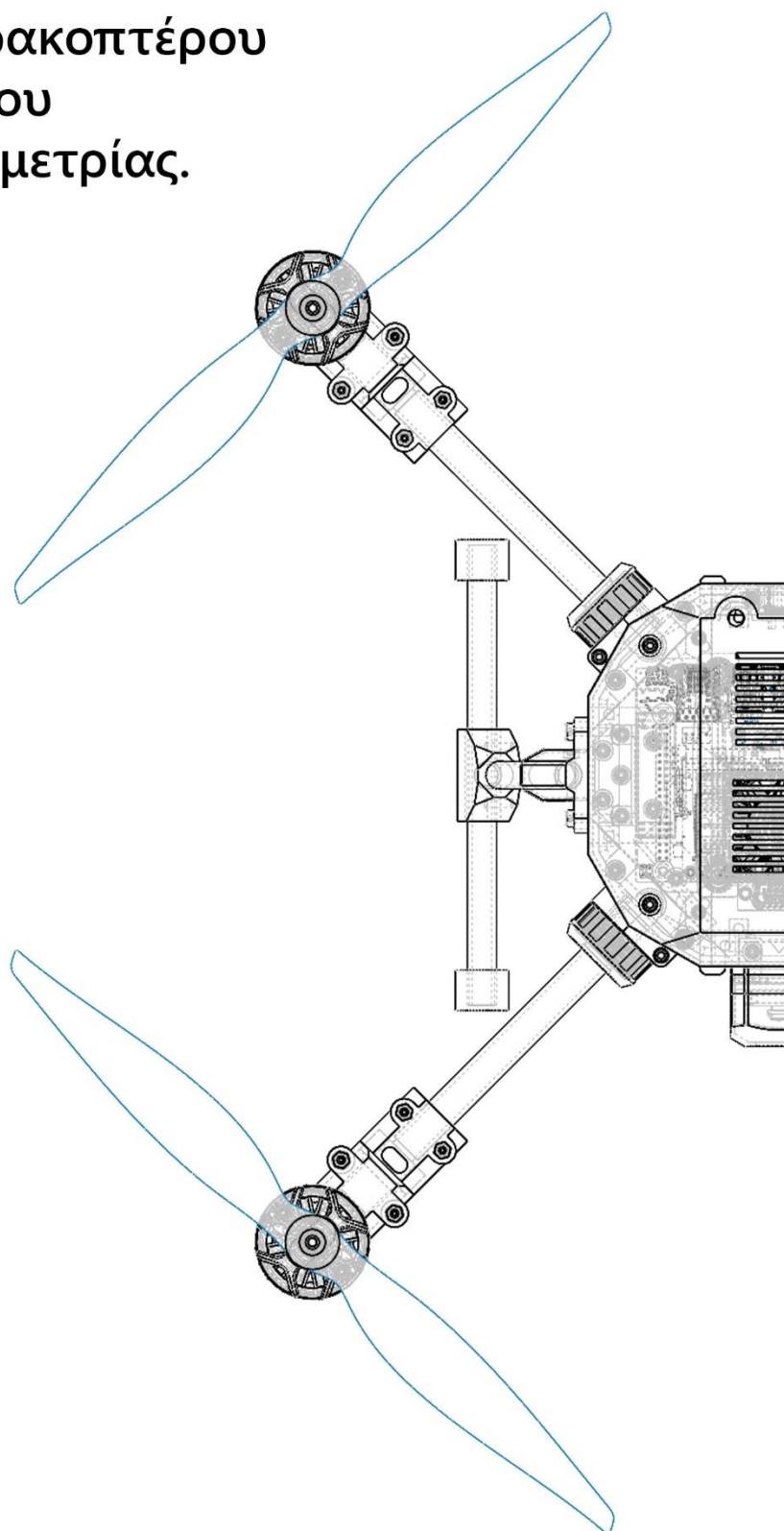




ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Μελέτη, κατασκευή τετρακοπτέρου και εφαρμογή αλγορίθμου οπτικοαδρανειακής οδομετρίας.



Μητρούδας Τηλέμαχος

Επιβλέπων καθηγητής:
Γαστεράτος Αντώνιος

Ξάνθη Ιούλιος 2021

Περίληψη

Το τετρακόπτερο κατατάσσεται στην κατηγορία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών περιστρεφόμενου ρότορα. Αποτελείται από τέσσερις ηλεκτροκινητήρες τοποθετημένους συμμετρικά ως προς το κέντρο του. Ο έλεγχος της κίνησης πραγματοποιείται με την ρύθμιση της γωνιακής τους ταχύτητας και συνεπώς της παραγόμενης ώσης. Η απλή αυτή διάταξη προσφέρει ευελιξία τόσο στον τομέα της κατασκευής τους όσο και στις αποστολές που μπορούν να αναλάβουν.

Τα τελευταία χρόνια με την πρόοδο που σημειώνεται στον τομέα της τεχνητής όρασης, ο συνδυασμός αυτών των δύο ανοίγει ένα νέο πεδίο εφαρμογών. Μια από αυτές αποτελεί η πλοήγηση τετρακοπτέρων σε περιβάλλοντα χωρίς σήμα GNSS, μια ικανότητα που βρίσκει εφαρμογή ιδιαίτερα σε αποστολές αναζήτησης και διάσωσης.

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε ένα τετρακόπτερο που πληροί κάποιες προϋποθέσεις, όπως συγκεκριμένο βάρος, μέγεθος, κ.α. και κατασκευάστηκε με την βοήθεια τρισδιάστατου εκτυπωτή εναπόθεσης υλικού χρησιμοποιώντας το πολυμερές πλαστικό PETG.

Για την εκτίμηση της θέσης του τετρακοπτέρου χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος οπτικοαδρανειακής οδομετρίας, σύμφωνα με τον οποίο τα δεδομένα του IMU και της κάμερας συνδυάζονται με την χρήση ενός φίλτρου Kalman. Ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε για τον σκοπό αυτό είναι το ROVIO λόγω της μικρής απαιτούμενης επεξεργαστικής ισχύς και της ευρωστίας του.

Η δοκιμή της απόδοσης του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε τόσο στο περιβάλλον προσομοίωσης του Gazebo όσο και στο πραγματικό τετρακόπτερο. Το όλο εγχείρημα βασίστηκε στο ROS.

Abstract

Quadcopters are classified as Unmanned Aerial Vehicles. They consist of four electric rotors placed symmetrically to the center of the quadcopter. Movement control is managed by fluctuating the angular velocity of the motors and therefore its thrust. A simple layout like that makes quadcopters easy to construct and ideal for a variety of applications.

In recent years with the advances in the field of computer vision, the combination of those two opens up a new range of applications. One of those is the navigation of quadcopters in GNSS denied environments, which will provide great assistance in the area of search and rescue.

In the present work, a modular quadcopter is designed within some guidelines for the total weight, size, payload capacity etc. and constructed with the help of FDM 3D printing using PETG material.

For the position estimation of the quadcopter a visual inertia odometry algorithm is used. VIO is creating a position estimate of the quadcopter by fusing inertia measurements from the IMU with the data of an image from the camera feed using an Extended Kalman filter. The algorithm that we chose is ROVIO (Robust Visual Inertia Odometry) because of its low computational needs and its robustness.

Performance testing was performed both in simulation environment of Gazebo and in real world using the actual quadcopter. The whole project is executed using ROS (Robotic Operating System).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κατάλογος Σχημάτων	7
Κατάλογος Πινάκων	9
1 Εισαγωγή	1
Μη επανδρωμένα Αεροσκάφη	1
Ιστορική αναδρομή	3
2 Τετρακόπτερα.....	5
Βασικές αρχές λειτουργίας των τετρακοπτέρων.....	5
Σύστημα συντεταγμένων και μετασχηματισμοί	7
Μαθηματικό Μοντέλο Τετρακοπτέρου	7
Σύστημα συντεταγμένων	8
Πίνακες Περιστροφής	8
Ελεγκτής PID	13
3 Κατασκευή	16
Εισαγωγή.....	16
Υλικό	17
Ελεγκτής πτήσης.....	17
Ενσωματωμένος υπολογιστής	18
Κάμερα.....	19
Κινητήρες.....	19
Ηλεκτρονικοί ελεγκτές ταχύτητας.....	20
Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης.....	21
Μπαταρία.....	22
Συνδυασμός Πομπού-Δέκτη.....	23
Έλικες	23

Κατασκευή Σκελετού (Frame).....	25
Σχεδιασμός Τετρακοπτήρου.....	25
3D εκτύπωση	27
4 Robotic Operating System (ROS).....	33
Εισαγωγή.....	33
Υπολογιστικό μοντέλο γράφων.....	34
Node	34
Topics	34
Services	34
Εργαλεία	35
Rosbag	35
Rosbash.....	35
Catkin.....	35
Roslaunch	35
Rviz.....	36
Gazebo Simulator.....	36
Κινητήρας	40
Σύστημα GNSS	43
IMU.....	43
Πρωτόκολλο Mavlink.....	43
Κάμερα.....	44
5 Τεχνητή Όραση	45
Εισαγωγή.....	45
Οπτικό - Αδρανειακή Οδομετρία.....	45
Φίλτρο Kalman	46
Rovio (Robust Visual Inertia Odometry)	48
Εισαγωγή	48
Δομή Φίλτρου	49
6 Εφαρμογή.....	58

Εισαγωγή.....	58
Εμπόδια	58
Προσομοίωση Gazebo	61
Πραγματικό Τετρακόπτερο.....	64
7 Συμπεράσματα.....	67
Βελτιώσεις.....	67
Εφαρμογές	68
Βιβλιογραφία.....	69

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

(Σχήμα 2.1)	Βασικές διατάξεις τετρακοπτέρων.	.5
(Σχήμα 2.2)	Βασικές κινήσεις τετρακοπτέρου.	.6
(Σχήμα 2.3)	Περιστροφές Euler.	.7
(Σχήμα 2.4)	Βασικά συστήματα συντεταγμένων τετρακοπτέρου.	.8
(Σχήμα 2.5)	Μορφή ελεγκτή PID.	.14
(Σχήμα 2.6)	Διάγραμμα απόκρισης.	.15
(Σχήμα 3.1)	Τρισδιάστατο μοντέλο τετρακοπτέρου.	.25
(Σχήμα 3.2)	Απεικόνιση τετρακοπτέρου 1.	.26
(Σχήμα 3.3)	Απεικόνιση τετρακοπτέρου 2.	.27
(Σχήμα 3.4)	Τρόπος λειτουργίας 3Δ εκτυπωτή.	.27
(Σχήμα 4.1)	Απλοποιημένο σχέδιο τετρακοπτέρου.	.36
(Σχήμα 4.2)	Συστήματα συντεταγμένων link.	.39
(Σχήμα 5.1)	Σύγκριση απόδοσης αλγορίθμων VIO.	.48
(Σχήμα 5.2)	Συστήματα συντεταγμένων.	.50
(Σχήμα 5.3)	Διαδικασία διαχείρισης feature από το φίλτρο.	.54
(Σχήμα 5.4)	Η Δημιουργία Patch σε πολλαπλά επίπεδα εικόνας.	.55
(Σχήμα 6.1)	Διάγραμμα κραδασμών του Flight Controller.	.59
(Σχήμα 6.2)	Ενδείξεις θορύβου και παρεμβολής του σήματος GNSS.	.59
(Σχήμα 6.3)	Διάγραμμα ακρίβειας GNSS, κλειδώματος GNSS, και αριθμός δορυφόρων.	.60
(Σχήμα 6.4)	Φαινόμενο κυλιόμενου κλείστρου (Rolling Shutter).	.60
(Σχήμα 6.5)	Διάγραμμα Διεργασιών ROS κατά την προσομοίωση του Gazebo.	.62
(Σχήμα 6.6)	Ταχύτητας τετρακοπτέρου σε κάθε άξονα κατά την προσομοίωση.	.62
(Σχήμα 6.7)	Απεικόνιση οδομετρίας προσομοίωση στο Rviz.	.63
(Σχήμα 6.8)	Γωνιακή ταχύτητα τετρακοπτέρου ως προς του άξονες του κατά την προσομοίωση.	.63
(Σχήμα 6.9)	Γωνίες Euler κατά την προσομοίωση.	.63

(Σχήμα 6.10)	Διάγραμμα διεργασιών ROS τετρακοπτέρου.	.63
(Σχήμα 6.11)	Ταχύτητα τετρακοπτέρου σε κάθε άξονα του.	.65
(Σχήμα 6.12)	Απεικόνιση οδομετρίας τετρακοπτέρου στο Rviz.	.65
(Σχήμα 6.13)	Γωνιακή Ταχύτητα τετρακοπτέρου ως προς τους άξονες του.	.66
(Σχήμα 6.14)	Γωνίες Pitch, Roll, Yaw τετρακοπτέρου.	.66

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

(Πίνακας 1.1)	Κατηγοριοποίηση UAV βάση του βάρους και την εμβέλειας τους	.2
(Πίνακας 3.1)	Τεχνικά χαρακτηριστικά ελεγκτή πτήσης	.18
(Πίνακας 3.2)	Τεχνικά χαρακτηριστικά ενσωματωμένου υπολογιστή	.18
(Πίνακας 3.3)	Τεχνικά χαρακτηριστικά κάμερας	.19
(Πίνακας 3.4)	Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρων	.20
(Πίνακας 3.5)	Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονικών ελεγκτών ταχύτητας	.21
(Πίνακας 3.6)	Τεχνικά χαρακτηριστικά πομποδέκτη GNSS	
(Πίνακας 3.7)	Πίνακας Μηχανικών ιδιοτήτων υλικών	.30
(Πίνακας 3.8)	Ρυθμίσεις εκτύπωσης των υλικών	.30
(Πίνακας 3.9)	Μηχανικές ιδιότητες υλικών	.31

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ

Χαρακτηρίζουμε ως μη επανδρωμένα αεροσκάφη αυτά οπού δεν απαιτούν την φυσική παρουσία ανθρώπου εντός αυτών για τον χειρισμό τους [1]. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη μπορούν να λειτουργήσουν είτε εντελώς αυτόνομα, με κάποιο σύστημα αυτόματης πλοήγησης ή με τον απομακρυσμένο έλεγχο τους από έναν πιλότο.

Λόγω του ότι δεν είναι αναγκαία η ανθρώπινη παρουσία τα καθιστά κατάλληλα για την χρήση σε περιβάλλοντα μη φιλόξενα για τον άνθρωπο ή σε σενάρια όπου η ανθρώπινη ζωή τίθεται σε κίνδυνο. Την τελευταία δεκαετία παρατηρείται η χρήση τους σε στρατιωτικές επιχειρήσεις. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η μείωση του κόστους των εξαρτημάτων τους συνεπάγεται την χρήση τους και σε άλλες εφαρμογές όπως στην μεταφορά αντικειμένων, γεωργία, αεροφωτογράφιση, ψυχαγωγία κτλ.

Τα UAV αποτελούν μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος του UAS του οποίου στοιχεία αποτελούν το αεροσκάφος, που αποτελείται από το σώμα του αεροσκάφους, τους ρότορες και τις προπέλες, τον δέκτη καθώς και το σύνολο αισθητήρων όπως γυροσκόπιο, επιταχυνσιόμετρο, βαρόμετρο, πυξίδα κτλ. Το σύστημα ελέγχου που απαρτίζεται από την βάση εδάφους και τον αναμεταδότη καθώς και την σύνδεση δεδομένων καθώς και τα περιφερειακά όπως Gimbal, Lidar και οποιοδήποτε άλλο απαιτείται για την εκτέλεση της αποστολής του

Τα UAV χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, στα αεροσκάφη σταθερού πτερυγίου και στα αεροσκάφη περιστρεφόμενου ρότορα.

Αεροσκάφη σταθερού πτερυγίου ονομάζουμε αυτά τα οποία για την παραγωγή της ώσης βασίζονται στην εμπρόσθια κίνηση. Η παραγόμενη ώση εξαρτάται από το σχήμα των πτερυγίων. Για την απογείωση και την προσγείωση του απαιτείται διάδρομος γεγονός που κάνει λιγότερο ευέλικτη την χρήση τους σε σχέση με τα αυτά περιστρεφόμενου ρότορα.

Περιστρεφόμενου ρότορα ονομάζονται τα αεροσκάφη τα οποία για την ανύψωση τους διαθέτουν έναν ή περισσότερους οριζόντιους ρότορες οι οποίοι παράγουν την απαιτούμενη ώση και έτσι μπορεί να αιωρηθεί και να κι-

νηθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση όπως και να προσγειωθεί και να απογειωθεί κάθετα. Τα παραπάνω καθιστούν αυτόν τον τύπο αεροσκαφών ιδιαίτερα ευέλικτα και κατάλληλα για διάφορα σενάρια χρήσης.

Τα UAV μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορα άλλα κριτήρια τα κυριότερα των οποίων είναι τα εξής [2]:

Κατηγοριοποίηση σύμφωνα με τον τρόπο προσγείωσης.

HTOL (Horizontal Take Off and Landing) πρόκειται δηλαδή για τα αεροσκάφη που απογειώνονται οριζόντια και ως επί των πλείστο είναι τύπου σταθερού πτερυγίου. Βασικά τους χαρακτηριστικά είναι οι μεγάλες ταχύτητες πτήσης και η ομαλή προσγείωση. Ως VTOL (Vertical Take Off and Landing) κατηγοριοποιούνται τα αεροσκάφη που απογειώνονται και προσγειώνονται κάθετα. Βασικά τους χαρακτηριστικά αποτελούν η κάθετη προσγείωση και απογείωση όπως επίσης και η δυνατότητα τους να αιωρούνται (hovering).

Σύμφωνα με το βάρος και την εμβέλεια πτήσης χωρίζονται σε:

ΤΥΠΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΒΑΡΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΜΒΕΛΕΙΑ	ΔΙΑΤΑΞΗ
NANO	0,2 Kg	5 Km	Σταθερού Πτερυγίου, Πολυκόπτερο
MICRO	2 Kg	25 Km	Σταθερού Πτερυγίου, Πολυκόπτερο
MINI	20 Kg	40 Km	Σταθερού Πτερυγίου, Πολυκόπτερο
LIGHT	50 Kg	70 Km	Σταθερού Πτερυγίου, Πολυκόπτερο
SMALL	150 Kg	150 Km	Σταθερού Πτερυγίου
TACTICAL	600 Kg	150 Km	Σταθερού Πτερυγίου
MALE	1000 Kg	200 Km	Σταθερού Πτερυγίου
HALE	1000 Kg	250 Km	Σταθερού Πτερυγίου

HEAVY	2000 Kg	1000 Km	Σταθερού Πτε- ρυγίου
SUPER HEAVY	2500 Kg	1500 Km	Σταθερού Πτε- ρυγίου

(Πίνακας 1.1) Κατηγοριοποίηση UAV βάση βάρους και εμβέλειας

Στην συγκεκριμένη εργασία θα επικεντρωθούμε στο τετρακόπτερο που αποτελεί ίσως την πιο δημοφιλή κατηγορία μη επανδρωμένων οχημάτων. Επίσης θα πραγματοποιηθεί η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός τετρακοπτερού. Τέλος θα εφαρμοστεί ένας αλγόριθμος οπτικοαδρανειακής οδομετρίας και θα αξιολογηθεί η απόδοση του.

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Παρότι έχει δοθεί μεγάλο ενδιαφέρον στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των τετρακοπτέρων, δεν είναι καινούρια ιδέα [5]. Τα πρώτα τετρακόπτερα τοποθετούνται στις αρχές του 20ου. Τα τετρακόπτερα μάλιστα προέκυψαν χρονολογικά νωρίτερα από τα συμβατικά ελικόπτερα μιας έλικας, όπως τα γνωρίζουμε σήμερα.

Το 1904 ο Γάλλος επιστήμονας και ακαδημαϊκός Charles Richet κατασκεύασε ένα μικρό, μη επανδρωμένο ελικόπτερο. Αν και το ελικόπτερο αυτό δεν είχε επιτυχία, προκάλεσε το ενδιαφέρον ενός από τους μαθητές του, του μετέπειτα πρωτοπόρου της αεροπλοΐας, Louis Brequet. Κατά το 1906 ο Louis Brequet μαζί με τον αδερφό του Jacques ξεκίνησαν να πειραματίζονται με το ελικόπτερο αυτό, υπό την καθοδήγηση του καθηγητή τους Charles Richet

Ο Louis Brequet μελέτησε προσεκτικά τα ατρακτοειδή σχήματα, εστιάζοντας την προσοχή του στο αεροπλάνο των αδερφών Wright που μόλις τρία χρόνια πριν (1903) είχε κάνει την πρώτη του επιτυχή πτήση. Το 1907, έχοντας κατανοήσει πλήρως την αεροδυναμική θεωρία του ελικοπτερού, οι αδερφοί Brequet κατασκεύασαν το πρώτο τετρακόπτερο.

Το ελικόπτερο αυτό ονομάστηκε Gyroplane No. 1 και αποτελείτο από έναν ατσάλινο σκελετό σε σχήμα σταυρού στις άκρες του οποίου υπήρχαν τέσσερις έλικες. Ο κάθε έλικας αποτελείτο από οκτώ πτερύγια, τα οποία ήταν χωρισμένα σε δύο παράλληλες τετράδες. Τα οκτώ πτερύγια ήταν μηχανικά ενωμένα και μπορούσαν να περιστρέφονται συγχρόνως. Επομένως το ελικόπτερο αυτό είχε 32 συνολικά πτερύγια που συνεισέφεραν στην ανύψωσή του.

Το ελικόπτερο αυτό ονομάστηκε Gyroplane No. 1 και αποτελείτο από έναν ατσάλινο σκελετό σε σχήμα σταυρού στις άκρες του οποίου υπήρχαν τέσσερις έλικες. Ο κάθε έλικας αποτελείτο από οκτώ πτερύγια, τα οποία ήταν χωρισμένα σε δύο παράλληλες τετράδες. Τα οκτώ πτερύγια ήταν μηχανικά ενωμένα και μπορούσαν να περιστρέφονται συγχρόνως. Επομένως το ελικόπτερο αυτό είχε 32 συνολικά πτερύγια που συνεισέφεραν στην ανύψωσή του.

Οι έλικες κινούνταν από μία μηχανή 40 hp που βρισκόταν δίπλα στον πιλότο. Το ελικόπτερο αυτό κατάφερε να ανυψωθεί και να πετάξει αλλά για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα επειδή δεν είχε ευστάθεια, ούτε κατάλληλα μέσα ελέγχου. Παρ' όλα αυτά το Gyroplane No. 1 ήταν το πρώτο μηχανοκίνητο ελικόπτερο στην ιστορία που μπορούσε να μεταφέρει το βάρος ενός ανθρώπου.

Το 1922 ένας Ρώσος μετανάστης στην Αμερική, ο Georges de Bothezat κατόπιν συνεργασίας με τον αμερικανικό στρατό κατασκεύασε ένα από τα μεγαλύτερα ελικόπτερα που είχαν κατασκευαστεί εκείνη την εποχή. Ήταν ένα τετρακόπτερο με έξι πτερύγια σε κάθε κύριο έλικα, ενώ διέθετε επίσης τέσσερις βοηθητικές έλικες, ανά δύο ίδιες. Το ίδιο έτος το ελικόπτερο αυτό πέταξε επιτυχώς πολλές φορές, αν και σε χαμηλά ύψη. Μέχρι τα τέλη του 1923 είχε κάνει περίπου 100 πτήσεις φτάνοντας σε ύψος μόλις τα 5 μέτρα. Αν και απέδειξε ότι το τετρακόπτερο είναι υλοποιήσιμο, το ελικόπτερο αυτό είχε σημαντικά προβλήματα. Η μηχανή του δεν ήταν αρκετά ισχυρή, δεν ελεγχόταν πλήρως, ήταν πολύπλοκο μηχανικά και είχε μικρή αξιοπιστία.

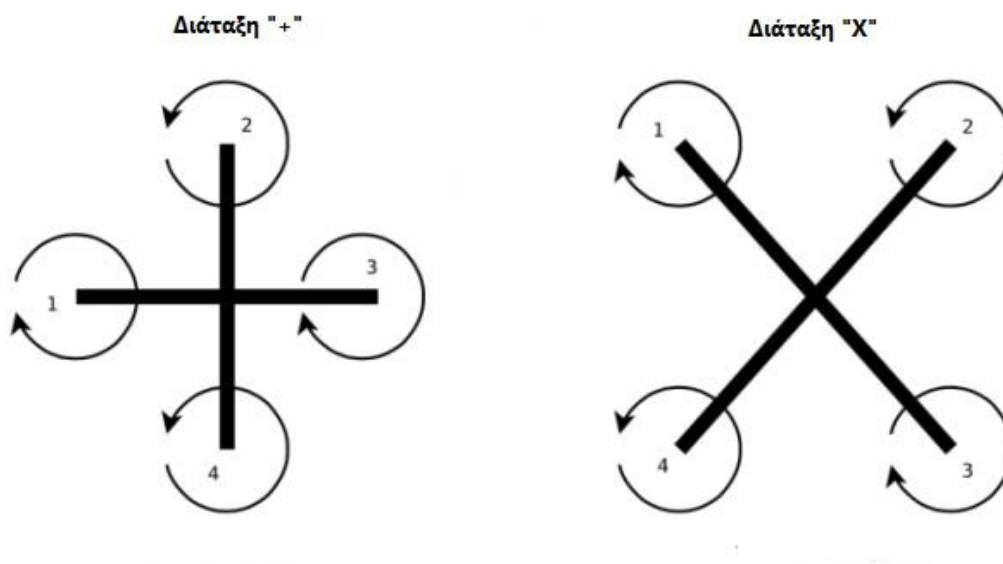
Το 1922, παράλληλα με τον de Bothezat, ο Etienne Oehmichen, πρώην υπάλληλος της Peugeot, κατασκεύασε ένα ελικόπτερο που αποτελείτο από τέσσερις κυρίους έλικες και οκτώ μικρότερους βοηθητικούς. Το ελικόπτερο διέθετε μια μηχανή 120 hp η οποία στη συνέχεια αντικαταστάθηκε από μία πιο ισχυρή μηχανή 180 hp. Το ελικόπτερο αυτό ονομάστηκε Oehmichen No.2 και ήταν το πιο πετυχημένο από το 6 διαφορετικά μοντέλα που είχε κατασκευάσει ο συγκεκριμένος μηχανικός.

