

8の字運動をする羽ばたき機構の研究開発

Research and development of flapping mechanism to provide the motion of figure-eight pattern

北川一敬[†], 野村達也^{††}, 鳥居祐太^{††}, 小西康都^{†††}

Kazutaka KITAGAWA[†], Tatsuya NOMURA^{††}, Yuuta TORII^{††}, Yasuhumi KONISHI^{†††}

Abstract Radio controlled micro aerial vehicles(MAV) have carried out unmanned missions the natural disaster and direct sowing on dry field. Research and development on flight system of MAV have focused on flying performance on low Reynolds number $O(10^4)$ under the biofluid dynamics by many researchers. The motivation of present study aim to produce and develop the MAV with flapping motion of figure-eight pattern of hummingbird by using the imitative technology. This paper is reporting and introducing the outline of flapping mechanism to provide the motion of figure-eight pattern, the results of the visualization of the flapping motion and measurement of unsteady aerodynamic force using the cantilever system.

1. 緒言

羽ばたき運動によって飛翔を行う生物は、大型の鳥や昆虫など多くの種類が存在する。それらの生物が持つ翼の大きさや羽ばたき周波数などによって翼端の軌跡は大きく異なる。大型の鳥の翼端の軌跡は、楕円軌道に近い羽ばたき運動を行う。ハチドリは、ホバリング時に8の字の羽ばたき運動を行い、翼弦レイノルズ数約 1.1×10^4 [-]である。(1)-(3)

本稿では、ハチドリの8の字の羽ばたき運動を模倣した羽ばたき装置の概要、羽ばたき運動の可視化、カンチレバを用いた推進力計測実験の結果を報告する。

2. 羽ばたき装置の概要

羽ばたき装置の開発にあたり、ハチドリの8の字の羽ばたき運動を模倣し、フラッピング角、リード・ラグ角、フェザリング角を同時に変化させる羽ばたき装置を設計した。

Fig.1は8の字の羽ばたき運動を行う羽ばたき装置の写真を示す。羽ばたき装置は2枚1対の翼を持ち、外部

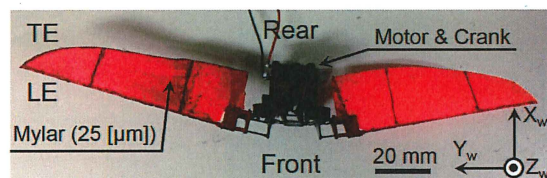


Fig.1 Photograph of flapping device

電源から電気を供給し、モータを駆動、その後、羽ばたき運動を行う。羽ばたき装置の部品は主にカーボンロッド及びパイプ、3DプリンタのABS樹脂性の造形部品などによって総質量 6.42[g]である。一様流速 1.45[m/s]において、モータに 3[V]の電圧を掛けた時、T.D.C から B.D.C までのストローク角は 82[deg]、羽ばたき周波数 9.9[Hz]で羽ばたき運動を行う。その時の翼弦レイノルズ数は $1.8 \times 10^3 \sim 3.5 \times 10^3$ [-]、無次元周波数は 0.46[-]となり、それぞれ式(1)、式(2)より計算を行った。(3)

$$Re = \frac{c_m U_e}{\nu} \quad (1) \quad k = \frac{2\pi f c_m}{U_{ref}} \quad (2)$$

C_m は平均翼弦、 U_e は平均翼弦における相対流速、 ν は動粘度、 f は羽ばたき周波数、 U_{ref} は翼端における平均相対流速である。Fig.2は翼を示す。翼は $\phi 0.7$ [mm]カーボンロッド、25[μ m]厚マイラ膜、3Dプリンタ造形部品、ボールジョイントによって製作し、ボールジョイントを中心に羽ばたき運動を行う。翼形状はハチドリの片翼長

[†] 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学大学院 (豊田市)

^{†††} 東北大学流体科学研究所 (仙台市)

(85[mm])及びアスペクト比(8[-])を基に全ての翼弦線が前縁で直線となる楕円翼になっている。フェザリングの回転中心は平均翼弦(21[mm])の前縁から 25%の位置にある。翼面積は両翼で 3612[mm²], 翼面荷重は 17.4[N/m²]である。

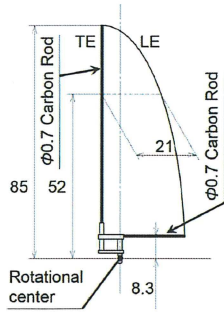


Fig.2 Wing

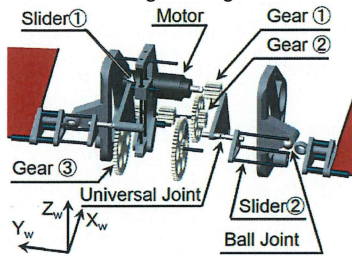
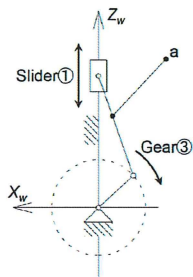
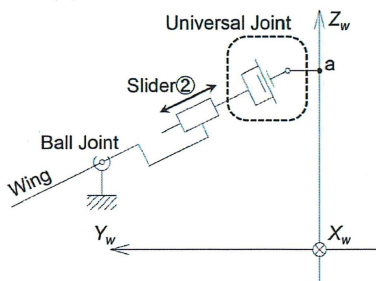


