

手指センシングのウェアラブルデバイスの開発

小山信之^{†1} 大原広暉^{†1} 浅井保至^{†1} 太田智浩^{†1}

概要: 仮想環境上で物体を操作するためには、身体的所有感を損なわず、手指の動きをセンシングできるインターフェースが必要である。カメラなどの既存の方法では構造物や身体の影響を受ける位置ではセンシングできないため、我々は、e-テキスタイルを用いたグローブ型ウェアラブルデバイスを提案した。まず、センシングに適した歪ゲージの素材を検討し、選定したe-テキスタイル（機能性繊維）で、指先から手の甲までの長さの変化（10~16%）による抵抗値変化（約10Ω）を手指の曲げ量0~1（分解能1Byte）でセンシングできることを確認した。本予稿では開発したデバイス、検証内容、評価結果を示す。

1. ウェアラブルデバイス

2030年度の国内デジタルトランスフォーメーション（DX）市場規模は6兆5,000億円になると予想されており、市場が急速に拡大している。その中で顧客接点の拡大やインクルーシブを実現するためにメタバースや遠隔操作が注目されており、メタバース上での商品体感や、遠隔操作による場所に依存しない多種多様な人による共同作業の実現が期待されている[1]。我々は実世界でインタラクションが最も必要な手に焦点を当てる。

現在、DXで使用するヘッドマウントディスプレイは数多くの製品が販売されている。一般的に使用されるコントローラでは手指の動きをセンシングできず、カメラを用いた物もあるが、装着者の体の正面以外でのセンシングが不可能である。一方、モーションキャプチャでは指先にマーカーやセンサを実装するが、固体が皮膚に当たり、装着感が損なわれる課題がある。

そこで、装着感を損なわずセンシングが可能なe-テキスタイルを用いた、グローブ型ウェアラブルデバイス（Glove-Type Wearable Device: GTWD）を提案する。本研究では実験によりGTWDに適した伸縮性素材を調査するとともに、GTWDにてセンシング性能を検証したので報告する。

2. GTWDの構造と目標性能

ここでは、まずGTWDの目指す姿と要件を整理する。

2.1 GTWDの構造

DXのインタラクションとして、物を掴む、離すなどを想定し、指の各々の動きをセンシングすることを目指す。場所の制約、伸縮性、装着感に優れた手法として、伸縮性素材による歪ゲージを選定する。

図1に歪ゲージ用いたGTWDを示す。指の各関節に伸縮性素材を装着し、曲げ伸ばしによる素材の伸張、抵抗値変化、その抵抗値変化から指の曲がり具合を推定する。

また、手や指先へのインタラクションを想定すると、歪

ゲージをそのままフィードバック用の電気回路にも用いるため、導電性の高さ（抵抗の低さ）も必要となる。

2.2 e-テキスタイル

伸縮性素材としてe-テキスタイルが有力な候補である。e-テキスタイルとは、導電性など電気的な特性を持たせることで様々な機能を実現する繊維である。メッキされた繊維を紡績した導電糸を、織る、編む、縫うなどの作業により作成される。グローブに一体化でき装着感を損なわない利点がある。

実際、e-テキスタイルを用いて、手や腕の曲げ伸ばしをセンシングした先行研究がある[2][3]。他の伸縮性素材として、導電性ゴムを用いた足の動きのセンシング、衣服に導電性のインクを印刷して、胸の動きから呼吸をセンシングする研究もある[4][5][6]。また、e-テキスタイルの縫い目による特性の違いや、伸縮の繰り返しによる特性ずれを調査した研究もある[7]。

2.3 GTWDの求める性能

GTWDの目標仕様をまとめる。指の曲げ易さ（伸縮率）、信号の伝達し易さ（抵抗値）、歪みの検知し易さ（伸張時の抵抗値変化率）、繰り返し性能（伸張反復後の抵抗値変化率）、の4項目を設定する。手を閉じた状態は開いた状態に比べ、各指先から手の甲までの長さが10~16%（1.5~2.5cm）伸張するため、伸縮率の目標は16%以上である。歪ゲージでの電圧低下を防ぐため抵抗値を1Ω/cm以下に、検出し易くするため伸縮率に対する抵抗値変化率を1%で1Ω以上に、繰り返し時の抵抗値変化率は10%以下に抑える。

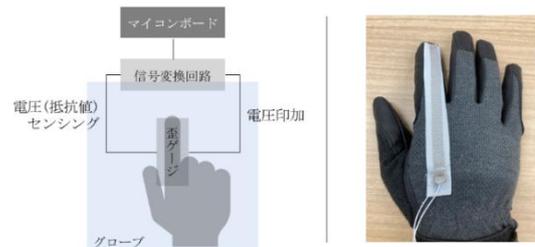


図1 歪ゲージによるセンシング

3. 伸縮性素材の性能評価

2章での GTWD 要件定義に従い、伸縮性素材を収集し、指標を満足するものを選定した。

3.1 伸縮性素材の種類

伸縮性素材として、e-テキスタイルの基本となる導電糸、それらを布にした導電布、シート状の導電素材を選定した。導電糸はメッキ素材の違いを2種類、導電布は織物・編物や後メッキ処理の布を7種類、シート状の導電素材は導電性ゴムや導電性ペースト表面加工シートを4種類選定した。導電性ゴムは伸縮性ゴムに導電性フィラーを複合化した素材である。e-テキスタイルと同様に導電性と伸縮性を持つ素材であり、先行研究でも注目されている[4][5]。

