

2022 年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目

円筒形のタッチ面を持つ
導電布製タッチインタフェース

主専攻 知能情報メディア主専攻

著者 田村 隼

指導教員 高橋 伸, 川口 一画, 志築 文太郎

要 旨

身体に装着して使用するウェアラブルデバイスが広く流通するようになった。しかし現在は腕時計型や眼鏡型といったものしか一般に使用されておらず、例えば衣類のように布素材を必要とするウェアラブルデバイスはまだ研究段階にある。布は衣料品をはじめとして多くの日用品に使用されており、導電布や電子部品を組み合わせることで電子デバイスとしてさまざまな機能を付加することができる。このような布製のインタフェースに関する研究は数多くされてきたが、ほとんどがタッチ位置やジェスチャなどの認識法といったその実装についてのものであり、それをどのように活用できるかについての研究はまだ多くない。

そこで本研究では布製タッチインタフェースの新たな活用法の模索と、新たなウェアラブルデバイスの開発を目指す。その中でも布製タッチインタフェースを前腕部に巻き付けた時にそのタッチ面が円筒形となることをに着目し、その形状を活かしたアプリケーションを設計する。タッチ面が円筒形であることには例えば側面が1周で繋がっていて、指を離さずになぞり続けることができるといった利点が存在し、このような利点を活かした新たなアプリケーションを設計できると考える。本論文ではそれらの前段階として、導電布を使用した前腕部に装着するタッチインタフェースの実装を行った。また実装したタッチインタフェースのタッチ位置の識別精度を調査するための実験を行い、腕を軸としたタッチ位置の角度についての識別精度は十分であるが、位置取得の精度やインタフェースの使いやすさには改善の余地があることがわかった。

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 目的とアプローチ	1
1.3 本論文の貢献	2
1.4 本論文の構成	2
第2章 関連研究	4
2.1 ウェアラブルデバイスに関する研究	4
2.2 布製タッチインタフェースに関する研究	4
2.3 非平面タッチインタフェースに関する研究	5
2.4 本研究の位置付け	5
第3章 平面での導電布製タッチセンサの試作	6
3.1 平面で1次元座標を取得する導電布製タッチセンサ	6
3.2 平面で2次元座標を取得する導電布製タッチセンサ	6
第4章 円筒形タッチインタフェースの実装	10
4.1 円筒形タッチインタフェースの構造	10
4.2 位置取得の仕組み	10
第5章 実験	17
5.1 円筒形タッチインタフェースの使用法	17
5.2 実験内容	17
5.3 実験結果	18
第6章 結論	21
謝辞	22
参考文献	23

図目次

1.1	円筒形タッチインタフェースの活用例. (a) 側面を回る長い移動ジェスチャ. (b) 中央に配置した 3D オブジェクトのポイント.	2
3.1	平面で 1 次元座標を取得する導電布製タッチセンサのシステム構成と等価回路図	7
3.2	導電布の上下辺に銅箔テープを付けたもの	7
3.3	平面で 2 次元座標を取得する導電布製タッチセンサ	8
3.4	平面で 2 次元座標を取得する導電布製タッチセンサのシステム構成と等価回路図	9
4.1	円筒形タッチインタフェース	11
4.2	円筒形タッチインタフェースの構造	12
4.3	システム構成	12
4.4	各導電布帯に電圧を印加して計測を行う流れ	13
4.5	2 枚の導電布帯を跨ってタッチしている際の電圧計測. (a) 片方の帯のみに電圧を印加. (b) 両方の帯に電圧を印加.	14
4.6	2 枚の導電布帯を跨ってタッチしている際の電圧計測時の回路図と等価回路図. (a) 片方の帯のみに電圧を印加. (b) 両方の帯に電圧を印加.	14
4.7	隣り合う 2 枚の導電布帯にそれぞれ電圧を印加して計測を行う流れ	15
4.8	2 枚の導電布帯を跨るようにタッチしている時に隣り合う 2 枚の導電布帯にそれぞれ電圧を印加して計測を行う流れ	15
5.1	前腕部に装着し操作する様子	18
5.2	実験用にタッチ点を示すマスキングテープを貼ったもの	19
5.3	各試行で取得されたタッチ位置の帯の数字と座標 X 及び座標 Y の平均値	20

第1章 序論

1.1 背景

近年、身体に装着して使用する電子デバイスであるウェアラブルデバイスが一般的に流通するようになった。特に Apple Watch¹や Google Glass²などの高機能なウェアラブルデバイスは多くの人が使用している。ウェアラブルデバイスはスマートフォンなどの既存の電子デバイスと比較し、常に素早く情報にアクセスすることができ、特に運動時など激しい動きが必要な時でも使用できるというメリットがある。しかし現在は先に挙げたような腕時計型や眼鏡型といったものしか一般に使用されておらず、例えば衣類のように着用するウェアラブルデバイスはまだ研究段階にある。

衣類の素材である布は一般的に軽量で柔軟性が高く加工が簡単なため、様々な用途に応用することができる。布は多くの日用品に使用されており、衣料品だけでなく、家具、自動車、建築などにも使用されている。現在は導電布や電子部品を組み合わせることでセンシングやアクチュエータなどさまざまな機能を付加する研究が行われている。しかしながら布製のインタフェースに関する研究はタッチ位置やジェスチャなどの認識法といったその実装についてのものがほとんどであり、それをどのように活用できるかについての研究は多くない。

1.2 目的とアプローチ

本研究の目的は布製タッチインタフェースの新たな活用法を模索し、それにより新たなウェアラブルデバイスの開発につなげることである。そこで本研究では、布製タッチインタフェースを前腕部に巻き付けた時にそのタッチ面が円筒形となることに着目し、その形状を活かして操作するアプリケーションを設計する。タッチ面が円筒形であることにはいくつかの利点を見出すことができる。例えば側面が1周してつながっているという特徴があり、これにより図 1.1(a) のような側面を回る長い移動ジェスチャを実装することができる。これにより画面端が繋がっているように操作できるカーソルや、継続的なスクロールをするカレンダーなどのアプリケーションを設計することができる。また側面が1周してつながっていることで側面全方向からタッチすることも可能であり、それを活かして図 1.1(b) のような円筒形内部に配置した 3D オブジェクトを全方向からポインティングするアプリケーションも設計できる。

¹<https://www.apple.com/jp/watch/>

²<https://www.google.com/glass/start/>

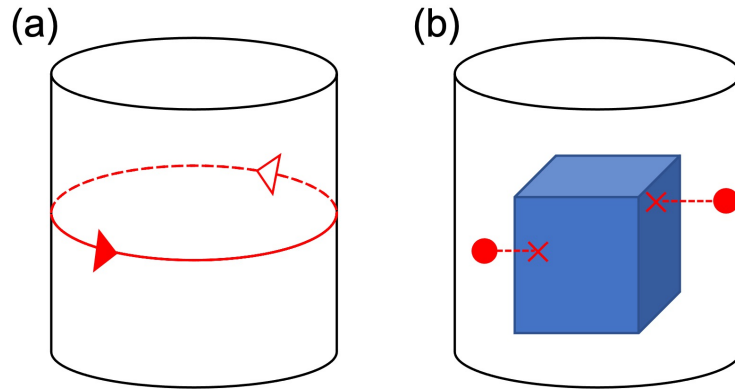


図 1.1: 円筒形タッチインタフェースの活用例. (a) 側面を回る長い移動ジェスチャ. (b) 中央に配置した 3D オブジェクトのポイント.

