

薄型リニア静電モータの高出力化に対する検討 Study of Thin Linear Electrostatic Motor for Higher Power

○田巻祐哉¹, 木屋大地¹, LYUSHUXIN², 森下克幸², 齊藤健³
*Yuya Tamaki¹, Daichi Kiya¹, Shuxin Lyu², Katsuyuki Morishita², Ken Saito³

Abstract: Previously, the authors developed electrostatic motors for micro-robots. However, the motors were designed for limited applications and required advanced microfabrication techniques. In this paper, based on theoretical calculations, we have designed and fabricated a thin linear electrostatic motor that can be fabricated using general photolithography techniques, improving on previously developed electrostatic motors. The newly fabricated electrostatic motor has 16 electrostatic actuators, generating a force of 86.2 mN. As a result, the electrostatic motor with 16 electrostatic actuators can generate about 58 times more force than conventional electrostatic motors. The proposal of electrostatic actuators is expected to be applied to a wide range of applications.

1. はじめに

現在、世界中で温室効果ガスによる地球温暖化が問題になっている。日本でも発電の大部分は温室効果ガスを排出する火力発電に依存し、発電した電力の約55%はモータによって消費される^{[1][2]}。従って、電力の消費量を低下させるために、低消費電力で駆動するモータの開発が望まれている。同時に、スマートフォンなどの小型化が進み、小型で薄型な構造を持つモータの開発が求められている^[3]。

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、他の小型モータと比較して消費電力が小さい。また、平面構造であり、微細加工技術を用いて製作が可能のため小型化および薄型化が実現できる。先に我々は、ミリメートルサイズの昆虫型マイクロロボットを駆動可能な静電モータの開発を行った^[4]。静電モータは、最小加工精度が $1\mu\text{m}$ であり電子線描画装置を利用して試作した。しかし、電子線描画装置は高額であり、一般的な製造工程に含めるのは困難である。

本論文では、一般的なフォトリソグラフィ技術^[5]で実現できる $10\mu\text{m}$ 以上の微細プロセスで製作可能でかつシリコンウェハ外の物体を移動可能な構造で設計し、用途の拡大を目指した薄型リニア静電モータについて検討したので報告する。

2. 昆虫型マイクロロボット用の静電モータ

Figure 1に、先に開発した昆虫型マイクロロボット用の従来の静電モータを示す。静電モータは、厚さ 0.6mm のSilicon-On-Insulator (SOI)ウェハを用いて、デバイスサイズを $2.2\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ で開発した。

Figure 2に静電アクチュエータの櫛歯モデルを示す。

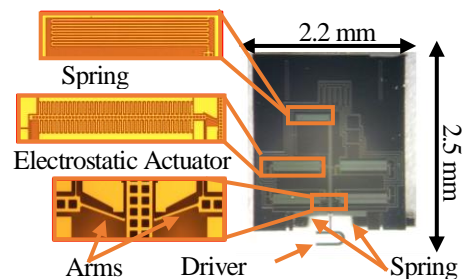


Figure 1. Conventional Electrostatic Motor

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が求められる。静電モータの発生力 F_r は、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 $V = 60\text{V}$ 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、合力であるため駆動体を押し出す F と駆動体を押し付ける F_h に分けられる。従って、駆動体を押し出す F は、式(2)で表される。

$$F = F_r \times \sin 20^\circ \quad (2)$$

従来の静電モータの最大発生力が 1.5mN であることが分かる。しかし、最小加工精度が $1\mu\text{m}$ であり一般的なフォトリソグラフィ技術での作製が困難であった。また、駆動体を本体に固定したため駆動体の駆動距離に限界があり使用用途に制限があった。

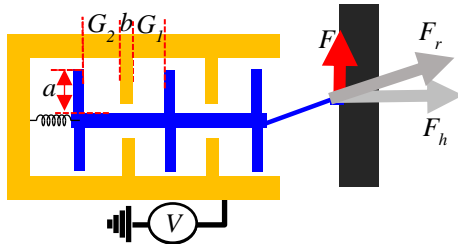


Figure 2. Comb Tooth Model of Electrostatic Actuator

3. フォトリソグラフィで製作可能な静電モータ

今回作製した静電モータは、最小加工精度が $10\ \mu\text{m}$ で $2.0\ \text{cm} \times 2.0\ \text{cm}$ のチップサイズに入るように設計し、従来の静電モータと同様の SOI ウェハを用いて製作を行った。また、従来の静電モータは使用用途に制限があったため、シリコンウェハ外の駆動体を移動可能な機械的構造で設計を行った。

