



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Συνεχές Διαφορικό Ανταγωνιστικό
Παίγνιο μεταξύ ενός Εναέριου και ενός
Επίγειου Οχήματος Με Χρήση
Προβλεπτικού Ελεγκτή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Τζαννέτου Παναγιώτη-Γεώργιου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Κ. Κυριακόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΕΩΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου

Συνεχές Διαφορικό Ανταγωνιστικό
Παίγνιο μεταξύ ενός Εναέριου και ενός
Επίγειου Οχήματος Με Χρήση
Προβλεπτικού Ελεγκτή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Τζαννέτου Παναγιώτη - Γεώργιου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Κυριακόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1η Φεβρουαρίου 2016.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Κων/νος Κυριακόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ευάγγελος Παπαδόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Αντωνιάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

(Υπογραφή)

.....

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ-ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΖΑΝΝΕΤΟΣ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2016 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου

Copyright ©–All rights reserved Παναγιώτης -Γεώργιος Τζαννέτος, 2016.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Ευχαριστίες

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Κυριακόπουλο, για την πολύτιμη καθοδήγηση του, τις συμβουλές του και την ελευθερία που επέδειξε επιτρέποντάς μου να εργαστώ πάνω στο θέμα που επέλεξα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω άπαντες στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου και Ρυθμίσεως Μηχανών & Εγκαταστάσεων του κ. Κυριακόπουλου(Control System Lab) για την βοήθεια και τις επισημάνσεις που μου έδωσαν καθ'ολη την διάρκεια της πολύμηνης εργασίας μου εκεί.

Οι γνώσεις και οι εμπειρίες που απέκτησα κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης και εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας ήταν πολύ ενδιαφέρουσες και εκτιμώ ότι θα φανούν χρήσιμες στην μετέπειτα πορεία μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα αγαπημένα και κοντινά μου πρόσωπα, τους γονείς μου, Γιάννη και Αγγελική και την αδερφή μου, Μαργαρίτα για την ηθική κυρίως υποστήριξή τους. Όπως επίσης και τους επί χρόνια φίλους μου και φίλες μου, και ιδιαίτερα την Κατερίνα Πεφάνη, για την στήριξη τους και την υπομονή που μου επέδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και όχι μόνο.

Περίληψη

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία μελετήθηκε και εξετάστηκε το (μη συνεργαζόμενο) ανταγωνιστικό διαφορικό και συνεχές παίγνιο μεταξύ ενός εναέριου(UAV) και ενός επίγειου ρομποτικού οχήματος (UGV) τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά.

Ο κάθε παίχτης ενεργεί ανεξάρτητα επιδιώκοντας να ικανοποιήσει την δική του συνάρτηση σκοπού. Συγκεκριμένα το εναέριο ρομπότ αποσκοπεί στην μείωση της μεταξύ τους απόστασης και κατεύθυνσης κίνησης, ενώ το επίγειο την αύξηση και επομένως την αποφυγή του εναέριου.

Για να γίνει αυτό πρέπει πρώτον ο κάθε παίχτης να έχει καλή γνώση(εκτίμηση) της κατάστασης της θέσης του, της ταχύτητάς του και του προσανατολισμού του με συνένωση διάφορων αισθητήρων ως προς ένα κοινό άξονα συντεταγμένων. Επίσης με οπτική ανατροφοδότηση γίνεται γνωστή η συνεχής μεταξύ τους σχετική απόσταση με μία κάμερα που είναι τοποθετημένη πάνω στο UAV.

Προκύπτει επομένως ότι σκοπός της διπλωματικής είναι ο σχεδιασμός των ανεξάρτητων εισόδων των δύο παιχτών με βάση την παραπάνω λογική ώστε να γίνει η μελέτη του παιγνίου πειραματικά σε πραγματικές πλατφόρμες αφού πρώτα εξεταστεί θεωρητικά.

Για αυτόν τον λόγο αναπτύχθηκε μη γραμμικός προβλεπτικός ελεγκτής με σταθερό ορίζοντα πρόβλεψης ώστε να υπολογίζει σε πραγματικό χρόνο κάθε φορά την βέλτιστη τροχιά του κάθε παίχτη σε σχέση με την κίνηση του άλλου, λαμβάνοντας υπόψιν και την δυναμική των μοντέλων. Οι πλατφόρμες που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική μελέτη είναι το εξακόπτερο εναέριο όχημα Asctec Firefly και το επίγειο όχημα Pioneer 2.

Εξετάζοντας διάφορα σενάρια στις θεωρητικές προσομοιώσεις εξάγονται συμπεράσματα για το συγκεκριμένο παίγνιο γρήγορου παίχτη με αργό αλλά ευέλικτο όταν τους θεωρούμε και τους δύο «λογικούς» .

Τέλος μέσω του πειράματος δείχνουμε τις δυνατότητες που έχουν τα εναέρια οχήματα όταν θέλουν να παρακολουθήσουν αντικείμενα με απρόβλεπτες τροχιές με ελλιπή γνώση της κίνησης που πρόκειται να ακολουθήσει και όχι απαραίτητα ανταγωνιστικές.

Λέξεις Κλειδιά

Μη-επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα, Θεωρία Παιγνίων, Διαφορικό Παίγνιο, Προβλεπτικός Έλεγχος, Έλεγχος με Οπτική Ανατροφοδότηση, Ρομποτική, Αυτόματος Έλεγχος, Αναγνώριση Συστήματος

Abstract

In this diploma thesis an imperfect information competitive differential and continuous game between an unmanned aerial and an unmanned ground vehicle is studied theoretically and experimentally.

Each player acts independently trying to satisfy its own objective function. Specifically the UAV is trying to reduce the relative distance and orientation in order to capture the mobile robot, while the other is trying to increase it in order to avoid the capture.

In order this to be achieved every robot should have good knowledge (estimation) of its variable states, namely its position, velocity and orientation through sensor fusion. Also, through visual servoing with an onboard camera on the moving UAV, the relative position between the robots becomes known.

Therefore the purpose of this work is to design the independent inputs of the two players based on the above in order to conduct a study of the game in real robotic platforms.

For this cause a non-linear model predictive control with fix horizon is designed to calculate in real time the optimal trajectory of each player, taking into account the model dynamics. The robotic platforms that were used for the experimental study are the UAV hexacopter Asctec Firefly and the mobile robot Pioneer 2.

Testing different scenarios in theoretic simulations various conclusions are made for the strategy that each agent should follow in a game of two "rational" players where one player is fast and the other is slower but more maneuverable.

Finally through the experiment we show the capabilities of the unmanned aerial vehicles to follow trajectories and objects that are unpredictable and the knowledge of the upcoming movement is limited, and not exclusively for competitive games.

Keywords

Unmanned aerial vehicles, Game Theory, differential game, Model predictive control, Visual servoing, Robotics, Control Theory, System Identification

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	4
Abstract	6
1 Εισαγωγή	14
Εισαγωγή	14
1.1 Αντικείμενο και Συμβολή Εργασίας	16
1.2 Οργάνωση του τόμου	16
2 Ανάλυση Δυναμικών Μοντέλων	19
2.1 Μοντελοποίηση εξαπτερύγιου εναέριου οχήματος	19
2.2 Μοντελοποίηση επίγειου οχήματος	24
3 Αναγνώριση Πλήρους Δυναμικού Μοντέλου	28
3.1 Ρομποτικές Πειραματικές Διατάξεις	28
3.1.1 Εναέριο Όχημα	28
3.1.2 Επίγειο Όχημα	29
3.1.3 Κάμερα	30
3.2 Μέθοδοι Αναγνώρισης Άγνωστων Παραμέτρων	32
3.2.1 Μάζα και Ροπές Αδράνειας	32
3.2.2 Αναγνώριση Παραμέτρων Αεροδυναμικών Αντιστάσεων και Κερδών Εσωτερικού Ελεγκτή	33
3.2.2.1 Θεωρία Αναγνώρισης Συστήματος	33
3.2.2.2 Εφαρμογή της Αναγνώρισης Συστήματος	34
3.2.2.3 Αποτελέσματα Αναγνώρισης Εναέριου Οχήματος	35
4 Θεωρία Παιγνίων και Βέλτιστος Έλεγχος	40
4.1 Εισαγωγή και Γενικές Έννοιες	40
4.1.1 Διατύπωση και Κατηγοριοποίηση του Παιγνίου	43
4.2 Σχεδιασμός Σχήματος Ελέγχου	45
4.2.1 Προβλεπτικός Έλεγχος	45
4.2.2 Βέλτιστος Έλεγχος στην Θεωρία Παιγνίων	45
4.2.2.1 Μεθοδολογία Βέλτιστου Ελέγχου	47

4.2.2.2	Μεθοδολογία Επαναλαμβανόμενου Προβλεπτικού Ελεγχτή	47
5	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	51
5.1	Περιβάλλον Παιγνίου	51
5.2	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	53
5.2.1	Ισορροπία Παιγνίου	55
5.2.2	Μανούβρες/Τεχνικές Καταδίωξης – Αποφυγής	59
6	Πειραματικά Δεδομένα	64
6.1	Περιγραφή Πειραμάτων	64
6.2	Συνένωση Αισθητήρων για Εκτίμηση Κατάστασης	64
6.2.1	Εφαρμογή του Φίλτρου	66
6.3	Αποτελέσματα	68
6.4	Βελτιώσεις Πειραμάτων	68
7	Επίλογος	73
7.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα	73
7.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	73
	Βιβλιογραφία	75

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Τα αρχικά δύο πλαίσια αναφοράς και η μεταξύ τους σχέση	20
2.2	Η γεωμετρία των ελίκων του εξαπτερύγιου εναέριου οχήματος και η φορά περιστροφής τους	23
2.3	Τα συνολικό σύστημα και τα πλαίσια αναφοράς τους	25
2.4	Κινηματική του επίγειου ρομπότ και τα πλαίσια αναφοράς στο επίπεδο κίνησης	26
3.1	Το Firefly της Asctec	29
3.2	Το Pioneer 2DX	30
3.3	Η τοποθέτηση καμερών στο Firefly	30
3.4	Η κάμερα mvBlueFOX	31
3.5	Διαφορετικοί τρόποι πρόσδεσης αντικειμένου για υπολογισμό της ροπής αδρανείας του. Σχήμα Α: I_{zz} Σχήμα Β: I_{xx} Σχήμα Γ: I_{yy}	33
3.6	Σχέση εισόδων-εξόδων σε πειραματική πτήση	35
3.7	Βήματα επαναληπτικής διαδικασίας εύρεσης των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου	36
3.8	Το σφάλμα πρόβλεψης των μεταβλητών κατάστασης	37
3.9	Σύγκριση θεωρητικών μεταβλητών κατάστασης με πειραματικά δεδομένα και ποσοστά fitting	38
4.1	Οι τιμές των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων των οχημάτων όπως υπολογίστηκαν κατά την διάρκεια ενός παιγνίου και το άθροισμά τους.	44
4.2	Σχηματική αναπαράσταση πραγματικού παιγνίου PEG	48
5.1	Το περιβάλλον προσομοίωσης του παιγνίου με χρήση Gazebo	52
5.2	Αναπαράσταση του υπολογιστικού γράφου του ROS	53
5.3	Το διάγραμμα κατάστασης των σχετικών θέσεων και προσανατολισμού \mathbf{x}_e και οι τελικές επιθυμητές κατά την διάρκεια μιας προσομοίωση παιγνίου όπου επικρατεί το εναέριο όχημα (Παίγνιο III).	55
5.4	Το διάγραμμα κατάστασης των σχετικών θέσεων και προσανατολισμού \mathbf{x}_e και οι τελικές επιθυμητές κατά την διάρκεια μιας προσομοίωση παιγνίου όπου επικρατεί το επίγειο όχημα (Παίγνιο I-II).	55
5.5	Απεικόνιση των τροχιών των δύο οχημάτων στο επίπεδο XY μιας προσομοίωσης παιγνίου όπου επικρατεί το εναέριο όχημα (Παίγνιο III).	56
5.6	Απεικόνιση των τροχιών των δύο οχημάτων στο επίπεδο XY μιας προσομοίωσης παιγνίου όπου επικρατεί το επίγειο όχημα (Παίγνιο I-II).	57

5.7	Η τιμή της πραγματικής νόρμας \mathcal{D} κατά την διάρκεια δύο παιγνίων με διαφορετικό αποτέλεσμα.	58
5.8	Γραφική αναπαράσταση του σχετικού διανύσματος κατάστασης \mathbf{x}_e και των προβλεπόμενων τελικών καταστάσεων του MPC του εναέριου οχήματος με γνώση της αντίπαλης στρατηγικής.	58
5.9	Γραφική αναπαράσταση του σχετικού διανύσματος κατάστασης \mathbf{x}_e και των προβλεπόμενων τελικών καταστάσεων του MPC του εναέριου οχήματος χωρίς γνώση της αντίπαλης στρατηγικής.	58
5.10	Γραφική αναπαράσταση του σχετικού διανύσματος κατάστασης \mathbf{x}_e και των προβλεπόμενων τελικών καταστάσεων του MPC του επίγειου οχήματος με γνώση της αντίπαλης στρατηγικής και τεχνικές αποφυγής του οπτικού πεδίου.	59
5.11	Γραφική αναπαράσταση του σχετικού διανύσματος κατάστασης \mathbf{x}_e και των προβλεπόμενων τελικών καταστάσεων του MPC του επίγειου οχήματος χωρίς γνώση της αντίπαλης στρατηγικής.	59
5.12	Η τιμή της πραγματικής νόρμας \mathcal{D} και της προβλεπόμενης νόρμας του ελεγκτή του εναέριου κατά την διάρκεια ενός παιγνίου (τύπου I-II). . .	60
5.13	Η τιμή της πραγματικής νόρμας \mathcal{D} και της προβλεπόμενης νόρμας του ελεγκτή του εναέριου κατά την διάρκεια ενός παιγνίου (τύπου III). . .	61
5.14	Η τιμή της πραγματικής νόρμας \mathcal{D} , της προβλεπόμενης νόρμας του ελεγκτή του εναέριου και του σχετικού προσανατολισμού yaw (rad) κατά την διάρκεια ενός παιγνίου (τύπου IV).	62
5.15	Γραφική αναπαράσταση της τεχνικής μανούβρας lag pursuit.	62
5.16	Γραφική αναπαράσταση της κατάστασης flat scissors.	62
6.1	Εικόνα από τα προκαταρκτικά πειράματα του ελεγκτή εναέριου οχήματος	65
6.2	Εικόνα από τα προκαταρκτικά πειράματα του ελεγκτή επίγειου οχήματος	66
6.3	Ο στόχος ArUco τοποθετημένος στο επίγειο όχημα	67
6.4	Οι εκτιμώμενες σχετικές θέσης κατά την διάρκεια του παιγνίου και οι επιθυμητές.	69
6.5	Οι εκτιμώμενοι σχετικοί προσανατολισμοί κατά την διάρκεια του παιγνίου και το επιθυμητό yaw.	70
6.6	Είσοδοι εναέριου οχήματος.	71

Κατάλογος Πινάκων

3.1	Μέγιστη γραμμική και γωνιακή ταχύτητα επίγειου ρομπότ	29
3.2	Πειραματικά δεδομένα για υπολογισμό των ροπών αδρανείας	32
3.3	Προσεγγιστικές τιμές ροπών αδρανείας	33
3.4	Κέρδη Εσωτερικού Ελεγκτή Εναέριου Οχήματος	36
3.5	Σταθερές Αεροδυναμικής Αντίστασης	36
5.1	Αναλυτικά Αποτελέσματα	53

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η θεωρία Παιγνίων αποτέλεσε και συνεχίζει να αποτελεί αντικείμενο συχνής μελέτης. Ξεκίνησε και αναπτύχθηκε στα οικονομικά ως προσπάθεια των επιστημόνων να κατανοήσουν οικονομικές συμπεριφορές και αποφάσεις των εταιριών, των καταναλωτών και της αγοράς. Στην συνέχεια επεκτάθηκε και στις κοινωνικές επιστήμες βρίσκοντας εφαρμογή στην κατανόηση των κοινωνικών, πολιτικών και ψυχολογικών συμπεριφορών. Με βάση επίσης την θεωρία των Παιγνίων έχουν μελετηθεί και οι συμπεριφορές των ζώων με πρώτο τον Ronald Fisher όπως επίσης έχει χρησιμοποιηθεί και για φιλοσοφικούς σκοπούς. Η επιστήμη των υπολογιστών έχει βοηθήσει ιδιαίτερα στην ανάπτυξη της ΘΠ αφού δίνει την δυνατότητα μελέτης πολύπλοκων υπολογιστικών προβλημάτων, αλλά και η ίδια η ΘΠ βρίσκει εφαρμογή στην επιστήμη των υπολογιστών και στην ρομποτική τα τελευταία χρόνια. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι μέσω της ΘΠ μπορεί κάποιος τόσο να περιγράψει, όσο και να εξηγήσει αλλά και να προβλέψει συμπεριφορές. Στην ουσία όμως αποτελεί την μελέτη της στρατηγικής με βάση την οποία θα πρέπει να παρθούν αποφάσεις σε καταστάσεις αλληλεξάρτησης από κάποιο παίχτη ώστε το αποτέλεσμα του παιγνίου να είναι ικανοποιητό για τον ίδιο. Εξετάζει τα μαθηματικά μοντέλα της σύγκρουσης και της συνεργασίας μεταξύ παιχτών που θεωρούνται «ευφυείς» και «λογικοί». Το πρώτο διότι έχουν πλήρη γνώση του παιγνίου και το δεύτερο διότι στόχος του είναι η μεγιστοποίηση του ατομικού τους οφέλους. Το παραπάνω γεγονός καθιστά την θεωρία παιγνίων πολύ ενδιαφέρουσα για έρευνα σε τομείς όπως είναι οι οικονομικές και πολιτικές επιστήμες, η βιολογία και η επιστήμη των υπολογιστών διότι δίνει απαντήσεις στην στρατηγική και τις κινήσεις που πρέπει να ακολουθήσουν είτε οι άνθρωποι, είτε οι εταιρίες, ή οι οργανώσεις ώστε να πετύχουν όσο το δυνατόν το μεγαλύτερο μέρος των στόχων τους. Τα παίγνια κατηγοριοποιούνται σε διάφορους τύπους ανάλογα με τα διάφορα χαρακτηριστικά που υπηρετούν. Μία ειδική κατηγορία παιγνίου είναι το λεγόμενο pursuit and evasion game , στο οποίο ο «διώκτης» (pursuer), ένας ή ομάδα προσπαθεί να πλησιάσει τον άλλον έναν ή περισσότερους παίχτες και ο «φυγάς» (evader), ή ομάδα προσπαθεί να αποφύγει αυτό το συμβάν. Παρόλο που η ιδέα αναπτύχθηκε από την παρατήρηση της συμπεριφοράς των ζώων, του θύτη και του θηράματος, και μελετήθηκε κυρίως για στρατιωτικές εφαρμογές, π.χ κατευθυνόμενος πύραυλος να ακολουθεί αεροσκάφος, μπορεί να βρει εκτεταμένη εφαρμογή σε διάφορες περιπτώσεις πέραν των στρατιωτικών, όπως είναι η αναζήτηση εισβολέων σε κτίρια, ο έλεγχος κυκλοφορίας και χειρουργικές επεμβάσεις. Άλλη περίπτωση παιγνίου που κατατάσσεται στην παραπάνω κατηγορία είναι το πρό-

βλημα της «πινακοθήκης» (the art gallery problem), όπου πρέπει να βρεθεί ο ελάχιστος αριθμός ατόμων που πρέπει να φρουρούν με ασφάλεια τους πίνακες του μουσείου. Η ανάπτυξη της ρομποτικής και των υπολογιστών δίνει την δυνατότητα αλγόριθμοι και προσομοιώσεις παιγνίων που για χρόνια έχουν μελετηθεί θεωρητικά να εξεταστούν σε πραγματικές πλατφόρμες σε πειράματα πραγματικού χρόνου. Η εξέλιξη ρομποτικών πλατφόρμων όπως είναι τα μη-επανδρωμένα εναέρια οχήματα και τα αντίστοιχα επίγεια ρομπότ, όπως επίσης και το γεγονός ότι οι υπολογιστές μπορούν να λύνουν πολύπλοκα υπολογιστικά προβλήματα σε ελάχιστο χρόνο μας δίνουν την δυνατότητα να λύνουμε σε πραγματικό χρόνο σύνθετα προβλήματα βέλτιστου ελέγχου με περιορισμούς όπως αυτά που απαιτούνται για την εφαρμογή παιγνίων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί ότι οι μελέτες που έχουν γίνει μπορούν να βρουν εφαρμογή σε πραγματικά μοντέλα. Τέτοια μοντέλα όπως είναι τα UAV βρίσκουν μεγάλη άνθηση στην σύγχρονη κοινωνία. Συνήθως αναλαμβάνουν «αποστολές» που θεωρούνται είτε ανιαρές είτε επικίνδυνες για να τις πραγματοποιήσουν επανδρωμένα αεροσκάφη. Παρόλο που η πλειοψηφία θεωρεί ότι χρησιμοποιούνται μόνο για στρατιωτικές εφαρμοφές, τα UAVs βρίσκουν πληθώρα εναλλακτικών εφαρμογών, όπως είναι :

- ◇ εναέρια παρακολούθηση καλλιεργιών
- ◇ ακροβατικά εναέρια πλάνα για δημοσιογραφικούς, καλλιτεχνικούς σκοπούς ή παραγωγή ταινιών
- ◇ σε επιχειρήσεις που αφορούν αναζήτηση και διάσωση
- ◇ επιθεώρηση αγωγών ηλεκτρικού ρεύματος και αγωγών πετρελαίου
- ◇ μελέτη άγριας πανίδας
- ◇ εντοπισμός φωτιάς σε δασική έκταση μέσω εντοπισμού πλούμιου(στήλη καπνού)
- ◇ εντοπισμός παράνομου κυνηγιού
- ◇ καθοδήγηση ανθρωπιστικής βοήθειας
- ◇ παράδοση ιατρικών προμηθειών σε απομακρυσμένες ή δύσκολα προσβάσιμες περιοχές και πολλά άλλα ...

Γίνεται αντιληπτό επομένως ότι η ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών και η χρησιμότητά τους στην σύγχρονη κοινωνία καθιστούν απαραίτητη την μελέτη αυτών και η ΘΠ είναι ένας τομέας πολύ σημαντικός και μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη ελεγχτών σε πραγματικές εφαρμογές όπως οι παραπάνω, όπου το περιβάλλον στο οποίο υπάρχουν τα ρομπότ είναι απρόβλεπτο και έτσι πρέπει να έχει την δυνατότητα να προσαρμόζεται συνεχώς στο περιβάλλον αυτό.

1.1 Αντικείμενο και Συμβολή Εργασίας

Η διπλωματική αυτή εργασία εντάσσεται στο γενικότερο πλαίσιο του Αυτόματου Ελέγχου Συστημάτων. Σχεδιάστηκαν συγκεκριμένα δύο παραπλήσιοι μη γραμμικοί ελεγκτές, αντίστοιχα για κάθε ένα ρομπότ. Η ανατροφοδότηση του ελεγκτή γίνεται μέσω κάμερας που είναι τοποθετημένη πάνω στο εναέριο ρομπότ και όχι στατική στο χώρο.

Επίσης έγινε αναγνώριση άγνωστων παραμέτρων, αεροδυναμικών και του εσωτερικού ελεγκτή, του συστήματος του εναέριου ρομπότ, ώστε να μπορέσει να περιληφθεί το πλήρες δυναμικό του μοντέλο στο παίγνιο. Οι δύο ελεγκτές σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να είναι και ανεξάρτητοι αλλά και να διατηρούν κάποια απαραίτητα χαρακτηριστικά ώστε να εφαρμοστεί ένα συνεχές διαφορικό ανταγωνιστικό παίγνιο μεταξύ των δύο παικτών.

Οι ελεγκτές του βέλτιστου ελέγχου που σχεδιάστηκαν είναι γρήγοροι, τόσο όσο είναι απαραίτητο για να εφαρμοσθούν σε πραγματική πειραματική εφαρμογή και ευπροσάρμοστοι στις απρόβλεπτες αλλαγές των επιθυμητών τους τελικών καταστάσεων και αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι η επιθυμητή κατάσταση του είναι στην ουσία ένας κινούμενος στόχος.

Αποτελεί επίσης έναν πειραματικό οδηγό για τους βέλτιστους ελιγμούς (μανούβρες) που πρέπει να κάνει ένας παίκτης σε περίπτωση «καταδίωξης» και συγκρίνεται με κινήσεις που εκτελούν πραγματικοί άνθρωποι/πιλότοι σε αντίστοιχα σενάρια.

Τέλος γίνεται μελέτη του συγκεκριμένου παιγνίου για την ανάδειξη κάποιου σημείου ισοροπίας σε θεωρητικό επίπεδο και για το αν αυτό μπορεί να επιτευχθεί στην πράξη.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Η εργασία αυτή είναι οργανωμένη σε επτά κεφάλαια:

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η ανάλυση των μαθηματικών δυναμικών μοντέλων του εναέριου και του επίγειου ρομπότ.

Κεφάλαιο 3: Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στις πειραματικές πλατφόρμες που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα και στα χαρακτηριστικά τους. Επίσης πραγματοποιείται αναγνώριση αγνώστων παραμέτρων του συστήματος του εναέριου οχήματος ώστε να περιγραφεί πλήρως το δυναμικό του μοντέλο.

Κεφάλαιο 4: Γίνεται αναφορά και σύγκριση με αντίστοιχες εργασίες, μελετώνται θεωρητικές έννοιες της Θεωρίας Παιγνίων και στην συνέχεια εφαρμόζονται στην δική μας περίπτωση δημιουργώντας το συνεχές διαφορικό ανταγωνιστικό παίγνιο. Περιγράφεται το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου που πρέπει να λυθεί, γίνεται η μαθηματική ανάλυση του σχεδιασμού των μη-γραμμικών προβλεπτικών ελεγκτών για το κάθε ρομπότ αντίστοιχα εξετάζοντας τις συναρτήσεις κόστους και τους περιορισμούς του προβλήματος και τον τρόπο επίλυσής τους.

Κεφάλαιο 5: Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης του παραπάνω παιγνίου και εξάγονται διάφορα συμπεράσματα. Παρουσιάζονται επίσης γραφικά αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 6: Στο τελευταίο κεφάλαιο περιγράφεται η «διαμόρφωση» του πειράματος, αναλύεται η χρησιμοποίηση φίλτρων για την συνένωση αισθητήρων για την εκτίμηση κατάστασης και στην συνέχεια παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματά.

Κεφάλαιο 7: Στο τελευταίο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα και η συνεισφορά της εργασίας αυτής καθώς και μελλοντικές επεκτάσεις που μπορούν να γίνουν.

