειμένου να αξιολογήσουν τις υποψήφιες τροχιές βάσει μιας εμπειρικής συνάρτησης κόστους [9]. Η διαδικασία αυτή εισάγει ένα κρίσιμο υπολογιστικό δίλημμα: η αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος αναζήτησης προσφέρει μεν καλύτερη λύση, αλλά αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο σε βαθμό απαγορευτικό για συστήματα ελέγχου υψηλής συχνότητας. Αφετέρου, τεχνικές όπως τα VO χαρτογραφούν τους χωρικούς περιορισμούς σε γεωμετρικούς κώνους απαγορευμένων ταχυτήτων. Στη βασική τους όμως μορφή προϋποθέτουν ότι το εμπόδιο κινείται με σταθερή ταχύτητα και ότι το όχημα μπορεί να μεταβάλλει ακαριαία τη δική του, παραδοχές που δεν ισχύουν σε αεροσκάφος με σημαντική αδράνεια και πεπερασμένη σταθερά χρόνου απόκρισης [10].

Το βασικό μειονέκτημα, όμως, είναι η απουσία μαθηματικής τεκμηρίωσης. Σε αντίθεση με τις μεθόδους που βασίζονται στην αναλυτική θεωρία ελέγχου, οι αλγόριθμοι δειγματοληπτικής αναζήτησης αξιολογούν την ασφάλεια βάσει εμπειρικών κριτηρίων. Ως εκ τούτου, δεν δύνανται να αποδείξουν αναλυτικά ότι το σύστημα θα διατηρηθεί διαρκώς εντός της ασφαλούς περιοχής λειτουργίας (forward invariance στη βιβλιογραφία) στο συνεχή χρόνο. Κατά συνέπεια, αδυνατούν να προσφέρουν τις απόλυτες εγγυήσεις αποφυγής σύγκρουσης που είναι μαθηματικά αναγκαίες για τη λειτουργία ενός ελεγκτή κλειστού βρόχου.

2.3.4 Εισαγωγή στις φραγμένες συναρτήσεις

Προς αντιμετώπιση του συνόλου των παραπάνω προκλήσεων, η σύγχρονη θεωρία μη γραμμικού ελέγχου προκρίνει τη χρήση των φραγμένων συναρτήσεων (Control Barrier Functions - CBF).

Η έννοια των συναρτήσεων φραγμού επινοήθηκε το 1960 στον τομέα της μαθηματικής βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς από τους Fiacco και McCormick [11]. Η πρώτη εισαγωγή της μεθοδολογίας στη θεωρία ελέγχου πραγματοποιήθηκε το 2004 από τους Prajna, Jadbabaie και Παππά [12] με τον όρο «πιστοποιητικά φραγμού», ενώ ο σύγχρονος όρος «Συναρτήσεις Φραγμού» ορίστηκε το 2007 από τους Wieland και Allgöwer [13].

Ωστόσο, η ευρεία καθιέρωσή τους στη σύγχρονη ρομποτική οφείλεται στην καθοριστική συμβολή του Aaron D. Ames και των συνεργατών του κατά τη δεκαετία του 2010 [14], [15]. Η έρευνες τους συνδύασαν τα CBF με προβλήματα Τετραγωνικού Προγραμματισμού (Quadratic Programming - QP), καθιστώντας τα υπολογιστικά ικανά να εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο. Η μεθοδολογία αυτή υιοθετήθηκε ευρέως διότι λειτουργεί ως ένα αυστηρό μαθηματικό «φίλτρο ασφαλείας», παρέχοντας αναλυτικές αποδείξεις αποφυγής συγκρούσεων.

2.3.5 Μεθοδολογία φραγμένων συναρτήσεων

Η θεμελιώδης αρχή των CBF βασίζεται στον ορισμό ενός «ασφαλούς συνόλου», συμβολιζόμενου ως C , εντός του χώρου καταστάσεων του συστήματος. Το σύνολο αυτό ορίζεται μέσω μιας συνεχώς παραγωγίσιμης βαθμωτής συνάρτησης $h(x)$, η οποία μετατρέπει την πρακτική γεωμετρική απαίτηση της αποφυγής σε έναν αριθμητικό δείκτη. Η ασφαλής περιοχή λειτουργίας αντιστοιχεί αποκλειστικά σε μη αρνητικές τιμές της συνάρτησης [16]:

$$C = \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) \geq 0\} \quad (2.8)$$

Θεωρώντας ένα μη γραμμικό σύστημα ελέγχου, το οποίο είναι αφινικό (γραμμικό) ως προς την είσοδο, η δυναμική του περιγράφεται από την εξίσωση [17]:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2.9)$$

όπου $x \in \mathbb{R}^n$ είναι το διάνυσμα κατάστασης, $u \in \mathbb{R}^m$ το διάνυσμα των εντολών ελέγχου, και $f(x)$, $g(x)$ συναρτήσεις που αντιπροσωπεύουν τα διανυσματικά πεδία του συστήματος. Οι συναρτήσεις αυτές περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο η είσοδος ελέγχου επιδρά στη δυναμική του συστήματος, απαιτείται να είναι συνεχείς και να μην απειρίζονται.

Σύμφωνα με την κεντρική θεωρία των CBF, εάν το σύστημα ξεκινήσει εντός του C , θα παραμείνει εντός αυτού για πάντα, εφόσον επιλεγεί ένας νόμος ελέγχου u τέτοιος ώστε ο ρυθμός μεταβολής της συνάρτησης φραγμού να ικανοποιεί την ανισότητα [16]:

$$\dot{h}(x, u) \geq -\alpha h(x) \quad (2.10)$$

Ο όρος α αντιπροσωπεύει μια συνάρτηση αυστηρά αύξουσα με $\alpha(0) = 0$. Στην πράξη του ελέγχου, η συνάρτηση αυτή λειτουργεί ως ένα δυναμικό κέρδος, το οποίο εξαρτάται από το τρέχον περιθώριο ασφαλείας. Η μαθηματική της ερμηνεία είναι άμεση: όσο το σύστημα βρίσκεται βαθιά μέσα στην ασφαλή περιοχή (το $h(x)$ είναι μεγάλο), το $\alpha h(x)$ παίρνει μεγάλη τιμή, επιτρέποντας στην κατάσταση του συστήματος να μεταβάλλεται με υψηλό ρυθμό προς το όριο. Όσο όμως η κατάσταση προσεγγίζει το όριο ασφαλείας $h(x) \rightarrow 0$, το επιτρεπτό όριο προσέγγισης τείνει επίσης στο μηδέν. Αυτό εξαναγκάζει το σύστημα να ανακόψει την πορεία του προς τη μη αποδεκτή περιοχή ακριβώς πάνω στο όριο, εγγυώμενο τη διαρκή παραμονή του εντός του συνόλου C . (Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, η συνάρτηση αυτή επιλέγεται στη γραμμική της μορφή, $\alpha h(x)$, όπου α είναι μια σταθερά θετικού κέρδους).

Για να συνδέσουμε τη θεωρητική ανισότητα με την πραγματική είσοδο ελέγχου u , εφαρμόζουμε τον κανόνα της αλυσίδας $\dot{h} = \nabla h \dot{x}$ και αντικαθιστούμε το $\dot{x}$ με τη δυναμική του συστήματος. Η πράξη αυτή γεννά την τελική συνθήκη των CBF [16]:

$$L_f h(x) + L_g h(x)u \geq -\alpha(h(x)) \quad (2.11)$$

Οι όροι $L_f h(x)$ και $L_g h(x)$ υποδηλώνουν τις Παραγώγους Lie (Lie Derivatives) της συνάρτησης h κατά μήκος των διανυσματικών πεδίων f και g . Πρακτικά, η παράγωγος Lie αποτελεί το εσωτερικό γινόμενο της κλίσης, της συνάρτησης φραγμού με το εκάστοτε διανυσματικό πεδίο ($\nabla h f$). Εκφράζει, επομένως, προς ποια κατεύθυνση και με ποιον ρυθμό μεταβάλλεται το περιθώριο ασφαλείας h , αφενός λόγω της εγγενούς, αυτόνομης δυναμικής του συστήματος (drift dynamics, $L_f h(x)$) και αφετέρου λόγω της επίδρασης που ασκεί η είσοδος ελέγχου ($L_g h(x)$).

Η θεμελιώδης ισχύς αυτής της μεθοδολογίας έγκειται στο γεγονός ότι η παραπάνω σχέση αποτελεί έναν αυστηρό, γραμμικό περιορισμό ως προς το διάνυμα ελέγχου u . Συνεπώς, μεταφράζει την αφηρημένη έννοια της «ασφάλειας» σε έναν άμεσα υπολογίσιμο μαθηματικό περιορισμό.

2.3.6 Βελτιστοποίηση μέσω Τετραγωνικού Προγραμματισμού (CBF-QP)

Όπως αναλύθηκε, η συνθήκη των CBF δεν παράγει μια μοναδική λύση, αλλά ορίζει ένα ολόκληρο σύνολο αποδεκτών εντολών ελέγχου οι οποίες εγγυώνται μαθηματικά την ασφάλεια (αποφυγή σύγκρουσης). Το κρίσιμο ερώτημα που προκύπτει κατά τον σχεδιασμό του ελεγκτή είναι ποια από όλες αυτές τις ασφαλείς εντολές πρέπει να εφαρμοστεί. Η αναζήτηση της ελάχιστης δυνατής απόκλισης μεταξύ αυτών των δύο διανυσμάτων διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης τετραγωνικού σφάλματος. Η ελαχιστοποίηση μιας τετραγωνικής αντικειμενικής συνάρτησης υπό την παρουσία γραμμικών ανισοτικών περιορισμών συνιστά τον ορισμό του Τετραγωνικού Προγραμματισμού.

Εφόσον ο περιορισμός της ασφάλειας ικανοποιείται από την ανισότητα του φραγμού, το ζητούμενο είναι η τελική επιλεγμένη εντολή ελέγχου u να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ονομαστική εντολή u_{nom} που έχει δοθεί από τον χειριστή. Ο QP ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων κυρτής βελτιστοποίησης και εγγυάται την εύρεση του ολικού ελαχίστου σε μικρό υπολογιστικό χρόνο.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ελέγχου διαμορφώνεται ως εξής [14], [16]:

$$\min_{u \in \mathbb{R}} \frac{1}{2} \|u - u_{nom}\|^2 \quad (2.12)$$

$$\text{υπό τον περιορισμό: } L_f h(x) + L_g h(x)u \geq -\alpha(h(x)) \quad (2.13)$$

Η ευκλείδεια νόρμα ποσοτικοποιεί την απόκλιση της τελικής ασφαλούς εντολής u από την αρχική επιθυμητή εντολή u_{nom} υπό τον περιορισμό των παραγώγων Lie της CBF. Εφόσον η εντολή u_{nom} ικανοποιεί ήδη τη συνθήκη του περιορισμού, το αποτέλεσμα την βελτιστοποίησης είναι $u = u_{nom}$ μένοντας έτσι εντός του ασφαλούς συνόλου C . Εάν την παραβιάζει, ο αλγόριθμος θα υπολογίσει την πλησιέστερη δυνατή τιμή που καθιστά την ανισότητα του περιορισμού αληθή.

Προκειμένου το πρόβλημα να επιλυθεί υπολογιστικά από τυποποιημένους αλγορίθμους (QP solvers), μετασχηματίζεται στην κανονική (standard) του μορφή:

$$\min_u \frac{1}{2} u^T H u + f^T u \quad (2.14)$$

$$\text{υπό τον περιορισμό } Au \leq b \quad (2.15)$$

Αναπτύσσοντας την τετραγωνική νόρμα, το πρόβλημα CBF αντιστοιχίζεται άμεσα στην κανονική μορφή. Ο πίνακας βαρών H ταυτίζεται με τον μοναδιαίο πίνακα ($H = I$), ενώ το διάνυσμα του γραμμικού όρου ισούται με $f = -u_{nom}$. Αντίστοιχα, ο πίνακας περιορισμών A και το διάνυσμα b προκύπτουν από τον ανασχηματισμό της ανισότητας του φραγμού, αντιστρέφοντας το πρόσημο:

$$-L_g h(x)u \leq L_f h(x) + a(h(x)) \quad (2.16)$$

Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα του Τετραγωνικού Προγραμματισμού είναι η ικανότητά του να διαχειρίζεται φυσικούς περιορισμούς του συστήματος. Η θεωρητική συνθήκη των CBF, από μόνη της, δεν λαμβάνει υπόψη τις φυσικές δυνατότητες του υλικού (ενεργοποιητές). Κατά συνέπεια, σε οριακές καταστάσεις, ενδέχεται να απαιτήσει πρακτικά μη υλοποιήσιμες τιμές ελέγχου προκειμένου να διατηρήσει το σύστημα εντός του ασφαλούς συνόλου. Εάν το σύστημα ελέγχου επιχειρήσει να εφαρμόσει μια τέτοια εντολή, οι ενεργοποιητές θα περιέλθουν σε κατάσταση κορεσμού. Ο κορεσμός υποβαθμίζει την απόκριση του συστήματος και ακυρώνει τις μαθηματικές εγγυήσεις ασφαλείας του CBF, καθώς η πραγματική είσοδος αποκλίνει από την υπολογισμένη.

Η δομή του QP επιλύει το πρόβλημα αυτό, επιτρέποντας την άμεση ενσωμάτωση λειτουργικών ορίων στο ίδιο το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Προσθέτοντας απλώς επιπλέον γραμμικές ανισότητες της μορφής $u_{min} \leq u \leq u_{max}$ στον πίνακα περιορισμών A , ο αλγόριθμος εξαναγκάζεται να αναζητήσει λύση αποκλειστικά εντός του φυσικά εφικτού χώρου. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι η τελική εντολή ελέγχου δεν θα είναι μόνο θεωρητικά ασφαλής, αλλά και αυστηρά υλοποιήσιμη από το φυσικό σύστημα [14].

Κεφάλαιο 3ο: Τοπολογία διασύνδεσης και υλικό κατασκευής

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του πρωτότυπου τετρακοπτέρου σε επίπεδο υλικού και λογισμικού, καθώς και η τοπολογία διασύνδεσης όλων των επιμέρους στοιχείων μεταξύ τους.

Πέρα από τα καθιερωμένα υποσυστήματα ενός τετρακοπτέρου, η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη διαφοροποιείται ενσωματώνοντας έναν δεύτερο, ανεξάρτητο συνεργατικό μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής αυτός παρεμβάλλεται στη διαδρομή των εντολών, μεταξύ του δέκτη τηλεχειρισμού και του ελεγκτή πτήσης, αναλαμβάνοντας τον ρόλο του κεντρικού κόμβου για την επεξεργασία των δεδομένων επικοινωνίας, αισθητήρων και την εκτέλεση αλγορίθμων αποφυγής.

Για την πλήρη κατανόηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος, η συνέχεια του κεφαλαίου δομείται ως εξής: Αρχικά, παρουσιάζεται η πλατφόρμα πτήσης με τα μηχανικά της μέρη και τον βασικό εξοπλισμό της. Στη συνέχεια, αναλύεται ο ρόλος του συνεργατικού μικροελεγκτή, ακολουθούμενος από την αρχιτεκτονική επικοινωνίας του οχήματος. Εκεί εξετάζεται τόσο ο μετασχηματισμός των εντολών του τηλεχειριστηρίου, όσο και η ασύρματη μετάδοση τηλεμετρίας μεταξύ του τετρακοπτέρου και του σταθμού βάσης. Τέλος, πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση της αρχής λειτουργίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών των αισθητήρων Time-of-Flight (ToF).

3.2 Πλατφόρμα αεροσκάφους και λογισμικό πτήσης

Η πλατφόρμα πτήσης που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας βασίζεται σε δομικά και ηλεκτρονικά υποσυστήματα της κατηγορίας FPV. Τα αεροσκάφη αυτής της κατηγορίας ξεχωρίζουν για την ταχύτητά τους, την αντοχή των υλικών, την απόλυτη ελευθερία κινήσεων και τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο από την κάμερα του αεροσκάφους μέσω ειδικών γυαλιών (FPV Goggles) που φοράει ο πιλότος. Για την εκπόνηση του πειραματικού μέρους της εργασίας, η επιλογή των εξαρτημάτων δεν έγινε με γνώμονα την απόλυτη καταλληλότητά τους, αλλά βάσει της διαθεσιμότητάς τους και της δυνατότητας προσθήκης εξοπλισμού ειδικής κατασκευής, με σκοπό την ταχύτερη ανάπτυξη του πρωτοτύπου. Παρακάτω ακολουθεί ο συγκεντρωτικός κατάλογος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών τους.

Πίνακας 3.1: BoM

Εξάρτημα	Μοντέλο	Ποσότητα	Κόστος (ανά τεμάχιο)
Σασί (Frame)	Pilotix Rocky5	1	50,8€
Ελεγκτής Πτήσης (FC)	Pilotix H743-SLIM	1	90€
Ελεγκτής Στροφών(ESC)	FVT BLHeli S LittleBee - Spring 30A	4	20€
Πλακέτα Διανομής	Matek PDB-XT60	1	15€

Ισχύος (PDB)			
Μοτέρ	RS2205 2300KV	4	14€
Προπέλες	HQ-Prop 5045	4	4,5€
Μπαταρία	Tattu R-Line 4S 1550mAh 14.8V	1	40€
Τηλεχειριστήριο	RadioMaster Pocket ELRS	1	78€
Μπαταρίες Τηλεχειριστηρίου	RadioMaster 18650 3200mAh	1(ζευγάρι)	14,40€
Δέκτης	RadioMaster RP1 V2 ELRS Nano	1	22,80€
Ενδιάμεσος Ελεγκτής	STM32G474RE Nucleo Board	1	14€
Ελεγκτής τηλεμετρίας	Seeed Studio XIAO ESP32-S3	1	5,7€
Αισθητήρες Απόστασης (ToF)	ST SATEL-VL53L8CX	3	14€

3.2.1 Σασί, προπέλες και μπαταρία

Η βάση του αεροσκάφους, αποτελείται από ένα 5 ιντσών σασί της εταιρίας pilotix. Είναι ένα μοντέλο τετρακοπτέρου FPV κατασκευασμένο με ανθρακονήματα T300, σχεδιασμένο για ανθεκτικότητα και απόδοση και ζυγίζει 112,5 g.



Σχήμα 3.1: Σασί 5"

Η επιλογή ελίκων τριών πτερυγίων (HQ-Prop 5045) αποτελεί τη βέλτιστη λύση για πλατφόρμες κατηγορίας FPV 5 ιντσών, καθώς επιτυγχάνει την ιδανική ισορροπία μεταξύ ενεργειακής απόδοσης και παραγόμενης ώσης. Γενικότερα, η χρήση ελίκων με λιγότερα πτερύγια πλεονεκτεί στην εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ η προσθήκη πτερυγίων αυξάνει την αεροδυναμική πρόσφυση και την αμεσότητα ελέγχου. Η τρίφυλλη διάταξη γεφυρώνει επιτυχημένα αυτά τα δύο άκρα, εξασφαλίζοντας τον βέλτιστο έλεγχο χωρίς να επιβαρύνει υπερβολικά την κατανάλωση ρεύματος. Επιπλέον, εξασφαλίζουν πιο ομαλή περιστροφή και μειωμένους κραδασμούς.

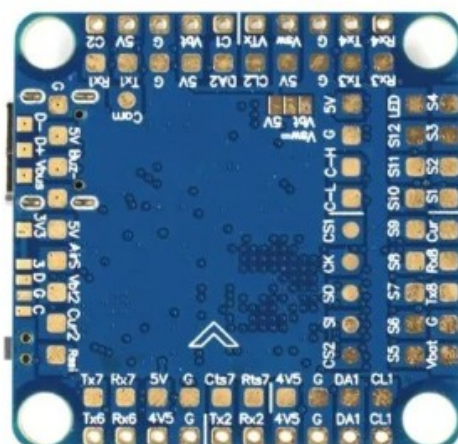
Για την τροφοδοσία του αεροσκάφους και του συνόλου των ηλεκτρονικών διατάξεων, επιλέχθηκε συσσωρευτής πολυμερών λιθίου (LiPo) της εταιρείας Tattu μοντέλου R-Line V3.0. Η συγκεκριμένη συστοιχία αποτελείται από τέσσερα στοιχεία σε σειρά (4S), αποδίδοντας ονομαστική τάση 14.8V και συνολική χωρητικότητα 1550 mAh. Η κρισιμότερη παράμετρος ωστόσο για την επιλογή της εν λόγω πηγής αποτελεί ο υψηλός ρυθμός εκφόρτισης (discharge rate), ο οποίος ανέρχεται στα 120C. Το χαρακτηριστικό αυτό μεταφράζεται στην ικανότητα παροχής ακαριαίων και εξαιρετικά υψηλών ρευμάτων χωρίς να παρατηρείται σημαντική πτώση τάσης.



Σχήμα 3.2: Μπαταρία LiPo

3.2.2 Ελεγκτής πτήσης και λειτουργικό Betaflight

Ο ελεγκτής πτήσης είναι ο πυρήνας του αεροσκάφους καθώς είναι υπεύθυνος για την σταθεροποίηση του σκάφους μέσω του γυροσκοπίου - επιταχυνσιόμετρου που διαθέτει (IMU). Παράλληλα διαχειρίζεται τη ροή δεδομένων όλων των περιφερειακών αισθητήρων (όπως GPS, βαρόμετρο και κάμερα), υπολογίζει τις απαραίτητες διορθώσεις και μεταδίδει τις εντολές και τις πληροφορίες στον αντίστοιχο τελικό προορισμό.

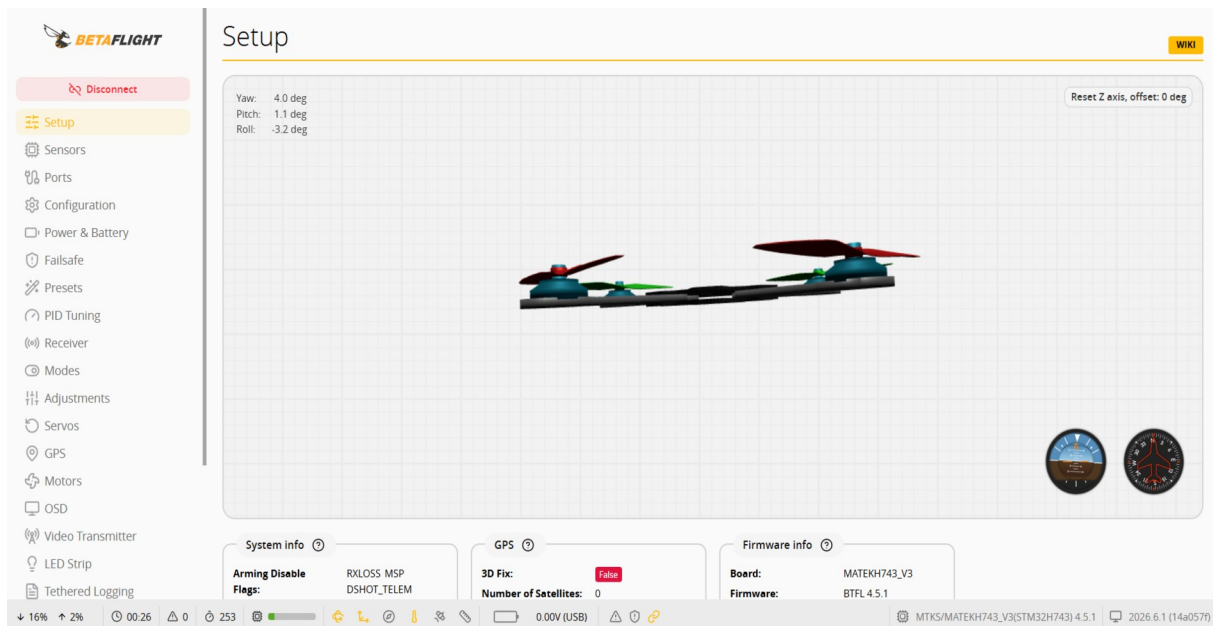


Σχήμα 3.3: Ελεγκτής πτήσης

Οι περισσότεροι ελεγκτές πτήσης που κυκλοφορούν στην αγορά, υποστηρίζουν την εγκατάσταση ανοιχτού λογισμικού κάποια από τα οποία είναι το *betafight*, το *ardupilot* και το *PX4*. Τα συγκεκριμένα περιβάλλοντα διαθέτουν εκτεταμένες βιβλιοθήκες οδηγών που εξασφαλίζουν τη συμβατότητα με πληθώρα αισθητήρων και υποστηρίζουν προηγμένες λειτουργίες πτήσης. Επιπλέον, προσφέρουν στον χρήστη τη δυνατότητα ρύθμισης (tuning) των παραμέτρων ελέγχου, όπως οι συντελεστές PID. Αυτό επιτρέπει τη λεπτομερή βαθμονόμηση (calibration) του συστήματος, προσαρμόζοντας με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά του αεροσκάφους.

Ακόμη, από το περιβάλλον αυτών των λογισμικών είναι εφικτή η παραμετροποίηση και χαρτογράφηση των βοηθητικών καναλιών του τηλεχειριστηρίου. Επιτρέπεται δηλαδή, η αντιστοίχιση των φυσικών διακοπών του πομπού σε συγκεκριμένες λειτουργίες και λογικές καταστάσεις. Μέσω αυτής της διαδικασίας ορίζεται για παράδειγμα η κρίσιμη εντολή ενεργοποίησης/απενεργοποίησης (arm/disarm) του συστήματος πρόωσης ή μετάβαση σε υποβοηθούμενη λειτουργία αυτοσταθεροποίησης (Angle Mode), και η διαχείριση της οπτικής τηλεμετρίας (OSD) μαζί με πληθώρα άλλων παραμέτρων.

Στην παρούσα εργασία στον ελεγκτή πτήσης έχει περαστεί το λογισμικό *betafight*. Το *betafight* είναι το πιο διαδεδομένο λογισμικό για την κατηγορία αεροσκαφών FPV, προσφέροντας ταχύτατη αρχικοποίηση λειτουργιών και δυνατότητα άμεσης πτήσης με ελάχιστες έως καθόλου παραμετροποιήσεις στα βάρη σταθεροποίησης. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε άλλο λογισμικό, διότι το σύστημα αποφυγής εμποδίων είναι εντελώς ανεξάρτητο από τον ελεγκτή πτήσης.



