解 説

導電性材料を用いたソフトな触覚センシング

Soft Tactile Sensing using Conductive Material

吉 元 俊 輔* *東京大学

Shunsuke Yoshimoto* *The University of Tokyo

1. は じ め に

人の身体機能には筋骨格による駆動系だけでなく、刺激や状態を検知する受容器による計測系が深くかかわっている。特に、力やトルク、圧力、接触面積、ひずみ、振動などの身体運動に伴う機械的刺激は触覚として知覚され、動作や操作の機能的な解釈や対象物の質的な評価をもたらしている。ロボットの身体機能においても機械的刺激の計測が重要であり、姿勢制御、把持力調整、身体コミュニケーションなど、目的に応じた様々な触覚センサが開発されてきた[1]~[3]。

触覚センサの基本機能は、身体と対象物の機械的作用やそれらの状態を電気信号に変換することであるが、機械的作用を電気インピーダンスや電流などの変化として検出する、機械電気特性を活用した方法が多くの触覚センサで採用されている。また、空間分布の計測や多様な物理量に回答するよう複数種類の検出要素を統合した手法にも注目が集まっている。一方、機械的作用や身体状態の検出にかかわる人の受容器は、筋骨格や皮膚など身体全体に分散し、様々な形状に適応し、何度も繰り返される変形にも耐えうる状態で、多様な物理量に対し高い感度で応答する。このような高い機能性と適応性を備えた触覚センサを実現するためには技術的課題が多く存在し、いまだ計測手法の模索が進められている。

身体と対象物の接触によって界面に生じる圧力分布は計測が難しい触覚情報の一つであるが、従来では感圧素子ごとに配線を設け、各検出素子の位置に応じた信号を取得する一対一配線方式や縦横の配線の交点に検出素子を配置し、逐次選択的に信号を取得するマトリクス配線方式が採用されてきた。近年では、材料科学の発展や解析技術の向上に伴い、感圧材料の外周囲に設けた複数の電極から得た電圧を利用し、逆問題を解くことで接触圧力分布を推定する外周配線方式を用いた方法が着目されている[4]~[8]。

電気インピーダンストモグラフィ（EIT）を利用した外周配線方式の圧力分布計測では、感圧材料に電気を流し、多点の電位を計測することでインピーダンスの分布を推定、

その変化から圧力分布を算出する[7]。EITによる手法は、感圧材料の周囲に設けた疎な電極の情報から連続的な圧力分布を推定することができ、柔軟かつ伸縮可能な素材を用いて触覚センサを構成することも可能である。また、感圧材料の電気特性に異方性を与えることでせん断ひずみ分布をも計測する手法なども開発されている[9]。ところが感圧材料が必要であることから形状や機能設計の自由度が低く製造が難しいという実装上の課題が残る。

これらの状況を踏まえ、筆者は導電体間の電気接触抵抗が接触圧力によって変化すること、電位分布をモデル化することで検出領域に対して疎な計測点から分布を推定するトモグラフィ技術の性能が向上したことに着目し、電位分布から接触圧力を推定する計測回路、再構成アルゴリズムを新たに考案することで、感圧性材料が不要で機能や形状の設計の自由度が高い、つまりソフトな触覚センシング技術を開発した[10]。本稿ではその計測手法と、実装例について解説する。

2. 計 測 手 法

二つの導電体が接触する際、その境界には電気接触抵抗が存在し、接触圧力に応じて変化する[11]。また、両導電体間に電圧を印加することで、接触圧力の分布に応じて導電体上の電圧の分布が変化する。提案手法では、図1に示すように、接触圧力の分布に応じた電位分布が導電体に生じるような二層構造の検出部を設計し、検出部の外周に配置された複数の電極を用いて取得した電圧から逆解析により接触圧力分布を推定するアルゴリズムを構築する。以下では接触圧力の検出機構、計測回路の構成、再構成アルゴリズム、圧力推定の手法について説明する。

図1 提案手法の概要

原稿受付 2019年2月20日

キーワード: Contact Pressure Distribution, Tactile Sensor, Electrical Contact Resistance, Conductor, Tomography

*〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

図2 (a) 接触圧力の検出機構と等価回路, (b) 接触圧力と電気接触抵抗の関係

2.1 接触圧力の検出機構

図2(a)に示すように、検出部は駆動層と検出層の二つの導電体により構成され、直流電源を駆動層に、接地電極を含む複数の電極を検出層の外周に接続し、両層が接触すると通電するような構造を設計する。また、接触圧力が加わっていない状態で出力がゼロとなるよう、両層間に粒子や繊維状の絶縁体を配置し、初期状態で一定の間隙を設ける。検出部の等価回路を考え、直流印加電圧を E 、導電体の抵抗を R_0 、接触抵抗を R とすると、接触領域における電圧 ϕ_c は、

$$\phi_c = E \frac{R_0}{R_0 + R} \quad (1)$$

と表すことができる。

二つの導体間の電気接触抵抗は接触圧力の増加に伴い減少する。なお、厳密には容量成分も変化するが、特性の調整が容易であることから抵抗成分のみに着目している。この接触圧力と電気接触抵抗の関係は、二つの物体間の接触面積が圧力に応じて変化することに起因するため、物体の形状や材料特性によって異なる関係性を示すが、経験的には次式で表される。

$$R = \alpha P^\gamma \quad (2)$$

ただし、 R は電気接触抵抗、 P は接触圧力、 α と γ (< 0) は導電体の形状や材料特性によって決まる定数である。図2(b)に示すように、接触圧力と電気接触抵抗の計測値は式(2)で表される冪関数におおむね当てはまることが確認できる。

2.2 計測回路

計測回路は従来の EIT で用いる計測回路 [12] に類似しているが、能動計測に用いる電源の接続方法が異なる。提案する計測回路では直流電源を駆動層に接続し、検出層に複数の参照電極を配置する。また、接触圧力による電気接触抵抗の変化は大きく、適切に導電体の抵抗値を設計することで感度調整可能であるため、信号の増幅を行う必要がない点が提案手法の利点である。図3に示すように、計測回路は二つのマルチプレクサと一つのマイクロコントローラにより構成される。検出部の駆動層と検出層が接触すると、両者の間に電流が流れ、電位分布が生じる。参照電極のうち一つを接地電極とし、マルチプレクサを用いて様々

図3 16 電極を用いた計測回路の構成

な電圧の印加条件に対する計測値を得ることで推定の精度を高める。また、実装性の観点から、電位を計測する参照電極についてもマルチプレクサを用いて選択し、時分割で各電極の電位を取得する。最終的に、すべての接地条件に対してすべての電極の電位情報を取得し、後述する再構成アルゴリズムにより電位境界条件の推定を行う。

2.3 再構成アルゴリズム

提案手法における再構成アルゴリズムでは、様々な接地条件に対する各電極の電位から、電位境界条件を求める。逆問題を定義するために、電位境界条件に応じた各電極の電位を求める順問題について考える。まず、マクスウェルの方程式から導かれる電気量保存則および電流密度と電界の関係から、定常状態における導電体 Ω の電位分布 u は、次式表されるラプラス方程式に従う。

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla u) = 0 \quad \text{on } \Omega \quad (3)$$

ただし、 σ は物体の導電率である。次に、境界条件として接触領域 Ω_c と接地領域 Ω_g の電位を次式で与える。

$$u = \phi_c \quad \text{on } \Omega_c, \quad u = 0 \quad \text{on } \Omega_g \quad (4)$$

以上の方程式を検出部の構造に適用し、各電極領域 Ω_e における電位 u を求める計算が順問題となる。本研究では、順問題の解を得るために有限要素法 (FEM) を用いる。検出部は導電性塗料や布などの薄膜で構成されることを想定し、検出層を表現するモデルには三次元のシェル要素で表現されたメッシュを使用する。結果として、順問題の解は既知の境界電位ベクトル ϕ と未知の全接地条件における全電極の電位を並べたベクトル $\mathbf{V}$ の関係 $\mathbf{V} = \mathbf{J}\phi$ として表される。ただし、 $\mathbf{J}$ はヤコビ行列である。