Κεφάλαιο 2

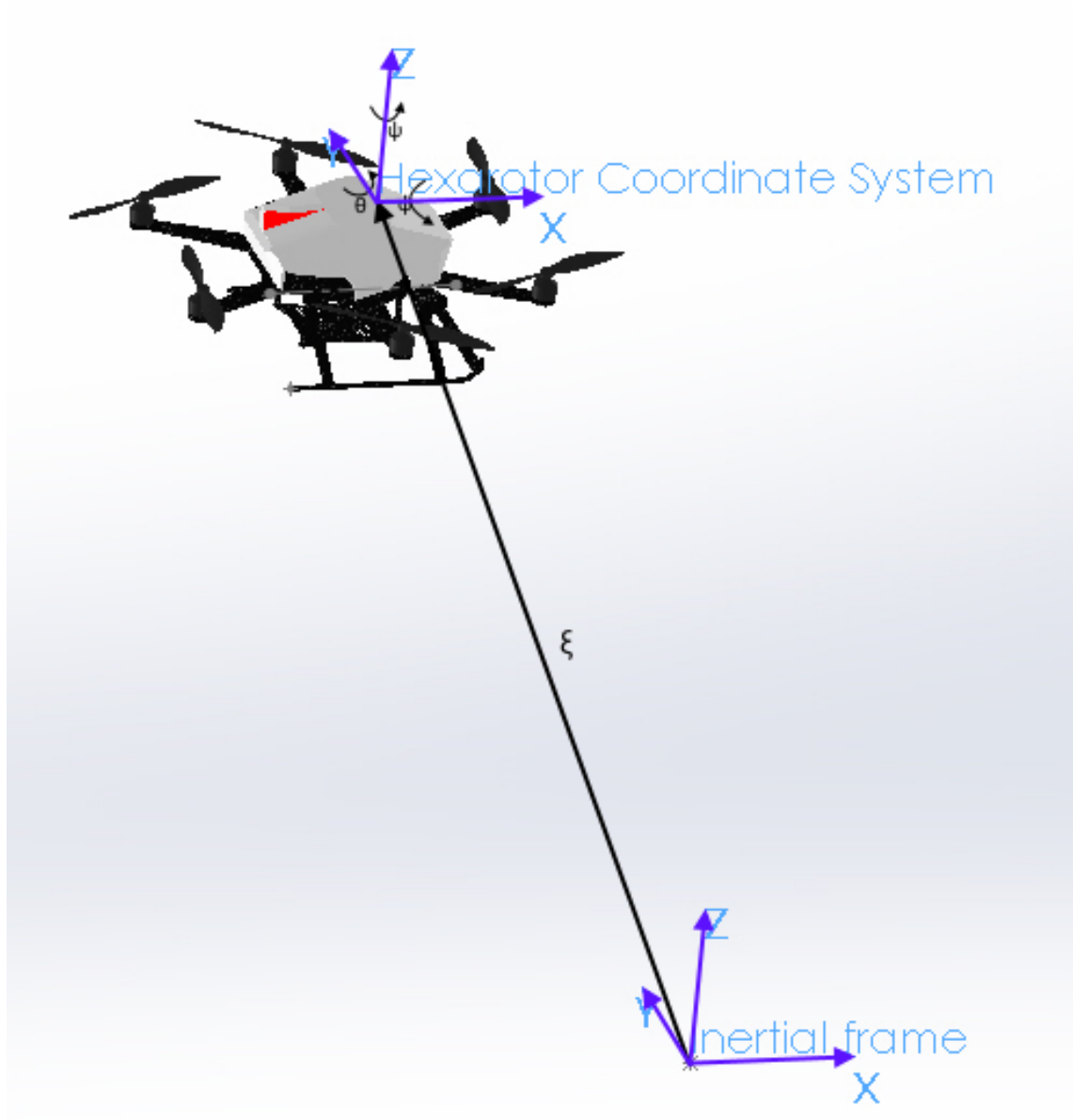
Μαθηματική Ανάλυση των Δυναμικών Μοντέλων

2.1 Μοντελοποίηση εξαπτερύγιου εναέριου οχήματος

Η μοντελοποίηση ξεκινά κάνοντας θεωρήσεις για τα πλαίσια αναφοράς. Έστω το χωρόδετο πλαίσιο αναφοράς $R_i = \{x_i, y_i, z_i\}$, το οποίο αρχικά θεωρούμε ότι είναι σταθερό στην επιφάνεια του εδάφους και το σωματόδετο πλαίσιο $R_b = \{x_b, y_b, z_b\}$ του εναέριου οχήματος με κέντρο στο κέντρο μάζας του οχήματος, όπου ο άξονας x δείχνει την εμπρός κατεύθυνση του οχήματος, ο άξονας y την αριστερή και ο z την πάνω. Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα.

Από το σχήμα γίνεται ξεκάθαρο ότι με το διάνυσμα $\xi = [x, y, z]^T$ μπορούμε να εκφράσουμε την **θέση** του κέντρου του συστήματος συντεταγμένων του οχήματος ως προς το αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς και τον πλήρη **προσανατολισμό** του με το διάνυσμα $\eta = [\phi, \theta, \psi]^T$. Ο συνολικός πίνακας περιστροφής R που ορίζει τον προσανατολισμό του σωματόδετου πλαισίου R_b ως προς το αδρανειακό R_i προκύπτει συναρτήσει των γωνιών Euler ZYX, και πιο συγκεκριμένα των Tait-Bryan γωνιών που χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στην αεροναυπηγική και με βάση αυτή την διατύπωση ισχύει ότι: $\phi \rightarrow roll$, $\theta \rightarrow pitch$, $\psi \rightarrow yaw$. Επομένως ο συνολικός πίνακας περιστροφής R προκύπτει με πολλαπλασιασμό των επιμέρους πινάκων $R(x, \phi)$, $R(y, \theta)$ και $R(z, \psi)$, όπου ο καθένας πίνακας περιστροφής με την σειρά του εκφράζει την περιστροφή του άξονα x, y, z του σωματόδετου ως προς την γωνία ϕ, θ, ψ αντίστοιχα. Επίσης αναφέρω ότι γίνεται χρήση των συντομογραφιών ca και sa , οι οποίες αναπαριστούν τις τριγωνομετρικές συναρτήσεις $\cos(a)$ και $\sin(a)$ της γωνίας a . Άρα :

$$\begin{aligned} R(\eta) &= R(x, \phi) \cdot R(y, \theta) \cdot R(z, \psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi c\theta & -s\theta \\ c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & c\theta s\phi \\ c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.1.1)$$



Σχήμα 2.1: Τα αρχικά δύο πλαίσια αναφοράς και η μεταξύ τους σχέση

Με βάση αυτών τον πίνακα περιστροφής ισχύει:

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = R(\eta) \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (2.1.2)$$

Ο πίνακας αυτός λέγεται και πίνακας συνημιτόνων κατεύθυνσης και μία ιδιαίτερη ιδιότητά του είναι η εξής : $R(\eta)^{-1} = R(\eta)^T$, δηλαδή ο αντίστροφος πίνακας ισούται με τον ανάστροφο αφού είναι ορθογωνικός, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο αφού αυτός ο αντίστροφος πίνακας χρησιμοποιείται για οποιαδήποτε μετατροπή από το σωματόδετο στο χωρόδετο πλαίσιο.

Το διάνυσμα της ταχύτητας του εναέριου οχήματος $V = [u \ v \ w]^T$ είναι εκφρασμένο στο σωματόδετο σύστημα συνεταταγμένων και είναι η παράγωγος του διανύσματος θέσης ξ ,

$$\xi = R(\eta)^T \cdot V \Leftrightarrow \dot{\xi} = V_{he}, \quad (2.1.3)$$

όπου V_{he} είναι η ταχύτητα εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα.

Στην συνέχεια, ο ρυθμός μεταβολής των γωνιών Euler ZYX $\dot{\eta} = [\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ συνδέεται με την γωνιακή ταχύτητα $\omega = [p \ q \ r]^T$ εκφρασμένη στο σωματόδετο, μέσω της σχέσης:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} &= R(x, \phi) \cdot R(y, \theta) \cdot R(z, \psi) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + R(x, \phi) \cdot R(y, \theta) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R(x, \phi) \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\phi & s\phi c\theta \\ 0 & -s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = E(\eta) \cdot \dot{\eta} \end{aligned} \quad (2.1.4)$$

Αφού εξετάσαμε την κινηματική του εναέριου οχήματος αναλύουμε και την δυναμική του. Για να γίνει αυτό πρέπει να γράψω τις εξισώσεις που προκύπτουν από την ανάλυση Newton-Euler.

$$m \cdot \dot{V}_{he} = R(\eta_h) \cdot (F_e + F_a) - m \cdot g \quad (2.1.5)$$

όπου $\eta_h = [\phi_h \ \theta_h \ \psi_h]^T$ είναι οι γωνίες Euler ZYX που ορίζουν τον προσανατολισμό του οχήματος ως προς το χωρόδετο σύστημα αναφοράς Ri και ο πίνακας $R(\eta_h)$ είναι ο πίνακας στροφής που ορίζει τον προσανατολισμό του οχήματος ως προς το χωρόδετο σύστημα αναφοράς Ri, F_e είναι η εξωτερική δύναμη που προκαλείται από την περιστροφή των ελίκων και στην περίπτωση του εξαπτερύγιου οχήματος είναι

$$F_e = \begin{bmatrix} f_{ex} \\ f_{ey} \\ f_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -k_t \cdot (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2 + \Omega_5^2 + \Omega_6^2) \end{bmatrix} \quad (2.1.6)$$

όπου το k_t είναι η σταθερά της έλικας και το Ω_i είναι η ταχύτητα περιστροφής της έλικας i και F_a είναι οι αεροδυναμικές δυνάμεις και ισούνται με:

$$F_a = \begin{bmatrix} f_{ax} \\ f_{ay} \\ f_{az} \end{bmatrix} = -diag(d_u, d_v, d_w) \cdot R(\eta) \cdot V_{he} \quad (2.1.7)$$

και d_u, d_v, d_w είναι σταθεροί θετικοί συντελεστές τριβής, και τέλος το $g = [0, 0, 9.81]^T$ το διάνυσμα επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Ομοίως από Newton-Euler προκύπτει και η δεύτερη εξίσωση της δυναμικής για τις ροπές.

$$J \cdot \dot{\omega}_{hb} = -\omega_{hb} \times (J \cdot \omega_{hb}) + M_e + M_a \quad (2.1.8)$$

Συγκεκριμένα στην παραπάνω εξίσωση κατά σειρά $J = diag(J_{xx}, J_{yy}, J_{zz})$ είναι το μητρώο των ροπών αδρανείας του οχήματος και τα διαγώνια στοιχεία συμβολίζουν τις

κύριες ροπές αδρανείας. Επιπλέον έχουν αμεληθεί οι όροι στροφορμής των ελίκων διότι οι ροπές αδρανείας των κινητήρων είναι μικρές σε σχέση με εκείνες του εναέριου οχήματος. Εν συνεχεία $\omega_{hb} = [p_{hb}, q_{hb}, r_{hb}]^T$ είναι η γωνιακή ταχύτητα του οχήματος εκφρασμένη στο σωματόδετο σύστημα αναφοράς. M_e είναι η συνολική εξωτερική ροπή που προκαλείται από την περιστροφή των ελίκων και ισούται με:

$$M_e = \begin{bmatrix} \mu_{ex} \\ \mu_{ey} \\ \mu_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{l}{2}k_t\Omega_1^2 - l\Omega_2^2 - \frac{l}{2}k_t\Omega_3^2 + \frac{l}{2}k_t\Omega_4^2 + l\Omega_5^2 + \frac{l}{2}k_t\Omega_6^2 \\ \frac{\sqrt{3}l}{2}k_t\Omega_1^2 - \frac{\sqrt{3}l}{2}k_t\Omega_3^2 \frac{\sqrt{3}l}{2}k_t\Omega_4^2 + \frac{\sqrt{3}l}{2}k_t\Omega_6^2 \\ -k_Q\Omega_1^2 + k_Q\Omega_2^2 - k_Q\Omega_3^2 + k_Q\Omega_4^2 - k_Q\Omega_5^2 + k_Q\Omega_6^2 \end{bmatrix} \quad (2.1.9)$$

όπου k_Q είναι σταθερά της προπέλας και l είναι το μήκος της προπέλας. M_a είναι οι αεροδυναμικές ροπές τριβής και ομοίως με τις δυνάμεις είναι

$$M_a = -diag(d_p, d_q, d_r) \cdot \omega_{hb}$$

και αντίστοιχα d_p, d_q, d_r είναι σταθεροί θετικοί συντελεστές τριβής.

Για χάριν πληρότητας αξίζει να αναφέρω ότι οι σχέσεις των εξωτερικών δυνάμεων και ροπών, 2.1.6 και 2.1.9 αντίστοιχα, προκύπτουν από το γεγονός ότι η συνολική δύναμη ανύψωσης ισούται με το άθροισμα της ώθησης (thrust) της κάθε έλικας και στην συνέχεια λόγω της γεωμετρίας (βλ. σχήμα) του εξαπτερύγιου οχήματος και αφού η ώθηση είναι ανάλογη του τετραγώνου της περιστροφικής ταχύτητας της έλικας προκύπτουν οι παραπάνω εξισώσεις.

$$F_{thrust} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 \quad (2.1.10)$$

όπου $T_i = k_t \cdot \Omega_i^2$.

Επομένως κάνοντας χρήση των εξισώσεων κινηματικής, 2.1.3 και 2.1.4, και των εξισώσεων δυναμικής Newton Euler, (2.1.5) και (2.1.8), προκύπτει το πλήρες μαθηματικό μοντέλο του εξαπτερύγιου εναέριου οχήματος [1]:

Κινηματικές εξισώσεις:

$$\frac{d}{dt}(\xi) = V_{he}, \quad (2.1.11\alpha')$$

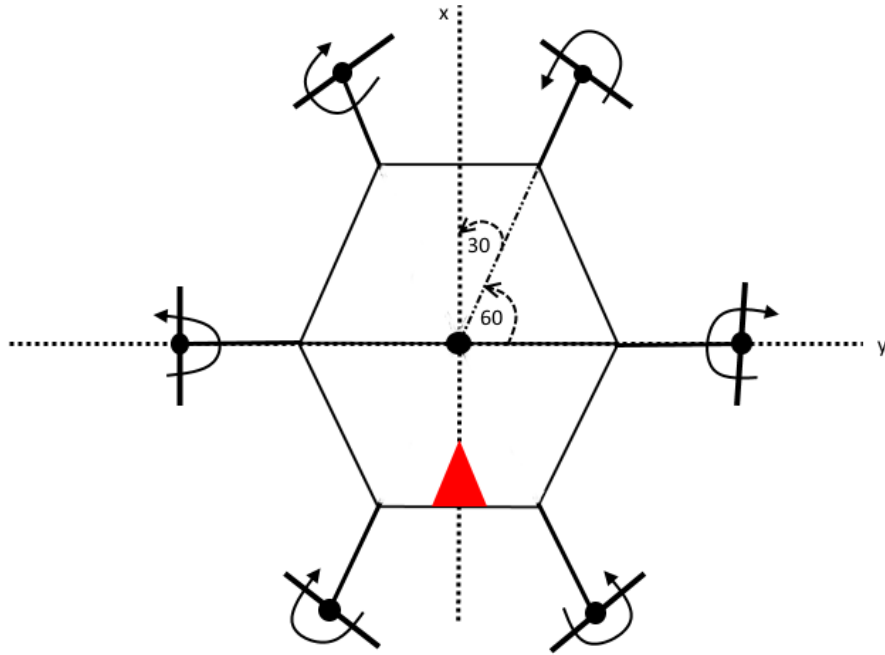
$$\frac{d}{dt}(\eta) = E(\eta)^{-1} \cdot \omega_{hb}, \quad (2.1.11\beta')$$

Δυναμικές εξισώσεις:

$$\frac{d}{dt}(V_{he}) = m^{-1} \cdot R(\eta_h) \cdot (F_e + F_a) - g, \quad (2.1.12\alpha')$$

$$\frac{d}{dt}(\omega_{hb}) = J^{-1} \cdot (-\omega_{hb} \times (J \cdot \omega_{hb}) + M_e + M_a) \quad (2.1.12\beta')$$

Αντικαθιστώντας στις 4 παραπάνω εξισώσεις τα γνωστά μεγέθη έχουμε αναλυτι-



Σχήμα 2.2: Η γεωμετρία των ελίκων του εξαπτερύγιου εναέριου οχήματος και η φορά περιστροφής τους

κότερα:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \\ \dot{x}_h \\ \dot{y}_h \\ \dot{z}_h \\ \phi_h \\ \theta_h \\ \psi_h \\ p_h \\ q_h \\ r_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_h \\ \dot{y}_h \\ \dot{z}_h \\ (c\psi_h \cdot s\theta_h \cdot c\phi_h + s\psi_h \cdot s\phi_h) \cdot \frac{f_{ez}}{m} + \frac{f_{ax}}{m} \\ (s\psi_h \cdot s\theta_h \cdot c\phi_h - c\psi_h \cdot s\phi_h) \cdot \frac{f_{ez}}{m} + \frac{f_{ay}}{m} \\ (c\theta_h \cdot c\phi_h) \cdot \frac{f_{ez}}{m} - g + \frac{f_{az}}{m} \\ p_h + s\phi_h \cdot \frac{s\theta_h}{c\theta_h} \cdot q_h + c\phi_h \cdot \frac{s\theta_h}{c\theta_h} \cdot r_h \\ c\phi_h \cdot q_h - s\phi_h \cdot r_h \\ \frac{s\phi_h}{c\theta_h} \cdot q_h + \frac{c\phi_h}{c\theta_h} \cdot r_h \\ \frac{J_{yy} - J_{zz}}{J_{xx}} \cdot q_h \cdot r_h + \frac{\mu_{ex}}{J_{xx}} + \frac{\mu_{ax}}{J_{xx}} \\ \frac{J_{zz} - J_{xx}}{J_{yy}} \cdot p_h \cdot r_h + \frac{\mu_{ey}}{J_{yy}} + \frac{\mu_{ay}}{J_{yy}} \\ \frac{J_{xx} - J_{yy}}{J_{zz}} \cdot p_h \cdot q_h + \frac{\mu_{ez}}{J_{zz}} + \frac{\mu_{az}}{J_{zz}} \end{bmatrix} \quad (2.1.13)$$

Σύμφωνα με την εργασία [2] τα εναέρια οχήματα διαθέτουν ένα ενσωματωμένο εσωτερικό ελεγκτή (Low Level Processor) ο οποίος είναι διαδομένο στις περισσότερες περιπτώσεις να είναι PID ελεγκτής. Έχει την μορφή:

Μορφή εσωτερικού Ελεγκτή:

$$f_{ez} = K_z \cdot thrust, \quad (2.1.14\alpha')$$

$$\mu_{ex} = J_{xx} \cdot (K_\phi \cdot (\phi_{des} - \phi_h) - K_p \cdot p_h) - (J_{yy} - J_{zz}) \cdot q_h \cdot r_h, \quad (2.1.14\beta')$$

$$\mu_{ey} = J_{yy} \cdot (K_\theta \cdot (\theta_{des} - \theta_h) - K_q \cdot q_h) - (J_{zz} - J_{xx}) \cdot p_h \cdot r_h, \quad (2.1.14\gamma')$$

$$\mu_{ez} = J_{zz} \cdot K_r \cdot (r_{des} - r_h) - (J_{xx} - J_{yy}) \cdot p_h \cdot q_h \quad (2.1.14\delta')$$

Στις παραπάνω εξισώσεις 2.1.14 $u_h = [thrust, \phi_{des}, \theta_{des}, \psi_{des}]^T$ είναι το διάνυσμα εισόδων του εναέριου οχήματος. Η μεταβλητή $thrust \subseteq [0, 1]$ και τα $K_z, K_\phi, K_p, K_\theta, K_q, K_r$ είναι άγνωστα κέρδη του εσωτερικού ελεγκτή. Τέλος αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 2.1.14 στις εξισώσεις του πλήρες μοντέλου 2.1.13 προκύπτει το τελικό μοντέλο μορφής $\dot{\bar{x}} = \dot{f}(\bar{x}_h, u_h, t)$ που χρησιμοποιήθηκε και στο οποίο χάριν του εσωτερικού ελεγκτή απαλείφονται οι όροι ροπών αδρανείας.

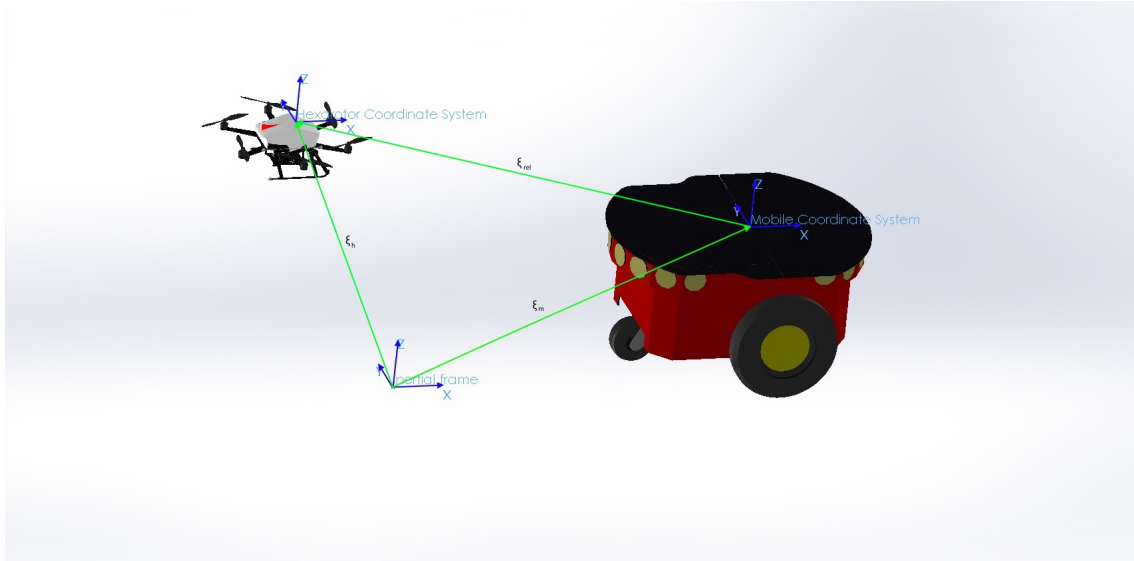
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \\ \dot{x}_h \\ \dot{y}_h \\ \dot{z}_h \\ \phi_h \\ \theta_h \\ \psi_h \\ p_h \\ q_h \\ r_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_h \\ \dot{y}_h \\ \dot{z}_h \\ (c\psi_h \cdot s\theta_h \cdot c\phi_h + s\psi_h \cdot s\phi_h) \cdot \frac{f_z}{m} + \frac{f_{ax}}{m} \\ (s\psi_h \cdot s\theta_h \cdot c\phi_h - c\psi_h \cdot s\phi_h) \cdot \frac{f_z}{m} + \frac{f_{ay}}{m} \\ (c\theta_h \cdot c\phi_h) \cdot \frac{f_z}{m} - g + \frac{f_{az}}{m} \\ p_h + s\phi_h \cdot \frac{s\theta_h}{c\theta_h} \cdot q_h + c\phi_h \cdot \frac{s\theta_h}{c\theta_h} \cdot r_h \\ c\phi_h \cdot q_h - s\phi_h \cdot r_h \\ \frac{s\phi_h}{c\theta_h} \cdot q_h + \frac{c\phi_h}{c\theta_h} \cdot r_h \\ K_\phi \cdot (\phi_{des} - \phi_h) - K_p \cdot p_h \\ K_\theta \cdot (\theta_{des} - \theta_h) - K_q \cdot q_h \\ K_r \cdot (r_{des} - r_h) \end{bmatrix} \quad (2.1.15)$$

Οι όροι της επίδρασης της αεροδυναμικής αντίστασης f_{ax}, f_{ay}, f_{az} στις γραμμικές ταχύτητες υπολογίζονται από την σχέση 2.1.7, ενώ οι όροι της αεροδυναμικής αντίστασης στις γωνιακές ταχύτητες $\mu_{ax}, \mu_{ay}, \mu_{az}$ είναι δυνατόν να αμεληθούν στις διαφορικές εξισώσεις του μοντέλου λόγω της μικρής επίδρασης που έχουν. Τέλος οι άγνωστοι παράμετροι θα υπολογιστούν πειραματικά στο επόμενο κεφάλαιο.

2.2 Μοντελοποίηση επίγειου οχήματος

Στο σημείο αυτό θα γίνει μαθηματική ανάλυση ενός επίγειου δίτροχου οχήματος με έναν βοηθητικό τροχό (castor wheel). Θα αρχεστούμε στην κινηματική ανάλυση και όχι σε ανάλυση δυνάμεων, πρώτον διότι το επίγειο ρομπότ είναι πιο αργό σε αποκρίσεις σε σχέση με το εναέριο οπότε και το κινηματικό μοντέλο κρίνεται επαρκές και δεύτερον για να κρατήσουμε το συνολικό αριθμό εξισώσεων των δύο μοντέλων (εναέριο και επίγειο) σε όσον το δυνατόν μικρότερο αριθμό.

Ομοίως με το κεφάλαιο 2.1 ορίζω το σωματόδετο σύστημα αναφοράς του επίγειου ρομπότ R_m το οποίο είναι τοποθετημένο στο κέντρο μάζας του ρομπότ και επίσης $\xi_m = [x_m, y_m, z_m]^T$ είναι η θέση του επίγειου οχήματος εκφρασμένη ως προς το χωρόδετο πλαίσιο αναφοράς R_i και $\omega_{mb} = [p_m, q_m, r_m]^T$ είναι η γωνιακή ταχύτητα του οχήματος



Σχήμα 2.3: Τα συνολικό σύστημα και τα πλαίσια αναφοράς τους

εκφρασμένη στο R_m και $\eta_m = [\phi_m, \theta_m, \psi_m]^T$ οι γωνίες Euler ZYX. Κάνω επίσης την θεώρηση ότι το επίγειο όχημα κινείται σε επίπεδη επιφάνεια, κάτι που καθιστά τις γωνίες $\phi, \theta = 0$, απλοποιώντας έτσι το κινηματικό μοντέλο.

Ο τρόπος με τον οποίο κινείται το επίγειο ρομπότ είναι με διαφορική οδήγηση. Διαθέτει δηλαδή δύο τροχούς σε κοινό άξονα οι οποίοι ελέγχονται από διαφορετικό κινητήρα. Η κίνηση του επίγειου ρομπότ πρέπει πάντα να υπακούει στο νόμο του Ackermann διατηρώντας έτσι την μη-ολονομικότητα (non-holonomic) του οχήματος [3] [4]. Επομένως με βάση τον νόμο αυτό και ελέγχοντας τις ταχύτητες των τροχών u_l, u_r μπορώ να καθορίσω και την κίνηση του οχήματος. Ανάλογα με την κίνηση των δύο τροχών το όχημα πρέπει να εκτελέσει περιστροφική κίνηση και το σημείο περιστροφής να βρίσκεται σε ένα σημείο του κοινού άξονα των τροχών. Αλλάζοντας την σχετική ταχύτητα των τροχών το σημείο περιστροφής κυλίνεται πάνω στον κοινό άξονα. Έχοντας τις σταθερές R, l που αντιστοιχούν πρώτον στην απόσταση του σημείου περιστροφής του κοινού άξονα με το εσωτερικό σημείο των δύο τροχών και δεύτερον στην απόσταση των κέντρων των δύο τροχών και επιπλέον παραπάνω έχει οριστεί ως ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$u_r = \omega (R + l/2), \quad (2.2.1\alpha')$$

$$u_l = \omega (R - l/2), \quad (2.2.1\beta')$$

Επιλύοντας ως προς ω και R έχουμε ως αποτέλεσμα:

$$R = \frac{l \cdot (u_l + u_r)}{2 \cdot (u_r - u_l)}, \quad \omega = \frac{u_r - u_l}{l} \quad (2.2.2)$$

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν εδώ ορισμένες ειδικές περιπτώσεις όπως είναι:

- $u_l = u_r$, τότε η ακτίνα R είναι ίση με άπειρο και το όχημα κινείται σε ευθεία γραμμή.
- $u_l = -u_r$, τότε η ακτίνα είναι μηδενική και το ρομπότ περιστρέφεται περί το κεντρικό εσωτερικό σημείο των δύο τροχών.

