無尾翼・小型羽ばたき飛翔体の安定性とその姿勢制御 Flight Stability and Body Angle Control of a Micro Flapping Robot

〇正 井村忠継(九工大) 正 瀧脇正樹(九工大) 正 田中和博(九工大)

Tadatsugu Imura, Kyushu Institute of Technology, 680-4 Kawazu, Iizuka, Fukuoka
Masaki Fuchiwaki, Kyushu Institute of Technology, 680-4 Kawazu, Iizuka, Fukuoka
Kazuhiro Tanaka, Kyushu Institute of Technology, 680-4 Kawazu, Iizuka, Fukuoka

Micro-Air-Vehicle (MAV) using insect and bird flight mechanisms have been researching all over the world in recent years since the micro-electro-mechanical systems (MEMS) have been developed. Many researchers have developed MAV with various actuators and devices however their MAV have not been put to practical use yet. The purpose is clarifying the flight trajectory of micro flapping robot at different flapping frequencies. The micro flapping robot moves upward in high flapping frequency flight and moves downward in low flapping frequency flight. The flapping frequency of micro flapping robot on a flight is one of important parameter for the flight attitude control.

Key Words: Micro Air Vehicle, Tailless aircraft, Flapping frequency

1. 緒言

近年、橋梁や高層ビルの保守・点検作業や災害地での捜索・救難支援など様々な利用が考えられている小型羽ばたき飛翔体や MAV (Micro Air Vehicle) の研究が国内外を問わず活発に行われている⁽¹⁾。羽ばたき飛翔体の特性の一つに、連続的かつ非線形な羽ばたき運動のために従来の飛翔体において要求される力およびモーメントの平衡点が特定できないことが挙げられる⁽²⁾。この特性のために直感的なデザインや試行錯誤に基づく羽ばたき飛翔体が多く開発されている。世界中で開発された羽ばたき飛翔体は尾翼を用いて機体の制御を行うなど、姿勢角の安定の確保および機体の制御のために複雑な構造を持つ必要があるため、機体重量の増加が問題視されている。

羽ばたき飛翔体の開発の手法として鳥や昆虫の飛翔を応用することにより、小型・軽量でシンプルな構造を持ち、さらには環境に溶け込むような飛翔を行う飛翔体を作り出せることが考えられる。この手法を用いて様々なアクチュエータおよびデバイスを用いた小型羽ばたき飛翔体の開発が試みられている。最近では、蝶の翅を模倣した翅を用いたBTO (Butterfly-type Ornithopter) の研究も報告されている⁽³⁾。また、Tanakaらは、BTOまわりの流れの可視化を通じて、羽ばたき運動と同期した迎角の受動的な変化が翅へのLeading edge vortexの安定的な付着を生むことにより飛翔を実現していることを明らかにしている⁽⁴⁾。さらには、飛翔時の翅の変形に着目し、翅の変形が異なるBTOを比較することにより、蝶の翅脈が持つ影響を明らかにしている⁽⁵⁾。Zacemらは昆虫やハチドリが持つ Traverse bending に着目し、弾性体を用いた羽ばたきメカニズムを用いることにより、大きなフラッピング角および高い羽ばたき周波数を実現できることを明らかにしている⁽⁶⁾。しかしながら、これらは実用化に至っていないのが現状であり、その原因の1つに昆虫や鳥の飛翔メカニズムが十分に明らかにされていないことが挙げられる。

本研究では、蝶の羽ばたき特性を応用した無尾翼・小型羽ばたき飛翔体 (Micro Flapping Robot) の羽ばたき周波数とその飛翔の関係を明らかにすることを目的とする。具体的には、姿勢角が安定するために必要な飛翔距離を調べ、姿勢角が安定した状態において羽ばたき周波数を変化させた際の飛翔時の軌跡を導出し、評価する。

2. 無尾翼・小型羽ばたき飛翔体および実験方法

図1に無尾翼・小型羽ばたき飛翔体を示す。飛翔体の翅ス

Fig. 1 Micro flapping robot

Fig. 2 Definition of body angle and measuring points

パン長さ、翅弦長さ、重量、翼面荷重、羽ばたき周波数およびアスペクト比はそれぞれ、240 [mm], 80 [mm], 1.97 [g], 1.5 [N/m²], 9 - 11 [Hz] 程度および 3.0 である。蝶の翼面荷重、羽ばたき周波数およびアスペクト比はそれぞれ、0.5 - 4 [W/m²], 4 - 20 [Hz] および 1.5 - 4.0 である⁽⁶⁾ことから蝶に近いサイズの飛翔体であるといえる。

無尾翼・小型羽ばたき飛翔体の飛翔の様子を撮影速度 500 [fps]のハイスピードカメラで撮影した。撮影した映像の画像計測により、飛翔体の胴体部先端および後端の位置を計測し、

垂直方向の速度および姿勢角を算出した (図 2)。さらには、羽ばたき周波数が 11.0 [Hz], 10.5 [Hz], 10.0 [Hz], 9.5 [Hz] および 9.0 [Hz] のときの飛行軌跡を算出した。

3. 実験結果および考察

3-1 無尾翼・小型羽ばたき飛行体の安定性 図 3 に無尾翼・小型羽ばたき飛行体の飛行時の飛行速度および姿勢角を示す。図 3 の横軸、上段の縦軸および下段の縦軸はそれぞれ、水平方向の位置、垂直方向の速度および姿勢角を示す。また、図 3 の(a), (b), (c) および (d) はそれぞれ、飛行開始点、姿勢角が 0 [deg.] の点、姿勢角が最大値 46 [deg.] を示す点および姿勢角が安定したと考えられる一定の振幅および周波数で姿勢角が振動し始めた点を示している。

