

MEMS マイクロロボット用の静電モータのばねに対する検討

Study on Spring of Electrostatic Motor for MEMS Microrobot

○山田哲之¹, 石川真聡¹, 伊藤穂高¹, 長田元気¹, 水本明日也¹, 森下克幸¹, 武井裕樹², 齊藤健³

*Noriyuki Yamada¹, Masato Ishikawa¹, Hotaka Ito¹, Genki Osada¹, Asuya Mizumoto¹, Katsuyuki Morishita¹, Yuki Takei², Ken Saito³

Abstract: The authors are studying a millimeter-sized Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) microrobot that is capable of autonomous behavior by the electrostatic motor. It was difficult to drive a microrobot's leg using the conventional electrostatic motor because the spring pullback force was not enough. In this paper, we integrated the electrostatic motor with microrobot part to make assembly easier and redesigned electrostatic motor's springs. As a result, we confirmed that the redesigned electrostatic motor's springs generate enough pullback force to drive the microrobot's leg by increasing spring constant.

1. はじめに

マイクロロボットは、小型な筐体を活かして、医療分野、産業分野などへの応用が期待されている。医療分野においては、検診時の身体への負担を軽減するために、患部へ直接医療行為をおこなうマイクロロボットの研究がおこなわれている^[1]。産業分野においては、道路、発電所、ガスタンクなどの施設の狭隘空間における検査をおこなうマイクロロボットの研究がおこなわれている^[2]。自律行動をおこなうマイクロロボットには、センサ、アクチュエータ、コントローラ、電源の搭載が求められる。しかし、ミリメートルスケールの筐体にこれら4要素を搭載することは難しい。先に我々は、Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)技術を用い、Shape Memory Alloy (SMA)アクチュエータで駆動する昆虫型マイクロロボットを開発した。しかし、SMAアクチュエータは消費電力が高く、昆虫型マイクロロボットに搭載可能な小型電源での駆動が困難であった。そのため、我々は低消費電力かつ小型化に適している静電モータに着目し、開発をおこなっている^[3]。

我々が開発した静電モータは、2対の静電アクチュエータを用いてシャトルを押し出し、ばねでシャトルを初期位置に戻す構造になっている。しかし、ばねの復元力が不十分であったため、マイクロロボット脚部を初期位置に引き戻すことができなかった。

本論文では、静電モータをマイクロロボットパーツに組み込んだ、組み込み型静電モータを設計し、マイクロロボットの脚部を駆動するために必要な復元力を発生することが可能なばねの設計をおこなったので報告する。

2. 組み込み型静電モータ

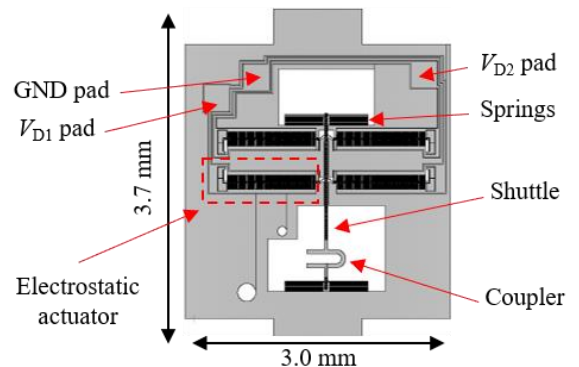


Figure1. Embedded electrostatic motor

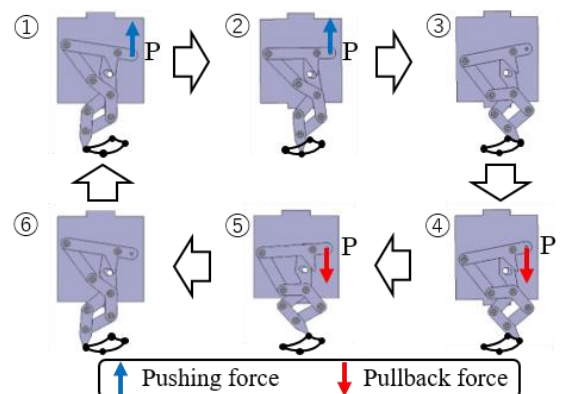


Figure2. Motions and trajectory of the leg

Figure1 に、設計した組み込み型静電モータを示す。従来のばねでは、マイクロロボットの脚部を駆動することが困難であった。そのため、ばねに一定の変位を持たせた状態でマイクロロボットと接続する必要がある。そして、ばねに一定の変位を持たせた状態でマイクロロボットに接続しやすくするため、静電モータのマイクロロボットパーツへの組み込みをおこなった。

組み込み型静電モータは、カップラー、シャトル、2対の静電アクチュエータ、上下に配置されたばね、電極 V_{D1} 、 V_{D2} 、GND で構成されている。静電アクチュエ

ータに電圧を印加し、櫛歯間に電位差が発生することで静電気力が発生する。櫛歯間に発生した静電気力によって、シャトルを押し出すことができる。そして、2対の静電アクチュエータで交互にシャトルの押し出し動作をおこない、大きな変位を生成する。