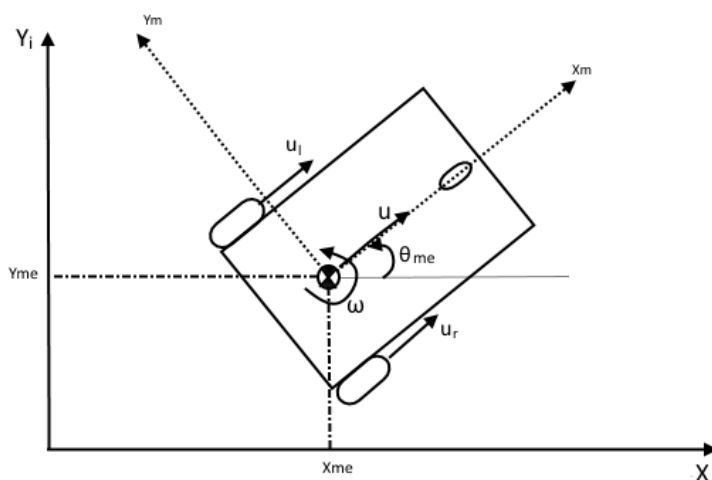
Αυτό καθιστά τον τρόπο διαφορικής οδήγησης ελκυστικό για πλοήγηση σε εσωτερικό χώρο.

Επίσης ισχύει η σχέση που συνδέει την γραμμική με την γωνιακή ταχύτητα του ρομπότ:

$$u_m = \omega \cdot R = \frac{1}{2} \cdot (u_l + u_r) \tag{2.2.3}$$

Με βάση λοιπόν τις παραπάνω εξισώσεις και το σχήμα 2.4 προκύπτει η κινηματική του επίγειου ρομπότ εκφρασμένη στο χωρόδετο σύστημα για κίνηση σε επίπεδη επιφάνεια:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_m^e \\ y_m^e \\ \theta_m^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot u_{des} \\ \sin \theta \cdot u_{des} \\ \omega_{des} \end{bmatrix} \tag{2.2.4}$$



Σχήμα 2.4: Κινηματική του επίγειου ρομπότ και τα πλαίσια αναφοράς στο επίπεδο κίνησης

Κεφάλαιο 3

Αναγνώριση Άγνωστων Παραμέτρων του Συστήματος Δυναμικού Μοντέλου Εναέριου Οχήματος

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 το δυναμικό μοντέλο (βλ. 2.1.15) περιλαμβάνει ορισμένες άγνωστες παραμέτρους, οι οποίες όμως είναι απαραίτητο να βρεθούν ώστε να γίνει χρήση του μοντέλου. Οι παράμετροι αυτοί εξαρτώνται από τον τύπο της πλατφόρμας και η εύρεση και αναγνώριση των παραμέτρων αυτών γίνεται μέσω πειραματικών μεθόδων. Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με μία από αυτές τις μεθόδους και θα την εφαρμόσουμε για την δική μας περίπτωση.

3.1 Ρομποτικές Πειραματικές Διατάξεις

3.1.1 Εναέριο Όχημα

Στα πειράματα που έγιναν το εναέριο όχημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το εξαπτερόγιο όχημα Firefly της εταιρίας Asctec που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Έχει ενσωματωμένο υπολογιστή με επεξεργαστή Intel Core i7 κάτι που επιτρέπει την αυτονομία του στην εκτέλεση εντολών και υπολογισμών.

Διαθέτει έξι ανεξάρτητους κινητήρες των 100W και η μέγιστη ώθησή(thrust) του είναι 36N με χρόνο διάρκειας πτήσης περίπου στα 15 min και μέγιστη ταχύτητα πτήσης $17\frac{m}{s}$. Η συνολική του μάζα κατά της διάρκεια πτήσης μαζί με την μπαταρία του(LiPo) είναι: $m = 1.718kg$

Διαθέτει επίσης μία αδρανειακή μονάδα μέτρησης (IMU) η οποία συμπεριλαμβάνει, γυροσκόπιο για την μέτρηση των γωνιών, επιταχυνσιόμετρο για την μέτρηση της επιτάχυνσης σε κάθε άξονα και βαρόμετρο(αισθητήρας πίεσης) για μέτρηση του ύψους πτήσης. Η συχνότητα ανανέωσης των μετρήσεων μπορεί να φτάσει μέχρι 1 KHz. Επιπλέον υπάρχει GPS και μαγνητόμετρο ως πρόσθετοι αισθητήρες. Όλους τους παραπάνω αισθητήρες τους χειρίζεται ο ενσωματωμένος υπολογιστής χαμηλού επιπέδου και εξάγει τις μετρήσεις των αισθητήρων ώστε στην συνέχεια να τα χρησιμοποιήσουμε

για εκτίμηση της θέσης του οχήματος.



Σχήμα 3.1: Το Firefly της Asctec

3.1.2 Επίγειο Όχημα

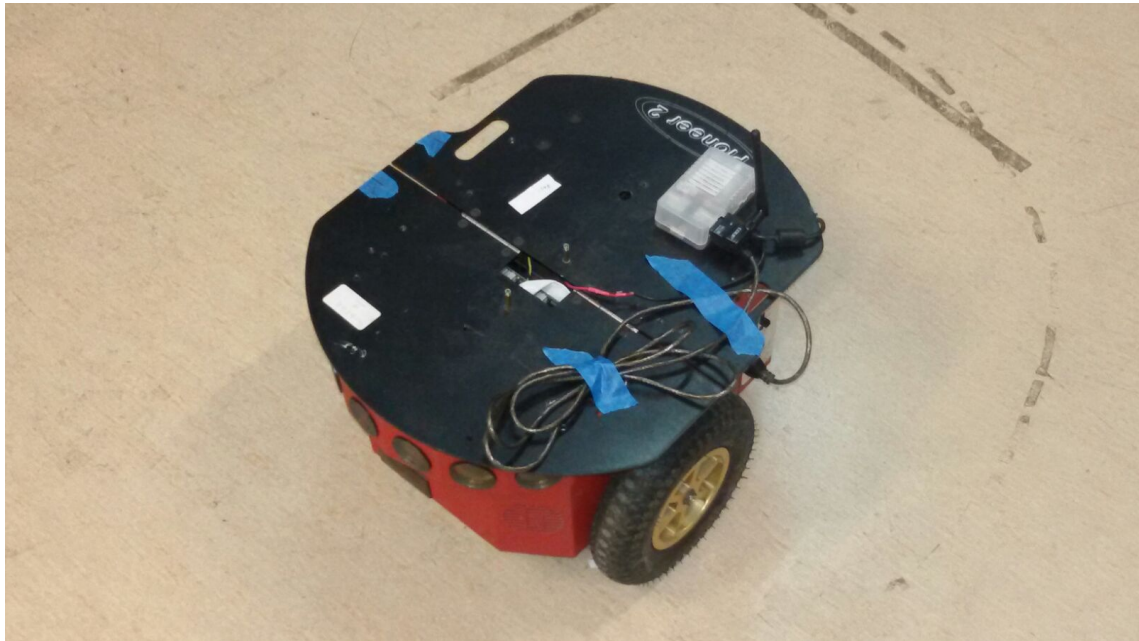
Ως επίγειο ρομποτικό όχημα χρησιμοποιήθηκε ένα τύπου Pioneer 2DX με ελαστικά για κίνηση και σε εξωτερικό χώρο.

Είναι δίτροχο όχημα με διαφορική κίνηση στους δύο τροχούς και έχει και έναν επιπλέον βοηθητικό τροχό για ισορροπία. Είναι συνδεδεμένο με υπολογιστή Odroid προσφέροντας την δυνατότητα ελέγχου και αυτονομίας και με χρήση οδομετρίας είναι δυνατόν να γίνει εκτίμηση της θέσης κάθε φορά του επίγειου οχήματος σε σχέση με την αρχική του θέση, με τα γνωστά όμως σφάλματα της οδομετρίας να υπάρχουν (stick-slip).

Διάφορα χαρακτηριστικά του οχήματος μπορούν να βρεθούν από το datasheet της εταιρίας. Αναφέρω τα όρια της εταιρίας για την μέγιστη γραμμική και περιστροφική ταχύτητα του κέντρου μάζας του οχήματος, τα οποία επιβεβαιώθηκαν και πειραματικά, διότι θα χρειστούν στην συνέχεια.

u_m^{max}	ω_m^{max}
$1.5 \frac{m}{s}$	$250 \frac{deg}{s}$

Πίνακας 3.1: Μέγιστη γραμμική και γωνιακή ταχύτητα επίγειου ρομπότ



Σχήμα 3.2: Το Pioneer 2DX

3.1.3 Κάμερα

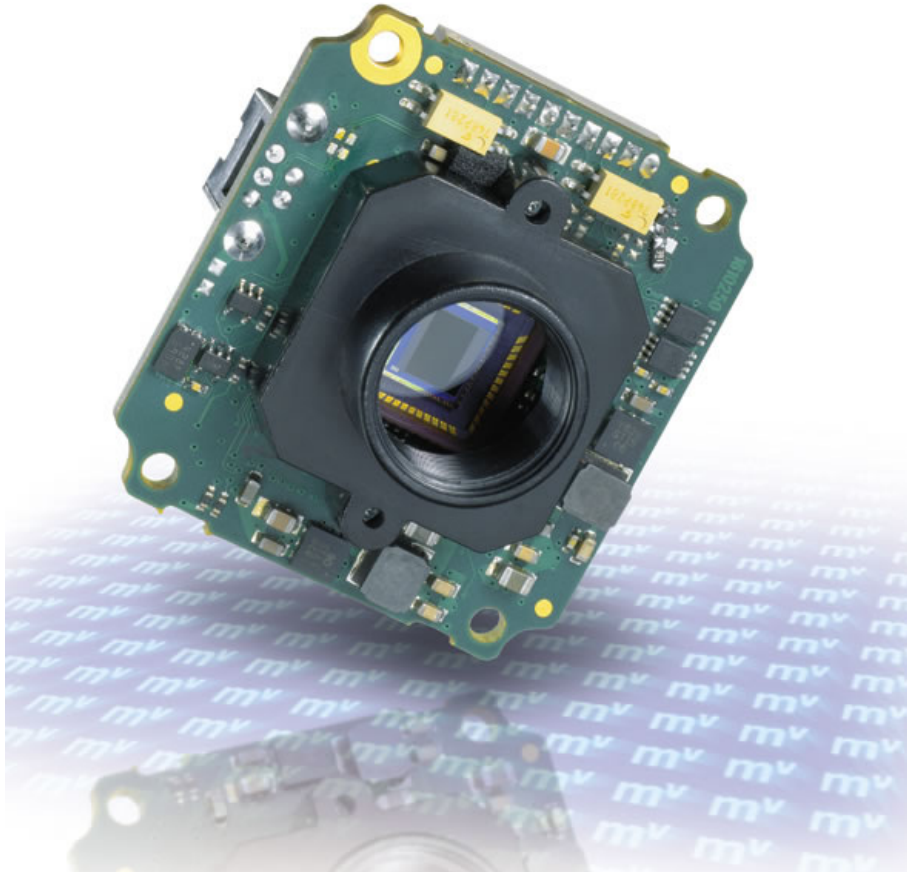
Σημαντικό κομμάτι του πειραματικού εγχειρήματος αυτής της εργασίας αποτελεί και η κάμερα η οποία τοποθετήθηκε σε σταθερή κατακόρυφη θέση (90 μοίρες ως προς το επίπεδο του οχήματος) στο εναέριο όχημα και αποτελεί τον βασικό αισθητήρα εκτίμησης της σχετικής θέσης των δύο οχημάτων. Η τοποθέτηση της κάμερας έγινε μέσω στηριγμάτων τα οποία έχουν την δυνατότητα να προσαρμόζονται σε οποιαδήποτε γωνία κλίσης ως προς το επίπεδο του οχήματος (βλ. 3.3).



Σχήμα 3.3: Η τοποθέτηση καμερών στο Firefly

Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε είναι η mvBlueFOX της εταιρίας Matrix Vision

(3.4). Στην εφαρμογή ο φακός που χρησιμοποιήθηκε είχε οπτικό πεδίο(field of view)140deg. Το ευρύ πεδίο όρασης καθίσταται σημαντικό στην εφαρμογή μας αφού με κατάλληλη προσαρμογή και ρύθμιση της εικόνας (calibration) δίνει την δυνατότητα στο εναέριο όχημα να εντοπίζει το κινούμενο επίγειο όχημα και να μην υπάρχει απώλεια του ακόμα και σε πιο επιθετικές μανούβρες.



Σχήμα 3.4: Η κάμερα mnBlueFOX

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την χρήση αυτής της κάμερας μας έδινε εικόνα ανάλυσης 752x480 με ταχύτητα 90 εικόνες το δευτερόλεπτο(frames per sec fps) . Η παράμετρος fps αποδεικνύεται ιδιαίτερα κρίσιμη σε εφαρμογές εναέριων μέσων για την εκτίμηση θέσης, πόσο μάλλον όταν πρέπει να εντοπίζει αντικείμενα τα οποία αλλάζουν θέση στο χώρο. Η ανάλυση, τα fps και τα ευρύ πεδίο όρασης του φακού καθιστούν την κάμερα αυτή ιδανική για το πείραμα της εργασίας αυτής σε αντίθεση με άλλες του εμπορίου, όπως π.χ η Sony Eye Camera.

3.2 Μέθοδοι Αναγνώρισης Άγνωστων Παραμέτρων

3.2.1 Μάζα και Ροπές Αδράνειας

Όπως ανέφερα και παραπάνω με την διαδικασία της ζύγισης προκύπτει η συνολική μάζα πτήσης του οχήματος. Στο τμήμα αυτό θα υπολογιστούν και οι ροπές αδράνειας του οχήματος που είναι άγνωστες.

Για την εύρεση των ροπών αδράνειας θα γίνει χρήση της θεωρίας του εκκρεμούς. Σύμφωνα με αυτήν το αντικείμενο προς μέτρηση πρέπει να συγκρατηθεί ώστε να περιστρέφεται περί έναν άξονα, στην συνέχεια να ταλαντωθεί ως προς αυτό το σημείο και να μετρηθεί η συχνότητα της ταλάντωσης. Αλλάζοντας τώρα κάθε φορά τον τρόπο πρόσδεσης υπολογίζονται και οι τρεις ροπές αδράνειας, μία για κάθε άξονα(βλέπε σχ. 3.5).

Για να αποφύγουμε αδυναμίες της θεωρίας του απλού εκκρεμούς (overhead pivot) έγινε χρήση της θεωρίας του εκκρεμούς με δύο καλώδια (bifilar pendulum)[5] [6].

Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 2 παράλληλα και κατακόρυφα καλώδια ίσου μήκους L με α την μεταξύ τους απόσταση. Τότε η ροπή αδράνειας του κάθε άξονα, ανάλογα με τον άξονα περιστροφής δίνεται από τον τύπο:

$$J_{CG} = \frac{\underbrace{m \cdot g}_W \cdot \underbrace{\text{περίοδος ταλάντωσης}}_{T^2} \cdot \underbrace{\text{απόσταση καλωδίων}}_{\alpha^2}}{16\pi^2 \cdot \underbrace{L}_{\text{μήκος καλωδίου}}} \quad (3.2.1)$$

Διαδικασία Πειράματος:

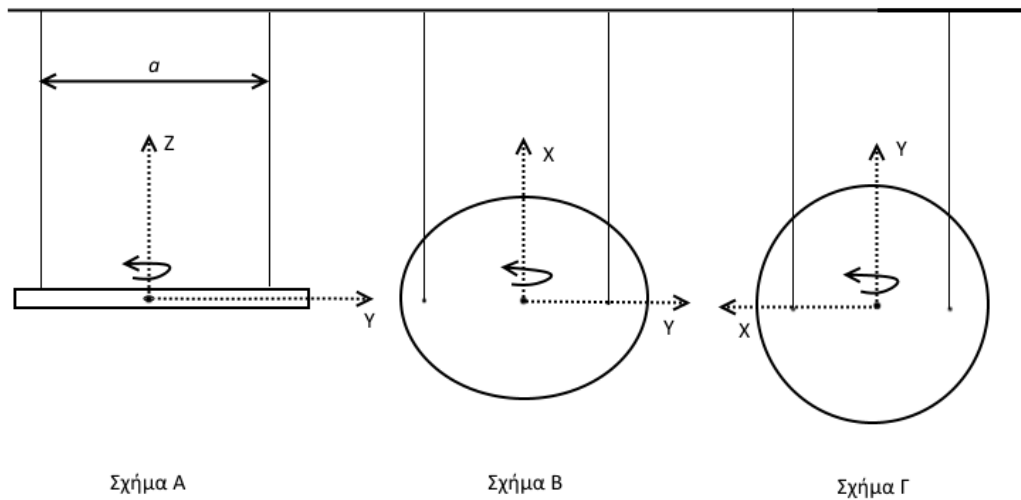
Πραγματοποιήθηκαν επομένως πειραματικές δοκιμές με βάση τα παραπάνω και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν ελαφριά καλώδια ώστε η επίδρασή τους να θεωρηθεί αμελητέα. Η αρχική γωνία που εφαρμόστηκε κάθε φορά ήταν 30 deg και χρονομετρήθηκαν 10 περίοδοι T της ταλάντωσης του εκκρεμούς, ώστε να εξαλειφθούν όσο το δυνατόν τυχαία σφάλματα χρονομέτρησης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι:

	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
α	142.19 mm	144.30 mm	105.39 mm
L	0.631 m	0.493 m	0.745 m
$10 \cdot T$	21.1 sec	18.3 sec	38.7 sec

Πίνακας 3.2: Πειραματικά δεδομένα για υπολογισμό των ροπών αδράνειας

Χρησιμοποιώντας λοιπόν την σχέση 3.2.1 και τα δεδομένα του πίνακα 3.2 υπολογίζονται κατά προσέγγιση οι ακόλουθες ροπές αδράνειας του πίνακα 3.3.

Οι ροπές αδράνειας των αξόνων x,y είναι σχεδόν ίσες κάτι αναμενόμενο από το γεγονός ότι κατασκευαστικά το όχημα έχει σχετικά κυκλική συμμετρική μορφή.



Σχήμα 3.5: Διαφορετικοί τρόποι πρόσδεσης αντικειμένου για υπολογισμό της ροπής αδρανείας του. Σχήμα A: I_{zz} Σχήμα B: I_{xx} Σχήμα Γ: I_{yy}

I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
$0.01522 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$0.01510 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$0.02365 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Πίνακας 3.3: Προσεγγιστικές τιμές ροπών αδρανείας

3.2.2 Αναγνώριση Παραμέτρων Αεροδυναμικών Αντιστάσεων και Κερδών Εσωτερικού Ελεγκτή

3.2.2.1 Θεωρία Αναγνώρισης Συστήματος

Η αναγνώριση συστήματος είναι μία στατιστική μέθοδος για την κατασκευή των μαθηματικών μοντέλων άγνωστων δυναμικών συστημάτων συνήθως από τα δεδομένα πειραματικών μετρήσεων. Στις εφαρμογές με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα η πλήρης και ακριβής γνώση του δυναμικού μοντέλου πτήσης είναι κρίσιμης και αναγκαίας σημασίας για την ανάλυση και τον σχεδιασμό του ελέγχου. Επομένως αφού γίνουν τα κατάλληλα σχεδιασμένα πειράματα για την συλλογή δεδομένων στην συνέχεια με την χρήση αλγοριθμικών μεθόδων γίνονται δοκιμές για την ταύτιση(fitting) των δυναμικών μοντέλων με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η εύρεση των παραμέτρων και η ακρίβεια του ανεπτυγμένου μοντέλου προκύπτει από σύγκριση των προβλεπόμε-

νων(θεωρητικών) με τις πραγματικές αποκρίσεις του μοντέλου σε πειράματα πτήσης. Η ανάγνωση του συστήματος μπορεί να γίνει τόσο στο επίπεδο των συχνοτήτων όσο και στο επίπεδο του χρόνου.

Πιο συγκεκριμένα στην αναγνώριση στο πεδίο της συχνότητας γίνεται αρχικά μία εκτίμηση του μη παραμετρικού μοντέλου της συνάρτησης της συχνότητας απόκρισης του οχήματος. Έπειτα μία παραμετρική καμπύλη της συχνότητας απόκρισης συγκρίνεται με το μη παραμετρικό μοντέλο και έτσι υπολογίζονται οι παράμετροι που ενδιαφέρουν, και συνήθως μπορεί να γίνει μία τελική επιβεβαίωση στο πεδίο του χρόνου [7].

Στην αναγνώριση στο πεδίο του χρόνου ακολουθείται άλλη προσέγγιση. Η μοντελοποίηση γίνεται στο χώρο κατάστασης (state-space) και ακολουθεί άμεσα η αντιστοίχιση με τα πειραματικά δεδομένα με χρήση μεθόδων, όπως τα ελάχιστα τετράγωνα ή άλλες μεθόδους μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood methods) .

Δύο είναι τα πιο συχνά μοντέλα που συναντάμε στην αναγνώριση συστήματος.

- Μοντέλο Γκρίζου κουτιού : το μοντέλο είναι εν μέρει γνωστό ωστόσο υπάρχουν άγνωστες παράμετροι που πρέπει να υπολογιστούν.
- Μοντέλο Μαύρου κουτιού : δεν υπάρχει καθόλου γνώση του μοντέλου.

3.2.2.2 Εφαρμογή της Αναγνώρισης Συστήματος

Στην εργασία αυτή έχουμε μερική γνώση του μοντέλου του οχήματος που εξήχθει από την κινηματική και δυναμική ανάλυση που έγινε στο κεφάλαιο 2. Άρα το μοντέλο μας υπάγεται στην κατηγορία του γκρίζου μοντέλου(grey box model).

Η διαδικασία που πρέπει να ακολουθήσουμε είναι η εξής:

Πραγματοποιούμε πειραματικές πτήσεις με ανθρώπινο χειριστή του εναέριου οχήματος και συλλέγουμε τις εντολές εισόδου του R/C(remote controller) που δόθηκαν. Επίσης γίνεται καταγραφή του πραγματικού διανύσματος κατάστασης του οχήματος. Στην συνέχεια με τις παραπάνω εισόδους που μετρήθηκαν προσπαθεί να συνταιριάζει το διάνυσμα κατάστασης του θεωρητικού μη γραμμικού μοντέλου(2.1.15) για αυτές τις εισόδους με το πραγματικό διάνυσμα κατάστασης που μετρήθηκε βρίσκοντας τις άγνωστες παραμέτρους που επιτυγχάνουν την βέλτιστη ταύτιση.

Ωστόσο για να επιτευχθεί η παραπάνω μέθοδος με καλύτερα αποτελέσματα θα πρέπει να γίνουν ειδικά πειράματα πτήσης. Συγκεκριμένα έγιναν πτήσεις όπου διαχωρίστηκαν σειριακά οι κινήσεις του οχήματος, δηλαδή έγινε κίνηση με pitch (μπρος - πίσω), ύστερα roll (δεξιά - αριστερά), μετά κίνηση με μόνο yaw και τέλος ανύψωση και βύθιση του οχήματος στο ίδιο σημείο(μόνο thrust). Επίσης για τον ακριβέστερο υπολογισμό των αεροδυναμικών αντιστάσεων πτήσεις με την μεγάλη ταχύτητα σε μεμονομένες κατευθύνσεις και πάλι.

Από τις διαφορικές εξισώσεις μπορεί να κατασκευαστεί προγραμματιστικά το μοντέλο των εξισώσεων, και να οριστούν οι είσοδοι, οι έξοδοι, οι άγνωστοι παράμετροι και το πεδίο ορισμού τους αν είναι γνωστό. Αφού έχουμε το μοντέλο κατασκευασμένο και το σήμα εισόδου από τα πειράματα μπορεί να γίνει προσομοίωση των εξόδων και της απόκρισης του συστήματος με χρήση Runge Kutta 4ης τάξης. Στην συνέχεια μπορεί

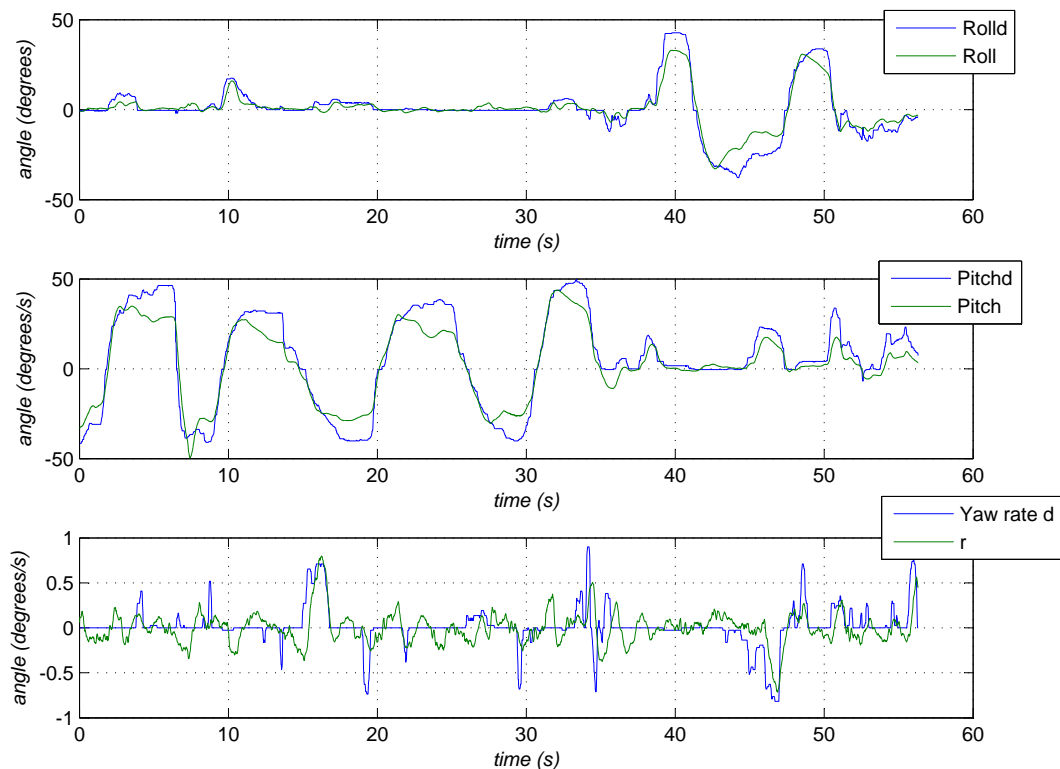
να γίνει η εκτίμηση των άγνωστων παραμέτρων του συστήματος (nlgreyest, Matlab). Στην περίπτωση αυτή η αριθμητική επαναληπτική μέθοδος εύρεσης των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκε είναι η Trust Region Reflective Newton. Η μέθοδος αυτή είναι μία μη γραμμική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων όπου το κόστος είναι το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων ανάμεσα στα μετρούμενα (πραγματικά) και στα θεωρητικά (προσομοίωσης) αποτελέσματα. Χρησιμοποιήθηκε γιατί είναι καλύτερη και πιο γρήγορη από τις μεθόδους line search σε περιπτώσεις όπου οι άγνωστοι παράμετροι δεν έχουν γνωστό πεδίο ορισμού. Τέλος αφού ο αλγόριθμος καταλήξει στις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων γίνεται αξιολόγηση της λύσης υπολογίζοντας την ταύτιση (fitting) που επιτεύχθηκε.

