



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**Σχεδίαση, μελέτη και κατασκευή συστήματος αυτόνομης πλοήγησης μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος κάθετης απογείωσης-προσγείωσης**



**Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων  
για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης**

**ΥΠΟ**

**Νικόλαο Ι. Βιτζηλαίο**

**Χανιά  
Νοέμβριος 2005**



**Η διατριβή του Νικολάου Βιτζηλαίου, εγκρίνεται**

**Νικόλαος Χρ. Τσουρβελούδης**  
**Επίκουρος Καθηγητής, Επιβλέπων**

---

**Βασίλειος Σ. Κουϊκόγλου**  
**Καθηγητής**

---

**Ιωάννης Κ. Νικολός**  
**Λέκτορας**

---

# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	4
Ευρετήριο Εικόνων .....	6
Ευρετήριο Πινάκων .....	7
Ευχαριστίες .....	8
Σύντομο βιογραφικό σημείωμα .....	9
Περίληψη.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	11
1.2 Δυσκολίες και περιορισμοί .....	12
1.3 Σχετική έρευνα .....	12
1.3.1 Η ομάδα Berkeley Aerobot.....	12
1.3.2 Η ομάδα Georgia Tech Aerial Robotics .....	12
1.3.3 Η ομάδα MIT Aerial Robotics .....	13
1.3.4 Η ομάδα του Carnegie Mellon .....	13
1.4 Σχετικές εργασίες .....	13
1.4.1 Εξοπλισμός ελέγχου (Control Hardware) .....	13
1.4.2 Μεθοδολογικά εργαλεία.....	14
1.5 Στόχος της εργασίας .....	15
1.6 Δομή της εργασίας .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	17
ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΘΕΤΗΣ ΑΠΟ-ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗΣ .....	17
2.1 Κύρια χαρακτηριστικά .....	17
2.1.1 Κύριο Στροφέιο (Main Rotor).....	18
2.1.2 Κινητήρας.....	20
2.1.3 Κεντρικό σύστημα μετάδοσης κίνησης .....	20
2.1.4 Κύριο πλαίσιο .....	21
2.1.5 Ουραίο πλαίσιο .....	21
2.1.6 Ουραίο στροφέιο .....	21
2.2 Ηλεκτρονικά συστήματα .....	22
2.3 Διάταξη προσεδάφισης .....	23
2.4 Διατάξη στροφείων .....	23
2.5 Χρήσεις .....	26
2.5.1 Πολιτικές εφαρμογές .....	26
2.5.2 Στρατιωτικές εφαρμογές.....	28
2.6 Κινηματική .....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	31
ΤΟ ΕΛΙΚΟΠΤΕΡΟ RAPTOR 60.....	31
3.1 Το όχημα Raptor 60 .....	31
3.2 Τηλεκατεύθυνση.....	33
3.3 Γυροσκόπιο .....	37
3.4 Βοηθητικός εξοπλισμός εδάφους .....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	41
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ .....	41
4.1 Απαιτήσεις και προδιαγραφές .....	41
4.1.1 Οικονομία .....	41
4.1.2 Ασφάλεια .....	41

4.1.3 Αξιοπιστία.....	42
4.1.4 Δυνατότητες .....	42
4.1.5 Φυσικοί περιορισμοί.....	42
4.2 Δομή του εξοπλισμού ελέγχου .....	42
4.2.1 Μεθοδολογία ελέγχου.....	42
4.2.2 Διάγραμμα δομής εξοπλισμού .....	43
4.3 Λειτουργικά στοιχεία.....	44
4.3.1 Υπολογιστικό σύστημα.....	44
4.3.2 Δέκτης GPS.....	47
4.3.3 Αδρανειακή μονάδα μέτρησης.....	48
4.3.4 Οδηγός σερβοκινητήρων .....	50
4.3.4 Ασύρματα μόντεμ .....	51
4.3.5 Ψηφιακός διακόπτης .....	53
4.3.6 Συσσωρευτές .....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	56
ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΛΕΓΚΤΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ .....	56
5.1 Απαιτήσεις και προδιαγραφές .....	56
5.2 Ασαφής έλεγχος .....	57
5.2.1 Ασαφής Λογική.....	57
5.2.2 Συναρτήσεις Συμμετοχής .....	57
5.2.3 Μορφή των Συναρτήσεων Συμμετοχής .....	58
5.2.4 Βάση Γνώσης .....	58
5.2.5 Η Συνεπαγωγή του Mamdani .....	59
5.2.6 Δομικά Στοιχεία ενός Ασαφούς Ελεγκτή.....	59
5.2.7 Σχεδιασμός Ασαφούς Ελεγκτή .....	60
5.3 Πλεονεκτήματα ασαφούς λογικής.....	60
5.4 Γιατί ασαφής έλεγχος; .....	61
5.5 Σχεδίαση ελεγκτή πλοήγησης .....	61
5.5.1 Καθορισμός των μεταβλητών εισόδου .....	61
5.5.2 Μεταβλητές εξόδου .....	63
5.5.3 Βάση κανόνων .....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	67
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ .....	67
6.1 Συμπεράσματα .....	67
6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις.....	68
Βιβλιογραφία .....	69

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Τα κύρια τμήματα του VTOL Raptor 60.....	18
Εικόνα 2.2: Η μετάδοση της κίνησης από τον κινητήρα προς τα στροφεία.....	18
Εικόνα 2.3: Τα στοιχεία που αποτελούν το κυρίως στροφείο.....	18
Εικόνα 2.4: Η διάταξη κυλιόμενου δίσκου .....	19
Εικόνα 2.5: Εξισορρόπηση ροπών μέσω του ουραίου στροφείου .....	21
Εικόνα 2.6: Διάταξη κυρίως στροφείου σε συνδυασμό με ουραίο στροφείο. ....	23
Εικόνα 2.7: Διάταξη δίδυμων στροφείων .....	24
Εικόνα 2.8: Διάταξη με στροφεία στο πλάι.....	24
Εικόνα 2.9: Διάταξη με πεπλεγμένα στροφεία .....	25
Εικόνα 2.10: Διάταξη με δύο ομοαξονικά στροφεία. ....	25
Εικόνα 2.11: Το VTOL Yamaha R-Max.....	28
Εικόνα 2.12: Το σύστημα συντεταγμένων των VTOL .....	29
Εικόνα 3.1: Το ελικόπτερο Raptor 60 v2 της Thunder Tiger .....	32
Εικόνα 3.2: Ο κινητήρας PRO-70H της Thunder Tiger .....	32
Εικόνα 3.3: Κυρίως και εφεδρικό ντεπόζιτο.....	33
Εικόνα 3.4: Ο πομπός Hitec Eclipse 7 QPCM .....	33
Εικόνα 3.5: Ο δέκτης Hitec HFD-08RD .....	34
Εικόνα 3.6: Τα servo HS-422 και HS-311 της Hitec.....	35
Εικόνα 3.7: Ανοδική / Καθοδική κίνηση ελικοπτερίου .....	35
Εικόνα 3.8: Εμπρόσθια / οπίσθια κίνηση (roll) .....	36
Εικόνα 3.9: Κίνηση δεξιά-αριστερά (pitch) .....	36
Εικόνα 3.10: Κίνηση ουραίου στροφείου (yaw) .....	37
Εικόνα 3.11: Το γυροσκόπιο GY401 της Futaba .....	38
Εικόνα 3.12: Το GY401 τοποθετημένο στο ελικόπτερο Raptor 60.....	38
Εικόνα 3.13: Κίνηση με απλό γυροσκόπιο .....	39
Εικόνα 3.14: Κίνηση με AVCS γυροσκόπιο .....	39
Εικόνα 3.15: Βοηθητικός εξοπλισμός εδάφους .....	40
Εικόνα 4.1: Κάρτα επεξεργαστή PC104.....	44
Εικόνα 4.2: Κάρτα επέκτασης σειριακών θυρών.....	45
Εικόνα 4.3: Κάρτα τροφοδοσίας.....	46
Εικόνα 4.4: Ο δέκτης GPS .....	47
Εικόνα 4.5: Η κεραία του δέκτη GPS .....	48
Εικόνα 4.6: Η μονάδα μέτρησης αδράνειας .....	48
Εικόνα 4.7: Δομικό διάγραμμα λειτουργίας της μονάδας .....	49
Εικόνα 4.8: Σύστημα συντεταγμένων της μονάδας .....	50
Εικόνα 4.10: Ασύρματο μόντεμ .....	51
Εικόνα 4.11: Ψηφιακός διακόπτης RxMux .....	53
Εικόνα 4.12: Διακόπτης καναλιού 7 στη θέση manual.....	54
Εικόνα 4.13: Διακόπτης καναλιού 7 στη θέση auto.....	54
Εικόνα 4.14: Συσσωρευτής LiPo.....	55
Εικόνα 5.1: Τριγωνική Συνάρτηση Συμμετοχής .....	58
Εικόνα 5.2: Διάφοροι τύποι Συναρτήσεων Συμμετοχής .....	58
Εικόνα 5.3: Συναρτήσεις συμμετοχής γωνίας roll.....	62
Εικόνα 5.4: Συναρτήσεις συμμετοχής γωνιακής ταχύτητας roll.....	63
Εικόνα 5.4: Συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου .....	64
Εικόνα 5.5: Διάγραμμα ελέγχου .....	66

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά ελικοπτήρου Raptor 60 .....	31
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά κινητήρα PRO-70H.....	32
Πίνακας 3.3.: Χαρακτηριστικά σερβοκινητήρων .....	34
Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά της κάρτας επεξεργαστή .....	45
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά της μονάδας μέτρησης αδράνειας .....	49
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά ασύρματου μόντεμ .....	52
Πίνακας 5.1: Κανόνες ασαφούς λογικής.....	65

## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν στην εκπλήρωση της παρούσας διατριβής.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διατριβής, Επίκουρο Καθηγητή Νικόλαο Τσουρβελούδη, που για μια ακόμη φορά με εμπιστεύθηκε και μου ανέθεσε αυτή την εργασία, δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ ερευνητικά με ένα θέμα εξαιρετικά ενδιαφέρον. Η στήριξη που μου παρέχει και οι υποδείξεις του, όλα αυτά τα χρόνια που συνεργαζόμαστε, είναι καθοριστικά για την εξέλιξη των σπουδών μου.

Πολύτιμη ήταν η συμβολή του Σάββα Πιπερίδη, ΕΤΕΠ του Εργαστηρίου Ευφυών Συστημάτων και Ρομποτικής, ο οποίος αφιέρωσε πολύ χρόνο για την εφαρμογή του εξοπλισμού στο ελικόπτερο. Τον ευχαριστώ για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε.

Ευχαριστώ επίσης τον κύριο Στραβαντζάκη Γεώργιο, ΕΤΕΠ του Διατμηματικού Εργαστηρίου Εργαλειομηχανών για την κατασκευή της βάσης στήριξης του ελικοπτέρου.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω στον Εμμανουήλ Κερπινή, Αεροναυπηγό Μηχανικό και χειριστή μη επανδρωμένων αεροσκαφών, για τον χρόνο που διέθεσε για την εκπαίδευσή μου στο χειρισμό του ελικοπτέρου.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους μου και συνεργάτες Εργαστήριο Ευφυών Συστημάτων & Ρομποτικής για την καθημερινή συνεργασία και υποστήριξη.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Η εργασία αυτή αφιερώνεται στη μνήμη της γιαγιάς Αφροδίτης.

Νίκος Βιτζηλαίος  
Νοέμβριος 2005



## **Σύντομο βιογραφικό σημείωμα**

Ο Νικόλαος Ι. Βιτζηλαίος γεννήθηκε στην Αθήνα το 1981, όπου μεγάλωσε και ολοκλήρωσε την βασική του εκπαίδευση στο 20<sup>ο</sup> Ενιαίο Λύκειο Αθηνών. Το 1999, εισήχθη στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το 2004 αποφοίτησε με βαθμό 8,15 (1<sup>ος</sup> σε σειρά αποφοίτησης) και εισήχθη στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Ειδίκευσης του ίδιου τμήματος, στον τομέα Συστημάτων Παραγωγής. Με την εργασία αυτή ολοκληρώνει τις μεταπτυχιακές σπουδές του.

## Περίληψη

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα κάθετης απο-προσγείωσης (ελικόπτερα) αποτελούν τις πιο ευέλικτες ιπτάμενες μηχανές που υπάρχουν σήμερα. Χρησιμοποιούνται σε πληθώρα πολιτικών και στρατιωτικών εφαρμογών και η εξέλιξή τους είναι ραγδαία τόσο σε ερευνητικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο.

Στην παρούσα διατριβή, ασχολούμαστε με ένα από τα σημαντικότερα πεδία έρευνας και ανάπτυξης αυτών των οχημάτων, την πλοήγησή τους. Απώτερος στόχος αυτής της εργασίας είναι να σχεδιαστεί και να αναπτυχθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα αυτόνομης πλοήγησης τέτοιων οχημάτων.

Αρχικά παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά και οι αρχές λειτουργίας και κίνησης των μη επανδρωμένων ελικοπτέρων. Μετά από μια σύντομη επισκόπηση της αγοράς, γίνεται αναγνώριση του συστήματος πλοήγησης και σχηματίζονται οι προδιαγραφές που πρέπει να έχει ένα τέτοιο σύστημα ώστε να είναι ικανό να οδηγεί αυτόνομα το όχημα. Ακολουθεί έρευνα αγοράς για κατάλληλο εξοπλισμό πλοήγησης και συγχρόνως αναπτύσσεται κατάλληλο λογισμικό πλοήγησης. Τέλος, το ολοκληρωμένο σύστημα πλοήγησης (hardware+software) εφαρμόζεται σε πραγματικό όχημα που διαθέτει το Εργαστήριο Ευφυών Συστημάτων & Ρομποτικής του Πολυτεχνείου Κρήτης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Τα εναέρια οχήματα κάθετης απογείωσης-προσγείωσης (ελικόπτερα), αποτελούν τις πιο ευέλικτες ιπτάμενες μηχανές που υπάρχουν σήμερα. Η κατασκευή και ο τρόπος λειτουργίας τους, τους δίνει τη δυνατότητα της κίνησης και εκτέλεσης περίπλοκων ελιγμών στον τρισδιάστατο χώρο. Η ευελιξία κίνησης των ελικοπτέρων είναι το χαρακτηριστικό που τα διαφοροποιεί από οποιοδήποτε άλλο εναέριο όχημα σταθερών πτερυγίων (αεροπλάνο. Ο πιλότος έχει τη δυνατότητα να κινήσει το ελικόπτερο εύκολα σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου, να πραγματοποιήσει σταθερή αιώρηση σε οποιοδήποτε ύψος επιθυμεί και να εκτελέσει ελιγμούς.

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα κάθετης από-προσγείωσης (στην αγγλική αναφέρονται ως **Vertical Take-Off and Landing**, εφεξής θα αναφέρονται ως **VTOL**) αποτελούν μια ειδική κατηγορία των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (**Unmanned Aerial Vehicles**, εφεξής θα αναφέρονται ως **UAVs**) [1]. Τα μη επανδρωμένα VTOLs έχουν τις ίδιες αρχές λειτουργίας και κίνησης με τα αντίστοιχα επανδρωμένα και μπορούν να εκτελέσουν κι αυτά εξίσου περίπλοκες κινήσεις. Έχουν όμως το πλεονέκτημα ότι δεν είναι επανδρωμένα, επομένως μπορεί να έχουν μικρό μέγεθος και να χρησιμοποιηθούν σε επικίνδυνες εφαρμογές χωρίς τον κίνδυνο της απώλειας της ανθρώπινης ζωής ή σε εφαρμογές οι οποίες πρέπει να αυτοματοποιηθούν ώστε να εκτελούνται χωρίς τη φυσική παρουσία ανθρώπου. Η αγορά των VTOL διακρίνεται από μεγάλη ταχύτητα εξέλιξης και πλέον υπάρχουν πολλά είδη VTOL (μικρής ή μεγάλης κλίμακας, με κινητήρες εσωτερικής καύσης ή ηλεκτρικούς, κ.α.) [2], [3], [4]. Αναλυτική παρουσίαση των VTOLs θα γίνει στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Πέραν της κατασκευής και των αρχών λειτουργίας των VTOL, αντικείμενο εκτεταμένης επιστημονικής έρευνας αποτελεί η πλοήγησή τους. Η πλοήγηση τέτοιων οχημάτων είναι εξαιρετικά δύσκολη καθώς η δομή τους και ο τρόπος λειτουργίας τους είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος. Τα κινηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί ως σήμερα εκτός από την πολυπλοκότητά τους διακρίνονται και για την αστάθεια τους, καθώς ενώ περιγράφουν την κίνηση του VTOL, δεν λαμβάνουν υπόψη τους εξωγενείς παράγοντες που το επηρεάζουν, όπως π.χ. ο άνεμος. Έτσι στην πράξη ο έλεγχος ενός VTOL αποδεικνύεται μια πολύπλοκη διαδικασία.

Σε αυτή τη διατριβή καλούμαστε να επιλύσουμε το πρόβλημα της αυτόνομης πλοήγησης. Σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθούν τα μη επανδρωμένα VTOL, να αναλυθούν τα χαρακτηριστικά και η λειτουργία τους, να ξεπεραστεί το πρόβλημα της

πολυπλοκότητας και να σχεδιαστεί σύστημα αυτόνομης πλοήγησης ικανό να ελέγξει κατάλληλα ένα τέτοιο όχημα.

## 1.2 Δυσκολίες και περιορισμοί

Το εγχείρημα της κατασκευής ενός συστήματος ελέγχου για ένα μη επανδρωμένο όχημα παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες και περιορισμούς. Η μεγαλύτερη δυσκολία είναι να ξεπεραστεί το πρόβλημα της αστάθειας. Ένας ελεγκτής αυτόνομης πλοήγησης θα πρέπει να είναι ικανός να προσαρμόζεται στο περιβάλλον πτήσης ενός VTOL και να μην επηρεάζεται από αυτό. Ακόμη το σύστημα θα πρέπει να διαθέτει δικλίδες ασφαλείας και ασφαλούς πλοήγησης καθώς σε περίπτωση σφάλματος του ελεγκτή το VTOL καθίσταται ανεξέλεγκτο και κατά συνέπεια πολύ επικίνδυνο.

Οι περιορισμοί που εμφανίζονται σχετίζονται με το μέγεθος και το βάρος του συστήματος πλοήγησης. Το σύστημα που θέλουμε να κατασκευάσουμε απευθύνεται σε VTOL μικρής κλίμακας επομένως πρέπει να έχει μικρό μέγεθος και βάρος ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα τέτοιο VTOL.

## 1.3 Σχετική έρευνα

Τα τελευταία χρόνια, ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη συστημάτων πλοήγησης για μη επανδρωμένα ελικόπτερα αποτέλεσε το αντικείμενο αρκετών εργασιών. Αυτό οφείλεται στην ανάγκη ύπαρξης ευκίνητων αυτόνομων εναέριων οχημάτων για χρήση σε πολιτικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Τα ελικόπτερα, ενώ είναι πιο αργά από τα αεροπλάνα, έχουν τη δυνατότητα της κάθετης απογείωσης - προσγείωσης και της αιώρησης, και είναι γενικότερα πιο ευέλικτα από τα αεροπλάνα σε περιορισμένους χώρους. Συνεπώς τα ελικόπτερα είναι μια από τις καλύτερες πλατφόρμες για επιχειρήσεις σε περιοχές με περιορισμένο χώρο κινήσεων. Παρόλα αυτά, η κινηματική και η δυναμική ενός ελικοπτέρου είναι πιο περίπλοκη από αυτήν ενός αεροπλάνου. Ένα ελικόπτερο είναι ασταθές στην αιώρηση και τα πτητικά του χαρακτηριστικά είναι πολύ διαφορετικά από του αεροπλάνου. Για αυτούς τους λόγους τα μη επανδρωμένα ελικόπτερα απασχολούν ερευνητικά μεγάλο κομμάτι της επιστημονικής κοινότητας, κυρίως στα ερευνητικά ιδρύματα των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες ερευνητικές ομάδες που ασχολούνται με τη σχεδίαση συστημάτων ελέγχου μη επανδρωμένων ελικοπτέρων.

### 1.3.1 Η ομάδα Berkeley Aerobot

Η ομάδα Berkeley Aerobot (University of California at Berkeley, Robotics and Intelligent Machines Laboratory), ερευνά και αναπτύσσει τεχνικές ελέγχου και αλγορίθμους πλοήγησης για μη επανδρωμένα ελικόπτερα [7], [8], [9], [23]. Η εφαρμογή των αλγορίθμων γίνεται σε ελικόπτερα Yamaha R-50, Yamaha R-MAX και Bergen. Η ομάδα εστιάζει την προσοχή της στο λογισμικό ελέγχου του ελικοπτέρου σε διάφορες αποστολές όπως αποφυγή εμποδίων, αναγνώριση εικόνας, συνεργατική συμπεριφορά κ.α.

### 1.3.2 Η ομάδα Georgia Tech Aerial Robotics

Το Πανεπιστήμιο Georgia Institute of Technology διαθέτει μια από τις μεγαλύτερες ερευνητικές ομάδες στον τομέα των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων. Η ομάδα αυτή αναπτύσσει καινοτόμα συστήματα ελέγχου και πλοήγησης

τα οποία δοκιμάζονται σε πραγματικά οχήματα. Η έρευνα της ομάδας επικεντρώνεται στην πλοήγηση μέσω αναγνώρισης εικόνας, στην αυτόματη εστίαση στόχων, σε συνεργατική συμπεριφορά οχημάτων και σε έλεγχο του οχήματος υπό καθεστώς βλαβών [10], [11],[ 12].

### 1.3.3 Η ομάδα MIT Aerial Robotics

Ο στόχος της ομάδας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση συστημάτων πλοήγησης για μη επανδρωμένα ελικόπτερα. Η ομάδα αυτή ασχολείται ερευνητικά κυρίως με τη μοντελοποίηση των οχημάτων και την όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαράσταση των δυναμικών τους χαρακτηριστικών. Το σύγγραμμα [13] αποτελεί το αποτέλεσμα αυτών των ερευνών. Σε αυτό παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μοντελοποίηση και αναγνώριση συστήματος ενός VTOL. Εκτός από την αναγνώριση του συστήματος έχουν παρουσιαστεί κι ανάλογες τεχνικές ελέγχου [14], [15].

### 1.3.4 Η ομάδα του Carnegie Mellon

Στο Robotics Institute του Πανεπιστημίου Carnegie Mellon υλοποιείται το 'πρόγραμμα αυτόνομου ελικοπτέρου' (Autonomous Helicopter Project) με στόχο την ανάπτυξη ενός ρομποτικού ελικοπτέρου το οποίο να μπορεί αυτόνομα να φέρει εις πέρας την ακόλουθη αποστολή [16], [17]:

- Αυτόνομη εκκίνηση και απογείωση
- Πτήση προς μία προκαθορισμένη περιοχή ακολουθώντας δεδομένη διαδρομή και αποφεύγοντας εμπόδια
- Αναζήτηση και εντοπισμός στόχου στην προκαθορισμένη περιοχή
- Αποστολή εικόνας στο σταθμό βάσης
- Ασφαλής επιστροφή και προσγείωση

## 1.4 Σχετικές εργασίες

Εξετάζοντας τον τομέα της έρευνας πάνω στα μη επανδρωμένα ελικόπτερα παρατηρείται ότι υπάρχουν δύο κατευθύνσεις. Στη μια κατεύθυνση βρίσκονται οι εργασίες που ασχολούνται μόνο με τον έλεγχο των μη επανδρωμένων ελικοπτέρων. Οι εργασίες αυτές προτείνουν αλγορίθμους και συστήματα ελέγχου σε θεωρητικό επίπεδο και οι εφαρμογές τους περιορίζονται κυρίως σε επίπεδο προσομοίωσης. Στην άλλη κατεύθυνση βρίσκονται οι ερευνητές όπου εκτός από τον έλεγχο ασχολούνται και με τον εξοπλισμό ελέγχου. Μελετούν δηλαδή και κατασκευάζουν ολοκληρωμένα συστήματα πλοήγησης τα οποία και δοκιμάζονται σε πραγματικά οχήματα. Στην συνέχεια παρουσιάζονται σχετικές εργασίες και από τις δύο κατευθύνσεις ώστε να σχηματιστεί μία ολοκληρωμένη εικόνα για το αντικείμενο της εργασίας.