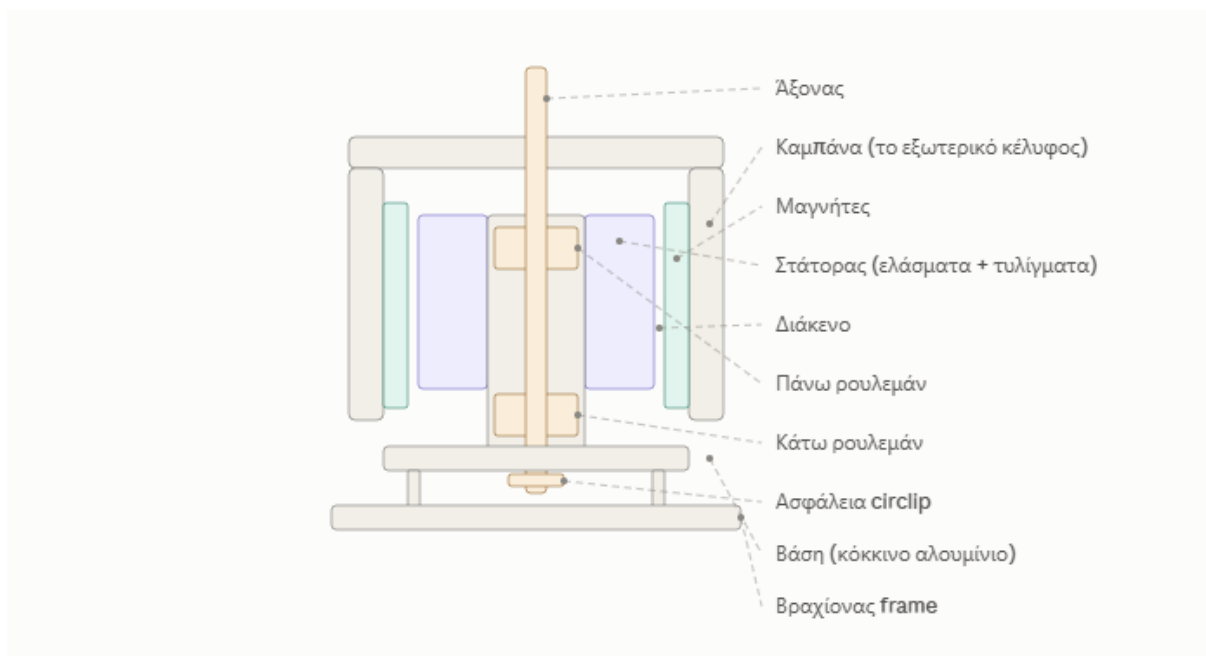
Σχήμα 3.4: Το λογισμικό Betaflight

3.2.3 Μοτέρ και έλεγχος μέσω ελεγκτών ταχύτητας

Οι κινητήρες του τετρακοπτέρου είναι τριφασικοί συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (brushless), τύπου RS2205 2300KV. Ο κωδικός 2205 περιγράφει τις διαστάσεις του στάτη: διάμετρος 22mm και ύψος 5mm. Μεγαλύτερος στάτης σημαίνει περισσότερο υλικό, άρα μεγαλύτερη ροπή αλλά και μεγαλύτερη

μάζα. Ο δείκτης 2300KV εκφράζει τις στροφές ανά λεπτό για κάθε volt τροφοδοσίας υπό μηδενικό φορτίο. Στη μπαταρία τεσσάρων κελιών του αεροσκάφους της παρούσας εργασίας μεταφράζεται σε περίπου 34.000 στροφές ανά λεπτό. Υψηλή τιμή KV σημαίνει περισσότερες στροφές αλλά μικρότερη ροπή ανά αμπέρ.

Ο συνδυασμός 2205/2300KV αποτελεί την καθιερωμένη επιλογή για τις πλατφόρμες πέντε ιντσών, καθώς προσφέρει αρκετή ροπή για δυναμικούς ελιγμούς χωρίς υπερβολική επιβάρυνση.



Σχήμα 3.5: Μηχανικά μέρη ενός μοτέρ

Για την λειτουργία των μοτέρ είναι αναγκαία η εναλλαγή του ρεύματος στις τρεις φάσεις, η οποία γίνεται μέσω ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που ονομάζονται ηλεκτρονικοί ρυθμιστές στροφών (ESC) και είναι το κύκλωμα που μεσολαβεί ανάμεσα στην μπαταρία και τα μοτέρ. Ο λόγος είναι, διότι ενώ η μπαταρία παράγει συνεχές ρεύμα, τα μοτέρ χρειάζονται τριφασικό εναλλασσόμενο με μεταβλητή συχνότητα για να λειτουργήσουν. Ο ρυθμιστής παράγει αυτό το σήμα μέσω έξι τρανζίστορ ισχύος που ανοιγοκλείνουν χιλιάδες φορές το δευτερόλεπτο, μέσω του αλγορίθμου Trapezoidal Commutation, ο οποίος επιτυγχάνει τον συγχρονισμό του κινητήρα μέσω της ανιχνευσης ανάστροφης τάσης (Back-EMF), χωρίς χρήση αισθητήρων θέσης.

Οι ρυθμιστές στροφών που χρησιμοποιήθηκαν στο αεροσκάφος είναι 30A ανά κανάλι, σε υλικό τύπου BLHeli_S, με εγκατεστημένο το λογισμικό BlueJay, μια ανοιχτού κώδικα εξέλιξη του αρχικού firmware της εταιρείας. Η μετάβαση στο Bluejay προσφέρει τρία στοιχεία που έχουν μεγάλη σημασία για την παρούσα εργασία. Πρώτον, υποστηρίζει το ψηφιακό πρωτόκολλο DShot, στο οποίο η εντολή ισχύος μεταδίδεται ως πακέτο με έλεγχο ακεραιότητας αντί ως αναλογικός παλμός, εξαλείφοντας την ανάγκη για χειροκίνητη βαθμονόμηση (calibration) και καθιστώντας την απόκριση των μοτέρ επαναλήψιμη. Δεύτερον, υποστηρίζει αμφίδρομη επικοινωνία (bidirectional DShot), επιστρέφοντας στον ελεγκτή πτήσης τις πραγματικές στροφές κάθε κινητήρα. Η πληροφορία αυτή επιτρέπει στοχευμένο φιλτράρισμα του θορύβου των ελίκων και, κατ' επέκταση, μικρότερη καθυστέρηση στον βρόχο σταθεροποίησης. Τρίτον, λειτουργεί σε υψηλότερη συχνότητα διακοπτικής λειτουργίας, προσφέροντας ομαλή οδήγηση και καλύτερη διακριτική ικανότητα σε χαμηλά επίπεδα ισχύος.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά υλικού και λογισμικού συνδέονται άμεσα με την ίδια την απόδοση του αλγορίθμου αποφυγής εμποδίων. Μολονότι η συνάρτηση φραγμού επιτρέπει στο όχημα να διατηρεί ταχύτητα ανάλογη του διαθέσιμου φυσικού περιθωρίου, η μαθηματική εγγύηση της ασφάλειας προϋποθέτει ότι το αεροσκάφος είναι ικανό να επιβραδύνει με τον εκάστοτε απαιτούμενο ρυθμό. Η ικανότητα αυτή ποσοτικοποιείται μέσω της σταθεράς χρόνου πέδησης, η οποία μετρήθηκε πειραματικά στα 0,234 s. Η συγκεκριμένη τιμή είναι καθοριστική, καθώς θέτει το αυστηρό ανώτατο όριο στο κέρδος του φραγμού. Επομένως η επιλογή του συγκεκριμένου εξοπλισμού υπερβαίνει την απλά βελτίωση των επιδόσεων πτήσης, υπαγορεύοντας επίσης το πόσο “επιθετικός” ή “συντηρητικός” επιτρέπεται να είναι ο αλγόριθμος ασφαλείας.

3.3 Σύστημα τηλεχειρισμού και ασύρματη ζεύξη ELRS

Για την επικοινωνία του χειριστή με το αεροσκάφος επιλέχθηκαν τα προϊόντα της εταιρείας Radiomaster, το τηλεχειριστήριο Pocket και ο δέκτης RP1 V2 Nano τα οποία λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz και υποστηρίζουν το πρωτόκολλο επικοινωνίας ExpressLRS. Η συγκεκριμένη επιλογή υπαγορεύτηκε από τα πλεονεκτήματα που παρέχει η ζώνη εκπομπής σε συνάρτηση με τις υψηλές επιδόσεις του πρωτοκόλλου.

Ειδικότερα η ζώνη συχνοτήτων 2.4Ghz αποτελεί ευρέως αποδεκτό βιομηχανικό πρότυπο λόγω της ισορροπίας που παρέχει ανάμεσα στην εμβέλεια της ζεύξης και την διατήρηση σύνδεσης χωρίς οπτική επαφή. Σε αντίθεση με λύσεις χαμηλότερης συχνότητας, όπως η μπάντα των 868/900MHz, που επίσης χρησιμοποιείται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες, προσφέρει πρώτον σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, μειώνοντας την καθυστέρηση μεταφοράς (latency) στο ελάχιστο και δεύτερον, λόγω του μικρότερου μήκους κύματος, απαιτεί κεραίες μικρότερων διαστάσεων. Ενώ οι λύσεις υψηλότερης συχνότητας όπως η μπάντα των 5.8GHz (χρησιμοποιείται για μετάδοση εικόνας) ή τα 10GHz, οι οποίες προσφέρουν σημαντικά μεγάλο εύρος ζώνης (bandwidth), υποφέρουν στην διατήρηση σύνδεσης χωρίς οπτική επαφή. (Path loss)

Το ExpressLRS πρόκειται για ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας ανοιχτού κώδικα, το οποίο έχει σχεδιαστεί με έμφαση στην ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και την αξιοπιστία μετάδοσης. Το ELRS αξιοποιεί προηγμένους αλγορίθμους διόρθωσης σφαλμάτων και διαμόρφωσης για να προσφέρει έναν εξαιρετικά σταθερό ρυθμό αποστολής πακέτων.



Σχήμα 3.6: Δέκτης και πομπός ELRS

3.3.1 Το σειριακό πρωτόκολλο CRSF

Η επικοινωνία μεταξύ του δέκτη τηλεχειρισμού και του ελεγκτή πτήσης πραγματοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου CRSF, ενός σειριακού πρωτοκόλλου ασύγχρονης μετάδοσης που λειτουργεί σε ρυθμό 420000 baud, με οκτώ ψηφία δεδομένων, χωρίς ισοτιμία και χωρίς αναστροφή σήματος. Κάθε πακέτο μηνύματος, περιλαμβάνει τη διεύθυνση προορισμού, μήκος, τύπο, ωφέλιμο φορτίο και άθροισμα ελέγχου, και μεταδίδεται με σταθερή περίοδο[18]. Το CRSF δημιουργήθηκε αρχικά από την εταιρεία TBS (Team BlackSheep) για τα δικά της συστήματα τηλεμετρίας και αργότερα υιοθετήθηκε κυρίως στο χώρο του τηλεκατευθυνόμενου μοντελισμού και της ρομποτικής, χάρη της εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης (latency) που προσφέρει και της απλής συνδεσμολογίας με μια μόνο θύρα UART (δύο καλώδια rx, tx και μια κοινή γείωση).

Το ωφέλιμο φορτίο ενός πακέτου εντολών δεν μεταφέρει τη θέση των χειριστηρίων σε φυσικές μονάδες, αλλά ως αδιάστατους ακέραιους αριθμούς. Κάθε κανάλι κωδικοποιείται σε έντεκα δυαδικά ψηφία, με τιμές που κυμαίνονται από 172 έως 1811 και ουδέτερη θέση το 992. Οι τιμές αυτές αποκαλούνται συμβατικά «ticks». Στα αναλογικά συστήματα τηλεχειρισμού η θέση ενός σερβομηχανισμού κωδικοποιείται ως διάρκεια παλμού, ονομαστικά από 1000 έως 2000 μs , με ουδέτερη θέση τα 1500 μs , και το κύκλωμα μετρούσε κυριολεκτικά τη χρονική διάρκεια του παλμού. Όταν οι ζεύξεις έγιναν ψηφιακές, διατηρήθηκε η σημασιολογία, αλλά καταργήθηκε η φυσική αναπαράσταση. Για λόγους συμβατότητας, η μετάβαση από τον χρόνο στη ψηφιακή τιμή ακολουθεί σταθερή αναλογία, όπου ένα «tick» μεταφράζεται σε 0.625 μs .

Ο δέκτης ELRS παραδίδει πλαίσια εντολών με σταθερό ρυθμό, ο οποίος στη διαμόρφωση που χρησιμοποιήθηκε είναι τα 250 Hz. Επειδή ο παρεμβαλλόμενος μικροελεγκτής στην ουσία αναπαρηστά τον δέκτη απέναντι στον ελεγκτή πτήσης, οφείλει να παραδίδει πλαίσια CRSF με τον ίδιο σταθερό ρυθμό, ώστε ο ελεγκτής να βλέπει ροή ταυτόσημη με εκείνη που θα λάμβανε απευθείας. Η περίοδος του βρόχου ελέγχου τίθεται επομένως στα 4 ms, και κάθε εκτέλεση του νόμου ελέγχου οφείλει να ολοκληρώνεται εντός αυτού του περιθωρίου.

3.3.2 Αντιστοίχιση δεδομένων τηλεχειρισμού σε ταχύτητες αναφοράς

Στη παρούσα εργασία η διαδικασία αποφυγής διατυπώνεται εξ ολοκλήρου σε φυσικά μεγέθη. Η συνθήκη ασφαλείας συσχετίζει αποστάσεις με ταχύτητες (m/s), ενώ το ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας, το κέρδος του φραγμού και η μετρούμενη ταχύτητα προσέγγισης φέρουν πραγματικές μονάδες μέτρησης. Για την κατανόηση των εντολών της τηλεχείρισης από τον βρόχο ελέγχου, επιβάλλεται μια αμφιμονοσήμαντη αντιστοίχιση ανάμεσα στον χώρο αναπαράστασης του πρωτοκόλλου και τον φυσικό χώρο στον οποίο διατυπώνεται ο φραγμός: η αντιστοίχιση εφαρμόζεται κατά την είσοδο, ο περιορισμός επιλύεται στον φυσικό χώρο, και η αντίστροφη αντιστοίχιση εφαρμόζεται κατά την έξοδο.

Η αντιστοίχιση από Ticks σε m/s αναλύεται σε τρία διαδοχικά βήματα:

- **Βήμα 1 - Αφαίρεση της μετατόπισης:** Από την ακέραια τιμή αφαιρείται η ουδέτερη θέση (τιμή 992), ώστε να προκύψει προσημασμένη απόκλιση από το κέντρο. Θετική απόκλιση αντιστοιχεί σε εντολή προς τα εμπρός ή προς τα δεξιά, και αρνητική στην αντίθετη φορά. Το αποτέλεσμα παραμένει αδιάστατο.
- **Βήμα 2 - Κανονικοποίηση:** Η απόκλιση διαιρείται με τη μισή διαδρομή του χειριστηρίου, οπότε προκύπτει αδιάστατο κλάσμα στο διάστημα $[-1, +1]$. Αυτό εκφράζει το ποσοστό της διαθέσιμης διαδρομής που έχει αξιοποιηθεί, ανεξάρτητα από την κωδικοποίηση του πρωτοκόλλου.
- **Βήμα 3 - Κλιμάκωση:** Το κανονικοποιημένο κλάσμα πολλαπλασιάζεται με τη μέγιστη ταχύτητα σχεδίασης, αποκτώντας έτσι διαστάσεις ταχύτητας. Η πλήρης απόκλιση αντιστοιχεί στη μέγιστη ταχύτητα και η ουδέτερη θέση σε μηδενική.

Πίνακας 3.2: Συμβολισμοί μετατροπής ticks

Σύμβολο	Σημασία	Τιμή
c	ακέραια τιμή καναλιού (ticks)	172 - 1811
c ₀	ουδέτερη θέση	992
Δc	μισή διαδρομή χειριστηρίου	819
c _{min} , c _{max}	όρια πρωτοκόλλου	172, 1811
s	κανονικοποιημένη απόκλιση	-1 - +1
v	ταχύτητα αναφοράς	m/s

V_max	μέγιστη ταχύτητα σχεδίασης	m/s
-------	----------------------------	-----

Πίνακας 3.3: Μετατροπή ticks σε m/s

Βήμα	Εξίσωση	Κώδικας
1. Αφαίρεση μετατόπισης	$e = c - c_0$	(float)ticks - 992.0f
2. Κανονικοποίηση	$s = e / \Delta c$	... / 819.0f
3. Κλιμάκωση	$v = s \cdot V_max$	... * 2.0f

Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται ανεξάρτητα στα δύο κανάλια οριζόντιας κίνησης (Pitch και Roll), παράγοντας το διάνυσμα ταχύτητας αναφοράς που εκφράζει την πρόθεση του χειριστή.

Μετά την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, η διορθωμένη πλέον εντολή είναι ένα νέο διάνυσμα ταχύτητας σε φυσικές μονάδες. Ωστόσο, ο ελεγκτής πτήσης (FC) κατανοεί αποκλειστικά την αναπαράσταση του πρωτοκόλλου σε ticks. Εφαρμόζεται συνεπώς ο αντίστροφος μετασχηματισμός, ο οποίος περιλαμβάνει:

1. Διαίρεση με τη μέγιστη ταχύτητα σχεδίασης.
2. Πολλαπλασιασμό με τη μισή διαδρομή.
3. Πρόσθεση της ουδέτερης θέσης.
4. Κορεσμό (saturation) εντός των επιτρεπτών ορίων του πρωτοκόλλου, ώστε να μη μεταδοθεί ποτέ μη έγκυρη τιμή προς τον FC.

Πίνακας 3.4: Μετατροπή m/s σε ticks

Βήμα	Εξίσωση	Κώδικας
1. Κανονικοποίηση	$s = v / V_max$	$v / 2.0f$
2. Κλιμάκωση	$e = s \cdot \Delta c$	... * 819.0f
3. Πρόσθεση μετατόπισης	$c' = c_0 + e$	992.0f + ...
4. Κορεσμός	$c = \text{clamp}(c', c_min, c_max)$	CLAMP(..., CRSF_TICKS_MIN, CRSF_TICKS_MAX)

Η αναγκαιότητα του αντίστροφου μετασχηματισμού απορρέει από την αρχή της παρούσας αρχιτεκτονικής: το πλαίσιο δεδομένων που παράγει ο ενδιαμέσος μικροελεγκτής (STM32) πρέπει να είναι μη διακρίσιμο από το πλαίσιο ενός γνήσιου δέκτη, ώστε ο ελεγκτής πτήσης να μην αντιλαμβάνεται

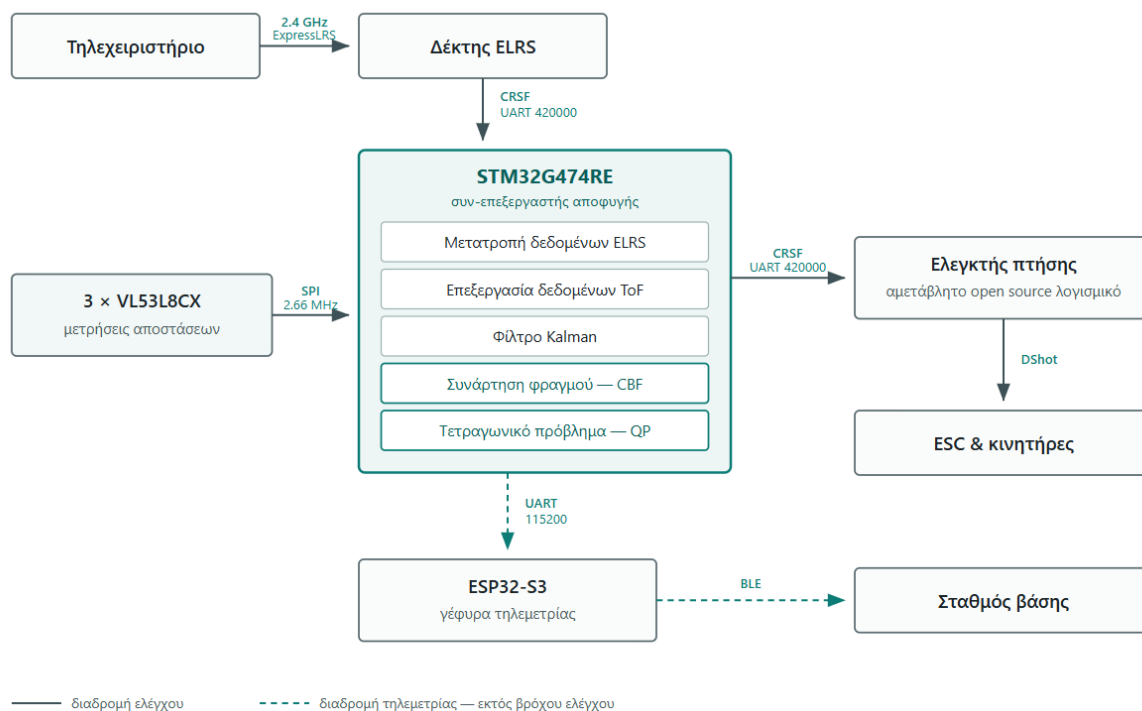
κανένα ίχνος της παρέμβασης. Ακόμη σε περίπτωση μη ενεργοποίησης του διακόπτη αποφυγής, τα δεδομένα περνούνε αυτούσια χωρίς παρεμβολή μέσω του ενδιάμεσου από τον δέκτη προς τον ελεγκτή πτήσης.

3.4 Ο ρόλος του ενδιάμεσου μικροελεγκτή (STM32G474RE)

Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική, ο μικροελεγκτής STM32G474RE, αποτελεί την κεντρική υπολογιστική μονάδα του συστήματος αποφυγής εμποδίων. Η ενσωμάτωση μιας ανεξάρτητης μονάδας επεξεργασίας, αντί της υλοποίησης του αλγορίθμου εντός του ελεγκτή πτήσης, κρίθηκε αναγκαία προκειμένου να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του ελεγκτή πτήσης, του οποίου ο ρόλος είναι απολύτως κρίσιμος, καθώς τυχόν υπολογιστικές καθυστερήσεις θα μπορούσαν να επιφέρουν την απώλεια ελέγχου του αεροσκάφους.

Ο μικροελεγκτής λειτουργεί ως ένας ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ του δέκτη τηλεχειρισμού, των αισθητήρων και του ελεγκτή πτήσης. Οι βασικές αρμοδιότητες που εκτελεί, αυστηρά μέσα σε κάθε κύκλο εκτέλεσης του βρόχου ελέγχου, συνοψίζονται στις εξής:

- **Διαχείριση και Επεξεργασία Αισθητήρων:** Ο STM32G474RE διαχειρίζεται την επικοινωνία με τους αισθητήρες απόστασης (ToF). Συλλέγει τις ακατέργαστες μετρήσεις και εφαρμόζει τα απαραίτητα φίλτρα για την αξιόπιστη εκτίμηση της απόστασης και της ταχύτητας προσέγγισης των εμποδίων.
- **Παρεμβολή και Μετασχηματισμός Εντολών:** Όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 3.3, ο μικροελεγκτής παρεμβάλλεται στη σειριακή ζεύξη (CRSF) μεταξύ του δέκτη ELRS και του ελεγκτή πτήσης. Αναλαμβάνει την ανάγνωση των (ticks) και τη μετατροπή τους σε διανύσματα ταχύτητας αναφοράς (m/s).
- **Εκτέλεση του Αλγορίθμου Αποφυγής:** Αποτελεί τον πυρήνα λήψης αποφάσεων. Συνδυάζοντας την πρόθεση του χειριστή με τα φιλτραρισμένα δεδομένα του περιβάλλοντος, εφαρμόζονται στον βρόχο ελέγχου οι συναρτήσεις φραγμού και ο τετραγωνικός προγραμματισμός, με σκοπό να βρεθεί ασφαλής λύση αποφυγής του εμποδίου, η οποία βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην εντολή του χειριστή.
- **Ανακατασκευή Πλαισίων Δεδομένων:** Μετά τον υπολογισμό της διορθωμένης εντολής, εφαρμόζει τον αντίστροφο μετασχηματισμό από m/s σε ticks. Στη συνέχεια, ανακατασκευάζει ένα έγκυρο πλαίσιο δεδομένων CRSF και το προωθεί προς τον ελεγκτή πτήσης. Μέσω αυτής της διαδικασίας, ο FC αντιλαμβάνεται τον STM32G474RE ως έναν τυπικό δέκτη, αγνοώντας πλήρως την ύπαρξη του συστήματος αποφυγής.



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος

Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής βασίζεται στον πυρήνα ARM Cortex-M4 (αρχιτεκτονικής RISC 32-bit) και χρονίζεται σε συχνότητες έως 170 MHz. Διαθέτοντας εξειδικευμένους μαθηματικούς επιταχυντές και ταχύτατα αναλογικά περιφερειακά, αποτελεί καθιερωμένη επιλογή στη βιομηχανία και την αυτοκινητοβιομηχανία για απαιτητικές εφαρμογές, όπως η ψηφιακή μετατροπή ισχύος, η οδήγηση κινητήρων και η διαχείριση συστοιχιών αισθητήρων. Η επιλογή του για την παρούσα εργασία υπαγορεύτηκε από τέσσερις βασικούς παράγοντες. Πρώτον, η υψηλή υπολογιστική του ικανότητα επιτρέπει την ταχύτερη εκτέλεση πράξεων σε πραγματικό χρόνο. Δεύτερον, η ενσωμάτωση ανεξάρτητων καναλιών Άμεσης Προσπέλασης Μνήμης (DMA) σε συνδυασμό με την πληθώρα σειριακών διεπαφών, εξασφαλίζει την ταυτόχρονη και ασύγχρονη ανάγνωση των αισθητήρων απόστασης, καθώς και την αδιαλείπτως αμφίδρομη διαχείριση της επικοινωνίας CRSF. Τρίτον, η προϋπάρχουσα εξοικείωση με το οικοσύστημα της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής και τέλος η υποστήριξη έτοιμων βιβλιοθηκών (ULD) από την ST για την χρήση των πολυζωνικών αισθητήρων πτήσης (ToF) συνέβαλε καθοριστικά στην ταχύτερη ανάπτυξη του λογισμικού ελέγχου.

Πίνακας 3.5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του STM32G474RE

Κατηγορία	Χαρακτηριστικά / Δυνατότητες
Πυρήνας (Core)	ARM Cortex-M4 32-bit (RISC) με υποστήριξη DSP εντολών
Συχνότητα Λειτουργίας	Έως 170 MHz
Κινητή Υποδιαστολή	Ενσωματωμένη μονάδα FPU (Floating Point Unit) απλής ακρίβειας
Μαθηματικοί Επιταχυντές	CORDIC (για τριγωνομετρικές συναρτήσεις) & FMAC (Filter Math Accelerator)
Μνήμη	512 KB Flash, 128 KB SRAM

Άμεση Προσπέλαση (DMA)	16 ανεξάρτητα κανάλια DMA με ευέλικτο δρομολογητή DMAMUX
Σειριακές Διεπαφές	6x USART/UART, 4x SPI, 4x I2C, 3x FDCAN, 1x USB 2.0, I2S, SAI
Αναλογικά Περιφερειακά	5x ταχύτατοι ADCs (12-bit, έως 4 Msps), 7x DACs, 7x Συγκριτές, 6x Τελεστικοί Ενισχυτές
Χρονιστές (Timers)	Υψηλής ανάλυσης χρονιστές (High-Resolution Timer - HRTIM), 32-bit & 16-bit timers
Τάση Λειτουργίας	1.71V έως 3.6V

3.5 Πολυζωνικοί αισθητήρες πτήσης (ToF)

Για την αντίληψη του περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται τρεις μονάδες SATEL-VL53L8 της STMicroelectronics[19]. Πρόκειται για αισθητήρες χρόνου πτήσης, οι οποίοι εκπέμπουν έναν παλμό υπέρυθρου φωτός που καλύπτει ένα πεδίο $45^\circ \times 45^\circ$ και υπολογίζουν την απόσταση από τον χρόνο επιστροφής της ανάκλασης. Το χαρακτηριστικό που τους διαφοροποιεί είναι η πολυζωνική τους λειτουργία, συγκεκριμένα στη λήψη του σήματος, όπου ο φακός εστιάζει την ανακλώμενη ακτινοβολία διαφορετικών τμημάτων του πεδίου σε ένα φωτοευαίσθητο πλέγμα διαστάσεων 8x8. Ένας παλμός δίνει έτσι 64 ταυτόχρονες μετρήσεις, καθεμία προς γνωστή κατεύθυνση. Η ιδιότητα — απόσταση μαζί με κατεύθυνση — σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος και το βάρος καθόρισαν την επιλογή αυτού του αισθητήρα. Παρόλα αυτά υστερεί στην εμβέλεια μετρήσεων, η οποία περιορίζεται στα 4 m και στην ευαισθησία του στο φως, καθιστώντας το έτσι χρήσιμο μόνο σε εσωτερικούς χώρους.

