

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：11201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650089

研究課題名(和文) 飛翔昆虫の尾翼を用いない方向転換メカニズムの解明

研究課題名(英文) Asymmetry Control of Wing Stroke Amplitudes for Rotational Torque Generation

研究代表者

三好 扶 (MIYOSHI, Tasuku)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号：10392193

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：飛翔昆虫は、尾翼・固定翼を持たずに、羽ばたきによって飛翔する。その飛翔方法の中でも、尾翼を用いずに方向転換を実現するメカニズムは不明であった。本研究では、「2枚翅の羽ばたき振幅量を制御することで、左右翅の揚力・推力の差分から方向転換を実現する」と仮説をたて、実機モデルによって検証した。本研究で開発した「操縦筋モデル」を実装し「機体ロール・ヨートルク」を計測した結果、機体回転トルクは操縦筋角度変化による羽ばたき振幅量変化に応じた増減が認められた。しかしながら、2枚翅による羽ばたきでは機体回転トルクを独立的に制御することは困難であり、4枚翅による効率がよいことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The insects conduct the asymmetric wing flapping amplitude to generate rotational torque to control flight orientation without using a tail rudder. In this study, asymmetry wing flapping amplitude control mechanism was a simplified joint link mechanism inspired from the exoskeleton mechanism of the Diptera that was controlled by the steering muscle model. The functionality of the steering muscle was modeled to control the wing flapping amplitude of left and right wings asymmetrically and independently to generate the difference of the dynamic lift generated by left and right wings. There also was a possibility that the rotational motion of the wing influences the generation of dynamic lift and it was generated passively.

Although the rotational torque modulation could be generated by controlling the steering muscle model to modulate the 2-wing flapping amplitudes asymmetry, it was suggested that 4-wing flapping was efficient to control flight orientation.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：羽ばたき機構 操縦筋モデル 方向転換トルク生成

1. 研究開始当初の背景

大規模自然災害が高頻度に発生する日本にとって、ヒトが進入不可能な領域での調査活動を目的とした調査・レスキューロボットは必要不可欠と言える。このニーズに対し、これまで地上走行型調査・レスキューロボットの研究開発は盛んに行われてきたが、小型飛行機型 (Micro Air Vehicle: MAV) の研究開発は、1990 年代よりアメリカを中心に盛んに行なわれてきた。MAV は翼幅 150-200 mm、重量 10-100 g、滞空時間 1 時間、飛行距離 10 km、飛行速度 20 m/s を達成する無人航空機として定義される。

現在まで MAV の利用は地球上が想定されているため重力に抗して揚力を発生させることに研究の主眼が置かれている。本研究では、来る宇宙環境利用の一旦として、飛行昆虫の飛行形態を工学的にモデル化しつつ、微小重力空間内での飛行昆虫の飛行形態を実現することを最終目標としている。

2. 研究の目的

MAV の研究の多くは揚力発生メカニズムに主眼が置かれてきたが、本研究では、飛行昆虫が合目的に目的地へ方向転換するメカニズムに着目し、“両翅の羽ばたき周波数・翼振幅量を制御することで、左右翅の揚力・推力の差分から方向転換を実現する”と仮説を立て、その検証を実施することを目的とする。特に、飛行昆虫が航空機のような「垂直尾翼：ラダー」を有さないことから、尾翼無しでの方向転換トルク生成機序を実機モデルによって検証する。本研究は下記 3 項目の実装および実験を実施した。

- (1) 方向転換を可能とするような、左右翅振幅調節機構 (操縦筋モデル) の開発とその実機モデルへの実装。
- (2) 実機モデルによる方向転換トルク生成の計測実験。
- (3) 実機モデルによる翅周り渦生成過程の PIV 計測実験。

3. 研究の方法

本研究にて検証する機体回転トルク生成の概念図を図 1 に示す。左右翅間の揚力差が回転力となって方向転換を達成すると仮説を立てている。

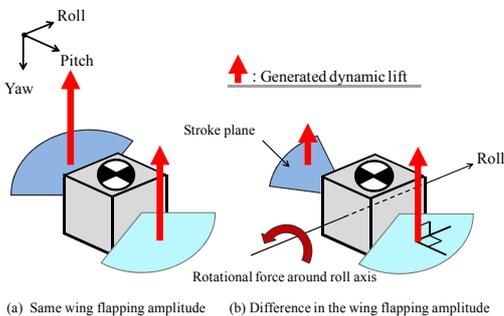


図 1 左右翅の翼振幅量差異による生成揚力の変化と機体回転トルク生成の概念図

(1) 操縦筋モデルの実装

操縦筋モデルは図 2 に示す θ_R または θ_L を左右で変化させることによって、羽ばたき振幅角度 ϕ_i を制御可能にする閉 8 リンク機構を採用した。また各リンク長は、 $L_{base}=60$ 、 $L_1=20$ 、 $L_2=60$ 、 $L_3=47$ [mm] とした。

