

PhotoelasticHair: 皮膚を通したセンシングが可能な埋め込み式毛状センサ

原田 雅文* 遠藤 暁友† 深代 悠太† 佐藤 俊樹*

概要.

我々（生物）における「毛」は、微細な力を皮膚に伝達し敏感に検知できる触覚センサである。本研究では、毛の生えた皮膚の構造に着目し、毛に対する微細な接触を皮膚の感圧センシング技術によって検知する新しい接触検出技術の提案を行う。本提案では、光弾性によって皮膚に加わる力を可視化する手法により、マーカーレスかつシンプルなハードウェアから、毛に加わる力の大きさと方向を検知可能な触覚センサを開発した。これにより、皮膚と毛を撫でるような接触検知機能を単一の接触検出装置によって実現することが可能になると考える。

1 はじめに

我々（生物）の皮膚に生えている「毛」は、微細な力を感じ取ることが可能な触覚センサである。生物の毛に着目した敏感な触覚センサはMEMS（微小電子機械システム）の分野において多く開発されているが [1][2][3]、人間が触れる設計にはなっていないものがほとんどである。一方で、人間が触れることを前提とした、毛の形に着目した触覚センサもいくつか開発されており [4][5][8]、これらは皮膚より上部に接触検知機能を搭載している。しかし、現実の毛は加わった力を皮膚中に存在する触覚受容体へ伝達することで感じ取る仕組みとなっており、毛は皮膚の触覚センサを拡張する役割を担っていると考えることができる。

本研究ではこのような、生物が皮膚を通して毛に対する接触を感じ取るメカニズムに着目し、皮膚を模した柔らかい感圧タッチセンサを通して毛に加わる力をセンシングする技術に着目した。これにより、皮膚と毛の接触機能を分別せず、単一の接触検出装置によって実装することが可能になる。将来的に、例えば等身大の人型タッチスクリーンに搭載する場合、皮膚と毛の触覚センサを単一のセンシング技術により搭載できる利点が考えられる。なお従来研究としては、例えば嵯峨らが提案する皮膚と毛のメカニズムに着目した毛状触覚センサがあり、毛状突起物に加わった力をマーカーの反射像の歪みによって可視化する手法が提案されている [6]。一方、本研究では将来的な頭部等の非平面サーフェイス上への配置を考え、特にシンプルなハードウェア構成かつマーカーレスでの検出が望ましいと考えた。そこで、毛に加わる力を光弾性の可視化により検出する新し

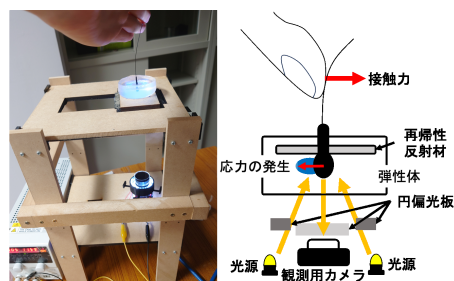


図 1. 試作機の外観（左）とその概略（右）

い皮膚上の毛のセンシング技術を開発した。

2 原理と実装

提案する検出手法の原理は、(1) 毛型の構造体に加わった力を皮膚型の弾性体に伝達させる「接触力伝達機構」と、(2) その皮膚（弾性体）中にある毛根が周囲の弾性体に加える力を下部から非接触で検出する「応力検出機構」の2つから成る。

接触力伝達機構は毛を模した構造体を皮膚を模した弾性体中に埋め込んだ構造をしている。弾性体上で直立した構造体の先端に力を加え、しなせると、弾性体表面を支点として構造体の根本に応力が発生する（図 1（右））。提案手法にて、毛を模した構造体はしなりに対して耐久性が高い PLA フィラメント（eSUM 製スーパータフ）を使用し、FDM 式 3D プリンタで出力する。構造体は、毛のように細くしなる「接触部」、支点となる「伝達部」、伝達した力により弾性体を押し応力を発生させる「毛根部」から構成される（図 2）。接触部の毛の長さは後述する実験 1 において、異なる高さで力を加えた時に違いが発生するか確認するために 75mm とした。また、毛を埋没させる皮膚は後述する光弾性を用いた検出を行うため透明弾性体とする。この透明弾性体は市販の食用ゼリーの素（富士商事パール

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

* 北陸先端科学技術大学院大学

† 電気通信大学

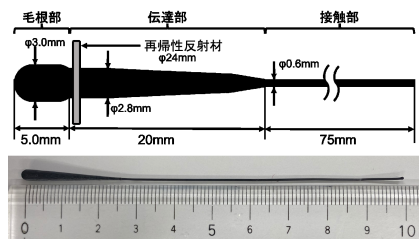


図 2. 毛の構造

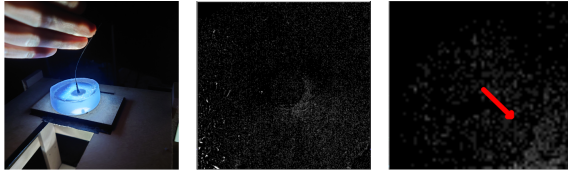


図 3. 触れている様子 (左) 差分画像 (中) 応力の方向 (赤矢印) (右)

アガー 8) を 25% の濃度で水と混合する。

応力検出機構は、接触力伝達機構により、構造体の根本が皮膚を模した弾性体を押す応力を弾性体下部から観測する機構である。提案手法では、応力を偏光と光弾性の性質によって観測する [7]。本提案では、[7] よりも偏光の量を増加させ観測しやすくするために、光源はカメラの周囲に円状に配置し、反射材として再帰性反射材を利用することで、光軸をカメラと一致する構造に改良した。再帰性反射材は直径 24mm (応力の発生が想定される範囲の最大値) の円盤状で、毛根部と伝達部の境界部分に埋め込んだ。これは、伝達部周囲に発生する応力は毛根部周囲と逆方向に発生し、ノイズとなるため、毛根部のみの反射を取り出すためである。

