

# 導電糸と非導電糸の組み合わせによるインタラクティブ刺繍

篠田 和宏<sup>1,a)</sup> 矢谷 浩司<sup>1,b)</sup>

**概要:** 布製品にインタラクティブな機能を搭載させるために、様々なスマートテキスタイル技術の研究が行われている。これまでの取り組みでは電極の形状を工夫することによってセンシングに対応した電気的特性を作り出しており、既存の衣服が持っているようなデザインの多様性をスマートテキスタイルでは実現できていない。そこで本研究では、導電糸の上に非導電糸で重ね縫いをするすることで、タッチ時における静電容量変化を制御し、タッチ位置検出に利用する手法を提案する。非導電糸の密度を変化させることで、タッチ時における指と導電糸の距離が変化して静電容量変化をもたらす。この手法を利用することで、インタラクティブ刺繍を多様なデザインで実現することができる。

## 1. はじめに

布製品にインタラクティブな機能を搭載させるために、様々なスマートテキスタイル技術の研究が行われている。スマートテキスタイルとは、導電性繊維を用いて布にセンシング機能を搭載するなど、従来持っていなかった機能を持つ布のことである。これまでの研究では、布の柔軟性とデバイスとしての耐久性を維持しながらセンサーを組み込むために、導電性繊維を特定のパターンで縫い込むことによって、様々なセンシングを実現している。これにより、布の素材としての特性を損なうことなく、インタラクティブデバイスとしての機能を組み込むことが可能になった。

本来、衣服にはデザインを通して自己を表現する社会的機能も持ち合わせている。そのため、これまで長い歴史をかけてデザインの多様性とそれを実現する様々な技法が培われてきた。その中でも、導電糸を組み込む時にもよく用いられている刺繍は、自由度の高い形状や模様を布地に組み込むことができるという特徴がある。

しかし、これまでの取り組みでは電極の形状を工夫することによって、センシングに対応した電気的特性を作り出している。つまり、センシング機能を持ち合わせるためにデザイン(電極の形状)に制限が生まれ、社会的な機能が一部損なわれている。スマートテキスタイルの技術を世の中に普及させるためには、デザインの多様性とセンシング機能の両立が必要である。

そこで本研究では、導電糸の上に非導電糸で重ね縫いをするすることで、タッチ時における静電容量変化を制御し、

タッチ位置検出に利用する手法を提案する。同一の電極の中で非導電糸の密度(厚さ)が異なる部分を作成することによって、それぞれの箇所でのタッチ時の指と導電糸間の距離が異なるようになり、静電容量に変化をもたらす。また、非導電糸を用いることは、よりカラフルなデザインの実現にも繋がる。この手法を利用することで、布上でのタッチ位置検出可能な電極を自由な形状にすることができるようになり、インタラクティブ刺繍のデザインの多様性を実現している(図1)。

## 2. 関連研究

### 2.1 刺繍の縫い方と電気的特性の関係

刺繍は既存の布地に後付けで導電繊維を組み込むため、刺繍の様々なパラメータを調整することで導電糸を自由度の高い形状や構造で組み込むことができる。これにより、縫い方によって電気的特性が変化することが先行研究で指摘されている。

Rhoらは走り縫いおよびジグザグ縫いにおいて、導電糸の消費量と刺繍の抵抗値を計算するモデルを構築し、実際の測定値とシミュレーション結果を比較した[5]。調査したパラメータは、層の数(何重に重ねるか)・縫い方(走り縫い/ジグザグ縫い)・ステッチの長さ・速度・方向の5つである。この研究では、統計的検定手法を用いてどのパラメータが抵抗値の変化に有意な影響をもたらすかを分析した。走り縫いのステッチの長さやジグザグ縫いの層の数が抵抗値や糸の消費量に有意な差をもたらすことを明らかにした。

Aignerらは一般的な刺繍ミシンを用いて任意の布地に圧力センサを組み込む手法[1]を提案した。基本のパターン

<sup>1</sup> 東京大学 Interactive Intelligent Systems Lab.