Το Oehmichen No.2 πραγματοποίησε πολλές πτήσεις αποδεικνύοντας ότι μια μηχανή κάθετης πτήσης θα μπορούσε να έχει κάποια ευστάθεια και ευκινησία. Τον Απρίλιο του 1924 απονεμήθηκε στον Oehmichen βραβείο από την FAI (Fédération Aéronautique Internationale) για μια επιτυχή πτήση 360 μέτρων. Ήταν το πρώτο βραβείο που απένειμε ο οργανισμός FAI σε ελικόπτερο. Η επιτυχία του Oehmichen No.2 συνεχίστηκε, και ένα μήνα αργότερα, τον Μάιο του 1924, πραγματοποίησε μια κλειστή διαδρομή ενός χιλιομέτρου, μένοντας στον αέρα για 7 λεπτά και 40 δευτερόλεπτα.

2 ΤΕΤΡΑΚΟΠΤΕΡΑ

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΤΕΤΡΑΚΟΠΤΕΡΩΝ

Το τετρακόπτερο αποτελεί μια σχετικά απλή κατασκευή, διαθέτει 4 ηλεκτροκινητήρες με μια έλικα σταθερής γωνίας λεπίδας στον κάθε έναν, σε αντίθεση με τα συμβατικά ελικοπτερα όπου διαθέτουν μια έλικα με λεπίδα μεταβλητής γωνίας. Οι κινητήρες είναι τοποθετημένοι σε ίσες αποστάσεις από το κέντρο μάζας του τετρακοπτέρου, είτε σε μορφή του αγγλικού γράμματος Χ ή σε μορφή σταυρού. Η συμμετρία αυτής της διάταξης έχει ως αποτέλεσμα σχετικά απλές δυναμικές εξισώσεις και περιορισμένα γυροσκοπικά φαινόμενα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των τετρακοπτέρων όπως προαναφέρθηκε είναι ότι συνδυάζουν υψηλή ικανότητα ελιγμών και ακρίβεια κινήσεων γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για ένα μεγάλο εύρος σεναρίων χρήσης [5].



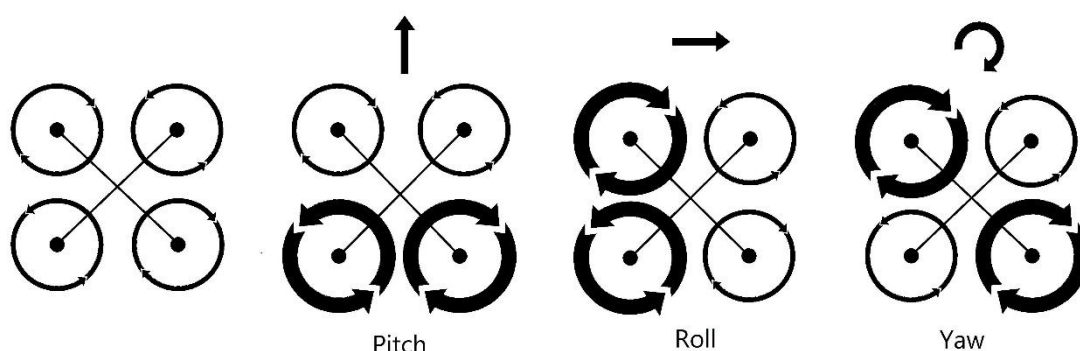
(Σχήμα 2.1) Βασικές διατάξεις τετρακοπτέρων

Το τετρακόπτερο παρουσιάζει επίσης κάποια μειονεκτήματα. Λόγω της παρουσίας 4 ηλεκτροκινητήρων των οποίων οι γωνιακές ταχύτητες αυξο-

μειώνονται συνεχώς παρατηρείται μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Αυτό αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό μειονέκτημα των τετρακοπτέρων λόγω της μεγάλης αύξησης του βάρους και του κόστους των μπαταριών σε σχέση με την ισχύ τους. Άλλα μειονεκτήματά τους είναι ο θόρυβος λειτουργίας τους.

Όπως προαναφέρθηκε, το τετρακόπτερο μπορεί να μετακινηθεί με ιδιαίτερη ευκολία στον χώρο αυξομειώνοντας την γωνιακή ταχύτητα των ηλεκτροκινητήρων ανεξάρτητα μεταξύ τους και συνεπώς την ώθηση που αυτοί παράγουν. Οι κινητήρες χωρίζονται σε ζεύγη ανάλογα με την φορά κίνησης τους. Έτσι οι δυο ηλεκτροκινητήρες που βρίσκονται στον ίδιο άξονα περιστρέφονται δεξιόστροφα (3,4) ενώ οι άλλοι δυο αριστερόστροφα (1,2).

Η δυνατότητα του τετρακοπτέρου να ελέγχει την γωνιακή ταχύτητα κάθε κινητήρα ανεξάρτητα του επιτρέπει να ρυθμίσει τις γωνίες Roll, Pitch, Yaw και να κινηθεί στον χώρο. Για παράδειγμα στην διάταξη "X" όπου πρόκειται και για την πιο συνηθισμένη, η ορθή αιώρηση πραγματοποιείται όταν το άθροισμα των ροπών του τετρακοπτέρου ισούται με μηδέν, όταν δηλαδή όλοι οι ρότορες περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα και το σύνολο της ώσης είναι ίσο με το την δύναμη που ασκεί η βαρύτητα πάνω στο τετρακόπτερο. Σε περίπτωση που η γωνιακή ταχύτητα όλων των ρότορων αυξηθεί ή μειωθεί ίσα τότε αυξάνεται ή μειώνεται αντίστοιχα το ύψος αιώρησης. Το pitch μπορεί να ελεγχθεί με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας των κινητήρων 4, 3 για την κίνηση προς τα εμπρός ή των 2, 1 για την κίνηση προς τα πίσω. Το Roll ελέγχεται με την αύξηση των γωνιακών ταχυτήτων των κινητήρων 1, 4 για την κίνηση προς τα δεξιά και των κινητήρων 2,3 για την κίνηση προς τα αριστερά. Τέλος το Yaw ελέγχεται με την αύξηση των στροφών των κινητήρων 3, 1 για την περιστροφή του τετρακοπτέρου στο άξονα z δεξιόστροφα και των κινητήρων 4, 2 για την αντίθετη περιστροφή [3].

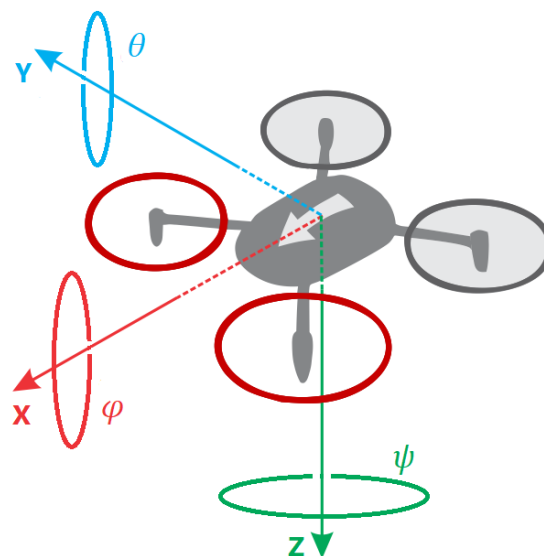


(Σχήμα 2.2) Βασικές κινήσεις τετρακοπτέρου

ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Μαθηματικό Μοντέλο Τετρακοπτήρου

Το quadcopter είναι ένα σύστημα έξι βαθμών ελευθερίας (6 DOF). Οι κινήσεις του περιγράφονται από δώδεκα μεταβλητές κατάστασης. Οι 6 αφορούν την κίνηση του quadcopter στον χώρο και τους ρυθμούς μεταβολής τους. Περιγράφονται από τις μεταβλητές X, Y, Z που δηλώνουν την μετατόπιση του στον τρισδιάστατο χώρο, και τις μεταβλητές u, v, w που περιγράφουν την μεταβολή της μετατόπισης, δηλαδή την ταχύτητα, στον κάθε άξονα. Οι υπόλοιπες 6 αφορούν τον προσανατολισμό και τους ρυθμούς μεταβολής τους δηλαδή την γωνιακή ταχύτητα [3]. Περιγράφονται από τις μεταβλητές Φ, Θ, Ψ που αντιπροσωπεύουν τις γωνίες Euler και τις μεταβλητές p, q, r που περιγράφουν τις μεταβολές αυτών δηλαδή την γωνιακή τους ταχύτητα.

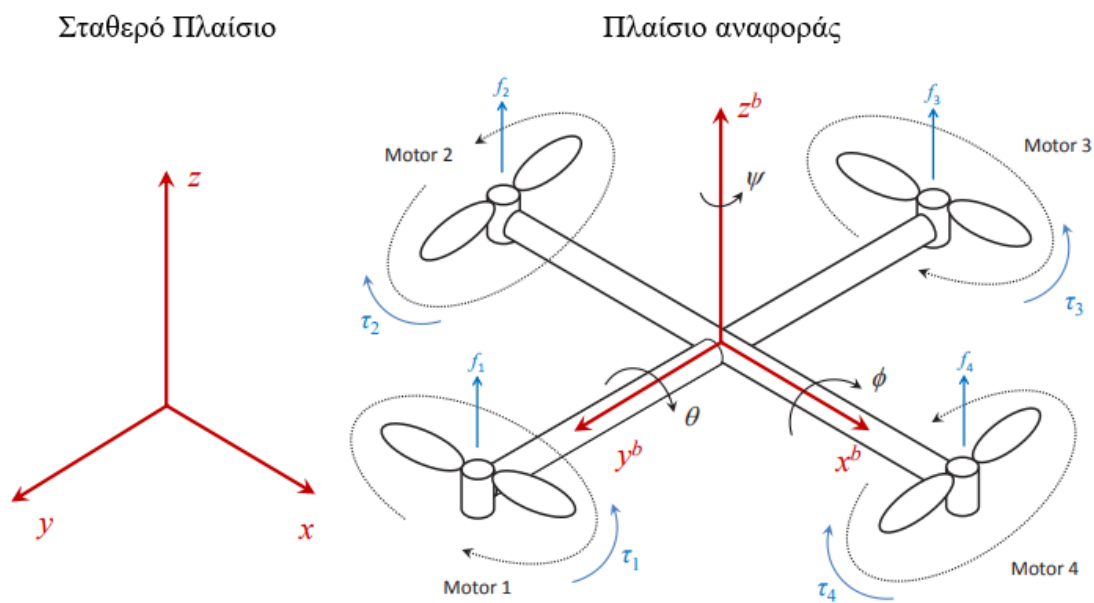


(Σχήμα 2.3) Περιστροφές Euler

- Η γωνία φ γύρω από τον άξονα X ονομάζεται **roll**,
- Η γωνία θ γύρω από τον άξονα Y ονομάζεται **pitch**
- Η γωνία ψ γύρω από τον άξονα Z ονομάζεται **yaw**.

Σύστημα συντεταγμένων

Όταν ένα τετρακόπτερο μετακινείται στον τρισδιάστατο χώρο υπάρχουν δυο διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων. Το πρώτο που το ορίζουμε ως 'b' (πλαίσιο αναφοράς) ορίζεται από το σώμα του τετρακοπτερου. Το δεύτερο σύστημα συντεταγμένων καθορίζεται από την βαρύτητα και αποτελεί το σημείο αναφοράς (σταθερό πλαίσιο) για το τετρακόπτερο. Αυτό μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε μα πρέπει να διατηρηθεί σταθερό μόλις το τετρακόπτερο ξεκινήσει να κινείται. Συνήθως αποτελεί την αρχική του θέση.



(Σχήμα 2.4) Βασικά συστήματα συντεταγμένων τετρακοπτερου [6]

Πίνακες Περιστροφής

Στην γραμμική άλγεβρα για την περιστροφή ενός αντικειμένου στον Ευκλείδειο χώρο χρησιμοποιείται ο πίνακας περιστροφής [4]. Για ένα καρτεσιανό επίπεδο XY η περιστροφή ενός σημείου κατά γωνία Euler θ εκφράζεται ως:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.1}$$

Ορίζουμε ένα διάνυσμα με την μορφή στήλης διανύσματος $\mathbf{v} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ τότε το εκ περιστροφής διάνυσμα (\mathbf{v}^*) που προκύπτει από το γινόμενο $\mathbf{R} \times \mathbf{v}$ είναι :

$$\mathbf{v}^* = \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \end{bmatrix} = \mathbf{R} \times \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.2}$$

Οι νέες συντεταγμένες (x^*, y^*) που προκύπτουν μετά την περιστροφή είναι :

$$x^* = x \times \cos \theta - y \sin \theta \quad \text{Εξ. 2.3}$$

$$y^* = x \times \sin \theta + y \cos \theta \quad \text{Εξ. 2.4}$$

Η περιστροφή ενός αντικειμένου στον τρισδιάστατο ευκλείδειο χώρο προκύπτει από την σύνθεση 3 βασικών περιστροφών γύρω από κάθε άξονα. Θεωρώντας την περίπτωση της περιστροφής γύρω από έναν άξονα x (roll) έχουμε πρακτικά μια περιστροφή δυο διαστάσεων, κατά την οποία αλλάζουν οι συντεταγμένες y και z ενώ παραμένει σταθερή η x. Αυτό μπορεί να μοντελοποιηθεί επεκτείνοντας τον 2x2 πίνακα περιστροφής σε πίνακα 3x3 με την χρήση του μοναδιαίου πίνακα για την τρίτη διάσταση.

Έτσι η γωνία φ γύρω από τον άξονα x ονομάζεται Roll και ορίζεται από τον πίνακα περιστροφής [4]:

$$R_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.5}$$

Αντίστοιχα η γωνία θ γύρω από τον άξονα y ονομάζεται Pitch και ορίζεται από τον πίνακα περιστροφής:

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.6}$$

Τέλος η γωνία ψ γύρω από τον άξονα z ονομάζεται yaw και ορίζεται από τον πίνακα περιστροφής

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.7}$$

Η επιτάχυνση και συνεπώς η κίνηση του τετρακοπτέρου ως προς το σύστημα συντεταγμένων του σταθερού πλαισίου αναφοράς είναι αποτέλεσμα των βαρυτικών δυνάμεων, της παραγόμενης ώσης και της αντίστασης του αέρα. Έτσι η εξίσωση κίνησης έχει ως εξής [6].

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + \mathbf{R}\mathbf{N}^b + \mathbf{F}_D \quad \text{Εξ. 2.8}$$

Όπου έχουμε:

- x, y, z οι συντεταγμένες της θέσης του τετρακοπτέρου (ως προς το σταθερό πλαίσιο)
- m : η μάζα του τετρακοπτέρου
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας
- \mathbf{F}_D : η οπισθέλκουσα δύναμη
- \mathbf{N}^b : το διάνυσμα της παραγόμενης ώσης (ως προς το ακίνητο σύστημα)
- \mathbf{R} : ο πίνακας στροφής

Ο πίνακας στροφής είναι απαραίτητος για την περιγραφή της περιστροφής ενός σώματος και προκύπτει από την σύνθεση των πινάκων περιστροφών γύρω από τους τρεις άξονες $R_x(\varphi)$, $R_y(\theta)$ και $R_z(\psi)$ και έχει ως εξής:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \theta \sin \varphi & \sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \varphi + \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & -\cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix}$$

Εξ. 2.9

Η οπισθέλκουσα \mathbf{F}_D λόγω της τριβής του αέρα, ορίζεται σαν μια δύναμη ανάλογη της ταχύτητας:

$$\mathbf{F}_D = -k_d \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.10}$$

Όπου k_d έχουμε τον συντελεστή τριβής του αέρα. Η ώση f_i που παράγεται από τον ι-οστο κινητήρα δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$f_i = k\omega_i^2, \text{ για } i = 1, \dots, 4, \quad \text{Εξ. 2.11}$$

Όπου k συμβολίζουμε τον συντελεστή ανύψωσης της έλικας και ω_i την γωνιακή ταχύτητα του i -οστού κινητήρα. Συνεπώς στην περίπτωση μας που η ώση παράγεται από τέσσερις κινητήρες δίνετε από την σχέση

$$\mathbf{N}^b = \sum_{i=1}^4 f_i = k \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \end{array} \right] \quad \text{Εξ. 2.12}$$

Η γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης τάσης στον κινητήρα και ορίζεται ως:

$$\omega_i^2 = c_m v_i^2 \text{ για } i = 1, \dots, 4, \quad \text{Εξ. 2.13}$$

Όπου c_m μια σταθερά και v_i^2 είναι η τάση που εφαρμόζεται στον εκάστοτε κινητήρα.

Ενώ είναι βολικό οι γραμμικές εξισώσεις κίνησης να εκφραστούν ως προς το σταθερό πλαίσιο, οι εξισώσεις της περιστροφικής κίνησης είναι χρήσιμο να εκφραστούν ως προς το κινητό σύστημα αξόνων, προκειμένου η οποιαδήποτε περιστροφή του τετρακοπτέρου να εκφράζεται ως προς το κέντρο βάρους του. Για να επιτευχθεί η συσχέτιση αυτή, θα γίνει χρήση των εξισώσεων Euler για την περιγραφή της δυναμικής του στερεού σώματος, που ορίζεται ως εξής (Ο τελεστής \times για δύο διανύσματα δηλώνει ένα κάθετο διάνυσμα σε αυτά):

$$\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) = \boldsymbol{\tau} \quad \text{Εξ. 2.14}$$

Όπου $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ έχουμε τον πίνακα ροπών αδράνειας, $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \omega_y \omega_z]^T$ αποτελεί το διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας, και το $\boldsymbol{\tau} = [\tau_x \tau_y \tau_z]^T$ οπού με την σειρά του αποτελεί το διάνυσμα των εξωτερικών ροπών.

Ένα τετρακόπτερο μπορεί απλά να μοντελοποιηθεί ως ένας σταυρός που αποτελείται από δυο ίσες λεπτές ράβδους. Το κέντρο του σταυρού αποτελεί το κέντρο βάρους και στην κάθε άκρη του βρίσκεται ένας κινητήρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον πίνακα

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.15}$$

I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} , αποτελούν τις ροπές αδράνειας στους άξονες x^b, y^b και z^b αντίστοιχα. Έτσι παίρνει την μορφή:

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_\varphi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (I_{yy} - I_{zz})\omega_y\omega_z \\ (I_{zz} - I_{xx})\omega_x\omega_z \\ (I_{xx} - I_{yy})\omega_x\omega_y \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.16}$$

Συνεπώς οι ροπές των περιστροφών roll και pitch προκύπτουν από βασικές εξισώσεις της μηχανικής.

$$\tau_\varphi = L(f_1 - f_3) = Lk(\omega_1^2 - \omega_3^2) = Lkc_m(u_1^2 - u_3^2) \quad \text{Εξ. 2.17}$$

$$\tau_\theta = L(f_2 - f_4) = Lk(\omega_2^2 - \omega_4^2) = Lkc_m(u_2^2 - u_4^2) \quad \text{Εξ. 2.18}$$

$$\tau_\psi = b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) = bc_m(v_1^2 - v_2^2 + v_3^2 - v_4^2) \quad \text{Εξ. 2.19}$$

Στις παραπάνω σχέσεις το L συμβολίζει την απόσταση του κάθε κινητήρα από το κέντρο του τετρακοπτέρου και το b συμβολίζει τον συντελεστή οπισθέλκουσας της έλικας.

Για την συσχέτιση των γωνιακών ταχυτήτων κάθε έλικας με τις παραγώγους των γωνιών roll, pitch και yaw χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας προβολής \mathbf{Q} :

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \varphi \tan \theta & \cos \varphi \tan \theta \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi / \cos \theta & \cos \varphi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.20}$$

Από τις εξισώσεις 2.8, 2.14 και 2.20 προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις που περιγράφουν το μαθηματικό μοντέλο του τετρακοπτέρου.

$$\dot{x} = v_x \quad \text{Εξ. 2.21}$$

$$\dot{y} = v_y \quad \text{Εξ. 2.22}$$

$$\dot{z} = v_z \quad \text{Εξ. 2.23}$$

$$\dot{v}_x = -\frac{k_d}{m}v_x + \frac{kc_m}{m}(\sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi \sin \theta)(v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + v_4^2) \quad \text{Εξ. 2.24}$$

$$\dot{v}_y = -\frac{k_d}{m}v_y + \frac{kc_m}{m}(\cos \varphi \sin \psi \sin \theta - \cos \psi \sin \varphi)(v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + v_4^2) \quad \text{Εξ. 2.25}$$

$$\dot{v}_z = -\frac{k_d}{m}v_z - g + \frac{kc_m}{m}(\cos \theta \cos \varphi)(v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + v_4^2) \quad \text{Εξ. 2.26}$$

$$\dot{\varphi} = \omega_x + \omega_y(\sin \varphi \tan \theta) + \omega_z(\cos \varphi \tan \theta) \quad \text{Εξ. 2.27}$$

$$\dot{\theta} = \omega_y \cos \varphi - \omega_z \sin \varphi \quad \text{Εξ. 2.28}$$

$$\dot{\omega}_x = \frac{Lkc_m}{I_{xx}}(v_1^2 - v_3^2) - \left(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}}\right)\omega_y\omega_z \quad \text{Εξ. 2.29}$$

$$\dot{\omega}_y = \frac{Lkc_m}{I_{yy}}(v_2^2 - v_4^2) - \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}}\right)\omega_x\omega_z \quad \text{Εξ. 2.30}$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{bkc_m}{I_{zz}}(v_1^2 - v_2^2 + v_3^2 - v_4^2) - \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}}\right)\omega_x\omega_y \quad \text{Εξ. 2.31}$$

ΕΛΕΓΚΤΗΣ PID

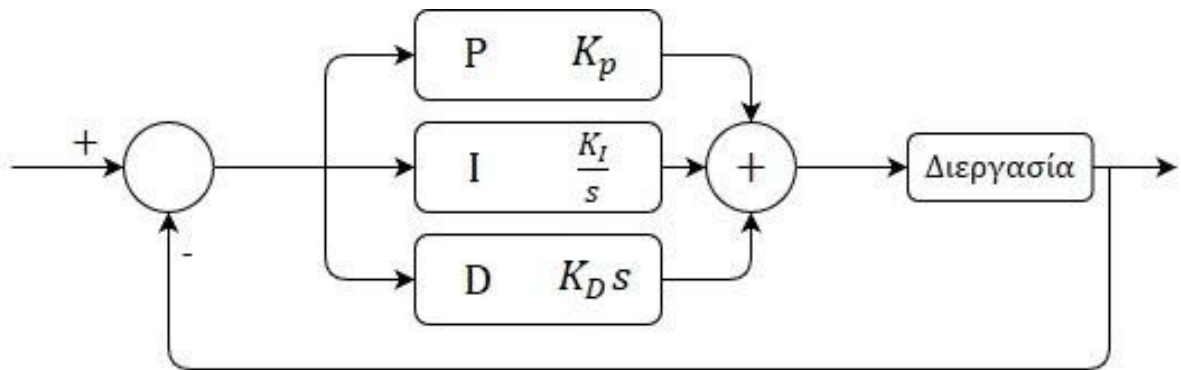
Η επίτευξη της σταθερότητας του τετρακοπτέρου όπως επίσης και οι κινήσεις του εξαρτώνται από τον έλεγχο των γωνιακών ταχυτήτων των κινητήρων του [7]. Για τον σωστό έλεγχο των κινητήρων χρησιμοποιείται ένα σύστημα κλειστού βρόχου όπου αποτελείται από τρεις συνιστώσες την αναλογική (P), την ολοκληρωτική (I) και την διαφορική (D). Ο ελεγκτής λαμβάνει το σφάλμα ως την διαφορά της επιθυμητής από την πραγματική τιμή, και το μετατρέπει σύμφωνα με τον μαθηματικό τύπο 2.32 στο πεδίο χρόνου. Διαφορετικά, η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή εκφρασμένη στο πεδίο Laplace δίνεται από την σχέση 2.33.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Εξ. 2.32}$$

$$G(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s \quad \text{Εξ. 2.33}$$

Όπου:

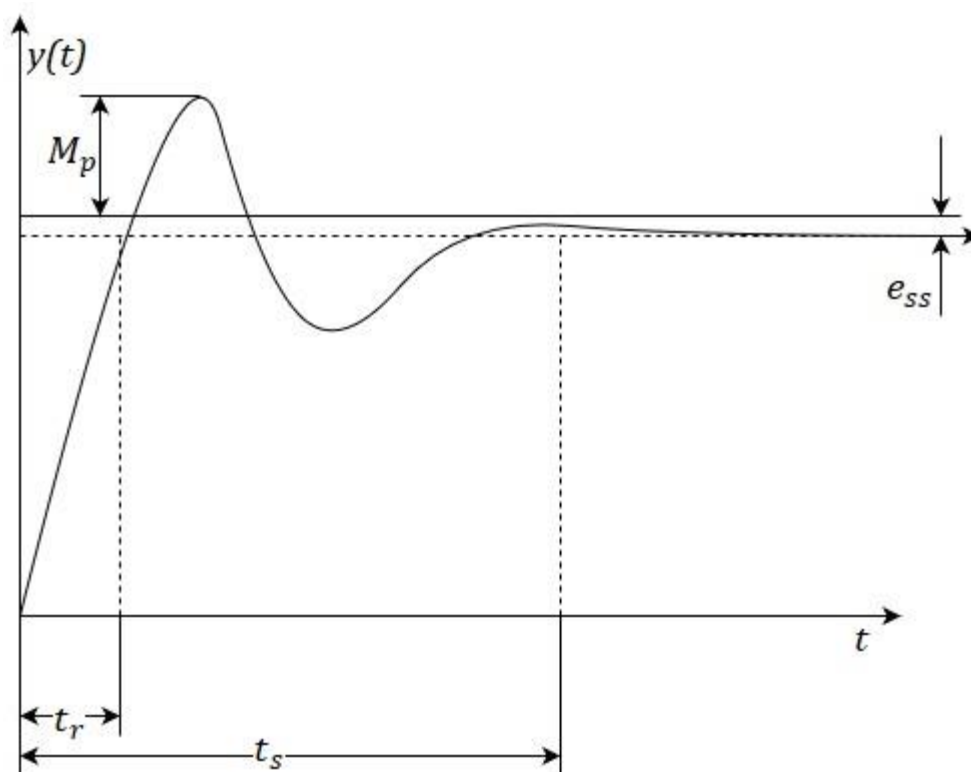
- $u(t)$: η έξοδος του ελεγκτή
- $e(t)$: το σφάλμα
- K_p : το κέρδος αναλογικής συνιστώσας
- K_I : το κέρδος ολοκληρωτικής συνιστώσας
- K_D : το κέρδος διαφορικής συνιστώσας



(Σχήμα 2.5) Μορφή ελεγκτή PID

Κριτήριο για την σωστή λειτουργία του ελέγχου είναι η απόκριση του συστήματος στην τιμή εισόδου. Τον τρόπο δηλαδή με το οποίο η μεταβλητή έφτασε στην τιμή που ορίσαμε αυτό επιτυγχάνεται με την μεταβολή των κερδών

κάθε συνιστώσας. Για την καλύτερη κατανόηση του ελεγκτή και του τρόπου λειτουργίας παρατίθεται το σχήμα 3.6.



