

# 静電容量力覚センサにおける面積依存性の研究

○福井 大地 (立命館大) 平井 慎一(立命館大)

## 1. 緒言

三品産業と呼ばれる食品、医薬品、化粧品をはじめとする分野では、多種多様かつ非定型なプロセスが多く、ロボットによる自動化が求められている[1]。例えば食品産業において、日本では一日あたり数百万食以上の弁当が製造されている[2]。弁当製造は、盛り付けなど多くの作業を手作業に頼っている現状が存在し、生産ラインでの単純作業の繰り返しにより、雇用の減少と人件費の高騰がますます深刻化するおそれがある。そこで、ロボット技術を積極的に活用することで、作業を機械化・自動化し、大幅な生産性向上が期待できる。食品の特徴として、同種の物でも大きさ、形状のばらつきが激しい。そのため、汎用性のあるハンドリング技術が求められており、ハンド自体が対象物の多種多様なばらつきに対応できるソフトロボットハンドの研究が進められている [3]-[7]。

以上で述べたようなソフトロボットの作業において、機械的接触時にかかる力を計測し、ロボットにフィードバックする必要がある。しかし、センサの構成材料に剛体が混ざっていると、柔軟物で構成されているソフトロボットの特徴が失われてしまう。そのため柔軟物のみで構成されたセンサが求められている。

以上より、本研究では柔軟物により構成される静電容量式力覚センサを作成し、センサを評価する。また、センサにおける面積依存性について考察する。

## 2. 静電容量式力覚センサ

### 2.1 原理と特徴

本研究では、静電容量の原理を利用した静電容量式力覚センサを対象とする。静電容量とは、2つの電極板間において、印加電圧に対して蓄えられる電荷の量である。図1に示すような平行板導体において、静電容量は以下の式(1)に示すように、電極板の面積  $S$  ここに数式を入力します。と絶縁体の誘電率  $\epsilon$  に比例し、電極板間の距離  $d$  に反比例して決定される。

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (1)$$

電極板間の距離が近くなることで、静電容量の値が増加する。よって電極板間距離の変位を値として取得することで、センサとしての利用が可能となる。また、電極板と誘電体に使用する材質を変更できる利点が存在し、これらを柔軟物で構成することで、弾性に優れるセンサが実現できる。

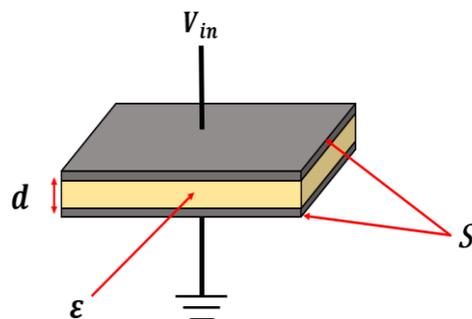


図1 平行板コンデンサ

### 2.2 製作センサ

製作したセンサの外観を図2に示す。2つの電極としてそれぞれ  $50 \times 50 \times 0.5$  mm の硬度  $20^\circ$  の導電性ゴムと  $50 \times 50$  mm の銅テープを使用した。また、誘電体には  $50 \times 50 \times 10$  mm のポリウレタンフォームでできたスポンジを使用した。静電容量はデュアルチャンネル近接タッチコントローラ(MICROCHIP, MTCH112)を用いて計測し、マイクロコントローラを通してセンサの初期値からの変化量を出力する。

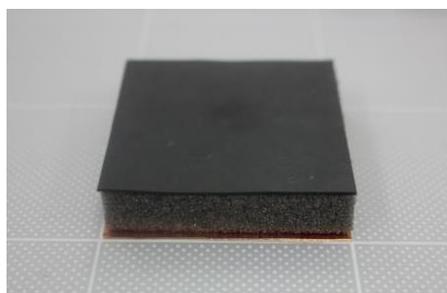


図2 制作した静電容量センサ

## 3. 押し込み力検出実験

本章では製作した静電容量式力覚センサに加えた力と静電容量の値の関係の計測を目的とする。

### 3.1 実験方法

図3に示す半径の異なる半球を用いて、センサを押し込み、1 mm 押し込みごとのセンサの値と、半球に取り付けたロードセルより押し込み力の値を計測する。半球は 5, 10, 20, 30, 40, 50 mm である。



