

MEMS マイクロロボットに用いる多層ばねに対する検討

A Study on Multilayer Springs for MEMS Microrobot

○佐藤隼¹, 政井悠夏², 富永雄大², 田巻祐哉², LYUSHUXIN³, 齊藤健⁴*Jun Sato¹, Yuka Masai², Yudai Tominaga², Yuya Tamaki², Shuxin Lyu³, Ken Saito⁴

Abstract: The authors have been studying a millimeter-sized Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) microrobot driven autonomously by the electrostatic motor. In our previous study, our electrostatic motor design was based on the assumption that the theoretical equations were correct. However, their output power was insufficient to drive the microrobot's legs. Therefore, this paper reports a study to revise the theoretical equation of the multilayer spring and to use more accurate values by measurement. The theoretical calculations show a difference of 0.04 mN per spring constant between the conventional and the new calculation methods. This study allows for a more accurate calculation of the restoring force.

1. はじめに

我々が研究を進めているマイクロロボットは、Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS)技術を利用したミリメートルサイズのロボットである。応用分野として、低侵襲の医療行為や人の手が届かない箇所へ薬の直接投与などの医療分野への応用や、工場での点検・検査など幅広い分野での活用を目指している^[1]。このような複雑な活動を行うためには自立駆動が可能なマイクロロボットの開発が必要不可欠である。そのためにはセンサ、制御回路、アクチュエータ、電池の4つの要素を必要とされるが、ミリメートルサイズでこれらの4つの要素を搭載したマイクロロボットの実現は出来ていない。

我々は低消費電力かつ小型化に適した静電モータの研究を行っている。静電モータは電圧駆動型のモータであり、既存の他の小型モータと比較して消費電力が小さいことが特徴である。また、平面構造にて駆動可能であるため、微細加工技術を用いて製作することが出来る。そのため小型化および薄型化を実現することが可能である。静電モータに使用している静電アクチュエータは、任意の変位量で引き戻しを起こせるようにするため、多層ばねの復元力と変位量が非常に重要である。しかし、これまで静電モータに用いた多層ばねは理論値計算であり、計測値とは乖離があると考えられる。

本論文では静電モータに用いる多層ばねの理論式を見直し、計測装置を作製し計測することを検討したので報告する。

2. 昆虫型マイクロロボットに用いる静電モータ

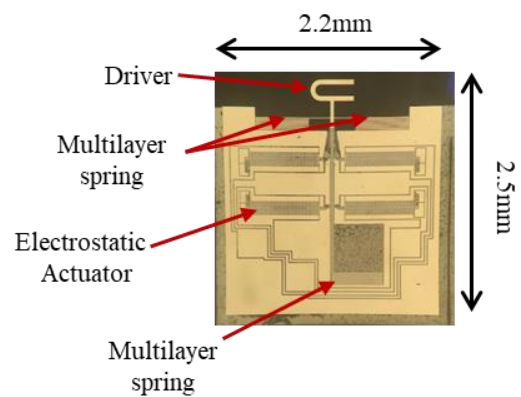


Figure 1. Electrostatic motor

Figure 1 に先に開発した昆虫型マイクロロボットに用いる静電モータを示す。静電モータは厚さ 0.6 mm の Silicon On Insulator(SOI)ウェハを用いて、デバイスサイズを 2.2 mm×2.5 mm で開発した。

Figure 2 に静電モータの櫛歯モデルを示す。静電アクチュエータの櫛歯を平行平板コンデンサとみなし、平板間にかかる静電引力を基に静電モータの発生力を求める。静電モータの発生 F_r [mN]は誘導伝率 $\epsilon = 8.84 \times 10^{-12}$ F/m, 奥行き $\omega = 40 \mu\text{m}$, 櫛歯の重なり長さ $a = 40 \mu\text{m}$, 櫛歯の変位 x [μm], 櫛歯間距離をそれぞれ $G_1 = 3.0 \mu\text{m}$, $G_2 = 5.0 \mu\text{m}$ 櫛歯の数 $n = 70$, 電圧 $V = 60$ V とした場合, 式(1)で表される。

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

静電モータの発生力 F_r は駆動体を押し出す F_v [N]と駆動体を押し付ける F_h に分けられる。したがって、駆動体を押し付ける F_h は, 式(2)で表される。