応力の可視化の原理は [7] と同様、応力が加わる部分のみ偏光が透過される現象をモノクロ画像処理用カメラ (FLIR Flea3, 1280x1024(8bpp)) を用いて観測し、画像処理ソフトウェアによって、応力発生時の画像から応力が発生していない時の画像 (背景画像) との差分画像を出力する。毛に加わる力が大きいほど差分画像の全体的な輝度値は大きくなる (図 3 (中))。また、応力は力を加えた方向とは逆方向に発生するため、差分画像の輝度の重心から加わった力の方向の推定 (図 3 (右)) が可能である。以上から本提案では 1 本の毛から力の強さと方向の推定を可能とする。

3 実験

開発したセンサの性能評価として、毛に加わる力の大きさと応力観測で算出される輝度値の関係を検証する実験 1、および毛に加わる力の方向と応力観測で算出される方向の誤差を検証する実験 2 を行った。実験 1 の方法としては、フォースゲージ (イマ



図 4. フォースゲージとスリット (左) 実験 1 の様子 (中) 実験 2 の様子 (右)

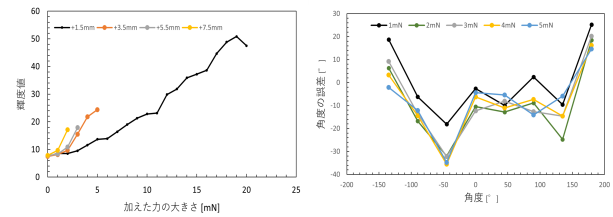


図 5. 実験 1 の結果 (左) 実験 2 の結果 (右)

ダ ZTA-5N) を治具上のスリットに沿って横方向に滑らせ (図 4 (左))、徐々に毛を押し、その時のフォースゲージの値と輝度値を記録する (図 4 (中))。そして、毛を押しすぎると毛が横になってフォースゲージから外れてしまうため、この時まで記録を行う。フォースゲージで押す点の高度は、毛の毛根部と伝達部の境界から上 15mm・35mm・55mm・75mm の 4 点とした。この実験の結果 (図 5 (左))、加える力の大きさと輝度値の大きさは相関関係 (相関係数 0.964) にあることがわかった。一方、実験 2 は毛の伝達部から 35mm の部分に対し $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ の範囲で 45° 刻みで異なる方向の力を 1mN~5mN まで、1mN 単位でフォースゲージで加えていき、差分画像から計算した角度との差を算出した (図 4 (右))。結果は (図 5 (右))、マイナス方向には最大 -35.54° まで誤差が出ており、プラス方向には最大 25.21° まで誤差が出ていることから大きな誤差が発生していることがわかった。

4 考察と展望

本研究では 1 本の毛の検知性能について評価した。2 本以上の毛を生やす場合、お互いの毛根の応力が干渉しあう問題があるが、現在の弾性体や毛の条件下では 15mm 程度離すことで複数本の毛を設置可能である。センサ機能を持たない形だけの毛を隙間に取り付けることで生物のような高密度な毛に見せることは可能だが、場所によって検知性能に偏りが生じてしまう。よって今後は高密度に毛を複数生やすことで毛らしい外見・触覚のセンサの開発を目指す。それに伴い、弾性体の硬度の上昇や毛をより細くすることを目指す。これにより、応力の発生範囲が小さくなり毛の密度を上げることができると、システムのスケールダウンも期待できると考える。

参考文献

- [1] A. A. L. B, Z. A, Y. O, and K. J. A magnetic nanocomposite for biomimetic flow sensing. In *Lab on a Chip*, pp. 4362–4369, 2014.
- [2] Y. Bian, Y. Zhang, and X. Xia. Design and Fabrication of a Multi-electrode Metal-core Piezoelectric Fiber and Its Application as an Airflow Sensor. *Journal of Bionic Engineering*, 13(3):416–425, 2016.
- [3] S. Huang, B. Zhang, Y. Lin, C.-S. Lee, and X. Zhang. Compact Biomimetic Hair Sensors Based on Single Silicon Nanowires for Ultrafast and Highly-Sensitive Airflow Detection. *Nano Letters*, 21(11):4684–4691, 2021. PMID: 34053221.
- [4] K. Nakajima, Y. Itoh, T. Tsukitani, K. Fujita, K. Takashima, Y. Kitamura, and F. Kishino. FuSA Touch Display: A Furry and Scalable Multi-Touch Display. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '11, p. 35–44, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [5] T. Nojima, Y. Ooide, and H. Kawaguchi. Hairly-top interface: An interactive surface display comprised of hair-like soft actuators. In *2013 World Haptics Conference (WHC)*, pp. 431–435, 2013.
- [6] S. Saga, S. Kuroki, N. Kawakami, and S. Tachi. Fibratus Tactile Sensor Using Reflection on an Optical Lever. In *ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '07, p. 3-es, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery.
- [7] 遠藤 暁友, 原田 雅文, 錦織 さくら, 佐藤 俊樹. 微弱な接触を検知可能な毛状タッチセンサ. 日本ソフトウェア科学会研究会資料シリーズ (Web), 98, 2022.
- [8] 鎌田 航誠, 高橋 治輝, 塚田 浩二. 導電性樹脂・磁鉄樹脂を用いた毛構造の3Dプリントと応用. インタラクション2023 論文集 © 情報処理学会 2023, pp. 681–685, 2023.