(Σχήμα 2.6) Διάγραμμα απόκρισης

Όπου:

- M_p : Η μέγιστη υπερύψωση του συστήματος, το μέγιστο πλάτος της αποβαίνουσας ταλάντωσης
- t_r : Ο χρόνο ανύψωσης,, ο χρόνος δηλαδή που έκανε η μεταβλητή για να φτάσει πρώτη φορά στην επιθυμητή τιμή.
- t_s : Ο χρόνος που απαιτείται μέχρι να σταματήσει η ταλάντωση της τιμής και να παραμείνει σταθερή.
- e_{ss} : Το σφάλμα μόνιμης κατάστασης εφόσον το σύστημα ισορροπήσει σε μια λίγο διαφορετική τιμή από την επιθυμητή

3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως προαναφέρθηκε σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, η σχεδίαση και η κατασκευή ενός τετρακοπτέρου. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού επιλέχθηκε ο δρόμος της κατασκευής ενός με την χρήση 3D εκτυπωτή. Οι απαιτούμενες προδιαγραφές συνοψίζονται παρακάτω.

- Ωφέλιμο φορτίο. Θα πρέπει να φτάνει το ένα κιλό για μελλοντική χρήση
- Ανθεκτικότητα. Το τετρακόπτερο θα πρέπει να υποστεί όσο το δυνατόν μικρότερη ζημία σε περίπτωση πτώσης.
- Αξιοπιστία. Η αστοχία των ηλεκτρονικών διατάξεων θα πρέπει να ελαχιστοποιείται
- Ενσωματωμένος υπολογιστής. Το τετρακόπτερο θα πρέπει να φέρει ένα ενσωματωμένο σύστημα στο οποίο θα εκτελούνται οι αλγόριθμοι μηχανικής όρασης και πλοήγησης όπως επίσης θα έχει αρκετή επεξεργαστική ισχύ για να αναλάβει τυχόν μελλοντικές εφαρμογές.

Μια άλλη προϋπόθεση στην οποία δόθηκε μεγάλη σημασία στο στάδιο του σχεδιασμού ήταν να είναι αρθρωτό (modular). Αυτή η ιδιότητα της κατασκευής εξυπηρετεί δυο σκοπούς. Αρχικά δίνει την δυνατότητα εύκολης παραμετροποίησης της κατασκευής χωρίς εκτεταμένες αλλαγές. Έτσι βασικά χαρακτηριστικά του μπορούν να αλλάξουν όπως η απόσταση μεταξύ των κινητήρων κατασκευάζοντας και αντικαθιστώντας μόνο τα εξαρτήματα που είναι αναγκαία. Δεύτερον σε περίπτωση πτώσης ενός τέτοιου αρθρωτού τετρακοπτέρου, η βλάβη θα περιοριστεί και θα είναι εύκολα επιδιωρθωσιμη με την αντικατάσταση μόνο των εξαρτημάτων που χρειάζονται.

Βάση όλων των προηγούμενων θα πρέπει να επιλεγθεί ο σωστός συνδυασμός ηλεκτροκινητήρων, μπαταριών, ενσωματωμένου συστήματος και άλλων εξαρτημάτων. Επίσης καθώς ο σκελετός του τετρακοπτέρου θα κατασκευαστεί με την χρήση 3D εκτυπωτή θα πρέπει να επιλεγθεί ένα υλικό που θα τηρεί όσο το δυνατόν καλύτερα τις προδιαγραφές κόστους - αντοχής που έχουν τεθεί.

ΥΛΙΚΟ

Ελεγκτής πτήσης

Ο Ελεγκτής πτήσης (flight controller, FC) αποτελεί τον εγκέφαλο κάθε UAV. Διαθέτει ένα σύνολο αισθητήρων όπως γυροσκόπιο(α), επιταχυνσιόμετρο(α), βαρόμετρο(α) κ.α. και σύμφωνα με την είσοδό των αισθητήρων και τον σημάτων τηλεκατεύθυνσης είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της θέσης του οχήματος και την διατήρηση σταθερού προσανατολισμού (π.χ. γωνίες roll, pitch, yaw). Το τετρακόπτερο όπως προαναφέρθηκε είναι ένα υποοδηγούμενο σύστημα (underactuated system) με 4 οδηγούς που πρέπει να ελέγξουν 6 βαθμούς ελευθερίας. Το γεγονός αυτό, το καθιστά ως ένα δυναμικώς ασταθές σύστημα. Επομένως η ύπαρξη ενός κλειστού βρόγχου ανατροφοδότησης είναι απαραίτητη έτσι ώστε να μπορεί το τετρακόπτερο να ίπταται χωρίς προβλήματα [5].

Η Διατήρηση του ζητούμενου προσανατολισμού επιτυγχάνεται με την χρήση του ελεγκτή PID τις αρχές λειτουργίας του οποίου αναλύσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Ο έλεγχος της θέσης του τετρακοπτήρου πραγματοποιείται από έναν άλλον αλγόριθμο που τρέχει παράλληλα και ονομάζεται Extended Kalman Filter η EKF. Ο αλγόριθμος αυτός δέχεται τα δεδομένα απ' όλους τους διαθέσιμους αισθητήρες όπως IMU (inertia measurement unit), GNSS, LIDAR, Optical Flow sensors και τα συνδυάζει ώστε να εκτιμήσει με όσο το δυνατόν μικρότερο σφάλμα την θέση του αεροσκάφους.

Ο flight controller που επιλέχθηκε είναι ο Pixhawk 1. Αποτελεί έναν flight controller γενικής χρήσης που βασίζεται στην αρχιτεκτονική FMUv3 η οποία αποτελεί υλισμικό ανοικτής πηγής. Λειτουργεί το σύστημα αυτόματου πιλότου PX4 πάνω στο λειτουργικό NuttX το οποίο πρόκειται για ένα λειτουργικό σύστημα που τρέχει σε πραγματικό χρόνο (real time operating system, RTOS) [7][9]. Ο συνδυασμός αυτών των δυο καθιστά το Pixhawk έναν flight controller που δίνει μεγάλη ευελιξία σε ένα μεγάλος εύρος εφαρμογών αφού δίνεται η δυνατότητα σύνδεσης του με μια πληθώρα περιφερειακών όπως π.χ. με ενσωματωμένο υπολογιστή όπως επίσης και η δυνατότητα παραμετροποίησης κάθε ρύθμισης του συστήματος (EKF).

Τεχνικά Χαρακτηριστικά ελεγκτή πτήσης

CPU	32bit STM32F427 168 MHz
Αισθητήρες	<ul style="list-style-type: none"> • ST Micro L3GD20H γυροσκόπιο • ST Micro LSM303D επιταχυνσιόμετρο, μαγνητόμετρο • Invensense MPU 6000 3-axis επιταχυνσιόμετρο, μαγνητόμετρο • MEAS MS5611 βαρόμετρο
Συνδεσιμότητα	<ul style="list-style-type: none"> • 5x σειριακές • 2x CAN • I2C • and 6.6V ADC είσοδοι • Είσοδος σήματος PPM

Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ελεγκτή πτήσης

Ενσωματωμένος υπολογιστής

Ο Ενσωματωμένος υπολογιστής (Companion computer) αποτελεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του τετρακοπτέρου, και αποτελεί την πλατφόρμα πάνω στην οποία τρέχουν ο αλγόριθμός οπτικοαδρανειακής οδομετρίας.

Για την εφαρμογή μας επιλέχθηκε το Nvidia Jetson Nano καθώς διαθέτει μεγάλη επεξεργαστική ισχύ (472-GFLOPS) [10]. Όπως επίσης η παρουσία CUDA cores είναι ένα προσόν που θα επιτρέψει υψηλές αποδόσεις με μελλοντικές εφαρμογές αλγορίθμων Νευρωνικών Δικτύων.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά ενσωματωμένου υπολογιστή

GPU	128-core Nvidia Maxwell GPU
CPU	Quad-core ARM® A57
Μνήμη RAM	4 GB 64-bit LPDDR4
Τροφοδοσία	5v 2amp

Πίνακας 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά ενσωματωμένου υπολογιστή

Κάμερα

Χρησιμοποιήθηκε η Raspberry Pi Cam V2. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή είναι αφενός το μικρό μέγεθος και βάρος, αφετέρου επειδή συνδέεται μέσω της θύρας CSI του Raspberry Pi. Η τελευταία, συνδέεται απευθείας με την GPU, με αποτέλεσμα να μην καταναλώνονται πόροι της CPU.

Τεχνικά χαρακτηριστικά κάμερας	
Βάρος	~3g
Ανάλυση αισθητήρα	3280 x 2464p
Αισθητήρας	Sony IMX219
Επιφάνεια αισθητήρα	3.68 x 2.76 mm (4.6 mm διαγώνιος)
Μέγεθος pixel	1.12μm x 1.12μm
Focal length	3.15 mm
Οριζόντιο Field of View	160 μοίρες

(Πίνακας 3.3) Τεχνικά χαρακτηριστικά κάμερας

Κινητήρες

Τα τετρακόπτερα διαθέτουν τέσσερις ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless direct current motor, BDCM). Οι BDCM αποτελούν τον τύπο που χρησιμοποιείται πιο συχνά σε εφαρμογές Πολυκόπτερων, διαφέρουν από τους συμβατικούς Brushed DC ηλεκτροκινητήρες στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μεταφορά τάσης στους οπλισμούς τους. Στους πρώτους πραγματοποιείται ηλεκτρονικά ελεγχόμενα, ενώ στον δεύτερο γίνεται με μηχανικό εναλλάκτη. Αυτό κάνει τους δεύτερους να έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής καθώς ο εναλλάκτης φθείρεται με την χρήση.

Πάρα την απαίτηση σύνθετων ηλεκτρονικών διατάξεων για τον έλεγχο των BLDCM προτιμώνται διότι παρουσιάζουν μια πληθώρα προτερημάτων όπως καλύτερο λόγο ροπής βάρους, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, λιγότερες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, κ.α.

Κατά την διαδικασία επιλογής ηλεκτροκινητήρα πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιιο παράγοντες όπως το βάρος, η ώση που παράγει ο κινητήρας, το μέγεθος ελίκων που είναι εφικτό να συνδυαστεί, η κατανάλωση και η τιμή KV. Η τιμή KV δηλώνει τον αριθμό στροφών (Revolutions per minute,, RPM) που μπορεί να επιτύχει ο ηλεκτροκινητήρας ανά Volt χωρίς φορτίο. Όπου V η τάση τροφοδοσίας του ηλεκτροκινητήρα [4]

$$RPM = KV \times V \quad \text{Εξ. 3.1}$$

Πολύ σημαντικός παράγοντας για την επιλογή του ηλεκτροκινητήρα όπως προαναφέρθηκε αποτελεί η τιμή ώσης. Γενικός κανόνας θεωρείται πως η μέγιστη παραγόμενη ώση όλων των ηλεκτροκινητήρων πρέπει να ισούται ή να είναι μεγαλύτερη του διπλάσιου βάρους του τετρακοπτέρου.

$$T_t \geq 2 \times M \quad \text{Εξ. 3.2}$$

Όπου T_t , η μέγιστη ώση που παράγεται από το σύνολο των ηλεκτροκινητήρων και M το βάρος του τετρακοπτέρου έτοιμο προς πτήση.

Σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή για έλικα 11x4.7 η μέγιστη παραγόμενη ώση ανά ηλεκτροκινητήρα είναι 1450g. Συνεπώς,

$$T_t = 5800g \quad \text{Εξ. 3.3}$$

Συνεπώς θα πρέπει το συνολικό βάρος του τετρακοπτέρου να μην υπερβαίνει τα 2900g. Οι ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι SUNNYSKY V3508 700KV.

Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρων	
Βάρος	105g
KV(RPM/V)	700
Μέγιστη Ισχύς	380W
Μέγιστη ένταση	30A
Πόλοι	14
Στάτορες	14
Μέγιστη ονομαστική τάση	14.8V

(Πίνακας 3.4) Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρων

Ηλεκτρονικοί ελεγκτές ταχύτητας

Ο Ηλεκτρονικός ελεγκτής ταχύτητας (Electronic Speed Controller – ESC) χρησιμοποιείται ως οδηγός των BDCM. Για την μετατροπή του συνεχές ρεύματος της μπαταρίας σε τρεις φάσεις ο ESC παράγει ψηφιακούς παλμούς. Η

συχνότητα των παλμών καθορίζει την ταχύτητα περιστροφής των ηλεκτροκινητήρων και ελέγχεται από ένα σήμα αναφοράς που προέρχεται από τον flight controller.

Βασικό κριτήριο για την επιλογή ESC ήταν το μέγιστο ρεύμα που μπορούν να δεχθούν. Προτιμήθηκαν επίσης ESC που διέθεταν το λειτουργικό BLHELI_S. Το BLHELI_S αποτελεί ουσιαστικά ένα λειτουργικό σύστημα που τρέχει στον 8bit επεξεργαστή του κάθε esc. Επιτρέπει την παραμετροποίηση πτυχών λειτουργίας τους, όπως την κατεύθυνση περιστροφής του κινητήρα, ενεργητική μείωση στροφών του ηλεκτροκινητήρα για πιο άμεσο και ακριβή έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής, όπως επίσης και ορισμός μιας ανώτατης θερμοκρασίας του ESC για την προστασία του.

Επιλέχθηκε το Racerstar SPROG X 35A BLheli-S

Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονικού ελεγκτή ταχύτητας

Σταθερή ένταση	35A
Μέγιστη ένταση	40A
Τάση εισόδου	2-6S (7.4-22.2V)
Βάρος	4g

(Πίνακας 3.5) Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονικών ελεγκτών ταχύτητας

Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης

Βασικός αισθητήρας σε κάθε σύγχρονο UAV αποτελεί ο πομποδέκτης παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού γεωγραφικής θέσης (Global navigation satellite system, GNSS). Χρησιμοποιήθηκε το BN-880 με ενσωματωμένο μαγνητόμετρο. Διαθέτει μέγιστη ακρίβεια θέσης της τάξης των 3m, μπορεί επίσης να υπολογίσει την ταχύτητα και την επιτάχυνση με ακρίβεια 0.1m/s και 0.1m/s² αντίστοιχα. Παρόλα αυτά η ακρίβεια όλων των πομποδεκτών GNSS επηρεάζονται από ένα σφάλμα που είναι ανάλογο με τον αριθμό των δορυφόρων με τους οποίους έχουν συνδεθεί. Θόρυβο στο σήμα μπορεί να προκαλέσει ακόμα η θέση των δορυφόρων με τους οποίους έχει συνδεθεί όπως επίσης και άλλες πηγές ηλεκτρομαγνητικών συχνοτήτων κοντά στο φάσμα συχνοτήτων λειτουργίας του GNSS (1575.42 Mhz) [11].

Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος εντοπισμού θέσης

Τροφοδοσία	DC 2.8V~6.0V Typical:3.3V ή 5.0V
Υποστηριζόμενα συστήματα GNSS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS και SBAS
Βάρος	10g
Συνδεσιμότητα	Σειριακή

(Πίνακας 3.6) Τεχνικά χαρακτηριστικά πομποδέκτη GNSS

Μπαταρία

Η μπαταρία παρέχει όλη την απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται το τετρακόπτερο. Οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την επιλογή μπαταρίας είναι το βάρος, το μέγεθος και πιο σημαντικά ρυθμός αποφόρτισης της και η μέγιστη τάση ρεύματος. Ο ιδανικότερος τύπος μπαταρίας για την εφαρμογή αυτή είναι ο Li-Po ή μπαταρία τύπου ιόντων πολυμερούς. Οι μπαταρίες αυτού του τύπου είναι σχετικά ενεργειακά πυκνές και μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλους ρυθμούς αποφόρτισης [4].

Η σημαντικότερη παράμετρος που πρέπει να υπολογισθεί είναι η ένταση του ρεύματος που θα πρέπει να παρέχει η μπαταρία. Έτσι έχουμε:

- Το Jetson Nano χρειάζεται μέγιστη τροφοδοσία ρεύματος 2A
- Ο κάθε κινητήρας σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή, χρειάζεται μέγιστη ένταση ρεύματος 18A συνεπώς αθροιστικά οι τέσσερις κινητήρες χρειάζονται 72A
- Ο Flight Controller χρειάζεται κατά προσέγγιση 0,5A

Η ένταση ρεύματος της μπαταρίας δίνεται υπό την μορφή συντελεστή, σε σχέση με το φορτίο της,

$$I = C_r \times C \quad \text{Εξ. 3.4}$$

Όπου C_r [1/h] ο συντελεστής έντασης και C [Ah] το φορτίο της μπαταρίας

Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια έγινε η επιλογή δυο μπαταριών με ονομαστική τάση 7.4V και χωρητικότητα 5500 mAh. Οι παραπάνω θα συνδεθούν σε σειρά ώστε να επιτύχουμε ονομαστική τάση 14.8V με χωρητικότητα 5500 mAh και συντελεστή αποφόρτισης 50 C, η οποία θεωρητικά μπορεί να παρέχει συνεχόμενο ρεύμα έντασης 275A.

Συνδυασμός Πομπού-Δέκτη

Για την επικοινωνία του τετρακόπτερου με τον τηλεχειρισμό επιλέχθηκε ο συνδυασμός πομπού και δέκτη της FrSKY. Στο κομμάτι του δέκτη χρησιμοποιήθηκε ο FrSKY D8R-II plus λόγω της δυνατότητας του να δεχθεί δεδομένα τηλεμετρίας και να τα στείλει πίσω στον πομπό. Ο δέκτης συνδέεται με τον Flight Controller μέσω PPM σήματος και του μεταδίδει το αποκωδικοποιημένο σήμα που έχει σταλεί από τον χειριστή. Στο κομμάτι του Πομπού χρησιμοποιήθηκε ο FrSKY DJT. Επιλέχθηκε ο πομπός αυτός καθώς έχει την δυνατότητα να λάβει τα δεδομένα τηλεμετρίας από το τετρακόπτερο. Τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης επικοινωνούν στα 2.4 Ghz και χρησιμοποιούν το ACCST (Advanced Continuous Channel Shifting Technology) ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που δημιουργήθηκε από την FrSKY με σκοπό να κάνει την επικοινωνία πομπού και δέκτη πιο αξιόπιστη και με μικρότερο latency.

Έλικες

Ένα τετρακόπτερο παράγει ώση από την περιστροφή των τεσσάρων ηλεκτροκινητήρων, οι οποίοι με την σειρά τους περιστρέφουν την έλικα που είναι στερεωμένη σε κάθε έναν από αυτούς.

Υπάρχουν δυο βασικοί παράμετροι που διαμορφώνουν τα χαρακτηριστικά μιας έλικας. Η διάμετρος της και η κλίση των πτερυγίων της. Για παράδειγμα μια έλικα 11 x 4.7 έχει διάμετρο περιστροφής 11 ίντσες και βήμα 4.7 ίντσες. Δυο έλικες ίσης διαμέτρου σε με διαφορετικό βήμα όταν περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα δεν παράγουν την ίδια ώση. Η έλικα με το μεγαλύτερο βήμα παράγει περισσότερη. Αντίστοιχα δυο έλικες με ίσο βήμα και διαφορετική διάμετρο, όταν περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα η έλικα με την μεγαλύτερη διάμετρο παράγει περισσότερη ώση. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η ενέργεια που καταναλώνει ο ηλεκτροκινητήρας αυξάνεται αναλογικά με την διάμετρο της έλικας και με το βήμα της.

Για την επιλογή της κλίσης της έλικας πρέπει να ληφθούν οι παρακάτω παράγοντες:

- Έλικες με μικρότερο βήμα δημιουργούν περισσότερη ροπή και προσδίδουν καλύτερη σταθερότητα στο τετρακόπτερο.
- Έλικες με μεγαλύτερο βήμα ωθούν περισσότερο όγκο αέρα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στροβιλισμοί και να προκαλούν ταλαντώσεις στο τετρακόπτερο.

Σχετικά με το μήκος του έλικα, ισχύουν οι παρακάτω συνθήκες:

- Μεγαλύτερο μήκος οδηγεί σε μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής του έλικας με τον αέρα και επομένως καλύτερη αποδοτικότητα. Αυτό σημαίνει, όμως, και μεγαλύτερη αδράνεια κίνησης με αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης του κινητήρα.
- Έλικα με μικρότερο μήκος είναι πιο εύκολο να σταματήσει ή να επιταχύνει, ενώ καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια [4][5].

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΚΕΛΕΤΟΥ (FRAME)

Έχοντας επιλέξει τα βασικά εξαρτήματα που θα χρησιμοποιηθούν στο τετρακόπτερο έχουν αμέσως τεθεί κάποιες κατευθυντήριες γραμμές όσον αναφορά τα βασικά χαρακτηριστικά της κατασκευής του σκελετού. Έγινε προσπάθεια για την μελέτη και τον σχεδιασμό ενός αρθρωτού σκελετού κατασκευασμένου με 3D εκτυπωτή ικανό να στεγάσει όλα τα προαναφερθέντα εξαρτήματα, που είναι αναγκαία για την εφαρμογή μας και να μην ξεπερνάει τα 2900g.

Σχεδιασμός Τετρακοπτέρου

Πολύ σημαντικός παράγοντας αποτελεί η ομοιόμορφη κατανομή βάρους καθώς το αντίθετο θα προκαλούσε την άνιση καταπόνηση των ηλεκτροκινητήρων, των ESC, καθώς θα υποβάθμιζε και τα χαρακτηριστικά πτήσης (π.χ. ευστάθεια, αυτονομία πτήσης ευκινησία κτλ.). Το Τετρακόπτερο σχεδιάστηκε ώστε να είναι αρθρωτό. Το χαρακτηριστικό αυτό φάνηκε ιδιαίτερα σημαντικό αφού καθιστούσε δυνατές μικρές μεταβολές στον σχεδιασμό μεμονωμένων κομματιών χωρίς να επηρεάζεται ο καθολικός σχεδιασμός. Επιπρόσθετα σε περίπτωση ατυχήματος η βλάβη μπορεί να περιοριστεί και να αντικατασταθούν μόνο τα κομμάτια που έχουν επηρεαστεί από αυτό.