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

<sup>b)</sup> koji@iis-lab.org

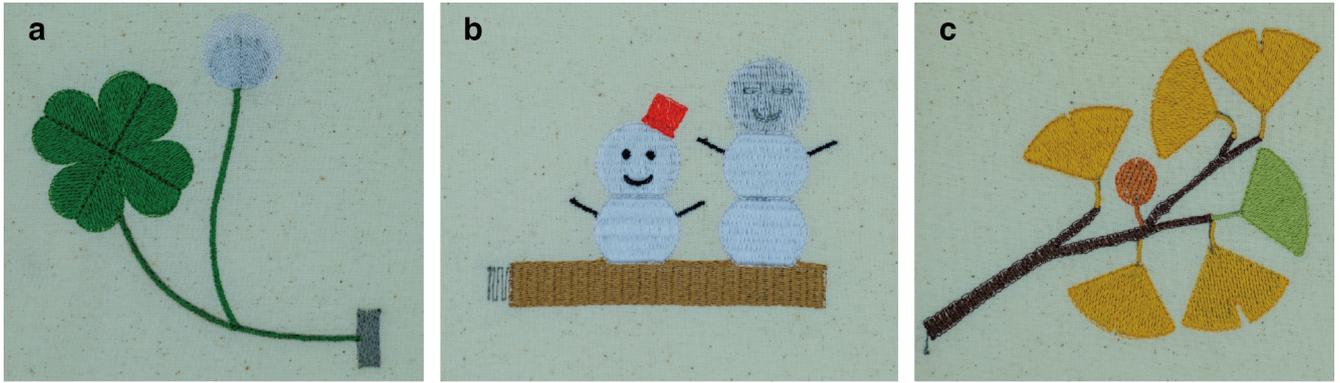


図 1: 提案手法により作られたインタラクティブ刺繍. 導電糸刺繍の上から非導電糸で糸密度の異なる刺繍を重ねることにより, 分岐した形状や複数本の配線を通せないような細い部分を含む形状でのタッチ位置検出を実現している. (a) クローバー刺繍の電極. (b) 雪だるま刺繍の電極. (c) 銀杏の枝葉刺繍の電極.

をもとに, 任意のサイズや輪郭形状に拡張できる圧力センサとなっている. ここでは, 刺繍のパラメータとしてピッチや走り回数などを変化させることで, 導電糸刺繍の電気的特性を変化させ, 分解能を向上させられることを明らかにしている.

このように, 刺繍の縫い方によって導電糸刺繍の電気的特性が変化し, センシングの分解能を向上させられることが明らかになっている. 本研究では, 導電糸の上に非導電糸を重ね縫いするときに, 非導電糸の糸密度を変化させることでタッチ時の電気的特性を変化させる.

## 2.2 布上におけるインタラクション検出手法

導電糸等を用いて様々なセンシングやインタラクションを実現する研究が行われている. Hamdan らは, 折り目をつまんで指で動かすことで操作する二次元のテキスタイルセンサーである Grabrics[2] を開発した. 任意軸での折りたたみ検出に対応していることに加え, つまんで入力するため既存のタッチセンサー等と比べて無意識に入力することを防いでいる. ただ, この手法では複数の独立した電極に 1 本ずつ配線を繋げる必要があるため, 細長い形状の刺繍にしようとした場合に配線の本数が限られてしまう. これにより, 刺繍の形状に制限が生まれてしまう.

また, McDonald らはニットのタッチセンサにおいて正確なタッチ位置を検出するための認識モデル [4] を開発した. これは, 一次元方向にタッチ位置が検出できるものを蛇行して配置することで, 二次元平面におけるタッチ位置の検出を行なっている. この手法は電極の両端の 2 箇所のみ配線を繋げればよいという利点があるが, 一筆書き可能な形状でなければならないという制限がある.

このように, これらの先行研究では導電部分の形状がセンシングに対応した電気的特性の実現に重要な意味を持っている. そのため, センシング技術を布に組み込むにあたり, 電極形状に制限が生まれ, 既存の衣服が持つようなデザイン性を損なってしまう. 本研究では, 刺繍の形状では

なく重ね縫いする非導電糸の密度を制御することで, 形状によらずにセンシングに対応した電気的特性を持つ電極を実現する.

