トンボを規範としたはばたき機構の研究*
(MEMS技術を用いた機体の製作)山下 瑛礼^{*1}, 島田 裕司^{*2}, 鈴木 健司^{*3}
高信 英明^{*3}, 三浦 宏文^{*4}Dragonfly-Inspired Flapping Mechanism
(Fabrication of Body and Wing Utilizing MEMS Techniques)Akihiro YAMASHITA^{*5}, Yuji SHIMADA, Kenji SUZUKI,
Hideaki TAKANOBU and Hirofumi MIURA^{*5} Department of Mechanical System Engineering, Kogakuin University,
2665-1 Nakano-machi, Hachioji-shi, Tokyo, 192-0015 Japan

This paper describes a flapping robot based on a dragonfly. Flapping flight enables the robot to hover and take a sharp turn like an insect. The flapping motion was produced by a four-bar linkage and a slider-crank mechanism actuated by a DC motor. The body of the robot was fabricated from a brass plate using MEMS techniques. The brass plate was patterned by etching, and then folded out of the plane to assemble the three dimensional structure. The wing with veins was also microfabricated from an aluminum plate and a parylene film. The robot flapped at 12.4 Hz and generated the lift force of 7.21 mN.

Key Words: MEMS, Accuracy, Flapping, Robot, MEMS Wing, ORIGAMI Structure

1. 緒 言

自然界に存在する飛翔生物の鳥類や昆虫類は、はばたきによって飛翔している。

はばたき飛翔は、急上昇、急停止、急旋回、さらにはホバリングも可能である。しかし、固定翼や回転翼は、はばたき飛翔のような高度な飛行は困難である。もし、はばたき飛翔を可能とした機体が製作できれば、柔軟な飛翔が可能となる。

そのため、多くの研究者がはばたき飛翔の研究を行っている。例えば Pomsin-sirirak ら⁽¹⁾は、チタン合金を翅の骨組みに利用した MAV (Micro Air Vehicle) の飛翔に成功しており、Baek ら⁽²⁾は共振を利用してはばたき機体を製作している。また、Finio ら⁽³⁾は重量わずか 60mg のはばたき飛翔ロボットを製作している。

以上のように、はばたき飛翔について多くの研究がなされているが、昆虫の持つ翅の複雑な翅脈構造の再現を行った研究は少ない。ほとんどの研究者が、簡易的な骨組みを翅に取り付けている。

MEMS 技術を用いて翅を製作すれば、昆虫の翅にある複雑な翅脈構造や、ギザギザの断面の再現など、複雑な構造を容易に再現可能である。また、機体の部品点数を減らすことができれば、小型で軽量の機体を製作できる。

そこで、本研究の目的は、MEMS 技術を利用した微細加工による翅の製作方法の確立と、同じく、MEMS 技術により金属板を機体の部品展開図に加工し、さらに折り溝加工を行うことで折り紙のように折り曲げて機体を製作することを目指す。また、昆虫の中でも飛翔能力が優れているトンボの飛翔様式を規範とすることで飛翔を目指す。

2. はばたき機構

本研究では左右の翅のはばたき角度の差を無くし同期を取るために、四節リンクを用いた機構を考案した(図 1)。また、動力伝達にはスライダ・クランク機構を用いる。また、機体のはばたき角度をトンボと同じ 60deg にするために、図 1 のように、各リンクの長さを設計した。

また、トンボの翅の 8 の字ひねり⁽⁴⁾は、図 2 のように翅の固定部に薄いプラスチック板を挟むことで、プ

* 原稿受付 2010 年 2 月 22 日。

^{*1} 学生員, 工学院大学機械工学専攻(〒192-0015 八王子市中野町 2665-1)。^{*2} 工学院大学工学部。^{*3} 正員, 工学院大学工学部。^{*4} 正員, 名誉員, 工学院大学工学部。

E-mail: am09070@ns.kogakuin.ac.jp

ラスチックの弾性変形を利用してパッシブなひねりによって再現する。

これにより、ひねり用のアクチュエータは必要とせず軽量化を図ることができる。また、はばたき機構の動力には制御がしやすく軽量であることから DIDEI 社製の重量 0.66g の超小型 DC モータを用いる。

3. 一体成型による機体製作

小型・軽量の機体を製作するため、一体成型による折り紙構造を用いる。金属の一体成型体加工には MEMS 技術による金属エッチングを用いる。エッチングの利点は、小型で複雑な形状でも精度よく製作できる。また、エッチング工程を統一すれば同寸法の物が精度よくいくつも製作できる。

