

導電糸刺繍の設計パラメータの違いによる 抵抗値変化を活用した布変形検出手法

篠田 和宏¹ 矢谷 浩司¹

概要: スマートテキスタイル技術によってセンサを作成する上で、コンピューター制御による刺繍マシンにより糸密度やピッチなどの設計パラメータを調整することで、導電糸刺繍の抵抗値を制御できることが明らかになっている。そこで本研究では、刺繍の設計パラメータの違いによる抵抗値変化を活用した、布の変形を検出する手法を提案する。これまで、布の柔軟性を活かし、つまむ・折る・曲げるなどの変形検出手法が提案されているが、これらの先行研究は布とセンサ回路基板との接続数の増大などハードウェアの複雑化による耐久性の低下が課題になっている。本研究では、電極形状ではなく刺繍の設計パラメータの変化により所望の電気的特性を実現することで、布とセンサとの接続数を減らした簡略なハードウェアによる変形の検出を目指す。また、タタミ縫いにおける刺繍の等価抵抗回路モデルの構築により、センサの検出精度向上に役立てる。

Cloth Deformation Sensing with Conductive Thread Embroidery Based on Resistance Changes by Different Stitching Properties

KAZUHIRO SHINODA¹ KOJI YATANI¹

1. はじめに

スマートテキスタイル技術によってセンサを作成する上で、コンピューター制御された刺繍マシンにより、導電糸刺繍によって複雑で自由度の高い形状の導電パターンを作成できるようになった。この利点を活かして、多くの電極や配線が高密度に配置された精密な電極パターンを実現することができ、布の柔軟性を生かしたセンサが作成されている。例えば、つまむ [6]・折る [2]・曲げる [10] などの布の変形を検出する手法が提案されている。これらの先行研究は、刺繍の複雑な形状の導電パターンを作成できる利点を活かして実現できているものの、布とセンサ回路基板との接続数の増大などハードウェアの複雑化による耐久性の低下が課題になっている。

加えて、刺繍マシンによるもう一つの利点として、糸密度やピッチなどの設計パラメータを調整することで、導電糸刺繍の構造を細かく制御することも可能になった。これまでの研究により、この刺繍の設計パラメータの違いに

よって電気抵抗に変化をたらしることが明らかになっている [16]。

そこで本研究では、刺繍の設計パラメータの違いによる抵抗値変化を活用した、変形ジェスチャを行うセンサを提案する。先行研究 [2,6] では、電極パターンの形状によってセンシングに対応した電気的特性を実現していたが、本研究では刺繍の設計パラメータの変化により所望の電気的特性を実現することで、布とセンサとの接続数を減らした簡略なハードウェアによる変形ジェスチャの検出を実現している。また、電極形状に依存しないことによって、自由な形状や大きさのセンサを作成することもできる。加えて、刺繍の等価抵抗回路モデルを構築することによって、センサの形状や大きさが変化したとしても、検出精度を向上させられるように、最適なパラメータでのセンサの設計を可能にしている。

本研究の貢献は次の通りである。

- タタミ縫いにおける等価抵抗回路モデルの構築
- 刺繍の縫い方の違いによる抵抗値変化を用いた変形センシングの実現

¹ 東京大学 Interactive Intelligent Systems Laboratory

2. 関連研究

2.1 刺繍の設計パラメータと電気的特性の関係

刺繍は既存の布地に後付けで組み込むため、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。そのため、容易に導電繊維を布に組み込めることから、布製のデバイスやセンサの開発によく使われている [3,4,8,9,12]。これまでに、刺繍のパラメータを変化させることで、刺繍によって作られた電極がどのような電気的特性を持つのかを調査する研究が行われている。Juchnevičienėらは正方形の閉回路を刺繍したときに、刺繍の密度・刺繍部分の幅・生地充填率の3つのパラメータが電気的特性に与える影響を調査した [5]。この研究により、刺繍の密度が大きく、幅が太い方が抵抗が小さくなることが明らかになった。また、生地充填率に関しては密度が大きい時は抵抗値と相関があるが、密度が小さい時の相関はみられなかった。また、Zhangらは上糸と下糸の両方に導電糸を用いて刺繍した場合の幾何学モデルと等価抵抗回路モデルを構築し、そのモデルを用いて算出されたシミュレーション値と実際の刺繍を計測した実測値とを比較し、モデルの有効性を示した [14]。ここでは走り縫いで作成した一次元方向の抵抗値を対象としている。調査したパラメータは、ピッチ・密度の2つである。加えて、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 [13]。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。

