

# 刺繍の縫い方の違いによる触覚特性の変化

篠田和宏<sup>1,a)</sup> マラクリヤ シルバン<sup>2,1</sup> 亀崎 允啓<sup>1</sup> 矢谷 浩司<sup>1</sup>

**概要:** 布特有の触覚特性を活用することで、布インタフェースにおいてアイズフリーやアフォーダンスを実現する手法が研究されている。先行研究では形状や輪郭の凹凸などにより触覚を変化させていたが、同時に外観も変化していた。しかし、外観はインタフェースの機能も示すなど、必ずしも触覚のために自由に変えられるものではない。そこで本研究では、刺繍の縫い方の違いによって、外観や形状に依存せずに触覚特性を変化させる手法を提案する。まずは様々な刺繍の縫い方から触覚に影響を及ぼしうる縫い方を絞り込み、縫い方のデザインスペースを定義する。その中から 26 種類の刺繍を用いてユーザ実験を行い、縫い方と触覚知覚の関係を明らかにする。また、縫い方ごとの外観類似性のユーザ実験も行い、外観に依存しない触覚の設計手法を提案する。

## 1. はじめに

スマートテキスタイル技術の進展により、日常的に用いる布製品に対してインタラクティブな機能を統合することが可能になっている。これまでの研究は、センシング技術やデジタルファブ리케이션といった技術的側面に焦点を当ててきた。しかし、布ならではの特性に基づく効果的なインタラクションを実現するには、技術的側面だけでなくインタフェースデザインの側面も検討することが重要である。

布のインタフェースにおけるデザインの側面なかでも、布の「触覚」に大きな関心が寄せられている。布ならではの多様な触覚特性を適切にデザインすることで、目で見ずに触覚だけで操作できるようなアイズフリーなインタフェースを設計したり [8]、指で触れた時の動きを誘導するアフォーダンスを設計する [6] が可能となる。一方で、既存の研究でも行われているこれらの手法は、形状 [7], [8], [11] や輪郭 [8], [11] といった布インタフェースの幾何学的性質の変更を前提としている。これらの方法はインタフェースの触覚特性を操作できる一方で、視覚的外観も変化させてしまう。インタフェースの形状や外観は機能やアフォーダンスも示していることから、触覚のために自由に変えられるものではない。したがって、外観に依存せずに布上で所望の触覚特性を実現する必要がある。

そこで本研究では、刺繍の縫い方の違いにより触覚特性を変化させる手法を提案する。刺繍にはピッチ（一針で縫

う長さ）や偏差（縫い目のずれ）など様々な縫い方を構成するパラメータがあり、これらを変化させることで様々な触覚特性を実現することができる。さらに、縫い方の変化は形状やサイズに依存しないことから、外観に与える影響は小さく布上で汎用的に使える手法である。

本研究では、まずさまざまな刺繍の縫い方の中で、触覚に影響を与える縫い方のデザインスペースを探索した (Study1)。次に、定義されたデザインスペースにある縫い方がもたらす触覚知覚をユーザ実験を通して明らかにした (Study2)。さらに、それらの縫い方の違いが実際にどの程度外観類似性を有しているのかを明らかにするためのユーザ実験を行った (Study3)。これらのユーザ実験を通して、外観に依存せず触覚特性を変化させる刺繍設計指針を提案する。本研究の貢献は以下のとおりである。

- 刺繍設計ソフトの調査と専門家インタビューを通じた触覚に影響を及ぼす縫い方のデザインスペースの探索。
- 縫い方の違いが触覚知覚に与える影響の調査。
- 縫い方の違いが外観類似性に与える影響の調査。
- 外観に依存せず触覚を変化させる刺繍設計指針の提案。

## 2. 関連研究

布インタフェースは、センシングやアクチュエータを布地に組み込むことで、柔らかく変形可能で日常的にも受容されやすいインタラクションをもたらす。布は素材としてのアフォーダンスに加え、触覚的な手掛かりによって視覚に頼らない操作を実現する。この特性は、滑らかなガラスや金属の表面では達成が難しい。したがって、このような触覚の適切な設計は布インタフェースを有効に実現するた

<sup>1</sup> 東京大学

<sup>2</sup> リール大学

<sup>a)</sup> kazuhiko@iis-lab.org

めに必要である。

これまでのスマートテキスタイルの研究はセンシング技術 [5] やファブリケーション技術 [10] に焦点を当てており、インタラクティブデザインに関してはしばしば副次的に扱われてきた。その結果として多くの布インタフェースは既存の GUI ウィジェット (例: ボタン, スライダー) を模したものとなっている [3]。これは視覚的にはわかりやすい一方で、触覚デザインの探索を手薄にしてしまった。このような背景から、テキスタイル上の触覚シグニファイアを体系的に研究し、視覚に依存しないインタラクションに向けた取り組みが行われてきている。

## 2.1 布上における触覚デザイン

布インタフェースにおけるインタフェースデザインとして触覚に着目した研究が行われ始めている。Mlakar らは専門家インタビューを通して、布インタフェースの設計において考慮すべき項目として、触覚的コントラスト (テクスチャや高さ)、インタラクティブ領域と非インタラクティブ領域の明確な区別、知覚可能な最小サイズ、形状に基づく機能の表示、触れられるシンボルの活用の 5 つの項目を提案している [7]。また、同じく Mlakar らは、テキスタイル表面の物理特性がどのジェスチャを誘発するか (例: なでる, こする) をどのように伝え得るかを探究し、布インタフェースは学習負荷を減らすためにモダリティと方向性を受動的に伝えるべきだと提案している [6]。この視点は既存の布インタフェースが抱えていた実践的な課題の解決につながる。たとえば、Project Jacquard は衣料品へのタッチセンシングの大規模な統合を可能にした一方で [10]、比較的均一なテキスタイル表面であったため、その場でインタラクティブ領域を区切ったり、利用可能なジェスチャを伝えたりする触覚シグニファイアに乏しかった。より広く言えば、布上の GUI のようなアイコンは視覚的には識別可能でも、アイズフリーでの操作に必要な触覚による識別はできない。これは衣服などに組み込んでウェアラブルインターフェースにした際に、自然な姿勢では操作する手元が視界に入ることではないため、アイズフリーであることがより重要になる。そのためにも、触覚のみで識別可能になるようなインタフェースデザインが求められる。

