

Title	3Dプリンティング技術による動的パターンを実現する磁性テキスタイル
Sub Title	Magnetic textile with dynamic patterns enabled by 3D printing technology
Author	チョウ, ゴ青(Zhao, Yuqing) 山岡, 潤一(Yamaoka, Jun'ichi)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2024
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2024年度メディアデザイン学 第1154号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002024-1154

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2024 年度

3D プリンティング技術による
動的パターンを実現する磁性テキスタイル



慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

趙 語青

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

趙 語青

研究指導コミッティ：

山岡 潤一 准教授 (主指導教員)

稲蔭 正彦 教授 (副指導教員)

論文審査委員会：

山岡 潤一 准教授 (主査)

稲蔭 正彦 教授 (副査)

杉浦 一徳 教授 (副査)

修士論文 2024 年度

3D プリンティング技術による 動的パターンを実現する磁性テキスタイル

カテゴリ：デザイン

論文要旨

生地は、人々の身体に密接しているマテリアルのひとつである。デザイン性やインタラクションの可能性を求めるデザイナーたちは、生地に電子回路を組み込んで制御することを試みてきたが、一般的なデザイナーにとってデザインの難易度が高く、また回路の持続性や安全性の問題がある。このような限界を超えるため、本研究では電子回路を使わずに動かせるテキスタイルのデザインに力を入れ、デザイナーにとってインタラクティブな作品に実用しやすい磁性テキスタイルとそのファブリケーション手法を提案する。具体的には、3D プリンティング技術を用い、柔らかい生地の表面に磁性フィラメントプリントすることで、生地に磁性を持たせるファブリケーションを実現する。また、カットアウトなどのファッション仕立てをベースとして、基礎パターンと制御方法をデザインし、デザイン要点をガイドにまとめることを通じて、デザイナーが簡単に磁性テキスタイルをカスタマイズし、フレキシブルなディスプレイを実現することを目指す。最終的に、磁性テキスタイルとそのファブリケーション手法の使用難易度をテストし、その応用可能性も検証する。これまでの研究の貢献と不足を確認した上で、今後の課題と展望について述べる。

キーワード：

キネティックファッション, テキスタイル, 磁性材料, 3D プリンティング, インタラクション

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

趙 語青

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2024

Magnetic Textile with Dynamic Patterns Enabled by 3D Printing Technology

Category: Design

Summary

Fabric is one of the materials closely associated with the human body. Designers, in pursuit of aesthetics and interactive potential, have attempted to incorporate electronic circuits into textiles for control purposes. However, for general designers, such methods present significant challenges in terms of design complexity, as well as issues related to circuit durability and safety. To overcome these limitations, this research focuses on the design of textiles that can change patterns without electronic circuits. It proposes magnetic textiles and a corresponding fabrication method that are practical and accessible for designers creating interactive works.

Specifically, this research uses 3D printing technology to print magnetic filament onto the surface of flexible fabrics, thereby imparting magnetic properties to the textile. Furthermore, by incorporating fashion tailoring techniques such as cut-outs as a foundation, we design basic patterns and control methods. The key design principles are compiled into a fabrication guide, enabling designers to easily customize magnetic textiles and realize flexible displays.

Finally, this research evaluates the usability of magnetic textiles and the proposed fabrication methods while verifying their applicability. After assessing the contributions and limitations of the study, future challenges and directions for further development are discussed.

Keywords:

kinetics fashion, textiles, magnetic materials, 3D printing, interaction

Keio University Graduate School of Media Design

Yuqing Zhao

目次

第1章 序論	1
1.1. 研究背景	1
1.1.1 スマートテキスタイルと課題	1
1.1.2 キネティックファッション	2
1.1.3 スマート時代のキネティックファッション	4
1.1.4 テキスタイルパターンのデジタルファブリケーション	5
1.1.5 提案	6
1.2. 研究目的	8
1.3. 論文の構成	9
第2章 関連研究	10
2.1. スマートテキスタイル	10
2.1.1 ディスプレイ	10
2.1.2 形の制御	11
2.1.3 課題	13
2.2. 磁性素材	13
2.2.1 磁性素材の分類	14
2.2.2 デジタルファブリケーション	15
2.2.3 課題	16
2.3. ソフト材料の変形	16
2.3.1 変形と制御方式	16
2.3.2 課題	17
2.4. まとめ	18

第3章 デザインプロセス	20
3.1. コンセプトデザイン	20
3.2. プロトタイプ1：動きパターン	21
3.2.1 実装	21
3.2.2 展示	23
3.2.3 考察	25
3.3. プロトタイプ2：磁性テキスタイル	26
3.3.1 予備実験	27
3.3.2 磁性テキスタイルのファブリケーション	29
3.3.3 磁性テキスタイルの制御	33
3.3.4 磁性パターンの設計	34
3.3.5 展示：Interaction 2024	35
3.3.6 考察	37
3.4. ワークショップ1：未来の服	38
3.4.1 概要	38
3.4.2 結果	40
3.4.3 評価と考察	42
3.5. ファブリケーションガイドの設計	43
3.5.1 概要	43
3.5.2 制御効果のデザイン	44
3.5.3 定量化のパターンデザイン	51
3.5.4 ファブリケーションガイド	52
第4章 応用	54
4.1. 触覚フィードバック付きカップホルダー	54
4.2. 内容物表示機能付きポケット	55
4.3. 展示：4DFF 2024	56
4.3.1 フィードバック整理	57
4.3.2 考察	59

第5章 評価	61
5.1. 実験目的	61
5.2. 実験設計	62
5.2.1 実験対象	62
5.2.2 実験内容	62
5.2.3 検証方法	64
5.3. 実験実施	68
5.4. 実験結果	70
5.4.1 タスク1：磁性テキスタイルの製作	70
5.4.2 タスク2：動的効果の実現	73
5.4.3 タスク3：応用とデザインスタイルの探索	75
5.5. 考察	82
5.5.1 紙ベースの説明書と設計ツールの限界	82
5.5.2 動的効果制御の限界	83
5.5.3 多感官表現と応用可能性	85
第6章 結論	87
6.1. 総括	87
6.2. 今後の課題と展望	88
謝辞	90
参考文献	91
付録	98
A. ファブリケーションガイド	98

目 次

1.1	磁性テキスタイルのコンセプト (生成 AI)	7
3.1	制御の二層構造	22
3.2	プロトタイプ 1 のデザイン	23
3.3	Maker Faire Tokyo で展示する様子	24
3.4	磁性材料の評価実験	27
3.5	磁性飾りを服に付け	29
3.6	ファブリケーションの流れ (画像の一部は生成 AI で)	30
3.7	熱転写法の改善 (画像の一部は生成 AI で)	33
3.8	磁性テキスタイルの変形モード (生成 AI)	34
3.9	3 種類の磁性パターン	36
3.10	Interaction 2024 で展示する様子	37
3.11	ワークショップ 1 の様子	40
3.12	未来の服：心拍の花	41
3.13	制御実験 1 の結果	46
3.14	制御実験 2(左) と制御実験 3(右) の様子	48
3.15	3 種類の磁石配置	50
3.16	Tinkercad のデザインテンプレート	52
4.1	カップホルダーのデザイン	55
4.2	カップホルダーのデザイン	56
4.3	4DFF 2024 で展示する様子	57
5.1	作業中の様子	69

5.2	USE Questionnaire の平均値と標準偏差	70
5.3	タスク 1 : パターン設計と布固定時間	71
5.4	タスク 1 : Q3 スコアの分布	72
5.5	被験者 A の作品	75
5.6	被験者 B の作品	76
5.7	被験者 C の作品	77
5.8	被験者 D の作品	78
5.9	被験者 E の作品	79
5.10	被験者 F の作品	80

表 目 次

3.1	磁性 PLA と標準 PLA の比較 [1]	31
3.2	磁性 Iron フィラメントの 3D プリンタ設定 [1]	32
3.3	薄片のサイズ	45
3.4	磁石の制御実験結果	48
3.5	パターンデザインの主要パラメータと推奨値	51
5.1	USE Questionnaire の評価項目	66
5.2	自由回答の質問	67

第 1 章

序

論

1.1. 研究背景

1.1.1 スマートテキスタイルと課題

スマートテキスタイルとは、ユーザーと環境の間でインタラクションを可能にする「知能的」な布素材を指す。一般的に、従来の織物や布地にセンサー、導電性素材、電子デバイスなどを組み込むことによって、外部環境やユーザーの動きに応じて応答できる。このようなスマートテキスタイルは、ファッション、医療、スポーツ、建築など幅広い分野での応用が期待されている [2]。また、スマートテキスタイルは情報伝達やインタラクションの媒体としても活用可能であり、これにより単なる衣服の機能を超えた新たな価値が生み出される。

特に、スマートテキスタイルはユーザーと環境を結ぶインターフェースとしての役割を果たし、情報収集および交換の手段を提供する。例えば、導電性素材を用いた布地はタッチ入力を可能にし、圧力の変化を検知して適切に応答するデザインが開発されている [3]。また、光や色の変化を用いて情報を視覚的に伝えることも可能である [4]。このように、スマートテキスタイルは、身体的なサポートだけでなく、情報伝達や環境との相互作用を実現する多面的な可能性を秘めている。

しかしながら、現在の技術にはいくつかの課題も存在する。まず、バッテリーの持続時間が課題として挙げられる [5]。スマートテキスタイルを衣服などのウェアラブルデバイスに使われた状況で、長時間の使用が望んでいるが、今のバッテリー寿命が短いため長時間の使用が困難である。さらに、電子回路の知識が十分でないデザイナーにとっては、電子回路を用いた服のデザインやプロトタイプの

制作が非常に難しく、制作の柔軟性が制限されることも大きな問題となっている。

一方で、サーモクロミックインク [6] やハイドロゲル [7] のように特定の物理条件に反応し、外観の変化を通じて視覚的表現や機能を提供する手法も多く活用されている。この方法は電気回路を使用しないためバッテリーの制約がなく、デザインの自由度が高い。しかし、温度や光など特定の物理条件に依存するため、表現の自由度に限界があり、応用範囲が狭まるという課題も指摘されている。

そのため、本研究では物理条件としての「磁場」に着目した。磁場は外部からの遠隔制御が可能であり、電力供給用のバッテリーや直接的な接続が不要なため、より高い自由度での応用が期待される。また、磁場は多くの材料に無害で容易に透過できるため、人体への影響を抑えつつ安全で効果的な駆動方法を提供する。この特性により、柔軟で応答性の高い磁性ソフトマテリアルを活用し、布地の形状を磁場によって制御することで、形状変化が実現でき、多様な動的効果も期待される。さらに、このアプローチは、アクチュエーターやソフトロボティクス、ファッションなど幅広い分野での応用可能性を秘めており、スマートテキスタイル分野において新たな展望を切り開くものである。

このようなスマートテキスタイルは多様な可能性を持ちながらも、現状では技術的な制約や応用範囲の限界が課題として残されている。これらの課題を解決し、ファッション分野での応用をさらに推進するためには、新たなデザインアプローチや革新的な技術の活用が必要不可欠である。その中で、動的な表現を備えたキネティックファッションは、スマートテキスタイルの可能性を拡張し、さらなる応用の可能性を切り開く重要な研究領域として注目されている。

1.1.2 キネティックファッション

スマートテキスタイルの発展に伴い、人々はもはや衣服が静的に身に着けられるだけでは満足しなくなっている。衣服を環境とインタラクションさせたり、動きのある斬新な効果を生み出したりすることが、HCI 技術が生活に浸透している現代において、新たな自己表現の手段として注目されている。ファッションの推進要因の一つは、身体 of 自然な形態を変容させることで、絶えず進化する美の概

念を探究することにある [8]。こうした時代において、衣服の動的な特性は美の表現としてますます重視されるようになっていく。

しかし、歴史を振り返れば、服装が完全に静止していたわけではない。すべての衣服は、布が身体に沿ってまとわれ、風や熱、身体の動きに応じて形状が変化する様から、動的彫刻の一形態とみなしている。ただし、時代ごとに変形の形式には異なる特徴が見られる。キネティックファッションという概念は、衣服やアクセサリが動的に変化し、着用者の動きや環境、意図に応じて形状や色に変化する新しいファッション形態を指すものである [9]

ファッションの発展過程において、デザイナーたちは多様な手法を用いて、異なる場面に適応し、より流動的な自己表現を可能にする動的な服装の表現を追求してきた。

Hussein Chalayan の「Rise」シリーズ [10] では、「ツューインワン」ドレスが特徴であり、1 回の引っ張り操作で形状が変化するデザインである。このコレクションは、ドレスが簡単な動作で異なるスタイルに変わることによって、機能性と美しさを兼ね備えたファッションを体現している。

フレドリック・チャーランセン [11] は、膨らんだバルーンが収縮することでドレスやスカートに変化するコレクションを発表した。この作品は、人間の自己認識が活性化し感情が生まれる瞬間にインスピレーションを得ており、その瞬間を表現するための実験的なプロセスの追求によって制作されたものである。

Jiye Shen の伸縮性のある妊婦服 [12] は、カットアウトというファッション手法を用いてお腹が大きくなるとともに生地が伸び、腹部に徐々にパターンが現れるデザインである。静止した布地に時間の次元を加え、妊娠に伴うお腹の成長を独特な視覚表現で示すことで、服に豊かな幸福感を込めた。

これらのキネティックファッションの試みは、付加機能の実現であると同時に、多様な個人スタイルを表現するための探求でもある。また、舞台演出の視覚効果の向上、スポーツウェアの通気性の実現、さらには日常生活における一着で多様な着こなしの可能性など、さまざまな場面で幅広く応用されている。さらに、同じ衣服が形態の変化によって複数のスタイルや機能を持つことが可能になれば、人々の購買需要が相対的に減少し、持続可能な利用を促進するとともに、ファッ

ション業界における環境汚染問題への効果的な解決策としても期待されている。

キネティックファッションの概念は、従来のファッション表現を超えて、動的なデザインや機能を通じて、着用者と環境との新しい関係性を生み出す可能性を秘めている。このような動的な特性は、スマートテキスタイル技術と融合することで、さらに新しい次元のファッション表現を生み出しつつある。これらの試みは、スマートテキスタイルが進化した次世代のファッションの形態であり、技術と創造性が融合する新しいデザイン領域の一部として位置付けられる。

1.1.3 スマート時代のキネティックファッション

スマート化の時代に突入し、ファッションナブルな表現を備えるコンピューティングウェアラブルデバイスは、衣服やジュエリー、その他のアクセサリーを通じて、インタラクション、コミュニケーション、表現の多様な形態で私たちの生活の様々な側面に徐々に浸透しつつある [2]。従来の衣服やアクセサリーに類似するコンピューティングウェアラブルデバイスは、人と社会をつなぐインターフェースであり、したがって美的特性や表現力が極めて重要である [13]。新しい素材を用いて新たなファッション言語を創造するという挑戦において、キネティックファッションは大きな注目を集めており、さまざまな動的な衣服やアクセサリーが、キネティックファッションに広がりあるデザイン空間と多様なデザイン理念を与えている。

Kino [14] は、制御可能な装飾がどのようにデザインされ、布地の表現を動的に変化させるかを示す優れた事例である。この研究では、キネティックウェアラブルの視点を解き明かし、可動性が自己表現をより流動的にすることを発見した。これは、将来のウェアラブルデバイスがより動的な特性を持ち、これによって多重なアイデンティティを表現できる可能性を示唆している。

Social Textiles [15] は、新しいウェアラブルプラットフォームを提案し、物理的な近接に基づいて共通の興味を提示することで、見知らぬ者同士の交流を促進し、アイスブレイク効果を生み出すことを目指している。Monarch [16] は、筋肉によって作動するキネティックテキスタイルのウェアラブルデバイスである。身体 of 自然な動作を物理的に拡張することで、Monarch はウェアラブルテクノロジー

が個人の表現手段としてどのように機能し得るか、さらにそれが自己の本質的な延長として感じられる可能性について探求している。

これまでの研究から、動的に色や模様を変化させる機能は、ファッションとインタラクティブ技術が融合する新たな空間を創出し、個人スタイルの未来に向けた新たな表現手段としての可能性を示している [17]。新素材の革新に伴い、ファッション分野での新たな探求も引き続き進展している。

一方で、過度に前衛的で大胆なデザインは非常に未来的であるものの、現実の生活においては受け入れがたい場合がある。伝統的な服装形式に基づいて改良を加えた作品は、時代の公衆意識に美的に調和しやすく、製作工程においても市場に出しやすい。大衆と市場の受容性を考慮する上で、ファッションデザインの革新は、伝統的な技法を基盤とした上で行う必要がある。

このように、スマートテキスタイル技術とキネティックファッションの融合は、インタラクティブな衣服やアクセサリの可能性を広げるだけでなく、デジタル技術を活用した新しい製造方法の必要性も示唆している。特に注目されているのが、テキスタイルパターンのデジタルファブリケーション技術である。この技術は、スマートテキスタイルやキネティックファッションにおける複雑なデザインの実現を支えるだけでなく、持続可能性や効率性の観点からも重要な役割を果たしている。以下では、デジタルファブリケーション技術の具体例とその特性について詳述する。

1.1.4 テキスタイルパターンのデジタルファブリケーション

スマートテキスタイルやキネティックファッションのような革新的な衣服デザインを実現するためには、従来の製造技術だけではなく、デジタル技術を活用した製作プロセスの導入が重要である。特に、テキスタイルパターンのデジタルファブリケーションは、精密でカスタマイズ性の高いデザインの実現に大きく寄与する技術として注目されている。

近年、テキスタイルデザインの分野において、デジタルファブリケーション技術の進展が著しく、これにより従来の手作業や機械生産による製造方法に変革がもたらされている。デジタルファブリケーション技術を用いることで、テキスタ

イルパターンの設計と製作がより精密かつ柔軟に行えるようになっている。この分野で主に活用されている技術には、レーザーカッティング、デジタルプリンティング、3D プリンティング、コンピュータ支援機械（CAD/CAM）などがある。これらの技術は、複雑なパターンの再現や精密なカットを可能にし、個別の要求に応じたデザインのカスタマイズにも対応できる点で高く評価されている。

例えば、レーザーカッティング技術は、布地に対して細かく正確な切り抜きを実現し、複雑なデザインパターンの製作が迅速に行える。また、デジタルプリント技術は、フルカラーの精密なグラフィックデザインを布地に直接プリントすることが可能になる [18]。さらに、3D プリンティング技術により、布地に立体的な装飾やテクスチャを直接生成することが可能となり [19]、伝統的な平面的テキスタイルデザインに新しい次元を加えている。

これらのデジタル技術の導入は、テキスタイル製造の効率化や持続可能性にも貢献している。デジタルファブリケーションは、材料の無駄を減らし、エネルギー消費を抑制することで、環境への配慮が求められる現代のニーズにも対応している。また、パターンの迅速な変更や少量生産にも対応可能であるため、ファッションの分野では顧客のニーズに応じたパーソナライズされたデザインの提供が容易になっている。

1.1.5 提案

以上のような背景を踏まえ、本研究は電子回路を使わずに動かせる磁性テキスタイルと従来の洋服仕立手法をベースとしてのデジタルファブリケーション手法を提案する。これまでのスマートテキスタイルと比較して、磁性テキスタイルは電気回路の知識がないデザイナーにとって、より使いやすく学びやすい素材である。複雑な電子回路を組み込む必要がなく、電池の持続時間にも依存しないため、温度や光による制御を必要とする他の物理的制御に比べ、デザインと制御の自由度が高い。ファブリケーション手法は洋服仕立手法を基盤とし、デジタルプリント技術を用いて生地のカスタマイズ可能なパターンを作成する。この手法は従来の仕立手法の一部を応用し、細かなパターンを迅速に仕上げる新しいデジタル技術も使い、デザイナーの作業に大きな利便性をもたらす。

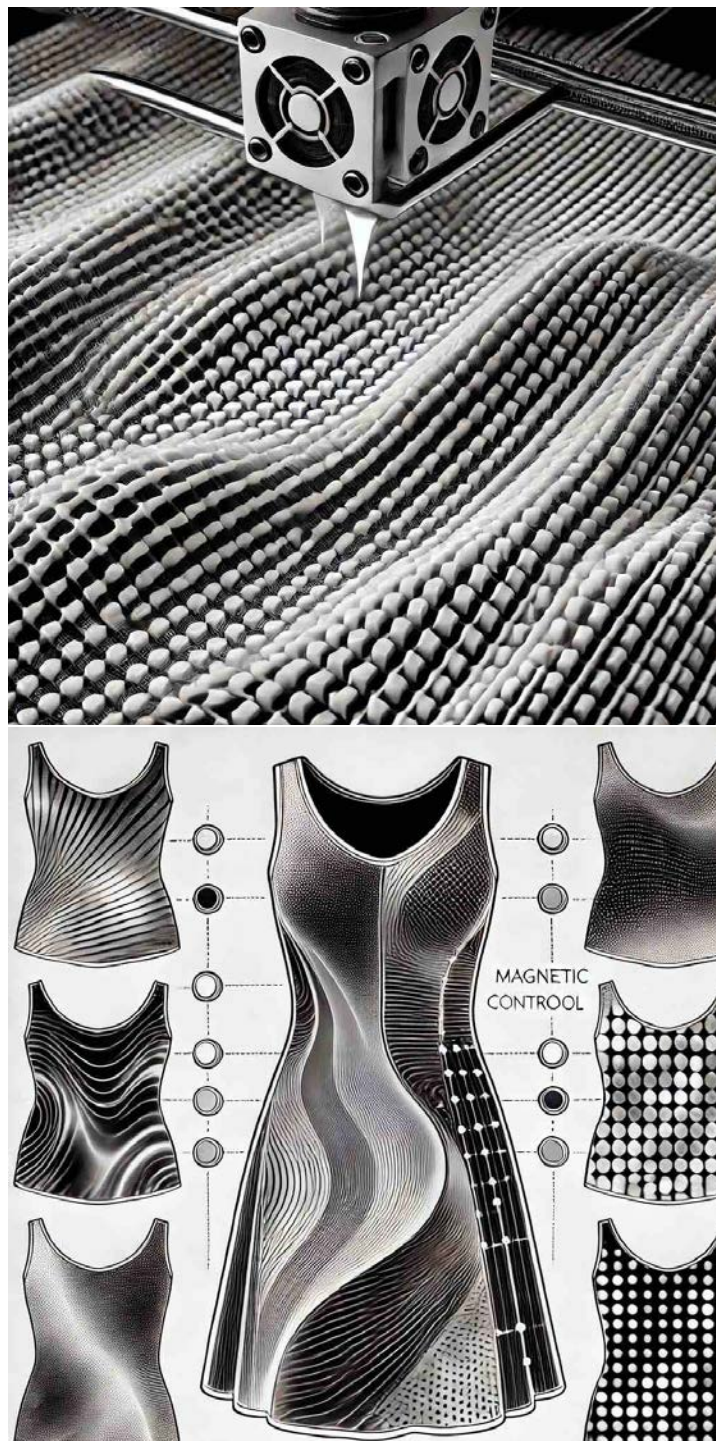


図 1.1 磁性テキスタイルのコンセプト (生成 AI)