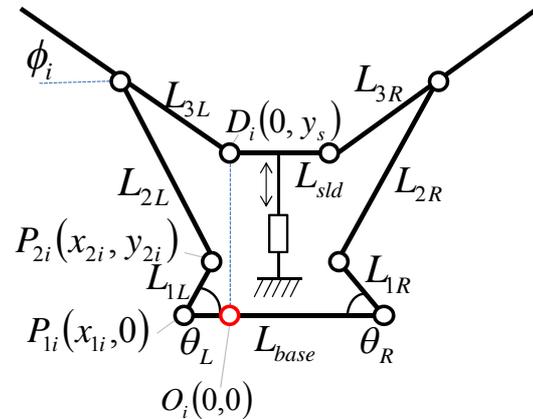


図 2 閉 8 リンク機構による操縦筋モデル

(2) 方向転換トルク計測実験

羽ばたき動作による発生揚力 L [N] は、空気密度 ρ [kg/m³]、羽ばたき代表速度 V_{ref} [m/s]、翅面積 S [m²]、および揚力係数 C_L (無次元数) から、次式で表される。

$$L = (\rho (V_{ref}^2) S * C_L) / 2$$

従って、左右翅が同一周波数で羽ばたいたとき、羽ばたき振幅量の違いは左右の羽ばたき速度 V_{ref} に影響すると予想され、左翅で生成される揚力を L_L 、右を L_R とすると、左右翅間の揚力差 L が生じ、結果的にロールトルクの生成が期待され、次式で表される。

$$L = L_L - L_R = (\rho (V_L^2 - V_R^2) S * C_L) / 2$$

本実験では、操縦筋モデルを実装した非対称羽ばたき装置 (図 3) を用い、羽ばたき振幅角変化に伴った生成力を計測する。

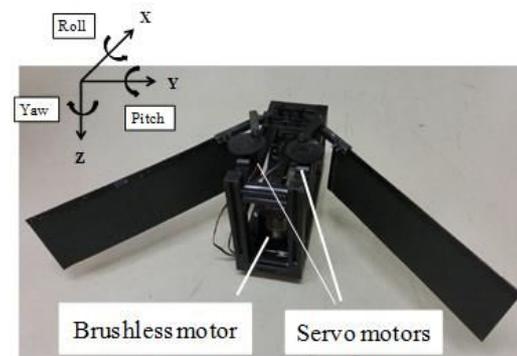


図 3 操縦筋モデルを実装した非対称羽ばたき装置

非対称羽ばたき装置下部に 6 軸力センサ (OPFT-50N-B, ミネベア (株)) を取り付け、また 3 次元リアルタイム動作解析システム VENUS3D ((株) ノビテック) を用いて左右翅の特徴点に関する 3 次元座標を取得した (図 4)。サンプリング周波数は、力データは 1kHz、座標データは 250Hz とした。得られた座標データより 10 周期分の羽ばたき動作を

抽出し、この間の力データに4次のバターワースフィルタ(カットオフ周波数 5[Hz])を適用し、振幅角度変化の差異を比較した。なお、振幅角度変化は左翅の操縦筋角度を一定とし、右翅の操縦筋角度から右翅羽ばたき振幅角度を3段階に設定した。

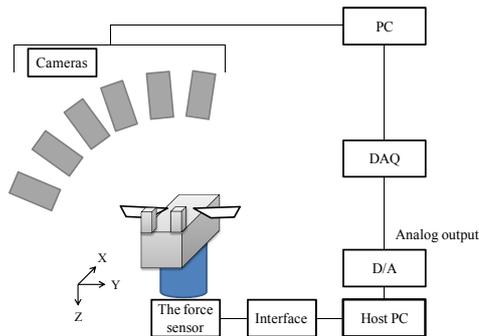


図4 非対称羽ばたき装置による方向転換トルク計測

(3) 渦生成過程の PIV 計測実験

羽ばたき動作中の翅周りで発生する空気流れ(渦構造)は、羽ばたき動作のフェーズによって変化する。中でも特徴的な形状で、かつ揚力生成に寄与する渦は、羽ばたき初期の前縁渦の形成、羽ばたき中期のドーナツ型渦輪の形成、および翅打ち下ろしから打ち上げに切り替わる際に発生する後流捕獲である。そこで本研究では、羽ばたき振幅角を変化させた際、生成される翅周りの渦が先行研究との間に違いが認められるかを実験的に明らかにする。翅周りの渦計測は、図5に示すような、密閉された計測空間にて、煙発生装置(DAINICHI, PORTA SMOKE PS-2002)からトレーサ粒子を挿入し、シート光用レーザ(Laser Light Sheet WN1000, カトウ光研(株))によってレーザ光を照射する、PIV計測実験を実施した。無風環境下にて羽ばたき周波数 1Hz で 10 周期分の羽ばたき動作を行い、このときレーザシートで切り出された流れ場は、高速度カメラ(PHANTOM MiroeX4(SN9054))を用いサンプリングレート 1kHz によって粒子位置を計測し、二次元流体解析ソフトウェア Flownizer 2D((株)ディテクト)を用いて解析を行った。レーザ光および高速度カメラは装置右側の翅におけるストローク 50%位置に対して直行するように配置した。