Και οι τρεις μονάδες συνδέονται στον ίδιο δίαυλο SPI, η συχνότητα του οποίου ρυθμίστηκε στα 2,66MHz. Η συγκεκριμένη τιμή προκύπτει από την διαίρεση του ρολογιού του μικροελεγκτή (170MHz) με τον συντελεστή 64 και αποτελεί τον μέγιστο ασφαλή ρυθμό μεταφοράς δεδομένων που δεν υπερβαίνει το όριο του κατασκευαστή των 3MHz. Η επιλογή του SPI έναντι του I²C βασίστηκε πρωτίστως στις απαιτήσεις μεταφοράς δεδομένων. Με μέγεθος πακέτου περίπου στα 1,1 kB στα 2,66 MHz, η ανάγνωση διαρκεί 3,3 ms, γεγονός που σημαίνει ότι για τρεις αισθητήρες με ρυθμό δειγματοληψίας 10 Hz ο δίαυλος απασχολείται μόλις στο 10% του διαθέσιμου χρόνου του. Από την άλλη μεριά, το πρωτόκολλο I²C, λόγω του χαμηλότερου ρυθμού μετάδοσης και του επιπλέον λειτουργικού φόρτου, θα απαιτούσε πολλαπλάσιο χρόνο ανά πλαίσιο γεγονός που ανεβάζει την απασχόληση του διαύλου άνω του 30%. Αντίστοιχο είναι το όφελος και κατά την εκκίνηση του συστήματος, όπου απαιτείται η μεταφόρτωση 86 kB εσωτερικού λογισμικού (firmware) σε κάθε μονάδα: με το SPI η διαδικασία ολοκληρώνεται συνολικά σε 0,8 s, ενώ με το I²C ο χρόνος θα ήταν 2,1 s. Ένας τελευταίος, εξίσου καθοριστικός παράγοντας υπέρ του SPI, ήταν η διευθυνσιοδότηση. Επειδή οι αισθητήρες διαθέτουν εργοστασιακά την ίδια σταθερή διεύθυνση I²C, η ταυτόχρονη χρήση τους θα απαιτούσε μια πολύπλοκη διαδικασία εκκίνησης, όπου κάθε μονάδα θα ενεργοποιούνταν χωριστά για να της αποδοθεί νέα διεύθυνση μέσω λογισμικού. Αντιθέτως, στο SPI τα καλώδια ρολογιού και δεδομένων παραμένουν κοινά και η επικοινωνία ελέγχεται σε επίπεδο υλικού μέσω αποκλειστικής γραμμής επιλογής (Chip Select). Έτσι, η προσθήκη ενός νέου αισθητήρα δεν περιπλέκει το πρωτόκολλο, παρά μόνο κοστίζει δύο επιπλέον καλώδια στον μικροελεγκτή, έναν για την επιλογή ολοκληρωμένου (CS) και έναν για το σήμα διακοπής (Interrupt).

Για τη βέλτιστη κάλυψη του οπτικού πεδίου, οι τρεις αισθητήρες διατάχθηκαν περιμετρικά του αεροσκάφους: μία μονάδα τοποθετήθηκε με μέτωπο προς τα εμπρός, ενώ οι άλλες δύο πλευρικά, διευρύνοντας έτσι το συνολικό οπτικό πεδίο. Η στερέωση της διάταξης υλοποιήθηκε πάνω σε μια προσαρμοσμένη βάση από αφρώδες υλικό (φελιζόλ), στα πλαίσια της ταχείας ανάπτυξης της εργασίας. Πέρα από την ευκολία διαμόρφωσης, το συγκεκριμένο υλικό επιλέχθηκε συνειδητά καθώς προσθέτει αμελητέο βάρος στην κατασκευή, ενώ παράλληλα αποσβένει τους υψίσυχνους κραδασμούς των κινητήρων και όχι μόνο πριν φτάσουν στους ευαίσθητους αισθητήρες.

Κεφάλαιο 4ο: Προσαρμογή των μαθηματικών μοντέλων στο σύστημα αποφυγής

4.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε το θεωρητικό πλαίσιο του μαθηματικού μοντέλου. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η υλοποίηση του πάνω στη φυσική του αεροσκάφους και στα δεδομένα των αισθητήρων.

Η ανάπτυξη ακολουθεί τη σειρά με την οποία επεξεργάζεται ο βρόχος του μικροελεγκτή την πληροφορία. Πρώτα περιγράφεται η μετάφραση του αεροσκάφους και των αισθητήρων σε σταθερές παραμέτρους: διαστάσεις, ύψη τοποθέτησης και γωνίες σκόπευσης, εκφρασμένα σε φυσικές μονάδες.

Έπειτα, ακολουθεί η επεξεργασία των δεδομένων των αισθητήρων. Παρουσιάζονται αρχικά τα κριτήρια επιλογής και απόρριψης μετρήσεων και έπειτα περιγράφεται η ανάλυση κάθε αποδεκτής μέτρησης σε τριγωνομετρικές καρτεσιανές συνιστώσες, από όπου προκύπτει ένα διάνυσμα το οποίο συνδέει την απόσταση με την θέση του εμποδίου σε σχέση με το αεροσκάφος. Η αναπαράσταση αυτή είναι που επιτρέπει, σε επόμενο στάδιο, την προβολή της ταχύτητας πάνω στη διεύθυνση κάθε εμποδίου.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η προσαρμογή του φίλτρου Kalman, το οποίο καλείται να εκτιμήσει τον ρυθμό μεταβολής της απόστασης. Μέγεθος που ο αισθητήρας δεν μετρά, καθώς παρέχει αποκλειστικά αποστάσεις. Έπεται η διατύπωση της συνάρτησης φραγμού, η οποία μετατρέπει το διαθέσιμο περιθώριο ασφαλείας σε όριο επιτρεπόμενης ταχύτητας, και τέλος η επίλυση του τετραγωνικού προβλήματος, από το οποίο προκύπτει η τελική εντολή ως το πλησιέστερο επιτρεπτό σημείο στην πρόθεση του χειριστή.

4.2 Γεωμετρική επεξεργασία των μετρήσεων

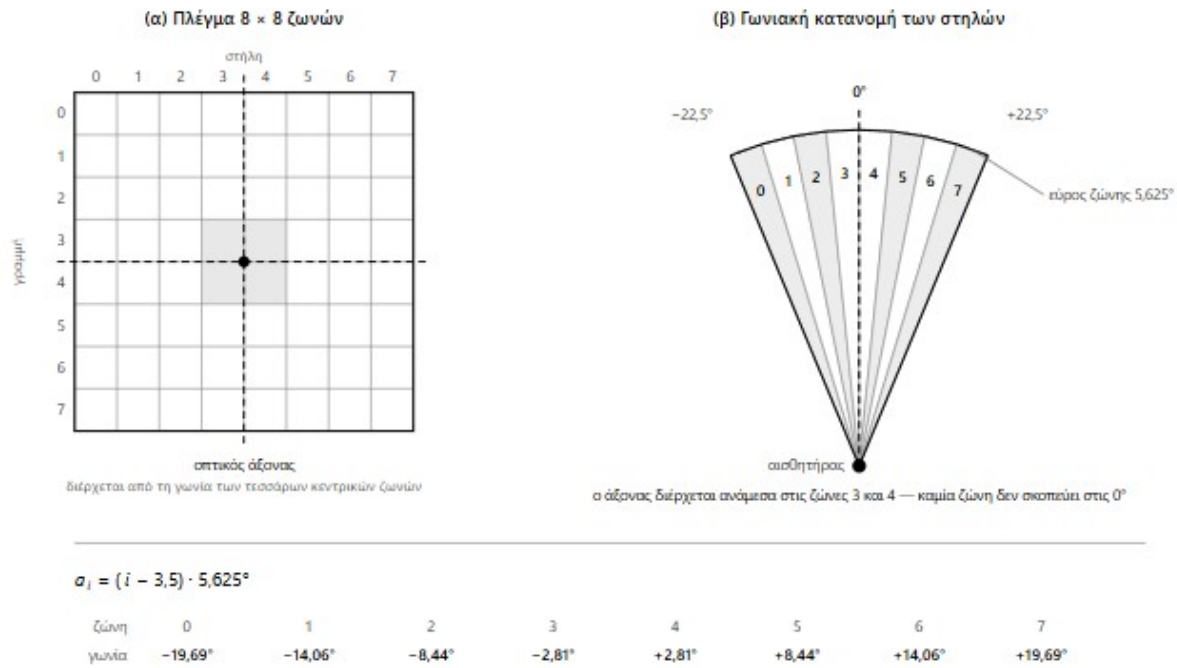
Επειδή όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 3.5 τα δεδομένα που επιστρέφει ο αισθητήρας είναι σφαιρικά, είναι αναγκαία η έκφραση τους σε ένα καρτεσιανό διάνυσμα που συνδέει την απόσταση και την κατεύθυνση ως προς την γωνία διόπτρευσης του κάθε αισθητήρα. Η παρούσα ενότητα περιγράφει αυτή τη μετάφραση, η οποία υλοποιείται σε τρία βήματα: την αντιστοίχιση γωνιών στο πλέγμα του αισθητήρα, την ανάλυση της μέτρησης σε συνιστώσες x , y , z , και την τελική περιστροφή τους στο σύστημα αναφοράς του τετρακοπτέρου.

4.2.1 Γεωμετρία του πλέγματος ζωνών

Ο αισθητήρας VL53L8CX έχει οπτικό πεδίο 45° , το οποίο διαιρείται σε ένα πλέγμα 8 γραμμών και 8 στηλών [19]. Αυτό σημαίνει ότι κάθε ζώνη καταλαμβάνει ένα γωνιακό εύρος 5.625° . Η γωνία της κάθε ζώνης i ως προς τον κεντρικό οπτικό άξονα του αισθητήρα υπολογίζεται ως εξής:

$$\alpha_i = (i - 3,5) \cdot 5,625, \quad i=0,1, \dots, 7 \quad (4.1)$$

Ο όρος $-3,5$ τοποθετεί την αρχή μέτρησης των γωνιών στον οπτικό άξονα του αισθητήρα. Έτσι οι μισές ζώνες λαμβάνουν αρνητική γωνία και οι άλλες μισές θετική. Λόγω της άρτιας διαίρεσης σε οκτώ ζώνες, η αρχή του άξονα διέρχεται ανάμεσα στις ζώνες 3 και 4, οπότε καμία ζώνη δεν σκοπεύει ακριβώς στις 0° . Η μικρότερη απόλυτη γωνία είναι $\pm 2,81^\circ$.



Σχήμα 4.1: Γεωμετρία του πλέγματος ζωνών. (α) Η διάταξη 8 × 8 και η θέση του οπτικού άξονα. (β) Η γωνιακή κατανομή των στηλών εντός του οπτικού πεδίου των 45°.

Επειδή αυτές οι γωνίες είναι γνωστές και σταθερές εκ κατασκευής, τα ημίτονα και τα συνημίτονα τους υπολογίστηκαν και αποθηκεύτηκαν σαν σταθερές στη μνήμη του μικροελεγκτή, με σκοπό τη μείωση του επεξεργαστικού χρόνου στον βρόχο ελέγχου.

Πολύ σημαντική είναι η σχέση της γεωμετρικής αβεβαιότητας Δ ως προς την εγκάρσια θέση του εμποδίου που παρουσιάζεται παρακάτω. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κάθε ζώνη μέτρησης δεν αποτελεί μια μονοδιάστατη ακτίνα, αλλά έναν κώνο του οποίου η διατομή διευρύνεται ανάλογα με την απόσταση. Κατά συνέπεια, παρότι η ζώνη εντόπισης του εμποδίου είναι γνωστή, η ακριβής θέση του αντικειμένου στο εσωτερικό αυτού του κώνου παραμένει απροσδιόριστη.

$$\Delta = r \cdot \tan(5,625^\circ \div 2) = 0,04913 r \quad (4.2)$$

Η αβεβαιότητα αυτή επηρεάζει καθοριστικά τους γεωμετρικούς ελέγχους της Ενότητας 4.3, οι οποίοι αποφασίζουν αν μια μέτρηση απειλεί την πορεία του αεροσκάφους.

4.2.2 Ανάλυση σε καρτεσιανές Συνιστώσες

Όταν μια ζώνη ανιχνεύσει ένα αντικείμενο, γίνεται γνωστή μια λοξή απόσταση r , μια γωνία στήλης α_C και μια γωνία γραμμής α_R . Διαλύοντας αυτή τη σφαιρική μέτρηση σε καρτεσιανές συνιστώσες, εξάγονται τέσσερα ξεχωριστά, χρήσιμα μεγέθη και καθένα εξυπηρετεί διαφορετικό σκοπό.:

$$d_h = r \cdot \cos \alpha_R \quad (4.3)$$

$$h = -r \cdot \sin \alpha_R \quad (4.4)$$

$$y = r \cdot \sin \alpha_C \quad (4.5)$$

$$x = r \cdot \cos \alpha_C \cdot \cos \alpha_R \quad (4.6)$$

Η οριζόντια εμβέλεια d_h της (4.3) είναι η προβολή της λοξής απόστασης στο οριζόντιο επίπεδο και αποτελεί το μέγεθος που τροφοδοτεί τον αλγόριθμο του φραγμού. Δεδομένου ότι αλγόριθμος του φραγμού έχει διατυπωθεί μαθηματικά ώστε να ελέγχει αποκλειστικά τις οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας (μετατόπιση προς τα εμπρός και πλάγια μετατόπιση), απαιτείται και η αντίστοιχη αναγωγή των δεδομένων στο ίδιο δισδιάστατο επίπεδο.

Το ύψος h της (4.4) δεν εισέρχεται σε κανέναν περιορισμό. Χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως κριτήριο απόρριψης δεδομένων που προέρχονται από το δάπεδο ή την οροφή.

Η πλάγια απόκλιση y της (4.5) καθορίζει αν η μέτρηση βρίσκεται εντός του όγκου που σαρώνει το αεροσκάφος.

Τέλος, η απόσταση κατά μήκος της πορείας x της (4.6) εκφράζει πόσο πράγματι μετακινείται το αεροσκάφος πριν την επαφή.

Η γεωμετρική διάκριση μεταξύ της λοξής απόστασης r και της διαμήκους x έχει άμεσο πρακτικό αντίκτυπο στην πτήση. Αν εξετάσουμε τις ακραίες (γωνιακές) ζώνες του πλέγματος, το γινόμενο $\cos \alpha_C \cdot \cos \alpha_R$ πέφτει στο 0,887. Αυτό σημαίνει πως, αν ο αλγόριθμος χρησιμοποιούσε τυφλά τη λοξή απόσταση, θα υπερεκτιμούσε τον πραγματικό διαθέσιμο χώρο μέχρι την πρόσκρουση κατά 12,8%. Κοντά στο όριο ασφαλείας, αυτή η παραδοχή μεταφράζεται σε ένα σφάλμα της τάξης των 4 cm εις βάρος της ασφαλείας. Δηλαδή, ο αλγόριθμος θα "έβλεπε" το εμπόδιο πιο μακριά από ό,τι πραγματικά είναι.

Κλείνοντας, το αρνητικό πρόσημο που εισάγεται στην εξίσωση (4.4) αποτελεί μια αναγκαία πρακτική σύμβαση, προκειμένου η εξαγόμενη τιμή του ύψους να ευθυγραμμιστεί με τις προϋποθέσεις των κατακόρυφων ελέγχων της Ενότητας 4.3.2. Ειδικότερα, επειδή η αρίθμηση του πλέγματος ξεκινά από το πάνω μέρος του οπτικού πεδίου, οι γραμμές του άνω ημίσεως (δείκτες 0 έως 3) στοχεύουν ψηλότερα από τον οπτικό άξονα και λαμβάνουν αρνητικές γωνίες. Η προσθήκη του αρνητικού προσήμου στην εξίσωση αντιστρέφει αυτό το μαθηματικό αποτέλεσμα. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι το ύψος h λαμβάνει θετικές τιμές για εμπόδια που βρίσκονται πάνω από το αεροσκάφος και αρνητικές για όσα βρίσκονται κάτω από αυτό.

4.2.3 Μετάβαση στο σύστημα αναφοράς του αεροσκάφους

Στις προηγούμενες ενότητες, όλες οι τιμές υπολογίστηκαν με σημείο αναφοράς τον ίδιο τον αισθητήρα μεμονωμένο, θεωρώντας X την ευθεία σκόπευσης του φακού. Για τον μπροστινό αισθητήρα, η ευθεία αυτή ταυτίζεται με την ευθεία κίνησης (pitch) του τετρακοπτέρου. Αντιθέτως, για τους πλευρικούς αισθητήρες, ο άξονας X των αισθητήρων είναι ο άξονας Y του αεροσκάφους.

Για να ενοποιηθούν τα δεδομένα, εφαρμόζεται μια περιστροφή κατά την γωνία τοποθέτησης ψ_s του κάθε αισθητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας το μοναδιαίο διάνυσμα της στήλης με έναν πίνακα περιστροφής:

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi_s & -\sin \psi_s \\ \sin \psi_s & \cos \psi_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_C \\ \sin \alpha_C \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Η σχέση αυτή παρουσιάζει απλά την προσθήκη της γωνίας του αισθητήρα, στη γωνία της μέτρησης $\theta = \psi_s + \alpha_c$. Η υλοποίηση μέσω του πίνακα περιστροφής επιλέχθηκε συνειδητά, διότι μέσω της χρήσης καρτεσιανών συντεταγμένων, το λογισμικό δε χρειάζεται ποτέ να υπολογίσει ρητά τη γωνία θ . Αποφεύγονται έτσι εντελώς προβλήματα αναδίπλωσης στις $\pm 180^\circ$, πολύπλοκων ελέγχων ορίων και υπολογιστικά βαρέων τριγωνομετρικών συναρτήσεων στον μικροελεγκτή.

Με αυτόν τον τρόπο, απομονώνεται πλήρως το υλικό από τον αλγόριθμο αποφυγής. Αφότου ολοκληρωθεί η περιστροφή, ο αλγόριθμος φραγμού και το QP τροφοδοτούνται με καθαρές διανυσματικές κατευθύνσεις. Δεν γνωρίζουν, και δεν χρειάζεται να γνωρίζουν, αν μια μέτρηση προήλθε από τον αριστερό, τον δεξιό ή τον μπροστινό αισθητήρα. Σημαντικότερα, σε περίπτωση μελλοντικής προσθήκης αισθητήρων σε άλλες γωνίες, η μόνη αλλαγή που απαιτείται στον κώδικα είναι η προσθήκη μιας γραμμής στον πίνακα αρχικοποίησης γωνιών.

4.3 Διαλογή και αναγωγή δεδομένων

Από τρεις αισθητήρες χρόνου πτήσης VL53L8CX προκύπτουν συνολικά 192 μετρήσεις ανά κύκλο εκτέλεσης, από τις οποίες ελάχιστες αφορούν πραγματικά την ασφάλεια της πτήσης. Η παρούσα ενότητα περιγράφει τα τρία διαδοχικά κριτήρια που εφαρμόζονται για την τελική αναγωγή των δεδομένων σε 24 χρήσιμες τιμές.

4.3.1 Έλεγχος εγκυρότητας

Ο πρώτος έλεγχος προηγείται κάθε γεωμετρικού υπολογισμού, ώστε οι άκυρες μετρήσεις να απορρίπτονται με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Απορρίπτονται όσες ζώνες δεν ανέφεραν κανέναν στόχο, καθώς και όσες φέρουν κωδικό κατάστασης εκτός του συνόλου των αποδεκτών.

Ο αισθητήρας συνοδεύει κάθε μέτρηση με κωδικό που δηλώνει τον βαθμό εμπιστοσύνης. Γίνονται δεκτοί τρεις: ο κωδικός “πλήρους εγκυρότητας”, καθώς και δύο κωδικοί “μερικής εμπιστοσύνης” ο ένας αντιστοιχεί σε πρώτη μέτρηση επί νέου στόχου, ο άλλος σε πιθανή συγχώνευση δύο στόχων εντός της ίδιας ζώνης [19].

Πίνακας 4.1: Πίνακας κωδικών κατάστασης του αισθητήρα VL53L8CX [19, Πίν. 4].

Κωδικός	Περιγραφή	Εμπιστοσύνη	Αποδοχή
0	Τα δεδομένα μέτρησης δεν έχουν ενημερωθεί	—	✗
1	Πολύ χαμηλός ρυθμός σήματος στη διάταξη SPAD	< 50%	✗
2	Σφάλμα φάσης στόχου	< 50%	✗
3	Πολύ υψηλός εκτιμητής θορύβου σ	< 50%	✗
4	Αποτυχία ελέγχου συνέπειας στόχου	< 50%	✗
5	Έγκυρη μέτρηση απόστασης	100%	✓
6	Απουσία ελέγχου αναδίπλωσης	50%	✓

7	Αποτυχία συνέπειας ρυθμού σήματος	< 50%	✗
8	Πολύ χαμηλός ρυθμός σήματος για τον τρέχοντα στόχο	< 50%	✗
9	Έγκυρη μέτρηση με ευρύ παλμό (πιθανή συγχώνευση στόχων)	50%	✓
10	Έγκυρη μέτρηση, χωρίς ανιχνευμένο στόχο στην προηγούμενη	< 50%	✗
11	Αποτυχία συνέπειας μέτρησης	< 50%	✗
12	Ο στόχος επισκιάζεται από άλλον, λόγω του φίλτρου όξυνσης (Sharpener)	< 50%	✗
13	Ανιχνεύθηκε στόχος με ασυνεπή δεδομένα· συχνό σε δευτερεύοντες στόχους	< 50%	✗
255	Δεν ανιχνεύθηκε στόχος	—	✗

Η αποδοχή μετρήσεων που φέρουν κωδικό “μερικής αξιοπιστίας” αποτέλεσε μια συνειδητή σχεδιαστική επιλογή. Αρχικά δοκιμάστηκε η αυστηρή προσέγγιση, όπου δεκτές ήταν μόνο οι μετρήσεις με ένδειξη “πλήρους εγκυρότητας”. Η προσέγγιση αυτή, ωστόσο, απορρίφθηκε λόγω της συμπεριφοράς του αισθητήρα σε δυναμικά περιβάλλοντα.

Όταν ένα νέο αντικείμενο εισέρχεται απότομα στο οπτικό πεδίο, ο αισθητήρας επιστρέφει άμεσα την απόσταση, αλλά την επισημαίνει με τον ειδικό κωδικό “πρώτη μέτρηση επί νέου στόχου” (κωδικός 6), ο οποίος συγκαταλέγεται στις καταστάσεις μερικής αξιοπιστίας. Αν το σύστημα απέρριπτε αυτούς τους κωδικούς, θα “τύφλωνε” εσκεμμένα τον εαυτό του απέναντι στην πρώτη και πιο κρίσιμη προειδοποίηση για κάθε νέο εμπόδιο.

4.3.2 Κατακόρυφη πύλη

Καθώς το οπτικό πεδίο των 45° του αισθητήρα εκτείνεται και κατακόρυφα, σε χαμηλό ύψος πτήσης το δάπεδο καταλαμβάνει τις κατώτερες γραμμές του πλέγματος και καταγράφεται ως το πλησιέστερο εμπόδιο, οδηγώντας το σύστημα σε εντολή οπισθοχώρησης. Παρόμοια συμπεριφορά συστήματος εμφανίζεται και στην πτήση του αεροσκάφους με κλίση. Ο αισθητήρας αποκτά και αυτός κλίση προς τα εμπρός με ενδεχόμενο ανίχνευσης του εδάφους και παράλληλα δημιουργείται το πρόβλημα κακής αντίληψης του ύψους που βρίσκεται το εμπόδιο.

Εφαρμόζεται συνεπώς έλεγχος επί του ύψους h της (4.4), με ασύμμετρα όρια:

$$- (H_{\text{κάτω}} + \Delta \leq h \leq H_{\text{πάνω}} + \Delta), \quad (4.8)$$

όπου επιλέχθηκαν σκόπιμα τα όρια, $H_{\text{πάνω}} = 0,350 \text{ m}$ και $H_{\text{κάτω}} = 0,060 \text{ m}$, κατόπιν πειραματικών δοκιμών.

Κατά την εμπρόσθια κίνηση, το αεροσκάφος λαμβάνει κλίση προς τα κάτω (pitch down). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα πραγματικά εμπόδια που βρίσκονται στο ίδιο ύψος με το τετρακόπτερο, να «μετατοπίζονται» εικονικά προς τις ανώτερες γραμμές του οπτικού πλέγματος του αισθητήρα. Για παράδειγμα, ένα μετωπικό εμπόδιο σε απόσταση 1 m, με κλίση του αεροσκάφους 10° , υπολογίζεται ότι έχει τοπικό ύψος $h \approx +0,18 \text{ m}$. Ένα πιο αυστηρό άνω όριο θα απέρριπτε αυτό το ύψος ως «οροφή», τυφλώνοντας το σύστημα ακριβώς κατά τη φάση της ταχείας πτήσης.

Όσον αφορά το κάτω όριο, ο φακός του αισθητήρα βρίσκεται τοποθετημένος μόλις 11 cm πάνω από το επίπεδο έδρασης. Με ένα πιο χαλαρό κάτω όριο, το ίδιο το δάπεδο θα υπολογιζόταν εντός του παραθύρου αποδοχής και θα καταγραφόταν μόνιμα ως μετωπικό εμπόδιο, εμποδίζοντας την απογείωση. Το όριο των 6 cm εξασφαλίζει την απόρριψη του δαπέδου, αφήνοντας ταυτόχρονα ένα μικρό περιθώριο για ανωμαλίες του εδάφους.

Ωστόσο, το κάτω όριο παρουσιάζει ένα τεράστιο σφάλμα, καθώς απορρίπτει σημαντικά δεδομένα σε περίπτωση φρεναρίσματος ή οπισθοχώρησης. Όταν η μύτη του τετρακοπτέρου ανασηκώνεται τυχόν εμπόδια πέφτουν στις κατώτερες γραμμές του πλέγματος (αρνητικό h) και απορρίπτονται από το αυστηρό κάτω όριο $H_{\text{κάτω}}$.

Τέλος επισημαίνεται ένα ακόμη σοβαρό ελάττωμα. Η στιγμιαία κλίση του αεροσκάφους δεν τροφοδοτείται ως δεδομένο στον αλγόριθμο αποφυγής, με αποτέλεσμα η αντίληψη του εμποδίου ως προς το επίπεδο του αεροσκάφους να είναι ανακριβής.

Η διατήρηση αυτής της προβληματικής συμπεριφοράς αποτέλεσε μια συνειδητή επιλογή σχεδιασμού, διότι οι δοκιμαστικές πτήσεις πραγματοποιήθηκαν σε περιορισμένο εσωτερικό χώρο και σε πολύ χαμηλό ύψος, με αποτέλεσμα πολλές ανατροπές του αεροσκάφους.

