

デザイン可能な磁性パターンを持つ 磁性テキスタイルのファブリケーション

趙 語青^{1,a)} 山岡 潤一^{1,b)}

概要: 本研究は柔らかい生地に磁性を持たせることで、電子回路を使わずに動かせるテキスタイルのファブリケーション手法を提案する。生地特有な伸縮性に着目して、磁性テキスタイルの変形しながら変色できる二層構造を提案する。ユーザーが磁性パターン（磁力の極の向きと磁性強さの分布）をデザインすることで、多様なフレキシブルなディスプレイや人との多感覚なインタラクションを実現できる。今回は、磁性の極性がない材料とテキスタイルの組み合わせるに注目して実験を行った。本稿では、磁性テキスタイルのファブリケーション手法及び制御実験、今後の展望について述べる。

1. はじめに

近年、スマートテキスタイルの進展により、ディスプレイは平面だけでなく、服やソファなどの日常用品にも組み込まれてきた。例えば、Adobe の Project Primrose[1] はボタン操作で模様に変化するウェアラブルなディスプレイを実現している。電子回路を介して色をダイナミックに変化させることが主流であるが、その際にはバッテリーの持続時間の問題が指摘されている [4]。また、デザイナーにとって電子回路を用いた服のデザインやプロトタイプ 제작は簡単ではない。

また、温度による変色するサーモクロミックインクや紫外線の量により色を変えていくフォトクロミックインクなど、変色素材を用いた方法も考えられる。電気回路を用いないため、バッテリーの制約やデザインはし易い。一方で、色変化のみに限定されている。色だけではなく、生地の柔らかさと伸縮性を活かし、形状変化を行うことで、ダイナミックな表現を実現すると考えられる。

一方で、布製品のデザインでは、カットアウトというファッション仕立てとして注目されている。カットアウトとは、上のレイヤーの穴を通して下のレイヤーの色が見えるようになるファッション仕立てである。例えば、Jiye Shen の伸縮性のある妊婦服 [6] は、腹部にカットアウトがあり、お腹が大きくなるにつれて、その部分が目立つようになるインタラクションが実現した。上下レイヤーの材料とパターンカットと生地の動きにより、服のスタイルの可能性

がさらに広がる。

本研究では、フレキシブルな物理的に変形するディスプレイを作るために、カットアウトというファッション仕立てをベースとして、柔らかい生地に磁性を持たせることで、電子回路を使わずに動かせるテキスタイルのファブリケーション手法を提案する。生地特有な伸縮性に着目して、磁性テキスタイルの変形しながら変色できる二層構造を提案する。ユーザーが磁性パターン（磁力の極の向きと磁性強さの分布）のデザインにより、フレキシブルなディスプレイや人との多感覚なインタラクションを実現できる。今回は、磁性の極性がない材料とテキスタイルの組み合わせるに注目して実験を行った。本稿では、磁性テキスタイルのファブリケーション手法及び制御実験、今後の展望について述べる。

2. 関連研究

2.1 スマートテキスタイル

既存研究は導電系と物理系に分けて、変色、変形、センシングなどの機能を実現した [1], [2], [5]。また、刺繍入りスピーカーという研究 [7] のような視覚以外の五感インタラクションに関する研究も含まれる。Ebb[3] は導電系にサーモクロミックインクをつけ、電流を通じながら加熱することによって変色のディスプレイである。導電回路を用いた手法は、多機能性を可能にするが、回路の複雑性など制約もある。本研究では、磁性素材を用いて電気回路を用いない方法を目指す。

2.2 磁性材料

磁性材料に関する研究では、異なる磁性材料の制御方法

¹ 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

^{a)} zyq980616@kmd.keio.ac.jp

^{b)} yamaoka@kmd.keio.ac.jp

や3Dプリント技術など新たな製造工芸に焦点を当てる。Kimら[9]はソフトマテリアル内にプログラムされた強磁性ドメインを3Dプリントして、磁気作動による複雑な3D形状間的高速変形を可能にする。Magnetic Plotter[10]は磁性ゴムシートに設計された磁気パターンにより触覚刺激を変化させるプロジェクトである。Yanら[8]は3D形状の外観が編集できるような磁気泳動ディスプレイを印刷するためのパイプラインを提出した。液体、粉末、柔らかい素材や硬い素材など、様々な磁性材料の研究が既に存在するが、柔らかく伸縮性のある生地のような素材は少ない。

