

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：32657

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13733

研究課題名（和文）蝶の飛翔メカニズムに基づく小型はばたきロボットの姿勢制御手法の立証

研究課題名（英文）Validation of a posture control method of a small flapping robot based on the flight mechanism of a butterfly

研究代表者

藤川 太郎 (Fujikawa, Taro)

東京電機大学・未来科学部・准教授

研究者番号：40618394

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：はばたき時の揚力や抗力を測定できる3軸力覚センサおよび蝶型はばたきロボットの動きを再現可能な数値流体解析シミュレータを構築した。これらを利用してはばたきロボットの運動解析を行った結果、翅の打ち上げ角と打ち下ろし角の大きさの違いなどが、体を起こそうとするボディの回転モーメントに大きな影響を与えることが明らかになった。また、直接解析することが困難であった飛翔中の揚力や抗力などの定量的な解析に対して、構築したシステムは有効であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「尾翼もなく翅の自由度が少ない蝶はどのように姿勢制御を行っているのか。」「固定翼では揚抗比曲線のような翼の設計の指標となるものが存在し、揚力生成や姿勢制御のメカニズムは航空力学的に明確になっている。はばたき翼においても同様に機体設計の指標や姿勢制御メカニズムなどを明確にできないか。」というものが学術的な問いであり、これらを解決するための手法を提案している。本手法が確立できれば、はばたき翼型飛行体の設計法を導くことができるという点で意義深いものである。

研究成果の概要（英文）：We constructed a 3-axis force sensor system that can measure lift and drag during flapping and a computational fluid dynamics simulator that can reproduce the flying motion of a butterfly-style flapping robot.

As a result of the motion analysis of the flapping robot using these systems, it is clarified that the difference in the range of the downstroke angle and the upstroke angle of the wing has a significant influence on the pitching moment to raise the body.

In addition, the constructed systems showed the effectiveness for quantitative analysis of lift, drag, and moments during flight, which was difficult to analyze directly.

研究分野：ロボティクス

キーワード：はばたき ロボット 蝶 CFD解析 姿勢制御

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

はばたいて飛翔する昆虫は膜翼であり、はばたき時に生成される翅周りの剥離渦を再帰的に利用することで揚力を得ていると考えられている。また、尾翼を持たないためにフラッピング運動の他に翅の迎角を変化させるフェザリング運動や翅を体軸前後方向に移動させるリード・ラグ運動を行うことで巧みに姿勢を制御している。これは、翼端からの渦の剥離を防ぎ、尾翼にある昇降舵や方向舵によって姿勢を制御する固定翼タイプとは全く異なる飛行メカニズムである。

近年、マルチロータヘリコプタに代表される小型飛行体の開発が目覚ましいが、狭隘空間の移動に優れるより小型である昆虫の飛翔をモデルとした小型はばたきロボットの開発も望まれている。しかし、昆虫サイズでは、ペイロードの問題から複数のアクチュエータやセンサ、質量増加を招く多自由度の機構を搭載することは困難である。このような問題点に対し、昆虫の中でも大型であり、省自由度の翅や単純な姿勢制御といった特徴をもつ蝶を小型はばたきロボットのモデルとすることは、工学的にも非常に実現性が高い。つまり、このような特徴をもつ蝶の飛翔メカニズムを解明し、これをロボットに実装することができれば、大空を自由に飛翔する昆虫サイズの小型はばたきロボットを開発することが可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、少ない翅の自由度で巧みに飛翔している蝶の姿勢制御に着目し、フラッピング角等の違いによる揚力の変化などを定量的に明らかにすることで提案する蝶型はばたきロボットの姿勢制御手法を立証することを目的とする。申請者は、数秒間飛翔可能な蝶型ロボットの運動解析と数値解析により、フラッピング角等の構造的違いで飛翔方向が変化することを明らかにし、これに基づく姿勢制御手法を提案してきた。しかし、わずか数秒の飛翔実験では揚力等を測定するのは困難であり、数値解析では、質点系の簡易モデルであったためにロボットの構造を考慮しておらず、提案手法の定量的な検証が行われていないという問題点が挙げられた。よって、長時間の飛翔を実現する蝶型ロボットの開発と運動解析およびこの結果を用いた新たな CFD (computational fluid dynamics) 解析システムの構築により、提案する姿勢制御手法を立証する。