3.2.2.3 Αποτελέσματα Αναγνώρισης Εναέριου Οχήματος

Στο τμήμα αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης αλλά και η αξιολόγηση τους.

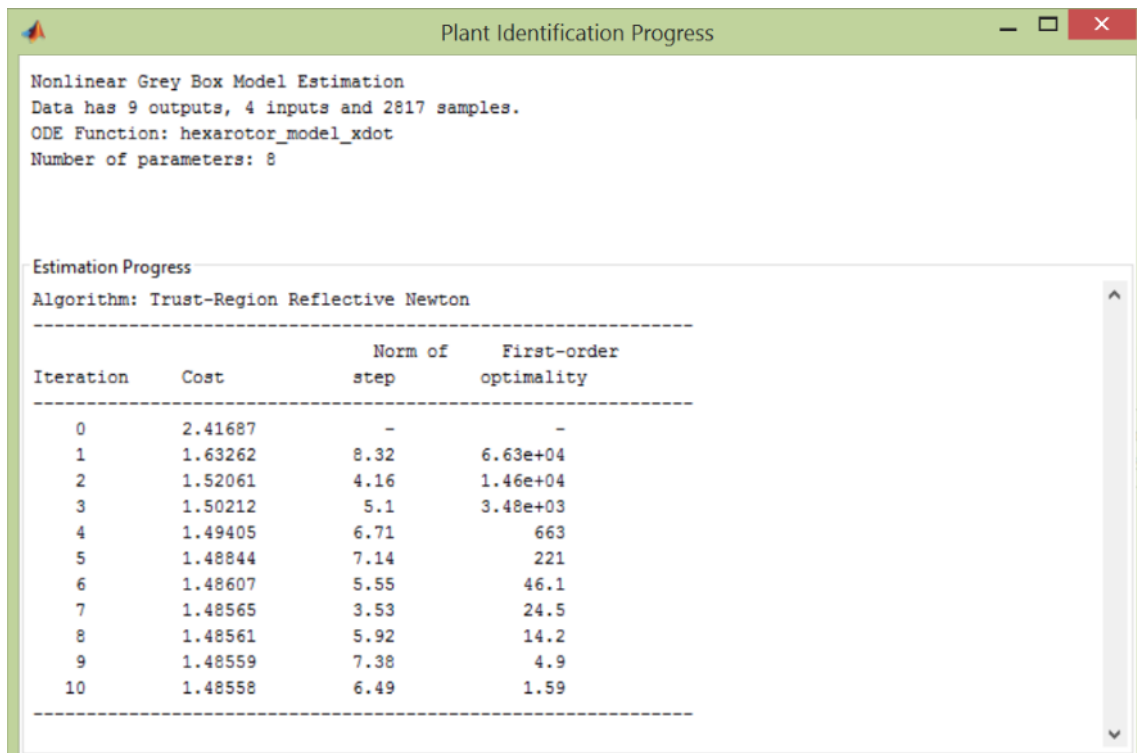
Αρχικά επισημαίνω ότι η παράμετρος K_z του μοντέλου δεν χρειάζεται να υπολογιστεί μέσω της αναγνώρισης του συστήματος και έχει τιμή $K_z = 36$. Αυτό εξάγεται από τα χαρακτηριστικά του οχήματος και συγκεκριμένα από την μέγιστη δύναμη ανύψωσης που είναι $36N$, είναι δηλαδή στην ουσία ένας απλός P ελεκτηής.

Για τις υπόλοιπες παραμέτρους πραγματοποιώ την αναγνώριση του συστήματος. Όπως εξήγησα η αναγνώριση αξιολογεί την σχέση εισόδων-εξόδων του συστήματος. Στο ακόλουθο σχήμα 3.6 φαίνονται οι επιθυμητές γωνίες (desired) του R/C σε σχέση με τις πραγματικές.



Σχήμα 3.6: Σχέση εισόδων-εξόδων σε πειραματική πτήση

Παρουσιάζω στην συνέχεια στο σχήμα 3.7 τα βήματα της επαναληπτικής μεθόδου εύρεσης των βέλτιστων παραμέτρων.



Σχήμα 3.7: Βήματα επαναληπτικής διαδικασίας εύρεσης των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου

Από την διαδικασία αυτή προέκυψαν οι τιμές των παραμέτρων όπως φαίνεται στους πίνακες 3.4 και 3.5

K_ϕ	K_p	K_θ	K_q	K_r
237.1	60.9	296.0	68.1	3.7

Πίνακας 3.4: Κέρδη Εσωτερικού Ελεγκτή Εναέριου Οχήματος

d_u	d_v	d_w
0.6	0.2	0.7

Πίνακας 3.5: Σταθερές Αεροδυναμικής Αντίστασης

Σημείωση : Δεν είναι τόσο σημαντικές οι ακριβείς τιμές των παραμέτρων $K_\phi, K_p, K_\theta, K_q$ αλλά κυρίως είναι ο λόγος των παραμέτρων αυτών $\frac{K_\phi}{K_p}, \frac{K_\theta}{K_q}$ (εδώ ≈ 4). Γίνεται κατανοητό δηλαδή ότι και για άλλους συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων αυτών αλλά διατηρώντας το ίδιο λόγο μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική προσέγγιση του μοντέλου.

Παραθέτω στην συνέχεια γραφικές αναπαραστάσεις των αποτελεσμάτων που αποδεικνύουν την εγκυρότητα των παραμέτρων αυτών.

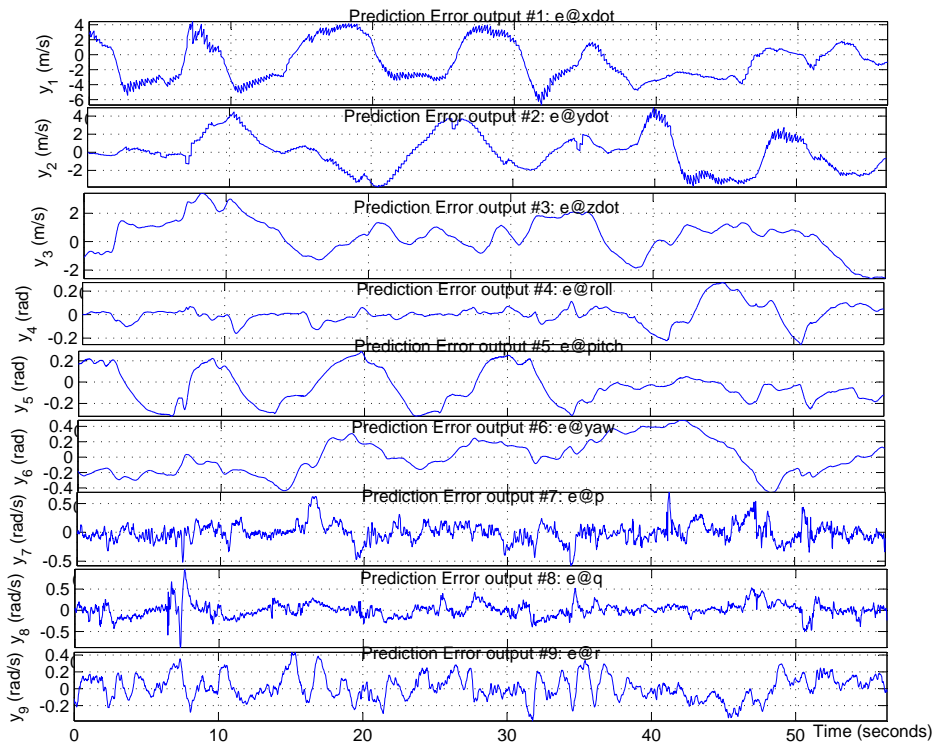
Στην εικόνα 3.9 για τις παραμέτρους που έχουν υπολογισθεί το ταυτόχρονο fitting που προκύπτει για όλες τις μεταβλητές κατάστασης είναι της τάξης του 60%. Αξίζει να αναφέρω ότι το ποσοστό αυτό είναι αρκετά υψηλό και επιβεβαιώνει την εγκυρότητα του αναπτυγμένου μοντέλου του κεφαλαίου 2. Οι απλοποιήσεις που έχουν γίνει στο θεωρητικό μοντέλο, και τα σφάλματα των μετρήσεων οδηγούν σε αυτό το ποσοστό.

Επιπλέον κριτήρια στατιστικών μεθόδων που δείχνουν πόσο κοντά είναι το θεωρητικό με το πραγματικό μοντέλο και υπολογίστηκαν για την περίπτωση μας είναι τα εξής:

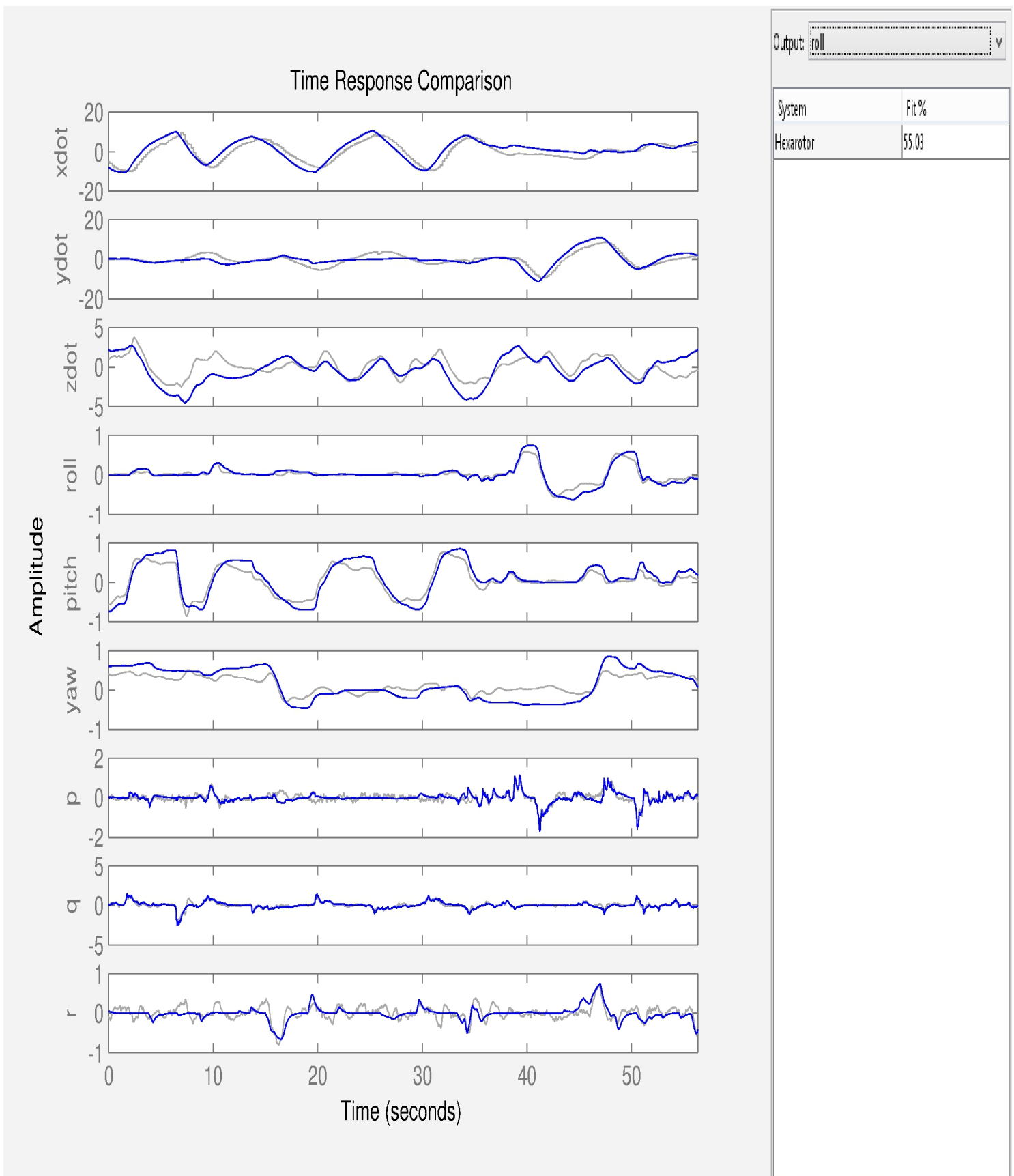
- Loss function 2.12771e-09
- Akaike’s Final Prediction Error for estimated model 2.13979e-09

Ένας άλλος παράγοντας σημαντικός σε τέτοιες μελέτες είναι το σφάλμα πρόβλεψης. Το σφάλμα πρόβλεψης είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα πρόβλεψης (mean squared prediction error) και στην ουσία είναι η αναμενόμενη τετραγωνική απόσταση ανάμεσα σε αυτό που προβλέπω για μια συγκεκριμένη τιμή και στην πραγματική της τιμή. Εκφράζει επομένως την ποιότητα της πρόβλεψης.

$$MSPE = E \left[\sum_{i=1}^n (g(x_i) - \hat{g}(x_i))^2 \right] \tag{3.2.2}$$



Σχήμα 3.8: Το σφάλμα πρόβλεψης των μεταβλητών κατάστασης



Σχήμα 3.9: Σύγκριση θεωρητικών μεταβλητών κατάστασης με πειραματικά δεδομένα και ποσοστά fitting

Κεφάλαιο 4

Θεωρία Παιγνίων και Βέλτιστος Έλεγχος

Η θεωρία Παιγνίων(ΘΠ) αποτελεί βασικό τμήμα αυτής της εργασίας. Το κεφάλαιο αυτό καλύπτει συνδυαστικά και την θεωρία παιγνίων και τον έλεγχο. Από την μία μεριά θα αναπτυχθούν βασικές έννοιες της ΘΠ και το πως μπορεί να βρει εφαρμογή σε πειράματα με ρομποτικές πλατφόρμες όπου πρέπει να γίνει ανάπτυξη και σχεδιασμός ελεγκτή και τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει. Από την άλλη θα περιγραφεί το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου, η ανάλυση του σχεδιασμού των μη γραμμικών προβλεπτικών ελεγκτών εξετάζοντας τις συναρτήσεις κόστους και τους περιορισμούς του προβλήματος. Τέλος θα περιγράψω τον τρόπο που εφαρμόστηκε αυτή η θεωρία για την κατάστρωση του παιγνίου μεταξύ των 2 ρομποτικών οχημάτων με προβλεπτικό έλεγχο.

4.1 Εισαγωγή και Γενικές Έννοιες

Η ΘΠ χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στην σημερινές εφαρμογές της ρομποτικής. Η ολοένα και αυξανόμενη χρήση των μη επανδρωμένων οχημάτων οδηγεί σε εφαρμογές υψηλής πολυπλοκότητας, όπου η συνεργασία και η αλληλεπίδραση μεταξύ των οχημάτων κρίνεται απαραίτητη. Συχνές εφαρμογές τέτοιου είδους είναι σμήνη οχημάτων που συνεργάζονται για να εκτελέσουν κάποιες αποστολές, όπως στις εργασίες [8] [9], ή ομοίως οχήματα που συνεργάζονται για να εκτελέσουν κάποια κοινή εργασία, όπως π.χ στις εργασίες [10] [11], όπου ένα εναέριο όχημα προσπαθεί να προσγειωθεί εφαρμόζοντας βέλτιστο έλεγχο σε ένα κινούμενο επίγειο όχημα.

Τι συμβαίνει όμως στην περίπτωση που τα δύο ή περισσότερα οχήματα έχουν αντίθετο ή άγνωστο(απρόβλεπτο) στόχο ;

Σε αντίθεση με τα συνεργαζόμενα παίγνια για αυτήν την περίπτωση η έρευνα που γίνεται είναι σχετικά περιορισμένη. Το γεγονός αυτό μας οδήγησε στην ιδέα να μελετηθεί ο σχεδιασμός και η ανάλυση ενός ανταγωνιστικού παιγνίου μεταξύ ενός επίγειου και ενός εναέριου οχήματος με σκοπό την απάντηση σε ορισμένα βασικά ερωτήματα που προέκυψαν:

- Ποιές τεχνικές/μανούβρες θα χρησιμοποιήσει το επίγειο όχημα για την αποφυγή του εναέριου ;
- Μπορεί το εναέριο όχημα, λόγω των ενισχυμένων δυνατοτήτων του, συγκεκριμένα πιο γρήγορο, να διασφαλίσει την νίκη του σε βάρος του αντιπάλου του ανεξαρτήτων τω συνθηκών του παίγνιου ;
- Μπορεί στο παίγνιο να επικρατήσει ισορροπία ;

Για την απάντηση αυτών των ερωτημάτων μέσω της μελέτης της εφαρμογής που περιγράφηκε έπρεπε να καταφύγουμε στο τομέα της θεωρίας των Παίγνιων. Παρόμοια με την δική μας εφαρμογή οι επιστήμονες έχουν αναπτύξει κατά καιρούς ενδιαφέροντες ιδέες σχετικές με το πρόβλημα της εργασία αυτής. Οι πιο σημαντικές και σχετικές είναι οι ακόλουθες:

Παίγνιο Μηδενικού Αθροίσματος : Αποτελεί έναν γενικό τύπο παίγνιου που μπορεί να αποτελείται από δύο ή περισσότερους παίχτες. Η κατηγοριοποίησή του γίνεται ως προς την δομή των συναρτήσεων απόδοσης. Στο παίγνιο αυτό το άθροισμα των αντικειμενικών συναρτήσεων του συνόλου των παιχτών είναι μηδέν.[12]

Διαφορικό Παίγνιο: Στο είδος αυτό, οι μεταβλητές κατάστασης των μελών του παίγνιου εξελίσσονται με βάση κάποιες διαφορικές εξισώσεις. Ο κάθε παίχτης λοιπόν μπορεί να περιγραφεί με ένα ορισμένο δυναμικό σύστημα.

Παίγνιο Καταδίωξης -Αποφυγής (pursuit-evasion game PEG) : Αποτελείται από δύο αντιχρουόμενες ομάδες παιχτών, όπου οι πρώτοι προσπαθούν να εντοπίσουν και να πλησιάσουν τα μέλη της άλλης ομάδας, ενώ αντίθετα οι δεύτεροι προσπαθούν να τους αποφύγουν και να αποδράσουν. Ο Isaacs είναι από τους πρώτους που μελέτησαν αυτού του είδους τα παίγνια στο βιβλίο του [13] και επιπλέον εκεί ανέπτυξε και ένα ακόμα ενδιαφέρον παιχνίδι, το επονομαζόμενο Homicidal Chauffeur Game .Σε αυτό το πρόβλημα ένας γρήγορος αλλά περιορισμένης ευελιξίας παίχτης (αυτοκίνητο) προσπαθεί να "χτυπήσει" έναν αργό αλλά ευέλικτο παίχτη, που μπορεί να αλλάζει κατεύθυνση ακαριαία (πεζός). Ο Isaacs μελέτησε αυτό το παίγνιο με σκοπό να καταλήξει στο αν κάποιος από τους δύο παίχτες μπορεί να ακολουθήσει μια συγκεκριμένη στρατηγική που να μπορεί να του εγγυηθεί την νίκη [14]. Επιπλέον σε μεταγενέστερες μελέτες μελετήθηκε ο συνδυασμός των παιχνιδιών αυτών με χρήση της θεωρίας του βέλτιστου ελέγχου, όπου ο κάθε παίχτης επιλέγει την στρατηγική που θα του επιφέρει το βέλτιστο αποτέλεσμα ως προς κάποιο παράγοντα της επιλογής του [15].

Όλα τα παραπάνω αποτελούν θεωρίες που ταιριάζουν στην εφαρμογή της εργασίας αυτής, και με βάση αυτές έχουν γίνει αρκετές αντίστοιχες έρευνες. Στην εργασία [16] οι συγγραφείς προτείνουν μία ημι-άμεση μέθοδο επίλυσης του προβλήματος της διπλής βελτιστοποίησης που μπορεί να βρει εφαρμογή σε παίγνια PEG μεταξύ δύο εναέριων οχημάτων, όπου τα αεροσκάφη περιγράφηκαν με μοντέλα τριών βαθμών ελευθερίας. Ο Quintero και ο Hespahna στη εργασία τους [17]χρησιμοποίησαν τεχνικές τις θεωρίας παίγνιων με μονή βελτιστοποίηση για το έλεγχο UAV, με σκοπό τον εντοπισμό, μέσω οπτικής ανατροφοδότησης, ενός απρόβλεπτα αλλά όχι βέλτιστα κινούμενου επίγειου

οχήματος, που χρησιμοποιεί τεχνικές αποφυγής για την έξοδο του από το πεδίο όρασης του εναέριου. Ένας άλλος τύπος PEG μοντελοποιείται στην εργασία [18]. Υπάρχει ένα αεροσκάφος - εισβολέας και ένα αναγνωριστικό. Το πρώτο αφού αναγνωρίσει οπτικά το δεύτερο, προσπαθεί να ξεφύγει χωρίς το δεύτερο να καταφέρει να το αναγνωρίσει και αυτό. Εδώ το πρόβλημα ελάχιστου-μεγίστου (min-max) λύθηκε χωρίζοντάς το σε δύο επιμέρους προβλήματα, ένα ελαχιστοποίησης και ένα μεγιστοποίησης. Στην εργασία [19] μελετήθηκαν πιθανολογικά PEGS μεταξύ ομάδων UAV και UGV, κυρίως από την πλευρά του διωκτή. Μέσω προσομοιώσεων και πειραμάτων, έγινε προσπάθεια να αποδειχτεί η συνεχής νίκη της ομάδας των διωκτών σε βάρος της αντιπάλου ομάδας, η οποία κινείται, είτε με τυχαίο είτε με βέλτιστο τρόπο.

Στην εργασία αυτή για να είναι δυνατόν να εφαρμοστεί ο βέλτιστος έλεγχος σε πραγματικά πειράματα ρομποτικών οχημάτων πρέπει ο υπολογισμός των διανυσμάτων εισόδου να γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Για τον λόγο αυτόν πρέπει να γίνει χρήση αρκετά γρήγορης βελτιστοποίησης για να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του προβλήματος. Επομένως, ως κατάλληλη επιλέχθηκε η μέθοδος του προβλεπτικού ελεγκτή και λόγω της μη γραμμικότητας των δυναμικών συστημάτων των μοντέλων, μη-γραμμικός προβλεπτικός ελεγκτής χρησιμοποιήθηκε (non-linear Model Predictive Controller). Μέσα σε αυτό το πλαίσιο που αναφέραμε παραπάνω, οι συγγραφείς της εργασίας [20] αντιμετώπισαν ένα παίγνιο PEG μεταξύ δύο εναέριων οχημάτων σταθερής πτερύγωσης στο τριδιάστατο χώρο. Για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου και την πρόβλεψη του αντίπαλου οχήματος χρησιμοποίησαν μη-γραμμικό προβλεπτικό ελεγκτή. Στις γραμμικές και περιστροφικές ταχύτητες επιβάλλονται σκληροί περιορισμοί. Επίσης το παίγνιο σε αυτή την εργασία είναι αντιστρεφόμενο, δηλαδή οι δύο παίχτες μπορούν να αλλάξουν ρόλους, λόγω της συμμετρικότητας του προβλήματος.

Στην διπλωματική αυτή εργασία, το PEG είναι ασύμμετρο, λόγω της ετερογένειας των δύο οχημάτων. Τα αντίπαλα οχήματα κινούνται στον τριδιάστατο ευκλείδειο χώρο R^{3x3} και προβλεπτικός ελεγκτής χρησιμοποιείται για να καθορίσει τις εισόδους των οχημάτων σε πραγματικό χρόνο. Επιλύοντας το Minimax πρόβλημα, κάθε παίχτης μπορεί να προβλέψει και να προδιορίσει την στρατηγική του άλλου γνωρίζοντας μόνο το μοντέλο του άλλου οχήματος και με αυτόν τον τρόπο να οδηγηθεί το παίγνιο σε ισορροπία κατά Nash. Στις αντικειμενικές συναρτήσεις και των δύο παιχτών το οπτικό πεδίο της κάμερας λαμβάνεται υπόψιν. Αναπτύχθηκε έτσι ένα περιβάλλον παιγνίου, όπου εξετάστηκαν διαφορετικά σενάρια, αξιολογώντας τις επιλογές του κάθε παίχτη και τα τελικά αποτελέσματα που προέκυψαν.

Στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα κατηγοριοποιήσουμε το παίγνιο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του και θα διατυπώσουμε το πρόβλημα με βάση την ΘΠ. Ύστερα θα εξηγηθεί το σχήμα ελέγχου που επιλέχθηκε και θα σχεδιαστούν οι δύο ελεγκτές, ένας για κάθε όχημα.

4.1.1 Διατύπωση και Κατηγοριοποίηση του Παιγνίου

Στο κεφάλαιο 2 προηγήθηκε η μοντελοποίηση των δύο οχημάτων. Τα δύο οχήματα περιγράφονται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων επομένως το παίγνιο στο οποίο συμμετέχουν είναι ένα διαφορικό παίγνιο. Μπορεί να γραφεί επομένως:

$$\dot{\mathbf{x}}_h = f(\mathbf{x}_h, \mathbf{u}_h, t) \quad \dot{\mathbf{x}}_m = f(\mathbf{x}_m, \mathbf{v}_m, t) \quad (4.1.1)$$

όπου το πρώτο είναι το μοντέλο του διώκτη-εναέριου οχήματος της εξίσωσης 2.1.15 και το δεύτερο είναι το μοντέλο του επίγειο οχήματος αποφυγής με βάση τις εξισώσεις 2.2.4, \mathbf{x}_i είναι ένα διάνυσμα n -στοιχείων των μεταβλητών κατάστασης, \mathbf{u}_h είναι η είσοδος του εναέριου και \mathbf{v}_m η είσοδος του επίγειου.