### 1.4.1 Εξοπλισμός ελέγχου (Control Hardware)

Για τον έλεγχο του ελικοπτέρου, εκτός από το λογισμικό ελέγχου (software), απαραίτητη είναι και η ύπαρξη κατάλληλου εξοπλισμού (hardware). Σε γενικές γραμμές, ο εξοπλισμός αποτελείται από υπολογιστικό σύστημα και κατάλληλους αισθητήρες (στην αγγλική τα ηλεκτρονικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στα εναέρια οχήματα καλούνται avionics).

Στην εργασία των Gavrillets et al., “Avionics System for a Small Unmanned Helicopter Performing Aggressive Maneuvers” [18], ένα τηλεκατευθυνόμενο ελικόπτερο Xcell-60 εξοπλίζεται με ηλεκτρονικό εξοπλισμό για να μετατραπεί σε αυτόνομο. Παρουσιάζεται αναλυτικά ο εξοπλισμός και η εφαρμογή του στο ελικόπτερο ενώ γίνεται και ανάλυση της δυναμικής του ελικοπτερου, βασισμένη στα δεδομένα πτήσης που δίνει το σύστημα. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζεται ο εξοπλισμός στο όχημα, με κατασκευή ειδικού κουτιού απομόνωσης των κραδασμών του ελικοπτερου. Στο κουτί αυτό τοποθετούνται όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα.

Στην εργασία των Dittrich και Johnson, “Multi-sensor navigation system for an autonomous helicopter” [19], δίδεται έμφαση στην επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων που θα πρέπει να έχει ένα VTOL και στο πως αυτοί θα συνδυαστούν με κατάλληλο λογισμικό ελέγχου. Αρχικά παρουσιάζεται η επιλογή του εξοπλισμού και η ενσωμάτωσή του στο όχημα Yamaha GTMax. Στη διαδικασία αυτή οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη είναι το βάρος, οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις, οι κραδασμοί, η ευελιξία, η ευκολία ενσωμάτωσης του εξοπλισμού, η αποφυγή αγοράς περιττού εξοπλισμού, η συντήρηση και η επεκτασιμότητα. Στη συνέχεια τα δεδομένα των αισθητήρων εισάγονται σε υπολογιστικό σύστημα και φιλτράρονται. Κατασκευάζεται λογισμικό πλοήγησης αλλά πριν αυτό χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές πτήσεις ελέγχεται η διασύνδεση των αισθητήρων με τους αλγόριθμους πλοήγησης και εξετάζεται η σωστή λειτουργία της. Χρησιμοποιώντας λογισμικό προσομοίωσης δοκιμάζονται αρχικά οι αλγόριθμοι. Ο ίδιος έλεγχος επαναλαμβάνεται στον υπολογιστή του ελικοπτερου χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της πρώτης προσομοίωσης. Στη συνέχεια το σύστημα πλοήγησης δοκιμάζεται σε έντροχο όχημα και ακολούθως στο ελικόπτερο. Τέλος, τα δεδομένα της πτήσης, που δείχνουν την απόδοση των αισθητήρων και του συστήματος πλοήγησης, συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Η εργασία των Buskey et al., “Helicopter Automation Using a Low-Cost Sensing System” [20], εκθέτει τη σχεδίαση ενός συστήματος αυτόνομης πλοήγησης χρησιμοποιώντας αισθητήρες χαμηλού κόστους και απλό PID έλεγχο. Το σύστημα τοποθετείται σε ένα τηλεκατευθυνόμενο ελικόπτερο Xcell 60. Η συμπεριφορά του ελικοπτερου, η ταχύτητα και το ύψος του, εκτιμώνται με χρήση μονάδας μέτρησης αδράνειας και συστήματος όρασης. Τα δεδομένα εισέρχονται σε μικροϋπολογιστή, φιλτράρονται και ένας PID ελεγκτής είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο του οχήματος.

Ο R. Duren, στην εργασία του “Development of a small rotary wing autonomous vehicle” [21], περιγράφει την ανάπτυξη ενός μικρού πακέτου ηλεκτρονικών συστημάτων πλοήγησης και την τοποθέτησή του σε ελικόπτερο Bergen Industrial Twin. Η ανάπτυξη του συστήματος περιλαμβάνει τη σχεδίαση και κατασκευή ενός αισθητήρα μέτρησης ύψους με υπέρηχους.

#### 1.4.2 Μεθοδολογικά εργαλεία

Για τον έλεγχο των VTOL, έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετά μεθοδολογικά εργαλεία, όπως προγραμματισμός κέρδους (gain scheduling) [22], γραμμικοποίηση με ανάδραση (linearization feedback) [23], [24], ασαφής έλεγχος (fuzzy control) [25], νευρωνικά δίκτυα (neural networks) [17], [24] και απλός PID έλεγχος (PID control) [26,27]. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά αυτές οι εφαρμογές.

Στην εργασία [22] παρουσιάζεται μια εφαρμογή ελέγχου σε ελικόπτερο με χρήση προγραμματισμού κέρδους. Συνοπτικά, η μέθοδος αυτή λειτουργεί σε στάδια: αρχικά, το μη γραμμικό μοντέλο του ελικοπτερου γραμμικοποιείται για έναν αριθμό διαφορετικών σημείων λειτουργίας. Τα σημεία αυτά μπορεί να είναι διαφορετικές ταχύτητες, διαφορετικά υψόμετρα, διαφορετικές γωνίες. Ως αποτέλεσμα, έχει κατασκευαστεί ένα πλέγμα σημείων λειτουργίας σύμφωνα με τις προαναφερθείσες λειτουργίες και ένα γραμμικό μοντέλο για κάθε σημείο του πλέγματος. Στη συνέχεια

σχεδιάζεται ένας γραμμικός ελεγκτής για κάθε γραμμικό μοντέλο. Όταν οι συνθήκες πτήσης (υψόμετρο, ταχύτητα, γωνίες) αλλάζουν, η γενική στρατηγική ελέγχου προσδιορίζει το σημείο λειτουργίας στο πλέγμα στο οποίο αντιστοιχούν κατά προσέγγιση οι νέες συνθήκες. Στο δεύτερο στάδιο, για τα σημεία του πλέγματος στα οποία δεν αντιστοιχεί γραμμικός ελεγκτής, σχεδιάζεται ένας gain-scheduler ('προγραμματιστής κέρδους') με παρεμβολή ανάμεσα σε γειτονικούς γραμμικούς ελεγκτές. Ο gain-scheduler χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να εκτελεί τη αλλαγή από τον ένα γραμμικό ελεγκτή στον άλλο, δηλαδή να ελέγχει το σύστημα κατά τη διάρκεια της μετάβασης από μία κατάσταση πτήσης σε άλλη. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται gain-scheduling. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι κάθε γραμμικός ελεγκτής είναι αποτελεσματικός μόνο σε μια μικρή γειτονιά γύρω από το σημείο του πλέγματος (κατάσταση πτήσης) στο οποίο αντιστοιχεί. Επομένως για να δουλέψει σωστά το σύστημα, πρέπει η μετάβαση από τον ένα ελεγκτή στον άλλο να είναι ομαλή και να μην προκαλεί αστάθεια στο σύστημα.

Στην εργασία [23], σχεδιάζεται ελεγκτής πλοήγησης ελικοπτέρου βασισμένος σε μη γραμμικό μοντέλο του ελικοπτέρου Ursa-Minor. Η σχεδίαση βασίζεται στην γραμμικοποίηση με ανάδραση εισόδου-εξόδου του μη γραμμικού μοντέλου. Χρησιμοποιούνται εξισώσεις Newton-Euler για τον υπολογισμό της εξόδου για κάθε είσοδο. Η πραγματική έξοδος εισάγεται με ανατροφοδότηση στην είσοδο και χρησιμοποιείται ένα γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης της νέας εξόδου. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι ασταθής σε εξωγενείς συνθήκες (π.χ. άνεμος) και δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε άλλα μοντέλα ελικοπτέρων πλην του Ursa-Minor.

Στην εργασία του Sugeno [25], για την πλοήγηση ενός ελικοπτέρου Yamaha R-50 εφαρμόζεται ιεραρχικός ασαφής ελεγκτής τύπου Mamdani. Ο ελεγκτής αποτελείται από πολλά επίπεδα ελέγχου. Το χαμηλότερο επίπεδο περιέχει ελεγκτές Mamdani για τον έλεγχο των γωνιών pitch, roll και yaw του ελικοπτέρου. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν χρησιμοποιεί άμεσα το μη γραμμικό μοντέλο του ελικοπτέρου, επομένως ο έλεγχος παρουσιάζει αστάθεια στην εφαρμογή του.

Στην εργασία [24], παρουσιάζεται η σχεδίαση ενός προσαρμοστικού ελεγκτή για μη επανδρωμένο ελικόπτερο με χρήση νευρωνικών δικτύων. Η διαδικασία ελέγχου είναι παρόμοια με τη γραμμικοποίηση με ανάδραση, χρησιμοποιείται όμως νευρωνικό δίκτυο για να εξαλείψει τις ατέλειες αυτής της μεθόδου. Το νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιείται για να μειώσει τα λάθη της ανάδρασης κατά τη διάρκεια της πτήσης. Επειδή η προσαρμογή του συστήματος γίνεται σε πραγματικό χρόνο, μειώνεται δραστικά η ανάγκη για εκ των προτέρων γνώση του δυναμικού μοντέλου κίνησης του ελικοπτέρου. Στην εργασία υποστηρίζεται ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί για διαφορετικά μοντέλα αεροσκαφών.

Στην εργασία [26] εφαρμόζεται κλασσικός PID έλεγχος για το μη επανδρωμένο ελικόπτερο Draper. Χρησιμοποιείται μη γραμμικό μοντέλο του συγκεκριμένου ελικοπτέρου και παρουσιάζονται οι μεταβλητές τις οποίες ελέγχει ο ελεγκτής. Το συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι ο έλεγχος PID είναι σχετικά απλός στην εφαρμογή του (δεν χρειάζεται εκπαίδευση το σύστημα ελέγχου όπως στις προηγούμενες μεθόδους), ωστόσο δεν είναι πάντα ευσταθής στην εφαρμογή του σε μοντέλα άλλων ελικοπτέρων.

## 1.5 Στόχος της εργασίας

Στόχος της εργασίας είναι να κατασκευαστεί σύστημα αυτόνομης πλοήγησης για μη επανδρωμένο VTOL, ικανό να εκτελεί αυτόνομη πλοήγηση δια μέσου σημείων αναφοράς (way-point navigation). Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει εξοπλισμό (hardware) και λογισμικό (software). Ο εξοπλισμός αποτελείται από κατάλληλους αισθητήρες και υπολογιστικό σύστημα. Το λογισμικό του υπολογιστικού συστήματος είναι υπεύθυνο για τη λήψη δεδομένων από τους αισθητήρες, την κατάλληλη

επεξεργασία αυτών και τον έλεγχο του VTOL. Το σύστημα θα λαμβάνει ως είσοδο από τον χρήστη δεδομένα σημεία στο χώρο και θα καλείται να κινήσει το VTOL δια μέσου αυτών των σημείων.

Απώτερος στόχος της εργασίας είναι ο εξοπλισμός και το λογισμικό να μετουσιωθούν σε ένα ολοκληρωμένο πακέτο πλοήγησης ικανό να μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα σε VTOL μικρής κλίμακας. Για το σκοπό αυτό, το σύστημα πλοήγησης, εφαρμόζεται και δοκιμάζεται στο VTOL Raptor 60 του Εργαστηρίου Ευφυών Συστημάτων & Ρομποτικής.

## **1.6 Δομή της εργασίας**

Η εργασία είναι δομημένη ως ακολούθως:

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα εναέρια οχήματα κάθετης απο-προσγείωσης. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά κατασκευής και λειτουργίας τους, αναλύεται η κινηματική τους και γίνεται μια σύντομη επισκόπηση της αγοράς των VTOL.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το όχημα Raptor 60 του Εργαστηρίου Ευφυών Συστημάτων & Ρομποτικής. Το όχημα αυτό αποτέλεσε τη βάση της έρευνας αυτής.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ο εξοπλισμός (hardware) του συστήματος πλοήγησης. Προσδιορίζονται οι προδιαγραφές του εξοπλισμού, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται και δίδεται το δομικό διάγραμμα εξοπλισμού του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η σχεδίαση του ελεγκτή. Αρχικά παρουσιάζεται η ασαφής λογική, βάσει της οποίας στη συνέχεια προτείνεται η κατασκευή ασαφούς ελεγκτή πλοήγησης.

Η διατριβή ολοκληρώνεται με το Κεφάλαιο 6, όπου παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας έρευνας.



### ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΘΕΤΗΣ ΑΠΟ-ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗΣ

Τα μη επανδρωμένα ελικόπτερα απαντώνται σε πολλά σχήματα και μεγέθη, αλλά τα περισσότερα αποτελούνται από τα ίδια βασικά στοιχεία. Τα κύρια τμήματα ενός μη επανδρωμένου οχήματος κάθετης από-προσγείωσης διαφοροποιούνται ελάχιστα από τα αντίστοιχα ενός επανδρωμένου ελικοπτέρου κανονικής κλίμακας.

#### 2.1 Κύρια χαρακτηριστικά

Σαν κύρια στοιχεία θεωρούνται ο σκελετός, ο κινητήρας, ο άξονας κίνησης, το κύριο και το ουραίο στροφέιο και το σύστημα προσγείωσης. Στην Εικόνα 2.1 φαίνονται τα βασικά αυτά τμήματα του ελικοπτέρου και στη συνέχεια θα γίνει αναφορά σε καθένα από αυτά.. Αρχικά αναλύονται τα τμήματα της πλέον διαδεδομένης σχεδίασης με κύριο και ουραίο στροφέιο [5], [6], [7]. Στις Εικόνες 2.1 και 2.2 παρουσιάζεται η θέση του κάθε τμήματος πάνω στο όχημα και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης προς το ουραίο στροφέιο.



Εικόνα 2.1: Τα κύρια τμήματα του VTOL Raptor 60

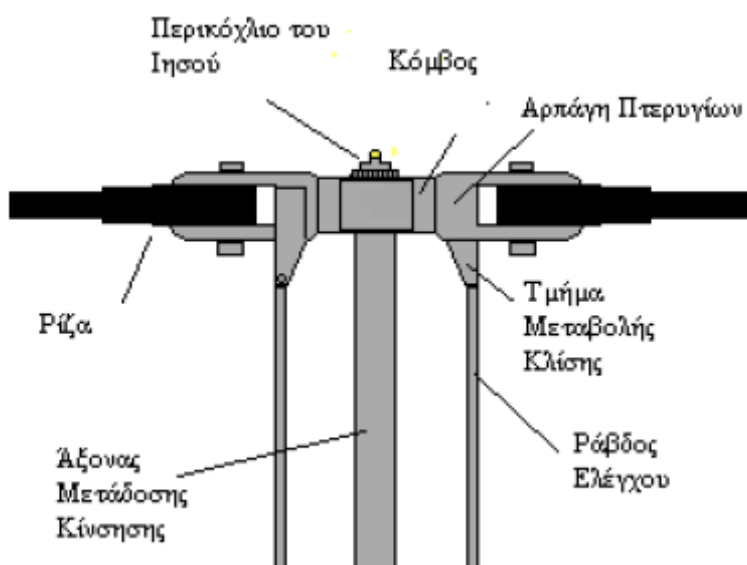


Εικόνα 2.2: Η μετάδοση της κίνησης από τον κινητήρα προς τα στροφεία

### 2.1.1 Κύριο Στροφέιο (Main Rotor)

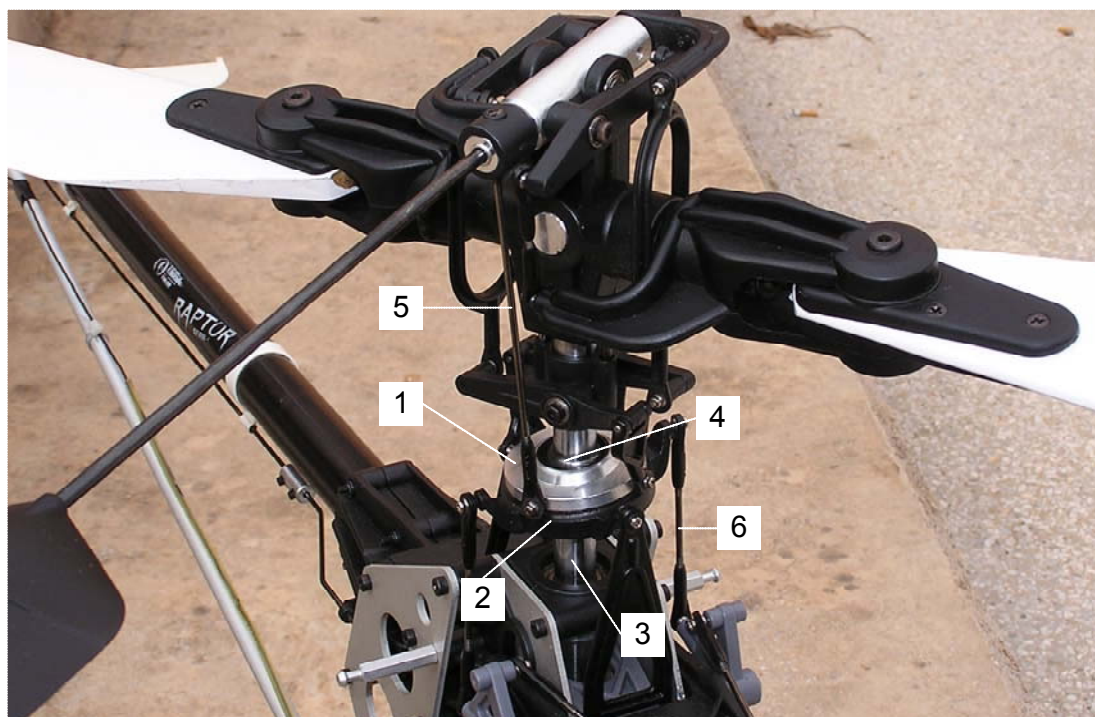
Το κυρίως στροφέιο προσδίδει την δύναμη ανύψωσης που επιτρέπει στο ελικόπτερο να πετάει, καθώς επίσης και τον αναγκαίο έλεγχο, που του επιτρέπει να κινείται οριζόντια, να εκτελεί ελιγμούς και να αλλάζει ύψος. Για την επίτευξη όλων αυτών των λειτουργιών, το στροφέιο πρέπει καταρχήν να είναι πολύ ανθεκτικό, κυρίως ως προς τις δυνάμεις στρέψης και κάμψης που ασκούνται πάνω του. Επίσης, θα πρέπει να επιτρέπει την ρύθμιση της κλίσης των πτερυγίων που βρίσκονται πάνω σ' αυτό (Εικόνα 2.3). Οι ρυθμίσεις επιτυγχάνονται μέσω μίας διάταξης που ονομάζεται διάταξη κυλιόμενου δίσκου (swash plate assembly) (Εικόνα 2.4).

Το κυρίως στροφέιο αποτελείται από πολλά επιμέρους συνδεδεμένα μεταξύ τους τμήματα, που παρουσιάζονται αναλυτικά στην Εικόνα 2.3 και περιγράφονται στη συνέχεια.



Εικόνα 2.3: Τα στοιχεία που αποτελούν το κυρίως στροφέιο

- ο **Ρίζα (Root)**: Το εσωτερικό τελείωμα του πτερυγίου που συνδέει το στροφέιο με την αρπάγη των πτερυγίων.
- ο **Αρπάγη των Πτερυγίων (Blade Grip)**: Σημείο πρόσδεσης των πτερυγίων πάνω στον κόμβο.
- ο **Κόμβος (Hub)**: Βρίσκεται πάνω από τον άξονα σύνδεσης και συνδέει τις πτέρυγες του στροφείου με τις ράβδους ελέγχου.
- ο **Άξονας Μετάδοσης Κίνησης (Mast)**: Περιστρεφόμενος από το κιβώτιο μετάδοσης κίνησης άξονας, ο οποίος συνδέει τα πτερύγια με το ελικόπτερο.
- ο **Ράβδοι Ελέγχου (Control Tubes)**: Οι ράβδοι μέσω των οποίων αλλάζει η κλίση των πτερυγίων του στροφείου.
- ο **Ντίζα Μεταβολής Κλίσης (Pitch Change Horn)**: Η ντίζα που μετατρέπει την κίνηση των ράβδων ελέγχου σε μεταβολή, όπως κλίση των πτερυγίων του στροφείου.
- ο **Κλίση (Pitch)**: Αύξηση ή μείωση της γωνίας των πτερυγίων του στροφείου για την ανύψωση, χαμήλωμα ή μεταβολή της διεύθυνσης της δύναμης ώθησης.
- ο **Περικόχλιο του Ιησού (Jesus Nut)**: Είναι το μοναδικό περικόχλιο που συγκρατεί τον κόμβο πάνω στον άξονα μετάδοσης κίνησης.



Εικόνα 2.4: Η διάταξη κυλιόμενου δίσκου

Η διάταξη κυλιόμενου δίσκου (Εικόνα 2.4), ανήκει στο κυρίως στροφέιο και έχει δύο βασικούς ρόλους:

- Μεταβάλλει τη γωνία δύο πτερυγίων ταυτόχρονα, αυξάνοντας ή μειώνοντας την δύναμη ανύψωσης το στροφέιο, επιτρέποντας στο όχημα να κερδίσει ή να χάσει ύψος.
- Μεταβάλλει την γωνία των πτερυγίων ανεξάρτητα καθώς περιστρέφονται. Αυτό επιτρέπει στο ελικόπτερο να κινηθεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση γύρω από ένα κύκλο 360 μοιρών, περιλαμβάνοντας και την εμπρός, πίσω, δεξιά και αριστερά κίνηση.

Η διάταξη αποτελείται από δύο δίσκους (τον σταθερό και τον περιστρεφόμενο) που φαίνονται αριθμημένοι ως 1 και 2 αντίστοιχα στην Εικόνα 2.4.

- Ο περιστρεφόμενος κυλιόμενος δίσκος περιστρέφεται μαζί με τον άξονα κίνησης (3) εξαιτίας των συνδέσεων (4).
- Οι ράβδοι ελέγχου κλίσης (5) επιτρέπουν στον περιστρεφόμενο κυλιόμενο δίσκο να αλλάζει την κλίση των πτερυγίων.
- Η γωνία του σταθερού κυλιόμενου δίσκου, μεταβάλλεται μέσω των ράβδων ελέγχου (6), που είναι συνδεδεμένοι σε αυτόν.
- Οι ράβδοι ελέγχου του σταθερού δίσκου επηρεάζονται από τις εντολές πλοήγησης μέσω των χειριστηρίων.
- Ο δύο δίσκοι έρχονται σε επαφή μέσω εδράνων ολίσθησης, που βρίσκονται ανάμεσα τους.

### 2.1.2 Κινητήρας

Ο κινητήρας αναλαμβάνει να δώσει την απαραίτητη ισχύ στα στροφέα του ελικοπτέρου. Η επιλογή της ισχύος της μηχανής εξαρτάται από το μέγεθος του ελικοπτέρου, το ωφέλιμο φορτίο που αυτό μεταφέρει και τις επιθυμητές δυνατότητες πτήσης, δηλαδή το μέγιστο ύψος και τη μέγιστη ταχύτητα. Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται είναι διαφόρων τύπων, απλοί δίχρονοι ή τετράχρονοι βενζινοκινητήρες, κινητήρες Wankel ή ακόμα και στροβιλοελικοφόροι (Turboprop). Οι δίχρονοι προτιμούνται λόγω της απλότητας κατασκευής και συντήρησης τους σε μικρά και ελαφρά οχήματα. Οι περιστροφικοί κινητήρες Wankel έχουν πολύ μεγαλύτερη ισχύ αλλά είναι δύσκολοι στη συντήρησή τους, λόγω πολυπλοκότητας και συνήθως χρησιμοποιούνται σε μεσαίου μεγέθους οχήματα. Τέλος οι στροβιλοελικοφόροι κινητήρες διαθέτουν μεγάλη ισχύ και χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλου μεγέθους οχήματα.

