

## 審査の結果の要旨

氏名 濱本 将樹

本論文は7章からなる。

第1章は序論である。まず背景として昆虫の羽ばたき飛行を工学応用することの有用性を述べ、これに必要な不可欠である、羽ばたき飛行の空気力学に関する従来の研究を整理している。その上で、工学的に応用範囲が広いと考えられる質量数グラム程度のミッドレンジ羽ばたき飛行ロボットの実現には、従来の手法では定量的に取り扱われて来なかった、流体との力学的相互作用を含む羽の大変形を含めた定量的設計手段が必須である、との視点から、ALE有限要素法を用いた流体・構造連成解析を活用し、トンボの羽(翅)の剛性分布の力学的特徴を分析・模倣し、設計・試作することを通じて、羽ばたき飛行ロボット実現のための筋道をつける本論文の目的が述べられている。

第2章は「流体・構造連成解析の基礎式」と題し、ALE有限要素法を用いた流体・構造連成シミュレータの基礎理論、およびこれを羽ばたき飛行の解析に用いるためのプログラムの改造について述べられている。前半ではALE表記法による流体解析手法、および昆虫の翅のモデリングに適したシェル要素を用いた構造解析手法が述べられ、後半で強連成を可能とする一体型連成方程式の生成およびメッシュ制御手法などについての説明がなされている。

第3章は「トンボにおける微速飛行のシミュレーション」と題し、上記シミュレーションを用いた生体における羽ばたき飛行の解析について述べられている。解析対象としてトンボを用い、前半ではシミュレーションに必要な昆虫の翅の形状、剛性、質量密度、および羽ばたき方の計測手法とその数値モデル化手法について説明されている。後半では得られた計算結果より、トンボの飛行状態を説明できる流体力、並びに実測と概ね一致する翅の変形が得られ、シミュレーションの妥当性が示されている。更に非定常流体力学的効果や翅の慣性力の影響についての定量的分析も加えられている。

第4章は「昆虫から人工物へ」と題し、昆虫の翅における剛性分布が果たす役割を解析し、この知見を反映した、羽ばたき飛行ロボットにおける羽の基本設計思想を提案している。即ち、翅剛性に関するパラメータスタディを行い、流体力や応力分布を分析した結果、翅を対角線上に走る浅い溝構造が翅の迎え角を定めることを見出し、羽ばたきロボットに用いる羽としては、(1) コルゲーションにより強化された前縁、(2) 上記のごとく対角線上に走る枝部、および(3) これらに張られた膜部からなる構造が適していると結論づけてい

る。

第 5 章は、「人工羽ばたき機構の設計」と題し、考案した羽ばたき飛行ロボットの基本構造に流体・構造連成解析を適用することにより、モータやバッテリーの要求スペックを算出し、その実現性を定量的に検証した。即ち、チタンフレームにアラミドフィルムが張られた翼弦長 75mm、質量 41mg の羽を、2 つの超音波モータの往復回転運動で駆動される運動変換機構により、水平方向の±45 度のストローク、およびその両端での±30 度の羽の捻り運動、の 2 駆動自由度で 25Hz にて羽ばたき運動させることを想定し、羽及び運動変換機構を含めて流体・構造連成解析を行った。解析結果からモータやバッテリーへの要求スペックが算出できることを示し、自立浮上への見通しを立てた。

第 6 章は、「試作及び実験による検証」と題し、第 5 章で設計・解析した羽ばたき飛行ロボットを実際に試作し、評価を行った。駆動回路の小型化が未達であり、また試作した in-house の超音波モータのパワーが 12mW と低く、自立浮上は困難であることが前もって予想されたため、駆動回路および電源はロボット外部に設け、やじろべえ型の浮上力補助機構に搭載した状態で計測を行った。具体的には、羽を駆動する上下ロータの駆動パターンを変えることで、上昇、前進、および後退を実現した。また上下ロータの回転角を高速撮影により取得し、これを入力条件とした流体構造連成解析を行った結果、実験とシミュレーションの良い一致が得られた。これらの結果から、モーターパワー向上により自立浮上できる裏付けが得られたこと、並びに自立浮上達成へ向けての改良すべき点などが論じられている。

第 7 章では以上の成果が結論としてまとめられ、今後の羽ばたき飛行ロボット開発におけるシミュレーションの有用性が展望として述べられている。

以上を要するに、本論文は羽ばたき飛行の力学について、羽の変形まで含めた定量的解析が可能な手段を確立し、これを用いたトンボの飛行解析から、羽ばたき飛行に適した羽の構造特性を明らかにすると共に、得られた知見に基づき羽ばたき飛行ロボットの設計および試作を実際に行い、工学的に応用範囲が広いと考えられる多自由度ミッドレンジ羽ばたき飛行ロボット実現への道筋を立てたものであり、機械工学、ロボット工学への発展に寄与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。