## 2.2 布インタフェースのデザインにおける触覚の活用

布上における触覚シグニファイアが識別可能性やユーザの入力精度に与える影響を評価した研究が行われている。Nowak らは、布上におけるスライダー UI を対象に、スライダーの形状 (直線や曲線など)、輪郭の凹凸、目盛の有無・配置の 3 つのパラメータを体系的に変化させてユーザ実験を行い、少なくとも 3 箇所の触覚目盛が位置同定とユーザの確信度を大幅に改善すること、また非一様な目盛

配置が意味的に重要な状態を強調できることを示した [8]。Schäfer らは布上におけるボタンを対象に、84 種の触覚アイコン (形状 × 高さプロファイル × 面処理) を製作し、凸型が平坦や凹型に比べて一般に好まれ、より速く高精度に認識されることを示した。また、視覚的には異なるが触覚的には混同されやすいペアを特定し、アイズフリーなインタフェースの設計において視覚的な差異に過度に依存すると触覚的には識別できなくなってしまうことを示している [11]。これらの研究は、布上における触覚設計の変数として、形状や輪郭の凹凸を提案している。ただ、これらの変数は UI 要素の形状や外観も変化させてしまうという課題がある。UI 要素の形状や外観などの視覚的要素は、その UI の機能なども示しているため、触覚デザインのみを目的として変化させることは好ましくない。そこで、形状や外観に依存することなく、布上に所望の触覚特性を実現する手法が必要である。

## 2.3 テクスチャの違いが触覚知覚に与える影響

触覚知覚は刺激のスケールによって異なることが知られており、細かなテクスチャは指滑走時に生じる振動情報 (パチニアン系) で、粗い起伏は皮膚上の空間的分布情報 (SA I 系) で主に弁別される (デュプレックス理論) [1], [4]。本研究では、*Surface I/O* の整理に倣い、おおよそ macro (10 mm–1 mm), meso (1 mm–200  $\mu$ m), micro (< 200  $\mu$ m) の 3 種類のスケールを前提とし [2]、刺繍で設計可能なスケールから macro ( $\leq$  10 mm), meso ( $\leq$  1 mm) を中心に議論する。さらに、触覚質感は粗さ (細かい/粗い) だけでなく、硬さ/柔らかさ、温冷感、滑りやすさといった複数の知覚次元から構成されることが体系化されている [9]。これらのを元にさまざまな材質やテクスチャに対して、触覚知覚を検証する研究が行われてきている [2]。

刺繍による触覚知覚の特徴としては、素材としての糸がもつ meso-scale の触覚 (糸の繊維/擦りによる質感) と、ピッチ・糸密度・偏差などの縫いパラメータが作る macro-scale の起伏・境界を同一素材・同一外観の中で重ね合わせられる。このように、刺繍では meso-scale と macro-scale が異なる方向で作用しうするため、従来の「形状だけ/微細テクスチャだけ」を前提にした設計とは本質的に異なるデザイン自由度を持っていることが刺繍ならではの特徴である。

## 3. Study1: 縫い方の探索

### 3.1 既存の縫い方の調査

刺繍の縫い方は非常に多くの種類があることから、縫い方を絞り込み、外観を変えずに触覚を変化させられる縫い方のデザインスペースを探索した。縫い方を絞り込む前に、刺繍設計ソフトに搭載されている縫い方を調査して、既存の縫い方を列挙した。刺繍設計ソフトにある縫い方を対象

としたのは、ソフトに無い縫い方を一般の刺繍デザイナーが扱うことは難しいため、誰もが知見を活用できるようにすることを目指した。調査対象としたのは、刺しゅうPRO 11 (ブラザー工業株式会社), Wilcom EmbroideryStudio (wilcom 社), DG16 (タジマ工業株式会社) の3つである。上記ソフトウェアで共通して搭載されている縫い方の中から、本研究の趣旨を鑑みて、以下の縫い方をデザインスペースには含めなかった。

- デザイン性の高いモチーフ (ハート, 葉っぱなど) の集合で構成された縫い方。本研究の「外観に依存せず触覚を変える」という趣旨に反するため除いた。
- 不規則な縫い方 (ピッチ・角度・密度などの刺繍パラメータ) が不均一な縫い方。縫い方として再現性がないので、この縫い方によって得られる触覚についても応用可能な知見として扱いづらいため。
- 糸密度が薄く布が見えてしまっている縫い方 (クロスステッチ, ネットフィルなど)。刺繍している布地が透けていることによって、指が布にも触れており、縫い方よりも布の方が触覚に影響を与えるため。

