解説

センサ技術から見たソフトロボティクス

Sensor Technology for Soft Robotics

平井 慎一^{*1} 王 忠奎^{*1} ホ アン ヴァン^{*2} 松野 孝博^{*1}

^{*1}立命館大学ロボティクス学科 ^{*2}北陸先端科学技術大学院大学マテリアルサイエンス系

Shinichi Hirai^{*1}, Zhongkui Wang^{*1}, Ho Anh-Van^{*2} and Takahiro Matsuno^{*1}

^{*1}Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ. ^{*2}School of Materials Science, JAIST

1. 緒 言

ソフトロボティクスでは、柔軟かく変形しやすい材料や素材を用いてロボットを構成する。このようなソフトロボットにセンサを導入するときは、ボディの変形による影響やボディの変形への影響を考慮する必要がある。すなわち、ボディの変形にかかわらずセンサとして機能すること、ソフトロボットに生じる変形をセンサが妨げないことが要求される。また、力学量のセンシングやセンサ信号処理に、ソフトロボットのボディの変形を積極的に利用することが考えられる。すなわち、ボディの形状や構造、材料を工夫することにより、センシングや信号処理における計算が可能になると期待できる。

筆者らはソフトロボティクス、特にソフトグリッパーによる物体把持、柔軟指における触覚センシングに関する研究を進めている。本解説では、ソフトロボットのためのセンサに関する研究を紹介する。第2章では、ソフトグリッパーの柔軟指にフレキシブルセンサを埋め込み、指の変形を計測する試みを紹介する。既存のフレキシブルセンサをソフトロボットのボディに埋め込む手法と把持の成否を判定する手法を述べる。第3章では、しわ構造を用いた触覚センシングについて述べる。しわの有無を制御することにより、滑りに対する感度を適応的に変化させる、すなわち力学量のセンシングにボディの変形を用いる例を紹介する。第4章では、形状の異なる複数の導電パターンを用いて、薄板状物体の曲げ変形を検出する手法を紹介する。

2. ソフトグリッパーにおける曲げ変形センシング

ソフトグリッパーの変形状態を把握するために、フレキシブルセンサが用いられている[1]~[3]。筆者らは、プリンタブルソフトグリッパーにセンサを埋め込む手法を提案した[4]。グリッパーは複数の柔軟指から成る。柔軟指を構成する空気圧チャンバー部とカバーの間に、曲げセンサを埋め込む。三次元プリンタによる柔軟指の造形中に、センサを埋め込む。すなわち、空気圧チャンバー部を造形した後、造形を中断し、造形されたチャンバー部の上に曲げセン

図1 プリンタブルソフトグリッパー

サを載せる(図1(a))。造形を再開し、チャンバー部の上にカバーを造形する。以上のプロセスにより、フレキシブルセンサが埋め込まれた柔軟指(図1(b))を製作することができる。柔軟指の曲げ角度 α を、柔軟指の自然状態で根本と先端を結ぶ線と変形状態における線が成す角度で定める(図1(c))。さらに、曲げセンサを有する3本の柔軟指を 120° の間隔で配置して、ソフトグリッパーを構築した(図1(d))。

試作したソフトグリッパーを用いて把持実験を行った。把持対象物は小豆とピーナッツが入った紙コップである(図1(d))。ソフトグリッパーの3本の柔軟指に、20[kPa]、30[kPa]、40[kPa]の空気圧を順次印加し、対象物が把持できるか否かを調べる。以上の試行を3回行った。3本の柔軟指の曲げ角度を図2(a)に示す。空気圧20[kPa]、30[kPa]を印加した場合、把持が失敗した。一方、40[kPa]の空気圧をかけたとき、対象物を持ち上げることができた。失敗例における曲げ角度(図2(b))と成功例における曲げ角度(図2(c))を比較すると、把持が失敗すると曲げ角度に振動が発生したことが分かる。これは、柔軟指が紙コップの表面で滑ることに起因する。したがって、この振動を検知しフィードバックすることによって、把持制御を実現できると考える。一方、把持が成功した場合、対象物が持ち上がるにつれて、曲げ角度が減少する。すなわち、曲がった指が対象物の重力で伸びる。曲げ角度の減少量から対象物の質量を推定できると考える[4]。

