

電気インピーダンス変化に基づき 位置識別を行う布型タッチインターフェース

関森 広大¹ 志築 文太郎² 高橋 伸²

概要：本研究では、電流を印加した導電布をタッチした際の電気インピーダンス変化を利用して、タッチ位置識別を行う布型タッチインターフェースを提案する。ユーザは布表面をタッチパッドのように扱うことができ、様々なインタラクションを行うことが可能となる。プロトタイプとして、導電布、波形発生器、ブレッドボード上の電子回路およびArduinoを使用したハードウェアを作成し、機械学習を利用した認識ソフトウェアを開発した。開発したプロトタイプを利用してタッチ位置の識別精度の評価実験を行った。

A Fabric Touch Interface that Can Detect Touch Positions through Electrical Impedance

KODAI SEKIMORI¹ BUNTAROU SHIZUKI² SHIN TAKAHASHI²

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末の普及が進み、タッチパネルに代表されるタッチインターフェースは日常生活において広く使用されている。ユーザはタッチインターフェースを操作することにより、コンピュータとのインタラクションが可能となる。しかし、現状の多くのタッチインターフェースは小型かつフラットな物体に限られており、凹凸のある表面、曲面などを含む複雑な形状の物体にはあまり適用されていない。そのため、タッチインターフェースはユーザにとってわかりやすいインターフェースであるにもかかわらず、日常的な物体におけるインターフェースとしては、利用例が少ない。この問題を解決するために、様々な物体をタッチインターフェース化する研究が数多くされている。先行研究では、電気[1], [2] やコンピュータビジョン[3], 音響[4]など多様なタッチセンシング手法が用いられている。

我々は、タッチインターフェース化する物体として布に着目した。布は形状変化可能であり、物体にかぶせれば複雑な形状のタッチインターフェースとして使用することが可能である。また、安価である、ユーザがタッチしたときの手

触りが良いおよび折りたたむことができるといった利点もある。

そこで、本研究では布表面をタッチパッドのように扱い、様々なインタラクションを可能とすることを目指す。そのため、導電性のある布素材（導電布）を使用する。導電布に電流を印加すると、タッチした際に電気インピーダンスの変化が生じるので、それをを利用して、タッチ位置識別を行う。今回、電気インピーダンストモグラフィ技術(Electrical Impedance Tomography: EIT)[5]において利用されているセンシングを参考にプロトタイプを開発した。また、開発したプロトタイプを使用したタッチ位置の識別精度の評価実験を行った。

2. 関連研究

一般の繊維素材では得られない新しい機能を備えた繊維素材のことをスマートテキスタイルという。繊維素材を使うため、身に付けていても自然であることから、ウェアラブルコンピューティングへ適用されている。また、本研究の手法では対象の電気インピーダンスの変化に基いてタッチセンシングを行っている。HCI分野において、電気的手法を用いてタッチセンシングを行う研究は数多くされている。よって本節では、本研究の関連研究としてスマートテキスタイルに関する研究および電気的手法を用いてタッチ

¹ 筑波大学 大学院システム情報工学研究科
コンピュータサイエンス専攻

² 筑波大学 システム情報系

センシングを行う研究について述べる。

2.1 スマートテキスタイルに関する研究

Vogl らは導電糸がたわむときに抵抗が変化することを利用して、伸縮性のある布に導電糸をジグザグに縫い付け、布を伸縮させることにより入力を行う伸縮センサを開発した [6]. Smart Furoshiki は通常の布に導電布を織り込み、さらに多数のRFIDタグを埋め込むことにより、自身の折られ方を認識することができる [7], [8]. Poupyrev らは衣服に縫い込むことが可能な導電性繊維の開発を行った [9], [10]. さらにこの繊維素材を用いることによって、スマートフォンなどに採用されている投影型静電容量方式のタッチパネルを模倣し、衣服上でのタッチインタラクションを実現した。Textile++は導電布を用いて、抵抗膜方式のタッチパネルを参考に開発されたテキスタイルインターフェースである [11]. Leong らは複数の導電布を用いて多層構造にすることにより、靴下のようなインターフェースである proCoverを開発した [12]. Parzer らは proCover のシステムを衣服の袖に移植し、袖をまくる、袖上をタッチする、またはスワイプするなどのジェスチャインタラクションを行えるようにした [13]. Textile++や proCover では複数の導電布を用いてセンシングを行っているが、本研究では1枚の導電布のみでセンシングを行っているという点で異なる。

