

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 久 保 大 輔

本論文では新しいTail-Sitter Mini UAVの設計案を提案し、その飛行特性を検討するとともに、ロバストな遷移飛行制御系の設計手法を提案した。飛行特性解析においては遷移飛行において失速の制約が厳しい制約であることを明らかにし、その解決策として前縁スラットを用いることを提案した。ロバストな制御系設計手法として、ニューラルネットワークを用いた制御系の構成を提案した。またそのパラメータをロバスト最適化するため、新しいロバスト最適化手法である環境変動型遺伝的アルゴリズム (Variable Environment Genetic Algorithm: VE-GA) を提案し、その有効性を検証した。これらの手法で設計された制御系の性能が確認された。

新しいTail-Sitter Mini UAVの提案

Tail-Sitterの従来研究に関して検討を行い、Mini UAVの課題の一つである離着陸に必要なスペースの条件を緩和するため、障害物に囲まれた狭いスペースからでも運用可能な、新しいTail-Sitter Mini UAVの設計を提案した。この設計ではMini UAVの特徴を考慮した設計を行っており、シンプルな機構・構造を迫及した。特徴としては単純な機構となる双発の逆回転プロペラの採用や、Tail-Sitter特有の尾部降着装置の簡素化が挙げられる。

第3章では、提案機体の飛行特性を明らかにするため、要素ごとの推算手法に基づいて構築された非線形飛行モデルを用いて解析を行なった。トリム飛行解析においては、中速域 (約5~8 m/s) に失速の制約のため水平飛行不可能な領域が存在することが明らかになった。この制約はある向い風の中で釣り合いを保った垂直効果が不可能であることを示しており、Tail-Sitter Mini UAVのコンセプトが破綻してしまう。そこで本研究ではこの問題を解決するために、高揚力装置 (High Lift Device: HLD) を用いることを提案した。失速制約の緩和には特に前縁スラットが有効であり、これを用いることにより全ての速度域で2 m/sの降下率を達成することが可能であることが明らかになった。これにより提案したTail-Sitter Mini UAVのコンセプトが成立することが示された。

動的最適フィードフォワード制御解析においては、最適な順遷移飛行と逆遷移飛行を明らかにした。順遷移飛行は加速飛行であるため、プロペラの後流が強まり、そのため有効迎角が小さく抑えられ、失速しにくくなる。定常飛行においてはHLDを用いない場合は失速のため水平飛行不可能な速度域が存在したが、動的な順遷移飛行においては水平飛行を維持したまま失速せずに巡航状態に移ることが可能である。一方、逆遷移飛行は減速飛行であるため、プロペラの後流が弱まり、有効迎角が大きくなり失速し易い傾向にある。これを回避するために上昇 (機体軸速度 U を大きくして有効迎角を小さくする) が必要となった。上昇飛行は致命的な問題ではないが、

着陸前に行なわれる逆遷移飛行において高度が上昇してしまうのは着陸の方向と反しており好ましくない。ここでもHLDを用いた場合の解析を行なった結果、スラットを用いた場合には高度変化のない逆遷移飛行が実現可能であることが明らかになった。また、フラップを用いた場合には抵抗が増えることから、より少ない時間・飛行距離で遷移を完了できることが明らかになった。

このような失速制約に係る飛行特性については、従来のTail-Sitter UAVでは必ずしも十分には考慮されていなかった。そのため、遷移飛行に成功している研究例でも、逆遷移飛行時に機体が不安定に揺れる現象が確認できる。これは主翼が部分失速し、不安定な空気力状態に陥っているためであると考えられる。本研究の成果により、Tail-Sitter設計における一つの重要な指針が明らかになったと言える。

制約条件を考慮した飛行制御系の提案

飛行特性解析の結果により得られた知見に基づき、実用的な遷移飛行制御系を設計するための手法を提案した。制御系の構成には、早いダイナミクス（ピッチ角、プロペラ回転数）を制御するインナーループ制御系と、このインナーループ系に指令値を与えるアウターループ制御系を用いる階層型を採用した。ピッチ角の制御には、広い動作範囲と非線形性に対応可能なゲインスケジューリング制御器を用いた。また、プロペラ回転数の制御にはダイナミクスの変動が小さいため、固定ゲインの制御器を用いた。