静電モータの大きさの変化に伴う発生力の変化要素として、櫛歯の重なり長さ a 、櫛歯の数 n が関係し、それぞれの寸法の変化は発生力の大きさに線形関係がある。従って、 $2.0\ \text{cm} \times 2.0\ \text{cm}$ のデバイスサイズにより長い櫛歯の重なり長さとして多くの櫛歯を搭載した静電モータの設計を行った。

従来の静電モータからの寸法の変更点として、櫛歯の重なり長さ $a = 510\ \mu\text{m}$ 、櫛歯間距離 $G_1 = 16\ \mu\text{m}$ 、櫛歯間距離 $G_2 = 19\ \mu\text{m}$ 、櫛歯の数 $n = 198$ に変更した。式 (1)、(2) を用いて、静電アクチュエータを 16 個搭載した静電モータに電圧 $V = 60$ を印加したときの櫛歯の変位と発生力は、変位 $15\ \mu\text{m}$ の時最大発生力が $86.2\ \text{mN}$ で、従来の静電モータの約 58 倍の力を生成できることが分かった。本研究では、駆動体として直径 $100\ \mu\text{m}$ の超硬棒を使用し、移動には $5.4\ \text{mN}$ 必要である。従って、最大発生力が超硬棒を駆動するだけの発生力を得られることが分かった。Figure 3 に静電アクチュエータを 16 個搭載した静電モータを示す。一般的なフォトリソグラフィで静電モータの作製が可能だと分かった。

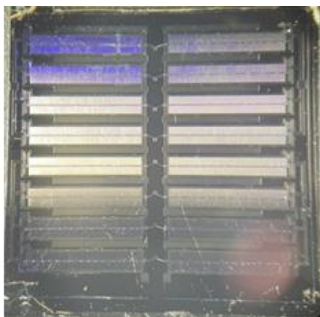


Figure 3. Electrostatic Motor with 16 Electrostatic Actuators

4. まとめ

本論文では、一般的なフォトリソグラフィ技術で製作可能な薄型リニア静電モータの理論値計算を基に設計および作製を行った。静電アクチュエータを 16 個搭載した静電モータの発生力は $86.2\ \text{mN}$ である。従来の静電モータと比較して、静電アクチュエータを 16 個搭載した静電モータの発生力は約 58 倍の発生力が生成可能であるため、幅広い用途に期待できる。

5. 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す。また、令和 2 年度日本大学学術研究助成金総合研究の助成、および令和 4 年度日本大学特別研究の助成を受けたものである。静電モータの試作は、日本大学マイクロ機能デバイス研究センター、武田先端知ビルスーパークリーンルーム(d.lab)の支援を受けて行われたものです。

6. 参考文献

- [1] 一般社団法人日本電機工業会：「トップランナーモータ」, https://www.jem-net.or.jp/Japanese/pis/top_runner/sansou_yudou.html (参照 2023-08-14).
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁、「エネルギー白書 2023」, 2023.
- [3] 総務省、「令和 4 年度版 情報通信白書」, 2022.
- [4] Ken Saito, Daniel S. Contreras, Yudai Takeshiro, Yuki Okamoto, Satoshi Hirao, Yuya Nakata, Taisuke Tanaka, Satoshi Kawamura, Minami Kaneko, Fumio Uchikoba, Yoshio Mita, and Kristofer S. J. Pister: "Study on Electrostatic Inchworm Motor Device for a Heterogeneous Integrated Microrobot System", Trans. of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.12, pp. E18-009-1-E18-009-7, (2019).
- [5] Mayumi Uno, Kazuo Satoh, Tsunehisa Tanaka, Shuichi Murakami, Kengo Nakayama: "高精度フォトリソグラフィと MEMS 技術への応用", (2016).