2.2 電気的手法を用いてタッチセンシングを行う研究

タッチセンシングを行う研究の中でも電気的手法を用いたセンシングは数多く研究されている。特に、導体の表面をタッチすると静電容量が変化することを利用しているものが多い [14]. スマートフォンなどのモバイル端末に使用されるタッチパネルの多くが静電容量方式になってきている。Sato らはこの静電容量方式タッチセンシング技術を電流の周波数を掃引することにより拡張することによって、物体や人体のタッチまたはジェスチャインタラクションを可能にした Touché を提案している [15]. SmartSkin は壁や机などの広い平面にメッシュ状に電極を配置し、各電極の交点での静電容量の変化を計測することにより、平面上でのジェスチャ認識を行うことが可能である [16]. Wall++ は壁に静電容量方式のセンサをメッシュ状に埋め込むことにより、壁付近でのジェスチャおよび室内の物体のセンシングを行っている [17]. Project Zanzibar は静電容量センサと NFC を利用し、折り曲げ可能なマット上での物体認識ならびにユーザのタッチおよびジェスチャ認識を可能にしている [18]. Holman らはテープのように物体に貼り付けることが可能な一次元タッチセンサである TactileTape を提案している [19]. Electrick は導電性素材により作られたプロトタイプや、既存物体を導電性素材によってコーティングすることにより、タッチインタラクションを可能

にしている [1]. Yoon らはカーボン製エラストマーを用いることにより、物体に取り付けることが可能な柔らかいタッチセンサである iSoft を開発した [2]. 本研究の手法では、Electrick および iSoft にて使用されている EIT を参考にしたセンシングを行っている。

3. 提案手法：布型タッチインタフェース

本節では提案手法の概要およびセンシング原理について述べる。

3.1 概要

本研究では、電流を印加した導電布をタッチした際の電気インピーダンス変化を利用して、タッチ位置識別を行う布型タッチインタフェースを提案する。ユーザは布表面をタッチパッドのように扱うことができ、様々なインタラクションを行うことが可能になると考える。例えば、布によってクッションを覆い、テレビリモコンのように使うという使用例が考えられる（図1）。布の左上をタッチするとテレビの電源がONになり、中央右側をタッチすると次のチャンネル、中央左側をタッチすると前のチャンネル、右下をタッチすると音量を上げる、左下をタッチすると音量を下げることができる。

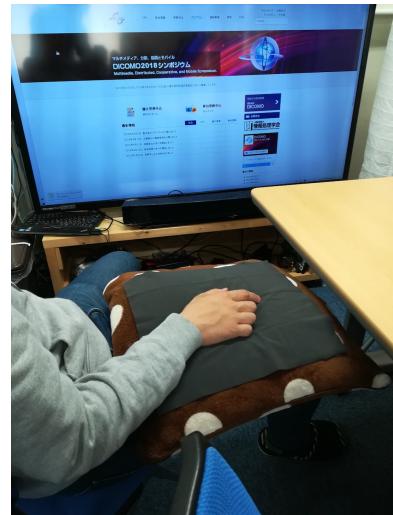


図1：テレビリモコンとしての使用のイメージ

3.2 センシング原理

提案手法では、EITにおいて利用されているセンシングを参考にしている。EITでは、導電体の周囲を取り囲むように電極を複数取り付けて、電流を印加する電極と電圧を計測する電極を順次切り替える（図2）。導電体をタッチすると静電容量が変化し、導電体上の電気インピーダンスが変化する。電気インピーダンスが変化すると、計測電極での電圧が変化する（図3）。各電極の組み合わせにおける電圧変化に基いて内部構造を可視化する。本研究の手法では