上記を踏まえて、残った縫い方に対して、ソフトウェア上設定可能な範囲や実際に刺繍した時の再現性をもとにパラメータを絞り込み、56種類の仮の縫い方セットを定義した。

### 3.2 専門家インタビュー

次に、56種類からなる仮の縫い方セットに対して、セットに含まれる縫い方の懸念や、含まれていないがデザインスペースに含めるべき縫い方を明らかにするために、刺繍を設計した経験がある方にインタビューを行った。インタビューを行ったのは5名で、刺繍の経験は数ヶ月の方から30年の方まで経験年数は様々であった。インタビューではまず、仮の縫い方セットを作成した手順やセットに含まれる縫い方・パラメータに対して説明を行った。ここでは、56種類の刺繍を実際に作成し、専門家の方に触れてもらいながらインタビューを行った。その後、仮の縫い方セットにある縫い方に対して、刺繍の実現可能性や再現性に対する懸念を聞いた。得られた結果の概要として、仮の縫い方セットには一般的な刺繍には使われないような縫い方がたくさんあるという指摘があったものの、それは布が歪んでしまい再現性高く綺麗に縫えないというものもあれば、経済合理性から使わないだけで縫うこと自体は問題ないものもあるという意見が得られた。これらを踏まえて後者の布が歪んでしまうものは再現性がないので、デザインスペースから除いた。具体例としては、糸が特定箇所に集中する縫い方 (同心円, 放射) で糸密度が高いものが挙げられた。また、仮の縫い方セットに無いが、触覚に影響を与える縫い方を提案していただいた。プログラムタタミ縫

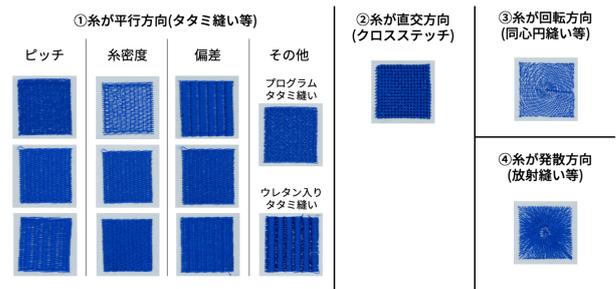


図 1: Study1 を通して作成した触覚に関わる刺繍の縫い方のデザインスペース。

い (ピッチなどのパラメータが一定値ではないが規則的なもの) やウレタン入り 3D タタミ縫いは一般的なミシンや素材, 設計ソフトで実現可能で再現性が高いためデザインスペースに含めた。一方で, 特殊なミシンや糸を利用した刺繍は汎用的な知見として扱いづらいためデザインスペースには含めなかった。

### 3.3 縫い方のデザインスペース

Study1 を通して, 図 1 に示すような触覚を変化させる縫い方のデザインスペースを定義した。デザインスペースは糸の方向から次の 4 種類に分類される。

1. 糸が平行方向 (同一方向) の場合 ここで代表的なのはタタミ縫いである。タタミ縫いはメアンダ状に図形を埋めるように縫う縫い方である。タタミ縫いを構成するパラメータは主にピッチ・糸密度・偏差の 3 種類があり, これらの組み合わせによってタタミ縫いの刺繍が作られる。ピッチは 1 針で縫う長さであり, これが長いほど糸による凹凸が粗くなる。糸密度は単位長さあたりの糸の本数であり, 大きいほど刺繍は分厚く指で触れても糸が動かなくなる。偏差は縫い目のずれであり, 0%だと縫い目が揃って直線上の凹凸ができるが, 25%や 50%だとその凹凸が見られない。また, これら 3 種類のパラメータを一定値ではなくある数列に基づいて規則的に変化させたプログラムタタミ縫いや偏差 0%でできる凹凸をウレタンを入れることでより強調される 3D タタミ縫いも一般的な刺繍でよく使われることからデザインスペースに含めた。制約としては, ピッチが短すぎるものは布によっては縮みやすい可能性がある。また, ピッチが長いと刺繍の端が引っかかりほつれやすくなる可能性がある。

2. 糸が直交方向の場合 クロスステッチなどの糸が直交方向に交わるような縫い方が含まれている。パラメータとしてはピッチと糸密度がある。制約としては, ピッチが長いと布が透けてしまうので, 刺繍で触覚を作る上ではピッチは短くする必要がある。

3. 糸が回転方向の場合 同心円縫い, 渦巻き縫いなど, 一針ずつ縫うごとに曲がりながら縫っていき, 円を描くような縫い方である。パラメータとしてはピッチと糸密度がある。制約としては, 糸密度が大きいと糸が中心部分に詰

表 1: 刺繍サンプルの縫い方の一覧.

ID	縫い方	ピッチ	糸密度	偏差
1	タタミ縫い	1mm	2本/mm	0%
2	タタミ縫い	1mm	2本/mm	25%
3	タタミ縫い	1mm	2本/mm	50%
4	タタミ縫い	1mm	6本/mm	0%
5	タタミ縫い	1mm	6本/mm	25%
6	タタミ縫い	1mm	6本/mm	50%
7	タタミ縫い	4mm	2本/mm	0%
8	タタミ縫い	4mm	2本/mm	25%
9	タタミ縫い	4mm	2本/mm	50%
10	タタミ縫い	4mm	6本/mm	0%
11	タタミ縫い	4mm	6本/mm	25%
12	タタミ縫い	4mm	6本/mm	50%
13	タタミ縫い	8mm	2本/mm	0%
14	タタミ縫い	8mm	2本/mm	25%
15	タタミ縫い	8mm	2本/mm	50%
16	タタミ縫い	8mm	6本/mm	0%
17	タタミ縫い	8mm	6本/mm	25%
18	タタミ縫い	8mm	6本/mm	50%
19	放射縫い	4mm	2本/mm	-
20	同心円縫い	4mm	2本/mm	-
21	クロスステッチ	6mm	1.5本/mm	-
22	3D タタミ	4mm	6本/mm	0%
23	3D タタミ	8mm	6本/mm	0%
24	プログラムタタミ (檜垣)	-	6本/mm	-
25	プログラムタタミ (紗綾)	-	6本/mm	-
26	プログラムタタミ (菱)	-	6本/mm	-

