

# ソフト力覚センサの形態学的設計

○平井 慎一（立命館大学） 松野 孝博（立命館大学）

## 1. はじめに

本稿では、ソフト力覚センサの誘電体の設計について述べる。静電容量型の力覚センサは、構造が単純であり、センサ出力が安定しており、近年は、電極と誘電体が柔らかい材料で構成された、ソフト力覚センサの研究が進められている [1, 2]。一方、静電容量型のソフト力覚センサの出力は、作用する力のみならず、接触領域の形状や面積に依存する。したがって、力の情報を得るためには、接触領域の形状や面積による影響を除去する必要がある。本稿では、誘電体の材料特性を設計することにより、接触面積に依存しないセンシングが可能であることを示す。すなわち、接触面積に独立なソフト力覚センサの可能性を示す。

## 2. 静電容量型ソフト力覚センサ

静電容量型ソフト力覚センサ（図1）は、柔らかい電極と柔らかい誘電体から成る。電極は誘電体の両面に貼り付けられている。電極に力を印加すると、電極が変形し、結果として電極間の静電容量が変化する。したがって、静電容量を計測することにより、電極に作用する力の大きさを求めることができる。

静電容量型ソフト力覚センサの出力は、力の大きさのみならず、接触面の形状や面積に依存する。センサを異なる面積の円柱棒で押した（図2）。力の大きさは

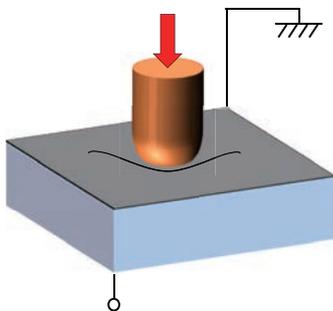


図1 静電容量型ソフト力覚センサ



図2 ソフト力覚センサの面積依存性

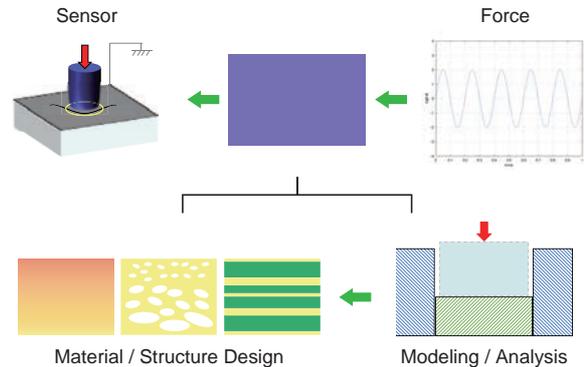


図3 形態学的設計

どちらも5Nである。接触面積が小さいとき（図2(a)）の静電容量は6.7pF、接触面積が大きいとき（図2(b)）の静電容量は7.1pFであった。このように、静電容量型ソフト力覚センサの出力は、接触面積に依存する。したがって、力の大きさのみを得るためには、接触面の形状や面積による影響を取り除く必要がある。

## 3. 形態学的設計

静電容量型ソフト力覚センサの出力から、接触面の形状や面積による影響を取り除く一つの方法は、センサの出力信号を処理することである。すなわち、コンピュータを用いてセンサ信号を処理し、目的とする物理量を求める手法である。この手法は、柔軟性がある反面、計算時間を要するという欠点がある。近年、センサやその周辺の構造や機構を工夫して、目的とするセンサ信号を得る形態学的計算という概念が提案されている。そこで、目的とする物理量を出力するように、センサの形状や材料を設計する手法（図3）を試みる。

この形態学的設計においては、センサのモデルを構築し、センサの挙動を定式化する。センサのモデルを解析的あるいは数値的に解き、目的とする物理量を出力するための条件、たとえば材料の応力-歪み関係や構造の力-変位関係を求める。得られた条件を実現するために、材料や構造を設計するという過程を踏む。材料や構造の設計においては、非線形特性を有する材料、ポアラス構造や多層構造など、様々な選択肢が考えられる。

## 4. ソフト力覚センサのモデリング

ソフト力覚センサのモデルを構築する。本稿では単純化のため、二次元断面でモデルを構築する。長方形物体でソフト電極を押す。このとき、接触している領域のみが一定の距離だけ変形し、非接触の部分は変形しないと仮定する（図4）。

センサの電極の面積を  $S$ 、電極間の距離を  $h$  で表す。誘電体の誘電率を  $\epsilon$  で表す。接触部分の比率を  $r$  とする。このとき、接触部の面積は  $rS$ 、非接触部の面積は  $(1-r)S$  である。接触部の押し込み距離を  $d$  とする。こ