4.3.3 Οριοθέτηση πλάτους ασφαλείας

Καθώς το αεροσκάφος κινείται κατά μήκος του άξονα σκόπευσης ενός αισθητήρα, καλύπτει έναν νοητό διάδρομο συγκεκριμένου πλάτους. Επομένως, μία μέτρηση θεωρείται ότι απειλεί την πορεία του μόνο εάν η εγκάρσια συνιστώσα της (y) εμπίπτει στα όρια αυτού του διαδρόμου.

$$|y| \leq W + \Delta \quad (4.9)$$

Το ημι-πλάτος αναφοράς ορίζεται σε $W = 0,200 \text{ m}$. Η τιμή αυτή προκύπτει από το πραγματικό φυσικό ημι-πλάτος του τετρακοπτέρου, το οποίο ανέρχεται σε 0,15m (απόσταση από το κέντρο έως το εξωτερικό άκρο του έλικα), προσανυξημένο κατά ένα περιθώριο ασφαλείας 0,050m.

4.3.4 Ανάγνωση ανά στήλη

Για την τροφοδότηση του αλγορίθμου φραγμού, τα δεδομένα δεν εισάγονται ως μεμονωμένες αποστάσεις ανά ζώνη του πλέγματος, αλλά συμπυκνώνονται σε μία ενιαία τιμή ανά στήλη. Συγκεκριμένα, για κάθε στήλη διατηρείται η ελάχιστη οριζόντια απόσταση μεταξύ των οκτώ γραμμών της:

$$d_C = \min_R d_h (R, c) \quad (4.10)$$

Όλες οι γραμμές μοιράζονται την ίδια οριζόντια γωνία και επομένως παράγουν παράλληλους περιορισμούς. Έτσι από ένα σύνολο παράλληλων περιορισμών μόνο ο αυστηρότερος δύναται να είναι ενεργός, και αυτός αντιστοιχεί στην πλησιέστερη μέτρηση.

Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας αποδίδει συνολικά είκοσι τέσσερις τιμές δεδομένων, μία για κάθε στήλη των τριών αισθητήρων από τις συνολικά εκατόν ενενήντα δύο που επιστρέφουν οι αισθητήρες σε κάθε κύκλο.

4.4 Εκτίμηση απόστασης και ταχύτητας προσέγγισης

Η έξοδος της προηγούμενης ενότητας αποτελείται από είκοσι τέσσερις αποστάσεις ανά κύκλο εκτέλεσης. Ο φραγμός ασφαλείας απαιτεί όμως δύο μεγέθη ανά διεύθυνση: την απόσταση και τον ρυθμό μεταβολής της. Το δεύτερο δεν μετρείται από κανέναν αισθητήρα του συστήματος και πρέπει να εκτιμηθεί από διαδοχικές μετρήσεις απόστασης, υπό συνθήκες σημαντικού θορύβου.

Εφαρμόζεται για τον σκοπό αυτό το διακριτό φίλτρο Kalman που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.2.2 [4]. Η παρούσα ενότητα περιγράφει την εξειδίκευση του γενικού μοντέλου στο συγκεκριμένο πρόβλημα και τεκμηριώνει τις αποκλίσεις από την τυπική διατύπωση.

4.4.1 Διαμόρφωση του μοντέλου κατάστασης

Το διάνυσμα κατάστασης που αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.2.2 λαμβάνει πλέον δύο συνιστώσες ανά διεύθυνση σκόπευσης του αισθητήρα:

$$x_k = \begin{bmatrix} d_k \\ v_k \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

όπου d η απόσταση προς το πλησιέστερο εμπόδιο της διεύθυνσης και v ο ρυθμός μεταβολής της. Επισημαίνεται ότι το v αποτελεί σχετικό μέγεθος: περιλαμβάνει τόσο την κίνηση του αεροσκάφους προς το εμπόδιο όσο και την αντίστροφη, χωρίς δυνατότητα διαχωρισμού τους. Η ιδιότητα αυτή έχει άμεσες συνέπειες στη διατύπωση του φραγμού και εξετάζεται στην Ενότητα 4.5.

Κινηματικό Μοντέλο και Πίνακες Μετάβασης

Υιοθετείται το μαθηματικό μοντέλο σταθερής ταχύτητας, το οποίο αποτελεί την καθιερωμένη επιλογή για στόχους χωρίς γνωστό μοντέλο ελιγμού [5]. Ο πίνακας μετάβασης της εξίσωσης κατάστασης λαμβάνει τη μορφή:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει από τη σύμβαση προσήμου του v : εφόσον θετική τιμή του ρυθμού μεταβολής δηλώνει προσέγγιση, η απόσταση αναγκαστικά μειώνεται κατά $v \cdot \Delta t$ σε κάθε βήμα.

Ο εκτιμητής Kalman δεν διαθέτει καμία πληροφορία για την κίνηση του ίδιου του αεροσκάφους, καθώς το σύστημα δεν εκτελεί εκτίμηση θέσης ούτε λαμβάνει δεδομένα ταχύτητας από τον ελεγκτή πτήσης. Κάθε μεταβολή της απόστασης, αντιμετωπίζεται ως εξωτερική εξέλιξη. Για τον λόγο αυτόν ο πίνακας ελέγχου B που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.2.2 μηδενίζεται.

Επειδή ο αισθητήρας παρέχει αποκλειστικά δεδομένα απόστασης, ο πίνακας παρατήρησης ορίζεται ως:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Η ταχύτητα αποτελεί επομένως μία μη άμεσα παρατηρήσιμη μεταβλητή.

Μοντελοποίηση θορύβου και χρονικού βήματος

Ο θόρυβος διεργασίας (Q), αναπαριστά το σφάλμα λογισμικού. Πιο αναλυτικά το σφάλμα των μαθηματικών εξισώσεων που έχουν οριστεί. Μοντελοποιείται ως άγνωστη επιτάχυνση του εμποδίου με τυπική απόκλιση $q = 2\text{ m/s}^2$. Βάσει αυτού, ο πίνακας συνδιακύμανσης θορύβου διεργασίας Q λαμβάνει την τυπική μορφή του μοντέλου σταθερής ταχύτητας [5]:

$$Q = q^2 \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^4}{4} & \frac{\Delta t^3}{2} \\ \frac{\Delta t^3}{2} & \Delta t^2 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Αντίστοιχα, ο θόρυβος μέτρησης (πίνακας συνδιακύμανσης R) είναι βαθμωτός και μοντελοποιείται ως συνάρτηση εξαρτώμενη από την τρέχουσα απόσταση

$$R = (\sigma_0 + \sigma_r z)^2, \quad \sigma_0 = 5\text{ mm}, \quad \sigma_r = 1 \quad (4.15)$$

Η εξάρτηση αυτή αντανακλά την πραγματική συμπεριφορά του αισθητήρα ToF, του οποίου η ακρίβεια υποβαθμίζεται όσο αυξάνεται η απόσταση, λόγω της εξασθένησης του επιστρεφόμενου σήματος.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στο χρονικό βήμα Δt των σχέσεων (4.12) και (4.14). Δεν χρησιμοποιείται η ονομαστική περίοδος των 0,1 s που προκύπτει από τον ρυθμό ανανέωσης των 10Hz (Ενότητα 3.5), αλλά υπολογίζεται ο πραγματικός χρόνος που μεσολάβησε μεταξύ των μετρήσεων, ξεχωριστά για κάθε αισθητήρα. Αυτό κρίθηκε απαραίτητο για δύο λόγους: Πρώτον, δεδομένου ότι ο μικροελεγκτής επικοινωνεί με τους τρεις αισθητήρες διαδοχικά (σειριακά) και όχι ταυτόχρονα, ο χρόνος απόκρισης της κάθε μονάδας παρουσιάζει μικρές, ανεξάρτητες διακυμάνσεις. Και δεύτερον, σε περίπτωση απώλειας μιας μέτρησης, ένα σταθερό Δt θα οδηγούσε σε πρόβλεψη υποδιπλάσιας μετατόπισης και συνεπώς σε υποεκτίμηση της ταχύτητας προσέγγισης με αποτέλεσμα την υποεκτίμηση του κινδύνου σύγκρουσης.

Ο πίνακας συνδιακύμανσης P και η ανάκτηση της ταχύτητας

Όπως αναφέρθηκε, η ταχύτητα δεν μετριέται άμεσα. Ο μηχανισμός ανάκτησής της βασίζεται αποκλειστικά στον πίνακα συνδιακύμανσης σφάλματος εκτίμησης P . Ο πίνακας αυτός είναι συμμετρικός, διάστασης 2×2 και περιγράφεται από τρία στοιχεία:

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{01} & P_{11} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Το P_{00} εκφράζει τη αβεβαιότητα της εκτιμώμενης απόστασης σε m^2 , ενώ το P_{11} τη διακύμανση της εκτιμώμενης ταχύτητας σε $(m/s)^2$. Το στοιχείο P_{01} εκφράζει τη συνδιακύμανση της απόστασης (d) και της ταχύτητας (v), δηλαδή τον βαθμό στον οποίο ένα σφάλμα στη μία μεταβλητή υποδηλώνει σφάλμα και στην άλλη.

Κατά την αρχικοποίηση του φίλτρου, ο πίνακας τίθεται σε:

$$P_0 = \begin{bmatrix} (0,1)^2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Η αρχικοποίηση του P_0 με τις παραπάνω τιμές δεν έγινε με βάση πειραματικών μετρήσεων. Με οποιεσδήποτε αρχικές τιμές, ο πίνακας συνδιακύμανσης P , σε περίοδο 0,3 – 0,4 s σταθεροποιείται και αποτυπώνει με ακρίβεια την πραγματική αβεβαιότητα του συστήματος.

Κατά το στάδιο της πρόβλεψης, η σχέση (2.4), εφαρμόζοντας τον πίνακα A της (4.12), αναπτύσσεται στις εξής τρεις βαθμωτές εξισώσεις:

$$P_{00}^- = P_{00} - 2 \Delta t P_{01} + \Delta t^2 P_{11} + q^2 \Delta t^4 / 4 \quad (4.18)$$

$$P_{01}^- = P_{01} - \Delta t P_{11} + q^2 \Delta t^3 / 2 \quad (4.19)$$

$$P_{11}^- = P_{11} + q^2 \Delta t^2 \quad (4.20)$$

Η δεύτερη εξίσωση καθιστά το φίλτρο λειτουργικό. Ξεκινώντας από μηδενική συσχέτιση $P_{01}=0$, ο αρνητικός όρος $-\Delta t P_{11}$ οδηγεί τη συνδιακύμανση σε αρνητικές τιμές. Αυτό έχει άμεση φυσική ερμηνεία: εφόσον η απόσταση μειώνεται όταν η ταχύτητα αυξάνεται, οποιαδήποτε υπερεκτίμηση της απόστασης συνεπάγεται υποεκτίμηση της ταχύτητας.

Η πρακτική σημασία αυτής της συσχέτισης γίνεται εμφανής κατά τον υπολογισμό του Κέρδους Kalman (K). Με $H = [1 \ 0]$, η σχέση (2.5) ανάγεται σε:

$$S = P_{00}^- + R, \quad k_1 = \frac{P_{00}^-}{S}, \quad k_2 = \frac{P_{01}^-}{S} \quad (4.21)$$

όπου S η συνολική αβεβαιότητα του συστήματος, ενώ ο εκθέτης « - » συμβολίζει την πρόβλεψη του φίλτρου πριν την νέα μέτρηση.

Έπειτα, η διόρθωση της κατάστασης, βάσει του σφάλματος πρόβλεψης y , πραγματοποιείται ως εξής:

$$d = d^- + k_1 y, \quad v = v^- + k_2 y, \quad \text{με } y = z - d^- \quad (4.22)$$

Συμπεραίνεται, ότι συντελεστής διόρθωσης της ταχύτητας (k_2) είναι ανάλογος της συνδιακύμανσης P_{01}^- . Εάν η συνδιακύμανση παρέμενε μονίμως μηδενική, το k_2 θα μηδενιζόταν και η εκτίμηση της ταχύτητας δεν θα ενημερωνόταν ποτέ, παρά τη συνεχή ροή μετρήσεων απόστασης. Η ταχύτητα ανακτάται αποκλειστικά μέσω της συσχέτισης (P_{01}^-) που αναπτύσσει ο πίνακας συνδιακύμανσης (P). Αυτή είναι η θεμελιώδης ιδιότητα του φίλτρου Kalman, η οποία το διαφοροποιεί από τα φίλτρα σταθερών κερδών: η σύζευξη των μεταβλητών παράγεται από το ίδιο το μαθηματικό μοντέλο και αναπροσαρμόζεται δυναμικά σε κάθε βήμα.

Τέλος, το στάδιο διόρθωσης του πίνακα συνδιακύμανσης ολοκληρώνεται με τις σχέσεις:

$$P_{00} = (1 - k_1) P_{00}^-, \quad P_{01} = (1 - k_1) P_{01}^-, \quad P_{11} = P_{11}^- - k_2 P_{01}^- \quad (4.23)$$

Στις δύο πρώτες σχέσεις, επειδή ο συντελεστής k_1 λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1, ο όρος $(1 - k_1)$ λειτουργεί μειωτικά. Όταν γίνει λήψη μιας νέας πραγματικής μέτρησης απόστασης, είναι αναμενόμενο ότι η αβεβαιότητα γύρω από αυτήν (P_{00}) θα μειωθεί, συμπαρασύροντας αντίστοιχα και τη συνδιακύμανση (P_{01}).

Η πραγματική δυναμική του φίλτρου, ωστόσο, αποκαλύπτεται στην τρίτη εξίσωση, η οποία αφορά την άγνωστη ταχύτητα. Το γινόμενο ($k_2 P_{01}^-$) είναι πάντα θετικό, καθώς προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό δύο αρνητικών μεγεθών. Αφαιρώντας αυτή τη θετική ποσότητα από την διακύμανση

(P_{11}^-), η τελική αβεβαιότητα της ταχύτητας (P_{11}) μειώνεται συνεχώς. Συνεπώς, ενώ η αβεβαιότητα της απόστασης μειώνεται επειδή η απόσταση μετρήθηκε, η αβεβαιότητα της ταχύτητας μειώνεται αποκλειστικά χάρη στη μαθηματική συσχέτιση (συνδιακύμανση) των δύο μεταβλητών.

4.4.2 Ασύμμετρη πύλη σφάλματος πρόβλεψης

Η αναγωγή κάθε στήλης στην ελάχιστη μέτρησή της, σύμφωνα με τη σχέση (4.10), εισάγει έναν μη γραμμικό τελεστή (min) στην είσοδο ενός κατά τα άλλα γραμμικού εκτιμητή. Η συνέπεια αυτής της πράξης δεν είναι η εισαγωγή θορύβου, αλλά η δημιουργία ασυνέχειας. Καθώς το αεροσκάφος κινείται, το φυσικό αντικείμενο που αποτελεί το ελάχιστο μιας στήλης ενδέχεται να μεταβληθεί απότομα ή να βγει εκτός οπτικού πεδίου και να εμφανιστεί ένα άλλο. Η ακολουθία μετρήσεων εμφανίζει τότε μεγάλες μεταβολές, τις οποίες το μοντέλο σταθερής ταχύτητας του Kalman ερμηνεύει εσφαλμένα ως ραγδαία ταχύτητα προσέγγισης.

Η κρίσιμη παρατήρηση είναι ότι οι δύο κατευθύνσεις αυτής της ασυνέχειας έχουν αντίθετες συνέπειες για την ασφάλεια. Μια μεταβολή προς τα έσω παράγει πλασματική ταχύτητα προσέγγισης, η οποία σφίγγει τον φραγμό και κοστίζει απλώς μια περιττή επιβράδυνση. Αντίθετα, μια βηματική μεταβολή προς τα έξω παράγει πλασματική απομάκρυνση, η οποία χαλαρώνει τον φραγμό. Με τα κέρδη της μόνιμης κατάστασης (η κατάσταση όπου οι τιμές αβεβαιότητας έχουν σταθεροποιηθεί και δεν μεταβάλλονται σημαντικά), ένα άλμα $0,4\text{ m}$ προς τα έξω μεταβάλλει την εκτιμώμενη ταχύτητα κατά $k_2 \cdot y \approx -2,0\text{ m/s}$, ποσό που προστίθεται αυτούσιο στο επιτρεπόμενο όριο ταχύτητας του φραγμού, επιτρέποντας στο αεροσκάφος να επιταχύνει επικίνδυνα.

Η καθιερωμένη βιβλιογραφική πρακτική αντιμετώπισης συνίσταται την εφαρμογή μιας συμμετρικής πύλης επικύρωσης, η οποία απορρίπτει μετρήσεις που απέχουν από την πρόβλεψη περισσότερο από ένα πολλαπλάσιο της αναμενόμενης τυπικής απόκλισης $\sqrt{s}$ [5]. Η τυπική, συμμετρική εφαρμογή αξιολογήθηκε επί καταγεγραμμένων δεδομένων και απορρίφθηκε, καθώς η απότομη είσοδος ενός αντικειμένου στο οπτικό πεδίο ερμηνεύτηκε ως ακραία τιμή και το εμπόδιο απορριπτόταν επί ένα ολόκληρο δευτερόλεπτο.

Υιοθετήθηκε συνεπώς ένας ασύμμετρος κανόνας αποδοχής, με πύλη $y = 3\sqrt{s}$:

$$\begin{aligned} y < 0 & \text{ αποδοχή} \\ 0 \leq y \leq \gamma & \text{ αποδοχή} \\ \gamma < y & \text{ απόρριψη} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Βάσει αυτού του κανόνα, αξιολογούνται και ενδέχεται να απορριφθούν αποκλειστικά οι μετρήσεις που θα χαλάρωναν τον φραγμό ασφαλείας, ενώ γίνονται άμεσα δεκτές όσες τον καθιστούν αυστηρότερο. Όταν το αρνητικό σφάλμα μέτρησης υπερβαίνει την πύλη η κατάσταση δεν διορθώνεται σταδιακά. Η απόσταση τίθεται ίση με τη μέτρηση, η ταχύτητα περιορίζεται σε μη αρνητικές τιμές ώστε να μη διατηρηθεί εσφαλμένη η ένδειξη απομάκρυνσης και ο πίνακας συνδιακύμανσης επαναρχικοποιείται με νέες τιμές: $P_{00}=0,05^2$, $P_{01}=0$, $P_{11}=4$.

4.4.3 Μηχανισμοί προστασίας από απόκλιση του μοντέλου

Η ύπαρξη πύλης στη μακρινή πλευρά (ανεξαρτήτως συμμετρίας) δημιουργεί έναν μηχανισμό θετικής ανάδρασης, ο οποίος εντοπίστηκε σε ανάλυση καταγραφών πραγματικής πτήσης. Όταν ένα εμπόδιο

που προσεγγιζόταν με υψηλή ταχύτητα ακινητοποιείται απότομα, η εκτιμώμενη ταχύτητα παραμένει υψηλή για ένα βήμα. Η πρόβλεψη τοποθετεί τότε το εμπόδιο πλησιέστερα από την πραγματικότητα, με συνέπεια κάθε επακόλουθη έγκυρη μέτρηση απόστασης να εμφανίζεται πιο μακριά και να απορρίπτεται από την πύλη. Η εσφαλμένη ταχύτητα εξακολουθεί έτσι να μειώνει την εκτιμώμενη απόσταση ανεμπόδιστα κατά το στάδιο της πρόβλεψης. Στα καταγεγραμμένα δεδομένα, η εκτίμηση έφτασε τα $-7,6\text{ m}$ και παρέμεινε αρνητική επί $3,5\text{ s}$, τιμή που ο φραγμός ερμηνεύει ως εντολή οπισθοχώρησης.

Διευκρινίζεται ότι ο μηχανισμός αυτός δεν οφείλεται στην ασυμμετρία του κανόνα (4.24). Στη συγκεκριμένη ακολουθία η καινοτομία είναι θετική, οπότε μια συμμετρική πύλη θα απέρριπτε τις ίδιες ακριβώς μετρήσεις, με το πρόσθετο μειονέκτημα ότι θα απέκλειε και τη διαφυγή μέσω αρνητικής καινοτομίας.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου, ενσωματώθηκαν τρεις ρητοί μηχανισμοί προστασίας:

1. **Κατώφλι στην προβλεπόμενη απόσταση:** Η προβλεπόμενη τιμή d^- περιορίζεται κάτωθεν στα $0,02\text{ m}$, καθιστώντας αδύνατη την εμφάνιση αρνητικών αποστάσεων, οι οποίες στερούνται φυσικού νοήματος.
2. **Όριο διαδοχικών απορρίψεων:** Εφόσον τρεις συνεχόμενες μετρήσεις απορριφθούν, η επόμενη γίνεται δεκτή ανεπιφύλακτα και η ταχύτητα μηδενίζεται. Εάν υπάρχουν πολλές παρόμοιες μετρήσεις θεωρείται πως το μαθηματικό μοντέλο έχει χάσει την επαφή με την πραγματικότητα, οπότε για να διορθωθεί η απόκλιση αυτή γίνεται επαναφορά των παραμέτρων.
3. **Άνω όριο στην εκτιμώμενη ταχύτητα:** Επιβάλλεται όριο ίσο με τη μέγιστη ταχύτητα που ο φραγμός επιτρέπεται να διατάξει. Η ανάγκη προέκυψε πειραματικά: ένα άλμα $0,4\text{ m}$ στα 10 Hz αποτιμάται σε 4 m/s . Σε καταγεγραμμένη πτήση, αυτό παρήγαγε ταχύτητα προσέγγισης $4,2\text{ m/s}$ ενώ το αεροσκάφος ήταν σχεδόν ακίνητο, καθιστώντας από μόνη της το τετραγωνικό πρόβλημα βελτιστοποίησης μη επιλύσιμο.

Η επιλογή του συγκεκριμένου άνω ορίου στην εκτιμώμενη ταχύτητα δεν είναι αυθαίρετη. Με την ταχύτητα φραγμένη στη μέγιστη διατάξιμη, το δεξιά μέλος κάθε περιορισμού (Ενότητα 4.5, σχέση (4.29)) ικανοποιείται πάντοτε από εντολή πλήρους υποχώρησης. Κατά συνέπεια, η μη επιλυσιμότητα μπορεί πλέον να προκύψει μόνο από πραγματικά αντικρουόμενους φυσικούς περιορισμούς (π.χ. πέρασμα από πόρτα), και όχι από μία εσφαλμένη εκτίμηση.

Οι τρεις μηχανισμοί δεν συνιστούν διορθώσεις σχεδιαστικού σφάλματος, αλλά το φραγμένο τίμημα της συνειδητής επιλογής της Ενότητας 4.4.2. Η ορθότητα της υλοποίησης επαληθεύτηκε με παράλληλη εκτέλεση του κώδικα και ανεξάρτητης υλοποίησης αναφοράς, παρουσιάζοντας ελάχιστη απόκλιση ($3,5\text{ mm}$ και $2,7\text{ cm/s}$), επιβεβαιώνοντας τη μαθηματική σταθερότητα του αλγορίθμου στις πιο ακραίες συνθήκες.

4.5 Αλγόριθμος ελέγχου μέσω συναρτήσεων φραγμού

Από την ανάλυση της Ενότητας 4.4 προέκυψε η κινηματική κατάσταση για εικοσιτέσσερις διευθύνσεις, αποδίδοντας σε καθεμία δύο κρίσιμα μεγέθη: την απόσταση από το πλησιέστερο εμπόδιο και τη σχετική ταχύτητα προσέγγισης. Στην παρούσα ενότητα εφαρμόζεται η θεωρία των συναρτήσεων φραγμού (CBF), η οποία αναλαμβάνει να μεταφράσει αυτά τα κινηματικά δεδομένα σε περιορισμούς των εντολών του χειριστή, παρέχοντας μαθηματικά τεκμηριωμένες εγγυήσεις ασφαλείας.

4.5.1 Η συνάρτηση φραγμού και η αναλλοιωτότητα του ασφαλούς συνόλου

Για κάθε διεύθυνση ορίζεται η βαθμωτή συνάρτηση, κατά το πρότυπο των πιστοποιητικών φραγμού [12], [13]:

$$h = d - D_{safe} \quad (4.25)$$

όπου d η εκτιμώμενη απόσταση και D_{safe} το επιθυμητό περιθώριο ασφαλείας. Η σχέση αυτή μεταφράζει την απαίτηση της απόστασης από το εμπόδιο. Θετικό h σημαίνει ότι υπάρχει περιθώριο και αρνητικό ότι το περιθώριο D_{safe} έχει παραβιαστεί.

Για την εξασφάλιση ενός ασφαλούς ρυθμού προσέγγισης προς τα εμπόδια, η θεωρία των συναρτήσεων φραγμού αξιοποιεί την πρώτη παράγωγο ($\dot{h}$) του περιθωρίου ασφαλείας h . Η βασική συνθήκη που επιβάλλεται, διατυπώνεται σύμφωνα με τη διατύπωση των Ames et al. [14], [16], μέσω της εξής σχέσης:

$$\dot{h} \geq -\alpha h \quad (4.26)$$

Με τη παραπάνω σχέση, το αεροσκάφος έχει τη δυνατότητα να πλησιάζει το εμπόδιο με τον ρυθμο της ταχύτητας να αλλάζει ανάλογα με το διαθέσιμο περιθώριο. Όσο μικρότερο είναι το διαθέσιμο περιθώριο, τόσο πιο αργή είναι η προσέγγιση του τετρακοπτέρου. Η παράμετρος α , με μονάδες s^{-1} , λειτουργεί ως συντελεστής αυστηρότητας και ρυθμίζει το πόσο επιθετική επιτρέπεται να είναι αυτή η προσέγγιση.

Η μαθηματική ισχύς της (4.26) αποδεικνύεται μέσω του λήμματος σύγκρισης [17] και η διαφορική ανισότητα συνεπάγεται ότι:

$$h(t) \geq h(0)e^{-\alpha t} \quad (4.27)$$

Μια εκθετική συνάρτηση με θετική αρχική τιμή δεν μηδενίζεται ποτέ σε πεπερασμένο χρόνο. Επομένως, εφόσον το αεροσκάφος ξεκινά από ασφαλή θέση ($h(0) > 0$), το διαθέσιμο περιθώριο εγγυάται ότι θα παραμείνει θετικό για κάθε μελλοντική στιγμή. Το ασφαλές σύνολο είναι, συνεπώς, προς τα εμπρός αναλλοίωτο (forward invariant) [2]. Εάν το σύστημα βρίσκεται εντός αυτού, παραμένει εντός. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα, είναι που προσδίδει στον αλγόριθμο αποφυγής τον χαρακτήρα μαθηματικής εγγύησης, υπό την προϋπόθεση, βεβαίως, ότι η συνθήκη (4.26) μπορεί πράγματι να επιβληθεί σε κάθε βήμα ελέγχου.

4.5.2 Από τη συνθήκη στον γραμμικό περιορισμό

Για να γίνει η (4.26) περιορισμός επί της εντολής, απαιτείται η έκφραση της μεταβολής του $\dot{h}$ σε συνάρτηση με την εντολής ταχύτητας του χειριστή. Επειδή το D_{SAFE} είναι σταθερά, ισχύει $\dot{h} = \dot{d}$ η μεταβολή του περιθωρίου ταυτίζεται με τη μεταβολή της απόστασης. Αυτή η μεταβολή της απόστασης προκύπτει από το άθροισμα δύο ανεξάρτητων παραγόντων: της ταχύτητας του αεροσκάφους προς το εμπόδιο και της ενδεχόμενης ταχύτητας του ίδιου του εμποδίου προς το αεροσκάφος.