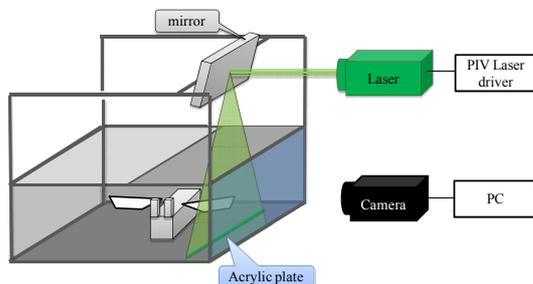


図5 羽ばたき振幅角度変化による渦計測実験環境

4. 研究成果

(1) 操縦筋モデルによる羽ばたき振幅角度変化

図6に、操縦角度 θ_R の変化に伴った羽ばたき振幅角度 θ_{flap} の変化の様子を示す。この結果、操縦筋モデルによって振幅角を線形に変化させることが可能となった。

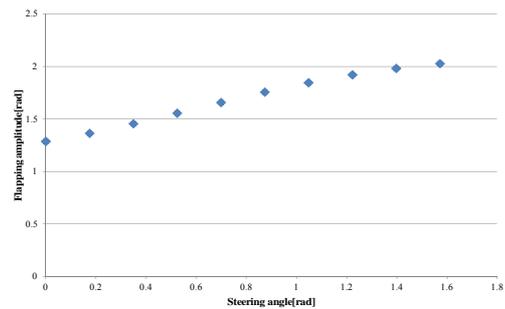


図6 操縦角度と羽ばたき振幅角度の関係(理論値)

なお、以降の解析では、操縦角度 1.61 rad (実測値 1.58 ± 0.005 rad) の条件を操縦角度 min、同 1.72 rad (1.71 ± 0.003 rad) を操縦角度 middle、同 1.83 rad (1.83 ± 0.001 rad) を操縦角度 max 条件とする。

図7は本装置による、羽ばたき1周期中の操縦角度変化に伴う羽ばたき振幅角速度変化の加算平均波形である。操縦角度が大きくなるに従って羽ばたき振幅角速度変化も大きくなっており、式とから揚力 L の大きさが調節可能と示唆され、かつ式から左右翅の操縦角度差によって左右翅間の揚力差 L が生成されることが予想された。

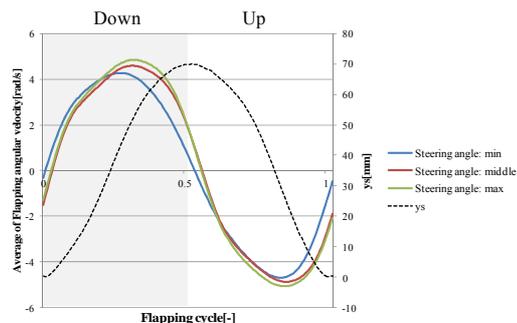


図7 羽ばたき1周期中の操縦角変化に伴う羽ばたき振幅角速度変化

(2) 方向転換トルク計測結果

図8に、スライダクラック位置 (y_s) に対する、左右翅間の操縦角度差によって生じた力データ変化を、計測された5周期分から加算平均した結果を示す。操縦角度 middle 条件は左右翅間の角度差が最小のときであり、操縦角度 min 条件では右翅側の揚力が小さく、逆に操縦角度 max 条件では右翅側の揚力が大きくなる。従って、操縦角度 min 条件では機体に対して右向き回転力が生成されることとなり、事実図8の M_x の波形では up ストローク時にピーク値を迎え、この値は操縦角度 middle 条件と比べて十分に大きい。

