



**ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

**Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών**

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του **Υ.Δ. κ. ΡΑΜΠ Μιχαήλ**, Μηχανολόγου Μηχανικού Παν. Κύπρου, MS in Mechanical Engineerin (UC Berkeley), την οποία εκπόνησε στον Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Τετάρτη 13 Ιουλίου 2022 ώρα 16:00π.μ. διαδικτυακά. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής:

«Μοντελοποίηση και έλεγχος μη-επανδρωμένων εναερίων οχημάτων πολλαπλών ελίκων με ανεξάρτητες απο συντεταγμένες γεωμετρικές μεθόδους»

Και ο Αγγλικός ως εξής
«Coordinate-free, Modeling and Control of Multirotor Unmanned Aerial Vehicles».

Ο Κοσμητοράς της Σχολής

Ν. Παπαδόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

- Για οδηγίες για την πρόσβαση σας διαδικτυακά απευθυνθείτε στον Επιβλέποντα του Υ.Δ., Καθ. Ε. Παπαδόπουλο (egpapado@central.ntua.gr)

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι συνεισφορές που έγιναν στον θεματικό τομέα της μοντελοποίησης και ελέγχου μη-επανδρωμένων εναερίων οχημάτων (ΜεΕΟ) πολλαπλών ελίκων μέσω ανεξάρτητων από συντεταγμένες γεωμετρικές μεθόδους. Με στόχο την απόκτηση μιας ευρείας κατανόησης και γνώσης πάνω στα ΜεΕΟ πολλαπλών ελίκων, η ερευνητική προσπάθεια αυτής της διατριβής επικεντρώνεται σε τρία θέματα:

Το πρώτο θέμα αφορά ΜεΕΟ πολλαπλών ελίκων (ΠΕ) μονοκατευθυντικής ώσης (η πιο διαδεδομένη κλάση μη-ολόνομων ΜεΕΟ-MUAVs). Αναπτύσσονται νέα Γεωμετρικά Μη γραμμικά Συστήματα Ελέγχου (ΓΜγΣΕ) που επιτυγχάνουν έλεγχο θέσης και προσανατολισμού της εν λόγω κλάσης. Συγκεκριμένα αναπτύσσεται ένα νέο ΓΜγΣΕ χαρακτηριζόμενο από σχεδόν ολικού εύρους περιοχή έλξης η οποία είναι ανεξάρτητη από το σφάλμα αρχικής θέσης/ταχύτητας: μια πρωτότυπη συνεισφορά ως προς την βιβλιογραφία γεωμετρικού ελέγχου. Επίσης, αναπτύσσεται μια νέα γεωμετρική στρατηγική κατανομής της δράσης ελέγχου, η οποία επιτρέπει υψηλής ακρίβειας ακροβατικούς ελιγμούς προσανατολισμού, ενώ ταυτόχρονα τηρεί τους περιορισμούς ώσης των επενεργητών (αποφεύγεται ο κορεσμός) και το κέντρο μάζας παραμένει "κοντά" σε ένα επιθυμητό σημείο θέσης. Αυτή η συνεισφορά αποδίδει 20.000 φορές βελτίωση στην παρακολούθηση ακροβατικών τροχιών προσανατολισμού (σε περιβάλλον προσομοίωσης). Η έρευνα που διεξάγεται σε ΜεΕΟ πολλαπλών ελίκων μονοκατευθυντικής ώσης δεν είναι μόνο θεωρητικής φύσεως, αλλά παρέχονται και πειραματικά αποτελέσματα.

Το δεύτερο θέμα αφορά την διερεύνηση/μελέτη του αναπροσανατολισμού κατεύθυνσης στερεού σώματος που χαρακτηρίζεται από κίνηση μεγάλης περιστροφικής ταχύτητας. Αναπτύσσεται μια νέα συνάρτηση παρακολούθησης τροχιών προσανατολισμού και ένα νέο ΓΜγΣΕ που αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα. Το πρώτο ΓΜγΣΕ ως προς την γεωμετρική βιβλιογραφία που αντιμετωπίζει το εν λόγω πρόβλημα ελέγχου είναι προϊόν αυτής της εργασίας. Η έρευνα διεξάγεται ως προετοιμασία για την κατανόηση της δυναμικής του ζεύγους κινητήρα-έλικας, που είναι προϋπόθεση για παραγωγή ώσης στα Ολόνομα ΜεΕΟ ΠΕ (Ο-ΜεΕΟ-ΠΕ)). Γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη γυροσκοπικών ταλαντωτικών φαινομένων που προκύπτουν κατά την κίνηση αναπροσανατολισμού και αναπτύσσεται μέθοδος για την εκτίμηση της συχνότητας ταλάντωσης των φαινομένων αυτών.