### 3. 研究の方法

第一に、数分間のはばたきを実現するために小型モータを実装した蝶型ロボットを開発する。ここでは、CFD 解析のためのデータ取得を目的とし、新たに開発した 3 軸力覚センサに機体を固定した状態ではばたかせ、翅サイズ等のパラメータを変えた際の揚力等を測定する。

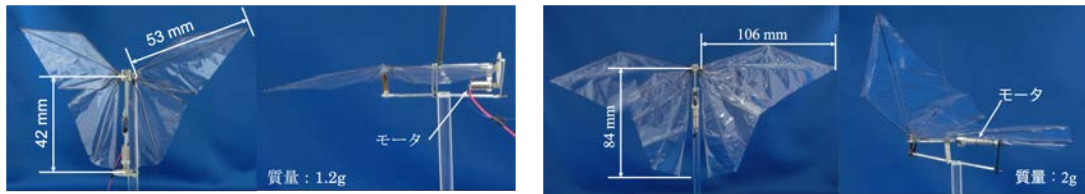
第二に、Altair 社の HyperWorks を用いた CFD 解析システムを構築する。実機の形状データを用いたはばたき運動を再現し、実機実験で得られた飛翔データを入力することで、揚力やピッチ角の変化などを算出する。

### 4. 研究成果

#### (1) モータを搭載した蝶型はばたきロボットの開発と 3 軸力覚センサシステムによる解析

これまでに開発してきた蝶型はばたきロボットは、軽量化のためにゴムを動力とすることで、初速 0m/s からの飛び立ちを実現していた。しかし、その飛翔時間はゴムの巻き数に依存していたため、わずか数秒という短いものであった。そこで、数分間の飛翔を実現するために、アクチュエータに  $\phi 4\text{mm}$  の DC モータを採用した新たな機体を開発した。本実験では様々なパラメータの実験を行うことから、複数の実機を必要とする。よって、機体は、量産性を考慮してこれまでの Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) 製からアルミニウム製へと変更し、微細 CNC 加工により製作した。一例として、翅のサイズを蝶と同スケール (翼長 100mm, 翼弦長 40mm 程度) で設計した機体および蝶の 2 倍スケールで設計したモデルをそれぞれ図 1 に示す。

次に、開発した実機の揚力等を解析するため、図 2 左に示す 3 軸力覚センサを開発した。このセンサに実機を固定しはばたかせることで、 $x, y, z$  方向に生じる力を検出する。その際、高速度カメラを 3 台用いてその様子を撮影することにより、はばたき運動と各軸方向の力の推移の関係を明らかにすることが可能となった。2 倍スケールモデルのはばたき時の解析について、 $z$  軸方向の力成分にフィルタ処理を施した後の結果の一例を図 2 右に示す。蝶と同様の 10Hz のはばたきであるが、2g の機体質量に対して、 $z$  軸方向へは最大約 20mN (2g 程度) の力を発生していることが明らかになった。これに対し、蝶と同等の翼面積をもつ翼幅 100mm の機体では 5mN の力であった。