従来の EIT と異なり、提案手法ではヤコビ行列が入力電位、つまり電位境界条件に対する微分で表現される。ヤコビ行列は FEM メッシュの K 個の要素に対する電位境界条件を摂動として与え、数値計算により求める。各要素のヤコビ行列の成分は次式で表すことができる。

$$J_{i,k} \approx \frac{\partial V_i}{\partial \phi_k}; \quad i = 1 \dots ML; \quad k = 1 \dots K \quad (5)$$

ただし、 M は電極の数、 L は接地条件の数を表す。

一方、計測においては逆問題を解く必要があるが、単純な方法として Tikhonov 正則化による差分イメージング [13] を用いることで、次式により近似解を得ることができる。

$$\delta\tilde{\phi} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda^2 \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{J}^T \delta \mathbf{V} \quad (6)$$

ただし、 $\delta \mathbf{V}$ は全接地条件における全電極の電位を並べたベクトルであり、 $\delta\tilde{\phi}$ は推定により求まる境界条件を表す電位ベクトル、 $\mathbf{Q} = \mathbf{I}$ は単位行列、 λ はハイパーパラメータである。また、リアルタイム推定するため、計測の開始前に逆行列 $(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda^2 \mathbf{Q})^{-1}$ を計算しておく必要がある。

2.4 圧力推定

電位境界条件から圧力分布を計算するために、電位から圧力への変換式を定義する。式 (6) で得られた電位境界条件は接触領域外でも値を持つため、圧力分布が求まる範囲を制限する目的で閾値処理を行う必要がある。適切な閾値はセンサ構造によって異なるが、本研究では最大値の 50% を閾値として設定し、一定の閾値以下の値をゼロとして扱う。閾値処理を施した要素 k における電位 $\delta\tilde{\phi}_k^{\text{th}} (> 0)$ に対し、式 (1) および式 (2) から導かれる次式を用いることで圧力 P_k を求めることができる。

$$P_k = \left(\frac{a_1}{\delta\tilde{\phi}_k^{\text{th}}} + a_2 \right)^{a_3} \quad (7)$$

ただし、 a_1, a_2, a_3 は検出部の形状や電気機械特性に依存した定数であり、力覚センサ等を併用して入出力関係を調べ、非線形回帰に基づいて決定する必要がある。

3. 提案手法の実装と特性

本章ではまず、提案する圧力分布の計測手法の実装例を示し、次に開発したセンサの性能評価について述べ、最後に提案手法の特徴と今後の展望について述べる。

3.1 実装例

検出部は、金属、繊維、ゴム、塗料など、様々な導電性材料で構成することができる。中でも多様な検出部の形状を実現するうえで、導電性塗料を用いた検出層と導電性繊維を用いた駆動層の実装が有効であると考えられる。また、検出の範囲や感度は両層の抵抗の比率で調整が可能であるが、電圧降下が主に検出層で生じるように、駆動層は検出層よりも低い抵抗を有した設計とすることが望ましい。実装例として、本研究では表面抵抗が $20 [\Omega]$ の導電性塗料 (PTP-EG1210OG, Plascoat) および表面抵抗が $0.05 [\Omega]$ 以下の導電性繊維 (MK-KTN260, Tanimura Corp.) を用いて検出部を構成した。導電性塗料を塗布した検出層の周囲には導電性エポキシ樹脂 (CW2400, Circuit Works) を用いて銅製の電極を 16 個接着した。

計測回路はマイクロコントローラ (ESP-WROOM-32, Espressif Systems) と二つのマルチプレクサ (ADG726, Analog Devices), 3.3 [V] リチウムバッテリーから成る。マルチプレクサはマイクロコントローラから出力されるデジタル信号により、接地電極と計測電極の位置を選択できるよう設計されており、一つの再構成圧力分布情報を取得するために、256 (16 電極 $\times$ 16 接地条件) のデータを取得するよう設定した。電位分布の FEM 解析においては、約 6,000 の三角形要素と約 3,000 のノードで構成される検出

