

導電糸とサーモクロミック糸を用いた 入出力が可能な組紐型デバイスの製作

穂積佳^{†1,a)} 塚田浩二^{†1} 吉田博則^{†1}

概要：紐は古来より様々な用途で使用されており、特に日本の伝統工芸である組紐は、柔軟性と強度を併せ持つため、固定や装飾等の多様な用途に利用できる。さらに、材料となる紐を変えることで、外観も美しくデザインできる。本研究では、導電糸やクロミック繊維などの組み方をカスタマイズすることで、引張や手指の接触を判定するセンシング機能や、繊維素材の変色による出力表現機能を持った組紐型デバイスを提案する。

1. 背景

紐は古代から多様な目的に利用されてきた。例えば、縄を結んでモノを固定したり、飾り結びを用いて装飾に利用したり、結縄のように結び目を用いて記憶補助手段としても利用された。本研究では、複数の細い紐を組み上げた組紐に着目する。組紐は、柔軟性と強度を併せ持つため、上述した多様な用途に利用できるだけでなく、材料となる紐を変えることで、外観も美しくデザインできる。また近年では、布や紐等の繊維に電子回路やセンサを組み込む E-Textile の研究が盛んに行われている。例えば、Olwal[1] らは、導電糸や光ファイバーなどの機能性繊維を紐に編み込み、タッチセンシングや情報提示機能を備えた紐型デバイスを提案している。Wilson[2] らは導電糸を用いたテキスタイルセンサを複数種類製作し、そのデザイン、構築、普及に関する事例をまとめている。本研究では、従来の紐だけでなく、導電糸・クロミック糸等の多様な機能性繊維を素材とした、新しい組紐を組み上げることを目指す。例えば、導電糸を組み込んで抵抗値を計測すれば伸縮を検出するセンサとして利用でき、静電容量を検出すればタッチセンサとして利用できる。また、サーモクロミック糸とヒーター導電糸等を組み合わせることで、色の変化による出力機能を組紐に付与できると考えられる。なお、本論文は、情報処理学会第 208 回 HCI 研究会 [10] で発表した内容を整理し、出力機能を中心に加筆した。

2. 関連研究

本章では、本研究に関連する研究事例として、「紐状の入

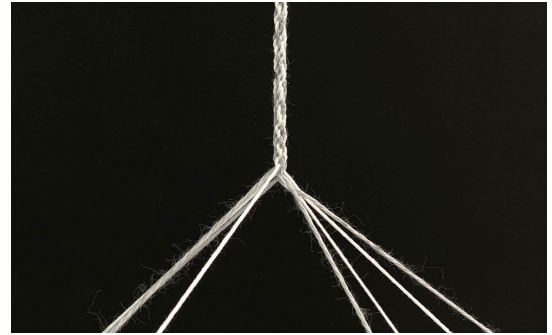


図 1 組紐を組んでいる様子

力デバイス」、「機能性繊維を用いたデバイスや表現」の 2 つの観点から説明する。

2.1 紐状の入力デバイス

Schwarz[3] らは紐の端や内部にセンサを取り付けることで、ねじり、引っ張り、タッチ箇所をセンシングできる手法を提案している。Schoessler[4] らは、コード内部に曲げセンサや導電性ポリマーを組み込むことで、コードを用いた入力方法を提案し、5つのプロトタイプの製作を行っている。Olwal[1] らは、非導電性のコアの周りに導電糸と光ファイバーを格子状に編み込み、近接、タッチ、ねじりをセンシングできる機能と情報提示機能を備えた紐型デバイスを提案した。さらに、音楽プレイヤーの音量を操作する応用例等を示している。Shahmiri[5] らは、コイル状の銅線と導電糸をシリコンを挟んで多重に配置することで、コイルの変形を用いたセンシング手法を提案した。具体的には、Pluck(つまむ)、Twirl(ねじる)、Stretch(伸ばす)、Pinch(つねる)、Wiggle(くねらせる)、Twist(ねじる)の 6 種類の操作を検出している。劉 [6] らは、導電糸を組み込

^{†1} 現在、公立はこだて未来大学

^{a)} g2124043@fun.ac.jp

んだ組紐に導電性の紐やクリップを取り付けることで入力
が出来るインタフェースを提案し、そのシステムを応用し
たタンジブル音楽システム「Music yarn」を提案している。
大崎 [7] らは、スニーカーのタンの部分に LED マトリクス
を、靴紐を通すホール部分にタッチセンサを組み込むこ
とで、靴紐の表現を拡張できるインタラクティブな靴紐を
提案をしている。