Ωστόσο για να μελετηθεί το διαφορικό παίγνιο που έχει περιγραφεί πρέπει να γραφούν το συνολικό δυναμικό μοντέλο του παιγνίου με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\dot{\mathbf{x}}_e = f(\mathbf{x}_e, \mathbf{u}_h, \mathbf{v}_m, t) \quad (4.1.2)$$

Όπως είναι φανερό στην παραπάνω εξίσωση η δυναμική του διαφορικού παιγνίου συμπεριλαμβάνει τις μεταβλητές κατάστασης των δύο οχημάτων μαζί όπως επίσης και τις εισόδους τους. Υποθέτοντας ότι τα δύο οχήματα έχουν ένα κοινό χωρόδετο σύστημα συντεταγμένων R_i όπως έχω ορίσει στο κεφάλαιο 2 το οποίο τοποθετείται στο κεντρό μάζας του κινούμενο UGV μπορεί να οριστεί η μεταβλητή κατάστασης σφάλματος \mathbf{x}_e ώστε να ικανοποιείται η δυναμική του παιγνίου, λόγω του ενδιαφέροντος μόνο για την σχετική θέση των δύο οχημάτων και όχι της απόλυτης θέσης τους. Άρα:

$$\mathbf{x}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \psi_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_h - x_m \\ y_h - y_m \\ \psi_h - \theta_m \\ z_h - z_m \end{bmatrix} \quad (4.1.3)$$

όπου $z_m = C$ είναι ίσο με μία σταθερά επειδή έχει θεωρηθεί ότι το επίγειο όχημα μπορεί να κινηθεί μόνο σε επίπεδη επιφάνεια. Τώρα μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης κάθε μέλους του παιγνίου είναι:

$$J_i = (x_e, u_h, v_m)$$

όπου i μπορεί να είναι είτε h για το εναέριο είτε m για το επίγειο.

Στην συνέχεια μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το παίγνιο της εργασίας αυτής είναι PEG. Για να έχει ισχύ ένα τέτοιο παίγνιο πρέπει να ικανοποιείται η επόμενη εξίσωση:

$$\begin{aligned} J(u_h^*, v_m^*) &= \min_{u_h \in U} J_h(u_h, v_m^*) = \max_{v_m \in V} J_m(u_h^*, v_m) \\ &= \min_{u_h \in U} \max_{v_m \in V} J(u_h, v_m) \end{aligned} \quad (4.1.4)$$

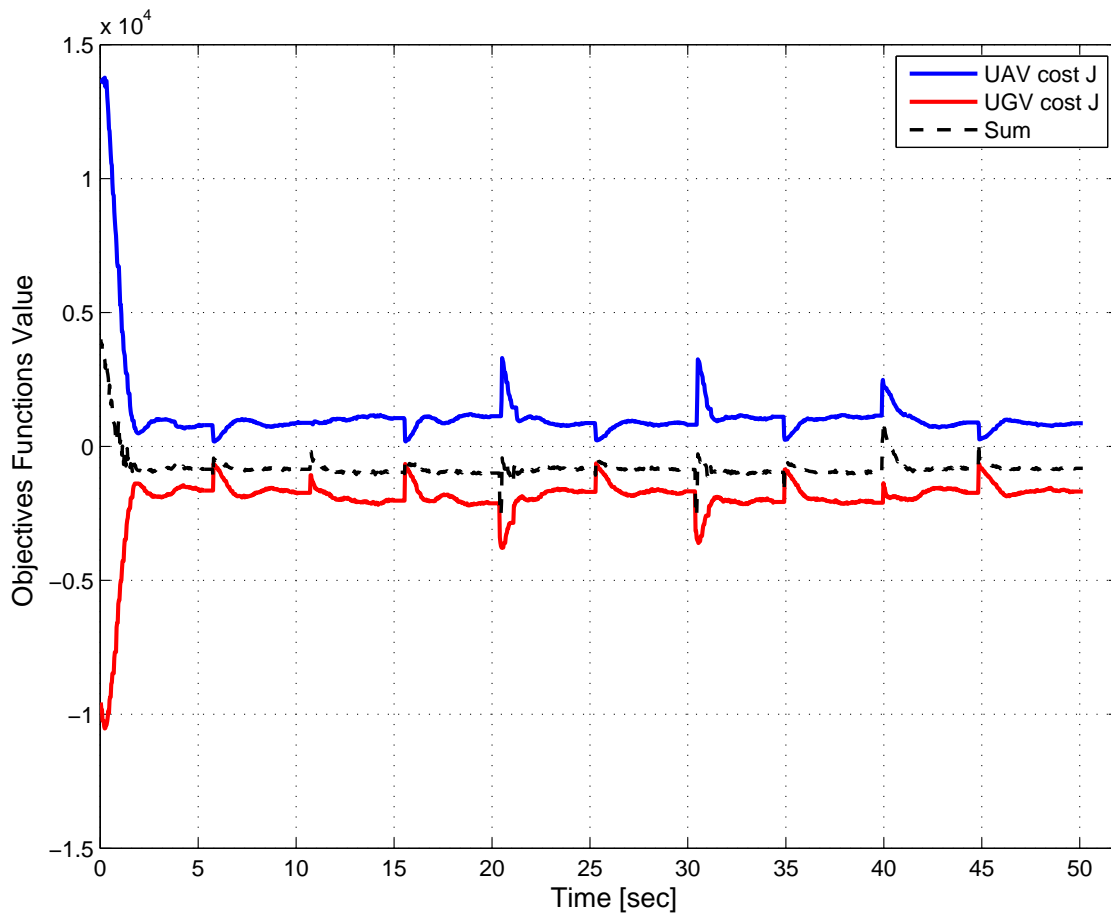
όπου U, V είναι αποδεκτά πεδία ορισμού του u και αντίστοιχα. Επίσης σε περίπτωση που τα u^* και v^* μπορούν να βρεθούν, τότε το ζευγάρι (u^*, v^*) ονομάζεται saddle point του παιχιδού και:

$$V = J(u_h^*, v_m^*) \quad (4.1.5)$$

ονομάζεται η τιμή του παιγνίου (value of the game). Το σημείο αυτό δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει, και συνήθως αυτό συμβαίνει σε συνεχή και πραγματικά PEG. Ένας άλλος σημαντικός ορισμός της ΘΠ είναι το παίγνιο μηδενικού αθροίσματος. Τα PEG συχνά θεωρούνται και παίγνια μηδενικού αθροίσματος λόγω του ανταγωνιστικού χαρακτήρα των μελών του. Η νικηφόρα κατάσταση για τον ένα παίκτη είναι απώλεια για τον άλλον. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι μεταξύ των εξισώσεων απόδοσης επικρατεί η παρακάτω σχέση:

$$J_h + J_m = 0 \leftrightarrow J_h = -J_m$$

Σε πραγματικές και ασύμμετρες εφαρμογές είναι πολύ δύσκολο το άθροισμα τους να είναι μηδέν, και τότε το παίγνιο καλείται μη-μηδενικού αθροίσματος. Στην περίπτωση μας το παίγνιο μεταξύ των δύο οχημάτων είναι μη-συμμετρικό για αυτό και το παίγνιο δεν είναι μηδενικού αθροίσματος. Ωστόσο μπορεί με ακρίβεια να θεωρηθεί ότι είναι παίγνιο σταθερού αθροίσματος και για την υποστήριξη αυτής της υπόθεσης παρουσιάζεται το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.1: Οι τιμές των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων των οχημάτων όπως υπολογίστηκαν κατά την διάρκεια ενός παιγνίου και το άθροισμά τους.

Στο σχήμα 4.1 μπορεί να παρατηρηθεί ο αντίθετος χαρακτήρας των δύο συναρτήσεων απόδοσης και επομένως το παίγνιο της εφαρμογής αυτής είναι ένα συνεχές

ανταγωνιστικό παίγνιο σταθερού αθροίσματος.

4.2 Σχεδιασμός Σχήματος Ελέγχου

4.2.1 Προβλεπτικός Έλεγχος

Αφού διατυπώθηκε η μορφή του παιγνίου μπορούμε τώρα να συνεχίσουμε στον σχεδιασμό του βέλτιστου ελεγκτή. Για τον σκοπό αυτής της εργασίας επιλέχθηκε ο προβλεπτικός έλεγχος για την επίλυση του προβλήματος. Η επιλογή αυτή μπορεί να στηριχθεί στους παρακάτω λόγους:

- Μπορεί να επιλυθεί γρήγορα, κάτι χρήσιμο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.
- Το γεγονός πρόβλεψης των μεταβλητών κατάστασης για έναν επιλεγμένο ορίζοντα προσφέρει την δυνατότητα να εφαρμοστεί εύκολα στην ΘΠ. Κάποιος μπορεί να προβλέψει την κατάσταση του μετά από κάποιον πεπερασμένο χρόνο και να καθορίσει ή να αλλάξει την στρατηγική του προς δικό του όφελος.
- Το γεγονός ότι ο ελεγκτής περιλαμβάνει το συνολικό δυναμικό μοντέλο του παιγνίου δίνει την δυνατότητα σε κάθε μέλος να προβλέψει ανεξάρτητα την βέλτιστη στρατηγική του αντιπάλου του και ύστερα με βάση αυτήν να καθορίσει την δική του στρατηγική.
- Τέλος, όσον αφορά τον έλεγχο του επίγειου ρομπότ, ο προβλεπτικός ελεγκτής προσφέρει το πλεονέκτημα αποφυγής των μη-ολονομικών περιορισμών του οχήματος.

4.2.2 Βέλτιστος Έλεγχος στην Θεωρία Παιγνίων

Ο προβλεπτικός έλεγχος βασίζεται σε επαναληπτική βελτιστοποίηση πεπερασμένου ορίζοντα. Σε κάθε χρονική στιγμή τ , η τρέχουσα κατάσταση $\mathbf{x}_e(\tau)$ μετράται ή εκτιμάται και υπολογίζεται ο νόμος ελέγχου που βελτιστοποιεί μία συγκεκριμένη συνάρτηση απόδοσης για ένα διάστημα $[t_o; t_o + T_h]$, όπου θεωρώ t_o μια αρχική χρονική τιμή, έναν σταθερό ορίζοντα πρόβλεψης T_h , $\tau \in [t_o, t_o + T_h]$ και αρχικές μεταβλητές κατάστασης $\mathbf{x}_e(t_o)$. Στην συνέχεια η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και υπολογίζεται εκ νέου ο νόμος ελέγχου για τις ανανεωμένες μεταβλητές κατάστασης.

Προχωρώντας, ορίζουμε την αντικειμενική συνάρτηση του διώκτη με βάση τις εξισώσεις 4.1.4 :

$$\min_{\mathbf{u}_h(\tau)} \max_{\mathbf{v}_m(\tau)} \mathcal{J}(\mathbf{x}_e(t), \mathbf{u}_h(\cdot), \mathbf{v}_m(\cdot); T_h) \quad (4.2.1)$$

ΠΟΥ ΥΠΟΧΕΙΝΤΑΙ:

$$\mathbf{x}_e(t_o) = \mathbf{x}_{e0}, \quad (4.2.2\alpha')$$

$$\mathbf{u}_h(t_o) = \mathbf{u}_{h0}, \quad (4.2.2\beta')$$

$$\mathbf{v}_m(t_o) = \mathbf{v}_{m0}, \quad (4.2.2\gamma')$$

$$\mathbf{x}_e(\tau) \in \mathcal{X}, \quad \mathbf{u}_h(\tau) \in \mathcal{U}, \quad \mathbf{v}_m(\tau) \in \mathcal{V} \quad (4.2.2\delta')$$

και η τρέχουσα συνάρτηση απόδοσης δίνεται από:

$$\begin{aligned} \mathcal{J}(\mathbf{x}_e(t), \mathbf{u}_h(\cdot), \mathbf{v}_m(\cdot); T_h) = \\ \sum_{t_o}^{t_o+T_h} \mathcal{L}_s(\mathbf{x}_e(\tau), \mathbf{u}_h(\tau), \mathbf{v}_m(\tau)) + \mathcal{F}(\mathbf{x}_e(t_o + T_h)) + k \cdot \mathcal{L}_v \end{aligned} \quad (4.2.3)$$

Στην εξίσωση (4.2.3) με \mathcal{L}_s συμβολίζεται το τρέχων κόστος της ατιχειμενικής συνάρτησης, με \mathcal{F} το τελικό κόστος που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των τελικών επιθυμητών καταστάσεων στο τέλος του χρονικού ορίζοντα και με \mathcal{L}_v ο παράγοντας κόστους που αφορά το πεδίο της όρασης που προσφέρει η κάμερα και χρησιμοποιείται για την διατήρηση του στόχου στο κέντρο της εικόνας της κάμερας και $k \in [0 \ 1]$ είναι ένας παράγοντας που δείχνει την επίδραση του όρου της όρασης στην συνολική συνάρτηση. Το τρέχων κόστος προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathcal{L}_s = \sum_{t_o}^{t_o+T_h} \mathbf{x}_e^T \cdot \mathbf{Q}_h \cdot \mathbf{x}_e + \sum_{t_o+1}^{t_o+T_h} \Delta \mathbf{u}_h^T \cdot \mathbf{R}_h \cdot \Delta \mathbf{u}_h \quad (4.2.4)$$

όπου $\Delta \mathbf{u}_h$ είναι η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών εισόδων, $\mathbf{Q}_h \in R^{n \times n}$ είναι ένας τετραγωνικός πίνακας $\text{diag}(\mathbf{Q}_h) \neq 0$ που συμβολίζει τον πίνακα κόστους κατάστασης του διώκτη, και n ο αριθμός των καταστάσεων, $\mathbf{R}_h \in R^{m \times m}$ είναι ο πίνακας του κόστους εισόδων, m είναι ο αριθμός των εισόδων. Ομοίως \mathbf{R}_h είναι ένας τετραγωνικός πίνακας, του οποίου τα διαγώνια στοιχεία δίνονται από την σχέση

$$R_{ii} = \frac{1}{\max u_i \cdot T_s}$$

Ο πίνακας βάρους $\mathbf{Q}_h \succeq 0$ είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει το πόσο γρήγορα καταστάσεις θα προσεγγίσουν τις επιθυμητές καταστάσεις. Ενώ ο πίνακας $\mathbf{R}_h \geq 0$ προσδιορίζει την ομαλότητα της τροχιάς των εισόδων. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή τόσο πιο ομαλή είναι η αλλαγή των εισόδων.

Το κόστος τερματικής κατάστασης δίνεται απο την εξίσωση 4.2.4 μόνο για τον τελικό χρόνο $\tau = t_o + T_h$. Ο όρος κόστους που αφορά της όραση \mathcal{L}_v χρησιμοποιείται όπως στην εργασία [10], και στην περιπτωσή μας χρησιμοποιούμε κάμερα Matrix Vision mvBlueFox με ανάλυση 752 x 480 (width x height) και με φακό που προσφέρει 140° πεδίο όρασης. Ο τύπος του \mathcal{L}_v είναι:

$$\mathcal{L}_v = \sum_{t_o}^{t_o+T_h} d_e^2 \cdot \left[\left(\frac{x_e}{a \cdot |z_e| \cdot d} \right)^2 + \left(\frac{y_e}{b \cdot |z_e| \cdot d} \right)^2 \right] \quad (4.2.5)$$

όπου d_e είναι η απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων στον τριδιάστατο χώρο, x_e, y_e, z_e ορίζονται στον τύπο (4.1.3), είναι παράμετροι του πεδίου όρασης της κάμερας, $a = \tan(\frac{a_h}{2})$ και $b = \tan(\frac{a_w}{2})$ αντίστοιχα, και η παράμετρος $d > 0$ είναι μια πολύ μικρή παράμετρος που χρησιμοποιείται για την αποφυγή ιδιομορφιών. Επίσης για πρακτικούς λόγους υποθέτουμε ότι οι μεταβλητές ελέγχου δεσμεύονται με σκληρούς περιορισμούς, εξαιτίας των πραγματικών δυνατοτήτων των οχημάτων:

$$u_{lower} < u_h < u_{upper} \quad (4.2.6)$$

4.2.2.1 Μεθοδολογία Βέλτιστου Ελέγχου

Για το εναέριο για να λύσει το βέλτιστο πρόβλημα ελέγχου χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.2.1 πρέπει να έχει γνώση των βέλτιστων εισόδων \mathbf{v}_m^* του αντιπάλου του και στην συνέχεια προχωρά σε ελαχιστοποίηση της συνάρτησής του ώστε να καθορίσει την βέλτιστη είσοδο \mathbf{u}_h^* . Λόγω του ανταγωνιστικού χαρακτήρα του παιγνίου ο διώκτης - εναέριο πρέπει να δρά αυτόνομα και ανεξάρτητα και να προβλέπει μόνος του τις αναμενόμενες εισόδους \mathbf{v}_m^* μέσω της μεγιστοποίησης της αντικειμενικής του συνάρτησης. Με αυτόν τον τρόπο, εκτιμά την βέλτιστη απόκριση του αντιπάλου του, που αντιστοιχεί στο χειρότερο σενάριο για αυτόν (worst case scenario), και στην συνέχεια αποφασίζει την κίνησή του. Αυτή η διαδικασία μπορεί να συνεχίσει να επαναλαμβάνεται, προσθέτωντας επίπεδα σχέψης στον παίχτη αυτόν προτού αποφασίσει την τελική τροχιά εισόδων που θα ακολουθήσει.

Algorithm 1 Επίλυση Διπλής Βελτιστοποίησης (Ελεγκτής Εναέριου)

- 1: **procedure** ΕΠΙΛΥΣΗ $\min \max \mathcal{J}(x_e, u_h, v_m)$
 - 2: Επίλυση $\max \mathcal{J}(x_e, u_h^*, v_m)$ για τον καθορισμό v_m^*
 - 3: Στην συνέχεια λύση $\min \mathcal{J}(x_e, u_h, v_m^*)$ για τον καθορισμό u_h^*
 - 4: Επανάληψη των βημάτων 2 και 3 N φορές, όπου N είναι ο αριθμός των επιπέδων σχέψης που έχουμε επιλέξει.
 - 5: Ορίζω το τελικό u_h^* ως τον βέλτιστο νόμο ελέγχου που προέκυψε.
 - 6: **end procedure**
-

Όλη η ανάλυση που έγινε παραπάνω στο κεφάλαιο αυτό ισχύει και μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα και για τον δραπέτη-επίγειο όχημα με κατάλληλη προσαρμογή της εξίσωσης 4.2.1 ώστε να επιλύσει το maximin πρόβλημα όπως φαίνεται στον αλγόριθμο 2, αφού σκοπός είναι τα δύο οχήματα να αντιτίθεται επί ίσοις όροις.

$$\max_{\mathbf{v}_m(\tau)} \min_{\mathbf{u}_h(\tau)} \mathcal{J}(\mathbf{x}_e(t), \mathbf{u}_h(\cdot), \mathbf{v}_m(\cdot); T_h) \quad (4.2.7)$$

όπου οι πίνακες κόστους \mathbf{Q}_m και \mathbf{R}_m προσαρμόζονται ώστε να εξυπηρετήσουν τα χαρακτηριστικά του επίγειου οχήματος.

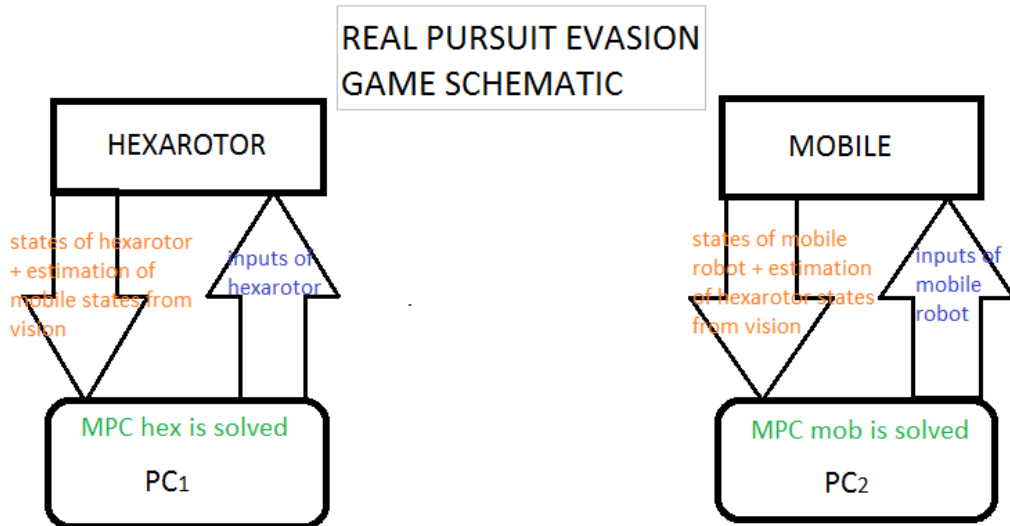
4.2.2.2 Μεθοδολογία Επαναλαμβανόμενου Προβλεπτικού Ελεγκτή

Επομένως όπως αναφέρθηκε τα δύο οχήματα δρουν αυτόνομα, και ανεξάρτητα το ένα από το άλλο υπολογίζει την στρατηγική που θα ακολουθήσει λαμβάνοντας όμως υπόψιν την στρατηγική του άλλου. Άρα σε κάθε επανάληψη του MPC το κάθε όχημα

Algorithm 2 Επίλυση Διπλής Βελτιστοποίησης (Ελεγκτής Επίγειου)

- 1: **procedure** ΕΠΙΛΥΣΗ $\max \min \mathcal{J}(x_e, u_h, v_m)$
- 2: Επίλυση $\min \mathcal{J}(x_e, u_h, v_m^*)$ για τον καθορισμό u_h^*
- 3: Στην συνέχεια λύση $\max \mathcal{J}(x_e, u_h^*, v_m)$ για τον καθορισμό v_m^*
- 4: Επανάληψη των βημάτων 2 και 3 N φορές, όπου N είναι ο αριθμός των επιπέδων σχέψης που έχουμε επιλέξει.
- 5: Ορίζω το τελικό u_m^* ως τον βέλτιστο νόμο ελέγχου που προέκυψε.
- 6: **end procedure**

θα έπρεπε να εκτιμά την δική του κατάσταση ως προς το χωρόδετο σύστημα συντεγμένων, να εκτιμά στην συνέχεια μέσω της οπτικής ανατροφοδότησης την κατάσταση του άλλου οχήματος εκφρασμένη στο κοινό χωρόδετο σύστημα, υπολογίζοντας έτσι την σχετική τους θέση, και τότε να επιλύει το πρόβλημα ο ελεγκτής και να προκύπτουν οι είσοδοι του κάθε οχήματος. Αυτή θα ήταν η διαδικασία που θα έπρεπε να ακολουθηθεί για να αναπαραστήσουμε ένα τέτοιο παιχνίδι, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση πραγματικού παιχνιδιού PEG

Ωστόσο στο παίγνιο αυτό επειδή όλες οι καταστάσεις που ενδιαφέρουν είναι σχετικές μεταξύ των δύο οχημάτων, μπορούμε να εκφράσουμε την σχετική του θέση και προσανατολισμό με έναν άλλο τρόπο. Ο εναλλακτικός τρόπος που προτάθηκε σε αυτήν την εργασία είναι ο εξής:

Το χωρόδετο σύστημα συντεταγμένων R_i τοποθετείται στο κέντρο βάρους του επίγειου οχήματος. Επομένως όταν γίνεται εκτίμηση της θέσης του εναέριου είναι πάντα η σχετική θέση των οχημάτων. Με αυτόν τον τρόπο ο προβλεπτικός ελεγκτής στους υπολογισμούς του μέσα σε έναν οριζόντια T_h εκφράζει τις θέσεις ως προς την θέση του επίγειου οχήματος στην αρχή του MPC. Υπολογίζει δηλαδή την θέση του επίγειου x_m ως προς την αρχική του θέση x_{m0} στο MPC_0 και ομοίως την θέση του εναέριου x_h ως προς x_{m0} , έχοντας έτσι σε κάθε βήμα την σχετική θέση-σφάλμα x_e . Ο βρόχος ελέγχου κλείνει όταν έρχεται η εκτίμηση θέσης από την οπτική ανατροφοδότηση όπου

και ξεκινάει το επόμενο MPC_1 και τότε η θέση του επίγειου ρομπότ εκείνη την χρονική στιγμή \mathbf{x}_{m1} θεωρείται ότι είναι η νέα θέση του χωρόδετου συστήματος, ως προς την οποία εκφράζονται οι θέσεις στο επόμενο βήμα του προβλεπτικού ελέγχου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνέχεια.

Είναι φανερό λοιπόν ότι στην παραπάνω διαδικασία προσφέρεται ένας εύκολος και χρήσιμος τρόπος για να αντιμετωπιστεί η συνεχής κίνηση των δύο οχημάτων στον χώρο, έχοντας ένα κινούμενο χωρόδετο πλαίσιο αναφοράς, το οποίο όμως μένει σταθερό στους εσωτερικούς υπολογισμούς βελτιστοποίησης κάθε MPC.

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε με βάση την θεωρία των προηγούμενων κεφαλαίων, ένας προσομοιωτής πραγματικού χρόνου στον τριδιάστατο χώρο. Αυτό έγινε εφικτό με την βοήθεια του προσομοιωτή Gazebo. Τα μοντέλα των οχημάτων κατασκευάστηκαν με βάση τα πραγματικά μοντέλα του εργαστηρίου που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3, δηλαδή για εναέριο το Asctec Firefly και για επίγειο το Pioneer 2DX.

5.1 Περιβάλλον Παιγνίου

Για το έλεγχο και την αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων παιχνιδιού έχοντας μία σταθερή βάση που θα βοηθήσει στην εξαγωγή συμπερασμάτων, σχεδιάστηκε ένα περιβάλλον παιχνιδιού-βαθμών (σχ. 5.1). Το παιχνίδι αυτό ορίστηκε ως εξής :

Κάθε παιχνίδι αποτελείται από πέντε σετ και σε κάθε σετ νικητής είναι είτε ο πρώτος παίχτης που θα έχει δύο βαθμούς διαφορά είτε ο πρώτος που θα φτάσει στους 3 πόντους. Ο τελικός νικητής είναι αυτός που θα έχει κατακτήσει 3 ή περισσότερα σετ στο τέλος του παιχνιδιού. Στην αρχή κάθε σετ η θέση των οχημάτων είναι τυχαία στον χώρο, με την προϋπόθεση όμως να υπάρχει οπτική επαφή.

Η κατάσταση του παιχνιδιού καθορίζεται από το πρόσημο της νόρμας \mathcal{D} :

$$\mathcal{D} = \sqrt{(x_h - x_m)^2 + (y_h - y_m)^2 + \frac{(\psi_h - \theta)^2}{\pi}} - 0.6 \quad (5.1.1)$$

$$\text{Εάν } \begin{cases} \mathcal{D} > 0, & \text{νίκη εναέριου} \\ \mathcal{D} < 0, & \text{νίκη επίγειου} \end{cases} \quad (5.1.2)$$

Ο παράγοντας 0.6 έχει επιλεγεί κρίνοντας ότι όταν η νόρμα $\mathcal{D} < 0$ ορίζει μία αρκετά κοντινή απόσταση θέσης μεταξύ των δύο οχημάτων.

Η νόρμα αυτή υπολογίζεται σε κάθε πεπερασμένο χρόνο T_s και ανάλογα με την κατάστασή της, όπως δείχνει η εξίσωση 5.1.2 ένας πόντος δίνεται στο αντίστοιχο όχημα. Ο πρώτος που θα συλλέξει 100 πόντους παίρνει μία νίκη στο αντίστοιχο σετ. Οι πόντοι στην ουσία αντιπροσωπεύουν χρονικό διάστημα στο οποίο κάποιο από τα οχήματα επικρατεί του άλλου.