### 2.1.3 Κεντρικό σύστημα μετάδοσης κίνησης

Το *κεντρικό σύστημα μετάδοσης κίνησης*, μεταφέρει την απαιτούμενη ισχύ από τον κινητήρα στο κυρίως και το ουραίο στροφέο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός συστήματος οδοντωτών τροχών, που σχεδιάζεται κατάλληλα, ανάλογα με τις στροφές του κινητήρα και την επιθυμητή ροπή και ταχύτητα περιστροφής του στροφείου.

Για την περιστροφή του κυρίως στροφείου, χρησιμοποιείται ο *κύριος άξονας μετάδοσης κίνησης*. Είναι ο άξονας που μεταφέρει την κίνηση από το κιβώτιο μετάδοσης στο κυρίως στροφέο.

Ο *πίσω άξονας μετάδοσης κίνησης* αναλαμβάνει να θέσει σε περιστροφή το ουραίο στροφέο του ελικοπτέρου. Στην ουσία, είναι ο άξονας που μεταφέρει την κίνηση από το κεντρικό σύστημα μετάδοσης στο στροφέο του ουραίου τμήματος. Ο άξονας αυτός καταλήγει σε ένα κιβώτιο μετάδοσης 90° μοιρών, περιστρέφοντας τα πτερύγια του ουραίου στροφείου. Σε ελικοπτερα που χρησιμοποιούνται διατάξεις δύο κύριων στροφείων το τμήμα αυτό απουσιάζει.

Τέλος, το *ουραίο κιβώτιο μετάδοσης κίνησης* είναι αυτό που μετατρέπει την περιστροφή του άξονα μετάδοσης κίνησης του *ουραίου στροφείου* σε περιστροφή ενός άξονα κάθετου προς αυτόν, περιστρέφοντας τα πτερύγια του ουραίου στροφείου. Στις περισσότερες περιπτώσεις μη επανδρωμένων οχημάτων το κιβώτιο δεν αλλάζει τις στροφές και την ροπή που μεταφέρεται από τον άξονα κίνησης του πίσω στροφείου.



### 2.1.4 Κύριο πλαίσιο

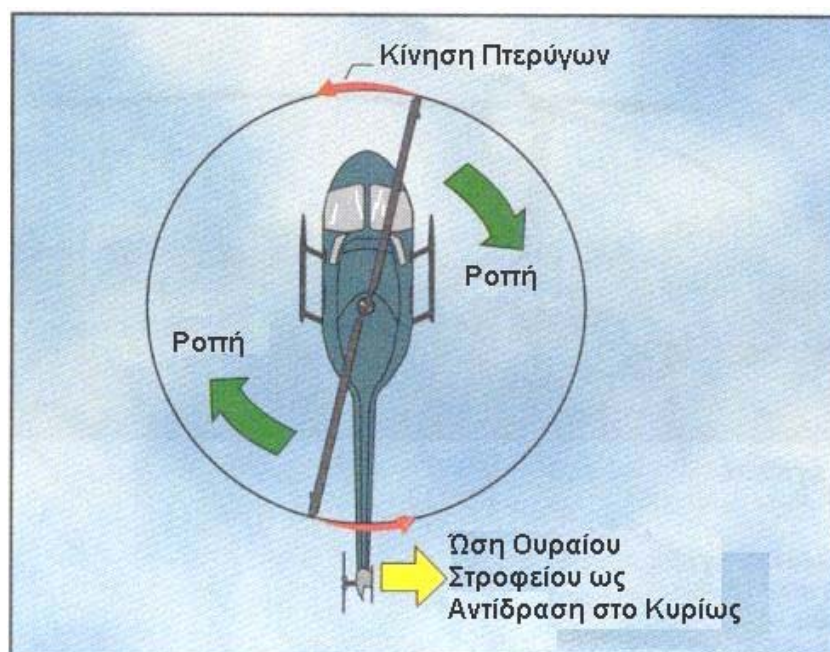
Αποτελεί το σώμα του οχήματος πάνω στο οποίο δένονται όλα τα υπόλοιπα τμήματα όπως μηχανή, κιβώτιο μετάδοσης κίνησης, κυρίως στροφείο, πλαίσιο ουράς ελικοπτέρου κ.λ.π. Βασική προϋπόθεση για την κατασκευή του είναι η επιλογή των κατάλληλων υλικών ώστε να διαθέτουν την απαιτούμενη αντοχή, στιβαρότητα και ακαμψία. Ειδικά στο χώρο όπου εδράζεται η μηχανή χρησιμοποιούνται ειδικοί ελαστικοί σύνδεσμοι για περιορισμό των ταλαντώσεων που μεταφέρονται στο πλαίσιο.

### 2.1.5 Ουραίο πλαίσιο

Αποτελεί την ουρά του ελικοπτέρου πάνω στην οποία συγκρατείται το ουραίο στροφείο. Το τμήμα αυτό μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να μην υπάρχει όπως συμβαίνει σε οχήματα που χρησιμοποιούνται διατάξεις δύο κύριων στροφείων. Όπως και το κυρίως πλαίσιο θα πρέπει να έχει δεδομένη αντοχή και ακαμψία.

### 2.1.6 Ουραίο στροφείο

Ο κύριος ρόλος του ουραίου στροφείου είναι να αντισταθμίζει την ροπή από το κύριο στροφείο και να κρατά το ελικόπτερο ευθυγραμμισμένο.



Εικόνα 2.5: Εξισορρόπηση ροπών μέσω του ουραίου στροφείου

Δίνοντας μεγαλύτερη ή μικρότερη κλίση στα πτερύγια του ουραίου στροφείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να στρίψει το ελικόπτερο αριστερά ή δεξιά. Το ουραίο στροφείο είναι συνδεδεμένο με το κύριο στροφείο με ένα σύστημα αξόνων μετάδοσης κίνησης και κιβωτίων οδοντωτών τροχών. Σε οχήματα που χρησιμοποιούνται διατάξεις δύο κύριων στροφείων το τμήμα αυτό απουσιάζει.

## 2.2 Ηλεκτρονικά συστήματα

Στο τμήμα αυτό τοποθετούνται όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές που είναι απαραίτητες για τον έλεγχο και την πλοήγηση ενός μη επανδρωμένου οχήματος.

### **A) GPS (Global Positioning System)**

Το GPS είναι ένα σύστημα το οποίο βασίζεται σε ένα ειδικά κωδικοποιημένο σήμα που προέρχεται από δορυφόρους και λαμβάνεται από ένα δέκτη τοποθετημένο στο σκάφος, ώστε να προσδιορίζεται η θέση του. Για να υπολογιστεί η θέση του σκάφους στον τρισδιάστατο χώρο απαιτείται σήμα από τέσσερις δορυφόρους.

### **B) Μονάδα μέτρησης αδράνειας**

Η μονάδα μέτρησης αδράνειας είναι μια συσκευή μέτρησης της κατεύθυνσης και της συμπεριφοράς του αεροσκάφους. Μετράει τις γωνίες κλίσης του οχήματος και τις επιταχύνσεις σε τρεις διαστάσεις.

### **Γ) Σύστημα επικοινωνίας**

Ασύρματο σύστημα επικοινωνίας του οχήματος με τον σταθμό βάσης για την μετάδοση πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα μπορεί να είναι μονόδρομο και αμφίδρομο. Στην πρώτη περίπτωση αποστέλλονται πληροφορίες μόνο από το ελικόπτερο προς τη βάση (οπότε ο σταθμός βάσης έχει εποπτικό χαρακτήρα) ενώ στη δεύτερη ο σταθμός βάσης στέλνει συγχρόνως σήματα στο ελικόπτερο.

### **Δ) Αισθητήρες ελέγχου ύψους**

Αναγκαία αισθητήρια για την πλοήγηση του οχήματος που παρέχουν το ύψος πτήσης του σκάφους. Μπορούν να είναι βαρομετρικοί αισθητήρες, είτε περισσότερο εξελιγμένοι αισθητήρες όπως είναι αισθητήρες laser, ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια. Υψομετρικά δεδομένα δίνει και το GPS με μικρότερη όμως ακρίβεια.

### **E) Radar**

Με την χρήση του radar το όχημα ανιχνεύει πιθανά εμπόδια και χρησιμοποιεί αλγόριθμους αποφυγής τους ή ο χειριστής που χειρίζεται το όχημα από απόσταση κάνει του κατάλληλους χειρισμούς αποφυγής.

### **Στ) Γυροσκόπιο**

Το γυροσκόπιο είναι υπεύθυνο για την ευστάθεια της ουράς του σκάφους. Συνοπτικά αναφέρουμε ότι ελέγχει συνεχώς το ουραίο στροφείο και είναι υπεύθυνο για τη σταθερότητά του. Θα εξηγηθεί στη συνέχεια αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας του.

### **Ζ) Ηλεκτρονικός υπολογιστής**

Είναι υπεύθυνος για την συλλογή των δεδομένων από τους αισθητήρες του οχήματος και την ταυτόχρονη αποστολή σημάτων ελέγχου. Σε αυτόν είναι αποθηκευμένο το σενάριο πτήσης και οι αλγόριθμοι κίνησης του σκάφους. Αποτελεί δηλαδή την πλατφόρμα στην οποία αποθηκεύεται η νοημοσύνη του οχήματος

## 2.3 Διάταξη προσεδάφησης

Η διάταξη προσεδάφησης είναι το τμήμα πάνω στο οποίο στηρίζεται το σώμα του ελικοπτήρου κατά την προσεδάφιση. Υπάρχουν διάφορα είδη συστημάτων προσεδάφησης.

### Απλό σύστημα προσγείωσης

Είναι το βασικό σύστημα προσγείωσης που έχουν τα ελικόπτερα. Ουσιαστικά πρόκειται για δύο μεταλλικές ράβδους παράλληλες προς το σκάφος συνδεδεμένες μεταξύ τους μέσω δύο άλλων ράβδων σχήματος Π, κάθετων προς το σκάφος. Πρόκειται δηλαδή για ένα μεταλλικό πλαίσιο στήριξης του οχήματος. Το κύριο πλεονέκτημα του είναι ότι είναι ελαφρύ.

### Σύστημα προσγείωσης με ρόδες

Το σύστημα προσγείωσης με ρόδες προτιμάται σε μεγάλα ελικόπτερα που έχουν πρόβλημα μετακίνησης όταν είναι προσγειωμένα. Σε κάποιες περιπτώσεις έχουν το πλεονέκτημα ότι κατά την πτήση οι ρόδες ανασύρονται και βελτιώνεται η αεροδυναμική του οχήματος. Κύριο μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι το αυξημένο βάρος του.

### Σύστημα προσγείωσης με πλωτήρες

Το σύστημα αυτό είναι ανάλογο με το απλό σύστημα προσγείωσης αλλά αντί μεταλλικών ράβδων διαθέτει πλωτήρες, που επιτρέπουν στο όχημα να επιπλέει στο νερό.

## 2.4 Διατάξη στροφείων

Διάφορες διατάξεις στροφείων χρησιμοποιούνται σε επανδρωμένα και μη ελικόπτερα με σκοπό την βελτίωση ορισμένων λειτουργικών χαρακτηριστικών ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται το όχημα.

### Διάταξη κύριου και ουραίου στροφείου:

Η συνηθέστερη διάταξη που χρησιμοποιείται είναι ο συνδυασμός κύριου και ουραίου στροφείου. Το ουραίο στροφείο αντισταθμίζει την ροπή στρέψης, η οποία παράγεται από το κύριο στροφείο. Είναι επίσης υπεύθυνο για τον έλεγχο του ελικοπτήρου στον κατακόρυφο άξονα κατά την διάρκεια της αιώρησης. Αποτελεί την πιο απλή διάταξη και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον και στα μη επανδρωμένα οχήματα.



Εικόνα 2.6: Διάταξη κυρίως στροφείου σε συνδυασμό με ουραίο στροφείο.

**Διάταξη δίδυμων κύριων στροφείων:**

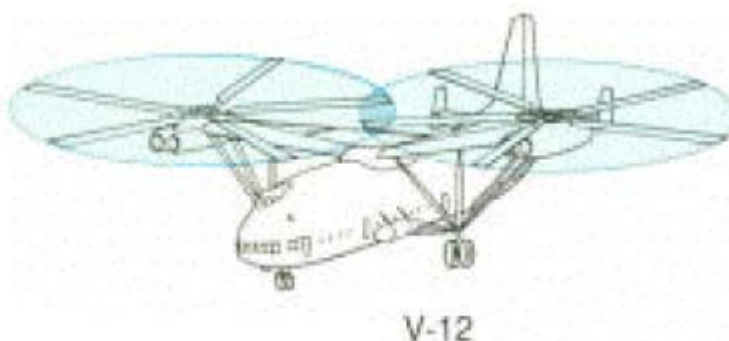
Η διάταξη με δίδυμα κυρία στροφεία χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλα ελικόπτερα. Εξαιτίας της αντίστροφης περιστροφής των στροφείων, η ροπή στην άτρακτο αλληλοεξουδετερώνεται. Η κατασκευή του συστήματος ελέγχου είναι πολυπλοκότερη από το σύστημα ελέγχου της διάταξης με στροφείο στην ουρά. Ο έλεγχος κατά την αιώρηση πραγματοποιείται με αλλαγή της κλίσεως των πτερύγων κάθε στροφείου.



Εικόνα 2.7: Διάταξη δίδυμων στροφείων

**Διάταξη πλαϊνών στροφείων:**

Η διάταξη με δύο στροφεία στο πλάι δεν ήταν ποτέ ιδιαίτερα δημοφιλής. Χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του μεγαλύτερου ελικοπτέρου που κατασκευάστηκε ποτέ χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία.



Εικόνα 2.8: Διάταξη με στροφεία στο πλάι

**Διάταξη πεπλεγμένων στροφείων:**

Όπως και στη διάταξη με τα δίδυμα στροφεία και αυτή δεν απαιτεί ουραίο στροφείο, γιατί η ροπή αντισταθμίζεται από την αντίστροφη περιστροφή τους. Αυτό το σύστημα αναπτύχθηκε στα πρώτα στάδια της πτήσης με ελικόπτερα αλλά γρήγορα εγκαταλείφθηκε. Σήμερα αυτή η μέθοδος ξαναμελετάται και χρησιμοποιείται από το K-MAX της Kaman.





Εικόνα 2.9: Διάταξη με πεπλεγμένα στροφεία

**Διάταξη ομοαξονικών στροφείων:**

Πρόκειται για δύο στροφεία πάνω στον ίδιο άξονα περιστροφής. Το ένα στροφείο είναι στην κορυφή και το άλλο στρέφεται με αντίστροφη φορά. Ο έλεγχος στον κάθετο άξονα πραγματοποιείται ως αποτέλεσμα διαφορετικών δυνάμεων ανύψωσης που δημιουργεί το κάθε στροφείο. Ανάλογα με το στροφείο που παράγει την μεγαλύτερη δύναμη ανύψωσης το ελικόπτερο στρίβει προς την μια ή την άλλη κατεύθυνση. Αυτά τα ελικόπτερα δεν φτάνουν σε μεγάλη ταχύτητα πτήσης, λόγω της μεγάλης οπισθέλκουσας.



Εικόνα 2.10: Διάταξη με δύο ομοαξονικά στροφεία.

## 2.5 Χρήσεις

Οι χρήσεις των οχημάτων κάθετης απο-προσγείωσης δύναται να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες [3], [4], [5]. Στις χρήσεις που σχετίζονται με πολιτικές εφαρμογές και σε αυτές που σχετίζονται με στρατιωτικές εφαρμογές.

### 2.5.1 Πολιτικές εφαρμογές

Οι πολιτικές χρήσεις των VTOLs μέχρι και σήμερα είναι δύο. Είναι οι εφαρμογές που σχετίζονται με

- 1) παρακολούθηση, έλεγχο, και
- 2) γεωργία.

#### 1) Παρακολούθηση

Τα VTOLs μπορούν να εξοπλιστούν με πλειάδα εξαρτημάτων που τα καθιστούν ιδανικά για παρακολούθηση. Τέτοια εξαρτήματα είναι κάμερες, υπέρυθρες ή μή, μικρόφωνα κ.λ.π. Στην κατηγορία παρακολούθησης εντάσσονται και διάφορες επιστημονικές μελέτες όπως είναι για παράδειγμα η συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων. Για την κατηγορία των επιστημονικών μελετών απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός. Στη συνέχεια αναφέρονται εφαρμογές που είτε χρησιμοποιούν είτε έχει προταθεί η χρήση VTOL.

##### α) Παρακολούθηση αγωγών

Τα VTOLs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παρακολούθηση αγωγών πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Το μήκος των αγωγών και οι περιοχές από τις οποίες διέρχονται καθιστά την παρακολούθηση τους δύσκολη. Με την βοήθεια των VTOLs μπορεί να γίνει εποπτικός έλεγχος και ενδεχομένως και επιχειρήσεις φύλαξης τους από διάφορους κινδύνους. Η μικρή ταχύτητα καθώς και η δυνατότητα να αιωρούνται, καθιστούν τα VTOL ιδανικά για την επιτήρηση αγωγών.

##### β) Επιτήρηση γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος

Ανάλογη χρήση με την χρήση επιτήρησης αγωγών είναι και η επιτήρηση γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος. Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος είναι ευαίσθητος τομέας για την ασφάλεια και την ομαλή λειτουργία της κοινωνικής και παραγωγικής διαδικασίας της χώρας. Το μεγάλο μέγεθος του δικτύου καθιστά δύσκολη την αστυνόμευση με παραδοσιακές μεθόδους (ομάδες περιφρούρησης). Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την βοήθεια των VTOLs, που μπορούν να επιτηρήσουν μεγάλες περιοχές δίχως να χρειάζονται την βοήθεια επίγειων δυνάμεων.

##### γ) Αστυνόμευση.

Μεγάλες είναι οι δυνατότητες χρήσης των VTOLs σε ρόλο αστυνόμευσης. Ήδη η αστυνομία στην χώρα μας, αλλά και σε άλλες χώρες κάνει χρήση επανδρωμένων ελικοπτέρων. Σε πολλές περιπτώσεις, η χρήση τέτοιων ελικοπτέρων μπορεί να αντικατασταθεί από VTOLs. Οι δυνητικές χρήσεις και εδώ είναι πολλές. Ως παράδειγμα αναφέρεται η επιτήρηση αυτοκινητοδρόμων και η παρακολούθηση συγκεντρωμένου πλήθους.

**δ) Μέσα μαζικής ενημέρωσης.**

Τα VTOLs μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα ΜΜΕ για την κάλυψη γεγονότων όπου η χρήση ομάδας ανθρώπων είναι δύσκολη ή εγκυμονεί κινδύνους (τρομοκρατικές ενέργειες, διαδηλώσεις, φυσικές καταστροφές κλπ). Το μικρό κόστος τους σε σχέση με τα επανδρωμένα ελικόπτερα, καθώς και η ευκολία στην ανάπτυξη τους στον χώρο όπου συμβαίνουν τα διάφορα γεγονότα τα καθιστούν ιδανικές πλατφόρμες για την εφαρμογή αυτή.

**ε) Επιτήρηση συνόρων.**

Η χώρα μας έχει εκτεταμένα χερσαία και θαλάσσια σύνορα τα οποία είναι πολύ δύσκολο να επιτηρηθούν. Το ολοένα και αυξανόμενο κύμα λαθρομεταναστών καθιστά την συστηματική επιτήρηση των συνόρων αναγκαία. Τα VTOLs μπορούν να δώσουν λύσεις στον τομέα αυτό, καθώς μπορούν να επιτηρήσουν δύσβατες περιοχές και εκτεταμένους θαλάσσιους χώρους, δεδομένου ότι έχουν την δυνατότητα να απογειώνονται και να προσγειώνονται σε πλοία.

**στ) Αποστολές διάσωσης.**

Τα VTOLs μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε αποστολές έρευνας και διάσωσης ως επικουρικά σκάφη για την ανεύρεση ναυαγών, χαμένων ανθρώπων σε δύσβατες περιοχές κ.λ.π.

**ζ) Έρευνα για πετρέλαιο και φυσικό αέριο.**

Κατάλληλα εξοπλισμένα VTOLs μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες για την ανεύρεση πετρελαίου και φυσικού αερίου.

**η) Πυροπροστασία.**

Είναι δυνατή η χρήση VTOLs για επικουρικό ρόλο στην πυροπροστασία. Έχουν την δυνατότητα να περιπολούν σε δασικές ή καλλιεργήσιμες εκτάσεις και εξοπλισμένα κατάλληλα (με κάμερες υπέρυθρων), να ανιχνεύουν εστίες πυρκαγιάς. Η εφαρμογή αυτή, μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη στην χώρα μας ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες. Με την βοήθεια κατάλληλου εξοπλισμού, μπορούν να βοηθήσουν στον συντονισμό του έργου κατάσβεσης.

**θ) Αλιεία.**

Μελετάται η χρήση VTOLs στην αλιεία. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ανιχνεύουν μεγάλα κοπάδια ψαριών και να καθοδηγούν τα αλιευτικά σκάφη σε αυτά.

**ι) Χρήση σε τοπογραφικές εφαρμογές.**

Είναι δυνατή η χρήση σε τοπογραφικές εφαρμογές. Χαρακτηριστική περίπτωση τέτοιας χρήσης είναι το εθνικό κτηματολόγιο, για το οποίο μπορούν να συλλέξουν δεδομένα με αεροφωτογραφίες και άλλους τρόπους.

**κ) Χρήση σε παρατήρηση φυσικών καταστροφών.**

Έχει γίνει χρήση των VTOLs για παρακολούθηση φυσικών καταστροφών. Τα VTOLs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μελετηθούν φαινόμενα όπως είναι εκρήξεις ηφαιστείων, σεισμοί, ασυνήθιστα μετεωρολογικά φαινόμενα κ.α.

## 2) Εφαρμογές στην γεωργία

Κατάλληλα κατασκευασμένα VTOLs μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αποστολές αεροψεκασμού καθώς και σε άλλες γεωργικές εργασίες. Η συγκεκριμένη χρήση έχει βρει μεγάλη εφαρμογή στην Ιαπωνία όπου για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα VTOL της Yamaha (Εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.11: Το VTOL Yamaha R-Max

### 2.5.2 Στρατιωτικές εφαρμογές

Οι στρατιωτικές χρήσεις των VTOLs μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε χρήσεις που σχετίζονται με αναγνώριση και επιτήρηση, επιχειρησιακές χρήσεις και ως μη επανδρωμένοι στόχοι.

#### 1) Αναγνώριση και επιτήρηση

Η κύρια χρήση των VTOLs είναι η αναγνώριση και η επιτήρηση. Όλα σχεδόν τα οχήματα χρησιμοποιούνται στον τομέα της αναγνώρισης και επιτήρησης. Ο τομέας αυτός έχει μια πληθώρα επιμέρους εφαρμογών, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

##### α) Στόχευση από απόσταση.

Είναι δυνατή η χρήση τους για την καθοδήγηση οπλικών συστημάτων από απόσταση. Οι χρήστες των VTOLs μπορούν να σκοπεύουν δίχως οι ίδιοι να κινδυνεύουν.

##### β) Απεικόνιση του πεδίου μάχης.

Με χρήση κατάλληλων συσκευών, μπορούν τα VTOLs να στείλουν μια σαφή εικόνα του πεδίου μάχης στο κέντρο επιχειρήσεων.

**γ) Έρευνα για νάρκες.**

Με χρήση κατάλληλων συσκευών, μπορούν τα VTOLs να χρησιμοποιηθούν για έρευνα ναρκοθετημένων περιοχών.

**δ) Ανίχνευση ελεύθερων σκοπευτών στο πεδίο της μάχης.**

Με την βοήθεια του κατάλληλου εξοπλισμού, τα VTOLs μπορούν να πετάξουν σε δύσκολες περιοχές και να εντοπίσουν ελεύθερους σκοπευτές.

**ε) Ανίχνευση χημικών, πυρηνικών και βιολογικών όπλων.**

Με την βοήθεια κατάλληλων αισθητήρων είναι δυνατή η εξέταση περιοχών έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν υπάρχει κίνδυνος από χημικά ή βιολογικά όπλα. Ακόμα μπορούν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις ραδιενέργειας.

