

## 論文の内容の要旨

論文題目 ALE有限要素法による羽ばたき翼シミュレーションと多目的デザイン

氏名 犬塚 一徹

### 1. 序論

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, 粘性等の効果により従来の固定翼機や回転翼機を単純に小型化したものでは高い飛行性能が得られないことが知られており, 鳥や昆虫を模倣した羽ばたき型の翼を持つMAVに期待が集まっている.

しかしながら羽ばたき飛行は三次元・非定常な流体现象によって生じる流体力を利用するもので, そのメカニズムは複雑であり, 未だ十分に解明されたとは言えない. そのため人工的に効率的な羽ばたき飛行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, 最適な翼の形状や運動を探索する必要がある.

既存の研究では個々の生物モデルやロボットにおいて流体力を発生させる流れ場の特徴や時間平均化された揚力・抗力等のマクロな飛行性能についての議論は多々行なわれているが, モデルや運動を変化させた際の流れ場の変化と飛行性能との関係に注目した例はほとんど見られない.

そこで本研究では, 有限要素法シミュレーションを用いて羽ばたき運動と翼周りの流れ場の関係, 及びそれが翼に働く力や消費エネルギーに与える影響について調べる. シミュレーションを利用する利点としては, 三次元・非定常な羽ばたき翼周りの流れ場を詳細に観測・分析することが可能であり, 形状や運動パラメータを変化させて感度解析を行なうことも容易であることが挙げられる. その後, 得られた知見を用いて羽ばたき型MAVの翼運動について多目的デザインを行なうことを目的とする.

### 2. シミュレーション手法

本研究では3次元的に運動する翼周りの流れ場を剛体 - 流体連成問題として取り扱い, 境界の移動を扱うためALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 法を用いて有限要素解析を行なう. ALE法は任意の参照座標系を用いて場の方程式を記述する方法であり, 既存のコードに対して解析アルゴリズムを大きく変更することなく移動境界を扱う機能を実装することができる.

本研究ではシミュレーションには東大生研で開発された並列三次元流体有限要素解析コードFrontFlow/Blueを用い、これに先述のALE解析機能と翼面に追従するメッシュの変形を制御する機能を追加実装したものを利用する。羽ばたき飛行のシミュレーションでは移動境界である翼面の移動量が大きいため、境界の移動に伴うメッシュの変形量が大きくなる。そのため翼面近傍の計算精度を保つためのメッシュ制御プロセスが重要な役割を持つ。本研究ではメッシュ制御プロセスにはメッシュを疑似的に構造体として扱う疑似弾性解析を利用する。さらに、計算時間の短縮を図るため、これらの追加機能を並列化し、全計算過程を並列で行なえるようにした。

### 3. 羽ばたき翼周りの三次元シミュレーション

前述のシミュレーションコードを用いて羽ばたき飛行の三次元シミュレーションを行なう。翼の運動モードとしては図1に示すFlapping運動とFeathering運動の組み合わせによるホバリング飛行を想定する。

まずシミュレーションの精度検証及び羽ばたき翼周りの流れ場の特徴を確認するため、既存の実験を参考としたシミュレーションを行なった。この実験モデルはガガンボという昆虫をモデル化しており、レイノルズ数がおよそ300、無次元振動数がおよそ0.06のモデルである。

シミュレーションに用いたメッシュは節点数383,916、要素数2,371,369で、算出された流体力が十分に周期性を示すよう、6周期分の計算を行った。計算ステップは12500ステップ、計算機環境は東大T2KのHA8000を128コア用い、11.8時間の計算時間を要した。シミュレーションの結果から、メッシュ制御プロセスにより翼の運動に伴ってメッシュが大きく変形しているが、この変形によるメッシュ性能の悪化が翼面近傍の流れ場計算に悪影響を及ぼさないことを確認した。さらに、翼面周りの時々刻々の流れ場が過去に報告されている羽ばたき翼周りの流れ場の特徴を再現できており、翼に働く揚力の時間変化が参照実験とよく一致したことから、このシミュレーションにより羽ばたき翼の運動を再現・評価できることを確認した。

