

## MEMS マイクロロボットに用いる昆虫の尾葉を模した静電センサの検討 Investigation of Insect Tail Lobe Mimicking Electrostatic Sensor for MEMS Micro robot

○山下莉史<sup>1</sup>, 佐藤隼<sup>1</sup>, 富永雄大<sup>2</sup>, 田巻祐哉<sup>2</sup>, LYU SHUXIN<sup>3</sup>, 齊藤健<sup>4</sup>  
\*Rihito Yamashita<sup>1</sup>, Jun Sato<sup>1</sup>, Yudai Tominaga<sup>2</sup>, Yuya Tamaki<sup>2</sup>, Shuxin Lyu<sup>3</sup>, Ken Saito<sup>4</sup>

Abstract: The authors are developing a microrobot that imitates the functionality of insects and walks independently. To mimic ability of insects to detect and respond to diverse environmental changes, we devised an electrostatic sensor that imitate the insect's cercus. In this electrostatic sensor, when the comb teeth on the movable electrode side tilt, the overlapping area with the comb teeth on the fixed electrode side changes, and the capacitance changes. In this paper, we report to design the overall shape of electrostatic sensor, and a structure in which the electrode part tilts without interference and the capacitance changes according to the tilt.

### 1. はじめに

世界中でロボットが活用されるようになった現在、マイクロロボットは人間や大型ロボットでは活動が困難な空間や医療現場での活躍が期待されており研究開発が進められている。例として、小口径配管の内部のような人間が直接検査できない狭隘箇所を点検可能なロボット<sup>[1]</sup>や人間の消化管内を検査する際の負担を軽減する診断画像をリアルタイムで送信する自走式ロボット<sup>[2]</sup>などの研究が行われている。しかし、センサやアクチュエータ、マイクロコントローラ、電源をすべて搭載したマイクロロボットは数センチメートルサイズで実現されているが、数ミリメートルサイズですべて搭載されているマイクロロボットは実現されていない<sup>[3]</sup>。したがって、我々は小型かつ自律性の高いマイクロロボットを実現するため昆虫の優れた機能や構造を模倣し搭載する研究を行っている。

本論文では外部環境の変化をセンシングし、環境や自身の状態の変化に対応可能なマイクロロボットを実現するための昆虫の尾葉を模した静電センサを提案する。

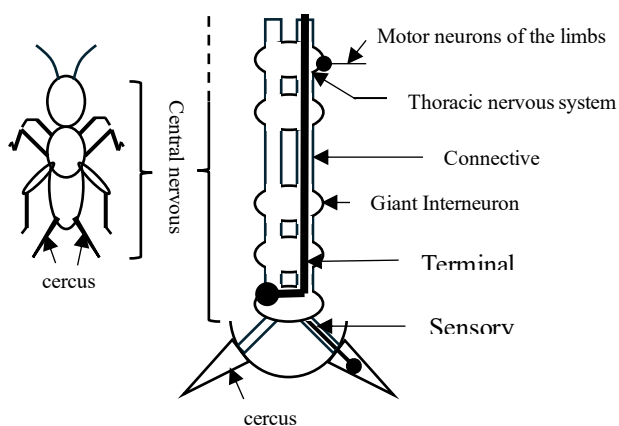


Figure 1. airflow sensory system.

### 2. 尾葉の働き

Figure1 に尾葉の概要を示す。尾葉とはコオロギやゴキブリ腹部末端にある突起のことである。この尾葉、正確には尾葉上に存在する多数の尾葉感覚毛に外部刺激を受けると、その刺激が巨大介在ニューロンの活動に変換された後運動中枢に伝達され行動発現に至る。

また、同じ外部刺激を加えた場合でも接地している状態、空中に吊るされている状態や水に浮かべた状態など、状態によって発現する行動が異なる。つまり、受容によって直接行動が発現するのではなく巨大介在ニューロンなどの活動が他の感覚情報により修飾を受けることで発現する行動が決定されると考えられる<sup>[4]</sup>。