これらのような形状的な利点を活かすことで平面では行えない操作ができるアプリケーションを制作し，布製タッチインタフェースの活用の幅を広げることができる考える．

本論文ではこの研究の前段階として円筒形のタッチ面を持つ導電布製タッチインタフェースの制作を行う．既存の布製タッチインタフェースは数層の布が重ねられている点や多くの電極を取り付ける必要がある点などが，前腕部に巻き付ける際の障害となりうる．電極を円筒形の底面近くにもみ取り付けること，電圧を利用したタッチ位置取得手法を使用することでその問題を解決する．

1.3 本論文の貢献

本研究の貢献を以下に示す．

- 布製タッチインタフェースを前腕部に装着する際に障害となる要素を解決するために，タッチ位置取得方式やインタフェースの構造について調査した．
- 調査結果を用いて，導電布を使用した前腕部に装着するタッチインタフェースを開発した．
- 実験を行い，制作したタッチインタフェースのタッチ位置認識精度を調査した．

1.4 本論文の構成

第 1 章では本研究の背景，目的とアプローチ，および貢献を示した．第 2 章では本研究に関連する研究を挙げ，本研究の位置づけを述べる．第 3 章では関連研究をもとに平面での導電布を用いたタッチセンサの実装について述べる．第 4 章では前腕部に装着するタッチイン

タフェースの構造と位置取得手法について述べる．第 5 章では実装したタッチインタフェースのタッチ位置の識別性能を調査するための実験とその結果について述べる．第 6 章では本研究の結論を述べる．

第2章 関連研究

本研究の目標は導電布を使用したアームカバー形状の前腕部に装着する円筒形タッチインタフェースを制作し、その形状を活かしたアプリケーションを設計することである。本研究に関連する研究として、同じく身につけて使用する「ウェアラブルデバイスに関する研究」、繊維素材にタッチインタラクションを付与するための「布製タッチインタフェースに関する研究」、円筒形のような特殊な形状のタッチ面を持つ「非平面タッチインタフェースに関する研究」が挙げられる。

2.1 ウェアラブルデバイスに関する研究

本研究のように腕に取り付けるウェアラブルデバイスについての研究を以下に挙げる。Multi-Touch Skin [1] は肌に貼り付けて使用するマルチタッチインタフェースを設計し印刷することができる。EIT-Kit [2] は電気インピーダンストモグラフィ (EIT) を用いたアプリケーションの開発を支援するツールキットである。体の表面に電極を取り付けることで、電流や電圧を測定することで身体のジェスチャなどを取得することができる。

本研究と同じように布製タッチインタフェースを前腕部に装着する研究もされている。Smart-Sleeve [3] はアームカバー型のタッチインタフェースで、触れた位置をセンシングしたり、捻る等のジェスチャを認識することができる。また、前腕部に装着するタッチインタフェースの活用に関する研究として、GestureSleeve [4] は前腕部に装着したタッチインタフェースによってスマートウォッチの入力面を拡大し、運動中など精密な操作が難しい状況での操作を補助する。

2.2 布製タッチインタフェースに関する研究

布製タッチインタフェースに関する研究は数多くなされてきた。その中でも布製タッチインタフェースの実装に関する研究として、FlexTiles [5] は抵抗膜方式と呼ばれる、導電繊維と非導電繊維を交互に縞模様になるように織られた布2枚で、圧力をかけることで抵抗値が変化するピエゾ抵抗布を挟んで作られた、タッチ位置を認識するセンサである。Project Jacquard [6] では高導電性の糸を開発し、それを格子状に布へ縫い付けることによりタッチ位置を認識するセンサを実装した。また PolySense [7] は布を専用の塗料で染めることにより任意の布に導電性を付与する研究で、衣類やぬいぐるみなどの目的に合わせた布をセンサとして使用することができる。

布製タッチインタフェースを使用したウェアラブルデバイスの研究も多くなされている。先述した抵抗膜方式のセンサ [5] を利用して、靴下型の圧力センサ proCover [8] が制作され、これを義足に装着することで触覚フィードバックを実装した。また、導電布を用いた VR 向け帽子型タッチインタフェース [9] で VR 空間での視点やオブジェクトの回転操作を行う研究もされている。

2.3 非平面タッチインタフェースに関する研究

本研究のように平面ではないタッチインタフェースに関する研究も多くなされている。in-FORM [10] は机の中に用意された直方体が迫り上がるような形状出力インタフェースで、物理的な形状がリアルタイムで変化するタッチインタフェースを実装した。Electrick [11] は導電塗料を塗られた面において電界トモグラフィーを用いてタッチ入力を認識する。この認識手法によって、曲面や凹凸がある面でのタッチインタフェースの実装を簡単に行うことができる。

本研究のような円筒形のタッチインタフェースに関する研究として、円筒型マルチタッチインタフェースを用いた 3D ポインティング手法 [12] が提案された。この研究では円筒型の立体ディスプレイ内に 3D コンテンツを投影しそれを周囲からタッチしポインティングするアプリケーションを設計した。

2.4 本研究の位置付け

先行研究において、本研究と同じく布製タッチインタフェースを前腕部に装着する研究が行われていたが、どちらもタッチ位置の取得手法は抵抗膜方式である。この方式は導電布 2 枚とピエゾ抵抗布からなる 3 層の構造で、装着する際の着心地があまり良くなく、また多くの電極を必要とするなど実装に手間がかかる。本研究で使用するタッチインタフェースは、導電布に印加した電圧を指の電極で計測する手法を使用しているため、1 枚の導電布で成り立つ。また、装着する際に円筒形のタッチ面を持つことに着目したアプリケーションを設計する。

第3章 平面での導電布製タッチセンサの試作

円筒形タッチインタフェースは、2次元でタッチ位置の座標を測る布製のタッチインタフェースを腕に巻き付けるようにして制作する。円筒形に加工する前に、導電布を使用した正しく2次元座標を計測できることを確認するために平面のタッチセンサを試作する。

3.1 平面で1次元座標を取得する導電布製タッチセンサ

本論文では軽量かつ加工が容易な導電布を用いてタッチインタフェースを制作する。タッチ位置の取得は先行研究 [9] の導電布を用いた帽子型タッチインタフェースで使用されている方式と同様に、導電布に電圧を印加してタッチ位置の電圧を計測することで位置を特定する手法を用いる。

まず布の縦軸1次元座標を特定するセンサを制作して、1次元座標が正しく取得できるか実験した。タッチセンサには導電布として TRUSCO 製の静電気除去シートを1枚を使用する。導電布の大きさは各辺約 24cm の正方形で、表面抵抗は $3 \times 10^4 \Omega/\text{sq}$ である。また電圧源やオシロスコープには Digilent 社の Analog Discovery 2 を使用する。図 3.1 に示したように導電布の上下辺中央にクリップを付け、布の上端を 5V、下端を GND と接続し布に電圧を印加する。オシロスコープと接続したクリップで布にタッチし、タッチ位置の GND に対する電圧 V_{in} を記録する。予め計測しておいた、上端の電圧 V_{max} と下端の電圧 V_{min} から布上の縦の1次元座標 $X(0 \leq X \leq 1)$ を計算する。

$$X = \frac{V_{in} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (3.1)$$

クリップ間を繋ぐ線上では上下の位置と比例して電圧が計測されるため上の式で位置を取得できるが、布の四隅に近い部分になると電圧が低くなり正しい位置計測が難しくなってしまう。図 3.2 のように布の上下端に銅箔テープを付けることで布の上下辺の電圧を一定にすることでこの問題を解決した。

