607 昆虫羽ばたき飛行の非線形動的安定性の研究

Nonlinear dynamic stability of a hovering insect

○ 学 高 娜 (千葉大院) 正 劉 浩 (千葉大院)

Na GAO, Graduate School of Engineering, Chiba University

Hao, LIU, Graduate School of Engineering, Chiba University

Key Words: non-linear, dynamic stability, hovering, fruitfly

1. 諸論

現在、世界中の多くの研究者らが火星探査機や自然災害時の迅速な情報収集のため、長さ、幅、高さが共に 15cm 以下の小型飛行体の研究開発を活発に行っている。その一環として自然界にある昆虫や鳥の羽ばたき飛行の原理解明に取り組んでいる。その結果、羽ばたき飛行中の非定常空気力学メカニズムは徐々に解明されつつあるが、羽ばたき飛行の瞬間力による位置と姿勢の変化と時間の経過による動的安定性についての研究はまだ少なく、全く理論体系ができていないのが現状である。本研究では、実際に測定されたショウジョウバエの形状データと運動データを用い、静止飛行の流体力学シミュレーションを行うことにより、昆虫羽ばたき飛行における非線形の動力学モードと動的安定性の解析を行った。

2. 研究手法

2-1 研究対象

本研究ではショウジョウバエ (*Drosophila melanogaster*) を研究対象としている。翅や胴体の実形状に基づく翅・胴体幾何学モデルとマルチブロック用の計算格子を本研究室で開発したコードにより生成した。羽ばたき翅と胴体の運動データは静止飛行中に計測されたショウジョウバエ翅の 3 軸に対する回転角度 (flapping angle, feathering angle, elevation angle) と回転面の角度 (stroke plane angle) を用いる^[1]。

2-2 解析手法

本研究では、静止飛行中の昆虫を剛体近似することにより、6 自由度を有する飛行体の運動方程式 (式(1)) を利用することができる。

$$\begin{aligned}\dot{u} &= -wq + rv + g\sin\theta + X/m \\ \dot{v} &= pw - ru - g\cos\theta\sin\phi + Y/m \\ \dot{w} &= uq - pv - g\cos\theta\cos\phi + Z/m \\ \dot{p} &= ((I_{zx}(\dot{r} + pq) + (I_{yy} - I_{zz})rq) + L)/I_{xx} \\ \dot{q} &= ((I_{zx}(r^2 - p^2) + (I_{zz} - I_{xx})rp) + M)/I_{yy} \\ \dot{r} &= ((I_{zx}(\dot{p} - qr) + (I_{xx} - I_{yy})rp) + N)/I_{zz}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、図 1 に示すように u, v, w, p, q, r は胴体に固定されている座標系 (重心は原点とする) の x, y と z 軸に沿う速度と三軸周りの角速度となり、変数 X, Y, Z, L, M, N は三軸に沿う空気力と各軸周りの空気モーメントとなる。 θ と ϕ はそれぞれ胴体のピッチング角度とローリング角度の釣り合い状態からの変位角度、 I_{zz} 、 I_{yy} と I_{xx} は各軸周りの慣性モーメントである。上記方程式の右辺に対して時間積分を取ると、状態変数 u, v, w, p, q, r の時間に関する関数を得ることができる。ここで時間と状態変数に関する力及び力のモーメントが必要となるため、微小変位による状態変数の変化に誘発される力と力のモーメントの変化を計算した。周期的な変化の特質

を示す羽ばたき運動に対して、力と力のモーメントの関数をフーリエ級数に展開して表示することができる。つまり、空気力学シミュレーションを用い、各状態下における空気力とモーメントを計算し、それらに対応する空気力と空気モーメントの各関数の微分係数を求めることができる。さらに計算されたこれらの微分係数をもとの運動方程式に代入し、各速度での力と力のモーメントを計算すると、もとの値によく合致している結果が分かった。

時間 t における状態変数 (u, v, w, p, q, r) の計算に対して、式 (1) の右辺に対して 4 次の Runge-Kutta 陽解法を用いた。

Fig. 1 Definition of the aerodynamic force components (X, Y, Z), aerodynamic moment components (L, M, N) and the state variable (u, v, w, p, q, r) on a body-fixed coordinates.

