

IPMCセンサ内蔵ソフトフィンガを用いた把持物体の大きさ推定

○竹林 龍之介（立命大） 松野 孝博（立命大） 杉野 卓司（産総研）
堀内 哲也（産総研） 物部 浩達（産総研） 平井 慎一（立命大）

1. 緒言

日本では毎日数百万食の市販弁当が生産されており、その盛り付けやパッキングは人の手によって行われている。食材は脆弱であり、また硬さや形状が不均一であるため、作業者は食材を破損せず取り扱いつつ、封入量に大きな差が出ないように配分を判断している。しかし、昨今の少子高齢化の影響により、今後日本では、労働者の確保が難しくなると予想されている。弁当は、消費期限の問題から生産拠点を海外に移すことができず、日本で消費される弁当は国内で生産する必要がある。労働者が不足する国内で現在の生産量を維持するために、パッキング作業などの自動化が求められている。

これらの自動化実現のために、食材のハンドリングにおいては食材を傷つけにくく、様々な形状の対象物を把持できるソフトロボットハンドが提案されている。平井らはバインディングハンドを用いたカップ入りの豆の把持に成功している [1]。また、王らは掬い込みバインディンググリッパ [2] や、プリントドグリッパ [3] で食品の把持に成功している。一方でパッキングを自動化する場合、食材の大きさは均一ではないため、その大きさをセンシングしつつ配分や組み合わせを判断する必要がある。ソフトグリッパのセンシングでは抵抗型曲げセンサ [4] や容量型ひずみセンサ [5] などが用いられている。しかし、抵抗型曲げセンサには直流電流を流し続ける必要があるという課題が、容量型ひずみセンサには感度や応答性に劣るという課題がある。そこで、著者らは高い感度と応答性を持つ IPMC (Ionic Polymer Metal Composite) センサに着目した [6]。

本研究では IPMC センサを内蔵したニューネット式のソフトフィンガを用いることで、フィンガの曲率を推定し、把持物体の大きさを推定する手法を提案する。

2. センサ内蔵ソフトフィンガおよびソフトグリッパの構成

2.1 IPMC センサ内蔵ソフトフィンガの構造

IPMC センサの構造を図 1(a) に示す。IPMC センサ [7][8] はイオン導電性高分子ゲルの両面に金メッキを施し作成する。センサを曲げ変形させると、イオン導電性高分子ゲル内に応力勾配が厚さ方向に形成される。それにより、陽イオンと水分子が水圧の低い伸長している金電極方向に移動し、陽イオン分布に偏りが生じ、曲げ変形により $\pm 0.1 \sim 1$ mV の電圧を発生する。

IPMC センサ内蔵ソフトフィンガの構造を図 1(b) に示す。ニューネット式のソフトフィンガに対し、IPMC センサを内蔵する。ソフトフィンガは 2つのシリコン部品から構成される。フィンガ上部パーツはチャンバを羅列した構造であり、また各チャンバを繋ぐ通路が設

けられている。成形における離型の工程のために、上部パーツのチャンバは一面が空いた状態で成形され、これを塞ぐために板状の底部パーツを接着する。この底部パーツを成型する際に IPMC センサを埋め込むことで、IPMC センサ内蔵ソフトフィンガを作成する。フィンガに空気圧を印加すると、チャンバ部分が膨張し、チャンバ同士の接触により、フィンガが曲がる。先行研究において、フィンガの曲げ変形およびソフトフィンガへの圧力印加により、IPMC センサの電圧が変動することを確認している [6]。