図3 押し込み用半球

### 3.2 実験結果

各半球でセンサを押し込んだ際のセンサの値と、加えられていた力の測定結果を図4に示す。

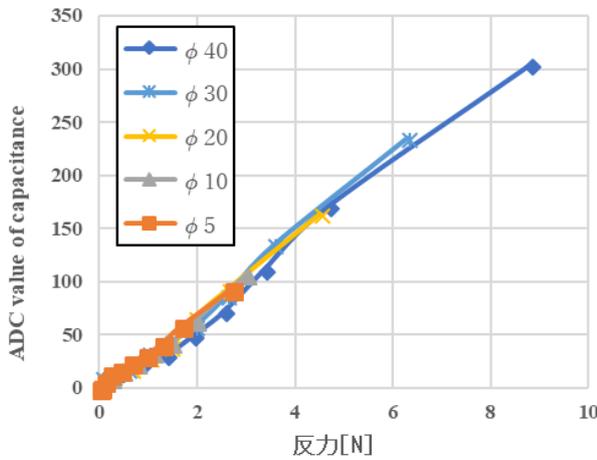


図4 押し込み力とセンサ出力

### 3.3 考察

半球の大きさによって、押し込んだ力の検出範囲は異なるものの、波形そのものはおおよそ一致した。しかし、2~4 Nの範囲においてはセンサの値に差がある。これは、センサへの接触面積が、センサの値に干渉することを意味する。このとき、センサへの接触面積は未知の情報であるため、センサの値から力を正確に特定することは困難である。以上より、本センサで正確に力を計測するためには、接触面積のセンサの値への干渉（以下：面積依存性）を減少させる必要がある。本稿では誘電体に使用する物体の変形特性に着目し、面積依存性の少ないセンサ素材を実験的に求める。

## 4. 静電容量式力センサの成立条件

静電容量式センサが力センサとして成立するためには、一定の力を加えた際、力を加える面積が異なる場合においてもセンサが同じ反応を示す必要がある。図5にセンサのモデルを示す。センサの面積の一定

割合  $R$  に一定力  $F$  を加えた時のセンサ変形量を  $d_1$ 、静電容量を  $C_1$  とする。また、センサの全体に一定力  $F$  を加えた時のセンサ変形量を  $d_2$ 、静電容量を  $C_2$  とする。この時、電極板の面積を  $S$ 、電極板間の距離を  $x$ 、誘電体の誘電率を  $\epsilon$  とすると、 $C_1$  と  $C_2$  の値は以下の式(2)、式(3)で表される。

$$C_1 = \epsilon S \left( \frac{1-R}{x} + \frac{R}{x-d_1} \right) \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon S}{x-d_2} \quad (3)$$

面積依存性を有さないセンサの条件としては、いかなる  $R$  に対しても  $C_1$  と  $C_2$  の値が等しくなることが挙げられる。式(2)、(3)において  $\epsilon S$  は共通であるため、実際には以下の式(4)の値が0に近づけば面積依存性の少ないセンサとなる。

$$\Delta C = \left( \frac{1-R}{x} + \frac{R}{x-d_1} \right) - \frac{1}{x-d_2} \quad (4)$$