Το επίγειο όχημα μπορεί να επικρατήσει με δύο διαφορετικούς τρόπους:



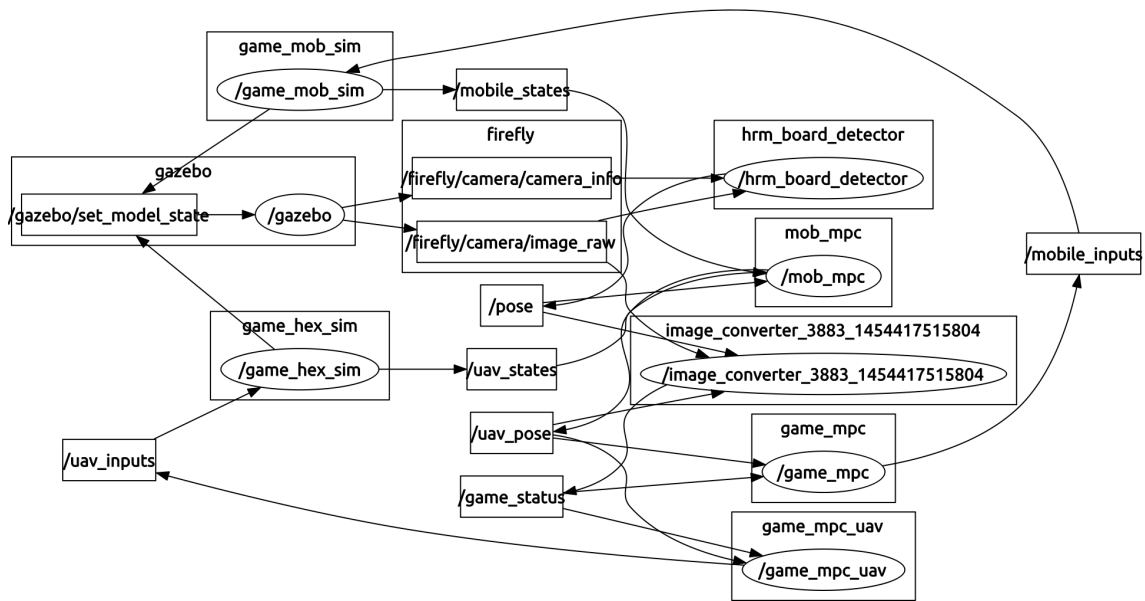
Σχήμα 5.1: Το περιβάλλον προσομοίωσης του παιχνιδιού με χρήση Gazebo

- Να συγκεντρώσει 100 πόντους.
- Να αποφύγει το πεδίο όρασης του εναέριου οχήματος.

Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι όταν χάνεται η οπτική επαφή, τα οχήματα σταματούν την επίλυση του προβλήματος ελέγχου και εφαρμόζουν την τροχιά εισόδων που έχουν ήδη υπολογίσει μέχρι το τέλος του ορίζοντα, μέχρις ότου να ανακτηθεί η επαφή. Σε αντίθετη περίπτωση, που αυτό δεν συμβεί, νικητής του παιχνιδιού αυτού είναι το επίγειο όχημα. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει και η παράμετρος t_g , που είναι ο χρόνος διάρκειας του παιχνιδιού.

Όσον αφορά τον ελεγκτή η επιλογή των τιμών στους πίνακες κόστους έγινε με βάση την απόδοση των οχημάτων. Για το εναέριο θέλω να είναι γρήγορη η απόκριση με σταθερή συμπεριφορά όμως και να μπορεί να εκτελεί hover.

Η προσομοίωση έγινε στο Gazebo που είναι ένας προσομοιωτής που συνεργάζεται με το ρομποτικό λειτουργικό σύστημα ROS. Για να γίνει η προσομοίωση και το περιβάλλον του παιχνιδιού, χρησιμοποιήθηκε η προγραμματιστική γλώσσα C++ και κατασκευάστηκαν κόμβοι (nodes) και θέματα (topics) που είναι ο τρόπος επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης μεταξύ των κόμβων. Όλα αυτά σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στην ανεπτυγμένη μέχρι τώρα θεωρία, αναπαραστώντας το παίγνιο όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2 με την παραλλαγή που έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 4.2.2.2. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το πως διαμορφώνεται η επικοινωνία των κόμβων κατά την διάρκεια της εκτέλεσης μιας προσομοίωσης.



Σχήμα 5.2: Αναπαράσταση του υπολογιστικού γράφου του ROS

5.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Με βάση την ανάλυση που έγινε στο 5.1 εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις. Τα σε-νάρια ελέγχθηκαν με ολοένα αυξανόμενη πολυπλοκότητα. Συγκεκριμένα στο Παίγνιο I και οι δύο παίχτες δεν έχουν καμία γνώση της στρατηγικής του άλλου και ο παρά-γοντας όρασης είναι $k = 0$ της εξίσωσης 4.2.3 και για τα δύο οχήματα. Στο Παίγνιο II, ο παράγοντας γίνεται $k = 1$, προστίθεται δηλαδή όρος της όρασης στην αντικει-μενική συνάρτηση του εναέριου μόνο. Το εναέριο όχημα αποκτά γνώση επιπέδου ένα στο Παίγνιο III. Ο όρος της όρασης προστίθεται και στο επίγειο στο Παίγνιο IV, και στο Παίγνιο V το επίγειο αποκτά και αυτό επίπεδο γνώσης ένα. Τέλος στο Παίγνιο VI το επίγειο όχημα αποκτά γνώση επιπέδου δύο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 5.2:

# Παιγνίου	Αριθμός νικών		Συνολικό Σκορ	Μέσος Χρόνος (sec)
	Εναέριο	Επίγειο		
I	0	15	0 : 30	51.36
II	0	15	0 : 30	50.00
III	14	1	29 : 3	54.36
IV	15	0	34 : 4	72.26
V	15	0	32 : 2	62.96
VI	14	1	33 : 7	74.06

Πίνακας 5.1: Αναλυτικά Αποτελέσματα

Είναι εμφανές από τον πίνακα ότι τα διαφορετικά σενάρια οδηγούν και σε διαφορετικά αποτελέσματα.

Ερμηνεία Αποτελεσμάτων:

Το εναέριο με ελεγκτή χωρίς γνώση χάνει από το επίγειο όχημα, τις περισσότερες φορές, παρόλο που έχει καλύτερες δυνατότητες, π.χ ταχύτητα. Το αποτέλεσμα αυτό αποδίδεται στο δικαίωμα του επίγειου οχήματος να επιλέγει πρώτο την στρατηγική που θα ακολουθήσει και με βάση αυτό το εναέριο να καθορίζει την δική του, κάτι που το εμποδίζει να εκμεταλλευτεί το μέγιστο των δυνατοτήτων του. Όταν τώρα το εναέριο όχημα επιλύει το συνολικό πρόβλημα και καθορίζει την στρατηγική του άλλου και την θέση του κατά την διάρκεια του ορίζοντα, μπορεί να διατηρηθεί σε αρκετά κοντινή θέση με τον κινούμενο στόχο του, και να νικήσει το παιχνίδι. Η παράμετρος της όρασης είναι χρήσιμη για το επίγειο όχημα διότι του προσφέρει μία επιπλέον μανούβρα αποφυγής, καθυστερώντας έτσι την νίκη του εναερίου. Τα επιπλέον επίπεδα σκέψης καθιστούν το επίγειο όχημα πιο ικανό στην αποφυγή αλλά δεν μπορούν να εγγυηθούν την νίκη του επίγειου, παρόλο που ο αντίπαλος του έχει ελεγκτή χαμηλότερου επιπέδου σκέψης.

Στα σχήματα 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται τα σχετικά διανύσματα κατάστασης κατά την διάρκεια του παιχνιδιού. Στο πρώτο σχήμα, οι σχετικές καταστάσεις πλησιάζουν στις επιθυμητές τιμές 0, επομένως γίνεται φανερό ότι το εναέριο προσεγγίζει με περισσότερη επιτυχία το κινούμενο επίγειο όχημα σε σχέση με το δεύτερο σχήμα όπου το επίγειο διατηρεί κάποια απόσταση από το εναέριο και άρα επικρατεί.

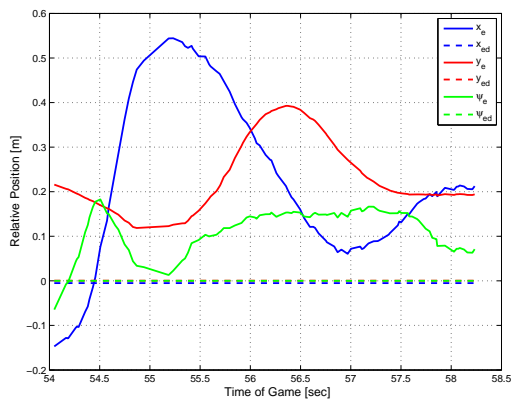
Στο ίδιο συμπέρασμα μπορούμε να καταλήξουμε παρατηρώντας τα σχήματα 5.5 και 5.6 όπου απεικονίζονται οι τροχιές των δύο οχημάτων στο επίπεδο XY και ο προσανατολισμός τους κάθε φορά. Και σε αυτά τα σχήματα γίνεται η ίδια με παραπάνω διάκριση, όπου στο πρώτο επικρατεί το εναέριο και στο δεύτερο το επίγειο, κάτι που φαίνεται στις τροχιές που ακολουθούν.

Πιο αναλυτικά η διαφορά των δύο αυτών περιπτώσεων φαίνεται στο σχήμα 5.7 όπου απεικονίζεται η υπολογιζόμενη νόρμα \mathcal{D} μαζί με το κριτήριο της, κάτι που έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 5.1 και καθορίζει το αποτέλεσμα του παιχνιδιού.

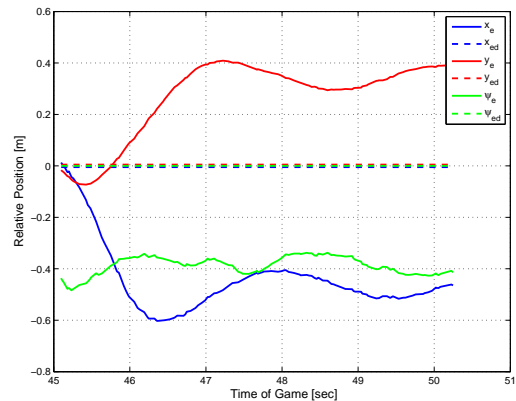
Στα σχήματα 5.8 και 5.9 η σημαντικότερη διαφορά της γνώσης ή μη στις προβλέψεις του MPC είναι ότι οι είσοδοι του ελεγκτή δίνονται έτσι ώστε στο τέλος του ορίζοντα εκτιμά ότι θα προσπεράσει τον αρχικό στόχο. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της γνώσης εκτιμά και προβλέπει ότι όταν θα φτάσει σε εκείνο το σημείο ο άλλος που προπορεύεται δεν θα είναι εκεί αλλά κάπου πιο μπροστά. Για αυτό ακριβώς τον λόγο η γνώση το καθιστά δυνατό να προσεγγίσει με καλύτερη ακρίβεια το επίγειο όχημα.

Τέλος στα σχήματα 5.10 και 5.11, όσον αφορά το MPC του επίγειου ρομπότ αυτό που παρατηρείται είναι ότι όταν λύνει το συνολικό πρόβλημα και έχει επομένως γνώση του αντιπάλου μπορεί και επιτυγχάνει τις τελικές προβλεπόμενες καταστάσεις ενώ χωρίς γνώση έχει μεγαλύτερη απόκλιση. Επίσης η γνώση του δίνει την δυνατότητα να εκτελεί μανούβρες αλλαγής κατεύθυνσης κάτι που οφείλεται και στις μανούβρες αποφυγής του οπτικού πεδίου της κάμερας και φαίνεται στο σχήμα 5.10 από τις ταλαντώσεις του ψ_e .

Παρόμοια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και από τα διαγράμματα 5.12, 5.13, 5.14. Στις εικόνες αυτές παρουσιάζεται η τιμή της πραγματικής νόρμας \mathcal{D} σε αντιπαράβολη με την προβλεπόμενη τιμή της νόρμας \mathcal{D}_{mpc} που προκύπτει από τον ελεγκτή του



Σχήμα 5.3: Το διάνυσμα κατάστασης των σχετικών θέσεων και προσανατολισμού \mathbf{x}_e και οι τελικές επιθυμητές κατά την διάρκεια μιας προσομοίωση παιχνίδια όπου επικρατεί το εναέριο όχημα (Παίγνιο III).

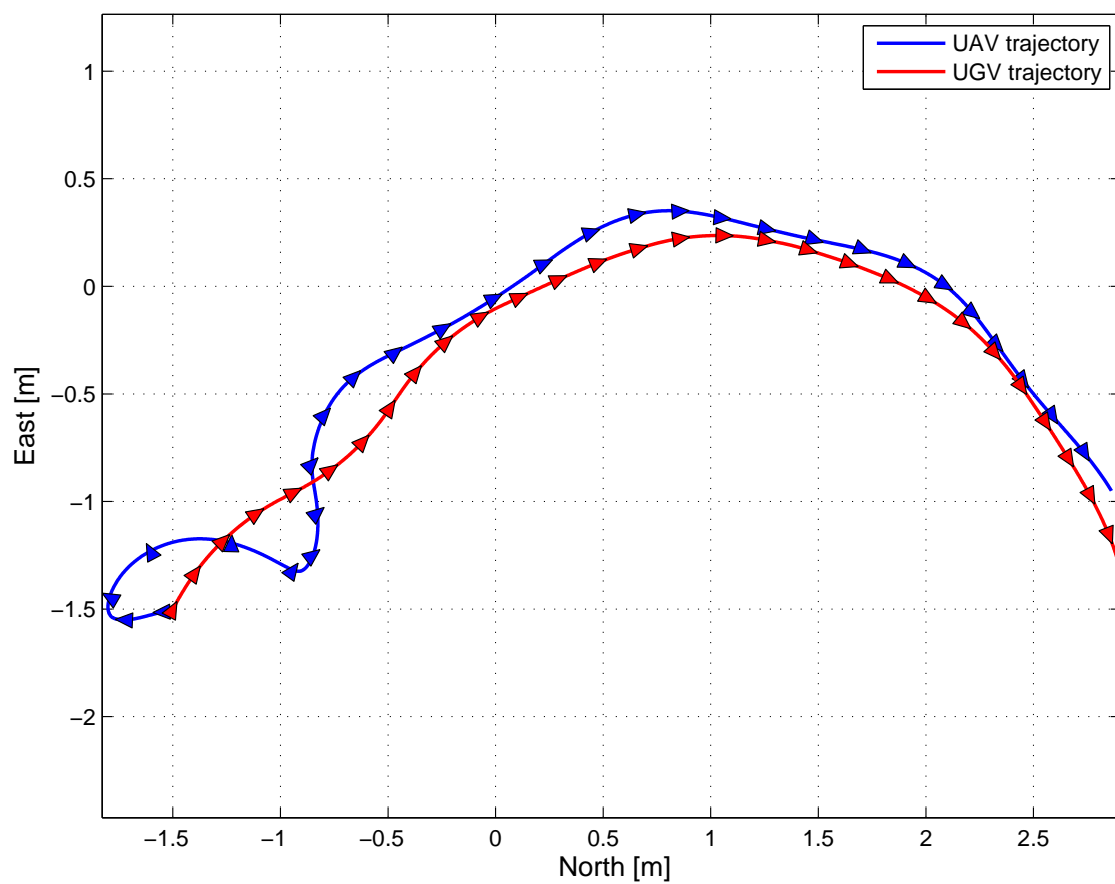


Σχήμα 5.4: Το διάνυσμα κατάστασης των σχετικών θέσεων και προσανατολισμού \mathbf{x}_e και οι τελικές επιθυμητές κατά την διάρκεια μιας προσομοίωση παιχνίδια όπου επικρατεί το επίγειο όχημα (Παίγνιο I-II).

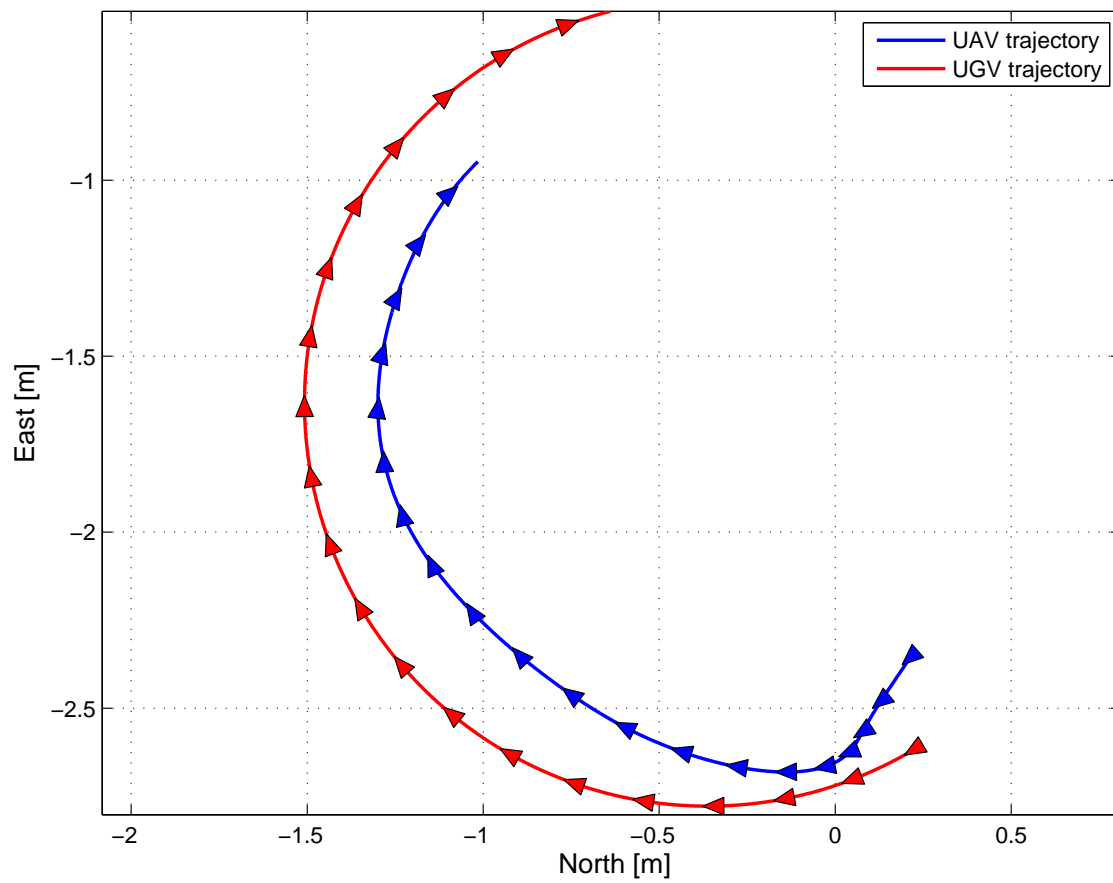
εναέριου οχήματος. Στο διάγραμμα 5.12 φαίνεται ότι ενώ η τιμή της νόρμας είναι πάνω από το όριο που έχει τεθεί, ο ελεγκτής προβλέπει ότι η νόρμα στο τέλος του ορίζοντα θα βρίσκεται κάτω από το όριο. Για αυτόν τον λόγο, με αυτόν τον νόμο ελέγχου δεν καταφέρνει το εναέριο όχημα να προσεγγίσει το επίγειο με ακρίβεια. Αντίθετα στο διάγραμμα 5.13 φαίνεται ότι η προβλεπόμενη νόρμα είναι πιο κοντά στην πραγματική λόγω της γνώσης που υπάρχει σε αυτήν την περίπτωση του παιχνίδια. Για αυτό και σε αυτόν τον τύπο παιχνίδια επικρατεί το εναέριο όχημα. Τέλος στο διάγραμμα 5.14 παρατηρείται μία περισσότερο ταλαντωτική συμπεριφορά της νόρμας \mathcal{D} σε σχέση με της προηγούμενες περιπτώσεις. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην γρήγορη αλλαγή της σχετικής γωνίας yaw. Η γρήγορη αλλαγή αυτή είναι αποτέλεσμα της προσθήκης της γνώσης και του όρου της όρασης στο ελεγκτή του επίγειου οχήματος, ο οποίος καθορίζει αυτήν την τεχνική στο επίγειο ως την βέλτιστη για την αποφυγή του εναέριου.

5.2.1 Ισορροπία Παιχνίδια

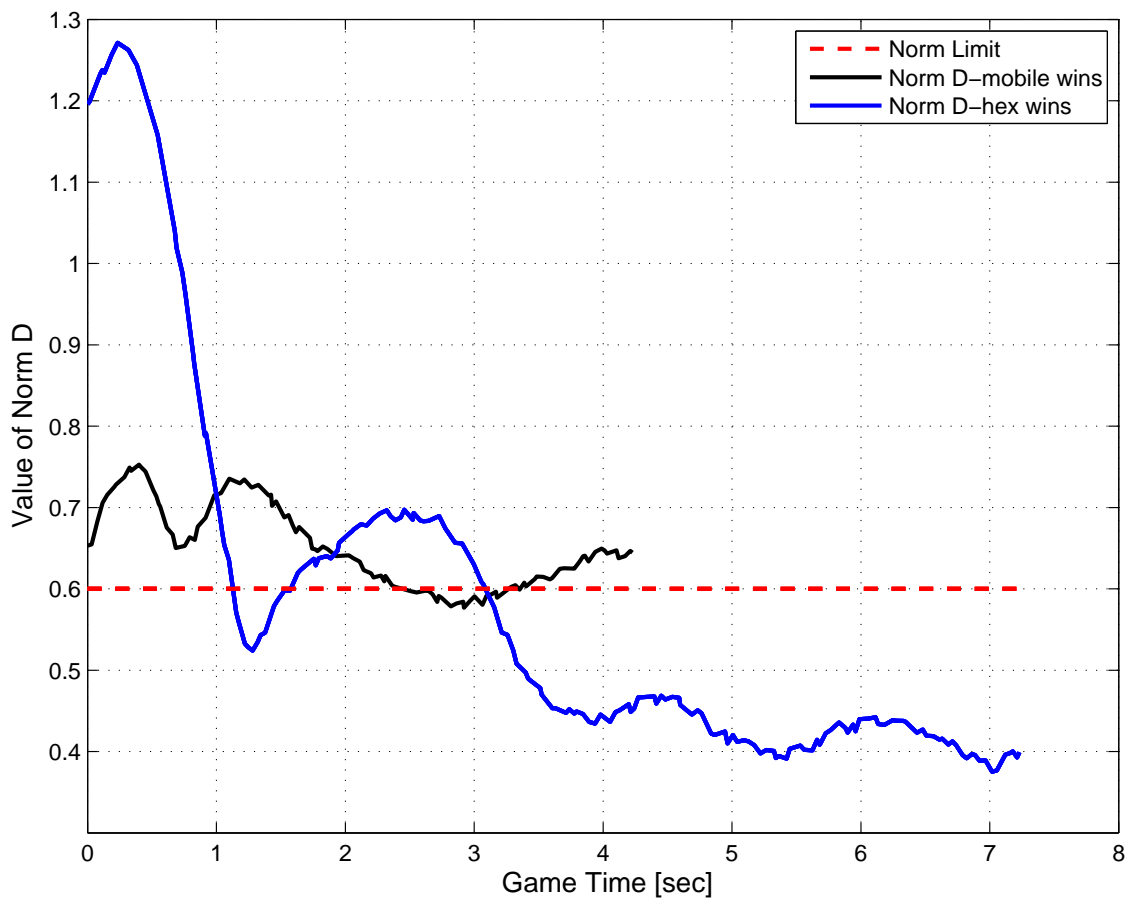
Ενδιαφέρον παρουσιάζει σε τέτοιες περιπτώσεις η απόδειξη της ισορροπίας τους. Στην περίπτωση αυτής της εργασίας, το παιχνίδι που εξετάστηκε όπως έχει αναφερθεί είναι παιχνίδι 2-παιχτών σταθερού αθροίσματος. Σε τέτοια παιχνίδια είναι αποδεδειγμένο ότι όταν οι παίχτες επιλέγουν να παίξουν την στρατηγική minimax/maximin τότε το παιχνίδι αυτό έχει ισορροπία κατά Nash. Άρα μπορούμε να πούμε ότι στις προσομοιώσεις που έγιναν οι δύο παίχτες επιλέγουν τις καλύτερες τους κινήσεις που οδηγούν σε ισορροπία και δεν έχουν καμία προθυμία να αλλάξουν την στρατηγική τους διότι αυτό θα σημαίνει ότι τελικά θα χάσουν από τον ανταγωνιστή τους.



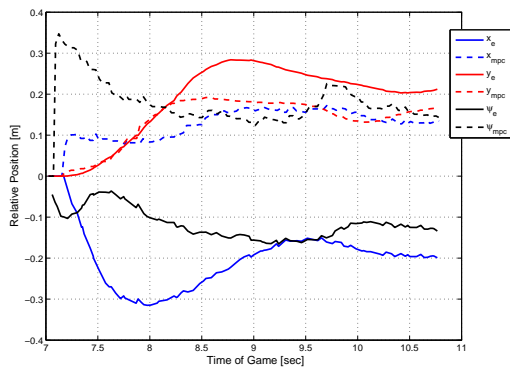
Σχήμα 5.5: Απεικόνιση των τροχιών των δύο οχημάτων στο επίπεδο XY μιας προσομοίωσης παιχνιδιού όπου επικρατεί το εναέριο όχημα (Παίγνιο III).



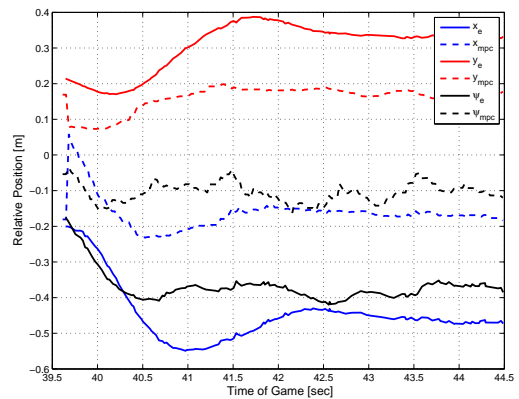
Σχήμα 5.6: Απεικόνιση των τροχιών των δύο οχημάτων στο επίπεδο XY μιας προσομοίωσης παιχνιδιού όπου επικρατεί το επίγειο όχημα (Παίγνιο I-II).



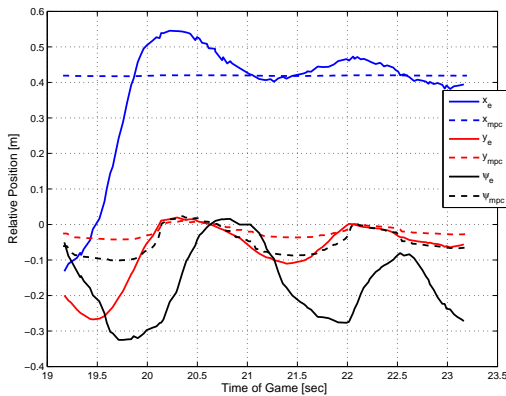
Σχήμα 5.7: Η τιμή της πραγματικής νόρμας D κατά την διάρκεια δύο παιγνίων με διαφορετικό αποτέλεσμα.