2.2 センサ内蔵フィンガを含むソフトグリッパの構成

ソフトグリッパ全体の構成を図 2 に示す。ソフトグリッパは複数本のソフトフィンガとそれらを設置するグリッパベースで構成される。複数本あるソフトフィンガのうち、少なくとも一本を IPMC センサ内蔵ソフトフィンガとする。なお、センサ電圧はアンプで増幅し、このアンプはグリッパベース内部に設置する。グリッパベースは導電材料で構成し、グランドに接続することでシールドとしての機能も持たせる。アンプの出力側の信号線は、AD 変換器に接続され、計測した電圧をもとに把持物体の大きさを推定する。グリッパの基本姿勢は図 2 に示すとおり、グリッパベースを上側、ソフトグリッパの指先を下側とし、指先でつまむように対象物を把持する。

3. IPMC センサを用いた把持物体の大きさ推定

3.1 フィンガ変形状計測のためのキャリブレーション法

把持物体の大きさ推定にあたり、まずはセンサ電圧からフィンガの変形状を導出する。本研究では、フィンガの変形状を円弧形状と仮定する。ソフトフィンガに内蔵した IPMC センサの電圧は、フィンガの曲率

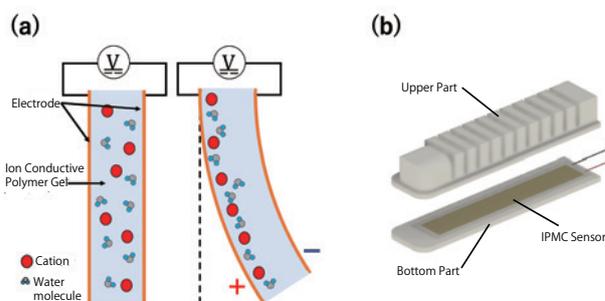


図 1 (a)IPMC sensor structure, (b)IPMC sensor built-in soft finger structure

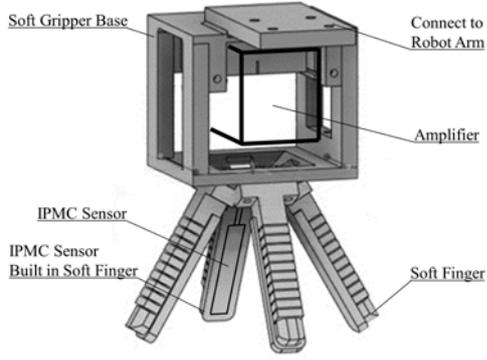


図2 Soft gripper with finger built-in IPMC sensor

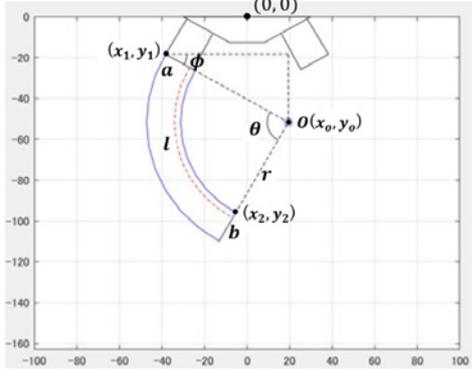


図3 Parameter to estimate finger tip position

のみならず、印加圧力によっても変化する [6]. そのためキャリブレーションでは、フィンガの曲率と印加圧力を独立して変化させ、校正用のデータを取得する. キャリブレーションでは、フィンガの曲率を 0~19.9 rad/m で固定し、0 kPa および 60 kPa の空気圧を印加した状態で、センサ電圧を計測する. センサ電圧の基準値は曲率 0 rad/m, 印加圧力 0kPa におけるセンサ電圧とし、アンプのオフセット機能を用いてこの状態の電圧を 0 V に調整する. 得られたデータについて、フィンガ曲率とセンサ電圧関係を空気圧ごとに 2 次式でフィッティングする. センサ電圧を V , フィンガの曲率を κ , フィッティングで得た係数を $k_{2,i}, k_{1,i}, k_{0,i}$ とし、フィッティング結果を次式で示す.

$$V = k_{2,i}\kappa^2 + k_{1,i}\kappa + k_{0,i} \quad (1)$$

ただし、係数の添字 i は印加した空気圧 (i [kPa]) を示す. また式 (1) を解くと κ は以下ようになる.

$$\kappa = \frac{-k_{1,i} + \sqrt{k_{1,i}^2 - 4k_{2,i}(k_{0,i} - V)}}{2k_{2,i}} \quad (2)$$

式 (2) を用いることにより、センサ電圧 V からフィンガ κ の曲率を推定できる.