2.2 機能性繊維を用いたインタラクティブデバイス

Wilson[2] らは導電糸を用いたテキスタイルセンサを複
数種類製作し、そのデザイン、構築、普及に関する事例をま
とめている。富永 [8] らは、羊毛フェルトと導電性繊維を組み
合わせることで、柔らかい触感がある入力インタフェー
ス「ふわもにゅインタフェース」を提案している。若本 [9]
らは、外部刺激で色等が可逆的に変化するクロミック素材
を用いて多様な色/描画パターンを表現できるインタラク
ティブキャンバスと描画デバイスを提案・試作し、基礎性
能評価をまとめている。

2.3 本研究の特徴

本研究では、導電糸やサーモクロミック糸などを組み合
わせた組紐に着目し、入出力機能を付与した組紐を製作
し、組紐型タンジブル・インタフェースのための基礎検討
を行う。

3. 提案

本章では、本研究のコンセプトや組紐、導電糸やサーモ
クロミック素材について述べる。

3.1 コンセプト

本研究では、組紐に導電糸やクロミック繊維などの機能
繊維を組み込むことにより、入力機能や出力機能を付与
した組紐の制作を行う。導電糸の抵抗を測定することで、
引張などを検出することができる。また、静電容量を測定
することによりタッチセンサの機能を付与することがで
きる。クロミック繊維に関しては、サーモクロミック糸と
ヒーター導電糸等と組み合わせることで、色の変化による
出力機能を組紐に付与できると考えられる。

3.2 組紐

本研究では、複数の紐もしくは糸を組み上げて作られた
紐を組紐とする。組紐を構成する紐や糸のことをストラ
ンドと呼ぶ。組紐には多様な束ね方があり、外観/伸縮性/手
触り等の特徴がある。例えば、3本のストランドをねじる
様に束ねた3つ打ちの組紐は、表面に凹凸があり、滑りに
くいがよじれやすいという特徴がある。一方、中に芯を通
し、その周りを十数本のストランドで編んだ金剛打ちは、
表面がなだらかで、よじれにくく、引張づらいという特徴

がある。本研究では機能性繊維の特徴に応じて複数の束ね
方を行った。

3.3 導電糸

導電糸とは、導電性繊維で出来た糸である。導電性繊維
とは金属やカーボンブラックなどを化学繊維に混合した
り、繊維の表面を金属で被覆したり、金属繊維を用いる等
して、導電性を付与した繊維素材である。導電繊維の抵抗
値は製法や素材によって異なる。本研究では 100mm で約
12 Ω の抵抗がある導電糸 A(幅 0.5mm) と、100mm で約
1k Ω の抵抗がある導電糸 B(幅 1mm) を使用した (図 2)。

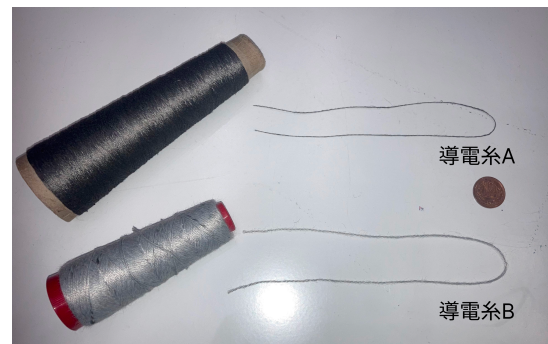


図 2 本研究で使用した導電糸

3.4 サーモクロミック素材

クロミック素材とは、外部刺激によって色が可逆に変化
する素材のことである。サーモクロミックは外部の温度変
化により変色する素材であり、本研究ではサーモクロミッ
クインクで糸を染色することでクロミック性の糸素材を製
作した。染色により組紐の素材を製作することにより、太
さなどが異なる複数の紐素材にクロミック性能を付与で
きる。

4. 実装

本章では、組紐の実装に関して「制作器具」、「導電組紐」、
「サーモインクを用いた染色」、「サーモクロミック組紐」に
ついて紹介する。

4.1 制作器具

糸から組紐を組み上げる製紐機としてミサンガ作成玩具
「からふるくみくる」を使用した (図 3)。12 個のボビンに
糸を設置してハンドルを回すことで、ボビンが規則的に移
動して糸が巻き上げられて 12 打ちの組紐を作ることがで
きる。設置する糸の箇所を変えることにより、異なるパター
ンの模様を作ったり、8 個のボビンのみを用いることで 8
打ちの組紐を制作することができる。