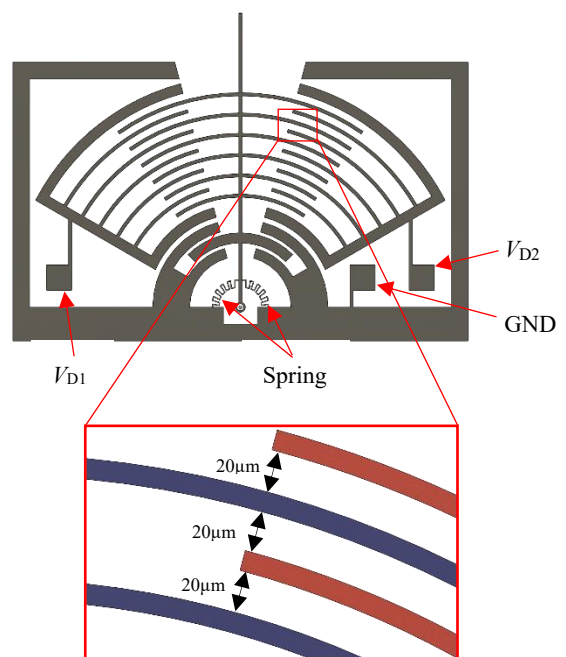


Figure 2. Electrostatic Sensor

### 3. 静電センサの設計

静電センサは、対となる電極の重なり部分の面積に応じた静電容量の変化を利用したセンサである。

今回設計する静電センサモデルの概略図を Figure2 に示す。静電センサの構成は櫛歯状の固定電極と可動電極、ばね、電極  $V_{D1}$ ,  $V_{D2}$ , GND とした。加工精度を考慮して最低寸法は  $10 \mu\text{m}$  で設計する。

可動電極は左右に最大  $15^\circ$  傾き、固定電極に差しこまれる面積が変化することで静電容量が変化する。可動電極は  $15^\circ$  傾いたときにストッパーにより止められ、上下の移動に関してもストッパーが作用し可動電極と固定電極は接触しない構造になっている。左右の固定電極はそれぞれ独立しており片方の静電容量が増加すればもう片方の静電容量は低下する反比例の関係にある。

今回、静電センサの櫛歯は同心円の円弧状の板を複数重ねたものとして扱う。可動電極の回転軸からの距離をそれぞれ  $a_1$ ,  $a_2$  ( $a_1 < a_2$ )、円弧の中心角を  $\theta \text{ rad}$  としたとき一对の櫛歯電極の静電容量  $C$  は

$$C = 2\pi\epsilon_0 \cdot \frac{1}{\ln \frac{a_2}{a_1}} \times \frac{\theta}{2\pi} \quad (1)$$

よって  $n$  本の櫛歯の静電容量  $C_n$  は

$$\begin{aligned} C_n &= 2\pi\epsilon_0 \left( \frac{1}{\ln \frac{a_2}{a_1}} + \frac{1}{\ln \frac{a_4}{a_3}} + \frac{1}{\ln \frac{a_6}{a_5}} \cdots \frac{1}{\ln \frac{a_n}{a_{n-1}}} \right) \times \frac{\theta}{2\pi} \\ &= 2\pi\epsilon_0 \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\ln \frac{a_{i+1}}{a_i}} \right) \times \frac{\theta}{2\pi} \quad (2) \end{aligned}$$

となる。円弧の中心角は通常状態のとき  $\pi/9$ 、最小で  $\pi/36$ 、最大で  $7\pi/36$  であるので、空気中の誘電率  $\epsilon = 8.86 \times 10^{-12}$ 、櫛歯数  $n = 100$  とすると通常時、面積最小時、面積最大時の静電容量はそれぞれ  $1.44 \times 10^{-12} \text{ fF}$ 、 $3.61 \times 10^{-13} \text{ fF}$ 、 $2.53 \times 10^{-12} \text{ fF}$  となる。一对の櫛歯電極の静電容量は円弧半径が櫛歯一本分長くなる毎に一次関数的に増加していくので櫛歯数  $n$  を2倍の200にすると全体の静電容量は約3.3倍になる。しかし、検出回路の設計次第で静電容量は増減できること、今後さらなる小型化を視野にいれていることから櫛歯数  $n$  を静電容量が測定限界に近くなる100で設計を行った。

### 4. まとめ

本論文では昆虫型マイクロロボットに搭載することを目的とした昆虫の尾葉を模した静電センサを設計した。計算上では最低寸法を考慮したうえで、作製可能なサイズ内に収めながら計測可能な値まで静電容量を発生させることができた。今後はフォトマスクの設計をおこない、微細加工技術を用いて実物を作製し、静電容量が測定可能であるか、静電容量が正しく変化するかを確認する。その後、理論値と測定値を比較すると共に検出回路を設計し、周波数を読み取れるようにする予定である。

### 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。

### 6. 参考文献

- [1] 宮川豊美, 涼森康一, 木村正信, 長谷川幸久 : 「1 インチ用配管ロボットの開発」, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 79-85, 1999
- [2] 岩下広樹, 伊藤高廣, 村上直, 木村俊広, 唐澤薫, 勝田ちひろ, 田中あかね, 久津見弘 : 「自走式カプセル内視鏡の研究-無線給電と動物実験-」, 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 385-386, 2021.
- [3] 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」, 特集 特別講演第31・32回合同年次学術集会より, Vol. 45, No. 4, pp169-173, 2022.
- [4] 松浦哲也, 加納正道 : 「コオロギの逃避行動と巨大介在ニューロン」, 比較生理生化学, 25 巻, 3 号, pp96-105, 2008