Fig.3 Drawing of flapping mechanism

Fig.3 は羽ばたき装置の概要を示す。8の字の羽ばたき運動を行うために、ギア、スライダ、ユニバーサルジョイント、ボールジョイントを用いる。



(a). Slide crank mechanism



(b). From point a to wing

Fig.4 Description of flapping motion mechanism

=12[枚]:36,12[枚]:48[枚]により速度伝達比 12[-]でトルクを上げている。Fig.4 は羽ばたき装置の機構図, (a)はスライドクランク機構, (b)は点 a から翼までの機構を示す。Fig.4 (a)の点 a と(b)の点 a は同じ位置にある。スライドクランク機構によってギア③の回転運動を変換することで、点 a が座標 X_w-Z_w面上に二次元の 8 の字を描く。二次元の 8 の字の運動を行う点 a はユニバーサルジョイントとスライダ②によってフェザリングの回転運動を伝達しながら、ボールジョイントを中心にフラッピング角とリード・ラグ角とフェザリング角を同時に変化させる 8 の字の羽ばたき運動を行う。

3. 羽ばたき装置の翼端の軌跡の可視化

羽ばたき装置の翼端の羽ばたき運動をハイスピードカメラ(ナックイメージテクノロジー製 MEMRECAM HX-3)により可視化を行った。Fig.5 は翼端の可視化実験の設置風景を示す。光源は Pi PHOTONICS 社製の 30[W]のホロライトを 4 つ使用した。風洞は運転を行わず、無風化で可視化実験を行った。羽ばたき装置は φ1.5[mm]のピアノ線で上からつるして固定した。ハイスピードカメラは 60[mm]マクロレンズを使用し、フレームレートは 3000[fps], シャッタースピードは 200[μs], 撮影範囲は 2048×1536[pixel](296×222[mm])で撮影を行った。

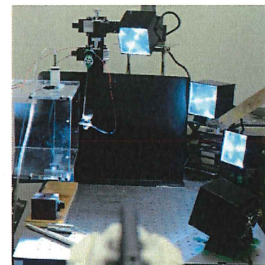


Fig.5 Experimental setup of visualization of flapping motion

Fig.6 は羽ばたき装置の翼端の可視化結果を示す。製作した羽ばたき装置の翼端の軌跡の結果は実線で示し、機構の計算結果の軌跡を破線で示す。羽ばたき装置は安定化電源から 3[V]で動作し、10.9[Hz]の羽ばたき運動を行う。T*は時間を羽ばたき運動の 1 周期で割った無次元時間である。羽ばたき装置の翼端の軌跡から 8 の字の羽ばたき運動を行っていることが確認できる。T*=0[-]において T.D.C となり、ダウンストロークを開始する。T.D.C においてアップストローク時の翼の慣性モーメントにより前衛のカーボンロッドが弾性変形したと考えられる。T*=0.17[-]から T*=0.50[-]まで翼が破線より後方を通過していることがわかる。

モータの回転運動は、ギア ① : ② : ③

これは翼が流体力の影響を受けて軌跡が変わったと考えられる。 $T^*=0.53[-]$ よりアップストロークを開始する。 $T^*=0.67[-]$ から $T^*=0.83[-]$ においてアップストロークを行い続けて $T^*=1.00[-]$ となり1周期が終わる。計算結果及び実機のストローク比(アップストローク/ダウンストローク)はそれぞれ1.15[-], 0.75[-]となった。計算結果は流体力を考慮していないので、ダウンストロークの方がアップストロークよりも翼の進行方向に対して抗力となる流体力を発生したと考えられる。