3.2 平面で2次元座標を取得する導電布製タッチセンサ

前節で作ったセンサをもとに、円筒形タッチインタフェースに使用するための2次元座標を取得するセンサを制作し、2次元座標が正しく取得できるか実験した。図 3.3 のように導電布の4辺の中央にクリップを付け、縦軸を取る際は布の上端を 5V、下端を GND と接続、横

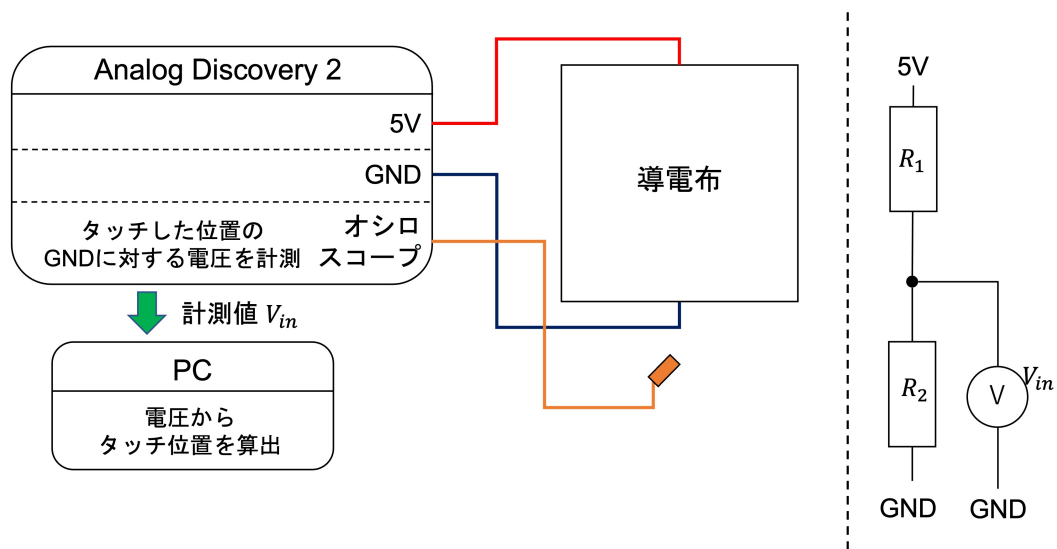


図 3.1: 平面で 1 次元座標を取得する導電布製タッチセンサのシステム構成と等価回路図

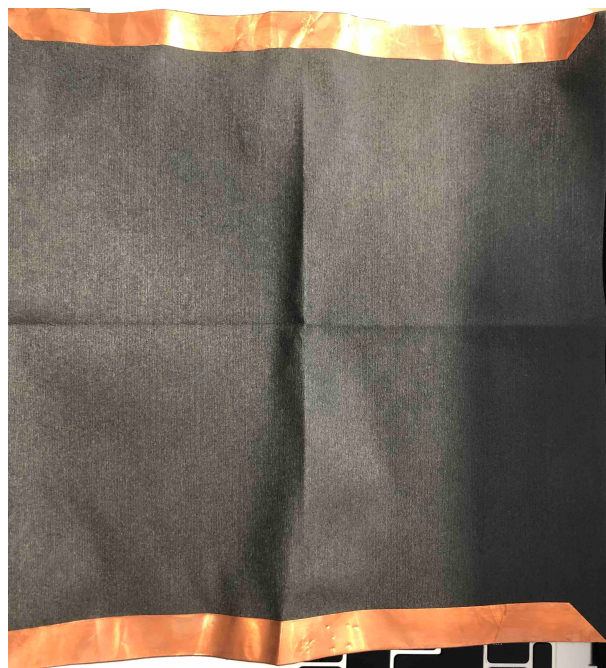


図 3.2: 導電布の上下辺に銅箔テープを付けたもの

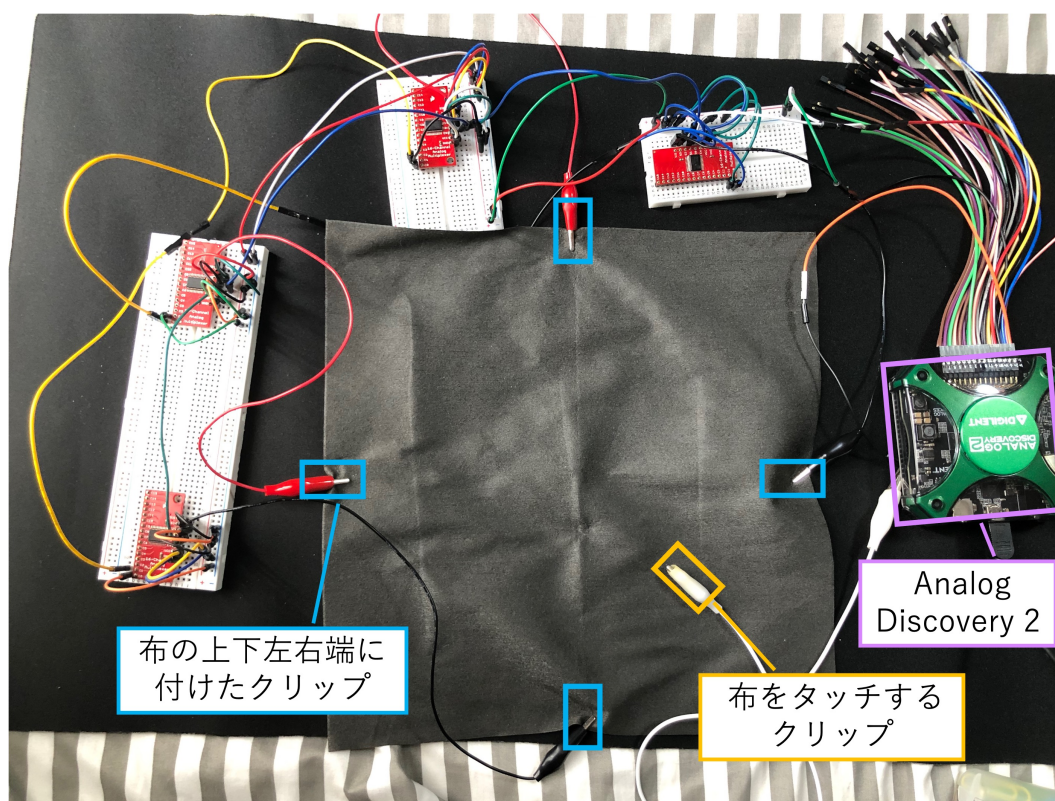


図 3.3: 平面で 2 次元座標を取得する導電布製タッチセンサ

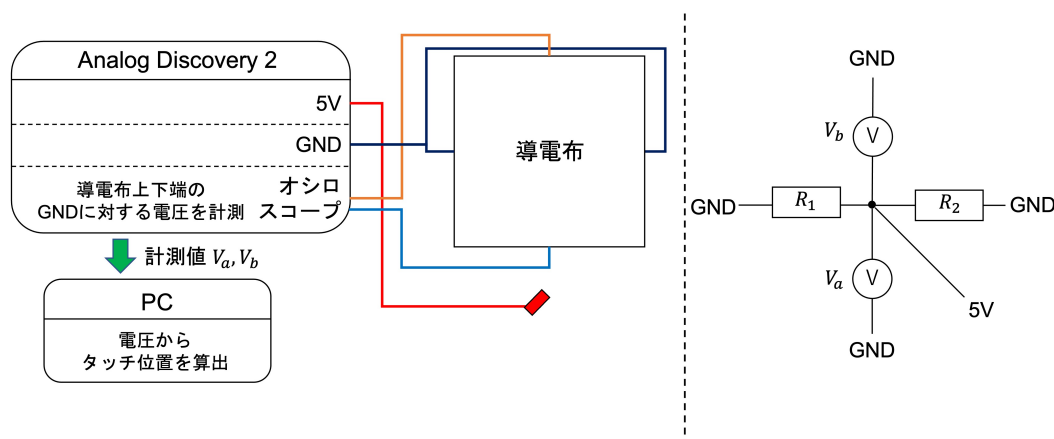


図 3.4: 平面で 2 次元座標を取得する導電布製タッチセンサのシステム構成と等価回路図

軸を取る際は布の左端を 5V、右端を GND と接続してタッチ位置の電圧を計測し、式 3.1 を使用してそれぞれの 1 次元座標を計算する．縦軸と横軸について別々に座標を計算し、これらを合わせることで 2 次元座標を取得する．

しかし先述した通り、布の四隅に近づくほど電圧から位置取得することが難しくなってしまう問題がある．また 1 次元座標の時と同じように 4 辺に銅箔テープを付けるような対策をしたが、例えば縦軸について計測しているときに左右に付けた銅箔テープにより辺上の電圧が一定になるといったように、うまく座標を計算することができなかった．

そこで先行研究 [13] を参考にタッチ位置を取得する方式を実装した．この方式では今までとは逆に指から電圧を印加して、導電布につけたクリップ 2 箇所から GND に対する電圧を計測し、それを利用してタッチ位置を取得する．この方式でも縦軸と横軸について別々に座標を計算する．縦軸を取る際には、図 3.4(b) に示したように布の上下端のクリップはそれぞれオシロスコープに、左右のクリップは GND に接続する．この時導電布上下端と繋げたオシロスコープで計測した GND に対する電圧 V_a, V_b から以下の式で 1 次元座標 $X (0 \leq X \leq 1)$ を計算する．

$$X = \frac{V_a}{V_a + V_b} \quad (3.2)$$

同様にして横軸の 1 次元座標 Y も計算する．