3.2 評価結果

代表的な素材の結果を表1に示す。e-テキスタイルの導電布（編物）が全ての目標を満足することを確認した。導電性ゴムは、繰り返し性能に問題があった。編物と織物の2つを比較した場合、同じ導電糸を用いても編物の方が伸縮性は大きい。また、編物の中でもハニカム構造は、伸長により糸の絡みが均一に増加することで導電性や反復性に優れていた。

表1 伸縮性素材の比較

	目標	導電糸	導電布 (編物)	導電布 (織物)	導電性ゴム
素材写真					
伸縮率[%]	16≦	12	20	0	35
抵抗値[Ω/cm]	≦1	3.7	0.1	0.1	0.031
抵抗値変化率(伸張)[%]	1≦	3.5	1.5	伸縮せず	0.9
抵抗値変化率(反復後)[%]	≦10	復元せず	6	—	復元せず

4. GTWD の実装

選定した導電布（編物）の歪ゲージをグローブに装着しGTWDを作成した。このGTWDで手指の開閉をセンシングできるか検証した。信号変換回路では、e-テキスタイルと固定抵抗の分圧とオペアンプにより、オフセットと増幅して歪ゲージの抵抗値変化をセンシングする。

実際に手指の曲げ量をセンシングした結果を図2に示す。抵抗値変化（約10Ω）を電圧値として観測し、255(1Byte)で正規化して、曲げ量の最大・最小を0~1とした。実験では5秒間で手を開いた状態から閉じた状態まで変化させ、5秒間手を閉じた状態を保持し、次に5秒かけて手を開いた。手を開いた状態（曲げ量最小:0）と手を閉じた状態（曲げ量最大:0.93）で曲げ量が安定し、変化過程で曲げ量が単調に増加・減少している。装着感が損なわれない手指センシングのGTWDが実現できた。

続けて、PC上で物を掴む動作を再現するよう、親指と人差し指の動きをPC画面上で再現するGTWDアプリケーションを開発した（図3）。指の開閉の速さに合わせてリアルタイムでボールを掴んだり離したりするデモを実現した。

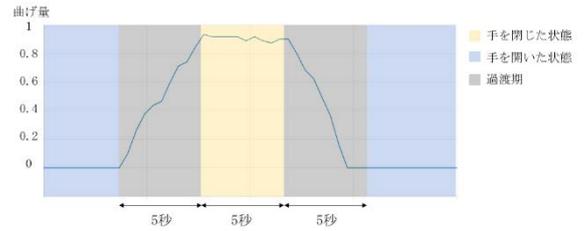


図2 手指の開閉のセンシング結果

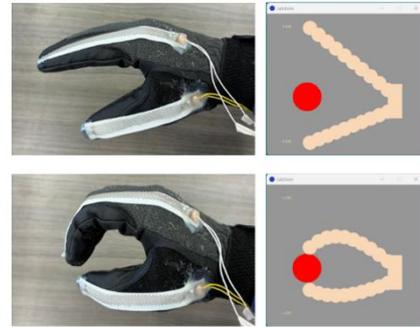


図3 GTWD アプリケーション

5. おわりに

本研究では、e-テキスタイルによる手指のセンシングデバイスとGTWDアプリケーションを開発することで、e-テキスタイルを用いたコンパクトなウェアラブルデバイスの実現可能性を示した。物を掴むデモでは、親指側の長さ変化、つまり抵抗値変化は僅かであり、微小な動きを検知できるよう感度向上の回路工夫がさらに必要である。

今後は、マイコンボードや回路などシステム全体をウェアラブル化していき、本システムをメタバースでのインタラクションだけでなく、遠隔地間での感覚共有などにも展開していく。その他にも、本素材は高い導電性を有しているため、電気回路の一部として、フィードバック制御などを実装し、さらなるGTWDの進化を図りたい。

参考文献

- [1]富士キメラ総研. 2023 デジタルトランスフォーメーション市場の将来展望《市場編》. 株式会社 富士キメラ総研, 2023.
- [2]Seongwoo Ryu, Phillip Lee, Jeffrey B. Chou, Ruize Xu, Rong Zhao, Anastasios John Hart and Sang-gook Kim. Extremely Elastic Wearable Carbon Nanotube Fiber Strain Sensor for Monitoring Human Motion. ACS Nano Vol 9/Issue 6, 2015.
- [3]Mengyun Yang, Junjie Pan, Anchang Xu, Lei Luo, Deshan Cheng, Guangming Cai, Jinfeng Wang, Bin Tang, ID and Xungai Wang. Conductive Cotton Fabrics for Motion Sensing and Heating Applications. Polymers 2018, 10, 568.
- [4]大高秀夫. 伸縮性ひずみセンサの開発と応用展開. 日本ゴム協会誌, 第91巻 第2号, 2018.
- [5]昆恵介. 歪ゲージを活用した簡易計測機器の製作方法と活用事例. 日本義肢装具学会誌, Vol35 No1, 2019.
- [6]安在絵美, 才脇直樹. 柔軟素材を用いたIoTシステムの基礎と応用IV. システム/制御/情報 第66巻 第8号, 2022.
- [7]Orathai Tangsirinaruenart and George Stylios. A Novel Textile Stitch-Based Strain Sensor for Wearable End Users. Materials 2019, 12, 1469.