Η συνεισφορά της κίνησης του τετρακοπτέρου δεν είναι ολόκληρη η ταχύτητα, αλλά μόνο η συνιστώσα της κατά μήκος της διεύθυνσης προς το εμπόδιο. Η εγκάρσια συνιστώσα προσπερνά το εμπόδιο χωρίς να το πλησιάζει. Ο διαχωρισμός αυτός είναι ακριβώς η προβολή του διανύσματος ταχύτητας στο μοναδιαίο διάνυσμα της διεύθυνσης, δηλαδή το εσωτερικό γινόμενο. Καθώς το μοναδιαίο διάνυσμα $\hat{n} = (n_x, n_y)$ ενσωματώνει ήδη τη γωνία τοποθέτησης του αισθητήρα, η μεταβολή του περιθωρίου γράφεται:

$$\dot{h} = -(n_x v_{fwd} + n_y v_{lat}) - v_{close} \quad (4.28)$$

όπου το πρώτο, μέρος αποδίδει τη δική μας κίνηση και το δεύτερο την κίνηση του εμποδίου, όπως τη μετρά ο εκτιμητής. Αντικαθιστώντας στην (4.26) προκύπτει ο περιορισμός σε τελική μορφή:

$$n_x v_{fwd} + n_y v_{lat} \leq \alpha (d - D_{safe}) - v_{close} \quad (4.29)$$

Η παραπάνω ανισότητα συγκρίνει την πρόθεση του χειριστή (αριστερό μέλος) με το όριο (δεξιό μέλος). Γεωμετρικά, η σχέση (4.29) είναι γραμμική ως προς το ζεύγος των ταχυτήτων (v_{fwd} , v_{lat}) και, συνεπώς, ορίζει ένα ημιεπίπεδο στον διδιάστατο χώρο των εντολών. Το διάνυσμα $\hat{n}$ αποτελεί την κάθετο στο σύνορο (δεξιό μέλος = αριστερό μέλος) του, ενώ το δεξιό μέλος της ανισότητας, προσδιορίζει τη θέση του. Επειδή κάθε στήλη από τους αισθητήρες συνεισφέρει έναν αντίστοιχο περιορισμό, η συνολική επιτρεπτή περιοχή προκύπτει ως η τομή αυτών των ημιεπιπέδων. Αυτή η γραμμική δομή είναι που καθιστά το πρόβλημα βελτιστοποίησης της Ενότητας 4.6 άμεσα επιλύσιμο.

Θέτοντας την ταχύτητα ίση με τη μέγιστη διατάξιμη ταχύτητα του αεροσκάφους (V_{limit}) στην οριακή περίπτωση πλήρους εντολής προς ένα ακίνητο εμπόδιο, προκύπτει ότι ο περιορισμός αρχίζει να δεσμεύει την κίνηση σε απόσταση:

$$d = D_{safe} + \frac{V_{limit}}{\alpha} \quad (4.30)$$

και με αντικατάσταση προκύπτει:

$$d = 0.3 + \frac{2.0}{1.0} = 2.3 \text{ m} \quad (4.31)$$

Συνεπώς, σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 2,3 m ο φραγμός είναι ανενεργός και δεν επηρεάζει την εντολή του χειριστή. Αντίθετα, σε μικρότερες αποστάσεις, ο αλγόριθμος σταδιακά περιορίζει την ταχύτητα προσέγγισης.

4.5.3 Ανάδραση της μετρούμενης ταχύτητας

Ο περιορισμός (4.29), όπως προκύπτει από τη θεωρία, συγκρίνει την εντολή ταχύτητας με το επιτρεπτό όριο. Όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 3.3.2, η εντολή του χειριστή εκφράζεται αρχικά σε μονάδες του χειριστηρίου (ticks) και μετασχηματίζεται αλγοριθμικά σε ταχύτητα αναφοράς. Στην πράξη, όμως, η μαθηματική αυτή αντιστοίχιση δεν εγγυάται ότι η φυσική κίνηση του αεροσκάφους θα ταυτίζεται πάντα με την εντολή. Η συνέπεια αυτού του χάσματος εντοπίστηκε κατά τη διάρκεια των πειραματικών πτήσεων: το αεροσκάφος μπορούσε να ολισθαίνει προς έναν τοίχο ενώ ο φραγμός, λαμβάνοντας μια κεντραρισμένη εντολή από το χειριστήριο, δεν κατέγραφε πρόθεση κίνησης και παρέμενε αδρανής.

Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, εισάγεται ένας μηχανισμός ανάδρασης που αξιοποιεί την πραγματική ταχύτητα προσέγγισης (v_{close}), όπως αυτή εκτιμάται από το φίλτρο. Όταν η μετρούμενη ταχύτητα υπερβαίνει το επιτρεπτό όριο, το δεξιό μέλος του περιορισμού (b) γίνεται αυστηρότερο κατά ένα ποσό ανάλογο της υπέρβασης:

$$\text{αν } v_{close} > \alpha h: \quad b \leftarrow b - G(v_{close} - \alpha h) \quad (4.32)$$

όπου το κέρδος ορίζεται σε $G = 3,0$ και επιλέχθηκε ώστε η προκύπτουσα ζώνη μετάβασης να είναι αυστηρά στενότερη από την τυπική απόκλιση του θορύβου της εκτίμησης ($\sigma_v = 0,30 \text{ m/s}$), εξαναγκάζοντας το σύστημα να εφαρμόζει ακαριαία το μέγιστο “φρένο” στην παραμικρή ολίσθηση. Ο όρος (4.32) μηδενίζεται όταν τα δύο μεγέθη συμφωνούν, οπότε δεν μπορεί να παρέμβει σε κανονική

πτήση. Ενεργοποιείται μόνο όταν η μέτρηση διαψεύδει το stick, και τότε εμπιστεύεται τη μέτρηση. Η επιλογή μεταφέρει την ασφάλεια από ένα μέγεθος που εξαρτάται από αβαθμονόμητη κλίμακα (τα ticks της εντολής) σε ένα μέγεθος που μετρείται απευθείας σε πραγματικές μονάδες (τον ρυθμό προσέγγισης της απόστασης).

4.5.4 Το κατώφλι της απαιτούμενης υποχώρησης

Ο όρος ανάδρασης της (4.32) τροφοδοτείται από θορυβώδη δεδομένα και εφαρμόζεται ταυτόχρονα σε πολλαπλές στήλες του αισθητήρα. Χωρίς κάποιον περιορισμό, ένα σφάλμα μέτρησης μόλις λίγων εκατοστών αρκεί για να προκαλέσει μια απότομη απαίτηση οπισθοχώρησης. Για την αποτροπή αυτού του φαινομένου, επιβάλλεται ένα κάτω φράγμα στο μέγιστο επιτρεπτό ποσό υποχώρησης του φραγμού:

$$b \geq -V_{FB, \max}, \quad V_{FB, \max} = -0,50 \text{ m/s} \quad (4.33)$$

Παρότι διαισθητικά ένα τέτοιο όριο φαίνεται να αποδυναμώνει την ικανότητα πέδησης του συστήματος, στην πράξη την εξασφαλίζει. Μια μη φραγμένη απαίτηση υψηλής ταχύτητας από πολλαπλές στήλες δεν μπορεί να ικανοποιηθεί κινηματικά εντός του επιτρεπτού εύρους ταχυτήτων V_{limit} . Αυτό καθιστά το πρόβλημα βελτιστοποίησης μη επιλύσιμο, εξαναγκάζοντας το σύστημα να καταφύγει στην εφεδρική λύση (Ενότητα 4.6.3), η οποία προσφέρει υποδεέστερη ικανότητα πέδησης. Διατηρώντας την σταθερά εντός εφικτών ορίων, ο επιλύτης διατηρείται λειτουργικός και η απόκριση σταθεροποιείται στα 0,53 m/s.

Τέλος, η χρήση μιας σταθερής τιμής έναντι ενός ορίου κλιμακούμενου με την ταχύτητα προσέγγισης v_{close} , αποτελεί συνειδητή επιλογή. Η κλιμάκωση θα εισήγαγε εκ νέου τον θόρυβο της εκτιμώμενης ταχύτητας προσέγγισης στον καθορισμό του ορίου, ακριβώς τη στιγμή που η αποκοπή του είναι κρίσιμη. Όπως διαπιστώθηκε από τις πειραματικές πτήσεις, η εισαγωγή του σταθερού κατωφλίου μείωσε τη χειρότερη στιγμιαία μεταβολή της εντολής από 1,99 m/s σε 1,02 m/s, εξαλείφοντας σχεδόν πλήρως τα ανεπιθύμητα σενάρια πλήρους οπισθοχώρησης από 39 σε μόλις 2 στο ίδιο σύνολο δοκιμών.

4.5.5 Η διπλομέτρηση της ταχύτητας του αεροσκάφους

Η διατύπωση του περιορισμού (4.29) εισάγει μια αδυναμία, η οποία επισημάνθηκε αρχικά στην Ενότητα 4.4.1 και αναλύεται περαιτέρω εδώ. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα προσέγγισης αποτελεί επαλληλία δύο ξεχωριστών κινήσεων, τις οποίες ο αισθητήρας αδυνατεί να διαχωρίσει:

$$v_{close} = v_{obs} + \hat{n} \cdot v_{ego} \quad (4.34)$$

Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης, ο οποίος εκφράζει την προβολή της ταχύτητας του ίδιου του αεροσκάφους $\hat{n} \cdot v_{ego}$, ελέγχεται ήδη από το αριστερό μέλος της (4.29). Οπότε, καθώς εμπεριέχεται ταυτόχρονα και στο δεξιό μέλος μέσω του v_{close} , οδηγεί στον διπλοϋπολογισμό της κινηματικής κατάστασης του οχήματος.

Στην περίπτωση των στατικών εμποδίων, η επίπτωση αυτού του σφάλματος είναι συντηρητική και, κατ' επέκταση, ασφαλής: ο φραγμός επιβάλλει πέδηση ελαφρώς νωρίτερα από όσο απαιτείται. Αντιθέτως, απέναντι σε ένα κινητό εμπόδιο που προσεγγίζει το αεροσκάφος, δημιουργείται ένας ανεπιθύμητος βρόχος ανάδρασης. Καθώς το όχημα οπισθοχωρεί, η ταχύτητα v_{close} μειώνεται. Αυτό προκαλεί τη χαλάρωση του ορίου ασφαλείας, η οπισθοχώρηση διακόπτεται και το εμπόδιο ανακτά έδαφος. Παρότι η ανισότητα ικανοποιείται σε κάθε χρονική στιγμή, το κινηματικό μοντέλο του $\hat{h}$ στο οποίο βασίζεται καθίσταται ανακριβές, αναιρώντας πρακτικά την ιδιότητα αναλλοιωτότητας (forward invariance) του ασφαλούς συνόλου.

Η οριστική επίλυση αυτού του ζητήματος προϋποθέτει την ανεξάρτητη εκτίμηση της ταχύτητας του αεροσκάφους, ώστε να απομονώνεται και να αφαιρείται από την (4.34) αποκλειστικά η συνεισφορά του εμποδίου. Δεδομένου ότι η τρέχουσα αρχιτεκτονική του συστήματος δεν διαθέτει τέτοια ανεξάρτητη πηγή οδομετρίας, η συγκεκριμένη διόρθωση καταγράφεται ως πρόταση μελλοντικής επέκτασης στην Ενότητα 6.3.

4.6 Ο τετραγωνικός προγραμματισμός

Μέσω της επεξεργασίας που προηγήθηκε στις προηγούμενες ενότητες, πλέον κάθε ενεργή κατεύθυνση αποδίδει ένα γραμμικό περιορισμό στο επίπεδο των ταχυτήτων αναφοράς. Γεωμετρικά, κάθε περιορισμός ορίζει ένα ημιεπίπεδο επιτρεπτών ταχυτήτων στον δισδιάστατο χώρο (v_{fwd} , v_{lat}), ενώ η τομή του συνόλου αυτών των ημιεπιπέδων σχηματίζει το ασφαλές πεδίο λειτουργίας. Ωστόσο, το κρίσιμο ζητούμενο που παραμένει είναι ποια ακριβώς εντολή μέσα σε αυτό το ασφαλές πεδίο θα επιλεγεί τελικά για να αποσταλεί στον ελεγκτή πτήσης.

Η λήψη αυτής της απόφασης διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ελάχιστης παρέμβασης, καθώς ζητείται η εύρεση της ταχύτητας εκείνης η οποία, τηρώντας απολύτως το σύνολο των ορίων ασφαλείας, αποκλίνει ελάχιστα από την αρχική, εντολή του χειριστή. Η ελαχιστοποίηση μιας τετραγωνικής αντικειμενικής συνάρτησης (που μετρά την απόκλιση από τον χειριστή) υπό το καθεστώς γραμμικών ανισοτικών περιορισμών συνιστά τον ορισμό του Τετραγωνικού Προγραμματισμού (Quadratic Programming - QP).

4.6.1 Διατύπωση ελάχιστης παρέμβασης

Η κατευθυντήρια αρχή ολόκληρου του σχεδιασμού του αλγορίθμου έγκειται στο γεγονός ότι η εντολή του χειριστή τροποποιείται αποκλειστικά στον βαθμό που απαιτείται για την αποφυγή συγκρούσεων, ελαχιστοποιώντας την περιττή παρέμβαση. Η παραπάνω πρόταση εκφράζεται μαθηματικά ως ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης απόστασης στο πεδίο των ταχυτήτων [16]:

$$\min_v ||v - v_{stick}||^2 \text{ υπό περιορισμό } A \cdot v \leq b \quad (4.35)$$

όπου $v = (v_{fwd}, v_{lat})$ είναι το διάνυσμα των τελικών εντολών ταχύτητας προς αποστολή, v_{stick} η ονομαστική εντολή του χειριστή, και $A \cdot v \leq b$ το σύνολο των γραμμικών περιορισμών που προέκυψαν από τις Συναρτήσεις Φραγμού (Ενότητα 4.5).

Επιπροσθέτως, στο σύστημα των περιορισμών ενσωματώνονται τέσσερις γραμμικές ανισότητες που εκφράζουν τα φυσικά όρια λειτουργίας και τους κορεσμούς ταχύτητας ανά άξονα ($\pm V_{limit}$):

$$v_{fwd} \leq V_{limit}, \quad -v_{fwd} \leq V_{limit}, \quad v_{lat} \leq V_{limit}, \quad -v_{lat} \leq V_{limit} \quad (4.36)$$

Ο λόγος για τον οποίο τα όρια αυτά εισάγονται ως περιορισμοί του προβλήματος, και όχι ως εκ των υστέρων ψαλίδισμα της λύσης, είναι λεπτός και εξετάζεται στην Ενότητα 4.6.4.

4.6.2 Ακριβής επίλυση βάσει γεωμετρικού ελέγχου των υποψηφίων

Το πρόβλημα (4.35) είναι ένα τετραγωνικό πρόβλημα σε ακριβώς δύο μεταβλητές. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει μια λύση που δεν είναι προσεγγιστική αλλά απόλυτα ακριβή, με φραγμένο και εκ των προτέρων γνωστό υπολογιστικό κόστος, εντός της προθεσμίας των 4 ms που επιβάλλει ο βρόχος ελέγχου.

Επειδή οι περιορισμοί ασφαλείας σχηματίζουν ένα νοητό κυρτό πολύγωνο στον δισδιάστατο χώρο των ταχυτήτων, το πλησιέστερο σημείο προς την ονομαστική εντολή του χειριστή (v_{stick}) μπορεί να βρίσκεται μόνο σε τρεις διακριτές γεωμετρικές θέσεις [20]:

1. Στο εσωτερικό του πολυγώνου (όταν η εντολή του πιλότου είναι ήδη ασφαλής και δεν απαιτείται καμία διόρθωση).
2. Πάνω σε μία ενεργή ακμή (όταν η εντολή «χτυπάει» σε έναν περιορισμό/τοίχο, οπότε προβάλλεται πάνω στο όριό του).
3. Σε μια κορυφή (όταν η εντολή «σφηνώνει» στη γωνία όπου τέμνονται δύο περιορισμοί ταυτόχρονα, όπως σε έναν στενό διάδρομο).

Συνεπώς, αντί για επαναληπτικούς αλγορίθμους γενικού σκοπού, ο επιλύτης εξετάζει άμεσα αυτό το πεπερασμένο σύνολο των πιθανών υποψηφίων: την ίδια την εντολή του χειριστή, την κάθετη προβολή της σε κάθε παραβιαζόμενο περιορισμό, και τις τομές όλων των ζευγών περιορισμών. Μεταξύ των εφικτών υποψηφίων, επιλέγεται εκείνος με τη μικρότερη απόσταση από το (v_{stick}).

Χωρίς έναν μηχανισμό περιορισμού του πλήθους τους, οι 24 περιορισμοί ($n_x \cdot v_{fwd} + n_y \cdot v_{lat}$) και οι 4 περιορισμοί των ορίων ταχύτητας (4.36) δημιουργούν πολλαπλές συνθήκες ελέγχου σε κάθε κύκλο εκτέλεσης. Για να διασφαλιστεί ότι ο υπολογιστικός χρόνος παραμένει αυστηρά εντός των ασφαλών ορίων μιας ρουτίνας διακοπής (ISR), εφαρμόζονται διαδοχικά δύο στάδια μείωσης των περιορισμών:

1. Απόρριψη αδύνατων περιορισμών: Αφαιρείται κάθε γραμμή με όριο (b) μεγαλύτερο από το μέγιστο δυνατό όριο ($V_{limit} \sqrt{2}$). Σε ανοιχτό χώρο, η μείωση αυτή μηδενίζει τους περιορισμούς εμποδίων.
2. Διατήρηση των 12 αυστηρότερων: Από το υποσύνολο περιορισμών που απομένουν, διατηρούνται οι δώδεκα με το μικρότερο όριο (b)

Με συνολικά δεκαέξι γραμμές προς εξέταση, το υπολογιστικό κόστος παραμένει φραγμένο και εκ των προτέρων γνωστό, καταλαμβάνοντας ελάχιστο μέρος της διαθέσιμης περιόδου.

Η προθεσμία των 4 ms δεν προκύπτει από απαίτηση του νόμου ελέγχου αλλά από την ασύρματη ζεύξη (Ενότητα 3.3.2). Ο ίδιος ο φραγμός, με σταθερά πέδησης 0,234 s, θα ήταν επαρκής σε πολύ χαμηλότερο ρυθμό. Επομένως, ο περιορισμός του υπολογιστικού χρόνου επιβάλλεται από το πρωτόκολλο επικοινωνίας και όχι από τη δυναμική του αεροσκάφους.

4.6.3 Διαχείριση μη επιλύσιμων προβλημάτων και διαβαθμισμένη υποβάθμιση

Όταν όλες οι μονάδες ανίχνευσης βλέπουν προς τα εμπρός, κάθε περιορισμός φέρει ομόσημο συντελεστή ως προς την εμπρόσθια ταχύτητα (v_{fwd}), με συνέπεια μια απλή οπισθοχώρηση να ικανοποιεί ταυτόχρονα το σύνολο των φραγμών και το εφικτό σύνολο να μην αδειάζει ποτέ. Οι πλευρικοί αισθητήρες προσθέτουν νέες γεωμετρικές ανάγκες: ένας τοίχος στα αριστερά απαιτεί πλάγια κίνηση προς τα δεξιά, ένας τοίχος στα δεξιά απαιτεί το αντίθετο, και σε διάδρομο πλάτους μικρότερου από το διπλάσιο του περιθωρίου ασφαλείας ($2 \cdot D_{safe}$) οι δύο απαιτήσεις είναι ταυτόχρονα αληθείς και μαθηματικά ασυμβίβαστες.

Για την αντιμετώπιση τέτοιων περιπτώσεων το σύστημα εφαρμόζει διαβαθμισμένη υποβάθμιση του κριτηρίου επιλογής $\|v - v_{stick}\|$. Κάθε υποψήφιος (v) αξιολογείται πρωτίστως ως προς την παραβίαση που επιφέρει και δευτερευόντως ως προς την απόστασή του από την ονομαστική εντολή του χειριστή.

Όταν υπάρχει έγκυρη λύση, όλοι οι εφικτοί υποψήφιοι έχουν μηδενική παραβίαση και ανταγωνίζονται αποκλειστικά στην απόσταση, αναπαράγοντας ακριβώς το κανονικό πρόβλημα ελάχιστης παρέμβασης της σχέσης (4.35).

Όταν αντιθέτως καμία εντολή δεν μπορεί να ικανοποιήσει όλους τους φραγμούς ταυτόχρονα, ο επιλύτης επιστρέφει τη λιγότερο παραβιάζουσα. Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει το γεγονός ότι το σημείο ακινησίας (0, 0) περιλαμβάνεται πάντοτε στη λίστα των υποψηφίων και ικανοποιεί εκ κατασκευής τα όρια λειτουργίας· συνεπώς, σε εξαιρετικά στενό διάδρομο, η απάντηση του αλγορίθμου τείνει φυσικά προς την ακινητοποίηση, που είναι η ειλικρινής απόκριση εκεί.

Επειδή η λύση αυτή προέρχεται από πρόβλημα με κενό εφικτό σύνολο και δεν φέρει τις εγγυήσεις της κανονικής λειτουργίας, η εντολή στο μη επιλύσιμο μονοπάτι περιορίζεται σε χαμηλό κατώφλι:

$$|v_{fwd}| \leq V_{fallback}, |v_{lat}| \leq V_{fallback}, V_{fallback} = 0,40 \text{ m/s} \quad (4.37)$$

Το όριο ταχύτητας $V_{fallback} = 0,40 \text{ m/s}$ δεν εξαλείφει τις μικρο-ταλαντώσεις του αλγορίθμου κατά τον εγκλωβισμό του αεροσκάφους καθώς ο επιλύτης εξακολουθεί να μεταβάλλει ελαφρώς την κατεύθυνση διαφυγής από κύκλο εκτέλεσης σε κύκλο εκτέλεσης. Η αναγκαιότητα αυτού του ορίου προέκυψε από πειραματική πτήση, όπου όταν το αεροσκάφος οδηγήθηκε σε αδιέξοδο, παρατηρήθηκε ότι, παρότι ο χειριστής διατηρούσε τους μοχλούς στο κέντρο, το σύστημα έστειλε στιγμιαία εντολή μέγιστης ταχύτητας.

Αρχικά, διατυπώθηκε η υπόθεση ότι αυτή η ασταθής συμπεριφορά οφειλόταν στον επιλύτη, ο οποίος ενδεχομένως ταλαντευόταν μεταξύ δύο σχεδόν ισοδύναμων λύσεων για αυτό και αντικαταστάθηκε από έναν εναλλακτικό αλγόριθμο (μέθοδος απότομης καθόδου). Το πρόβλημα ωστόσο παρέμεινε, αποδεικνύοντας ότι η πραγματική αιτία ήταν ο θόρυβος των μετρήσεων από τους αισθητήρες, λόγω πολλών συνεχόμενων κοντινών αποστάσεων.

4.6.4 Ο ρόλος και η θέση του κορεσμού στον υπολογισμό

Απομένει να τεκμηριωθεί ο λόγος για τον οποίο τα όρια λειτουργίας ($\pm V_{limit}$) εισάγονται ως περιορισμοί εντός του προβλήματος βελτιστοποίησης και όχι ως εκ των υστέρων αποκοπή της τελικής λύσης.

Όταν η εντολή του χειριστή παραβιάζει κάποιον περιορισμό, η βέλτιστη λύση του τετραγωνικού προβλήματος εντοπίζεται ακριβώς επί του συνόρου της εφικτής περιοχής. Μια εκ των υστέρων αποκοπή, δηλαδή περιορισμός κάθε συνιστώσας της λύσης χωριστά, μετά την επίλυση, θα μετακινούσε αναγκαστικά το σημείο αυτό. Και επειδή η αποκοπή κατά συνιστώσα μεταβάλλει όχι μόνο το μέτρο αλλά και τη διεύθυνση του διανύσματος ταχύτητας, η μετακίνηση δεν γίνεται κατά μήκος του συνόρου: το τελικό σημείο μπορεί να βρεθεί εκτός της εφικτής περιοχής, παραβιάζοντας περιορισμό εμποδίου τον οποίο η λύση μόλις ικανοποιούσε. Η εγγύηση ασφαλείας που παρήγαγε η επίλυση θα ακυρωνόταν επομένως από το τελευταίο βήμα του ίδιου του υπολογισμού.

Αντιθέτως, με την ενσωμάτωση των ορίων ταχύτητας ως περιορισμών εντός του ίδιου προβλήματος, οι περιορισμοί ασφαλείας των εμποδίων και τα λειτουργικά όρια του συστήματος συνυπολογίζονται ταυτόχρονα και δεν μπορούν να αντιφάσκουν μεταξύ τους. Επιπλέον, επειδή το εύρος των επιτρεπτών ταχυτήτων ($\pm V_{limit}$) είναι συμμετρικό και κεντραρισμένο στο μηδέν, περιλαμβάνει πάντοτε και αρνητικές τιμές. Τα όρια αυτά δεν αφαιρούν επομένως ποτέ τη δυνατότητα οπισθοχώρησης και από μόνα τους, δεν μπορούν να καταστήσουν το πρόβλημα μη επιλύσιμο.

Υπάρχει μία και μοναδική εξαίρεση, και αφορά το μη επιλύσιμο μονοπάτι. Όταν κανένα σημείο δεν ικανοποιεί όλους τους φραγμούς, ο επιλύτης επιστρέφει τον υποψήφιο με τη μικρότερη μέγιστη

παραβίαση και ο υποψήφιος αυτός μπορεί να βρίσκεται εκτός των ορίων ταχύτητας. Ο λόγος είναι ότι το κριτήριο επιλογής της Ενότητας 4.6.3 δεν ξεχωρίζει τα δύο είδη περιορισμού: μια μικρή υπέρβαση του ορίου ταχύτητας βαθμολογείται ευνοϊκότερα από μια μεγάλη παραβίαση περιορισμού εμποδίου, και σωστά, αφού σε αδιέξοδο προτεραιότητα έχει το να μη συγκρουστεί το αεροσκάφος. Το αποτέλεσμα όμως είναι εντολή που ενδέχεται να ξεπερνά το επιτρεπτό όριο ταχύτητας.

Στην κατάσταση αυτή το προηγούμενο επιχείρημα παύει να ισχύει. Εκείνο απαγόρευε την αποκοπή επειδή θα κατέστρεφε μια υπάρχουσα εγγύηση, ενώ εδώ δεν υπάρχει εξ αρχής εγγύηση, αφού το πρόβλημα δεν είχε λύση. Επιβάλλεται συνεπώς τελικός κορεσμός στα $\pm V_{\text{limit}}$, ώστε η εντολή να παραμείνει εντός του εύρους που επιτρέπεται να προωθηθεί προς τον ελεγκτή πτήσης.

Συνοψίζοντας, ο τελικός κορεσμός δεν έρχεται σε αντίφαση με το επιχείρημα της ενότητας. Όσο το πρόβλημα είναι επιλύσιμο, παραμένει εκ κατασκευής ανενεργός, διότι η λύση βρίσκεται ήδη εντός των ορίων που συμμετείχαν στην επίλυση. Ενεργοποιείται αποκλειστικά όταν το σύστημα έχει ήδη περάσει σε κατάσταση υποβάθμισης, και εκεί αποτελεί την τελευταία γραμμή προστασίας.

Κεφάλαιο 5ο: Αξιολόγηση του συστήματος

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική αξιολόγηση του συστήματος επί πραγματικών δεδομένων πτήσης. Προηγείται η περιγραφή της πειραματικής διάταξης, καθώς και της διαδικασίας συλλογής και δειγματοληψίας των δεδομένων.

Αναλύονται ειδικότερα ο τρόπος ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του συστήματος εντός της ίδιας πτήσης, τα μεγέθη που καταγράφονται σε κάθε δείγμα και ο ρυθμός δειγματοληψίας τους, καθώς και τα κριτήρια βάσει των οποίων μια καταγραφή κρίνεται έγκυρη για ανάλυση. Ακολουθούν η αξιολόγηση της ακρίβειας του φίλτρου Kalman, η σύγκριση με τη μέθοδο των τεχνητών δυναμικών πεδίων, και η εξέταση της συμπεριφοράς του συστήματος σε τέσσερις πειραματικές διατάξεις.