磁性テキスタイルのファブリケーションについては、柔らかい生地磁性を持たせるために、デジタルプリンティング技術を用いて、生地に磁性パターンをつける。布料の柔軟性を保ちながら、磁場の中で磁力の作用を受けられるようにする。また、磁性テキスタイルは異なる磁性パターンのデザインに応じて、フレキシブルなディスプレイを実現できる。

磁性テキスタイルの制御方法については、カットアウトなどの洋服仕立手法を基に、変形しつつ色を変えられる二層構造を提案する。第一レイヤーは磁性テキスタイルであり、第二レイヤーはコントロール層として機能する。上のレイヤーには磁性パターンがプリントされ、動き方に応じて従来の仕立てデザインが施される。日常の洋服デザインでよく用いられたカットアウトという手法を例として説明する。カットアウトとは、上のレイヤーに穴を開け、下のレイヤーの色や模様を見せるデザインであり、上のレイヤーが変形すればカットアウトのパターンも変化する。このように、上下レイヤーの素材、パターンの様式、生地の動きを組み合わせることで、ファッションデザインの可能性がさらに広がる。

1.2. 研究目的

本研究は、革新的なインタラクティブ磁性テキスタイルの探索を目的としている。従来の洋服仕立手法を基にしたデジタルファブリケーション技術を用いて磁性テキスタイルを製作し、フレキシブルなディスプレイを実現できる制御方法を提案する。研究課題「磁力によって制御され、デザイナーにとって使いやすいパターンが変えられるテキスタイルをどのようにデザインするか」に答えるため、本研究の研究目的は六つの相互に関連する側面に分けている。各側面は、主要な研究課題から導き出されたテキスタイルファブリケーションおよびデザインの全体的な進展に寄与している。

- 磁性テキスタイルのファブリケーション手法を開発する。
- 磁性テキスタイルを用いて動きパターンを設計する。
- 磁性テキスタイルの制御方法を検証する。

- ファブリケーションガイドを設計することで、ユーザーが磁性テキスタイルを容易に作成し、このテキスタイルを用いて布製品の創造的なデザインを行う。
- 新材料の複数の応用シナリオを提示する。
- 磁性テキスタイルの機能と有効性、ファブリケーション手法のやすさを評価し、デザインスペースを定義する。

1.3. 論文の構成

第1章では、磁性テキスタイルが研究対象となる背景と理由を述べる。次に、その課題を解決するための提案と研究目的を述べる。

第2章では、本研究に関連する三つの研究方向について述べる。まずはスマートテキスタイルの現状とその課題に焦点を当てて、これらのテキスタイルがどのような機能が持っているのとどのように応用されるを概観する。次に、磁性材料の種類と製造、制御方法について詳細に紹介する。最後に、ソフトマテリアルとのインタラクションに関する研究を列挙し、さまざまな変形形式を比較して、本研究に適用可能な手法を選定する。

第3章では、磁性テキスタイルとそのファブリケーション手法の設計と実装について詳細にする。この章では、2つのプロトタイプと1つのワークショップを通じてそのデザイン空間を検討し、ファブリケーションガイドにまとめる。このプロセスは、本研究全体の前提と基盤となる。

第4章では、第3章でまとめたファブリケーションガイドと磁性テキスタイルの特性を布製品に応用することを述べる。

第5章では、磁性テキスタイルの機能と有効性、ファブリケーション手法のやすさを検証するために実施された実験について述べる。実験の目的、設計、実施方法、データの分析手法および分析結果について詳細し、最後に実験結果を考察する。

第6章では研究を総括し、本研究の限界と今後の課題についても議論し、磁性テキスタイルのさらなる研究と開発のための方向を提示する。

第 2 章

関 連 研 究

2.1. スマートテキスタイル

現在、磁場を制御条件として用いるスマートテキスタイルの研究は、依然として材料開発の段階にとどまっており、ファッションデザイン分野での応用はほとんど見られない。そこで、本研究と最も関連性の高い幾つかの研究をレビューし、これらがスマートテキスタイルの発展において果たした貢献を参考にする。主にスマートテキスタイルを活用して変形や変色の効果を生み出し、ファッションデザイン分野におけるさまざまな機能的応用を目指している研究に焦点を当てる。

2.1.1 ディスプレイ

衣服やアクセサリは情報伝達の媒体として機能し、個人のスタイル構築と密接に結びついている。日常生活において、衣服上の情報は主に二つのカテゴリーに分類される。具体的な図案や文字による実用的な情報と、抽象的なパターンや色の組み合わせによるスタイル情報である。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。これらの研究は、スマートテキスタイルを活用してさまざまな生活シーンに組み込む際に、伝達される情報の種類に応じて大きく二つのカテゴリーに分けられる。

実用的なディスプレイ グループランニング向けの Social Fabric Fitness [20] は、柔軟な LED ベースディスプレイを使用し、試合中にランナーのペースや心拍数をリアルタイムで共有するより、集団運動の一体感を促進している。Social Textiles [15]

は、導電性布地とサーモクロミックインクを用いて動的な文字ディスプレイより、共通の興味を持つ着用者同士が物理的接触を通じて興味や所属情報を共有し、グループ間のコミュニケーションや一体感を向上させる。Xiang Shi ら [21] は、織物構造に基づく電界発光 (EL) ディスプレイ技術を提案している。この新たなテキスタイルは柔軟性と耐久性を備えただけでなく、高解像度のパターンを自然かつ効果的に表示することも実現している。これらの実用的な情報提示を目的としたディスプレイは、特定の場面で機能的な情報伝達を担うことが多い。それは、スマートフォンや他の電子デバイスのスクリーンが柔軟なウェアラブルデバイスに組み込まれたものと見なしている。

スタイル表現のディスプレイ Adobe MAX 2023 で発表した Project Primrose [22] は、従来の発光ディスプレイが抱える高エネルギー消費の課題を解決するために、超低電力で動く、反射性の電気活性ポリマーボタンのディスプレイモジュールを提案している。素材を小さなピクセルブロックに分割して組み合わせることで、電子信号の制御により模様が変化し、非常にスタイリッシュなウェアラブルディスプレイを実現している。Ebb [23] は、熱致変色材料を用いた低解像度の色彩変化を特徴とする、編み物のディスプレイ技術である。テキスタイルディスプレイをスクリーンではなくアートキャンバスとして捉える新たなデザイン概念を提出している。このようなスタイル表現のディスプレイを衣服上で表現することで、好奇心を喚起し、楽しく偶発的なコミュニケーションを促進するだけでなく、芸術的な表現として技術文化についての考察を促すことも期待されている。

2.1.2 形の制御

衣服そのものは、柔軟で変化可能な特性を持っている。従来のファッションデザインにおいて、衣服の変化は重力の作用より自然で人体に合致するものであり、そのダイナミックな表現も一定の制約を受けていた。そのため、スマートテキスタイルを使用することで、異なる場面のニーズに応じた「不自然」な変化を衣服に実現することが期待されている。Awakened Apparel [24] は柔軟なロボティクスとファッションを融合し、空気圧駆動による折り紙構造を用いた動的な衣服であ

り、1日の中で人の気分や行動に応じて形態を変化させている。形状を変化させることで多様な場面に適応可能な衣服は、その使用の多様性を高めるだけでなく、人々が頻繁に新しい衣服を購入する欲求を抑制することで、環境保護の観点からも積極的な意義を持っている。このような衣服は、単一の衣服のライフサイクルを延ばし、資源の浪費や生産過程における環境負荷を削減することで、持続可能なファッションに対する新たな解決策を提供している。

また、平面的なディスプレイと比較して、空間的な変化は異なる形で情報を伝達し、さらに高いインタラクティブ性と表現力を備えている。Davis と Microsoft Research の研究チームが共同開発した Textile Mirror [25] は、形状記憶合金ニチノールを用いて人の感情状態に応じて変形する生地であり、人々が感情の認知と表現における障壁を克服する支援を行っている。H. P. Profita らの研究 Flutter dress [26] は、聴覚障害者へのナビゲーション情報を提供することを目的に、衣服の翼状の装飾部分を振動させ、周囲の音源方向を向くように動作させることで、着用者の環境認識を支援している。これらの立体的な衣服は、特別なデザイン性を備え、個人の独自のスタイルを一層際立たせるとともに、全く新しい時代を超えたファッション言語を形成する可能性を秘めている。

さらに、衣服は人間の第二の皮膚のように私たちの身体を包み込む存在である。衣服の形状変化と皮膚とのインタラクションにより、新たな機能が付加される可能性もある。MIT Media Lab の研究 bioLogic [27] で、湿度や温度に反応するバイオフィルムを利用し、皮膚の汗より通気性を自動調整するスポーツウェアを開発している。Kentaro Ueda らの研究 [28] で、形状記憶合金（SMA）とスプリングで構成されたアクチュエーターを使用して衣服を変形させ、触覚フィードバックを生成する技術が開発されている。衣服が変形する際に視覚的な提示だけでなく触覚フィードバックも提供できるようになれば、日常生活や特定の応用場面において多方面の利点が期待されている。例えば、支援デバイスの分野やインタラクティブエンターテインメントなどでその活用が考えられている。

2.1.3 課題

スマートテキスタイルに関する研究は、制御条件に基づいて、電子部品を埋め込んだ「電子系の研究」と、物理的制御を用いた「物理系の研究」に分類されている。第1章で述べたように、「電子系の研究」にはバッテリーの持続時間の制約や、非専門家にとって製作が難しいという課題が存在している。一方、「物理系の研究」は特定の物理条件に依存し、デザインや機能に制約が生じるという課題がある。

さらに、既存の研究において使用されているスマートマテリアルの多くは、単一の機能に限定されていることが確認されている。この機能の単一性は、スマートテキスタイルの潜在能力を制約する要因となっている。しかしながら、もし単一のスマートテキスタイルが複数の機能を統合して備えることが可能となれば、その実用性および適応性が飛躍的に向上すると考えられる。加えて、多機能性を有するスマートテキスタイルの導入は、持続可能な発展に対して新たな展望を開くものである。複数の用途を単一の製品で満たすことにより、単機能衣服への需要が大幅に減少し、衣服の生産および消費に伴う資源浪費の抑制に寄与する可能性がある。これにより、ファッションと機能性の調和を追求し、持続可能な未来の実現に向けた革新的なアプローチを提供することが期待される。

2.2. 磁性素材

現在、柔軟な磁性素材のウェアラブルデバイスにおけるインターフェースやファッション分野での応用例は非常に限られている。一方で、磁性繊維を用いた柔軟素材は、すでにロボット工学や医療分野において多様な応用可能性が探求されている [29]。本研究では、主に磁性テキスタイルのファッション分野における応用可能性およびデザイン空間を探求することを目的としており、関連する既存研究を参照しながら、磁性テキスタイルに活用できる磁性原材料およびその製造方法について検討を行う。そのため、本節では現行の磁性素材の分類およびそれらのデジタルファブリケーションに関する研究を中心に据え、その利点と課題、さらに生地との適合性を分析する。

2.2.1 磁性素材の分類

磁性とは、物質が磁界の中に置かれたときに生じる磁気的な変化を表す性質である。どんな物質もなんらかの磁性を示している。例えば、強磁場中に置かれたリングも浮上する現象が観察される。ミクロな物質の配列と磁化特性との関係に基づき、反磁性、常磁性、強磁性、フェリ磁性などに分類される。その中で、日常生活でよく見られる磁性素材は外部磁場を受けない状態においてもでも自発磁化をもつ磁性体であり、通常は強磁性体やフェリ磁性体を指す。これらの磁性素材は、磁化の反転が起きる際に必要な磁場の強さに基づいて、軟磁性材料と硬磁性材料に分類される [30]。

軟磁性材料とは外部磁界が取り去られると磁化を失い、元の状態に戻る材料である。Yan らの研究では、軟磁性材料である鉄粉を用いて、インタラクティブな磁気泳動ディスプレイを構築している。具体的には、油と鉄粉を混ぜた液体を各单位に注入し、外部磁場を用いることでオブジェクトの外観を編集可能にしている。室内装飾でよく使用するマグネットペイントも軟磁性材料の一種であり、壁に塗布することで磁石が自由に壁に吸着でき、家庭用の掲示板として利用できる。軟磁性材料の利点は、磁場に対して高い感度を持つ一方で、磁場が存在しない場合には他の磁性材料に影響を与える磁力を発生させない点である。しかしながら、磁場下では単方向の作用力しか生じないため、インタラクションの形式において一定の制約がある。

硬磁性材料とは一度磁化されると外部磁場がなくても磁化状態を保持し続ける特性を持つ材料である。日常生活でよく使用される各種の磁石や磁気テープは、いずれも硬磁性材料に分類される。MagneSwift [31] で使用されている磁性コンベア材料であるラバーマグネットも、軟磁性材料に分類される。ラバーマグネットは、磁性粉末をゴムやプラスチックなどの柔軟な樹脂と混ぜ合わせて製造されており、高い柔軟性を持つ磁性素材である。磁石と比較して磁化の反転が容易であり、表面の磁性パターンを簡単に変更できるため、永磁石と組み合わせてインタラクティブ製品によく活用されている。また、子ども向けの手作りワークショップなどでも広く活用されている。軟磁性材料と比較して、硬磁性材料はその向きを変えることで磁場内で異なる方向への運動を実現でき、より多様で豊かな動的

効果が可能である。しかし、磁性材料持つ磁性が応用シーンに制約を与える要因となる。例えば、予想外の磁性材料が存在する場合、意図しない吸引が発生する可能性があるため、シーン内でそれを排除する必要がある。また、再磁化が容易な硬磁性材料については、性能安定性や耐久性も課題として挙げられる。

2.2.2 デジタルファブリケーション

デジタル製造技術の普及に伴い、新しい製造手法が磁性材料の生産工程や応用シーンに徐々に取り入れられている。この技術は、時間とコストの節約を可能にするだけでなく、複雑な形状や微細な構造の作成も実現する。3D プリンティング、印刷、レーザーカットなどのデジタル製造技術の支援を受けて、磁性材料の設計と加工はさらに柔軟性を増し、高度にカスタマイズされた製品や機能的な構造が可能となった。本節では、それぞれの手法とその特性について説明する。

3D プリンティングは、磁性材料を用いた複雑な形状や立体的な構造を製造するのに適したデジタル製造技術である。現在、市場には多様な磁性フィラメントが販売されており、例えば Protopasta 社が開発した Iron Metal-Filled PLA Filament [32] は、鉄粉を混合した樹脂で構成される軟磁性材料である。Kim ら [33] 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 プリントすることで、磁気駆動による複雑な 3D 形状間的高速変形を実現している。しかし、この方法では、印刷中に素材を磁化する特殊な改造を施した 3D プリンターが必要となる。

磁性インクを用いた印刷は、紙やフィルムといった柔軟な基材に磁性を付与する効率的な手法であり、偽造防止や情報の記録用途に広く利用されている [34]。印刷後のパターンは、専用の磁気インク文字認識 (MICR) デバイスを用いることで、高精度な認識が可能である。この方法は柔軟な素材上に精細な磁性パターンを印刷できる点で優れているが、専用の印刷装置が必要であり、磁力の強弱が用途を制約する可能性が課題となる。

レーザーカットは、磁性素材を細かいパターンや部品形状に加工する際によく使用される技術であり、特に硬度の高い軟磁性材料や柔軟な磁性材料に適している。しかし、レーザーカットによって高温が発生するため、一部の磁性物質が有毒物質へ変化し、空气中に拡散する危険性がある点に注意が必要である。例えば、

マグネットシートは塩素化ポリエチレン（CPE）が含まれている場合があり、レーザー加工時に有毒な塩素ガスが発生するリスクがあるため、レーザーカットが使用できない。

2.2.3 課題

まず材料の選択において、軟磁性材料と硬磁性材料のそれぞれが持つ特徴と課題に注目する。本研究ではこれらの材料特性を巧みに活用し、柔軟性と伸縮性を備えた生地と組み合わせることで、制御可能で多様な着用シーンに適応する磁性テキスタイルのデザインという課題に焦点を当てる。材料の形態については、生地に塗布可能な液体や小型の固体を優先するが、生地との適合性より、材料の磁性特性およびプロトタイプ製作の結果に基づき評価を行う必要がある。

製作手法については、より多くのユーザーに利用可能であり、設計スタジオの製作環境に適合するかを考慮する。具体的には、家庭用の3Dプリンターやレーザーカッターなど、専門的な設備を必要としない機器の使用を優先する方針である。一方で、磁性材料のデジタル製造技術と洋服の製作プロセスをいかに組み合わせ、一般的なデザイナーにとって簡単かつ習得しやすい製作フローを設計するかが、本研究における重要な課題となる。

最後に、磁性材料の製作過程において人体に有害な物質が発生するリスクがある。そのため、製作の安全性を確保することもまた、本研究で取り組むべき重要な課題の一つである。

2.3. ソフト材料の変形

2.3.1 変形と制御方式

ソフト材料の変形効果は、主に材料の特殊な物理特性と外部刺激の作用によって実現される。例えば、水応答性のハイドロゲル材料 [7] は、水を吸収して膨張し、脱水して収縮することで形状変化を実現する。また、空気圧駆動材料 [35] では、空気圧を利用して材料の形状を変化させ、多様な動的表現が可能である。本

研究の対象である磁性材料は、磁場で精密な制御を実現する特徴を持ち、材料をカスタマイズの磁性パターンに磁化することで、複雑な三次元形状の変化も可能となる [33]。

ソフト材料の変形形式 [36] には、伸縮、曲げ、ねじり、折りたたみ、テクスチャ変化、および複雑な三次元形態変化が含まれる。多くの変形材料は、一般的なソフト材料と特殊な材料を組み合わせ、多層構造の複合材料として設計され、形態変化を実現している。例えば、Zhang らの研究 [37] では、熱刺激による形状記憶ポリマー薄片の収縮と復元を通じて、平面から三次元構造への展開を可能にし、自動折りたたみと自動展開を実現している。また、Active Membranes [38] では、事前に引き伸ばされた生地上に多様な幾何学的パターンをプリントし、応力が解放されることで、螺旋形からアーチ形などの多様な曲線変形を実現している。一方で、磁性制御はこれらの方法とは異なる特性を持つ。FluxPaper [39] では、紙の端に異なる磁性パターンをデザインし、磁場の方向や強度によって引力や斥力を生じさせることで、折りたたみや展開などの操作が可能となる。

実験的製造技術とデジタルシミュレーションツールを組み合わせることで、柔性材料の精密な制御が可能となる。簡単な動きの制御では、実験によって材料構造と応答挙動の対応関係を記録・概括するより、変形効果が再現できる。複雑な三次元変形を実現するには、デジタルシミュレーションツールが不可欠であり、材料の実際の製造に先立ち、形状変化や応答挙動を正確に予測することを可能にし、デザイナーにとって重要な支援となる。

2.3.2 課題

本研究では、主に磁性テキスタイルの変形を利用して衣服やアクセサリーにより豊かな視覚効果をもたらすことを目指している。そのため、テキスタイル全体の形状変化よりも、テキスタイルを小さなブロックに分割し、パターンやテクスチャの変化を生み出すことこそが、本研究の課題である。例えば、aeroMorph [40] で提案された、テクスチャの変化を利用して触覚フィードバックを実現する自転車用触覚手袋は、優れた参考事例である。

次に、異なる柔軟性を持つ素材を多層構造に組み合わせることで、磁性制御以

外の自変形が可能になる。このような自変形構造と磁性制御を組み合わせることで、磁性テキスタイルのパターンに多彩で複雑な変形効果を実現することは、革新性の高い研究方向と考えている。

最後に、磁性制御より変形可能なスマートテキスタイルを開発し、設計プロセスで期待される性能を実現するためには、制御実験を適切に設計し、性能の再現性を向上させることが本研究における最も重要な課題である。

2.4. まとめ

総じて、以上の関連研究は、複数の重要な課題を明らかにしており、特にスマートテキスタイルの性能上の限界、磁性材料のファッション分野における革新的応用、そして可変パターンの設計、三つの研究課題に焦点を当てる：

- スマートテキスタイル性能の制約：既存のスマートテキスタイルに関する研究は、主に「電子系」と「物理系」の二大制御方式に集中している。しかし、前者はバッテリー寿命の制限、後者は機能設計の制約という課題を抱えている。さらに、多くのスマートテキスタイルは単一機能のみに対応しており、その実用性と適応性を制限している。複数の機能を単一のスマートテキスタイルに統合し、実用性を向上させるとともに、持続可能なデザインを実現することは重要な課題である。
- 磁性材料のファッション分野における革新応用：磁性材料は、さまざまな分野で革新的な応用が進んでいるものの、ファッション分野はまだ磁気ボタンの段階にある。硬磁性材料と軟磁性材料の特性を活用し、それらを生地と組み合わせることで、新たなスマートテキスタイルの開発が期待されている。また、新型磁性複合材料を開発する際には、磁性材料のデジタルファブリケーション技術と服装制作プロセスの統合、さらに製造プロセスにおける安全性確保も重視すべき点である。
- 可変パターンのデザイン：ソフト材料の変形に関する研究は、HCI 研究全般で注目されているが、テクスチャやパターンの変化に関する研究は相対的に

不足といえる。一方で、多層構造と磁性制御を組み合わせることで複雑な動的効果を実現することは、高い革新性を持つ研究方向である。このような新たなソフト材料の開発において、制御実験の設計と性能再現性の確保も課題と考慮している。

本研究では、これらの課題に対応するとともに、新たな革新点を見出すことを目指す。これにより、ファッション分野に応用できるスマートテキスタイルのさらなる発展を促進し、多機能と持続可能なデザインを探索する。