## 3. 導電糸と非導電糸の重ね縫いによるタッチ位置検出手法

本研究では導電糸の刺繍の上に非導電糸を異なる密度で重ねて刺繍することによってタッチ位置の識別を行う. 本章では, 非導電糸の密度がタッチ時のインピーダンスに与える影響の検証について述べる. また, 刺繍の作成やセンシングの方法について示す.

### 3.1 刺繍の作成

本研究の刺繍は全てコンピュータミシンを利用して製作している. 刺繍ミシンはイノヴィス NX2800DW(ブラザー工業株式会社) を利用した. 使用した糸として, 導電糸はナイロン 100%の銀メッキされた導電糸 (Smart-X, 株式会社フジックス製) を利用した. この導電糸の線抵抗は約  $250 \Omega/m$  である. 非導電糸はポリエステル 100%の刺繍糸 (ウルトラポス刺繍糸, ブラザー工業株式会社製) を利用した. 布は綿 100%のシーチングという生地を利用し, 布の縮みによる刺繍の歪みを防ぐために接着芯を貼り付けている. また, 刺繍データの設計は「刺しゅう PRO11」(ブラザー工業株式会社) を利用した.

非導電糸の密度がタッチ時のインピーダンスに与える影響の検証のために図 2 (a) のような刺繍を作成した. 導電糸の刺繍は指をタッチするためのタッチ領域とセンシング回路とクリップで接続するためのセンサ接続領域の 2 つに分かれている. タッチ領域は非導電糸の刺繍を妨げないように糸密度を 1 本/mm とし, また導電糸が非導電糸の刺繍からはみ出ることがないように非導電糸の刺繍よりも周囲 1mm だけ小さくしている. センサ接続領域はクリップの接続位置のずれによる影響を最小限にするために, 糸密度を 4 本/mm と大きくすることによって抵抗値を小さく

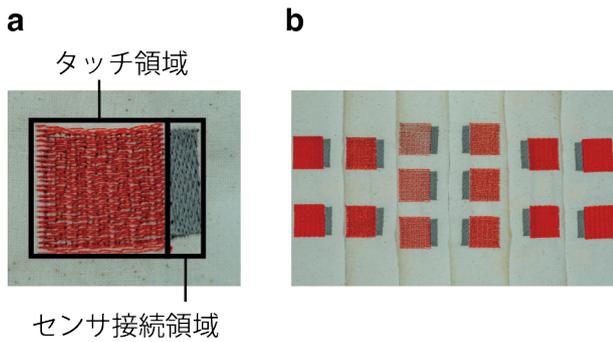


図 2: 検証に利用した電極. (a) 指でタッチするためのタッチ領域とセンシング回路とクリップで接続するためのセンサ接続領域の 2 つに分かれている. (b) 14 種類の糸密度の異なる刺繍を実装して実験を行った.

している. 非導電糸の刺繍は導電糸の刺繍のタッチ領域に重ねるように刺繍した. 本検証では異なる糸密度の電極で検証するため, 1.0, 1.5, 1.8, 2.0, 2.2, 2.5, 2.8, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0 本/mm の 14 種類の糸密度の電極を用意した (図 2 (b)). また, 非導電糸を刺繍するときに導電糸を針で損傷することがないように, 偏差を 50% にして, ピッチを 4mm にすることで, 導電糸の通っているところに針を打たないようにした.

### 3.2 センシング手法

センシング手法は様々な周波数の信号を用いてインピーダンス計測を行う手法である SFCS (Swept Frequency Capacitive Sensing) を利用している [6]. 本研究においては, Honigman らの方法 [3] を参考にして波形生成器を用いない簡易的な実装にしている. マイコンボードは Microchip Technology 社の ATSAM51J19A を搭載した Adafruit Feather M4 Express (Adafruit Industries) を利用して, 300kHz から 27.5kHz の範囲で 1980 の周波数で掃引している.

このセンシング手法で得られたインピーダンスを機械学習で分類することで, 非導電糸の密度が異なる電極へのタッチを識別する. 機械学習は scikit-learn のランダムフォレストを利用している.

