

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420190

研究課題名(和文) 空中静止に向けたトンボ型飛行ロボットの姿勢変更ダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Study of attitude change of dragonfly-like flapping robot toward hovering flight

研究代表者

平木 講儒 (HIRAKI, Koju)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40249933

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、優れた飛行性能を有するトンボに倣って、4枚の翼を羽ばたかせて空中静止をなしうる羽ばたきロボットを目指したものであり、まず単独のモータで2枚の翼の上下動とねじりを同時に行う機構を考案し、その機構で効率的に揚力を発生させる軽量の構造と電気的條件を追求することで空中静止を行うに足る余剰揚力を生み出すことに成功した。さらに、2つの機構を重心に対して前後対称な形で配置した4枚翼羽ばたきロボットを製作し、それを自由飛行模擬装置に取り付けて、前後翼の羽ばたき周波数を調整することで、ピッチ姿勢の変更を行えることが示した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to build a flapping robot with four wings, which may achieve hovering. Firstly, the unique mechanism is invented which allows a pair of wings not only to flap but also to feather simultaneously, using a single motor. The appropriate structures to achieve such motions is sought, which are light and able to withstand the dynamic loads. Also, the appropriate torque and the revolution number of the motor is investigated, under which it works quite efficiently. The generated lift is sufficiently large enough to hover. The model to fly is built in which two pairs of wings are placed symmetrically about the center of the body. The model is attached to the rotatable arm which is built to simulate a flight. The wing beating frequencies are controlled to stabilize the pitch angle of the model. The test successfully proved the potential to achieve hovering of the four-wing flapping robot.

研究分野：機械力学、宇宙工学

キーワード：羽ばたきロボット トンボ

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、空中静止が可能な無人飛行体としては、ヘリコプタとドローン(マルチロータ機)が存在したが、ヘリコプタは実用性が高いものの回転中のロータに接触するなど危険性も高く、ドローンはまだ実用に向けての開発段階であった。空中静止を実現するもう一つ的手段として、プロペラに頼らない、羽ばたきによる飛行が考えられたが、鳥のように飛行することはできても、空中静止を行うには、揚力が不足している点と、羽ばたき運動により揺れる機体を非定常に変化する空気力の中で安定化する技術が未確立なことが主なる理由で、実現困難なことと考えられていた。

## 2. 研究の目的

本研究は、空中静止や後退飛行など優れた飛行性能を有するトンボに着想を得て、4枚翼を有する羽ばたきロボットにより空中静止を実現することを目標として、空中静止を行うに十分な揚力の発生と軽量の機体の開発、飛行試験を安全に行うための装置の開発、試験装置を用いた空中姿勢変更試験を通じて、非定常な空気力の卓越する環境下での羽ばたきロボットの姿勢安定化の技術を確立する。

## 3. 研究の方法

(1) 空中静止の達成には、機体重量の倍近くの揚力の獲得が不可欠である。トンボは計4枚の翅を独立に操ることで、非定常な空気の流れをつくって大きな揚力を得るが、同様の機能を羽ばたきロボットに持たせることは、機体軽量化の観点から現実的でない。代わりに、左右一対の翼を上下動(フラッピング)とねじり(フェザリング)運動させる機構を開発する。これにより、単なるフラッピング動作に比較して、大きな揚力の獲得が期待できる。

(2) フラッピングとフェザリングを別々のモータで駆動させるのは、機体軽量化の観点から好ましくない。左右一対の翼のフラッピング・フェザリング両運動を単一のモータで実現させるには、駆動トルクの滑らかな伝達が鍵となる。そこで、3Dプリンタを使って機構部品を自在に設計・製作することで、滑らかな動きと高い剛性を併せ持つ構造を決定する。

(3) 市販されている超小型ブラシレスモータは、そのトルク・効率等の特性が不明なものがほとんどである。その測定に既存の計測装置を用いようとしても、トルクが微小すぎて使うことができない。そのため、ロボットに搭載する超小型モータの微小トルク・効率

特性を測定するための装置を製作し、電氣的に効率のよい条件を見出す。

(4) 空中静止に適した機体形状の追求が必要である。飛行姿勢の制御がしやすい機体形状を、採用する姿勢制御方式に合わせて決定する。

(5) 羽ばたきロボットは着地の際に機体が損傷することが多いため、姿勢変更の試験を機体に損傷なく何度も実施できるようにする必要がある。そこで、支配的な空気力(推力・揚力・ピッチングモーメント)に対応する運動の自由度を許容した試験装置を製作する。