図4 シート型 (上) と指型 (下) の検出部の実装と動作の様子

図5 触覚センサの性能を調べるための実験装置

部のメッシュモデルを作成し、電極部の要素にはラベルを付与した。また、式 (6) におけるハイパーパラメータ λ については、L カープ [14] と位置誤差を考慮して $\lambda^2 = 1,000$ とした。図4に柔軟なシート型の触覚センサと3D プリントした指模型に適用した触覚センサの実装と動作の様子を示す。同図より、おおむね負荷の位置に応じた圧力分布が得られることが確認できる。

3.2 計測性能

提案手法を評価するため、図5に示す実験装置を用いて接触位置と接触圧力の計測精度を調べた。本実験装置では水平二軸の手動ステージと垂直一軸の直動アクチュエータ (DRLM42G-04A2P-K, Oriental Motor) による接触子の移動が可能のほか、接触子の上部に取り付けた力覚センサ (USL06-H5-50N-A, Tec Gihan) により提案システムの出力と同時に接触力の計測が可能である。接触位置の評価においては、装置に設置した検出層に対し、 5×5 箇所の等間隔の接触位置に半球状のステンレス鋼 (SUS304) を用いてセンサ面垂直方向に $10 [\text{N}]$ の一定の負荷を与え、圧力分布の重心位置と接触位置の差を評価に利用した。接触圧力の評価においては、直径 $6 [\text{mm}]$ の導電性ゴムを接触子先端に備え、直動アクチュエータにより $0.005 [\text{mm/s}]$ の一定速度で押し付けを行い、接触力と接触位置における提案システムの出力値 (電位) の特性を取得した。なお、実験では

図6 検出部 L の (a) 接触位置の真値と推定値, (b) 接触圧力と出力電圧の関係

検出部の大きさに対する性能の違いを比較するために、一辺が 30, 60, 100 [mm] の正方形の検出部 (S, M, L) を用意し、それぞれに対して接触位置と接触圧力の計測性能を評価した。

図6に検出部 L について、接触位置の真値と推定値、接触圧力と出力電圧の関係を示す。接触位置の精度に関しては、接触位置近傍に推定位置を得ることができ、一辺が 100 [mm] の検出部に対しては誤差 5.44 ± 3.00 [mm] であった。同検出部における接触圧力に関しては、特性がモデル式におおむね当てはまり、最大接触圧力 0.50 [N/mm²] に対して、 0.0509 [N/mm²] の誤差であった。三つの検出部 (S, M, L) を比較すると位置・圧力ともに一辺の長さが短いほど精度が高く、接触位置を検出層の1辺の長さに対して平均 5.68%, 接触圧力を最大 0.50 [N/mm²] に対して 5.38~10.2%の精度で推定できることが明らかとなった。この結果は、従来の EIT を用いた計測手法 [6] [8] [9] などと比較しても高精度であり、指腹部程度の領域に限定すれば、人の触覚機能における空間サンプリングや接触圧力感度を超える計測機能を実現できる可能性が示唆される。

3.3 提案手法の特徴と今後の展望

本研究で提案した計測手法は、これまでの物体内部の導電率分布を可視化する EIT を用いた手法とは異なり、感圧材料が不要であり、一般的な導電性材料で検出部を構成することができるため設計の自由度が高い。実装例で示したように、導電性塗料の塗布と電極の貼り付けにより、柔軟で薄型の検出部の作製や 3D プリントした物体へのセンシング機能付与も容易であることに加え、ミクロからマクロまでの対象を同一の計測回路で扱うことができる。さらに、電圧増幅が不要なため高感度かつ高精度な計測が可能であるほか、接触時のみに電流が流れるため、従来の EIT を用いた手法よりも消費電力が少ないという利点もある。

本論文では基礎開発の内容について解説したが、今後は下記のような改善を通して計測の極限に迫るとともに、ロボットの触覚センシングを起点として産業・医療・スポーツ・エンタテインメントなどへの社会展開を目指す。

- 材料の電気特性調整による接触圧力-抵抗特性の最適化
- 接触-抵抗の変換機構の設計による計測自由度の拡張
- 最新の逆解析アルゴリズム導入による分布推定性能向上
- 回路印刷などによる検出部の製造技術の確立