Το τρίτο θέμα αφορά την κλάση των Ο-ΜεΕΟ-ΠΕ και ειδικά με αεροχήματα με ικανότητες αναπροσανατολισμού έλικας (ώσης). Προτείνεται μια νέα διαμόρφωση Ο-ΜεΕΟ-ΠΕ (ολόνομο tricopter) και μελετάται διεξοδικά μέσω ανεξάρτητων από συντεταγμένες γεωμετρικών μεθόδων. Η γνώση και η εμπειρία που αποκτήθηκε από τα δύο προηγούμενα ερευνητικά θέματα εφαρμόζεται στις διεργασίες μοντελοποίησης και κατά τον σχεδιασμό των ΓΜγΣΕ που αναπτύσσονται για το εν λόγω αεροχέμα. Συγκεκριμένα παράγεται νέο ΓΜγΣΕ αναπροσανατολισμού/ώσης έλικας και νέο ΓΜγΣΕ παρακολούθησης τροχιάς θέσης κέντρου μάζας του οχήματος καθώς και στρατηγική κατανομής ώσεων ανεξάρτητης από συντεταγμένες (βασισμένη σε απλό γεωμετρικό κανόνα). Η συνδυαστική τους δράση επιτυγχάνει έλεγχο θέσης/προσανατολισμού ολόνομης φύσεως. Επίσης αναπτύσσεται μια εναλλακτική, ανεξάρτητη από τον ελεγκτή, μέθοδος για την εκτίμηση της συχνότητας των ενδογενών γυροσκοπικών ταλαντωτικών φαινομένων που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της κίνησης των ελίκων.

Σημειώνεται ότι οι κύριες συνεισφορές που παρουσιάζονται σε αυτήν την εργασία αναπτύσσονται απευθείας στη μη γραμμική πολλαπλότητα/ θεσεογραφικό χώρο, αποφεύγοντας ιδιομορφίες και αμφισημίες που προκύπτουν από τη χρήση τοπικών συντεταγμένων προσανατολισμού (γωνίες Euler ή quaternions κ.λπ.), ενώ τα ΓΜγΣΕ χαρακτηρίζονται από σχεδόν ολικές περιοχές έλξης/ευστάθειας. Τα αποτελέσματα υποστηρίζονται από μαθηματική ανάλυση, αριθμητικές προσομοιώσεις (MATLAB, ROS/GAZEBO) και σε ορισμένες περιπτώσεις με πειράματα.

Abstract

In this dissertation Control System Design (CSD) contributions in Multirotor Unmanned Aerial Vehicles (MUAVs) are presented from a coordinate-free approach using geometric methods.

Since research in MUAVs is in a mature state; considerable effort is devoted to identifying research contribution points. Fueled by passion in obtaining a broad understanding and knowledge of MUAVs, the research effort of this thesis is distributed in three topics: The first topic deals with Non-Holonomic Multirotor Unmanned Aerial Vehicles (NHMUAVs), specifically with Uni-directional Thrust, Non-Holonomic, Multirotor Unmanned Aerial Vehicles (UT-NH-MUAVs) (the most prominent subclass of NH-MUAVs); new Geometric Nonlinear Control Systems (GNCSs) are developed for the locomotion task of the UT-NH-MUAVs-class. A new GNCSs addressing this task is developed characterized by an Almost Global (AG) Region of Attraction (RoA) that is also independent of the initial position/velocity error; a first in terms of the geometric UT-NH-MUAV literature, providing an alternative control structure for aggressive UT-NH-MUAV maneuvers and simplifying path planning. Also, a new geometric control-allocation structure is developed, for the UT-NH-MUAVs-class, yielding high precision aggressive UT-NH-MUAV attitude motion while adhering to actuator limitations and staying "close" to a desired Center of Mass (CoM) position command. This development yields a 20.000-fold improvement in aggressive attitude tracking (in simulation). Additionally, this work is not purely theoretical; experimental results relating to the UT-NH-MUAV-class developments are provided.

The second topic addresses the Pointing Direction & Angular Velocity (PDAV) control task of a high Revolutions Per Minute (RPM) rigid body (a subclass of rigid body attitude control); a new tracking error function and a new geometric control structure addressing this problem are developed. The first PDAV GNCS in terms of the geometric literature is a product of this work; this research is also conducted as a prelude-preparation in dealing with high RPM tilting Brushless Motors (BMs) (the main actuating entity deployed to Tilting-Propeller, Holonomic, Multirotor Unmanned Aerial Vehicles (TP-H-MUAVs)), yielding intrinsic knowledge like the identification of gyroscopic oscillatory phenomena arising during smooth PDAV motion and developing a method in estimating the frequency of oscillation of these phenomena.

The third topic deals with Holonomic, Multirotor Unmanned Aerial Vehicles (H-MUAVs), specifically with the TP-H-MUAV-class; a novel TP-H-MUAV configuration is proposed (a tricopter H-MUAV) and analyzed in a geometric, coordinate free-manner. The experienced gained from the two previous research topics is put in to good use during the multi-body modeling and geometric CSD processes; The PDAV control structure, developed in research topic two, is adapted to the TP-H-MUAV dynamics for tilting propeller thrust generation; a new CoM output tracking GNCS and a coordinate-free allocation strategy (based on a simple geometrical rule) are developed, addressing the locomotion task of the new platform. An alternative, controller-independent, method for estimating the frequency of gyroscopic oscillatory phenomena arising during PDAV motion is also developed. Finally, the developed TP-H-MUAV pose control structure can be easily generalized to any vehicle of the TP-H-MUAV-class.

It is signified that the major contributions presented in this work are developed directly on the nonlinear configuration manifold; complexities and ambiguities that are associated with minimal attitude representations (Euler-angles, quaternions etc.) are completely avoided, almost global attractivity results for the tracking error metrics are provided without any time-scale separation assumptions and no interpretation of the results on $SO(3)$ and S^2 is required. The developed results are supported by mathematical analysis, numerical simulations (MATLAB, ROS/GAZEBO), and at some instances with experiments.