(6) 空中静止の実現には、自身の羽ばたき運動によって振動し、しかも発生する非定常な空気力によって大きな影響を受ける機体の姿勢を安定化させる技術が不可欠である。製作した羽ばたきロボットを飛行試験装置に取り付けた状態で、姿勢変更試験を行い、姿勢の安定化を図る。

## 4. 研究成果

(1) 非定常な空気の流れを作って大きな揚力を得るために、左右一対の翼のフラッピングとフェザリングを単一のモータを使って連動させる独特な機構を考案した。本機構では、まずモータの回転軸に接続されたクランクが翼桁上の力点を上下動させることでフラッピングを行う。このクランクには直角を保って翼弦方向の構成部材が付いているため、クランクの上下動に合わせて翼の前後方向の傾きが変化する。これが翼のフェザリングとなる。本機構により、単一のモータにより、フラッピングとフェザリングの連動が可能になる。連動の位相を変えて簡易的に揚力を比較したところ、フェザリングをフラッピングに対して90°遅らせて連動させる条件で、最も大きな揚力を獲得できることがわかった。

(2) 連動の機構部品および機体構造を3Dプリンタで成形したABS樹脂製にすることにより、設計の変更と製作が容易となった。高い剛性が必要な部分では積層数を増やし、剛性を弱めても差し支えない部分では積層数を減らすことによって、羽ばたきに伴う動荷重に対して十分な剛性を保ちつつ、軽量の部材の製作が可能となった。しかし、3Dプリンタによる成形の歯車はトルクに耐え切れないことがわかったので、射出成型法による製作へと切り替えた。歯車軸にも大きな荷重がかかることがわかったため、鉄製に変更するとともに、その軸の支持にベアリングを用いることで、駆動トルクの滑らかな伝達が可能となった。図1は製作された機構の写真である。

(3) 図1に示された超小型ブラシレスモータは、そのトルク・効率と回転数の関係が不明であった。カップリングを用いた測定器で計測するにはトルクが微小すぎるため、その測定用の装置を製作した(図2)。本装置は、モータの回転軸に垂直に取り付けられたアームが電子天秤を押し下げる力からトルクを求め、モータの回転角速度から回転数を知ることによって、トルクと回転数の関係を得る。測定精度を上げるための改良を重ね、最終的には20 $\mu$ Nmの分解能を有するに至った。これによる計測値から、使用中の電気的条件下では、モータ定格トルクの10%程度しか利用していないことが判明した。これに基づき、供給電圧をほぼ2倍にすることが可能なモータドライバを使うことで、超小型ブラシレスモータを効率的に動作させる条件を見出した。

(4) 上で見出した超小型ブラシレスモータを効率的に動作させる条件を用い、図1に示された機構を使って2枚翼で発生する揚力を、電子天秤により測定したものが図3である。当初の動作では、羽ばたき周波数はせいぜい14Hzであったものが、23Hzまで増速できた。発生揚力は羽ばたき周波数の2次関数で近似でき、最大で80gを達成した。

(5) 2枚翼の機構を2つ用いて、重心を挟んで前後対称に配置すれば、羽ばたき運動で発生する擾乱を互いに相殺するので、4枚翼の羽ばたきロボットに適する。このような機体形状とすることで、前後2つのモータが存在するため、それらの回転数を調整することが空中姿勢変更の有力な手段となった。

(6) 機体を損傷させることなく姿勢変更試験を行う装置として、円軌道飛行試験装置の製作を行った。本装置は、鉛直軸まわりに回転可能な水平棒(腕)の先端に鉛直面内で回転可能な腕(腕)が付いており、その腕の先にロボットを取り付ける腕(腕)があるが、この腕はピッチ軸まわりに回転可能である。鉛直軸まわりの回転は推力に対応するもので、鉛直面内の回転は揚力に対応し、最後のピッチ軸まわりの回転はピッチングモーメントに対応する。この装置を利用すれば、自由飛行時に支配的となる空気力の三成分に対するロボットの応答を知ることができる。各回転部にはポテンショメータを内蔵しており、その回転角を計測できる。

(7) 4枚翼の羽ばたきロボットを円軌道試験装置に装着して、一方のモータの回転数を固定し、他方のモータの回転数を制御して機体ピッチ角変更の実験を行った。ここで、機体のピッチ角検出には腕の角度を用いた。図4は、羽ばたいていない状態から始め、黒線で示されたピッチ角が0°になるように制御を行っている。比例・積分制御を行っており、比例ゲインは経験的に得たものを用いた。