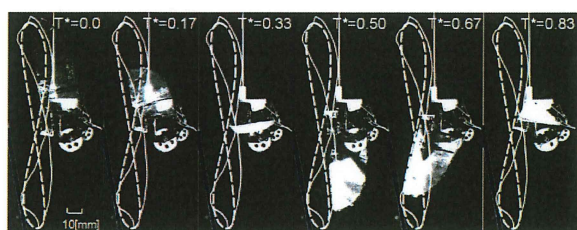


Fig.6 Motion path of wing tip

4. 推進力計測実験

8の字の羽ばたき運動を行う羽ばたき装置のカンチレバ式推進力計測実験を行った。Fig.7は実験装置の概要を示す。ひずみゲージには、株式会社共和電業製のKFG汎用箔ひずみゲージKFG-5-120-C1-11(抵抗値:120[Ω],ゲージ率:2.1[-])を使用した。カンチレバはφ5[mm],長さ約240[mm]のステンレス丸棒を用いた。ブリッジ回路は、2枚のひずみゲージを用いた2ゲージ法により、鉄の丸棒に生じる曲げひずみを測定した。本実験では、羽ばたき装置の推力方向に生じる流体力を測定するために、2枚1組のひずみゲージを1箇所貼り付けた。推力方向のひずみゲージは、羽ばたき装置の中心軸からひずみゲージまでの距離を200[mm]とし、カンチレバ端部から145[mm]の位置に貼り付けた。動ひずみ測定器の感度を $1 \times 10^4 \times 10^{-6}[\square]$ とし、ローパスフィルタを30[Hz]で行う。

風洞は東北大学流体科学研究所の小型低乱風洞(検定風洞)の開放型を用いた。一樣流は羽ばたき装置の正面から1.45[m/s]で流し、羽ばたき装置に3[V]の電圧を掛けて羽ばたき周波数9.9[Hz],ストローク比0.83[-]で稼働した。

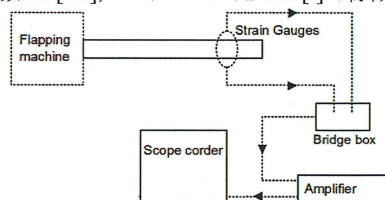


Fig.7 Details of aerodynamic force measurement system

Fig.8は推進力計測実験の結果を示す。左側の縦軸は推進力を羽ばたき装置の自重(mg)で割った無次元推進力、右側の縦軸は推進力、横軸は無次元時間を示す。

$T^*=0[-]$ においてT.D.Cとなり、ダウンストロークを開始する。ダウンストローク時の最大値は $T^*=0.19[-]$ において $Fh^*=1.22[-]$ である。 $T^*=0.55[-]$ においてB.D.Cに到達し、アップストロークを開始する。アップストローク時の最大

値は $T^*=0.71[-]$ において $Fh^*=2.55[-]$ である。 $T^*=1.00[-]$ においてT.D.Cとなり1周期が終わる。1周期の Fh^* の積分値は0.26[-]となり、推進力を発生させている。しかし、翼弦レイノルズ数が $1.8 \times 10^3 \sim 3.5 \times 10^3[-]$ になってしまい、前縁剥離渦などの生成が不十分な可能性がある。羽ばたき装置の改善策として羽ばたき周波数及びストローク角の向上が必要であると考えられる。

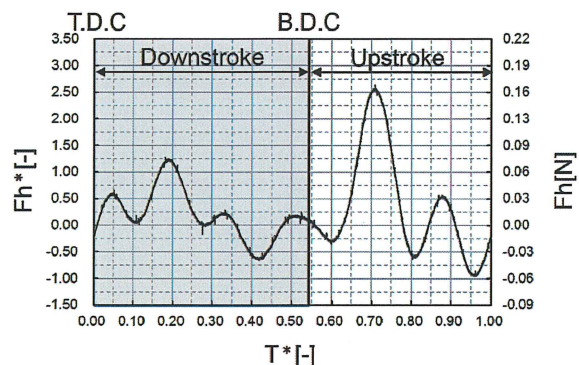


Fig.8 Time history of aerodynamic force

5. 結論

ハチドリのような8の字の羽ばたき運動を模倣した羽ばたき装置の概要、羽ばたき運動の可視化、カンチレバを用いた推進力計測実験の結果から以下の結論を得た。

- (1) スライドクランク機構、ユニバーサルジョイント、ボールジョイントにより、羽ばたき周波数9.9[Hz]の8の字の羽ばたき運動を行う羽ばたき装置を完成させた。
- (2) 羽ばたき運動を行う翼端の軌跡の可視化から計算結果及び実機のストローク比はそれぞれ1.15[-], 0.75[-]となることがわかった。
- (3) 推進力計測実験から1周期の Fh^* の積分値が0.26[-]となり、推進力を発生させているが、翼弦レイノルズ数が $1.8 \times 10^3 \sim 3.5 \times 10^3[-]$ になってしまったので、羽ばたき装置の羽ばたき周波数及びストローク角の向上が必要であると考えられる。

参考文献

- (1) 東照, “生物の動きの辞典”, 朝倉書店, (2007)
- (2) Akira Azuma, “THE BIOKINETICS OF FLYING AND SWIMMING SECOND EDITION”, AIAA Education Series, (2006)
- (3) WEI SHYY, et al, “An Introduction to FLAPPING WING AERODYNAMICS”, CAMBRIDGE, (2013)