しかしこの方式でも同様に正方形の布では四隅に近づくほど電圧が低くなってしまうため位置取得が難しい．また、側面に電極を取り付けると実際に腕に巻き付ける際に邪魔になってしまうため、制作するインタフェースの電極は底面近くの部分に取り付けるようにしたい．そこで円筒形タッチインタフェースでは、3.1 節で実装した方法を応用して、複数の導電布を細長く切り分けてその導電布帯上における一次元座標を電圧から計算する方式を採用した．

第4章 円筒形タッチインタフェースの実装

3.1 節で試作した 1 次元の導電布性タッチセンサを応用して、アームカバー形状の装着型タッチインタフェース (図 4.1) を制作した。

4.1 円筒形タッチインタフェースの構造

円筒形タッチインタフェースの本体は非導電性の布で作られる台布の上に導電布製の帯を貼り付けるように制作する。台布にはポリエステル 80 %，綿 20 % の布を使用する。著者の腕の大きさに合わせて、台布の布は上底約 18 cm，下底約 27 cm，高さ約 20 cm の台形になるように切り出した。その台布上に導電性の TRUSCO 製の静電気除去テープを帯状に 8 枚切り出し、図 4.1 のように貼り付けた。導電布帯は図 4.2 に示すように、それぞれ上底約 2 cm，下底約 3 cm，高さ約 20 cm で台布を分割するような形の台形である。腕に装着するために、斜辺にはそれぞれマジックテープを取り付けた。また本体の他に、タッチ位置の電圧を計測するための電極として、導電布を使用して指に装着して使う指サックを製作した。

各帯の上下端や指サックには直径 9.6 mm のニッケル鍍金ジャンパーホック式ボタンのオス側を取り付けている。ボタンのメス側はワイヤをはんだ付けしており、ボタンを付けることで導電布と電圧源やオシロスコープと接続する。3 章と同じく、電圧源やオシロスコープには Digilent 社の Analog Discovery 2 を使用した。各帯の上端にあるボタンは各帯に個別に電圧を流せるように Analog Discovery 2 のデジタル出力端子に接続する。各帯の下端にあるボタンは一括で GND 端子に接続し、また指サックはオシロスコープ端子に接続する。

4.2 位置取得の仕組み

タッチ位置の取得は各導電布の帯ごとに行う。導電布帯のうち 1 つの上端を 3.3 V と接続して電圧を印加する。各帯の下端は常に GND と接続されている。その後、指サックに接続したオシロスコープから電圧を計測する。図 4.4 のように、電圧がかかっている帯にタッチしている場合、触った位置に応じた電圧が計測され、それ以外の帯にタッチしている場合は約 0 V と計測される。これを 8 本の帯それぞれに対して 1 本ずつ電圧を印加して計測を行い、8 つの帯のうち 1 番高い値 V_{in} を記録した帯をタッチしているものとみなし、この値からタッチ位置の座標を計算する。予め計測しておいた、その帯に電圧を印加している時の上端の電圧