原稿受付 2018年9月27日

キーワード: Soft Robotics, Sensors, Deformation, Wrinkle

^{*1}〒525-2577 草津市野路東 1-1-1

^{*2}〒923-1292 能美市旭台 1-1

^{*1}Kusatsu-shi, Shiga

^{*2}Nomi-shi, Ishikawa

図2 把持実験の結果

使っている曲げセンサの材質は柔軟指の素材より硬いので、製作した指の剛性が高くなる。また、このセンサは指全体の変形に反応しているため、複雑な曲がり方を計測することが困難である。近年、ソフトロボティクス分野の発展とともに、材質が柔らかくてフレキシブルなセンサや多点で計測可能なセンサが開発されている。これらのセンサを利用して、ソフトグリッパーにおけるセンシングの発展が期待できる。

3. しわ構造を用いた適応的触覚センシング

ソフトロボットの制御のためには、柔軟なボディの変形や環境との相互作用を計測する必要がある[5]。柔軟なボディに埋め込まれるセンサを固定することは困難であるため、柔軟なボディの動的な変形を前提に、センサ系を構成することが望ましい。また、センサの性能は柔軟なボディの形状や特性に影響されるので、柔軟なボディの形態を用いて適応的なセンシングを実現できる。筆者らは、このようなセンシングを、可変求心性ネットワーク (Variable Afferent Network) と名付け、柔軟なボディの変形や環境との相互作用が生じるとき、ボディ内部に埋め込まれたセンサの反応を調べている。図3に示すように、柔軟ボディ内部のセンサの位置や姿勢を動的に変化させることで、様々なセンサ特性を実現することを目指す。

可変求心性ネットワークの例として、しわ構造を用いた触覚センシングについて述べる。しわ構造は、自然界に数多く見受けられる。皮膚は、複数の層から構成されており、外側の層が硬い。しわは、皮膚の層の座屈や折りたたみにより生じる[6]。しわの効果として、湿潤物体の把持が挙げられる。手を水に浸すと、皮膚にしわが生じる。しわのある指は、しわのない指より、表面が濡れている物体を確実

図3 可変求心性ネットワーク (Variable Afferent Network) の概念

図4 しわ構造を用いた適応的触覚センシング

に把持できることが示されている[7]。すなわち、指に生じたしわは、物体把持や操作を容易にする。筆者らは、空気圧を用いて柔軟指の表面にしわを発生させ、柔軟指に埋め込んだセンサの感度を制御する手法を提案した[8]。本章では、柔軟な母材と薄いフィルムを用いてしわを発生させる手法を紹介する。図4に示すように、柔軟な母材に歪みゲージを埋め込む。その母材を伸長させ、曲がるが伸縮しないフィルムを張り合わせる。この状態では、フィルムは平らであり、歪みゲージはフィルムに平行である。このとき、歪みゲージは、法線方向の変形に対して高い感度を持つ。母材の伸長を緩めると、フィルムに曲げ変形が生じ、結果として歪みゲージが傾く。このとき、歪みゲージは、接線方向の変形に対して高い感度を持つ。すなわち、センサを有する柔軟指の形態を制御することにより、センサの特性を変化させることができる。図5(a)に示すように、母材の伸縮により歪みゲージの向きが変化し、結果としてその出力が変わる。また、図5(b)に示すように、しわがないときに比べて、しわがあるときは滑りに対して高い感度を示す。以上のようにしわ構造を導入することにより、柔軟なボディの変形や環境との相互作用を検出することが可能になる。ただし現状では、ボディの変形と相互作用を同時に検出することはできない。今後は、単一のセンサで、ボディの変形と相互作用を同時に検出することを目指す。

本章で紹介した、柔らかい材料の形態を用いるセンシングは、形態学的計算 (morphological computation) と総称されている[5]。三次元プリンタを用いて様々な形態を試作することが可能になっており、ソフトロボティクスにおける形態学的計算の今後の発展が期待できる。