5.1.1 Κριτήρια εγκυρότητας καταγραφών

Το σύστημα αποφυγής ενεργοποιείται από διακόπτη που έχει οριστεί ως ενεργοποιητής στο τηλεχειριστήριο του χρήστη. Με τον διακόπτη απενεργοποιημένο τα δεδομένα χειρισμού προωθούνται προς τον ελεγκτή πτήσης αναλλοίωτα.

Για την πλήρη ενεργοποίηση όμως του συστήματος αποφυγής, ο μικροελεγκτής αναμένει δεδομένα από τουλάχιστον έναν αισθητήρα, για τον λόγο αυτό ενσωματώθηκαν δύο σημαίες « ενεργοποιημένο» και «σε ισχύ» οι οποίες πρέπει να είναι αληθείς.

5.1.2 Καταγραφόμενα μεγέθη

Η αξιολόγηση του φίλτρου Kalman και της συνάρτησης φραγμού, στηρίζεται αποκλειστικά στα δεδομένα που καταγράφει ο ίδιος ο μικροελεγκτής, χωρίς εξωτερικό σύστημα μέτρησης. Τα μεγέθη αυτά επαρκούν για την τεκμηρίωση και των δύο, καθώς περιλαμβάνουν τους δύο πίνακες εντολών (πίνακας εντολών πριν τον αλγόριθμο και πίνακας με τροποποιημένες εντολές μετά τον αλγόριθμο), τις ωμές μετρήσεις των αισθητήρων και τις εκτιμήσεις απόστασης και ταχύτητας προσέγγισης που παράγει το φίλτρο για κάθε διεύθυνση.

Ο συνδυασμός τους επιτρέπει τον έλεγχο κάθε σταδίου χωριστά. Οι ωμές μετρήσεις μαζί με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις τεκμηριώνουν την ακρίβεια του φίλτρου, ενώ οι εκτιμήσεις μαζί με τους δύο πίνακες εντολών τεκμηριώνουν τη συμπεριφορά του φραγμού.

Ο βρόχος ελέγχου εκτελείται κάθε 4 ms, ενώ η τηλεμετρία δειγματοληπτεί κάθε 50 ms. Ένα επεισόδιο μη επιλυσιμότητας μπορεί επομένως να εμφανιστεί και να εκλείψει ολόκληρο ανάμεσα σε δύο διαδοχικά δείγματα. Για να μη χάνονται τέτοια συμβάντα, η σχετική ένδειξη δεν διαβάζεται στιγμιαία αλλά διατηρείται από τη στιγμή που θα εμφανιστεί έως την επόμενη αποστολή τηλεμετρίας, όπου και μηδενίζεται.

5.1.3 Οι πειραματικές διατάξεις

Για την αξιολόγηση του συστήματος, σχεδιάστηκαν τέσσερα πειραματικά σενάρια. Κάθε διάταξη επιλέχθηκε με γνώμονα να απομονώνει και να εξετάζει ανεξάρτητα συγκεκριμένες ιδιότητες της συνάρτησης φραγμού:

Πίνακας 5.1: Πειραματική διάταξη

Διάταξη	Αντικείμενο αξιολόγησης
Προσέγγιση σε σταθερό τοίχο	Η λειτουργία του φραγμού κατά την προσέγγιση του αεροσκάφους σε ακίνητο εμπόδιο
Κινούμενο εμπόδιο, ακίνητο αεροσκάφος	Η ικανότητα αυτόνομης υποχώρησης του συστήματος, με τη δεδομένη ταχύτητα αναφοράς του χειριστή να παραμένει μηδενική.
Αμοιβαία προσέγγιση	Η συμπεριφορά του ελέγχου όταν η μετρούμενη ταχύτητα προκύπτει από την ταυτόχρονη κίνηση και των δύο σωματίων.
Διέλευση από στενό πέρασμα	Η διαχείριση αντικρουόμενων περιορισμών σε καταστάσεις όπου το πρόβλημα καθίσταται μη επιλύσιμο.

5.2 Αξιολόγηση του φίλτρου Kalman

Η αξιολόγηση του εκτιμητή υπόκειται σε έναν πρακτικό περιορισμό, καθώς απουσιάζει μια ανεξάρτητη μέτρηση αναφοράς. Ελλείψει εξωτερικού συστήματος προσδιορισμού θέσης, δεν κατέστη δυνατή η απευθείας σύγκριση της εκτιμώμενης απόστασης με την πραγματική. Ως εκ τούτου, η μοναδική εφικτή αξιολόγηση αφορά την εσωτερική συνέπεια του φίλτρου. Ο έλεγχος αυτός εστιάζει στην ικανότητα του φίλτρου να προβλέπει με ακρίβεια την επόμενη μέτρηση και στον βαθμό που η αβεβαιότητα την οποία το ίδιο υπολογίζει ταυτίζεται με το πραγματικό σφάλμα της εκτίμησης. Παρότι με αυτόν τον τρόπο δεν τεκμηριώνεται η απόλυτη ακρίβεια του εκτιμητή, κρίνεται επαρκής για να απαντήσει στο κρίσιμο ζητούμενο της παρούσας εφαρμογής: εάν η απόσταση που παραδίδεται στις συναρτήσεις φραγμού παρουσιάζει συστηματική τάση υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης σε σχέση με την πραγματική.

5.2.1 Δεδομένα και κριτήρια αξιολόγησης

Η ανάλυση στηρίζεται σε μία πτήση με στατικά εμπόδια και διέλευση από στενό πέρασμα, δηλαδή σε συνθήκες όπου οι ελεύθερες αποστάσεις γίνονται μικρές και οι μεταβολές τους απότομες. Από την καταγραφή εξαιρέθηκε η αρχική φάση κατά την οποία το αεροσκάφος παρέμενε ακίνητο στο έδαφος, καθώς τα δείγματα αυτής εμφανίζουν αμελητέο σφάλμα και θα βελτίωναν τεχνητά όλους τους δείκτες. Το παράθυρο ανάλυσης εκτείνεται επομένως από το τριακοστό δευτερόλεπτο έως το τέλος της εγγραφής και περιλαμβάνει 807 δείγματα για τον εμπρόσθιο αισθητήρα και 806 για καθέναν από τους πλευρικούς, συνολικής διάρκειας 80 s. Ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 10,1 Hz, δηλαδή αντιστοιχεί στο βήμα $\Delta t = 0,10$ s του μοντέλου.

Ορίζεται ως σφάλμα πρόβλεψης η διαφορά της μέτρησης από την πρόβλεψη που είχε σχηματίσει το φίλτρο πριν την παραλάβει:

$$y_k = z_k - \hat{d}_k^-, \quad \hat{d}_k^- = \hat{d}_{k-1}^- - \Delta t \hat{v}_{k-1}^- \quad (5.1)$$

Θετικό σφάλμα πρόβλεψης σημαίνει ότι ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται το εμπόδιο σε μεγαλύτερη απόσταση από αυτήν της πρόβλεψης ενώ αρνητικό σφάλμα συμβολίζει το αντίστροφο, ότι το εμπόδιο εμφανίστηκε πιο κοντά από ό,τι αναμενόταν.

Πάνω στις σχέσεις των σφαλμάτων πρόβλεψης, υπολογίζονται τέσσερις δείκτες.

1. Το μέγεθος του σφάλματος πρόβλεψης ενός βήματος, $|y_k|$.
2. Το κανονικοποιημένο τετραγωνικό σφάλμα (NIS), το οποίο συγκρίνει το σφάλμα με την αβεβαιότητα που το ίδιο το φίλτρο δήλωνε τη δεδομένη χρονική στιγμή [5]:

$$\varepsilon_k = \frac{y_k^2}{S_k}, \quad S_k = P_{00,k}^- + R_k \quad (5.2)$$

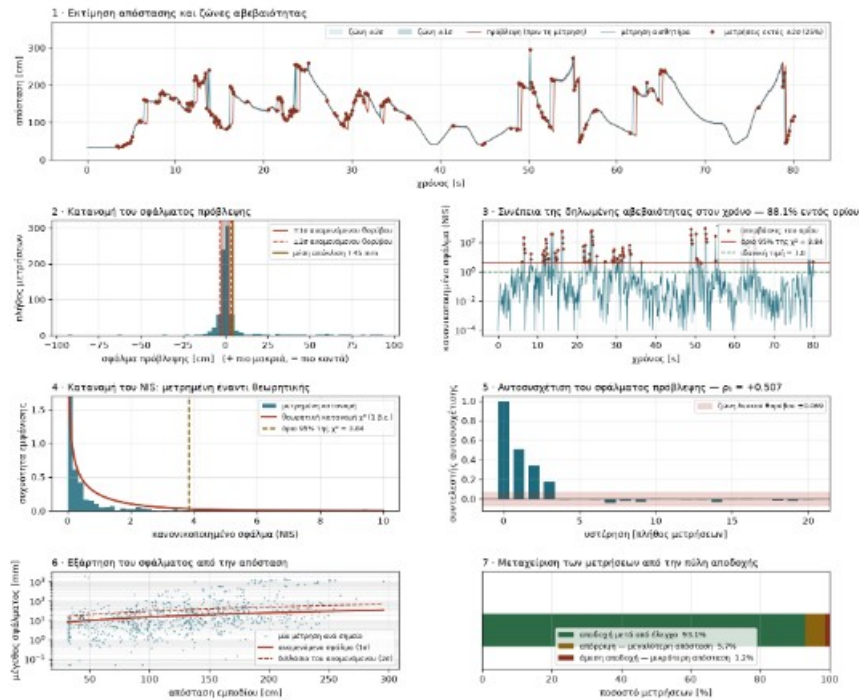
3. Η μέση τιμή του σφάλματος, η οποία ανιχνεύει τυχόν συστηματική απόκλιση (bias) προς μία κατεύθυνση:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k \quad (5.3)$$

4. Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης πρώτης υστέρησης, ο οποίος ελέγχει εάν τα σφάλματα

συμπεριφέρονται ως λευκός θόρυβος [5]:

$$\rho_1 = \frac{\sum_k y_k y_{k+1}}{\sum_k y_k^2} \quad (5.4)$$



Σχήμα 5.1: Διαγνωστικά διαγράμματα φίλτρου Kalman.

5.2.2 Ακρίβεια πρόβλεψης

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται τα διαγνωστικά γραφήματα του φίλτρου Kalman στα δεδομένα του μπροστινού αισθητήρα σε μια πτήση που περιλαμβάνει ακίνητα εμπόδια και στενά περάσματα.

Το πρώτο διάγραμμα του Σχήματος 5.1 παραθέτει σε κοινό άξονα χρόνου δύο καμπύλες: την ακατέργαστη μέτρηση του αισθητήρα και την πρόβλεψη που είχε σχηματίσει το φίλτρο για τη μέτρηση αυτή πριν την παραλάβει. Γύρω από την πρόβλεψη σχεδιάζονται δύο σκιασμένες ζώνες, που αντιστοιχούν σε μία και σε δύο τυπικές αποκλίσεις του δηλωμένου θορύβου, ώστε να φαίνεται οπτικά αν κάθε μέτρηση έπεσε εκεί που το φίλτρο την περίμενε. Με έντονη σήμανση αποδίδονται όσες μετρήσεις βρέθηκαν εκτός της ζώνης των δύο τυπικών αποκλίσεων, οι οποίες ανέρχονται στο 25% του συνόλου.

Η ανάγνωση του διαγράμματος δίνει δύο πληροφορίες. Πρώτον, οι δύο καμπύλες είναι πρακτικά αδιάκριτες σε ολόκληρη τη διάρκεια της πτήσης, δηλαδή η παρακολούθηση είναι ακριβής. Δεύτερον, το σήμα του αισθητήρα δεν μεταβάλλεται ομαλά αλλά εμφανίζει βηματικές μεταβολές που ξεπερνούν το 1 m, χαρακτηριστικά γύρω στα 24, στα 50 και στα 62 s, όπου η απόσταση μεταπηδά από το 1 m σε πάνω από 2 m μέσα σε ένα μόνο βήμα. Οι μεταβολές αυτές συμβαίνουν όταν το οπτικό πεδίο του αισθητήρα περνά από τη μία επιφάνεια στην άλλη, στην ακμή ενός εμποδίου, στο πλαίσιο της πόρτας, ή όταν πάψει να βλέπει τον κοντινό τοίχο και δει το βάθος του χώρου. Ένα μοντέλο σταθερής ταχύτητας δεν διαθέτει κανέναν μηχανισμό για να προβλέψει μια τέτοια ασυνέχεια, διότι αυτή δεν αντιστοιχεί σε κίνηση του εμποδίου αλλά σε αλλαγή του εμποδίου. Το γεγονός ότι οι σημασμένες μετρήσεις συγκεντρώνονται πάνω σε αυτά τα άλματα και στις αμέσως επόμενες μετρήσεις δείχνει ότι τα μεγάλα σφάλματα δεν είναι διάχυτος θόρυβος του εκτιμητή αλλά καταγραφή των μεταβολών της σκηνής.

Το δεύτερο διάγραμμα μεταφέρει την ίδια πληροφορία σε στατιστική μορφή. Πρόκειται για το ιστόγραμμα του σφάλματος πρόβλεψης, με τον οριζόντιο άξονα να δίνει το σφάλμα σε εκατοστά και τον κατακόρυφο το πλήθος των μετρήσεων. Θετικές τιμές αντιστοιχούν σε εμπόδιο που βρέθηκε πιο

μακριά από την πρόβλεψη και αρνητικές σε εμπόδιο που βρέθηκε πιο κοντά. Πάνω στο ιστόγραμμα σημειώνονται με κατακόρυφες γραμμές τα όρια μίας και δύο τυπικών αποκλίσεων του αναμενόμενου θορύβου, καθώς και η μέση τιμή του σφάλματος.

Η κατανομή είναι στενή και έντονα οξυκόρυφη, με διάμεσο σφάλμα 13,1 mm έναντι δηλωμένου θορύβου 18 mm στην αντίστοιχη περιοχή αποστάσεων, ενώ το 90 % των προβλέψεων μένει κάτω από 12,6 cm. Ταυτόχρονα όμως εκτείνεται σε ουρές που φτάνουν τα ± 100 cm: στο ανώτερο 1 % των δειγμάτων το σφάλμα ξεπερνά το 1,24 m, με μέγιστη τιμή 2,05 m. Η μέση τιμή, 82,7 mm, είναι εξαπλάσια της διαμέσου, γεγονός που από μόνο του χαρακτηρίζει κατανομή με βαριές ουρές. Ως προς τα ποσοστά κάλυψης, εντός της ζώνης μίας τυπικής απόκλισης πέφτει το 55,1 % των προβλέψεων και εντός των δύο τυπικών αποκλίσεων το 75,5 %, έναντι 68 % και 95 % που θα αντιστοιχούσαν σε γκαουσιανή κατανομή. Η σύγκριση αυτή χρειάζεται προσοχή στην ερμηνεία της, καθώς οι ζώνες αναφοράς αφορούν μόνο τον θόρυβο του αισθητήρα, ενώ το σφάλμα πρόβλεψης περιέχει επιπλέον και την αβεβαιότητα του ίδιου του μοντέλου, η οποία με το αεροσκάφος σε κίνηση δεν είναι αμελητέα. Είναι επομένως αναμενόμενο η κάλυψη να υπολείπεται των ονομαστικών τιμών, και η απόκλιση δεν συνιστά από μόνη της ένδειξη κακής βαθμονόμησης. Το κατάλληλο κριτήριο για το ερώτημα αυτό είναι ο δείκτης της επόμενης ενότητας, ο οποίος κανονικοποιεί με τη συνολική και όχι μόνο με τη μετρητική αβεβαιότητα.

Το έκτο διάγραμμα εξετάζει αν το σφάλμα εξαρτάται από την απόσταση του εμποδίου. Κάθε μέτρηση της πτήσης αποδίδεται ως ένα σημείο, με οριζόντια συντεταγμένη την απόσταση και κατακόρυφη το μέγεθος του σφάλματος σε λογαριθμική κλίμακα. Οι δύο συνεχείς καμπύλες δίνουν το σφάλμα που θα ανέμενε κανείς από το μοντέλο θορύβου, σε μία και σε δύο τυπικές αποκλίσεις. Το νέφος των σημείων ακολουθεί την ανοδική τάση των καμπυλών, επιβεβαιώνοντας ότι η γραμμική εξάρτηση του θορύβου από την απόσταση αποδίδει σωστά τη συμπεριφορά του αισθητήρα. Η κατακόρυφη συγκέντρωση σημείων στα 32 cm αντιστοιχεί στη φάση ακινησίας. Τα λίγα σημεία που ξεφεύγουν κατά δύο τάξεις μεγέθους εμφανίζονται διάσπαρτα σε ολόκληρο το εύρος αποστάσεων, δηλαδή δεν συνδέονται με κάποια συγκεκριμένη εμβέλεια αλλά με τη γεωμετρία της σκηνής, όπως ήδη προέκυψε από το πρώτο διάγραμμα.

5.2.3 Αξιολόγηση συνέπειας του φίλτρου (NIS)

Το μέγεθος του σφάλματος από μόνο του δεν απαντά στο αν το φίλτρο αναγνωρίζει την αβεβαιότητά του. Το ερώτημα αυτό εξετάζει το κανονικοποιημένο τετραγωνικό σφάλμα της σχέσης (5.2), το οποίο διαιρεί το τετράγωνο του σφάλματος με τη συνολική αβεβαιότητα που το ίδιο το φίλτρο δήλωνε τη δεδομένη στιγμή, αθροίζοντας δηλαδή τη μετρητική και τη μοντελική συνιστώσα. Επειδή η μέτρηση είναι βαθμωτή, η ποσότητα ε ακολουθεί κατανομή χ^2 με έναν βαθμό ελευθερίας εφόσον το μοντέλο αβεβαιότητας είναι σωστό. Η αναμενόμενη μέση τιμή είναι τότε 1,00, η διάμεσος 0,45, και το 95 % των τιμών οφείλει να βρίσκεται κάτω από το κατώφλι 3,84 [5].

Το τρίτο διάγραμμα παρουσιάζει την εξέλιξη του δείκτη αυτού στον χρόνο. Ο κατακόρυφος άξονας είναι λογαριθμικός και καλύπτει έξι τάξεις μεγέθους, ώστε να είναι ορατή τόσο η συνήθης λειτουργία όσο και οι ακραίες τιμές. Δύο οριζόντιες γραμμές σηματοδοτούν την ιδανική τιμή της μονάδας και το κατώφλι 3,84, ενώ σημειώνονται ξεχωριστά οι μετρήσεις που το υπερέβησαν.

Η καμπύλη κινείται στο μεγαλύτερο μέρος της κάτω από την ιδανική τιμή, με τυπικές τιμές μεταξύ 10^{-2} και 10^{-1} , ενώ οι υπερβάσεις του κατωφλίου εμφανίζονται ως απομονωμένες αιχμές που φτάνουν έως και δύο τάξεις μεγέθους πάνω από αυτό. Οι αιχμές συγκεντρώνονται χρονικά στα ίδια σημεία με τις ασυνέχειες του πρώτου διαγράμματος, ενώ υπάρχουν εκτεταμένα διαστήματα, χαρακτηριστικά μεταξύ

36 και 60 s, όπου δεν σημειώνεται καμία. Συνολικά το 88,1 % των δειγμάτων παραμένει εντός ορίου, έναντι στόχου 95 %.

Το τέταρτο διάγραμμα εξηγεί γιατί η απόκλιση αυτή δεν σημαίνει υποεκτίμηση της αβεβαιότητας του φίλτρου. Παραθέτει το ιστόγραμμα των τιμών που πράγματι μετρήθηκαν στην πτήση μαζί με τη θεωρητική καμπύλη πυκνότητας της κατανομής χ^2 , ώστε να είναι άμεσα ορατή η μεταξύ τους απόκλιση, ενώ μια κατακόρυφη γραμμή σημειώνει το κατώφλι 3,84. Εάν το φίλτρο δήλωνε μικρότερη αβεβαιότητα από την πραγματική, το μετρημένο ιστόγραμμα θα ήταν μετατοπισμένο δεξιά της θεωρητικής καμπύλης. Παρατηρείται όμως το αντίθετο: η μετρημένη κατανομή είναι πιο συγκεντρωμένη κοντά στο μηδέν, με διάμεσο 0,08 έναντι ιδανικής 0,45.

Στη συντριπτική πλειοψηφία των δειγμάτων επομένως το φίλτρο υπερεκτιμά την αβεβαιότητά του και είναι ακριβέστερο απ' όσο δηλώνει. Ταυτόχρονα η μέση τιμή ανέρχεται σε 16,07 έναντι ιδανικής 1,00, και τη διαμορφώνει αποκλειστικά το 11,9% των δειγμάτων που βρίσκεται εκτός ορίου. Οι δύο δείκτες κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπάρχει μία ενιαία, λανθασμένα βαθμονομημένη κατανομή αλλά δύο διακριτοί πληθυσμοί δειγμάτων: η ομαλή ροή, όπου το μοντέλο ισχύει και το φίλτρο είναι συντηρητικό, και οι ασυνέχειες, όπου το μοντέλο δεν ισχύει καθόλου. Αυστηρή βαθμονόμηση θα απαιτούσε μοντέλο μέτρησης με βαριές ουρές αντί για γκαουσιανό· η φορά πάντως της απόκλισης στην ομαλή ροή είναι η ασφαλής.

5.2.4 Συστηματική απόκλιση και δομή των σφαλμάτων

Επανερχόμενοι στο δεύτερο διάγραμμα, παρατηρείται ότι το ιστόγραμμα δεν είναι κεντραρισμένο στο μηδέν αλλά μετατοπισμένο κατά +44,9 mm, όπως σημειώνει και η αντίστοιχη κατακόρυφη γραμμή. Με διάστημα εμπιστοσύνης 95% ίσο με $\pm 17,2$ mm, η μετατόπιση είναι στατιστικά σημαντική. Με τη σύμβαση προσήμου της σχέσης (5.1) αυτό σημαίνει ότι το φίλτρο τοποθετεί συστηματικά το εμπόδιο πιο κοντά απ' ό,τι μετρίεται.

Η αιτία δεν είναι τυχαία αλλά σχεδιασμένη, και αποτυπώνεται στο έβδομο διάγραμμα. Πρόκειται για μία σωρευτική οριζόντια ράβδο που αναλύει το σύνολο των μετρήσεων της πτήσης σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη μεταχείρισή τους από την πύλη της Ενότητας 4.4.2, η οποία αποκλίνει σκοπίμως από τη συμμετρική διατύπωση της βιβλιογραφίας [5]: όσες έγιναν δεκτές κανονικά, όσες απορρίφθηκαν επειδή δήλωναν μεγαλύτερη απόσταση, και όσες έγιναν δεκτές χωρίς έλεγχο επειδή δήλωναν μικρότερη. Τα ποσοστά είναι αντίστοιχα 93,1%, 5,7% και 1,2%.

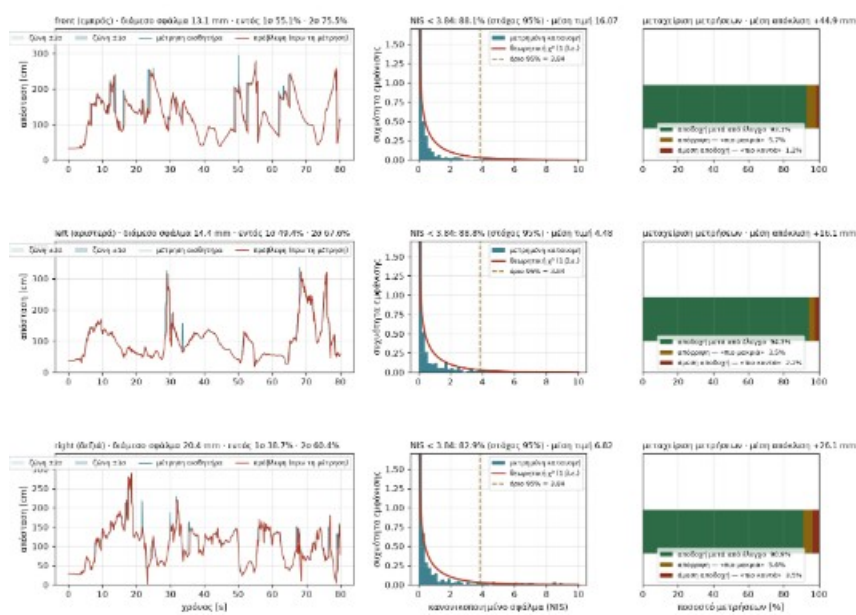
Η κατανομή αυτή δείχνει ότι η πύλη ενεργοποιείται σπάνια, αλλά όταν ενεργοποιείται το κάνει πάντοτε προς μία κατεύθυνση: η εκτίμηση συγκρατείται στην απομάκρυνση και ακολουθεί ελεύθερα στην προσέγγιση. Ακριβώς αυτή η ασυμμετρία παράγει τη θετική μέση τιμή του σφάλματος. Σε απόλυτο μέγεθος τα 44,9 mm αντιστοιχούν στο 15% της απόστασης ασφαλείας D_{safe} , δηλαδή σε πρόσθετο περιθώριο με κόστος την ενεργοποίηση της αποφυγής λίγα εκατοστά νωρίτερα από όσο επιβάλλει η γεωμετρία.

Το τελευταίο στάδιο της αξιολόγησης εξετάζει κατά πόσο η ακολουθία των σφαλμάτων πρόβλεψης προσεγγίζει τα χαρακτηριστικά λευκού θορύβου. Ένας βέλτιστος εκτιμητής παράγει σφάλματα πρόβλεψης ασυσχέτιστα μεταξύ τους. Αν παραμένει συσχέτιση, τότε υπάρχει στα δεδομένα πληροφορία την οποία το μοντέλο δεν εκμεταλλεύεται. Το πέμπτο διάγραμμα απαντά σε αυτό απεικονίζοντας τον συντελεστή αυτοσυσχέτισης της σχέσης (5.4) για υστερήσεις από μηδέν έως είκοσι μετρήσεις. Κάθε ράβδος δείχνει πόσο μοιάζει το σφάλμα μιας μέτρησης με το σφάλμα της μέτρησης

που απέχει τόσα βήματα, ενώ η σκιασμένη ζώνη γύρω από το μηδέν οριοθετεί τις τιμές που θα προέκυπταν από καθαρά τυχαία σφάλματα για το συγκεκριμένο πλήθος δειγμάτων.

Η ράβδος της πρώτης υστέρησης φτάνει το +0,507, επταπλάσιο του ορίου τυχαιότητας $\pm 0,069$, και οι επόμενες φθίνουν σε 0,34 και 0,18 μπαίνοντας εντός της ζώνης από την τέταρτη υστέρηση, δηλαδή μετά από περίπου 0,4 s. Ο έλεγχος επομένως αποτυγχάνει καθαρά. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης αυτός παραμένει πρακτικά αμετάβλητος όταν η ανάλυση περιοριστεί στη φάση πτήσης, σε αντίθεση με όλους τους υπόλοιπους, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι δεν οφείλεται σε συνθήκες ηρεμίας αλλά στο ίδιο το μοντέλο κίνησης. Η αιτία είναι η υπόθεση σταθερής ταχύτητας σε ένα αεροσκάφος που επιταχύνει διαρκώς, και η πρακτική συνέπεια είναι ότι κατά τις επιταχύνσεις η εκτίμηση μένει συστηματικά πίσω για χρονικό διάστημα της τάξης των τεσσάρων δεκάτων του δευτερολέπτου.