3.2 グリッパ近似モデルと把持物体の大きさ推定

つづいて、IPMC センサ内蔵ソフトフィンガの曲率から、フィンガの先端部分の座標を求め、把持物体の大きさを推定する. 本研究では把持物体の形状を円筒状の物と仮定する. グリッパを図 2 のようにロボットア

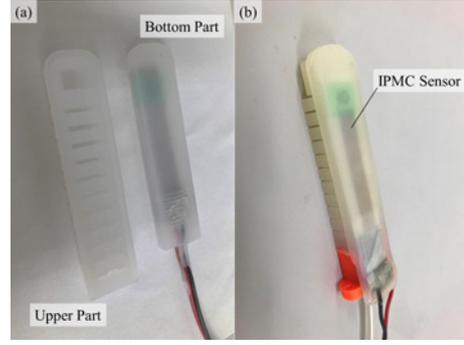


図4 (a)Molded upper part and bottom part, (b)Fabricated soft finger with built-in IPMC sensor

ムに固定したときの、IPMC センサ内蔵ソフトフィンガの 2 次元図を図 3 に示す.

図 3 の黒い実線の部分がフィンガの取り付け部で、青い実線部分が IPMC センサ内蔵ソフトフィンガ外周、赤い点線が中立軸である. また、フィンガの外側の円弧と接触しているフィンガの取り付け部を (x_1, y_1) , 曲げ変形したフィンガの円弧中心を $O(x_o, y_o)$, フィンガ内側の先端部分の座標を (x_2, y_2) とする. x 軸とフィンガの取り付け部分の角度を ϕ , 円弧の中心角を θ とする.

本手法では、フィンガの先端部分 (x_2, y_2) の座標を求める. まずグリッパベースの寸法から (x_1, y_1) と ϕ は既知である. そのため、センサ電圧から推定された曲率を κ とすると、曲率半径 r は

$$r = \frac{1}{\kappa} \quad (3)$$

となる. ただし、曲率推定で得られる曲率は、フィンガ外側の円弧である. フィンガの取り付け部座標 (x_1, y_1) と ϕ , 曲率半径 r から円弧中心 $O(x_o, y_o)$ を求める.

$$x_o = r \cos(\phi) + x_1 \quad (4)$$

$$y_o = -r \sin(\phi) + y_1 \quad (5)$$

フィンガ外側の円弧と中立軸の距離を a , 中立軸の長さを l とすと円弧の中心角 θ は

$$\theta = \frac{l}{(r - a)} \quad (6)$$

となる. また、グリッパの厚さを b とすると、先端部分座標 (x_2, y_2) は

$$x_2 = x_o - (r - b) \cos(\theta - \phi) \quad (7)$$

$$y_2 = y_o - (r - b) \sin(\theta - \phi) \quad (8)$$

となる. したがって、把持物体の直径 d は対称性より

$$d = 2|x_2| \quad (9)$$

となる. 以上の方法で把持物体の大きさを推定する.