図 3 ミサンガ作成玩具：からふるくみくる

4.2 導電組紐

導電糸と非導電糸を用いて組み上げた導電組紐の制作を行った。導電組紐は8打ちの組紐と2層構造になっている組紐の2種類を制作した。

4.2.1 8打ちの導電組紐

8打ちの導電組紐は、導電糸と非導電糸を用いて、それぞれの本数と配置を調整して複数種類制作した。制作した組紐の例を図4に示す。8打ちの導電組紐は制作器具の節で述べた製紐機（からふるくみくる）で制作した。具体的には、6種類のパターンに対して、導電糸A・Bを用いた場合で、計12種類制作した。長さは約20cmである。8打ちの導電組紐は柔軟性があり、抵抗値を測定することで引張を検出することができる。制作時の配置パターンと導電糸Bを用いた組紐を図5に示す。

また、導電糸Bで制作した8打ち導電組紐の引張による抵抗値の変化を測定した。導電組紐を錘と共に吊るし、100gごとの抵抗値の変化をテスターで測定した。錘は0gから500gまでの6段階とし、各5回の測定を行った。6パターンの組紐の測定結果をまとめたものを図6に示す。この結果により導電糸を組み込む本数や配置パターンを変えることで、引張に対して大きく抵抗値が変わる紐（パターンA, B, C）と、変化が少ない紐（パターンE, F）を作り分けることができる。よって、センサや導線等、用途に応じて使い分けできると考える。



図 4 制作した8打ち導電組紐

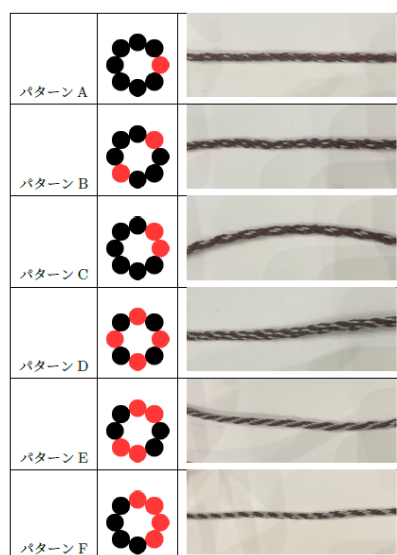


図 5 制作した導電組紐。模式図の赤が導電糸の配置箇所

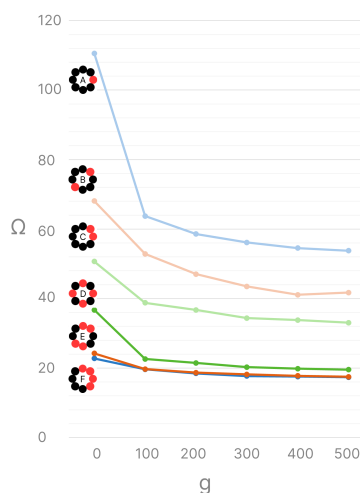


図 6 引張による抵抗値の変化

4.2.2 2層構造の導電組紐

2層組紐は、同軸ケーブルのように、導電糸の周りを絶縁体の層で囲み、さらにその周りを導電糸で組んだ2層構造の組紐である。2層組紐の構造を図7に示す。芯になる導電糸の束をチューブ状になっている紐に通し、その周りを12打ちで組み上げて2層構造にする。具体的には、市販のダブルブレードロープの芯糸を抜いて、導電糸Aの束を芯糸として通した。その後、周りをからふるくみくるを用いて、導電糸Bと非導電糸を組み上げて制作した。最後に、芯になっている導電糸Aと周りに編み込まれている導電糸Bを端で結び、導電組紐の端子が片方にまとめられる構造に仕上げた。2層組紐は主に外周の組紐をセンサとして活用するため、芯糸としては、抵抗値が小さい導電糸Aを使用した。制作した2層組紐を図8に示す。2層組紐は芯糸を通しているため、引張しずらいが端子が片方に集結しているという特徴がある。

制作した2層組紐の結んだ回数による抵抗値の変化を測定した。2層組紐の外層と芯糸をミノムシクリップを介してテスターに接続した。2層組紐を図9のように結んでいき、巻き数ごとの抵抗値を測定した。巻き数としては、結んでいない状態から6回結ばれた状態までを、各5回ずつ測定した。測定した結果を図10にまとめる。結ぶ回数が増えるほど抵抗値が低くなっていくことが確認できた。このように、2層組紐は結ぶ回数を測定するセンサとして利用可能だと考えられる。