**2) Πολεμικές και βοηθητικές χρήσεις**

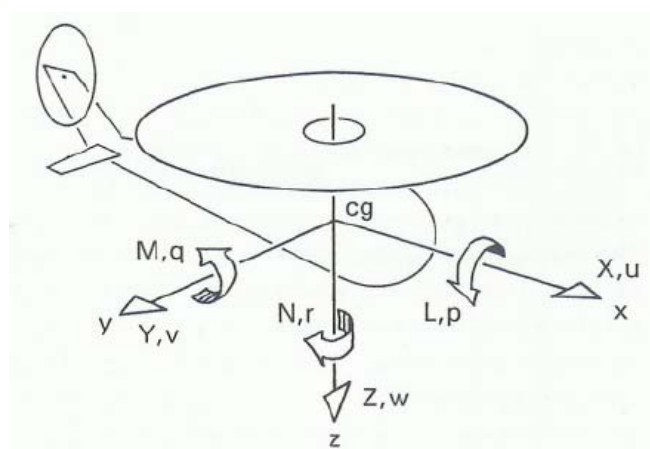
Κατάλληλα εξοπλισμένα VTOLs μπορούν να αντικαταστήσουν τα επανδρωμένα ελικόπτερα στο πεδίο της μάχης. Οι χρήσεις τους μπορεί να είναι σε καθαρά πολεμικό ρόλο ή ακόμα και σε ρόλο μεταφοράς εφοδίων. Μελετάται ήδη από πολλούς κατασκευαστές η εγκατάσταση οπλικών συστημάτων πάνω σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα.

**3) Στόχοι**

Είναι δυνατή η χρήση VTOLs ως στόχων παραπλάνησης. Από την έρευνα που έγινε, τα VTOL που καλύπτουν αυτή την χρήση είναι ελάχιστα (καθώς στον τομέα αυτό κυριαρχούν τα μη επανδρωμένα αεροπλάνα), αλλά προβλέπεται ότι στο μέλλον θα αναδειχθεί η χρήση τους.

**2.6 Κινηματική**

Τα VTOL έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας (Εικόνα 2.12) [6], [13], [28]:



Εικόνα 2.12: Το σύστημα συντεταγμένων των VTOL

- Διαμήκης κίνηση (Longitudinal motion): κίνηση κατά μήκος του άξονα x, η οποία περιγράφεται από τη θέση  $x$  και την ταχύτητα  $\dot{x}$
- Πλευρική κίνηση (Lateral motion): κίνηση κατά μήκος του άξονα y, η οποία περιγράφεται από τη θέση  $y$  και την ταχύτητα  $\dot{y}$
- Ανώθηση (Heave): κάθετη κίνηση κατά μήκος του άξονα z, η οποία περιγράφεται από τη θέση  $z$  και την ταχύτητα  $\dot{z}$
- Κύλιση (Roll): επιτυγχάνεται με στροφή γύρω από τον x άξονα και περιγράφεται από τη γωνία Euler  $\phi$  και τη γωνιακή ταχύτητα  $\dot{\phi}$
- Πρόνευση (Pitch): επιτυγχάνεται με στροφή γύρω από τον y άξονα και περιγράφεται από τη γωνία Euler  $\theta$  και τη γωνιακή ταχύτητα  $\dot{\theta}$
- Παρέκκλιση (Yaw): επιτυγχάνεται με στροφή γύρω από τον z άξονα και περιγράφεται από τη γωνία Euler  $\psi$  και τη γωνιακή ταχύτητα  $\dot{\psi}$

Το πιο απλοποιημένο μοντέλο για την περιγραφή της κίνησης του οχήματος είναι το ακόλουθο [13], [28]:

$$\begin{aligned}\dot{u} &= -(wq - vr) + \frac{X}{M_a} - g \sin \theta \\ \dot{v} &= -(ur - wp) + \frac{Y}{M_a} + g \cos \theta \sin \phi \\ \dot{w} &= -(vp - uq) + \frac{Z}{M_a} + g \cos \theta \cos \phi \\ I_{xx} \dot{p} &= (I_{yy} - I_{zz})qr + I_{xz}(\dot{r} + pq) + L \\ I_{yy} \dot{q} &= (I_{zz} - I_{xx})rp + I_{xz}(r^2 - p^2) + M \\ I_{zz} \dot{r} &= (I_{xx} - I_{yy})pq + I_{xz}(\dot{p} - qr) + N \\ \dot{\phi} &= p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi + r \sin \phi \\ \dot{\psi} &= q \sin \phi \sec \theta + r \cos \phi \sec \theta\end{aligned}$$

όπου:

- $u = \dot{x}$ ,  $v = \dot{y}$ ,  $w = \dot{z}$  είναι οι ταχύτητες κατά μήκος των τριών αξόνων του συστήματος συντεταγμένων της ατράκτου
- $p = \dot{\phi}$ ,  $q = \dot{\theta}$ ,  $r = \dot{\psi}$  είναι οι γωνιακές ταχύτητες γύρω από τους άξονες x, y, z
- $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$ ,  $I_{zz}$  είναι οι ροπές αδράνειας των αντίστοιχων αξόνων και  $I_{xz}$  είναι το γινόμενο των ροπών αδράνειας των αντίστοιχων αξόνων
- X, Y, Z και L, M, N είναι οι εξωτερικές δυνάμεις και ροπές αντίστοιχα
- $M_a$  είναι η μάζα του οχήματος

Παρατηρούμε ότι το συγκεκριμένο μοντέλο αν και είναι απλοποιημένο (δεν περιλαμβάνει δυνάμεις και γωνίες στροφειών, εξωτερικές δυνάμεις κ.λ.π) είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιλυθεί με κλασσικές μεθόδους ελέγχου καθώς αποτελεί ένα έντονα μη γραμμικό σύστημα πολλών μεταβλητών. Σε αυτό το σημείο φαίνεται πόσο δύσκολο είναι να μοντελοποιηθεί ένα όχημα VTOL και να εξαχθούν εξισώσεις περιγραφής της δυναμικής του κατάστασης.

---

**ΤΟ ΕΛΙΚΟΠΤΕΡΟ RAPTOR 60****3.1 Το όχημα Raptor 60**

Το Εργαστήριο Ευφυών Συστημάτων & Ρομποτικής διαθέτει ένα μη επανδρωμένο ελικόπτερο μικρής κλίμακας. Πρόκειται για το μοντέλο Raptor 60 v2 της εταιρείας Thunder Tiger (Εικόνα 3.1). Πρόκειται για ένα σύγχρονο όχημα με δυνατότητα τρισδιάστατης πλοήγησης και ικανότητα εκτέλεσης περίπλοκων ελιγμών, το οποίο χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στον αερομοντελισμό. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος είναι:

Μήκος ατράκτου	1.370mm
Πλάτος ατράκτου	190mm
Ύψος (με κανονική βάση)	465mm
Ύψος (με βάση και εξοπλισμό ελέγχου)	660mm
Διάμετρος κύριου στροφείου	1.500mm
Διάμετρος ουραίου στροφείου	260mm
Σχέση μετάδοσης	1:9,3:4,65
Βάρος (χωρίς εξοπλισμό)	4.668g
Βάρος (με εξοπλισμό)	5.568g

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά ελικοπτέρου Raptor 60





Εικόνα 3.1: Το ελικόπτερο Raptor 60 v2 της Thunder Tiger

Για την κίνηση των δύο στροφείων, το ελικόπτερο έχει τον κινητήρα PRO-70H της εταιρείας Thunder Tiger (Εικόνα 3.2). Πρόκειται για δίχρονο, μονοκύλινδρο κινητήρα εσωτερικής καύσης, ο οποίος ως καύσιμο χρησιμοποιεί μίγμα μεθανόλης, νιτρομεθανίου και συνθετικού λαδιού. Για την εκκίνηση του χρησιμοποιείται ένα μπουζί θερμικής αντίστασης το οποίο με τη συμπίεση του κινητήρα αναφλέγει το καύσιμο. Επίσης ο κινητήρας διαθέτει καρμπυρατέρ με ρυθμίσεις για το μίγμα αέρα-καυσίμου που εισάγεται στον κινητήρα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του PRO-70H είναι:

Κυβισμός	11,49cc
Διάμετρος κυλίνδρου	25mm
Διαδρομή εμβόλου	23,4mm
Ιπποδύναμη	2,5bhp/16000rpm
Στροφές λειτουργίας	2000~18000rpm
Βάρος	570g

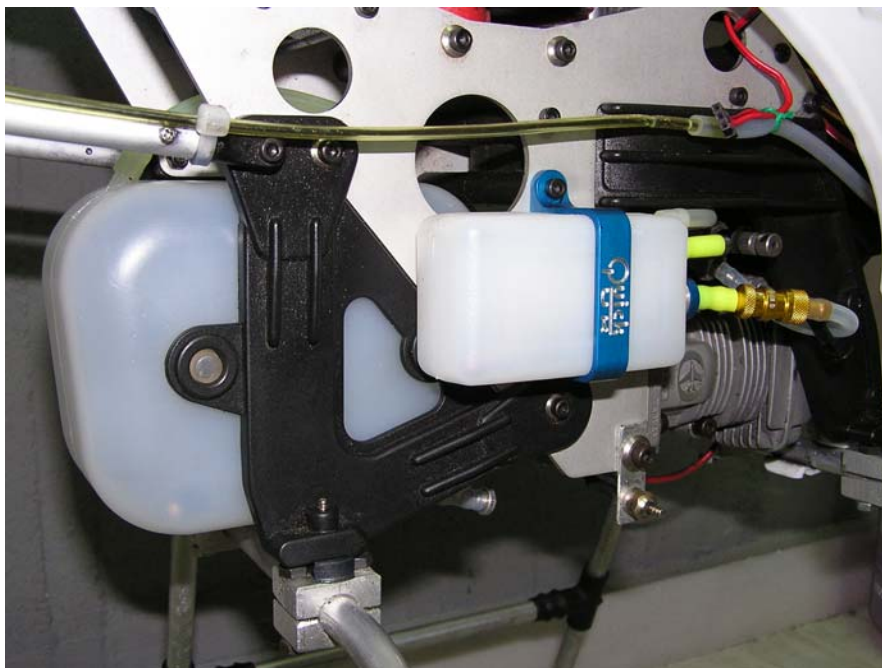
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά κινητήρα PRO-70H



Εικόνα 3.2: Ο κινητήρας PRO-70H της Thunder Tiger



Το ελικόπτερο διαθέτει κύρια δεξαμενή καυσίμου χωρητικότητας 450ml και εφεδρική δεξαμενή καυσίμου χωρητικότητας 60ml (Εικόνα 3.3). Η αυτονομία του ελικοπτήρου είναι περίπου 15 λεπτά. Η εφεδρική δεξαμενή καυσίμου είναι συνδεδεμένη σε σειρά με την κύρια δεξαμενή ώστε να αποφεύγεται η εισαγωγή φυσαλίδων αέρα από την παροχή καυσίμου στον κινητήρα. Επίσης η κύρια δεξαμενή είναι συνδεδεμένη με ειδικό θάλαμο της εξάτμισης, ώστε να δημιουργείται από τα καυσάερια η απαραίτητη πίεση για την εισαγωγή καυσίμου στον κινητήρα.



Εικόνα 3.3: Κυρίως και εφεδρικό ντεπόζιτο

### 3.2 Τηλεκατεύθυνση

Για τον χειρισμό του ελικοπτήρου χρησιμοποιείται σύστημα τηλεκατεύθυνσης της εταιρείας Hitec. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ο πομπός Eclipse 7 QPCM (Εικόνα 3.4) σε συνεργασία με το δέκτη Supreme HFD-08RD (Εικόνα 3.5). Η εμβέλεια της τηλεκατεύθυνσης είναι περίπου 1,5km.



Εικόνα 3.4: Ο πομπός Hitec Eclipse 7 QPCM

Ο πομπός/χειριστήριο αποτελεί τη συσκευή που κρατάει ο πιλότος και που του επιτρέπει να χειρίζεται τις ποικίλες λειτουργίες του ελικοπτέρου. Κάθε μια από αυτές τις λειτουργίες αντιστοιχεί σε ένα κανάλι εκπομπής, οπότε, όσα περισσότερα κανάλια διαθέτει ο πομπός, τόσες περισσότερες λειτουργίες μπορούν να ελεγχθούν. Για να ελεγχθεί ένα μη επανδρωμένο ελικόπτερο χρειάζονται τουλάχιστον πέντε κανάλια επικοινωνίας, για την εκτέλεση των βασικών κινήσεων. Επίσης, ο κάθε πομπός έχει τη δική του συχνότητα, οπότε περισσότερα από ένα μη επανδρωμένα ελικόπτερα μπορούν να πετάνε στην ίδια περιοχή, εφόσον οι πομποί τους έχουν διαφορετικές συχνότητες.

Ο πομπός Hitec Eclipse 7 QPCM διαθέτει επτά κανάλια επικοινωνίας και επτά μνήμες μοντέλων (για ελικόπτερα, αεροπλάνα και ανεμόπτερα). Η τροφοδοσία του είναι 7,2 VDC.



Εικόνα 3.5: Ο δέκτης Hitec HFD-08RD

Ο δέκτης είναι εγκατεστημένος πάνω στο ελικόπτερο. Λαμβάνει τα σήματα του πιλότου από τον πομπό, απορρίπτοντας τυχόν άλλα που εκπέμπονται στην ίδια περιοχή. Ο δέκτης έχει σημεία σύνδεσης με τους σερβοκινητήρες και με πηγή τροφοδοσίας μέσω μπαταριών. Για να μπορέσει ένας δέκτης να λειτουργήσει με ένα συγκεκριμένο πομπό, πρέπει να βρίσκονται στην ίδια συχνότητα, να έχουν την ίδια μορφοποίηση σήματος και να έχουν τον ίδιο αριθμό καναλιών.

Οι σερβοκινητήρες (συνηθίζεται να ονομάζονται RC servo) είναι μικρές συσκευές, οι οποίες μετατρέπουν το παλμικό σήμα του δέκτη σε φυσική κίνηση. Έχουν εξωτερικά τμήματα πάνω στα οποία ενσωματώνονται μοχλοί μετάδοσης κίνησης ή τροχοί. Όταν ο δέκτης στείλει σήμα στον σερβοκινητήρα για να κινηθεί, το εξωτερικό του τμήμα περιστρέφεται, θέτοντας έτσι το μοχλό μετάδοσης σε κίνηση και κατά συνέπεια ότι είναι συνδεδεμένο με αυτή κινείται. Η τάση λειτουργίας του δέκτη και των σερβοκινητήρων είναι 4.8 – 6.0 VDC.

Το Raptor 60 χρησιμοποιεί πέντε RC servo (HS-422 και HS-311) της Hitec (Εικόνα 3.6), με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

	HS-422	HS-311
Ροπή στα 4.8V (kg)	3.3	3.0
Ταχύτητα στα 4.8V (sec/60°)	0.21	0.19
Ροπή στα 6.0V (kg)	4.1	3.7
Ταχύτητα στα 6.0V (sec/60°)	0.16	0.15
Διαστάσεις (mm)	41 x 20 x 37	40 x 20 x 37
Βάρος (g)	45.5	43

Πίνακας 3.3.: Χαρακτηριστικά σερβοκινητήρων

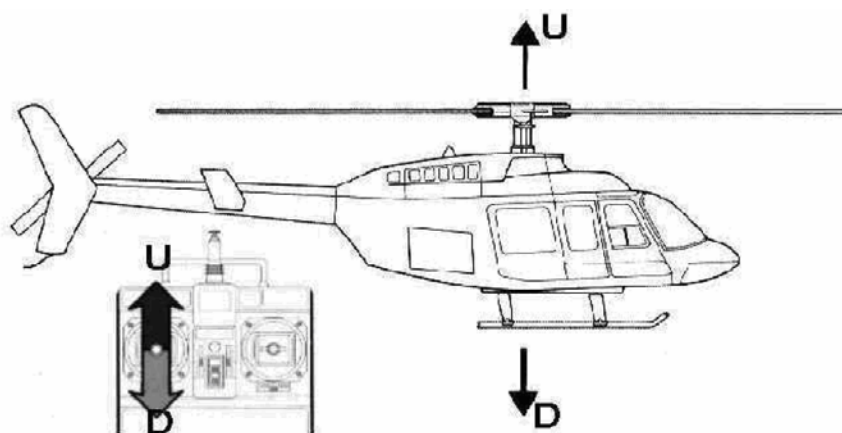


Εικόνα 3.6: Τα servo HS-422 και HS-311 της Hitec

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος χειρισμού του οχήματος παρουσιάζονται στη συνέχεια συνοπτικά οι βασικές κινήσεις του χειριστηρίου και το αποτέλεσμα που αυτές επιφέρουν στην κίνηση του ελικοπτήρου.

#### Α. Συλλογικό χειριστήριο

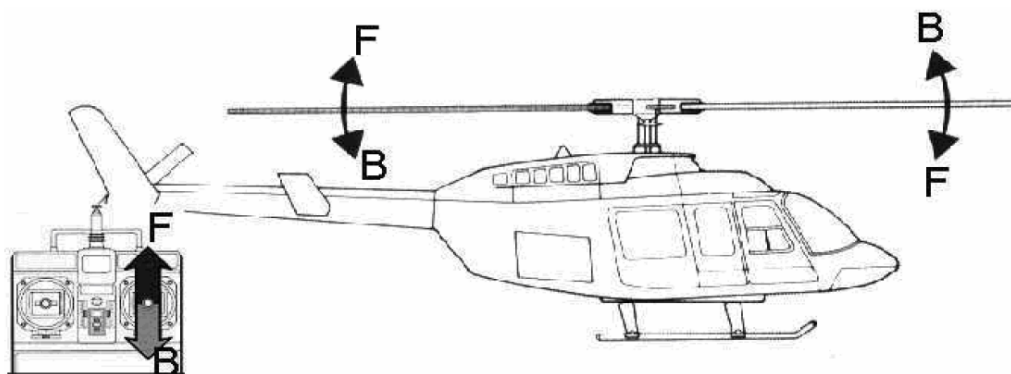
Το χειριστήριο αυτό έχει διπλή λειτουργία: μεταβάλλει το βήμα στους ρότορες του κυρίου στροφείου και το γκάζι του κινητήρα (Εικόνα 3.7). Για το σκοπό αυτό το χειριστήριο διαχειρίζεται αυτόματα δύο κανάλια επικοινωνίας και κατά συνέπεια δύο σέρβο. Η άνοδος ή κάθοδος αυτού του μοχλού έχει ως αποτέλεσμα τη αύξηση ή μείωση, αντίστοιχα, των στροφών ανά λεπτό (rpm) του κινητήρα και του βήματος των ελίκων του κυρίως στροφείου. Έτσι ελέγχεται η καθοδική και ανοδική πορεία του ελικοπτήρου καθώς και η ισχύς του κινητήρα. Η σχέση ανάμεσα στις δύο κινήσεις δεν είναι ανάλογη, αλλά ορίζεται από το χρήστη.



Εικόνα 3.7: Ανοδική / Καθοδική κίνηση ελικοπτήρου

### Β. Εμπρόςθιο / Οπίσθιο κυκλικό χειριστήριο

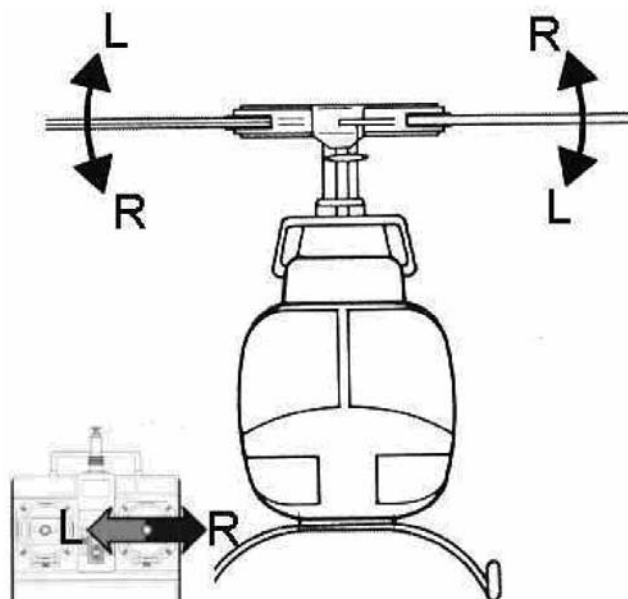
Το χειριστήριο αυτό προκαλεί κίνηση του ελικοπτέρου προς τα εμπρός ή προς τα πίσω (Εικόνα 3.8). Αυτό επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της κλίσης του επιπέδου περιστροφής του στροφέιου και κατά αυτό τον τρόπο μπορεί το ελικόπτερο να κινηθεί είτε εμπρός είτε πίσω, ωθώντας τον αέρα προς την αντίθετη κατεύθυνση της τελικής κίνησης.



Εικόνα 3.8: Εμπρόςθια / οπίσθια κίνηση (μεταβολή της γωνίας roll)

### Γ. Αριστερό / Δεξί κυκλικό χειριστήριο

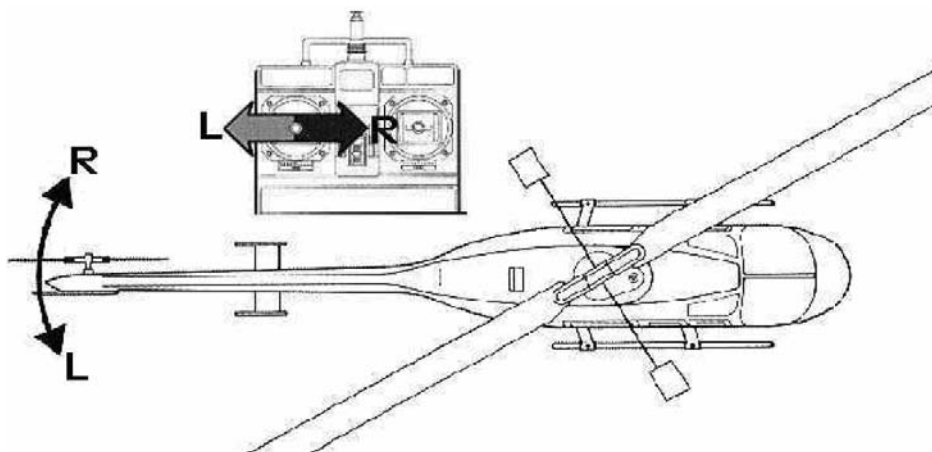
Το χειριστήριο αυτό προκαλεί πλευρική κίνηση του ελικοπτέρου μετά την αιώρηση, ή μπορεί να προκαλέσει αριστερή ή δεξιά στροφή κατά τη διάρκεια της πτήσης (Εικόνα 3.9). Η λογική της λειτουργίας αυτού του χειριστηρίου είναι όμοια με της προηγούμενης.



Εικόνα 3.9: Κίνηση δεξιά-αριστερά (μεταβολή της γωνίας pitch)

#### Δ. Χειριστήριο ουραίου στροφείου

Εκτελεί την ίδια λειτουργία με τα ποδοστήρια διεύθυνσης που υπάρχουν στα επανδρωμένα ελικόπτερα. Με άλλα λόγια, ελέγχει τη γωνία κλίσης των πτερυγίων του ουραίου στροφείου, επιτρέποντας στο ελικόπτερο να περιστραφεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση γύρω από τον κατακόρυφο άξονά του.



Εικόνα 3.10: Κίνηση ουραίου στροφείου (μεταβολή της γωνίας yaw)

### 3.3 Γυροσκόπιο

Το κυρίως στροφείο του ελικοπτέρου περιστρέφεται συνεχώς με 1.500 έως 1.700 στροφές ανά λεπτό. Από την περιστροφή αυτή προκαλείται ροπή στρέψης στον κύριο άξονα του ελικοπτέρου, η οποία αντισταθμίζεται με τη χρήση του ουραίου στροφείου. Ο ρόλος του στροφείου αυτού είναι πολύ σημαντικός, καθώς χωρίς την ύπαρξη του θα είχαμε συνεχή περιστροφή όλης της ατράκτου. Το ουραίο στροφείο περιστρέφεται και αυτό με σταθερές περίπου στροφές, σε αναλογία περίπου 2,5:1 με το κύριο στροφείο. Πρακτικά δηλαδή περιστρέφεται με περίπου 3.750 στροφές ανά λεπτό. Όπως και στο κύριο στροφείο, η κίνηση δεξιά-αριστερά του ουραίου στροφείου επιτυγχάνεται με μεταβολή του βήματος του στροφείου. Για τη μεταβολή του βήματος χρησιμοποιείται ένα από τα πέντε RC servo του οχήματος.

