T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	自励振動型静電ジッピングアクチュエーションシステムを適用した小型羽ばたきロボットの試作
Title(English)	Prototype of a Small Wing-Flapping Robot Applying a Self-Excited Electrostatic Zipping Actuation System
著者(和文)	宮﨑 裕暉, 難波江 裕之, 鈴森 康一
Authors(English)	Hiroki Miyazaki, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2023講演論文集, Vol. , No. , pp.
Citation(English)	, Vol. , No. , pp.
発行日 / Pub. date	2023, 6

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

自励振動型静電ジッピングアクチュエーションシステムを適用した小型羽ばたきロボットの試作

Prototype of a Small Wing-Flapping Robot Applying a Self-Excited Electrostatic Zipping Actuation System

学　宮﨑　裕暉（東工大）　○正　難波江　裕之（東工大）
正　鈴森　康一（東工大）

Hiroki MIYAZAKI, Tokyo Institute of Technology
Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology, nabae.h.aa@m.titech.ac.jp
Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology

Small wing-flapping aerial robots are expected to be useful for exploration in confined spaces and at disaster sites. Self-excited electrostatic actuators, which can generate a reciprocating motion by the application of a DC voltage, have been studied as actuators suitable for the tetherless drive of small wing-flapping aerial robots, because the driving circuit can be simplified and the generated force per unit volume increases as the scale decreases. However, it is difficult for this actuator to make large-amplitude reciprocating motions. In this study, we devised a "self-excited electrostatic zipping actuation system" that can generate large-amplitude reciprocating motion by applying a DC voltage using electrostatic zipping actuation, in which one electrode deforms in steps towards the opposite electrode to produce a large displacement. We then applied this system to a prototype of a small flapping robot. The prototype successfully moved horizontally at a speed of 28.3 mm/s in an experiment.

***Key Words*:** Small wing-flapping aerial robot, Electrostatic actuator, Self-excited vibration

1　緒言

小型羽ばたき飛行ロボットは，建物内部等の狭隘空間での探査や災害現場での人命捜索などでの活躍が期待され，圧電アクチュエータ [1]，電磁アクチュエータ [2]，誘電エラストマーアクチュエータ [3] など，様々なアクチュエータを用いて開発が行われてきた．中でも，直流電圧の印加で往復運動を生み出す自励振動型静電アクチュエータは，駆動回路の簡素化が狙えることや，スケールが小さくなるほど単位体積当たりの発生力が大きくなる特徴を持つことから，小型羽ばたき飛行ロボットの自立駆動に適したアクチュエータとして期待され，研究が行われている [4]．しかし，電極間距離が大きくなるほどアクチュエータの駆動に用いられる静電気力は小さくなるので，大振幅の往復運動を苦手とする．先行研究 [4] では，大きな羽ばたき角を生み出すために変位拡大機構を用いているが，このような機構を用いると，ロボットの質量の増加や構造の複雑化による製作効率の低下などの問題が生じる．そこで，静電ジッピングという，一方の電極が反対側の電極に向かって段階的に変形することで大変位を生み出すことができるアクチュエーションに注目した．このアクチュエーションでは，電極間に高誘電率の絶縁性液体を注入することで高出力な大変位運動を生み出すことが知られている [5]．この効果を利用し，交流電圧を印加して電極に取り付けられた翼を直接羽ばたかせる小型羽ばたきロボットの研究が行われている [6]．本研究では，静電ジッピングアクチュエーションによる大振幅の往復運動を直流電圧の印加で引き起こすことができる「自励振動型静電ジッピングアクチュエーションシステム」を考案した．さらに，このシステムのロボットへの適用性を示すために，本システムにより駆動される小型羽ばたきロボットを試作した．

本稿ではまず，自励振動型静電ジッピングアクチュエーションシステムについて述べる．その後，考案したシステムを適用した小型羽ばたきロボットの試作機について説明し，試作機を用いた動作実験の結果について述べる．