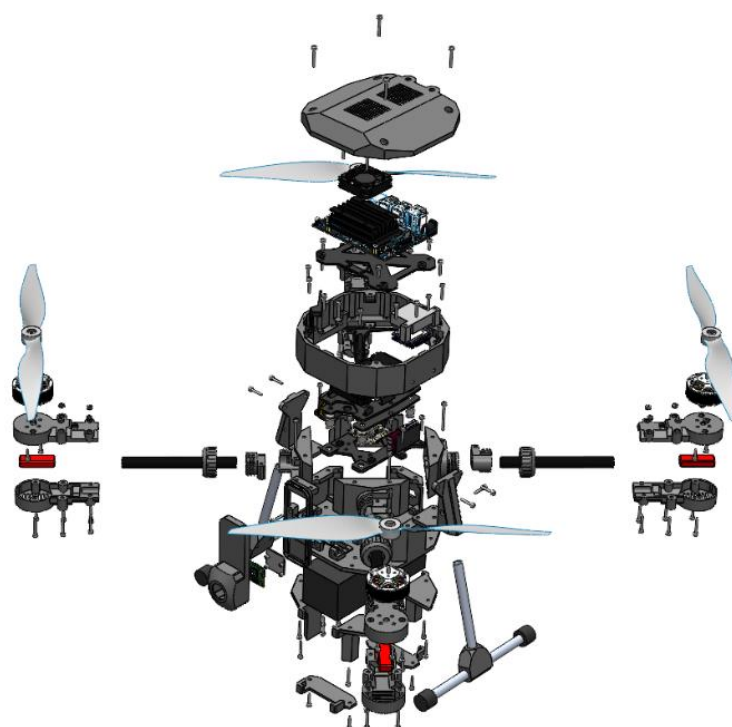
(Σχήμα 3.1) Τρισδιάστατο μοντέλο τετρακοπτέρου

Επιπλέον αναγκαία αποδείχθηκε η ανάγκη του Flight controller να απομονωθεί από κραδασμούς του σκελετού. Αυτό συμβαίνει διότι τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε αυτούς. Η ύπαρξη δυνατών κραδασμών έχει τα παρακάτω αποτελέσματα [12]:

- Λιγότερο αποδοτική πτήση με μειωμένη αυτονομία.
- Υπερθέρμανση των κινητήρων.
- Σφάλματα στην εκτίμηση θέσης που μπορούν να οδηγήσουν στην απομάκρυνση του τετρακοπτερου.
- Αυξημένη καταπόνηση σκελετού.

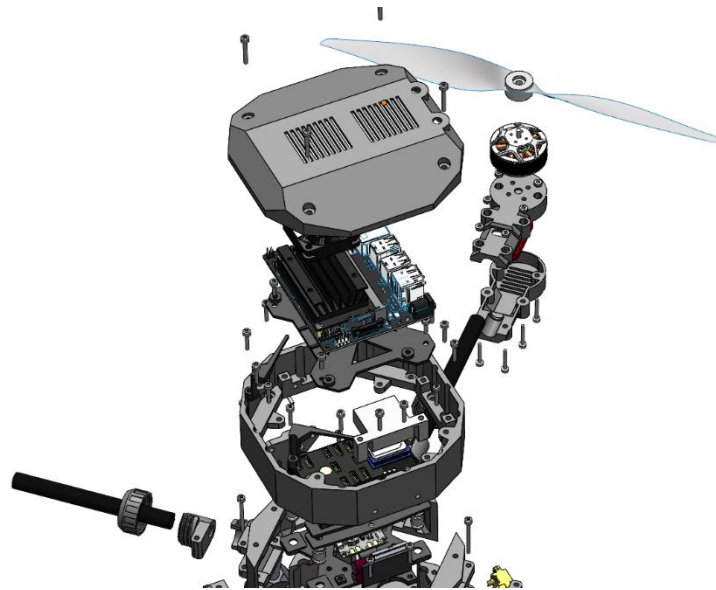
Σε περιπτώσεις με πολύ ισχυρούς κραδασμούς μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο γνωστό ως sensor clipping κατά το οποίο το σήμα που δέχονται οι αισθητήρες ξεπερνάνε την μέγιστη επιτρεπτή τιμή τους.

Για την αντιμετώπιση αυτού σχεδιάστηκε μια διάταξη σύμφωνα με την οποία ο Flight controller απομονώνεται από τους κραδασμούς μέσω τεσσάρων αποσβεστήρων σιλικόνης.



(Σχήμα 3.2) Απεικόνιση τετρακοπτερου 1

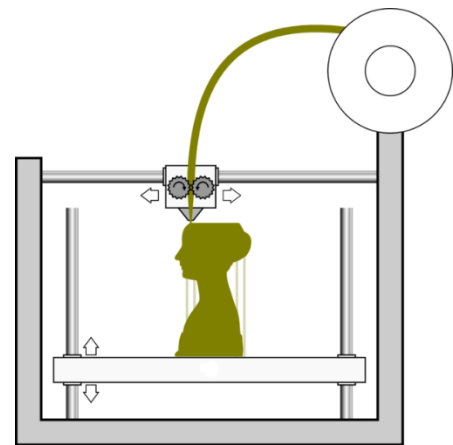
Τα άκρα του τετρακοπτερου σχεδιάστηκαν ώστε να διπλώνουν και τα σκέλη προσγείωσης να αποσπώνται για την εύκολη μετακίνηση του τετρακοπτερου.



(Σχήμα 3.3) Απεικόνιση τετρακοπτέρου 2

3Δ εκτύπωση

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, ή προσθετικής κατασκευής, είναι διαδικασία κατασκευής ενός τρισδιάστατου αντικειμένου από ένα τρισδιάστατο ψηφιακό αρχείο (CAD) [13]. Ο 3Δ εκτυπωτής λειτουργεί με τις ίδιες αρχές μιας κλασικής εργαλειομηχανής CNC. Η κεφαλή κινείται εντός ενός καρτεσιανού επιπέδου, προσαρμοσμένη σε αυτήν βρίσκεται ένα ακροφύσιο το οποίο τροφοδοτείται με ένα νήμα (πλαστικού συνήθως) και θερμαίνεται σε μια, από τον χρήστη καθορισμένη θερμοκρασία. Μέσω αυτού του ακροφύσιου γίνεται στρώση - στρώση εναπόθεση υλικού (όπως πλαστικού). Τα στρώματα αυτά συγχωνεύονται χάρη στην υψηλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ενιαίου στερεού αντικειμένου [14].



Εικόνα 3.4 Τρόπος λειτουργίας 3Δ εκτυπωτή [42]

Κύριος τύπος υλικών που χρησιμοποιείται στην 3Δ εκτύπωση είναι τα πολυμερή [15], λόγω του ότι μπορούν να παραχθούν και να επεξεργαστούν σχετικά εύκολα, παρόλα αυτά με την ανάπτυξη της τεχνολογίας 3Δ εκτύπωσης έχουν ενταχθεί και πιο εξωτικά υλικά όπως μέταλλα και κεραμικά. Αυτή

η πληθώρα υλικών όπως και ταχύτητα μετάβασης από το στάδιο σχεδιασμού στο στάδιο παραγωγής καθιστά τις προσθετικές διαδικασίες παραγωγής και ειδικά της 3D εκτύπωσης ένα πολύ ισχυρό εργαλείο παραγωγής και ιδιαίτερα παραγωγής πρωτοτύπων [13].

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι τρεις συνηθέστεροι και πιο εμπορικά διαδεδομένοι τύποι νημάτων [16].

- **PETG.** Πρόκειται μια τροποποιημένη έκδοση τереφθαλικής Πολυαιθυλενογλυκόλης που χρησιμοποιείται κατά κύρια βάση στην κατασκευή μπουκαλιών νερού. Αποτελεί υλικό με αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες αφού Παρουσιάζει ικανοποιητική αντοχή σε κρούση χωρίς να είναι εύθρυπτο. Μπορεί επίσης να παραμορφωθεί ελαστικά προτού σπάσει. Διαθέτει πολύ καλές θερμικές ιδιότητες με την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης κυμαίνεται στους 80°C και ξεκινάει να λιώνει στους 200°C-230°C. Επίσης λόγω της ομοιόμορφης ψύξης μετά το πέρας της εκτύπωσης το παραχθέν εξάρτημα παραμορφώνεται αμελητέα η και καθόλου, επιτρέποντας άριστη συναρμογή του στην κατασκευή. Αρνητικό αποτελεί πως η επιφάνεια του είναι σχετικά μαλακή κάτι που το καθιστά επιρρεπή σε επιφανειακή φθορά. Για την εκτύπωση του απαιτούνται σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (230-250 °C) σε σχέση με αλλά υλικά όπως PLA. Ακόμα για ικανοποιητική πρόσφυση στην επιφάνεια εκτύπωσης η τελευταία πρέπει να θερμαίνεται (75-90 °C) .
- **PLA.** Το πολυγαλακτικό οξύ είναι το πιο διαδεδομένο υλικό στον τομέα της 3D εκτύπωσης. Αυτό γιατί απαιτεί σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες εκτύπωσης επίσης η επιφάνεια εκτύπωσης δεν χρειάζεται να είναι θερμαινόμενη. Το κόστος του είναι μικρό. Παράγεται από σοδιές ζαχαροκάλαμων και καλαμποκιού κάτι που το κάνει φιλικό προς το περιβάλλον διότι ουσιαστικά η πρώτη ύλη προέρχεται από μια ανανεώσιμη πηγή. Οι επιφάνειες των κατασκευασμένων από PLA εξαρτημάτων είναι πιο σκληρές συγκριτικά με αυτές του PETG. Επίσης λόγω της σχετικά μικρής διαφοράς θερμοκρασίας εκτύπωσης και περιβάλλοντος η παραμόρφωση κατά την σταδιακή ψύξη είναι και εδώ μικρή. Δεν παρουσιάζει καλή αντοχή στην ελαστική παραμόρφωση και η σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων εκτύπωσης δεν είναι τόσο ομογενοποιημένη και ισχυρή όσο του PETG και του ABS. Όπως προαναφέρθηκε οι μπορεί να εκτυπωθεί με σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες εξώθησης (180-210°C) και επιφάνειας εκτύπωσης (0-50 °C).
- **ABS.** Το ακρυλονιτριλίο-βουταδιενίο-στυρολίο είναι ένα από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήθηκε σε βιομηχανικές εφαρμογές 3D εκτύπωσης. Αποτελεί ακόμα ένα από τα πιο δημοφιλή υλικά χάρης στο χαμηλό του κόστος και στις άριστες μηχανικές του ιδιότητες. Πέρα των

εφαρμογών προσθετικής κατασκευής το ABS είχε εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία στα είδη οικιακών συσκευών, στα είδη ηλεκτρονικών υπολογιστών κ.α. Οι υψηλές θερμοκρασίες εκτύπωσης ομογενοποιούν το παραγόμενο εξάρτημα και έτσι δεν παρατηρείται το φαινόμενο αποκόλλησης των στρωμάτων εκτύπωσης. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης κυμαίνεται στους 100°C και συνεπώς παρουσιάζει αρίστη αντοχή στην θερμότητα. Τα αρνητικά αυτού του υλικού επικεντρώνονται στην δυσκολία εκτύπωσης του. Απαιτούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες τόσο εξώθησης (220-250 °C) αλλά και επιφάνειας εκτύπωσης (95-110 °C). Έντονο είναι και το φαινόμενο παραμόρφωσης κατά την διάρκεια της σταδιακής ψύξης του αντικειμένου. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου απαιτείται ο εγκλεισμός της περιοχής εκτύπωσης εντός θαλάμου του οποίου η θερμοκρασία θα μπορεί να ρυθμιστεί. Τα παραπάνω καθιστούν το ABS ιδιαίτερα δύσκολο.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις βασικές μηχανικές ιδιότητες και προτάσεις για ρυθμίσεις εκτύπωσης των τριών υλικών, όπως αυτές εμφανίζονται στο δελτίο τεχνικών χαρακτηριστικών του κατασκευαστή [17].

Ιδιότητες υλικού

	ABS	PETG	PLA
Ροή Υλικού κατά την τήξη	21 g/10min	11 g/10min	6 g/10min
Θερμοκρασία τήξης	210-240°C	>220°C	150-180°C
Πυκνότητα	1.05 g/m^3	1.27 g/m^3	1.24 g/m^3
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης	92°C	85°C	55-60°C
Θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης	85°C	70°C	-

(Πίνακας 3.7) Γενικές ιδιότητες υλικών

Ρυθμίσεις εκτύπωσης

	ABS	PETG	PLA
Θερμοκρασία ακροφύσιου	230-255°C	230-255°C	185-215°C
Θερμοκρασία επιφάνειας εκτύπωσης	100°C	60-80°C	0-45°C
Ενεργός ανεμιστήρας εκτύπωσης	Ναι (μέχρι και 100%)	Ναι (μέχρι και 100%)	Ναι (μέχρι και 100%)
Πάχος Στρώματος Εκτύπωσης	0.05-0.35mm	0.08-0.30mm	0.05-0.35mm
Ταχύτητα εκτύπωσης	40-100mm/s	40-120mm/s	40-150mm/s

(Πίνακας 3.8) Ρυθμίσεις εκτύπωσης εκάστοτε υλικού

Μηχανικές ιδιότητες υλικών

Δοκιμή εκφυλισμού, (100% infill)						
	ABS		PETG		PLA	
	Κάθετη Ε-κτύπωση, (Z-Άξον.)	Οριζόντια Εκτύπωση, (X,Y-Άξον.)	Κάθετη Ε-κτύπωση, (Z-Άξον.)	Οριζόντια Εκτύπωση, (X,Y-Άξον.)	Κάθετη Ε-κτύπωση, (Z-Άξον.)	Οριζόντια Εκτύπωση, (X,Y-Άξον.)
Τάση εκφυλισμού (MPa)	16.2	23.8	15.9	27.1	16.2	23.8
Δύναμη κατά το σπάσιμο (Mpa)	16.2	23.6	15.9	25.2	16.2	23.6
Επιμήκυνση στην μέγιστη δύναμη (%)	3.9	5.3	4.7	11.0	3.9	5.3
Μέγιστη Επιμήκυνση (%)	3.9	13.3	4.7	9.5	11.0	13.3
Συντελεστής ελαστικότητας (%)	428.7	453.8	341.7	360.4	307.8	453.8
Δοκιμή Κρούσης, (100% infill)						
Αντοχή κρούσης (J/cm^2)	4.61	1.70	1.25	1.94	4.61	1.70
Ενέργεια κρούσης (mJ)	1900	700	566	766	1900	700
Δοκιμή Κάμψης, (100% infill)						
Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	1490	2157	1628	1932	1490	2157
Μέγιστη τάση κάμψης (MPa)	23.48	63.64	38.79	72.26	23.48	63.64
Μόνιμη Παραμόρφωση (mm)	11	10.5	9	10.5	11	10.5

(Πίνακας 3.9) Μηχανικές ιδιότητες υλικών

Πρέπει να σημειωθεί πως οι δοκιμές τάσης πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο ASTM D638. Οι δοκιμές κρούσης πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο ISO 179 και οι δοκιμές κάμψης με την ISO 178. Όλα τα δείγματα εκτυπώθηκαν με βάση τις βέλτιστες ρυθμίσεις εκτύπωσης που ορίζει ο κατασκευαστής για το εκάστοτε υλικό [17].

Λαμβάνοντας υπόψιν τα προτερήματα και μειονεκτήματα κάθε υλικού. Όπως επίσης και τα δεδομένα χαρακτηριστικά μηχανικών ιδιοτήτων καταλήγουμε πως το PETG είναι το κατάλληλο για την κατασκευή του τετρακοπτερου αφού φαίνεται να συνδυάζει την εύκολη εκτύπωση του PLA και τις καλές μηχανικές ιδιότητες του ABS.

4 ROBOTIC OPERATING SYSTEM (ROS)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ROS αποτελεί επι της ουσίας λογισμικό σχεδιασμένο για εφαρμογές ρομποτικής [18]. Εμπεριέχει όλες τις δυνατότητες που θα περίμενε κανείς από ένα λειτουργικό σύστημα. Όπως χαμηλού επιπέδου χειρισμό συσκευών, επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών διεργασιών, διαχείριση πακέτων κτλ. Ακόμα περιλαμβάνει εργαλεία και βιβλιοθήκες για την σύνταξη και εκτέλεση κώδικα σε ένα μεγάλο εύρος συσκευών. Μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ένα ολοκληρωμένο προγραμματιστικό πλαίσιο για την ανάπτυξη εφαρμογών ρομποτικής. Το ROS βασίζεται πάνω σε μία αρχιτεκτονική γράφων δικτύου peer-to-peer και οι διεργασίες εντός αυτού επικοινωνούν μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας του. Δεν τρέχουν κατά κύρια βάση σε πραγματικό χρόνο αλλά υπάρχει η δυνατότητα ενσωμάτωσης κώδικα πραγματικού χρόνου. Πρέπει να σημειωθεί πως το ROS είναι Open-Source και υποστηρίζει μια πληθώρα γλωσσών προγραμματισμού όπως C++, C, python, java κτλ. Άλλα βασικά προτερήματα του ROS είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης κώδικα στην έρευνα και ανάπτυξη εφαρμογών ρομποτικής. Έτσι το ROS αποτελεί ένα περιβάλλον το οποίο επιτρέπει την εκτέλεση και την μεταξύ επικοινωνία διεργασιών οι οποίες έχουν αναπτυχθεί ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι διεργασίες αυτές μπορούν να συνδυαστούν σε πακέτα τα οποία μπορούν εύκολα να κοινοποιηθούν, να διανεμηθούν και να μεταφερθούν σε repositories από όπου μπορούν να εξετασθούν και να βελτιωθούν από ένα ακόμα μεγαλύτερο κοινό.

Όπως προαναφέρθηκε το ROS σχεδιάστηκε με γνώμονα την αρχή του ανοικτού κώδικα ώστε οι χρήστες να μπορούν να επιλέξουν οι ίδιοι βιβλιοθήκες και εργαλεία ανάπτυξης επιτρέποντας τους να αναπτύξουν με μεγαλύτερη ευκολία λογισμικό που θα καλύπτει τις ανάγκες τους. Το ROS μπορεί να παρομοιαστεί με ένα υδραυλικό σύστημα του οποίου οι σωλήνες συνδέουν τις διεργασίες μεταξύ τους με πολύ λίγους περιορισμούς. Πέρα από ένα «υδραυλικό δίκτυο» το ROS διαθέτει και ένα σύνολο εργαλείων ανάπτυξης.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΡΑΦΩΝ

Οι διεργασίες του ROS παρουσιάζονται ως κόμβοι (nodes) σε ένα δίκτυο γράφων συνδεδεμένες μεταξύ τους με μονοπάτια που ονομάζονται topics. Οι κόμβοι (nodes) του ROS μπορούν να ανταλλάξουν μηνύματα μεταξύ τους μέσω των topics. Η διεργασία που τα επιτρέπει όλα αυτά, καταγράφοντας και ονομάζοντας όλα τα nodes, ονομάζεται ROS MASTER. Αφού τα nodes έχουν συνδεθεί επικοινωνούν μόνο μεταξύ τους και όχι μέσω του ROS MASTER. Ο τελευταίος περιέχει τον server παραμέτρων, ένα κατάλογο ο οποίος ουσιαστικά διαθέτει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους ρυθμίσεων που χρειάζεται ο κάθε node για να λειτουργήσει.

Nodes

Κάθε node αναπαριστά μια διεργασία που εκτελείται εντός του γράφου του ROS. Κάθε node έχει ένα όνομα το οποίο δηλώνεται στο ROS MASTER κατά την εκκίνηση. Πολλά nodes με διαφορετικά ονόματα μπορούν να λειτουργήσουν με διαφορετικά namespace. Τα nodes αποτελούν τον κορμό του ROS. Έχουν την δυνατότητα να δέχονται και να στέλνουν μηνύματα από και σε άλλα nodes. Όπως επίσης να ζητάνε ο ένας στον άλλον συγκεκριμένες ενέργειες.

Topics

Τα topics αποτελούν ονοματισμένους διαύλους επικοινωνίας μέσω των οποίων τα nodes στέλνουν και δέχονται μηνύματα. Για να δεχτεί ο node 1 ένα συγκεκριμένο μήνυμα από ένα node 2 πρέπει ο node 2 να κάνει publish στο topic και ο node 1 subscribe σε αυτό. Το περιεχόμενο των topic μπορεί να είναι δεδομένα ενός αισθητήρα, εντολές σε έναν ελεγκτή κινητήρα ή ενεργοποιητή (actuator).

Services

Πρόκειται για μια απλή διεργασία που μπορεί να εκτελέσει ένα node και αποφέρει ένα μόνο αποτέλεσμα. Λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με τα topics. Παράδειγμα service αποτελεί η λήψη καρέ από μία κάμερα.

ΕΡΓΑΛΕΙΑ

Τα εργαλεία που συμπεριλαμβάνει το ROS διευκολύνουν σημαντικά την ανάπτυξη εφαρμογών. Αυτά επιτρέπουν το visualization και την αποθήκευση δεδομένων, την εύκολη περιήγηση στα πακέτα του ROS, την δημιουργία scripts κ.α. Αυτά τα εργαλεία έχουν την ίδια αρχιτεκτονική όπως κάθε άλλος κώδικας ROS με την διαφορά ότι λειτουργούν χωρίς να εξαρτούνται από το hardware και τον κώδικα της εκάστοτε εφαρμογής. Πρόκειται δηλαδή για robot-agnostic εργαλεία. Τα παρακάτω αποτελούν τα πιο χρήσιμα και αυτά με τα οποία θα ασχοληθούμε.

Rosbag

Είναι ένα εργαλείο γραμμής εντολών το οποίο έχει την δυνατότητα καταγραφής όλων ή μόνο κάποιων topic που δηλώνει ο χρήστης. Αυτό εξυπηρετεί στην μετέπειτα ανάλυση του κώδικα ώστε να μην είναι αναγκαίο να επαναλαμβάνεται η εκτέλεση του στο robot αυτό κάθε αυτό

Rosbash

Πρόκειται και αυτό για ένα εργαλείο της γραμμής εντολών το οποίο επεκτείνει τις δυνατότητες της. Εμπεριέχει εργαλεία όπως το roscd, roscp, rosls, κ.α τα οποία λειτουργούν όπως οι εντολές cd, cp, ls αντίστοιχα με την μόνη διαφορά πως αντί για την διαδρομή ενός πακέτου είναι αναγκαίο μόνο το όνομα του.

Catkin

Το Catkin αποτελεί το εργαλείο που κάνει build τα πακέτα του ROS. Έχει αντικαταστήσει το rosbld. Βασίζεται στο CMake.

Roslaunch

Το roslaunch είναι το εργαλείο το οποίο δίνει την δυνατότητα εκκίνησης nodes τόσο τοπικά όσο και απομακρυσμένα δηλαδή σε άλλες συσκευές. Επίσης θέτει τις απαραίτητες παραμέτρους στον ROS parameter server. Τα αρχεία αυτού του εργαλείου χρησιμοποιούν XML και μπορούν να αυτοματοποιηθούν σύνθετες εκκινήσεις που συμπεριλαμβάνουν πολλά nodes με πολλές παραμέτρους. Ένα script roslaunch μπορεί να εκκινήσει ένα άλλον script roslaunch.

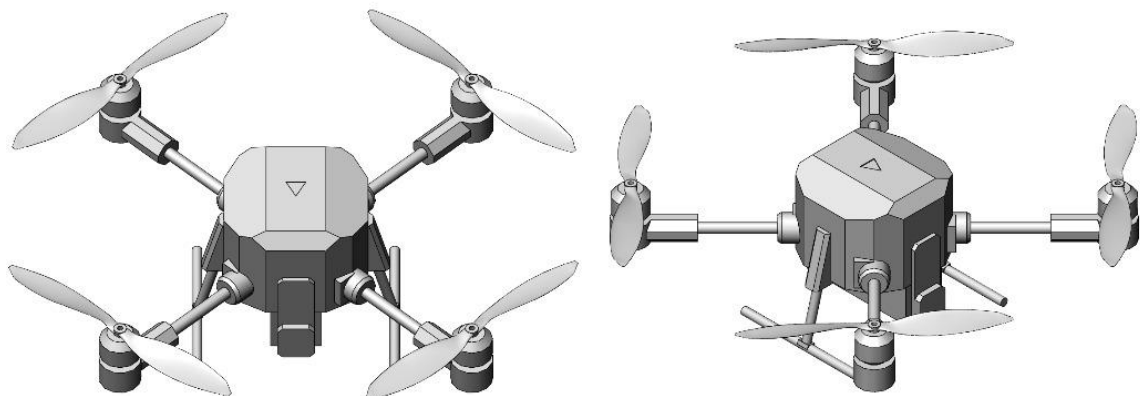
Rviz

Ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία του ROS είναι το Rviz. Έχει την δυνατότητα να κάνει visualize με διάφορους τρόπους μια πληθώρα δεδομένων (point cloud, οδομετρία, κτλ.) σε τρισδιάστατο χώρο. Είναι επίσης αρκετά παραμετροποιήσιμο

GAZEBO SIMULATOR

Πρόκειται για έναν 3d robotics simulator ανοικτού κώδικα. Χρησιμοποιεί την μηχανή OpenGL για τα γραφικά και την ODE για τα physics [19]. Υποστηρίζει την προσομοίωση μιας πληθώρας εξαρτημάτων αισθητήρων και ελεγκτών πλήρως συμβατοί με πακέτα του ROS. Συμπεριλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος έτοιμων οχημάτων όπως UAV πολυκόπτερα, UAV σταθερού πτερυγίου, τροχοφόρα και ερπιστριοφόρα οχήματα, ακόμα και ρομποτικούς βραχίονες. Διαθέτει ακόμα μεγάλη ποικιλία σε κόσμους. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν την εκτέλεση ρεαλιστικών σεναρίων κάτι που επιτρέπει τον σχηματισμό μιας πιο ολοκληρωμένης άποψης για την σωστή λειτουργία του αναπτυσσόμενου συστήματος.