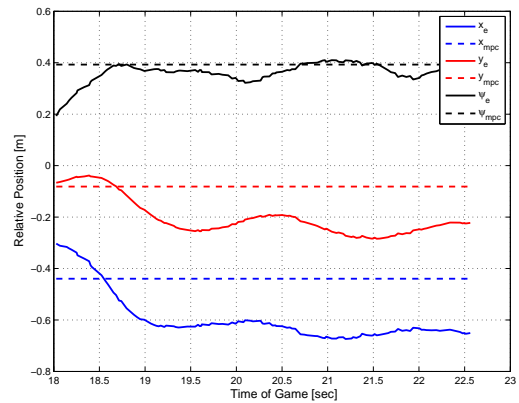
Σχήμα 5.8: Γραφική αναπαράσταση του σχετικού διανύσματος κατάστασης x_e και των προβλεπόμενων τελικών καταστάσεων του MPC του εναέριου οχήματος με γνώση της αντίπαλης στρατηγικής.



Σχήμα 5.9: Γραφική αναπαράσταση του σχετικού διανύσματος κατάστασης x_e και των προβλεπόμενων τελικών καταστάσεων του MPC του εναέριου οχήματος χωρίς γνώση της αντίπαλης στρατηγικής.



Σχήμα 5.10: Γραφική αναπαράσταση του σχετικού διανύσματος κατάστασης \mathbf{x}_e και των προβλεπόμενων τελικών καταστάσεων του MPC του επίγειου οχήματος με γνώση της αντίπαλης στρατηγικής και τεχνικές αποφυγής του οπτικού πεδίου.

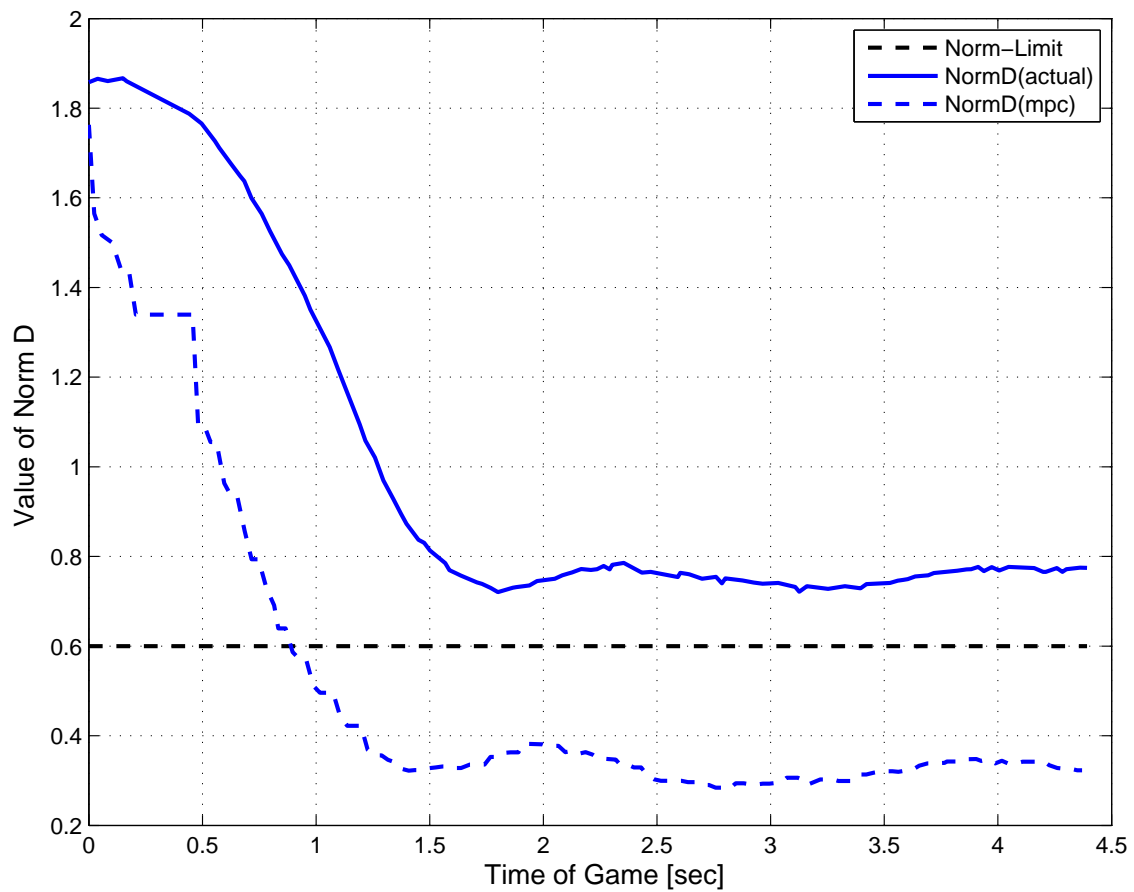


Σχήμα 5.11: Γραφική αναπαράσταση του σχετικού διανύσματος κατάστασης \mathbf{x}_e και των προβλεπόμενων τελικών καταστάσεων του MPC του επίγειου οχήματος χωρίς γνώση της αντίπαλης στρατηγικής.

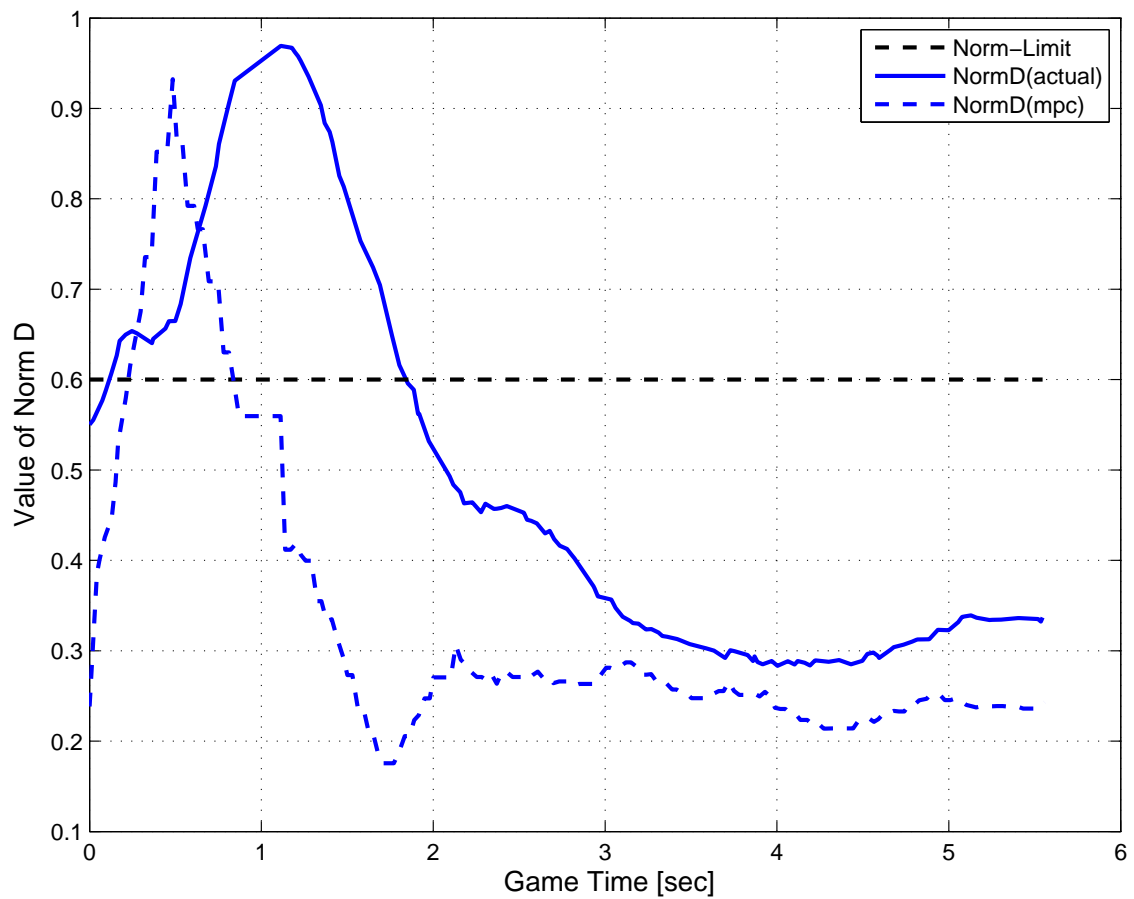
5.2.2 Μανούβρες/Τεχνικές Καταδίωξης – Αποφυγής

Στο σημείο αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να παρουσιαστεί μία σύγκριση των τεχνικών/μανούβρων που ακολουθούν τα οχήματα και προκύπτουν από τους προβλεπτικούς ελεγκτές με τεχνικές που ακολουθούνται σε αληθινά σενάρια, όπου τα οχήματα τα χειρίζονται άνθρωποι. Μία τέτοια μελέτη και ανάλυση τακτικών έχει γίνει από τον Shaw στο βιβλίο του [21]. Αν και ως επί το πλείστον αφορά εναέρια οχήματα, έχει εξετάσει και ανταγωνισμό μεταξύ δύο οχημάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, κάτι που μπορεί να ταυτιστεί με την περίπτωση αυτής της εργασίας.

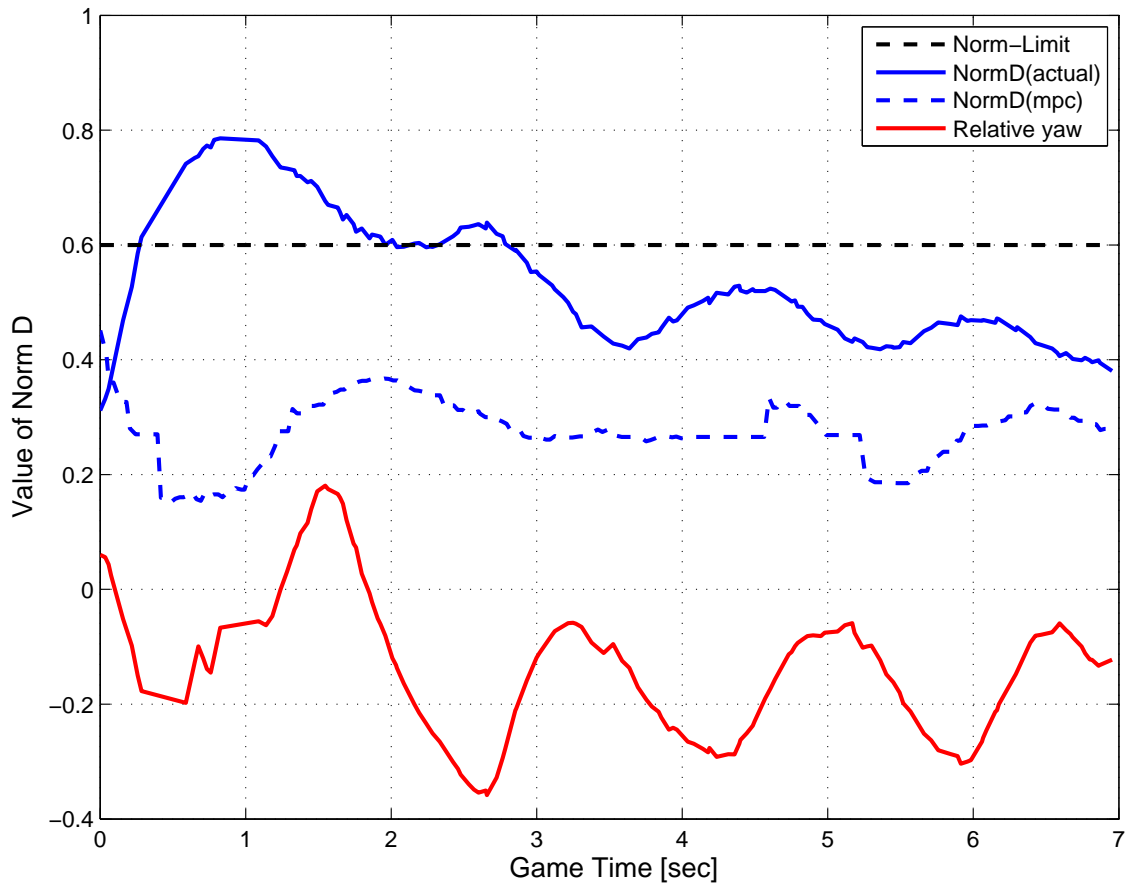
Παρατίθεται ενδεικτικά και με μία σύντομη επεξήγηση ορισμένες από τις τεχνικές μανούβρες του βιβλίου που παρατηρήθηκαν και στις τροχιές των προσομοιώσεων και φαίνονται και στα σχήματα 5.5 και 5.6. Μια χαρακτηριστική μανούβρα καταδίωξης που παρατηρήθηκε και στις προσομοιώσεις της εργασίας αυτής είναι η τεχνική του lag pursuing(5.15). Στην περίπτωση αυτή ο διώκτης ακολουθεί την τροχιά του αντιπάλου του και προσπαθεί να ευθυγραμμίσει τους προσανατολισμούς τους. Χρησιμοποιείται κυρίως όταν έχεις να αντιμετωπίσεις πιο αργούς αντιπάλους, όπως ακριβώς και στην περίπτωσή μας. Επίσης ως αμυντική στρατηγική για αυτήν την περίπτωση προτείνεται συχνή αλλαγή της κατεύθυνσης και της ταχύτητας, κάτι που όπως έχει παρατηρηθεί κάνει και το επίγειο ρομπότ για να αποφύγει το εναέριο. Μια επιπλέον κατάσταση που παρατηρήθηκε είναι αυτή των flat scissors. Αυτή είναι αποτέλεσμα συχνών υπεραχοντίσεων (overshoot) και αντίστροφων χρονισμών (reversal timing) των δύο οχημάτων. Μία σύγκριση των θεωρητικών και των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που είναι διακριτή η περίπτωση αυτή μπορεί να γίνει στα σχήματα 5.5 και 5.16.



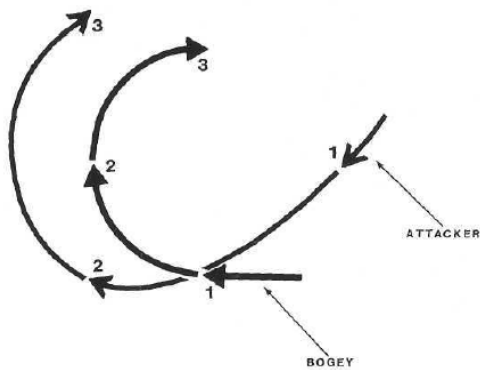
Σχήμα 5.12: Η τιμή της πραγματικής νόρμας \mathcal{D} και της προβλεπόμενης νόρμας του ελεγκτή του εναέριου κατά την διάρκεια ενός παιχνιδιού (τύπου I-II).



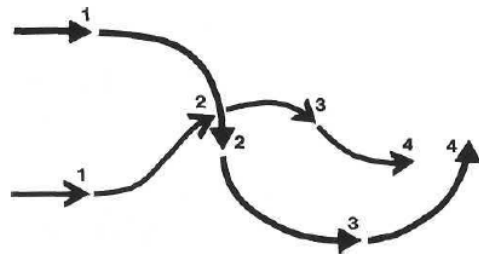
Σχήμα 5.13: Η τιμή της πραγματικής νόρμας \mathcal{D} και της προβλεπόμενης νόρμας του ελεγκτή του εναέριου κατά την διάρκεια ενός παιχνιδιού (τύπου III).



Σχήμα 5.14: Η τιμή της πραγματικής νόρμας \mathcal{D} , της προβλεπόμενης νόρμας του ελεγκτή του εναέριου και του σχετικού προσανατολισμού yaw (rad) κατά την διάρκεια ενός παιχνιδιού (τύπου IV).



Σχήμα 5.15: Γραφική αναπαράσταση της τεχνικής μανούβρας lag pursuit.



Σχήμα 5.16: Γραφική αναπαράσταση της κατάστασης flat scissors.

Κεφάλαιο 6

Πειραματικά Δεδομένα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στα προκαταρκτικά πειράματα που εκτελέστηκαν. Αφού προηγήθηκαν οι προσομοιώσεις, για την ανάλυση της εγκυρότητας των σχεδιασμένων ελεγκτών με βάση την θεωρία της εργασίας αυτής, στην συνέχεια έγινε προσπάθεια να πραγματοποιηθούν οι ίδιες δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες. Στην συνέχεια θα παρατεθεί το «στήσιμο» και οι συνθήκες των πειραμάτων, λεπτομέρειες για το πως πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα και τα αποτελέσματα.

6.1 Περιγραφή Πειραμάτων

Πριν την εκτέλεση ενός τελικού πειράματος κάποιου σεναρίου που στηρίζεται στις προσομοιώσεις θεωρήθηκε θεμιτό να χωριστεί το πείραμα και να εκτελεστούν πρώτα δύο υποπειράματα σε προκαταρκτικό στάδιο. Τα πειράματα χωρίστηκαν ως εξής:

- Πείραμα για την εξέταση του ελεγκτή του εναέριου οχήματος, όπου το επίγειο κινείται με τηλεχειρισμό (εικόνα 6.1) .
- Πείραμα για την εξέταση του ελεγκτή του επίγειου οχήματος, όπου το εναέριο είναι σε αδράνεια και μετακινείται με το χέρι (εικόνα 6.2).

Επομένως όταν και στην δύο περιπτώσεις τα πειράματα ανταποκριθούν στις ζητούμενες απαιτήσεις, τότε είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί το συνολικό πείραμα με τους δύο ελεγκτές να λειτουργούν ταυτόχρονα καθιστώντας τα οχήματα αυτόνομα.

6.2 Συνένωση Αισθητήρων για Εκτίμηση Κατάστασης

Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί το πείραμα, όπως είναι γνωστό πέραν του ελέγχου είναι απαραίτητη και η εκτίμηση της κατάστασης των οχημάτων. Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3 το εναέριο όχημα διαθέτει ενσωματωμένα διάφορα μετρητικά. Το κάθε μετρητικό από αυτά προσφέρει μία εκτίμηση ενός μέρους του διάνυσματος κατάστασης του οχήματος σε μία συγκεκριμένη συχνότητα f_m , συχνά διαφορετική για κάθε μετρητικό. Είναι φανερό λοιπόν, ότι για να προκύψει το συνολικό διάνυσμα κατάστασης πρέπει να γίνει συνένωση όλων των εκτιμήσεων των χρησιμοποιούμενων



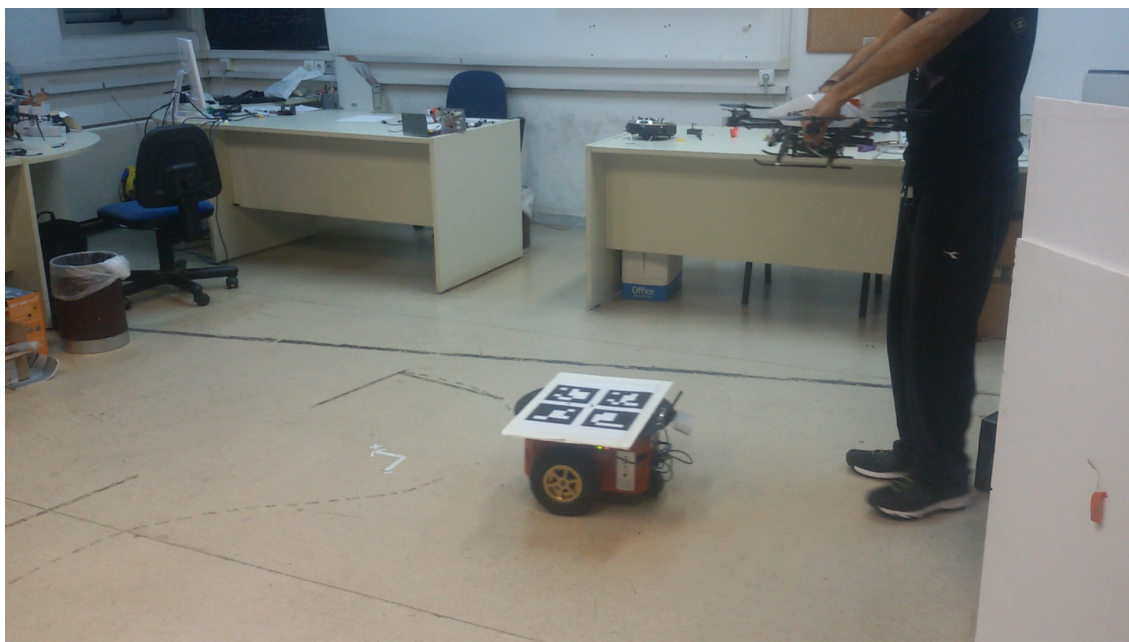
Σχήμα 6.1: Εικόνα από τα προκαταρκτικά πειράματα του ελεγχτή εναέριου οχήματος

αισθητήρων ώστε να προκύψει η συνολική εκτίμηση. Επίσης γίνεται κατανοητό ότι η συνολική εκτίμηση θα πρέπει να προκύπτει υπό μία κοινή συχνότητα f_t , η οποία θα πρέπει να τηρεί ορισμένες απαιτήσεις. Θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την συχνότητα επίλυσης του MPC αφού για να κλείσει ο βρόχος ελέγχου απαιτεί την συνολική εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης, όπως επίσης θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να ικανοποιεί την δυναμική του εναέριου οχήματος, αφού είναι ένα όχημα του οποίου η κατάσταση αλλάζει αρκετά γρήγορα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η συχνότητα της δειγματοληψίας που απαιτείται είναι $T_s \approx 35Hz$. Τον σκοπό αυτό εξυπηρετεί η χρήση φίλτρων, και κατά κύριο λόγο το φίλτρο Kalman.

Πέραν των ενσωματωμένων αισθητήρων, έχει προστεθεί μία κάμερα όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2. Η κάμερα αυτή αποτελεί τον βασικό αισθητήρα του πειράματος, που προσδίδει την εκτίμηση της θέσης και του προσανατολισμού με συχνότητα $f_c \approx 50Hz$. Η εκτίμηση της θέσης μέσω της κάμερας γίνεται με χρήση στόχου με γνωστά ασπρόμαυρα μοτίβα (ArUco marker), ο οποίος εντοπίζεται στα καρέ της κάμερας, δίνοντας την σχετική τους θέση. Ο στόχος τοποθετείται επάνω στο επίγειο όχημα, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.3, και όντας η κάμερα τοποθετημένη επάνω στο εναέριο όχημα προκύπτει με συχνότητα f_c η εκτίμηση του διανύσματος της σχετικής τους θέσης και προσανατολισμού.

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση αυτή, έγινε χρήση των πληροφοριών του επιταχυνσιόμετρου, του βαρομέτρου, και του γυροσκοπίου. Επιπλέον η κάμερα πέραν της εκτίμησης της σχετικής θέσης, με χρήση οπτικής ροής (optical flow) προσέφερε και μία εκτίμηση του διανύσματος της ταχύτητας.

Για το επίγειο όχημα δεν έγινε προσθήκη κάποιου επιπλέον αισθητήρα διότι η μόνη πληροφορία που ενδιέφερε ήταν η σχετική θέση, λόγω των απλοποιήσεων που έγιναν. Πιο συγκεκριμένα, αμελήθηκε η δυναμική κατάσταση του επίγειου ρομπότ, επομένως δεν χρειαζόταν εκτίμηση της ταχύτητας. Επίσης το επίγειο όχημα θεωρήθηκε ότι



Σχήμα 6.2: Εικόνα από τα προκαταρκτικά πειράματα του ελεγκτή επίγειου οχήματος

κινείται στο επίπεδο χώρο, άρα δεν χρειζόταν επιπλέον πληροφορία για τις γωνίες πέραν της γωνίας ως προς τον άξονα z . Σε περίπτωση που η γνώση αυτή ήταν απαραίτητη θα έπρεπε να γίνει προσθήκη IMU, κάμερας για οπτική ροή, και χρήση της οδομετρίας που προσφέρεται από το επίγειο ρομπότ. Με συνδυασμό όλων αυτών θα προέκυπτε η εκτίμηση του πλήρους διανύσματος κατάστασης, ωστόσο δεν κρίθηκε αναγκαίο.

6.2.1 Εφαρμογή του Φίλτρου

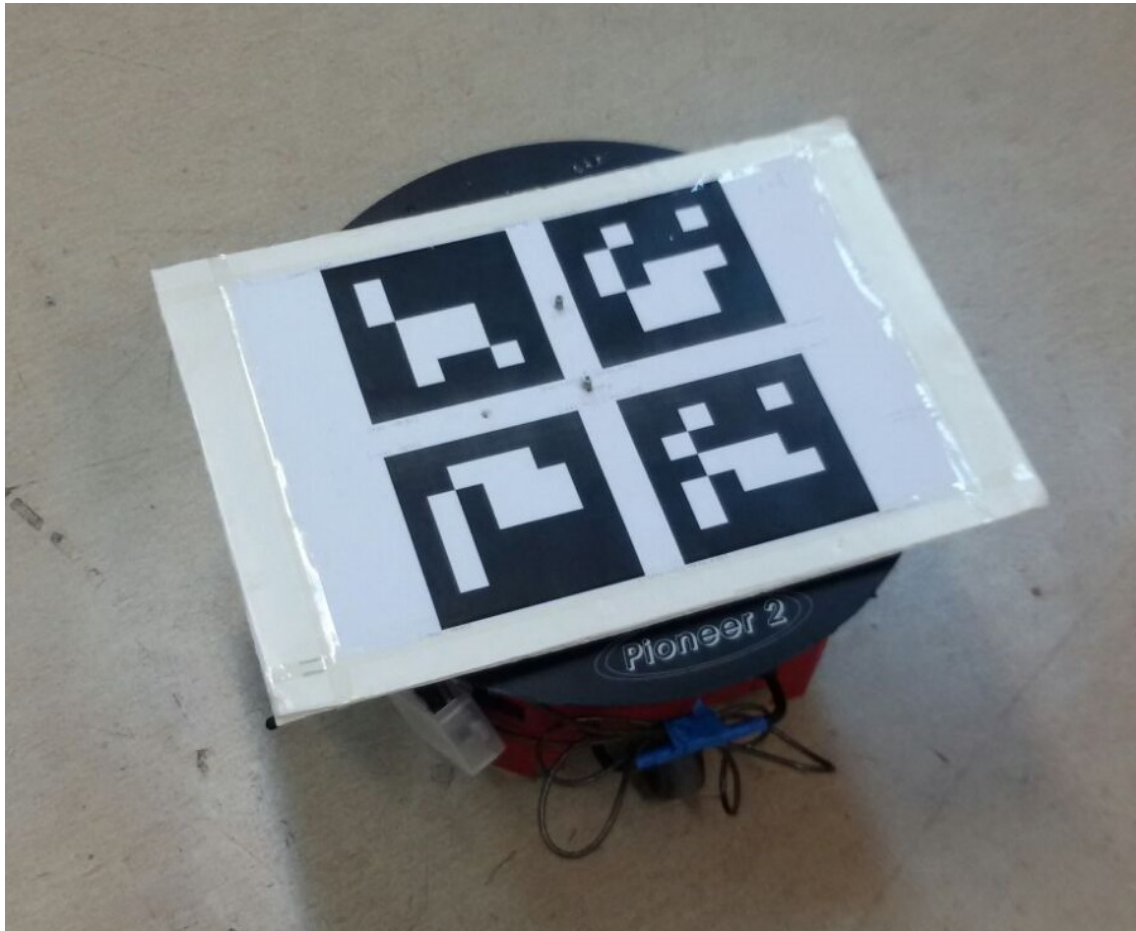
Για την συνένωση των αισθητήρων για το εναέριο όχημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική του στατικού φίλτρου Kalman. Ωστόσο σε περιπτώσεις μη-γραμμικότητας είναι πιο θεμιτό να χρησιμοποιηθεί το εκτεταμένο φίλτρο Kalman (extended Kalman filter).