まって布が中心部分に集まるように歪んでしまうので小さくすべきである。また、ピッチが短いと同様に布が歪んでしまうので長くすべきである。

4. 糸が発散方向の場合 放射縫いなどある中心点から離れるにつれて隣り合う糸間の距離が離れていくような縫い方である。制約としては、糸密度が大きいと布が中心部分から離れる方向に引っ張られて布が歪んでしまったり、穴が開いてしまう場合があるので小さくすべきである。また、ピッチが短いと同様に布が歪んでしまうので長くすべきである。

## 4. Study2: 縫い方と触覚知覚の関係

### 4.1 実験用刺繍の作成

3.3 をもとに実験対象とする刺繍を図 2 および表 1 に示す 26 種類とした。タタミ縫い以外のパラメータの範囲が少ないのは、専門家インタビュー等を通して、綺麗に縫うことができない縫い方を除いたためである。

刺繍の作成には家庭用刺繍ミシン (Inovis NX2800DW, ブラザー工業) を利用した。糸はパールヨット社製のポリエステル 100% で太さが最も一般的な 120d/2 の糸を使用し

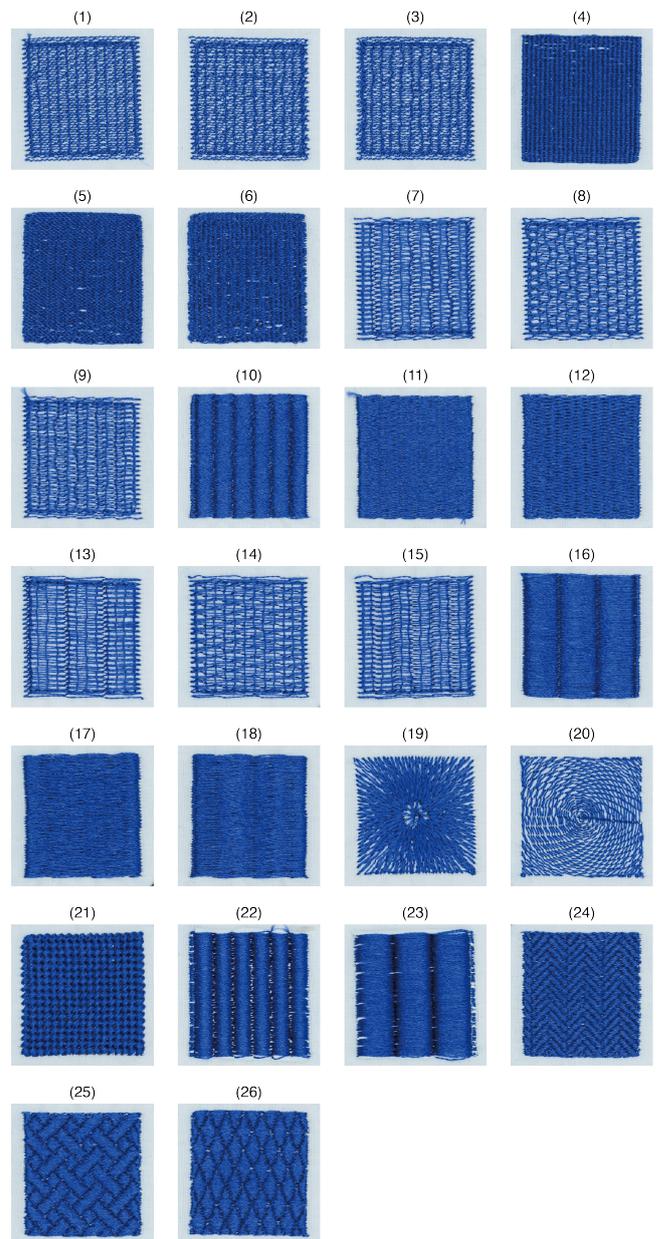


図 2: 実験で使用した 26 種類の刺繍.

た。事前の検証で、レーヨン 100% の糸も使用したが、触覚にはあまり影響しなかったため、ポリエステルのみを使用した。生地は綿 100% のシーチングを用い、刺繍の歪みを防ぐために接着芯を貼り付けて刺繍を行った。作成した刺繍は全て刺しゅう PRO 11 (ブラザー工業) という刺繍設計ソフトウェアを利用した。

縫い方に関わらず、全ての刺繍は一辺が 2.5cm の正方形で作成した。刺繍の角度 (糸の方向) は一部 (同心円・放射・クロスステッチ) を除き、全て同じ方向とした。刺繍したものは直径 4cm の円形の刺繍枠に入れた。したがって、実験参加者が刺繍に触れる際は布のすぐ裏に刺繍枠内部の木の板がある。

### 4.2 実験方法

実験は手指が健康な 18 歳以上を対象とし、10 代から 40

表 2: 本研究で使用した刺繍の触覚特性に関する質問リスト. 質問リストは Surface I/O[2] を元に作成した. 「\*」印のスケールタイプの質問 (q1~q10) は, 水平方向と垂直方向の 2 方向で実施し, それぞれ同一の質問文・選択肢を用いた.