可視化ではなく、計測した電圧を使用して機械学習を行うことによってタッチ位置識別を行う。

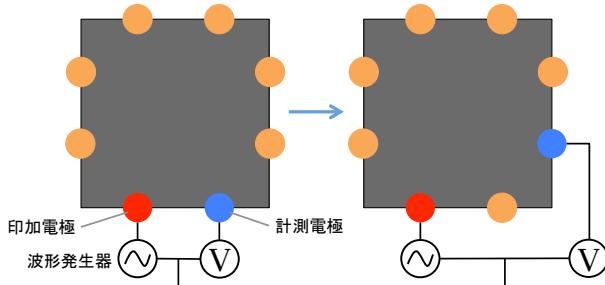


図 2: 計測電極を切り替えるイメージ図

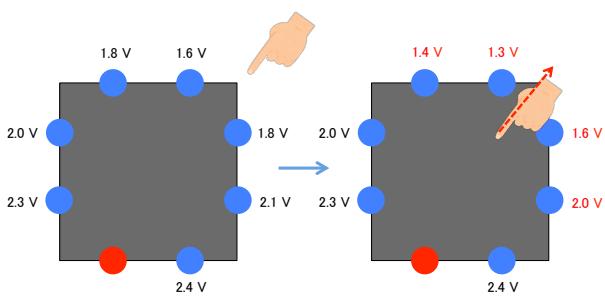


図 3: 導電体をタッチしたときの電圧変化のイメージ図

4. 実装

EITにおけるセンシングを導電布に適用し、布表面のタッチ位置を識別可能なシステムのプロトタイプ（図 4）を開発した。本プロトタイプは電圧を計測するハードウェアと、タッチ位置の識別を行う認識ソフトウェアによって構成される。

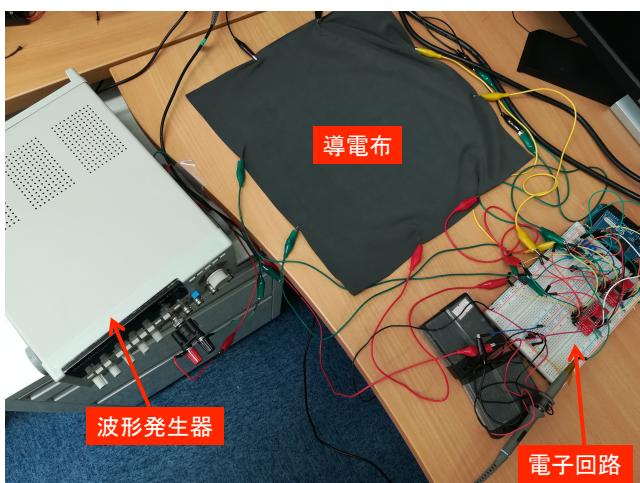


図 4: プロトタイプ

導電布として EonTex Conductive Stretchable Fabric^{*1}

^{*1} <https://www.sparkfun.com/products/14112>

(32.5 cm × 30.8 cm) を使用し、波形発生器として Metex MXG-9810A FUNCTION GENERATOR^{*2}を使用した。図 4 の電子回路として、印加電極と計測電極の切り替えを行うためのマルチプレクサ、計測した電圧の信号を増幅するための増幅回路をブレッドボード上に実装した。また、計測したデータの転送やマルチプレクサの制御を行うマイクロコンピュータとして Arduino MEGA ADK^{*3}を使用した。Arduino は USB ケーブルによって PC に接続されている。

