

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	小型無人航空機による非バンク旋回のための計測と制御
氏 名(Name)	河原 遼太

本稿では、小型無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) に分類される固定翼機を対象に、横力板を用いたバンクによらない旋回をとりあげる。小型 UAV は固定翼機と回転翼機に大別され、これらは一長一短であり、利活用する場面によって使い分けられる。固定翼機は高速飛行や長距離飛行が可能であるが、機体が前進することで発生する主翼の揚力を用いて飛行するため、回転翼機のような低速飛行や急旋回ができず、屋内などの飛行領域が限られた狭い空間での利活用が難しい。また、固定翼機のバンク旋回は、機体に搭載されたカメラや GPS アンテナを傾けることとなり、カメラの撮影範囲に偏りが生じたり GPS アンテナの受信状況が悪化したりする。これらの問題の解決の一つに、横力板と呼ばれる垂直操舵翼を用いた非バンク旋回がある。横力板は外滑り旋回時にラダーと逆位相で操舵して直接横力を制御でき、高い旋回率のバンクによらない旋回を可能にする。

本研究では、非バンクを維持しながら指定されたウェイポイントで飛行方向を変更させる制御方法を提案し、飛行シミュレーションにより検証した。通常のバンク旋回の制御系は、微小擾乱を仮定して非線形運動方程式を線形化し、縦系の運動と横方向系の運動に分離して設計される。しかし、横力板 UAV の非バンク旋回では外滑りにより強い非線形性をもつ縦系と横方向系の連成運動が生じるため、従来の制御系設計手法を適用できない。提案した制御系は、エルロン操舵と旋回内側のプロペラ後流増大により非バンクの維持し、ラダーと重心付近に搭載した横力板の操舵により飛行方向を制御する。飛行方向は、機体からウェイポイントまでの距離を考慮して直線飛行から円旋回へと徐々に徐々に変更する。また、推力による速度の予見制御により、旋回率が変化する遷移飛行時に対気速度の機首方向成分が減少することで生じる高度低下を抑制する。

飛行実験を行うにあたり、従来手法では計測困難であった小型 UAV の三次元の対気速度を超音波を用いて計測する手法を提案する。小型 UAV 用対気速度計は、低流速を高分解能で応答性良く計測できること、小型で軽量であることが要求される。提案手法は、風上方向と風下方向のそれぞれの伝播時間を計測する時間差法と、直交変換により信号を復調して位相を計測する位相差法を併用しており、高い分解能で応答性良く計測できる。校正は、静止空気中で対気速度計を搭載した手押し車を走行させ、車輪に取り付けたロータリエンコーダで計測される対地速度を基準にして行い、対気速度計の固有のパラメータを取り除くことで高い計測精度を実現できることを示した。さらに、校正した対気速度計を実機に搭載し、対気速度から算出される迎え角と慣性航法装置で計測されるピッチ角を比較することで提案手法の有効性を実証した。

着陸時に必要となる姿勢角計測のため、畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) を用いた推定手法を提案する。通常、姿勢角は加速度と角速度を計測する慣性航法装置と磁気センサの組み合わせにより計測されるが、ビルや橋梁の周辺などの磁場外乱が生じる環境下では、磁気センサで地磁気を正確に計測できない。そこで、磁場外乱の影響を受けない地上に設置されたカメラを利用し、撮影された機体画像を姿勢角に応じて分類する多クラス分類問題として CNN を適用した。学習には、様々な姿勢角の画像を容易に作成できる 3D モデルを用いた。学習した CNN により飛行する実機の姿勢角を推定して、慣性航法装置と磁気センサの組み合わせによる計測値と比較することで提案手法の有効性を実証した。

これらの計測器と IMU を用いて、非バンクを維持した飛行方向変更の飛行実験に成功した。しかし、シミュレーション、飛行実験ともに飛行方向と旋回半径に定常偏差が残り、制御方法の改良や定常円旋回の制御への切り替えなどの工夫が必要であることが分かった。

(様式9号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏名	河原 遼太
審査委員	主査： 小河原加久治
	副査： 江 鐘偉
	副査： 三上 真人
	副査： 間普 真吾
	副査： 新銀 秀徳
論文題目	小型無人航空機による非バンク旋回のための計測と制御 (Measurement and Control for Flat Turns of a Micro Unmanned Aerial Vehicle)

