

静電容量式力センサを有するロボットハンドによる把持

Robotic gripper equipped with a capacitive force sensor

○山田 寛大 (立命館大) 平井 慎一 (立命館大)

Tomohiro YAMADA, Ritsumeikan University
Shinichi HIRAI, Ritsumeikan University

Lunch boxes usually contain soft food such as fried chickens and boiled eggs. It is difficult to manipulate soft food objects due to their deformation and variety in shape and size. In this research, we focus on the design of a sensor for grasping such objects using a robot hand. During food object manipulation, a robot hand often applies excess grasping force to the object, causing much deformation of the food, or destroying it. A capacitive force sensor was designed to deal with this problem. Capacitance changes according to the distance between electrodes so, by using this property, a robot hand was equipped with a couple of electrodes are able to measure the grasping force. Some experiments performed showed that the proposed capacitive force sensor successfully detects the change in the force during grasping.

Key Words: Robot Hand, Capacitive Force Sensor, Tactile Sensor

1. 緒言

近年、食品製造業での人件費の高騰が問題となっており、生産ラインでの自動化が求められている。現在、日本では一日数百万食以上の弁当が製造されている。弁当の詰め合わせ作業をはじめとする食品のハンドリング作業の多くは人手で行われている。そこで、作業の自動化により、人はオペレーションに専念でき、人件費の削減が期待できる[1][2]。これまで、食品のハンドリング作業の自動化が行われなかった理由として、ロボットの対象物を大きさや形状のばらつきが少ない剛体物体として扱うことを前提としていたからである。そのため、ばらつきが激しいものを対象としたロボットハンドの研究が多く行われている[3][4][5]。食品には以下の特徴があげられる。同種の物でも大きさ、形状のばらつきが激しく、柔軟物体を含む。また、商品としての価値がなくなるため潰してはいけないという点があげられる。食品産業の自動化のために、食品をはじめとする物体に対応できるロボットハンドが求められている。

以上より、本研究では食品をはじめとする柔軟物体に対応できるセンサとハンドの製作を行う。そして、製作したセンサとハンドを用いて、把持性能について検証、評価を行う。

2. 静電容量式力センサ

2.1 原理と特徴

本研究では、力センサとして静電容量の原理を用いた静電容量式力センサを利用する。静電容量とは、孤立した2つの電極間において、印加電圧に対して蓄えられる電荷の量である。静電容量式力センサでは、Fig.1に示すような平行板導体を用いるコンデンサの仕組みを利用する[6]。静電容量は、電極の面積 S と絶縁体の誘電率 ϵ に比例し、電極間の距離 Δd に反比例して決まる。以下に静電容量の関係を求める式を示す。

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

電極間の距離が近くなると、静電容量の値が増加する。そのため、静電容量の値の変化を用いることにより、力センサとして利用することができる[7][8]。静電容量式力センサの特

徴として、電極板と誘電体に利用する物質を変更できるところがあげられる。電極板と誘電体として扱う物質を柔軟物にすることで、弾性や伸縮性に優れるセンサが可能となる[9]。

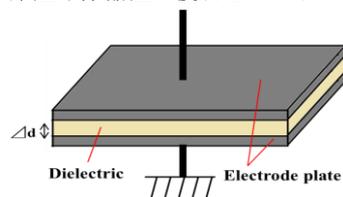


Fig.1 Parallel-plate capacitor

2.2 利用方法

今回、対象物の把持力制御に静電容量式力センサを使用する。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値を出力する。製作した静電容量式力センサを Fig.2 に示す。2つの電極にはそれぞれ $50 \times 60 \times 1 \text{mm}$ の導電性ゴムと $50 \times 60 \text{mm}$ の銅テープを使用した。誘電体には厚さ 11mm のポリウレタンでできたスポンジを利用した。このサイズにすることにより、面接触での把持が可能となる。銅テープ、スポンジ、導電性ゴムの順に貼り付け製作した。この構造にした理由を2点あげる。1つ目として、導電性ゴムと把持対象物間の摩擦力の確保である。2つ目として、導電性ゴムとスポンジを利用することで対象物に形状が馴染み外力を抑えることが期待できるからである。

静電容量式力センサは製作したハンドの手先に取り付ける。対象物を把持する際に、静電容量の値を読み取り、把持力制御することが目的である。センサに力が加わると静電容量が変化する特性と利用し、その値をハンドのアクチュエータ部分にフィードバックすることで把持力の制御を行う。

