

# 自励振動型静電アクチュエータの斜毛駆動式小型移動ロボットへの適用

## Application of Self-Excited Electrostatic Actuator to Small Bristle-Bots

○ 宮崎 裕暉 (東工大) 正 難波江 裕之 (東工大)  
正 遠藤 玄 (東工大) 正 鈴森 康一 (東工大)

Hiroki MIYAZAKI, Tokyo Institute of Technology, miyazaki.h.ac@m.titech.ac.jp

Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology

Gen ENDO, Tokyo Institute of Technology

Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology

Small robots are attracting attention for exploring narrow/confined spaces that humans cannot enter. Among various small robots, bristle-bots have been studied for microrobots because of their simple structures. Although various actuators such as electromagnetic motors and piezoelectric actuators have been used for actuators of bristle-bots, this research focuses on self-excited electrostatic actuators. That is because They have a simple structure, can be driven by a DC voltage, and have the characteristic that the force density increases as the size increases, so they are expected to be suitable for the small wireless robots. In this paper, we propose a bristle-bot driven by a self-excited electrostatic actuator and experimentally verified the feasibility of the proposal with a prototype.

**Key Words:** Micro robot, Mobile robot, Electrostatic self-excitation

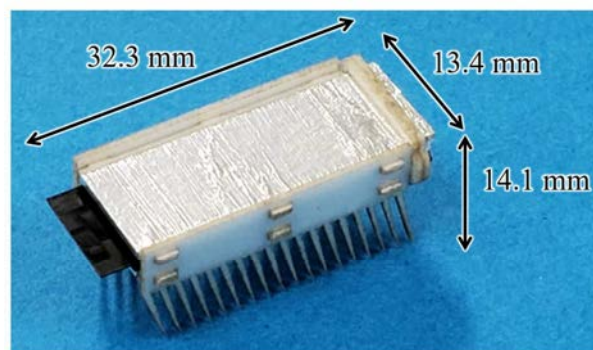
### 1 緒言

災害現場等で生じる人間の侵入が困難な狭小空間の探査において、昆虫サイズの小型ロボットの利用が注目されている。様々な種類の小型ロボットの中の1つとして、斜毛駆動機構を用いた小型移動ロボットの研究が進められてきた。斜毛駆動機構は、ロボット下部に斜めの弾性毛が取り付けられた構造をしており、ロボットが鉛直上下方向の振動的な力を受けると移動することができる。この機構は構造が単純であるため、小型移動ロボットに適した機構として期待されている。斜毛駆動機構に用いるアクチュエータとして、電磁モータ [1,2] や圧電アクチュエータ [3] など、様々なアクチュエータの利用が試みられてきた。しかし、これらのアクチュエータには、ロボットのさらなる小型化およびワイヤレス化を図る際に様々な課題がある。電磁モータは、構造上の問題から小型化が容易ではないため、より小型なロボットに搭載するのが難しい。また、圧電アクチュエータ等の交流で駆動するアクチュエータは、ロボットに搭載してワイヤレス駆動させる際にインバータ等の要素が必要となり、ロボットのサイズの増加につながる。