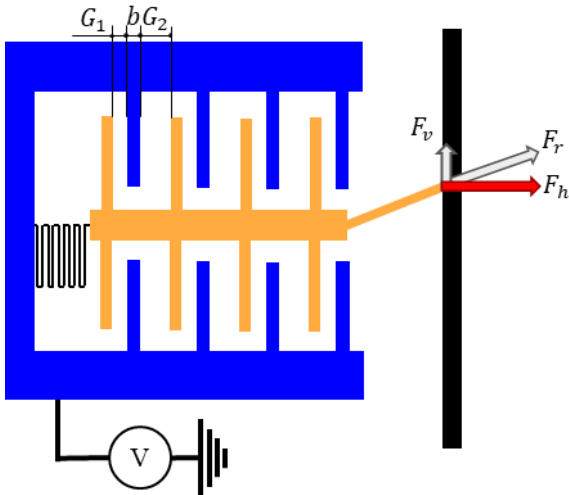


Figure 2. Comb tooth model of electrostatic actuator

$$F_h = F_r \times \cos 21^\circ \quad (2)$$

(1), (2)式より, 最大押しつけ力は $F_h = 4.1 \text{ mN}$ である. 静止摩擦係数を $\mu = 0.45$ とすると [2], ばねの復元力が $F_s = 1.84 \text{ mN}$ の時に初期位置に戻ることが分かる.

3. MEMS ばねの計算式

先の研究では MEMS ばねを片持ち梁として考え, シリコンのヤング率 $E = 130 \text{ GPa}$, ばねの厚さ $h = 40 \text{ }\mu\text{m}$, 幅 $b = 5 \text{ }\mu\text{m}$, 長さ $L = 490 \text{ }\mu\text{m}$, 段数 $N = 10$ 段とした場合, ばね定数 $k_1 [\text{N/m}]$ は次式によって求めた.

$$k_1 = \frac{Ehb^3}{4L^3N} \quad (3)$$

このときのばね定数は $k_1 = 0.138 \text{ N/m}$ となる.

しかし, (3)式は多段にするために梁と梁との接続に短い梁の影響を無視して計算している. そこで, 短い梁と長い梁が一体として考えたラーメン構造で考えた. この場合のばね定数 $k_2 [\text{N/m}]$ は, 長い梁を $L_1 = 490 \text{ }\mu\text{m}$, 短い梁を $L_2 = 9 \text{ }\mu\text{m}$ とすると

$$k_2 = \frac{Ehb^3}{4(L_1^3 + 3L_1^2L_2 - 3L_1L_2^2)N} \quad (4)$$

で求めることができ, $k_2 = 0.131 \text{ [N/m]}$ となる.

4. 実験方法

Figure 3 にばね定数の計測装置を示す. 2つのばねで支えられている部分を, 中央下の隙間からマイクロフォースセンサで押し, 力に対する変位量を計測するこ

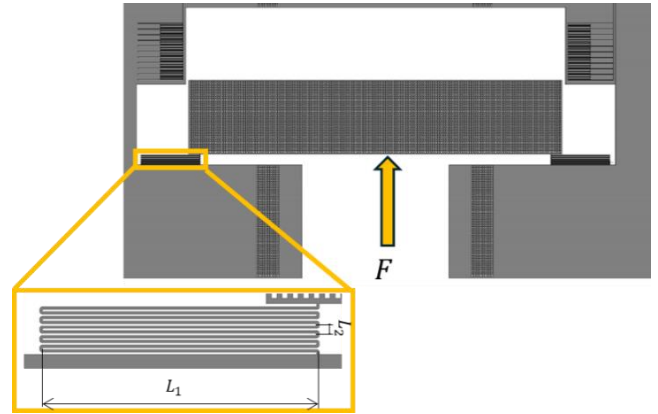


Figure 3. Spring constant measuring device

とでばね定数を算出する.

5. まとめ

本論文では静電モータに搭載するばねの理論値の再計算と計測装置の作製を行った. 従来と新しい計算方法のばね定数の差は1つあたり 0.04 mN である. これによって, より正確な復元力の計算をすることができた. 今後は4章で示したデバイスを作製し, 理論値と計測値を比較する予定である.

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, 令和2年度日本大学学術研究助成金 総合研究, および日本大学特別研究の助成を受けたものである. 計測装置の試作は, 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.

6. 参考文献

- [1] 齊藤健, 金子美泉, 内木場文男, 佐伯勝敏, 武藤伸洋, 見坐地一人, 山下裕玄, 後藤田卓志:「医療応用に向けたマイクロロボットの開発」, 生物試料分析, Vol.45, No.4, pp.169-173, 2022
- [2] 渡辺茂, 鈴木雅史, 吉村昇, 藤田博之:「シリコンウェーハ間の静摩擦特性に対する温度の影響」, T.IEE Japan, Vol.114-A, No.2, pp.168-172, 1994.