従来の研究では指令値の生成に関して十分には考慮されていなかった。非常に単純なロジック（ランプ入力など）などが用いられており、それによって失速に至る飛行状態に陥る危険があった。そこで本研究では失速の制約条件を陽に考慮した目標値生成を行なうため、オフライン最適化されたNNを用いた。状態量を入力とし目標値を出力とするNNをオフラインシミュレーションに基づいてロバスト最適化して用いる。

本研究で提案した新しいロバスト最適化手法（後述）を用いてNNをオフライン最適化し、これにより失速などの制約やモデル化誤差、外乱などの要素を陽に考慮に入れた目標値生成器設計が可能となり、ロバストな飛行が達成される。非線形シミュレーションベースのモンテカルロシミュレーションによりその有効性を示した。

新しいロバスト最適化手法の提案

本研究では新しいロバスト最適化手法を提案した。一般に、外乱などの確率的変動まで考慮するロバスト最適化には、評価関数の期待値や分散などの統計値の評価が必要となるため、ノミナルケースに対する最適化に比べて計算コストが桁違いに高くなる。そのため、従来研究においては、実験計画法などに基づいて効率良く応答曲面を構築した後、間接的にロバスト最適化を行なうという手法が主流であった。このような手法ではどれだけ精度の高い応答曲面を構築できるかが鍵であり、研究の主眼であった。しかしながら近年の計算機処理能力の発展を考えると、近似に基づかないより柔軟性の高い手法も求められていると考えられる。

そこで本研究では、応答曲面などに基づかないながらも、計算コストを削減できる新しいロバスト最適化手法であるVE-GAを提案した。VE-GAは実数値GAに基づいた

手法であり、ある世代が経過するごとに評価関数（評価シミュレーション）で考慮する環境（不確定性の設定）を変更する。これにより世代を重ねるにつれて個体群が様々な環境を経験し、ロバスト性を備えるようになる。このような考え方を取り入れた研究は過去にも見られるが、それら従来研究においては一定世代ごとに環境を変化させるものとしており、これが計算の安定性を損ねていた。つまり容易で頻度の多い環境には適応するものの、頻度の少ない難しい環境への適応性は失われ易くなってしまっていた。そこで本研究では新しい環境への個体群の適応度平均を基準として、新しい環境が容易な環境であるか困難な環境であるかを判断し、新しい環境が継続する世代数を逐次決定する手法を提案した。これにより計算の安定性が格段に向上した。

VE-GAは実数値GAに基づいた手法であり、大域的な探索と同時にロバスト解に接近することができる。しかしVE-GAには(a)後半における効率の悪さ、(b)制約条件の曖昧な取り扱い、という課題もある。そこでこれらの課題を克服すべく汎用性の高い局所最適化手法であるPowellの共役方向法（Powell's Direction Set Method: PDSM）を導入し、VE-GA/PDSM法として提案した。PDSMは評価関数に含まれる統計値を直接評価するため計算コストが高いが、あらかじめVE-GAで最適解近傍まで到達しているため必要となるイタレーションは少なく済み、トータルとしての計算コストは妥当な範囲に抑えられる。

本手法を倒立アームの振り上げ制御の例題に適用し、その有効性を検証するとともに、アルゴリズムの特徴を明らかにした。また上述のTail-Sitter Mini UAVの遷移飛行制御系設計問題に適用し、得られた制御器の性能をモンテカルロシミュレーションにより評価、確認した。

このロバスト最適化手法はNNのパラメータ最適化や制御系の最適化のみならず、一般的なロバスト最適化問題に適用可能である。特に大域的探索手法に基づいていることから、NNパラメータ空間のような多峰性空間でのロバスト最適化において有効であると考えられる。