続いて同じスケールのモデルを用いて翼の形状・運動パラメータを変化させ、流れ場の変化とそれによる飛行性能の変化を調べた。翼の形状としては、実験との比較に用いたガガンボの翼をモデル化したものに加え、これと翼長・翼面積を一致させた矩形翼及び丸型翼の計3つを用いる。運動パラメータとしてはFeathering運動の振幅、FlappingとFeatheringの位相差(図2のように翼断面の回転するタイミングを変化させるパラメータ)、及び羽ばたき周波数の3つについてパラメトリックスタディを行なった。その結果以下のような知見が得られた。

- 翼の形状による流れ場の変化はほとんどなく、飛行性能の変化についても面積配置の変化に伴う流体力の増減で説明可能であった

- Feathering振幅の変化に伴い、翼面周りの渦が発達し、剥離する時刻と大きさが変化する。振幅を45deg. から60, 70deg. と増大させたとき、揚力はあまり変化しないのに対して抗力、消費エネルギーが大きく減少した。
- FlappingとFeatheringの位相差については、90deg. から差を小さくすることにより、翼の回転に伴う渦がより発達し揚力が増大した。一方、位相差をわずかに大きくすることにより抗力が翼面の回転を助けることで消費エネルギーが減少した。
- 羽ばたき周波数については、0.6倍から1.4倍に変化させた範囲において、周期で規格化した時刻における流れ場がほとんど変化せず、揚力・抗力・消費エネルギーもそれぞれ無次元化した値がほとんど変化しない。
- すなわち周波数を変えることは、流れ場の特徴を変化させることなく力や仕事率の絶対値のみを変化させることになる。これはMAVの運動を制御するパラメータとして非常に有用であると考えられる。

#### 4. 多目的デザイン

前章で得られた知見をもとに、羽ばたき型MAVの翼運動について多目的デザインを行なう。ここでは目的関数、あるいは制約条件として評価する飛行性能として、1周期平均の揚力係数、エネルギー係数、及びホバリング時の上下方向への振動量を扱う。振動量は、MAVを翼に働く揚力により運動する質点と仮定し、1周期中の質点の運動において初期位置からの距離が最も離れた時刻での距離と定義し、揚力の時間積分を用いて算出する。揚力が周期的に変化する羽ばたき飛行において定点観測や定位置での待機を行なう際に最小化するべき指標として設定した。

多目的デザインはホバリング状態を想定して以下のような問題設定により行なう。

- 目的関数：飛行効率 ⇒ 最小化  
          : 振動量 ⇒ 最小化
- 制約条件  : 揚力 > モデル重量  
          : 消費エネルギー < モデル最大パワー

これらの問題設定に対して、設計変数をFeathering振幅と位相差の2つに限定し、対話型多次元設計解可視化分析ツールADVENTURE\_DecisionMakerによる分析を行ない、最適解探索を行なう。ここで、3章の知見から羽ばたき周波数は他の設計変数による飛行性能の変化と干渉しないものと推測されるため、翼運動を決定した後にモデルのスケールに応じて調整可能なパラメータとして扱うことを想定し、設計変数には含めないものとした。

結果として、複数のパレート最適解を算出した。実際のMAVの運用においてはこれら

の解のうち、待機時には振動量をある程度無視して消費エネルギーを抑える、観測時には逆に振動量を抑えるという形で運動を選択することになる。

## 5. 結論

本研究では羽ばたき型MAVの設計を目的に、羽ばたき翼周りの流れ場と飛行性能との関係に注目し、翼の形状及び運動パラメータに関するパラメトリックスタディを行なった。その結果、各パラメータを変化させた際の流れ場の変化とそれらが飛行性能に与える影響について複数の知見を得た。

