

マイクロロボットに搭載する昆虫の尾葉を模倣した静電センサの容量検出回路に対する検討
 Study on the Capacitance Detection Circuit for an Electrostatic Sensor imitating the Tailed Leaf of an Insect for Use in Microrobots

○齋藤樹希¹, 山下莉史², LYU SHUXIN³, 齊藤健⁴

*Tatsuki Saito¹, Rihito Yamashita², Shuxin Lyu³, Ken Saito⁴

Abstract : The authors has been developing autonomous micro-robots in MEMS technology that mimic insects. To enable autonomous walking, it is necessary to understand the external environment and respond appropriately. Therefore, sensors that can be mounted on microrobots are crucial for autonomy. In this paper, we connected the designed electrostatic sensor to a capacitance detection circuit, performed simulations, and confirmed changes in the output frequency.

1. はじめに

近年、マイクロロボットは小型であるという特徴から、医療分野や、製造分野において微細組立作業など、人や大型機器が介入しにくい狭隘空間での活躍が見込まれている^[1]。しかし、このような環境では外部からの操作や電力供給、通信が物理的に制約されるため、ロボット自身による経路計画・障害物回避・作業実行などの高い自律性が不可欠となる。

こうした背景のもと、我々は昆虫を模倣した自律型マイクロロボットの研究開発を進めている。

本論文では、自律動作を実現するための基盤として、外部環境をセンシングするために設計した静電センサを仮想的に容量検出回路に接続し、その動作や性能をシミュレーションによって評価した結果を基に、マイクロロボットへの実装可能性および今後の課題について検討する。

2. 静電センサ

静電センサの概略図を Figure1 に示す。静電センサは、昆虫に備わっている尾葉という器官から着想を得た、対向配置された電極の重なり面積の変化による静電容量の変動を検出原理とするセンサであり、マイクロロボットの後部に搭載し、風などの外部刺激を検出し、歩行などに反映させる目的で用いるものである。

このセンサは、楕歯状の固定電極および可動電極、ばね、ならびに電極端子 V_{D1}, V_{D2}, GND により構成される。製造時の加工精度を考慮し、最小寸法は 10 μm として設計を行った。可動電極は左右方向に最大 15°まで傾斜可能であり、その傾斜に伴って固定電極との重なり領域が変化し、結果として静電容量が変動する。可動電極は 15°に達した時点でストッパーにより回転が制限され、さらに上下方向の変位についても同様に

ストッパーが作用し、固定電極との接触を回避する構造とした。なお、左右に配置された固定電極はそれぞれ独立しており、一方の静電容量が増加すると、他方は減少するという反比例的関係を有する。

センサは、同心円の円弧状の楕歯が n 本重なったものとし、軸からの距離を可動部、固定部それぞれ a₁, a₂ (a₁ < a₂)、円弧の中心角を θ [rad]、空気中の誘電率 ε₀ = 8.86 × 10⁻¹² とし、静電容量 C_n は次の式であらわされ。

$$C_n = 2\pi\epsilon_0 \left(\frac{1}{\ln \frac{a_2}{a_1}} + \frac{1}{\ln \frac{a_4}{a_3}} + \frac{1}{\ln \frac{a_6}{a_5}} \dots \frac{1}{\ln \frac{a_n}{a_{n-1}}} \right) \times \frac{\theta}{2\pi}$$

$$= 2\pi\epsilon_0 \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\ln \frac{a_{i+1}}{a_i}} \right) \times \frac{\theta}{2\pi} \tag{1}$$

本研究で設計した静電センサの楕歯の数は、小型化を目指すため測定限界に近い 100 本とし、その静電容量は(1)式より、通常状態で円弧の中心角は π/9 をとるため 1446.6 fF、重なり面積が最大のときに中心角 7π/36、最小にときに π/36 をとり、静電容量値はそれぞれ 2531.5 fF, 361.6 fF となり、軸の傾きが変化した場合静電容量変化の理論値を Table1 に示す。