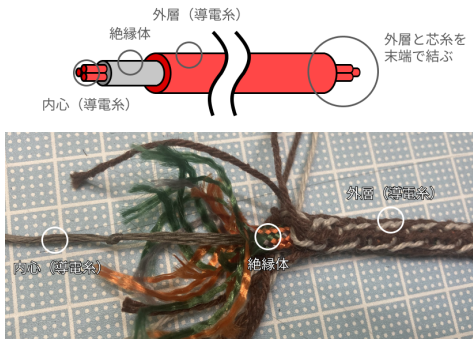


図 7 2層組紐の構造と制作例



図 8 制作した2層組紐



図 9 2層組紐の結び方

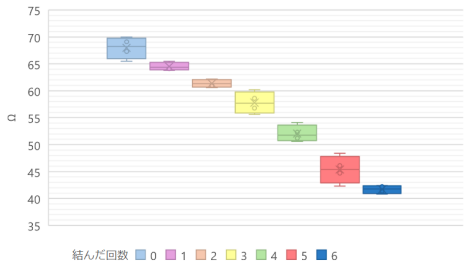


図 10 結んだ回数による抵抗値の変化

4.2.3 デモ装置

8打ち導電組紐、2層導電組紐の機能を分かりやすく見せるためのデモ装置を制作した。8打ち導電組紐にかかる張力に応じて、LEDの光量が変化する装置の制作した。抵抗値の検出とLEDの制御はArduinoで行った。図11のように、ミスミフレームに固定された組紐を引っ張ること糸の抵抗値が減少し、それに応じてLEDの明るさが増加する。2層導電組紐のデモ装置は、組紐を結ぶことで抵抗値が変化し、それに応じてLEDの光量が変化する。回路は、8打ちのデモ装置と同じである。図12のように結ぶ回数が増えるほど、LEDの明るさが増加する。

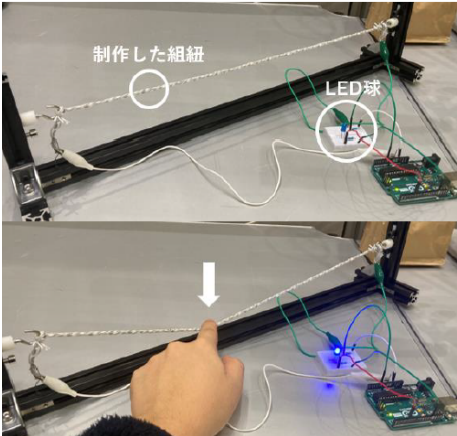


図 11 制作事例：引張に応じて光量が変化する



図 12 制作事例：結ぶごとに光量が増える

4.3 サーモインクを用いた染色

温度変化で変色をするサーモクロミック糸を製作するために、実験用のサーモインクを用いて、紐を染色する作業を行った。サーモインクは理科実験教材等に用いられる青色から桃色へ変色するものを使用した(図13)。染める糸をトレーに張ったサーモインクに浸し、乾燥させた(図14)。室温状態では青色だが、40℃前後で桃色へと変色する。染色した紐を図15に示す。



図 13 本研究で使したサーモインク



図 14 紐を染色している様子

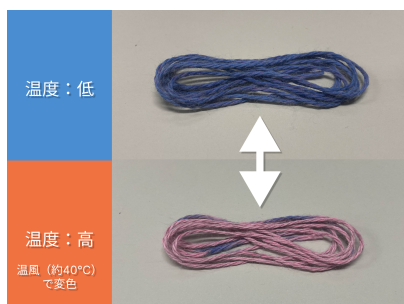


図 15 染色した紐

4.4 サーモクロミック組紐

染色を行った紐を用いて、サーモクロミック組紐を製作した。温度制御を行うために染色した糸を線径 1mm のニクロム線と束ねて組紐を製作した (図 16)。ニクロム線が導電糸程は柔軟な素材ではないため、からふるくみくんで組み上げることが困難だったため、サーモクロミック組紐は手打ちで実装を行った。組み上げた組紐は図 17 のように、内部のニクロム線に電流を流し温度を上げると変色する。具体的には、3V の電圧 (単 3 乾電池 2 本を直結) での電圧で、ニクロム線を発熱させると、15 秒程で完全に桃色に変色する。完全に変色している状態で電流を切ると、同じく 15 秒程で元の色に戻る。