(a) 等倍スケールモデル

(b) 2倍スケールモデル

図1 開発した蝶型はばたきロボットの一例

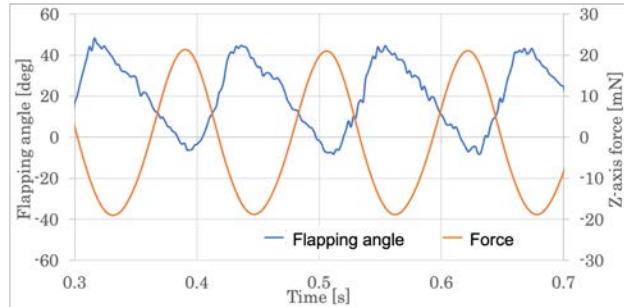
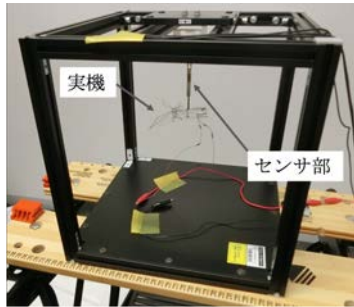
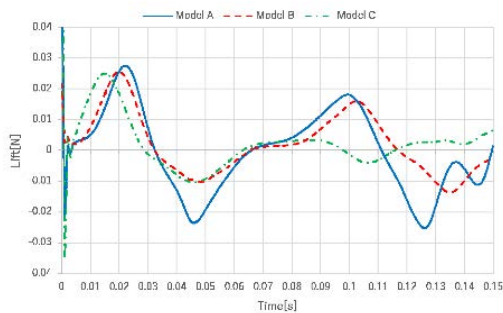


図2 3軸力覚センサ (左) と解析結果の一例 (右)

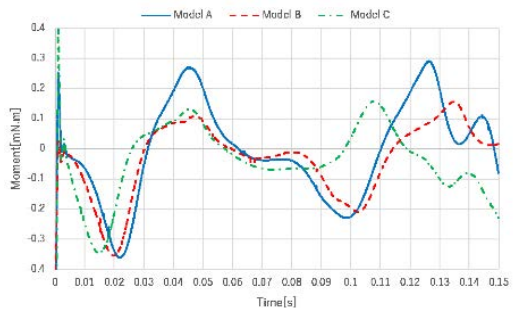
## (2) CFD 解析システムの構築と運動解析

まず、Altair社のHyperWorksを用いたCFD解析システムを構築した。これにより、蝶型はばたきロボットの3D-CADデータおよび実際のはばたき運動データ(フラッピング角や姿勢角など)を用いることで、はばたき運動とともに重心まわりにボディが回転する様子をシミュレーション上で再現できるようになった。そして、その際のはばたきロボットの揚力やボディの回転モーメント、翅周りの流れ場などが解析可能となった。

次に、この解析システムを用いることにより、蝶型はばたきロボットが初速0m/sから飛び立った際の揚力と抗力、ボディの回転モーメントを求めた。翅の打ち下ろし角と打ち上げ角の中立角が異なる3種のモデル(10°:上反角, 0°:地面と水平, -10°:下反角)について、フラッピング角とボディピッチ角の時系列データをCFD解析のためのはばたき運動の入力値とした。解析の結果、上昇方向の揚力の最大値には3種間で大きな差は見られなかったが、ボディのピッチ回転モーメントについては、中立角が10°のモデルは、ボディを起き上がらせる(機首上げ)方向により大きな値を示していることが明らかになった(図3)。また、中立角10°のモデルについて、1はばたき間における翅周りの圧力分布の様子を図4に示す。翅打ち下ろし時には翅の状面に負圧が生じ、翅の下面は高い圧力が広がっていることがわかる。翅打ち上げ時にはこれが逆となり、翅の下面には負圧が広がっている。この圧力差を利用することで、蝶はより高い揚力を生成しているものと考えられる。



(a) 揚力



(b) ピッチ回転モーメント

図3 揚力とボディのピッチ回転モーメントの関係[1]

(Model A: 中立角10°, Model B: 中立角0°, Model C: 中立角-10°)