3. 結果

作成された関数を式(1)に代入し、初期値問題であるこの連立微分方程式を解く。まず、釣り合い状態 (周期平均の水平力とピッチングモーメントがゼロであり、なお且つ平均垂直力が重力に等しいことを指す) において 1 周期の羽ばたき運動による各状態変数の時間変化を図 2 に示す。次に、釣り合い状態より擾乱を加えた $u=v=w=\pm 0.05, p=q=r=\pm 0.005$ といった 12 つの初期値問題について、羽ばたき運動による状態変数の時間的な変化を計算した。

4. 考察

図 2 でショウジョウバエの羽ばたき運動により、1 周期の縦方向における状態変数 (u, w, q) の時間変化を示している。今回の計算では、適切な釣り合い状態 (状態変数の時間平均値が零に近づくことを指す) を得るために、初期時間を $t_0 = 0.35 \text{ period} = 5.173$ (nondimensional) に設定した。図 2 に示しているように、すべての状態変数が平衡状態の付近で振動し、1 周期がたつて元の状態に戻るということがわかった。

図 3 はそれぞれの状態変数 (u, v, w, p, q, r) の初期値を与えた際の他の方向の状態変数への影響を示す。擾乱状態において

Fig. 2 The variation t of u, w, q with initial conditions $u_0 = v_0 = w_0 = p_0 = q_0 = r_0 = 0$ and $t_0 = 5.73$ (無次元)

Fig. 3 The variations of state variables when the disturbances from different directions are given. The horizontal axis denotes the non-dimensional time

モデルのいずれかの回転角度が 90° を超えるまで計算結果を示している。図 3(A)-(C)に縦方向に生じた擾乱が縦状態変数への影響を示す (昆虫モデルは左右対称とするため、縦方向の擾乱が横方向に影響を与えない)。各方向から擾乱を受けた際に、 u は時間とともに振動しながら元の状態に戻ることがわかった。ただし、打ち面の角度が変わるため、ピッチング方向に擾乱を受けた時 u の変化が著しくて、その後ピッチング角度が逆方向に発散するために u 値がまた収束していくことがわかった。 w 値が x -軸方向からの擾乱以外に安定している様子が見える。 q 値は比較的に不安定な様子を示し、時間とともに発散してしまうことがわかった。図 3(D)-(I)に横方向に生じた擾乱が各方向における状態変数への影響を示す。 y -軸方向に擾乱値 $v=0.05$ を与えた際に各方向の状態変数が非常に不安定な様子を表している。4 周期後にローリング角度が 90° を超えたために、モデルの運動が発散してしまうことがわかった。ローリング方向に擾乱を与えた際に u と q 以外の状態変数が若干影響を受けて、発散してしまうことがわかった。ヨーイング方向に擾乱を受けた場合、ローリング方向から擾乱を受ける場合とほぼ同じ様子が見えるが、発散するまで長時間がかかることがわかった。各方向からの擾乱が状態変数への影響をまとめ、表 1 に示す。6 自由度を有する昆虫モデルの各方向における状態変数が相互影響を与えることがわかった。

Table 1 The variations of state variables resulting from the disturbances in each of direction, respectively

擾乱値 状態値	u	v	w	p	q	r
u	収束	発散	収束	発散	収束	発散
v	—	収束	—	発散	—	発散
w	発散	収束	収束	発散	収束	発散
p	—	発散	—	発散	—	発散
q	発散	発散	発散	収束	発散	収束
r	—	収束	—	発散	—	収束

5. 結論

本研究では、実際の計測データをもとに作成した翅・胴体の幾何学モデルと運動学モデリングを用い、流体力学シミュレーションにより、6 自由度を有するショウジョウバエの静止飛行の非線形安定性を検討した。その結果、ショウジョウバエが外乱を受けた際に羽ばたき運動を変えず 6 自由度における状態変数の時間変化を解析することにより、ショウジョウバエは完全に受動的な安定性を備えてないことがわかった。状態変数が発散するまでの時間が擾乱の来る方向によって違い、 y -軸からの擾乱を受けた際のローリング角度の発散が一番早い。しかしながら、昆虫は状態変数が発散する前にフィードバックによる能動的な調節を加えることにより安定飛行を実現することができる^[2]。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費(萌芽研究 No.18656056)と日本科学振興会科学研究費(基盤研究(S) No.18100002)により支援された。関連各位に、ここに感謝の意を表す。

文献

- [1] S. N. Fry, R. Sayaman and M. H. Dickinson, 2005, The aerodynamics of hovering flight in *Drosophila*, *J. Exp. Biol* **208**, 2303-2318
- [2] A. Sherman and M. H. Dickinson, 2003, Summation of visual and mechanosensory feedback in *Drosophila* flight control, *J. Exp. Biol*, **207**, 133-142