

可食センシング要素

— ロボット要素としての可食感知・検出器 —

Edible Sensing Element

— Edible Sensing Device as a Robotic Elements -

○藤田政宏⁽¹⁾, 藤本敏彰⁽¹⁾, 西村礼貴⁽¹⁾, 鉄井光⁽¹⁾, 野村陽人⁽¹⁾,
高根英里⁽¹⁾, 小松洋音⁽¹⁾, 多田隈建二郎⁽¹⁾, 昆陽雅司⁽¹⁾, 田所諭⁽¹⁾

○Masahiro Fujita⁽¹⁾, Toshiaki Fujimoto⁽¹⁾, Ayaki Nishimura⁽¹⁾, Hikaru Tetsui⁽¹⁾,

Akito Nomura⁽¹⁾, Eri Takane⁽¹⁾, Hirone Komatsu⁽¹⁾, Kenjiro Tadakuma⁽¹⁾,

Masashi Konyo⁽¹⁾, Satoshi Tadokoro⁽¹⁾,

(1) 東北大学

(1)Tohoku University

キーワード

機構 (Mechanism), 可食 (Edible), センサ (Sensor)

連絡先 〒980 - 8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

東北大学大学院情報科学研究科 応用情報科学専攻 藤田政宏

Tel : 022-795-7025 Fax : 022-795-7023 E-mail : fujita.masahiro@rm.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, 消化可能な素材で構成されたロボット要素技術に関する研究が注目されており, 摂取や血液内への注入が可能なロボットに関する研究が行われ始めている[1][2].

アクチュエータに関する研究としては, 2016年に著者ら, 2017年に新竹らが, いずれもゼラチンを素材とした空気圧駆動型アクチュエータを発表している[3][4]. また, 機械要素に関する研究として, 著者らがやはりゼラチンを素材とした吸盤の試作を行っている[5]. また, 生体内で安全に使用できるセンサの研究も始められている. まず, 消化不可能ではあるが, ドラッグデリバリーシステムの一部



図 1: 可食センサ

として, 生体内における薬品の拡散・吸収状態を計測するためのセンサが開発されている[6]. また, 消化可能な素材で構成されたセンサとして, pH の変化を人間が直接知覚可能な色・匂い・形の変化として検出する Organic Primitives や, 食品の質的狀態の変化により励

起される誘電率の変化を検出するセンサなどが研究されている[7][8]。しかしながら、アクチュエータの制御に必要な、機械的特性を計測する可食センサの実現にはまだ至っていないのが現状である。

そこで本報では、可食素材で構成された力・変位を検出可能な静電容量型センサ構造を考案し、設計・試作した実機の構成について論じる。そして、試作センサに変位を付与した際の静電容量の変化を実機実験により計測し、実際に力・変位センサとして機能することを検証する。

2. 可食センサ

消化可能な素材で構成された可食式のセンサの構造として、以下に示す各方式が考えられる。

2.1 袋構造方式

柔軟な袋構造とその内部に封入された流体間の応答を利用する方式が挙げられる。考案した空気圧駆動型アクチュエータの構造を直接利用し、入出力を逆転させることで実現可能と考えられる[3][4]。

2.2 化学反応方式

化学反応による物体の状態変化を検出する方式が考えられる。消化器官内の状態や、消化液と可食ロボットの化学反応状態の検出などに利用できると考えられる。また、文献[7]のセンサに本方式が採用されている。

2.3 共振回路方式

物体の状態変化による共振回路の共振周波数の変化を検出する方式が挙げられる。本方式は文献[8]のセンサに採用されている。

2.4 コンデンサ方式

平行平板コンデンサにおいて、電極間がバ

ネ要素で結合された構造を構成し、外力・変位に応じた静電容量の変化を利用する方式が考えられる。また、電極間の距離を一定に保つ場合に電極を柔軟素材で構成することで、平板面積の変化により、やはり静電容量を変化させることが可能である。本方式により、可食ロボットが環境と接触した際の変形状態、接触力などが検出可能になると考えられる。

2.5 歪ゲージ方式

入力により伸縮された抵抗体の抵抗値の変化を検出する方式が考えられる。本方式においても、可食ロボットと環境が接触した際のロボットの変形状態、接触力などが検出できるようになると考えられる。