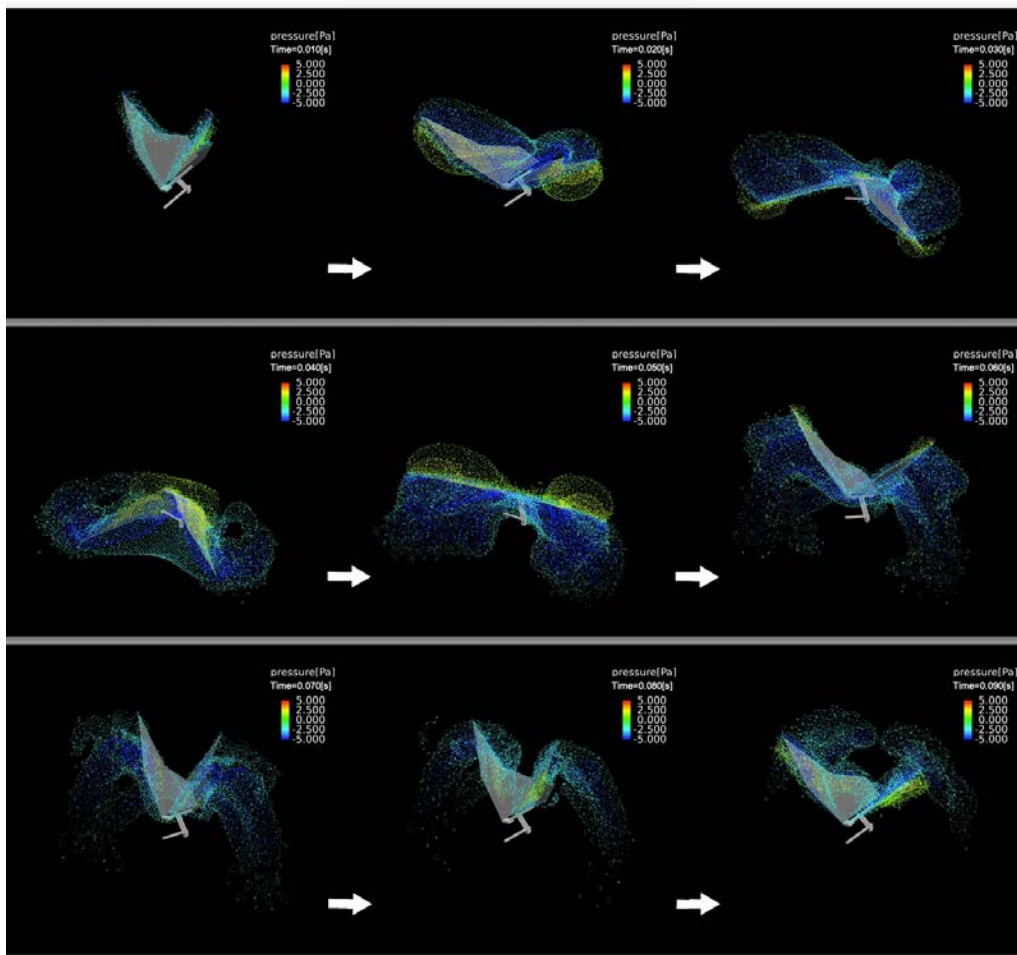


図 4 翅周りの圧力分布[1]

<引用文献>

[1] Keisuke Sanuki and Taro Fujikawa, Motion Analysis of Butterfly-Style Flapping Robot Using CFD Based on 3D-CAD Model and Experimental Flight Data, Journal of Robotics and Mechatronics Vol.33 No.2, pp. 216-222, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sanuki Keisuke, Fujikawa Taro	4. 巻 33
2. 論文標題 Motion Analysis of Butterfly-Style Flapping Robot Using CFD Based on 3D-CAD Model and Experimental Flight Data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 216 ~ 222
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2021.p0216	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 飯塚陸, 藤川太郎
2. 発表標題 翅サイズの違いにおける蝶型はばたきロボットの揚力測定
3. 学会等名 日本設計工学会2021年度春季研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 讃岐奎祐, 遠藤一, 中原聡美, 藤川太郎
2. 発表標題 蝶型はばたきロボットの飛翔データに基づく CFD 解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------