このように先行研究では、走り縫いなどの一次元形状(線状)の刺繍において抵抗値を変化させるパラメータや等価抵抗回路モデルを提案している。一方で、インタラクションの検出などセンサの作成に導電糸刺繍を用いる場合、主に配線の作成に利用される走り縫い等の線状の刺繍だけでなく、タタミ縫い等の面状の刺繍も電極の作成に利用されている。また、篠田らの研究によって、タタミ縫いは設計パラメータの変化により大きな抵抗値変化をもたらすことが明らかになっている [16]。タタミ縫い等の面状の刺繍は導電糸自体による抵抗値だけでなく、導電糸同士が接触することによって接触抵抗が発生するため、既存の手法でタタミ縫いの抵抗値を推定することはできない。そこで本研究ではタタミ縫いにおいて、刺繍のパラメータや導電糸の太さなどから抵抗値を推定することを目的としている。

2.2 布の変形検出手法

布の柔らかい特性を活かして、布の変形ジェスチャを検出する研究が行われている。

Karrerらは、導電糸を直線に縫ったものを並べ、指でつまんだ時にそれらが接触するのを検知するPinstripeを開発した [6]。接触するステッチの組み合わせによって、一次元方向に指でつまんだ位置と大きさを検出している。そして、Pinstripeを二次元に拡張したのが、HamdanらによるGrabrics [2]である。これは、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である。六角形の電極を二次元平面を埋め尽くすように多く配置し、指でつまんだ時に接触した組み合わせによってつまんだ位置を検出している。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。

Luoらは導電糸を用いて層ごとに大きさの異なる二層構造の編み物を作成し、指で押した時に導電糸同士がより接触するようになることで抵抗値が小さくなるという仕組みを利用して圧力センサを開発した [7]。加えて、センサと配線を自動で設計し、ユーザが好みの色や形状などをカスタマイズできるようにするソフトウェアも開発した。また、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。これは抵抗膜方式となっており、基本の形状パターンから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。さらに、Parzerらは変形ジェスチャー(つかむ・ひねるなど)と表面上でのジェスチャー(タッチ・スワイプ)の両方を検出可能なデバイスを開発した [11]。

篠田らは折りたたんで変形することによってアプリケーションごとに最適な形状で利用できるハンカチ型インタフェースを開発した [15]。これは市販されている複数チャンネルの静電容量センサを利用して、折りたたみは二つの電極が接触することによる静電容量センサの短絡を、タッチは電極と指の間の静電容量変化を検出することにより、同一の電極で折りたたみによる変形とタッチの両方を検出している。

これらの先行研究の共通点としては、刺繍の形状を制御することによってセンシングに対応した電気的特性をもつ電極を実現している点である。これによって、センサ・電極パターンの形状制約があったり、布と回路の接続箇所の多さによる耐久性の低下が課題となっている。そこで本研究では、電極形状ではなく、刺繍の設計パラメータを制御して抵抗値変化をもたらすことで、布とセンサとの接続数を減らした簡略なハードウェアによる変形ジェスチャの検出を実現している。

3. タタミ縫いの等価回路モデル

3.1 走り縫いのモデル

走り縫いのモデルは先行研究 [14] を参考にする。走り縫いでは、針を落としたときに導電糸が下糸に引っ張られて布の内部を通るが、ピッチの変化によって針を落とす間隔が変わると、刺繍を構成する導電糸が長くなる。導電糸が布の内部を通る長さに関して、先行研究では導電糸と下糸は布の表面と裏面の中間で交わるとしているため、その長さは布の厚さと等しくなるとしている。一方で、本研究の刺繍ミシン等の実験環境では、作成した刺繍において上糸(導電糸)が裏面にも見えていることから、導電糸と下糸は布の裏面で交わっているとした。したがって、本研究では走り縫いを構成する導電糸の長さ(導電糸消費量) L_t を以下のように定義した。

$$L_t = L + 2 \times T \times [L/L_s]$$

ただし、 L : ステッチの長さ、 T : 布の厚さ、 L_s : ピッチ(一針で縫う長さ)である。走り縫いの抵抗値はこの導電糸の長さに導電糸の長さあたりの抵抗値をかけた値となる。

また、本研究の実験環境では、刺繍時に導電糸が損耗することによって導電糸自体の抵抗値が変化していた。この損耗は刺繍速度を下げることで抑えることができる [13] ため、本研究で利用したミシンで最も遅い刺繍速度に設定したが、完全に導電糸変化を抑えることができなかった。そこで、走り縫いの測定結果により導電糸の長さあたりの抵抗値を求めて、タタミ縫いのモデルの評価に利用する。

3.2 タタミ縫いのモデル

前述のように、タタミ縫いは走り縫いを蛇行させて配置している縫い方であるため、刺繍を構成する導電糸の長さ(導電糸消費量)は走り縫いと同様に考えることができる。ただし、タタミ縫いでは縫い方向が折り返す時に図 1 (a) に示すように裏面に大きく導電糸が引っ張られている。そこで、本研究では折り返し時に導電糸が引っ張られる長さを図 1 (b) に示すように定義した。まず、縫いの折り返し位置を点 O、その前後の縫い位置を点 A・点 B とおく。すると、上糸が引っ張られるのはベクトル OA と OB の和の方向となる。これは、上糸が裏面に出てくるのはベクトル OA と OB の方向に下糸で引っ張られるからである。長さはベクトル OA と OB の和の α 倍とした。 α 倍としているのは、ベクトル OA と OB は導電糸が引っ張られる力を示しており、導電糸が引っ張られる長さは必ずしもその等倍ではないためである。このパラメータは測定により求める必要がある。したがって、タタミ縫いの導電糸消費量は走り縫い分の長さで折り返し分の長さの和となる。

次に、タタミ縫いにおいて導電糸が接触することによる

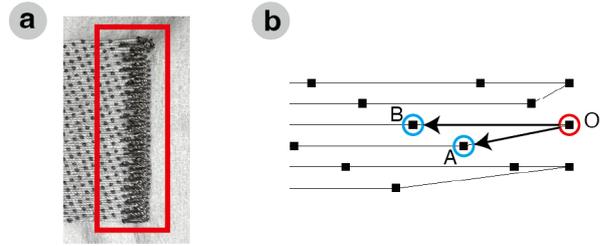


図 1 タタミ縫いの折り返し。タタミ縫いは縫い方向を折り返すときに裏面に大きく導電糸が引っ張られる。(a) タタミ縫いの裏面の写真。(b) 折り返し縫いの定義。

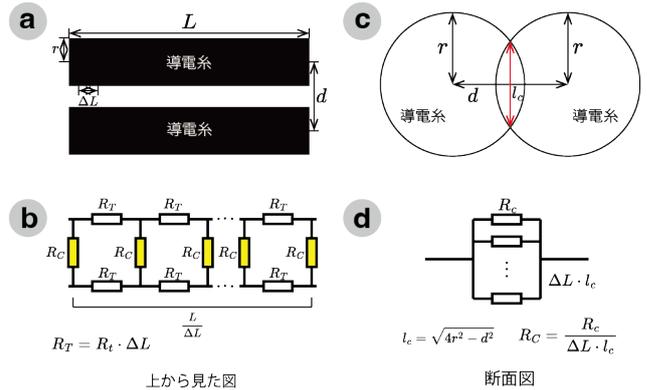


図 2 接触抵抗の導出と等価抵抗回路モデル。(a) 導電糸の並びを上から見た図。(b) 導電糸を上から見た図における等価回路。(c) 接触する導電糸の断面図。(d) 接触する導電糸の断面図における等価回路

接触抵抗について述べる。この接触抵抗により、走り縫いのように導電糸消費量に導電糸の長さあたりの抵抗値をかけることで刺繍の抵抗値を求めることはできない。接触抵抗を定義するために、2本の導電糸が d ($d < 2r$) の間隔で並んでいる(接触している)場合を考える(図 2 (a))。その導電糸の微小区間 ΔL において、断面図(図 2 (c))を考える。この時、導電糸の接触を l_c の分だけ接触していると考え。ここで、 r を導電糸の太さ(半径)とすると、 l_c の長さは以下のように求められる。

$$l_c = \sqrt{4r^2 - d^2}$$

ただし、実際には導電糸の断面は正円ではなく、接触すると潰れてさらに正円ではなくなっていると考えが、ここでは簡単のため上記のように考える。そうすると単位面積あたりの接触抵抗 R_c が並列に繋がっている図 2 (d) のような等価回路が考えられる。ここで R_c の個数は $\Delta L \cdot l_c$ 個あるので、断面の接触抵抗 R_C はその合成抵抗なので以下のように定義できる。

$$R_C = \frac{R_c}{\Delta L \cdot l_c}$$

しかし、布の柔らかさなどの影響により、刺繍は設計通りの d にならないことが多々ある。そのため、提案モデル

は d に正規分布に従う誤差を加えることにした。この正規分布は d を平均値として、 $\frac{d}{\beta}$ を標準偏差にとると定義した。ただし、ここでの β は未知のパラメータであり、素材やミシンの設定項目などに応じて変化するものとする。

次に上から見た図 2 (a) に関して、 R_t を導電糸の単位長さあたりの抵抗値とすると、この時の等価抵抗回路は、微小区間分の導電糸の抵抗 $R_T = R_t \cdot \Delta L$ が導電糸の 2 本分直列につながっていて、その間に断面の接触抵抗 R_C がつながっているような回路になる (図 2 (b))。これが $\frac{L}{\Delta L}$ 個だけ連なっている。このように定義すると、 R_c は導電糸ごとに特有であり、測定により求める必要のあるパラメータとなる。

基本的にはタタミ縫いで刺繍した領域に前述の抵抗回路が一様に連なっているが、次の 2 点に関して前述の回路と異なる部分がある。一つ目は、針を打っている位置では、導電糸が布の内部や裏面を通っているので、隣り合う導電糸と接触せず、接触抵抗は存在していない。二つ目は、縫いを折り返しているところでは、裏面に導電糸が引っ張られて小さなループができているが、ループ内で全体的に接触しており、回路的にはフローティング状態に近似できるとして、合成抵抗には含めないこととした。

3.3 評価実験

3 で定義したタタミ縫いモデルが抵抗値を推定できているか検証するために、実際に刺繍したものの抵抗値を計測して、モデルにより求められた理論値との比較を行った。

3.3.1 評価に用いた素材・機材

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 TAJIMA SAI MDP-S0801CS (タジマ工業株式会社) を利用した。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。刺繍する上でのミシン上のパラメータとして、刺繍速度は 250spm (1 分あたり 250 針縫う) で固定した。これは、導電糸の損傷による抵抗値変化を抑えるため、今回利用しているミシンで最も遅い 250spm とした。

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。この導電糸の太さ (半径) r は約 0.15mm であり、導電糸の長さあたりの抵抗値 R_t は約 $250 \Omega \text{m}^{-1}$ であった。ただし、導電糸や酸化等によって抵抗値が変化してしまうため、刺繍モデルの評価においては刺繍する直前に測定した値を用いて推定値を計算している。生地は「シーチング」、接着芯は「高級接着芯 普通地用 (コスモ株式会社)」を用いた。生地と接着芯の厚さ T は 0.6mm だった。

抵抗値の測定にはデジタルマルチメータ (CD771, 三和電気計器株式会社) を利用した。デジタルマルチメータのリードの当て方を一定にするために、クリップリード (TL-9IC, 三和電気計器株式会社) で 1 本だけ糸を引っ掛ける形で計

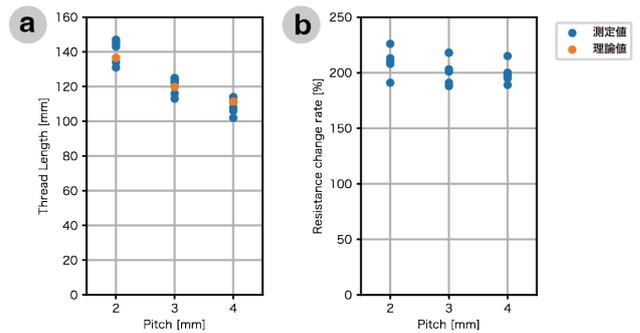


図 3 走り縫いの評価結果. (a) 走り縫いの導電糸消費量の実測値と推定値の比較 (b) 刺繍後における導電糸の長さあたりの抵抗値の変化率

測した。刺繍のサンプルは各パラメータに対して 6 サンプルずつ製作し、それぞれ 3 回ずつ計測した平均値をそのサンプルの測定値とした。

3.3.2 走り縫いモデルと導電糸の抵抗値変化の評価

タタミ縫いの導電糸消費量を推定するためには、走り縫いの導電糸消費量を推定する必要があるため、本研究の走り縫いモデルにより推定された導電糸消費量を実測値と比較する。走り縫いはピッチ 2mm, 3mm, 4mm で、長さが 10cm の直線を刺繍した。縫い始点と終点はほつれ防止のために複数回重ね縫いをしているため、その部分を取り除いた、8.5cm 分の抵抗値を測定した。図 3 (a) に走り縫いの導電糸消費量の実測値と推定値の比較を示す。各ピッチにおいて、理論値が測定値の 95% 信頼区間に収まっていることから、理論値は測定値を正確に推定できていると言える。

図 3 (b) に刺繍後における導電糸の長さあたりの抵抗値の変化率を示す。刺繍によって、導電糸自体の抵抗値が 2 倍程度に大きくなっていることが見て取れる。これにより得られた値をもとに、次のタタミ縫いの抵抗値の推定値を求める。

3.3.3 タタミ縫いモデルの評価

タタミ縫いモデルの評価のために、糸密度が 1 本/mm, 2 本/mm, 3 本/mm の 3 パターンの刺繍を作成した。それぞれのパラメータにおいて、3 サンプルずつ作成した。それぞれに対して、導電糸消費量の測定と抵抗値の測定を行った。

図 4(a) にタタミ縫いの導電糸消費量の評価結果を示す。糸密度の変化に対して、提案したモデルによって糸密度による導電糸消費量を推定できていることが見てとれる。

次に図 4(b) にタタミ縫いの抵抗値の評価結果を示す。この抵抗値はタタミ縫いの縫い始点と縫い終点間を計測した値であり、今回作成した刺繍は左上の頂点が縫い始点、右上の頂点が縫い終点となっている。モデルを用いた推定値の計算においては、 $\Delta L = 0.1 \text{mm}$, $R_c = 0.8$, $\sigma = \frac{d}{\beta}$ としている。糸密度の変化に対して、提案したモデルによって抵抗値を推定できていることが見てとれる。

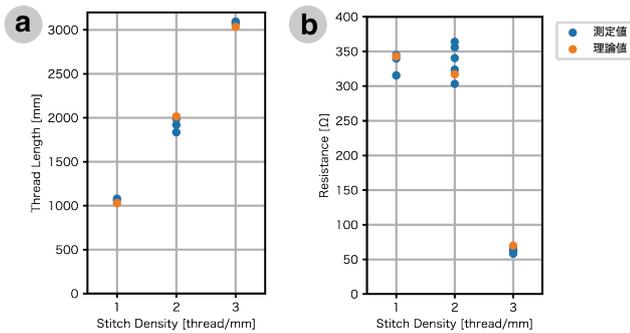


図 4 タタミ縫いの測定値と理論値の比較. (a) 導電糸消費量. (b) 抵抗値.

4. 布変形の検出手法

刺繍の等価回路モデルにより明らかになった、刺繍のパラメータと抵抗値変化の関係を活用することで、図5に示すような3つのセンサを製作し、変形による抵抗値変化を評価した。

4.1 (a) つまむ位置の検出

つまんでいる位置を検出するために、図5(a)のようなセンサを製作した。このセンサは5つの検出部(S1~S5)と2つの接続部(C1,C2)から構成されている。隣り合う2つの検出部が接触するようにつまむことで電極パターンが部分的に短絡するが、5つの検出部ごとに異なる糸密度になっているため、つまむ位置によってC1-C2間の抵抗値が変化することを利用して検出を行なっている。これにより、2カ所の接続だけで、複数箇所でのつまむ位置の検出を実現しており、検出したい位置を増やしても布と回路の接続数は変化しないことから、センサを大規模化しやすいメリットがある。

今回作成しているセンサはS1~S5の電極の糸密度をそれぞれ4, 3, 2.5, 2, 1本/mmに設定した。

4.2 (b) 折りたたみ形状の検出

折りたたみ形状を検出するために、図5(b)のようなセンサを製作した。このセンサは8つの検出部(S1~S8)と2つの接続部(C1,C2)から構成されている。原理はつまむ位置の検出と同じく、電極パターンの中で8つの検出部ごとに異なる糸密度にすることで形状を識別している。これにより、2カ所の接続だけで複数の軸での折りたたみを実現している。

識別可能な折りたたみ形状は、以下の通りである。

折りたたんでいないパターン 1パターンのみ。

1/2に折りたたむパターン 向かい合う2つの辺の中点を通るような軸で1回折りたたんで、1/2サイズの長方形を作るようなパターンである。表面の2軸(A-H, A-V)、裏面の2軸(B-H, B-V)それぞれに対して山折

りができるので4パターンがある。

1/4に折りたたむパターン 1/2に折りたたむパターンからさらに半分に折りたたむことで、本来の1/4サイズの正方形を作るようなパターンである。理論的には1/2に折りたたむ4つの軸に対して、それぞれ山折りと谷折りの2パターンあるので、合計で8パターンがある。しかし、今回のプロトタイプでは、一部を除いた6パターンのみ識別可能であった。

今回作成しているセンサはS1~S8の電極の糸密度をそれぞれ1, 1.6, 2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.2, 4本/mmに設定した。

4.3 (c) 曲げ形状の検出

曲げ形状の検出するために、図5(c)のようなセンサを製作した。このセンサは検出部(S)と2つの接続部(C1,C2)で構成されており、布の曲げ方によって検出部における導電糸の接触度合いが変化するため、曲げることによって抵抗値が変化する。このセンサは適切な糸密度に設定することによって、曲げによる抵抗値変化を大きくしている。

5. センサの評価

作成したセンサに対して、各変形ごとにどのような抵抗値変化をとったのか計測した。変形による抵抗値変化の計測において、各変形に対して5回ずつ測定した。また、計測にはデジタルマルチメータ(CD771, 三和電気計器株式会社)を利用した。

5.1 (a) つまむ位置の検出の評価

図6(a)につまむ位置ごとの抵抗値の測定結果を示す。つまんでいない状態と4ヶ所のつまむ位置ごとに抵抗値が異なることが見てとれる。

5.2 (b) 折りたたみ形状の検出の評価

図6(b)に折りたたみ形状ごとの抵抗値の測定結果を示す。折りたたんでいない状態と1/2に折りたたむ4パターン、1/4に折りたたむ6パターン、のそれぞれで異なる抵抗値となっていることが見てとれる。

5.3 (c) 曲げ形状の検出の評価

曲げ形状の検出の評価では、検出部の糸密度が異なる複数のセンサを製作して評価した。図6(c)に曲げ形状ごとの抵抗値の測定結果を示す。糸密度が小さい場合は変形によって抵抗値が変化していないことが見て取れるが、2本/mmや2.5本/mmで外曲げ・真っ直ぐ・内曲げの3パターンの形状ごとに抵抗値が異なることが見てとれる。