2　自励振動型静電ジッピングアクチュエーションシステム

本研究で考案した自励振動型静電ジッピングアクチュエーションシステムの構成と動作原理を図 1 に示す．このシステムの駆動部分は，曲面に沿って固定された「固定電極」と一端のみが固定された「駆動電極」，2 つの電極間に配置された絶縁フィルムと絶縁性液体から構成される．絶縁フィルムは固定電極の片面に貼られている．絶縁フィルムと駆動電極の固定端は接しており，この隙間に少量の絶縁性液体が注入されている．また，固定電極側の一端は駆動電極の方に向かって丸めた状態で固定されている．2 つの電極と直流電圧源 V，電流制限抵抗 R が直列に接続されており，電極間に電圧が印加されて電極が帯電すると，駆動電極が固定電極へ引き寄せられ，電極間距離の近い部分から順に閉じていくような動作をする．駆動電極が閉じていくと，あるところで電極の先端同士が接触し，2 つの電極が同電位となることで静電気力が弱まる．この時，回路に接続している電流制限抵抗によって電極に流れ込む電荷が制限されていることで，2 つの電極に再び十分な電荷が溜まるまでの間に駆動電極が自重や弾性によって下方向に開いていく．2 つの電極が十分帯電すると再び駆動電極が閉じていく．以上の過程を繰り返すことで，直流電圧の印加のみで大振幅の往復運動を生み出すことができる．

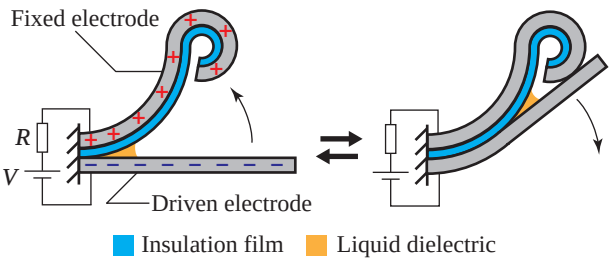

Fig.1 Configuration and operating principle of the self-excited electrostatic zipping actuator

3　考案したシステムを適用した小型羽ばたきロボット

3.1　構造

今回試作した小型羽ばたきロボットを図 2，ロボットの構造の概要を図 3 に示す．固定電極として導電性布テープ（3M™ ニッ

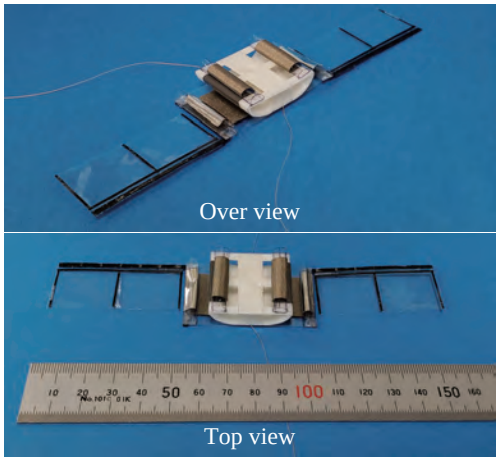

Fig.2 Prototype of a small wing-flapping robot

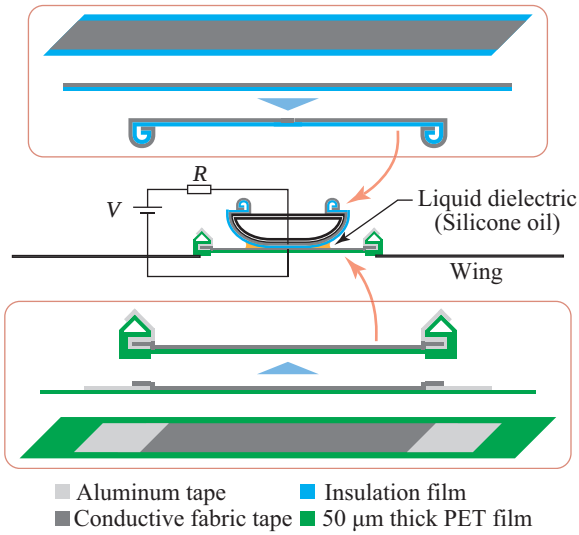

Fig.3 Structure of the small wing-flapping robot

ケルメッキポリエステルクロス導電性テープ 2191FR，3M 社)，絶縁フィルムとして 100 μm 厚 PVC フィルムを用い，100 μm 厚 PVC フィルムに導電性布テープを貼り付け，両端を丸めたものを，楕円柱面を持つ樹脂製部品に貼り付けられている．駆動電極には，50 μm 厚 PET フィルムと導電性テープの積層シートを用いている．本ロボットでは駆動電極の中央が固定されており，両端が閉じていく構造となっている．この積層シートの先端は，固定電極先端との間の放電による劣化を防ぐため，アルミテープを用いている．また，固定電極との接触部分に絶縁性液体が流れていくことを防ぐために，駆動電極の先端も丸めて固定している．絶縁フィルムと駆動電極の間には，絶縁性液体としてシリコーンオイル（KF96L-5CS，信越化学工業株式会社）を約 0.5 mL 注入した．また，駆動電極の両端には翼長 50 mm，翼弦長 20 mm の翼を取り付けた．この翼は，20 μm 厚のポリプロピレンシートに幅 1 mm，厚さ 0.1 mm の CFRP 板を翼に貼り付けて製作することで軽量化を図っている．