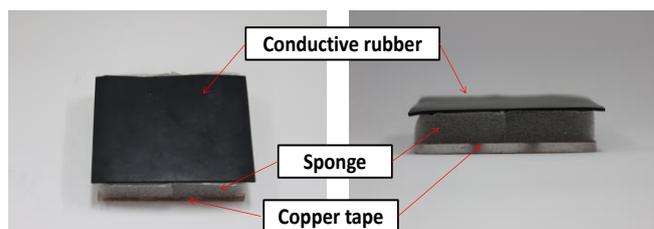


Fig.2 Capacitive force sensor

3. 静電容量式力センサの静電容量の計測

本章では製作した静電容量式力センサの押し込み量と静電容量の値の関係を計測することを目的とする。

3.1 実験方法

面接触でセンサ全体を押し込む場合と直径 10mm の半球を利用した点接触でセンサの中央を押し込む場合での静電容量の値の変化を計測する。Fig.3, Fig.4 で示すように、リニアステージを用いてセンサを面接触と点接触の 2 種類の方法により手動で押し込む。1mm 刻みにセンサを押し込み、その時の静電容量の値を静的に測定する。

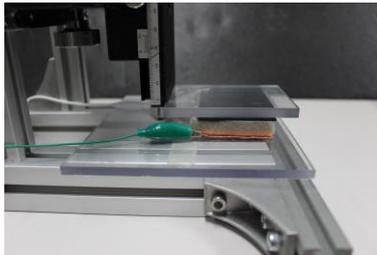


Fig.3 Surface contact

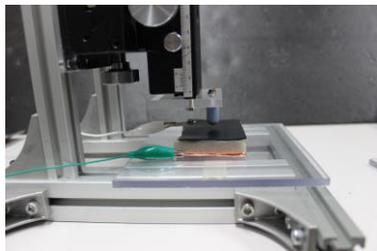


Fig.4 Point contact

3.2 実験結果

面接触と点接触で押し込んだ場合の実験結果を Fig.5 に示す。

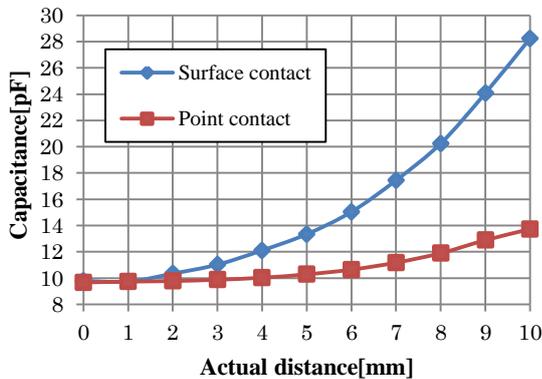


Fig.5 Capacitance

3.3 考察

面接触でセンサ全体を押し込んだ場合に比べ、点接触では静電容量の変位量が小さいことが読み取れた。式(1)から考えられるように、電極間距離が近くなる電極板の面積が点接触の方が小さいからだと考えられる。対象物の大きさを考慮してセンサを利用する必要があることが考えられる。電極板を小さくし複数取り付けることで、対象物の大きさへの考慮が軽減できると考えられる。

4. 静電容量式力センサの再現性の評価

製作した静電容量式力センサの再現性を検証する。

4.1 実験方法

3 章と同様に押し込む実験を行い静電容量の値を読み取る。リニアステージを用いて製作したセンサを 1mm 刻みに手動で押し込む。その時の静電容量の値を静的に測定する。この動作を 5 回繰り返す。この実験も Fig.3, Fig.4 で示すように面接触と点接触で行った。