ハードウェアのブロック図を図 5 に示す。導電布の周囲

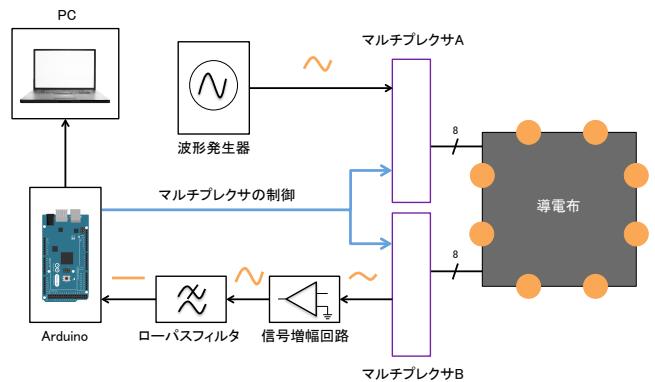


図 5: ハードウェアのブロック図

を取り囲むように電極を 8 個取り付けた。波形発生器から 200 kHz, 6 Vp-p の正弦波を発生させ、マルチプレクサ A を通して導電布の 1 つの電極に印加する。1 つの電極に印加している間に、マルチプレクサ B を切り替えることにより、他の電極にて電圧を計測する。全ての電極にて電圧の計測が終了すると、印加する電極を別の電極に切り替え、再度他の電極にて電圧を計測する。計測した電圧の信号は微小であるため、オペアンプを使用した信号増幅回路を用いて増幅させる。増幅された信号はダイオードにより整流した後、ローパスフィルタを通じ交流成分を除去する。Arduino の analogRead() 関数を使用して、直流成分のみとなった信号を読み取る。シリアル通信により、計測したデータを PC に送信する。1 組の電極の組み合わせにつき連続 100 フレーム計測を行う。以上を全ての印加電極、計測電極の組み合わせにて行う。本プロトタイプでは 8 つの電極を使用し、印加電極以外の全ての電極にて電圧を計測するため、8P₂ = 56 通りの組み合わせが存在する。1 組の組み合わせにて 100 フレーム計測するため、計 5600 フレーム分のデータを 1 つの学習データとする。

タッチ位置の識別を行うソフトウェアを Python の機械学習ライブラリである scikit-learn^{*4}を用いて開発した。認識ソフトウェアは学習フェーズと認識フェーズに分かれ

^{*2} <https://www.tequipment.net/MetexMXG-9810A.html>

^{*3} <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>

^{*4} <http://scikit-learn.org/stable/>

る。タッチする布上の点にラベル名を付ける。学習フェーズでは、ユーザがディスプレイに表示されるラベル名と対応する布上の点をタッチし、PCにて学習データを収集する。機械学習の手法としてSVMを使用し、分類を行うため、C-SVC^{*5}を採用した。カーネル関数には線形カーネル(式1)を採用した。線形カーネルのハイパーパラメータとして、誤分類をどの程度許容するかを決めるパラメータであるCが存在し、値が小さいほど誤分類を許容する。今回はデフォルト値のC = 1.0とした。

$$K(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

本プロトタイプでは、学習データを5分割して交差検証を行い、学習器を構築する。認識フェーズでは、学習フェーズにて構築した学習器に新たに計測したデータを与えることにより、リアルタイムにタッチ位置の識別を行う。

5. 実験

本節では、4節にて述べたプロトタイプを用いたタッチ位置の識別性能に関する評価実験について述べる。まず、布を平面に置いた状態にてシングルタッチを行う実験およびマルチタッチを行う実験について述べる。次に、物体を布で覆った状態にてシングルタッチを行う実験について述べる。被験者は筆頭著者1名である。認識率を式2のように定義した。

$$\text{認識率 (\%)} = \frac{\text{正しく識別された回数}}{\text{総操作回数} \times 100} \quad (2)$$

5.1 実験1：布を平面に置いた状態にてシングルタッチを行う実験

実験1の目的は、布を平面に置いた状態にてシングルタッチを行う場合に、どれだけ細かくタッチ位置を識別できるかどうかを調査することである。タッチする位置が変わらないようにするために、縦横方向に等間隔に半径1cmの円状の穴が空いている紙を複数用意した。紙の大きさは布のそれぞれの辺を5mmずつ短くし、31.5cm × 29.8cmの大きさとした。紙は絶縁体であるため、本プロトタイプに影響を与えない。穴の数は縦横それぞれ2×2, 3×3, 4×4, 5×5の4種類である。隣接する穴の中心間の距離は、2×2が15.0cm, 3×3が10.0cm, 4×4が7.5cm, 5×5が6.0cmである。左上の点をラベル1とし2, 3, …と順番にラベルを付ける。何もタッチしていない状態をラベル0とする。これらの紙を布の上に重ね、被験者はこの穴上の布の点をタッチする。