ID	種類	質問文 (選択肢)
open1	オープン	サンプルをどのように触るのが良いと思いますか? もしあれば, それは何ですか?
open2	オープン	サンプルの感触を 1 文で説明してください。
q1*	スケール	サンプルの触覚刺激をどの程度強く感じますか? (とても弱い / 少し弱い / 普通 / 強い / とても強い)
q2*	スケール	サンプルの触覚は快適ですか, 不快ですか? (とても不快 / 不快 / 普通 / 快適 / とても快適)
q3*	スケール	サンプルは鈍いですか, 鋭いですか? (dull / sharp) (とても鈍い / 鈍い / 普通 / 鋭い / とても鋭い)
q4*	スケール	サンプルはより連続的に感じますか, 離散的に感じますか? (continuous / discrete) (とても連続的 / 連続的 / 普通 / 離散的 / とても離散的)
q5*	スケール	サンプルは平らですか, でこぼこしていますか? (flat / bumpy) (とても平ら / 平ら / 普通 / でこぼこしている / とてもでこぼこしている)
q6*	スケール	サンプルは滑らかですか, 粗いですか? (smooth / rough) (とても滑らか / 滑らか / 普通 / 粗い / とても粗い)
q7*	スケール	サンプルは滑りやすいですか, 粘着性がありますか? (slippery / sticky) (とても滑りやすい / 滑りやすい / 普通 / 粘着性がある / とても粘着性がある)
q8*	スケール	サンプルは温かいですか, 冷たいですか? (warm / cold) (とても温かい / 温かい / 普通 / 冷たい / とても冷たい)
q9*	スケール	サンプルは柔らかいですか, 硬いですか? (soft / hard) (とても柔らかい / 柔らかい / 普通 / 硬い / とても硬い)
q10*	スケール	サンプルは指の動きをどの程度誘導しているように感じますか? (まったく誘導しない / 少し誘導する / 普通 / 明確に誘導する / 非常に明確に誘導する)
q11	選択式	指の動きを誘導していると感じる場合, どの方向に感じますか? (上-下 / 右上-左下 / 左右 / 右下-左上 / 誘導しない)



図 3: Study2 の実験の様子 (a) 実験の様子. (b) 質問回答システム.

代の 26 名 (男性 13 名, 女性 13 名) が参加した. 実験は以下の手順で行われた

- (1) 26 種類の刺繍をランダムな順番で全て触ってもらい, どのような刺繍があるか把握してもらった. 様々な方向やスピードで刺繍の表面を指で探索するように指示した.
- (2) 先ほどとはまた異なる順番で刺繍を触りながら, 触覚知覚に関する表 2 に示す質問に回答してもらった.

図 3 は実験の様子と質問回答システムのスクリーンショットである. 刺繍枠は木製の治具に固定するように配置した. 視覚による影響を避けるために, 参加者は刺繍を見ずに触れて触覚のみで質問事項に回答した. 刺繍の提示順による影響を避けるために, 参加者ごとに異なる順番で刺繍を提示した.

### 4.3 結果と考察

図 4 は刺繍サンプルごとのリッカート尺度の質問 (Q1-Q10) の結果を示す. 上の 10 個は左右方向, 下の 10 個は上下方向に触れた時の触覚知覚であり, 棒グラフの薄い水色はタタミ縫い, 緑は同心円縫い, 濃い水色は放射縫い, ピンクはクロスステッチ, 濃い青は 3D タタミやプログ

ラムタタミ縫いを示している. 全体的に, 上下方向よりも左右方向の方が縫い方ごとに触覚知覚が異なる傾向にある. 質問ごとに関して, 触覚刺激 (tactile intensity) や平ら/でこぼこ (flat/bumpy), 指の動きの誘導 (no direction/strong direction) は縫い方ごとに大きな違いが見られる. 対照的に, 温冷感 (warm/cold) は縫い方ごとにほとんど違いがない. 縫い方ごとにみると, タタミ縫い (1-18) は触覚刺激 (tactile intensity), 連続/離散 (continuous/discrete), 平ら/でこぼこ (flat/bumpy) は縫いパラメータごとに大きな違いが見られる. 特にピッチが 1mm の場合や偏差が 0% の時に, 強い触覚刺激で離散的でこぼこな触覚知覚を生じる. それ以外のパラメータではその逆の傾向が見られる. 放射縫い (19)・同心円縫い (20) は方向誘導 (j, t) が最も低く, 粗さ (f) と凹凸 (e) はやや高めである. これは糸の方向が全方向にあるため, 左右も上下も両方で糸の流れに逆らうように触ることになるため, 方向誘導は弱くなり, 粗さや凹凸を感じやすい. クロスステッチ (21) は左右方向における鋭さ (c) と硬さ (i) がいずれも平均 4 前後と高めで, 粗さ (f) や粘着性 (g) も相対的に高い. 一方で方向誘導 (j, t) は中程度で強い方向誘導にはなりにくい. 3D タタミ縫い (22,23) はでこぼこ (e) は左右方向で 4.5~5 と極めて高く, 粗さ (f) や硬さ (i, s) も高い. 触覚刺激 (a, k) も相対的に大きく, 「はっきりした凹凸と強い刺激」を与える刺繍である.

図 5 は指の誘導方向に関する質問 (Q11) の結果を示している. 多くの刺繍で左右方向が最も多くなっているが, これは糸の方向と一致している. 放射縫い (19), 同心円縫い

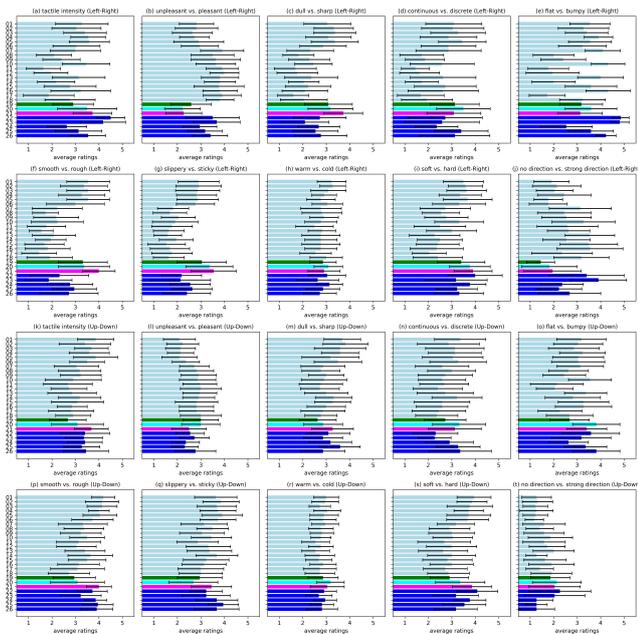


図 4: 刺繍サンプルごとのリッカート尺度の質問 (Q1-Q10) の結果. 縦軸は刺繍サンプルの ID, 横軸は 5 段階リッカート尺度の平均値を示している. 10 問分 × 2 方向 (左右・上下) で 20 個のグラフがある.