使用する金属は $100\mu\text{m}$ 厚の黄銅板である。また、折り溝加工もエッチングを用いることで、幅 $150\mu\text{m}$ 、深さ $60\mu\text{m}$ 程度の溝を製作する。これにより、機体を 90deg 折り曲げた場合の曲率半径を $80\mu\text{m}$ にまで精度を向上させることができた。しかし、繰り返し曲げに対する強度が低下したため、はばたき運動により大きく変化する接点については、図 3 のようにヒンジ接合を用いた。

金属エッチングは一工程目で折り溝加工を、二工程目で外形をエッチングする。エッチング後の黄銅板および折り曲げた構造を図 4 に示す。

Fig. 1 Flapping mechanism

Fig. 2 Plastic parts

Fig. 3 Movable hinge

(a) Parts fabricated by MEMS

(b) Assembled bottom part

Fig. 4 Fabrication process

4. 翅の製作

まず、翅の薄膜にはパリレンを用いる。パリレンは熱蒸着により膜厚を容易に制御ができる。また、コンフォーマルコーティングにより凹凸形状にもムラなく一様に成膜できる利点がある。

また、翅脈は金属エッチングを用いて製作を行う。材料は 0.1mm 厚のアルミニウムを選んだ。また、トンボ

は翅に V 字状のギザギザの形状があることで、空気の流れが乱されことなくスムーズな流れを翅の周りに形成し揚力の発生に役立っている⁽⁹⁾。

本研究では V 字型の型に押し付けることで、翅に 130deg の V 字型の折り目を加工した。完成した翅と、翅の断面図を図 5 に示す。翅脈のアルミの幅は最小 0.5mm で縦横共に最小 1 mm 間隔の格子状に配置されている。翅の質量は一枚 0.1g である。

これらの工程を経て製作された機体を図 6 に示す。機体はクランクシャフトを介して一つのモータで前後の翅を動作させ、四枚翅をはばたかせている。機体重量は 2.5g と、一体成型により小型・軽量化に成功した。また前後のはばたき位相差は 180deg に設定している。2.5V 印加時に 12.4Hz のはばたき周波数を確認した。

Fig. 5 MEMS wing

Fig. 6 Flapping robot

5. 実験・結果

製作した機体を用いて上昇力の測定、高速度カメラによる翅の軌跡の解析を行った。

上昇力の測定は天秤の片側に分銅を乗せ、もう一方に機体を乗せ動作させることで、その釣り合いから算出した。その結果 2.5V 時に最大 7.21mN (機体重量に対して 28%) の上昇力の発生に成功した。

また高速度カメラを用いて機体の側面と正面から撮影を行うことで、左右のはばたき角度と翅の軌跡を解析した。その結果、はばたき角度は設計通りの 60deg であるが、翅の弾性変形によるひねりの影響で翅先に近づくにつれ角度が増大していき、翅の末端では 70deg を観測した。また、軌跡は単純な往復運動ではなく 8 の字に近い軌跡を描くことがわかった。はばたき機体の軌跡を図 7 に示す。

また、翅の末端を固定し、折り目がない翅と折り目がある翅の先端にそれぞれ 1g の分銅を載せた。その結果、折り目をつけた翅は折り目がないものと比べて、たわみ量が 10 分の 1 に減少し折り目をつけることで剛性が向上されることを確認した。

Fig. 7 Wing trajectory

6. 結 言

- (1) MEMS 技術により、微細な構造を持った翅の製作プロセスを確立した。
- (2) MEMS 技術により、機体の一体成型を行い、重量 2.5g の軽量小型化に成功した。
- (3) パッシブな翅のひねりの再現に成功した。
- (4) 最大 7.21mN の上昇力の発生に成功した。

文 献

- (1) T. Nick Pornsin-sirirak, Y. C. Tai, H. Nassef and C. M. Ho, Titanium-alloy MEMS wing technology for a micro aerial vehicle application, *Sensors and Actuators A*, Vol. 89, (2001-3), pp.95-103.
- (2) Stanley S. Baek, Kevin Y. Ma, and Ronald S. Fearing, Efficient Resonant Drive of Flapping-Wing Robots, *IROSIEEE*, (2009), pp. 2854-2860.
- (3) B. Finio, Asymmetric flapping for a robotic fly using a hybrid power-control actuator, *IROSIEEE* (2009), pp. 2755-2762.
- (4) Keiji Kawachi, Flight Mechanism of Insect. From Standpoint of View of Bio-Fluidynamics, *Biophysics*, Vol.39, No.5, (1999), pp.279-284.
- (5) Koji Tsuyuki, Three-dimensional Structure of a Wing and Flow Field around a Flapping Dragonfly with the PIV System, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B*, Vol.68, No.676, (2002-12), pp.3392-3399.