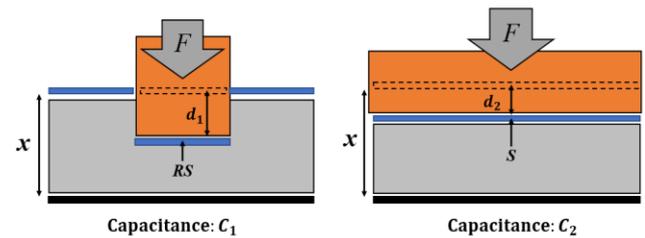


図5 センサの簡易モデル

## 5. 誘電体素材の面積依存性の検証

本章では、誘電体素材の面積依存性について評価する。検証では、センサの全体面積および厚みを仮定し、その1割の面積に該当する面積および同じ厚みの試験片を作成する。まず、この試験片に対して押し込み実験を行う。次に、この計測結果を等倍することで他の該当面積における結果を推定する。試験片を複数種類用意し、各素材における面積依存性を評価する。

### 5.1 押し込み力と反力の測定方法

センサの面積を  $9000 \text{ mm}^2$  とした時の面積の1割の大きさを想定し、 $30 \times 30 \times 20 \text{ mm}$  に切断した異なる3種の試験素材を、リニアステージを用いて手動で  $0.5 \text{ mm}$  刻みに押し込む。その際の試験片からの反力を力覚センサ(株式会社テック技術, USL06-H5-50N-D-FZ)を用いて計測する。計測した試験素材を表1に示す。

表1 測定試験素材

スポンジA	ポリウレタンフォーム
スポンジB	軟質ウレタンフォーム
スポンジC	メラミンフォーム

## 5.2 測定結果

押し込み量と各試験片の反力の関係を図5に示す。本測定結果を、センサの全体面積の一割に接触し押し込んだ時、つまり $R=0.1$ における誘電体素材からの反力と仮定する。

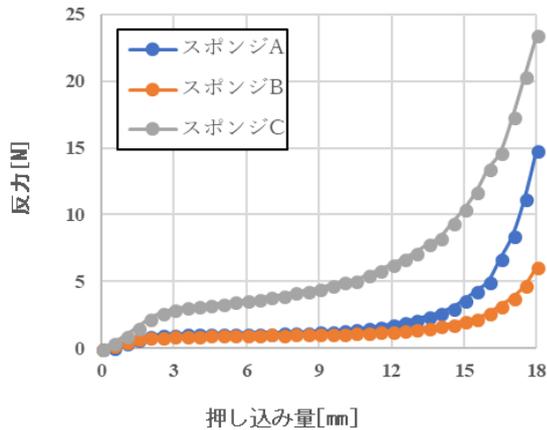


図5 押し込み量と反力

## 5.3 各接触面積の反力と押し込み量の関係推定

次に他の接触面積で各センサ素材を押し込んだ時の反力を、図5に示す実験結果から推定する。今回は、接触面積について $R=0.1, 0.5, 0.9, 1.0$ の4種類を想定する。図5に示す $R=0.1$ における誘電体素材からの反力を、それぞれ5, 9, 10倍することで、 $R=0.5, 0.9, 1.0$ における誘電体素材からの反力を推定する。図6にスポンジAの各接触面積における押し込み量と反力の関係の推定結果を示す。この曲線の逆関数から、誘電体素材に力 $F$ を加えた時の誘電体素材の変形量が得られる。スポンジAの測定結果の反力、押し込み量の軸を入れ替え、押し込み量0~3 mm, 3~12 mm, 12~18 mmの3区間に分けてそれぞれ5次関数で近似したグラフを図7に示す。

