

審査の結果の要旨

氏名 犬塚 一 徹

近年, MAV (Micro Air Vehicle) と呼ばれる小型の飛行ロボットの研究・開発が盛んに行なわれている. これは数 mm~十数 cm 程度のスケールで, 狭窄地や極限環境での調査・観測を主な用途としている. このようなサイズでは, 鳥や昆虫を模倣した羽ばたき型の翼を持つ MAV が高い飛行性能を発揮すると期待されている. しかしながら羽ばたき飛行のメカニズムは複雑な非定常効果・三次元効果に基づいており未だ完全には解明されていない. そのため人工的な羽ばたき飛行において飛行性能を制御するための知見は十分に得られてはおらず, 高い飛行性能を実現するのは容易ではない. 高性能な羽ばたき型 MAV を設計するためには人工的な翼運動・形状と飛行性能との定量的な関係を明らかにし, 最適な翼のデザインを探索する必要がある. これまで生物を模した翼モデル等について実験やシミュレーションを用いて個別の飛行性能評価を行なった例は多々あるが, 同一モデルにおいて翼の形状や運動パラメータを変化させた際の流れ場の変化及びその結果生じる飛行性能の変化を定量的に評価した例は少ない. また, MAV の設計に際してはペイロード, 消費エネルギー, 安定性等, 複数の飛行性能の評価指標が考えられるが, これらについて単一の目的関数でなく, 複数の目的関数間のトレードオフを考慮した多目的設計を行なった例はほとんど見られない. そこで本論文では, 3次元 ALE 有限要素法を用いて羽ばたき翼周りのシミュレーションを行ない, 翼の運動・形状と翼に働く力との関係について知見を得るとともに, その結果を利用して多目的最適な羽ばたき型 MAV の翼運動デザインを提案している.

本論文は5つの章から構成される.

第1章は序論であり, 本研究の背景として従来までの羽ばたき飛行に関する研究及びそれらから得られている知見についての概要をまとめた後, MAV 設計という観点での現状と課題, 本研究の意義と目的を述べている.

第2章では研究手法について述べている. 本研究で用いた計算手法として ALE 法, メッシュ制御手法, 流体計算の概要及び計算アルゴリズム, 実装について述べた後, 基礎的な検証問題を用いてコードの精度並びにパフォーマンスについて検証・評価を行なっている.

第3章では前章で導入した手法を用いて羽ばたき翼周りのシミュレーションを行なっている. まず始めに計算に用いる MAV モデル及び翼運動について述べた後, 既往の実験とモデル形状, レイノルズ数等を一致させたシミュレーションを行なっている. この際 ALE 法及びメッシュ制御により発生するメッシュの歪みが翼周りの流れに影響を及ぼさないこと

を確認している。シミュレーション結果より翼周りの流れ場の特徴及び翼に働く流体力が過去の知見と一致することを確認し、本シミュレーションの妥当性を示している。続いて翼の平面形及び翼運動についてパラメトリックスタディを行ない、パラメータの変化による翼周りの流れ場の様相、翼に働く力及び消費エネルギーの変化を定量的に検討している。その結果翼のひねり運動の振幅とひねりのタイミングについて、これらのパラメータの変化によって渦の生成・剥離及び翼運動と周囲の相対的な流れ場との非定常な相互作用が変化することにより、流れ場の変化とそれに伴う定常理論では予測できない飛行性能の変化を確認・評価している。一方、翼の平面形及び羽ばたき周波数については無次元化された流れ場に対して大きな影響を及ぼさないことを明らかにしている。

第 4 章では前章の知見を利用し、羽ばたき翼によるホバリング飛行を想定した翼運動の多目的設計を行なっている。ここでは翼ひねりの振幅とタイミングを設計変数とし、安定性と飛行の効率を目的関数、ペイロードと消費エネルギーを制約条件とする問題設定を行なっている。複数の設計解候補についてシミュレーションを行ない、算出された飛行性能を評価・分析することにより、複数のパレート最適解を示している。さらに、それらパレート解間の関係から飛行目的・状況に応じて最適な設計解の探索を行なうための知見を抽出している。

第 5 章は結論であり、本研究で用いた手法及び得られた知見についてまとめ、今後の展望が述べられている。

以上を要するに、本論文では高性能な羽ばたき型 MAV の飛行を実現すべく人工的な羽ばたき翼の飛行性能評価を行ない、多目的最適な設計解及びその探索手法を提案している。翼と流れとの複雑な相互作用によって生じる飛行性能を再現・評価するとともに、それらを人工物システムとして利用するための知見・指針を示した点はシステム創成学分野にとって大きな価値があり、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。