Ο Gazebo Simulator δίνει την δυνατότητα εισαγωγής σε αυτόν μοντέλα κόσμων και οχημάτων που έχουν δημιουργηθεί από τον χρήστη. Παρακάτω θα αναλυθούν τα στάδια εισαγωγής του τετρακοπτέρου της παρούσας εργασίας.



(Σχήμα 4.1) Απλοποιημένο σχέδιο τετρακοπτέρου

Αρχικά πρέπει να δημιουργηθεί ένα ψηφιακό τρισδιάστατο σχέδιο (stl) του τετρακοπτέρου. Το Solidworks Assembly που έχει ήδη δημιουργηθεί είναι πολύ σύνθετο και περιέχει πολλά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά και εσωτερικά εξαρτήματα που δεν είναι αναγκαία για την προσομοίωση. Έτσι δημιουργήθηκε ένα Assembly με τα βασικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού, τις πραγματικές διαστάσεις του τετρακοπτέρου, δηλαδή απαλείφοντας κάθε τι που δεν είναι αναγκαίο όπως για παράδειγμα οι γρίλιες εξαερισμού που βρίσκονται στην κορυφή του.

Παρατηρείται πως χρησιμοποιήθηκαν μόνο πέντε κομμάτια σε αυτό το Assembly, το σώμα του τετρακοπτέρου και οι έλικες. Το Gazebo για τον ορισμό των μοντέλων του χρησιμοποιεί αρχεία της μορφής .sdf. Τα αρχεία αυτά περιέχουν ένα σύνολο συνδέσμων, αρθρώσεων, μοντέλων collision, και plugins. Η δυσκολία της δημιουργίας των αρχείων αυτών είναι ανάλογη με την πολυπλοκότητα των μοντέλων [20]. Πιο αναλυτικά:

Links

Τα links [21] περιέχουν τις βασικές φυσικές ιδιότητες των επιμέρους μερών ενός μοντέλου. Αυτό μπορεί να αποτελεί μια ρόδα, έναν έλικα, έναν ρομποτικό βραχίονα κτλ. Είναι σημαντικό για την επίτευξη μέγιστης απόδοσης ο αριθμός των links να παραμένει όσο το δυνατόν μικρότερος. Στο τετρακόπτερο της παρούσας εργασίας υπάρχουν 6 links. Πρώτο link η base_link όπως συχνά ονομάζεται αποτελεί το κύριο σώμα του μοντέλου στο οποίο συνδέονται μέσω του joint τα υπόλοιπα. Τα 4 links αποτελούνται από τους έλικες και ένα για το IMU (inertial measurement unit). Η θέση των link δηλώνεται με την μορφή σημείου καρτεσιανών συντεταγμένων με αρχή των αξόνων που ορίζεται από τον χρήστη και στην περίπτωση μας πρόκειται για το σημείο Origin του Assembly του Solidworks. Ένα link μπορεί να περιέχει κάποια από τα παρακάτω στοιχεία:

- **Collision**: Το στοιχείο collision καθορίζει την γεωμετρία που χρησιμοποιεί το μοντέλο μας για να ανιχνεύει την σύγκρουση του με άλλα μοντέλα του κόσμου. Μπορεί να αποτελείται από ένα απλό γεωμετρικό στερεό (π.χ. κύλινδρος) ή ένα πιο σύνθετο mesh που θα χρησιμοποιεί περισσότερους επεξεργαστικούς πόρους. Στην εφαρμογή μας χρησιμοποιούμε γεωμετρικά στερεά. Ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο για το σώμα του τετρακοπτέρου και έναν κύλινδρο για κάθε μία έλικα. Στο link του IMU δεν χρησιμοποιείται το στοιχείο του collision καθώς αφενός βρίσκεται μέσα στα όρια του collision του base_link και αφετέρου δεν υπάρχει η ανάγκη να έχει δεδομένα collision.

- **Visual:** Το στοιχείο visual χρησιμοποιείται για να απεικονίσει τα 3D μοντέλα των links. Στην περίπτωση μας πρόκειται για τα 3D αρχεία του τετρακοπτέρου και των ελίκων. Ένα link μπορεί να περιέχει κανένα, ένα ή και περισσότερα στοιχεία αυτού του είδους.
- **Inertial:** Το στοιχείο αυτό περιγράφει τις δυναμικές ιδιότητες κάθε link. Περιέχει στοιχείο όπως η μάζα και ο πίνακας περιστροφικής αδράνειας. Ένα θετικό στοιχείο της σχεδίασης του μοντέλου στο Solidworks και η εξαγωγή του μέσω αυτού είναι πως ο πίνακας περιστροφικής αδράνειας μπορεί να υπολογιστεί αυτοματοποιημένα χρησιμοποιώντας τα στοιχεία μάζας που εισάγονται από τον χρήστη.
- **Sensor:** Ένας αισθητήρας ουσιαστικά που συλλέγει δεδομένα για την χρήση τους από ένα plugin. Σε ένα link δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό αισθητήρων που περιέχει αλλά μπορεί να μην περιέχει και κανένα.
- **Light:** δίνεται επίσης η δυνατότητα εισαγωγής ανεξάρτητων πηγών φωτός προσαρμοσμένες σε ένα link και μπορούν να είναι καμία, μία ή περισσότερες.

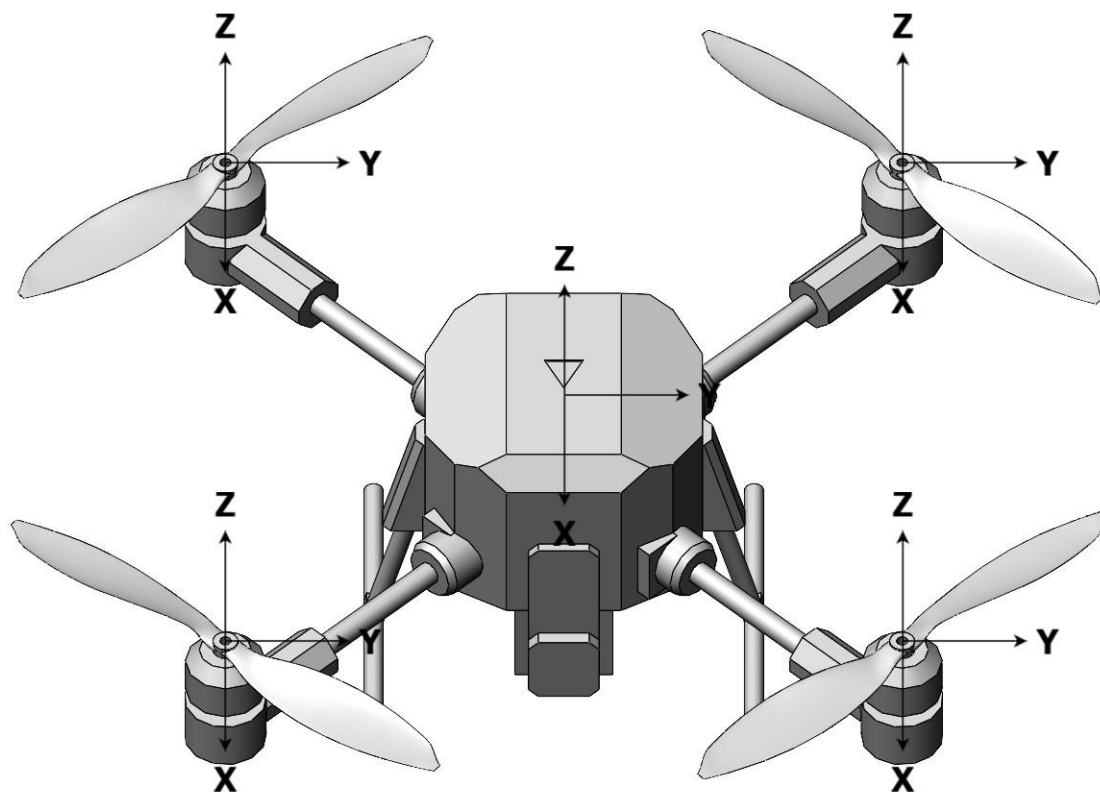
Joints

Ένα joint ή σύνδεσμος συνδέει δυο links μεταξύ τους. Καθορίζεται η σχέση parent-child ανάμεσα στα δυο link όπως και το είδος του συνδέσμου. Υπάρχουν τέσσερα είδη συνδέσμων

- **Revolute** ή περιστροφικοί. Σε αυτήν την περίπτωση το child link περιστρέφεται γύρω από ένα άξονα καθορισμένο από τον χρήστη πάντα συνδεδεμένο με τον parent link. Το εύρος περιστροφής μπορεί να είναι περιορισμένο ή και όχι. Στην εφαρμογή του τετρακοπτέρου γίνεται χρήση αυτού του τύπου συνδέσμου αφού οι έλικες περιστρέφονται.
- **Prismatic** αποτελεί έναν σύνδεσμο κύλισης όπου το εύρος κίνησης καθορίζεται από μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή.
- **Fixed** πρόκειται για έναν σύνδεσμο με κανέναν βαθμό ελευθερίας.
- **Screw** επιτρέπει μόνο έναν βαθμό ελευθερίας και τον συνδυασμό περιστροφικής και γραμμικής κίνησης.
- **Ball and socket** όπως δηλώνει και το όνομα πρόκειται για έναν σύνδεσμο που προσομοιώνει τον βαθμό ελευθερίας κινήσεων που προσφέρει ένας σύνδεσμος μπάλας και υποδοχής

Έχοντας αναλύσει τις έννοιες των στοιχείων και των παραμέτρων των Link και joint επόμενο βήμα είναι η δημιουργία ενός αρχείου sdf που να περιέχει τα παραπάνω δεδομένα. Για την αυτοματοποίηση της Διαδικασίας γίνεται χρήση ενός εργαλείου ανοικτού κώδικα που λειτουργεί σε συνεργασία με το

Solidworks, το Solidworks URDF Exporter [23]. Αρχικά γίνεται ο ορισμός των συστημάτων συντεταγμένων κάθε link όπως επίσης και των αξόνων αναφοράς. Έπειτα για κάθε link θα πρέπει να οριστούν κάποιοι παράμετροι όπως το όνομα του συνδέσμου (joint) ανάμεσα στο parent link και child link το σύστημα συντεταγμένων και ο άξονας αναφοράς που ορίστηκε για το κάθε link όπως επίσης και ο τύπος του συνδέσμου στην συγκεκριμένη περίπτωση revolute (περιστροφική) για κάθε έλικα και για το IMU.



(Σχήμα 4.2) Συστήματα συντεταγμένων links

Τέλος, έρχεται το στάδιο του export όπου γίνεται ο υπολογισμός των αδρανειακών πινάκων κάθε link του μοντέλου όπως και ο ορισμός της μάζας τους. Επίσης γίνεται ο αυτοματοποιημένος ορισμός, όπως προαναφέρθηκε, των καρτεσιανών συντεταγμένων των child links με βάση την αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων του μοναδικού parent link του τετρακοπτερου, του base link. Ο exporter παράγει τα απαραίτητα αρχεία stl, τα οποία λειτουργούν ως το visual στοιχείο κάθε link, και του αρχείου urdf το οποίο θα μετατραπεί σε sdf με την εξής εντολή σε terminal ubuntu

```
gz sdf -p /my_urdf.urdf > /my_sdf.sdf
```


Το αρχείο sdf περιέχει όλες τις πληροφορίες για την τοποθεσία των link σχετικά με το σύστημα αναφοράς, τα μοντέλα collision, τα visual μοντέλα (αρχεία stl) και τον τύπο των joints.

Για την ολοκλήρωση του sdf αρχείου μένει να συμπεριληφθούν να plugins του μοντέλου. Τα plugins αποτελούν στοιχεία του gazebo που επεκτείνουν την χρησιμότητα των μοντέλων και είναι αυτά που συνδέουν όλη την πλατφόρμα του ROS με το Gazebo. Στο μοντέλο του τετρακοπτέρου υπάρχουν κάποια plugins που είναι αναγκαία για την λειτουργικότητα αυτού στο πλαίσιο του simulator και την σύνδεση του με το λειτουργικό του εικονικού flight controller. Χρησιμοποιούνται plugins για τα παρακάτω στοιχεία του τετρακοπτέρου.

Κινητήρας

Το plugin `libgazebo_motor_model.so` αναλαμβάνει την προσομοίωση των χαρακτηριστικών του κινητήρα και περιλαμβάνει κάποιες παραμέτρους. Λόγω του ότι δεν υπάρχει ακριβής καταγραφή του plugin δεν είναι ξεκάθαρη η λειτουργία όλων των παραμέτρων. Πιο σημαντικές είναι η φορά περιστροφής (<turningDirection>), η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα (<maxRotVelocity>) και δυο ακόμα που έχουν να κάνουν με τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των ελίκων. Ο τρόπος υπολογισμού τους μπορεί να κατανοηθεί μέσα από τον ορισμό τους στον πηγαίο κώδικα [22]. Πρόκειται για τις παραμέτρους <motorConstant> και <momentConstant>. Στον πηγαίο κώδικα της προσημείωσης του flight controller για το Gazebo (https://github.com/PX4/sitl_gazebo/blob/master/src/gazebo_motor_model.cpp) στην γραμμή 194 φαίνεται πως ο υπολογισμός του thrust (ώσης) γίνεται με τον παρακάτω τύπο

$$\text{force} = \text{real motor velocity} * \text{real motor velocity} * \text{motor constant} \quad \text{Εξ. 4.1}$$

Γνωρίζοντας πως σύμφωνα με το βασικό μοντέλο φυσικής της έλικας :

- ρ , αποτελεί την πυκνότητα του αέρα (kgm^{-3})
- T , η ώση που παράγεται από την έλικα (N)
- Q , η ροπή που παράγεται από τον έλικα (Nm)
- P , η απαιτούμενη ισχύς για την περιστροφή του έλικα (W)
- n , ο ρυθμός περιστροφής της έλικας (στροφές ανά δ.) και ω , η γωνιακή ταχύτητα της έλικας (rad/s)

- u_0 , η ταχύτητα με την οποία η έλικα κινείται κατά μήκος του άξονα που διέρχεται από τον άξονα περιστροφής της (m/s)
- D , η διάμετρος της έλικας (m)

Για την προσομοίωση των δυνάμεων και ροπών στο τετρακόπτερο πρέπει να είναι γνωστή η μεταβολή του T και του Q σύμφωνα με το n . Αυτό επιτυγχάνεται με τις παρακάτω διαστατές παραμέτρους.

- $J = u_0/Dn$, Ο λόγος προώθησης της έλικας
- $C_T = T/\rho n^2 D^4$, ο συντελεστής ώσης
- $C_Q = Q/\rho n^2 D^5$, ο συντελεστής ροπής
- $C_P = P/\rho n^3 D^5$, ο συντελεστής ισχύς

Οι παραπάνω συντελεστές είναι εξαρτώμενοι από το J και από τον σχεδιασμό της έλικας. Για τον υπολογισμό της ώσης και της ροπής είναι αναγκαία η εύρεση των τιμών $C_T(J)$ και $C_Q(J)$ και έπειτα η χρήση των παρακάτω σχέσεων

$$T = C_T(J) \rho n^2 D^4 \quad \text{Εξ. 4.2}$$

$$Q = C_Q(J) \rho n^2 D^5 \quad \text{Εξ. 4.3}$$

Η σχέση των συντελεστών ισχύς και ροπής για όλες τις προπέλες καθορίζεται από τον τύπο:

$$C_Q = C_P/2\pi \quad \text{Εξ. 4.4}$$

Μετατρέποντας την σχέση 4.1 στο γενικό μοντέλο υπολογισμών έχουμε

$$T = \omega^2 (\text{motor_constant_}) = (2\pi n^2) (\text{motor_constant_}) = C_{T0} \rho n^2 D^4$$

Συνεπώς,

$$\text{motor_constant_} = \frac{C_{T0} \rho D^4}{(2\pi)^2} \quad \text{Εξ. 4.5}$$

Όπου C_{T0} έχουμε τον συντελεστή στατικής ώσης με $J = 0$ και από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως το `motor_constant` έχει σαν μονάδα kgm

Από την γραμμή 233 του ίδιου αρχείου φαίνεται πως το μοντέλο του Gazebo υπολογίζει το μέγεθος της ροπής ως το γινόμενο $moment_constant_ * force$ συμπεραίνεται λοιπόν πως υπολογίζεται σε m. Με βάση λοιπόν την βασική θεωρεία ελίκων έχουμε πως

$$moment_constant_ = \frac{C_{Q0}\rho n^2 D^5}{C_{T0}\rho n^2 D^4}$$

$$moment_constant_ = \frac{C_{Q0}}{C_{T0}} D \quad \text{Εξ. 4.6}$$

Το τετρακόπτερο της παρούσας εργασίας όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιεί έλικες 11x4.7. Στην βάση δεδομένων UIUC [40][41] εντοπίζουμε την έλικα APC Slow Flyer 11x4.7 που έχει τα ίδια βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά έτσι:

$$C_{T0} = 0.098$$

$$C_{P0} = 0.04$$

Θεωρούμε θερμοκρασία $20^\circ C$ οπότε

$$\rho = 1.2041 \text{ kgm}^{-3}$$

Η διάμετρος της έλικας είναι 11 inch ή 280mm, συνεπώς

$$D = 0.28m$$

Εφόσον γνωρίζουμε τα C_{T0} και C_{P0} μπορούμε να υπολογίσουμε το C_{Q0} από την σχέση 4.4

$$C_{Q0} = 0.00637$$

Από την σχέση 4.5 και 4.6 έχουμε :

$$motor_constant_ = 1.8 \times 10^{-5} \text{ kgm}$$

moment_constant_ = 0.0182m

Συμπληρώνοντας τις τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν το gazebo καταφέρνει να δημιουργήσει μια αρκετά ρεαλιστική απεικόνιση του συστήματος ηλεκτροκινητήρας – έλικα.

Σύστημα GNSS

Το `libgazebo_gps_plugin.so` πρόκειται για το plugin του Gazebo που αναλαμβάνει την εξομοίωση του δέκτη GNSS. Περιέχει ένα σύνολο παραμέτρων για να κάνει πιο ρεαλιστικά τα εικονικά δεδομένα του GNSS. Προαιρετικά μπορεί να οριστεί η ακριβής θέση του στο τετρακόπτερο χρησιμοποιώντας link και joint.

IMU

Το τετρακόπτερο διαθέτει επίσης όπως προαναφέρθηκε αισθητήρες όπως IMU, βαρόμετρο και μαγνητόμετρο. Την προσομοίωση τους αναλαμβάνουν τα plugin `libgazebo_imu_plugin.so`, `libgazebo_barometer_plugin.so`, `libgazebo_magnetometer_plugin.so` αντίστοιχα. Τα παραπάνω διαθέτουν και αυτά παραμέτρους που εισάγουν ένα ποσοστό σφάλματος για πιο ρεαλιστική προσομοίωση.

Πρωτόκολλο Mavlink

Το `libgazebo_mavlink_interface.so` αναλαμβάνει την ενσωμάτωση του Gazebo Simulator και του PX4 Firmware με το ROS μέσω του Mavros. Το Mavlink αποτελεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας του flight controller με τα διάφορα περιφερειακά π.χ. (onboard computer). Το Mavros εν' ολίγης πρόκειται για ένα πακέτο ROS το οποίο δέχεται τα μηνύματα του πρωτοκόλλου Mavlink και τα μετατρέπει σε ROS topics. Και σε αυτήν την περίπτωση υπάρχουν κάποιες παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν για την σωστή λειτουργία του προσθέτου. Αρχικά πρέπει να ονομαστούν τα topics των εκάστοτε αισθητήρων μέσω των `<imuSubTopic>`, `<magSubTopic>`, `<baroSubTopic>`. Έπειτα ορίζεται η εικονική διαδρομή της σειριακής θήρας που δημιουργείται για να συνδεθεί το Mavros (`<serialDevice>`) καθώς και το baudrate, την ταχύτητα της σειριακής σύνδεσης δηλαδή σε bit/s (`<baudRate>`).

Κάμερα

Τέλος η εισαγωγή κάμερας στο Gazebo επιτυγχάνεται με το plugin `libgazebo_ros_camera.so`. καθώς τα δεδομένα μιας κάμερας αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του αλγόριθμου. Η εγγύτητα του simulation θα είναι σημαντικά βελτιωμένη εάν τα χαρακτηριστικά της εικονικής κάμερας του Gazebo είναι όσο τον δυνατόν πιο κοντά στα χαρακτηριστικά της πραγματικής κάμερας που έχει χρησιμοποιηθεί στο τετρακόπτερο. Οι παράμετροι που είναι αναγκαίοι στην προκειμένη περίπτωση είναι η ανάλυση της εικόνας `<width> <height>` και το οριζόντιο field of view `<horizontal_fov>`. . Ακόμα πρέπει να οριστεί το όνομα του ROS topic με το οποίο θα εισάγεται η εικόνα στο ROS (`<imageTopicName>` και `<cameraInfoTopicName>`) όπως επίσης και τα καρέ ανά δευτερόλεπτα που θα λαμβάνει η εικονική κάμερα (`<update_rate>` και `<updateRate>`).

5 ΤΕΧΝΗΤΗ ΟΡΑΣΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι άνθρωποι αντιλαμβανόμαστε τον χώρο γύρω μας ως τρισδιάστατο, πράγμα που σημαίνει πως η θέση κάθε σημείου εντός αυτού μπορεί να περιγράφει από τρεις συντεταγμένες (x,y,z) . Η αντίληψη του υπολογιστή για τον χώρο με την χρήση κάμερας οδηγεί στην αναπαράσταση του χώρου ως ενός δισδιάστατου επιπέδου (εικόνα) με δύο συντεταγμένες. Με αυτόν τον τρόπο ένας υπολογιστής δεν αποκτά δεδομένα για την τρίτη κατεύθυνση δηλαδή το βάθος [24]. Το πρόβλημα αυτό έρχεται να καλύψει η τεχνητή όραση (Computer Vision) η οποία αντλεί πληροφορίες για ένα τοπίο αναλύοντας μια εικόνα αυτού που δέχεται από μια κάμερα. Στόχος αυτών των συστημάτων αποτελεί η αναγνώριση διάφορων αντικειμένων – χαρακτηριστικών που παρατηρούνται στο τοπίο αυτό [25]. Η όραση υπολογιστών λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί επιστημονικό πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης το οποίο βρίσκει σήμερα πολλές εφαρμογές στην ιατρική, στην εκπαίδευση, στην αυτόνομη οδήγηση κ.α.

ΟΠΤΙΚΟ - ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΗ ΟΔΟΜΕΤΡΙΑ

Ένας τρόπος απόκτησης δεδομένων για την κατεύθυνση και την ταχύτητα ενός αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο αποτελεί η οπτική οδομετρία (Visual Odometry). Η οπτική οδομετρία χρησιμοποιεί ως μοναδική της είσοδο μια ή περισσότερες κάμερες ενσωματωμένες σε ένα ρομποτικό σύστημα και βασίζεται στην αρχή της τεχνητής όρασης που ονομάζεται «Δομή προερχόμενη από κίνηση» (structure from motion). Πρόκειται ουσιαστικά για την ανάκτηση της σχετικής θέσης της κάμερας από χαρακτηριστικά του περιβάλλοντα χώρου στον οποίο βρίσκεται όπως και την δομή του [26].

Στην περίπτωση της εφαρμογής του τετρακοπτέρου της παρούσας εργασίας θα γίνει χρήση μίας κάμερας. Οι μέθοδοι οι οποίες υπολογίζουν κατά προσέγγιση ταυτόχρονα τόσο την θέση όσο και την δομή της σκηνής μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες [27]. Τις τεχνικές που βασίζονται στην αντιστοίχιση επιλεγμένων χαρακτηριστικών στην περιοχή ενδιαφέροντος

(Feature Based) και στις τεχνικές που βασίζονται στην ένταση της φωτεινότητας όλων των εικονοστοιχείων της περιοχής ενδιαφέροντος (Area Based ή Direct).