6. 制約と考察

6.1 タタミ縫いの等価抵抗回路モデルの汎用性

本研究の等価抵抗回路モデルではタタミ縫いを対象とし、

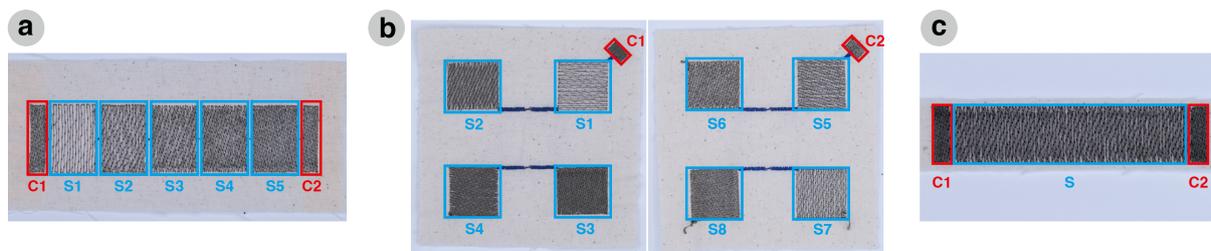


図 5 製作したセンサ. (a) つまむ位置の検出 (b) 折りたたみ形状の検出 (c) 曲げ形状の検出

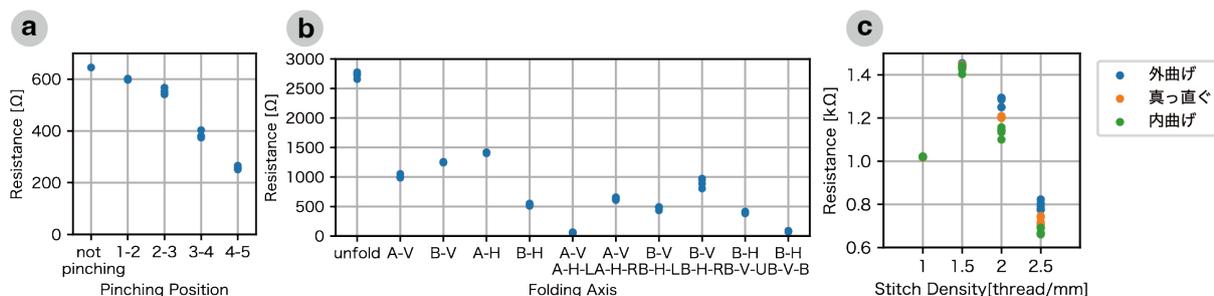


図 6 製作したセンサの評価結果. (a) つまむ位置の検出 (b) 折りたたみ形状の検出 (c) 曲げ形状の検出

評価では糸密度のみを変化させているが、タタミ縫いにおいては糸密度以外にもピッチや偏差など様々なパラメータがある。それらのパラメータにおいても提案したモデルで抵抗値を推定できるか評価していく必要がある。例えば、ピッチの長さによって抵抗値が変化することは走り縫いモデルによって示されているため、タタミ縫いでも同じような傾向になることが考えられる。また、ピッチの長くなると糸が緩みやすくなるため、今回提案したモデルにおける糸の位置に加えて正規分布に従う誤差の標準偏差が大きくなる可能性が考えられる。また、タタミ縫い以外にも様々な刺繍の縫い方が存在しており、それらに対しても提案したモデルを適用できるかどうか検討する必要がある。このように、今回提案しているモデルが他の縫い方・刺繍のパラメータに対しても抵抗値を推定できるかどうか、その汎用性を検討する必要がある。

また、刺繍の抵抗値は用いる素材や刺繍マシン、刺繍時のセッティングによっても変化する。今回提案したモデルでは、導電糸の線抵抗や布・接着芯の厚さは考慮しているが、生地の充填率のなど他の素材に関するパラメータの影響によっては汎用性が無い可能性が考えられる。また、刺繍マシン内部での擦れによる導電糸の抵抗値変化や、刺繍枠への布の張り具合など、刺繍マシンや刺繍時のセッティングなどがモデルの汎用性に影響を与える可能性が考えられる。

6.2 センサの頑強性

本研究で行なった評価実験では、同一の変形をしても抵抗値にばらつきがあることが見て取れる。この要因とし

て、次の2つが考えられる。一つ目の要因は、同じ変形でもつまみや折りたたみの軸がずれることによって電極の接触面積が変化するからである。これは、非導電糸で刺繍して布を部分的に硬くすることにより、変形の軸をずれないようにすることで解決できる可能性が考えられる。二つ目の要因は、導電糸は伸縮によって抵抗値が変化することにより、センサ全体の抵抗値が変形によって変化するからである。本研究では伸縮性の小さい導電糸・布を用いているため、この影響はそこまで大きなものではないが、変形を繰り返すことで徐々に検出の閾値が変化して行く可能性がある。加えて、導電糸の酸化によっても抵抗値が徐々に大きくなっていく。本研究の評価実験は短時間で終わっているため影響が見られなかったが、長期的な評価を行うことで時間的にセンサの閾値が変化して行く可能性がある。