また、導電糸 A とサーモクロミック糸、ニクロム線を合わせて組み上げた組紐の制作を行った。製作した組紐を図 18 に示す。この組紐は、ニクロム線の周りをサーモクロミック糸で巻き、導電糸と合わせることで、導電糸とニクロム線が干渉しないように組紐を組み上げている。この組

紐を用いることで、例えば導電糸に触れる時間に応じてニクロム線が発熱し、徐々に色が変わるような表現を行うことができる。



図 16 サーモクロミック組紐



図 17 ニクロム線の温度と組紐の色変化

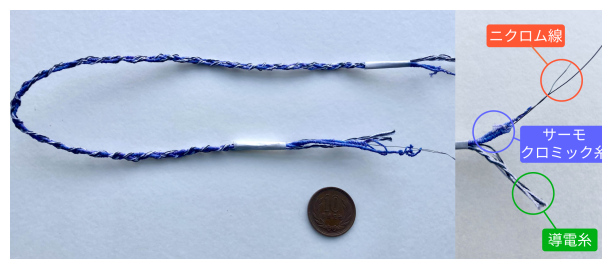


図 18 導電糸とサーモクロミック糸を組み込んだ組紐

5. まとめと今後の展望

本研究では、導電糸、サーモクロミック糸を用いて導電組紐とサーモクロミック組紐の制作を行った。導電組紐は引張や手指の接触を検出することができ、サーモクロミック組紐は電子制御により変色させることが可能である。一方、現状のサーモクロミック組紐は、ニクロム線を用いることで、本来の組紐が持つ柔軟性が損なわれているため、今後はヒーター導電糸 (高い抵抗値を持ちヒーターとして扱える導電糸) に置き換える予定である。また、導電糸による入力機能とクロミック糸による出力機能を合わせた組紐の制作を進め、組紐型タンジブルデバイスの実現を目指し、多様な応用例を提案していきたい。

参考文献

- [1] Alex Olwal, Jon Moeller, Greg Priest- Dorman, Thad Starner, and Ben Carroll. 2018. I/O Braid: Scalable Touch-Sensitive Lighted Cords Using Spiraling, Repeating Sensing Textiles and Fiber Optics. In Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST ' 18). 485 – 497.
- [2] Hannah Perner-Wilson, Leah Buechley, and Mika Satomi. 2010. Handcrafting textile interfaces from a kit-of-no-parts. In Proceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction (TEI ' 11). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 61 – 68.
- [3] Julia Schwarz, Chris Harrison, Scott Hudson, and Jennifer Mankoff. 2010. Cord input: an intuitive, high-accuracy, multi-degree-of-freedom input method for mobile devices. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ' 10). 1657 – 1660.
- [4] Philipp Schoessler, Sang-won Leigh, PictureKrithika Jagannath, PicturePatrick van Hoof, Hiroshi Ishii. Cord UIs: controlling devices with augmented cables. Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. ACM, 2015. pp. 395-398.
- [5] Fereshteh Shahmiri, Chaoyu Chen, Anandghan Waghmare, Dingtian Zhang, Shivan Mittal, Steven L. Zhang, Yi-Cheng Wang, Zhong Lin Wang, Thad E. Starner, and Gregory D. Abowd. 2019. Serpentine: A Self-Powered Reversibly Deformable Cord Sensor for Human Input. In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ' 19).1 – 14.
- [6] 劉悦怡, 串山久美子, Music yarn : 導電糸組ひもを利用したタンジブル音楽システム, インタラクション 2019 論文集, インタラクティブ発表, 2019-3
- [7] 大崎隼平, 塚田浩二, LED マトリクスで拡張したインタラクティブな靴紐の提案, インタラクション 2020 論文集, インタラクティブ発表, 3B-58, pp.998-1000, 2020-03-11.
- [8] 富永祐衣, 塚田浩二, 椎尾一郎: フェルト羊毛を用いた電子手芸手法の提案, 情報処理学会研究会報告 IPSJ SIG Technical Report, Vol.2012-MBL-61 No.16, Vol.2012 UBI-33 No.16, pp. 1-6 (Mar, 2012)
- [9] 若本麻央, 沖真帆, 塚田浩二, ChromicCanvas: クロミック繊維を用いたインタラクティブキャンパスの提案, インタラクション 2019 論文集, インタラクティブ発表 (プレミアム発表), 1B-45, pp.364-369, 2019.
- [10] 穂積 佳, 塚田 浩二, 吉田 博則. 導電糸を活用した組紐型タンジブル・インタフェースの基礎検討. 情報処理学会研究報告, 2024-HCI-208(24), pp.1-7. 2024-6.