Ο ρόλος επομένως του ουραίου στροφείου είναι διπλός. Πρώτον, αντισταθμίζει τη ροπή στρέψης του κυρίως στροφείου και δεύτερον μετακινεί την ουρά του ελικοπτέρου σύμφωνα με τις εντολές του χρήστη. Η δεύτερη διαδικασία είναι πλήρως ελεγχόμενη από τον χειριστή του ελικοπτέρου. Για την πρώτη διαδικασία χρησιμοποιείται μία συσκευή που ονομάζεται γυροσκόπιο. Το γυροσκόπιο είναι μία ειδικά σχεδιασμένη διάταξη που "αισθάνεται" την κίνηση του ελικοπτέρου γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Παρεμβάλλεται μεταξύ του δέκτη της τηλεκατεύθυνσης και του RC servo που ελέγχει το βήμα του στροφείου στην ουρά του ελικοπτέρου και στέλνει τα ανάλογα σήματα στο RC servo ώστε το ελικόπτερο να στρίβει μόνο όταν ο χειριστής "εισάγει" κάποια εντολή για το σκοπό αυτό. Τα γυροσκόπια χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, αυτά που διαθέτουν την δυνατότητα της διατήρησης κατεύθυνσης (γνωστή ιδιότητα και ως "heading lock") και σε απλά γυροσκόπια που δεν διαθέτουν αυτή την ιδιότητα ("standard rate gyros"). Το "heading lock" διατηρεί τη θέση της ουράς του ελικοπτέρου χωρίς να επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. τον άνεμο). Κατά πολλούς κάνει πιο εύκολη την διαδικασία εκμάθησης, όμως είναι πιθανό σε κάποιους συγκεκριμένους ελιγμούς ή στις στροφές να μην βολεύει τόσο το "heading lock". Πάντως όλα τα "heading lock"



γυροσκόπια μπορούν και απενεργοποιούν αυτή την ικανότητα μετά από εντολή του χειριστή, οπότε είναι στην ευχέρεια του τελευταίου να δοκιμάσει και τις δύο καταστάσεις λειτουργίας.

Το Raptor 60 είναι εφοδιασμένο με το γυροσκόπιο GY401 της Futaba (Εικόνες 3.11 και 3.12). Πρόκειται για ένα “heading lock” γυροσκόπιο υψηλής απόδοσης με μικρό μέγεθος και βάρος. Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- Σύστημα ελέγχου: Ψηφιακός αναλογικο-ολοκληρωτικός (PI) έλεγχος
- Τάση λειτουργίας: +4 έως +6 VDC
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -10 °C έως +45 °C
- Διαστάσεις: 27 x 27 x20 mm
- Βάρος: 27g



Εικόνα 3.11: Το γυροσκόπιο GY401 της Futaba



Εικόνα 3.12: Το GY401 τοποθετημένο στο ελικόπτερο Raptor 60

Το GY401 διαθέτει ένα εξελεγμένο σύστημα διατήρησης της κατεύθυνσης (heading lock), το AVCS (Angular Vector Control System). Η λειτουργία του AVCS είναι η εξής:

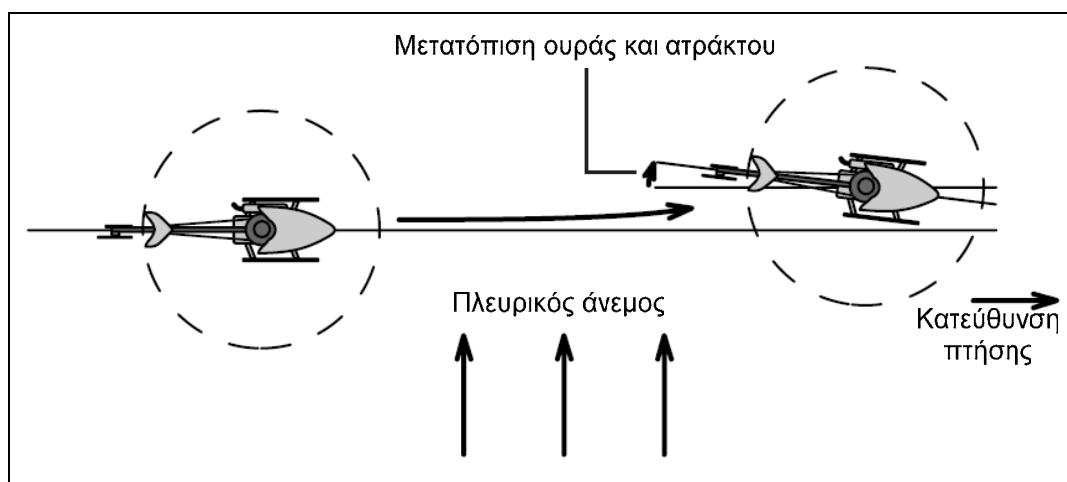
Τα συμβατικά γυροσκόπια στέλνουν σήματα ελέγχου στο RC servo της ουράς μόνο όταν κινείται η ουρά του ελικοπτερού. Όταν η ουρά σταματά να κινείται, το σήμα ελέγχου από το γυροσκόπιο γίνεται μηδενικό. Το AVCS αντίθετα, συνεχίζει να στέλνει σήματα ελέγχου στο σέρβο της ουράς ακόμα και όταν αυτή δεν κινείται. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η λειτουργία του AVCS σε σύγκριση με ένα συμβατικό γυροσκόπιο.

### Συμβατικό γυροσκόπιο

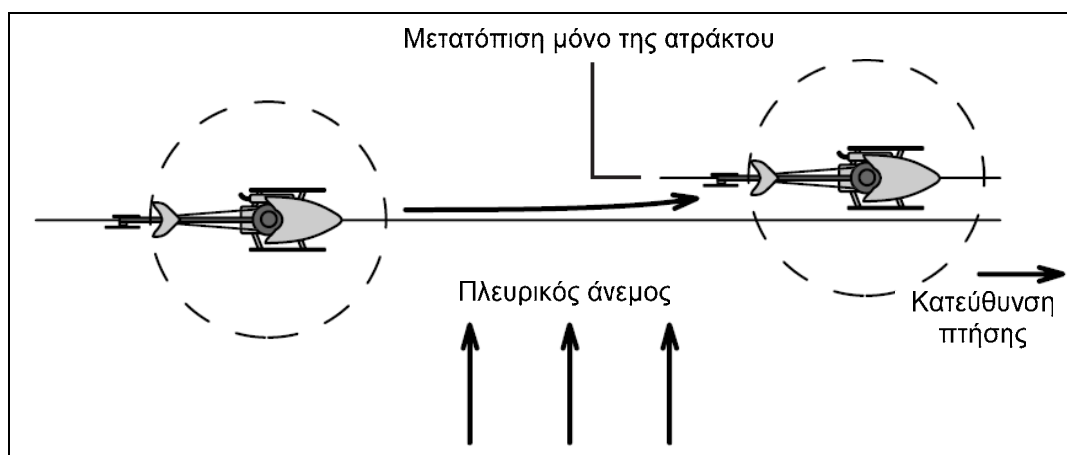
Η βασική λειτουργία περιγράφεται για την περίπτωση όπου το ελικόπτερο εκτελεί αιώρηση (hovering) σε συνθήκες πλευρικού ανέμου (Εικόνα 3.13). Με ένα συμβατικό γυροσκόπιο, όταν το ελικόπτερο αντιμετωπίζει πλευρικό άνεμο, η δύναμη του ανέμου μετατοπίζει την διεύθυνση της ουράς. Όταν μετατοπίζεται η ουρά, το γυροσκόπιο παράγει σήμα ελέγχου το οποίο σταματάει τη μετατόπιση. Όταν η ουρά σταματήσει να μετατοπίζεται το σήμα του γυροσκοπίου μηδενίζεται. Εάν ο άνεμος συνεχίσει να προκαλεί μετατοπίσεις στην ουρά, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η διεύθυνση της ουράς να γίνει ίδια με τη διεύθυνση του ανέμου.

### AVCS γυροσκόπιο

Με AVCS γυροσκόπιο, όταν το ελικόπτερο αντιμετωπίζει πλευρικό άνεμο (Εικόνα 3.14) και η ουρά μετατοπίζεται, ένα σήμα του γυροσκοπίου σταματάει τη μετατόπιση. Συγχρόνως, το γυροσκόπιο υπολογίζει τη γωνία μετατόπισης και αποστέλλει σταθερά ένα σήμα ελέγχου το οποίο αντιστέκεται στη μετατόπιση του ανέμου. Κατά συνέπεια, η μετατόπιση της ουράς μπορεί να σταματήσει ακόμα κι αν ο πλευρικός άνεμος συνεχίζει να επηρεάζει το ελικόπτερο. Επομένως το AVCS διορθώνει αυτόματα τις αλλαγές στη διεύθυνση της ουράς του ελικοπτερού.



Εικόνα 3.13: Κίνηση με απλό γυροσκόπιο



Εικόνα 3.14: Κίνηση με AVCS γυροσκόπιο

### 3.4 Βοηθητικός εξοπλισμός εδάφους

Για την εκκίνηση του ελικοπτήρου και την πλοήγησή του χρησιμοποιείται βοηθητικός εξοπλισμός εδάφους (Εικόνα 3.15). Ο εξοπλισμός αυτός περιλαμβάνει:

- Δεξαμενή καυσίμου χωρητικότητας 3.73 lt
- Αντλία καυσίμου για την εισαγωγή καυσίμου στη δεξαμενή καυσίμου του ελικοπτήρου
- Μπουζόπιπτα. Πρόκειται για ένα εργαλείο όπου στο εσωτερικό του έχει συσσωρευτή 1.2V και χρησιμοποιείται για την παροχή ρεύματος στο μπουζί κατά την εκκίνηση του ελικοπτήρου
- Εκκινητής (starter). Πρόκειται για μια διάταξη που περιλαμβάνει ηλεκτρικό κινητήρα και δίνει τις απαραίτητες στροφές στον κινητήρα του ελικοπτήρου κατά τη διάρκεια της εκκίνησης
- Συσσωρευτής 12V, 6Ah. Δίνει την απαραίτητη ισχύ στην αντλία καυσίμου και τον εκκινητή.



Εικόνα 3.15: Βοηθητικός εξοπλισμός εδάφους



---

### ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

Για να μπορέσει να ελεγχθεί αυτόνομα το ελικόπτερο, πρέπει το σύστημα ελέγχου να περιλαμβάνει τόσο εξοπλισμό (hardware) όσο και λογισμικό (software). Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο εξοπλισμός πλοήγησης.

#### 4.1 Απαιτήσεις και προδιαγραφές

Ο στόχος της εργασίας είναι να αναπτυχθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα αυτόνομης πλοήγησης το οποίο να μπορεί στο μέλλον να διατεθεί εμπορικά για χρήση σε πολιτικές ή και στρατιωτικές εφαρμογές. Επομένως ένα τέτοιο σύστημα πρέπει να είναι οικονομικό, ασφαλές, αξιόπιστο και να έχει τη δυνατότητα να εκτελεί μεγάλο εύρος αποστολών. Οι σχεδιαστικές απαιτήσεις ενός συστήματος αυτόνομης πλοήγησης είναι:

##### 4.1.1 Οικονομία

Εφόσον το σύστημα πλοήγησης θέλουμε να μπορεί να διατεθεί ως ολοκληρωμένο πακέτο, θα πρέπει να είναι πρακτικό και αρκετά οικονομικό ώστε να μπορεί να διατεθεί σε μεγάλο μέρος της αγοράς. Συγκρίνοντας με άλλα συστήματα της αγοράς, διαπιστώθηκε ότι το κόστος θα πρέπει να είναι κάτω από 6.000€ ώστε το προϊόν να είναι ανταγωνιστικό. Για το σκοπό αυτό έγινε προσπάθεια το κόστος του εξοπλισμού να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα.

##### 4.1.2 Ασφάλεια

Ένα αυτόνομο σύστημα πλοήγησης στην ουσία υποκαθιστά τον ανθρώπινο παράγοντα στο χειρισμό του VTOL και αναλαμβάνει πλήρως την πλοήγηση του. Το VTOL, όπως κάθε μη επανδρωμένο αεροσκάφος, είναι εξαιρετικά επικίνδυνο, καθώς λόγω της μάζας και της ταχύτητάς του μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ζημιές, τόσο υλικές όσο και τραυματισμό ανθρώπων. Ειδικά τα VTOL, έχουν υψηλό δείκτη επικινδυνότητας καθώς οι ρότορες του κυρίως στροφείου περιστρέφονται με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Επομένως το σύστημα πλοήγησης θα πρέπει να λαμβάνει σοβαρά

υπόψη την ασφάλεια του VTOL όσο και του χώρου στον οποίο κινείται. Ακόμη θα πρέπει να περιλαμβάνει συστήματα ασφαλείας και ασφαλούς πλοήγησης στην περίπτωση όπου συμβεί κάποια βλάβη στην τροφοδοσία, απώλεια σήματος ελέγχου ή σφάλμα στο λογισμικό ελέγχου.

#### **4.1.3 Αξιοπιστία**

Η αξιοπιστία σχετίζεται άμεσα με την ασφάλεια του συστήματος και είναι σημαντική για την λειτουργία του. Το σύστημα πρέπει να αποτελείται από υλικά υψηλής ποιότητας τα οποία να έχουν πλήρη συμβατότητα μεταξύ τους και η λειτουργία κάθε υποσυστήματος να είναι ανεξάρτητη και ανεπηρέαστη από τα υπόλοιπα υποσυστήματα. Για παράδειγμα, ένα κρίσιμο ζήτημα αξιοπιστίας είναι αυτό της σωστής τροφοδοσίας. Το σύστημα ελέγχου για την λειτουργία του χρειάζεται ενέργεια από συσσωρευτές. Θα πρέπει οι συσσωρευτές αυτοί να επιλεγούν κατάλληλα ώστε να παρέχουν αδιάλειπτη και αξιόπιστη παροχή ρεύματος σε όλα τα υποσυστήματα για μεγάλο χρονικό διάστημα (τουλάχιστον δύο ώρες).

#### **4.1.4 Δυνατότητες**

Το σύστημα θα πρέπει να είναι εύρωστο και ικανό να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών. Θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να διανύει μικρές και μεγάλες αποστάσεις, να προσαρμόζεται στις καιρικές συνθήκες (άνεμος) και σε υψομετρικούς περιορισμούς. Η αρχική απαίτηση είναι το σύστημα να εκτελεί πλοήγηση μέσω δεδομένων σημείων (way-point navigation). Ωστόσο το σύστημα θα πρέπει να είναι και επεκτάσιμο, να μπορεί δηλαδή να δεχθεί κι άλλο εξοπλισμό, αλλά και να εκτελεί και άλλες λειτουργίες, όπως π.χ. αυτόνομη απογείωση/προσγείωση.

#### **4.1.5 Φυσικοί περιορισμοί**

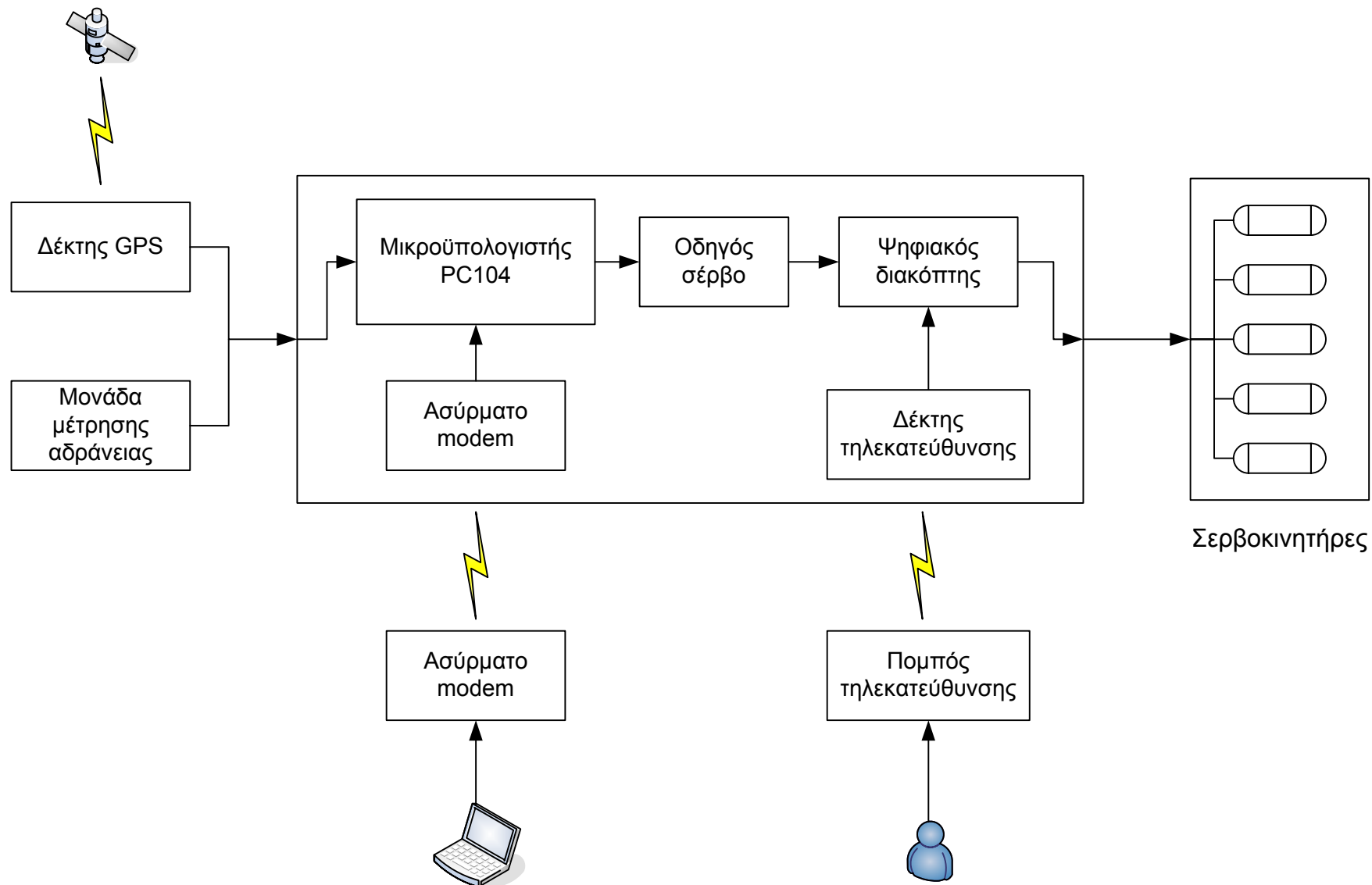
Οι φυσικές διαστάσεις και το βάρος του συστήματος πλοήγησης δεν είναι ελεύθερες προς επιλογή. Το σύστημα σχεδιάζεται για χρήση σε VTOL μικρής κλίμακας, επομένως πρέπει να είναι ελαφρύ και με μικρές διαστάσεις. Στην περίπτωση μας, βασιζόμενοι στο VTOL που θα εφαρμοστεί το σύστημα, ορίζουμε ως μέγιστο βάρος του συστήματος τα 2kg και τις μέγιστες διαστάσεις 25cm x 20cm x 10cm (μήκος x πλάτος x ύψος). Οι περιορισμοί αυτοί δημιουργούν ένα σύστημα ικανό να εφαρμοστεί σε μεγάλο εύρος VTOL μικρής κλίμακας.

### **4.2 Δομή του εξοπλισμού ελέγχου**

#### **4.2.1 Μεθοδολογία ελέγχου**

Η μεθοδολογία του ελέγχου, όσον αφορά στον εξοπλισμό, είναι απλή. Χρησιμοποιούνται αισθητήρια όργανα μέτρησης διαφόρων απαραίτητων στοιχείων πλοήγησης του ελικοπτέρου και μικροϋπολογιστής για τη διασύνδεση των αισθητηρίων με το λογισμικό και κατά συνέπεια με τον έλεγχο του οχήματος. Ο μικροϋπολογιστής διαβάζει τα δεδομένα των αισθητήρων και τα επεξεργάζεται. Σε κάθε χρονική στιγμή δηλαδή γνωρίζει τη θέση και την κατάσταση του συστήματος. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα και την μεθοδολογία ελέγχου που εισάγεται μέσω του λογισμικού στο σύστημα, ο μικροϋπολογιστής-ελεγκτής στέλνει τα κατάλληλα σήματα στους σερβοκινητήρες και κατά συνέπεια κινεί το ελικόπτερο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται σχηματικά το δομικό διάγραμμα ελέγχου του οχήματος.

#### 4.2.2 Διάγραμμα δομής εξοπλισμού



### 4.3 Λειτουργικά στοιχεία

Ως λειτουργικά στοιχεία του συστήματος καλούνται όλες εκείνες οι διατάξεις και συσκευές που η συνδυασμένη χρήση τους καθιστά το όχημα λειτουργικό. Τα λειτουργικά στοιχεία του αυτόνομου συστήματος πλοήγησης περιγράφονται στη συνέχεια.

#### 4.3.1 Υπολογιστικό σύστημα

Το υπολογιστικό σύστημα του συστήματος πλοήγησης αποτελείται από κάρτες PC/104. Το PC/104 είναι ένα πρωτόκολλο τυποποίησης πολύ μικρών υπολογιστικών συστημάτων, τα οποία σε μία μικρών διαστάσεων μητρική κάρτα διαθέτουν όλες τις συνδέσεις και υποδοχές μεγαλύτερων υπολογιστικών συστημάτων. Σε μία κάρτα PC/104 μπορούν να τοποθετηθούν διάφορα στοιχεία, όπως επεξεργαστές, μνήμες, σειριακές θύρες, GPS δέκτες, GPRS μόντεμ κ.λ.π. Έτσι με τη σύνδεση μερικών τέτοιων καρτών μπορεί να δημιουργηθεί πλήρες υπολογιστικό σύστημα μικρού μεγέθους και βάρους. Το πρωτόκολλο πήρε το όνομα του από τις 104 συνδέσεις σημάτων που έχουν οι κάρτες PC/104 για τη διασύνδεσή τους.

Το υπολογιστικό σύστημα του συστήματος πλοήγησης αποτελείται από τρεις κάρτες PC/104.

##### (Α) Επεξεργαστής

Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται η κάρτα PC104 που φιλοξενεί τον επεξεργαστή του συστήματος. Πρόκειται για το μοντέλο PV-0588 της εταιρείας Micronix.



Εικόνα 4.1: Κάρτα επεξεργαστή PC104

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάρτας παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Επεξεργαστής	NS Geode GX1 300MHz χαμηλής ισχύος (0.8~3W) Μνήμη Cache: 16KB L1
BIOS	Award BIOS, 128KB (Flash) EPROM
Μνήμη RAM	256 MB SDRAM
Διασύνδεση	PC/104
I/O	Enhanced IDE interface RS-232/485 x 1 RS-232 x 1 Parallel Port x 1 IrDA FDD x 1 USB(Ver. 1.1) x 2
VGA	υποστήριξη SMA 64-bit TFT LCD/CRT, CRT και 18-bit TFT LCD με ανάλυση μέχρι 1280x1024x8 BPP
Μνήμη Flash	2 GB
Τροφοδοσία	+5VDC
Διαστάσεις	90mm x 96mm
Θερμοκρασία	0 ~ 85°C (χωρίς χρήση ανεμιστήρα λόγω χαμηλής ισχύος του επεξεργαστή)
Βάρος	100g

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά της κάρτας επεξεργαστή

### (B) Σειριακές θύρες

Η κάρτα επεξεργαστή διαθέτει ήδη δύο σειριακές θύρες. Για λόγους επεκτασιμότητας χρησιμοποιείται επιπλέον μια κάρτα PC/104 με τέσσερις σειριακές θύρες (Εικόνα 4.2). Πρόκειται για το μοντέλο PV-4000HS της εταιρείας Micronix.