第 3 章

デザインプロセス

3.1. コンセプトデザイン

本研究では、電子回路を必要とせず、制作の柔軟性とデザイン性を兼ね備えた磁性テキスタイルの可能性を探索する。従来のスマートテキスタイルが複雑な電子回路やコントロールしにくい物理条件に依存することに対し、本研究は、シンプルな制作工法と磁性パターンの精密な制御によって、新しい変形可能なテキスタイルデザインを提案する。これにより、デザイナーが専門的な電子工学の知識を持たなくても、容易に操作可能で高いデザイン自由度を実現する磁性テキスタイルを開発する。

研究は主に3つのアプローチに基づいて進行する。

まず、ファブリケーション手法の探索では、デジタルファブリケーション技術と従来の洋服仕立手法を組み合わせることで、柔軟性と高度なカスタマイズ性を兼ね備えた磁性テキスタイルの制作を目指す。これにより、柔らかい布地に磁性を持たせるパターンを簡便かつ効率的に作成する手法を検証する。

次に、磁性テキスタイルの制御については、コントロールの二層構造に基づいてテキスタイルの動きや変形をテストし、精密な制御を可能にするためのデザイン要素やプロセスを特定する。

最後に、変形可能な磁性パターンのデザインでは、視覚的な魅力を伴うパターンを設計し、ディスプレイの実用性とスタイル表現を備えたデザインスペースを考え、磁性テキスタイルの応用可能性を広げる。

これらのアプローチはプロトタイプ制作とユーザ向けのワークショップを通じて反復的にテストを行うことで進められる。試作を重ねることで、磁性テキス

タイルの制作可能性を探求するとともに、そのデザインスペースをより明確にする。そして、それぞれの結果から得られた知見を基に、研究の方向性を柔軟に調整し、磁性テキスタイルの性能と応用可能性を最大化する。

3.2. プロトタイプ1：動きパターン

本研究の最初の試作品「動きパターン」は、磁力制御で布がどのようなディスプレイ効果を実現できるかを探ることを目的として設計された。この試作品では、布の変形と同時にパターンの変化を可能にする二層構造を初めて提案した。試作品は展示を通じて評価され、変形する布のサンプルと磁力によるディスプレイ効果に対する観察者の反応やフィードバックが得られた。特に、視覚的な魅力とインタラクティブな動きが注目を集め、次の研究段階における設計方向性を定めるための重要な手がかりとなった。

3.2.1 実装

二層構造

磁性素材は磁場内でのみ磁力制御による運動を可能にする。しかし、日常生活において大規模な磁場を利用して服や布製品に動的な効果を与えることは現実的ではない。そこで、本研究では、磁場を外部から供給するのではなく、布製品自体が制御磁場を提供する仕組みを提案し、図 3.1 に示すような二層構造を設計した。

第一層は磁性布料で構成され、展示層として動的な変形効果を生み出す役割を持つ。第二層は制御層として機能し、磁場を生じて展示層を制御する。本試作品では、展示層の生地には小型のネオジム磁石を取り付けることで磁性を持たせた。使用した磁石は Sangyo Supply 製の丸型ネオジム磁石であり、直径は 6mm、高さは 1.5mm、吸引力は 0.56kgf である。制御層には、Flexar 12L を用いて可変電磁場を生成し、展示層の小型磁石を制御した。Flexar 12L は、小型軽量ながら高効率な 12 層 PCB アクチュエータであり、1V の電圧で小型磁石を駆動可能な磁場を

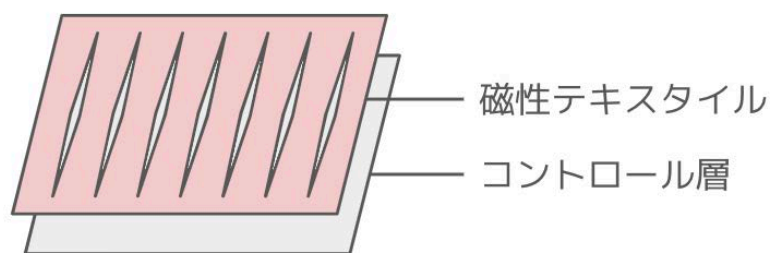


図 3.1 制御の二層構造

発生させる。この構造により、展示層の生地が制御層の磁場によって動的な変形を実現できる。

なお、本試作品では磁性テキスタイルの材料選定や制作には着手しておらず、それらは次のプロトタイプ2で詳細に探究する予定である。今回の設計では、磁力の制御が比較的容易なネオジム磁石と電磁線コイルを用いて、動的制御の基礎的な検証を行った。

ディスプレイ

本試作品では、図3.2に示すようなディスプレイ効果の実現を目指している。展示層には半透明の白い布と赤いシルクを重ね、上層布地を横方向にストライプ状にカットアウトした。この構造により、布地には横方向に並んだ複数のストライプが形成される。それぞれのストライプは独立した制御ユニットとして機能し、個別に動的な変形を実現することが可能である。上層布が変形して下層布の色を露出する際に、視覚的なパターンの変化が観察できる。

各ストライプには2つの小型磁石が取り付けられており、制御層の Flexar 12L による電磁場の反転に応じて磁石が布地を動かす仕組みになっている。Arduino を用いて Flexar 12L を制御し、電磁場の方向を毎秒2回反転させることで、布地のストライプが「パタパタ」と往復運動を行う。この動きは、単一のストライプとしては個別の動的表現を生み出し、一列のストライプ全体が同期して動作する

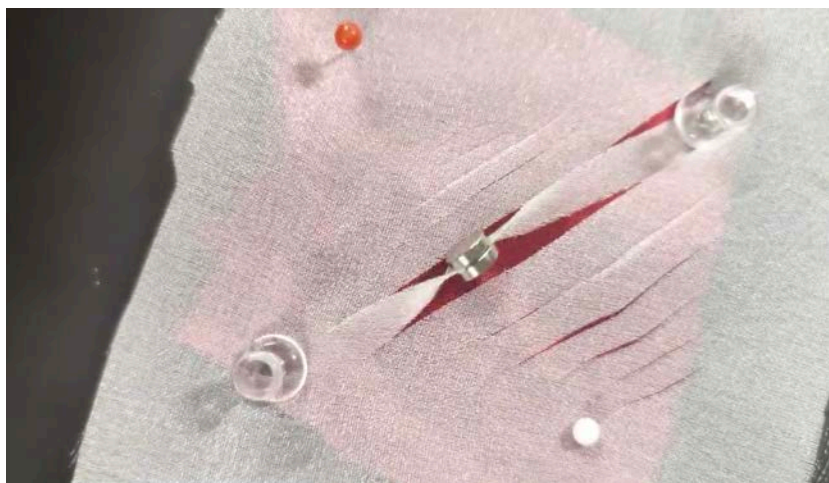


図 3.2 プロトタイプ1 のデザイン

場合には、滑らかで一体感のあるディスプレイ効果を実現する。

今回のプロトタイプでは、Flexar 12L の数量が限られていたため、単一のストライプによるディスプレイ効果の検証にとどまった。それでも、この試作品は磁力制御による布地の動的表現の可能性を示した。

3.2.2 展示

本作品は、2023 年 10 月 14 日から 15 日にかけて Maker Faire Tokyo に出展され、100 名以上の来場者が立ち止まり、そのうち約 50 名からフィードバックと評価が得られた。この展示を通じて、来場者の行動や反応を詳細に観察し、分析を行った。

展示中、跳ねる磁石の動きが来場者の注意を引き、布地の周期的な変化によって多くの人が足を止めて観察する様子が見られた。観察中、多くの来場者は作品に強い関心を示し、「これは何か」という質問をしたり、作品説明を読んだりした。作品のコンセプトを理解した後、一部の来場者は布地に触れて磁石の動きを体感しようとしたり、磁石の制御原理を知るために屈んで仕組みを観察する姿も見られた。

これらの観察結果から、以下のことが明らかになった。規則的かつリズム感の

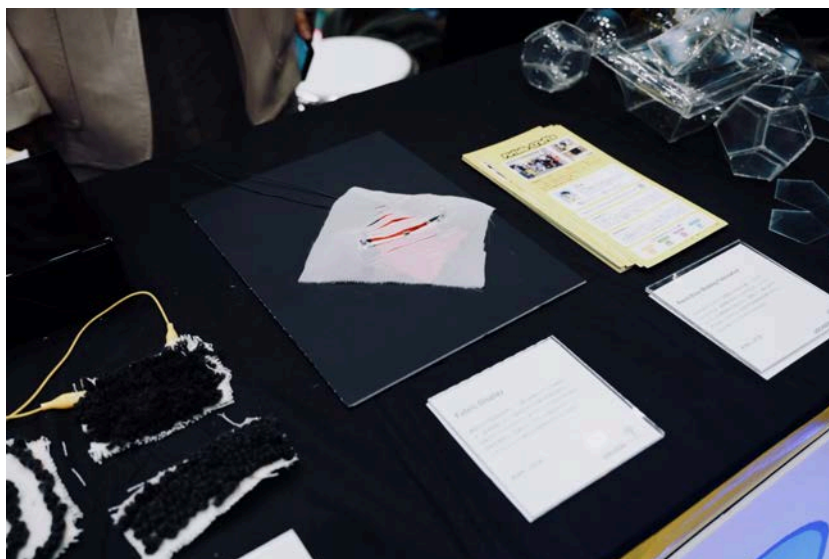


図 3.3 Maker Faire Tokyo で展示する様子

ある磁性布地の動きは、自然に人々の注意を引きつける力を持つ。また、このような布地の動的変形は一般的な布製品では見られないため、来場者にとって新奇であり、直感的に服や布製品と関連付けるのは難しいことがわかった。しかし、「未来の衣服が動的に変形する」というコンセプトを提示すると、来場者は作品に対して心理的距離を縮め、より触れてみたい、仕組みを理解したいといった意欲を示す傾向が見られた。

フィードバックと評価に関しては、主に以下のような意見に要約される：

- 未来のファッションへの期待：動的変形可能な衣服への関心は非常に高く、一部の来場者は、ファッションショーにおいてモデルの歩行に連動して衣服の模様が変化する場面を想像した。また、模様の変化によって感情を表現するアイデアや、服飾デザイナーからの共同制作の申し出もあった。
- 規則的な動きの魅力：規則的で繰り返される動きが視覚的な流動感を生み出し、自然で調和の取れたリズム感があると評価された。
- 制御精度に関する指摘：一部の服飾デザイナーからは、展示では平面布地を使用しているが、衣服の布地は通常垂れ下がるため、磁石の重さが実際の使

用時の制御精度や表示効果に影響を与える可能性が指摘された。

- 応用可能性：衣服デザイン以外にも、磁性布地をテーブルクロスに応用し、ダイナミックな表示効果を持つインテリアとして活用する提案があった。また、布地の変形による触覚フィードバックを家具やベッドに応用する可能性も指摘された。
- 安全性の懸念：磁性素材が人体に及ぼす影響や、空港のセキュリティチェックを通過できるかどうかといった懸念が示された。
- 耐久性および快適性の課題：布地が洗濯に耐えられるかどうか、また、衣服に埋め込まれた磁石が着心地に影響しないかといった懸念が示された。

3.2.3 考察

展示で得られたフィードバックと観察結果は、本研究のデザイン方向および次の研究段階に向けた重要な示唆を与えた。

まずは、本試作の目的である磁力制御で布の動的ディスプレイの可能性について明確な方向性が確認された。規則的でリズム感のある動きが来場者の関心を強く引きつけ、生地の変動的変化に自然な流れや調和を感じるとともに、その動きをじっくりと観察し、視覚的に心地よいリズムを楽しんでいる様子が見られた。この結果は、今後のデザインにおいて「反復性デザイン」の重要性を認識し、可変ユニットを規則的に配置し、自然で秩序あるデザインリズムを構築することを目指す。

次に、次の段階で行う磁性テキスタイルの制作に向けて、材料選定や布地の性能に関する示唆も得られた。布地が人体に密着する場面が多いことから、健康への影響を最小限に抑える安全な材料を使用することが求められる。また、布地が日常生活で繰り返し使用されることを想定し、洗濯や長期的な使用に耐え得る耐久性も重要である。加えて、布地が快適性を損なわない柔軟さや伸縮性を持つことが望まれる。これらの条件を満たす素材の選定が、今後の課題となる。

磁性テキスタイルの性能面では、布地の変形を制御するための二層構造システムのさらなる最適化の必要性がある。特に、布地がさまざまな環境下でパターンをデザイン通りに変形できるよう、制御精度を向上させることが求められる。

最後に、磁性テキスタイルの応用可能性についても多くの意見が寄せられた。布地を用いた動的パターンの表示は、具体的な情報伝達やスタイルの表現に活用できるし、さらに変形時に生じる触覚フィードバックを利用することで、視覚と触覚を組み合わせた多次元のインタラクションが実現できると考えられる。これにより、インテリアデザインやウェアラブルデバイス、さらには触覚を利用したインタラクティブな家具など、さまざまな分野での応用が期待される。

今回の展示を通じて得られた知見は、磁性テキスタイルの製作、パターンデザインと応用における基礎的な方向性を示すものであり、今後の研究をさらに深化させるための重要な指針となる。

3.3. プロトタイプ2：磁性テキスタイル

プロトタイプ1で得られた知見を基に、プロトタイプ2では磁性布地の製作およびその制作プロセスの探索に正式に着手する。本段階では、磁性布地そのものの特性を深く理解するとともに、これを用いて二層構造の制御システムをさらに最適化し、より高度で魅力的な磁性パターンの設計を試みる。また、磁性テキスタイルが提供する多様なデザインスペースを探索し、その応用可能性を明らかにすることを目的としている。

磁性テキスタイルにおいては、布地に適用可能な磁性素材の選定および加工技術の検討を行い、安全性、耐久性、柔軟性といった要素を考慮しながら、デザイナーに使いやすいデジタルファブリケーション手法を模索する。さらに、プロトタイプ1で提案した二層構造の改良を行い、布地がより正確かつダイナミックに制御可能となる仕組みを構築する。

本プロトタイプでは、制作した磁性布地を用いて、視覚的に魅力的で動的なパターンを設計することを目指す。これにより、磁性テキスタイルのデザインスペースを広げ、新たな表現方法や機能性の可能性を示し、次の研究段階への基盤を築く。

3.3.1 予備実験

材料の選択

磁性テキスタイルとは、生地の上に磁気層を付与することで磁性を持たせたものである。磁気層のパターンによって異なる変形効果を生み出し、ディスプレイとしての可能性を拡張する。本研究では、生地に付着可能な磁性材料の中から4つの代表的な材料（ネオジム磁石、磁性塗料、ラバーマグネットシート、磁性フィラメント）を選定し、それぞれを用いた磁性テキスタイルを試作・評価した。その結果は図3.4にまとめている。

評価指標				
制御の難しさ	△	×	△	○
ディスプレイの面白さ	△	×	△	○
生地の着心地	△	○	○	△
身体への悪影響	○	×	○	○

○：良い △：普通 ×：悪い

図 3.4 磁性材料の評価実験

まず、ネオジム磁石に関する試みはプロトタイプ1で詳述した。ネオジム磁石を伸縮性のあるカットアウト布地と組み合わせ、磁石を周期的に反転させることで、ダイナミックなディスプレイを実現した。ネオジム磁石は磁場に敏感であり、引力や斥力を用いることで豊かな動的表現が可能である。しかし、磁石そのものの磁力が強いため、複数の磁石を並べる場合に、広い間隔を空ける必要がある。また、比較的硬い布地を用いなければパターンの崩れを防げない。その結果、

布地の着用や使用時の快適性が損なわれる。一方で、磁石はすでに日常的に衣服やアクセサリで使用されており、適切に使用する限り健康へのリスクはほぼ存在しない。

次に、磁性塗料を用いて布地表面に直接パターンを描くことで試作を製作した。この試作では、磁石の吸着力を利用して布地をパターンに沿って素早く折りたたんだ。例えば、花のような形状も短時間で形成可能であった。しかし、磁性塗料は吸引力が非常に弱く、動的な表現を生み出すのは困難である。また、軟磁性材料であるため、どの方向の磁場でも引力しか発生せず、制御の可能性に課題がある。さらに、使用中に強い刺激臭を感じ、健康への懸念が浮上したため、衣服やアクセサリの素材としては適していないと判断された。

ラバーマグネットシートを小片に切り、布地に貼り付けることでプロトタイプを製作した。このシートの磁気パターンは短冊状に分布しており、布地を引っ張るとシートが弾むことで波状の動きを生み出した。引っ張る方向を変えることで、波状の幅を調整することも可能であった。ラバーマグネットシートは硬磁性材料であり、ネオジム磁石と同様に引力や斥力を発生できるが、磁力が弱いため、大きな動きには向かない。また、常温では臭気がなく、安全性は十分に確保されているが、再磁化されやすく、耐久性に課題がある。

最後に、本研究で採用した磁性フィラメントは、従来の磁性材料とは異なり磁化されないため、片方向の力でしか制御できないという制約がある。しかし、その他の性能評価では優れた結果を示した。フィラメントで印刷したパターンは硬いものの、デザイン次第で布地の柔軟性と伸縮性を保つことが可能である。特に重要なのは、平面的な柄だけでなく立体的なデザインも可能である点で、これがデザイナーに創造の自由をもたらしている。磁性フィラメントの具体的な性能評価については、次節で詳しく述べる。

磁性フィラメントの性能評価

本研究に使用している磁性フィラメントは、Proyopasta 社が開発した Iron-filled Metal Composite PLA 1.75mm である。Real Iron Powder と PLA 樹脂を混合して製造されており、強磁性（ferromagnetic）を有している。

まず、磁性フィラメントの物理特性を調査するため、異なる形にした3Dモデルをプリントした。その結果として、磁性フィラメントは鉄を引きつけないが、磁石（実験にはネオジム磁石を使用）につくことが確認された。図3.5に示したように、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する可能性を示している。

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、磁気フィラメントを磁化させることはできなかったという結果が得られた。この磁性フィラメントは軟磁性材料に属し、外部磁場が取り除かれると磁化を失い、元の状態に戻る性質を持っている。

磁性フィラメントのプリント特性およびプリンターの設定については、次節の『磁性テキスタイルのファブリケーション』で詳述する。



図 3.5 磁性飾りを服に付け

3.3.2 磁性テキスタイルのファブリケーション

テキスタイルへの3Dプリントに関する研究やプロジェクトはこれまでも数多く存在しているが、そのほとんどが専用の3Dプリンターを使用している。例えば、Polyjet方式の3Dプリンター「J850 TechStyle」が挙げられる。本研究の目的は、

デザイナーにとって使いやすいインタラクティブなテキスタイルを提供することであり、制作手法には従来の洋服仕立手法を基盤としたデジタルファブリケーションを目指している。そのため、専用機器を持たないデザイナーでも簡単に生地への3Dプリントや磁性テキスタイルの製作ができるよう、一般的なFDM方式の3Dプリントと熱転写法を組み合わせたファブリケーション手法を提案した（図3.6）。本研究に使用している3DプリンターはFlashforge社製のAdventurer 5M Proである。

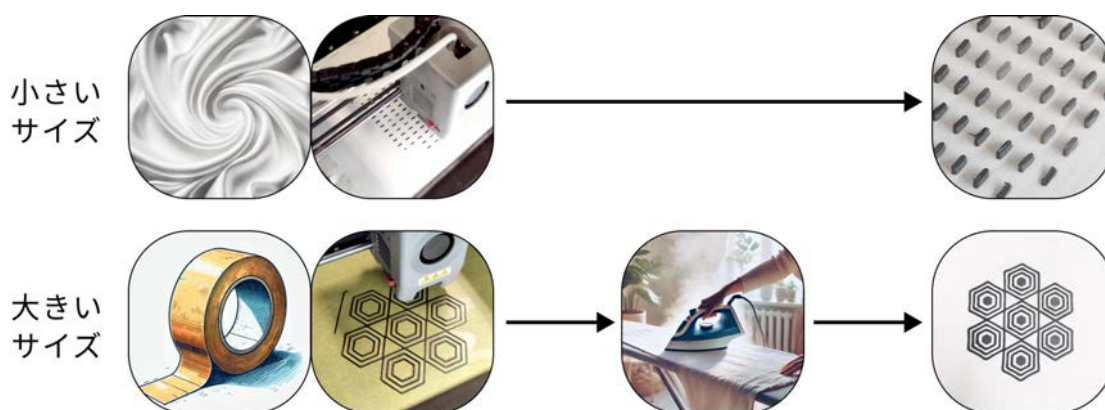


図 3.6 ファブリケーションの流れ (画像の一部は生成 AI で)

生地選び

3D プリントを行う上で、生地の耐熱性と粗面性が重要となる。

まず、プリント中にノズルの高温による生地の損傷を防ぐため、250℃以上の耐熱性が必要である。一方で、生地が厚ければ耐熱性が向上する傾向があるが、磁力による制御を効果的に行うためには、生地の柔軟性と伸縮性も考慮する必要がある。このため、生地選びにおいては耐熱性と柔軟性のバランスが重要である。

次に、表面が粗い生地は、3D プリント時に溶融したフィラメントとの接触面積が大きくなり、プリントしたパターンが生地に強固に付着する。そのため、コットン、ポリエステル、スウェードなど、織物構造または表面が滑らかでない素材が適している。本研究では、伸縮性のあるポリエステルを使用している。

テキスタイルの 3D プリント

生地サイズにより異なる対処方法がある。小サイズであれば、生地を張ってプリントプラットフォームに固定できる。プリント後に、パターンは自然に生地に付着する。大きなサイズの場合は、テープのような剥がしやすい素材にプリントする。その後、熱転写法で生地にパターンを付着させる。

生地をプリントベッドとして使用する場合、生地を四方向に均等に引っ張り、テープで固定する必要がある。本研究で使用している生地は伸縮性があるため、事前に張り詰めておかないと、プリント時にノズルの動きに伴って生地が伸縮し、パターンが歪む可能性がある。また、生地には一定の厚みがあるため、プリントごとにプリントプラットフォームの高さを調整し、ノズルが生地に接触しすぎないように注意する必要がある。

表 3.1 磁性 PLA と標準 PLA の比較 [1]

特性 (property)	磁性 PLA	標準 PLA
硬度 (toughness)	低い (low)	標準 (base)
柔軟性 (flexibility)	最小限 (Minimal)	多少あり (some)
密度 (density)	標準の 1.5 倍まで	標準 (base)
外観 (appearance)	金属質 (Metallic)	光沢あり (lustrous)
ノズル摩耗 (nozzle wear)	高い (higher)	標準 (standard)
ブリッジ性能 (bridging)	低い (poor)	良好 (good)