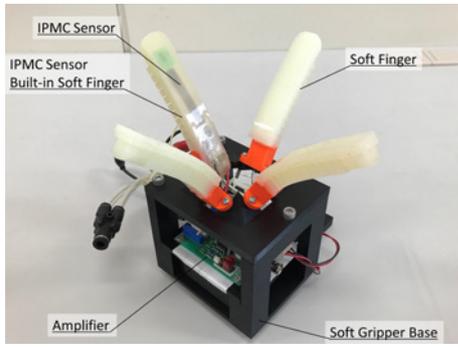


図 5 Fabricated soft gripper with a soft finger with built-in IPMC sensor

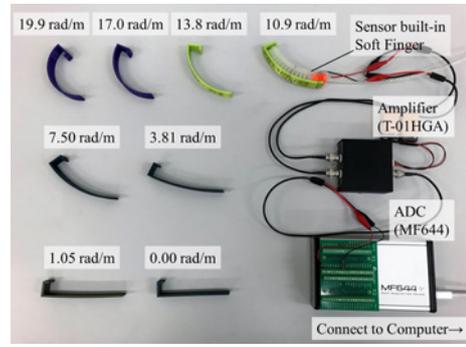


図 6 Curvature constraint frame and measurement set up used to calibrate sensor value

4. 検証実験

4.1 IPMC センサ内蔵ソフトフィンガとキャリブレーション

提案した IPMC センサを用いた把持物体の大きさ推定について検証する。構築した IPMC センサ内蔵ソフトフィンガを図 4 に示す。使用する IPMC センサは一对の電極とその間に配置するイオン導電性高分子層で構成される。電極には金メッキ電極、イオン導電性高分子層にはイオン導電性高分子ゲルを用いた。また、IPMC センサ構築後に湿度 70 % の環境で十分に乾燥させ、その後にはフッ素テープで封入している。センサの電極サイズは縦 65 mm × 横 8 mm である。図 4(a) に成型した上部パーツと、成型の際に上述の IPMC センサを埋め込んだ底部パーツの外観を示す。これらのペースをシリコン用接着剤で接着することで、図 4(b) に示すセンサ内蔵ソフトフィンガを作成した。

ソフトグリップ全体像を図 5 に示す。ソフトグリップは、1 本の IPMC センサ内蔵ソフトフィンガと 3 本のソフトフィンガで構成した。IPMC センサから得られた電圧をアンプ (T-01HGA, タートル工業, 日本) によって 1000 倍に増幅した。このアンプはグリップベース内部に設置した。アンプから出力された電圧は AD 変換機 (MH644, HumuSoft, チェコ共和国) によってデジタルデータに変換しパソコンへ送られる。最後に MATLAB/Simlink を用いて、前述のアルゴリズムを用いて把持物体の大きさを推定する。サンプリング時間は 0.1 ms であり、1000 回移動平均フィルタをセンサ電圧計測に適用した。構築したソフトグリップについて、センサ内蔵ソフトフィンガの取り付け部の座標 (x_1, y_1) と角度 ϕ 、フィンガ背面から中立軸までの距離 a 、フィンガの厚み b 、長さ l を表 1 に示す。

まず、センサ内蔵ソフトフィンガ単体で、センサのキャリブレーションをした。キャリブレーションに使用したフィンガの曲率を固定するフレームを図 6 に示す。曲率は 0 ~ 19.9 rad/m で 8 段階で固定した。また印加圧力 i は 0 kPa, 60 kPa の二通りとした。キャリブレーションの結果、図 7 に示すフィンガ曲率とセンサ電圧関係が得られた。図 7 では、青色と橙色の点を実測値をしめし、各色の破線が 2 次式のフィッティング結果を示す。なおフィッティングには、MATLAB の Curve Fitting Toolbox の fit 関数を使用し、係

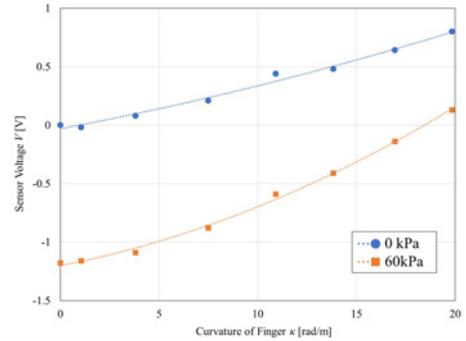


図 7 Calibration result of curvature v.s. sensor voltage v.s. applied pressure

数 $k_{2,0} = 0.00044V \cdot m^2$, $k_{1,0} = 0.03230V \cdot m$, $k_{0,0} = -0.01363V$ および $k_{2,60} = 0.001743V \cdot m^2$, $k_{1,60} = 0.03232V \cdot m$, $k_{0,60} = -1.41700V$ を得た。構築した IPMC センサ内蔵ソフトフィンガでは、フィンガ曲率の増加に合わせセンサ電圧が上昇した。また、印加圧力の増加に伴い、センサ電圧が下がる現象が確認された。