Εικόνα 4.2: Κάρτα επέκτασης σειριακών θυρών

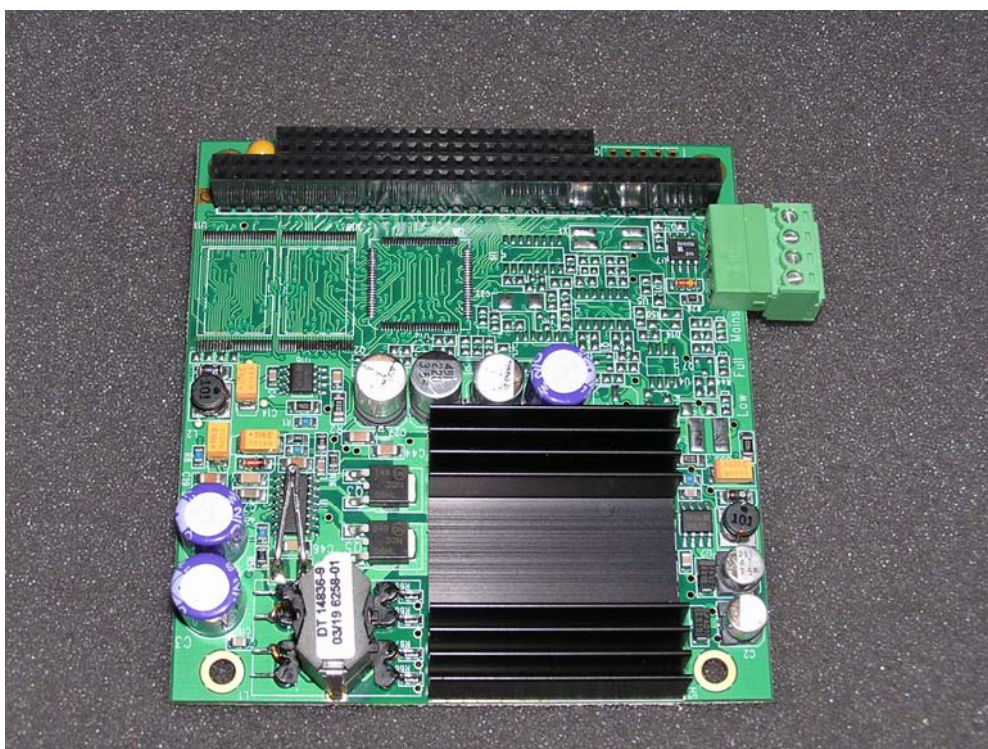


Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάρτας είναι τα ακόλουθα:

- Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων έως 460kbps
- Τέσσερις έξοδοι RS-232
- Τροφοδοσία: +5VDC , 500mA
- Θερμοκρασία λειτουργίας: 0 - 60 °C
- Διαστάσεις: 95 x 90 x 18 mm
- Βάρος: 55g

#### (Γ) Τροφοδοσία

Για την τροφοδοσία του υπολογιστικού συστήματος χρησιμοποιείται η κάρτα PV-5120AS της εταιρείας Micronix (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3: Κάρτα τροφοδοσίας

Τα χαρακτηριστικά της είναι:

- Είσοδος: 8-30 VDC
- Έξοδος: +5 VDC &  $\pm 12$  VDC
- Ισχύς: 30 Watt
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -20 με +70 °C
- Διαστάσεις: 90 x 95 x 18 mm
- Βάρος: 75 g

### 4.3.2 Δέκτης GPS

Το GPS χρησιμοποιείται στο όχημα για τον εντοπισμό της θέσης του. Ο δέκτης GPS που τοποθετείται στο Raptor 60 είναι το μοντέλο RCB-LJ της εταιρείας ublox (Εικόνα 4.4). Πρόκειται για μία πλήρως προγραμματιζόμενη μονάδα, υψηλής ακρίβειας με δυνατότητα εξόδου διαφόρων μορφών δεδομένων NMEA (πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων GPS).



Εικόνα 4.4: Ο δέκτης GPS

Τα κύρια χαρακτηριστικά της μονάδας GPS είναι:

- 16 κανάλια λήψης σημάτων
- Ρυθμός ανανέωσης θέσης 4 Hz
- Μνήμη FLASH
- Υποστήριξη συστημάτων DGPS και SBAS (WAAS, EGNOS)
- Ακρίβεια θέσης: 2.5m, 2.0m με υποστήριξη DGPS/SBAS
- Τάση λειτουργίας 3.15 – 5.25 V
- Θερμοκρασία λειτουργίας -40 – 85 °C
- Μικρό μέγεθος και βάρος: 71 x 41 x 11 mm, 17 g

Για τη λήψη των σημάτων χρησιμοποιείται η κεραία ANN-MS της ίδιας εταιρείας (Εικόνα 4.5). Τα χαρακτηριστικά της είναι:

- Ευκολία χρήσης
- Μικρό μέγεθος: 48 x 40 x 13 mm
- Μικρό βάρος: 105g





Εικόνα 4.5: Η κεραία του δέκτη GPS

#### 4.3.3 Αδρανειακή μονάδα μέτρησης

Η αδρανειακή μονάδα μέτρησης (Inertial Measurement Unit, IMU) είναι ο σημαντικότερος ηλεκτρονικός αισθητήρας του συστήματος πλοήγησης καθώς δίνει τον προσανατολισμό του ελικοπτήρου. Χάρis στους αισθητήρες που έχει και τον ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή, υπολογίζει σε πραγματικό χρόνο τις γωνίες “roll, pitch και yaw καθώς και τις επιταχύνσεις σε τρεις διαστάσεις. Στο Raptor 60 τοποθετήθηκε το μοντέλο MTi της εταιρείας Xsens Motion Technologies (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 4.6: Η αδρανειακή μονάδα μέτρησης

Το MTi είναι ένα μικροσκοπικό σύστημα αναφοράς για συμπεριφορά και κατεύθυνση (Attitude and Heading Reference System, AHRS). Ο εσωτερικός του επεξεργαστής χαμηλής ενέργειας δίδει ως δεδομένα τρισδιάστατο προσανατολισμό (3D orientation), τρισδιάστατη επιτάχυνση (3D acceleration), τρισδιάστατη γωνιακή ταχύτητα (3D rate of turn, rate gyro) και τρισδιάστατο μαγνητικό πεδίο γης (3D earth-magnetic field). Είναι η ιδανική μονάδα μέτρησης για σταθεροποίηση και έλεγχο ρομπότ, οχημάτων και άλλου κινούμενου εξοπλισμού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά της μονάδας:



Έξοδος
3D προσανατολισμός (γωνίες Euler [pitch, yaw, roll], πίνακας στροφής)
3D επιτάχυνση
3D γωνιακή ταχύτητα
Θερμοκρασία

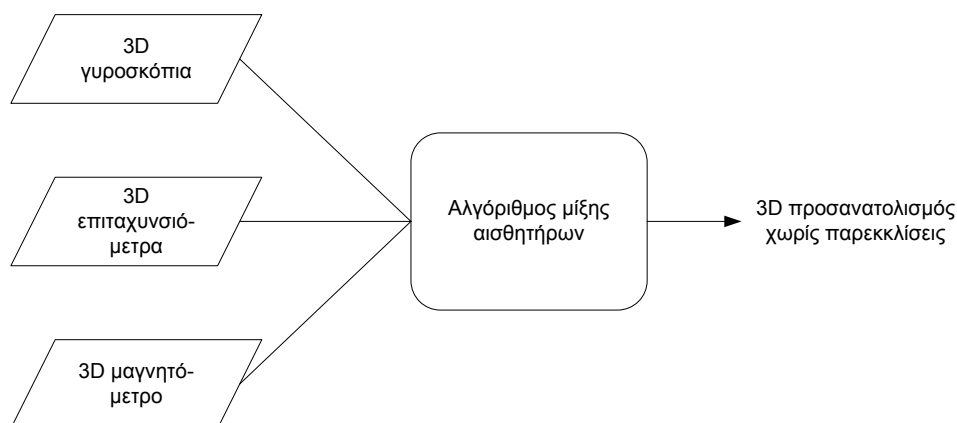
Ακρίβεια προσανατολισμού
Δυναμική μέτρηση: όλες οι γωνίες 3D
Γωνιακή ανάλυση: 0,05 μοίρες
Στατική ακρίβεια (Roll/Pitch): <0,5 μοίρες
Στατική ακρίβεια (Yaw): <1 μοίρα
Δυναμική ακρίβεια: 2 μοίρες RMS

Απόδοση αισθητήρων				
	Γωνιακή ταχύτητα	Επιτάχυνση	Μαγνητικό πεδίο	Θερμοκρασία
Διαστάσεις	3 άξονες	3 άξονες	3 άξονες	-
Μέγιστη κλίμακα	$\pm 900 \text{ deg/s}$	$\pm 100 \text{ m/s}^2$	$\pm 750 \text{ mGauss}$	$-55 \dots +125 \text{ }^\circ\text{C}$
Γραμμικότητα	0.1% of FS	0.2% of FS	0.2% of FS	<1% of FS
Ακρίβεια κίνησης	5 deg/s	0.02 $\text{m/s}^2$	0.5 mGauss	0.5 $^\circ\text{C}$ ακρίβεια
Πυκνότητα θορύβου	0.1 deg/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.001 $\text{m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$	0.5 mGauss	-
Σφάλμα ευθυγράμμισης	0.1 deg	0.1 deg	0.1 deg	-
Συχνότητα	40 Hz	30 Hz	10 Hz	-

Διασύνδεση και διαστάσεις
Μέγιστος ρυθμός ανανέωσης: 512 Hz (δεδομένα αισθητήρων)
100 Hz (δεδομένα προσανατολισμού)
Ψηφιακή διασύνδεση: RS-232, RS-422, USB
Τάση λειτουργίας: 4.5-15V
Κατανάλωση ενέργειας: 360 mW
Διαστάσεις: 58x58x22 mm
Βάρος: 50g
Εξωτερική θερμοκρασία λειτουργίας: 0-55 $^\circ\text{C}$

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά της μονάδας μέτρησης αδράνειας

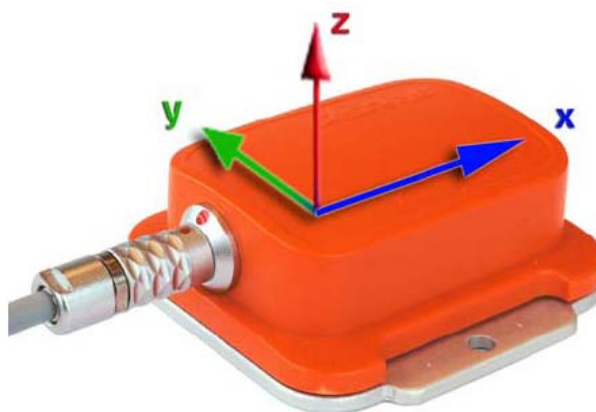
Για την εξαγωγή των δεδομένων, η μονάδα έχει ενσωματωμένους μικροσκοπικούς τρισδιάστατους αισθητήρες (γυροσκόπια, επιταχυνσιόμετρα, μαγνητόμετρο) και χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο μίξης των δεδομένων τους για τον ακριβή υπολογισμό του απόλυτου προσανατολισμού στον τρισδιάστατο χώρο σε πραγματικό χρόνο (Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7: Δομικό διάγραμμα λειτουργίας της μονάδας

Ο αλγόριθμος μπορεί να εξηγηθεί ως ένα σύστημα όπου η μέτρηση της βαρύτητας (επιταχυνσιόμετρα) και του μαγνητικού βορά (μαγνητόμετρα) αντισταθμίζει το σφάλμα που προκύπτει από την ολοκλήρωση της γωνιακής ταχύτητας. Χωρίς τις μετρήσεις αυτές το σφάλμα θα ήταν αυξανόμενο και απεριόριστο. Αυτός ο τύπος της διόρθωσης σφάλματος ονομάζεται διόρθωση συμπεριφοράς και κατεύθυνσης και γι' αυτό το σύστημα ονομάζεται αναφοράς της συμπεριφοράς και της κατεύθυνσης (AHRS).

Όλες οι μετρήσεις των αισθητήρων (επιταχύνσεις, γωνιακές ταχύτητες, γήινο μαγνητικό πεδίο) γίνονται στο δεξιόστροφο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, όπως αυτό ορίζεται στην Εικόνα 4.8. Το σύστημα αυτό είναι ενσωματωμένο στη συσκευή και ορίζεται ως το σύστημα συντεταγμένων των αισθητήρων (S).



Εικόνα 4.8: Σύστημα συντεταγμένων της μονάδας

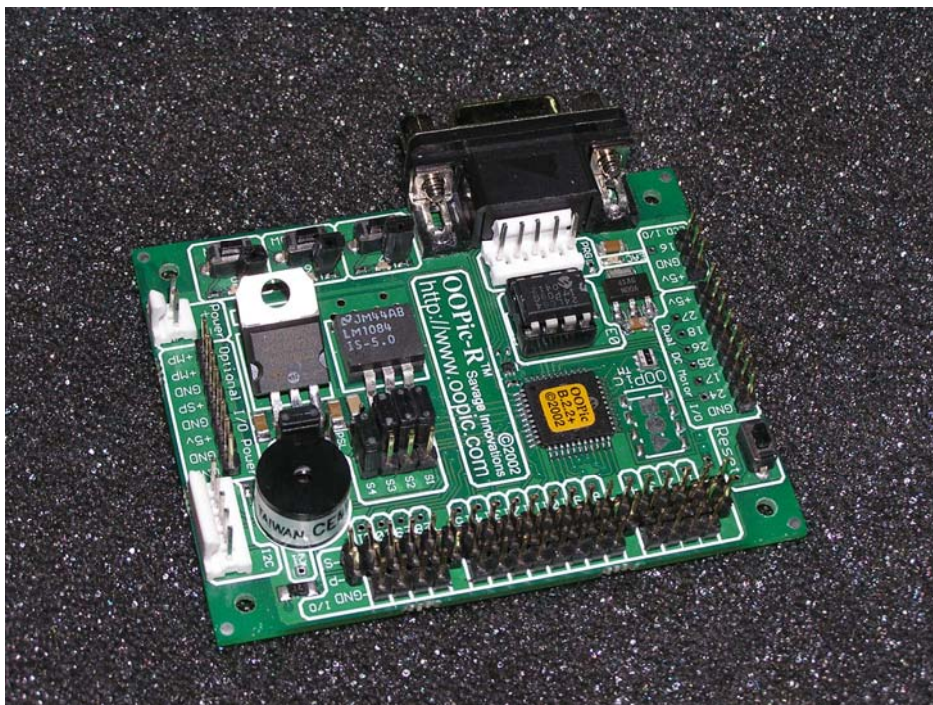
Το σύστημα συντεταγμένων είναι ευθυγραμμισμένο με το εξωτερικό κέλυφος του MTi. Η βάση αλουμινίου της συσκευής είναι προσεκτικά ευθυγραμμισμένη με το σύστημα συντεταγμένων (βάση // xy επίπεδο). Η ευθυγράμμιση του πλαστικού καλύμματος με το σύστημα συντεταγμένων έχει ακρίβεια της τάξεως της 0,1 μοίρας, γεγονός που υποδηλώνει ότι και η ακρίβεια των μετρήσεων ανάγεται στην τιμή αυτή.

#### 4.3.4 Οδηγός σερβοκινητήρων

Τα RC servo δέχονται ως σήμα ελέγχου παλμό πλάτους από 1 έως 2ms. Κατά συνέπεια για τον έλεγχο τους από τον υπολογιστή είναι απαραίτητη η χρήση οδηγού (driver). Ο οδηγός μετατρέπει τα σήματα ελέγχου του υπολογιστή σε σήματα RC σέρβο (παλμούς).

Στο σύστημα πλοήγησης του Raptor 60 χρησιμοποιείται ο οδηγός OOPic-R (Εικόνα 4.9) της εταιρίας Savage Innovations. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Διαθέτει 16 κανάλια εισόδου/εξόδου ειδικά σχεδιασμένα για την οδήγηση RC σέρβο.
- Διαθέτει σειριακή θύρα RS-232 για διασύνδεση με υπολογιστή
- Έχει τάση λειτουργίας τα 5VDC
- Έχει μικρό μέγεθος: 6.5 x 7.62 cm



Εικόνα 4.9: Οδηγός σέρβο OOpic

#### 4.3.4 Ασύρματα μόντεμ

Για τη μεταφορά δεδομένων ανάμεσα στο υπολογιστικό σύστημα του ελικοπτέρου και το σταθμό βάσης, χρησιμοποιούνται δύο ασύρματα μόντεμ της εταιρείας Maxstream, μοντέλο X24-009PKC-UA (Εικόνα 4.10). Πρόκειται για μόντεμ που χρησιμοποιούν ραδιοσυχνότητα (RF modems) για τη μεταφορά δεδομένων και πρωτόκολλο επικοινωνίας USB για διασύνδεση με υπολογιστή.



Εικόνα 4.10: Ασύρματο μόντεμ

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μόντεμ είναι τα ακόλουθα:

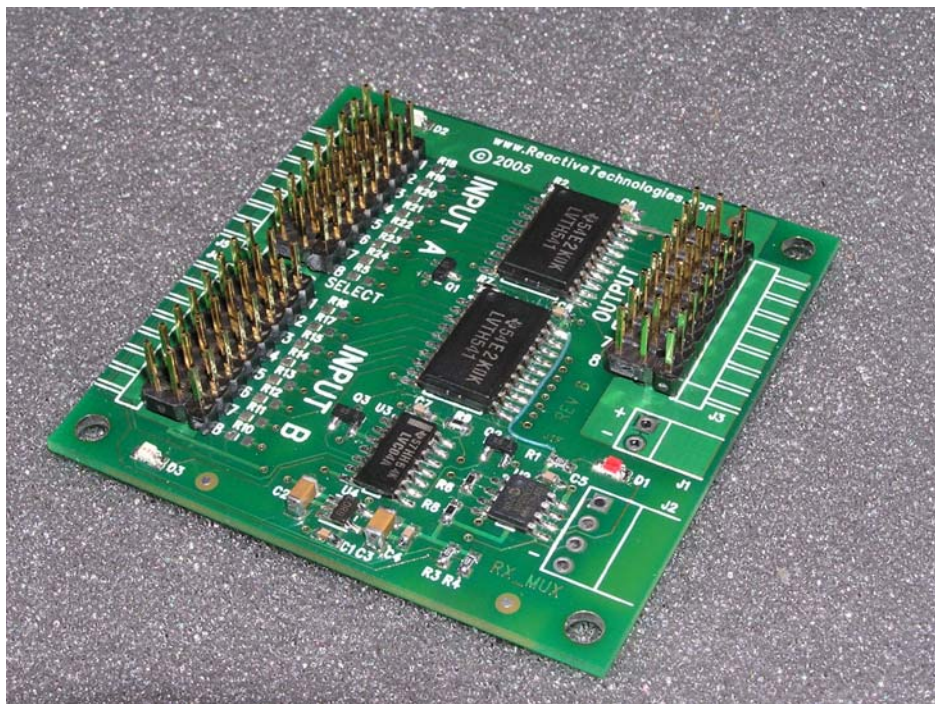
Γενικά	
Συχνότητα	2.4000 έως 2.4835 GHz
Μετάδοση σήματος	Ραδιοσήμα direct RF
Τοπολογία δικτύου	Σημείο προς σημεία, σημείο προς σημείο, σημεία προς σημεία
Χωρητικότητα καναλιών	7
Διασύνδεση	USB 1.1, 11 Mbps
Ρυθμός δεδομένων εισόδου εξόδου (διασύνδεση με PC)	1.200—57.600 bps (επιλογή από λογισμικό)
Απαιτήσεις ισχύος	
Τροφοδοσία	5-12VDC εξωτερική ή USB τροφοδοσία
Ρεύμα μετάδοσης	250mA
Ρεύμα λήψης	120mA
Ρεύμα αναμονής	50mA
Φυσικές ιδιότητες	
Τύπος καλύμματος	ανωδιομένο αλουμίνιο
Διαστάσεις καλύμματος	7.9x13.9x3.8 cm
Βάρος	200g
Θερμοκρασία λειτουργίας	0-70 °C
Μήκος κεραίας	13.3cm
Απόδοση	
Εσωτερική/Αστική εμβέλεια	Έως 183m
Εξωτερική εμβέλεια	Έως 5km
Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων	9.600 bps
Ισχύς εξόδου πομπού	50 mW (17dBm)
Ευαισθησία δέκτη	-105dBm

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά ασύρματου μόντεμ



### 4.3.5 Ψηφιακός διακόπτης

Για την περίπτωση που παρουσιάζεται οποιοδήποτε πρόβλημα κατά τη διάρκεια που το ελικόπτερο ελέγχεται από το αυτόνομο σύστημα, πρέπει να ενσωματωθεί ένα σύστημα το οποίο να έχει τη δυνατότητα να μεταβιβάζει τον χειρισμό του ελικοπτέρου στο χρήστη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο ψηφιακός διακόπτης RxMux της εταιρείας Reactive Technologies (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11: Ψηφιακός διακόπτης RxMux

Ο διακόπτης RxMux επιτρέπει τον έλεγχο RC servo από δύο διαφορετικές πηγές ελέγχου. Διαθέτει δύο εισόδους (Input A και Input B) στις οποίες μπορούν να συνδεθούν πηγές σημάτων όπως δέκτες τηλεκατεύθυνσης, αυτόματοι πιλότοι, μικροελεγκτές κ.λ.π. Τα RC σέρβο του ελικοπτέρου συνδέονται στη μοναδική έξοδο (Output). Η εναλλαγή ανάμεσα στις δύο πηγές επιτυγχάνεται στέλνοντας σήμα κατάλληλου πλάτους στο κανάλι επιλογής πηγής (Κανάλι 8 της Εισόδου 1). Όταν το σήμα έχει πλάτος λιγότερο από 1.5ms, στην έξοδο στέλνονται τα σήματα της Εισόδου A. Όταν το σήμα έχει πλάτος μεγαλύτερο από 1.5ms, στέλνονται στην έξοδο τα σήματα της Εισόδου B. Όταν δεν βρίσκεται κανένα σήμα, εξ ορισμού στην έξοδο στέλνονται τα σήματα της Εισόδου A.

Στην περίπτωση του Raptor 60, χρησιμοποιούμε το κανάλι 7 της τηλεκατεύθυνσης που είναι ελεύθερο. Τα σήματα του καναλιού αυτού ελέγχονται από ένα μοχλό πάνω στην τηλεκατεύθυνση ο οποίος μπορεί να βρίσκεται σε δύο μόνο θέσεις (Εικόνες 4.12 και 4.13). Στη μία θέση ορίζουμε εμείς να στέλνει σήμα 1ms στον ψηφιακό διακόπτη και κατά συνέπεια σε αυτή τη θέση το ελικόπτερο ελέγχεται από το χειριστή. Στην άλλη θέση ορίζουμε να στέλνεται σήμα 2ms στον διακόπτη. Κατά συνέπεια, σε αυτή την περίπτωση το ελικόπτερο ελέγχεται από το σύστημα αυτόνομης πλοήγησης. Επομένως όταν το ελικόπτερο εκτελεί αυτόνομη πτήση, αν ο χειριστής παρατηρήσει βλάβη στο σύστημα γυρνάει το διακόπτη του καναλιού 7 σε χειροκίνητη λειτουργία και αναλαμβάνει αυτός το χειρισμό.



Εικόνα 4.12: Διακόπτης καναλιού 7 στη θέση manual



Εικόνα 4.13: Διακόπτης καναλιού 7 στη θέση auto

### 4.3.6 Συσσωρευτές

Για την τροφοδοσία του συστήματος πλοήγησης απαιτείται η χρήση συσσωρευτών ικανών να τροφοδοτούν το σύστημα για ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η αυτονομία καυσίμου του ελικοπτέρου είναι περίπου 15 λεπτά, η αυτονομία των μπαταριών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 2 ώρες ώστε να μπορούν να εκτελεστούν αρκετές δοκιμές και πτήσεις χωρίς να χρειάζεται επαναφόρτιση των συσσωρευτών. Υπολογίζεται ότι το φορτίο του συστήματος θα είναι περίπου 15W στα 5VDC. Απαιτείται λοιπόν η χρησιμοποίηση συσσωρευτών μεγάλης χωρητικότητας. Το βάρος όμως και το μέγεθος των μπαταριών πρέπει να είναι μικρό. Οι συσσωρευτές που πληρούν αυτές τις προδιαγραφές είναι οι μπαταρίες LiPo (Lithium Polymer). Πρόκειται για μπαταρίες εξαιρετικά υψηλής χωρητικότητας με χαμηλό όμως βάρος και μικρό μέγεθος.

Για την τροφοδοσία του συστήματος πλοήγησης χρησιμοποιείται μπαταρία LiPo της εταιρείας Flightpower (Εικόνα 4.14), με ονομαστική τάση 11.7VDC και χωρητικότητα 3.300mAh. Πρόκειται για μια εξαιρετικά ισχυρή μπαταρία κατασκευασμένη ειδικά για εφαρμογές αερομοντελισμού, η οποία ικανοποιεί πλήρως τις προδιαγραφές της σχεδίασης. Έχει τη δυνατότητα παροχής σταθερού φορτίου έως 66A και στιγμιαίου έως 99A.