ロボットの横幅（左右の翼端間の距離）は 155 mm，縦幅 30 mm，高さ 12 mm であり，総質量は 3275 mg である．その内，翼の質量は左右合わせて 213 mg である．

3.2 動作実験

試作した羽ばたきロボットを用いて動作実験を行った．実験では，水平に設置されたアルミ棒材上にリニアボールスライド（LS877，THK 株式会社）を固定し，このスライドに羽ばたきロボットを取り付けた．この羽ばたきロボットに対し，高圧アンプ（HEOP-10B2，松定プレシジョン株式会社）から 10 kV の直流電圧を印加した．回路の途中には 0.2 GΩ の電流制限抵抗を直列に接続した．この時の羽ばたきロボットの運動の様子をビデオカメラおよびハイスピードカメラ（Chronos 1.4，Kron Technologies 社）を用いて撮影した．ビデオカメラは 60 fps，ハイスピードカメラは 1057 fps で撮影を行った．

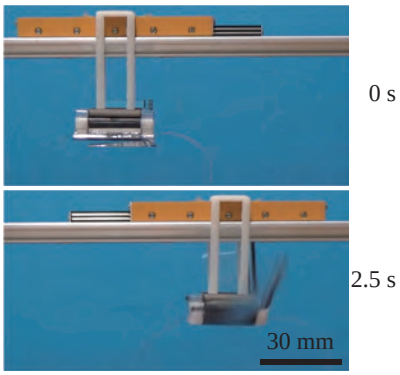

Fig.4 Horizontal movement of the small wing-flapping robot.

動作実験の結果，羽ばたきロボットが速さ 28.3 mm/s で水平移動を確認することができた．水平移動の様子を図 4 に示す．この時，ロボットの羽ばたき周波数は 6 Hz から 8 Hz 程度であった．ハイスピードカメラで正面からロボットを撮影した動画を確認したところ，駆動時の羽ばたき角度は −9° から 27° であり，振り上げ側の角度に対して振り下ろし側の角度が 3 分の 1 程度の値となっていた．

4 結言

本研究では，一定の直流電圧の印加で大振幅振動が可能な自励振動型静電ジッピングアクチュエーションシステムを適用した小型羽ばたきロボットを試作し，本稿では試作機を用いた動作実験の結果を述べた．実験の結果，リニアボールスライドに取り付けた状態で翼の羽ばたきによる推力を利用して水平移動させることに成功し，本アクチュエーションシステムの小型羽ばたきロボットへの適用性を示すことができた．今後は駆動部分の材質，寸法，構造の改善を行い，羽ばたき周波数や羽ばたき角度を増加させ，ロボットの推力の向上を目指す．また，ロボットの自立飛行の検討も進めていく予定である．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H03667 の助成を受けたものである．

参考文献

[1] Wood, R. J., “The First Takeoff of a Biologically Inspired At-Scale Robotic Insect,” IEEE Transactions on Robotics, vol.24-2, pp.341–347, 2008.

[2] Zou, Y., Zhang, W. and Zhang, Z., “Liftoff of an Electromagnetically Driven Insect-Inspired Flapping-Wing Robot,” IEEE Transactions on Robotics, vol.32, no.5, pp.1285–1289, 2016.

[3] Chen, Y., Zhao, H., Mao, J., Chirarattananon, P., Helbling, E. F., Hyun, N. P., Clarke, D. R. and Wood, R. J., “Controlled flight of a microrobot powered by soft artificial muscles,” Nature, vol.575, pp.324—329, 2019.

[4] Qi, M., Yang, Y., Yan, X., Liu, Z., Zhu, Y., Zhang, X. and Lin, L., “Untethered flight of a tiny balloon via self-sustained electrostatic actuators,” 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), pp.2075–2078, 2017.

[5] Taghavi, M., Helps, T. and Rossiter. J, “Electro-ribbon actuators and electro-origami robots,” Science Robotics, vol.3-25, eaau9795, 2018.

[6] Helps, T., Romero, C., Taghavi, M., Conn, A. T. and Rossiter. J, “Liquid-amplified zipping actuators for micro-air vehicles with transmission-free flapping,” Science Robotics, vol.7-63, eabi8189, 2022.