【論文審査の結果及び最終試験の結果】

小型無人航空機 (UAV) にはマルチコプター型と固定翼型があるが、本論文は航続距離と高速移動に有利な固定翼型に関するものである。近年 5G 通信による遠隔操作が実用化段階に至っているが、UAV に適用する場合は機体のバンク (傾き) による通信途絶が問題となる。一般的な固定翼機は旋回時に機体をバンクさせる必要があるが、横力板を利用して無バンクで方向転換する飛行技術を確認しようとする研究が骨子である。

本論文は上記目的を達成するための実機実証実験で明らかになった諸問題の対処法を7章にわたり述べているが、手法別に大別すると3つに分けられる。1番目は、無バンク飛行するために必要な飛行力学による制御系設計に関するものである。横力板を使わない通常の固定翼航空機でも旋回半径数百メートルの無バンク旋回は可能であるが、横力板の使用により旋回半径5メートルという小さな旋回半径で無バンク旋回が可能であることを実証している。しかし、旋回率がある一定値を超えると急激な沈下により高度が保てなくなる問題が生じることを発見し、それに対する解決法を見出している。つまり、横力板の急な操舵により生ずる機体応答の非線形性を予見制御で解決する新たな制御アルゴリズムを提案し、数値シミュレーションでその有効性を確認している。

2番目は、本論文で対象とする小型 UAV の機体に搭載された慣性センサーや GPS などでは十分な精度が得られない機体の高度、方位角、静止座標系での位置などを地上設置画像センサーで求める手法である。通常の固定翼航空機は空港に設置された ILS (計器着陸システム) を使って滑走路に着陸進入するが、本論文が想定している小型 UAV には積載量の制限があり ILS の搭載は現実的ではない。しかし、一方ではホバリングが可能なマルチコプター型 UAV に伍する狭い着陸領域でも機体回収が求められている。そこで本論文では画像センサーを使った着陸誘導の際に問題となる機体の姿勢角推定法を提案している。

(様式 9 号)

ステレオカメラによる物体の3次元座標検出は実用段階にあるが、機体の着陸回収時に必要となる絶対方位角測定法はまだ確立されていない。本論文では地上設置カメラ画像とCNN(畳み込みニューラルネットワーク)を用いた姿勢角推定法を提案し、その有効性を実証している。本手法の特徴は、画像からは判別困難な機体姿勢を実機実験で考察し、誤差を最小化するための機体彩色法を採用し、CNNの学習効率を高めるために3DCG(3次元コンピュータグラフィクス)による機体姿勢異存の学習データ生成を行っていることである。これは学習用データベース増大に貢献し、汎化能力の向上に役立つと結論付けている。これら新規開発された計測器と既存の慣性センサを組み合わせることで、回転半径6m程度の無バンク飛行方向転換の実機実験に成功した。しかし、制御後の方位角には定常偏差が残っており、更なる改良が必要であると考察されている。本論文は風外乱の無い屋内での基礎研究ではあるが、固定翼UAVの無バンク飛行実現に向けて重要な知見をまとめていると判断する。

3番目は、この予見制御による提案制御手法を実機実装する際に必要な対気速度および風向計に関するものである。本研究で対象としているスパン1m級のUAV(以下、小型UAV)を対気速度数メートル毎秒の極低速で飛行することができることを実証しているが、既存の計測器では必要な精度で風向風速を計測することができない。そこで実機飛行実験を行うにあたり問題となる極低速での対気速度計測・3次元横滑り角計測のために超音波風向風速計を新に開発している。これをUAV実機に搭載し実証試験を行い、必要精度が得られることを確認している。この技術はピトー管などでは実現できない数センチメートル毎秒の対気速度と3次元での風向まで計測可能で、固定翼型UAVだけでなく、様々な分野での活用が期待できる。

公聴会は学内会場参加者に同時配信オンライン参加者を加えて行われた。主な質問内容は、高度維持の難しさについて、CNNによる方位角計測の更なる精度向上の必要性について、機体搭載通信機器の通信速度について、超音波風速計の位相アンラッピングについて、本研究では実機実験までには至っていない予見制御による高度維持に関する今後の課題についてであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計2編)

- 1) 河原 遼太, 小河原 加久治, 新銀 秀徳, 超音波を用いた小型 UAV の対気速度の計測, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.887, DOI: 10.1299/transjsme.19-00429, 2020年7月
- 2) R. Kawahara, K. Ogawara, H. Shingin, N. Hino, T. Yamamoto, Attitude Estimation of a Micro UAV with Side-Force Fins Using a Convolutional Neural Network, AIAA SciTech Forum, 2021.1