Στις Feature Based μεθόδους πραγματοποιείται η εξαγωγή χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος από κάθε καρέ και έπειτα αντιστοιχίζονται με τα χαρακτηριστικά του αμέσως επόμενου. Από αυτήν την αντιστοίχιση και με την χρήση πολικής γεωμετρίας υπολογίζεται η σχετική θέση της κάμερας καθώς και η μορφή της σκηνής κατά προσέγγιση ελαχιστοποιώντας το σφάλμα προβολής της κάμερας. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί ότι βασίζεται στην ιδανική αρχικοποίηση από τον χρήστη, ενώ παράλληλα δεν υπάρχουν μέθοδοι εκτίμησης λανθασμένων αντιστοιχίσεων. Με την χρήση των Direct μεθόδων η θέση της κάμερας και της σκηνής υπολογίζονται άμεσα μέσω των τιμών έντασης φωτεινότητας μέσα στην σκηνή. Η τοπική διαβάθμιση της έντασης φωτεινότητας και το μέγεθος αυτής χρησιμοποιούνται έπειτα για τη μείωση του σφάλματος. Παρότι οι Direct μέθοδοι παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων, είναι υπολογιστικά βαριές.

Βασικός αισθητήρας που επιτρέπει την σταθερή και αξιόπιστη πτήση του τετρακοπτέρου αποτελεί η αδρανειακή μονάδα μέτρησης (IMU) [25]. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις του προβλήματος εκτίμησης της θέσης προσανατολισμού και κίνησης της κάμερας μέσα στον χώρο συνδυάζουν τόσο τα δεδομένα της κάμερας όσο και του IMU. Η προσέγγιση αυτή ονομάζεται Μονόφθαλμη οπτικό – αδρανειακή οδομετρία (monocular visual Inertia Odometry ή VIO για συντομία) [28]. Στους αλγορίθμους VIO λοιπόν η κάμερα λειτουργεί ως αισθητήρας και επιτρέπει την μέτρηση της γεωμετρίας και την εμφάνιση ενός αραιού τρισδιάστατου τοπίου, ενώ η εσωτερική αδρανειακή μονάδα δρα ως ένας ιδιοδεκτικός αισθητήρας που καθιστά παρατηρήσιμη τη μετρική κλίμακα της μονόφθαλμης όρασης [29].

ΦΙΛΤΡΟ KALMAN

Το φίλτρο Kalman αποτελεί σε θεωρητικό επίπεδο έναν εκτιμητή του λεγόμενου γραμμικού προβλήματος ελάχιστων τετραγώνων [30]. Καλείται να υπολογίσει την στιγμιαία κατάσταση ενός γραμμικού δυναμικού συστήματος από μετρήσεις που σχετίζονται γραμμικά με την δυναμική κατάσταση αυτού που διαταράσσεται από «λευκό θόρυβο». Ο εκτιμητής είναι στατιστικά βέλτιστος ως προς οποιαδήποτε συνάρτηση του τετραγώνου του σφάλματος ε-

κτίμησης ($f(\varepsilon^2) = \min$). Πρακτικά το φίλτρο Kalman πρόκειται για ένα εργαλείο που αποσκοπεί στον έλεγχο πολύπλοκων δυναμικών συστημάτων όπως η ναυπηγική, η εκτίμηση θέσης ενός αυτοκινήτου (GNSS), η εξομάλυνση (smoothing) μηνυμάτων (ήχου είτε εικόνας) που έχουν φθαρεί από θόρυβο και γενικά σε οποιαδήποτε τεχνολογική διαδικασία απαιτεί υψηλή ακρίβεια δεδομένων. Παρέχει ένα πλήρη στατιστικό χαρακτηρισμό ενός δυναμικού προβλήματος, λαμβάνει δηλαδή υπόψιν τη διανομή των πιθανοτήτων, για όλες τις μεταβλητές που επιφορτίζεται να υπολογίσει και καθιστά δυνατή την πρόβλεψη της δυναμικής κατάστασης ενός συστήματος λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση όλων των προηγούμενων παρατηρήσεων.

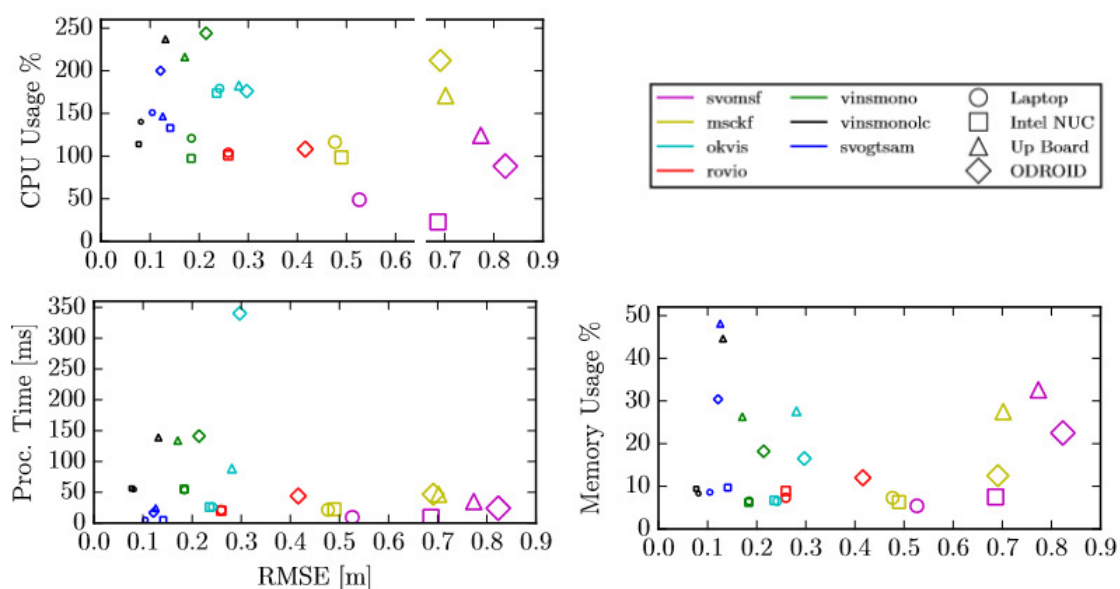
Το φίλτρο Kalman χρησιμοποιείται πρακτικά για τον συνδυασμό μετρήσεων διάφορων αισθητήρων (sensor fusion) επιλύοντας το πρόβλημα της εκτίμησης ενός φυσικού μεγέθους ενός συστήματος (π.χ. θέση τετρακοπτέρου), από τον συνδυασμό διαφορετικών ενδείξεων \mathbf{z}_i $i = 1, 2, 3, \dots, n$ από διάφορους αισθητήρες. Το πρόβλημα αυτό περιπλέκεται αν οι μετρήσεις από τους αισθητήρες δεν έχουν την ίδια αξιοπιστία [31]. Σε περίπτωση που οι μετρήσεις \mathbf{z}_i έχουν την ίδια αξιοπιστία και καθεμία είναι αποτέλεσμα μιας στοχαστικής διαδικασίας (Gaussian process) με μέση τιμή \mathbf{z}_m και διασπορά $\sigma_i = \sigma = \sigma_{\alpha\theta}$, η εκτίμηση της παραμέτρου ενδιαφέροντος x που προκύπτει από όλες τις μετρήσεις \mathbf{z}_i υπολογίζεται εύκολα. Σε περίπτωση όπου οι μετρήσεις \mathbf{z}_i έχουν διαφορετική αξιοπιστία δηλαδή για κάθε \mathbf{z}_i έχουν διαφορετική διασπορά σ_i τότε για την συνολική εκτίμηση της μεταβλητής x , κάθε μέτρηση πρέπει να ληφθεί υπόψιν με διαφορετικό βάρος (weighted mean).

Το εκτεταμένο Kalman Filter εφαρμόζεται σε προβλήματα όπου η διεργασία που πρόκειται να προσεγγιστεί ή/και η διαδικασία της μέτρησης εμπεριέχει μη γραμμικότητες. Η λειτουργία του περιλαμβάνει τη γραμμικοποίηση της εκάστοτε μέσης τιμής και της συνδιακύμανσης [32].

ROVIO (ROBUST VISUAL INERTIA ODOMETRY)

Εισαγωγή

Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι οπτικοαδρανειακής αδράνειας με φαινομενικά παρόμοια αποτελέσματα όταν αυτοί δοκιμάζονται σε υπολογιστές με μεγάλη επεξεργαστική ισχύ. Η αποδοτικότητα του αλγορίθμου όμως παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή του στο τετρακόπτερο λόγω της περιορισμένης επεξεργαστικής ισχύς του Jetson Nano. Χρησιμοποιήθηκε το ROVIO ανάμεσα σε άλλους παρόμοιους αλγορίθμους VIO χάρις στον συνδυασμό χαμηλής χρήσης επεξεργαστή, μνήμης και χαμηλού χρόνου επεξεργασίας [33], όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1. Καθοριστικό παράγοντα αποτέλεσε πως το ROVIO έχει εφαρμοστεί και δοκιμαστεί σε πολλές εφαρμογές, η ανάπτυξη του επίσης είναι ενεργή και αυτό μπορεί να βοηθήσει σε περίπτωση αντιμετώπισης προβλημάτων.



(Σχήμα 5.1) Σύγκριση απόδοσης αλγορίθμων VIO

Το Rovio αποτελεί έναν αλγόριθμο VIO οπου συνδυάζει τα οπτικά δεδομένα μιας κάμερας με τα αδρανειακά δεδομένα ενός IMU μέσω της χρήσης ενός extended Kalman Filter. Αυτό το επιτυγχάνει με την επιλογή περιοχών, στο

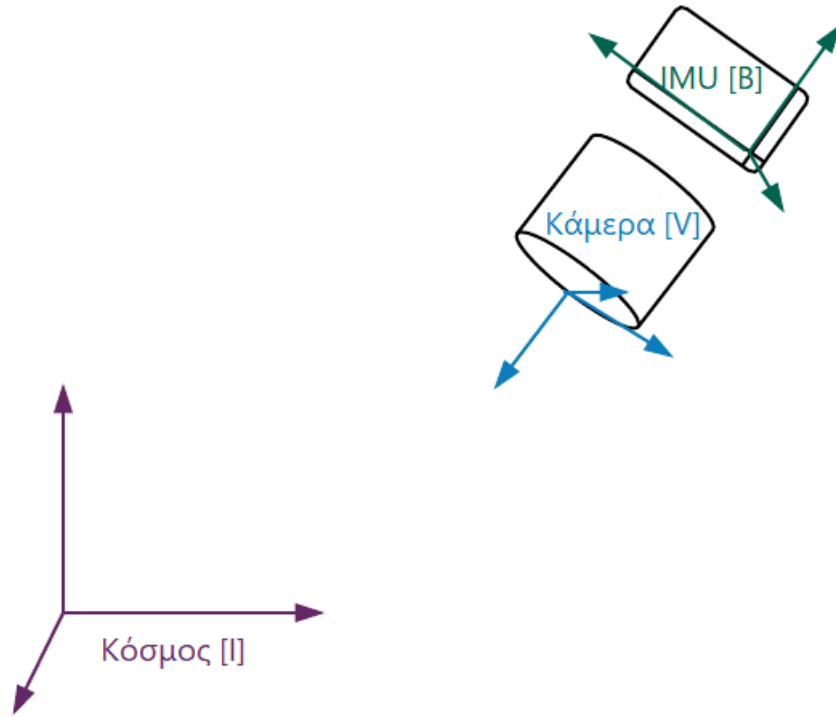
καρέ της κάμερας (patches), ως περιγραφέας για τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά (features). Υπολογίζεται ένα φωτομετρικό σφάλμα το οποίο έπειτα λαμβάνεται υπόψιν από το φίλτρο για την συνέχιση ιχνηλάτησης του χαρακτηριστικού αυτού, πράγμα που οδηγεί στην εξάλειψη της ανάγκης για επανάληψη της διαδικασίας εξαγωγής features σε κάθε καρέ και την ταύτιση τους με αυτά του προηγούμενου. Επίσης επιτρέπει την ιχνηλάτηση features χωρίς αυτά να αποτελούν γωνίες γεγονός που αυξάνει τον αριθμό αυτών που μπορούν να εντοπιστούν και βελτιώνει την φερεγγυότητα του. Η εκτίμηση της θέσης των εντοπισμένων features απαρτίζεται από μία παράμετρο απόστασης και ένα διάνυσμα κατεύθυνσης διαδικασία που ενισχύει την ιχνηλάτηση. Όλα αυτά αποφέρουν έναν αλγόριθμο οδομετρίας με πάρα πολύ καλή απόδοση [34]. Παρακάτω θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα η λειτουργία του.

Δομή Φίλτρου

Γενική Μορφή Φίλτρου και Παραμετροποίηση

Οι αδρανειακές μετρήσεις που προέρχονται από το IMU χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του φίλτρου ενώ η οπτική πληροφορία λαμβάνεται υπόψιν μόνο κατά το στάδιο της ανανέωσης αυτού. Προτέρημα αυτής της μορφής του φίλτρου αποτελεί ότι μπορούν να απορρίπτονται χαρακτηριστικά τα οποία δεν μπορούν να εμφανιστούν στην εικόνα. Από την άλλη μεριά το IMU παράγει θόρυβο λειτουργίας και επηρεάζει όλα τα στοιχεία που πρέπει να υποστούν περιστροφή κατά το στάδιο της αναπαραγωγής, το σφάλμα αυτό όμως, εφόσον αυτό είναι αφενός μικρό και αφετέρου η πλειοψηφία των χαρακτηριστικών είναι εμφανή δεν πρόκειται να παρουσιάσει κάποιο πρόβλημα.

Αρχικά για την καλύτερη αντίληψη του αλγορίθμου πρέπει να οριστούν τα συστήματα συντεταγμένων και τα διανύσματα που χρησιμοποιούνται. Τα συστήματα συντεταγμένων είναι τρία, το αρχικό coordinate frame που αποτελεί και αυτό του κόσμου, συμβολίζεται με I , το σύστημα συντεταγμένων του IMU όπου συμβολίζεται με B , όπως επίσης και το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας όπου συμβολίζεται με V .



(Σχήμα 5.2) Συστήματα συντεταγμένων

Για τον εντοπισμό N αριθμό χαρακτηριστικών χρησιμοποιούμε την παρακάτω μορφή φίλτρου

$$x = (r, v, q, b_f, b_\omega, c, z, \mu_0, \dots, \mu_N, \rho_0, \dots, \rho_N) \quad \text{Εξ. 5.1}$$

Όπου:

- r : αποτελεί την ρομποκεντρική θέση του IMU (εκφρασμένη στο B)
- v : αποτελεί την ρομποκεντρική ταχύτητα του IMU (εκφρασμένη στο B)
- q : προσέγγιση του IMU (map από B στο I)
- b_f : επιπρόσθετη πόλωση (bias) μετρήσεων επιταχυνσιόμετρου (εκφρασμένη στο B)
- b_ω : επιπρόσθετη πόλωση μετρήσεων γυροσκοπίου (εκφρασμένη στο B)
- c : διάνυσμα μεταφοράς IMU-κάμερας (εκφρασμένο στο B)
- z : διάνυσμα περιστροφής IMU-κάμερας (map από B στο V)
- μ_i : διάνυσμα κατεύθυνσης προς το χαρακτηριστικό i (εκφρασμένο στο V)
- ρ_i : παράμετρος απόστασης του σημείου i

Η γενική παραμετροποίηση της απόστασης d_i του στοιχείου i δίνεται από την αντιστοίχιση $d_i = d(\rho_i)$, Στα πλαίσια του Rovio δίνεται μεγαλύτερη βάση στην αντίστροφη παραμετροποίηση της απόστασης $d(\rho_i) = 1/\rho_i$.

Οι περιστροφές ($q, z, \in SO(3)$) και τα μοναδιαία διανύσματα ($\mu_i \in S^2$) παραμετροποιούνται ακολουθώντας της προσέγγιση του Hertzberg et al. Αυτό απαιτείται ώστε να εκτελεστούν οι υπολογισμοί των διαφορών και των παραγώγων όπως και για την αναπαράσταση της αβεβαιότητας του σταδίου με όσο το δυνατόν πιο απλό τρόπο. Για την παραμετροποίηση των μοναδιαίων διανυσμάτων χρησιμοποιούμε περιστροφές ως βοηθητικά εργαλεία, οπού ορίζουμε έναν τελεστή Ξ -που επιστρέφει την διαφορά μεταξύ δύο μοναδιαίων διανυσμάτων εντός του δισδιάστατου γραμμικού χώρου. Το πρότερημα αυτής της παραμετροποίησης είναι η ευκολία στον υπολογισμό του εφαπτόμενου χώρου.

Χρησιμοποιώντας τον συνδυασμό διανύσματος κατεύθυνσης και μιας παραμέτρου απόστασης, τα features αρχικοποιούνται με απλό τρόπο και ενσωματώνονται στο φίλτρο από το στάδιο κιάλας του εντοπισμού τους. Η απόσταση αρχικοποιείται με μία σταθερή τιμή ή, εάν μπορεί να υπολογιστεί, με μια εκτίμηση βασισμένη σε μια μέση τιμή απόστασης της σκηνής. Μια πολύ μεγάλη τιμή ορίζεται στην παράμετρο συνδιακύμανσης της απόστασης (covariance). Στον πίνακα συνδιακύμανσης της απόκλισης σε κάθε εντοπισμένο χαρακτηριστικό αντιστοιχούν 3 στήλες (δύο για το διάνυσμα κατεύθυνσης και μία για την παράμετρο απόστασης) [34].

Ανάλυση Φίλτρου

Βάση της σωστής μέτρησης των τιμών της επιτάχυνσης, \tilde{f} και του μέτρου του ρυθμού περιστροφής, $\tilde{\omega}$, Η αξιολόγηση των αδρανειακών δεδομένων από το IMU οδηγεί στο παρακάτω σύνολο συνεχώς μεταβαλλόμενων εξισώσεων:

$$\dot{\mathbf{r}} = -\tilde{\omega}^\times \mathbf{r} + \mathbf{v} + \mathbf{w}_r \quad \text{Εξ. 5.2}$$

$$\dot{\mathbf{v}} = -\tilde{\omega}^\times \mathbf{v} + \tilde{\mathbf{f}} + \mathbf{q}^{-1}(\mathbf{g}) \quad \text{Εξ. 5.3}$$

$$\dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{q}(\tilde{\omega}) \quad \text{Εξ. 5.4}$$

$$\dot{\mathbf{b}}_f = \mathbf{w}_{bf} \quad \text{Εξ. 5.5}$$

$$\dot{\mathbf{b}}_\omega = \mathbf{w}_{bw} \quad \text{Εξ. 5.6}$$

$$\dot{\mathbf{c}} = \mathbf{w}_c \quad \text{Εξ. 5.7}$$

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{w}_z \quad \text{Εξ. 5.8}$$

$$\dot{\boldsymbol{\mu}}_i = \mathbf{N}^T(\boldsymbol{\mu}_i)\hat{\boldsymbol{\omega}}_v - \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{N}^T(\boldsymbol{\mu}_i) \frac{\hat{\mathbf{u}}_v}{d(\rho_i)} + \boldsymbol{\omega}_{\mu,i} \quad \text{Εξ. 5.9}$$

$$\dot{\rho}_i = -\boldsymbol{\mu}_i^T \hat{\mathbf{u}}_v / d'(\rho_i) + \omega_{\rho,i} \quad \text{Εξ. 5.10}$$

Όπου $\mathbf{N}^T(\boldsymbol{\mu})$ αποτελεί την προβολή ενός τρισδιάστατου διανύσματος ε-φαπτόμενο σε ένα δισδιάστατο επίπεδο γύρω από το διάνυσμα κατεύθυνσης $\boldsymbol{\mu}$, με τις αδρανειακές μετρήσεις διορθωμένες με το επιπρόσθετο συστηματικό σφάλμα και την μείωση του θορύβου σήματος:

$$\hat{\mathbf{f}} = \mathbf{f} - \mathbf{b}_f - \boldsymbol{\omega}_f \quad \text{Εξ. 5.11}$$

$$\hat{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\omega} - \mathbf{b}_\omega - \boldsymbol{\omega}_\omega \quad \text{Εξ. 5.12}$$

Την γραμμική ταχύτητα της κάμερας και τον ρυθμό περιστροφής ως εξής:

$$\hat{\mathbf{u}}_v = \mathbf{z}(\mathbf{u} + \hat{\boldsymbol{\omega}}^\times \mathbf{c}) \quad \text{Εξ. 5.13}$$

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}_v = \mathbf{z}(\hat{\boldsymbol{\omega}}) \quad \text{Εξ. 5.14}$$

Επιπλέον, το \mathbf{g} αποτελεί το διάνυσμα της βαρύτητας εκφρασμένο στο σύστημα συντεταγμένων του κόσμου (\mathbf{I}), και τα στοιχεία της σχέσης \mathbf{w}_* αποτελούν διεργασίες Λευκού Προσθετικού Γκαουσιανού Θορύβου. Οι παράμετροι συνδιακύμανσης του IMU μπορούν είτε να υπολογιστούν χειροκίνητα είτε να παρθούν από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να αναχθούν σε μια διακριτή πρόβλεψη του φίλτρου [35]. Πρέπει να σημειωθεί πως οι παράγωγοι των διανυσμάτων κατεύθυνσης και περιστροφής ορίζονται στον δισδιάστατο και τρισδιάστατο χώρο αντίστοιχα. Αυτό απαιτείται για την επίτευξη καλύτερης και πιο σταθερής αναπαράστασης του φίλτρου και των παραμέτρων συνδιακύμανσης [34].

Ανανέωση Φίλτρου

Για κάθε εικόνα πραγματοποιείται μια ανανέωση του φίλτρου, Υποθέτοντας ότι έχει πραγματοποιηθεί η εσωτερική διόρθωση του λάθους προβολής της κάμερας, μπορεί να υπολογιστεί η προβολή ενός διανύσματος κατεύθυνσης στην αντίστοιχη θέση του εικονοστοιχείου $\mathbf{p} = \boldsymbol{\pi}(\boldsymbol{\mu})$. Έτσι υπολογίζεται ένας δισδιάστατος γραμμικός περιορισμός $\mathbf{b}_i(\boldsymbol{\pi}(\hat{\boldsymbol{\mu}}_i))$, για κάθε χαρακτηριστικό i , που έχει προβλεφθεί πως θα είναι εμφανές στην παρούσα εικόνα με διάνυ-

σμα κατεύθυνσης $\hat{\mu}_i$. Αυτός ο γραμμικός περιορισμός περιλαμβάνει την ένταξη των σφαλμάτων που συνδέεται με κάθε χαρακτηριστικό και μπορεί να αποτελέσει έναν παράγοντα μεταβολής για την ανανέωση του Kalman.

Ο Γκαουσιανός λευκός θόρυβος δίνεται από:

$$y_i = b_i(\pi(\hat{\mu}_i)) + n_i \quad \text{Εξ. 5.15}$$

Και ο Ιακωβιανός :

$$H_i = A_i(\pi(\hat{\mu}_i)) \frac{d\pi}{d\mu}(\hat{\mu}_i) \quad \text{Εξ. 5.16}$$

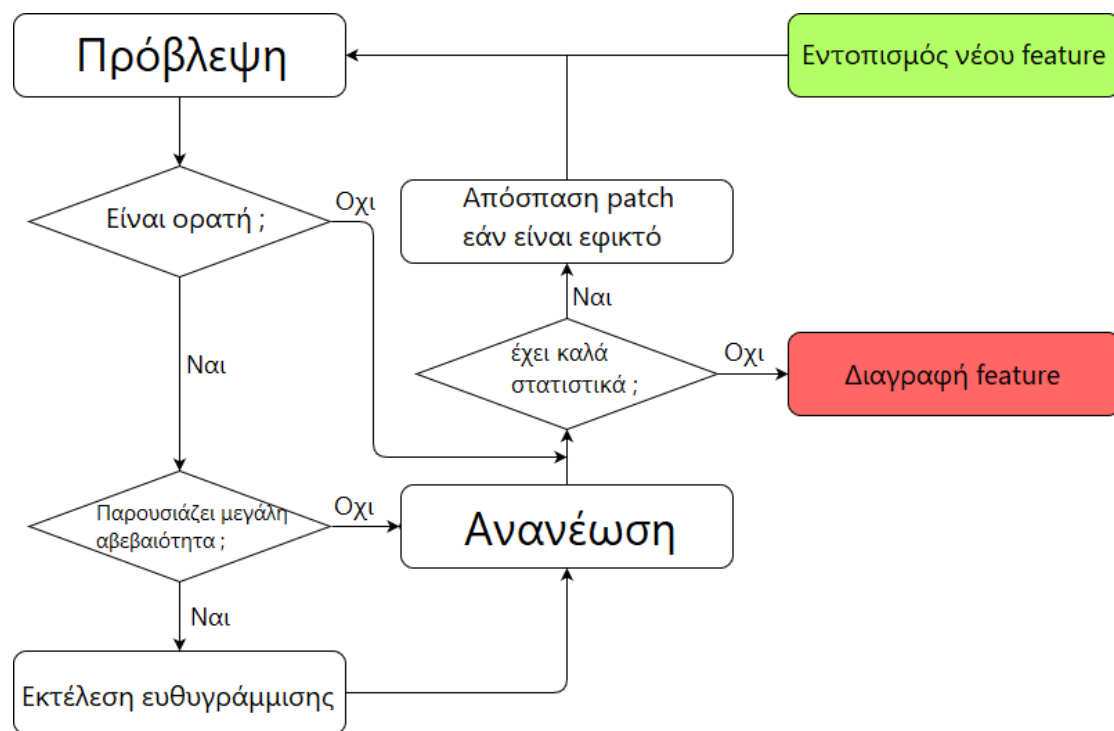
Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω για όλα τα ορατά στοιχεία μιας εικόνας είναι εφικτή η απευθείας ανανέωση του EKF. Παρόλα αυτά εάν η αρχική πρόβλεψη για ένα διάνυσμα κατεύθυνσης έχει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας η ανανέωση της θέσης είναι επόμενο να αποτύχει. Αυτό συνήθως συμβαίνει εάν τα στοιχεία έχουν μόλις αρχικοποιηθεί ή παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας ως προς την απόστασή τους. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος που σχετίζεται με τον μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας για ένα διάνυσμα κατεύθυνσης πραγματοποιείται αναζήτηση του feature σε μια περιοχή της εικόνας (patch) και όχι σε ένα μόνο εικονοστοιχείο. Με τον υπολογισμό του διανύσματος κατεύθυνσης με βάση το patch αυτό επιτυγχάνεται η ευκολότερη γραμμικοποίηση του EKF.