Figure2 にマイクロロボットの脚部の駆動図を示す。マイクロロボット脚部の押し出しを静電アクチュエータ、引き戻しをばねによっておこなう。

3. 組み込み型静電モータのばねの設計

マイクロロボット脚部の引き戻し動作をおこなうには、最大で約 0.219 mN 必要である。従来の静電モータのばねの復元力が不十分であったため、ばねの寸法を見直し、ばね定数を大きくした。設計したばねは、従来の静電モータのばねと同様に、複数段重ねた片持ち梁とみなし、ばね定数を求めた。片持ち梁にかかる力を F 、片持ち梁の長さを L 、幅を b 、厚さを h 、ヤング率を E 、断面二次モーメント I とすると、片持ち梁のたわみ x は以下の式(1)で表される。

$$x = \frac{FL^3}{3EI} \quad (1)$$

式(1)とフックの法則より、片持ち梁を n 段重ねたときのばね定数 k_n は以下の式(2)で求められる。

$$k_n = \frac{Ehb^3}{4L^3n} \quad (2)$$

ヤング率 E と厚さ h は、用いるシリコンウエハによって異なる。本論文では、静電モータの外形寸法に与える影響、ばねの耐久性などを考慮して、ばねの幅 b と長さ L を従来のものから変更した。また、マイクロロボット脚部と静電モータを接続する際は、ばねに一定以上の変位 a を持たせた設計にした。静電モータのばねの復元力 F_{Pull} は、式(2)より以下の式(3)で求まる。静電モータには、合計 4 つのばねが取り付けられている。また、ヤング率 $E = 130 \text{ GPa}$ 、ばねの厚さ $h = 40 \text{ }\mu\text{m}$ 、ばねの段数 $n = 10$ とした。

$$F_{\text{Pull}} = 4k_n(x + a) = \frac{Ehb^3}{L^3n}(x + a) \quad (3)$$

寸法への影響を抑えるため、ばねの長さ $L = 440 \text{ }\mu\text{m}$ 、ばねの幅 $b = 7 \text{ }\mu\text{m}$ とした。また、変位 $a = 105 \text{ }\mu\text{m}$ を持

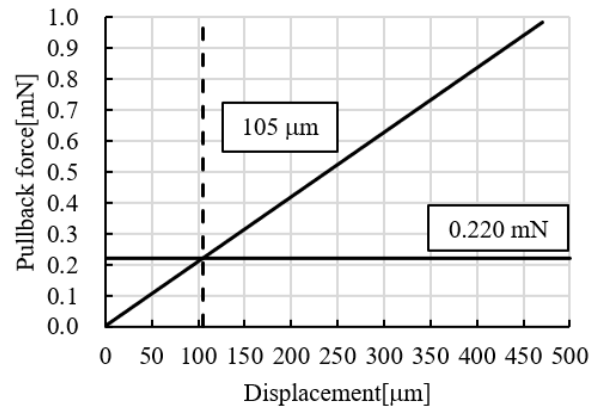


Figure3. The characteristic between the displacement of the spring and pullback force

たせた状態でマイクロロボットと接続する設計にした。

Figure3 に、ばねの変位とばねの復元力の関係を示す。ばねの伸びが $105 \text{ }\mu\text{m}$ の時、ばねの復元力は約 0.220 mN である。マイクロロボット脚部の引き戻し時には最大で約 0.219 mN 必要であるので、設計した静電モータのばねは脚部の引き戻しが可能であるといえる。また、ばねが最大まで変位した際の長さ $x + a$ は、約 $470 \text{ }\mu\text{m}$ であるため、ばねによる復元力は約 0.984 mN である。

4. まとめ

本論文では、マイクロロボットの脚部を駆動するために必要な復元力を発生することが可能なばねの設計をおこなった。設計したばねの発生する復元力は、マイクロロボット脚部の引き戻し動作をおこなうことが可能であることを計算により示した。今後、実際に組み込み型静電モータを作製し、静電モータ駆動のマイクロロボットを作製する予定である。

5. 参考文献

- [1] 長尾巧, 川中和貴, 中里裕一, 遠山茂樹: 「血管走行マイクロロボットの研究—血管狭窄に対応するマイクロロボットの開発—」, 2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.327-328, 2014.
- [2] M. Takeda: “APPLICATIONS OF MEMS TO INDUSTRIAL INSPECTION”, Technical Digest, MEMS 2001, 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp.182-191, 2001.
- [3] K. Saito, D. S. Contreras, Y. Takeshiro, Y. Okamoto, S. Hirao, Y. Nakata, T. Tanaka, S. Kawamura, M. Kaneko, F. Uchikoba, Y. Mita, and K. S. J. Pister: “Study on Electrostatic Inchworm Motor Device for a Heterogeneous Integrated Microrobot System”, Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.12, pp.E18-009-1 - E18-009-7, 2019.