4. おわりに

ロボットによる人の身体機能の代替の重要性が増す一方で、触覚センサには実装上の課題が多く残っていることから、電気接触抵抗と逆解析技術を利用したソフトな接触圧力分布の計測手法を提案した。提案手法は、電気を通す材料に電極を取り付けるだけで接触圧力分布を計測可能にする技術であり、触覚センサの自在な形状と機能の設計への貢献が期待できる。カメラと知的情報処理技術の向上によりロボットの視認機能が大きく発展しつつあるように、高機能かつ多様な触覚センサの搭載が進めば、ロボットの身体機能も飛躍的に高まることであろう。

参考文献

- [1] R.D. Howe: "Tactile sensing and control of robotic manipulation," *Adv. Robot.*, vol.8, no.3, pp.245-261, 1993.
- [2] R. Dahiya, G. Metta, M. Valle and G. Sandini: "Tactile sensing-from humans to humanoids," *IEEE Trans. Robot.*, vol.26, no.1, pp.1-20, 2010.
- [3] Z. Kappassov, J.A. Corrales and V. Perdereau: "Tactile sensing in dexterous robot hands," *Robot. Auton. Syst.*, vol.74, pp.195-220, 2015.
- [4] Y. Kato, T. Mukai, T. Hayakawa and T. Shibata: "Tactile sensor without wire and sensing element in the tactile region based on eit method," *Proc. IEEE Sens.*, pp.792-795, 2007.
- [5] A. Yao, C.L. Yang, J.K. Seo and M. Soleimani: "Eit-based fabric pressure sensing," *Comput. Math. Methods Med.*, vol.2013, pp.1-9, 2013.
- [6] S. Russo, S. Nefti-Meziani, N. Carbonaro and A. Tognetti: "A quantitative evaluation of drive pattern selection for optimizing eit-based stretchable sensors," *Sensors*, vol.17, no.9, p.1999, 2017.
- [7] D. Silvera-Tawil, D. Rye, M. Soleimani and M. Velonaki: "Electrical impedance tomography for artificial sensitive robotic skin: A review," *IEEE Sens. J.*, vol.15, no.4, pp.2001-2016, 2015.
- [8] Y. Zhang, G. Laput and C. Harrison: "Electricick: Low-cost touch sensing using electric field tomography," *Proc. SIGCHI Conf. Hum. Factor Comput. Syst.*, pp.1-14, 2017.
- [9] H. Lee, D. Kwon, H. Cho, I. Park and J. Kim: "Soft nanocomposite based multi-point, multi-directional strain mapping sensor using anisotropic electrical impedance tomography," *Sci. Rep.*, vol.7, no.39837, pp.1-10, 2017.
- [10] S. Yoshimoto, Y. Kuroda and O. Oshiro: "Tomographic Approach for Universal Tactile Imaging with Electromechanically Coupled Conductors," *IEEE Ind. Elect.*, 2018 (in print).
- [11] Z. Del Prete, L. Monteleone and R. Steindler: "A novel pressure array sensor based on contact resistance variation: Metrological properties," *Rev. Sci. Instrum.*, vol.72, no.2, pp.1548-1553, 2001.
- [12] M. Cheney, D. Isaacson and J.C. Newell: "Electrical impedance tomography," *SIAM review*, vol.41, no.1, pp.85-101, 1999.
- [13] A. Adler and R. Guardo: "Electrical impedance tomography: regularized imaging and contrast detection," *IEEE Trans. Med. Img.*, vol.15, no.2, pp.170-179, 1996.
- [14] B. Graham and A. Adler: "Objective selection of hyperparameter for eit," *Physiol. Meas.*, vol.27, no.5, p.S65, 2006.

吉元俊輔 (Shunsuke Yoshimoto)

2012 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。同年同研究科助教、2019 年東京大学大学院工学系研究科講師、現在に至る。触覚工学、生体計測に関する研究に従事。IEEE、日本生体医工学会、日本バーチャリアリティ学会、電子情報通信学会等に所属。