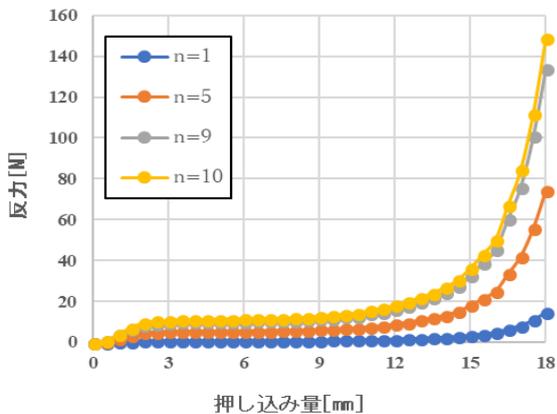


図6 押し込み量と反力の要素数変化

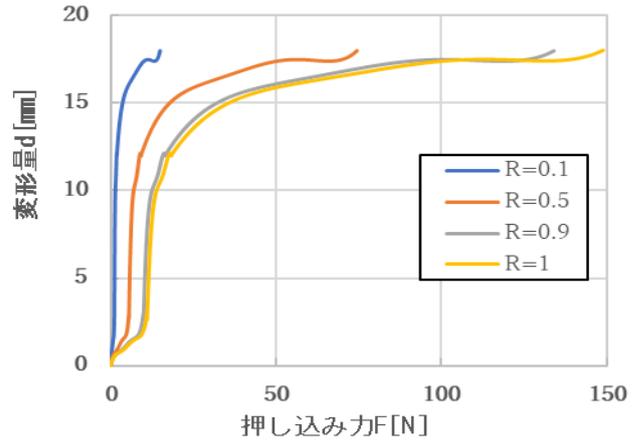


図7 スポンジA 近似曲線

## 5.4 各素材における面積依存性の検証

スポンジ10個分の面積をセンサ全体の面積とする。5.3節より、スポンジ $n$ 個を押し込んだ際の変化の近似曲線を得ているため、押し込んでいない面積について導電板間距離が変化しないと仮定する。このとき、式(2), (3)より押し込み力 $F$ を与えた時の $R=0.1, 0.5, 0.9, 1$ における静電容量の値を得る。スポンジA, B, Cにおける押し込み力と静電容量の関係をそれぞれ図8, 9, 10に示す。