5.1.1 実験手順

実験には前述の穴が開いている紙を使用し、2×2, 3×3,

^{*5} <http://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.svm.SVC.html>

4×4, 5×5の順に4種類行った。

まず、学習フェーズとしてディスプレイに1つのラベルが表示されるので、対応する布上の点をタッチする。このとき、指を放すように指示が出るまでタッチし続ける。1つの点につき10個の学習データを取得する。1つの点での学習データの取得が終わると、順番に次のラベルが表示される。以上の操作を全てのタッチする点での学習データの取得が終わるまで繰り返す。

認識フェーズでは、ディスプレイに1つのラベルが表示されるので、対応する布上の点をタッチする。データの取得が終わると、取得したデータを学習器に与え、タッチした点の識別を行う。ディスプレイに表示されたラベルと識別結果のラベルが一致していれば、正しく識別されたと見なす。1つの点での識別が終わると、ランダムな順序で次のラベルが表示される。以上の操作を全てのタッチする点と何もタッチしていない状態にて各10回ずつ行う。例えば、穴の数が4×4の場合、(4×4+1)×10 = 170回の操作を行う。図6はタッチする点が3×3のときに、ディスプレイに表示されているラベル8と対応する点をタッチしている様子である。

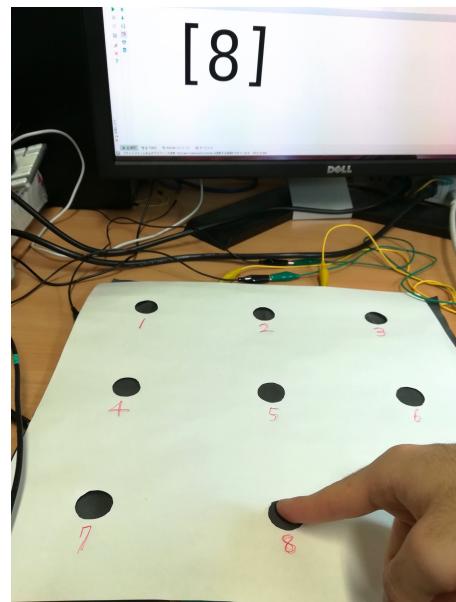


図6: 実験1の様子

5.1.2 実験結果

2×2および3×3の紙を使用したときの認識率は100%であった。4×4の紙を使用したときは170回の操作中169回正しく識別され、隣接するラベルと1回誤認識しており、認識率は99.4%であった。5×5の紙を使用したときは260回の操作中259回正しく識別され、隣接するラベルと1回誤認識しており、認識率は99.6%であった。

5.2 実験2：より短い間隔にてシングルタッチを行う実験

実験1にて、本プロトタイプは布を平面に置いた状態に

てシングルタッチを行う場合に、6.0 cm 間隔でのタッチ位置識別を行えることを確認した。そこで実験 2 では、より短い間隔にてタッチ位置識別を行えるかどうかを調査する。これ以上穴の数を増やすと実験タスク数が増えすぎてしまうため、布の一部分だけを使用して実験を行う。紙の中央に縦横方向に等間隔に半径 1 cm の円状の穴が 2 つずつ、計 4 つ空いた紙を複数用意した。隣接する穴の中心間の距離は 5.0 cm, 3.0 cm, 2.0 cm の 3 種類である。実験手順は実験 1 と同じである。

5.2.1 実験結果

5.0 cm 間隔のときは認識率は 100 % であった。3.0 cm 間隔のときは 50 回の操作中 48 回正しく識別され、隣接するラベルと 2 回誤認識しており、認識率は 98.0 % であった。2.0 cm 間隔のときは 50 回の操作中 22 回正しく識別され、認識率は 44.0 % であった。2.0 cm 間隔のときの混同行列を図 7 に示す。セル内の数値は認識した回数を示しており、認識した回数が多いほどセルの色は濃い。実験 1, 2 から、布を平面に置いた状態にてシングルタッチを行う場合に、3.0 cm 間隔でのタッチ位置識別を行えることが示唆された。