Για την αντιμετώπιση των κινούμενων features μία μέθοδος Mahalanobis χρησιμοποιήθηκε για την αγνόησή τους. Συγκρίνει την μεταβολή που παρατηρείται με την μεταβολή που έχει προβλεφθεί από το φίλτρο και απορρίπτει την μέτρηση όταν το σταθμισμένο κριτήριό ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή. Αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψιν της τους παράγοντες συνδιακύμανσης του φίλτρου και τις μετρήσεις. Για παράδειγμα λαμβάνει υπόψιν του την κλίση της εικόνας και τείνει να αποκλείει τα patch της εικόνας με μικρότερη κλίση (gradient less) [34].

Διαχείριση Patches Διαφορετικών Επιπέδων

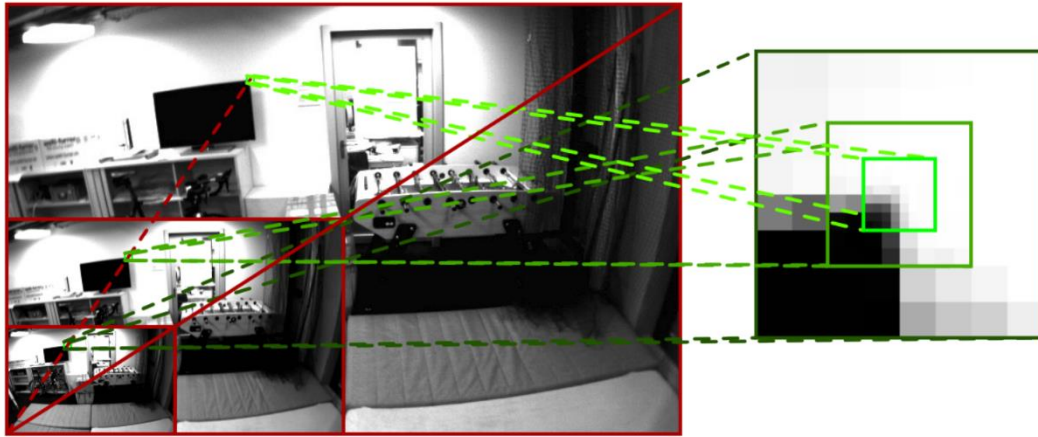
Τα οπτικά features ενσωματώνονται πλήρως στο φίλτρο Kalman. Στο στάδιο της πρόβλεψης η νέα θέση ενός feature υπολογίζεται σε συνδυασμό με τα μοντέλο κίνησης του IMU (Εξ. 5.9). Εάν οι εξωτερικές παράμετροι βαθμονόμησης και η παράμετρος απόστασης του feature συγκλίνουν αποτέλεσμα θα

είναι μια πολύ αξιόπιστη εκτίμηση της θέσης του. Επιπρόσθετα η συνδιακύμανση της εκτίμησης της συντεταγμένης του εικονοστοιχείου πάνω στην εικόνα μπορεί εύκολα να υπολογιστεί και οι αναγκαίοι υπολογιστικοί πόροι μπορούν να αυξημειωθούν ανάλογα με τι δυνατότητες του συστήματος. Το επακόλουθο στάδιο υπολογίζει έναν όρο μεταβολής αξιολογώντας την απόκλιση ανάμεσα στο patch της εικόνας και της εικόνας αυτής κάθε αυτής. Λαμβάνοντας υπόψιν την συσχέτιση ανάμεσα στα στάδια το EKF πραγματοποιεί τις διορθώσεις που έχουν προκύψει.



(Σχήμα 5.3) Διαδικασία διαχείρισης feature από το φίλτρο

Για ένα image pyramid (εικόνα με ελαττωμένη ανάλυση στο μισό της) και ένα δοθέν διάνυσμα κατεύθυνσης, ένα patch επιλέγεται εξάγοντας περιοχές με ίσο μέγεθος 8×8 εικονοστοιχεία, για κάθε επίπεδο εικόνας l στην αντίστοιχη θέση εικονοστοιχείου $p = \pi(\mu)$.



(Σχήμα 5.4) Η Δημιουργία Patch σε πολλαπλά επίπεδα εικόνας

Το προτέρημα αυτής της διαδικασίας είναι πως η ιχνηλάτηση τέτοιων feature είναι σταθερή απέναντι σε κακές προβλέψεις και θολές εικόνες. Τέτοια patches επιπλέον επιτρέπουν απευθείας ενημέρωση του φίλτρου για την ένταση του σφάλματος [34].

Εξισώσεις Ευθυγράμμισης

Για την προ-ευθυγράμμιση των features και την ανανέωση του φίλτρου γίνεται χρήση των εντάσεων σφάλματος. Για μία δοθείσα πυραμίδα εικόνας (image pyramid) με τις εικόνες I_l και ένα patch σε όλα τα επίπεδα της πυραμίδας, η ένταση των παρακάτω σφαλμάτων μπορεί να υπολογιστεί για την εικόνα επιπέδου l και εικονοστοιχείου της περιοχής p_j :

$$e_{l,j} = P_l(p_j) - I_l(p_{sl} + Wp_j) - m \quad \text{Εξ. 5.17}$$

Στην παραπάνω σχέση το βαθμωτό μέγεθος $s_l = 0.5^l$ λαμβάνεται υπόψιν για την μείωση της ανάλυσης των εικόνων της πυραμίδας εικόνων. Επίσης αφαιρούμε τον μέσο όρο έντασης σφάλματος m που αποδίδουμε στις μεταβολές της φωτεινότητας ανάμεσα στις εικόνες.

Για την τακτική της ευθυγράμμισης των patch, οι όροι της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μπορούν να αθροιστούν από όλες τις εικόνες και τα patch αυτών και συνδυάζονται σε μια βελτιστοποίηση Gauss – Newton για την εύρεση των βέλτιστων συντεταγμένων των patch. Παρόλα αυτά η απευθείας χρήση ενός τόσο μεγάλου αριθμού όρων σφάλματος στα

πλαίσια του EKF. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιείται η παραγοντοποίηση QR στο γραμμικό σύστημα εξισώσεων και οδηγεί στον συνδυασμό όλων των όρων σφάλματος για συγκεκριμένη συντεταγμένη εικονοστοιχείου \hat{p}

$$\bar{b}(\hat{p}) = \bar{A}(\hat{p})\delta p \quad \text{Εξ. 5.18}$$

Όπου $\bar{A}(\hat{p})$ μπορεί να υπολογιστεί βάση της έντασης της κλίσης του patch. Ανεξάρτητα από τον βαθμό του πίνακα $\bar{A}(\hat{p})$ η παραγοντοποίηση QR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μας δώσει ένα πιο απλοποιημένο γραμμικό σύστημα εξίσωσης

$$b(\hat{p}) = A(\hat{p})\delta p \quad \text{Εξ. 5.19}$$

Με $A(\hat{p}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ και $b(\hat{p}) \in \mathbb{R}^2$. Εφόσον ο θόρυβος θεωρείται ότι είναι ο ίδιος για όλα τα Patches μπορεί να μην συμπεριληφθεί στις παραπάνω εξισώσεις.

Εντοπισμός Features και απαλοιφή τους

Η αναγνώριση των feature βασίζεται στον αλγόριθμο FAST (Feature from accelerated features) corner detector και παρέχει έναν μεγάλο αριθμό υποψήφιων features. Αφού πραγματοποιηθεί η αφαίρεση αυτών που βρίσκονται κοντά σε άλλα που ήδη ιχνηλατούνται πραγματοποιείται ο υπολογισμός ενός Shi-Tomashi score για την επιλογή νέων που θα εισαχθούν στο φίλτρο. Το προσαρμοσμένο shi-Tomashi score βασικά υπολογίζει τον πίνακα hessian που έχει υπολογιστεί απ' όλα τα επίπεδα εικόνων έναντι ενός μόνου επιπέδου. Το σκορ αυτό συνδυάζεται με την ακρίβεια ευθυγράμμισης του αντίστοιχου patch. Ακόμα το στάδιο του εντοπισμού feature συνδυάζεται με μία τεχνική bucketing για την ομοιόμορφη κατανομή τους σε όλο το εύρος της εικόνας. Με την αύξηση του αριθμού των landmarks, δηλαδή των patches αυτών που έχουν ιχνηλατηθεί επιτυχώς, μειώνεται η σταθερότητα λειτουργίας του EKF. Για τον λόγο αυτό ο αριθμός τους διατηρείται περιορισμένος. Για την επιλογή των landmarks που θα διατηρηθούν λαμβάνεται υπόψιν ένας βαθμός ποιότητας ο οποίος υπολογίζεται με βάση τρία κριτήρια:

- Την καθολική ποιότητα αυτού του landmark, δηλαδή πόσο συχνά εντοπίζεται από τον αρχικό εντοπισμό του

- Την επιμέρους ποιότητα του, δηλαδή το πόσο συχνά το landmark έχει εντοπιστεί την θέση που έχει προβλεφθεί ότι θα βρίσκεται
- Την τοπική ορατότητα του, πόσο συχνά δηλαδή το landmark βρίσκεται στο πεδίο όρασης.

Χρησιμοποιώντας μεταβλητές τιμές ορίων για τα παραπάνω κριτήρια μπορεί να ελεγχθεί ο αριθμός των landmark που είναι ορατά στην εικόνα. Στην περίπτωση όπου ο αριθμός τους έχει φτάσει το μέγιστο και είναι δυνατή η ιχνηλάτηση της μειοψηφίας τους τότε ρυθμίζονται ανάλογα οι τιμές ορίων ώστε να διαγραφούν τα landmark με τον μικρότερο βαθμό ποιότητας και πραγματοποιηθεί ο εντοπισμός νέων [34][36].

6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

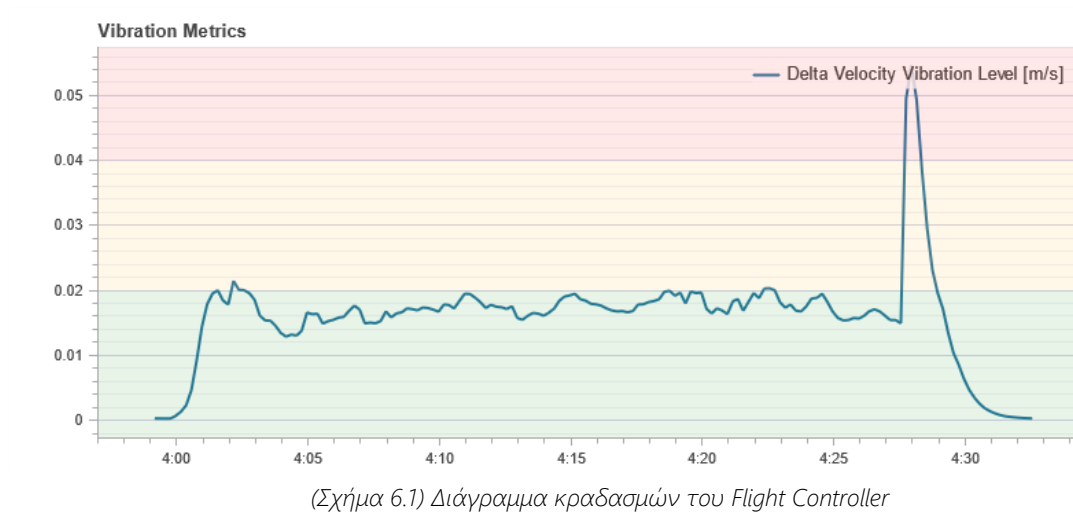
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρακτικό μέρος της παρούσας εργασίας απαρτίζεται από δύο σκέλη. Αρχικά ο αλγόριθμός εφαρμόστηκε στο περιβάλλον προσομοίωση του Gazebo και έπειτα στο πραγματικό τετρακόπτερο. Και στις δύο περιπτώσεις δημιουργήθηκε μια αποστολή που αποτελείται από τέσσερα σημεία συντεταγμένων GNSS τοποθετημένων με τέτοιο τρόπο ώστε η διαδρομή του τετρακοπτέρου και στις δύο περιπτώσεις θα σχηματίσει ένα παραλληλόγραμμο. Επιλέχθηκε το σχήμα του παραλληλογράμμου για την αποστολή καθώς κάποια μεγάλη απόκλιση στην περιστροφή και στην απόσταση που έχει διανύσει θα είναι εύκολα εμφανής.

Δεν αναμένεται μεγάλη απόκλιση στην συμπεριφορά του αλγόριθμου ανάμεσα στο εικονικό περιβάλλον του Gazebo και στον πραγματικό κόσμο καθώς με τον σχεδιασμό του μοντέλου του τετρακοπτέρου και τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των ελίκων η προσομοίωση έγινε όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική.

ΕΜΠΟΔΙΑ

Από το στάδιο σχεδιασμού του τετρακοπτέρου έγινε προσπάθεια για την απομόνωση των κραδασμών λειτουργίας από τον Flight Controller καθώς θα επέφεραν αρνητικά αποτελέσματα τόσο στην απόδοση της πτήσης, όπως προαναφέρθηκε όσο στην απόδοση του αλγορίθμου και στην ακρίβεια της οδομετρίας που ο τελευταίος παράγει. Μετά την ανάλυση των αρχείων καταγραφής του Flight Controller απορρέει το συμπέρασμα πως οι κραδασμοί είναι εντός αποδεκτών ορίων [12][38].



Στοιχείο που δεν λήφθηκε υπόψιν κατά την διάρκεια του σχεδιασμού ήταν οι παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων και η απομόνωση εξαρτημάτων που είναι ευαίσθητα από αυτές (GNSS). Ισχυρή πηγή τέτοιων παρεμβολών αποτελούν τα ESC παρόλα αυτά τοποθετήθηκαν μακριά από τον Flight Controller. Μετά από ανάλυση των αρχείων καταγραφής παρατηρείται πως ο δείκτης παρεμβολών του GNSS είναι υψηλός [38].



Αυτό, σύμφωνα με την Intel [37], φαίνεται να οφείλεται στις παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων που παράγονται από την λειτουργία των θυρών USB 3.0 του Jetson Nano παρόλα αυτά η ύπαρξη WIFI, που χρησιμοποιεί αυτήν την θήρα, είναι απαραίτητη για την επικοινωνία του τετρακοπτέρου με τον σταθμό ελέγχου εδάφους.

Παρά τον υψηλό δείκτη παρεμβολών του GNSS η λήψη του ήταν πολύ καλή και εφικτή αποτέλεσε η επικοινωνία του με 17-18 δορυφόρους και η ακρίβεια

τόσο της οριζόντιας όσο και της κάθετης θέσης διατηρήθηκε κάτω των 4 μέτρων.



(Σχήμα 6.3) Διάγραμμα ακρίβειας GNSS, κλειδώματος GNSS, και αριθμός δορυφόρων

Ο σημαντικότερος παράγοντας που αναμένεται να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση του ROVIO στο πραγματικό τετρακόπτερο είναι αυτός του κυλιόμενου κλείστρου (Rolling shutter). Rolling Shutter είναι η τεχνική που χρησιμοποιεί η πλειοψηφία των εμπορικών καμερών για την καταγραφή εικόνων. Με αυτήν την τεχνική η κάθε σειρά εικονοστοιχείων (pixel) του αισθητήρα εικόνας σαρώνουν διαδοχικά το τοπίο. Η καθυστέρηση της έκθεσης κάθε σειράς δημιουργεί μια παραμόρφωση παρόμοια με αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Αντίθετα σύμφωνα με την τεχνική του Global Shutter το τοπίο σαρώνεται ταυτόχρονα απ' όλα τα pixel του αισθητήρα [39].



(Σχήμα 6.4) Φαινόμενο κυλιόμενου κλείστρου (Rolling Shutter)

Αυτό θα έχει αντίκτυπο στο στάδιο πρόβλεψης της θέσης του landmark στην εικόνα της κάμερας και θα μειώσει με την σειρά του σημαντικά την αξιοπιστία της οδομετρίας. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται μόνο στο πραγματικό τετρακόπτερο καθώς η εικονική κάμερα του Gazebo δεν παρουσιάζει το φαινόμενο του κυλιόμενου κλείστρου. Για την αντιμετώπιση του η πτήση πραγματοποιήθηκε μεσημέρι με πολύ καλό φωτισμό για την διατήρηση πολύ υψηλής ταχύτητας κλείστρου.

Κάθε εικόνα και κάθε μέτρηση του IMU διαθέτει μια χρονοσφραγίδα. Ο σωστός συγχρονισμός του συστήματος, δηλαδή η ύπαρξη μιας μέτρησης IMU με την ίδια χρονοσφραγίδα (η με πολύ μικρή απόκλιση) με μία εικόνα της κάμερας οδηγεί σε ακριβείς προβλέψεις της θέσης των landmarks και συνεπώς σε αξιόπιστα δεδομένα οδομετρίας. Ακριβής συγχρονισμός θα μπορούσε να επιτευχθεί με τον εξωτερικό σκανδαλισμό της κάμερας μέσω ενός σήματος ρολογιού ίδιας φάσης και συχνότητας με αυτήν του Flight Controller και συνεπώς του IMU. Παρόλα αυτά η κάμερα της εφαρμογής μας δε διαθέτει αυτό το χαρακτηριστικό.

Δεν πραγματοποιήθηκε κάποια μεταβολή στις παραμέτρους όπως το μέγεθος των Patches ο αριθμός των επιπέδων της εικόνας και το πλήθος των features που πρόκειται να ιχνηλατηθούν καθώς τόσο στην περίπτωση του Gazebo όσο και στην περίπτωση του τετρακοπτερου η υπολογιστική ισχύς δε αποτέλεσε σημαντικό περιοριστικό παράγοντα.

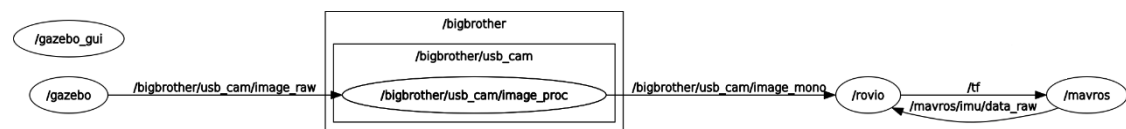
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ GAZEBO

Για την εξακρίβωση της σωστής λειτουργίας του ROVIO πρέπει να πραγματοποιηθεί ένα πείραμα το οποίο θα καταγράφει τόσο τα δεδομένα οπτικοαδρανειακής οδομετρίας όσο και τα δεδομένα οδομετρίας του εικονικού GNSS που στην περίπτωση του Gazebo οι παράμετροι του έχουν ρυθμιστεί ώστε η απόκλιση των δεδομένων να είναι απειροελάχιστη, συνεπώς τα δεδομένα οδομετρίας του GNSS χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του των δεδομένων οδομετρίας του ROVIO (ground truth).

Για την απόκτηση των αδρανειακών δεδομένων του IMU χρησιμοποιήθηκε το MAVROS το οποίο όπως προαναφέρθηκε αποτελεί ένα πακέτο ROS που αναλαμβάνει την μετατροπή των μηνυμάτων πρωτοκόλλου Mavlink σε ROS Topics.

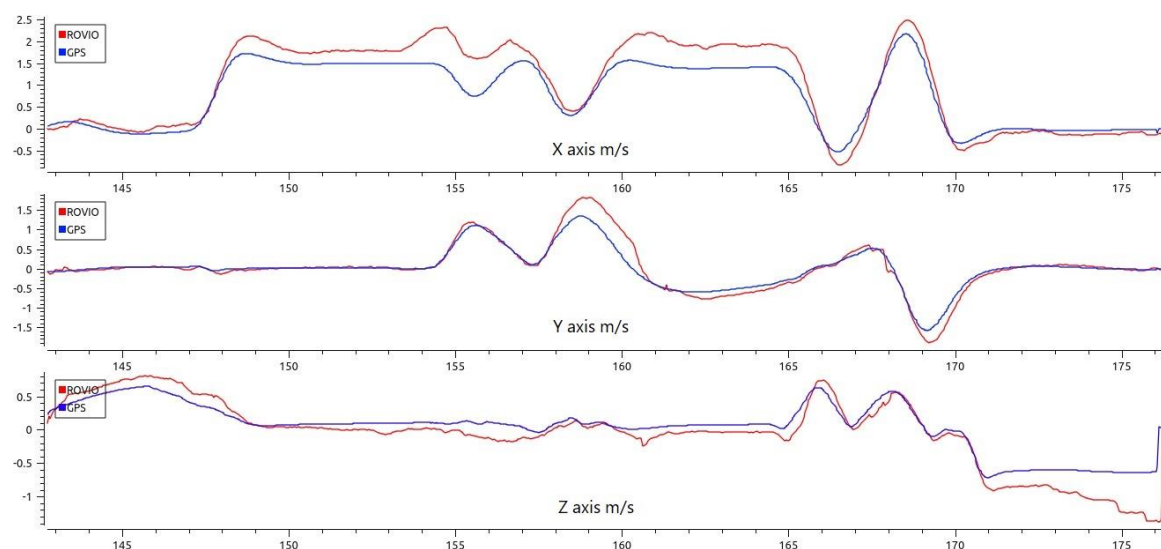
Τα Δεδομένα οδομετρίας του ROVIO ανανεώνονται σε πραγματικό χρόνο και ο ρυθμός ανανέωσης είναι ίσος με τον ρυθμό λήψης εικόνων από

την κάμερα, ο οποίος ορίστηκε στα 20 καρέ το δευτερόλεπτο καθώς αυτός αποδείχθηκε ότι αποτελεί χρυσή τομή μεταξύ της διατήρησης της αξιόπιστης λειτουργίας του αλγόριθμου και της μείωσης του υπολογιστικού φόρτου, πράγμα ιδιαίτερα σημαντικό για την εφαρμογή του αλγορίθμου στο πραγματικό τετρακόπτερο. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα διεργασιών των πακέτων ROS που χρησιμοποιήθηκαν.



(Σχήμα 6.5) Διάγραμμα Διεργασιών ROS κατά την προσομοίωση του Gazebo

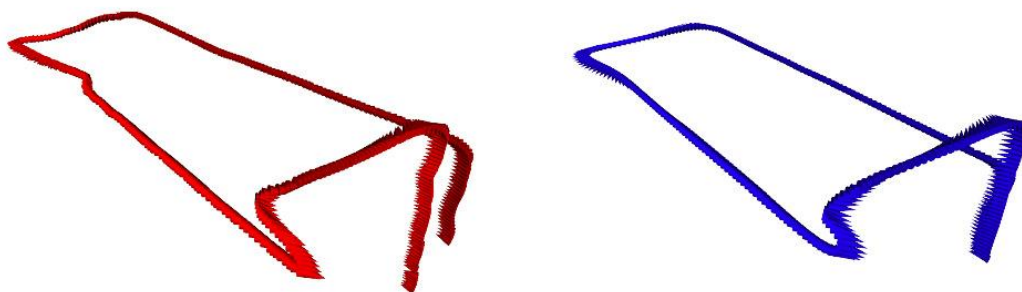
Η αποστολή για την δοκιμή δημιουργήθηκε στο QGroundcontrol. Οι αποστολές του QGroundcontrol έχουν την μορφή διαδοχικών σημείων με συντεταγμένες GNSS (waypoints). Η ταχύτητα πτήσης ορίστηκε 1.5 m/s για την αποφυγή απότομων κινήσεων καθώς αυτό διευκολύνει τον αλγόριθμο να εκτελέσει πιο αξιόπιστα τον εντοπισμό και την ιχνηλάτηση των features. Ο περιορισμός της ταχύτητας πτήσης είναι ορατός στα παρακάτω διαγράμματα που απεικονίζουν την ταχύτητα του τετρακοπτέρου σε κάθε άξονα.