2.6 光検知方式

入力による光の経路変化を受光素子で検出する方式が考えられる。透明性の高い柔軟可食素材により、可食レンズを構成することが可能であると考えられる。

2.7 その他

上記の各方式を組み合わせた複合的方式も機能としては同様に可食センサの構造として考えることが可能である。

以上で挙げたセンサ構造のうち、本稿では新規性、実現可能性を考慮して、平行平板コンデンサで構成された、静電容量型の力・変位センサの構築を試みる。

3. 実機具現化

試作した可食センサの外観、三面図、および諸元をそれぞれ図2、図3、表1に示す。電極と電線は一体としており、その素材には厚さ $0.1\mu\text{m}$ の食用金箔を適用した。ただ

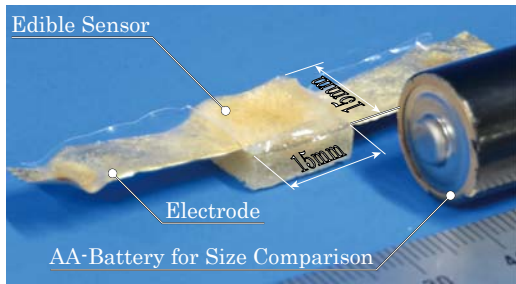


図 2: 可食センサ試作機

し、金箔単体では強度が不足するため、厚さ $30\mu\text{m}$ の寒天シートを金箔の両面に張り付けることで強度を確保した。また、2枚の電極間、およびセンサ全体を、形状の維持、および極板間におけるバネ特性の実現のためにゼラチンで覆う構成とした。

次に、センサの基本原理について述べる。センサは2枚の電極による平行平板コンデンサで構成されているが、平行平板コンデンサの静電容量は式(1)で表される。

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

ただし、各記号は $C[\text{F}]$: 静電容量, $\epsilon [\text{F/m}]$: 誘電率, $S[\text{mm}^2]$: 平行平板面積, $d[\text{mm}]$: 平行平板間の距離, を表す。このとき、2.4 節で述べたとおり、平行平板間の変位を入力とすれば変位センサとして利用できる。また、平行平板間がバネ特性を有していれば、センサへの押付力を変位に変換し、さらに式(1)を用いて静電容量へ変換できるため、考案するセンサは力センサとしても利用することが可能である。

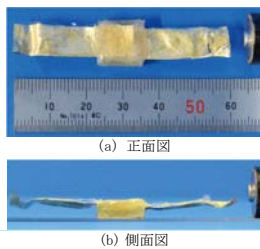


図 3: 試作機の三面図

表 1: 試作機の仕様

Weight	0.84[g]
Width	15mm
Depth	15mm
Height	5mm
Size of the Plate	10mm×10mm
Distance between Two Plates	2.5mm

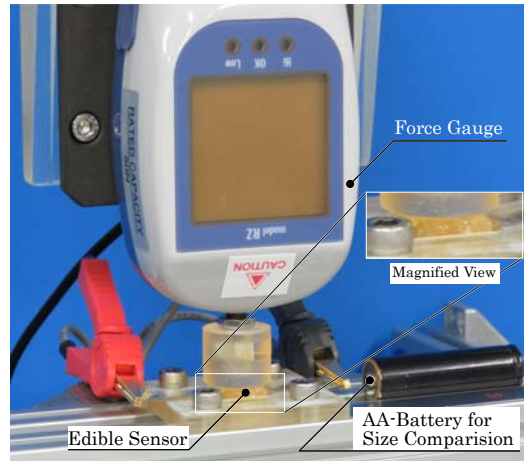


図 4: 力・変位-静電容量特性計測装置

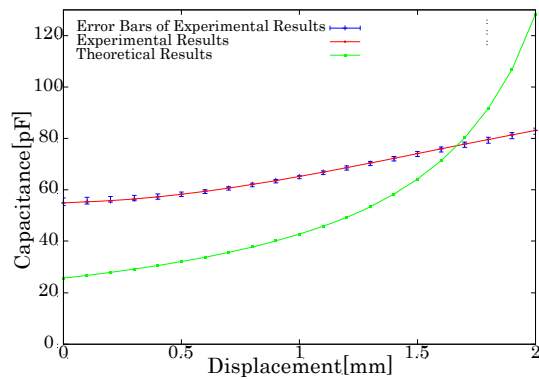


図 5: 変位-静電容量特性の計測結果

4. 実機実験 (変位-静電容量特性計測)