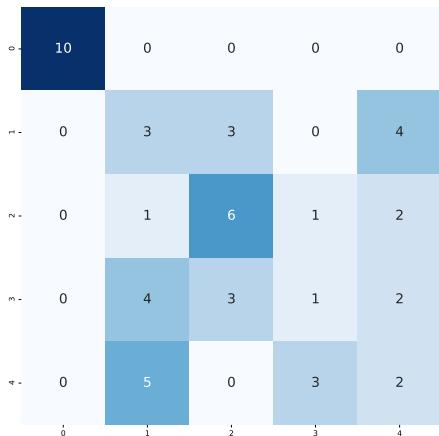


図 7: 2.0 cm 間隔のときの識別結果の混同行列

5.3 実験 3: 布を平面に置いた状態にてマルチタッチを行う実験

実験 3 の目的は、布を平面に置いた状態にてマルチタッチ識別を行うことができるかどうかを調査することである。実験 1 にて使用した 2 × 2 の穴が空いた紙を使用し、各点でのシングルタッチに加えて、全ての 2 点の組み合わせ ((1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (3, 4)) を同時にタッチするマルチタッチの識別を行う。隣接する穴の中心間の距離は、15.0 cm である。図 8 に被験者がマルチタッチを行っている様子を示す。

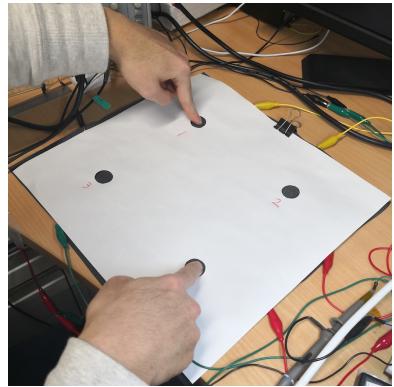


図 8: 実験 3 の様子

5.3.1 実験手順

学習フェーズでは、まず実験 1 と同じように、布上の各点での学習データの取得を行う。その後、2 つのラベルの組み合わせがディスプレイに表示されるので、対応する 2 点を同時にタッチする。1 組の組み合わせでの学習データの取得が終わると、順番に次のラベルの組み合わせが表示される。以上の操作を全てのタッチする 2 点の組み合わせでの学習データの取得が終わるまで繰り返す。

認識フェーズでは、ディスプレイに 1 つのラベルまたは 2 つのラベルの組み合わせが表示されるので、対応する布上の 1 点または 2 点をタッチする。データの取得が終わると、取得したデータを学習器に与え、タッチした点の識別を行う。ディスプレイに表示されたラベルと識別結果のラベルが一致していれば、正しく識別されたと見なす。識別が終わると、ランダムな順序で次のラベル、またはラベルの組み合わせが表示される。以上の操作を全てのシングルタッチする 1 点、マルチタッチする 2 点の組み合わせおよび何もタッチしていない状態にて各 10 回ずつ行う。穴の数が 2 × 2 なので、 $(4C_1 + 4C_2 + 1) \times 10 = 110$ 回の操作を行う。

5.3.2 実験結果

認識率は 100 % であった。また、実験 3 から布を平面に置いた状態にてマルチタッチを行う場合に、それぞれのタッチ位置が 15.0 cm 離れているときタッチ位置識別を行えることが示唆された。しかし、マルチタッチをどれだけ細かい精度にて識別を行うことができるかは未調査であるため、今後調査する必要があると考えられる。

5.4 実験 4: 物体を布で覆った状態にてシングルタッチを行う実験

実験 4 の目的は、平面でない状態にてシングルタッチを識別できるかどうかを調査することである。平面でない状態にするために物体を布で覆い、底面を除く面をタッチする。実験に使用したのは、縦 8.0 cm、横 11.7 cm、高さ 5.2 cm の木製の箱（図 9）、プラスチック製の円筒型容器（図 10）、アルミ缶（図 11）、凹凸のあるプラスチック製の物体