5.2.5 Συνολική αξιολόγηση και σύγκριση αισθητήρων



Σχήμα 5.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων και των τριών αισθητήρων

Το σχήμα 5.2 παρουσιάζει τρία διαγράμματα αξιολόγησης για κάθε έναν από τους τρεις αισθητήρες. Η πρώτη στήλη δίνει την παρακολούθηση στον χρόνο με τις ζώνες αβεβαιότητας, η δεύτερη τη σύγκριση της μετρημένης κατανομής με τη θεωρητική, και η τρίτη την ανάλυση των μετρήσεων ανάλογα με τη μεταχείρισή τους από την πύλη.

Οι τρεις γραμμές του Σχήματος 5.2 είναι ποιοτικά όμοιες, με διαφορές που εξηγούνται από τη σκηνή που κατέγραψε ο καθένας. Ο δεξιός αισθητήρας υστερεί σε κάθε δείκτη, με 82,9% επιτυχία στον έλεγχο συνέπειας και ποσοστό μετρήσεων εκτός της ζώνης δύο τυπικών αποκλίσεων που φτάνει το 40%. Είναι επίσης ο μόνος του οποίου το διάμεσο σφάλμα, 20,4 mm, υπερβαίνει τον δηλωμένο θόρυβο των 16 mm. Είναι όμως και ο αισθητήρας που κατέγραψε τις μικρότερες αποστάσεις της πτήσης, με ελάχιστη τιμή 10 cm έναντι 28 και 32cm των υπολοίπων, καθώς εκείνος πέρασε ξυστά από το πλαίσιο της πόρτας. Στις αποστάσεις αυτές τα πραγματικά άλματα είναι τα μεγαλύτερα ενώ ο δηλωμένος θόρυβος του μοντέλου ο μικρότερος, οπότε ο λόγος των δύο μεγεθύνεται. Χαρακτηριστικά, η διάμεσος του δείκτη συνέπειας για τον δεξιό αισθητήρα είναι 0,23, δηλαδή η πλησιέστερη στην ιδανική τιμή από τους τρεις: το περιθώριο που διαθέτει για να απορροφήσει τις ασυνέχειες είναι το μικρότερο, και γι' αυτό αστοχεί συχνότερα. Η υποβάθμιση είναι επομένως συνέπεια του σεναρίου και όχι του αισθητήρα.

Και οι τρεις αισθητήρες αποκλίνουν προς την ίδια κατεύθυνση, τοποθετώντας το εμπόδιο πιο κοντά απ' ό,τι μετριέται, ενώ ο αριστερός, που έχει το χαμηλότερο ποσοστό απορρίψεων με 3,5%, παρουσιάζει και τη μικρότερη απόκλιση με 16,1 mm. Η σύνδεση της συστηματικής απόκλισης με την ασύμμετρη πύλη επιβεβαιώνεται έτσι και στους τρεις.

Σημειώνεται τέλος ότι όλοι οι παραπάνω δείκτες αφορούν την πρόβλεψη, δηλαδή την κατάσταση πριν ενσωματωθεί η μέτρηση της τρέχουσας στιγμής, ενώ η ποσότητα που παραδίδεται στις συναρτήσεις φραγμού είναι η διορθωμένη εκτίμηση. Η διάκριση αυτή καθορίζει την ερμηνεία των βαριών ουρών. Ένα μεγάλο αρνητικό σφάλμα, δηλαδή εμπόδιο που εμφανίζεται απότομα πολύ πιο κοντά, ανήκει στην κατηγορία που η πύλη δέχεται χωρίς έλεγχο και διορθώνεται εντός του ίδιου κύκλου εκτέλεσης. Ένα μεγάλο θετικό σφάλμα ενδέχεται να απορριφθεί, οπότε η εκτίμηση παραμένει στην παλαιότερη και μικρότερη απόσταση. Και οι δύο ουρές της κατανομής καταλήγουν σε συμπεριφορά υπέρ της ασφάλειας.

Συνολικά, ο εκτιμητής δεν είναι βέλτιστος με τη στατιστική έννοια, καθώς τα σφάλματα πρόβλεψης δεν είναι ασυσχέτιστα και ο έλεγχος συνέπειας παραμένει κάτω από τον στόχο και στους τρεις αισθητήρες. Οι αστοχίες όμως δεν είναι διάχυτες: συγκεντρώνονται σε ποσοστό δειγμάτων που κυμαίνεται από 11 έως 17%, συμπίπτουν χρονικά με πραγματικές αλλαγές της σκηνής, και στο υπόλοιπο της πτήσης το σφάλμα παραμένει στην περιοχή των 2 cm. Η μοναδική συστηματική απόκλιση που εντοπίστηκε έχει το σωστό πρόσημο και μέγεθος που δεν ξεπερνά το 15% της απόστασης ασφαλείας. Για εκτιμητή που τροφοδοτεί φράγμα ασφαλείας ο συμβιβασμός αυτός κρίνεται αποδεκτός, καθώς είναι προτιμότερο ένα φίλτρο που αιφνιδιάζεται περιστασιακά χωρίς να το αποκρύπτει, από ένα φίλτρο στατιστικά άρτιο αλλά αισιόδοξο ως προς την απόσταση.

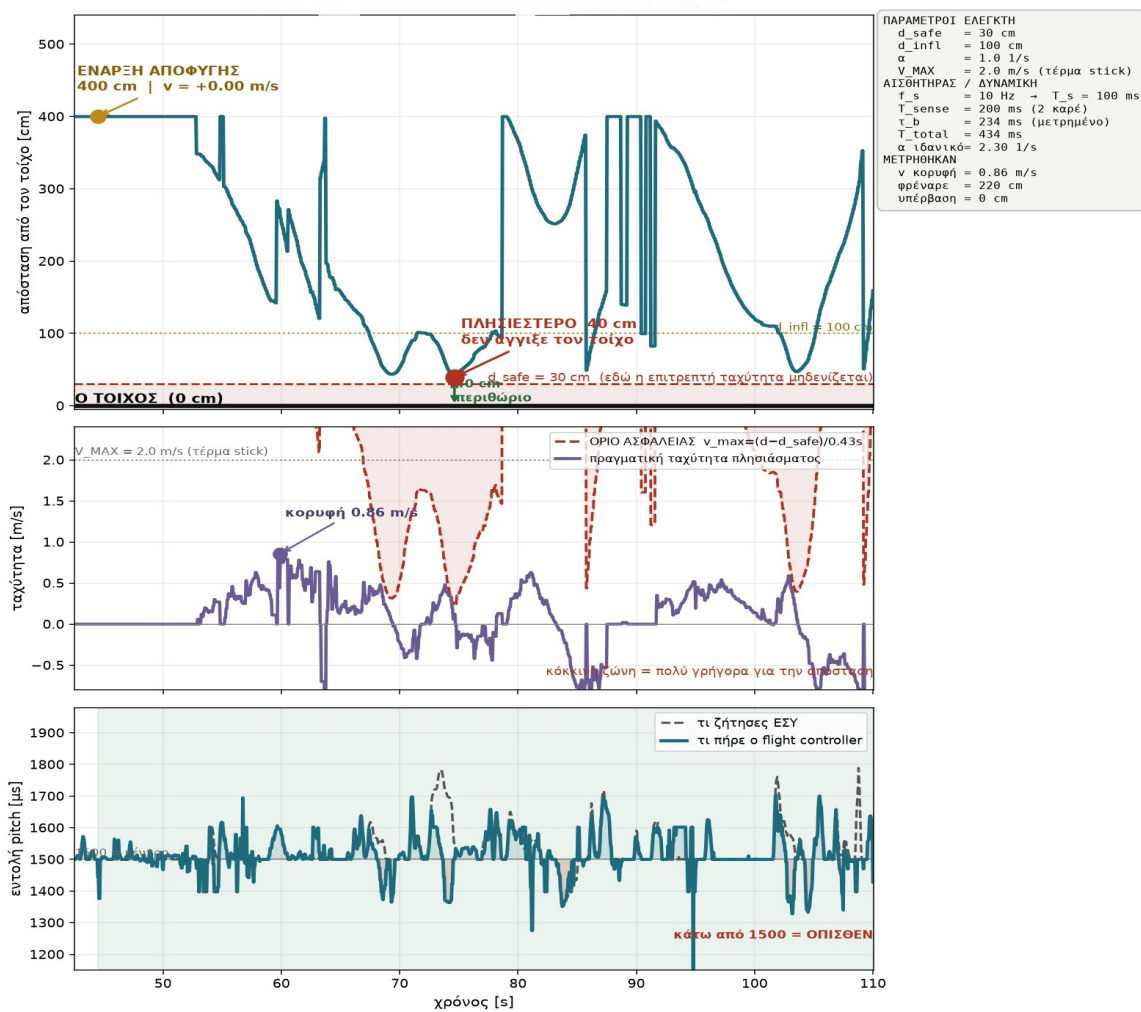
5.3 Αξιολόγηση της αποφυγής (CBF+QP)

Ο αλγόριθμος αποφυγής αξιολογείται με βάση τέσσερα μεγέθη που καταγράφονται σε κάθε κύκλο εκτέλεσης. Την ελάχιστη απόσταση κάθε αισθητήρα, την ταχύτητα προσέγγισης, το επιτρεπόμενο όριο προσέγγισης $b = a(d - D_{safe}) - v_{close}$, και το πλήθος των ενεργών περιορισμών μαζί με την ένδειξη επιλυσιμότητας. Το απόλυτο κριτήριο επιτυχίας είναι η αποτροπή οποιασδήποτε φυσικής επαφής του αεροσκάφους με το εμπόδιο.

Η αξιολόγηση του συστήματος βασίστηκε σε δεδομένα που προέκυψαν από αντιπροσωπευτικούς ελιγμούς του αεροσκάφους. Πρόκειται για τυπικά σενάρια κίνησης τα οποία συναντώνται κατά τις συνήθεις συνθήκες πτήσης ενός αεροσκάφους, όπως προαναφέρθηκαν στον Πίνακα 5.1.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται δύο πτήσεις, με τηλεμετρία στα 20 Hz. Η πρώτη διαρκεί 110 s, περιλαμβάνει και τους τρεις αισθητήρες, και αφορά στατικά εμπόδια με διέλευση από στενό πέρασμα, όπου η αποφυγή ήταν ενεργή στο 78 % της καταγραφής, δηλαδή σε 1708 δείγματα. Η δεύτερη διαρκεί 49 s, έχει έναν ενεργό εμπρόσθιο αισθητήρα, και αφορά κινούμενο εμπόδιο, αρχικά προς ακίνητο αεροσκάφος και στη συνέχεια με ταυτόχρονη κίνηση και των δύο. Η αποφυγή ήταν ενεργή σε 666 δείγματα.

5.3.1 Στατικά εμπόδια



Σχήμα 5.3: Σύνοψη πτήσης με στατικά εμπόδια

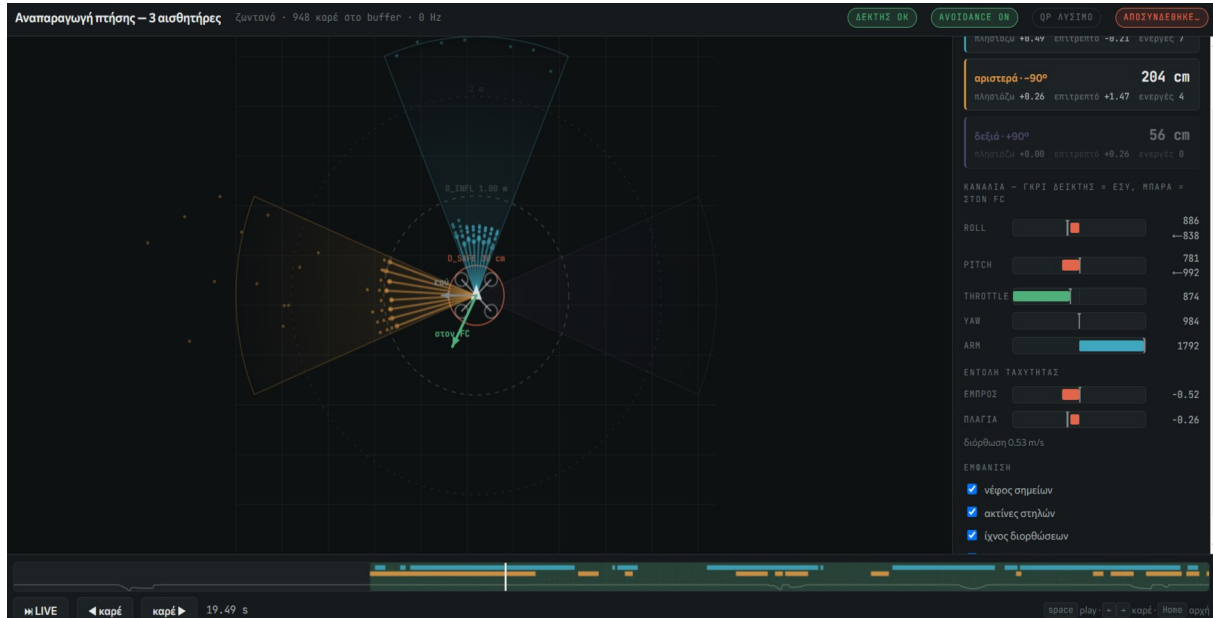
Το Σχήμα 5.3 συνοψίζει την πλησιέστερη προσέγγιση σε τοίχο. Το άνω διάγραμμα δίνει την απόσταση με σημειωμένα τα δύο κατώφλια, τη ζώνη επιρροής στο 1 m και την απόσταση ασφαλείας στα 30 cm. Το μεσαίο αντιπαραβάλλει την πραγματική ταχύτητα προσέγγισης με το όριο που επιβάλλει ο περιορισμός, όπου η σκιασμένη περιοχή δηλώνει ταχύτητες υπερβολικές για την τρέχουσα απόσταση. Το κάτω συγκρίνει την εντολή του χειριστή με την εντολή που παραδόθηκε στον ελεγκτή πτήσης.

Η προσέγγιση ξεκίνησε από τα 4,00 m με μηδενική ταχύτητα, η ταχύτητα κορυφώθηκε στα 0,86 m/s, η επιβράδυνση εκκινεί στα 2,20 m και η πλησιέστερη απόσταση ήταν 0,40 m. Το αεροσκάφος σταμάτησε δηλαδή 10 cm έξω από την απόσταση ασφαλείας, χωρίς καμία υπέρβασή της, και η πραγματική ταχύτητα παρέμεινε καθ' όλη τη διάρκεια εντός του επιτρεπόμενου ορίου. Η επιτυχής αυτή συμπεριφορά δεν αποτελεί μεμονωμένο γεγονός. Παρατηρήθηκε πως καθ' όλη την διάρκεια της πτήσης ο εμπρόσθιος αισθητήρας δεν κατέγραψε ούτε μία φορά απόσταση μικρότερη της απόστασης ασφαλείας.

Η συνολική υστέρηση του βρόχου ελέγχου μετρήθηκε σε 434 ms και αναλύεται σε 200 ms για τη διαμόρφωση μιας μέτρησης απόστασης, δηλαδή δύο διαδοχικά καρέ στα 10 Hz, και 234 ms απόκρισης του αεροσκάφους. Το μέγεθος αυτό θέτει το ανώτατο όριο της παραμέτρου του φράγματος, καθώς η προσέγγιση πρέπει να μηδενίζεται μέσα σε αυτόν τον χρόνο, και αντιστοιχεί σε $a_{max} = 2,30 \text{ s}^{-1}$. Η

υλοποιημένη τιμή είναι $\alpha = 1,0 \text{ s}^{-1}$, δηλαδή περισσότερο από δύο φορές πιο συντηρητική. Το πρακτικό της αποτέλεσμα είναι η έναρξη της επιβράδυνσης στα 2,20 m, τιμή που συμφωνεί με την απόσταση δέσμμευσης 2,30 m της σχέσης (4.31).

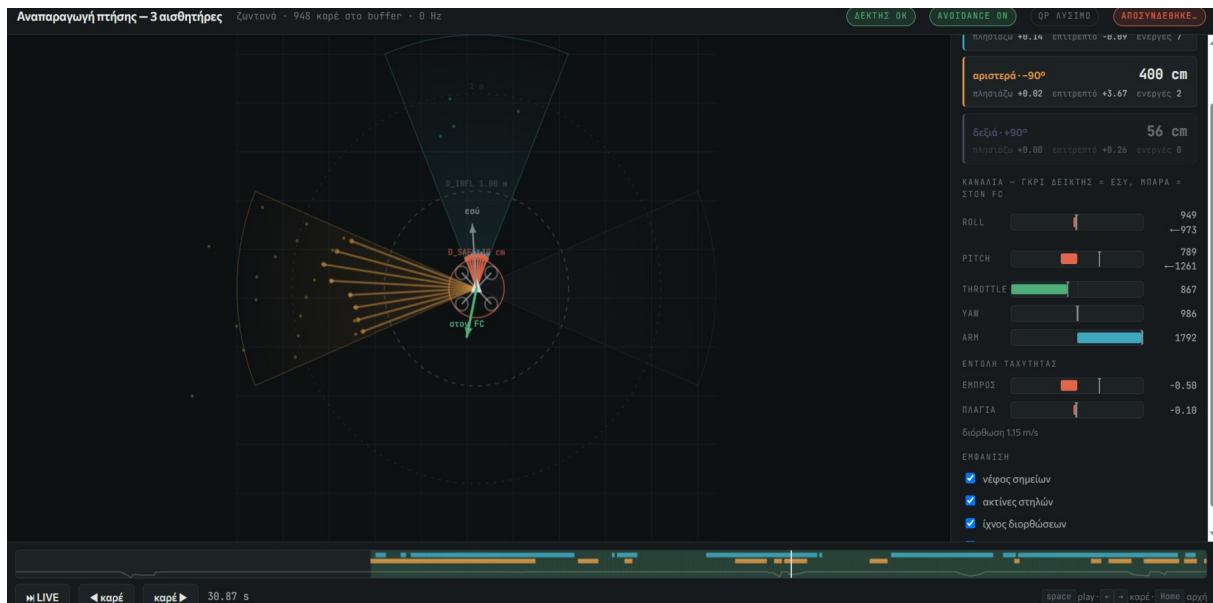
5.3.2 Κινούμενο εμπόδιο



Σχήμα 5.4: Στιγμιότυπο προσέγγισης εμποδίου σε ακίνητο αεροσκάφος

Το Σχήμα 5.4 απεικονίζει μία μεμονωμένη στιγμή της πτήσης, όπου το εμπόδιο κινείται προς ακίνητο αεροσκάφος. Στο αριστερό τμήμα φαίνεται η κάτοψη με τα οπτικά πεδία των τριών αισθητήρων, τα δύο κατώφλια αποστάσεων, και δύο διανύσματα: η εντολή του χειριστή και η εντολή που παραδόθηκε στον ελεγκτή πτήσης. Στο δεξί τμήμα παρατίθεται για κάθε αισθητήρα η απόσταση, η ταχύτητα, το επιτρεπόμενο όριο και το πλήθος των ενεργών περιορισμών, καθώς και οι τελικές εντολές ταχύτητας.

Ο εμπρόσθιος αισθητήρας καταγράφει ταχύτητα προσέγγισης $+0,49 \text{ m/s}$ με επιτρεπόμενο όριο $-0,21 \text{ m/s}$. Το αρνητικό πρόσημο του ορίου σημαίνει ότι καμία τιμή προς τα εμπρός δεν είναι αποδεκτή και ότι απαιτείται ενεργή οπισθοχώρηση. Η διαμήκης εντολή του χειριστή είναι ακριβώς μηδενική, ενώ υπάρχει πλάγια εντολή προς τα αριστερά $0,38 \text{ m/s}$. Παρ' όλα αυτά, η εντολή που φτάνει στον ελεγκτή πτήσης είναι $-0,52 \text{ m/s}$ κατά τον διαμήκη άξονα, ενώ η πλάγια συνιστώσα περιορίζεται σε $0,26 \text{ m/s}$. Το σύστημα δηλαδή δεν αρκείται στην ακινησία αλλά απομακρύνει ενεργά το αεροσκάφος από το εμπόδιο που το πλησιάζει, διατηρώντας μέρος μόνο της πλάγιας πρόθεσης του χειριστή.



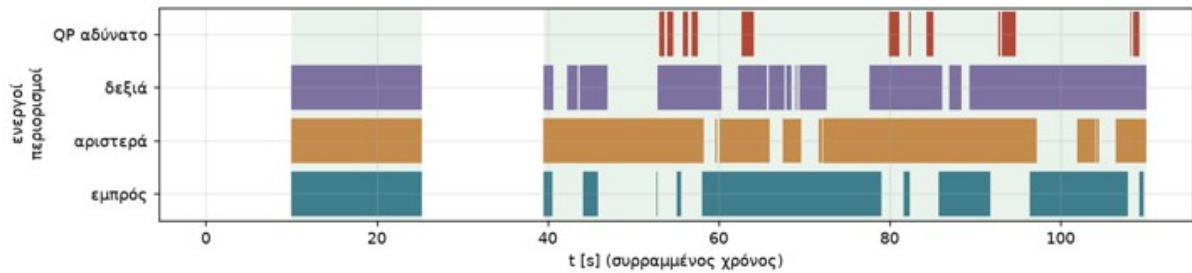
Σχήμα 5.5: Στιγμιότυπο προσέγγισης κινούμενου εμποδίου σε κινούμενο αεροσκάφος

Το Σχήμα 5.5 δείχνει μεταγενέστερη στιγμή της ίδιας πτήσης, όπου κινούνται και τα δύο σώματα. Ο χειριστής ζητά τώρα ενεργά κίνηση προς τα εμπρός με ταχύτητα $0,66 \text{ m/s}$, όπως φαίνεται από τον δείκτη του καναλιού. Ο εμπρόσθιος αισθητήρας έχει επιτρεπόμενο όριο $-0,09 \text{ m/s}$ και επτά ενεργές στήλες, και η εντολή που παραδίδεται είναι $-0,50 \text{ m/s}$. Το μέτρο της διόρθωσης, $1,15 \text{ m/s}$, είναι το μεγαλύτερο της πτήσης και αντιστοιχεί σε πλήρη αντιστροφή της πρόθεσης του χειριστή. Ο αριστερός αισθητήρας, στα $4,00 \text{ m}$, δίνει επιτρεπόμενο όριο $+3,67 \text{ m/s}$, τιμή πολύ μεγαλύτερη από κάθε επιτεύξιμη ταχύτητα, και δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα.

Και στις δύο στιγμές ο επιλύτης βρήκε λύση. Σε ολόκληρη τη δεύτερη πτήση, δεν σημειώθηκε ούτε ένας μη επιλύσιμος κύκλος εκτέλεσης. Η συμπεριφορά αυτή είναι απόλυτα θεωρητικά αναμενόμενη δεδομένου ότι, όταν υφίσταται μόνο ένα ενεργό μέτωπο, το εφικτό σύνολο αποτελεί τομή ημιεπιπέδων με σχεδόν παράλληλες κάθετες διευθύνσεις, η οποία παραμένει μη κενή όσο το κάτω όριο του b διατηρείται υψηλότερα από το όριο ταχύτητας. Η εμφάνιση μη εφικτής λύσης απαιτεί συγκρουόμενους περιορισμούς, συνθήκη η οποία υπαγορεύει αναγκαστικά την ύπαρξη τουλάχιστον δύο αντίθετων μετώπων.

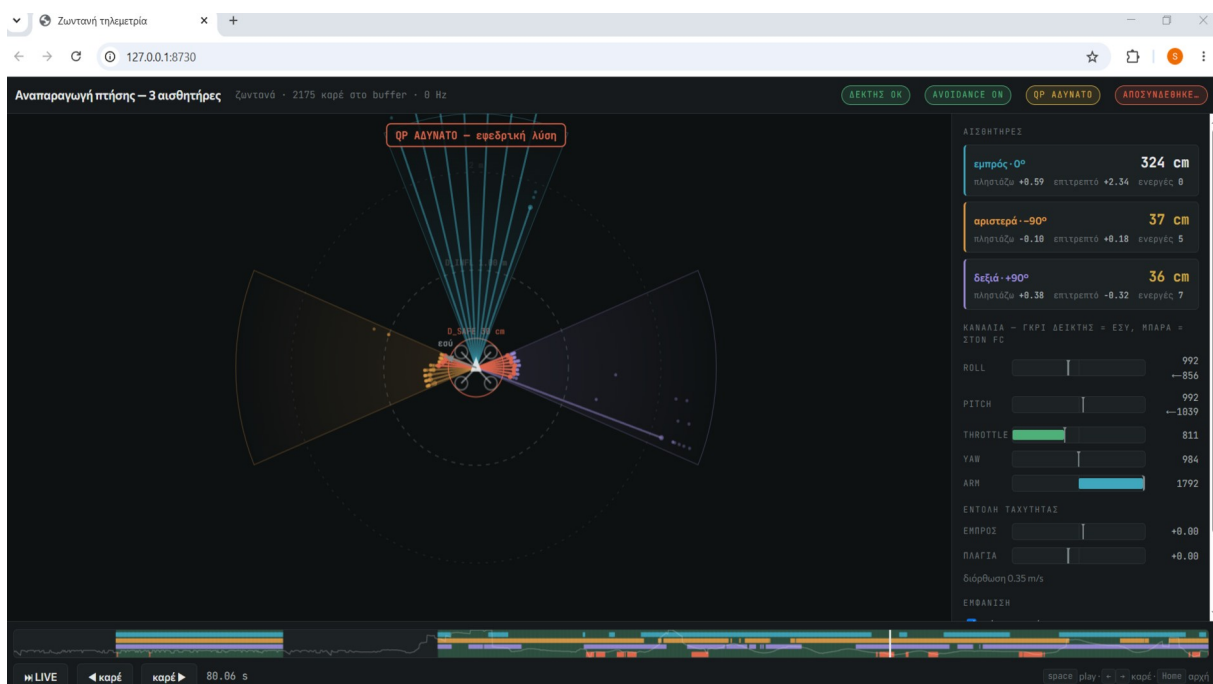
Η εικόνα ωστόσο διαφοροποιείται ως προς την τήρηση του κατωφλίου ασφαλείας D_{safe} . Στην πτήση αυτή ο εμπρόσθιος αισθητήρας κατέγραψε απόσταση μικρότερη της απόστασης ασφαλείας στο $3,75 \%$ των δειγμάτων, σε δύο επεισόδια διάρκειας $0,20$ και $0,46 \text{ s}$, με ελάχιστη τιμή $0,16 \text{ m}$. Δεν σημειώθηκε επαφή, παρέμεινε δηλαδή περιθώριο 16 cm , όμως το κατώφλι παραβιάστηκε. Η αιτία είναι δομική και δεν αποτελεί ζήτημα ρύθμισης παραμέτρων. Η εντολή οπισθοχώρησης που μπορεί να παραγάγει ο περιορισμός είναι κορεσμένη στα $0,50 \text{ m/s}$. Όταν το εμπόδιο πλησιάζει ταχύτερα από αυτή την τιμή, καμία επιτρεπτή εντολή δεν αρκεί για να διατηρηθεί η απόσταση και το φράγμα περιορίζεται στο να επιβραδύνει τη μείωσή της. Το όριο αυτό δεν εμφανίζεται με στατικά εμπόδια, όπου η ταχύτητα προσέγγισης καθορίζεται εξ ολοκλήρου από το ίδιο το αεροσκάφος και επομένως ελέγχεται πλήρως από τον περιορισμό.