4.2 実験結果

面接触と点接触で押し込んだ場合の実験結果を Fig.6, Fig.7 に示す。

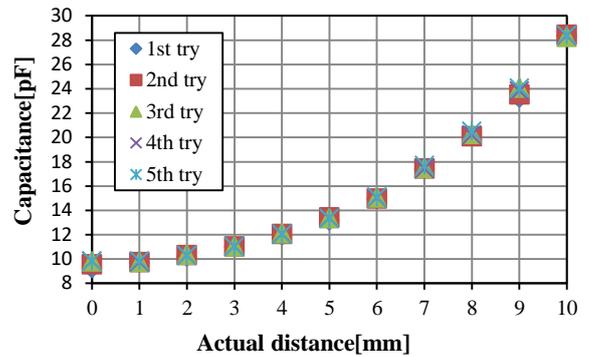


Fig.6 Reproducibility of surface contact

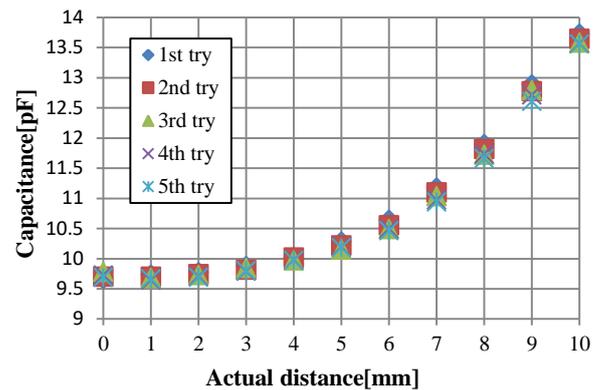


Fig.7 Reproducibility of point contact

4.3 考察

面接触と点接触共に再現性が高いことが読み取れた。面接触に比べ点接触の方が再現性の誤差が生じているのは、点接触で押す場合にスポンジのひずみに違いが出るからだと考える。ひずみに違いが生じることで、電極間の距離と面積に誤差が生じる。また、使用回数を増やすと誘電体自体の物理的なヒステリシスも生じることが予想される。そのため、誘電体の選定も重要となる。

5. 静電容量式力センサの押し込み量と力

本章では、押し込み量とその時に生じるスポンジの反力の関係を計測する。

5.1 実験方法

リニアステージを用いて製作したセンサを 1mm 毎に手動で押し込む。その時のスポンジの反力を力覚センサ(株式会社テック技販, USL06-H5-50N-D-FZ)を用いて計測する。1 辺が 45mm の正方形のポリカーボネートに力覚センサを設置し、これをリニアステージに取り付けて計測する。実験の様子を Fig.8 で示す。

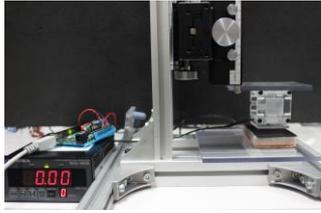


Fig.8 Reaction force measurement

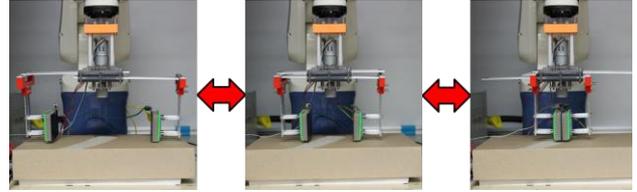


Fig.11 Grasping action

5.2 実験結果

押し込み量とスポンジの反力の関係を Fig.9 に示す。

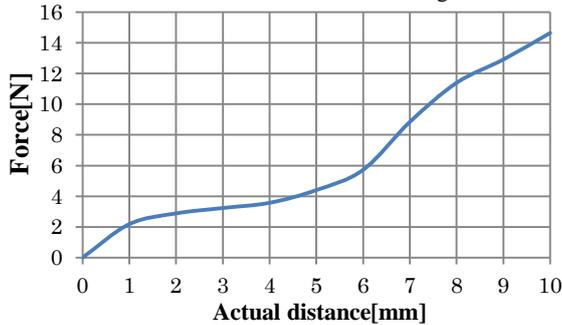


Fig.9 Force and push distance

5.3 考察

押し込み量が 1~5mm に比べ 0~1mm の方が必要な力が多い。一定の力以上を加えないとセンサが変形し始めないからだと考えられる。また、6mm 以降押し込むために必要な力が大きく上がる理由はスポンジの圧縮により含んでいる空気の量が減少し、変形が難しくなったからだと考えられる。

6. 実機システム

本章では、製作したハンドについて説明する。製作したハンドを Fig.10 に示す。実機の最大の大きさは高さ 190mm、幅 300mm、奥行き 105mm、重量 504g である。ハンドの手先には、静電容量式力センサを左右それぞれひとつずつ搭載する。ハンドの把持機構は、1 自由度でモータの回転によりラックが直動に動き開閉動作を行う。手先の把持可能範囲は製作した静電容量式力センサ 50×60mm、開閉幅 0~180mm である。ハンドの開閉動作を Fig.11 に示す。