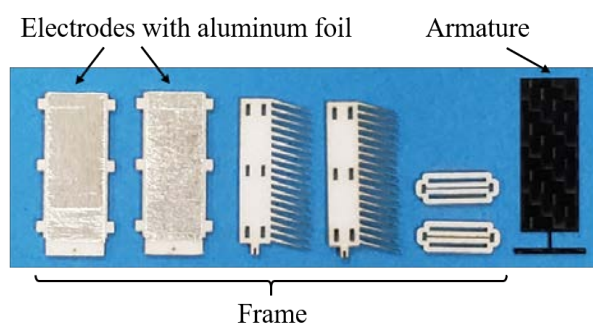
本研究では、斜毛駆動式小型移動ロボットに適用するアクチュエータとして、静電自励振動アクチュエータ（静電ベル、フランクリンベル）に着目した。このアクチュエータは、2つの電極と振動子から構成されるシンプルな構造であり、電極に直流電圧を印加することで、静電気力により振動子の往復運動を可能にする。本アクチュエータを利用した研究として、小型インパクトドライバアクチュエータ [4] や MEMS 技術を用いたフランクリンベル [5] 等がある。静電自励振動アクチュエータは直流電圧で駆動するため、ワイヤレス駆動の際にインバータ等の要素が不要である。また、静電気力のスケール効果により小型化するほど力密度が増加するという特性を持っている。以上の点から、静電自励振動アクチュエータは、小型ロボットのさらなる小型化およびワイヤレス化に有利なアクチュエータであると考えられ、本アクチュエータと斜毛駆動機構を組み合わせることで、より小型な自立移動マイクロロボットが実現することが期待される。本稿では、試作機を用いた実験により、静電自励振動アクチュエータを用いて斜毛駆動式小型移動ロボットの駆動が可能であることを実証する。また、付加質量を変えた際の動作特性についても検証を行う。

### 2 試作した小型移動ロボット

試作した小型移動ロボットとその構成部品を図1に示す。ロボットのサイズは、幅 13.4 mm、長さ 32.3 mm、高さ 14.1 mm



(a) Prototype robot



(b) Prototype components

**Fig.1** Prototype robot and its components

で、質量は 412 mg である。ロボットは、斜毛一体型のフレームと振動子から構成されている。フレームは、0.7 mm 厚の発泡スチロール板を UV レーザにより加工した部品を組み上げることで製作した。側面フレームには、複数の傾いた細い毛状の外形加工を施しており、これが斜毛駆動機構における弾性毛（斜毛）の役割を果たす。そして、フレームの上下面に張り付けられたアルミ箔により電極が構成される。また、振動子は、0.2 mm 厚の CFRP

板を UV レーザにより加工した。試作機の構造の概略を図 2 に示す。図 2 のように、振動子は片持ち構造になっており、これにより振動子に弾性要素が付与され、振動周波数が向上する [6]。フレームの上下面に取り付けられた電極 (アルミ箔) には外部の高電圧電源 (Trek 社製, MODEL2210) から直流電圧が印加される。振動子の先端付近が上下の電極と接触することで静電自励振動が起り、斜毛駆動によりロボットが前進する。

### 3 動作実験

#### 3.1 実験システム

試作した小型移動ロボットの動作確認実験を行った。実験システムを図 3 に示す。高電圧電源から 2.0 kV の直流電圧を印加してロボットを駆動させ、レーザ変位計 (KEYENCE 社製, LK-G500) を用いてロボットの進行方向の変位を測定した。データの取得にはオシロスコープ (Agilent Technology 社製, DSO1004A) を用いた。ロボットと高電圧電源の回路には抵抗を加えることで、短絡した際に過大な電流が流れることを防止している。実験では図 4 のように間隔 20 mm の直線ガイドを木板上に設置し、そのガイド間をロボットに走行させた。また、ロボットの可搬質量を確認するために、ロボットの上に 174 mg, 339 mg, 512 mg, 675 mg, 845 mg, 1006 mg の重りをそれぞれ載せた状態で、ロボットを駆動させデータを取得した。

#### 3.2 実験結果

実験で取得したデータを用いて、ロボットが 100 mm 走行するのにかかった時間から平均速度を算出した。また、実験は各条件について 3 回行い、その平均値により評価を行った。実験結果を図 5 に示す。重りを載せていない状態 (負荷質量 0 mg) では、63.0 mm/s で走行することを確認した。また、ロボット本体の質量 412 mg の 2 倍以上である 1006 mg の負荷質量を載せた状態で、27.3 mm/s で走行することが確認された。

### 4 結言

本稿では、静電自励振動アクチュエータを適用した斜毛駆動式小型移動ロボットを提案し、試作機を用いた実験により、提案したロボットの動作の検証を行った。実験の結果、負荷質量なしの場合に 63.0 mm/s で走行することを確認し、提案する原理によるロボットの駆動が可能であることを実証した。また、ロボット本体の質量の 2 倍以上である 1006 mg の負荷質量を載せた状態でも 27.3 mm/s で走行することを確認した。今後は、ロボットのワイヤレス化や、さらなる小型化を試みる予定である。

