

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760197

研究課題名(和文)ハチドリを規範としたスマート羽ばたき翼

研究課題名(英文)Hummingbird-inspired smart flapping wings

研究代表者

田中 博人(Tanaka, Hiroto)

千葉大学・千葉大学・上海交通大学国際共同研究センター・特任助教

研究者番号：80624725

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：ホバリング可能な小型羽ばたき飛行機の規範としてハチドリに着目し、ホバリング飛行中のハチドリの翼運動と翼形状変形を高速ビデオカメラで3次元運動解析した。ハチドリの翼運動を単純かつ軽量の構造で再現する手法として、人工翼の翼面フィルムに「たるみ」を与えて翼面のねじれ変形を大きくした結果、実際のハチドリの自重に相当する平均揚力が発生し、たるみが無い場合にくらべて効率(揚力/入力電力)も向上した。

研究成果の概要(英文)：Aiming to develop small flapping aerial robots capable of hovering flight, we measured wing motions and shapes of a real hummingbird in hovering flight using multiple high-speed video cameras and motion analysis software. To realize wing deformation like the real hummingbird wing in artificial wings with light-weight structures and mechanisms, the wing films was relaxed in order to enhance passive feathering deformation. As a result, the wing with the relaxed film generated higher average lift than the wing with a tight film, which was comparable to the body weight of the hummingbird. The relaxed film also improved efficiency represented as a ratio of average lift to input power.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 知能機械学・機械システム

キーワード：羽ばたき飛行 ハチドリ ホバリング 生物規範工学 バイオミメティクス

### 1. 研究開始当初の背景

近年、人が入り込めない場所で観測を行う小型無人飛行ロボットが盛んに研究されている。空中を移動する飛行ロボットは陸上移動ロボットと異なり、崩壊した建物内部等でも障害物に邪魔されることなく目的地まで到達でき、迅速な観測が行える。そのためには、複雑で狭い空間を飛行できる小さなサイズ(翼幅 15 cm 以下の手乗りサイズ)と高機動性、さらに観測時に空中静止できるホバリング能力を有することが求められる。ハチドリの羽ばたき飛行はホバリング能力と高機動性で良く知られ、翼幅も 15 cm 以下であるため、小型飛行ロボットの規範として期待される。ホバリング中のハチドリはほぼ水平に羽ばたくが、この際に打ち上げと打ち下ろしで適切な迎え角(翼断面と相対流速がなす角)を取るように翼全体もしくは翼面がねじれる。このような複雑な翼運動を人工の羽ばたき機構において飛行可能な重量で実現する方法は確立されていない。

### 2. 研究の目的

ハチドリの翼運動を単純化された軽量の機構で実現する方法として、能動的な 1 軸の羽ばたき運動と受動的な翼面のねじれを組み合わせた構造を採用し、実際のハチドリのホバリング飛行と比較する。そのために以下の 2 項目を研究目的とした。

(1) 羽ばたき機の規範および比較対象とするために、実際のハチドリのホバリング飛行中の翼運動と翼形状を 3 次元的に計測する。

(2) 計測したハチドリと同じ平面形の人工翼を製作し、電動羽ばたき機構で試験する。ハチドリと同様の翼形状変化を受動的に発生させ、翼変形、空気力、効率を計測して性能を評価する。

### 3. 研究の方法

(1) ハチドリの翼形状を計測するために、多摩動物公園が飼育するチャムネエメラルドハチドリ *Amazilia amazilia* を対象として 3 次元運動解析を行った。吸蜜時のホバリング飛行を 4 台の高速度ビデオカメラ(2000 fps, 1024 x 1024 pixels)で撮影し、運動解析ソフトウェアで羽軸の端点、翼端、翼付け根の 3 次元座標をフレーム毎に再構成して、翼運動と翼形状を計測した。また、ハチドリの止まり木にロードセルを設置して、ハチドリの体重を計測し、ホバリング時の平均揚力の指標とした。

(2) 計測したハチドリの翼平面形に基づいて、CFRP(炭素繊維強化プラスチック)フレームとポリエチレンフィルムから成る軽量の平坦翼を製作した。この翼を電動羽ばたき機構に取り付けてハチドリと同じ周波数(29 Hz)で羽ばたかせ、受動的な翼形状変形と平均揚