Ο τρόπος εφαρμογής του φίλτρου παρουσιάζεται στην συνέχεια. Το σύστημα είναι:

$$x_{t+1} = f(x_t, u_t) + w_t \quad (6.2.1)$$

$$z_t = h(x_t) + v_t \quad (6.2.2)$$

όπου w_t και v_t είναι ο Gaussian θόρυβος διαδικασίας και παρατήρησης με διακύμανση Q_t και R_t αντίστοιχα.



Σχήμα 6.3: Ο στόχος ArUco τοποθετημένος στο επίγειο όχημα

Οι εξισώσεις του φίλτρου που εκτελούνται σε κάθε επανάληψη είναι:

$$\hat{x}_{t+1|t} = f(\hat{x}_{t|t}, u_t) \quad (6.2.3\alpha')$$

$$P_{t+1|t} = F_t P_{t|t} F_t^T + Q_t \quad (6.2.3\beta')$$

$$K_{t+1} = P_{t+1|t} H_t^T (H_t P_{t+1|t} H_t^T + R_t)^{-1} \quad (6.2.3\gamma')$$

$$P_{t+1|t+1} = (I - K_{t+1} H_t) P_{t+1|t} \quad (6.2.3\delta')$$

$$\hat{x}_{t+1|t+1} = \hat{x}_{t+1|t} + K_{t+1} [z_{t+1} - h(\hat{x}_{t+1|t})] \quad (6.2.3\epsilon')$$

όπου P είναι η εκτίμηση της διακύμανσης, K είναι το βέλτιστο κέρδος Kalman και F_t , H_t είναι οι Ιακωβιανές των πινάκων κατάστασης και παρατηρήσεων αντίστοιχα.

$$F_t = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_{t|t}, u=u_t}$$

$$H_t = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_{t|t-1}}$$

Το ενδιαφέρον στην περίπτωση μας είναι ότι σε κάθε βήμα δεν είναι ίδιος ο αριθμός των μετρητικών που στέλνουν πληροφορία, διότι το κάθε μετρητικό έχει δική του συ-

χνότητα. Επομένως αυτή η κατάσταση αυτή αντιμετωπίζεται καθιστώντας τον πίνακα H_t μεταβλητού μεγέθους ανάλογα με τον αριθμό των μετρητικών σε κάθε επανάληψη.

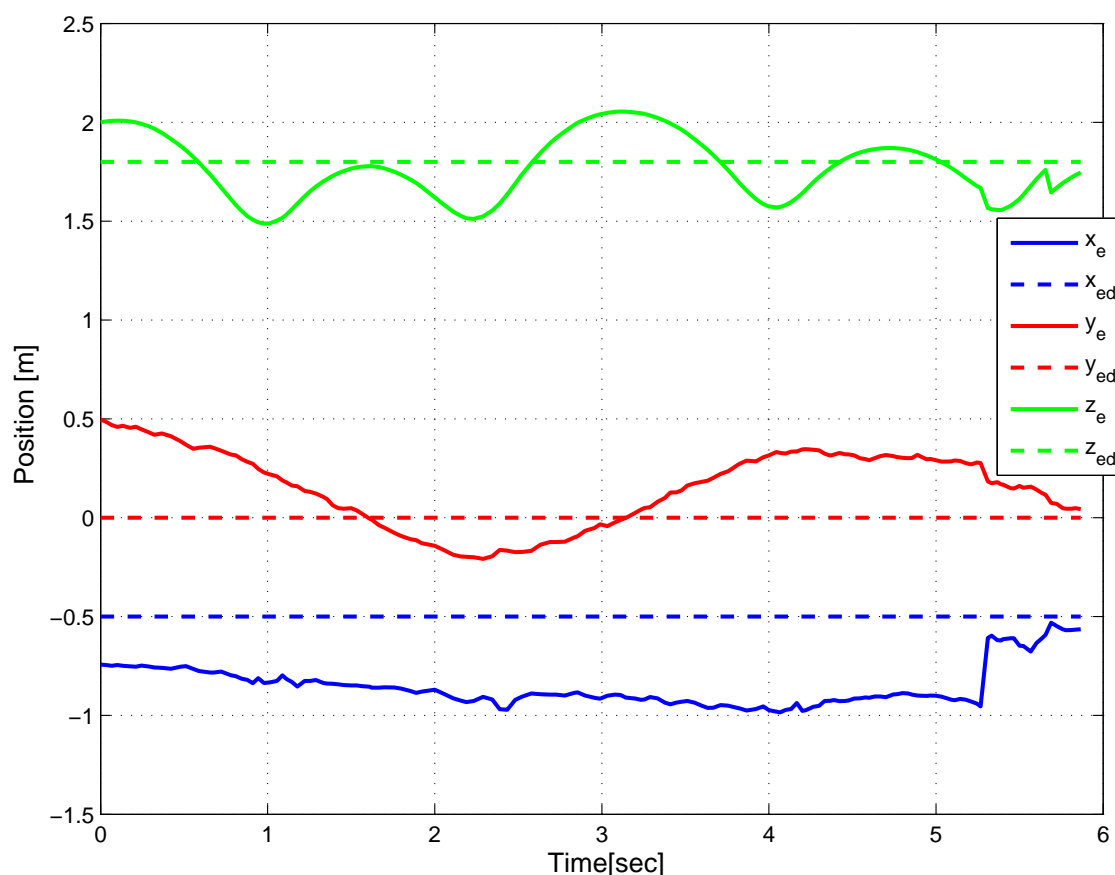
6.3 Αποτελέσματα

Πραγματοποιήθηκαν μία σειρά από πειράματα για τον έλεγχο του εναέριου ελεγκτή. Όπως αναφέρθηκε όταν ο εναέριος ελεγκτής ήταν σε λειτουργία το επίγειο όχημα κινούταν με τηλεχειρισμό έχοντας ένα στόχο ArUco τοποθετημένο επάνω του. Το πείραμα ξεκινά με το εναέριο όχημα σε μία τυχαία θέση αρκεί να υπάρχει οπτική επαφή με το επίγειο όχημα. Η τελικές επιθυμητές θέσεις του ελεγκτή είναι αυτές που φαίνονται με διακεκομμένες γραμμές στο διάγραμμα 6.4 και παρατηρούμε ότι επιτυχώς στο τέλος του παιχνιδιού που διήρκτησε περίπου $t_g \approx 6sec$ οι εκτιμώμενες σχετικές θέσεις καταλήγουν στις επιθυμητές, δηλαδή το εναέριο όχημα προσέγγισε το κινούμενο επίγειο. Ομοίως παρουσιάζεται σε διάγραμμα και η συμπεριφορά του σχετικού προσανατολισμού των οχημάτων 6.5. Σε αυτήν την περίπτωση όπως έχει τονιστεί ενδιαφέρει μόνο η σχετική γωνία ως προς τον άξονα z (yaw), ενώ οι άλλες σχετικές γωνίες pitch και roll είναι ελεύθερες χωρίς κανέναν περιορισμό. Αξίζει να αναφέρω ότι επιλέχθηκε χρονικός ορίζοντας $T_h = 15$ και ο χρόνος δειγματοληψίας των πειραμάτων είναι $T_s = 0.03sec$. Τέλος παρουσιάζονται και οι καθορισμένες εισοδοί του εναέριου οχήματος για το πείραμα αυτό (σχήμα 6.6). Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα οι προκύπτουσες εισοδοί από τον ελεγκτή εμπίπτουν στα φυσικά όρια των δυνατοτήτων του εναέριου οχήματος. Η είσοδος $thrust \in [0 \ 1]$ αντιστοιχεί σε δύναμη ανύψωσης $[0 \ 36N]$ όπου για $thrust \approx 0.49$ το όχημα εκτελεί hover υπό φυσιολογικές καιρικές συνθήκες.

6.4 Βελτιώσεις Πειραμάτων

Όπως παρατηρήθηκε σε εργαστηριακές δοκιμές και σε πειράματα, η αδυναμία ορισμένων αισθητήρων οδηγεί σε εκτιμήσεις χαμηλής ακρίβειας. Πιο συγκεκριμένα στο βαρόμετρο που είναι ο βασικός αισθητήρας του ύψους πτήσης, όταν δεν έχει καρέ, παρατηρείται ένας μη συστηματικός θόρυβος που οδηγεί σε απόκλιση της εκτίμησης του ύψους από το πραγματικό, όταν ο στόχος εξέρχεται της εικόνας της κάμερας που λόγω και της κίνησης του στόχου είναι κάτι αρκετά πιθανό. Αυτός ήταν και ο κύριος λόγος που τα πειράματα ήταν μικρής διάρκειας. Το πρόβλημα επιβεβαιώθηκε ότι ήταν στον βαρόμετρο διότι σε πειράματα αιώρησης (hover) που έγιναν πάνω από τον στόχο επιτεύχθηκε διατήρηση του ζητούμενου ύψους για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης η εκτίμηση του προσανατολισμού μέσω των στόχων ArUco, παρατηρήθηκε ότι ορισμένες φορές δείχνει ακραία αποτελέσματα (outliers) που ακόμα και το φίλτρο αδυνατεί να διορθώσει. Επομένως αυτές οι συνθήκες σε ένα δυναμικό πρόβλημα ελέγχου το καθιστούν αρκετά δύσκολο.

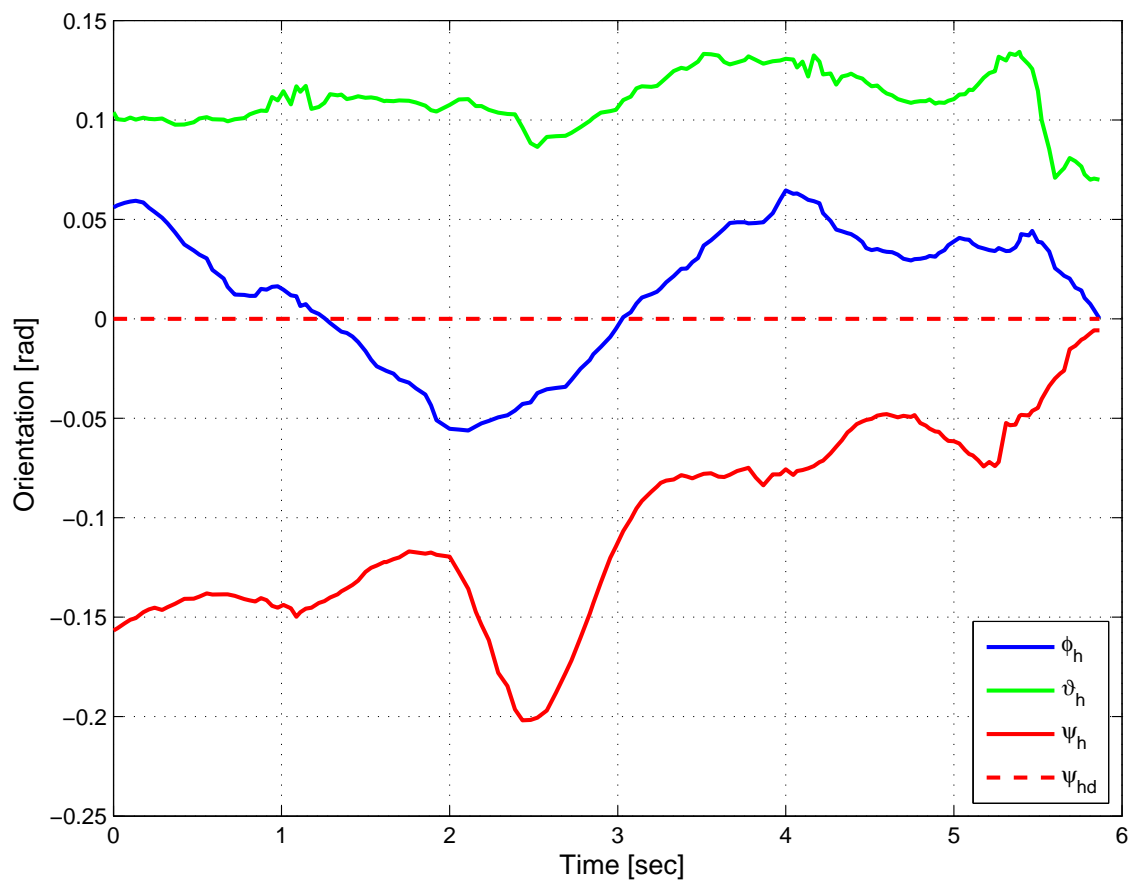
Ωστόσο υπάρχουν δυνατότητες να διορθωθούν μερικά προβλήματα που θα οδηγήσουν σε ακριβέστερη εκτίμηση κατάστασης. Το βασικό πρόβλημα όπως αναφέρθηκε είναι η σωστή εκτίμηση του ύψους, κάτι που επηρεάζει όπως είναι λογικό και τις άλλες εκτιμήσεις και περισσότερο της εκτίμησης της ταχύτητας αφού ο αλγόριθμος υπολογισμού της ταχύτητας μέσω οπτικής ροής απαιτεί μία καλή εκτίμηση του ύψους της κάμερας από το έδαφος.



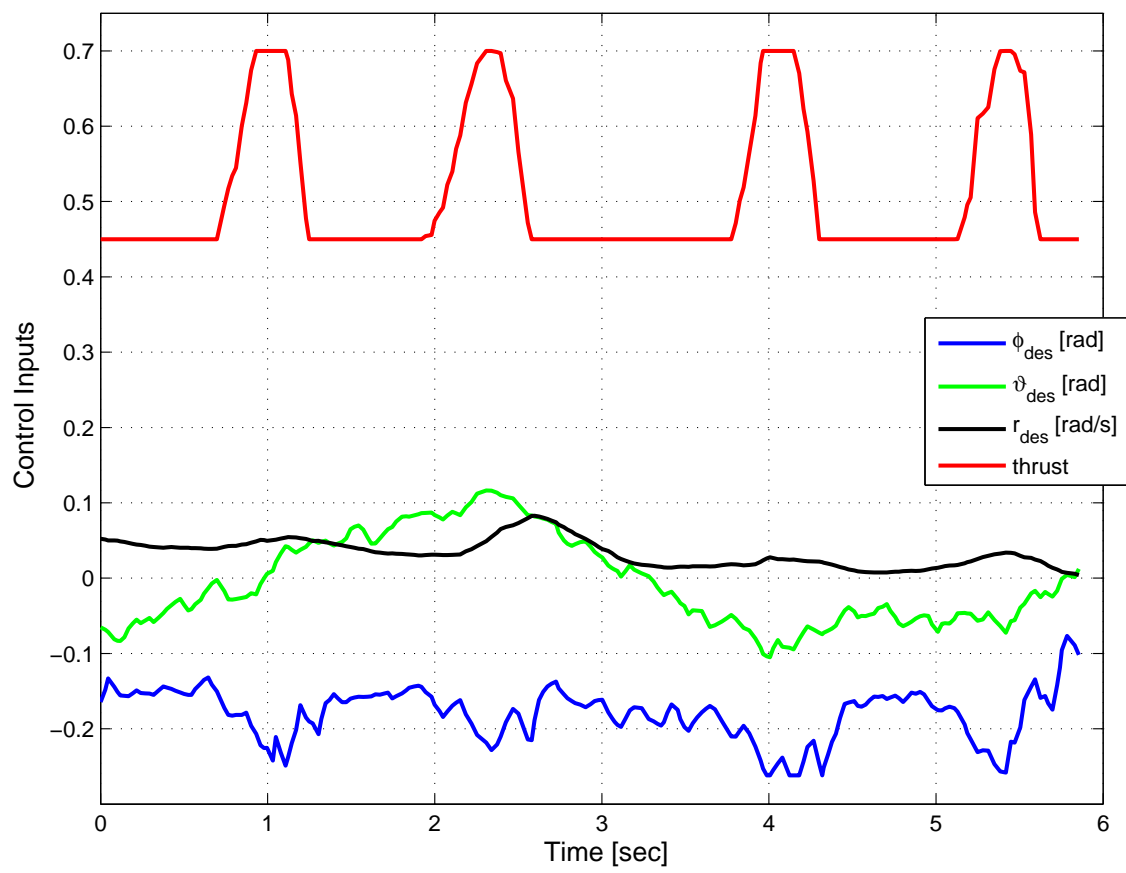
Σχήμα 6.4: Οι εκτιμώμενες σχετικές θέσης κατά την διάρκεια του παιχνιδιού και οι επιθυμητές.

Επομένως εναλλακτικά αντί του βαρομέτρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα αλτίμετρο για εκτίμηση του ύψους. Το αλτίμετρο είναι ένας αισθητήρας, που υπολογίζει το ύψος από το έδαφος. Αυτό σε τέτοιες εφαρμογές συνήθως το πραγματοποιεί με χρήση ηχητικού σήματος (σόναρ), όπως π.χ είναι ο αισθητήρας PX4Flow. Τέτοιοι αισθητήρες προσφέρουν μία αρκετά ακριβή εκτίμηση της απόστασης από το έδαφος για ύψη πτήσης μέχρι τα 5 μέτρα, άρα εμπίπτει στο δικό μας επιθυμητό ύψος πτήσης του πειράματος.

Επίσης υπολογιστικά πακέτα όπως είναι το Semi-Direct Monocular Visual Odometry (SVO) [22] και το ethzasl_msf του ETH [23] μπορούν να δοκιμαστούν αντίστοιχα, αντί για χρήση των στόχων ArUco και του φίλτρου που αναπτύχθηκε παραπάνω, και να εξαχθούν συμπεράσματα για το αν η συνολική εκτίμηση κατάστασης που προσφέρουν είναι καλύτερης ποιότητας.



Σχήμα 6.5: Οι εκτιμώμενοι σχετικοί προσανατολισμοί κατά την διάρκεια του παιχνιδιού και το επιθυμητό yaw.



Σχήμα 6.6: Είσοδοι εναέριου οχήματος.

Κεφάλαιο 7

Επίλογος

7.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκαν δύο ανεξάρτητοι προβλεπτικοί ελεγκτές βασισμένοι στα μοντέλα ενός εναέριου και ενός επίγειου οχήματος. Ο βέλτιστος έλεγχος εφαρμόστηκε έτσι ώστε να υπάγεται στους κανόνες της Θεωρίας Παιγνίων. Με χρήση ενός προσομοιωτή πραγματικού χρόνου ελέγχθηκε πλήθος σεναρίων σε περιβάλλον ανταγωνιστού παιγνίου μεταξύ των δύο οχημάτων. Παράγοντες όπως είναι η γνώση της στρατηγικής του αντιπάλου, ή οι μανούβρες αποφυγής για έξοδο από το οπτικό πεδίο προστέθηκαν στα σενάρια που εξετάστηκαν.

Συμπεράσματα για το αν οι στρατηγικές που ακολούθησαν οι παίχτες είναι οι βέλτιστες για τον καθένα (Nash equilibrium) προέκυψαν λόγω του τύπου του παιγνίου που εξετάστηκε και του τρόπου που εξάχθηκαν οι στρατηγικές. Επίσης εξάχθηκαν συμπεράσματα για τις προϋποθέσεις και τις συνθήκες υπό των οποίων, μπορεί να εγγραφεί η επικράτηση του ενός παίχτη έναντι του αντιπάλου του. Ακόμα ελέγχθηκε αν οι τεχνικές αποφυγής που ακολούθησε το επίγειο όχημα υπάγονται σε κατηγορίες τεχνικών/μανούβρων που χρησιμοποιούν «λογικοί» παίχτες σε τέτοιες περιπτώσεις.

Τέλος, ο σχεδιασμός των ελεγκτών και της προσομοίωσης έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί επακριβώς πειραματικά σε μη επανδρωμένα οχήματα, έχοντας ως ανάδραση μόνο την εκτίμηση της σχετική θέση των οχημάτων.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η έρευνα που έγινε σε αυτήν την εργασία προσφέρει την βάση ώστε να επεκταθεί περαιτέρω τόσο σε πειραματικό αλλά και σε βαθύτερο θεωρητικό επίπεδο.

Στο πειραματικό επίπεδο έχοντας ως βάση την θεωρία του κεφαλαίου 4 αλλά και των προκαταρκτικών πειραμάτων που έγιναν στο κεφάλαιο 6, θα μπορούσαν να επαναληφθούν τα πειράματα οδηγώντας σε μεγαλύτερης διάρκειας παίγνια ταυτόσημα με εκείνα των προσομοιώσεων, αποδεικνύοντας τις πραγματικές δυνατότητες των μη επανδρωμένων οχημάτων να ανταποκρίνονται σε συνεχώς μεταβαλλόμενες επιθυμητές καταστάσεις αυτόνομα. Επίσης αφού δοκιμαστούν μονομερώς οι ελεγκτές, θα μπορούσαν να δοκιμαστούν και ταυτόχρονα όπως γίνεται στις προσομοιώσεις. Για να γίνει αυτό είναι απαραίτητη μία εκτίμηση της σχετικής του θέσης και προσανατολισμού ι-

κανοποιητικής ακρίβειας, κάτι που απαιτεί καλού επιπέδου αισθητήρες και συνένωση όλων των αισθητήρων με φίλτρο Kalman.

Ακόμα, θα είχε ενδιαφέρον να αναπτυχθεί και το δυναμικό μοντέλο του επίγειου οχήματος και να εξεταστεί αν το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα ή δεν επηρεάζει καθόλου.

Στο θεωρητικό επίπεδο, η σημαντικότερη επέκταση πάνω στην εργασία αυτή είναι το παίγνιο μεταξύ των δύο οχημάτων να γίνει ελλιπής πληροφόρησης. Είναι πιο ρεαλιστικό ο ένας παίχτης να μην διαθέτει γνώση της δυναμικής του αντιπάλου, των κερδών του και των εισόδων του, και επομένως θα πρέπει να εκτιμήσει τόσο το δυναμικό μοντέλου του άλλου αλλά και να εκτιμήσει την στρατηγική του. Ένας συνδυασμός της εργασίας αυτής με τις εργασίες [24] [25], όπου έχει μελετηθεί θεωρητικά το ανταγωνιστικό παίγνιο ελλιπής πληροφόρησης, και η εφαρμογή του προβλεπτικού ελεγκτή με τρόπο τέτοιο ώστε να εκτιμά το μοντέλο και την στρατηγική του άλλου είναι μια ενδιαφέρουσα επέκταση που μπορεί να διευρύνει τη θεωρία πέραν του πειραματικού επιπέδου και σε περισσότερες πρακτικές εφαρμογές.

Βιβλιογραφία

- [1] Tobias Magnusson, “Attitude control of a hexarotor,” Master thesis, Linkoping University, 2014.
- [2] Tommaso Bresciani, “Modeling, identification and control of a quadrotor helicopter,” Master thesis, Lund University, 2008.
- [3] G. Dudek and M. Jenkin, *Computational Principles of Mobile Robotics*, 2nd ed. 32 Avenue of the Americas, New York NY 10013-2473, USA: Cambridge University Press, 2010, ch. 3, pp. 31–64.
- [4] A. Kelly, *Mobile Robotics, Mathematics, Models and Methods*, 1st ed. 32 Avenue of the Americas, New York NY 10013-2473, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [5] A. Kotikalpudi, B. Taylor, C. Moreno, H. Pfifer, and G. J. Balas, “Swing tests for estimation of moments of inertia,” *Aerospace Engineering and Mechanics*, University of Minnesota, Tech. Rep.
- [6] F. Bussamra, C. M. M. Vilchez, and J. C. Santos, “Experimental determination of unmanned aircraft inertial properties,” in *3rd CTA-DLR Workshop on Data Analysis and Flight Control*, S. J. Campos, SP, Brazil, 2009.
- [7] M. Tischler and R. Remple, *Aircraft And Rotorcraft System Identification: Engineering Methods With Flight-test Examples*, 1st ed., ser. Aiaa Education Series. AIAA, 2006.
- [8] E. Mario, I. Navarro, and A. Martinoli, “Distributed learning of cooperative robotic behaviors using particle swarm optimization,” *Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 109, pp. 591–604, 2016.
- [9] M. Rubenstein, A. Cornejo, and R. Nagpal, “Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm,” *Science Journal*, vol. 345, no. 6198, pp. 795–799, 8 2014.
- [10] P. Vlantis, P. Marantos, C. Bechlioulis, and K. Kyriakopoulos, “Quadrotor landing on an inclined platform of a moving ground vehicle,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2015-June, pp. 2202–2207, conference paper.

- [11] K. Wenzel, A. Masselli, and A. Zell, “Automatic take off, tracking and landing of a miniature uav on a moving carrier vehicle,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, no. 61, 2011.
- [12] T. Basar and G. Olsder, *Dynamic Noncooperative Game Theory*. New York: Academic Press, 1982.
- [13] R. Isaacs, *Differential Games: A Mathematical Theory with Applications to Warfare, Pursuit, Control and Optimization*. Dover, 1999.
- [14] V. Patsko and V. Turova, “Homicidal chauffeur game: history and modern studies,” Ekaterinburg Russia: Ural Branch of RAS, Tech. Rep., 2009.
- [15] A. E. Bryson and Y.-C. Ho, *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control*. Taylor & Francis Group, 1975.
- [16] K. Horie and B. A. Conway, “Optimal fighter pursuit evasion maneuvers found via two-sided optimization,” *Journal Of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 29, no. 1, 2 2006.
- [17] S. A. Quintero and J. P. Hespanha, “Vision-based target tracking with a small uav: Optimization-based control strategies,” *Control Engineering Practice*, vol. 32, pp. 28–42, 11 2014.
- [18] T. Raivio and H. Ehtamo, “Visual aircraft identification as a pursuit-evasion game,” *Journal Of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 23, no. 4, 8 2000.
- [19] R. Vida, O. Shakernia, H. J. Kim, D. H. Shim, and S. Sastry, “Probabilistic pursuit-evasion games: Theory, implementation, and experimental evaluation,” in *IEEE Transactions on Robotics And Automation*, vol. 18, 10 2002.
- [20] J. M. Eklund, J. Sprinkle, and S. S. Sastry, “Switched and symmetric pursuit/evasion games using online model predictive control with application to autonomous aircraft,” in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 20, 5 2012.
- [21] R. L. Shaw, *Fighter combat: Tactics and maneuvering*. Annapolis, MD, United States: Naval Institute, 1985.
- [22] C. Forster, M. Pizzoli, and D. Scaramuzza, “SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014.
- [23] S. Lynen, M. Achtelik, S. Weiss, M. Chli, and R. Siegwart, “A robust and modular multi-sensor fusion approach applied to mav navigation,” in *Proc. of the IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2013.
- [24] N. Satak and J. Hurtado, “A framework for behavior learning in differential games,” in *AIAA SciTech, 52nd Aerospace Sciences Meeting*, 1 2014.

- [25] K. Cavalieri, N. Satak, and J. Hurtado, “Incomplete information pursuit-evasion games with uncertain relative dynamics,” in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 1 2014.