3D プリンターのパラメーター設定については、磁性フィラメントの特性（表 3.1）や、生地をプリントベッドとして使用する場合の特性を考慮して特別な調整を行う必要がある。Dean McClements の磁性フィラメントに関する評価 [1] を参考にすると、磁性フィラメントは通常の PLA に比べて靱性が低く、密度が高いため、プリント中に金属粉末が詰まる可能性がある。このため、プリント速度、レイヤー厚さなどの設定を細かく調整し、最適な条件を見つける必要がある。さらに、生地上へのプリントでは、生地の耐熱性と伸縮性も考慮する必要がある。ノズル温度は可能な限り低い範囲内で設定し、プリント時にストリングまたは垂直

方向に歪む場合は、プリント加速度を調整して問題を軽減できる。複数回のプリント実験を経て、本研究では最適なプリントパラメーターを確立した（表 3.2）。

表 3.2 磁性 Iron フィラメントの 3D プリント設定 [1]

プリンタ設定項目	値
ベッド温度 (bed temperature)	室温～60℃
ノズル温度 (nozzle temperature)	185～215℃
印刷速度 (print speed)	10-20 mm/s (初層); 20-80 mm/s (本体)
押出機ファンスピード (extruder fan speed)	最大 RPM の 10-20%
リトラクション (retraction)	最小限
レイヤー高 (layer height)	0.15～0.20 mm

熱転写法

熱転写印刷とは、絵柄を印刷したフィルムシートを熱と圧力を加えて生地転写する方法であり、布製品の製造に広く活用されている。その原理は、アイロンの熱圧で転写紙の粘着剤を溶かし、絵柄を生地に付着させる。アイロンの加熱温度は、磁性フィラメントの融点（200℃前後）に達するため、熱転写印刷の原理を基に、3D プリントしたパターンに適した熱転写方法を設計した。

図 3.7 に示すように、従来の熱転写とは異なり、アイロンは生地の表面ではなく裏面にかけるべきである。3D プリントしたパターンを表面に固定し、パターンと生地の接点でフィラメントを溶かすために、裏面の相対位置にアイロンをあてる。この作業を短時間で数回繰り返すことで、パターンが生地にしっかりと付着する。生地の裏面から磁性フィラメントが透けて見えるようになれば、パターンがしっかりと粘着したことを示している。ただし、過熱するとパターンを変形させるリスクがあるため、長時間加熱は避けるべきである。

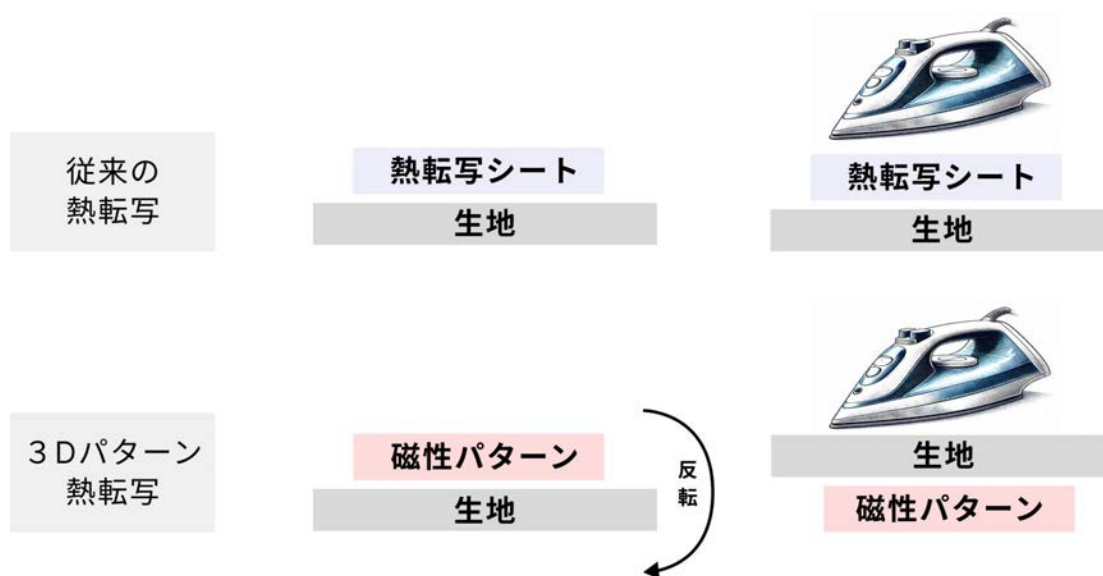


図 3.7 熱転写法の改善 (画像の一部は生成 AI で)

3.3.3 磁性テキスタイルの制御

プロトタイプ1で提案した二層構造を基に、本試作では展示層と制御層の磁性材料の特性に基づいて制御方法をさらに調整した。本試作では、展示層に軟磁性材料の磁性フィラメントを使用し、制御層にはネオジム磁石を採用している。軟磁性材料はネオジム磁石によって一方向にのみ吸引されるため、二層が相対的に静止しているだけでは動的效果は生まれない。そのため、展示層と制御層を相対的に動かし、展示層のパターンが引かれる状態と引かれない状態を繰り返すことで動的な効果を生み出す制御方法を採用した。

この制御方法では、相対的な動きの中で見られる動的な効果、ならびに相対的に静止した際の制御層の異なる磁性パターンによる展示層の図案変化という二つのデザインポイントに焦点を当てている。

次に、ネオジム磁石による磁性パターンの変形モードを探る必要がある。試験として布地上に立体的な長方体をプリントし、ネオジム磁石と相互作用させる実験を行った。その結果、2つの変形モードが得られた (図3.8)。1つ目は、ネオジム磁石が長方体を吸引し、磁石を周囲に移動させることで布地が変形し、布地の平面上での変形モードである。2つ目は、長方体の上端がネオジム磁石に吸引さ

れて前方に倒れ、布地の垂直面上での変形モードである。

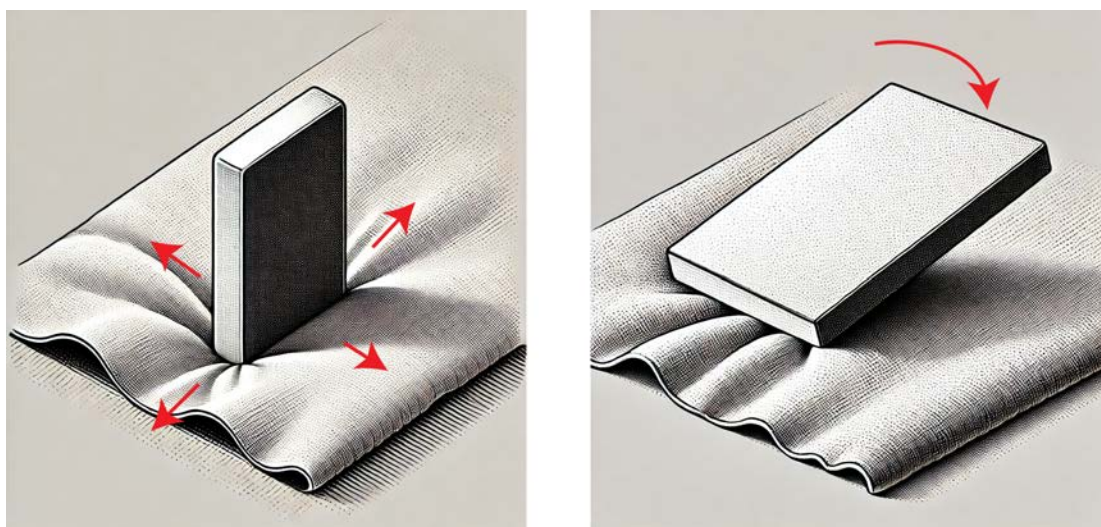


図 3.8 磁性テキスタイルの変形モード (生成 AI)

3.3.4 磁性パターンの設計

異なる磁性パターンにより、テキスタイルが異なるダイナミックなディスプレイを生み出す。磁性パターンの2種類の変形モードと生地特性に基づき、六角形移動パターン、直立パターン、半円パターンの3種類の磁性パターンをデザインした。それぞれのパターンは、単一の基本形状を規則的に配置して構成されている。

六角形移動パターン（図 3.9-a） 平面パターンとカットアウトというファッション仕立てを組み合わせたデザインである。カットアウトによって生地が弱まり、パターンが部分的に動かせる。磁気制御により、平面のディスプレイが実現できる。

直立パターン（図 3.9-b） ドミノ型の規則的な立体パターンである。コントロール層に引かれ、薄片が一枚ずつ前に倒れ、立体的な視覚効果を生み出しながら、

人に聴覚や触覚の刺激も与えられる。また、個々の薄片の表と裏を異なる色で塗ることで、前後の動きがダイナミックな色の変化をもたらす。デザインプロセスについては、節 3.5 に記述されている。

半円パターン（図 3.9-c） 布地の伸縮性を利用し、平面パターンを立体化させる特殊なデザインである。Alberts の 4D テキスタイル [41] の原理に基づき、カットアウトの仕立てを組み合わせる鱗柄のパターンをデザインした。4D テキスタイルは、伸縮性のある生地を張り広げた状態で 3D プリントしており、生地を自然な形に戻すと立体的な形状へと自動的に変形する。パターンに沿って切り込みを入れると、鱗柄が自動的に弓なりに曲がって開いていく。コントロール層を入れると、鱗柄が上下に開閉し、面白いダイナミックな効果が生まれる。同時に、生地を変形しながら下の層も見えるようになるから、色の変化もできる。

3.3.5 展示：Interaction 2024

本研究で設計した 3 種類の磁性パターンのサンプルは、2024 年 3 月 8 日に一般社団法人情報処理学会シンポジウム「Interaction 2024」で展示され、インタラクティブ発表賞を受賞した。当日のデモ発表では、独特なパターンと新しいインタラクティブ体験が来場者の注目を集め、多くの人が実際に体験した。多数の肯定的な評価を得るとともに、今後の研究に役立つ貴重なフィードバックと提案を収集した。

得られた好評のポイントは以下の通りである：

- パターンデザイン：「非常に個性的で印象的」、「半円パターンが魚の鱗のようで可愛い」、「立体的なパターンの手触りが特別」
- 動的ディスプレイ：「予想外の動きが面白い」、「動いている様子が癒される」、「直立パターンの動きによる色の変化がピクセルアートのように新鮮」
- 制作手法：「普通の 3D プリンターで作れるのは非常に便利」、「想像以上にパターンがしっかりと生地固定されている」、「自分でも磁性布地を作ってみたい」

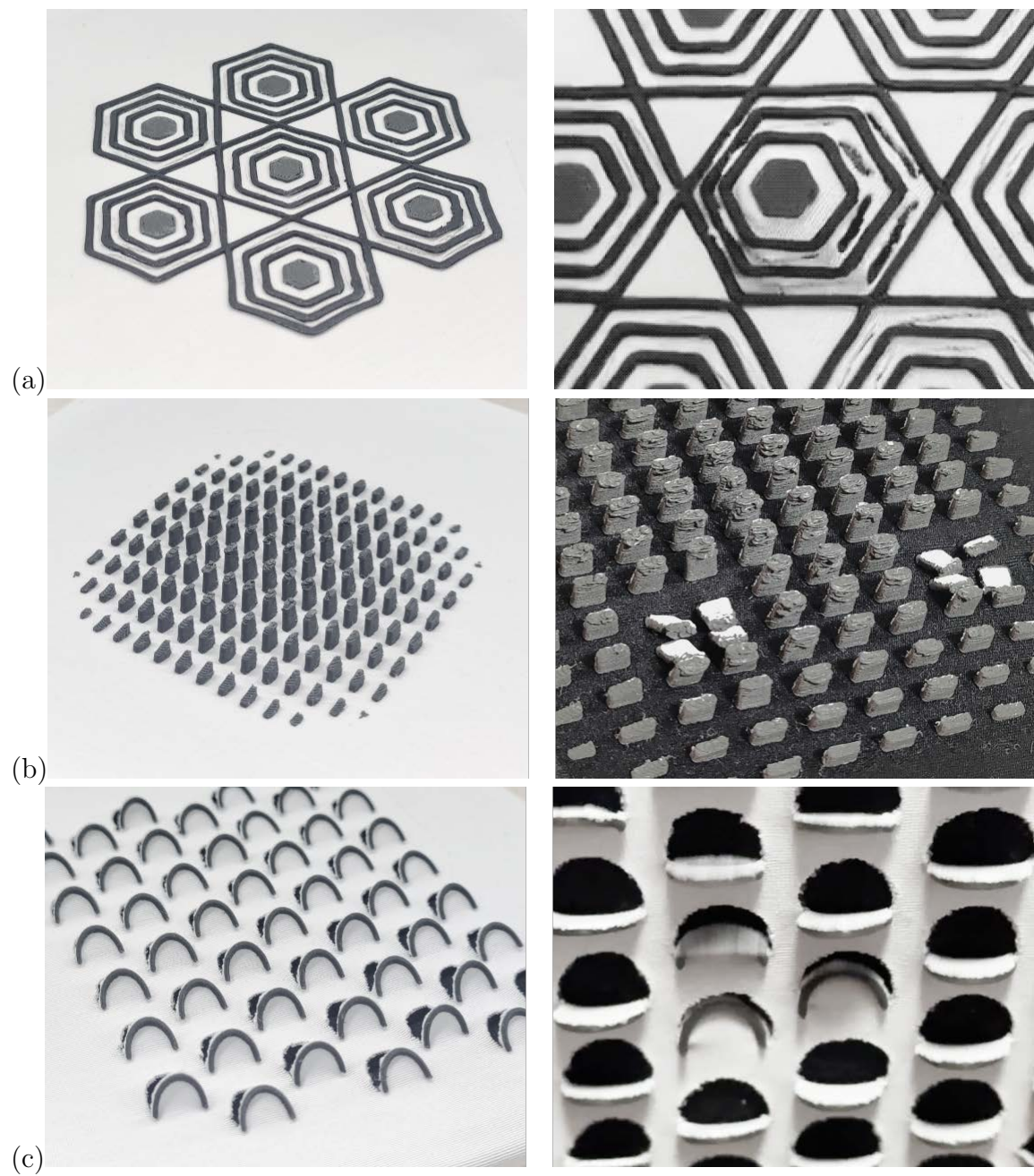


図 3.9 3種類の磁性パターン



図 3.10 Interaction 2024 で展示する様子

以下のフィードバックや提案が次の研究課題やデザインの可能性を示した：

- 制御に関する課題：「これを衣服に応用した場合、どのように動きを制御するのか想像が難しい」、「人間の自然な動きによる影響と設計された動きの違いをどう捉えるか」、「衣服を動かす理由がやや曖昧に感じる」
- 応用に関する提案：「ファッション以外の応用シーンも必要」、「視覚と触覚の両方で利用できるディスプレイとして、盲人に便利なデザインが考えられる」、「異なる磁性パターンを磁気センサーで識別し、NFCのような近距離通信に応用できる可能性」

3.3.6 考察

展示を通じて、磁性布地の表現効果については初期目標をほぼ達成できたと評価できる。サンプルのパターンは非常に興味深く、多様な動的ディスプレイ効果を示した。しかし、多くの来場者が「この布地がどこでどのように使われるのか」という具体的な用途をイメージするのは難しいと感じていることが明らかになった。

このため、次の研究課題として、磁性布地と3種類の動的パターンを用い、具体的な使用シーンを想定した布製品の応用を制作することが挙げられる。これにより、磁性布地の実用性と応用可能性をさらに明確にする。具体的な制作プロセスについては、第4章で詳述する。

さらに、磁性布地のディスプレイデザイン自体は評価されたものの、その制作プロセスがデザイナーのニーズを満たしているかどうかはまだ十分に確認できていない。そのため、次のステップとしてワークショップを実施し、ユーザーに磁性布地の制作プロセスを実際に体験してもらい、そのフィードバックを収集することで、制作手法をさらに最適化することを目指す。

3.4. ワークショップ1：未来の服

本ワークショップは、本研究で開発した磁性テキスタイルや他のスマートテキスタイルを活用し、高校生が未来の服装について創造的なデザインを行うことを目的として実施された。このワークショップでは、参加者が磁性テキスタイルの基本的な制作方法を学び、さらに導電性布料やスマート布料を組み合わせることで、動的かつインタラクティブな服装を制作するプロセスを体験した。

特に、50年後の未来を想像しながら、服装に求められる機能性や表現性を議論し、それをデザインに反映することで、素材の特性を最大限に活用する方法を模索した。参加者はチームで協力し、創造的なアイデアを実現する過程を通じて、布料の特性や技術的な可能性に対する新しい視点を得た。また、制作活動を通じて、磁性テキスタイルの具体的な課題や改良点を明らかにし、未来の服装に応用する際の方向性が見えてきた。

3.4.1 概要

時間 2024年5月20日と5月21日の2日間

対象 シンガポール芸術学校（以下 SOTA と略記）の高校生4名

テーマ 未来の服装をデザインする

目的 参加者は磁性布料や他のスマートテキスタイルなど多様な先端素材の特性と応用可能性を理解させるとともに、チームで協力して未来の衣服を制作する体験を通じて、創造的なデザインプロセスを学ぶ。

日程と構成 本ワークショップは2日間にわたり実施され、全体で6時間の構成となっている。

- 第1日目

- － イントロダクション（30分）：ワークショップの概要、目的、提供素材とサンプルの紹介、基本的なデモンストレーション。
- － デザインプロセス（1時間）：各チームで未来の服装のコンセプトをスケッチし、アイデアを具体化する。
- － 制作プロセス（1.5時間）：磁性テキスタイルや他のテキスタイルを使用した制作を開始。3Dプリンターを用いて磁性パターンを作成し、各チームのコンセプトに基づいた作品を進める。

- 第2日目

- － 制作プロセス（2.5時間）：前日の作業を引き継ぎ、未来の服装の完成を目指して制作を続行。
- － 発表とディスカッション（30分）：各チームが制作した作品を発表し、デザインの背景や意図を説明。参加者同士やファシリテーターとの意見交換を行う。

提供された材料 磁性テキスタイル、磁石、導電性糸、LED、3Dプリンター、導電性生地などが含まれ、実験的な制作環境をサポートした。

期待される成果

- 未来の服装を1点完成させる。
- 磁性布料と他のスマートテキスタイルの応用可能性に対する具体的な洞察を得る。

3.4.2 結果



図 3.11 ワークショップ1の様子

制作の成果

参加者は、心拍のリズムをモチーフにした未来の服装を制作した。心臓の位置を中心に広がる花のパターンをデザインし、布地の背面に配置した磁石を利用して布の動きを制御する仕組みを実現した。また、心臓の中心を象徴する部分にLEDを組み込み、導電性の糸で回路を構築。布地が開閉する際にLEDが点灯する仕掛けを試みた。さらに、心拍に基づく波状のC字型パターンを採用し、視覚的に魅力的な動きと美しいデザインを融合させた作品を完成させた。

参加者の反応

参加者からは以下のような意見やフィードバックが得られた：

- 肯定的な評価
 - － 花を模したデザインや布地の動きが美しく、視覚的に非常に印象的であるとの評価を得た。



図 3.12 未来の服：心拍の花

- － 「磁性テキスタイルが複雑な機械や電子回路を必要とせず、比較的シンプルな制作プロセスで多彩な効果を生み出せる点が魅力的」との意見が見られた。
- － 「心拍という人間的な特徴を未来の服装に取り入れるアイデアが非常にユニークで興味深い」との声が多かった。

- 課題の指摘

- － 磁石の磁力が強すぎて、回路の動作に問題が発生するなど、機能面で改善の余地があることが指摘された。
- － 3D プリントしたパーツが布地にしっかり固定されず、剥がれる問題があるため、より適切な接着方法や布地の選定が必要との意見があった。

ワークショップ中の観察

参加者は磁性テキスタイルの制作方法に対して非常に高い興味を示していた。特に、3D プリントを用いた磁性パターンの制作や、それを布地に適切に固定する

工程において、積極的に試行錯誤を行う姿が見られた。

最初に制作手順を説明したものの、実際の操作段階ではいくつかの問題に直面していた。例えば、プリントしたパターンを布地にしっかりと固定する方法や、磁石の位置と布地の動きを連動させる際の課題が挙げられた。これらの課題に対して、参加者は加熱時間や接着方法を工夫しながら解決策を模索し、一部では問題を解決する進展も見られた。

また、参加者同士で意見を交換しながら実験を繰り返すことで、磁性布料がどのように動き、どのようにデザインと連動するのかについての理解を深める場面も多かった。このような過程を通じて、参加者は磁性布料の特性と応用方法について実践的な学びを得ることができた。

3.4.3 評価と考察

本ワークショップを通じて、磁性テキスタイルの制作や応用における重要な知見が得られた一方で、制作プロセスや制御層の設計において課題が明らかになった。特に、参加者が3Dプリントした磁性パターンを布地に固定する過程で、多くの困難に直面していた点が目立った。プリントしたパターンが布地から剥がれやすい、または磁性パターンが期待した動作を示さないといった問題が頻発していた。これらの問題は、接着方法や布地の選択に関する知識不足だけでなく、加熱時間などの具体的な条件が明確でなかったことに起因すると考えられる。このような状況から、制作手順をより明確化し、誰もが容易に磁性布料を作成できる詳細なガイドラインの整備が急務である。

また、磁性テキスタイルの動作を支える二層構造の制御層においても、設計や配置の精度不足が明らかになった。制御層に用いる磁石の配置や距離が不適切である場合、展示層の動きが制御できず、デザイン意図を十分に反映させることができない場面が見られた。制御層の設計においては、磁石の強度、展示層と制御層の距離や相互作用を定量的に評価する指針を確立する必要がある。これにより、磁性テキスタイルの動きやパターンデザインの自由度が大幅に向上する可能性がある。

今後の研究では、これらの課題を解決するため、制作プロセスと制御構造の両面でさらなる改良を重ねていく予定である。具体的には、制作条件を明確にし、各プロセスを定量化することで、誰もが理解し、学びながら磁性テキスタイルを制作できるようなデザインガイドの作成を目指す。また、制御層の精密な設計を実現することで、衣服や布製品における磁性テキスタイルの応用範囲を広げ、より実用的かつ創造的なデザインを可能にする基盤を構築していく。

3.5. ファブリケーションガイドの設計

3.5.1 概要

本章では、これまでの研究およびワークショップを通じて明らかになった課題を解決し、磁性テキスタイルの制作プロセスを効率化および標準化するためのファブリケーションガイドを設計する。このガイドの目的は、誰でも再現可能で、磁性テキスタイルを活用した創造的なデザインが実現できる制作手順を提供することである。