2.3 ソフト材料とのインタラクション

ダイナミックな動きや自動成形[11]など、二次元から三次元まで様々なインタラクション[12]が可能である。例えば、張ら[13]は花のような構造を作成することによって、2Dから3Dへの自動折り曲げインタラクションを実証した。

3. 提案手法

3.1 目標

関連研究を踏まえ、本研究では2つの目標を設定した。まず、簡単なファブリケーションで伸縮性のある磁性パターンがデザイン可能な磁性テキスタイルを製作する。次に、この磁性テキスタイルを制御し、電子回路を使用せずにフレキシブルなディスプレイを実現し、同時に動的な触感を与える。具体的なコンセプトデザインを、磁性テキスタイルのファブリケーション及び制御方法、応用の順で紹介する。

3.2 磁性テキスタイルのファブリケーション

磁性素材を動的に変形させる手法として、3つの方法が考えられる：

- 電流から磁力を生じるという原理で、導電糸で作ったコイル[14]で磁力をコントロールする案である。しかし、この案は研究動機と矛盾するので、考慮しない。
- マグネットペイントあるいは他の化学材料を生地の表面に塗り、ラバーマグネットシートのような乾燥した後も、磁性が自由に変われるテキスタイルを作る方法である。永久磁石で磁性テキスタイルの表面に磁性パターンを描ける[10]。
- 3Dプリンティングを用いて磁性パターンまでプリンティングできる技術である。Kimらの研究[9]で示したように、プリントしながら、複合インクを磁化させることで細かい磁性パターンが描ける。

3.3 磁性テキスタイルの制御方法

作成した磁性テキスタイルを図1のような二層構造で制御する。上層の磁性テキスタイルは引力と斥力により、磁

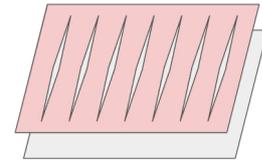


図1 磁性テキスタイルの二層構造



図2 磁性パターン通りに膨張

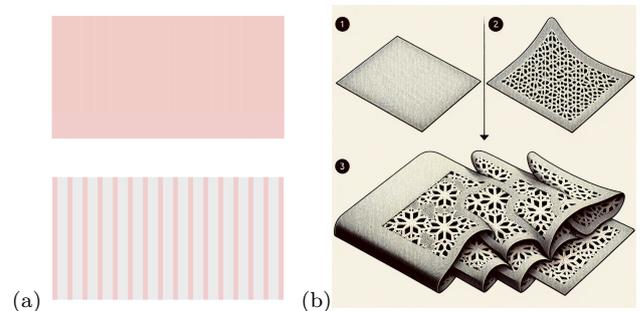


図3 テキスタイルの色と模様の変化

性パターン通りに膨らませる(図2)。そして、生地に直接触れると、動いているときに動的な触感を実感できる。下のコントロール層は磁性テキスタイルに磁場をかけることである。コントロール層と磁性生地の距離と相対位置をコントロールすることで、ダイナミックなディスプレイができる。例えば、上のテキスタイルに柄をカットすると、生地を変形しながら下の層も見えるようになる。図3のように模様が出たり、色も変えることができる。

3.4 磁性テキスタイルの応用

- 服デザイナー向けの便利なデザイン用ツール:1枚の生地から、デザイナーは磁力制御により、さまざまな柄や配色だけでなく、異なるシルエットの効果もシミュレートできる。磁性テキスタイルを使用することで、デザイナーがパターンを繰り返し作成する時間や、生地の無駄を削減することができる。
- 視覚障害者の触覚ディスプレイ:磁性テキスタイルを膨らせることにより、視覚的なディスプレイだけでなく、様々な触感体験を与えられる。視覚情報だけでなく、触ることによって情報を伝えることが可能になる。視覚障害者にも優しいディスプレイが実現できる。
- 距離の可視化と触覚提示:距離が近ければ近いほど磁