(図 12) である。何もタッチしていない状態をラベル 0、箱の上面をラベル 1、左側面をラベル 2、背面をラベル 3、右側面をラベル 4、正面をラベル 5 とする。円筒型容器の上面をラベル 1、上から見て側面を 90 度ずつ区切り、区切った面の中央それぞれにラベルを付ける。アルミ缶も円筒型容器と同様にラベルを付ける。凹凸のある物体の凹んでいる中央部分をラベル 1、突出している部分それぞれにラベルを付ける。



(a) 布で覆う前

(b) 布で覆った後

図 9: 実験 4 にて使用した木製の箱



(a) 布で覆う前

(b) 布で覆った後

図 10: 実験 4 にて使用したプラスチック製の円筒型容器



(a) 布で覆う前

(b) 布で覆った後

図 11: 実験 4 にて使用したアルミ缶

5.4.1 実験手順

学習フェーズおよび認識フェーズは実験 1 と同様である。ただし、ラベルに対応する面の中央をタッチする。全てのタッチする面および何もタッチしていない状態にて各 10 回ずつ行う。



(a) 布で覆う前

(b) 布で覆った後

図 12: 実験 4 にて使用した凹凸のある物体

5.4.2 実験結果

木製の箱、プラスチック製の円筒型容器およびプラスチック製の凹凸のある物体を覆った状態のときの認識率は 100 % であった。アルミ缶を覆った状態のときは 60 回の操作中 47 回正しく識別され、認識率は 78.3 % であった。アルミ缶での実験における識別結果の混同行列を図 13 に示す。セル内の数値は認識した回数を示しており、認識した回数が多いほどセルの色は濃い。アルミ缶以外の物体のタッチ位置識別精度は非常に高かった。本プロトタイプは電気的手法を用いており、アルミ缶は導電体であるため、影響を受けてしまったと推測できる。

0	10	0	0	0	0	0
0	0	3	0	0	7	0
0	0	0	10	0	0	0
0	0	0	0	8	2	0
0	2	0	0	0	8	0
0	0	2	0	0	0	8
0	1	2	3	4	5	

図 13: アルミ缶を覆ったときの識別結果の混同行列

6. まとめ

本研究では電流を印加した導電布をタッチした際の電気インピーダンス変化を利用して、タッチ位置識別を行う布型タッチインターフェースを提案した。ユーザは布表面をタッチパッドのように扱うことができ、様々なインタラクションを行うことが可能となる。開発したプロトタイプでは、EITにおいて利用されているセンシングを参考にし、

SVM を利用してタッチ位置の識別を行う。プロトタイプの性能を評価するために、タッチ位置の識別精度の評価実験を行った。布を平面に置いた状態にてシングルタッチを行う場合に、3.0 cm 間隔でのタッチ位置識別を行えることが示された。布を平面に置いた状態におけるマルチタッチを識別可能なことが示唆された。また、布で物体を覆った状態においてもシングルタッチを識別可能なことが示された。

今後の展望としては、今回行った4つの実験の被験者は筆頭著者1名のため、被験者ごとに個人差があるかどうかの調査を行う。加えて温度、湿度および環境光などの実験を行う環境によって影響があるかどうかの調査、ハードウェアの小型化などを行う予定である。