Εικόνα 4.14: Συσσωρευτής LiPo

---

### ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΛΕΓΚΤΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

Το θέμα αυτού του κεφαλαίου είναι η σχεδίαση ενός ελεγκτή πλοήγησης που εκτελεί πτήση διαμέσου σημείων (waypoint navigation). Ο ελεγκτής θα δέχεται ως είσοδο τα σημεία μέσω των οποίων πρέπει να οδηγήσει το ελικόπτερο και με χρήση των δεδομένων των αισθητήρων θα δίνει τα κατάλληλα σήματα στα σέρβο και θα κινεί το ελικόπτερο.

#### 5.1 Απαιτήσεις και προδιαγραφές

Στη σχεδίαση του ελεγκτή πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιες απαιτήσεις από τις οποίες θα καθοριστούν οι προδιαγραφές του. Οι προδιαγραφές που τίθενται για τον ελεγκτή είναι:

- Ο ελεγκτής θα πρέπει να ξεπερνάει το πρόβλημα της πολυπλοκότητας του συστήματος και να οδηγεί το όχημα με αποτελεσματικότητα.
- Ο ελεγκτής θα πρέπει να είναι εύρωστος. Η ευρωστία του ελεγκτή ορίζεται ως η ικανότητά του να προσαρμόζεται σε εξωγενείς παράγοντες που επηρεάζουν την πλοήγηση (π.χ. άνεμος).
- Ο ελεγκτής θα πρέπει να είναι ανεξάρτητος του μοντέλου πλοήγησης και να μην επηρεάζεται από αλλαγές στη δομή του ελικοπτέρου (π.χ. μεγαλύτερο φορτίο)
- Ο ελεγκτής θα πρέπει να είναι αποδοτικός και γρήγορος. Η μεγάλη αστάθεια που παρουσιάζει το ελικόπτερο στην πλοήγηση “υποχρεώνει” τον ελεγκτή να γίνει γρήγορες και σωστές εντολές κίνησης
- Ο ελεγκτής θα πρέπει να διαθέτει δυνατότητα επέκτασης. Μια προσθήκη ενός νέου αισθητήρα στο όχημα θα πρέπει να συνοδεύεται από εύκολη ενσωμάτωσή του στον ελεγκτή.



## 5.2 Ασαφής έλεγχος

Για τη σχεδίαση του ελεγκτή προτείνεται η χρήση τεχνικών ασαφούς ελέγχου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του ασαφούς ελέγχου και στη συνέχεια εξηγείται γιατί προτείνεται η σχεδίαση ασαφούς ελεγκτή.

### 5.2.1 Ασαφής Λογική

Η ασαφής λογική είναι μια γενίκευση της δυαδικής λογικής (Boolean Logic). Είναι βασισμένη στη θεωρία του ασαφούς συνόλου και παρέχει ένα ακριβές πλαίσιο για την αντιπροσώπευση μη ξεκάθαρων καταστάσεων. Η βασική δομή της ασαφούς λογικής, βασισμένη σε κανόνες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς διαφορετικούς τύπους εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου διεργασιών και της λήψης αποφάσεων.

Η ασαφής λογική επιτρέπει, σε ένα βαθμό, τη σχέση μεταξύ των ασαφών συνόλων, έτσι μπορεί κάτι να είναι μερικώς αληθές και ταυτόχρονα μερικώς ψευδές αφού δύναται να είναι μέλος σε δύο ή και περισσότερα ασαφή σύνολα ταυτόχρονα.

### 5.2.2 Συναρτήσεις Συμμετοχής

Οι συναρτήσεις συμμετοχής είναι καμπύλες που καθορίζουν πώς κάθε σημείο στο διάστημα εισαγωγής απεικονίζεται σε μια τιμή της συνάρτησης μεταξύ του 0 και του 1. Εάν  $X$  είναι το υπερσύνολο αναφοράς με επιμέρους στοιχεία  $x$ , τότε  $X=\{x\}$ . Ένα ασαφές σύνολο  $A$  του υπερσυνόλου αναφοράς  $X$  μπορεί να εκφραστεί συμβολικά ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών:

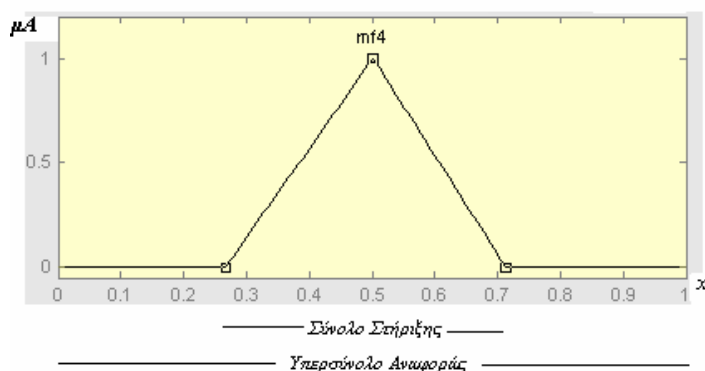
$$A = \int \{ \mu_A(x)/x \} \text{ ή } \sum \{ \mu_A(x)/x \} \text{ για } x \in X$$

για τη συνεχή και τη διακριτή περίπτωση αντιστοίχως. Εδώ  $\mu_A(x)$  καλείται η συνάρτηση συμμετοχής (membership function) του  $x$  στο σύνολο  $A$  και είναι μια απεικόνιση από το υπερσύνολο αναφοράς  $X$  στο κλειστό διάστημα  $[0,1]$ . Η συνάρτηση συμμετοχής υποδεικνύει το βαθμό κατά τον οποίο το σύνολο  $x$  ανήκει στο σύνολο  $A$ , δηλαδή

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$$

Τα σύμβολα  $\int$  και  $\sum$  εκφράζουν το 'σύνολο' και δεν έχουν καμία σχέση με το κλασικό ολοκλήρωμα ή άθροισμα.

Το σύνολο στήριξης ενός ασαφούς συνόλου  $A$  είναι το σύνολο των στοιχείων του υπερσυνόλου αναφοράς  $X$  για το οποίο  $\mu_A(x) > 0$ . Ένα ασαφές σύνολο μπορεί να θεωρηθεί ως μια απεικόνιση του συνόλου στήριξης στο κλειστό διάστημα  $[0,1]$ .

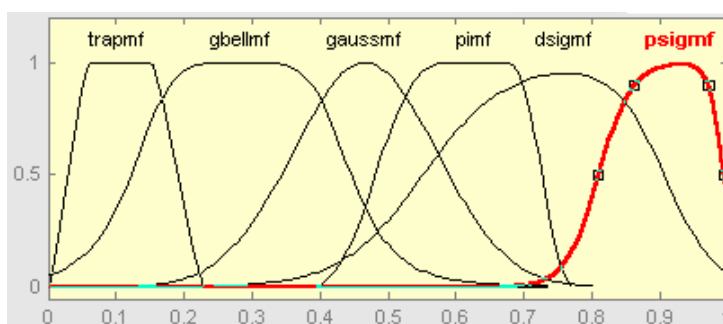


Εικόνα 5.1: Τριγωνική Συνάρτηση Συμμετοχής

### 5.2.3 Μορφή των Συναρτήσεων Συμμετοχής

Υπάρχουν αρκετοί τύποι συναρτήσεων συμμετοχής που βασίζονται σε βασικές συναρτήσεις όπως γραμμικές, Gaussian, σιγμοειδής, τετραγωνικές και κυβικές πολυωνυμικές καμπύλες. Οι απλούστερες συναρτήσεις συμμετοχής είναι αυτές που δημιουργούνται χρησιμοποιώντας ευθείες γραμμές. Από αυτές η πιο απλή είναι η τριγωνική και ακολουθεί η τραπεζοειδής. Η πρώτη αποτελείται από τρία σημεία που δημιουργούν ένα τρίγωνο ενώ η δεύτερη από τέσσερα που δημιουργούν ένα τραπέζιο. Στην τραπεζοειδή συνάρτηση υπάρχει ένα ευθύγραμμο τμήμα, η μικρή βάση του τραπεζίου, στο οποίο η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής ισούται με ένα.

Στην εικόνα 5.2 παρουσιάζονται διάφοροι τύποι συναρτήσεων συμμετοχής.



Εικόνα 5.2: Διάφοροι τύποι Συναρτήσεων Συμμετοχής

### 5.2.4 Βάση Γνώσης

Για τον έλεγχο διεργασιών με ασαφείς ελεγκτές απαιτείται ένα σύνολο κανόνων. Οι κανόνες αυτοί είναι όμοιοι με αυτούς με τους οποίους εκπαιδεύονται και στη συνέχεια εφαρμόζουν οι χειριστές διεργασιών στην πράξη. Το σύνολο των κανόνων αποτελεί τη βάση γνώσης (rule base) του ελεγκτή. Φυσικό είναι να μην είναι γνωστοί όλοι οι κανόνες που είναι απαραίτητοι για να αντιμετωπίσουν όλες τις πιθανές καταστάσεις της ελεγχόμενης διαδικασίας. Συνεπώς ζητείται κάποια τεχνική ικανή να συμπεραίνει αποφάσεις από ελλιπή στοιχεία, όπως ακριβώς κάνει ένας άνθρωπος χειριστής. Η ασαφής λογική είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική για την εξεύρεση αποφάσεων κάτω από αυτές τις συνθήκες.

Η γνώση για τον έλεγχο μιας διεργασίας συνήθως καθορίζεται από ένα σύνολο κανόνων της μορφής 'ΕΑΝ (αίτιο) ΤΟΤΕ (συμπέρασμα)' ή 'ΕΑΝ Α ΤΟΤΕ Β'.

Η τελευταία αποτελεί μια ασαφή εξαρτημένη δήλωση η οποία περιγράφει την εξάρτηση μιας γλωσσικής μεταβλητής από μία άλλη.

Οι τιμές μιας ασαφούς μεταβλητής μπορούν να θεωρηθούν ετικέτες ασαφών συνόλων. Έτσι, για παράδειγμα, η ασαφής μεταβλητή 'θερμοκρασία' σε κάποιο σημείο μιας βιομηχανικής διαδικασίας μπορεί να πάρει γλωσσικές τιμές κανονική, χαμηλή, μέση, υψηλή και πολύ υψηλή. Οι γλωσσικές τιμές αυτές μπορούν να περιγραφούν με ασαφή σύνολα.

### 5.2.5 Η Συνεπαγωγή του Mamdani

Η συνεπαγωγή του Mamdani χρησιμοποιεί τον τελεστή min και ορίζεται ως:

$$R_{\text{mamdani}} = A \times B$$

όπου A, B ασαφή σύνολα. Στο χώρο των συναρτήσεων συμμετοχής η συνεπαγωγή Mamdani είναι:

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

Ο συνδυασμός N εξαρτημένων σχέσεων γίνεται με το συνδετικό Ή, δηλαδή

$$R^N = \vee_k R^k \text{ όπου } k=1,2,\dots,N \text{ και}$$

$$\mu_R^N(x, y) = \vee_k (\mu_A^k(x) \wedge \mu_B^k(y))$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απλουστευμένη συνεπαγωγή του Mamdani άνοιξε το δρόμο για την ευρύτερη διάδοση της ασαφούς λογικής στις βιομηχανικές εφαρμογές.

### 5.2.6 Δομικά Στοιχεία ενός Ασαφούς Ελεγκτή

Τα απαραίτητα δομικά στοιχεία ενός ασαφούς ελεγκτή, βασισμένου σε κανόνες, είναι τα εξής:

- Η *βάση γνώσης* στην οποία είναι καταχωρημένη η κωδικοποιημένη γνώση (οι κανόνες ελέγχου) για τον έλεγχο της διαδικασίας.
- Τα *ασαφή σύνολα* που είναι καταχωρημένα είτε σε αναλυτική είτε σε διακριτή μορφή σε ειδικό αρχείο. Ο μηχανισμός συμπεράσματος χρησιμοποιεί τα σύνολα αυτά για να αποδώσει τις πράξεις ελέγχου στη διαδικασία.
- Τον *ασαφοποιητή* όπου οι φυσικές μεταβλητές της διαδικασίας μετατρέπονται στη γλώσσα των ασαφών συνόλων.
- Το *μηχανισμό συμπεράσματος* όπου συμπεραίνονται οι αποφάσεις ελέγχου βάσει των διαθέσιμων κανόνων σε μορφή ασαφών συνόλων.
- Τον *από-ασαφοποιητή* όπου τα ασαφή σύνολα των εξόδων του ελεγκτή μετατρέπονται σε σαφείς δράσεις ελέγχου προς μετάδοση στους ενεργοποιητές της διαδικασίας μέσω των τοπικών μονάδων ελέγχου.

### 5.2.7 Σχεδιασμός Ασαφούς Ελεγκτή

Ο σχεδιασμός ενός ασαφούς ελεγκτή γίνεται σε πέντε βήματα:

- Στο πρώτο βήμα προσδιορίζεται το πρόβλημα. Συνήθως αυτό δεν είναι ένα μαθηματικό μοντέλο, απλά καθορίζεται πως θα πρέπει να λειτουργήσει το σύστημα που ελέγχεται.
- Καθορισμός όλων των μεταβλητών εισόδου και εξόδου του συστήματος καθώς και της διακύμανσής τους.
- Καθορισμός των συναρτήσεων συμμετοχής για κάθε μεταβλητή εισόδου και εξόδου του συστήματος.
- Καθορισμός τελεστών λογικών πράξεων.
- Επιλογή μεθόδου από-ασαφοποίησης.

### 5.3 Πλεονεκτήματα ασαφούς λογικής

Η θεωρία της Ασαφούς Λογικής έχει κάποια πλεονεκτήματα, σε σχέση με άλλες μεθόδους, τα οποία την καθιστούν την πλέον κατάλληλη για την επίλυση ενός προβλήματος όπου υπάρχει δυσκολία στη δημιουργία δυναμικού μοντέλου. Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η ασαφής λογική εννοιολογικά είναι εύκολο να γίνει κατανοητή. Οι μαθηματικές αρχές που βρίσκονται πίσω από αυτήν είναι ιδιαίτερα απλές.
- Είναι πολύ ευέλικτη με αποτέλεσμα όταν επιβάλλεται να γίνουν κάποιες αλλαγές στο σύστημα να μην ξεκινάει από τον σχεδιασμό.
- Είναι ανεκτική σε ανακριβή δεδομένα. Τα πάντα είναι ανακριβή εάν ελεγχθούν από κοντά και ακόμα περισσότερο εάν επιθεωρηθούν προσεκτικά. Η ασαφής λογική προσαρμόζει αυτή την αντίληψη μέσα στην διαδικασία.
- Μπορεί να μοντελοποιήσει μη γραμμικές συναρτήσεις αυθαίρετης πολυπλοκότητας. Ένα ασαφές σύστημα δύναται να ταιριάζει κάθε σύνολο δεδομένων εισόδου – εξόδου.
- Η ασαφής λογική μπορεί να στηριχτεί στην κορυφαία εμπειρία των ειδικών, που ήδη κατανοούν το σύστημα.
- Δύναται να συνεργαστεί με τα συμβατικά συστήματα ελέγχου. Τα ασαφή συστήματα σε πολλές περιπτώσεις τα συμπληρώνουν και κάνουν την υλοποίηση τους απλούστερη.
- Βασίζεται στη φυσική γλώσσα, που αποτελεί και τη βάση για την ανθρώπινη επικοινωνία.
- Αυξάνει το βαθμό αυτοματοποίησης που σε πολλές περιπτώσεις βιομηχανικών διεργασιών είναι περιορισμένος.
- Είναι οικονομικότερο να αναπτυχθεί ένας ασαφής ελεγκτής από οποιοδήποτε άλλο ελεγκτή που κάνει την ίδια εργασία.

## 5.4 Γιατί ασαφής έλεγχος;

Το δυναμικό μοντέλο πλοήγησης του ελικοπτέρου είναι εξαιρετικά πολύπλοκο και δύσκολο να επιλυθεί ακόμα και με προχωρημένες μεθόδους επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων. Γι' αυτό το λόγο, οι περισσότερες εφαρμογές (βλ. Κεφάλαιο 1) χρησιμοποιούν κάποια μέθοδο γραμμικοποίησης του μοντέλου. Το γεγονός αυτό όμως δημιουργεί αστάθεια στον έλεγχο και αδυναμία κατασκευής ελεγκτή που θα συμπεριλαμβάνει όλους τους παράγοντες πλοήγησης (ενδογενείς και εξωγενείς). Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος προτείνεται η σχεδίαση και εφαρμογή ασαφούς ελεγκτή. Η ιδέα αυτού του εγχειρήματος είναι εκμεταλλευτούμε τη ικανότητα προσαρμογής της ασαφούς λογικής σε ένα σύστημα χωρίς να είναι απαραίτητη η γνώση των δυναμικών καταστάσεων του συστήματος.

Ο χειριστής του ελικοπτέρου κάνει πτήση δια οπτικής επαφής και χωρίς να ξέρει τίποτα για τη δυναμική κατάσταση του ελικοπτέρου. Βλέπει τη θέση του ελικοπτέρου και τις κινήσεις του στο χώρο και δίνει στο χειριστήριο κατάλληλες εντολές. Αν για παράδειγμα παρατηρήσει εκτελεί αιώρηση και παρατηρήσει κλίση προς τα δεξιά, θα δώσει στο χειριστήριο για ελαφριά κλίση του στροφείου προς τα αριστερά μέχρι το ελικόπτερο να αποκτήσει πάλι τη σωστή του θέση.

Τη διαδικασία αυτή θέλουμε να προσομοιώσουμε με τη χρήση του ασαφούς ελεγκτή. Χωρίς να χρησιμοποιεί κανένα δυναμικό μοντέλο κίνησης, ο ελεγκτής διαβάζει τα δεδομένα από τους αισθητήρες και δίνει κατάλληλες εντολές κίνησης στους σερβοκινητήρες του οχήματος. Σε ανάλογη περίπτωση με αυτή που αντιμετώπισε ο χειριστής πριν, ο ελεγκτής διαβάζει από τη μονάδα μέτρησης αδράνειας ότι το ελικόπτερο παρουσιάζει ελαφριά κλίση προς τα δεξιά, οπότε δίνει εντολή κίνησης προς τα αριστερά στο αντίστοιχο σέρβο.

Με τη διαδικασία αυτή ο ασαφής έλεγχος προσαρμόζεται στην πλοήγηση του οχήματος και ξεπερνά το πρόβλημα πολυπλοκότητας του συστήματος. Το μόνο δύσκολο πλέον να διαμορφωθεί κατάλληλα ο ελεγκτής ώστε οι κινήσεις να πλησιάζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις κινήσεις του χειριστή. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια ενδεικτική σχεδίαση ενός τέτοιου ελεγκτή.

## 5.5 Σχεδίαση ελεγκτή πλοήγησης

Ο ασαφής ελεγκτής που δημιουργηθεί θα χρησιμοποιεί τη συνεπαγωγή Mamdani και θα έχει ως στόχο τον έλεγχο της συμπεριφοράς του ελικοπτέρου. Θα έχει ως εισόδους και εξόδους μεταβλητές που θα συσχετίζονται μεταξύ τους με κανόνες της μορφής «EAN... TOTE...» που αποτελούν και τη βάση γνώσης του ελεγκτή.

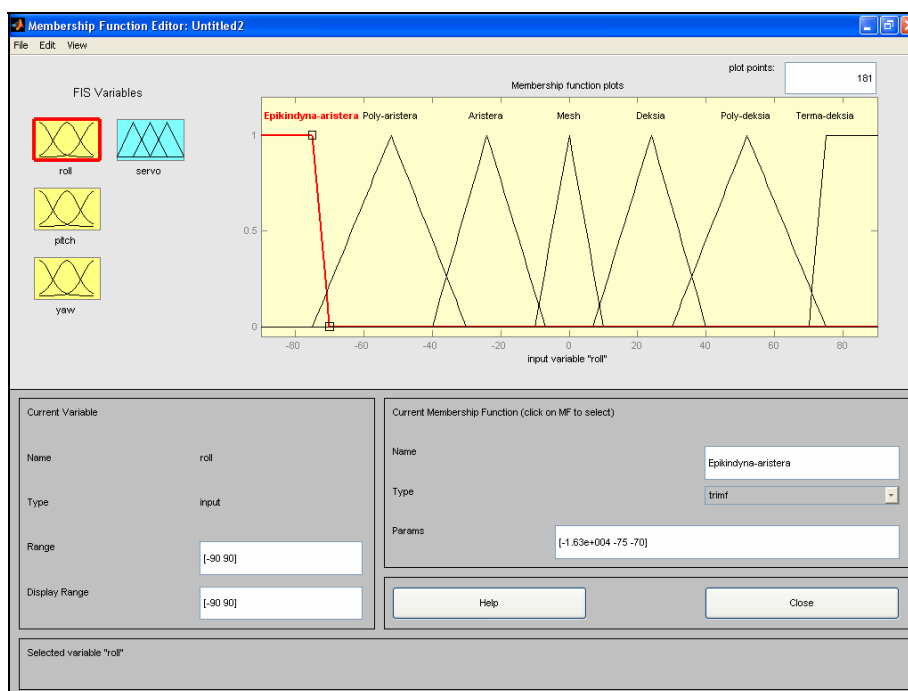
### 5.5.1 Καθορισμός των μεταβλητών εισόδου

Ο ασαφής ελεγκτής που θα χρησιμοποιηθεί έχει έξι εισόδους, τις γωνίες κύλισης  $\phi$  (roll), πρόνευσης  $\theta$  (pitch) και παρέκκλισης  $\psi$  (yaw) και τις αντίστοιχες γωνιακές ταχύτητες. Οι τρεις γωνίες μας δίνουν την τρισδιάστατη θέση του οχήματος, ενώ οι αντίστοιχες ταχύτητες δίνουν τη συμπεριφορά του (π.χ. αν υπάρχει κίνηση προς μια κατεύθυνση).