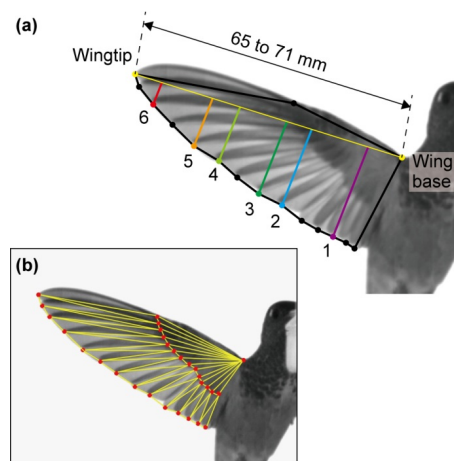


図 1. チャムネエメラルドハチドリの翼形状計測点

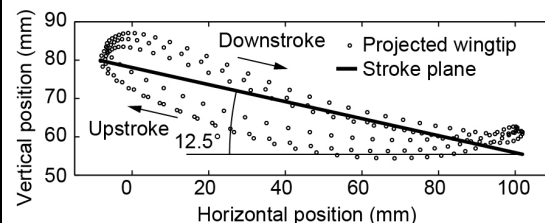


図 2. 矢状面に投影した翼端の軌跡

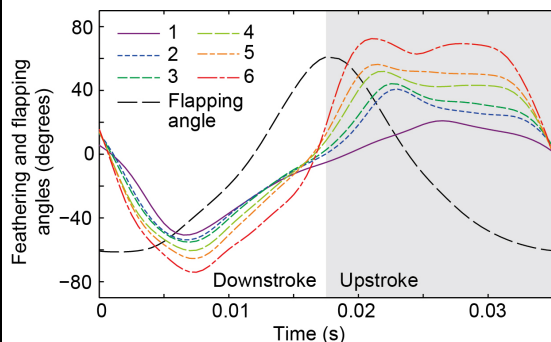


図 3. ホバリング飛行中のフェザリング変形

力を計測し、実際のハチドリのホバリング飛行と比較した。

### 4. 研究成果

(1) ハチドリの翼形状を、翼端、翼付け根、各羽軸の翼後縁端、各羽軸と雨覆いの交点を頂点とするポリサーフェスで近似した(図 1 (b))。翼面積の時間変化を計算したところ、羽ばたき中に最大値に対して約 20% 変化し、打ち下ろし中に最大値を示した。この翼面積変化は、第 1 風切り羽の羽軸の広がり角および雨覆い部の広がり角の時間変化の増減と対応していた。

各羽軸の翼後縁端から、翼付け根と翼端を結ぶ直線に垂線を下ろして翼弦線を定義し、フェザリング角(ストロークプレーンと翼弦線のなす角)を求めた(図 1 (a))。翼端を矢状面に投影した軌跡を最小二乗法で線形近似し、その近似直線で矢状面と垂直に交わる平面をストロークプレーンとした(図 2)。フェザリング角はストロークプレーンに垂直な時をゼロ度とし、翼を回外する方向を正、回内

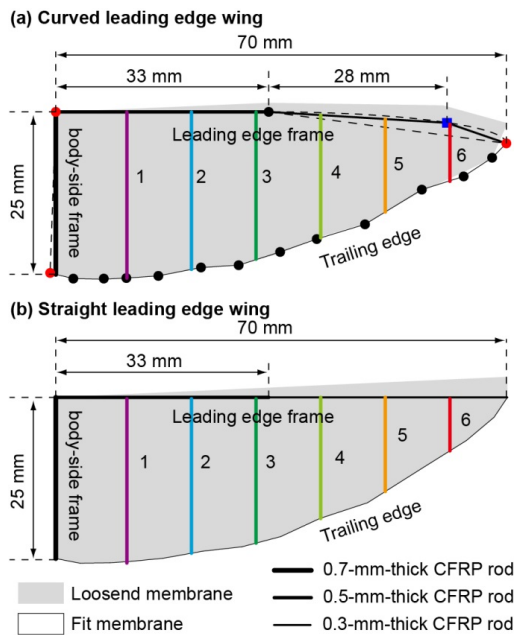


図 4. 製作した人工翼の模式図

する方向を負とする。打ち上げ時は打ち下ろし時よりも翼付け根付近のフェザリング（フェザリング角の絶対値）が小さく、翼面のねじれ（翼付け根側と翼端側のフェザリング角の差）が大きかった（図 3）。この翼面のねじれは、羽軸の受動的曲げ変形によって生じていると考えられる。

(2) 計測したハチドリの形状をもとに、CFRP フレームとポリエチレンフィルムから成る人工翼を製作した。前縁形状の影響を調べるために、ハチドリの翼形状を模した湾曲した前縁と製作しやすい直線状前縁を比較した（図 4 (a, b)）。さらに、翼面の受動的フェザリングを制御する手法として、翼面フィルムに「たるみ」を与える方法を提案し、フレームで定められた平面形よりも大きなフィルム（図 4 中の灰色部）を張った「たるみ翼」を製作した。これらの翼を 1 軸の羽ばたき運動を行う電動羽ばたき機構に取り付けて、翼形状、空気力、効率を計測した。羽ばたき周波数と羽ばたき振幅は実際のハチドリとほぼ同じ 28 Hz と 110° である。