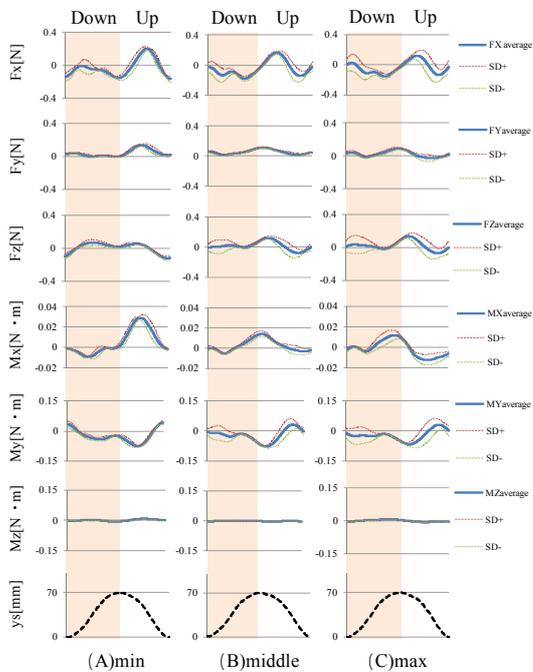


図 8 左右翅間の操縦角度差に対する各力の加算平均波形

また、操縦角度 max 条件では左向きの回転力が生成されることとなり、up ストロークでの Mx ピーク値は操縦角度 middle 条件に比べ十分に小さくなった。以上から、本研究の仮説であった「両翅の羽ばたき振幅量を制御することで、左右翅の揚力の差分から機体 Roll 回転を実現する」ことが実験的に明らかになった。しかしながら、Pitch 回転方向(図 8 の My 成分)においても、左右翅間の操縦角度変化によって、生成される回転力に差が生じた。これは操縦筋を制御するだけでなく、翅基部の迎角制御、あるいは 翅枚数の増加による補償、のいずれかの方法論によって実際の 2 翅飛翔昆虫モデルの方向転換制御が達成される可能性が高く、この点は今後の研究課題としたい。

(3) 操縦筋モデルによる翅周囲渦生成

渦度は流れ速度の回転ベクトルであることから、翅が同一周波数で羽ばたく際は、羽ばたき振幅角の増加に伴い羽ばたき速度も増加することによって渦度は成長する。図 9 に、操縦角度の増大に伴った渦度生成過程を示す。操縦角度の増加に伴い生成される渦の大きさが増大し、操縦角度が大きいほど前縁渦およびドーナツ型渦輪の成長が確認された。また、Wake capture 相では、振幅角度が大きくなることで翅前・後縁部から翅中心方向への渦度の成長が併せて観察されたことから、操縦筋モデルが確かに羽ばたき機構の揚力・推進力制御に貢献することが明らかとなった。今後は、得られた翅周囲渦度生成過程と、実際に発生する揚・推進・回転力との関係性を定式化する。

なお、本研究目的(1)実機モデル開発は Journal of Aero Aqua Biomechanisms 誌に掲載

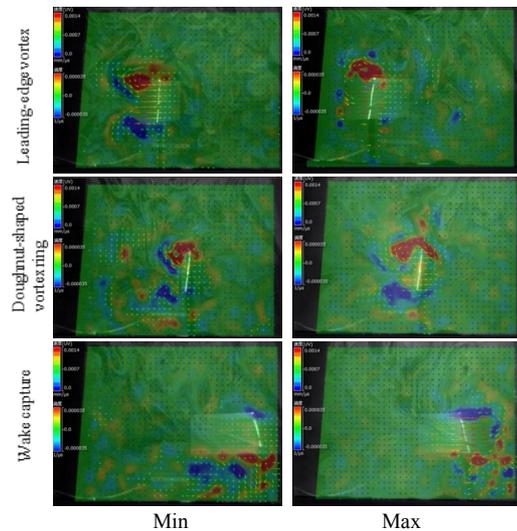


図 9 操縦角度差に対する渦度生成過程

済み、目的(2)方向転換トルク生成機序は ISABMEC 2014(ハワイ)、目的(3)翅周りの渦生成過程は日本機械学会計算力学部門講演会 2014(岩手)にてそれぞれ発表予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Motoki Takagi, Masayoshi Kawabe, Ayumi Fujita, Adiljan Yimit, Fumihito Nishimura, Yoshihiro Hagihara, Tasuku Miyoshi: Asymmetry Control of Wing Stroke Amplitudes for Rotational Torque Generation, Journal of Aero Aqua Biomechanisms, Vol.3, No.1, pp.97-102, 2013、査読有

〔学会発表〕(計 2 件)

三好扶,川辺将剛,高木基樹,萩原義裕,西村文仁: 2 翅による飛翔昆虫の翼機構に関する研究,日本機械学会第 25 回バイオエンジニアリング講演会, pp.127-128, 2013.1.9-11、つくば

Masayoshi KAWABE, Motoki TAKAGI, Ayumi FUJITA, Adiljan YIMIT, Yoshihiro HAGIHARA, Tasuku MIYOSHI, Yaw torque generation using the asymmetry control of the wing stroke amplitudes, ISABMEC2012, Proceedings pp.210-215, 2012 August 25-28, Taipei、査読有

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.iwate-u.ac.jp/~miyoshi/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

三好 扶 (MIYOSHI, Tasuku)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号: 1 0 3 9 2 1 9 3