図5 しわ構造を用いたセンシングにおける歪みゲージの反応

図6 対称／非対称導電パターンを塗布した薄板状弾性体

4. 非対称導電パターンを用いた変形センシング

フレキシブルな薄板状の素材（薄板状弾性体と称する）は、小型軽量で復元力の生成が可能なため、弾性を必要とする機械やロボットの部品として用いられる。薄板状弾性体に適切な拘束条件を加えることで、跳躍ロボットや吸盤の負圧調整機構として応用することが可能である。薄板状弾性体の変形形状を計測できると、拘束条件を制御したり作用する力を計測することが可能になる。しかし、ひずみゲージで薄板状弾性体の変形形状を計測する場合、多数のセンサを弾性体上に並べて設置する必要がある。さらに、計測のための配線やAD変換器が増加し、複雑なシステムになる。これらの問題を解決するために、非対称導電パターンを用いる手法を提案した[9]。提案した導電パターンの一例を図6に示す。薄板上弾性体に、形状の異なる複数の導電パターンを塗布する。図に示す例では、対称な導電パターンと非対称な導電パターンを用いている。非対称な導電パターンでは、右側における導電パターン密度が低く、左側の密度が高い。

非対称導電パターンで薄板状弾性体の変形形状が計測可能である理由を、図7に示す3種類の変形形状を用いて示す。薄板状弾性体の自然形状は平面とし、(a) 左側に変形が集中した場合、(b) 均等に変形した場合、(c) 右側に変形が集中した場合を考える。導電パターンを「左」、「中」、「右」の三つの領域に仮想的に分割する。三つの領域における抵抗値を計算し、それらを加え合わせることで、導電パターンの抵抗値を得ることができる。それぞれの変形における対称／非対称パターンの抵抗を求めた結果を、表1に概念的に示す。対称導電パターンでは、導電パターン密度が均一であるため、その抵抗値の上昇量は薄板状弾性体の変形量で定まる。変形(a)や(c)においては変形が集中した箇所

図7 変形形状と導電パターンの領域

表1 各変形形状における対称／非対称導電パターンの抵抗値

変形	パターン	左側抵抗値	中央抵抗値	右側抵抗値	合計
(a)	対称	Lv3	Lv2	Lv1	Lv6
	非対称	Lv3	Lv1	Lv0.25	Lv4.25
(b)	対称	Lv2	Lv2	Lv2	Lv6
	非対称	Lv2	Lv1	Lv0.5	Lv3.5
(c)	対称	Lv1	Lv2	Lv3	Lv6
	非対称	Lv1	Lv1	Lv0.75	Lv2.75

の抵抗値が大きくなり、変形(b)においては均等に抵抗値が上昇する。ただし、それぞれの導電パターンは1本の線で接続されているため、計測可能な抵抗値はこれらの合計値である。そのため対称導電パターンでは、各変形形状で同じ合計値を示し、変形形状を特定できない。一方で、非対称導電パターンでは、位置によりパターンの密度が異なる。非対称導電パターンの左側の領域においては、対称導電パターンに近い抵抗値変化を示す。反対に右側の領域では導電パターン密度が少ないため、抵抗値変化の影響が少ない。結果として、各領域の抵抗値の合計値は、変形形状により異なる。以上のように、非対称導電パターンを用いることにより、変形形状を推定することができる。

変形形状を推定するために、薄板状弾性体の変形モデルを構築した。次に、薄板状弾性体の変形と導電パターンにおける抵抗値の関係を定式化した。実際に計測した導電体の抵抗値を制約条件とし、薄板状弾性体のモデルを用いて変形形状を数値的に計算することで、薄板弾性体の変形形状を推定することができる。導電パターンを塗布した薄板状弾性体を試作し（図6）、変形形状の推定実験を行った。その結果、実際の変形形状と導電パターンの抵抗値から推定した変形形状の傾向が一致することを確認した[9]。また、本手法では、導電パターンの抵抗を計測するための配線は、薄板状弾性体の一端にまとめることが可能であり、配線が容易である。今後は、推定精度向上のために、導電パターンを最適化するとともに、導電材料を選定する予定である。