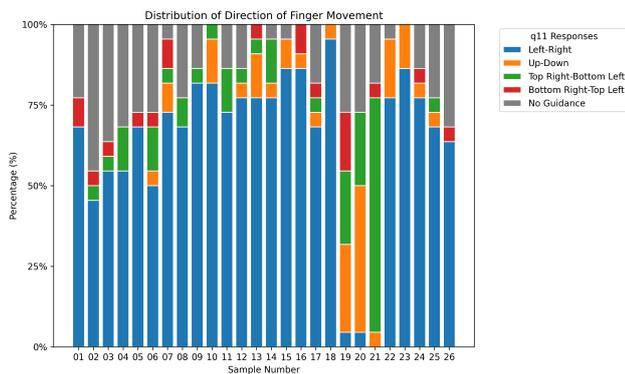


図 5: 指の誘導方向に関する質問 (Q11) の結果.

(20) は回答が分散しているが, 糸の方向が一方ではなく全ての方向にある. クロスステッチ (21) は右上-左下方向が多いが, これも糸の方向と一致している. これらから, 縫い方の違いがもたらす macro-scale の触覚と糸自体がもたらす meso-scale だと, meso-scale が支配的と言える.

## 5. Study3: 縫い方と外観類似性の関係

Study2 を通して, 縫い方の違いによる触覚知覚を明らかにしたが, 外観に依存せずに触覚を変化させられることを示すには, 縫い方の違いがどの程度外観類似性を持っているのか示す必要がある. そこで Study3 として, 縫い方の違いによる外観類似性を明らかにするユーザ実験を行う.

### 5.1 実験方法

この実験はオンラインで参加者に 2 種類の刺繍の画像

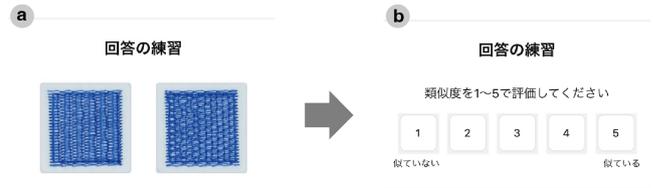


図 6: Study3 で用いた回答システム. (a) 3 秒間だけ 2 種類の刺繍ペアが表示される. (b) 5 段階リッカート尺度で類似度を回答する.

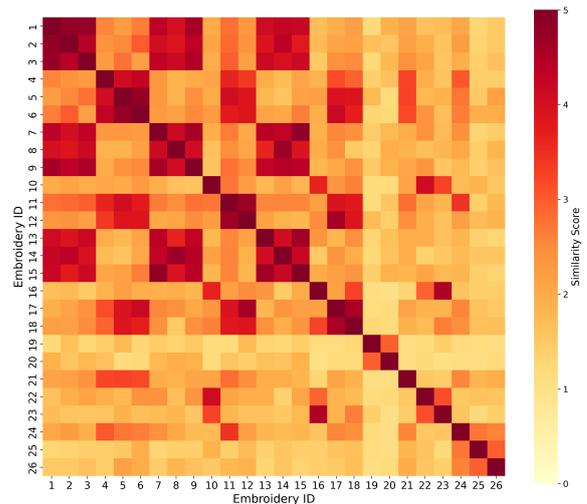


図 7: 刺繍サンプルペアの外観類似度のヒートマップ.

を提示して, 参加者は 5 段階のリッカート尺度で類似度を回答した. Study2 と同じ 26 個の刺繍サンプルを使用した (表 1). これらの刺繍を全く同じ照明条件になるように撮影ボックスに入れて, 高解像度のミラーレス一眼で撮影した. 実験の流れは最初に実験概要を提示して, 同意する場合は次の画面に進んで, 年齢を回答してもらった. 次に, 実験参加者ごとに画面上で刺繍の写真が実物サイズで表示されるように調整するタスクを行った. 外観類似度の問題は 3 秒間だけ 2 つの刺繍の写真を表示して (図 6(a)), その後写真が消えて 5 段階で類似度を回答してもらった (図 6(b)). 最初に練習問題として 1 問だけ提示して, その後本番の問題として, 一人あたり 25 問回答してもらった. 実験には 331 名が参加し, 25 問全てを回答できなかった参加者分も合わせて 8343 件の回答を得た. 26 種類の刺繍サンプルペアの組み合わせは全部で 325 件あるため, ペアごとに平均 25.7 件の回答を得た.