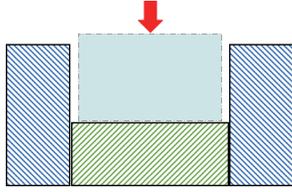


図4 ソフト力覚センサのモデル

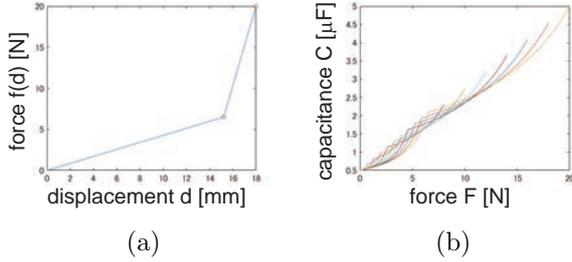


図5 ソフト力覚センサの挙動のシミュレーション

のとき、接触部の電極間距離は  $h - d$  であるので、センサの静電容量は

$$C = \varepsilon \frac{rS}{h-d} + \varepsilon \frac{(1-r)S}{h} \quad (1)$$

となる。センサに印加する力を  $F$  で表す。誘電体の応力-歪み関係を、関数  $g$  で表す。接触部分の応力は  $F/(rS)$ 、伸縮歪みは  $d/h$  で与えられるので

$$\frac{F}{rS} = g\left(\frac{d}{h}\right) \quad (2)$$

となる。ここで、 $S$  と  $h$  が定数であることに注意し、 $f(d) = Sg(d/h)$  を導入すると

$$F = rf(d) \quad (3)$$

を得る。力  $F$  を与えたとき、(3) 式より距離  $d$  を求め、その値を (1) 式に代入することで、静電容量の値を計算することができる。たとえば、図 5(a) に示す関数  $f(d)$  を与えたとき、様々な  $r$  の値に対して静電容量を計算した結果、図 5(b) を得た。

## 5. 最適化計算に基づく設計

誘電体の材料特性は、関数  $f(d)$  で表される。本節では、接触面積に依存しないセンシングが可能であるように、関数  $f(d)$  を決定する手法を述べる。関数  $f(d)$  を有限個のパラメータで表す。ここでは関数  $f(d)$  を区分解線補間で定式化する。すなわち、変位 10 mm, 15 mm, 17 mm, 18 mm に対応する関数  $f$  の値を  $f_{10}, f_{15}, f_{17}, f_{18}$  で表し、4 個の線分から成る折れ線で関数を表す。ここで、有限個のパラメータをまとめてベクトル  $\mathbf{p} = [f_{10}, f_{15}, f_{17}, f_{18}]^T$  で表す。パラメータベクトル  $\mathbf{p}$  の値を与えると、ソフト力覚センサの挙動のシミュレーションを通して、力と静電容量の関係を計算することができる。力と静電容量の関係は、比率  $r$  の値によって異なる。本稿の目的は、接触面積に依存しないソフト力覚センサの設計である。そこで、比率  $r$  の様々な値に対して力と静電容量の関係を計算し、

計算結果の分散を評価関数とする。以上の計算は、パラメータベクトル  $\mathbf{p}$  を入力とし、分散を出力とする関数である。すなわち分散は  $\sigma^2(\mathbf{p})$  と表される。

接触面積に依存しないとは、分散が 0 であることである。したがって、最小化問題

$$\text{minimize } \sigma^2(\mathbf{p})$$

を数値的に解くことにより、分散が最小となるパラメータベクトル  $\mathbf{p}$  の値を求めることができる。パラメータベクトル  $\mathbf{p}$  の値から、誘電体の変形特性を決定する。

計算結果を図 6 に示す。図 6(a) に示す変形特性のとき、図 6(b) に示す力と静電容量の関係を得た。最終的に、図 6(c) に示す変形特性を得た。このときの力と静電容量の関係を図 6(d) に示す。力と静電容量の関係の分散が小さくなっており、結果として接触面積に依存しない力覚センシングが実現できていることがわかる。

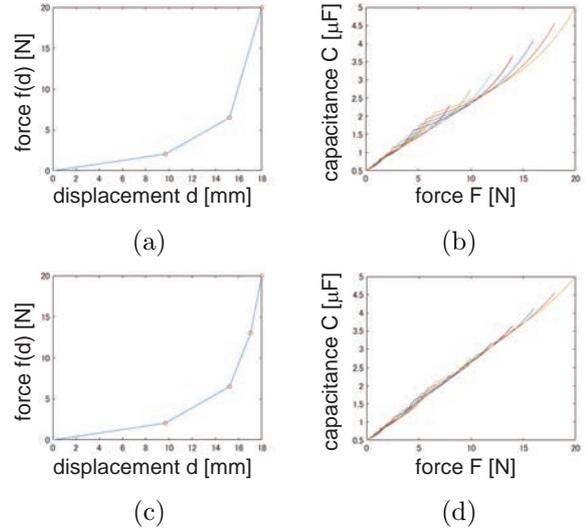


図6 計算結果

## 6. おわりに

本稿では、ソフト力覚センサの誘電体の設計について述べた。接触面積に依存しない力覚センシングという目標のために、誘電体の力学特性を決定する手法を述べ、計算例を示した。このような特性を有する材料や構造を設計することにより、接触面積に依存しない力覚センシングを実現することができると思われる。材料や構造の設計、ならびに他の目標に対する設計が今後の課題である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 19H05337 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] J. Choi, S. Kim, J. Lee, and B. Choi, *Improved Capacitive Pressure Sensors Based on Liquid Alloy and Silicone Elastomer*, IEEE Sensors J., Vol. 15, No. 8, pp. 4180–4181, 2015.
- [2] M. Tavakoli, P. Lopes, J. Lourenco, R. P. Rocha, L. Giliberto, A. T. Almeida, and C. Majidi, *Autonomous Selection of Closing Posture of a Robotic Hand Through Embodied Soft Matter Capacitive Sensors*, IEEE Sensors J., Vol. 17, No. 17, pp. 5669–5677, 2017.