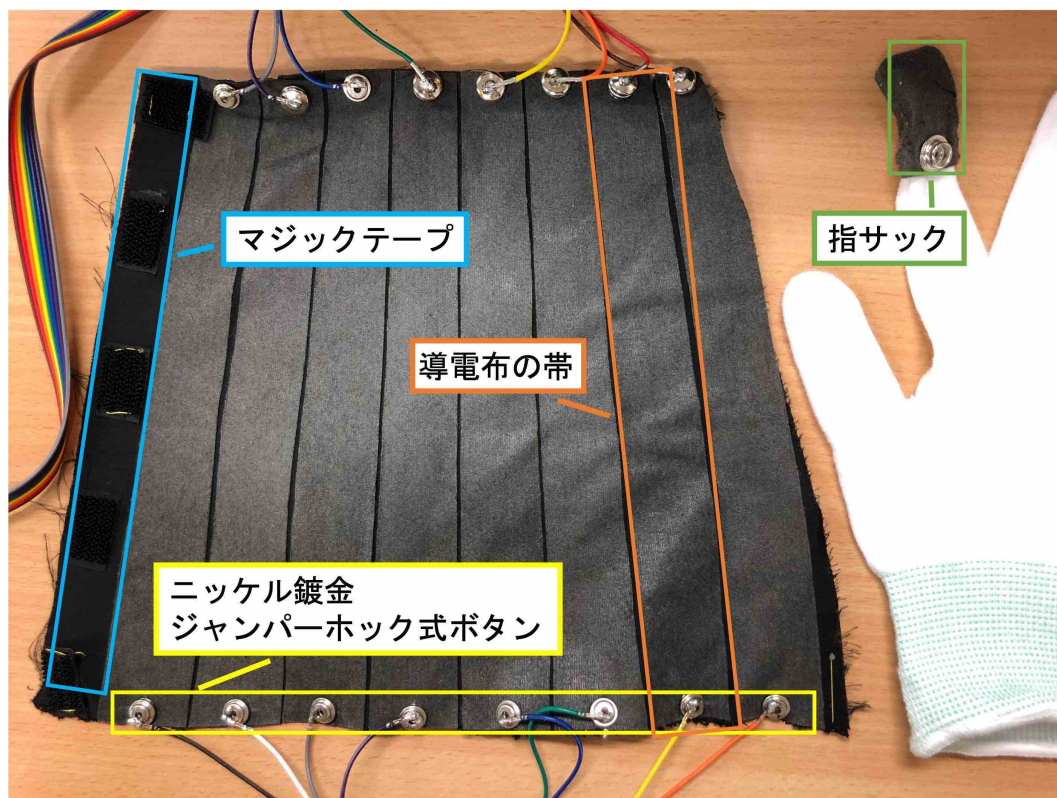


図 4.1: 円筒形タッチインタフェース

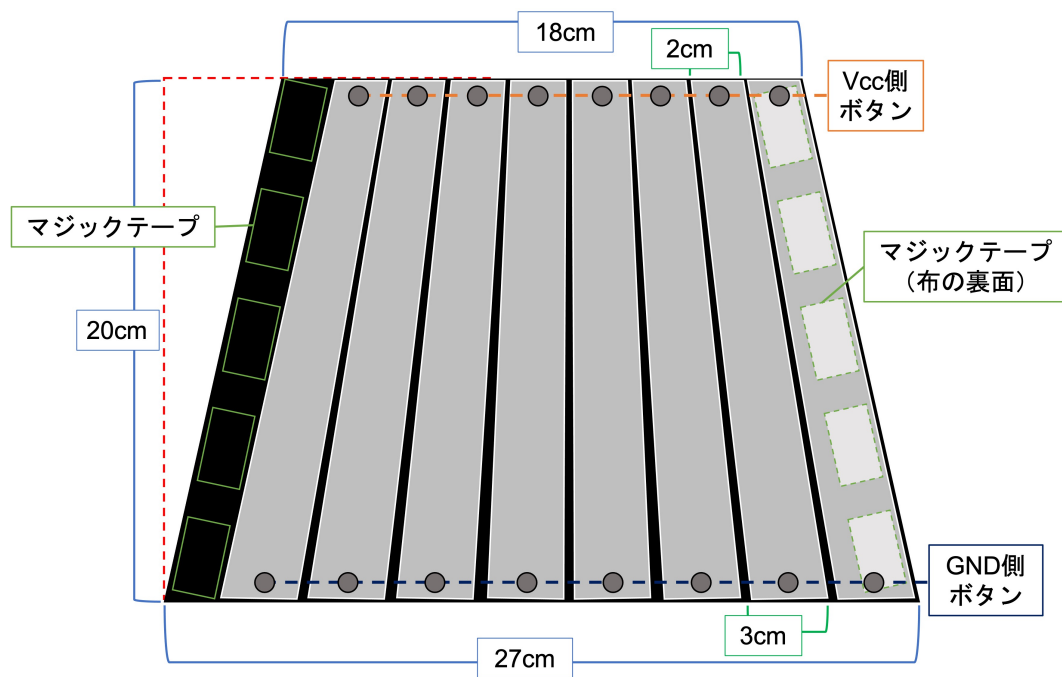


図 4.2: 円筒形タッチインタフェースの構造

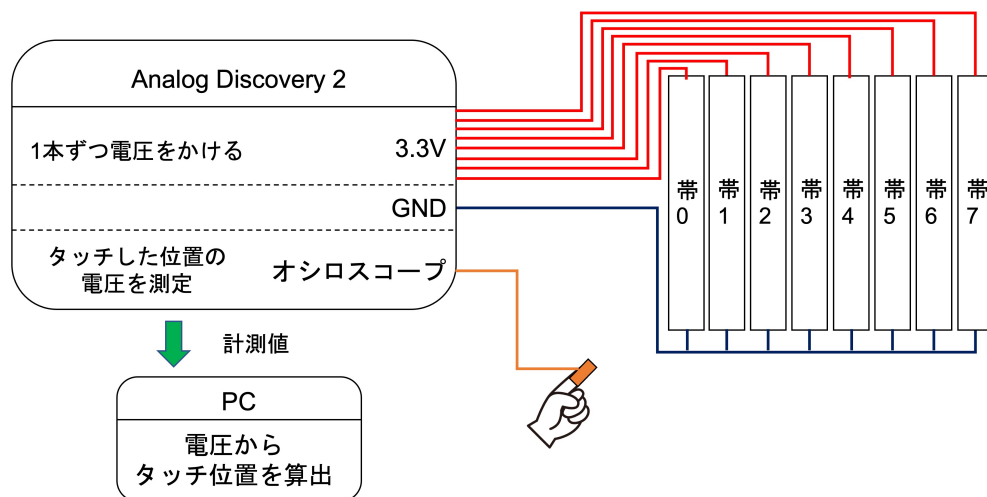


図 4.3: システム構成

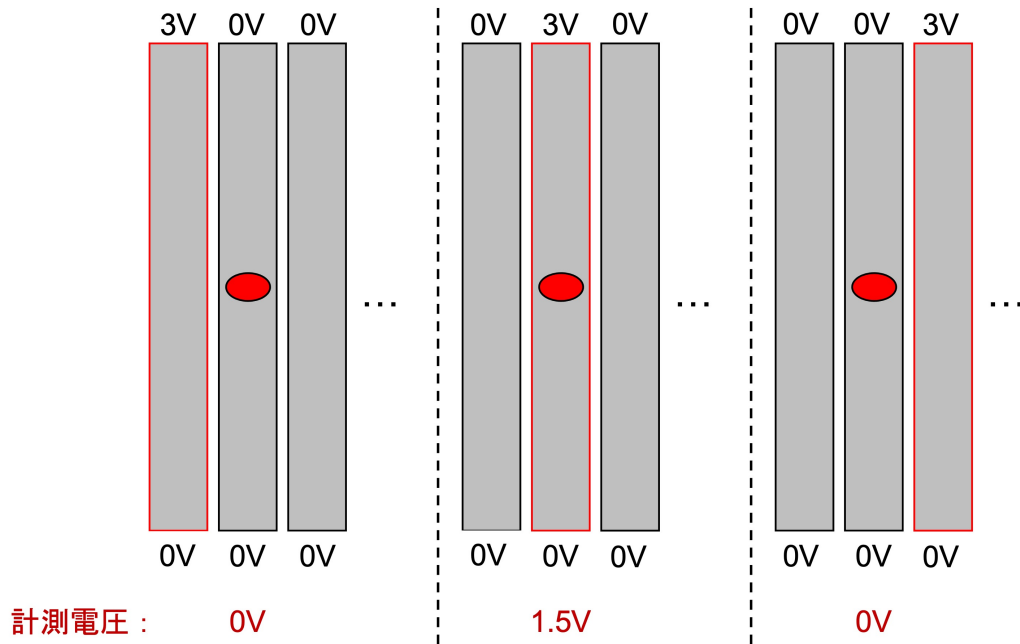


図 4.4: 各導電布帯に電圧を印加して計測を行う流れ

V_{max} と下端の電圧 V_{min} からタッチ位置の帯上の一次元座標 $X(0 \leq X \leq 1)$ を計算する.

$$X = \frac{V_{in} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (4.1)$$

またタッチした帯がどれかによって、タッチ位置が腕を軸としてどの角度であるかを特定する.