(Σχήμα 6.6) Ταχύτητα τετρακοπτέρου σε κάθε άξονα κατά την προσομοίωση

Από το παραπάνω σχήμα γίνεται εμφανής μια απόκλιση στον υπολογισμό της ταχύτητας από το ROVIO, κυρίως στον άξονα του x, της τάξης του 0.3 m/s.

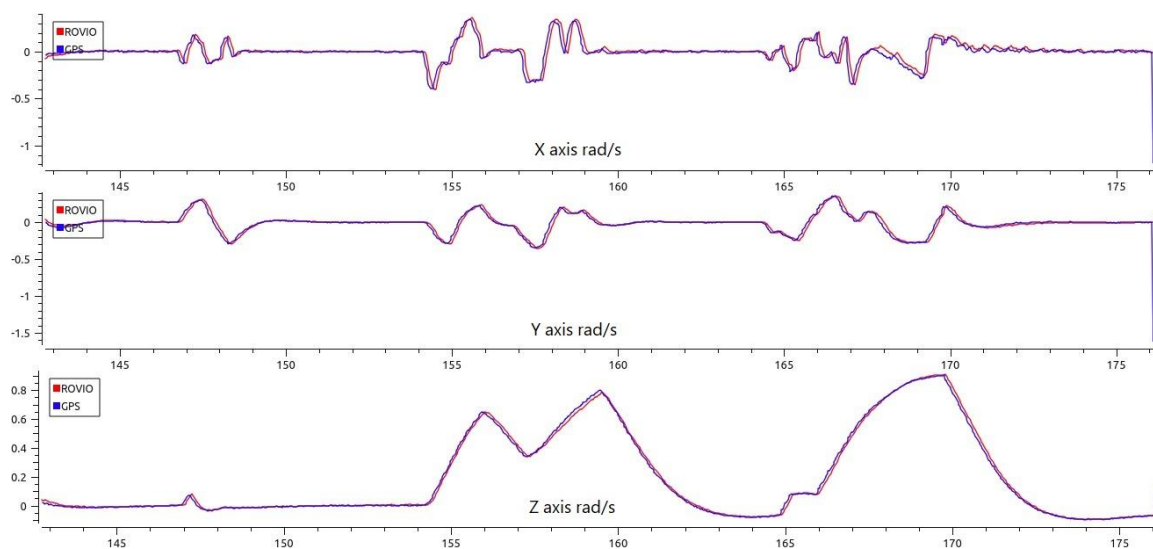
Για μια πρώτη σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μετά το πέρας της αποστολής πραγματοποιείται η απεικόνιση των δεδομένων οδομετρίας τόσο του ROVIO όσο και του GNSS από το RVIZ.



(Σχήμα 6.7) Απεικόνιση οδομετρίας προσομοίωσης στο RViz

Η απόκλιση μεταξύ των δύο είναι πολύ μικρή. Παρόλα αυτά παρατηρήθηκε απόκλιση όσο αναφορά τον άξονα z καθώς το σημείο προσγείωσης σύμφωνα με την οδομετρία ROVIO βρίσκεται χαμηλότερα από το σημείο απογείωσης.

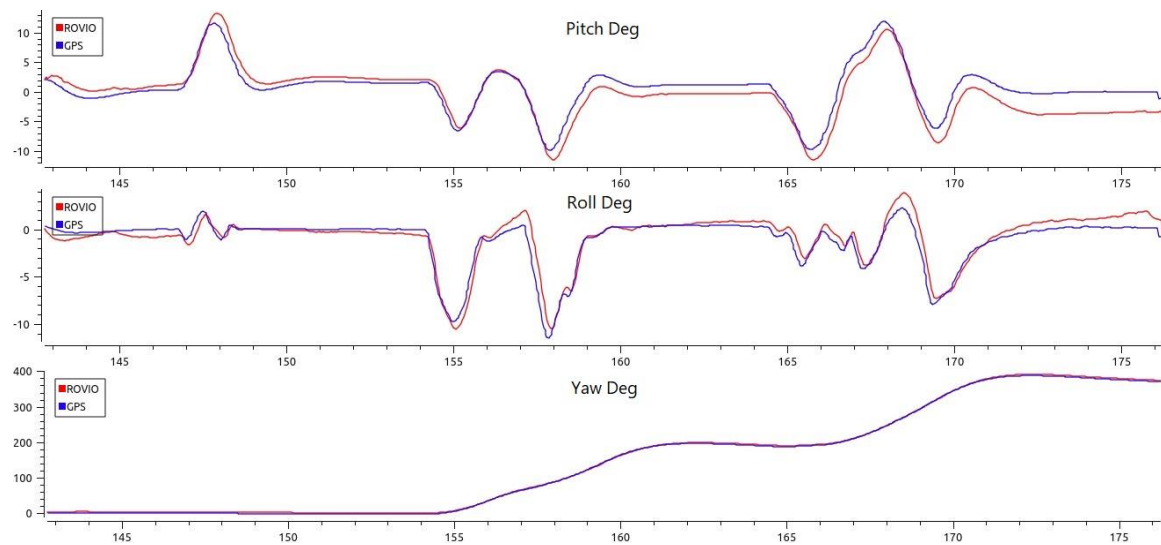
Η πολύ καλή γενικότερη απόκριση του ROVIO φαίνεται και από το διάγραμμα γωνιακής ταχύτητας του κάθε άξονα:



(Σχήμα 6.8) Γωνιακή ταχύτητα τετρακοπτέρου σε κάθε άξονα του κατά την προσομοίωση

Οι μετρήσεις του ROVIO φαίνονται να έχουν μια καθυστέρηση πράγμα που οφείλεται στον χρόνο επεξεργασίας της εικόνας από τον αλγόριθμο αλλά και

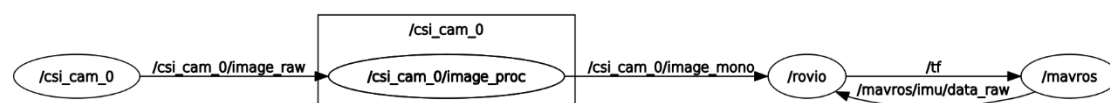
στο χρόνο λήψης της εικόνας από την κάμερα. Η απόκριση του αλγορίθμου φαίνεται επίσης στο παρακάτω διάγραμμα απεικόνισης των γωνιών Euler.



(Σχήμα 6.9) Γωνίες Euler κατά την προσομοίωση

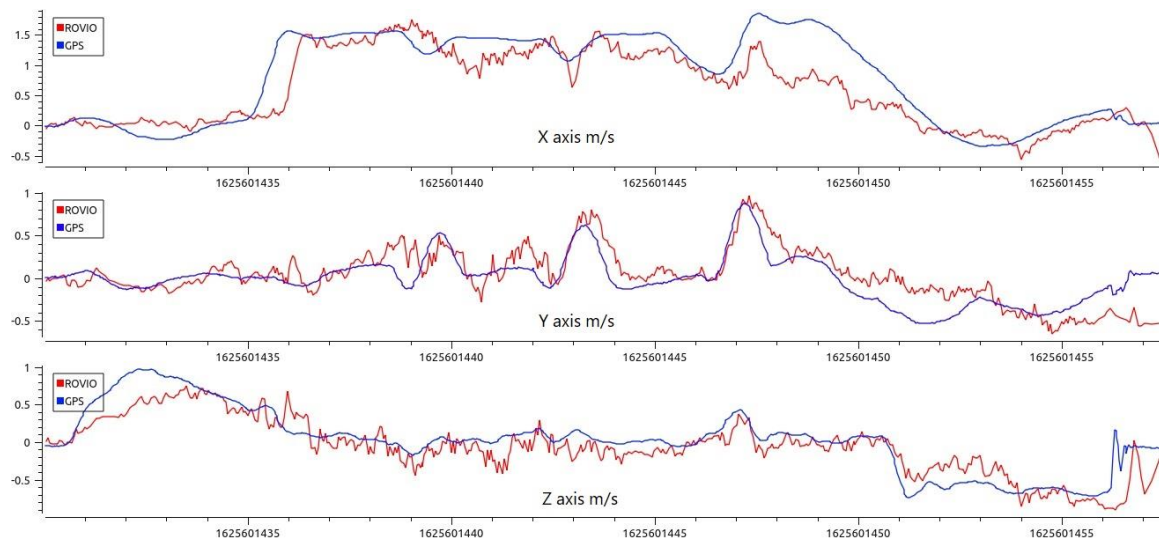
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΤΕΤΡΑΚΟΠΤΕΡΟ

Μετά την εφαρμογή όλων των πακέτων ROS στο περιβάλλον προσομοίωσης του gazebo επόμενο βήμα αποτελεί η εφαρμογή του στο πραγματικό τετρακόπτερο της εργασίας. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ίδια και αυτό είναι αμέσως εμφανές από το διάγραμμα διεργασιών του ROS:



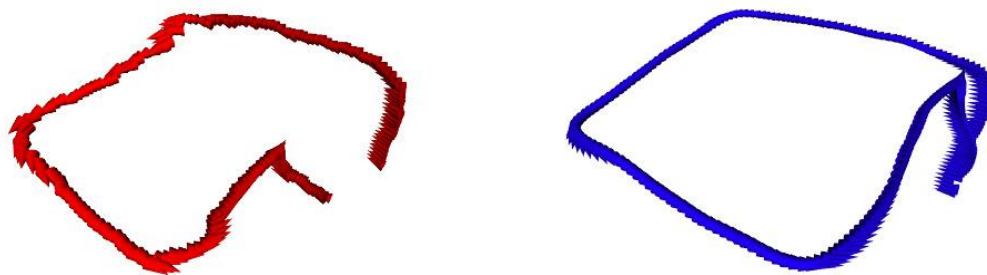
(Σχήμα 6.10) Διάγραμμα διεργασιών ROS τετρακοπτέρου

Για την αποφυγή απότομων κινήσεων τέθηκε και εδώ περιορισμός στην οριζόντια ταχύτητα του τετρακοπτέρου στα 1.5 m/s



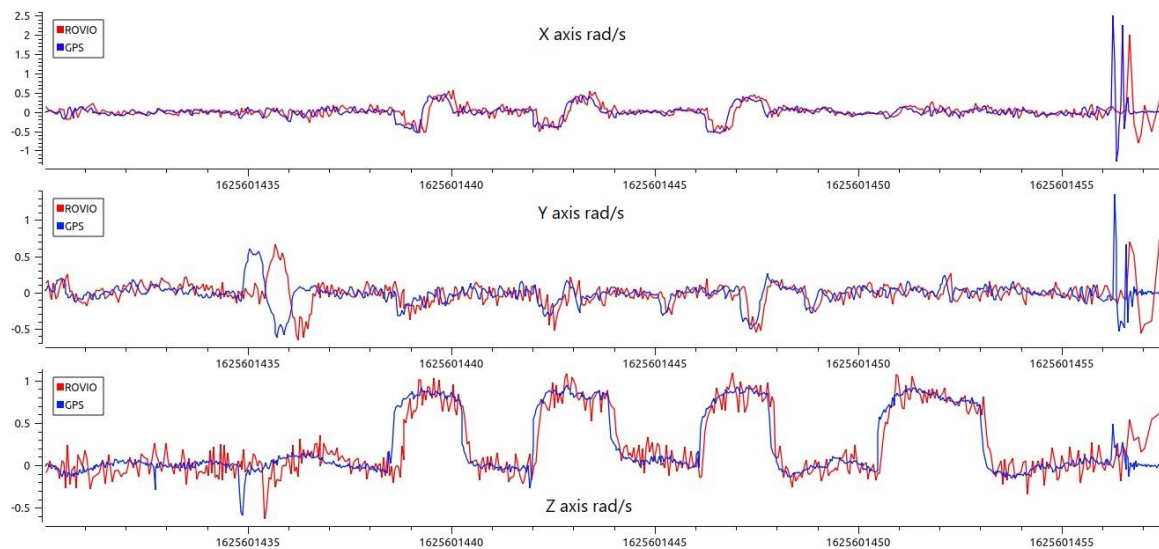
(Σχήμα 6.11) Ταχύτητα τετρακοπτήρου σε κάθε άξονα του

Τα δεδομένα οδομετρίας τόσο του GNSS όσο και του ROVIO απεικονίζονται μέσω του RVIZ (Σχήμα 6.12), και έτσι σχηματίζεται μια πρώτη άποψη για την ευστοχία του αλγορίθμου.



(Σχήμα 6.12) Απεικόνιση οδομετρίας τετρακοπτήρου στο RViz

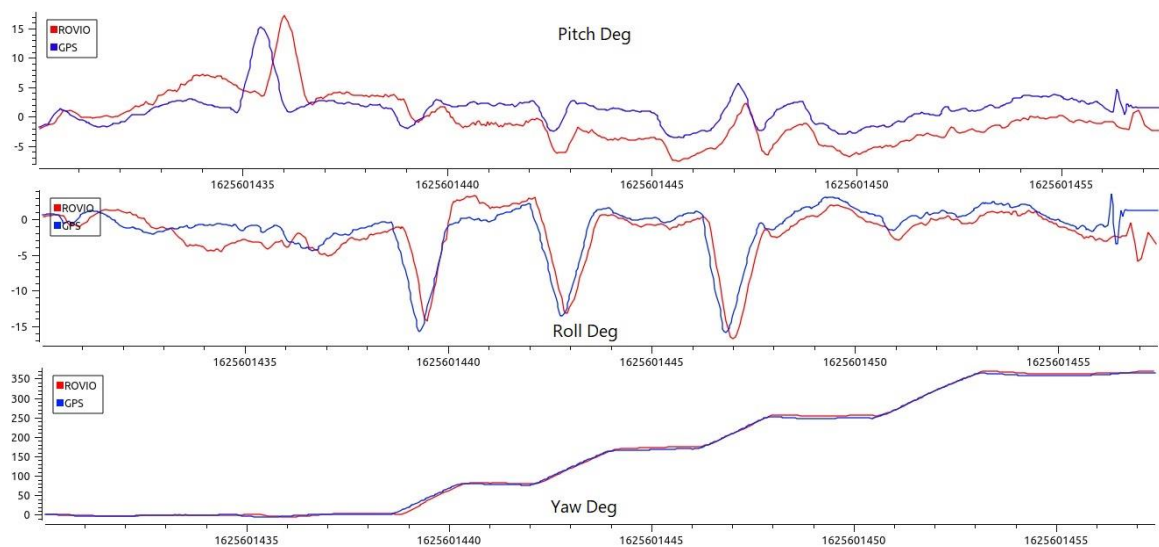
Παρατηρείται πως ο αλγόριθμος παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση συγκριτικά με την προσομοίωση όπως και αναμενόταν. Αυτό φαίνεται από την απόσταση του σημείου απογείωσης και προσγείωσης. Παρόλα αυτά η απόδοση του είναι αρκετά καλή όπως στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.13) απεικόνισης γωνιακών ταχυτήτων.



(Σχήμα 6.13) Γωνιακή Ταχύτητα τετρακοπτέρου ως προς τους άξονες του

Συγκρίνοντας το Σχήμα 6.12 με το Σχήμα 6.7 παρατηρείται περισσότερος θόρυβος που οφείλεται στους κραδασμούς λειτουργίας. Η καθυστέρηση μετρήσεων του ROVIO φαίνεται μεγαλύτερη και αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην μειωμένη επεξεργαστική ισχύ του Jetson σε σχέση με τον υπολογιστή.

Η καλή απόδοση του αλγορίθμου φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.14) όπου απεικονίζονται οι γωνίες Euler.



(Σχήμα 6.14) Γωνίες Pitch, Roll, Yaw τετρακοπτέρου

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανακεφαλαιώνοντας, σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη, η κατασκευή τετρακοπτέρου, με χρήση 3D εκτυπωτή, και η εφαρμογή αλγορίθμου οπτικο-αδρανειακής οδομετρίας.

Για την εκπόνηση της εργασίας λοιπόν σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα τετρακόπτερο με την χρήση του υλικού PETG. Ο Flight Controller που χρησιμοποιήθηκε είναι το Pixhawk χάρης στην ικανότητα σύνδεσης πολλών περιφερειακών (companion computer, Bluetooth, GNSS). Ο υπολογιστής που ανέλαβε την εκτέλεση του αλγορίθμου αποτελεί το Nvidia Jetson Nano που επιλέχθηκε χάρης στην υψηλή επεξεργαστική του ισχύ και η επικοινωνία του με τον Flight Controller γίνεται μέσω σειριακή θήρας χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Mavlink. Στον τομέα της οπτικοαδρανειακής οδομετρίας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ROVIO (Robust Visual Inertia Odometry) που συνδυάζει τις αδρανειακές μετρήσεις του IMU και τα δεδομένα μια κάμερας (monocular) για την παραγωγή δεδομένων οδομετρίας. Η εφαρμογή υλοποιήθηκε στο ROS που επιτρέπει την εύκολη επικοινωνία του flight controller και της κάμερας με το ROVIO. Επίσης παρέχει εργαλεία για την καταγραφή και απεικόνιση δεδομένων, για τον εντοπισμό και επιδιόρθωση σφαλμάτων όπως επίσης για την προσομοίωση. Για λόγους ασφαλείας σχεδιάστηκε ένα ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο του τετρακοπτέρου και η αρχική δοκιμή του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον προσομοίωσης του Gazebo.

ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ

Κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας παρουσιάστηκαν προβλήματα τα οποία δυσκόλεψαν πολύ την τελική υλοποίηση. Πιο συγκεκριμένα το κυλιόμενο κλείστρο της κάμερας είχε ως αποτέλεσμα εκτιμήσεις αυξημένου σφάλματος από τον αλγόριθμο. Επίσης η απουσία δυνατότητας για εξωτερικό σκανδαλισμό κάμερας οδήγησε στην μεγάλη διαφορά χρονοσφραγίδων της εικόνας και των δεδομένων του IMU. Συνεπώς μια κάμερα καθολικού κλείστρου με δυνατότητα εξωτερικού σκανδαλισμού θα οδηγούσε σε σημαντική βελτίωση της απόδοσης και αξιοπιστίας του αλγορίθμου. Ωφέλιμη θα ήταν η τοποθέτηση του GNSS μακριά από κάθε πιθανή πηγή παρεμβολών για την πιο αξιόπιστη πτήση του τετρακοπτέρου και την εκτέλεση μεγαλύτερων αποστολών. Τέλος παρότι το Jetson Nano είναι αρκετά επεξεργαστικά ικανό,

περισσότερη επεξεργαστική ισχύ θα φαινόταν χρήσιμη για την αύξηση του ρυθμού ανανέωσης δεδομένων όπως επίσης και για την εκτέλεση παράλληλων λειτουργιών όπως δημιουργία χαρτών και εντοπισμού θέσης βάσης αυτών.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Ο Αλγόριθμος οπτικοαδρανειακής οδομετρίας επιτρέπει τον υπολογισμό της θέσης του τετρακοπτέρου ως προς την αρχική του θέση. Αυτό επιτρέπει την πλοήγηση του με σταθερότητα ανάλογη αυτής του αλγορίθμου σε περιοχές χωρίς λήψη σήματος GNSS. Επιπρόσθετα το EKF μπορεί να κάνει χρήση της οδομετρίας για την βελτίωση των χαρακτηριστικών πτήσης.

Ιδιαίτερα ενδιαφέρον θα ήταν η ενσωμάτωση του σε ένα μεγαλύτερο πλαίσιο που θα συμπεριλάμβανε αλγορίθμους SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), σχεδιασμού τροχιάς, αναγνώρισης σκηνής κ.α και θα καθιστούσε εφικτή την πλήρως αυτόνομη πτήση του τετρακοπτέρου σε περιβάλλοντα χωρίς λήψη σήματος GNSS. Έτσι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε τομείς διάσωσης και πιο συγκεκριμένα στο κομμάτι της αναζήτησης, χάρη στην ικανότητα των τετρακοπτέρων να πάνε με μεγάλη ευκολία και ευελιξία εκεί που ο άνθρωπος δεν μπορεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Unmanned Aerial Vehicle, Wikipedia, 2020
- [2] Gaurav S., Babankumar B., Lini M., (2018) Unmanned Aerial Vehicle classification, Applications and challenges: A Review
- [3] Μυλωνάς Ε., Σπυρόπουλος Κ., (2017) Έλεγχος και μοντελοποίηση μη επανδρωμένου οχήματος.
- [4] Αποστολίδης Α., (2015) Σχεδιασμός, ανάπτυξη και υλοποίηση τετρακοπτήρου βασισμένο σε raspberry pi με έλεγχο μέσω smartphone.
- [5] Σανταβάς Ν., Ταϊτζόγλου Α., (2018) Μελέτη και κατασκευή αυτόνομου ιπτάμενου τετρακοπτήρου και υλοποίηση αλγορίθμου βαθιάς μάθησης σε ενσωματωμένο σύστημα για αυτόνομη προσεδάφιση.
- [6] Agudelo M. O., Moor D. B., (2019) Case study : Quadcopter.
- [7] Kaliampetsou S. (2018) Αυτόματος έλεγχος τετρακοπτήρου με χρήση μεθόδων ευφυΐας σμήνους.
- [8] Pixhawk Overview, <https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html>, July 2020
- [9] Pixhawk 1 Flight Controller, https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk.html#pixhawk-1-flight-controller, Oct 2020
- [10] Jetson Nano, <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit#collapseTechSpecs>, 2021
- [11] Global Positioning System, Wikipedia 2021
- [12] Vibration Isolation, https://docs.px4.io/master/en/assembly/vibration_isolation.html, March 2021

- [13] 3D Printing, Wikipedia, 2021
- [14] Lam H. K.S., Ding L., Cheng T.C.E., Zhou H., (2019) The impact of 3D printing implementation on stock returns
- [15] Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D., (2016) 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective
- [16] Simplify 3D, <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>, 2021
- [17] Spectrum Filament Catalog, 2019
- [18] Introduction to Ros, <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>, Aug 2018
- [19] Gazebo Tutorials, <http://gazebo.org/tutorials>, 2021
- [20] URDF in Gazebo, http://gazebo.org/tutorials/?tut=ros_urdf, 2021
- [21] Setting Velocity on Joints and Links, https://gazebo.org/tutorials?cat=set_velocity&tut=set_velocity, 2021
- [22] Vernacchia M. (2019) Gazebo Motor & Propeller Model Notes
- [23] https://github.com/ros/solidworks_urdf_exporter Oct. 2020
- [24] . Shah M., (1997) Fundamentals of computer vision
- [25] Ntalis K., (2017) Υλοποίηση εύρωστου αλγορίθμου ταυτόχρονης εκτίμησης θέσης και χαρτογράφησης (SLAM) για αυτόματη πλοήγηση μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος.
- [26] Scaramuzza D., Fraundorfer F., (2021) Visual Odometry: The First 30 Years and Fundamentals
- [27] Forster C., Pizzoli M., Scaramuzza D., (2014) SVO: Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry

- [28] Donovanik D., Hardt-Stremayr A., Gremillion G., Weiss S., Nothwang W., (2016) Multi-sensor fusion techniques for state estimation of micro air vehicles
- [29] Forster C., Carlone L., Dellaert F., Scaramuzza D., (2017) On-Manifold Pre-integration for Real-Time Visual-Inertial Odometry
- [30] Anastasiou D., (2020) Εισαγωγή στο φίλτρο Kalman
- [31] Deakin R.D. (2006) The Kalman filter: a look behind the scene.
- [32] Julier J.S., Uhlmann J.K., (2004) Unscented Filtering and Nonlinear Estimation
- [33] Delmerico J., Scaramuzza D., (2018) A Benchmark Comparison of Monocular Visual-Inertial Odometry Algorithms for Flying Robots
- [34] Bloesch M., Omari S., Hutter M., Siegwart H. (2015) Robust Visual Inertial Odometry Using a Direct EKF-Based Approach
- [35] Hertzberg C., Wagner R., Freese U., Schroder L., (2011) Integrating Generic Sensor Fusion Algorithms with Sound State Representations through Encapsulation of Manifolds
- [36] Bloesch M., Burri M., Sammy O., Marco H., Roland S. (2017) Iterated extended Kalman filter based visual-inertial odometry using direct photometric feedback
- [37] Intel (2012) Iterated extended Kalman filter based visual-inertial odometry using direct photometric feedback
- [38] Flight Log Analysis, https://docs.px4.io/master/en/log/flight_log_analysis.html, Oct. 2021
- [39] Thithanhnhan L., Nam-Tuan L., Yeong M., J., (2015) Performance of Rolling Shutter and Global Shutter Camera in Optical Camera Communications
- [40] Brandt, J. B., (2005) "Small-Scale Propeller Performance at Low Speeds," M.S. Thesis, Department of Aerospace Engineering.

- [41] Brandt, J.B. and Selig, M.S., (2011) Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers.
- [42] R. Scopigno, P. Cignoni, N. Pietroni, M. Callieri and M. Dellepiane, (2015). Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey.