



導電性毛糸とタフティングガンを用いた インタラクティブ・デジタルファブリケーション

Interactive Digital Fabrication Using Conductive Yarn and Tufting Gun

張子涵¹⁾, 馬華¹⁾, 山岡潤一¹⁾

Zihan ZHANG, Hua MA, and Junichi YAMAOKA

1) 慶應義塾大学 メディアデザイン研究科 (〒 223-8521 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1, cyou.shihan, yamaoka@kmd.keio.ac.jp)

概要: 本研究ではタフティングガンと導電性毛糸を用いて、簡易にスマートテキスタイルを作成するデザイン手法を提案する。導電性毛糸を材料として、任意の模様や導電性・非導電性、テクスチャなどを制御しながら、センシング可能なラグ編み生地を作成できる。タッチセンシング可能なカーペットやインタラクティブな家具などへの応用を目指す。

キーワード: デジタルファブリケーション, スマートテキスタイル, 導電性

1. 研究背景

近年、エレクトロニクスと繊維技術の融合により、スポーツ、医療、健康管理、パフォーマンスなどの分野で、さまざまなインタラクティブなスマートテキスタイルが多く開発されている。研究者は、日常生活の観察に基づき、スマートテキスタイルを簡易化し、生活に普及させ続けている。例えば、身体活動をモニターし、生理学的データ分析、双方向制御などの機能を提供できるウェアラブルデバイスは、健康管理やスポーツパフォーマンスにおいて積極的な役割を果たしている。

一方、家庭分野のスマートテキスタイルに関する研究は比較的少ない。スマートホームには、家庭環境の自動化、日常生活行動のモニタリング、その他の技術応用が含まれる。スマートテキスタイルデバイスを通じて、テキスタイルの柔らかさはそのままに、家具とのインタラクションやホームセキュリティのリスク監視などの機能を実現し、ユーザーの生活体験や生活の利便性を高めることができる。

Andres L. Bleda らによって提案された SSF (Smart Sensory Furniture) [1] は、自宅で一人暮らしをしている人の潜在的な危険行動や健康データを推測できる家具環境支援システムである。健康管理は、導電性繊維の最も新しい応用でもある。研究の前提となっているのは、家庭が人間が最も長く滞在する場所であるという事実と、一人暮らしの割合の増加によるものであり、それ故にモニタリング・デバイスとしてスマート感覚家具が選ばれている。

家庭分野のスマート・テキスタイルについて、既存の導電性テキスタイル材料は、主に導電性コーティング、導電性繊維、導電性ヤーン、導電性布に分けられる。以上の材料を用いたテキスタイルのインターフェースは、より自然なインタラクション体験を提供することができる。ファブリック

は人間が最もよく触れる素材として、自然に親近感を与えることができる。また、導電性繊維をスマートデバイスの物理的インタラクティブなインターフェースとして使用し、繊維の触感を維持することに関する研究も出てきている。

しかし、素材の選択だけでなく、スマートテキスタイルの制作手法についても非常に重要な研究である。スマートテキスタイルの制作手法はすでに多くにあるが、一人一人の生活環境の違いを考慮した上で、複雑な機械と制作プロセスを必要としない、DIY 可能な工芸品が必要だと考えられる。

本研究では、タフティングガンを用いて、導電性テキスタイルで新しい DIY 制作手法を提案する。タフティングガンは、高速回転するフェルトリング針を使用して繊維を基布に挿入し、立体感と良好な触感を備えたぬいぐるみ効果を生み出す特殊な繊維加工ツールである。伝統的な編み物や製造技法に比べ、タフティングガンははるかにシンプルで使いやすく、オペレーターは専門的な技術や経験を必要としない。したがって、タフティングガンを使って導電性毛糸を生地に均等に挿入し、導電ループを形成することは、非常に実現可能な新しい技術である。

実験の結果により、タフト加工された導電性毛糸はソフトで肌触りの良い質感を保ち、ユニークなテクスチャーと触感のディテールで温かみを感じさせる。本手法はシンプルかつ効率的で、自由度が高いため、ユーザーは自分の導電性テキスタイルを素早くデザインし、インタラクションのエリアを計画し、手作業の喜びを体験することができる。

2. 関連研究

安定性、着心地、カスタマイズ性、耐摩耗性、簡便性を目指して、導電性テキスタイルの研究は、導電性繊維、制

作技法、機能性など、多くのトピックをカバーしているが、異なるアプローチに基づくいくつかの欠点がまだある。

2.1 導電性繊維

導電性繊維は現在よく使われる素材であり、「導電性金属繊維」、「導電性炭素繊維」、「導電性ポリマー繊維」に分けられる。Jung-Sim Roh が提案した MCEY (金属複合刺繍糸) [2] は新しいタイプの導電性金属繊維で、導電性、耐久性、安定性に優れている。導電性炭素繊維と導電性ポリマー繊維 [3] は十分に柔らかいが、高価で製造が複雑なため、商業的に成立させるのは難しい。

2.2 導電性繊維の制作手法

主に従来のテキスタイルの制作手法をもとに、導電性素材をテキスタイルに織り込み、印刷、刺繍、染め、または化学加工することが多い。織物機で作られた導電性織物 [4] は柔軟でデザイン性に富み、さまざまな形状や構造要件に対応できる。導電性材料や導電性インクを織物表面に直接プリントする方法 [5] は、正確なラインパターンを描くことができる。しかし、どちらの完成品も導電性の安定性に問題があり、一度問題が発生すると手作業で修理することはできず、作り直ししかない。

2.3 カスタマイズ可能なスマートテキスタイルファブリケーション

大きなカスタマイズ可能性は刺繍技法の利点であり、刺繍技法で作られた導電性テキスタイルは、楽しい手作りのスリルを提供することができ、特に教育や芸術 [6] の分野で人気がある。しかし、導電性糸で作り直ししやすい刺繍技法 [7] であるが、大きな面積で刺繍するのが難しい。また、スケッチからデジタル刺繍ミシンの刺繍データへ直接変換する手法 [8] はプロトタイプングの効率の向上に効くが、手作業の楽しさを失い、プロトタイプの修正は基本的にやり直ししかない。スマート・テキスタイルとプリント・エレクトロニクスからなる熱活性化接着材料に基づいており、カスタム・インターフェース機能を作成するために布地に柔軟にアイロンで貼り付けるスマートテキスタイル制作ツール [9] である。操作は簡単で、デザインの自由度も高いが、テープで貼り付けられた回路の耐久性は導電性繊維を織り込んだものよりは低い。

3. 提案手法

本研究の目的は、タフティングガンを用いて、新しいスマートテキスタイルの製造とデザイン方法を提案することである。

本研究は2つの部分から構成される。1つ目は導電性毛糸の制作、2つ目は制作した導電性毛糸とタフティングガンを用いた導電性タフト織物のデザインである。

導電性毛糸を制作については、幅広い素材から導電性が安定した毛糸を選び、タフティングガンを使ってテキスタイルのインターフェースを自由にデザインする。このプロセスにより製造工程が簡素化され、タフティング毛糸はシームレスな一体化特性に優れ、ユーザーが自由にインタラク

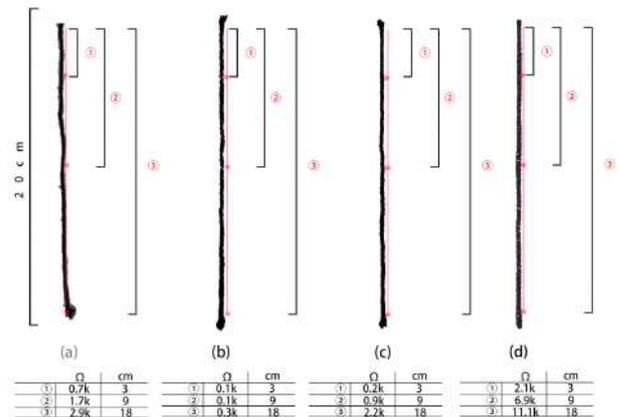


図1: 各種の毛糸を導電性染めた後の抵抗値: (a) ウール、(b) ポリエステル、(c) ナイロン、(d) アクリル

ティブなジェスチャーを設定でき、修理も容易である。

3.1 導電性毛糸

導電性毛糸は、PolySense という導電性テキスタイルを染める手法 [10] を用いて製造される。この手法はピロール、テキスタイル、塩化鉄を水に入れて混ぜ、導電性のあるテキスタイルを作るというものである。ポリエステル、アクリル、ナイロン、ウールなど、市販されている毛糸素材の比較を行った。図1は、2mm太さ、20cm長さの異なる素材の毛糸が水、ピロール、毛糸、塩化鉄を75:2:1.5:1の割合で加え、同時に染めた複数の実験結果である。

結果はテスターワイヤの測定距離が上がるにつれて抵抗値が上がることを示している。100%アクリル系の毛糸の抵抗値は最も強く、18cmの測定距離で11.1kΩと最も高い抵抗値を示す。最短距離の3cmでも抵抗値は2.1kΩに達する。他の毛糸の抵抗値は、低い順にウール、ナイロン、ポリエステルである。上記の4種類の毛糸はこの手法によって導電性毛糸に変えられることを証明しており、次のインタラクショナルデザインの部分で変化をよりよく展示するため、本研究では抵抗値の最も高いアクリル毛糸が選ばれた。

3.2 タフティングガンを用いた制作手法

タフティングガンは、糸を通した口金によって導電性毛糸を裏生地の間隙に突き刺し、裏生地の裏側に導電ループを形成するという原理で行われる (図2)。

導電性毛糸を突き刺すことで、デザイン要求に応じて織物の特定の位置や形状に導電ループを形成することができる。タフティング手法により、導電性毛糸の密度と長さのパラメータを調整して、センシング状態を制御することができる (図3)。

その結果、密度と長さの変化にかかわらず、抵抗値の変化は非常に安定しており、ショットがないことができた。

3.3 インタラクショナルデザイン

タフティングガンを使って導電織物の界面を自由に作ることで、織物の表面に2つの異なる状態を作り出すことができる。まず、1つ目の状態では、導電毛糸は十分に密に並んでおらず、織物は導電性がない。ループを形成する必要が

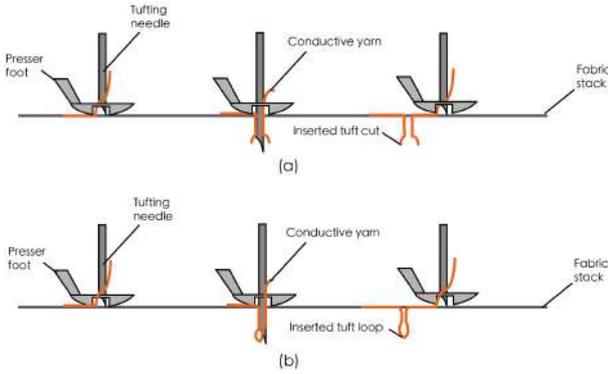


図 2: 2 種類タフティングガンの使用原理: (a) カットパイル、(b) ループパイル



図 3: タフティングガンの使い方とタフト加工された導電性毛糸の展示

ある場合は、押しや絞りなどのインタラクションによって、導電性毛糸を十分に密着させて閉ループを形成することができる。2 つ目の状態は、導電性毛糸が自然な状態で十分に密接に配置され、生地自体を導電性もたらすことであり、インタラクションによって抵抗値を変えることができる (図 4)。

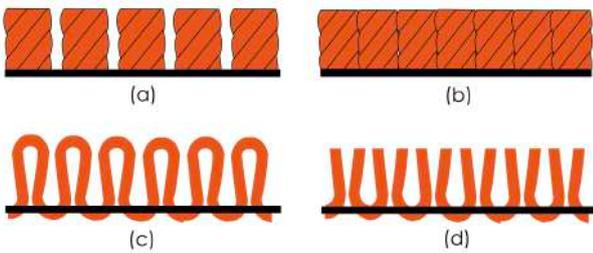


図 4: 2 種類タフティングガンを用いたパイルの区別: (a) カットパイル、(b) ループパイル

毛糸の配列に加えて、繊維界面の変形による抵抗値の変化がインタラクションデザインの基礎となる。異なるジェスチャーの下で、パイルの抵抗値変化の度合いをテストした。最終的に、タッチ、曲げ、スライド、3 種類のインタラクションのジェスチャーをまとめた (図 5)。

例えば、18cm*18cm のタフトされる毛糸の場合、タッチのジェスチャーでは、指の力が強まるにつれて抵抗値は減少し、最終的には通常値の 70 % に達する。スライドのジェスチャーでは、指が中心に近づくほど抵抗値は大きくなり、

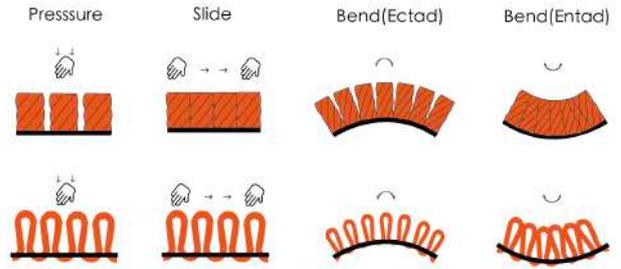


図 5: インタラクションのジェスチャーの見取り図

最大で通常値の 130 % に達する。外側に曲げるジェスチャーでは、曲がり強いほど抵抗値は小さくなり、最終的には正常状態の 20 % に達する。内側に曲げるジェスチャーでは、曲がり強いほど抵抗値は高くなるが、その変化は明らかではなく、最終的には正常時の 110 % に達する。

ジェスチャーによって抵抗値を変更することで、ユーザーはインタラクション手法を決めたり、スマートデバイスを制御するための調整ボタンとして使用することができる。

また、導電性毛糸と普通の毛糸を交互に使うことができ、ユーザーが自分でインタラクティブなエリアをカスタマイズすると、実際のニーズに応じてインタラクティブなエリアを作ることが可能である。

4. まとめ

本研究では、従来の毛糸の柔らかさとカスタマイズ性に着目し、PolySense という染める手法で導電性ポリマーを従来の毛糸と組み合わせて使用することで、毛糸の心地よい手触りを維持しつつ、導電性ポリマー毛糸の導電率と安定性を利用し、より快適な導電性繊維製品を生み出す手法を提案する。