7. おわりに

本研究では、刺繍の設計パラメータの違いを活用した布の変形検出手法を提案した。これにより、二点間の抵抗値を計測するだけで、多段階のつまむ位置や折りたたみ形状、曲げを検出することが可能になった。また、タタミ縫いにおける等価回路モデルの構築により、それぞれの変形による抵抗値変化が最適になるようにセンサを設計することが可能になった。今後の課題としては、タタミ縫い以外の他の縫い方における刺繍モデルの構築やセンサへの応用、センサの頑強性を向上などが挙げられる。

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、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*, p. 1–13 (online), available from <https://doi.org/10.1145/3313831.3376305>, Association for Computing Machinery (2020).
- [2] Hamdan, N. A.-h., Heller, F., Wacharamanatham, 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, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 2497–2503 (online), DOI: 10.1145/2851581.2892529 (2016).
- [3] Hamdan, N. A.-h., Voelker, S. and Borchers, J.: Sketch Stitch: Interactive Embroidery for E-Textiles, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–13 (online), DOI: 10.1145/3173574.3173656 (2018).
- [4] Jo, J. and Kao, C. H.-L.: SkinLace: Freestanding Lace by Machine Embroidery for On-Skin Interface, *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3411763.3451756 (2021).
- [5] JUCHNEVIČIENĖ, Ž., JUCIENĖ, M. and RADAIVIČIENĖ, S.: The research on the width of the closed-circuit square-shaped embroidery element, *Materials Science*, Vol. 23, No. 2, pp. 186–190 (2017).
- [6] Karrer, T., Wittenhagen, M., Lichtschlag, L., Heller, F. and Borchers, J.: Pinstripe: Eyes-Free Continuous Input on Interactive Clothing, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1313–1322 (online), DOI: 10.1145/1978942.1979137 (2011).
- [7] Luo, Y., Wu, K., Palacios, T. and Matusik, W.: KnitUI: Fabricating Interactive and Sensing Textiles with Machine Knitting, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3411764.3445780 (2021).
- [8] Ma, H. and Yamaoka, J.: SenSequins: Smart Textile Using 3D Printed Conductive Sequins, *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3526113.3545688 (2022).
- [9] Nabil, S., Jones, L. and Girouard, A.: Soft Speakers: Digital Embroidering of DIY Customizable Fabric Actuators, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3430524.3440630 (2021).
- [10] Nolden, R., Zöll, K. and Schwarz-Pfeiffer, A.: Smart Glove with an Arduino-Controlled Textile Bending Sensor, Textile Data Conductors and Feedback Using LED-FSDsTM and Embroidery Technology, *Proceedings*, Vol. 68, No. 1, MDPI, p. 4 (2021).
- [11] Parzer, P., Sharma, A., Vogl, A., Steimle, J., Olwal, A. and Haller, M.: SmartSleeve: Real-Time Sensing of Surface and Deformation Gestures on Flexible, Interactive Textiles, Using a Hybrid Gesture Detection Pipeline, *UIST '17*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 565–577 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126652 (2017).
- [12] Post, E. R., Orth, M., Russo, P. R. and Gershenfeld, N.: E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing, *IBM Systems Journal*, Vol. 39, No. 3.4, pp. 840–860 (online), DOI: 10.1147/sj.393.0840 (2000).
- [13] 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 (online), DOI: 10.1177/00405175211061028 (2022).
- [14] Zhang, Y., Hu, J., Yan, X. and Tu, H.: The equivalent resistance model of double-layer embroidered conductive lines on nonwoven fabric, *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 0, No. 0, p. 15280837211049481 (online), DOI: 10.1177/15280837211049481 (0).
- [15] 篠田和宏, 雪田和歌子, 横田知之, 染谷隆夫 and 矢谷浩司: 変形可能なハンカチ型インタフェースの設計, *研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI)*, Vol. 2021, No. 2, pp. 1–8 (2021).
- [16] 篠田和宏 and 矢谷浩司: 導電糸刺繍における縫い方の抵抗値に与える影響の調査, *情報処理学会全国大会, IPSJ* (2023).