ここまでの手法では 1 枚の導電布帯をタッチしている時の場合のみを考えている. 例えば図 4.5(a) のように 2 枚の導電布帯のちょうど中間点をタッチした場合, 4.6(a) のように電圧を印加した帯のタッチ位置の電圧と電圧を印加していない帯の電圧 0V の中間値, つまり本来の電圧値の約半分の電圧が計測される. さらにどちらかの導電布に偏るようにタッチしている場合はこの限りではなく, この状態で電圧から触れた位置を計算することは難しい.

そこでこの問題を解消し, かつ 2 枚の導電布帯を跨ってタッチしていることを認識できるように電圧の計測アルゴリズムを改良した. 今までには導電布帯 1 枚ずつに電圧を印加して計測を行っていたが, 図 4.7 のように, 2 枚の導電布帯に同時に電圧を印加するようにした. 電圧計測は隣り合う 2 枚の導電布帯に印加する時の 7 回と, 加えて左右端の帯 2 枚に印加する時の 1 回の, 合計 8 回行う. この時, 導電布帯 1 枚のみにタッチしている場合は 8 回の電圧計測のうち続けて 2 回タッチ位置を示す電圧が計測され, この 2 回で電圧を印加し続けている帯をタッチしていると推定する. 計測した電圧の大きい方を V_{in} として式 4.1 で座標 X を計算する. また, 2 枚の導電布帯を跨るようにタッチしている場合は, 図 4.8 のように 8 回の電圧計測のうち 1 回タッチ位置を示す電圧が, その前後でその約半分の電圧が計測される. この時 1 番高い電圧を記録した時に電圧を印加していた 2 枚の帯をタッチしているとして座標

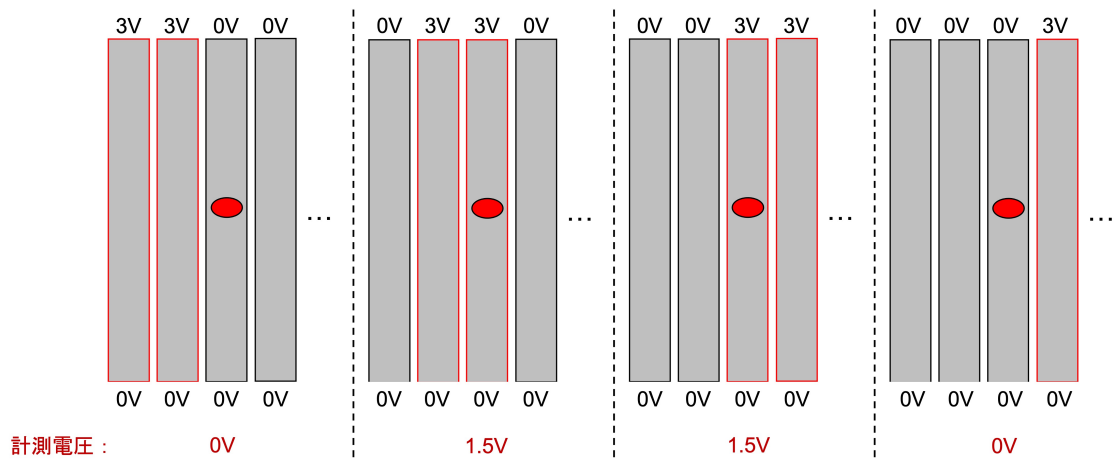


図 4.7: 隣り合う 2 枚の導電布帯にそれぞれ電圧を印加して計測を行う流れ

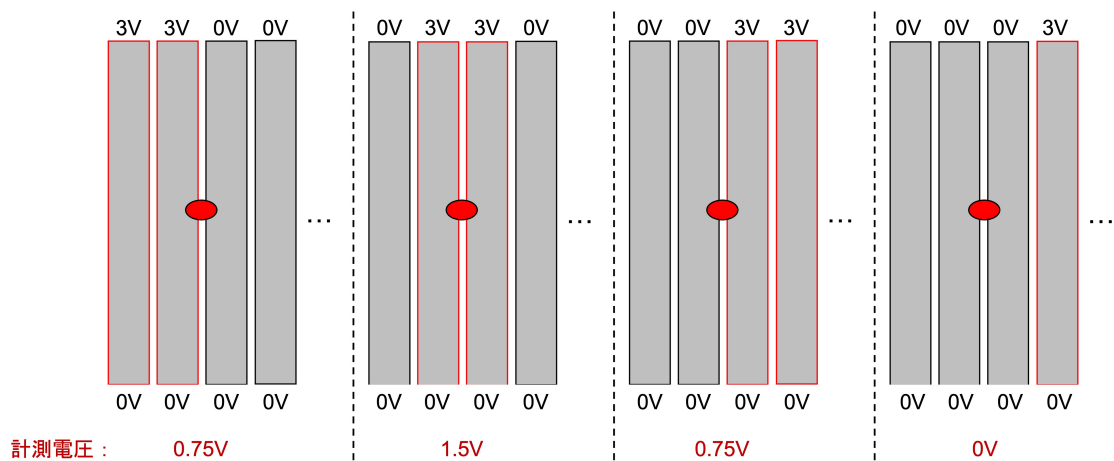


図 4.8: 2 枚の導電布帯を跨るようにタッチしている時に隣り合う 2 枚の導電布帯にそれぞれ電圧を印加して計測を行う流れ

を計算する．計測した電圧を V_{in} として， V_{max}, V_{min} は対象の 2 枚の導電布帯の平均値を使用して式 4.1 で座標 X を計算する．

第5章 実験

制作した前腕部に装着して使用するタッチインタフェースのタッチ位置の識別性能を測るための実験を行った。

5.1 円筒形タッチインタフェースの使用法

装着型タッチインタフェースを使用する時には、図 5.1 のように腕に巻き付け、指サックで触る。円筒形タッチインタフェース本体は腕に巻き付けた後、マジックテープで固定する。その後ボタンを付けて電圧源やオシロスコープと接続する。指サックは直接肌に触れないように手袋の上から装着する。

次にタッチインタフェースのキャリブレーションを行う。各導電布帯と電極となる金属ボタンの間の抵抗値はそれぞれ少し異なるため、それを補正するためである。専用のアプリケーションを使用して各導電布帯に電圧を印加した状態でそれらの上下端の電圧 V_{max}, V_{min} を指サックにより計測する。計測結果は csv ファイルに保存され、アプリケーション起動時に読み込まれる。指サックで本体に触ることでタッチ位置を検出しそれを利用して各アプリケーションの機能を使用する。

5.2 実験内容

本実験では、机の上に平面で広げたタッチインタフェースの本体を指サックをつけた指でタッチし、計測された電圧から推定されたタッチ位置が実際の値とどれくらい差が生まれるかを確かめる。

著者 1 名（男性、22 歳）が実験を行った。実験手順は以下の通りである。

1. キャリブレーションを行う。本実験時は各帯について 3 回ずつキャリブレーションを行い、各帯の電圧の平均値を上下端の電圧 V_{max}, V_{min} として計算に使用した。
2. 予め決めたタッチ点をタッチして電圧を計測し、タッチ位置の帯と座標 X を推定する。これを 5 回繰り返す。
3. 各タッチでの電圧の計測結果、タッチした帯の推定、タッチ位置の座標 X の計算結果をまとめて csv ファイルに出力し分析を行う。

タッチ点は以下の通りである。

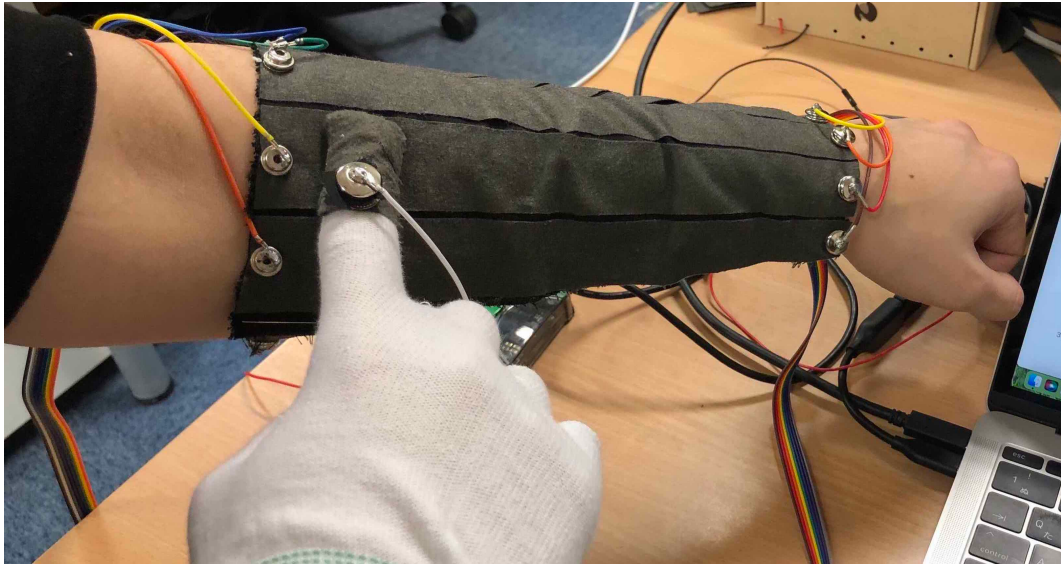


図 5.1: 前腕部に装着し操作する様子

座標 X 軸方向 導電布の下端から 4 cm, 8 cm, 12 cm, 16 cm の地点 4 箇所

導電布帯方向 各導電布帯の上 8 箇所および 2 枚の帯を跨るようにタッチする中間点 7 箇所

座標 X 軸方向 4 箇所と導電布帯方向 15 箇所を合わせて全部で $4 \times 15 = 60$ 箇所である．実験中タッチ点は図 5.2 のようにマスキングテープを使用して示し，テープ間にタッチ点が配置されるように貼った．

5.3 実験結果

各タッチ点で計測された電圧から取得されたタッチ位置の帯の番号と座標 X を図 5.3 に示す．縦軸が取得された座標 X ，横軸が取得された帯の番号を示す．各帯を端から 0 から 7 の数字で表し，また 2 枚の帯の間を各帯の中間値で表す．

結果のうち，下端から 4 cm のタッチ点において極端に計算結果が高く外れたものが 2 箇所分あった．電圧の計測結果から導電布やワイヤが電圧源と接触してしてしまったものであると予想し，これらは外れ値として分析には含めない．

式 4.1 によって計算される座標 X の範囲は $0 \leq X \leq 1$ となり，導電布の長さが 20 cm であることから，導電布の下端から 4 cm, 8 cm, 12 cm, 16 cm の地点の座標 X はそれぞれ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 となる．全ての帯での座標 X の平均値は 4 cm, 8 cm, 12 cm, 16 cm のそれぞれの地点において，0.14, 0.35, 0.57, 0.83 で，標準偏差は 0.020, 0.015, 0.020, 0.028 である．また全ての施行において，タッチしている帯の識別は正しく行われた．

座標 X 0.01 の差は 2 mm の差となるため，平均値から考えると各点で 1 cm 程度の誤差が生じている．また電圧が低いタッチ位置では本来の値よりも小さく計算され，電圧が高いタッ

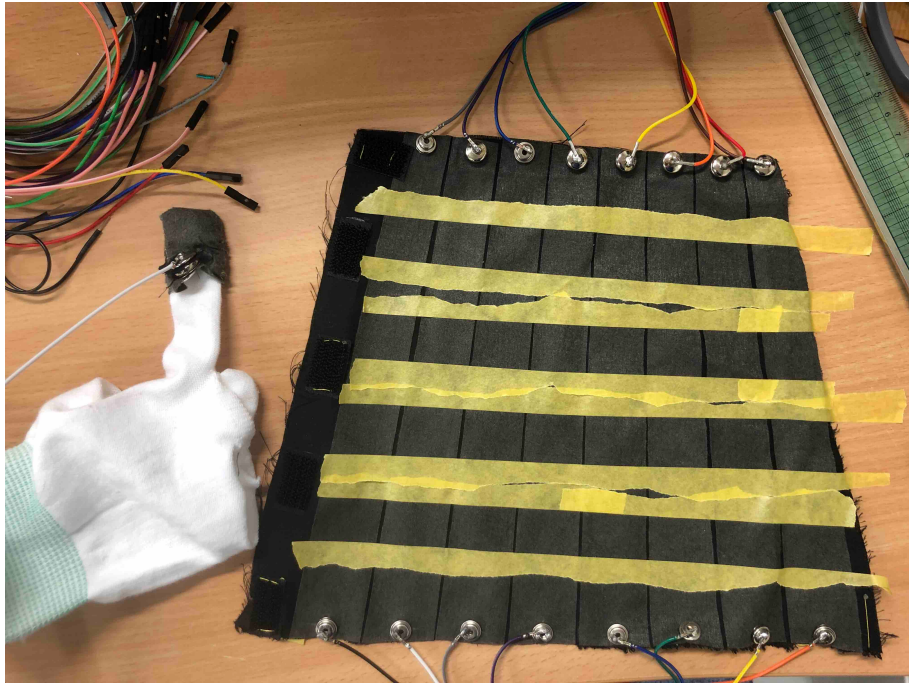


図 5.2: 実験用にタッチ点を示すマスキングテープを貼ったもの

チ位置になるほど誤差は減るが 16 cm 地点では逆に本来の値よりも大きく計算された。計測電圧のブレは大きいがこれは実験中同じタッチ位置でも少しズレた地点を触れている可能性があることや指サックでタッチする面積が広いことなども原因となっていると考えられるため、これらの問題を改善した実験を今後行いたい。

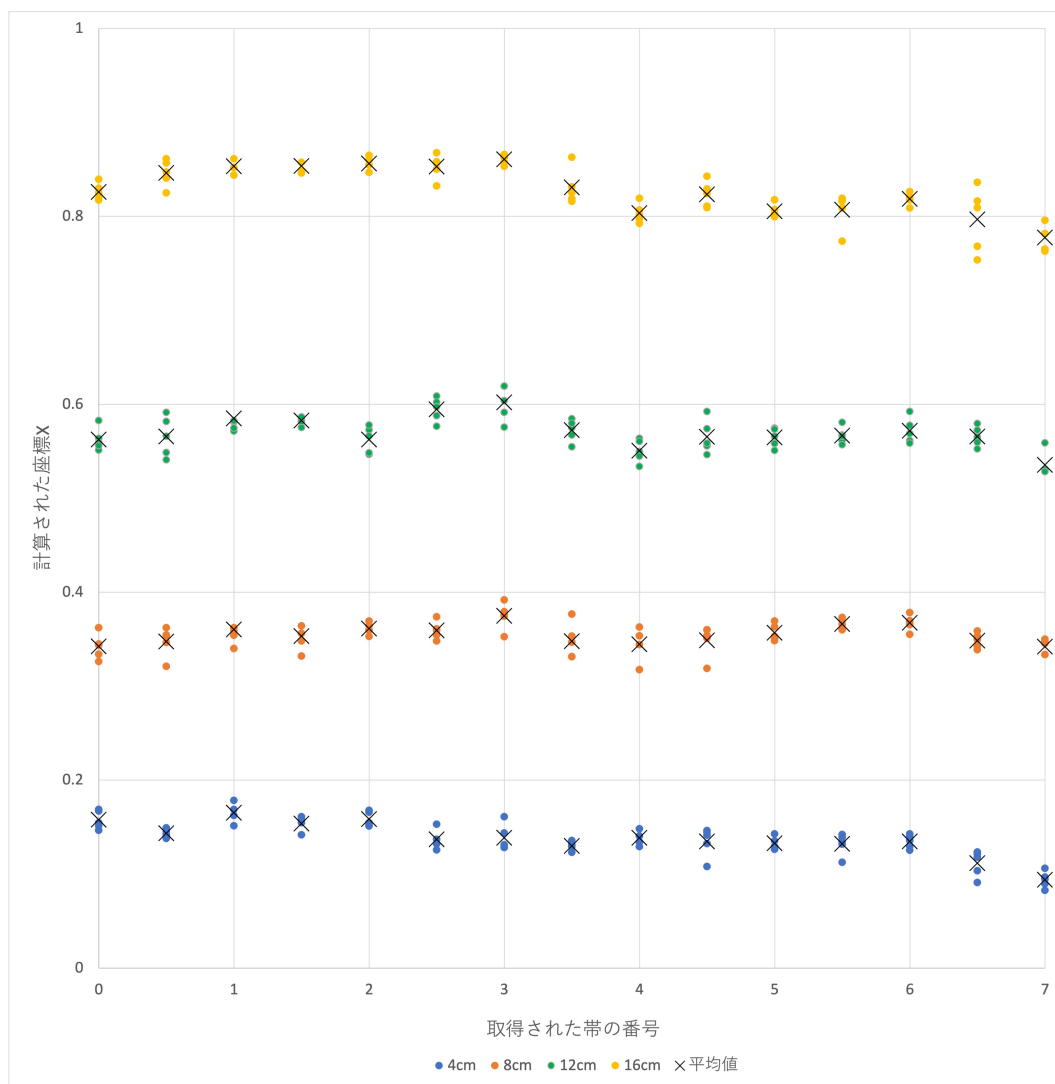


図 5.3: 各試行で取得されたタッチ位置の帯の数字と座標 X 及び座標 X の平均値

第6章 結論

本研究では導電布を使用した円筒形のタッチ面を持つタッチインタフェースを制作し、その精度を実験によって検証した。タッチセンサの試作を行い、導電布を使用したタッチセンサでのタッチ位置取得手法について調査した。試作したタッチセンサを元に、前腕部に装着するタッチインタフェースを制作した。制作したタッチインタフェースは台布の上に8枚の導電布の帯を貼り付けられており、指先につけた電極からGNDに対する電圧を計測しタッチ位置の座標を取得する。これを用いて実験を行いタッチ位置の識別精度を調査した。タッチしている帯の識別は上手くいったが、座標の取得には1 cm程度の誤差があるという結果になった。また導電布帯を並べる構造により、導電布帯を跨ぐようになぞる時に指が引っかかり操作がしづらいといった問題もあり、これらを改善するために手法の改良が必要である。

今後は腕に装着した際に円筒形のタッチ面を形成することを活かして操作するアプリケーションを制作する。またそのアプリケーションのを用いて複数人を対象としたユーザビリティ調査実験を行い、その性能を検証する。

謝辞

本研究を進めるにあたって、高橋伸先生、志築文太郎先生、川口一画先生には多大なご意見とご指導を頂きました。心から感謝申し上げます。特に高橋伸先生には、研究の進め方、および論文執筆の仕方をはじめとして、研究に関することを一からご指導いただきました。さらに、研究の相談や研究生活において、多くの助言および指南をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。インタラクティブプログラミング研究室の同輩、先輩方には研究生生活において大変お世話になりました。UBIQUITOUS チームの皆様には、チームゼミにおけるご意見や、論文の添削だけではなく、研究室において多くの助言を頂きました。深く感謝いたします。最後に、学生生活においてお世話になった皆様、そして金銭的および精神的に私の学生生活を支えてくださった家族に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Aditya Shekhar Nittala, Anusha Withana, Narjes Pourjafarian, and Jürgen Steimle. Multi-touch skin: A thin and flexible multi-touch sensor for on-skin input. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [2] Junyi Zhu, Jackson C Snowden, Joshua Verdejo, Emily Chen, Paul Zhang, Hamid Ghaednia, Joseph H Schwab, and Stefanie Mueller. Eit-kit: An electrical impedance tomography toolkit for health and motion sensing. In The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '21, pp. 400–413, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [3] 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. Association for Computing Machinery.
- [4] Stefan Schneegass and Alexandra Voit. GestureSleeve: Using Touch Sensitive Fabrics for Gestural Input on the Forearm for Controlling Smartwatches. In Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC '16, pp. 108–115, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [5] Patrick Parzer, Kathrin Probst, Teo Babic, Christian Rendl, Anita Vogl, Alex Olwal, and Michael Haller. Flextiles: A flexible, stretchable, formable, pressure-sensitive, tactile input sensor. In Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '16, pp. 3754–3757, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [6] 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. Association for Computing Machinery.
- [7] Cedric Honnet, Hannah Perner-Wilson, Marc Teyssier, Bruno Fruchard, Jürgen Steimle, Ana C. Baptista, and Paul Strohmeier. PolySense: Augmenting Textiles with Electrical Func-

- tionality Using In-Situ Polymerization. In Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '20, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [8] 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. Association for Computing Machinery.
- [9] 坂田和輝. 導電布を用いた VR 向け帽子型タッチインタフェース. 筑波大学情報学群情報科学類 卒業研究論文, 2020.
- [10] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. Inform: Dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '13, pp. 417–426, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [11] 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. Association for Computing Machinery.
- [12] 内藤真樹. 円筒型マルチタッチインタフェースを用いた 3D ポインティング手法. 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2009.
- [13] Kazuki Sakata, Buntarou Shizuki, Ikkaku Kawaguchi, and Shin Takahashi. A hat-shaped pressure-sensitive multi-touch interface for virtual reality. In Proceedings of the 27th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.