4.2 実験方法

本実験では直径が 50 mm, 75 mm, 100 mm の 3 つの PLA 樹脂製の円筒に対して直径の推定を行い、推定精度について調べる。グリップをロボットアームに取り付けた状態で、設置されている円筒を把持し、15 秒間リアルタイムで把持物体の直径を推定する。このとき印加する空気圧は、60 kPa とし、前述の $i = 60$ の係数を用いる。

4.3 実験結果と考察

実行結果を図 8 に示す。図 8(a-1,2) に直径 50 mm の把持物体における (a-1) 把持の様子と、(a-2) 推定したフィンガ変形状と把持物体の直径を示す。同様に図 8(b-1,2) に直径 75 mm, 図 8(c-1,2) に直径 100 mm の実験結果を示す。また、この時の推定直径の時間変化を

表 1 Dimensional parameters of soft gripper

x_1 [mm]	y_1 [mm]	ϕ [rad]	a [mm]	b [mm]	l [mm]
-38.2	-18.2	30	13	16	86

表2 Average value of experimental results

Diameter of object [mm]	50	75	100
Average estimated value [mm]	54.8	79.7	109.8
Standard deviation [mm]	1.22	1.30	3.73

図9に示す。グラフの横軸に時間、縦軸に推定直径を示す。なお推定実験は、75 mm, 50 mm, 100mmの順で実施した。得られた推定直径の15秒間平均と標準偏差を表2に示す。

推定結果の平均値に着目すると、本研究で提案した方法では、1割未満の誤差で把持物体の直径を推定できることを確認した。また、標準偏差から把持物体の直径が大きい程、誤差が大きくなることがわかった。これはフィンガ曲率を2次式でフィッティングしているため、ノイズによる推定値への影響がフィンガの曲率が小さくなるごとに上がるためだと考える。この誤差の原因として、2つの原因が考えられる。1つ目は、フィンガ曲率計測の精度である。図7に示すキャリブレーション結果では、実測値とフィッティングした関数が完全には一致していない。曲率計測にはフィッティングした2次式を用いており、曲率計測自体に誤差が乗っていた場合、大きさ推定に影響がある。2つ目の原因として、IPMCセンサ内蔵ソフトフィンガが一定の曲率で変形していない可能性があげられる。IPMCセンサ内蔵ソフトフィンガを一定の曲率で変形させ、曲率推定手法を作成した。しかし、物体をグリッパで把持するときは、重力や接触による力で一定曲率で変形しない。大きさ推定の精度をより上げるためには、今後この2つの誤差原因を改善する必要がある。

5. 結言

本論文では、IPMCセンサ内蔵ソフトフィンガを用いた把持物体の大きさ推定手法を提案した。まず、ニューネット式のソフトフィンガにIPMCセンサを内蔵する方法を考案し、つづいてセンサ電圧からフィンガの曲率を得るためのキャリブレーション方法を示した。把持物体の大きさ推定では、フィンガの曲率から指先の座標を求め、把持物体の大きさを推定する方法を導出した。最後に3種類の大きさの異なる円筒をに対して、大きさ推定を行うことで提案手法についての評価を行った。検証の結果、IPMCセンサ内蔵ソフトフィンガで1割未満の誤差で把持物体の直径を推定できることを確認した。今後は提案した大きさ推定の応用として、食材を均等に分配するシステムや、大きさに応じて収穫物を自動的に仕分けるロボットなどを開発する。