翼面のねじれは、いずれの翼も翼付け根側のフェザリングが小さく翼端側のフェザリングが大きいという翼面のねじれを示した（図 5）。これは実際のハチドリの打ち上げと同様の傾向であり、ハチドリの翼の打ち上げ中のねじれ変形が受動的に引き起こされていることを示唆する。各翼弦のフェザリング振幅は、翼面のたるみによって平均 9%（湾曲前縁）および 19%（直線前縁）増加した。

羽ばたき機構に取り付けた 1 軸ロードセルで計測した時間平均揚力を図 6 (a) に示す。いずれの翼面の場合でも、湾曲前縁は直線前縁よりも揚力が大きく、いずれの前縁形状でもたるみ翼面は通常の翼面よりも揚力が大きくなった。湾曲前縁かつたるみ翼面の場合は

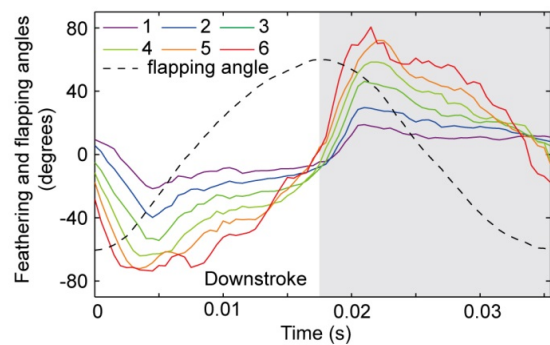


図 5. 湾曲前縁たるみ翼のフェザリング変形

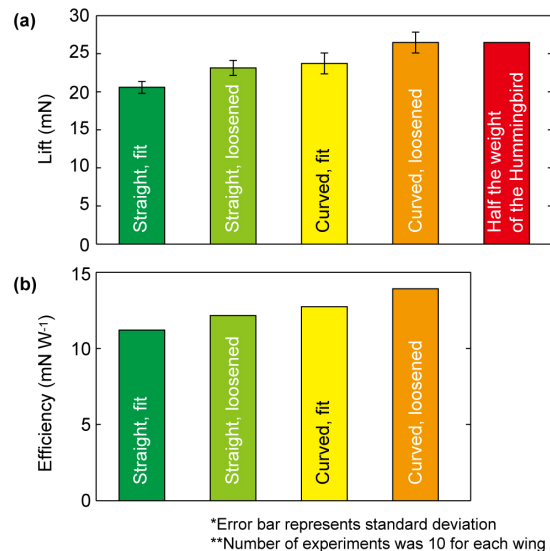


図 6. (a) 各翼の平均揚力とハチドリの体重。(b) 効率（平均揚力/入力電力）。

1 枚の平均揚力が規範としたハチドリの体重の 50% にほぼ一致した。

このときの効率を入力電力に対する時間平均揚力の比で計算した結果を図 6 (b) に示す。翼面のたるみによって揚力だけでなく効率も向上できることが示された。

これらの結果から 1 軸の単純な羽ばたき翼でも、たるみ翼面による受動的なフェザリング変形によって揚力と効率の向上が可能であり、規範元のハチドリと同等の性能を実現できることが示された。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 13 件)

H. Tanaka, K. Suga, M. Maeda, I. Kitamura and H. Liu, "Passive wing deformation of hovering hummingbirds," in *The Society for Integrative & Comparative Biology Annual Main Meeting 2014 (SICB 2014)*, Austin, TX, USA, Jan. 3 – 7, (2014), p. 337.

H. Tanaka, H. Suzuki, I. Kitamura, M. Maeda

and H. Liu, "Lift generation of hummingbird wing models with flexible loosened membranes," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Tokyo, Japan, Nov. 3 – 8, (2013), pp. 3777-83.

H. Tanaka, I. Kitamura, M. Maeda, T. Nakata and H. Liu, "Morphing wings of a hovering hummingbird," in The Society for Experimental Biology Annual Main Meeting 2013, Valencia Conference Centre, Valencia, Spain, July 3 – 6, (2013). [General Biomechanics Best Poster 3rd Prize]

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

アウトリーチ活動

子供向けワークショップ：田中博人, "体験ワークショップ「ハチドリの飛行のヒミツ～羽ばたきロボットが空を飛ぶ！？」," in 2014年春休み特別展「4億年、昆虫との手紙展。バイオミメティクス いきものに学ぶイノベーション」, 科学技術館, 東京, Mar. 28, (2014).

市民向け講演：田中博人, "空飛ぶハチドリのヒミツ - 飛行生物のエアロダイナミクス-," in 鳥博セミナー, 鳥の博物館, 千葉県我孫子市, Oct. 6, (2013).

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

田中 博人 (TANAKA, Hiroto)

千葉大学・千葉大学上海交通大学国際共同  
研究センター・特任助教

研究者番号：80624725