力は強くなるため、磁性テキスタイルは距離を視覚的な変化、また生地自体の形状も変形し、人同士が近くと触感を感じるなどの、新しいコミュニケーションに応用できる。

- 様々なシーンに合わせる服: 磁性テキスタイルで作られた服の柄や色を自由にコントロールできるため、様々なシーンに合わせてカスタマイズできる。一日の中での様々な場面に応じて、複数の服を持たずに、磁性テキスタイルによって色や形をシーンごとに変更できる。

4. テキスタイルの磁気制御プロトタイプ

4.1 異なる磁性材料とのプロトタイプ

さまざまなインタラクションや制御手段を試すために、異なる磁性材料と異なる生地を組み合わせるプロトタイプを作成した。

図4(a)は、ネオジム磁石とカットアウトした伸縮性のある生地を組み合わせたものである。生地の下にあった誘導コイルが磁場を制御し、ネオジム磁石が反転運動を繰り返すようになっていた。上層の生地が動くことで、下層の色が現れ、生地の模様も変化した。複数のネオジム磁石を並べれば、ネオジム磁石の周期的な反転を制御することで、ダイナミックなディスプレイが実現できる。

図4(b)は、マグネットペイントで織物の表面に柄を描いたものである。磁石の吸着力で、柄に沿って織物をすばやく折ることができた。柄を工夫すれば、花のような形も短時間で折ることができる。

図4(c)は、ラバーマグネットシートを小さく切って布に貼り付けたプロトタイプである。ラバーマグネットシートの磁気パターンは短冊状に分布しているため、ラバーマグネットシートの上を布を引っ張ることで、布に貼ったラバーマグネットが弾み弾ませたため、布を波状に動かすことができた。布の引っ張られる方向を変えるにつれ、布を波状に動かす幅も変えていった。

4.2 3Dプリンティングを用いた磁性材料

磁性テキスタイルのディスプレイをカスタマイズ可能にするために、3Dプリンティング技術を用いたプロトタイプを製作した。具体的にいうと、ユーザのニーズに応じてソフトウェアで様々な形状の磁性飾りをモデリングして(図5)、プリントした後テキスタイルの表面に貼り付けた。テキスタイルの動きは磁場によって制御され、フレキシブルなディスプレイを実現できる。今回の実験には、Protopasta社が開発したIron-filled Metal Composite PLA 1.75mmを使用した。

まず、磁性プリントの物理特性を調査するため、異なる形にした3D物体をプリントした。その結果として、磁性プリント自体は磁性を持たないが、磁石(実験にはネオジム磁石を使用)の表面に吸着させられることが確認された。

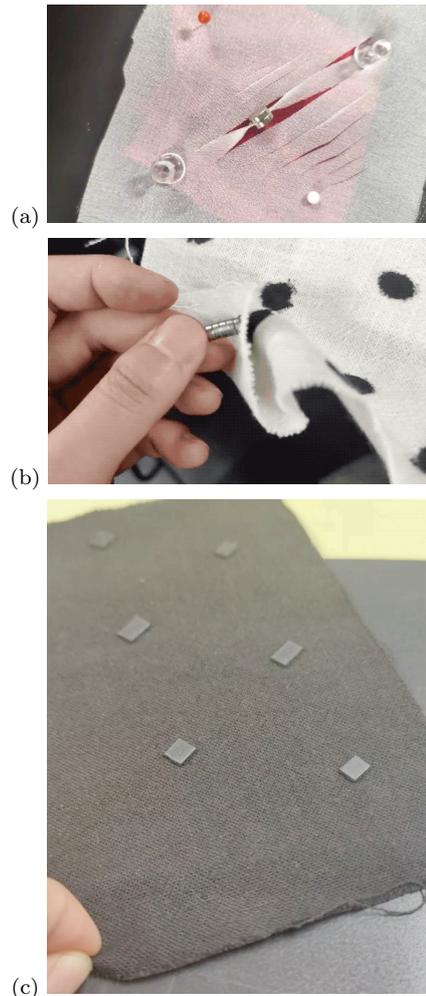


図4 磁性素材と生地の組み合わせるプロトタイプ

図6に示すように、星の飾りは磁石で衣服の表面に固定でき、星は磁石によって衣服の表面で動くように制御できる。この実験により、磁性プリントに含まれる鉄分は磁石によって容易に制御されることが証明され、プリントの形状や並べ方をデザインすることで、フレキシブルなディスプレイを実現できる可能性がある。

