

K-21

マイクロロボットに用いる静電モータと脚部を一括形成した脚部機構の開発 Development of Leg Mechanism with Leg and Electrostatic Motor by Batch Fabrication for Microrobot

○田巻祐哉¹, 佐藤隼², 政井悠夏¹, LYUSHUXIN³, 齊藤健⁴
*Yuya Tamaki¹, Jun Sato², Yuka Masai¹, Shuxin Lyu³, Ken Saito⁴

Abstract: The authors study millimeter-sized microrobots. Previously, we had fabricated the electrostatic motor and the leg of the microrobot separately. However, further miniaturization was difficult because the robot components were assembled by hand. In this study, we report the design and fabrication of a mechanism that can form the electrostatic motor and the leg mechanism of the microrobot in a single batch based on theoretical calculations. The results of the theoretical calculation showed that the generated force was 0.65 mN higher than that required for the walking motion of the microrobot, and that it satisfied the conditions sufficient for walking.

1. はじめに

世界中で昆虫を模倣したミリメートルサイズの小形のロボットの開発が進められている^[1]。昆虫は、その小形の体に脳、筋肉、触覚器官、エネルギー源を搭載し、非常に高度な制御をおこなっている。そのため、ロボットにおいても脳に相当する制御回路、筋肉に相当するアクチュエータ、触覚器官に相当するセンサ、エネルギー源に相当する電源の開発が求められる。先に我々は、昆虫の筋肉に代替可能で、低消費電力で駆動し、微細化に適した静電モータに注目し研究をおこなってきた。従来の研究では、静電モータとマイクロロボットの脚部機構を個別に作製し、それらを超硬棒で固定して動力を伝達していた。しかし、この製作方法は極めて微細な構造を扱う必要があり、顕微鏡を使った作業が非常に困難であった。また、さらなる小形化にも限界があった。本研究では、微細加工技術を用いて、静電モータとマイクロロボットの脚部機構を一括で形成可能な設計および作製をおこなった。さらに、理論値計算に基づき、マイクロロボットが十分に歩行可能な出力を得られることを確認したので、その結果も併せて報告する。

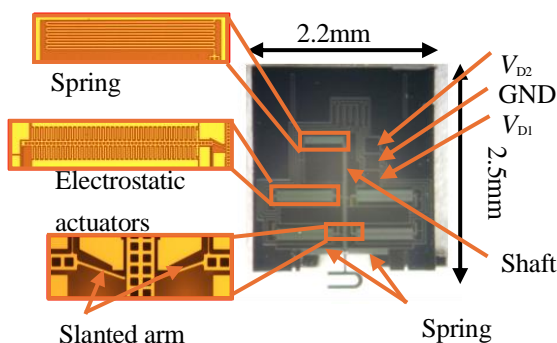


Figure 1. Structure of electrostatic motor

2. 従来の静電モータと脚部機構

先に開発した静電モータの写真を Figure1 に示す。静電モータの各寸法は、誘電率シリコンの誘導伝率 $\epsilon = 8.844 \times 10^{-12}$, 奥行き $\omega = 40 \mu\text{m}$, 櫛歯の重なり長さ $a = 50 \mu\text{m}$, 櫛歯の変位 x , 櫛歯間距離 $G_1 = 3.0 \mu\text{m}$, 櫛歯間距離 $G_2 = 5.0 \mu\text{m}$, 櫛歯の数 $n = 70$, 電圧 $V = 60 \text{V}$ である。静電モータの発生力 F_r は以下の式(1)で表される。

$$F_r = \epsilon \frac{\omega a}{2} \left(\frac{1}{(G_1 - x)^2} - \frac{1}{(G_2 + x)^2} \right) n V^2 \times \sin 20^\circ \quad (1)$$

式(1)に静電モータの各寸法を代入すると最大 1.5 mN の発生力を得られた。マイクロロボットの一つの脚部を駆動するのに約 0.64 mN の力が必要であり、それを十分に満たす出力が得られた。さらに、静電モータの作製および駆動実験にも成功した^[2]。

Figure2 にマイクロロボットの脚部機構の写真を示す^[3]。脚部機構の駆動に必要な力をマイクロフォースセンサで測定した結果、脚部を持ち上げるのには最大 1.68 μN , 下ろすのには最大 1.56 μN の力が必要であることが分かった。これにより、静電モータと脚部機構と搭載したマイクロロボットが駆動可能だと分かった。



Figure 2. Sword-shaped Leg

1: 日大理工・院 (前)・精機 2: 日大理工・学部・精機 3: 日大理工・院 (後)・精機 4: 日大理工・教員・精機

Table 1. Spring Dimensions

Name of spring	spring1	spring2	spring3
Cantilevered beam length (L)[μm]	510	510	220
width(b)[μm]	5	5	5
thickness(h)[μm]	40	40	40
Number of springs(N)	2	1	2
Number of spring steps(n)	9	18	10
deflection(x)[μm]	200	100	100