### 3.3 非導電糸の密度とタッチ時のインピーダンスの関係

実験参加者の男性 1 名にそれぞれの電極を 10 回ずつタッチをしてもらい, センシング結果を収集した. 図 3 は糸密度の異なる電極それぞれの平均のインピーダンスを示す. 非導電糸の密度によって波形が変化していることがわかる. 収集した結果を元に前述した機械学習アルゴリズムを用いて層化 K 分割交差検証 ( $k=3$ ) を行なったところ, macorF1 は 0.96 となった.

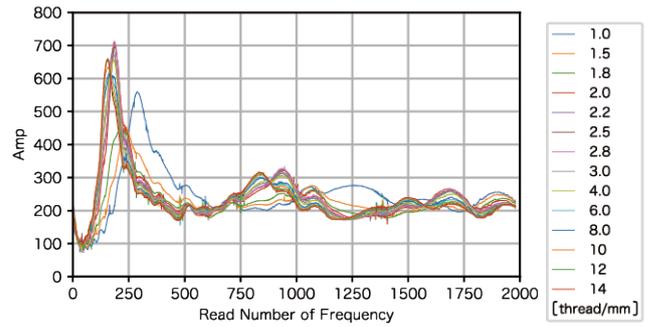


図 3: 非導電糸の密度とタッチ時のインピーダンスの関係

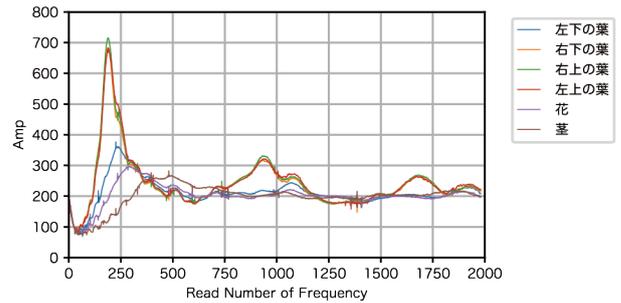


図 4: クローバー刺繍 (図 1 (a)) の電極における各タッチ位置のインピーダンス

## 4. インタラクティブ刺繍の作成例

本章では, 3 章で示した手法を用いることによって, どのようなインタラクティブ刺繍が作成可能になるかを実際の作例をもとに示す.

### 4.1 クローバー刺繍の電極

図 1 (a) はクローバーを模した電極である. クローバーの 4 枚の葉と白詰草の花, 茎の計 6 箇所におけるタッチを識別可能である. また, 右下にある導電糸が剥き出しになっている部分がクリップでセンサと接続する部分である. クローバーの葉と白詰草の花はそれぞれ茎が分岐した位置にあり, クローバーの 4 枚の葉の導電糸刺繍は同一になっている. このような電極形状では, 2.2 で指摘したように, 細い茎に複数本の配線を通すことができないことに加え, 分岐があるため一筆書きが不可能な図形となっているが, それぞれのタッチ箇所における非導電糸の糸密度を異なるものにするすることでタッチの識別を可能にしている. 図 4 は 6 つのタッチ箇所をそれぞれ 10 回ずつタッチした時の平均のインピーダンスを示す.

### 4.2 雪だるま刺繍の電極

図 1 (b) は雪だるまを模した電極である. 雪だるまを構成する 5 つの白い円と地面の計 6 箇所におけるタッチを識別可能である. また, クリップでセンサと接続する部分は左下にある. 左右の雪だるまはそれぞれクリップ接続箇所