現在までに設計された3種類のパターン（六角形移動パターン、半円パターン、直立パターン）の中で、直立パターンはこれまでの研究や展示で最も高く評価され、動的効果においても大きな可能性を示している。一方で、制作条件が最も複雑で、定量化された基準が求められる部分も多い。このため、本章では直立パターンを例に取り上げ、標準化された制作フローを設計する。もしこのガイドラインを活用して直立パターンをスムーズに制作し、期待どおりの動的効果を実現できれば、他の2種類のパターン制作も容易に実現できる。

ファブリケーションガイドは以下の4つのセクションで構成されている：

1. 作業準備: 必要な材料（磁性フィラメント、生地、3D プリンター、ネオジム磁石など）と設備をリストアップし、制作環境（温度、湿度など）の条件を整える。また、制作時の安全性についても注意を促す。
2. パターンデザイン: パラメトリックデザインを活用し、形状、サイズ、間隔を調整可能なテンプレートを作成する。これにより、効率的かつ柔軟にデザ

インが可能となる。

3. 3D プリントと熱転写: 磁性フィラメントの特性に基づき、3D プリンターの設定（温度、速度、厚みなど）を詳細に定義し、布地への固定プロセスを熱転写法を用いて標準化する。
4. 制御効果のデザイン: 制御層の磁石配置、展示層との距離調整、動的効果を最大化するための具体的な手順を示す。制御実験で得られたデータを基に、 15×15 のコントロールマトリクスの設計を含む精密な組み立て方法を提案する。

このうち、作業準備と 3D プリントと熱転写については、Prototype2 の設計中に既に詳細に説明されている。これらの部分では、必要な材料の選定やプリント条件、熱転写法による布地への固定方法が具体化されており、既存の内容をそのままガイドに取り込む。一方で、制御効果のデザインやパターンデザインについては、現在の段階でまだ定量化されていない部分が多い。この部分の内容については、本章で詳しく説明する。

最後に、これらの内容を統合し、図解付きのファブリケーションガイドとしてまとめる。このガイドは、初心者でも簡単に磁性テキスタイルを制作し、動的なデザインを実現できるようにするだけでなく、今後の応用研究や実践の基盤となることを目指している。

3.5.2 制御効果のデザイン

本節では、磁性テキスタイルの動的表現を精密に制御するため、表現層と制御層の設計を体系化し、その設計要件を定量化する。特に、表現層における動的パターンの生成と、制御層における磁場の設計が、全体の動きの品質や多様性に大きく影響を与える。これらを効率的に最適化するために、本節では以下の 3 つの制御実験を実施する。

さらに、これらの制御実験から得られた結果を統合し、制御層の磁石配列を設計する。各制御単位を独立させつつ、細かい動きを組み合わせることで複雑なパターンを生成する基盤となる。

制御実験 1：プリントサイズと制御効果

本実験では、表現層における単一立方体のサイズや隣接パーツとの間隔が、動的パターンの連続性や滑らかさに与える影響を評価した。

まず、隣接パーツとの間隔については、列間隔（d）と行間隔（D）の2つの数値を設定した。列間隔は、立方体が前傾する際に、前の立方体を完全に覆わない、または半分だけ覆う範囲が最適であることが確認された。そのため、d の範囲は立方体の高さの1倍から1.5倍が適切である。また、D についてはデザインの美観を重視し、幅の1.5倍から2.5倍の範囲が推奨される。

次に、単一立方体のサイズに関する実験では、高さ（H）、幅（W）、長さ（L）を変化させ、それぞれがパターンの視覚効果に与える影響を評価した。結果（図 3.13）として、高さが増加すると傾斜角度が大きくなり、動きが視覚的に目立つことが分かった。一方、長さが増加すると、磁力の集中が強まり、布地の動きが顕著になるものの、長すぎる場合には摩擦が増大し動作が不安定になる傾向が確認された。幅については、一定の値で評価を行い、過度に広い場合には接地面積の増加が動きを妨げる可能性が示唆された。

結論として、最適なプリントサイズは高さ 7.5mm、幅 5.5mm、長さ 1.2mm である。ただし、この実験は限られた条件下で行われたものであり、実際のデザインには柔軟性がある。基本的には、立方体形状が長さが幅の半分以下、高さが幅を超える薄片構造であれば、動的パターンを実現可能である。

表 3.3 薄片のサイズ

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

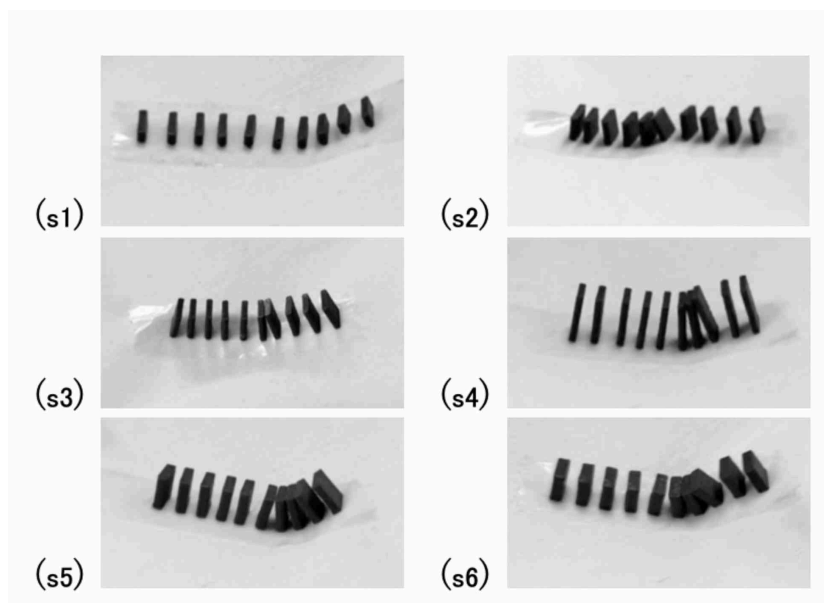


図 3.13 制御実験 1 の結果

制御実験 2：磁石種類と制御効果

磁性フィラメントの動作を最適化するためには、制御層に使用する磁石の特性が重要である。同一の軟磁性材料に対して、その磁化強度は主に磁石の表面磁束密度、形状、サイズに依存する。特に、表面磁束密度が同一であっても、磁石の形状や大きさが異なる場合、外部磁場の分布が変化し、それに伴いフィラメントへの磁化効果にも差異が生じることが知られている。

磁石の形状が外部磁場分布に与える影響として、磁力線の集中度および分布範囲が挙げられる。例えば、円柱形磁石では磁力線が軸方向に集中するため、局所的に強い磁場が形成される。一方で、長方体磁石は広い面積にわたる均一な磁場分布を持ち、複数のフィラメントを同時に制御する用途に適している。

また、磁石の大きさも外部磁場の特性に影響を与える。同じ形状の磁石であっても、体積が大きい場合、内部の磁化量が増加することで、外部に広がる磁場の分布範囲が拡大する。この結果、フィラメントに作用する磁場の強度や安定性が向上する一方で、隣接する磁石間の相互干渉が増加する可能性も考慮すべきである。

以上の特性を踏まえると、磁性フィラメントの動的効果を最適化するためには、

磁石の形状と大きさを設計条件に応じて慎重に選定する必要がある。本研究では、異なるサイズおよび形状のネオジム磁石を用い、それらが磁性フィラメントの動作に及ぼす影響を詳細に評価した。

本実験では、異なるサイズ、形状、および表面磁束密度を持つネオジム磁石を使用し、それぞれが磁性フィラメントの動作に与える影響を評価した。まず、図 3.14 に示したように、磁性フィラメントを固定し、磁石をフィラメントから徐々に近づけ、フィラメントが動き始める最小距離（最大制御距離）を測定した。また、磁性パターンの動作を評価するために、同一の直立パターンのサンプルを使用し、異なる磁石を用いてその動作の変化を観察した。磁石の特性（表面磁束密度や形状）に応じて、図案が微妙に収縮する、部分的に傾く、完全に前倒しするなどの動作を示し、それぞれを分類して記録した。この測定を複数回繰り返し、磁石の特性とパターンの動作との関係を明らかにした。

実験の結果（表 3.4）、磁石の表面磁束密度が高いほどフィラメントに作用する磁力が強まり、より明確な動作（部分的に傾く、または完全に前倒）が得られることが確認された。一方で、表面磁束密度が低い磁石やサイズが小さい磁石は「軽微な傾き」に留まり、視覚的インパクトが不足することが判明した。

結論として、動的パターンの表現には、部分的に傾くまたは完全に前倒する動作を実現できる磁石が適しているが、磁力が強すぎる磁石は摩擦や干渉を引き起こしやすいため、慎重な選定が必要である。本研究では、円形磁石では m6（ $\phi 8 \times 4$ ）、角型磁石では m10（ $50 \times 4 \times 4$ ）が、動作の視覚効果と制御精度のバランスに優れていることが示された。また、円形磁石は、狭い範囲で磁場を集中させる能力に優れ、単一のパーツを正確に制御する場合に適している。一方で、角型磁石は広い面積にわたる均一な磁場を生成し、複数のパーツを同時に制御する場合や、大規模なパターンに対して効果的であるデザインの要求に応じて磁石の選定を調整することで、さまざまな動的表現に対応可能であることが明らかとなった。

制御実験 3：磁石間の相互作用の測定

本実験では、制御層に配置された磁石が互いに引き合う相互作用が層全体の安定性と制御精度に与える影響を評価し、最適な磁石間距離を決定することを目的

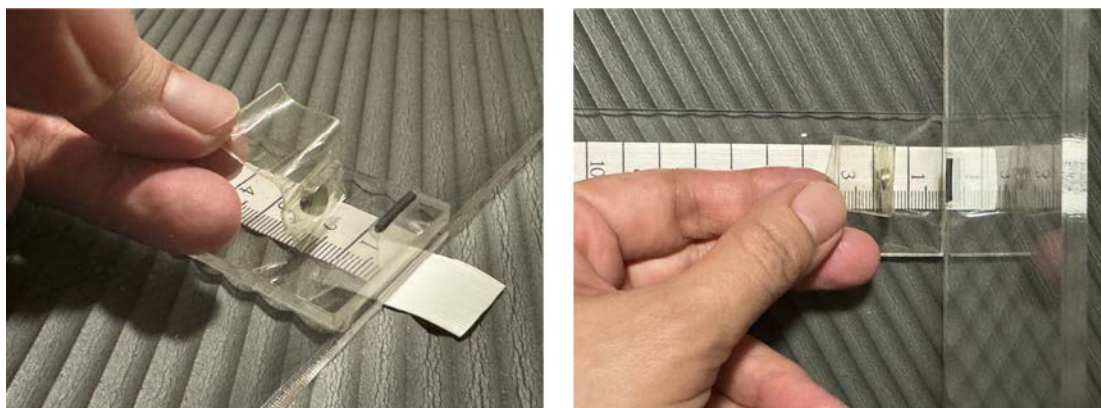


図 3.14 制御実験 2(左) と制御実験 3(右) の様子

表 3.4 磁石の制御実験結果

番号	形状	サイズ (mm)	表面磁束密度 (mT)	吸着力 (kgf)	最大制御距離 (mm)	磁性パターンの動作	相互作用距離 (mm)
m1	円形	$\phi 4 \times 1.5$	310	0.29	5.5	軽微な傾く	18.0
m2	円形	$\phi 5 \times 1.5$	260	0.38	6.5	軽微な傾く	19.0
m3	円形	$\phi 6 \times 1.5$	250	0.56	7.0	軽微な傾く	22.0
m4	円形	$\phi 6 \times 3$	385	0.84	8.0	部分的に傾く	28.0
m5	円形	$\phi 8 \times 2$	260	1.0	7.5	軽微な傾く	27.5
m6	円形	$\phi 8 \times 4$	400	1.5	10.0	完全に前倒	33.0
m7	角型	$15 \times 2 \times 2$	311	0.9	4.5	軽微な傾く	—
m8	角型	$50 \times 2 \times 2$	305	4.1	6.5	軽微な傾く	—
m9	角型	$50 \times 4 \times 2$	254	5.2	7.0	部分的に傾く	—
m10	角型	$50 \times 4 \times 4$	363	6.8	8.0	完全に前倒	—

とした。磁石間の相互作用が強すぎると、制御層が意図せず変形し、表現層の動的パターンが不安定になる可能性があるため、適切な間隔を設計条件として確立する必要がある。

実験は、異なるサイズと特性を持つ6種類の磁石を使用し、相互作用距離を測定する方法で行われた。具体的には、図3.14に示したように、アクリル板の上に磁石を一つ固定し、もう一つの磁石をゆっくりと近づけ、磁石同士が引き合って吸着する瞬間の距離を記録した。この測定を3回繰り返し、平均値を相互作用距離として採用した。使用した磁石は直径や厚さが異なり、それぞれの表面磁束密度と吸着力も異なることで、多様な条件下での相互作用を確認できるように設計した。

実験の結果（表3.4）、磁石のサイズが大きいほど、また表面磁束密度が高いほど相互作用距離が長くなることが確認された。また、直径4mm、高さ1.5mmの小型磁石（m1）ですら、相互作用距離が18.0mmあり、これはフィラメントとの最大制御距離（5.5mm）と比較してもはるかに長い。この結果は、特に精密な動的ディスプレイを設計する場合には、相互作用距離が過度に広いことが制御精度を妨げる要因となった。

結論として、制御層が柔軟な素材で構成されている場合、磁石間の最適な間隔は相互作用距離に10～20%の余裕を加えた値が推奨される。例えば、m6を使用する場合は36～40mm程度の間隔が適切である。一方、間隔が広すぎると精密な表示効果が難しくなるため、精密な動作を必要とする場合には、制御層に硬い素材を使用するか、弾性のある布地を用いて制御層を皮膚や他の物体表面に密着させることで、磁石間の相互作用を抑制することが求められる。このような工夫により、安定性と精度の両立を実現する制御層設計が可能となる。

制御層のデザイン

制御層は、磁性テキスタイルの動的な動作を実現するために、磁性フィラメントに対して正確かつ安定した磁場を提供する重要な構成要素である。本研究では、前述の実験結果を基に、制御層の最適化を図るために、円形磁石（ $\phi 8 \times 4$ ）と角型磁石（ $50 \times 4 \times 4$ ）の2種類の磁石を使用し、それぞれの特性を活かした3種

類の磁石配置（図 3.15）を設計した。また、磁石間の距離を最小化し、より精密な制御を可能にするために、泡沫板を用いて制御層を製作した。

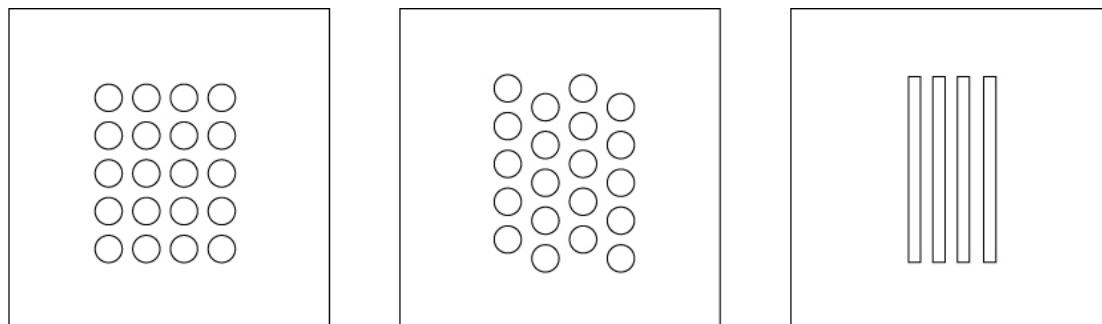


図 3.15 3種類の磁石配置

まず、格子状配置では、磁石を等間隔で配置し、ピクセル点のように簡単な図案や文字を形成することを目的としている。この配置は、各磁石が独立して動作し、制御層全体が均一に作用するため、単純かつ明確なパターンを生成するのに適している。また、行列間隔が正確に設定されることで、制御精度が向上し、安定したパターン表示が可能となる。

次に、対角線配置は、格子状配置を基盤にしつつ、隣接する列を互いにずらして配置する形式である。この配置は、同じ行列間隔を維持しながら、磁石間の相互作用を軽減する効果がある。特に、磁石の密度が高い場合でも、磁場の干渉を最小限に抑えるため、複雑な動的パターンや曲線的な図案を生成する際に有効である。

最後に、縦線配置は、磁石を縦方向に直線的に並べることで、同一列の磁石が同時に動作することを強調する。この配置は、布地の線状の変形や縦方向の波動効果を表現するのに適しており、動的な視覚効果を強調するデザインに向いている。また、角型磁石（ $50 \times 4 \times 4$ ）のような広範囲に均一な磁場を形成する磁石を使用することで、複数列の一貫した動作を確保することが可能となる。

これらの3種類の配置は、それぞれ異なる動的表現を実現するための基盤となり、用途やデザイン要件に応じて自由に組み合わせることで、より複雑なパターン変化を創造できる。しかしながら、精密な制御は布地と比較的硬い物体との相互作用に適しており、より繊細な動きを実現できる。一方で、服装用途の場合に

は、磁石間の間隔を適度に広げることが推奨される。これにより、動作の安定性を確保しつつ、布地の柔軟性と着用時の快適性を損なわない設計が可能となる。

3.5.3 定量化のパターンデザイン

本節では、パターンデザインに必要なすべての設計パラメータを定量化し、効率的にカスタマイズ可能な設計フレームワークを提供することを目指す。これにより、簡単なパターンの作成には Tinkercad 上でのテンプレートを利用し、複雑なパターンデザインには他の 3D モデリングソフトを活用する柔軟なワークフローを構築する。

表 3.5 に示したように、制御実験の結果に基づき、パターン設計時に以下の主要パラメータが明らかになった：

表 3.5 パターンデザインの主要パラメータと推奨値

パラメータ	値（推奨）	設計自由度/説明
単一立方体のサイズ		
幅（W）	5.5 mm	一定の幅を維持、デザイン要件に応じて調整可能
高さ（H）	7.5 mm	$H > W$ 、目立つ動きにはより大きい高さが必要
長さ（L）	1.2 mm	$L \leq 0.5 \times W$ 、薄片構造を維持
立方体間の間隔		
列間隔（d）	6.5	$0.5 \times H \sim 1.5 \times H$
行間隔（D）	10	$1.5 \times W \sim 2.5 \times W$
ピクセル単位の配列		
行数	可変	デザイン要件に応じて調整可能
列数	可変	デザイン要件に応じて調整可能

パターン設計時には以下の論理的な手順でパラメータを設定することが推奨される。

まず、設計する図案の全体的な大きさに基づいて、基準となる立方体の幅（W）を決定する。次に、決定した幅を基準として、立方体の高さ（H）や長さ（L）を

設定する。特に、 H は W を上回り、 L は W の半分以下となる範囲で設計することで、動的パターンの視覚的効果を最大化できる。さらに、立方体間の列間隔 (d) と行間隔 (D) は、幅と高さを基準に適切な範囲内で調整し、デザインの一体感と動作の連続性を確保する。

最後に、デザインの要求に応じてピクセル単位の配列 (行数と列数) を設定することで、全体のパターンレイアウトを完成させる。このようにパラメータを段階的に設定することで、効率的かつ柔軟に様々なパターンデザインが可能となる。

Tinkercad を活用して構築したテンプレートは、パラメータ化された直立パターンの効率的なデザインを可能にする。図 3.16 に示したように、必要なパラメータの変更箇所が明確にマークされており、ユーザーはこれらの部分を修正するだけで、希望するパターンを容易に生成できる。また、推奨基本パラメータに基づき生成されたサンプルデザインは、直立パターンの基本的な動作特性を保持しながら、美観と機能性を両立している。このテンプレートは、単純なデザインだけでなく、より複雑なパターン設計の出発点としても活用でき、さらなる拡張性を提供する。



図 3.16 Tinkercad のデザインテンプレート

3.5.4 ファブリケーションガイド

これまでの研究結果を基に、磁性テキスタイルを効率的かつ精密に制作するためのファブリケーションガイドを設計した。このガイドは、作業準備からパター

ンデザイン、3D プリントと熱転写、制御効果のデザインまでの全体プロセスを体系化している。特に、定量化されたパラメータや実験結果を反映し、各プロセスにおける設計基準や制作手順を明確に示している。

設計されたガイドは、具体的な手順や注意点を図解付きで詳述しており、附録に収録している。また、このガイドの有用性を確認するため、第5章においてデザイナーを対象に実施する評価実験で実際に使用してもらい、磁性テキスタイルの制作を行う予定である。制作を通じて得られたフィードバックを基に、ガイドをさらに改良し、より実用的で完成度の高い内容に仕上げる。

第 4 章

応 用

本章では、磁性布料の応用可能性を探究し、具体的な製品制作と展示を通じてその実用性とデザイン性を評価する。触感フィードバックや内容物の可視化といった機能を備えた磁性布料の新しい応用事例を制作し、これらが日常生活やデザインの領域でどのように活用できるかを実証した。また、これらの試作品を展示することで、デザインや機能性に対する多様なフィードバックを収集し、磁性布料のデザイン空間から応用空間への発展を検証した。これらの成果は、磁性布料の応用可能性をさらに広げるための基盤となるものである。

4.1. 触覚フィードバック付きカップホルダー

本プロトタイプは、日常生活での観察を起点に、ユーザーの無意識の動作と磁性布料の特性を融合させた設計となっている。観察から、多くの人がカップを持つ際、無意識にカップホルダーを回転させる動作を行うことがわかった。この行動に着目し、磁性布料の制御層をカップ本体に組み込み、ホルダーを展示層にする。ホルダー回転させることで磁性パターンが動的な効果を生み出すデザインを提案した。

具体的には、カップホルダーを回転させると磁性パターンが変形・動作し、視覚的な動きが発生する。また、ユーザーが手で磁性パターンを覆いながらホルダーを回転させることで、布の立体的な構造が手のひらに触感としてフィードバックされ、従来にはない触覚体験が得られる仕組みとなっている。