図 4 に示す試験装置を用いて静電容量式可食センサの変位と静電容量の関係を計測した。押付力を計測するためにフォースゲージ (AIKOH: RZ-50) を用いてセンサを押し付け、静電容量は LCR メータ (HIOKI: IM3536) を用いて測定周波数 1MHz にて計測した。

図 5 に可食センサの変位-静電容量の入出力関係の理論値と実験結果を示す。ゼラチンゲルの比誘電率は文献[9]を参考に 72.5 とした。5 回計測を行い、赤点は平均値を表し、青色のエラーバーは 5 回の計測における最大、最小値を表す。図 5 より、変位を増加させることで静電容量が増加する、という基本的傾

向，および静電容量値のオーダーは同様であるが，絶対値としては差が生じていることが分かる．

この原因は次のように考えられる．まず，ゼラチンの誘電率が温度，計測周波数などの条件により大きく変化すると考えられる[9]．また，試作機では極板間のみならず全体をゼラチンゲルでコーティングしていることから，実際の極板間距離の変位は入力として与えた変位より小さくなったことが考えられる．電極間の変位については再実験にてより詳しく調べる必要がある．しかしながら，本実験により考案原理に基づき，考案した可食センサ構造が力・変位センサとして基本的機能を有することが確認できた．

5. 可食性フィルムを用いた薄型バルーンアクチュエータ

これまでに，ゼラチンなど柔軟な可食素材を用いてバルーン状構造や吸盤などの実機を具現化してきた．可食性のフィルムを用いて，可食アクチュエータやセンサを構成した例は見当たらない．そこで，我々は可食性のフィルムを用い，従来のゼラチンなどで構成する方法に比べて簡易的にアクチュエータなど可食機構を構成する方法を構築することを試みる．試作方法として，サイズ:110mm×110mm，厚さ:30 μ m の寒天性の可食フィルムを，ヒートシーラを用いて各辺から 10 mm の箇所においてシールをし，閉じた袋状構造のコーナ部からさらに 10 mm の箇所で作動流体を供給するためのチューブを取り付けた．本チューブに関してはまだ可食素材では構成していない．チューブの接着部分はゼラチンを用いて密封し構造とした．試作した可食フィルムアクチュエータの外観を図 8 に，またその仕様を表 1 にそれぞれ示す．

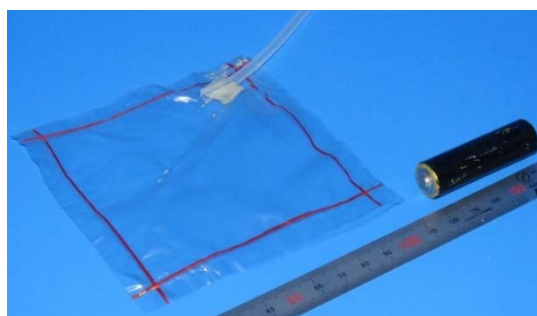


図 6：可食フィルムを用いた膨張式アクチュエータの外観

表 2：可食フィルムを用いた膨張式アクチュエータの仕様

Weight	0.98[g]
Size of the Film	110[mm]×110[mm]
Size of the Pressurized Area	84[mm]×87[mm]
Normal Height	60[μ m]
Maximum Height	26[mm]

本アクチュエータが膨張動作可能であることを確認するための実機実験を行った．その様子を図 9 に示す．図より，内部に空気を送り込むことにより膨張動作が可能であることがわかる．現在の試作機における高さの変化は 0.06mm から 26mm まで変化することが分かった．

今後は膠やプルランなどの可食接着剤でシート間の接着強度を高めることで耐圧性を確保し，アクチュエータとしての性能を向上させることに加え，バルーンの形状の検討，積層状にすることによるストロークの向上などが挙げられる．また過去のアクチュエータのように内部に低沸点溶液を封入（例えば[10]-[11]）し，この可食フィルムならではの薄膜さを活用した巻き尺状のアクチュエータを構