### 5.2 結果と考察

図 7 は 26 種類の刺繍サンプルペアの外観類似度を可視化したヒートマップを示す. タタミ縫いでは糸密度 (2/6 本/mm) ごとに明瞭なブロックが現れ, 同じ糸密度であれば高い類似度, 異なる糸密度であれば低い類似度となっている. 糸密度が同じ刺繍の下では, ピッチ (1/4/8mm) や偏差 (0/25/50%) を変えても高い類似度が維持されてお

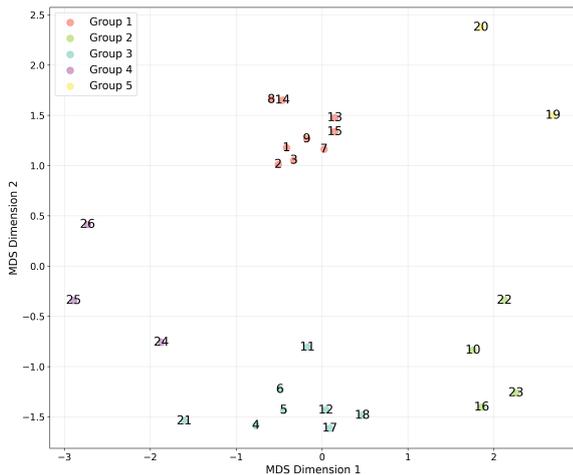


図 8: 刺繍サンプルの外観類似度を多次元尺度構成法で可視化した結果.

り、特に糸密度が 2 本/mm の場合 (例: 1-3, 7-9, 13-15) で極めて高い類似度となっている。タタミ縫い以外の場合は相対的に類似度は低く、放射縫い (19)・同心円縫い (20) は互いに近い一方、タタミ縫いとの類似度は低い。クロスステッチ (21) はピッチが 1mm で糸密度が 6 本/mm のタタミ縫い (4-6) とは相対的に類似しているという回答が多かったが、それ以外の縫い方とはほぼ類似していない。3D タタミ (22, 23) はお互いに類似しており、また、縫いパラメータが同じタタミ縫いのペア (10&22, 16&23) とも類似度が高い。

図 8 は多次元尺度構成法 (Multidimensional Scaling) による 2 次元での類似度の可視化である。色分けは K-Means(k=5) を用いてクラスタリングを行った結果である。本結果では縦軸に沿って糸密度が 2 本/mm のグループが上方、6 本/mm のグループが下方に配置されている。横軸では放射・同心円・3D タタミが右側に、タタミ縫いは中央に、クロスステッチおよびプログラムタタミ縫い (24-26) が左側に配置されている。

以上より、外観類似度について以下の 5 つのグループに分けられる。

- グループ 1 糸密度が 2 本/mm のタタミ縫い。
- グループ 2 糸密度が 6 本/mm で偏差が 0%かつピッチが 4,8mm のタタミ縫い・3D タタミ。
- グループ 3 糸密度が 6 本/mm でグループ 2 に属さないタタミ縫い (偏差が 25%や 50%の全てのピッチの刺繍および偏差が 0%でピッチが 1mm の刺繍), クロスステッチ。
- グループ 4 プログラムタタミ縫い。
- グループ 5 放射縫い・同心円縫い。

外観に最も影響する要因は糸密度であり、密度が異なると見た目の一貫性が保たれない。密度が 2 本/mm の場合は生地が透けて見えるのに対して、6 本/mm では一切見えないというのが外観に影響を与えている。ピッチの違い

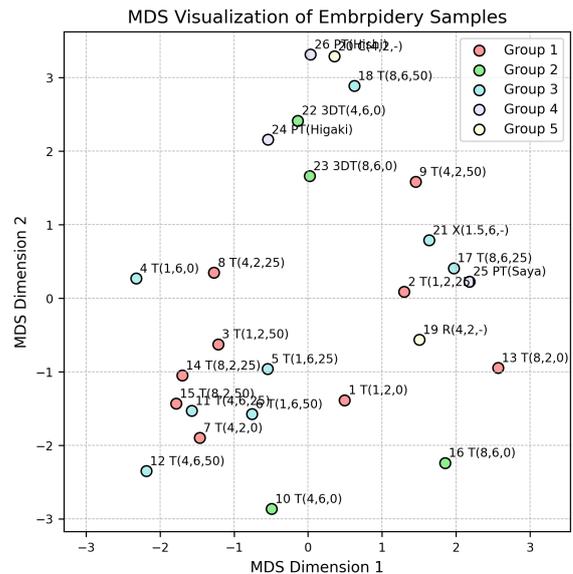


図 9: 刺繍サンプルの触覚知覚を多次元尺度構成法で可視化した結果. 点の色は外観類似性の色となっている。

は外観類似度への影響はあまり見られないが、糸密度が 6 本/mm の場合のみ偏差の違いが外観類似度に影響している。これは、偏差が 0%の場合は縫い目が揃うことによって凹凸ができることが原因である。一方でピッチが 1mm の場合は偏差の違いが外観類似度に影響していないが、これは偏差 0%による凹凸が極めて細かいため、参加者が凹凸を認識しなかったことが原因である。

## 6. 考察: 触覚のための刺繍設計指針

Study2 と Study3 で得られた知見を統合し、外観や形状を保ったまま触覚特性を変化させるためにはどの刺繍の縫い方やパラメータを変化させるのが良いかを議論する。前提として、縫い方の違いは形状には依存しないことから、マクロな視点においてはどの縫い方も外観には依存しないと言える。一方で、ミクロな視点では縫い方ごとに外観が異なっており、より厳密に外観を変化させない場合には Study2 と Study3 で得られた知見を統合した議論が必要である。Study3 を通して、外観は主に糸密度で決まり密度が同じであればピッチや偏差を変えても高い外観類似性が維持されることが分かった (特に糸密度が 2 本/mm のグループ 1 では顕著)。一方で 6 本/mm では偏差 0%において見た目の凹凸が強調されているため、外観を揃えたい場面では「糸密度を統一し、6 本/mm を用いる場合は偏差 0%を避ける」のが基本方針と言える。図 9 は Study2 から得られた触覚特性に関して多次元尺度構成法で可視化した散布図に、Study3 で得られた外観類似性のグループで色分けしたものになっている。図 9 から、外観が類似しているグループ内でも触覚知覚 (粗さ・凹凸・硬さ・誘導など) が広く分散することが示されており、外観を揃えたまま触覚を作り分けることができる。したがって、外観に依存しな