また、タフティングガン的高速製織と扱いやすさを利用して、繊維地上の導電性毛糸を自由にデザインする新しい工芸システムを提案する。本提案は、毛糸の柔らかさと可鍛性を保持し、異なる形状や構造を適応でき、装置を織物にシームレスに組み込むことができる。インターフェイスを通して、ユーザーは布の表面とインタラクションし、タフティングガンは布地本来の触感を損なわない特性を持つ布地家具を可能にする。本手法は、デザイナー、職人、DIY 愛好家を対象としている。そのため、簡単にカスタマイズすることができる。本手法を用いて、導電性毛糸を繊維生地に挿入するため、いつでも取り外して導電回路を再構築、修理することができる。本手法を使えば、導電技術について知識を持っていないユーザーでも、自分のニーズに合わせたインタラクティブなスマートテキスタイルを簡単に作ることができる。

5. 展望

本研究でタフティングガンを使った中で、いくつかの課題と限界が見つかった。1 つ目に、タフティングガンの操作にはある程度の経験が必要であり、精度が低いと美観に欠

ける表面になってしまう可能性がある。2つ目に、デザインされたエリアはあらかじめ布地に描かれている必要があるが、実際の操作では予想された範囲から外れてしまい、全体的な効果に影響を及ぼす可能性がある。

以上の問題を解決するため、将来的にはタフティングガンの追跡装置を開発する予定である。この装置は、布地上のタフティングガンの位置をリアルタイムで追跡し、それがあらかじめ決められた設計範囲から外れているかどうかを判断できる。そのため、ユーザーはタフティングガンの操作をより正確に制御できるようになり、想定範囲から外れないことができる。

参考文献

- [1] A. L. Bleda, F. J. Fernández-Luque, A. Rosa, J. Zapata and R. Maestre, "Smart Sensory Furniture Based on WSN for Ambient Assisted Living," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 17, pp. 5626-5636, 1 Sept. 1, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2721434.
- [2] Roh, J.-S. (2018). Conductive Yarn Embroidered Circuits for System on Textiles. In *Tech*. doi: 10.5772/intechopen.76627
- [3] Haiyang Lu, Zhihao Yang, and Long Ba. 2021. High electric conducting 1D nanomaterial/polymer composite fibers for wearable biomedical sensing system. In *Proceedings of the 2021 International Conference on Bioinformatics and Intelligent Computing (BIC 2021)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 6–11. <https://doi.org/10.1145/3448748.3448750>
- [4] Sara Nabil, Lee Jones, and Audrey Girouard. 2021. Soft Speakers: Digital Embroidering of DIY Customizable Fabric Actuators. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 11, 1–12. <https://doi.org/10.1145/3430524.3440630>
- [5] Koya Narumi, Steve Hodges, and Yoshihiro Kawahara. 2015. ConductAR: an augmented reality based tool for iterative design of conductive ink circuits. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 791–800. <https://doi.org/10.1145/2750858.2804267>
- [6] Sofia Guridi, Tamara Vicencio, and Rodrigo Gajardo. 2021. Arpilleras Parlantes: Designing Educational Material for the Creation of Interactive Textile Art Based on a Traditional Chilean Craft. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 38, 1–11. <https://doi.org/10.1145/3430524.3440657>
- [7] Lee Jones, Miriam Sturdee, Sara Nabil, and Audrey Girouard. 2021. Punch-Sketching E-textiles: Exploring Punch Needle as a Technique for Sustainable, Accessible, and Iterative Physical Prototyping with E-textiles. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 21, 1–12. <https://doi.org/10.1145/3430524.3440640>
- [8] Nur Al-huda Hamdan, Simon Voelker, and Jan Borchers. 2018. Sketch&Stitch: Interactive Embroidery for E-textiles. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper 82, 1–13. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173656>
- [9] Konstantin Klamka, Raimund Dachsel, and Jürgen Steimle. 2020. Demonstrating Rapid Iron-On User Interfaces: Hands-on Fabrication of Interactive Textile Prototypes. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–4. <https://doi.org/10.1145/3334480.3383139>
- [10] Cedric Honnet, Hannah Perner-Wilson, Marc Teyssier, Bruno Fruchard, Jürgen Steimle, Ana C. Baptista, and Paul Strohmeier. 2020. PolySense: Augmenting Textiles with Electrical Functionality using In-Situ Polymerization. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–13. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376841>
- [11] Jing Xue, Bruna Beatriz Petreca, Christopher Dawes, and Marianna Obrist. 2023. FabTouch: A Tool to Enable Communication and Design of Tactile and Affective Fabric Experiences. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '23)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 476, 1–16. <https://doi.org/10.1145/3544548.3581288>