5.3.3 Διέλευση από στενό πέρασμα και μη επιλύσιμοι κύκλοι εκτέλεσης



Σχήμα 5.6: Χρονική κατανομή των ενεργών περιορισμών και των μη επιλύσιμων κύκλων εκτέλεσης

Το Σχήμα 5.6 παρουσιάζει, το χρονικό ιστορικό ενεργοποίησης των περιορισμών καθώς και τα διαστήματα στα οποία προέκυψε αδυναμία εύρεσης λύσης από τον επιλύτη. Η εκ των υστέρων ανακατασκευή του προβλήματος επί των καταγεγραμμένων δεδομένων υποδεικνύει ποσοστό μη επιλύσιμων κύκλων εκτέλεσης της τάξης του 4,5% (για τα δείγματα με ενεργή αποφυγή). Όλες οι αστοχίες εντοπίζονται στη δεύτερη φάση ενεργοποίησης του συστήματος (πράσινη σκίαση), εμφανιζόμενες ως στιγμιαίες διακοπές διάρκειας μερικών δεκάτων του δευτερολέπτου. Όπως παρατηρήθηκε και στην προηγούμενη ενότητα (5.3.2), όταν δεν υπάρχουν αντικρουόμενοι πλευρικοί περιορισμοί δεν παρατηρείται καμία αδυναμία επίλυσης του τετραγωνικού προβλήματος.



Σχήμα 5.7: Στιγμιότυπο διέλευσης από στενό πέρασμα

Το Σχήμα 5.7 αποτυπώνει μια στιγμή αδυναμίας επίλυσης του τετραγωνικού προβλήματος. Ο εμπρόσθιος αισθητήρας είναι ελεύθερος, στα 3,24 m, με επιτρεπόμενο όριο +2,34 m/s και καμία ενεργή στήλη. Ο αριστερός βρίσκεται στα 0,37 m αλλά απομακρύνεται, με ταχύτητα $-0,10$ m/s, και δίνει θετικό όριο +0,18 m/s με πέντε ενεργές στήλες. Ο δεξιός βρίσκεται στα 0,36 m και πλησιάζει με +0,38 m/s, δίνοντας αρνητικό όριο $-0,32$ m/s με επτά ενεργές στήλες.

Το άθροισμα των ενεργών στηλών είναι δώδεκα, τιμή που ταυτίζεται με το ανώτατο πλήθος περιορισμών που δέχεται ο επιλύτης. Οι δύο πλευρικοί αισθητήρες εξάντλησαν δηλαδή μόνοι τους ολόκληρο το διαθέσιμο πλήθος, ενώ ο εμπρόσθιος, παρότι ελεύθερος, δεν συνεισέφερε καμία γραμμή.

Οι δώδεκα αυτοί περιορισμοί, με τις κάθετες διευθύνσεις των στηλών να ανοίγουν σε βεντάλια εκατέρωθεν κάθε πλευρικού άξονα, έχουν κενή τομή και το πρόβλημα καθίσταται αδύνατο. Το αίτιο δεν είναι η παραβίαση της απόστασης ασφαλείας, αφού και οι δύο πλευρικές αποστάσεις παραμένουν πάνω από το κατώφλι, αλλά ο όρος ταχύτητας. Δηλαδή, ο ένας τοίχος πλησιάζει αρκετά γρήγορα ώστε να απαιτεί ταχύτητα υποχώρησης την οποία ο απέναντι τοίχος δεν επιτρέπει ως ταχύτητα προσέγγισης.

Ο χειριστής ζητούσε την ίδια στιγμή κίνηση $0,12 \text{ m/s}$ προς τα εμπρός και $0,33 \text{ m/s}$ προς τα αριστερά. Η εφεδρική λύση μηδένισε πλήρως και τις δύο συνιστώσες, παραδίδοντας εντολή ακινησίας με μέτρο διόρθωσης $0,35 \text{ m/s}$. Επέλεξε δηλαδή, ανάμεσα στα υποψήφια σημεία, εκείνο που ελαχιστοποιεί τη μέγιστη παραβίαση, το οποίο σε αυτή τη διάταξη είναι η ίδια η αρχή των αξόνων. Πρόκειται για τη συμπεριφορά που περιγράφει το κριτήριο της Ενότητας 4.6.3: όταν κανένα σημείο δεν ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς, το σύστημα δεν επιλέγει αυθαίρετα αλλά συγκρατεί το αεροσκάφος στη λιγότερο δυσμενή διαθέσιμη κατάσταση.



Σχήμα 5.8: Διέλευση αεροσκάφους από στενό πέρασμα

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δύο πτήσεων

	στατικά εμπόδια και διέλευση στενού περάσματος	κινούμενο εμπόδιο
διάρκεια · δείγματα	110,1 s · 2189	48,6 s · 971
δείγματα με αποφυγή ενεργή	1708 (78,0 %)	666 (68,6 %)
εμπρός — ελάχιστη απόσταση	0,40 m, καμία υπέρβαση	0,16 m · 3,75 % των δειγμάτων
αριστερά—ελάχιστη απόσταση	0,29 m · 0,70 %	0,34 m, καμία υπέρβαση
δεξιά — ελάχιστη απόσταση	0,10 m · 1,99 %	0,56 m, καμία υπέρβαση
μη επιλύσιμοι κύκλοι	≈4,5 %	0 %
επαφή με εμπόδιο	καμία	καμία

5.4 Σύγκριση με τη μέθοδο τεχνητών δυναμικών πεδίων

Στο Σχήμα 5.9 παρατίθεται, για τους δύο άξονες κίνησης, η εντολή που θα είχε παραχθεί από διαφορετικούς νόμους ελέγχου αν τροφοδοτούνταν με τα ίδια ακριβώς δεδομένα αισθητήρων. Ειδικότερα απεικονίζονται: η αρχική εντολή του χειριστή, η πραγματική εντολή που εξήγαγε το σύστημα κατά την πτήση, η εκ των υστέρων ανακατασκευή της, και η εντολή που θα προέκυπτε από έναν αλγόριθμο τεχνητών δυναμικών πεδίων [8]. Η εκ των υστέρων ανακατασκευή ταυτίζεται με την πραγματική εντολή, γεγονός που επικυρώνει τη μεθοδολογία της σύγκρισης, αποδεικνύοντας ότι το περιβάλλον αξιολόγησης αποτελεί πιστό αντίγραφο της πραγματικής λειτουργίας

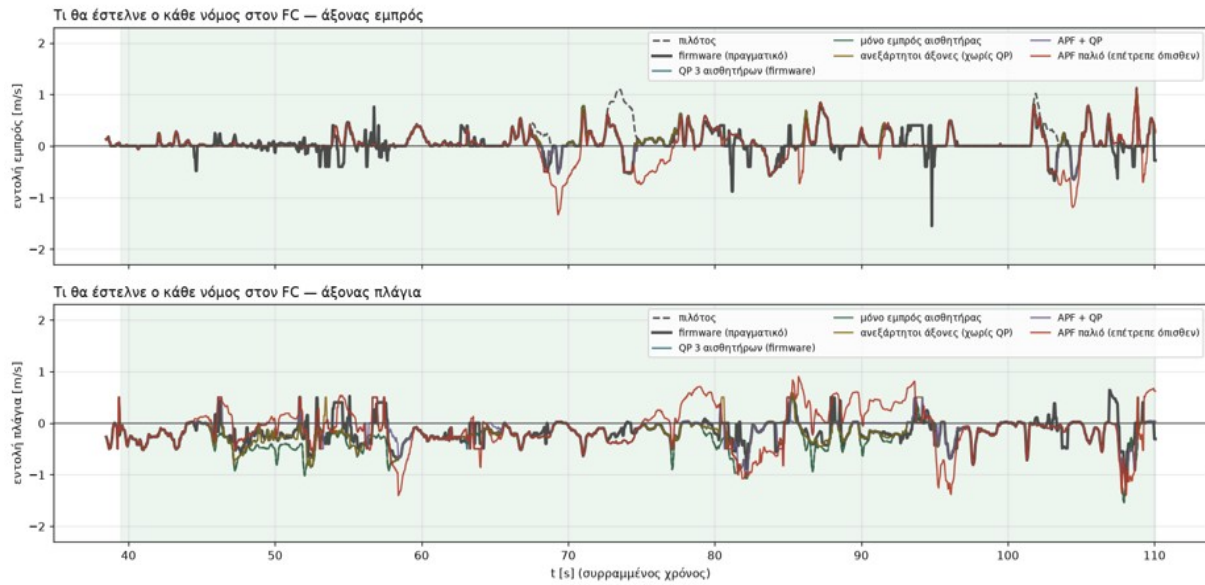
Η καμπύλη των δυναμικών πεδίων αποκλίνει σημαντικά, φθάνοντας σε εντολές οπισθοχώρησης που ξεπερνούν το 1,2 m/s σε στιγμές όπου ο υλοποιημένος νόμος δεν επενέβαινε καθόλου. Η αιτία είναι δομική και έχει ήδη διατυπωθεί στο Κεφάλαιο 2 [1], [8]: η απωστική συνιστώσα εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση, ενώ ο περιορισμός του φράγματος εξαρτάται από την απόσταση και από την ταχύτητα προσέγγισης.

Το στιγμιότυπο του Σχήματος 5.4 δίνει το πιο άμεσο παράδειγμα της διαφοράς αυτής, καθώς περιέχει και τις δύο περιπτώσεις ταυτόχρονα. Ο δεξιός αισθητήρας βρίσκεται στα 0,56 m, εντός της ζώνης επιρροής, αλλά με μηδενική ταχύτητα προσέγγισης, το επιτρεπόμενο όριο παραμένει θετικό και το σύστημα δεν παρεμβαίνει καθόλου. Ένα δυναμικό πεδίο, μη έχοντας πρόσβαση στην πληροφορία της ταχύτητας, θα παρήγαγε στην ίδια στιγμή απωστική εντολή απλώς και μόνο επειδή η απόσταση είναι μικρή. Ταυτόχρονα, στον εμπρόσθιο άξονα, όπου υπάρχει πραγματική προσέγγιση, ο υλοποιημένος νόμος διατάσσει οπισθοχώρηση -0,52 m/s παρότι ο χειριστής δεν ζητά καμία κίνηση προς τα εμπρός.

Το συμπέρασμα είναι ότι η διαφορά δεν εντοπίζεται στο αν οι δύο μέθοδοι επεμβαίνουν όταν χρειάζεται, αλλά στο αν επεμβαίνουν όταν δεν χρειάζεται. Πέρα από την περιττή παρέμβαση, η απουσία του όρου ταχύτητας σημαίνει ότι δεν υφίσταται τιμή του κέρδους η οποία να εξασφαλίζει την τήρηση της

Κεφάλαιο 5

απόστασης ασφαλείας για επαρκώς μεγάλη ταχύτητα προσέγγισης. Η έλλειψη αυτής ακριβώς της εγγύησης, και όχι η ποιότητα της παραγόμενης τροχιάς, είναι ο λόγος που η μέθοδος δεν υιοθετήθηκε.



Σχήμα 5.9: Αντιπαραβολή νόμων ελέγχου επί των ίδιων δεδομένων

Κεφάλαιο 6ο: Τελικά συμπεράσματα και προτάσεις περαιτέρω ανάπτυξης του συστήματος

6.1 Συμπεράσματα

Η εργασία υλοποίησε και αξιολόγησε ένα σύστημα υποβοηθούμενης αποφυγής εμποδίων για τηλεχειριζόμενο τετρακόπτερο, το οποίο παρεμβάλλεται στη ζεύξη δέκτη-ελεγκτή πτήσης. Από τη μελέτη προκύπτουν τρία συμπεράσματα.

1. Ο περιορισμός με όρο ταχύτητας παρέχει ασφάλεια θεμελιωμένη σε σχεδιαστικό επιχείρημα και όχι σε εμπειρική ρύθμιση, εφόσον η ταχύτητα προσέγγισης ελέγχεται από το ίδιο το αεροσκάφος. Στις πτήσεις με στατικά εμπόδια που πραγματοποιήθηκαν (Ενότητα 5.3.2), ο εμπρόσθιος αισθητήρας δεν παρουσίασε υπέρβαση της απόστασης ασφαλείας, ενώ η πέδηση ολοκληρωνόταν πριν την προσέγγιση του κατωφλίου. Το αποτέλεσμα είναι συνεπές με τον προϋπολογισμό καθυστέρησης του βρόχου: η παράμετρος του φράγματος επιλέχθηκε αρκετά συντηρητικότερη από το ανώτατο όριο που θέτει η μετρημένη καθυστέρηση, ώστε το σύστημα να παραμένει ασφαλές ακόμη και αν αυτή αυξηθεί σημαντικά. Η ασφάλεια εδώ δεν προκύπτει από αναζήτηση κατάλληλων κερδών αλλά από τη σχέση μεταξύ μιας μετρήσιμης ιδιότητας της πλατφόρμας και μιας παραμέτρου με φυσική ερμηνεία.
2. Ο εκτιμητής κατάστασης δεν είναι στατιστικά βέλτιστος, αστοχεί όμως προς την ασφαλή κατεύθυνση. Τα σφάλματα πρόβλεψης δεν είναι ασυσχέτιστα και ο έλεγχος συνέπειας παραμένει κάτω από τον στόχο, με τις αστοχίες να μην είναι διάχυτες αλλά συγκεντρωμένες σε μικρό ποσοστό δειγμάτων που συμπίπτουν χρονικά με πραγματικές ασυνέχειες του περιβάλλοντος. Η μοναδική συστηματική απόκλιση που εντοπίστηκε είναι κοινής φοράς και στους τρεις αισθητήρες, όπου το φίλτρο τοποθετεί το εμπόδιο πιο κοντά απ' ό,τι μετριέται, δηλαδή σφάλει υπέρ της ασφαλείας. Για εκτιμητή που τροφοδοτεί φράγμα ασφαλείας, η ιδιότητα αυτή είναι προτιμότερη από τη στατιστική βελτιστότητα.
3. Τα όρια του συστήματος δεν βρίσκονται στον νόμο ελέγχου αλλά στην πληροφορία που τον τροφοδοτεί. Οι περιπτώσεις στις οποίες παρατηρήθηκε υπέρβαση της απόστασης ασφαλείας έχουν κοινή αιτία την έλλειψη δεδομένων και όχι κάποια αδυναμία της διατύπωσης. Κατά τη διέλευση από στενό πέρασμα, δύο αντικρουόμενοι πλευρικοί περιορισμοί εξαντλούν το διαθέσιμο πλήθος γραμμών και αφήνουν κενό εφικτό σύνολο. Με κάλυψη ολόκληρου του οριζόντιου επιπέδου, ο επιλύτης θα διέθετε ελεύθερες κατευθύνσεις προς τις οποίες να διαφύγει αντί να οπισθοχωρήσει. Στην περίπτωση του κινούμενου εμποδίου, η εντολή υποχώρησης είναι κορεσμένη σε προκαθορισμένη τιμή και δεν επαρκεί όταν το εμπόδιο πλησιάζει ταχύτερα από αυτήν. Ο κορεσμός υπάρχει επειδή το σύστημα δεν γνωρίζει τη δική του ταχύτητα και συνεπώς δεν μπορεί να διακρίνει ποιο από τα δύο σώματα κινείται. Τα ποσοτικά στοιχεία που τεκμηριώνουν τα παραπάνω παρατίθενται στο Κεφάλαιο 5 και αφορούν τις συγκεκριμένες πτήσεις που αξιολογήθηκαν.

6.2 Σύγκριση με συναφή εργασία

Οι Gerencheal και Lee [21] παρουσίασαν σύστημα με παρόμοια αρχιτεκτονική, όπου μικροελεγκτής παρεμβάλλεται στη ζεύξη τηλεχειρισμού και τροποποιεί τις εντολές του χειριστή με βάση μετρήσεις αισθητήρων χρόνου πτήσης. Η συγκριτική ανάλυση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς οι δύο προσεγγίσεις μοιράζονται κοινό επιχειρησιακό στόχο και αντίστοιχη τοπολογία στην αλυσίδα ελέγχου, διαφοροποιούνται ωστόσο ριζικά ως προς τον εφαρμοζόμενο έλεγχο αποφυγής.

Το σύστημα του άρθρου διαθέτει οκτώ αισθητήρες με πλήρη οριζόντια κάλυψη 360°, έναντι των τριών της παρούσας υλοποίησης, και επικυρώνεται με εξωτερικό σύστημα καταγραφής κίνησης. Και τα δύο αποτελούν σαφή πλεονεκτήματα και αποτυπώνουν τους πραγματικούς περιορισμούς της παρούσας εργασίας.

Η διαφορά εντοπίζεται στη διατύπωση της αποφυγής. Η απωστική δύναμη υπολογίζεται εκεί ως συνάρτηση της απόστασης και μόνο, χωρίς κανέναν όρο ταχύτητας, και προστίθεται αφαιρετικά στην εντολή του χειριστή. Οι συνέπειες της επιλογής αποτυπώνονται στο πειραματικό στάδιο, όπου η ταχύτητα προσέγγισης δεν μετρήθηκε ενώ αναφέρθηκε ρητά ότι λόγω αδράνειας το αεροσκάφος συνέχιζε να κινείται προς το εμπόδιο έως ότου η δύναμη γίνει αρκετά ισχυρή ώστε να αντιστρέψει την κίνηση.

Σημαντικότερη είναι η απουσία οποιασδήποτε πραγμάτευσης των αντικρουόμενων περιορισμών. Η συνολική δύναμη ορίζεται ως ο μέσος όρος των επιμέρους δυνάμεων όλων των γωνιακών τομέων. Όταν δύο εμπόδια βρίσκονται σε αντιδιαμετρικές κατευθύνσεις, όπως συμβαίνει κατά τη διέλευση από άνοιγμα, οι αντίστοιχες δυνάμεις είναι αντίρροπες και σχεδόν ίσου μέτρου. Με τις παραμέτρους της εργασίας εκείνης και για τη γεωμετρία της Ενότητας 5.3.4, δηλαδή ελεύθερες αποστάσεις 0,46 m και 0,36 m εκατέρωθεν, τα μέτρα των δύο δυνάμεων προκύπτουν 870 και 936 μονάδες αντίστοιχα, ενώ το διανυσματικό τους άθροισμα μόλις 66: αλληλοαναιρούνται κατά 93 %. Η επακόλουθη διαίρεση με το πλήθος των ενεργών τομέων μειώνει περαιτέρω το αποτέλεσμα. Το σύστημα δηλαδή παύει πρακτικά να παρεμβαίνει ακριβώς στη συνθήκη με το μικρότερο διαθέσιμο περιθώριο. Τα πειράματα του άρθρου που παρουσιάζονται περιλαμβάνουν αποκλειστικά ζεύγη εμποδίων σε γειτονικές κατευθύνσεις, όπου οι δυνάμεις αθροίζονται ενισχυτικά, και ουδέποτε αντιδιαμετρική διάταξη.

Αντιθέτως, στο προτεινόμενο σύστημα η συγκεκριμένη συνθήκη αντιμετωπίζεται με ρητό μαθηματικό τρόπο. Το πρόβλημα αναγνωρίζεται ως μη επιλύσιμο, καταγράφεται, και επιλύεται με κριτήριο την ελάχιστη παραβίαση, εξυπηρετώντας τον πιο κρίσιμο περιορισμό. Η αντιμετώπιση δεν είναι ιδανική, αφού η τυπική εγγύηση παύει να ισχύει στα διαστήματα αυτά, είναι όμως ορισμένη και μετρημένη.

Συνοψίζοντας, η σύγκριση δεν αφορά τη συνολική επίδοση των δύο συστημάτων, όπου η ευρύτερη κάλυψη και η εξωτερική επικύρωση ευνοούν σαφώς την εργασία [21], αλλά τη δομή του νόμου αποφυγής. Δηλαδή την εξάρτηση από την ταχύτητα προσέγγισης, την ύπαρξη φραγμένης εγγύησης, και την ύπαρξη ορισμένης συμπεριφοράς όταν οι απαιτήσεις των αισθητήρων αντικρούονται.

6.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η σύγκριση της προηγούμενης ενότητας υποδεικνύει και την πρώτη προτεραιότητα. Επέκταση του πεδίου αντίληψης με σχεδίαση νέας βάσης στήριξης που θα φιλοξενεί περισσότερους αισθητήρες, ώστε να εκλείψουν τα τυφλά τμήματα του οριζόντιου επιπέδου. Η επέκταση αυτή δεν έχει μόνο ανιχνευτικό χαρακτήρα, καθώς με πλήρη κάλυψη καθίσταται δυνατή η κίνηση προς διαθέσιμο χώρο αντί για οπισθοχώρηση. Στην παρούσα υλοποίηση, όταν οι διαθέσιμοι περιορισμοί αντικρούονται, η μόνη

κατεύθυνση για την οποία υπάρχει βεβαιότητα είναι η ήδη διανυθείσα, και γι' αυτό η εφεδρική λύση καταλήγει σε υποχώρηση. Εφόσον ο επιλύτης γνωρίζει ότι κάποιος τομέας διαθέτει θετικό περιθώριο, η διαφυγή μπορεί να κατευθυνθεί εκεί, μετατρέποντας την υποχώρηση σε παράκαμψη.

Δεύτερη κατεύθυνση είναι η ενσωμάτωση αισθητήρα οπτικής ροής (optical flow sensor) στο κάτω μέρος του αεροσκάφους, η οποία προσφέρει δύο μεγέθη που σήμερα λείπουν: την ταχύτητα του ίδιου του αεροσκάφους και το ύψος πτήσης.

Η ιδιοταχύτητα επιτρέπει να αποδοθεί η μεταβολή κάθε απόστασης στην κίνηση του αεροσκάφους ή στην κίνηση του εμποδίου, και επομένως ο έλεγχος αποδοχής των μετρήσεων να εφαρμοστεί σε αυτό που πραγματικά είναι απροσδόκητο. Με τον τρόπο αυτό η πύλη μπορεί να γίνει συμμετρική και στενότερη χωρίς να απορρίπτει έγκυρες μετρήσεις, αίροντας τον συμβιβασμό που επέβαλε την ασύμμετρη διατύπωση της Ενότητας 4.4 και τη συστηματική απόκλιση που αυτή παράγει.

Το ύψος αίρει έναν δεύτερο και ανεξάρτητο συμβιβασμό. Στην παρούσα υλοποίηση οι χαμηλότερες ζώνες των αισθητήρων απορρίπτονται μέσω σταθερού γεωμετρικού ορίου, το οποίο επιλέχθηκε ώστε να μη θεωρείται εμπόδιο το ίδιο το δάπεδο όταν το αεροσκάφος βρίσκεται στο έδαφος. Η επιλογή είναι αναγκαστική, αλλά ισχύει και εν πτήση, οπότε ένα τμήμα των κατακόρυφων δεδομένων απορρίπτεται μονίμως και μαζί του η προστασία του κατώτερου μέρους του αεροσκάφους. Η πληροφορία του ύψους επιτρέπει, κατ' επέκταση, να ρυθμιστεί το κατώτερο όριο αποκοπής δεδομένων ανάλογα με τις συνθήκες αντί να παραμένει σταθερό.

6.4 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίστηκαν τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και παρουσιάστηκαν οι πιθανές κατευθύνσεις για τη μελλοντική εξέλιξη του συστήματος. Το πειραματικό στάδιο απέδειξε ότι ο προτεινόμενος συνδυασμός υλικού και λογισμικού δύναται να εγγυηθεί ασφαλή πτήση σε πραγματικές συνθήκες, διατηρώντας ταυτόχρονα χαμηλό χρηματικό κόστος.

Συνολικά, τα ευρήματα της μελέτης καταδεικνύουν ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική διαθέτει σημαντικά περιθώρια περαιτέρω βελτιστοποίησης, παρέχοντας μια ισχυρή βάση για την ανάπτυξη ακόμα πιο στιβαρών και αποτελεσματικών συστημάτων αυτόνομης αποφυγής εμποδίων.

Τέλος, οφείλει να αναφερθεί η υποστηρικτική συμβολή εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης κατά την εκπόνηση της εργασίας, τόσο ως βοήθημα κατανόησης του μαθηματικού υποβάθρου και της μετάβασης από τη θεωρητική διατύπωση των σχέσεων στην υλοποίησή τους στο λογισμικό, όσο και στη διαμόρφωση του κειμένου, με την απόδοση εξειδικευμένης ορολογίας και τη βελτίωση της σαφήνειας και της σύνταξης του. Οι σχέσεις που παρατίθενται επαληθεύτηκαν έναντι της βιβλιογραφίας και επικυρώθηκαν πειραματικά, ενώ οι σχεδιαστικές επιλογές, η υλοποίηση και τα πειραματικά δεδομένα ανήκουν εξ ολοκλήρου στον συγγραφέα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Άρθρα και εγχειρίδια χρήσης

- [1] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation," in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 1991.
- [2] F. Blanchini, "Set Invariance in Control," *Automatica*, vol. 35, no. 11, pp. 1747-1767, 1999.
- [3] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. San Diego, CA: California Technical Publishing, 1997.
- [4] R. E. Kálmán, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35-45, 1960.
- [5] Y. Bar-Shalom, X.-R. Li, and T. Kirubarajan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. New York: Wiley, 2001.
- [6] R. C. Smith and P. Cheeseman, "On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 5, no. 4, pp. 56-68, 1986.
- [7] M. Hoy, A. S. Matveev, and A. V. Savkin, "Obstacle Avoidance for Small Autonomous UAVs: A Review," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 77, no. 3, pp. 473-493, 2015.
- [8] O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," *International Journal of Robotics Research*, vol. 5, no. 1, pp. 90-98, 1986.
- [9] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 23-33, 1997.
- [10] P. Fiorini and Z. Shiller, "Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 17, no. 7, pp. 760-772, 1998.
- [11] A. V. Fiacco and G. P. McCormick, *Nonlinear Programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques*. John Wiley & Sons, 1968.
- [12] S. Prajna, A. Jadbabaie and G. J. Pappas, "A framework for worst-case and stochastic safety verification using barrier certificates," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 8, pp. 1415-1428, 2007.
- [13] P. Wieland and F. Allgöwer, "Constructive safety using control barrier functions," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 40, no. 12, pp. 462-467, 2007.
- [14] A. D. Ames, J. W. Grizzle, and P. Tabuada, "Control barrier function based quadratic programs with application to adaptive cruise control," *53rd IEEE Conference on Decision and Control*, Los Angeles, CA, USA, 2014, pp. 6271-6278.
- [15] A. D. Ames et al., "Control Barrier Functions: Theory and Applications," *2019 18th European Control Conference (ECC)*, Naples, Italy, 2019, pp. 3420-3431.
- [16] A. D. Ames, X. Xu, J. W. Grizzle, and P. Tabuada, "Control barrier function based quadratic programs for safety critical systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 62, no. 8, pp. 3861–3876, Aug. 2017.
- [17] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.

- [18] Team BlackSheep, TBS CROSSFIRE Manual: CRSF Protocol Specification. Team BlackSheep. [Online]. Available: https://www.team-blacksheep.com/products/prod:crossfire_tx. [Accessed: Sep. 5, 2026].
- [19] STMicroelectronics, UM3109: A guide for using the VL53L8CX low-power, high-performance Time-of-Flight multizone ranging sensor, User manual, Rev. 12, Aug. 2025.
- [20] S. Boyd and L. Vandenberghe, Convex Optimization. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004.
- [21] T. A. Gerencheal and J. H. Lee, "Development of a collision avoidance system using multiple distance sensors for indoor inspection drone," Applied Sciences, vol. 15, no. 16, art. no. 8791, 2025.