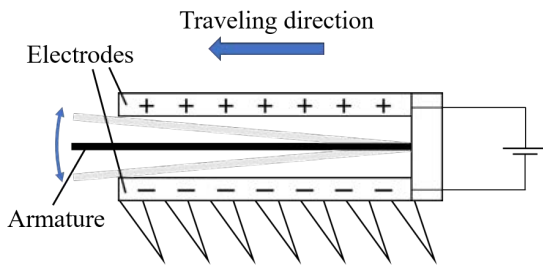


Fig.2 Schematic diagram of the structure of the prototype

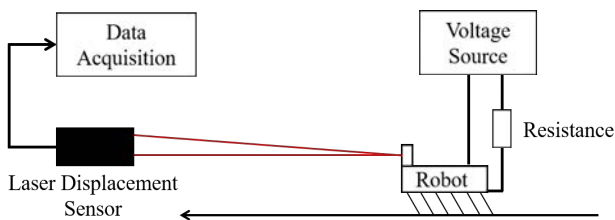


Fig.3 Experimental system

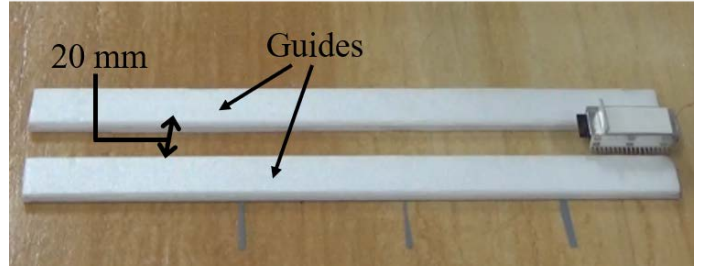


Fig.4 Setup for driving experiment

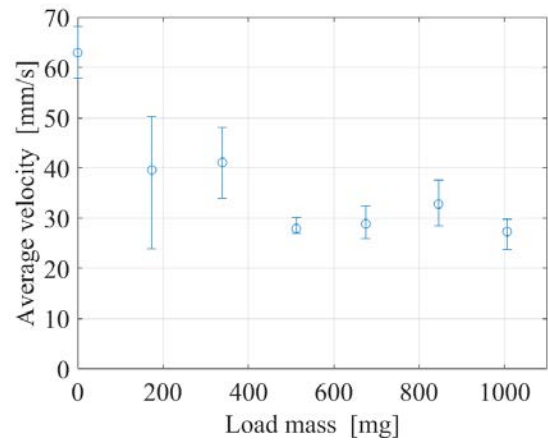


Fig.5 Relationship between average velocity and load mass

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K14940 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] 五百井清, “遠心力を利用した走行マイクロロボットの研究”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.3, pp.396-401, 1999.
- [2] Becker, F., Börner, S., Lysenko, V., Zeidis, I. and Zimmermann, K., “On the Mechanics of Bristle-Bots - Modeling, Simulation and Experiments,” ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics, pp.1-6, 2014.
- [3] Kim, D., Hao, Z., Ueda, J. and Ansari, A., “A 5 mg micro-bristle-bot fabricated by two-photon lithography,” Journal of Micromechanics and Microengineering, vol.29, no.10, 105006, 2019.
- [4] Yamamoto, A., Katsurai, H. and Higuchi, T., “DC-operated electrostatic impact drive actuator,” Advanced Robotics, vol.24, no.10, pp.1441-1459, 2010.
- [5] Shmulevich, S., Hotzen, I. and Elata, D., “The electromechanical response of a self-excited MEMS Franklin oscillator,” In 2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pp.41-44, 2015.
- [6] Nabae, H. and Ikeda, K., “Effect of elastic element on self-excited electrostatic actuator,” Sensors and Actuators A: Physical, vol.279, pp.725-732, 2018.