また、強力なネオジム磁石で磁性プリントを着磁する実験も実行した。同じ磁石で純鉄の物体を磁化することはできたが、磁気プリントを磁化することはできなかったという結果が得られた。

次に、磁気制御の効果に対するプリントサイズの影響を検討するため、規則的なパターン(図7)になるようなサイズの異なる小さい飾り(図8)をプリントして実験した。プリントのサイズは表1で示した。

図9で示すように、飾りを一列に並べ、テキスタイルに固定した。テキスタイルの下で磁石を左右に動かすと、飾りが左右に傾くように引き寄せられ、ドミノのような動きでフレキシブルなディスプレイが実現できる。

異なるサイズの飾りの動き効果を比較すると、他の要素が同じである場合、飾りの高さが高いほど傾斜角度が大き

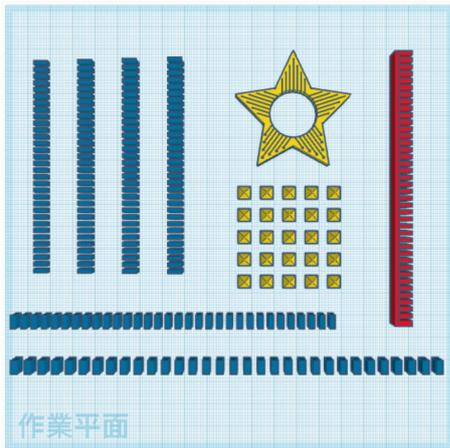


図 5 モデリング



図 6 磁性飾りを服に付け

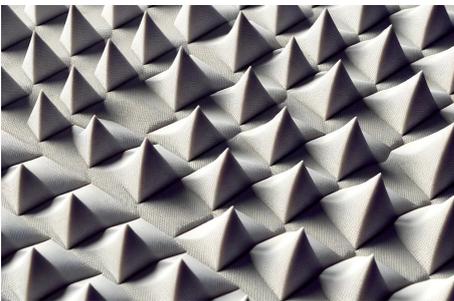


図 7 規則的なパターン

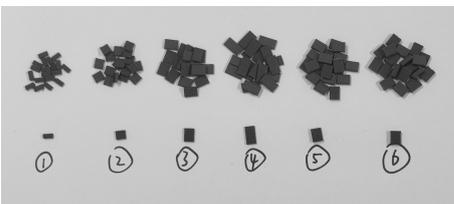


図 8 サイズの異なる小さい飾り

くなり、より目立つようなディスプレイができることがわかった。一方、長さを変えると飾りの体積が大きくなり、受ける引力も大きくなる。布の変形が大きくなるため、ディスプレイはより顕著になる。しかし、逆に磁力が強すぎると、磁石と布地との摩擦が大きくなり、磁石をスムーズに動かすことができなくなる。

表 1 プリントのサイズ

番号	長さ (mm)	幅 (mm)	高さ (mm)
s1	1. 2	5. 5	2. 5
s2	1. 2	5. 5	5. 0
s3	1. 2	5. 5	7. 5
s4	1. 2	5. 5	10. 0
s5	1. 8	5. 5	7. 5
s6	2. 4	5. 5	7. 5