この設計は、使用者の無意識の動作を取り入れることで、触覚や視覚を通じた感覚情報を補強し、製品への愛着や新たな使用体験を生み出す可能性を秘めている。

る。こうした無意識の行動との自然な融合は、磁性布料のデザイン空間をさらに拡張する可能性を示している。



図 4.1 カップホルダーのデザイン

4.2. 内容物表示機能付きポケット

このプロトタイプは、磁性テキスタイルの動的効果を活かし、内容物の識別や確認を直感的に行えるよう設計である。

プロトタイプの構成は、磁性パターンをつけたポケットと異なる磁石の配列が埋め込まれたカード二部分である。カードをポケットに挿入する過程で磁性パターンが磁力の影響を受けて動的な変化を生み出す。さらに、カードごとに磁石の配置が異なるため、カードがポケットに完全に挿入されると、磁性パターンが定形化され、特定の図案がポケットの表面に現れる仕組みとなっている。この図案の違いによって、ユーザーはポケット内の内容物を視覚的に識別することが可能となる。視覚的なデザインの魅力と実用性を兼ね備えており、従来のポケットに新たな機能を付加するものである。

本設計は、ポケット以外の布製容器にも応用が可能である。例えば、バッグ、収納ケース、あるいは家庭内の布製オーガナイザーに導入することで、内容物の視

覚的な識別が容易になり、整理整頓の効率が向上する。また、磁性布料の柔軟性を活かし、さまざまな形状や用途に対応できる。

さらに、この設計は視覚障害者にとっても大きな利便性をもたらす可能性がある。磁性パターンの立体的な変化や触覚フィードバックによって、視覚に頼らずとも内容物の有無や種類を確認できるため、日常生活における自立支援の一助となる。触ることで直感的に情報を得られるこの仕組みは、アクセシビリティの観点からも優れており、より多くの人々にとって実用的なデザインである。



図 4.2 カップホルダーのデザイン

4.3. 展示：4DFF 2024

2024年10月25日、4DFF2024のショーケースにおいて、本研究の成果として3種類の磁性パターンサンプルと2つの新しい布製品応用を展示した。今回の発表では、磁性テキスタイルが持つデザイン空間から応用空間への探求成果を示し、生地におけるさまざまなインタラクティブパターンのデザイン可能性を提示した。また、2つの具体的な応用例を通じて、磁性テキスタイルが実際の布製品にどのように活用されるかを示し、物と人とのインタラクションを通じたより緊密なつながりの実現可能性を提案した。



図 4.3 4DFF 2024 で展示する様子

4.3.1 フィードバック整理

展示を通じて、多くの参加者から得られたフィードバックは良い点と改善点に大きく分けられる。

良い点

- 触覚フィードバック付きカップホルダー
 - － 直感的な体験：カップを回転させることで得られる触覚と視覚の融合が「面白く新しい」と評価された。
 - － 無意識の動作をデザインに活かす工夫：日常の無意識の動作にインタラクティブな要素を取り入れた点が、多くの参加者に高く評価された。
- 内容物表示機能付きポケット
 - － 実用性の高さ：内容物の視覚的な識別が整理整頓に役立ち、日常生活における利便性が評価された。
 - － アクセシビリティ：視覚障害者への応用が期待され、触覚フィードバックの有用性が特に注目された。
- 3種類の磁性パターンサンプル

- － デザインの可能性：磁性パターンの動的な変化が新しい表現手法として評価され、アート、ファッション、インテリア分野への展開が示唆された。
- － 革新性：磁性布料の動的特性が、従来の布にはない新たな価値を生み出す点が評価された。

改善点

- 触覚フィードバック付きカップホルダー
 - － 触覚の強弱：触覚フィードバックがまだ不明瞭であり、磁性パターンの動きにさらなる明確さが求められた。
 - － 耐久性：繰り返しの操作や長時間の使用に耐えられる耐久性に関して改善の余地が指摘された。
- 内容物表示機能付きポケット
 - － 動的効果の安定性：ポケット表面の磁性パターンの変化が、内容物の重さや位置によって不安定になることがあるとの意見があった。
 - － 視覚的なコントラスト：表示される磁性パターンが視覚的にもう少し鮮明であれば、さらに実用性が向上するという指摘があった。
- 3種類の磁性パターンサンプル
 - － 操作性の改善：磁性パターンのコントロール性や反応速度について、さらなる精度向上が求められた。
 - － デザインの豊かさ：展示されたサンプルは新しい試みとして評価されたが、磁性パターンの種類や動きにさらなる多様性があれば、より多くの用途やデザイン表現が考えられるという意見があった。
 - － 応用の可能性：磁性パターンの動的特性をより具体的なシナリオやプロダクトに落とし込むことで、ファッションやインテリア、アクセサリー分野への応用がさらに明確になることが期待されている。

4.3.2 考察

4DFF2024の展示を通じて得られたフィードバックを基に、磁性布料のデザイン空間から応用空間への展開について、以下の考察が導かれる。

- 無意識の行動と体験価値の深化: 触覚フィードバック付きカップホルダーでは、無意識の回転動作を活用することで、日常の使用体験に自然なインタラクションを生み出した。このデザインアプローチは、従来の製品にはない新たな体験価値を提供し、触覚や視覚の融合によって製品への愛着や楽しさを引き出す可能性が示された。
- 視覚的および触覚的インタラクションの実用性: 内容物表示機能付きポケットは、視覚的な磁性パターンの表示と触覚フィードバックを組み合わせることで、内容物の識別や整理に寄与する実用性が確認された。特に視覚障害者支援の観点から、触れることで情報を得る仕組みはユニバーサルデザインの一環としての発展が期待される。
- デザインの多様性と応用可能性: 3種類の磁性パターンサンプルでは、磁力による動的変化が生地に新しい表現の可能性をもたらすことが示された。一方で、磁性パターンの種類や動きにさらなる多様性を持たせることで、ファッション、インテリア、アクセサリなど、さまざまな分野への応用がさらに広がることが期待される。デザインの豊かさを高め、具体的なシナリオに応じた用途開発が今後の課題となる。
- 技術的な課題: フィードバックから得られた課題として、磁性パターンの制御精度や動作の安定性が挙げられる。特に、長時間の使用や実際の製品化を考慮した場合、耐久性と操作性のさらなる向上が求められる。また、磁性テキスタイルの機能を最大限に活用するためには、より精密な磁力コントロールや新しいデザイン手法の開発が重要である。

総じて、今回の展示を通じて磁性テキスタイルは実用性とデザイン性の両面において高い評価を受けた。特に視覚・触覚を通じた新しいインタラクションの可能性が確認され、今後の応用展開に向けた具体的な方向性が示された。これらの

成果と課題を基に、さらなる技術的検証とデザイン開発を進めることで、磁性テキスタイルの新たなデザイン空間と応用領域の拡大が期待される。

第 5 章

評

価

5.1. 実験目的

本研究では、従来のスマートテキスタイルが複雑な電子回路や操作の難しさにより、制作や応用において課題を抱えている点に着目した。特に、専門知識を持たないユーザーでも利用可能な、新しい磁性布料の制作および応用プロセスの開発が求められていた。また、動的効果の安定性やデザインの多様性についても評価の必要性が指摘されていた。

前回のワークショップでは、効率的かつ精密に磁性布料を制作する必要性が明確になった。そのため、本研究では制作プロセスと注意点を体系化し、ファブリケーションガイドとしてまとめた。このガイドを活用することで制作を標準化し、その実用性を評価することも本実験の目的の一つとした。

これらの背景を踏まえ、本研究では以下の三つの目的を達成することを目指して評価実験を実施した。

磁性布料の製作プロセスの評価 ファブリケーションガイドを基に、磁性テキスタイルを制作するプロセス全体を評価する。本評価では、製作手順の「易学性」、ガイドやツールの「易用性」、そして完成品の品質と安定性を総合的に検証する。

動的効果の実現可能性の評価 磁性テキスタイルが持つ動的効果の特性を活用し、具体的な設計および制御がどの程度成功するかを評価する。本評価では、動的効果の「設計性」、制御操作の「簡便性」、実現した「視覚的效果」を主な観点として検証を行う。さらに、制御プロセスにおいて発生する潜在的な課題や改善点を

特定することで、動的効果を最大限引き出すための最適化に向けた知見を得ることを目指す。

ファッションデザインにおける応用可能性の評価 磁性布料を用いた立体的で規則的に配置された動的模様が、ファッションデザインだけでなく生活用品の布製品にもたらす新しい可能性を評価する。特に、動的模様が視覚的インパクトや機能性をどのように向上させるかを探り、それを活用した新しいデザイン表現と応用シナリオを提案する。

5.2. 実験設計

5.2.1 実験対象

評価実験は、デザイン業界の幅広い分野に携わる従事者または学生6名を対象に実施された。被験者は、20歳から35歳の年齢層で、3年以上のデザイン関連経験を有することを条件とした。さらに、本布料が衣服だけでなく日常生活の布製品にも応用可能性があるため、ファッションデザインに限らず、平面デザイン、プロダクトデザイン、インタラクションデザインなど多様な分野の専門知識を持つ初回体験者を選定した。

実験中には、3Dプリント、布料パターン設計、スマートテキスタイルの操作など特定のスキルが必要となるため、被験者はこれらのいずれかに関する実務経験または基礎知識を有することを条件とした。

5.2.2 実験内容

実験は以下の三つのタスクに分けて設計された。それぞれのタスクは異なる評価目的に基づき、被験者が特定の操作や創作を行う形式で設計されている。

タスク 1：磁性布料の製作

目的 磁性テキスタイルの製作プロセスの評価。ファブリケーションガイドの有効性を評価し、磁性テキスタイルを効率的かつ精密に制作できるかを検証する。

作業内容 被験者は、提供されたファブリケーションガイドに従い、磁性テキスタイルを製作する。具体的には、3D モデリングソフトを用いてパターンを設計し、3D プリンターで磁性インクを生地にプリントし、必要に応じてアイロンを使用してパターンを固定するプロセスを実施する。

評価指標

- 操作時間：各ステップにかかる時間を記録する。
- エラー率：プリントエラーや生地の固定失敗などを記録する。
- 被験者フィードバック：操作の難易度やガイドの有用性について自由コメントを収集する。

タスク 2：動的効果の実現

目的 動的効果の実現可能性の評価。磁性テキスタイルが持つ動的効果の特性を活用し、具体的な設計および制御がどの程度成功するかを評価する。

作業内容 被験者は用意された磁性テキスタイルを使用し、磁石配列の異なる三種類の制御カードを活用して制御磁場を自由にデザインする。磁石をカードに配置して生地模様を変化させ、意図した動的効果を試みる。制御操作は繰り返し行い、動的効果が安定して再現可能になるまで調整を続ける。

評価指標

- 成功回数：動的効果が被験者の意図通りまでに実現する回数を記録する。

- 操作性：制御操作の直感性や難易度を被験者のフィードバックを基に評価する。
- 視覚効果：布地の動きの滑らかさや模様の鮮明さについて、被験者の主観的満足度を記録する。

タスク 3：応用とデザインスタイルの探索

目的 応用可能性の評価。磁性テキスタイルが生活用品やファッションデザインにどのように応用できるかを評価し、その潜在的なデザイン可能性を探る。

作業内容 被験者は用意された異なるスタイルの布地と磁性テキスタイルを組み合わせ、自由なスタイルで新しいデザインを作成する。視覚的な印象や機能性を意識しながら、布地をカットしたり、ピン止めや接着を使用して作品を制作する。完成したデザインについては、被験者自身がデザインコンセプトを説明し、それがどのように応用可能かを提案する。

評価指標

- デザインの多様性：被験者が制作したデザインの種類や独創性を評価する。
- 材料の組み合わせ効果：磁性テキスタイルと他の布地がどの程度調和しているかを評価する。
- 応用可能性：完成したデザインがどのような用途に適しているか、被験者の提案を基に記録する。

5.2.3 検証方法

本実験では、Lund, A.M. が提案した USE Questionnaire を基に定量的な評価を行い、被験者の態度を明らかにする。その後、インタビューを通じて定性的な評価を取得し、各タスクの目的に対する深い洞察を得る。具体的な検証方法は以下の通りである。

定量評価：USE Questionnaire

USE Questionnaire を採用した背景には、操作性、満足度、有用性といったユーザー体験を包括的に評価できる点が挙げられる。Likert スケールを用いることで、主観的な体験を数値化し、客観的な比較や統計分析を可能にする。また、質問内容を柔軟に調整できる特性から、本研究の評価目的に適している。

- 評価項目：表 5.1 に示すように、各タスクに関連する具体的な質問項目に対して、5 段階評価で回答。
- 収集方法：被験者に紙またはデジタル形式のアンケートを提供し、その場で記入を依頼。

定性評価：自由回答とインタビュー

自由回答およびインタビューは、定量評価で捉えきれない具体的な体験や課題を深掘りする目的で実施する。

自由回答 各タスク終了後、表 5.2 に示すような質問に基づき被験者が自身の感想や提案を記述する。

インタビュー 定量アンケートと自由回答で記述された内容をさらに掘り下げる目的で実施する。半構造化形式を採用し、以下の内容を中心に柔軟に質問を展開する：

- タスク中の体験：特に難しいと感じたステップや成功体験について聞き取る。
- 改善提案：ファブリケーションガイドや動的効果の制御方法に関する改善案を探る。
- 応用可能性：磁性テキスタイルがどのような製品やデザインに応用できるかを議論する。

表 5.1 USE Questionnaire の評価項目

タスク	質問番号	質問内容	評価尺度
タスク 1	Q1	製作手順は理解しやすかったか	1 (全くそう思わない) ~ 5 (非常にそう思う)
	Q2	提供された操作マニュアルやツールは、製作をスムーズに進める助けになりましたか？	
	Q3	製作した磁性テキスタイルのパターンは、期待通りの品質でしたか？	
タスク 2	Q4	磁性テキスタイルの動きや模様の変化は、意図通りに実現できましたか？	
	Q5	制御操作は簡単でしたか？	
	Q6	動的効果の視覚的なインパクトに満足しましたか？	
タスク 3	Q7	磁性テキスタイルを使用することで、従来の布地では得られない新しい表現ができましたか？	
	Q8	このテキスタイルは未来の服や製品デザインに適していると思いますか？	
	Q9	この磁性テキスタイルを他のデザイナーやユーザーに勧めたいと思いますか？	

表 5.2 自由回答の質問

番号	質問内容
1	磁性テキスタイルの製作や使用で最も興味深かった点は何ですか？
2	テキスタイルの製作や動的効果の実現中に直面した主な課題や改善点は何ですか？
3	磁性テキスタイルはどのようなデザインや製品に応用できると思いますか？
4	実験全体の感想やその他の提案があれば教えてください。
5	磁性テキスタイルについての総合的な印象を一言で表してください。

インタビューは1人あたり15～20分程度を予定して実施され、録音または速記により詳細なデータを記録する。これにより、被験者の具体的な課題認識やアイデアを深掘りし、磁性テキスタイルの製作および応用におけるさらなる可能性を明らかにする。

データ分析方法

データ分析は、定量評価、定性評価、そして実験観察データを統合して実施する。具体的な手法は以下の通りである。

定量データの分析

- 基本統計量の算出：各質問項目について、平均値を算出。
- タスク間比較：タスクごとのスコアを比較し、評価項目ごとの顕著な違いを検出。
- 相関分析：操作性、満足度、有用性の間の相関を調査し、各側面の関係性を明らかに。

定性データの分析

- テーマ分析：自由回答およびインタビュー内容を基に共通テーマを抽出。
- 対比分析：被験者間での意見の違いや類似点を比較し、傾向を把握。
- 改善案の統合：得られた課題と提案を整理し、ファブリケーションガイドやプロセス設計に反映可能な具体案を導出。

観察データの分析

- 操作時間：各タスクの操作時間を計測し、効率性を比較。
- エラー頻度：実験中に発生したエラーや失敗を分類し、ボトルネックを特定。
- 成功回数：特にタスク2の動的効果について、意図した効果がどの程度に実現できるかを評価。

定量的な結果、定性的な洞察、実験観察データを統合し、磁性テキスタイルの製作プロセス、動的効果の実現可能性、および応用可能性について総合的に評価。これにより、磁性テキスタイルのさらなる改良に向けた方向性を示す。

5.3. 実験実施

本実験は2024年12月に実施され、以下の手順にしたがって行われた。

- 準備段階：まずは生地、3Dプリンター、磁性フィラメント、磁石、制御カードなど必要な材料と機器を用意し、実験環境を整備した。
- 実験説明：被験者には、実験の目的、進行手順、評価方法について文書および口頭で説明が行われた。また、実験中の円滑な進行を確保するために、各ツール（3Dプリンター、ミシンなど）の基本操作について簡単に説明した。

- タスク実施：被験者はファブリケーションガイドに基づきタスク1とタスク2を進行した。タスク1では磁性布料の製作、タスク2では動的効果の実現に取り組み、研究者は操作時間、エラー発生率、完成品の品質を観察・記録した。タスク3では、被験者が自由なデザイン探索を行い、用意された布地を組み合わせ独創的なデザインを制作した。この際、デザインの多様性や視覚的効果についての観察が行われた。
- 作業後調査：各タスク終了後に被験者がアンケート（USE Questionnaire と自由回答で構成）を記入し、具体的な感想や提案を記述してもらった。さらに、アンケートに回答した内容とタスク表現を基に、半構造化形式のインタビューが実施された。インタビューでは、タスク中の成功体験や課題、改善提案、磁性布料の応用可能性について柔軟に対話を進め、被験者の詳細な意見を収集した。
- 実験終了後：向参与者に感謝の意を伝え、すべての実験データを適切に整理し、分析の準備を整えた。

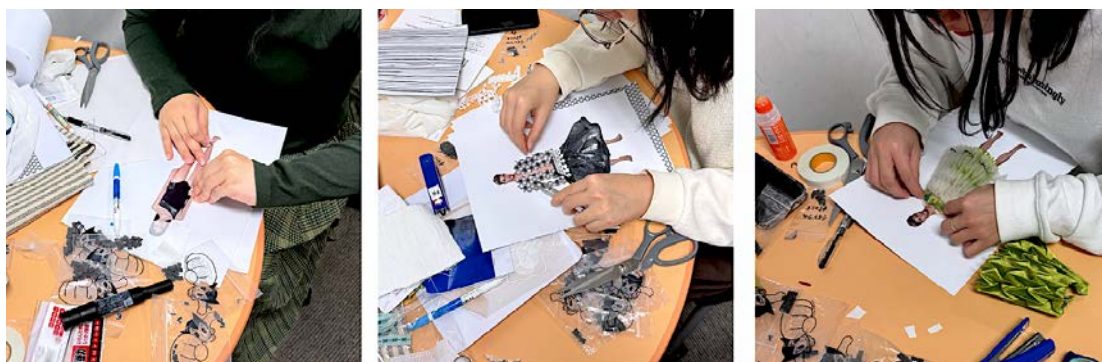


図 5.1 作業中の様子

USE Questionnaireの平均値と標準偏差

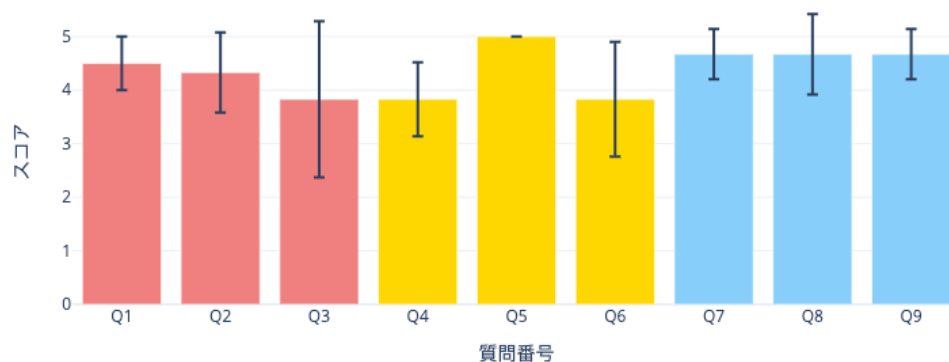


図 5.2 USE Questionnaire の平均値と標準偏差

5.4. 実験結果

5.4.1 タスク 1：磁性テキスタイルの製作

USE Questionnaire のスコア結果から、タスク 1 に対する被験者の評価は全体的に良好であり、製作方法が理解しやすく学びやすいと示された。しかし、タスク遂行の過程および完成品の品質に関する満足度には大きなばらつきがあり、使用したツールやガイドについていくつかの改善案が提案された。

製作手順の学習容易性

Q1 の平均スコアが 4.5 と高く、被験者の多くが製作手順を分かりやすく理解しやすいと感じていることを示している。標準偏差が 0.5 と低いことから、評価の一貫性も確認された。今回の被験者は全員、磁性テキスタイル製作を初めて体験したが、各段階（パターンデザインから 3D プリントの開始まで）を独自にスムーズに遂行し、所要時間は最長でも 65 分、最短では 22 分であった。この結果は、磁性テキスタイルの製作が短期間で習得する可能性を示唆している。

ガイドやツールの有効性

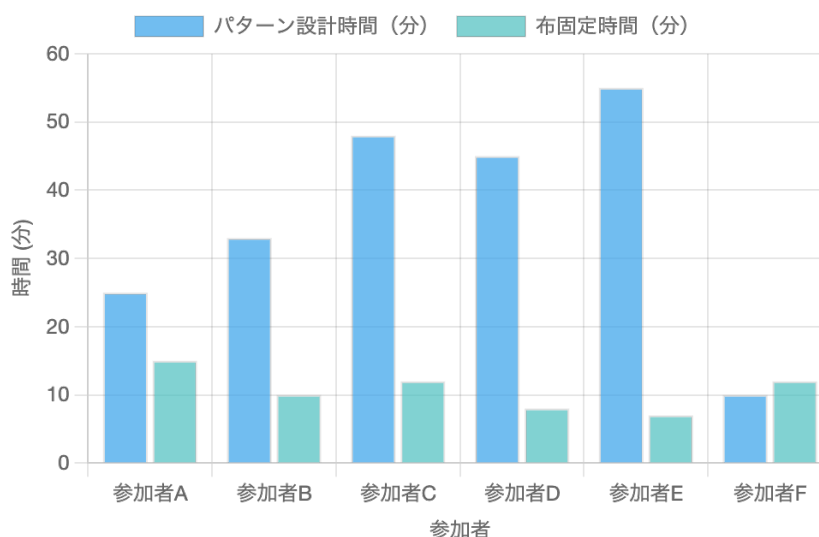


図 5.3 タスク 1：パターン設計と布固定時間

Q2 の平均スコアは 4.33 と高く、ガイドとツールの有効性や機能性に対する全体的な満足度を示している。ただし、標準偏差が 0.75 であることから、一部の被験者間で評価にばらつきがあることも分かった。