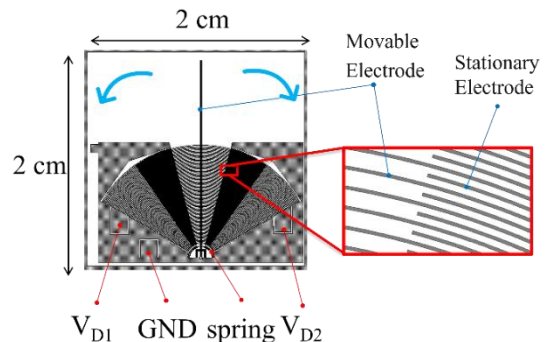


Figure 1. Electrostatic Sencer

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

Table 1. Theoretical value of capacitance

Central angle[°]	Capacitance[fF]	Central angle[°]	Capacitance[fF]
-15°	361.6	1°	1518.9
-14°	434.0	2°	1591.2
-13°	506.3	3°	1663.6
-12°	578.6	4°	1663.6
-11°	651.0	5°	1735.9
-10°	723.3	6°	1880.5
-9°	795.6	7°	1952.9
-8°	867.9	8°	2025.2
-7°	940.3	9°	2097.5
-6°	1012.6	10°	2169.9
-5°	1084.9	11°	2242.2
-4°	1157.3	12°	2314.5
-3°	1229.6	13°	2386.8
-2°	1301.9	14°	2459.2
-1°	1374.2	15°	2531.5
0°	1446.6		

3. 静電容量検出回路

Figure2 に静電容量検出に用いる回路を示す. 静電容量検出回路は, マイクロロボットの細胞体モデルに並列に接続することで構成した.

細胞体モデルは, 生体の細胞体を持つ特性を模倣し, パルス状の出力波形を生成する発振回路であり, 本回路はマイクロロボットの駆動回路である NNIC の構成要素としても利用している. これを使用することで集積化が可能となる.

回路は, MOSFET : M_1, M_2, M_3, M_4 , コンデンサ : C_1, C_M , 電源 : V_1 で構成し, 回路定数は MOSFET : $M_1 = W/L = 3 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$, $M_2 = 1.2 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$, $M_3 = 10 \mu\text{m}/1.2 \mu\text{m}$, $M_4 = 10 \mu\text{m}/1.2 \mu\text{m}$, コンデンサ : $C_1 = 10 \text{pF}$, $C_M = 1 \text{pF}$, 電源 : $V_1 = 2.8\text{V}$ とした. 容量変化を検出しやすくするため, センサ C_S にコンデンサ C_M を並列接続し, より静電容量の大きいコンデンサ C として扱う.

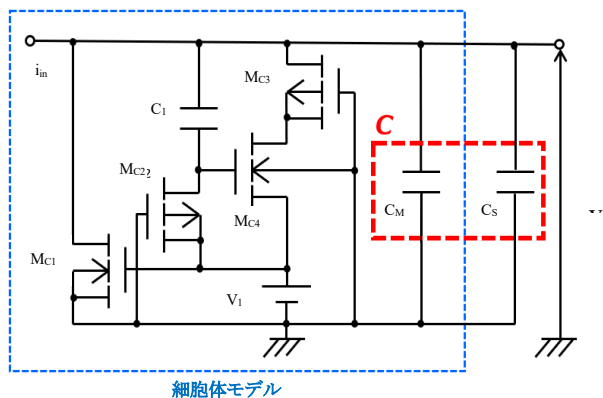


Figure 2. Cell body model's capacity detection circuit

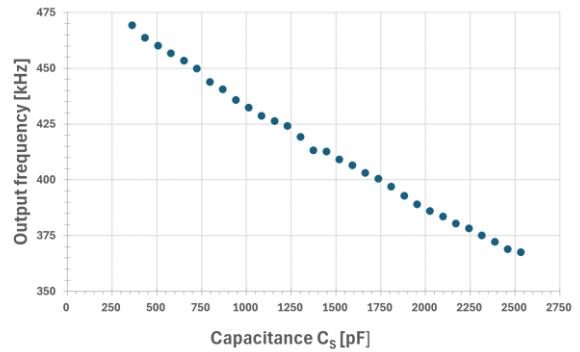


Figure 3. Output frequency characteristic with varying capacitance of capacitor C_S

実際に検出するのは C の静電容量値であるが, 今回は値が変化する C_S の静電容量値のみシミュレーションを行った.

4. シミュレーション結果

Figure3 に細胞体モデルにセンサを接続し, 周波数特性をシミュレーションした結果を示す.

シミュレーション結果は, 櫛歯の重なり面積が最小のときの理論上の静電容量値 361.6fF のときの周波数は 469.3kHz , 櫛歯の重なり面積が最大となるときの静電容量値 2531.5fF ときの周波数は 367.5kHz となり, 約 100kHz の周波数変化を確認できた.

5. まとめ

マイクロロボットに搭載する静電センサの静電容量検出回路について検討した.

シミュレーションの結果からセンサの静電容量変化による出力周波数の変化を確認し, 設計した静電センサはマイクロロボットに搭載可能であると言える. 今後は静電センサの作製を行い静電容量変化の測定を行う.

謝辞

本研究 (一部) は, 文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業 (JPMXP1225UT1126) の支援を受けて, 東京大学武田先端知ビルクリーンルーム微細加工拠点で実施されたものである.

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