謝辞 本研究は産業技術総合研究所・立命館大学融合シーズ・スプラウト・プログラムの助成を受けた。

参考文献

- [1] H. Iwamasa & S. Hirai: "Binding of Food Materials with a tension-sensitive elastic thread", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, May 2015, pp. 4298-4303.
- [2] Zhongkui Wang, Haruki Furuta, Shinichi Hirai, and Sadao Kawamura: "Ascooping Binding Robotic Gripper for Handling Various Food Products", Frontiers in Robotics and AI, 10.3389/frobt.2021.640805, Feb., 2021

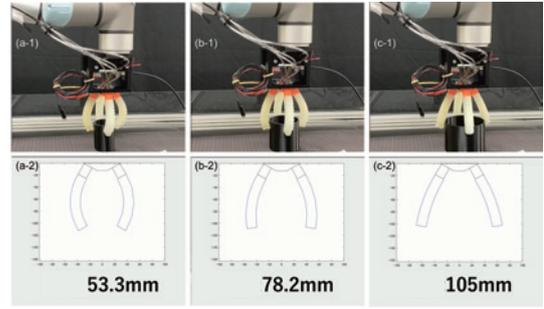


図8 Experimental results with (a-1,2) phi 50mm object, (b-1,2) phi 75mm object, (c-1,2) phi 100mm object.

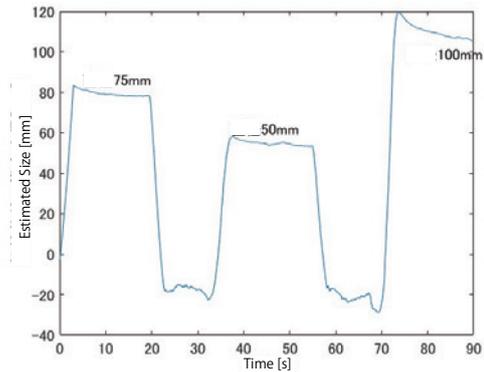


図9 Experimental result time v.s. estimated size of grasping object.

- [3] Zhongkui Wang and Shinichi Hirai: "A 3D Printed Soft Gripper and Its Application for Lunch Box Packing", 12th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2016), Osaka Ibaraki Campus (OIC), Ritsumeikan University, Japan, Nov. 11-14, 2016
- [4] Kim S, Kim S, Majditehran H, et al: "Electromechanical Characterization of 3D Printable Conductive Elastomer for Soft Robotics.", In: Proceedings. 2020 IEEE International Conference on Soft Robotics. IEEE, 2020, pp. 318-324.
- [5] Shintake J, Piskarev Y, Jeong S H, et al: "Ultra-stretchable Strain Sensors Using Carbon Black-Filled Elastomer Composites and Comparison of Capacitive Versus Resistive Sensors.", Advanced Materials Technologies. 2018; 3; 1700284.
- [6] 竹林 龍之介, 松野 孝博, 杉野 卓司, 堀内 哲也, 物部 浩達, 平井 慎一: "IPMCセンサを用いたソフトグリッパの曲率推定", 第23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 (SI2022), 千葉市美浜区・幕張メッセ 国際会議場, Dec. 14-16, 2022
- [7] Tetsuya Horiuchi, Toshifumi Mihashi, Takashi Fujikado, Tetsuro Oshika, Kinji Asaka: "Voltage-controlled accommodating IOL system using an ion polymer metal composite actuator", Optics Express, 2016, 24, pp.23280-23288.
- [8] Zicai Zhu, Tetsuya Horiuchi, Karl Kruusamäe Longfei Chang, Kinji Asaka: "Influence of Ambient Humidity on the Voltage Response of Ionic Polymer-Metal Composite Sensor", The Journal of Physical Chemistry B, 2016, 120, pp.3215-3225.