パターンデザインの段階では、被験者 A、B、F が既存テンプレートの簡単なサイズ調整を選び、被験者 C、D、E が複雑なデザインを選んだ。簡単な調整を行った A と F の所要時間はそれぞれ 25 分、10 分と短く、操作もスムーズであった。B は 3D モデリング未経験のため、基本操作の習得に時間がかかったものの、ガイドの助けで最終的に 33 分で完了した。一方、複雑なデザインを選んだ C、D、E はそれぞれ 48 分、45 分、55 分と長時間を要した。彼らはガイドの範囲外の機能を試みる中で困難に直面したものの、最終的にはタスクを完了した。しかし、より詳細なガイドや簡便なツールの必要性が指摘されている。たとえば、A は「磁性テキスタイル専用の統合型デザインツールの開発が望まれる」と述べ、C と D は具体例や動画が複雑な設計プロセスの理解を助けると指摘した。また、B はガイド内の専門用語が多いことが理解の妨げとなったと指摘している。

布地の固定に関する準備作業では、全員が 15 分以内に完了したものの、被験者

A、C、E はプリンとベットに布を固定する際に数回失敗した。この操作は布を均一に引っ張りながらテープで固定する必要があり、初めての被験者にとって難易度が高かった。しかし、試行錯誤を通じて最終的に成功させた。そのため、被験者はこの部分の説明をより明確かつ具体的にすることを提案し、生地の固定方法を詳細に示す図解を追加することを求めた。特に被験者 E は、生地への 3D プリントに関する注意点の 2 番目、「プリント中に布が引っ張られないようテンションを適度に調整」の「適度に」が曖昧であると指摘した。代わりに、「手で触れてもしわが立たない程度」というように判断基準を含む表現に変更することを提案した。

結果から、現在のガイドやツールは、ユーザーが基本的な磁性テキスタイルの製作を順調に遂行する上で有効であることが示された。しかし、複雑なデザイン機能の説明や生地の固定方法においては、さらなる改善が必要である。また、現行のガイドの提示形式は直感的であるとは言い難く、読みやすさや効率性の面でも向上の余地がある。

完成品の品質と安定性

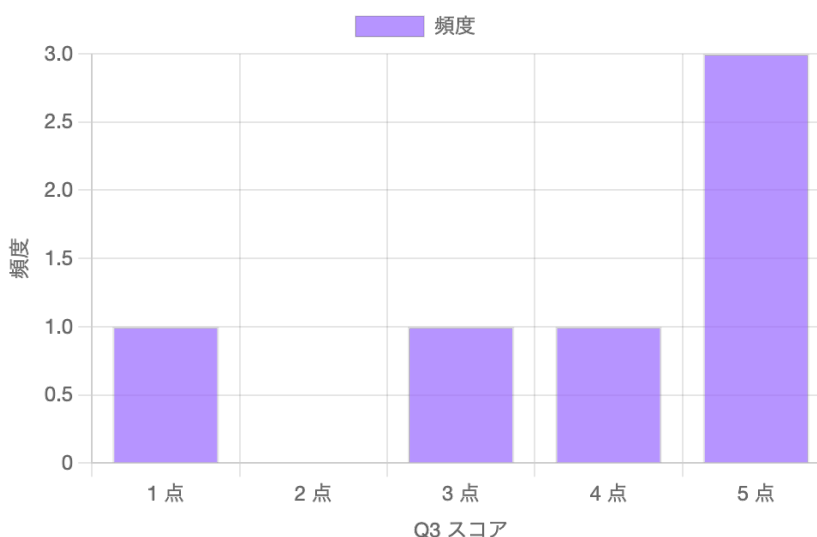


図 5.4 タスク 1 : Q3 スコアの分布

Q3 の平均スコアは 3.83 とやや低く、標準偏差が 1.46 と大きいことから、完成

品の品質に対する被験者間の満足度にばらつきがあることが確認された。被験者 A、B、E は設計したパターンのプリントに失敗し、低評価を与えた。その中で、被験者 A と B は通常のテープを使用して生地を固定したが、プリントベットの加熱で粘着力が失われ、布が移動してパターンが歪む結果となった。この点について、被験者 B は服飾専用の耐熱マスキングテープの使用を提案した。その後の実験では、このテープを使用することで成功率が向上した。一方、被験者 E の失敗はプリンターの故障に起因しており、製作プロセス自体とは関係ないと確認した。

この結果から、完成品の品質はプリント準備作業の細やかさに大きく依存していることが分かり、耐熱テープの使用の重要性も確認された。また、細かく多岐にわたる注意点が安定性低下の一因であることが判明した。今後は、ガイドの注意事項をさらに充実させるとともに、異なる環境やプリンターでのテストを行うことで、完成品の成功率向上を図る必要がある。

5.4.2 タスク 2：動的効果の実現

USE Questionnaire のスコア結果から、タスク 2 に対する被験者の評価は全体的に前向きであり、特に制御操作の直感性が高く評価された。一方で、動的効果の設計性および実現した視覚効果については意見が分かれた。これらの分岐は、被験者の実際の操作過程、個々のデザイン要件、およびガイドの支援内容と密接に関連している。

動的効果のデザイン性

Q4 の平均スコアは 3.83 で、大多数の被験者がタスク中にある程度期待される動的効果を実現できたことを示しているが、一部に差異が見られた。この差異は標準偏差（0.69）にも反映されている。

具体的なタスクでは、被験者 C、F、E が迅速に目標とする動的効果を実現し、磁石の配置が精度よくデザインされたことを示唆している。一方、A と B は初期段階で磁石の配置が過密であったため、磁石同士が引き寄せ合う現象が発生した。配置密度を調整することで問題を解決したが、試行錯誤の時間が余分にかかった。

D は最終的な動的効果に対して満足できず、特に形状変化の制御性や予測可能性が期待に達しなかったと指摘している。

制御操作の改良に関する提案として、被験者 E は「磁石配置の異なる方式が動的効果に及ぼす影響」に関する詳細なガイド、例えば間隔の推奨値や配置パターンのビジュアル例を追加するよう提案した。また、被験者 F は、生地プリント前に可能な動的効果をプレビューできる専用のシミュレーションツールの開発を提案し、操作効率の向上が期待されると述べた。

制御操作の容易さ

Q5 のスコアは満点の 5.0 を記録し、全被験者が制御操作の直感性と容易さを非常に高く評価している。磁石の固定作業では、どの配置方式であっても全被験者が短時間で完了した。3 つの制御層を作成するために要した合計時間は平均 15 分、1 つの制御層あたり約 5 分であった。この結果から、制御層の製作は短時間で実行可能であることが確認された。

被験者は、磁石の配置や制御層の製作が明確かつ直感的で、追加の学習コストが不要であると評価した。例えば、被験者 F は 3 つの磁石配置パターンを自由に組み合わせられる点を高く評価し、「操作が非常に柔軟で、デザインのインスピレーションが湧きやすい」と述べた。また、被験者 A は、磁石配置が過密な場合に操作ミスが発生する可能性を指摘しつつも、「手動で調整する操作はシンプルで、すぐに理想的な効果を得られる」と評価した。一方で、被験者 E は手動制御が迅速な調整を可能にする一方、実際の製品では手動による精度を完全に再現することは難しいと指摘し、より自動化された制御方法の探索を提案した。

実現した視覚的效果

Q6 の平均スコアは 3.83 で、視覚効果に対する被験者の評価にはばらつきが見られた（標準偏差 1.07）。一部の被験者（C、F）は動的な視覚効果に満足した一方で、他の被験者（D、E）は期待した効果に達しなかったと感じている。

タスク遂行中、被験者 A は「直立パターン」を高速制御中に最も視覚的な効果を発揮する一方で、横方向の形状変化は制御しにくいことを発見した。B は縦方向の模様変化が横方向よりも優れていると観察したが、生地 of 粗いテクスチャが動的効果のスムーズさに影響すると指摘した。C は自身のデザインした動的効果に高い視覚的満足度を示したが、操作前に動的効果を完全に予測できなかったと述べた。

被験者 D は動的効果の安定性について、「異なる配置方式が視覚的インパクトに与える影響」に関するガイドの追加を提案した。また、E は動的効果と触覚フィードバックを組み合わせることで、磁性テキスタイルの適用範囲を拡大できる可能性を示唆し、マッサージやヘルスケア分野への応用を提案した。

5.4.3 タスク 3：応用とデザインスタイルの探索

被験者のデザイン作品

1. 被験者 A



図 5.5 被験者 A の作品

- 作品説明：「呼吸感」をテーマにしたドレスをデザインし、そのインスピレーションは自然界の川の流れや呼吸のリズムから得た。動的な模様は肩からスカートの裾にかけて広がり、川の流れのような効果を生み出している。ドレスは主に薄手のチュールと緑色のサテン素材で構成され、チュールが軽やかさを強調し、サテンが自然な光沢を与えている。磁性テキスタイルによる動的効果で、スカートは特定の磁石制御で波打つような変化を見せ、呼吸するかのような生命感を表現している。
- 応用分野：
 - － 舞台衣装：動的効果と自然なデザインが融合し、舞台パフォーマンスでの視覚的効果を強化。
 - － インタラクション装置：動的パターンとインタラクション装置を組み合わせ、ファッションとテクノロジーの融合を探求。

2. 被験者 B



図 5.6 被験者 B の作品

- 作品説明：動的効果と実用性を兼ね備えたトートバッグをデザインした。このトートバッグのプリント模様は、Bによるオリジナルのデジタルプリントと立体的な磁性パターンで構成されている。磁石の制御によって表面の立体パターンが変化する。特に物を出し入れする際に表面の模様に影響を与え、動的な視覚効果を生み出す。この設計により、従来のバッグにユニークなインタラクティブ体験を付加し、ユーザーの使用体験を向上させている。
- 応用分野：
 - － ファッションアクセサリ：高級バッグやカジュアルバッグに動的要素を加え、個性的な製品を開発。
 - － インタラクティブディスプレイ：小売環境での製品展示に活用し、消費者の注目を引く。

3. 被験者 C



図 5.7 被験者 C の作品

- 作品説明：「剛柔一体」をテーマにして、複数の布地を組み合わせ、磁性素材の質感を引き立て、男性向けに前衛的で大胆なスカートスタイルをデザインした。カットアウトやレースの要素を取り入れ、金属的な質感を持つメッシュ素材と組み合わせた。また、磁性素材には規則的な平面パターンを配置し、硬さと柔らかさ、立体感と平面感のバランスをこの服飾デザインの中で巧みに実現した。
- 応用分野：
 - － ファッションショー：前衛的なデザインが高級ファッションショーでのアート性を強調。
 - － カスタムウェア：個性的なデザインを求める顧客向けの高級カスタムサービス。

4. 被験者 D



図 5.8 被験者 D の作品

- 作品説明：スカートの膨張度を動的に制御できるドレスを設計した。スカートには磁性パターンが配置され、磁石の制御によって部分的に膨

張や起伏が生じる。素材には半透明の生地を採用し、膨張に伴って透明度が変化することで、視覚的に層のある動的効果を生み出している。このデザインは、動的効果と素材特性の融合を探究している。

- 応用分野：

- － 舞台衣装：歌劇や舞台公演で求められる高度な視覚的表現に適応。
- － 動的ファッション展示：透明素材と動的模様を組み合わせた服装展示に活用。

5. 被験者 E



図 5.9 被験者 E の作品

- 作品説明：磁性テキスタイルの動的変形機能を利用したマッサージ枕をデザインした。この枕は、磁性パターンが規則的に配置されており、制御層の操作で動的な起伏が生じ、触覚フィードバックを提供する仕組みになっている。このデザインは、機能性と快適性を両立させ、健康分野での磁性布料の新たな応用可能性を示している。
- 応用分野：
 - － ヘルスケア製品：頭皮マッサージ枕や動的サポート枕として使用可能。

- － インタラクティブ家具：機能性と楽しさを兼ね備えた家具製品への応用。

6. 被験者 F



図 5.10 被験者 F の作品

- 作品説明：「輝く薔薇」と名付けたカップホルダーをデザインし、動的な視覚効果と光の表現を組み合わせた。このカップホルダーの動的パターンには透明なカラーシートが覆われており、動的パターンの制御によってシートがわずかに動き、きらめく波のような効果を生み出す。日光が当たると、カップホルダーの表面に虹色の光の変化が現れる。この設計は、シンプルな磁性パターンで独特の芸術性を実現している。
- 応用分野：
 - － アートインスタレーション：家庭の装飾や芸術展示に適した小型のインタラクティブ装置。
 - － 高級ギフト：動的効果と視覚的なインパクトを兼ね備えた創造的なギフト製品。

磁性テキスタイルの新しい可能性

磁性テキスタイルは、その動的な模様や触覚フィードバック機能を通じて、服飾デザインや生活用品デザインにおける広範なイノベーションの可能性を提供する。本実験での作品は、以下の側面における磁性テキスタイルの潜在力を示している。

デザインの多様性 各被験者の作品は、動的なドレスやトートバッグから機能性家居用品に至るまで、多様な形態をカバーし、スタイル面で顕著な独特性を示した。被験者 A と D の作品は、動的パターンと生地を組み合わせ、「動的表現」がファッションデザインでの魅力を強調している。一方、被験者 B と F の作品は、動的パターンと芸術的表現を組み合わせ、動的な視覚効果やインタラクティブな体験を革新する手法を示している。

材料の組み合わせ効果 磁性テキスタイルと異なる生地を組み合わせることで、その優れたデザイン適応性がさらに引き出されている。例えば、被験者 A は薄手のチュールとサテンを組み合わせ、柔らかな素材と動的パターンの自然なつながりを表現している。一方、C の作品では、レースと金属的な質感を持つ布地の対比を通じて、剛と柔が調和するデザインを生み出している。また、F のカップホルダーや D のスカートは、光の効果と透明素材を組み合わせることで、視覚的なレイヤー感を大幅に向上させた。これらのデザインは、磁性テキスタイルが多様な素材で機能性を発揮しつつ、視覚表現の高度な調和を実現した。

応用可能性 実験結果は磁性テキスタイルが持つ幅広い応用可能性を示した。ファッション分野では、動的な舞台衣装（被験者 A、D）や高級ファッションアクセサリ（被験者 B）が、個性的なデザインの魅力を発揮している。また、機能性家居用品（被験者 E のマッサージ枕）は、健康およびケア市場に新しい視点を提供する。一方、動的な視覚効果を活かしたアートインスタレーションや高級ギフト（被験者 F のカップホルダー）は、家庭装飾や高級ギフト市場での利用に適している。磁性テキスタイルは、その強い視覚的インパクトと触覚フィードバック機能を通じ

て、応用の範囲を広げるだけでなく、服飾や生活用品の機能性向上に向けた新たなデザインの可能性を提供している。

5.5. 考察

5.5.1 紙ベースの説明書と設計ツールの限界

実験結果から、現在使用されている紙ベースの説明書と設計ツールは、磁性テキスタイルの基本的な製作を支援するには有効であるものの、複雑なデザイン機能のサポートや直感的な操作性の提供には明確な限界があることが示された。

まず、紙ベースの説明書において、専門的な用語や曖昧な表現が多く、無経験のユーザーに対する直感的な理解を妨げている。例えば、「適度に」といった具体性に欠ける記述は、操作の詳細を不明確にし、作業の実施に支障をきたす可能性がある。また、完成品の品質は製作プロセスの細やかさに密接に関係しているが、現在の製作手順では注意事項が複雑で多岐にわたり、ユーザーにとって学習の難易度を高めている。さらに、多くの操作で表形式のパラメータや言葉では説明が困難なステップが用いられており、理解の妨げとなっている点も問題である。加えて、長文の紙ベースの説明書を読むという行為自体が集中力を要するため、注意事項の見落としが発生しやすいという課題も明らかになった。

次に、Tinkercad を基づいてテンプレートを作成したが、簡単な図案の調整には対応可能であるものの、複雑なパターンの設計を試みる際に機能が不足していることが明らかになった。ユーザーは、ツールやガイドが提供する範囲を超えた設計を行う場合、自身の探索に依存する必要があるため、それが設計に要する時間や難易度の増加を招いている。

さらに、布地の固定が不十分であったことが、今回の実験における 3D プリントの失敗要因の一つとなった。被験者のフィードバックによると、固定方法に関するガイドには、より具体的な図解やアニメーションを取り入れるべきだという意見が多めである。また、3D プリント用の専用部品を開発し、布地固定を効率化することも一案として挙げられている。

改善方向

1. 集成型ウェブサイトの開発

- 磁性テキスタイル製作専用のウェブサイトを開発し、説明ガイドと設計ツールを一体化する。
- 多言語対応と専門用語の解説を取り入れ、読みやすさや異文化への適応性を向上させる。
- 動画やインタラクティブなガイドを一部のテキストに代わり使用し、操作手順を直感的に示す。
- パラメトリックモデリングや複雑なパターンデザインをサポートする専用設計プラットフォームを提供し、上級者のデザインニーズに応える。
- 動的効果のシミュレーション機能を搭載し、製作前にデザインをレビューし最適化する手段を提供する。
- 製作失敗の原因を特定しやすくするためのトラブルシューティング機能を追加する。

2. 補助ツールの開発

- 生地固定を効率化し、成功率を高める 3D プリント専用部品の開発。
- 磁性テキスタイル製作に必要な素材を含む専用キットを商品化し、ユーザーの利便性を向上させる。

5.5.2 動的効果制御の限界

動的効果の制御において、ユーザーは制御層の製作と操作を直感的かつ簡単に行うことができたが、動的パターンの変形精度と視覚的表現に関しては現行の方法にいくつかの限界があることが分かった。

まずは、動的パターンの変形精度は、磁石の配置密度や方向に大きく依存している。現在の方法では、手動調整を通じて基本的な動的効果を実現することが可

能であり、磁石間隔の推奨値も提供されている。しかし、精密な制御ツールが不足しているため、デザイン段階で動的パターンの効果を正確に予測することが難しい。特に、複雑なパターン設計においてこの不確実性が拡大し、効率的かつ精密な動的効果を実現する難易度が高まる。また、動的効果の変化幅や視覚的インパクトは、磁性パターンのデザイン、生地素材、およびその組み合わせ方に依存している。現行の単一生地素材やプリント材料では、動的効果の潜在力を十分に引き出すことが難しい。加えて、現在の方法では、動的表現が主に 2.5D のパターン変形や簡単な触覚フィードバックに限定されており、多様な材質や色彩を持つプリント材料、動的効果に伴う音響デザイン、複雑な触覚フィードバックとの融合といった多次元の表現には十分に対応できていない。

さらに、実験では手動制御は高い直感性と柔軟性を示したが、実際の応用においては、実験と同じ精度と安定性を再現することが難しい。また、展示層と制御層の相互作用を製品利用時の動作にどう組み込むかについても、さらなる検討が必要である。

改善方向

1. 動的効果のシミュレーションと予測

- シミュレーションやアルゴリズム最適化を活用した設計ツールを開発し、ユーザーがデザイン段階で動的効果を直感的にプレビューできるようにする。
- ユーザーが磁石の配置密度や方向、パターン変化をリアルタイムで調整し、より高い精度で設計を進められるようにする。
- 多様な配置テンプレートを提供し、実際の効果データを基にした最適な設計パラメータを推薦する。

2. 多次元動的表現の探索

- 多種材料の混合プリントをテストし、磁性素材と異なる材質の適合性や模様の制御性を探求する。

- 触覚フィードバックデザインを深化し、模様変化に応じて異なる強度や振動パターンを実現することで、ユーザーの感覚体験を豊かにする。
- 立体的な模様が変形し、互いに接触または衝突する際に発生する音響効果を調査し、動的効果に新たな次元を加える。

5.5.3 多感官表現と応用可能性

磁性テキスタイルは、視覚および触覚の表現において革新の可能性を示すだけでなく、多感覚融合デザインのための広範な探索の機会を提供している。本研究の実験では、動的パターンが生み出す視覚効果と触覚フィードバックがその応用価値を示し始めているが、他の感覚（例：聴覚）との相互作用をさらに掘り下げる必要性が示されている。

まずは、視覚表現は磁性テキスタイルの主要な強みであり、動的パターンのデザイン、異なる素材の使用、布地のカットアウト方法を組み合わせることで、デザインにより強い視覚的インパクトを与えられる。しかし、現在の視覚的応用は、主にパターンの形状変化に集中しており、比較的単一である。今後は、より複雑な動的効果の探求が求められる。たとえば、反射素材を活用して光線の変化を演出する、透明素材で豊かなレイヤー効果を生み出す、またはより明確な変色効果を組み込むことで、視覚的インパクトをより向上させる。

また、触覚フィードバック機能は、健康およびインタラクティブデザインの分野での応用可能性を示している。たとえば、動的パターンの変形や起伏を用いて触覚刺激を提供し、マッサージ機能を持つ製品デザインに活用できる。しかし、この潜在力はまだ十分に引き出されていない。触覚フィードバックの強度、頻度、適用範囲についてさらなる最適化が必要である。また、触覚フィードバックと他の感覚（例：音のデザイン）を融合することで、ユーザーの総合的な感覚体験を大幅に向上させることも期待される。たとえば、磁性パターンの動的変化により自然に発生する音を活用し、動的効果と調和する音のデザインが考えられる。動的パターンの変形に音響効果を組み合わせることで、製品が動作中により心地よい体験を提供できる。

さらに、磁性テキスタイルの応用範囲について、ファッション、機能性家居用品、アートインスタレーションなど、多岐にわたる。例えば、ファッション分野では、動的パターンが個性化された衣服やアクセサリーのデザインに活用できる。触覚フィードバックと動的なパターンを組み合わせた製品は、快適性と実用性を兼ね備えたスマート家具として健康や生活の質を向上させる可能性がある。音、色、触覚フィードバックを統合した動的表現により、ユーザーに没入型の体験を提供し、新しい芸術的価値を創出できる。

一方で、現在の実験はコンセプトデザインの段階にとどまっており、具体的な実用化事例が不足している。ファッション分野や製品デザインにおいて、どのような効果を実現できるのか検証できていない。そのための応用例や社会実装については今後検討していく必要がある。

改善方向

1. 応用シナリオのプロトタイプ開発：磁性テキスタイルの特性を活かしたプロトタイプを、実際の使用シナリオに基づいて設計・制作する。例として、ファッション分野では動的な衣装やアクセサリー、家居用品では触覚フィードバックを備えた機能性アイテムを試作する。
2. 実用性の評価実験：プロトタイプを実生活に近い環境でテストし、ユーザーの使用感や耐久性、操作性を評価する。これにより、応用可能性を検証し、製品化への具体的な改善点を特定する。