飛行開始直後 (a) において、飛行体の垂直方向の速度、姿勢角および姿勢角の角速度は負を示し、下向きに飛行する。飛行の経過に伴い、姿勢角および姿勢角の角速度は大きくなり、姿勢角は正となる (b)。姿勢角が大きくなるに従い垂直方向の速度も増加し、姿勢角が正となった直後に垂直方向の速度も正となる。また、その後バッテリー電圧が低下するまで、常に垂直方向の飛行速度は正となることを確認している。その結果、飛行体はバッテリー電圧が低下するまで飛行し、およそ 20 分間飛行を続ける。姿勢角が正となった後、(c) において最大値を示すまで姿勢角は大きくなり続ける。姿勢角が最大値を示す(c) 付近で飛行速度は 0 [m/s] 程度まで減少する。また、このとき水平方向の速度も最小値となり、飛行体の飛行速度は最も低くなる。羽ばたき飛行体は、重力、慣性力および流体力が平衡することにより、飛行すると考えられている⁽²⁾。これらのことから、飛行速度の低下により飛行体に生じる推進力および揚力が変化し、飛行体に生じる力およびモーメントの平衡点が変わった結果、姿勢角を維持できなくなったと考えられる。姿勢角が最大値となった後、姿勢角は小さくなり、姿勢角の振動は収束し、(d) において飛行体の姿勢角はほぼ一定の振幅および周波数で飛行することから姿勢角が安定していると考えられる。その際、飛行速度は増加し 0 [m/s] から 1 [m/s] の間で振動する。また、飛行速度は常に正を示すことから、安定した姿勢角で飛行高度が上昇し続けることがわかる。これらのことから、無尾翼・小型羽ばたき飛行体は飛行速度および姿勢角が増減した後、安定した姿勢角および常に正の垂直方向の速度で飛行することが分かった。さらには、姿勢角が安定するまで 3 [m] 程度飛行する必要があることが分かった。

3-2 羽ばたき周波数と飛行の関係 図 4 に無尾翼・小型羽ばたき飛行体の姿勢角が安定すると考えられる水平方向の位置が 3 [m] から 4 [m] の範囲における羽ばたき周波数が 9.5 [Hz], 9.0 [Hz] および 9.5 [Hz] のときの飛行軌跡を示す。

羽ばたき周波数が 11.0 [Hz] および 10.5 [Hz] のとき飛行体の飛行高度は上昇し、10.0 [Hz] のとき飛行高度を維持し、9.5 [Hz] および 9.0 [Hz] のとき飛行高度が低下することがわかる。また、羽ばたき周波数が低下すると飛行高度の上昇の勾配が小さくなることも分かる。羽ばたき周波数により、飛行体の翅に生じる揚力および推進力が変化することが知られている⁽¹⁾。また、蝶やトンボなどは飛行時に渦輪を形成しながら飛行することが知られている⁽⁷⁾。このことから無尾翼・小型羽ばたき飛行体も蝶やトンボなどの昆虫と同様に羽ばたき運動によって渦輪を形成することがわかる。これらのことから、羽ばたき周波数が上昇することにより翅の運動速度が高くなり、翅が形成する渦輪が強く発達するため大きな揚力および推進力が生じ、羽ばたき周波数が低いとき、翅が形成する渦輪が弱く発達するため小さな揚力および推進力が生じると考えられる。飛行する無尾翼・小型羽ばたき飛行体の羽ばたき周波数が高いとき飛行高度は上昇し、低いとき飛行高度は低下する。また、羽ばたき周波数を変化させた場

Fig. 3 Body angle and vertical velocity on free flight

Fig. 4 Flight trajectories at different flapping frequencies

合においても、飛行体は飛行することから、尾翼を持たない羽ばたき飛行体においても羽ばたき周波数を用いて飛行高度を制御できると考えられる。

4. 結論

飛行する無尾翼・小型羽ばたき飛行体の姿勢角は、飛行開始直後において微小に振動しつつ姿勢角は増減するものの、3 [m] 程度飛行した後、安定することが分かった。姿勢角が安定すると思われる飛行開始点から 3 [m] ほど飛行した位置において、尾翼を持たない羽ばたき飛行体においても、羽ばたき周波数が高いときは、飛行体の飛行高度は上昇する。羽ばたき周波数が低いときは、飛行時の飛行高度は低下することが明らかとなった。これらのことから、羽ばたき周波数を変化させることにより、飛行時の飛行高度は変化するといえる。さらには、羽ばたき周波数は、無尾翼・小型羽ばたき飛行体の飛行高度の制御に重要なパラメータの1つと考えられる。

参考文献

1. Lung-Jieh Yang et al., Sensors and Actuators A, 139, pp. 95-103, 2007
2. A. T. Pfeiffer et al., J. Bio. Eng., vol. 7, pp. 102-111, 2010
3. Tanaka H., et al., IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2008), pp. 3095-3100
4. 田中博人ら, 日本機械学会論文集 B 編, 718, (2007), 1490-1496
5. Zaeem A. Khan et al., Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation Orlando, Florida - May 2006
6. 東 昭, 生物の動きの辞典 (1997)
7. R. J. Bomphrey, Exp. Fluids, Vol. 40., pp. 546-554, 2006