本研究では、製作した静電容量式力センサをハンドに取り付け、把持力制御を行い、対象物にかかる力を抑えることが目的である。DC モータの回転をポテンショメータとモータドライバを用いて目標値に収束させることで開閉の制御を行う。静電容量式力センサが変形すると静電容量が変化するという特性を利用し、アクチュエータ部分にフィードバックすることで把持力の制御をする。このとき静電容量の値に閾値を設け、閾値に収束させることで把持力制御を行う。

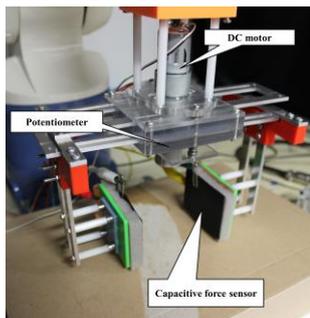


Fig.10 Hand appearance

7. ハンドの把持制御

製作したハンドは、DC モータの回転により実機が開閉し物体を把持する。その際にポテンショメータで算出した値を目標値に収束することで開閉を行う。そこでラックギアによるモータの減速部分で生じる摩擦を考慮し、制御側には PI 制御を用いる。以下にその制御側を示す。

$$V_m = K_p(R_d(t) - R_x(t)) + K_i \int (R_d(t) - R_x(t)) dt \quad (2)$$

式(2)において、 V_m は DC モータを駆動させるモータドライバ IC への電圧指令値、 R_d は角度の目標値であり、 R_x は現在の角度、 K_p は比例ゲイン、 K_i は積分ゲインを表す。

7.1 検証実験

式(2)で示した制御側を用いてハンドの制御を行い、目標値への収束性能を検証し評価する。ポテンショメータで与えた目標値に収束するまでの時間と実機の開閉位置の精度を読み取る。このとき、実機の開口状態を最大値から 170mm 変化させる。170mm とした理由は、最小開口量の限界値を超え、実機の破損を防ぐためである。

7.2 実験結果

実験結果を Fig.12 に示す。

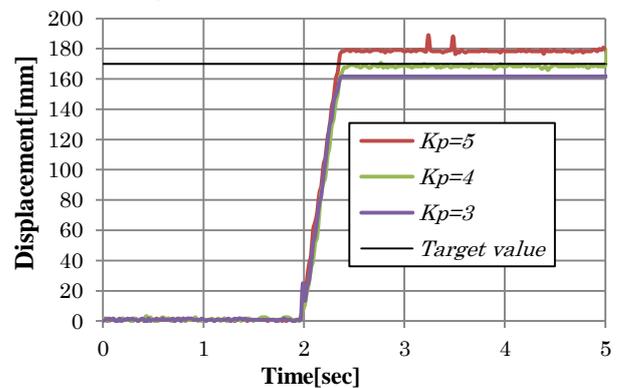


Fig.12 Step response of hand

7.3 考察

実験結果より、 $K_p=5$ の場合オーバーシュートが確認できる。 $K_p=3$ の場合、目標値までの収束に時間がかかると考えられる。 $K_p=4$ のとき目標値に十分収束していることが確認できる。どの値も一定ではなく不安定であるのは、モータの摩擦の影響があると考えられる。また、 $K_p=4$ 以外の数字のときは、定常偏差が残ったままとなっている。これは積分項がモータの摩擦により十分な働きができていないためであると考えられる。

8. 把持力と静電容量の評価実験

本章では、製作した実機で力覚センサを取り付けた立方体

形状の把持物体を把持し、その際に把持物体にかかる力の計測を行う。また、その際の静電容量の値も計測する。

8.1 把持力計測の実験方法

1 辺 45mm の立方体に力覚センサを取り付けた把持物体を把持する。把持物体を Fig.13 に示す。ハンドの開口幅を最大値にした状態から目標を開口幅最小値とし把持を行い力の計測をする。把持の様子を Fig.14 に示す。