参考文献

- [1] Yang Zhang, Gierad Laput, and Chris Harrison. Electrick: Low-Cost Touch Sensing Using Electric Field Tomography. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 1–14, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [2] Sang Ho Yoon, Ke Huo, Yunbo Zhang, Guiming Chen, Luis Paredes, Subramanian Chidambaram, and Karthik Ramani. iSoft: A Customizable Soft Sensor with Real-time Continuous Contact and Stretching Sensing. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 665–678, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [3] Robert Xiao, Chris Harrison, and Scott E. Hudson. WorldKit: Rapid and Easy Creation of Ad-hoc Interactive Applications on Everyday Surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 879–888, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [4] Makoto Ono, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Touch & Activate: Adding Interactivity to Existing Objects Using Active Acoustic Sensing. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 31–40, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [5] Liliana Borcea. Electrical Impedance Tomography. *Inverse Problems*, Vol. 18, No. 6, pp. R99–R136, 2002.
- [6] Anita Vogl, Patrick Parzer, Teo Babic, Joanne Leong, Alex Olwal, and Michael Haller. StretchEBand: Enabling Fabric-based Interactions Through Rapid Fabrication of Textile Stretch Sensors. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 2617–2627, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [7] Ryo Ohsawa, Kei Suzuki, Takuya Imaeda, Masayuki Iwai, Kazunori Takashio, and Hideyuki Tokuda. Smart Furoshiki: A Context Sensitive Cloth for Supporting Everyday Activities. In *HCI (2)*, Vol. 4551 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 1193–1199. Springer, 2007.
- [8] Masayuki Iwai, Ryo Ohsawa, Takuya Imaeda, Kei Suzuki, and Hideyuki Tokuda. Smart-Furoshiki: RFID-embedded Cloth enabling Multiple Area Detection. In *ICDCS Workshops*, p. 53. IEEE Computer Society, 2007.
- [9] Ivan Poupyrev, Nan-Wei Gong, Shiho Fukuhara, Mustafa Emre Karagozler, Carsten Schwesig, and Karen E. Robinson. Project Jacquard: Interactive Digital Textiles at Scale. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 4216–4227, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [10] Jacquard by Google — Home. <https://atap.google.com/jacquard/>. (Accessed on 01/25/2018).
- [11] Keisuke Ono, Shinichiro Iwamura, Akira Ogie, Tetsuaki Baba, and Paul Haimes. Textile++: Low Cost Textile Interface Using the Principle of Resistive Touch Sensing. In *ACM SIGGRAPH 2017 Studio*, SIGGRAPH '17, pp. 8:1–8:2, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [12] Joanne Leong, Patrick Parzer, Florian Perteneder, Teo Babic, Christian Rendl, Anita Vogl, Hubert Egger, Alex Olwal, and Michael Haller. proCover: Sensory Augmentation of Prosthetic Limbs Using Smart Textile Covers. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 335–346, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [13] Patrick Parzer, Adwait Sharma, Anita Vogl, Jürgen Steimle, Alex Olwal, and Michael Haller. SmartSleeve: Real-time Sensing of Surface and Deformation Gestures on Flexible, Interactive Textiles, Using a Hybrid Gesture Detection Pipeline. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 565–577, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [14] Tobias Grossé-Puppenthal, Christian Holz, Gabe Cohn, Raphael Wimmer, Oskar Bechtold, Steve Hodges, Matthew S. Reynolds, and Joshua R. Smith. Finding Common Ground: A Survey of Capacitive Sensing in Human-Computer Interaction. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 3293–3315, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [15] Munehiko Sato, Ivan Poupyrev, and Chris Harrison. Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 483–492, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [16] Jun Rekimoto. SmartSkin: An Infrastructure for Free-hand Manipulation on Interactive Surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '02, pp. 113–120, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [17] Yang Zhang, Chouchang (Jack) Yang, Scott E. Hudson, Chris Harrison, and Alanson Sample. Wall++: Room-scale interactive and context-aware sensing. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 273:1–273:15, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [18] Nicolas Villar, Daniel Cletheroe, Greg Saul, Christian Holz, Tim Regan, Oscar Salandin, Misha Sra, Hui-Shyong Yeo Yeo, William Field, and Haiyan Zhang. Project zanzibar: A portable and flexible tangible interaction platform. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 515:1–515:13, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [19] David Holman and Roel Vertegaal. TactileTape: Low-cost Touch Sensing on Curved Surfaces. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium Adjunct on User Interface Software and Technology*, UIST '11 Adjunct, pp. 17–18, New York, NY, USA, 2011. ACM.