図 7：可食性フィルムアクチュエータの膨張動作

成することも可能であると考えられる。溶液の可食性を高めることが次の課題となる。さらに、可食（機械）油を作動流体とすることで、液圧駆動による高出力化も考えられる。

また、本アクチュエータによって、内圧の変化として外力を検出するといった、入力と出力の関係を逆にすることで、センシング構造として成り立たせ、センサ機能を実現することも可能であるため、本薄型可食フィルムを用いたバルーンをはじめとする各種構造は製作容易性の観点からも非常に有用であると言える。また、セルロース性の可食シートも1つの候補である。

前報では羊腸という天然ケーシングを用いたが、魚類の浮袋の活用や、生体構造・反射動作の活用として、ダンゴムシやワニガメを用いた把持機構にまで応用できるなど学術的展開も期待できる切り口である。さらに、動物性の生体構造に限らず、植物の茎構造を活用したり、溶解することで形状と機能が変化する点に着目する観点も有用であると考えられる。可変剛性の応用としての脱皮するロボット構造やバイオメテイクスの発展としての擬態ロボティクスへの取り組みなども次の課題となる。

6. まとめ

本稿では、力・変位の検出が可能な静電容量式可食センサを新たに考案・具現化した。

また、実機実験により、変位と静電容量の関係について計測し、力・変位センサとしての基本的性能を有することを確認した。

また、可食アクチュエータを構成する素材として、可食性フィルムに着目し、この可食性フィルムを用いた薄型バルーンアクチュエータを具現化した。試作した実機を用いた実験によって基本的な膨張動作を確認した。

今後の予定として、まず、電極内部の変位が直接確認できるよう、断面状態が視認可能な状態で再度実験を行い、実際の極板間変位と静電容量の関係についてより詳しく調べる。また、本センサ構造において押付力を検出するために、力と静電容量間の特性について明らかにする。また、可食フィルムを用いたバルーン状のセンシング構造に関して、性能と新機能付加を見据えて、さらに具現化を進めていく。

謝 辞

本研究は総務省 異能 vation プログラムの支援を得て行われました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] S. Miyashita, et.al, “Ingestible, Controllable, and Degradable Origami Robot for Patching Stomach Wounds”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.909-916, 2016.
- [2] C. Breger et.al, “Self-Folding Thermo-Magnetically Responsive Soft Microgrippers”, ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol.7, No.5, pp.3398-3405, 2015.
- [3] 小松洋音, 高根英里, 藤田政宏, 野村陽人, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭, “可食アクチュエータ”, 第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1X1-01, 2016.
- [4] J. Shintake et.al, “Soft Pneumatic Gelatin Actuator for Edible Robotics”, IEEE Conf. on Robotics and Automation, 2017.
- [5] 小松洋音, 高根英里, 藤田政宏, 野村陽人, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭, “可食アクチュエータ - 第2報: バルーン式機体の基本的特性の計測および可食吸盤の具現化 -”, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, 1I3-1, 2017.
- [6] H. Hafezi et al. “An ingestible sensor for measuring medication adherence”. IEEE Trans. Biomed. Eng. 62, pp.99-109, 2015.
- [7] H. Tao et. al, “Silk-Based Conformal, Adhesive, Edible Food Sensors”. Advanced Materials Vol.24, No.8, pp.1067-1072, 2012.
- [8] W. Wang et. al. 2017. Transformative Appetite:

Shape-ChangingFood Transforms from 2D to 3D
by Water Interaction through Cooking, Proceedings
of the 2017 CHI Conference on Human Factors in
Computing Systems. ACM, 6123–6132.

- [9] T. Sunaga et. Al, “Development of a Dielectric equivalent gel for better impedance matching for human skin”, *Bioelectromagnetics*, 24, pp.214-217, 2003.
- [10] 細井ら, “気液相変化マイクロアクチュエータの試作”, 日本機械学会第 73 期通常総会講演会論文集(IV), pp.67-68, 1997.
- [11] 堂田ら, “低沸点流体で駆動される封筒型アクチュエータの試作”, フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp94-96, 2014.