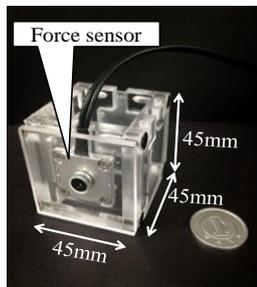


Fig.13 Cube for measuring force

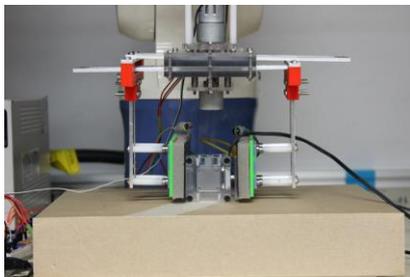


Fig.14 Grasping cube

8.2 実験結果

実験結果を Fig.15 に示す。

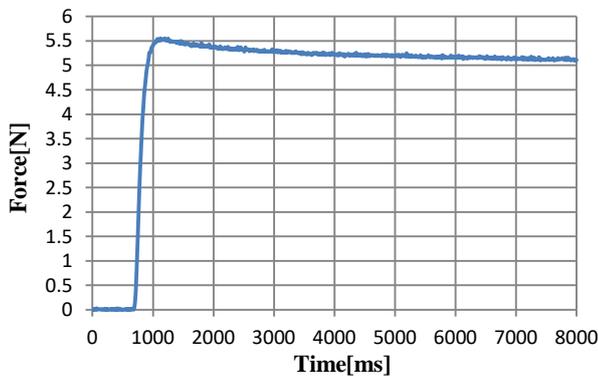


Fig.15 Force of grasping

8.3 考察

ハンドが対象物を把持する瞬間に 5.5N の力が加わり、その後 5N 近くまで把持力が減少した。把持を行う際、静電容量式力センサを対象物より柔らかくし変形しやすくする。それにより、対象物に大きな力が加わる前に把持力制御ができると考えられる。

8.4 静電容量の計測方法

8.1 節と同様の方法で立方体の把持物体を把持した。その際の静電容量の値を計測する。同時に値を取らなかった理由として静電容量の値の出力に I2C 通信を利用しておりサンプリングタイムに差が出るからである。

8.5 実験結果

実験結果を Fig.16 に示す。結果の変位が大きく読み取れた。ハンドの左のセンサにおいてである。

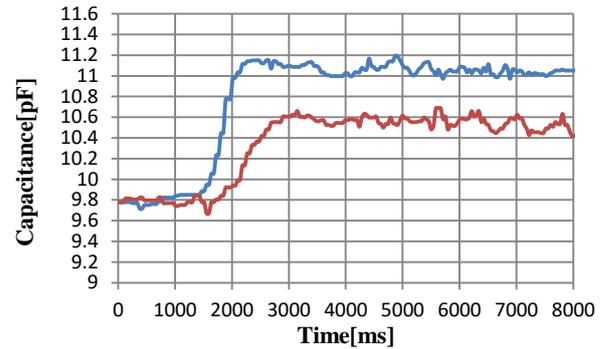


Fig.16 Capacitance of grasping

8.6 考察

左と右の静電容量式力センサはそれぞれ 9.8~11pF, 9.8~10.5pF の変化を読み取ることができた。左のセンサの値の方が大きな変位が出たのはスポンジの形状変化が大きく見られたからである。またこの結果から 2~3mm センサの形状が変化したと考えられる。今後、センサに使う材料を形状変化しやすいものにする事でより変位が大きく確認でき、制御しやすくなると考えられる。

9. 結言

本報告では、静電容量式力センサとハンドの製作、評価を行った。静電容量式力センサではセンサ自体の変形が静電容量の変位に大きく影響することがわかった。また、センサとしての複数回の使用での再現度の確認もできた。製作したハンドの把持力が確認できた。

今後の課題として、センサに搭載する電極の数を増やし分布、静電容量の精度を検証する。センサと把持物体の変形量の測定を行う。また、ハンドの把持力、センサと把持物体の柔軟度を考慮することで、材料の選定を行う。

参考文献

- [1] 経済産業省, “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—”, pp.77-81, 2005.
- [2] 慶應義塾大学 細田衛士研究会, “日本のコンビニ弁当の行方と環境への取り組み”, 事前レポート, 2011.
- [3] 石川淳一, 平井慎一, “柔軟指ハンドによる多種類の物体のハンドリング”, 第31回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.4-6, 2011.
- [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, "3P1-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] オーム社, “電気工学ポケットブック, 電気学会編”, pp.42-32, 1967.
- [7] 柏原稔樹, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, “MEMS を用いた静電容量式力覚センサの研究”, 日本機械学会第2回マイクロ・ナノエレクトロニクス講演論文集, pp.97-98, 2010.
- [8] 辻聡史, 小浜 輝彦, “積層型静電容量式 3D タッチパネルの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2013, "2A1-A03(1)"-"2A1-A03(2)", 2013.
- [9] 郭士傑, 加藤陽, 伊藤弘昭, 向井利春, “福祉機器用柔軟面状ゴムセンサの開発”, SEI テクニカルレビュー, 第 181 号, pp.117-123, 2012.