3. 静電モータと脚部を一括形成した脚部機構

Figure3 に設計した静電モータと脚部を一括形成した脚部機構の写真を示す. 従来は脚部機構と静電モータを別々に作製し, 1つの脚部に組立をおこなったため, さらなる小形化には限界があった. 本研究では, マイクロロボットの脚部機構と静電モータを一体で作製できる機構の設計をおこなった. 設計においては, 9.9ミリメートルの筐体に6足を搭載し, 歩行可能な出力が得られることが設計の条件であった. そのため, 1つの脚部の大きさを3.3mm×6.4mm以内に設計した. また, 脚部に必要な力は約0.64mNであり, それを上回る発生力が得られる設計が求められる. 静電モータの部分寸法は, 誘電率シリコンの誘導伝率 $\epsilon = 8.844 \times 10^{-12}$, 奥行き $\omega = 40 \mu\text{m}$, 櫛歯の重なり長さ $a = 70 \mu\text{m}$, 櫛歯の変位 x , 櫛歯間距離 $G_1 = 3.0 \mu\text{m}$, 櫛歯間距離 $G_2 = 5.0 \mu\text{m}$, 櫛歯の数 $n = 56$, 電圧 $V = 70 \text{V}$ である. 式(1)から静電モータの発生力は最大1.22mNである. 脚部を押し出す構造にはこの原理を利用しているため, 脚部機構に最大1.5mNの力が伝達される.

Table1 に各スプリングの寸法を示す. ばねを片持ち梁とみなし, 片持ち梁にかかる力 F , 片持ち梁の長さ L , 幅を b , 厚さ h , ヤング率 E , ばねの数 N , ばねの段数 n , 片持ち梁のたわみ x , ばねの一定以上の変位 a とする. 片持ち梁にかかる力 F は以下の式(2)で表される.

$$F = \frac{NEhb^3}{4L^3n}(x + a) \quad (2)$$

Table1 の各寸法を式(2)に代入した結果, 復元力の合力は最大0.21mNとなる. ばねは, リリースされた機構の保持と駆動後に原点まで戻す役割がある. しかし, 駆動時は復元力が抗力として作用する. したがって, 静電モータの発生力が, ばねの復元力と1つの脚部にかかる力の合力を上回れば十分に脚部は駆動する. この条件に対して, 静電モータの発生力は0.65mN上回った. これにより, マイクロロボットの歩行動作に必要な発生力が得られることが分かった.

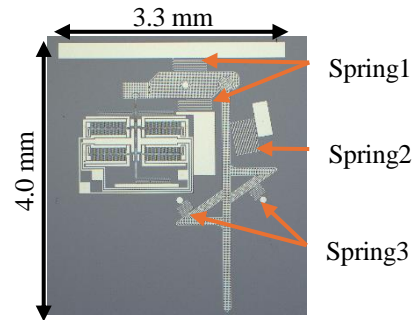


Figure 3. Fabricated Electrostatic motor

4. まとめ

本論文では, 静電モータとマイクロロボットの脚部機構を一括で形成可能な機構を理論値計算に基づいて設計し, その作製について報告した. 理論値計算の結果, マイクロロボットの歩行動作に必要な発生力を0.65mN上回り, 歩行に十分な条件を満たすことが分かった. 今後は, 脚部機構の駆動実験およびマイクロロボットの歩行実験を行う予定である.

謝辞

本研究は, 文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業(JPMXP1223UT1015)の支援を受けたものである. また, 日本大学特別研究の助成および令和2年度日本大学学術研究助成金 総合研究を受けたものである. 脚部機構の試作は, 武田先端知ビルスーパークリンルーム(d.lab)の支援を受けて行われたものである.

5. 参考文献

[1] Andrew T. Baisch and Robert J. Wood, “Pop-up Assembly of a Quadrupedal Ambulatory MicroRobot”, School of Engineering and Applied Sciences, Cambridge, MA, USA, Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on, 3-7 Nov. 2013.

(1)[2] K. Saito, D.S. Contreras, Y. Takeshiro, Y. Okamoto, Y. Nakata, T. Tanaka, S. Kawamura, M. Kaneko, F. Uchikoba, Y. Mita, and K. S. J. Pister : “Syudy on Silicon Device of Microrobot System for Heterogeneous Integration”, ICEP, (2018)

[3] 古屋董, 伊藤穂高, 石川真聡, 山田哲之, 森下克幸, 武井裕樹, 金子美泉, 内木場文男, 齊藤健: 「MEMS マイクロロボットに用いる剣型脚部の検討」, 第38回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 10P3-SSP-19(1-4), 2021.