5. 結 言

本解説では、ソフトロボットのためのセンサ技術を紹介した。ソフトロボットに用いるセンサには、ソフトロボットに生じる変形を妨げないことが要求される。一方、ソフ

トロボットの变形を積極的に利用して、新しいセンシング原理を構築したり、センシング性能を向上させることが期待できる。柔らかい材料を用いることが可能な三次元ブリントの発展に伴い、分布的に材料特性を制御したり、しわ構造やポーラス構造などの複雑な形状を製作することが可能になっている。このような製造技術を用いることにより、また、柔らかい材料が有する様々な力学特性や電気特性、光学特性を利用することにより、新しいセンシング技術が生まれることが期待できる。

本解説の第1章と第5章は平井が、第2章は王が、第3章はホが、第4章は松野が執筆した。

謝 辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金17K14633, 18H01406, 立命館グローバル・イノベーション研究機構研究プロジェクト「先端材料に基づくロボティクス・イノベーション」から援助を得た。

参 考 文 献

- [1] Koivikko, E.S. Raei, M. Mosallaei, M. Mantysalo and V. Sariola: "Screen-printed curvature sensors for soft robots," IEEE Sensors Journal, vol.18, no.1, pp.223-230, 2018.
- [2] H. Zhao, K. O'Brien, S. Li and R.F. Shepherd: "Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides," Science Robotics, vol.1, eaai7529, 2016.
- [3] F. Visentin and P. Fiorini: "A flexible sensor for soft-bodied robots based on electrical impedance tomography," IEEE Int. Conf. on Soft Robotics, pp.158-163, 2018.
- [4] Z. Wang and S. Hirai: "A 3D printed soft gripper integrated with curvature sensor for studying soft grasping," IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration, pp.629-633, 2016.
- [5] J. Bernth, V.A. Ho and H. Liu: "Morphological Computation in Haptic Sensation and Interaction: From Nature to Robotics," Advanced Robotics, vol.32, no.7, pp.340-362, 2018.
- [6] J. Yin, G.J. Gerling and X. Chen: "Mechanical modeling of a wrinkled fingertip immersed in water," Acta Materialia, vol.6, pp.1487-1496, 2010.
- [7] K. Kareklas, D. Nettle and T.V. Smulders: "Water-induced finger wrinkles improve handling of wet objects," Biol. Lett., vol.9, 2013, [online] Available: <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2012.0999>.
- [8] V.A. Ho, H. Yamashita, Z. Wang, S. Hira and K. Shibuya: "Wrin'Tac: Tactile Sensing System with Wrinkle's Morphological Change," IEEE Tran. Industrial Informatics, vol.13, no.5, pp.2496-2506, 2017.
- [9] T. Matsuno and S. Hirai: "Deformation Estimation of a Plate Spring Using Asymmetric and Symmetric Conductive Patterns," IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration, pp.368-373, 2017.

平井慎一 (Shinichi Hirai)

1990年3月京都大学大学院工学研究科数理工学専攻博士課程単位取得退学。工学博士。2002年4月より立命館大学理工学部ロボティクス学科教授。ソフトロボティクスに関する研究に従事。日本機械学会、看護理工学会、IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)

ホ アン ヴァン (Ho Anh-Van)

2012年3月立命館大学理工学研究科博士学位取得。博士(工学)。2012~2013年日本学術振興会特別研究員PD。2013~2015年三菱電機(株)先端技術総合研究所研究員。2015~2017年龍谷大学理工学部助教。2017年4月より北陸先端科学技術大学院大学(JAIST)マテリアルサイエンス系准教授。ソフトロボティクスに関する研究に従事。IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)

王 忠奎 (Zhongkui Wang)

2011年3月立命館大学大学院理工学研究科総合理工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。2014年4月より立命館大学理工学部ロボティクス学科助教となり、現在に至る。ソフトロボティクスと生体医工学に関する研究に従事。日本生体医工学会、看護理工学会、IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)

松野孝博 (Takahiro Matsuno)

2017年3月立命館大学大学院理工学研究科機械システム専攻博士課程後期課程修了。博士(工学)。2017年4月より立命館大学グローバル・イノベーション研究機構専門研究員となり、現在に至る。ソフトロボティクスに関する研究に従事。日本機械学会、日本ばね学会、日本繊維機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)