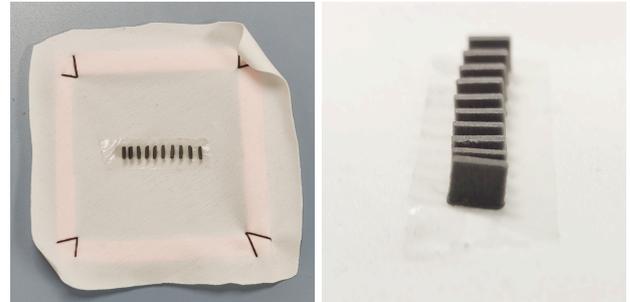


図 9 3Dプリントのプロトタイプ

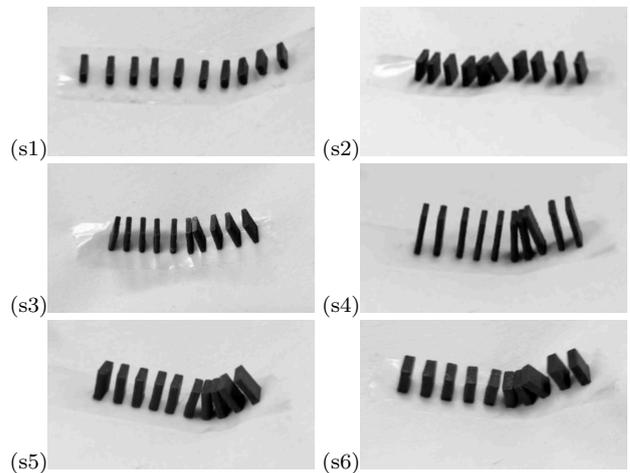


図 10 磁気制御の実験

5. まとめと今後の展望

磁気制御のプロトタイプをいくつか試したことで、人間とテキスタイルとのさまざまなインタラクションが実現され、磁性テキスタイルの動きを磁気で制御してフレキシブルなディスプレイを実現できることが確認された。しかし、今回用いた素材では、磁化する効果は得られなかった。生地磁性が正極と負極を持つ場合、より豊かでスムーズな効果が得られる。今後は磁性テキスタイルのファブリケーションにおいて原料の選択から着手し、磁化が容易で生地としての特性を維持した磁性テキスタイルの製造を目指す。

一方、日常生活におけるテキスタイルの使い方は、水平面だけでないため、様々な角度で制御効果を実験する予定である。最後に、この磁性テキスタイルと特化したインタラクションを服のデザインに応用することを目指す。そのため、ファッションデザイナーや使用者の両方を対象とし

たワークショップを実施し、その実用性と機能がユーザの期待に応えられるかどうかを検証する。ワークショップからもらったフィードバックに基づいて、プロトタイプを調整しながら最適化する。

参考文献

- [1] Dierk Christine, Rhodes TJ, Miller Gavin: *Project Primrose: Reflective Light-Diffuser Modules for Non-Emissive Flexible Display Systems*, Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (2022).
- [2] Wessely Michael, Tsandilas Theophanis, Mackay Wendy E.: *Stretchis: Fabricating Highly Stretchable User Interfaces*, Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (2016)
- [3] Devendorf Laura, Lo Joanne, Howell Noura, Lee Jung Lin, Gong Nan-Wei, Karagozler M. Emre, Fukuhara Shiho, Poupyrev Ivan, Paulos Eric, Ryokai Kimiko: *"I Don't Want to Wear a Screen": Probing Perceptions of and Possibilities for Dynamic Displays on Clothing*, Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (2016).
- [4] Stoppa Matteo, Alessandro Chiolerio: *Wearable electronics and smart textiles: a critical review*, Sensors (Basel) (2014).
- [5] Rivera Michael L, Forman Jack, Hudson Scott E, Yao Lining: *Hydrogel-Textile Composites: Actuators for Shape-Changing Interfaces*, Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (2020).
- [6] retractable garment designed for pregnant women <https://www.taipeidaward.tapei/Post/181479>
- [7] Preindl Thomas, Honnet Cedric, Pointner Andreas, Aigner Roland, Paradiso Joseph A, Haller Michael: *Sonoflex: Embroidered Speakers Without Permanent Magnets*, Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (2020).
- [8] Yan Zeyu, Lee Hsuanling, He Liang, Peng Huaishu: *3D Printing Magnetophoretic Displays*, Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (2023).
- [9] Kim, Y., Yuk, H., Zhao, R. et al.: *Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials*, Nature (2018).
- [10] Yasu, Kentaro: *Magnetic Plotter: A Macrotexture Design Method Using Magnetic Rubber Sheets*, ACM SIGGRAPH 2017 Studio (2017).
- [11] Ogata Masa, Fukumoto Masaaki: *FluxPaper: Reinventing Paper with Dynamic Actuation Powered by Magnetic Flux*, Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (2015).
- [12] Farhang Momeni, Seyed M.Mehdi Hassani.N, Xun Liu, Jun Ni: *A review of 4D printing*, Materials and Design (2017).
- [13] Zhang, Q., Zhang, K., Hu, G. : *Smart three-dimensional lightweight structure triggered from a thin composite sheet via 3D printing technique*, Nature (2016).
- [14] Nabil Sara, Jones Lee, Girouard Audrey; *Soft Speakers: Digital Embroidering of DIY Customizable Fabric Actuators*, Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (2021).