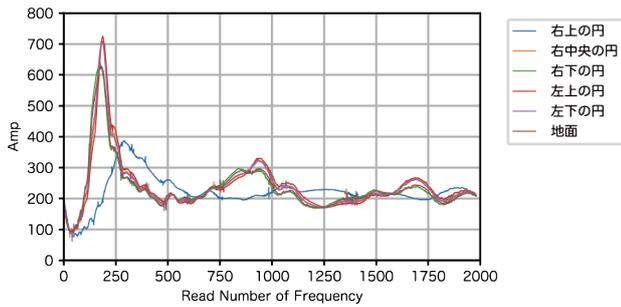


図 5: 雪だるま刺繍 (図 1 (b)) の電極における各タッチ位置のインピーダンス

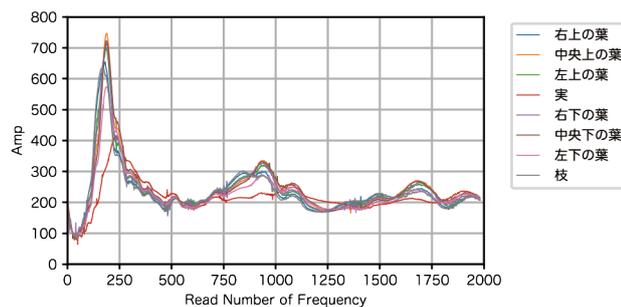


図 6: 銀杏の枝葉刺繍 (図 1 (c)) の電極における各タッチ位置のインピーダンス

から見て分岐した位置にある。クローバーの例と同じように、このような分岐した電極形状においても、それぞれのタッチ箇所における非導電糸の糸密度を異なるものにする事でタッチの識別を可能にしている。図 5 は 6 つのタッチ箇所をそれぞれ 10 回ずつタッチした時の平均のインピーダンスを示す。

### 4.3 銀杏の枝葉刺繍の電極

図 1 (c) は銀杏の枝葉を模した電極である。銀杏の 6 枚の葉と実、枝の計 8 箇所におけるタッチを識別可能である。また、クリップでセンサと接続する部分は左下にある。それぞれの銀杏の葉や実はそれぞれクリップ接続箇所から見て分岐した位置にある。また、全ての葉につながるように 1 本ずつ配線を繋げられるほど枝が太くない。これまでの例と同じように、このような分岐しているかつ複数本の配線を通す太さがないような形状においても、それぞれのタッチ箇所における非導電糸の糸密度を異なるものにする事でタッチの識別を可能にしている。図 6 は 8 つのタッチ箇所をそれぞれ 10 回ずつタッチした時の平均のインピーダンスを示す。

## 5. 考察

多くの実験参加者を集めて検証を行なっているわけではないが、14 パターンの糸密度でタッチを識別できることが明らかになった。タッチ時の押す強さや指のサイズによってばらつきがあることが想定されるため、たくさんの実験

参加者を集めて評価実験を行い、頑健性の検証を行う必要がある。

## 6. 結論

本研究では、布上でのタッチ位置検出が可能な電極の形状の自由度を高めるために、導電糸の上から異なる密度で非導電糸を重ね縫いした電極を作成することで、タッチ位置の識別を行う手法を提案した。検証では、14 種類の非導電糸の密度の異なる電極において、識別に十分な精度になることが明らかになった。また、この知見を活用した電極の作例を提示することで、電極形状の自由度の高さと、既存の刺繍表現の中に自然に組み込めることを示した。今後は、複数の実験参加者による評価実験を行うことで頑健性を確認することや、タッチ位置検出以外の他のインタラクションの検出に応用することに取り組みたい。

**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、株式会社パー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] Aigner, R., Pointner, A., Preindl, T., Parzer, P. and Haller, M.: Embroidered Resistive Pressure Sensors: A Novel Approach for Textile Interfaces, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, p. 1–13 (2020).
- [2] Hamdan, N. A.-h., Heller, F., Wacharamanotham, C., Thar, J. and Borchers, J.: Grabrics: A Foldable Two-Dimensional Textile Input Controller, *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, p. 2497–2503 (2016).
- [3] Honigman, C., Hoehenbaum, J. and Kapur, A.: Techniques in Swept Frequency Capacitive Sensing: An Open Source Approach., *NIME*, pp. 74–77 (2014).
- [4] McDonald, D. Q., Vallett, R., Solovey, E., Dion, G. and Shokoufandeh, A.: Knitted Sensors: Designs and Novel Approaches for Real-Time, Real-World Sensing, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 4, No. 4 (2020).
- [5] Rho, S. H., Lee, S., Jeong, W. and Lim, D.-Y.: Study of the optimization of embroidery design parameters for the Technical Embroidery Machine: derivation of the correlation between thread consumption and electrical resistance, *Textile Research Journal*, Vol. 92, No. 9-10, pp. 1550–1564 (2022).
- [6] Sato, M., Poupyrev, I. and Harrison, C.: Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, p. 483–492 (2012).