収束精度に改善の余地が残るものの、目標のピッチ角である0°付近に落ち着いていく様子が示されている。

(8) 本研究により、空中静止に適した4枚翼羽ばたきロボットの形式とそのピッチ姿勢変更の手法の有用性が示された。今後、これをさらに発展させれば空中静止の実現が期待できる。

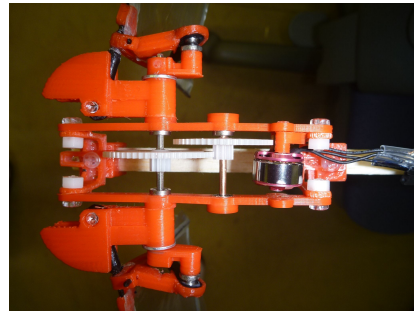


図1 フラッピング・フェザリング運動機構

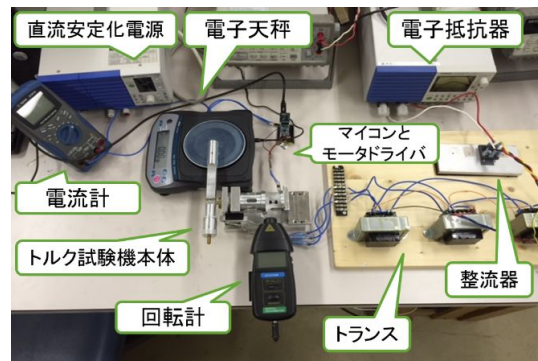


図2 微小トルク測定装置

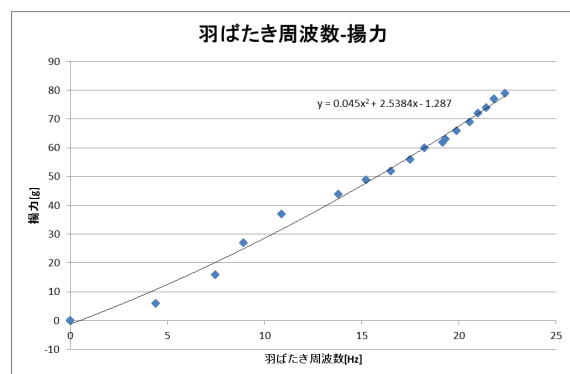


図3 羽ばたき周波数と発生揚力

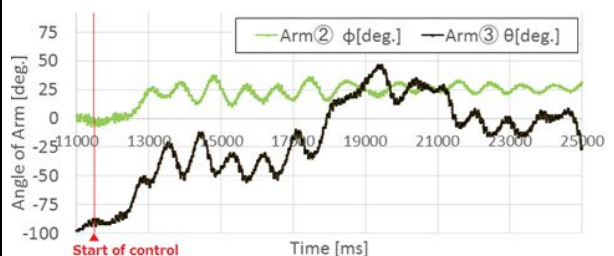


図4 4枚翼ロボットでのピッチ角変更試験

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5件)

K. HIRAKI, N. MIE, K. YOSHINO, M. INOUE, Experiments of Flapping Robot with Four Wings to Achieve Hovering, 2nd International Conference on Computational Methods in Engineering and Health Science, December 19-20, 2015, Serdang, Malaysia.

K. HIRAKI, N. MIE, K. YOSHINO, M. INOUE, Hovering Test of Flapping Robot using Circular Flight Device, The 12<sup>th</sup> International Conference in Motion and Vibration Control, August 3-7, 2014, Sapporo.

弥栄信宏, 牛島圭, 平木講儒, 円軌道試験装置を用いた離陸・ホバリング時挙動の把握, 日本機械学会九州支部第67期総会・講演会, 2014年3月13日, 北九州

N. MIE, K. HIRAKI, N. WINDRIF, Study of adjustment methods of flapping robot by using circular orbit test equipment, 第3回 JSME-KSME ダイナミクス&コントロールに関するジョイントシンポジウム, 2013年8月27-28日, 福岡

弥栄信宏, Everiste MOURETTE, 平木講儒, 羽ばたき運動による円軌道試験装置の試作, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 2013年5月22-25日, つくば.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.kyutech.ac.jp/labo/dyna.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

平木 講儒 (HIRAKI, Koju)

九州工業大学・大学院工学研究院機械知能工学研究系・教授

研究者番号: 40249933

(2)研究分担者

吉野 慶一 (YOSHINO, Keiichi)

北九州工業高等専門学校・生産デザイン工学科(情報システムコース)・教授

研究者番号: 40249876

井上 昌信 (INOUE, Masanobu)

北九州工業高等専門学校・生産デザイン工学科(機械創造システムコース)・准教授

研究者番号: 70253549