

## 審査の結果の要旨

氏名 ラビ クリストファー トマス

修士(工学) ラビ クリストファー トマス 提出の論文は **Failure-Tolerant Control and Vision-Based Navigation for Hexacopters** 「ヘクサコプターのための耐故障制御と視覚に基づくナビゲーション」と題し、英文で書かれ、7章からなっている。

複数のローターの回転制御によって飛行するマルチコプターは、機構が単純で制御も比較的容易なため、小型垂直離着陸型 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) として実用化が始まっている。筆者は、6個のローターを有するヘクサコプターを対象に、安全性の向上と適用範囲の拡大を目的に研究を行っている。安全性向上に関しては、飛行中にローターの故障が発生した場合にも、正常なローターの制御則を適応的に自動調整して自動飛行を維持させる耐故障制御則に関して検討を行い、適用範囲の拡大に関しては、GPS (グローバル・ポジショニング・システム) の衛星信号を捕獲できない室内等での自動飛行を可能にすべく、機体に搭載した視覚センサーで飛行位置を計測する Vision-based ナビゲーションシステムの開発を目指している。

第1章は序論で、研究の背景を整理するとともに、研究の動機、目的を述べ、マルチコプターの技術動向、耐故障制御および Vision-based ナビゲーションシステムに関する先行研究を整理し、最後に本論文の構成をまとめている。

第2章では、ヘクサコプターの運動方程式を誘導し、線形制御則を設計するために線形化された運動方程式を導出している。

第3章では、耐故障制御則に関しては、入力効きが変動した場合に、適応的に規範となる状態量に追従できるモデル規範型適応制御がヘクサコプターのローター故障に適していることを示し、適応調整則を適応的に切り替える手法を提案するとともに、入力が過多になるヘクサコプターへの拡張法を提案している。また、提案する手法の特性を感度解析により分析し、外乱や、システムの不確実性が、特に入力が小さな状況では適応則の収束に影響を及ぼすことを指摘するとともに、故障したローターの検知に関して考察を行っている。

第4章は、機体搭載視覚センサーで飛行位置を計測する Vision-based ナビゲーションシステムに関して、アルゴリズムを中心にまとめている。筆者は、事前に地形情報の詳細が得られていない環境における適用を想定し、自己位置推定と環境地図作成を同時に実施する SLM (Simultaneous Localization and

Mapping) として、PTAM (Parallel Tacking And Mapping) を適用した。PTAM は、カメラデータから特徴点を自動抽出し、その動きを追跡することから実時間で SLAM を実施する能力を有しており、マルチコプターのナビゲーションへ PTAM を拡張する方法を提案している。

第 5 章は、飛行試験のために使用したヘクサコプターおよび Vision-based ナビゲーションシステムに関して説明している。ヘクサコプターのハードウェアは市販の既存品を流用し、飛行制御ソフトを組み込み、2.0 GHz CPU 搭載のコンピュータにカメラシステムを取り付け、Vision-based ナビゲーションソフトを組み込むと共に飛行制御ソフトとのインターフェースを開発したことを説明している。

第 6 章では、Vision-based ナビゲーションシステムの飛行試験と、耐故障制御のシミュレーションに関してそれらの結果を整理している。3 軸の姿勢制御に関しては LQG (Linear Quadratic Gaussian) 制御則を適用し、PTAM による自己位置推定の精度を、GPS ならびに室内でのモーションキャプチャーシステムでの計測結果と比較した。モーションキャプチャーシステムとの差は 2.4cm と、高精度なナビゲーションに十分な性能を有していることを確認した。最後に、3つのウェイポイントを垂直上昇降下と水平飛行を組み合わせる自律飛行を実施し、PTAM による Vision-based ナビゲーションのみでの飛行に成功している。耐故障制御に関しては、シミュレーションによってローターの故障に関して適切に機能することを確認するとともに、外乱が大きな状況での適応制御の限界も指摘している。

第 7 章では、本研究の成果をまとめると同時に、さらなる研究課題について述べている。

以上、要するに、本論文は、ヘクサコプターを対象に、モデル規範型適応制御によりローター故障に対する耐故障制御設計を提案し、その効果と限界をシミュレーションによって明らかにするとともに、機体搭載視覚センサーによる Vision-based ナビゲーションシステムを開発し、飛行実証に成功している。これらの成果は、航空工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。