Κατά την έναρξη του ελέγχου γίνεται αρχικοποίηση της μονάδας μέτρησης αδράνειας, μηδενίζονται δηλαδή οι τρεις γωνίες. Οι μηδενικές γωνίες αναπαριστούν την ιδανική θέση την οποία πρέπει να έχει το ελικόπτερο. Κάθε γωνία παίρνει τιμές στο διάστημα  $[-90^\circ, 90^\circ]$ , και μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα επίπεδα:

- *Επικίνδυνα αριστερά*, που κυμαίνεται από  $-90^\circ$  έως  $-70^\circ$
- *Πολύ αριστερά*, που κυμαίνεται από  $-75^\circ$  έως  $-30^\circ$
- *Αριστερά*, που κυμαίνεται από  $-40^\circ$  έως  $-8^\circ$
- *Μέση*, που κυμαίνεται από  $-10^\circ$  έως  $10^\circ$
- *Δεξιά*, που κυμαίνεται από  $8^\circ$  έως  $40^\circ$
- *Πολύ δεξιά*, που κυμαίνεται από  $30^\circ$  έως  $70^\circ$
- *Επικίνδυνα δεξιά*, που κυμαίνεται από  $70^\circ$  έως  $90^\circ$

Για το σχηματισμό των παραπάνω συνόλων χρησιμοποιούνται τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής. Στην Εικόνα 5.3 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής για τη γωνία roll. Οι συναρτήσεις συμμετοχής των άλλων δύο γωνιών είναι της ίδιας μορφής και διάταξης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των γωνιών, οι διακυμάνσεις τους και οι επικαλύψεις των ασαφών συνόλων είναι ενδεικτικές. Θα πρέπει οι τιμές αυτές να επαληθευτούν πειραματικά ύστερα από μια σειρά δοκιμαστικών πτήσεων του ελικοπτήρου κατά τη διάρκεια των οποίων θα δοκιμάζονται διάφορες τιμές για κάθε σύνολο έως ότου προκύψει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

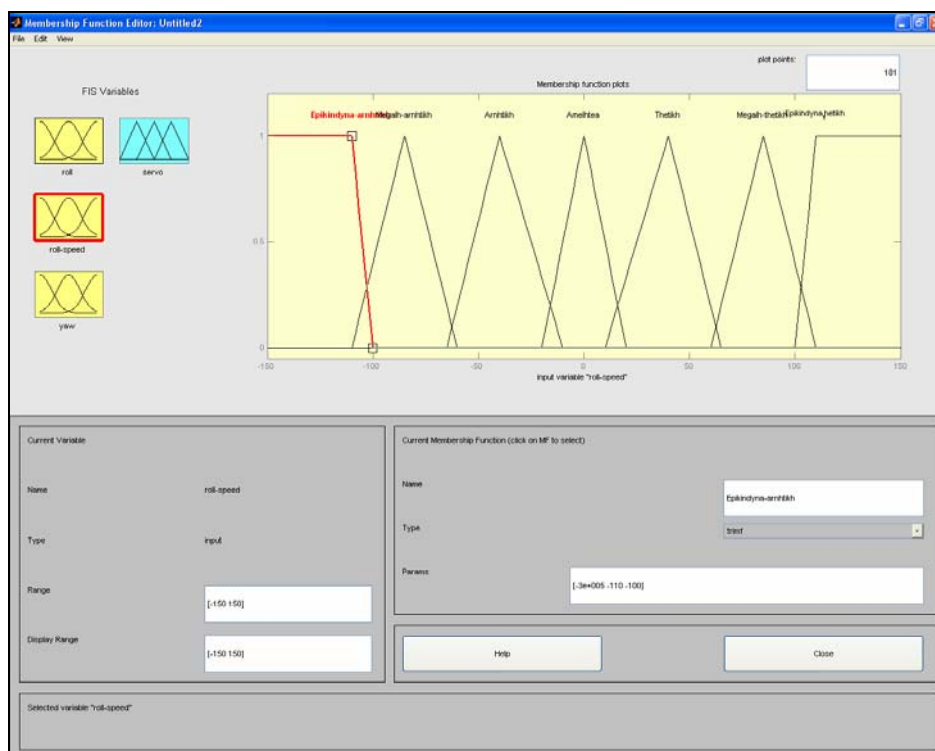


Εικόνα 5.3: Συναρτήσεις συμμετοχής γωνίας roll

Οι γωνιακές ταχύτητες μετρώνται σε deg/sec (Η μονάδα αδράνειας μπορεί να μετρήσει μέχρι  $300^\circ/\text{sec}$ ). Ως θετική ορίζεται η ταχύτητα που αυξάνει την αντίστοιχη γωνία (στροφή προς τα δεξιά). Οι γωνιακές ταχύτητες χωρίζονται στα ακόλουθα σύνολα:

- *Επικίνδυνα αρνητική*, από  $-300^\circ$  έως  $-100^\circ / \text{sec}$
- *Μεγάλη αρνητική*, από  $-110^\circ$  έως  $-60^\circ / \text{sec}$
- *Αρνητική*, από  $-65^\circ$  έως  $-10^\circ / \text{sec}$
- *Αμελητέα*, από  $-20^\circ$  έως  $20^\circ / \text{sec}$
- *Θετική*, από  $10^\circ$  έως  $65^\circ / \text{sec}$
- *Μεγάλη θετική*, από  $60^\circ$  έως  $110^\circ / \text{sec}$
- *Επικίνδυνα θετική*, από  $100^\circ$  έως  $300^\circ / \text{sec}$

Και σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής. Στην Εικόνα 5.4 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής της roll γωνιακής ταχύτητας. Ίδιας μορφής και διάταξης είναι οι συναρτήσεις συμμετοχής των άλλων δύο γωνιακών ταχυτήτων.



Εικόνα 5.4: Συναρτήσεις συμμετοχής γωνιακής ταχύτητας roll

Περαιτέρω, ο ελεγκτής θα δέχεται ως είσοδο δεδομένα θέσης από το GPS του ελικοπτερίου. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τόσο τη γεωγραφική θέση του οχήματος (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) όσο και το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται το ελικόπτερο. Τέλος ως είσοδος στον ελεγκτή εισάγονται και συντεταγμένες θέσης του χρήστη. Ανάλογα με την πορεία που θέλει ο χρήστης να ακολουθήσει το ελικόπτερο, εισάγει συντεταγμένες θέσης διαμέσου των οποίων θα πρέπει να περάσει το όχημα.

### 5.5.2 Μεταβλητές εξόδου

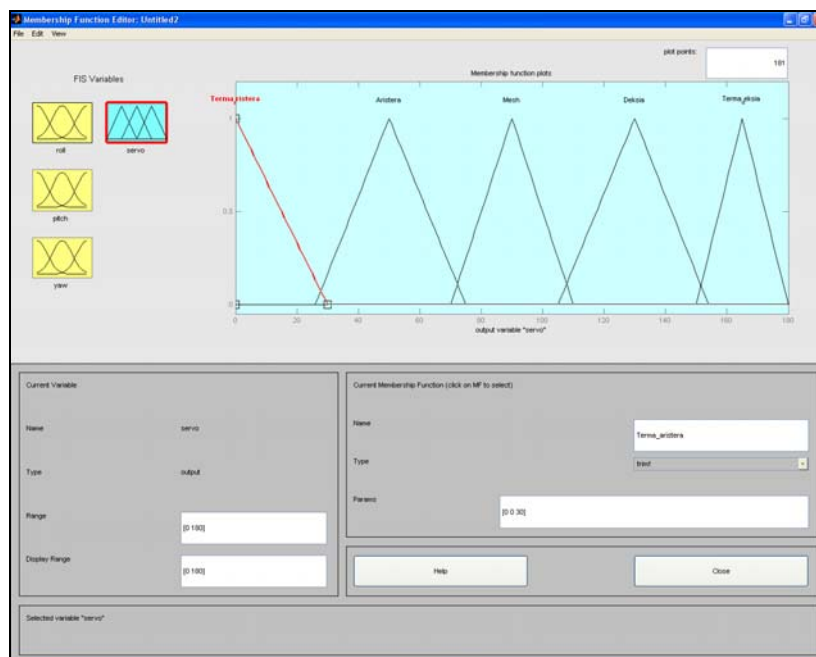
Για τον έλεγχο των κινήσεων του ελικοπτερίου ο ελεγκτής ελέγχει τα πέντε RC servo τα οποία εκτελούν τις αντίστοιχες κινήσεις στο όχημα. Τα RC servo περιστρέφονται σε συγκεκριμένο εύρος γωνιών (0 έως 180 μοίρες). Επομένως για να κινηθεί κατάλληλα το ελικόπτερο πρέπει να δοθούν στα RC servo κατάλληλες τιμές γωνιών. Κατά συνέπεια, ως μεταβλητές εξόδου ορίζονται οι γωνίες στροφής των πέντε RC servo. Ορίζοντας ως μέση θέση των RC servo τις 90 μοίρες, η διακύμανση των μεταβλητών εξόδου είναι η ακόλουθη:

- *Τέρμα αριστερά*, από 0 έως 30 μοίρες
- *Αριστερά*, από 26 έως 75 μοίρες
- *Μέση*, από 70 έως 110 μοίρες
- *Δεξιά*, από 105 έως 154 μοίρες
- *Τέρμα δεξιά*, από 150 έως 180 μοίρες

Όπως έχει ήδη ειπωθεί (Κεφάλαιο 3), χρησιμοποιούνται πέντε RC Servo:

- Ένα RC servo ρυθμίζει το γκάζι του κινητήρα
- Ένα RC servo ρυθμίζει το βήμα του κυρίως στροφείου
- Ένα RC servo ρυθμίζει το βήμα του ουραίου στροφείου (yaw)
- Ένα RC servo ρυθμίζει την κίνηση δεξιά-αριστερά (roll)
- Ένα RC servo ρυθμίζει την κίνηση μπρος-πίσω (pitch)

Στην Εικόνα 5.4 φαίνεται πως έχουν διαμορφωθεί οι συναρτήσεις συμμετοχής της εξόδου.



Εικόνα 5.4: Συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου

### 5.5.3 Βάση κανόνων

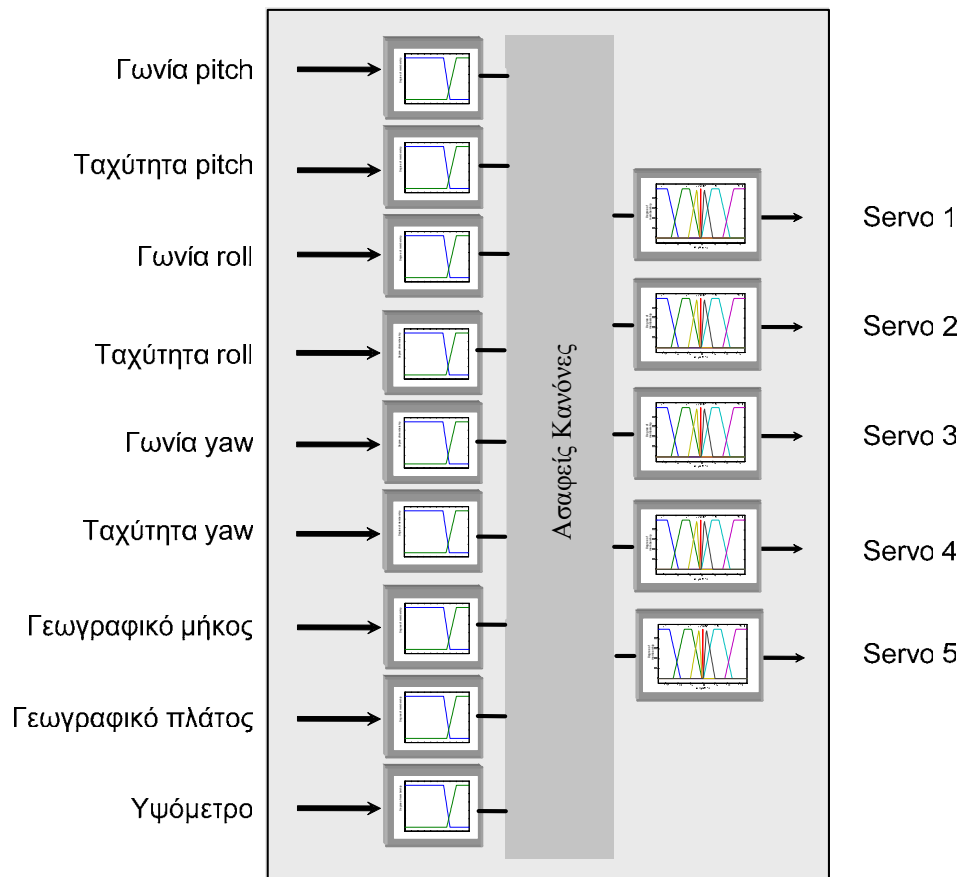
Οι κανόνες της μορφής 'ΕΑΝ... ΤΟΤΕ...' αποτελούν τη βάση γνώσης του ασαφούς ελεγκτή. Είναι αυτοί που περιγράφουν την εξάρτηση που υπάρχει ανάμεσα στις εισόδους και τις εξόδους του συστήματος. Στην περίπτωση του ασαφούς ελεγκτή του ελικοπτέρου χρησιμοποιούνται κανόνες ανάλογα με την αποστολή που πρέπει να εκτελέσει το ελικόπτερο. Για την περίπτωση της εκτέλεσης αιώρησης, η βάση κανόνων του ελεγκτή αποτελείται από τους ακόλουθους κανόνες:



ΕΑΝ Γωνία (pitch, roll, yaw)	ΚΑΙ Ταχύτητα (pitch, yaw, roll)	ΤΟΤΕ RC Servo (αντίστοιχο)
Επικίνδυνα αριστερά	Επικίνδυνα αρνητική	Τέρμα δεξιά
Επικίνδυνα αριστερά	Μεγάλη αρνητική	Τέρμα δεξιά
Επικίνδυνα αριστερά	Αρνητική	Δεξιά
Επικίνδυνα αριστερά	Αμελητέα	Δεξιά
Επικίνδυνα αριστερά	Θετική	Δεξιά
Επικίνδυνα αριστερά	Μεγάλη θετική	Μέση
Επικίνδυνα αριστερά	Επικίνδυνα θετική	Μέση
Πολύ αριστερά	Επικίνδυνα αρνητική	Τέρμα δεξιά
Πολύ αριστερά	Μεγάλη αρνητική	Δεξιά
Πολύ αριστερά	Αρνητική	Δεξιά
Πολύ αριστερά	Αμελητέα	Δεξιά
Πολύ αριστερά	Θετική	Δεξιά
Πολύ αριστερά	Μεγάλη θετική	Μέση
Πολύ αριστερά	Επικίνδυνα θετική	Μέση
Αριστερά	Επικίνδυνα αρνητική	Δεξιά
Αριστερά	Μεγάλη αρνητική	Δεξιά
Αριστερά	Αρνητική	Δεξιά
Αριστερά	Αμελητέα	Δεξιά
Αριστερά	Θετική	Μέση
Αριστερά	Μεγάλη θετική	Μέση
Αριστερά	Επικίνδυνα θετική	Αριστερά
Μέση	Επικίνδυνα αρνητική	Δεξιά
Μέση	Μεγάλη αρνητική	Δεξιά
Μέση	Αρνητική	Δεξιά
Μέση	Αμελητέα	Μέση
Μέση	Θετική	Αριστερά
Μέση	Μεγάλη θετική	Αριστερά
Μέση	Επικίνδυνα θετική	Αριστερά
Δεξιά	Επικίνδυνα αρνητική	Δεξιά
Δεξιά	Μεγάλη αρνητική	Δεξιά
Δεξιά	Αρνητική	Μέση
Δεξιά	Αμελητέα	Αριστερά
Δεξιά	Θετική	Αριστερά
Δεξιά	Μεγάλη θετική	Αριστερά
Δεξιά	Επικίνδυνα θετική	Αριστερά
Πολύ δεξιά	Επικίνδυνα αρνητική	Μέση
Πολύ δεξιά	Μεγάλη αρνητική	Μέση
Πολύ δεξιά	Αρνητική	Αριστερά
Πολύ δεξιά	Αμελητέα	Αριστερά
Πολύ δεξιά	Θετική	Αριστερά
Πολύ δεξιά	Μεγάλη θετική	Αριστερά
Πολύ δεξιά	Επικίνδυνα θετική	Τέρμα αριστερά
Επικίνδυνα δεξιά	Επικίνδυνα αρνητική	Μέση
Επικίνδυνα δεξιά	Μεγάλη αρνητική	Μέση
Επικίνδυνα δεξιά	Αρνητική	Αριστερά
Επικίνδυνα δεξιά	Αμελητέα	Αριστερά
Επικίνδυνα δεξιά	Θετική	Αριστερά
Επικίνδυνα δεξιά	Μεγάλη θετική	Τέρμα αριστερά
Επικίνδυνα δεξιά	Επικίνδυνα θετική	Τέρμα αριστερά

Πίνακας 5.1: Κανόνες ασαφούς λογικής

Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα δομής του ασαφούς ελεγκτή. Στο διάγραμμα αυτό, αναπαριστώνται οι είσοδοι και οι έξοδοι του ελεγκτή καθώς και το σημείο στο οποίο εμπλέκονται οι ασαφείς κανόνες.



Εικόνα 5.5: Διάγραμμα ελέγχου

---

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

#### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκε το πρόβλημα της αυτόνομης πλοήγησης μη επανδρωμένων ελικοπτέρων. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την διατριβή αυτή είναι τα ακόλουθα:

- Τα μη επανδρωμένα ελικοπτερα αποτελούν τις πιο ευέλικτες ιπτάμενες μηχανές, η ευελιξία όμως αυτή συνοδεύεται και από εξαιρετική πολυπλοκότητα της δομής και πλοήγησής τους.
- Είναι εξαιρετικά δύσκολο να σχηματιστεί δυναμικό μοντέλο που να περιγράφει πλήρως την κινηματική των VTOL καθώς αυτά διακρίνονται από μεγάλη αστάθεια σε εξωγενείς παράγοντες.
- Ακόμη και τα απλοποιημένα δυναμικά μοντέλα ελικοπτέρων είναι εξαιρετικά μη γραμμικά και δύσκολα να επιλυθούν με μεθόδους κλασσικού ελέγχου.
- Προτείνεται η χρήση ασαφούς λογικής για την κατασκευή συστήματος πλοήγησης ικανού να ξεπερνάει τα προβλήματα μοντελοποίησης και να ελέγχει κατάλληλα ένα VTOL.
- Ένα ολοκληρωμένο σύστημα πλοήγησης αποτελείται από κατάλληλο εξοπλισμό και λογισμικό.
- Ο εξοπλισμός πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένες προδιαγραφές και να συνεργάζεται κατάλληλα με το λογισμικό για την σωστή και ασφαλή πλοήγηση του οχήματος.
- Σχεδιάζεται ένα πλήρες πακέτο εξοπλισμού και παρουσιάζονται τα επιμέρους στοιχεία του μέσω της εφαρμογής του σε πραγματικό όχημα.
- Για την δημιουργία του ασαφούς ελεγκτή είναι απαραίτητη η εκτέλεση μεγάλου αριθμού δοκιμαστικών πτήσεων, κατά τη διάρκεια των οποίων θα γίνονται διορθώσεις και βελτιώσεις στον ελεγκτή.

## 6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στο σημείο αυτό προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις και πεδία έρευνας για την εξέλιξη της παρούσας διατριβής. Το πρόβλημα της πλοήγησης μη επανδρωμένων ελικοπτέρων είναι πολυδιάστατο κι έτσι οι επεκτάσεις που μπορούν να υπάρξουν είναι πολλές. Συνοπτικά έχουμε:

- Στον εξοπλισμό που προτείνεται σε αυτή τη διατριβή μπορούν να προστεθούν και περαιτέρω αισθητήρες για την ακόμα καλύτερη γνώση της κατάστασης του ελικοπτέρου από το σύστημα ελέγχου. Θα μπορούσε για παράδειγμα να τοποθετηθεί στο ελικόπτερο ένα βαρομετρικό όργανο μέτρησης υψομέτρου το οποίο θα δίνει το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται το όχημα με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από αυτή που δίνει το GPS. Ο περαιτέρω εξοπλισμός περιλαμβάνει ακόμη κάμερα για οπτική αναγνώριση, ραντάρ για αποφυγή εμποδίων κ.α.
- Μια σημαντική επέκταση είναι η ολοκλήρωση της σχεδίασης του ασαφούς ελεγκτή και η πλήρης ενσωμάτωσή του στο σύστημα ελέγχου. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την εκτέλεση πολλών πτήσεων και δοκιμών για την βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών του ασαφούς συστήματος.
- Μεγάλο ενδιαφέρον έχει επίσης ερευνητικά η διαχείριση προβλημάτων αστάθειας και βλαβών μέσω λογισμικού. Μπορεί δηλαδή να κατασκευαστεί λογισμικό ελέγχου το οποίο θα αναλαμβάνει να προσγειώνει επιτυχώς το ελικόπτερο σε ασφαλές σημείο, στην περίπτωση όπου υπάρξει βλάβη είτε στο σύστημα πλοήγησης είτε στο ελικόπτερο (π.χ. κράτημα κινητήρα)
- Μεγάλα περιθώρια εξέλιξης υπάρχουν στην διαχείριση των δεδομένων που λαμβάνει το ελικόπτερο από το σταθμό βάσης. Είναι χρήσιμο να κατασκευαστεί λογισμικό για την διαχείριση των δεδομένων αυτών και την αναπαράστασή τους σε πραγματικό χρόνο, ώστε να εμποττεύεται από το έδαφος το όχημα χωρίς να είναι απαραίτητη η οπτική επαφή

## Βιβλιογραφία

- [1] P. Van Blyenburgh, "UAVs: an Overview", *Air & Space Europe*, Vol. 1, No 5/6, 1999, pp. 43-47.
- [2] P. Van Blyenburgh, "UAVs in Europe", *Unmanned Systems*, vol. 19, no 1, pp. 8-11, 2001.
- [3] P. Spanoudakis, L. Doitsidis, N. C. Tsourveloudis, K. P. Valavanis, 'Vertical Take-Off and Landing Vehicle Market Overview', *Unmanned Systems*, pp. 14-18, vol. 21, no. 5, Sept/Oct 2003.
- [4] P. Spanoudakis, L. Doitsidis, N. C. Tsourveloudis, K. P. Valavanis, 'A Market Overview of the Vertical Take-Off and Landing UAVs', *Workshop on Unmanned Aerial Vehicles, 11th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Rhodes, Greece, 2003.
- [5] Σπανουδάκης Πολυχρόνης, "Σχεδίαση Νέου Μη Επανδρωμένου Οχήματος Κάθετης Απογείωσης-Προσγείωσης", *Μεταπτυχιακή Διατριβή*, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Οκτώβριος 2003.
- [6] Raymond W. Prouty, "Helicopter Performance Stability, and Control", *Krieger Publishing Company*, Florida, 1990.
- [7] D. H. Shim, H. J. Kim, S. Sastry, "A Flight Control System for Aerial Robots: Algorithms and Experiments", *IFAC Control Engineering Practice*, 2003
- [8] D. H. Shim, H. J. Kim, S. Sastry, "System Identification and Control Synthesis for Rotorcraft-based Unmanned Aerial Vehicles", *IEEE International Conference on Control Applications*, Anchorage, September 2000
- [9] D. H. Shim, T. J. Koo, F. Hoffmann, S. Sastry, "A Comprehensive Study on Control Design of Autonomous Helicopter", *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*, Florida, December 1998
- [10] G. Vachtsevanos, L. Tang, G. Drozeski, L. Gutierrez, "From mission planning to flight control of unmanned aerial vehicles", *Annual Reviews in Control*, vol. 29, pp 101-115, 2005
- [11] G. Vachtsevanos, L. Tang, J. Reiman, "An Intelligent Approach to Coordinated Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicle", *AHS Annual Forum 60: Uninhabited VTOL Aircraft/Rotorcraft*, 2004
- [12] G. Drozeski, B. Saha, G. Vachtsevanos, "A Fault Detection and Reconfigurable Control Architecture for Unmanned Aerial Vehicles", *IEEE Aeroconf*, 2005
- [13] B. Mettler, , "Identification Modeling and Characteristics of Miniature Rotorcraft", *Kluwer Academic Publishers*, 2003
- [14] B. Mettler, M. Valenti, T. Schouwenaars , Y. Kuwata, J. How, J. Paunicka and E. Feron, "Autonomous UAV Guidance Build-up: Flight Test Demonstration

- and Evaluation Plan," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Austin, 2003.
- [15] V. Gavrillets, I. Martinos, B. Mettler and E. Feron, "Control Logic for Automated Aerobatic Flight of Miniature Helicopter". AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Monterey, 2002
  - [16] B. Mettler, M. Tischler, T. Kanade, "Attitude Control Optimization for a Small-Scale Unmanned Helicopter", AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 2000
  - [17] J. Bagnell, J. Schneider, "Autonomous Helicopter Control using Reinforcement Learning Policy Search Methods", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001
  - [18] V. Gavrillets, A. Shterenberg, M. Dahleh, E. Feron, "Avionics System for a Small Unmanned Helicopter Performing Aggressive Maneuvers", AIAA Digital Avionics Systems Conference, 2000
  - [19] J. Dittrich, E. Johnson, "Multi-sensor navigation system for an autonomous helicopter", AIAA Digital Avionics Systems Conference, 2002
  - [20] G. Buskey, J. Roberts, P. Corke, G. Wyeth, "Helicopter Automation Using a Low-Cost Sensing System", Australian Conference on Robotics and Automation, Brisbane Australia, 2003
  - [21] R. Duren, "Development of a small rotary wing autonomous vehicle", AIAA Digital Avionics Systems Conference, 1999
  - [22] K. Sprague, V. Gavrillets, D. Dugail, B. Mettler, E. Feron, "Design and applications of an avionics system for a miniature acrobatic helicopter", AIAA Digital Avionics Systems Conference, 2001
  - [23] T. Koo, S. Sastry, "Output tracking control design of a helicopter model based on approximate linearization", IEEE Conference on Decision and Control, 1998
  - [24] J. Prasad, A. Calise, Y. Pei, J. Corban, "Adaptive nonlinear controller synthesis and flight test evaluation", IEEE International Conference on Control Applications, 1999
  - [25] M. Sugeno, H. Winston, I. Hirano, "Intelligent control of an unmanned helicopter based on fuzzy logic", 51<sup>st</sup> Annual Forum of the American Helicopter Society, 1995
  - [26] C. Sanders, "Hierarchical control of small autonomous helicopter", IEEE Conference on Decision and Control, 1998
  - [27] O. Amidi, "An Autonomous Vision-Guided Helicopter", PhD thesis, Dept of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University
  - [28] G. Padfield, "Helicopter Flight Dynamics: The Theory and Application of Flying Qualities and Simulation Modelling", AIAA Education Series, 1999