第 6 章

結

論

6.1. 総括

本研究では、電子回路を使用せずに制御可能なスマートテキスタイルのデザインに注力し、デザイナーにとって使いやすいテキスタイルとそのファブリケーション手法を提案した。従来のスマートテキスタイルは、デザイナーにとって使用の難しさや制御条件の限界が存在していた。電子回路を埋めたテキスタイルは、電子回路の知識を持たないデザイナーにとって設計の難易度が非常に高い。一方で、物理条件に基づいて変化を生じさせるスマートテキスタイルは、制御条件に制約があり、使用可能なシーンが限られていた。そこで本研究では、物体を透過して自由に制御可能な磁場を制御条件として使用し、磁場内で変形可能な磁性テキスタイルの設計を試みた。従来のスマートテキスタイルが抱える課題に対する革新的なアプローチを提示し、磁性テキスタイルを活用した新しいインタラクティブデザインの可能性を探求した。

まず、磁性テキスタイルの制作と動的効果の実現に関して、本研究ではプロトタイプの最適化を繰り返すことで、現段階での最適な制作および制御手法をまとめた。具体的には、3D プリンティング技術を用い、柔らかい生地の上に磁性フィラメントプリントすることで、生地に磁性を持たせるファブリケーションを実現した。また、カットアウトなどのファッション仕立てをベースとして3種類の基礎パターンをデザインした。次に、磁性テキスタイルの制御について、変形しながら変色できる二層構造を提案し、制御実験を基にした制御方法を特定した。さらに、制作プロセスの標準化と容易性に焦点を当て、製作と使用方法をファブリケーションガイドにまとめた。

さらに、本研究では、触感フィードバックや視覚的な動的模様を含む応用事例の試作を通じて、磁性テキスタイルのデザイン空間から応用空間への拡張を試みた。これにより、日常生活やファッション分野における新しいデザイン表現の可能性を提示するとともに、視覚・触覚の多感覚的なインタラクションの実現に向けた重要な知見を得た。

最後に、評価実験を通じて専門知識を持たないユーザーでも磁性テキスタイルを効率的に制作できることが実証された。得られたフィードバックから、磁性テキスタイルが持つ課題とその改善方向を特定した。動的効果の精度向上や視覚的表現の多様性の拡大といった技術的な課題に加え、制作プロセスにおけるツールやガイドのさらなる改善が求められることが示された。

これらの成果は、磁性テキスタイルの設計と応用の新たな可能性を切り開くとともに、スマートテキスタイル分野全体における技術革新とデザインの自由度の向上に寄与するものである。

6.2. 今後の課題と展望

本研究を通じて、磁性テキスタイルがスマートテキスタイル分野において持つ多くの可能性を明らかにした。本研究の成果は、デザイナーが専門知識に頼らず直感的に使用できるテキスタイルデザインの新しい方向性を提示し、インタラクティブな素材としての磁性テキスタイルの設計と応用の基盤を構築した。特に、触覚や視覚を含む多感覚的なデザインの可能性を開拓した点は、スマートテキスタイルの新しい価値を示す重要な成果である。

未来の研究では、以下の3つの方向性に注力する必要がある：

- 制作プロセスのさらなる改善: 現在のファブリケーションガイドや紙ベースの説明書は、基礎的な制作プロセスを支援するには有効であるものの、初心者にとって直感的でわかりやすい操作支援には限界がある。今後は、ウェブベースのインタラクティブな制作ガイドやシミュレーション機能を備えた設計プラットフォームの開発を進めることで、制作プロセスの効率化と標準化

をさらに推進する。また、補助ツールや専用キットを活用し、制作時の精度や成功率を向上させる仕組みを構築することが重要である。

- 技術的な課題への対応: 動的効果の制御精度や視覚的表現の多様性を向上させるため、シミュレーション技術や最適化アルゴリズムの活用が求められる。また、磁石の配置や生地 of 素材による影響をデザイン段階で予測可能にするツールの開発が必要である。さらに、反射素材や透明素材、変色素材を用いた多次元的なデザインの探求は、より豊かな動的表現を実現する上での鍵となる。
- 多感覚表現と新しい応用シナリオの探求: 触覚や音響効果を融合した多感覚的なデザインは、健康分野やリラクゼーション、エンターテインメントにおいて新たな価値を提供する可能性がある。また、ファッション、家具、アート分野での応用プロトタイプを試作し、実生活における使用シナリオを基にその実用性を評価することが、社会実装への道を切り開く重要なステップとなる。

磁性テキスタイルは、ファッション、インテリア、アートだけでなく、医療やリハビリテーション、さらには教育やエンターテインメント分野においても広範に応用される可能性がある。これらの応用は、デザインの多様性や機能性を拡張するだけでなく、ユーザー体験を豊かにし、より多様な社会的ニーズに応えることが期待される。

本研究の成果が引き金となり、より多くのデザイナーや研究者が磁性テキスタイルを活用した新たなアイデアや製品を生み出すことを期待している。この研究が、スマートテキスタイル分野全体の技術革新を促進し、技術開発と応用デザインの間に存在する障壁を低減することを目指し、デザインの自由度と実用性の向上に寄与することを願っている。

謝 辞

この度の修士論文の完成にあたり、数々のご支援とご指導を賜りました全ての皆様に心から感謝申し上げます。

まず、本研究の指導教員であり、厳しくも温かいご指導を賜りました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の山岡潤一准教授に心から感謝いたします。先生の詳細かつ緻密なフィードバックは、この研究の質を格段に向上させるものでした。また、研究の方向性に迷った時には、先生が示してくださった示唆に富むアドバイスが道しるべとなりました。

研究指導や論文執筆など数多くの助言や指導をいただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の稲蔭正彦教授に心から感謝いたします。

また、研究を通じて得られた知識と経験は、高山国際教育財団からの奨学金支援により、より充実したものとなりました。この貴重な支援に対しても、心から感謝申し上げます。

研究室の同僚たちには、日々の議論を通じて多くの刺激と助けを受けました。また、私に多大な知識と経験を共有してくれた馬華前にも特別な感謝を表します。

最後に、常に私を支えてくれた家族や親友にも深く感謝しております。皆様のご支援があったからこそ、この研究を完遂することができました。

心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] Dean McClements. Magnetic iron pla 3d printing filament. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/magnetic-iron-pla-3d-printing-filament/>. Accessed: 2024-12-16.
- [2] S. Jabari, A. Shaikh, Ç. Genç, O. Buruk, J. Virkki, and J. Hamari. A systematic literature review on computational fashion wearables. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 40, No. 22, pp. 6913–6940, 2023. doi:10.1080/10447318.2023.2269007.
- [3] Hua Ma and Junichi Yamaoka. Sensequins: Smart textile using 3d printed conductive sequins. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3526113.3545688.
- [4] Masato Sekine, Naoya Watabe, Miki Yamamura, and Hiroko Uchiyama. Shell shaped smart clothes for non-verbal communication. In *Proceedings of the 11th Augmented Human International Conference*, AH '20, pp. 1–2, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3396339.3396341.
- [5] Alessandro Chiolerio Stoppa Matteo. Wearable electronics and smart textiles: a critical review. *Sensors (Basel)*, 2014.
- [6] Akira Wakita and Midori Shibutani. Mosaic textile: wearable ambient display with non-emissive color-changing modules. In *Proceedings of the 2006*

- ACM SIGCHI international conference on Advances in computer entertainment technology*, ACE '06, pp. 48–es, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1178823.1178880.
- [7] Hudson Scott E Yao Lining Rivera Michael L, Forman Jack. Hydrogel-textile composites: Actuators for shape-changing interfaces. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, p. 1–9, New York, NY, USA, 2020. URL: <https://doi.org/10.1145/3334480.3382788>, doi:10.1145/3334480.3382788.
- [8] Harold Koda. *Extreme Beauty: The Body Transformed*. Metropolitan Museum of Art, New York, 2001.
- [9] Joanna Berzowska and Marcelo Coelho. Kukkia and vilkas: kinetic electronic garments. In *Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pp. 82–85, Osaka, Japan, 2005. IEEE. doi:10.1109/ISWC.2005.29.
- [10] Hussein Chalayan. Rise. <https://www.dezeen.com/2013/03/06/rise-by-hussein-chalayan/amp/>, 2013. Accessed: 2024-12-16.
- [11] Fredrik Tjaerandsen. Balloon dresses at csm graduate fashion show. <https://www.designboom.com/design/fredrik-tjaerandsen-balloon-dresses-csm-graduate-fashion-show-06-03-2019/>, 2019. Accessed: 2024-12-16.
- [12] Jiyeshen. Retractable garment designed for pregnant women. <https://www.taipeidaward.taipei/Post/181479>, 2023. Accessed: 2024-12-16.
- [13] Oscar Tomico, Lars Hallnäs, Ron-Hsien Liang, and Stephan A. Wensveen. Towards a next wave of wearable and fashionable interactions. *International Journal of Design*, Vol. 11, No. 3, pp. 1–6, 2017. URL: <http://www.ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/viewFile/3177/793>.

- [14] Huan-Lin Kao, Deborah Ajilo, Oksana Anilionyte, Artem Dementyev, Inrak Choi, Sean Follmer, and Chris Schmandt. Exploring interactions and perceptions of kinetic wearables. In *Proceedings of the Conference on Designing Interactive Systems*, pp. 391–396, New York, NY, 2017. ACM. doi:10.1145/3064663.3064686.
- [15] Viirj Kan, Katsuya Fujii, Judith Amores, Chang Long Zhu Jin, Pattie Maes, and Hiroshi Ishii. Social textiles: Social affordances and icebreaking interactions through wearable social messaging. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 619–624, New York, NY, USA, 2015. ACM. doi:10.1145/2677199.2688816.
- [16] Kate Hartman, Jackson McConnell, Boris Kourtoukov, Hillary Predko, and Izzie Colpitts-Campbell. Monarch: Self-expression through wearable kinetic textiles. In *9th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 413–414, New York, NY, 2015. ACM. doi:10.1145/2677199.2690875.
- [17] Çağla Genç, Oğuz Buruk, Serkan İnal, Kerem Can, and Oguzhan Özcan. Exploring computational materials as fashion materials: Recommendations for designing fashionable wearables. *International Journal of Design*, Vol. 12, No. 3, 2018. URL: <https://www.ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/2831/832>.
- [18] デジタルプリントと持続可能性. <https://textile.komon-koubou.jp/digitalprint-sustainable/#:~:text=%E3%83%87%E3%82%B8%E3%82%BF%E3%83%AB%E3%83%97%E3%83%AA%E3%83%B3%E3%83%88%E3%81%A8%E3%81%AF&text=%E7%94%9F%E5%9C%B0%E3%81%AB%E7%9B%B4%E6%8E%A5%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%AF%E3%82%92,%E3%81%AB%E5%AF%BE%E5%BF%9C%E3%81%97%E3%81%A6%E3%81%84%E3%81%BE%E3%81%99%E3%80%82&text=%E5%88%86%E6%95%A3%E6%9F%93%E6%96%99%E3%81%8C%E7%86%B1%E3%81%A7,%E5%8D%B0%>

- E6%8D%BA%E3%81%99%E3%82%8B%E5%8A%A0%E5%B7%A5%E6%96%B9%E6%B3%95%E3%80%82, 2023. Accessed: 2024-12-16.
- [19] Stratasy. Polyjet 3d printer tech style. <https://www.stratasy.co.jp/3d-printers/printer-catalog/polyjet/3d-printer-tech-style/>, 2023. Accessed: 2024-12-16.
- [20] Matthew Mauriello, Michael Gubbels, and Jon E. Froehlich. Social fabric fitness: the design and evaluation of wearable e-textile displays to support group running. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 2833–2842, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2556288.2557299.
- [21] X. Shi, Y. Zuo, P. Zhai, et al. Large-area display textiles integrated with functional systems. *Nature*, Vol. 591, pp. 240–245, 2021. doi:10.1038/s41586-021-03295-8.
- [22] Miller Gavin Dierk Christine, Rhodes TJ. Project primrose: Reflective light-diffuser modules for non-emissive flexible display systems. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22, New York, NY, USA, 2022. URL: <https://doi-org.kras.lib.keio.ac.jp/10.1145/3526113.3545625>, doi:10.1145/3526113.3545625.
- [23] Howell Noura Lee Jung Lin Gong Nan-Wei Karagozler M. Emre Fukuhara Shiho Poupyrev Ivan Paulos Eric Ryokai Kimiko Devendorf Laura, Lo Joanne. "i don't want to wear a screen": Probing perceptions of and possibilities for dynamic displays on clothing. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, p. 6028–6039, New York, NY, USA, 2016. URL: <https://doi-org.kras.lib.keio.ac.jp/10.1145/2858036.2858192>, doi:10.1145/2858036.2858192.

- [24] Laura Perovich, Philippa Mothersill, and Jennifer Broutin Farah. Awakened apparel: embedded soft actuators for expressive fashion and functional garments. In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '14, pp. 77–80, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2540930.2540958.
- [25] T. Fox. Smart textiles respond to human emotions. *MRS Bulletin*, Vol. 45, pp. 694–696, 2020. doi:10.1557/mrs.2020.236.
- [26] Halley P. Profita, Nicholas Farrow, and Nikolaus Correll. Flutter: An exploration of an assistive garment using distributed sensing, computation and actuation. In *Proceedings of the 9th Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, pp. 359–362, New York, NY, 2015. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2677199.2680586.
- [27] Wen Wang, Lining Yao, Chin-Yi Cheng, Teng Zhang, Hiroshi Atsumi, Luda Wang, Guanyun Wang, Oksana Anilionyte, Helene Steiner, Jifei Ou, Kang Zhou, Chris Wawrousek, Katherine Petrecca, Angela M. Belcher, Rohit Karnik, Xuanhe Zhao, Daniel I. C. Wang, and Hiroshi Ishii. Title of the article. *Science Advances*, Vol. 3, No. 5, p. e1601984, 2017. doi:10.1126/sciad.1601984.
- [28] Kentaro Ueda, Tsutomu Terada, and Masahiko Tsukamoto. Haptic feedback method using deformation of clothing. In *Proceedings of the 17th International Conference on Advances in Mobile Computing Multimedia*, MoMM2019, pp. 84–93, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3365921.3365933.
- [29] Randall M. Erb, James J. Martin, Ramin Soheilian, Cong Pan, and James R. Barber. Actuating soft matter with magnetic torque. *Advanced Functional Materials*, Vol. 26, pp. 3859–3880, 2016. doi:10.1002/adfm.201504699.

- [30] 佐藤勝昭. 基礎から学ぶ磁性材料. Publisher Name, 2020.
- [31] Kentaro Yasu. Magneswift: Low-cost, interactive shape display leveraging magnetic materials. In *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, pp. 1–11, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3613904.3642058.
- [32] Magnetic iron pla. https://proto-pasta.com/products/magnetic-iron-pla#product_details. Accessed: 2024-12-16.
- [33] Yuk H. Zhao R. et al. Kim, Y. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials. *Nature*, Vol. 558, pp. 274–279, 2018.
- [34] 川口智幸. 三星インキ株式会社: 特殊インキ. <https://letterpresslabo.com/2019/09/30/mitsuboshi-inki-column15/>, Sep 2019. Accessed: 2024-12-16.
- [35] Jose Francisco Martinez Castro, Alice Buso, Jun Wu, and Elvin Karana. Tex(alive): A toolkit to explore temporal expressions in shape-changing textile interfaces. In *Proceedings of the 2022 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '22, pp. 1162–1176, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3532106.3533515.
- [36] Farhang Momeni, Seyed M.Mehdi Hassani.N, Xun Liu, and Jun Ni. A review of 4d printing. *Materials and Design*, Vol. 122, pp. 42–79, 2017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517302034>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.068>.
- [37] Q. Zhang, K. Zhang, and G. Hu. Smart three-dimensional lightweight structure triggered from a thin composite sheet via 3d printing technique. *Sci Rep*, Vol. 6, p. 22431, 2016. doi:10.1038/srep22431.

- [38] A. Agkathidis, Y. Berdos, and A. Brown. Active membranes: 3d printing of elastic fibre patterns on pre-stretched textiles. *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 17, No. 1, pp. 74–87, 2019. doi:10.1177/1478077118800890.
- [39] Fukumoto Masaaki Ogata Masa. Fluxpaper: Reinventing paper with dynamic actuation powered by magnetic flux. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, p. 29–38, New York, NY, USA, 2015. URL: <https://doi-org.kras.lib.keio.ac.jp/10.1145/2702123.2702516>, doi:10.1145/2702123.2702516.
- [40] Jifei Ou, Mélina Skouras, Nikolaos Vlavianos, Felix Heibeck, Chin-Yi Cheng, Jannik Peters, and Hiroshi Ishii. aeromorph - heat-sealing inflatable shape-change materials for interaction design. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, p. 121–132, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/2984511.2984520>, doi:10.1145/2984511.2984520.
- [41] Max Alberts. 4d textile printing. <https://ddwtue.nl/projects/2023p-4d-textile-printing/>. Accessed: yyyy-mm-dd.

付 録

A. ファブリケーションガイド

ファブリケーションガイド

本ガイドでは、磁性テキスタイルの直立パターンの製作と制御のための標準化プロセスを提供します。この手順は、作業準備、パターンデザイン、3Dプリントと熱転写、制御層の設計と組み立ての4つのステップで構成されています。

1. 作業材料準備

展示層

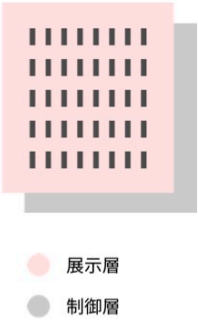
ポリエステル（伸縮性、耐熱性250℃以上、表面粗さ適度）、磁性フィラメント

制御層

硬質泡沫板、磁石（φ8×4、50×4×4など）。

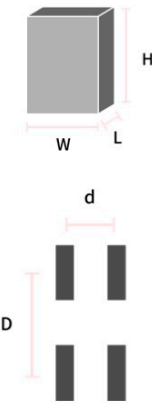
ツール

3Dプリンター（FDM方式）、アイロン、カッター、テープなど。



2. パターンデザイン

パラメータの設定



パラメータ	値（推奨）	設計自由度/説明
単一立方体のサイズ		
幅（W）	5.5 mm	一定の幅を維持、デザイン要件に応じて調整可能
高さ（H）	7.5 mm	$H > W$ 、目立つ動きにはより大きい高さが必要
長さ（L）	1.2 mm	$L \leq 0.5 \times W$ 、薄片構造を維持
立方体間の間隔		
列間隔（d）	6.5	$0.5 \times H \sim 1.5 \times H$
行間隔（D）	10	$1.5 \times W \sim 2.5 \times W$
ピクセル単位の配列		
行数	可変	デザイン要件に応じて調整可能
列数	可変	デザイン要件に応じて調整可能

パターン設計時には以下の手順でパラメータを設定することが推奨される。

1. 設計する図案の全体的な大きさに基づいて、基準となる立方体の幅（W）を決定する。
2. 決定した幅を基準として、立方体の高さ（H）や長さ（L）を設定する。特に、HはWを上回り、LはWの半分以下となる範囲で設計することで、動的パターンの視覚的効果を最大化できる。

- 立方体間の列間隔 (D) と行間隔 (D) は、幅と高さを基準に適切な範囲内で調整し、デザインの一体感と動作の連続性を確保する。
- デザインの要求に応じてピクセル単位の配列 (行数と列数) を設定することで、全体のパターンレイアウトを完成させる。

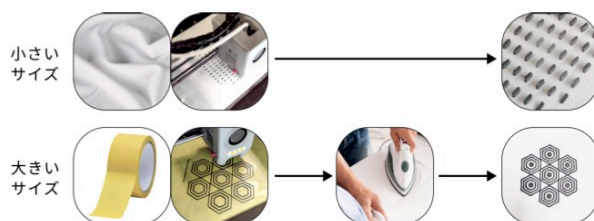
設計ツール

パラメータ設計の基準に基づき、任意の3D建模ソフトウェアを使用して磁性テキスタイルのパターンを作成できます。効率的かつ直感的なデザインを可能にするため、**TinkerCAD**を用いたテンプレートを提供しています。このテンプレートでは、必要なパラメータを入力するだけで、希望の図案を迅速に生成できます。



3. 3Dプリントと熱転写

パターン製作手順



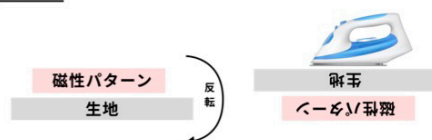
- 小サイズの生地: 生地 directly にプリントする。
- 大サイズの生地: テープにプリントしてから、生地に熱転写する。

布への3Dプリント注意点

- 生地をプリントベッドに均一に張り付け固定する。
- プリント中に布が引っ張られないようテンションを適度に調整。
- プリント後、アイロンでパターンを再固定する可能性がある。

3Dプリンターセットアップ

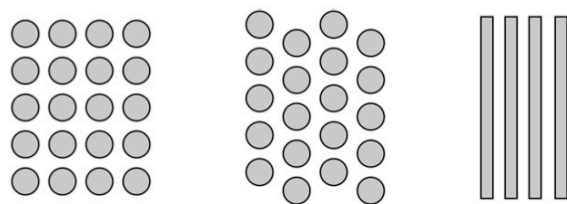
プリンター設定	値
ベッド温度	室温～60℃
ノズル温度	185～215℃
プリント速度	初層: 10～20 mm/s、その他: 20～80 mm/s
押出ファン速度	最大RPMの10～20%
リトラクション	最小限
レイヤー高さ	0.15～0.20 mm

熱転写

- ・ アイロン温度: 200-210℃。
- ・ 生地裏面にアイロンを当て、フィラメントを溶解させながら生地につけさせる。
- ・ 複数回短時間で圧着し、接着強度を高める。
- ・ 注意点: 過熱によるパターンの変形を防ぐ。

4. 制御効果のデザイン**磁石の選定**

- ・ $\phi 8 \times 4$: 高精度、局所制御に適している。
- ・ $50 \times 4 \times 4$: 広範囲の動的パターンに適している。

磁石の配置**固定方法**

- ・ 泡沫板の嵌入設計: 磁石を泡沫板内に嵌め込み。
- ・ テープを使用して、磁石の動きを防止。