さらに、それらの知見を利用して翼の運動について多目的デザインを行ない、複数のパレート最適な翼運動を提案した。

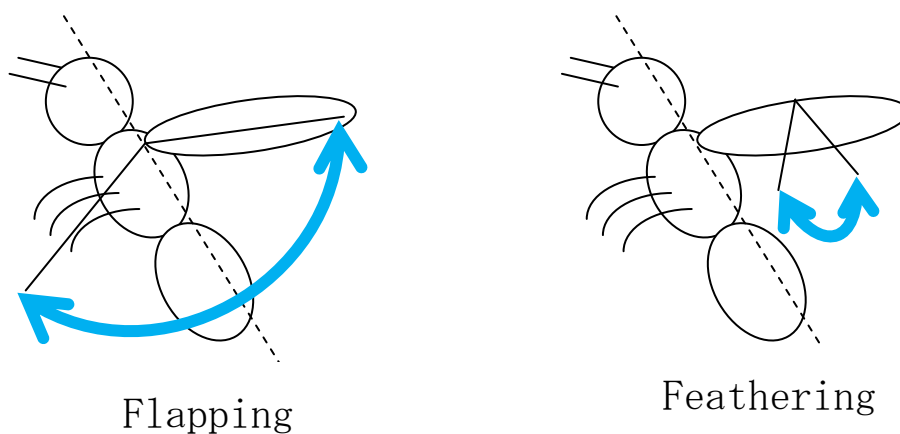


図 1 翼の運動モード

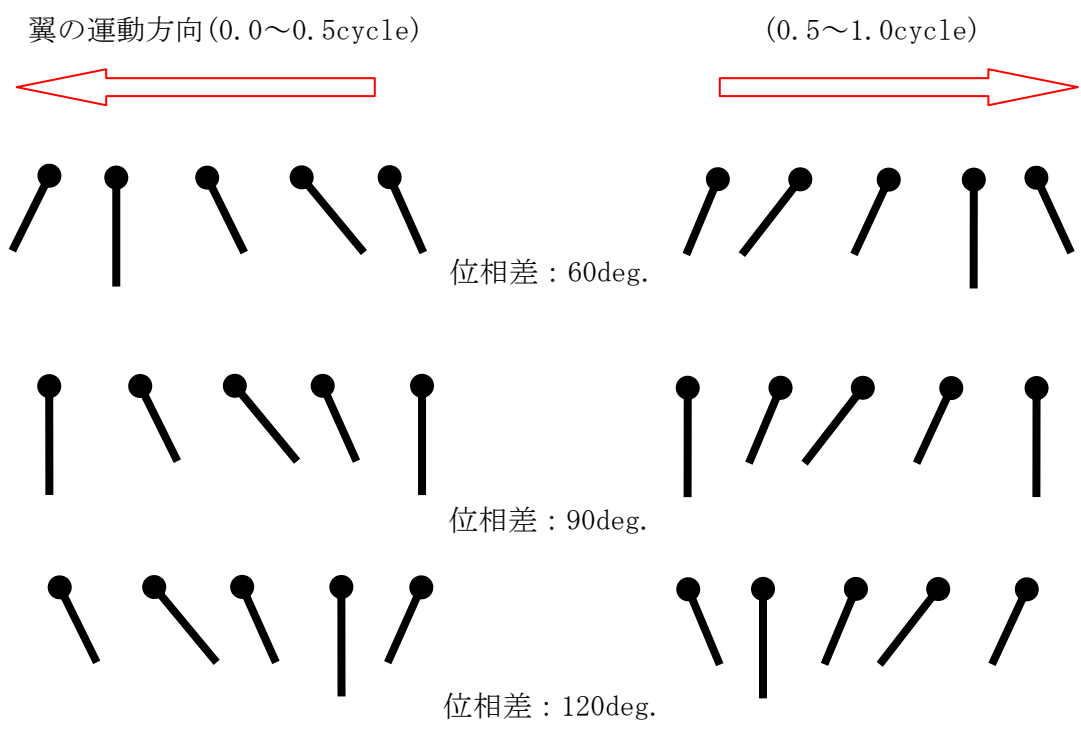


図 2 位相差と翼断面の運動