

審査の結果の要旨

氏名 久保大輔

修士（工学）久保大輔 提出の論文は「環境変動型 GA を用いたロバスト最適化および Tail-Sitter Mini UAV の飛行制御系設計への応用」と題し、8章と補遺からなっている。

全備重量が数 kg 程度の小型無人機（Mini UAV）は、手軽に利用可能であるため空撮や科学観測、防災などの様々なミッションへの応用が期待されている。筆者は実際に Mini UAV を開発し、科学観測の実証試験を行った経験から、限られた空間での離着陸が Mini UAV の技術的な課題の一つであると実感し、簡単な機構で垂直離着陸が可能な Tail-Sitter Mini UAV の提案を行っている。飛行特性の解析から、特にホバーから巡航への、また、その逆の巡航からホバーへの遷移飛行への自動制御系設計の検討を行っている。遷移飛行は飛行状態が大きく変動し、失速の制約が厳しく、特に Mini UAV は風の影響を受けやすいので、自動制御系の設計は容易ではない。筆者は、環境変動型遺伝的アルゴリズムと名付けたロバスト最適化手法を新たに提案し、その有効性を Tail-Sitter Mini UAV の制御系設計により検証することを試みている。

第1章は序論で、Tail-Sitter Mini UAV を研究するに至った背景の説明と、現状の研究開発状況の概観のあと、遷移飛行制御系設計へのアプローチの方針を述べ、最後に本論文の構成を整理している。

第2章では、垂直離着陸 UAV の開発動向を整理した後、提案する Tail-Sitter Mini UAV のミッションを設定し、設計要求を明らかにしている。

第3章では、Tail-Sitter Mini UAV の垂直面内運動の数学モデルを構築し、飛行特性を分析している。静的な釣り合い状態を求めるトリム解析の結果では、ホバーと巡航の中間の飛行状態において失速の制約から水平定常飛行が不可能な領域が存在することが示され、前縁スラットの必要性が明らかにされた。また、最適飛行経路解析の結果より、遷移飛行における最適操縦履歴が求められ、巡航からホバーへの遷移飛行においては、失速を避けるために一旦上昇した後にホバーに移行することが必要であることが示され、この場合も前縁スラットが有効に機能することが確認されている。

第4章では、第3章の考察を踏まえ、遷移飛行を達成するための制御系の構成を提案している。提案する制御系は機体ピッチ角とプロペラ回転数の指令値を与えるコマンド生成部（アウトーループ制御器）と指定された機体ピッチ角とプロペラ回転数を実現するインナーループ制御器から構成される。インナーループ制御器では、機体ピッチ角制御に関してはホバーから水平飛行という異なる飛行状態を連続的に制御するために、飛行速度をスケジューリング・パラメータとするゲインスケジュール制御則を採用し、プロペラ回転数制御に関しては PID 制御を採用している。ゲインスケジュール制御に関しては、ホバー、

中速度、巡航速度の3つの速度での線形時不変モデルに対する線形レギュレーターと目標に追従させるためのフィードフォワード制御器を設計し、速度に応じて制御則を内挿している。機体ピッチ角とプロペラ回転数の目標値を設定するアウトーループ制御器に関しては、従来の研究では単純な目標設定しかなされていなかったため、筆者は飛行状態に応じて柔軟に目標値を生成できるニューラルネットワークの導入を提案し、ニューラルネットワークを失速への制約や、風やモデルの不確かさを考慮して学習させることで、ロバストな制御系を構築することを提案している。

第5章では、ロバストなアウトーループ制御器を設計するために、ニューラルネットワークを学習させる新しいロバスト最適化手法「環境変動型遺伝的アルゴリズム」を提案している。その手法は実数値遺伝的アルゴリズムの進化過程において、外乱を統計的に与えた環境を定期的に変動させ、ロバスト性を付加させるものである。特に、環境への個体群の適応度に応じて、その環境を継続させる世代数を調節する手法を提案し、探索の最終段階で Powell の共役方向法を用いることを検討している。

第6章では、第4章および第5章で提案したロバスト制御系の設計手法を倒立アームの振り上げ制御問題に適用し、制御系の特性を検証するとともに、提案する手法が優れたロバスト性と解の収束性を持つことを実証している。

第7章では、具体的に Tail-Sitter Mini UAV の遷移飛行制御系を設計し評価を行っている。すなわち、アウトーループ制御器としてのニューラルネットワークのパラメータを、失速などの制約条件やモデル誤差、外乱などの要素を陽に考慮し、提案する環境変動型遺伝的アルゴリズムを用いて最適化し、最終段階で Powell の共役方向法により最適解を得ている。得られた制御系の特性を評価するために、非線形モデルを用いたモンテカルロシミュレーションを実施した結果、失速制約を満たしつつ、高度変化の小さい遷移飛行が実現され、高いロバスト性を持った制御系が構築できたことが確認されている。

第8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、垂直離着陸可能な Tail-Sitter Mini UAV を提案するとともに、その飛行特性の分析を通して、制御の難しいホバーと巡航飛行の遷移飛行制御を設計するための環境変動型遺伝的アルゴリズムを用いたロバスト最適化手法を提案し、その有効性を外乱やパラメータ変動を考慮した非線形シミュレーションによって実証した。提案するロバスト最適化手法は広範な工学問題に応用できる可能性を持ち、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であると認められる。