い触覚の異なる刺繍の設計方針として「外観を糸密度で固定し、触覚をピッチと偏差（+糸の方向／縫い方）で調整する」が挙げられる。

触覚ごとに選択すべき縫い方については以下の通りである。

**強い凹凸・明瞭な刺激** タタミ縫いの短いピッチ（1mm）や偏差0%、3D タタミは、凸凹感・粗さ・硬さを大きくする。クロスステッチは局所的な鋭さをもたらす。  
**滑らかさ・連続感** 偏差25-50%で縫い目の段差を打ち消し、長めのピッチ（4, 8mm）と組み合わせると平坦・連続的に感じられる。

**指の動きを誘導する** 誘導は糸の向きに大きく依存することから、糸の向きで設計する。長めのピッチ（4, 8mm）の方が指の誘導を促す。特定の方向に摩擦を生じて誘導させない場合は糸をその方向とは垂直に配置する。放射縫いや同心円縫いを用いることであらゆる方向の誘導を抑えられる。

## 7. 結論

本研究では、外観に依存せずに布上で所望の触覚特性を実現するために、刺繍の縫い方の違いによって触覚を変化させる手法を提案した。刺繍設計ソフトの調査と専門家インタビューを通して触覚に影響を及ぼす縫い方のデザインスペースの定義し、ユーザ実験を通して縫い方の違いが触覚知覚に与える影響や外観類似性に与える影響の検証を行った。これらのユーザ実験を通して、外観に依存せず触覚特性を変化させる刺繍設計指針を提案した。

今後の展望として、実験データの更なる分析を通じた縫い方と触覚の関係の解明や具体的なUI要素を用いたタスク遂行への影響の調査が挙げられる。アイズフリーインタフェースの作成例としては、スライダーUIにおいてピッチの違いによって値の大小を提示したり、指の動きを誘導するような刺繍で指のスライド方向を提示することが考えられる。あるいは、幼児向けの文字学習手法としてざらざらした文字をなぞることで学習する“モンテッソーリの砂文字”というものがあるが、これは一様にざらざらした文字を触るだけであるのに対して、刺繍によって指を動かす方向の誘導や摩擦による指の動きを妨げることで、より書く方向やトメ・ハネを意識した文字学習を実現可能である。これらが実際に上記のような作用をもたらすかどうかを実際に検証する必要がある。

**謝辞** 本研究は、株式会社メルカリ R4D とインクルーシブ工学連携研究機構との共同研究である価値交換工学の成果の一部である。また、本研究はJSPS 科研費 JP24KJ0749 の助成を受けた。加えて、株式会社パルヨットから刺繍の作成に関して助言を受けた。

## 参考文献

- [1] Bensmaïa, S. J. and Hollins, M.: The vibrations of texture, *Somatosensory & Motor Research*, Vol. 20, No. 1, pp. 33-43 (online), DOI: 10.1080/0899022031000083825 (2003).
- [2] Ding, Y., Shultz, C. and Harrison, C.: Surface I/O: Creating Devices with Functional Surface Geometry for Haptics and User Input, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23 (2023).
- [3] Gilliland, S., Komor, N., Starner, T. and Zeagler, C.: The Textile Interface Swatchbook: Creating graphical user interface-like widgets with conductive embroidery, *International Symposium on Wearable Computers (ISWC) 2010*, pp. 1-8 (online), DOI: 10.1109/ISWC.2010.5665876 (2010).
- [4] Hollins, M. and Risner, S. R.: Evidence for the duplex theory of tactile texture perception, *Perception & Psychophysics*, Vol. 62, No. 4, pp. 695-705 (online), DOI: 10.3758/BF03206916 (2000).
- [5] Jiang, Y., Haynes, A. C., Pourjafarian, N., Borchers, J. and Steimle, J.: Embrogami: Shape-Changing Textiles with Machine Embroidery, *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3654777.3676431 (2024).
- [6] Mlakar, S., Alida Habermelner, M., Jetter, H.-C. and Haller, M.: Exploring Affordances of Surface Gestures on Textile User Interfaces, *Proc. DIS'21*, ACM, p. 1159-1170 (2021).
- [7] Mlakar, S. and Haller, M.: Design Investigation of Embroidered Interactive Elements on Non-Wearable Textile Interfaces, *Proc. CHI'20*, ACM, p. 1-10 (2020).
- [8] Nowak, O., Schäfer, R., Brocker, A., Wacker, P. and Borchers, J.: Shaping Textile Sliders: An Evaluation of Form Factors and Tick Marks for Textile Sliders, *Proc. CHI'22*, ACM (2022).
- [9] Okamoto, S., Nagano, H. and Yamada, Y.: Psychophysical Dimensions of Tactile Perception of Textures, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 6, No. 1, pp. 81-93 (online), DOI: 10.1109/TOH.2012.32 (2013).
- [10] Poupyrev, I., Gong, N.-W., Fukuhara, S., Karagozler, M. E., Schwesig, C. and Robinson, K. E.: Project Jacquard: Interactive Digital Textiles at Scale, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 4216-4227 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858176 (2016).
- [11] Schäfer, R., Nowak, O., Suchmann, L. B., Schröder, S. and Borchers, J.: What's That Shape? Investigating Eyes-Free Recognition of Textile Icons, *Proc. CHI'23*, ACM (2023).