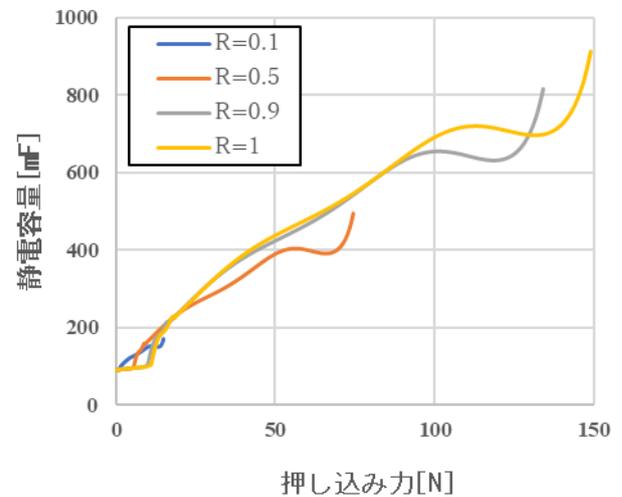


図8 ポリウレタンフォーム

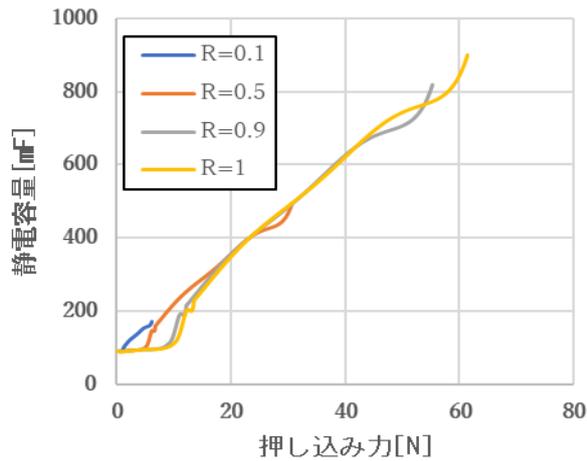


図9 軟質ウレタンフォーム

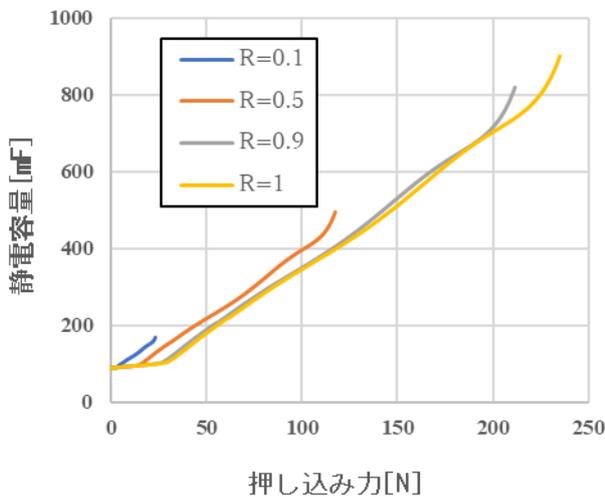


図10 メラミンフォーム

## 5.5 考察

図8~10においては、 $R$ の値によらず波形が一致するほど面積依存性が少ない。2章にて作成したセンサの材料はポリウレタンフォームであり、センサの反応は面積依存性が少ないものであった。しかし、図8では力を加える面積により静電容量の値が異なる様子が確認できた。これは、センサに用いた導電ゴムによって、押し込んだ面積以外にも力が加わっていたためであると考えられる。スポンジ単体で見ると、図9に示す軟質ウレタンフォームの面積依存性が最も少ない結果となった。また、計測したスポンジ3種ではそれぞれ押し込み力の計測範囲が異なるため、目的となる範囲に合わせた素材の選定が必要となる。

## 6. 結言

本報告では、静電容量式力センサの製作し、評価

した。提案した柔軟な静電容量式力センサが力覚センサとして成立するためには、一定の力を加えた際、力を加える面積にかかわらず、センサが同じ反応を示す必要があり、要件を満たしていた。さらにより面積依存性の少ない素材を選定すべく、材質の異なる素材の反力と変形量の測定を行い、センサを作成した際の面積依存性について評価を行った。結果、軟質ウレタンフォームを用いた場合に面積依存性が少ないことを確認した。

今後の課題として、面積依存性の少ない反力と変形量の関係を数値計算にて解析し、求めた波形に近い素材を選定する。選定した材料を用いてセンサを作成し、面積依存性を評価する。

## 参考文献

- [1] “ロボット新戦略 Japan’s Robot Strategy —ビジョン・戦略・アクションプラン—,” 経済産業省, Jan. 2015.
- [2] 日本のコンビニ弁当の行方と環境への取り組み, “慶應義塾大学 細田衛士研究会, 事前 レポート,” 2011.
- [3] “食料需給予測調査分析事業食品産業動態調査報告書. 平成 18 年度第 1 編 (調査分析 編),” 食品需給研究センター, 2007.
- [4] 岩政恒史, 平井 慎一, “ Binding に基づく柔軟紐ハンドによる把持操作 (ロボットハンドの機構と把持戦略 (1)),” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2014, P1-S02(1)-3P1-S02(4), 2014.
- [5] John R. Amend, Jr. Eric Brown, Nicholas Rodenberg, Heinrich M. Jaeger, Hod Lipson, “A Positive Pressure Universal Gripper Based on the Jamming of Granular Material ,” IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 28, NO. 2, pp. 341-350, 2012.
- [6] Zhongkui Wang and Shinichi Hirai, “ Soft Gripper Dynamics Using a Line-Segment Model with an Optimization-Based Parameter Identification Method, ”IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 2, Issue 2, pp. 624-631, 0.1109/LRA. 2017. 2650149, Jan. , 2017.
- [7] K. Suzumori, S. Iikura, H. Tanaka, “Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms, ”Proc. 1991 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. , pp. 1622-1627, 1991.