

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

電気インピーダンス法を用いた
布型タッチインタフェース

関森 広大

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 高橋 伸

2020年3月

概要

導電性を持った繊維素材の登場をきっかけに、繊維素材を用いたセンシングおよびインタフェースの研究が行われてきている。本論文では、電気インピーダンス法（EIM）と呼ばれる技術を用いた布型タッチインタフェースを提案する。EIMは、対象物体周囲に複数個の電極を取り付け、微弱な電流を印加することにより物体の内部構造を推定する技術である。本研究では、導電布周囲に複数個の電極を取り付け、EIMによるセンシングを行い得られた電圧データを機械学習にかけることにより、タッチ位置の認識を可能とする。本手法を用いることにより、繊維素材を用いたタッチインタフェースを容易に実装可能である。本論文では、提案手法を実現するために、異なる導電布、印加する交流信号の周波数、電極の取り付け位置ごとにタッチによる電圧変化を測定し、導電布におけるEIMを用いたセンシングが可能であるかどうかを調査した。この調査に基づき、提案手法のプロトタイプとなるハードウェアおよびPC上のソフトウェアを実装した。さらにこのプロトタイプを用いて、指一本でのタッチ位置および導電布上に置いた手形状の認識精度を評価する実験を行った。実験の結果から、9点のタッチ位置を90.9%、3種類の手形状を98.1%の精度で認識可能であることを示した。

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本研究の目的とアプローチ	3
1.3	本論文の構成	3
第2章	関連研究	4
2.1	スマートテキスタイルに関する研究	4
2.1.1	導電糸を用いた研究	4
2.1.2	導電布を用いた研究	5
2.2	EIMに関する研究	5
2.2.1	電気インピーダンストモグラフィ	5
2.2.2	HCI分野におけるEIMを用いたセンシングに関する研究	6
2.3	本研究の位置付け	6
第3章	EIM	7
3.1	EIMとは	7
3.2	EIMを用いたセンシング手法	7
3.2.1	4-terminal EIM	8
3.2.2	2-terminal EIM	8
3.3	本手法におけるセンシング	8
第4章	EIMを用いた布型タッチインタフェース	11
4.1	概要	11
4.2	利用例	14
4.2.1	利用例1: 布型キーボードおよびタッチパッド	14
4.2.2	利用例2: ニット帽に取り付けた音楽再生インタフェース	15
第5章	予備実験	16
5.1	予備実験1: センシングに適した導電布および印加する電流周波数の調査	16
5.1.1	実験機器	16
5.1.2	実験内容	17
5.1.3	実験結果	20
5.2	予備実験2: 一辺に取り付ける電極の最適な間隔の調査	25

5.2.1	実験機器	25
5.2.2	実験内容	25
5.2.3	実験結果	25
5.3	予備実験 3: タッチ点ごとの様々な電極間における電圧変化の調査	27
5.3.1	実験機器	27
5.3.2	実験内容	27
5.3.3	実験結果	27
第 6 章	プロトタイプ実装	33
6.1	概要	33
6.2	プロトタイプに用いる導電布	33
6.3	EIM センシングハードウェア	33
6.3.1	ハードウェア構成	33
6.3.2	センシングの流れ	35
6.4	タッチ認識ソフトウェア	36
第 7 章	評価実験	38
7.1	実験 1: 布を平面に置いた状態にてタッチした場合のタッチ位置の認識精度を評価する実験	38
7.1.1	実験機器	38
7.1.2	実験内容	38
7.1.3	実験結果	39
7.2	実験 2: 布上に置いた手形状の認識精度を評価する実験	41
7.2.1	実験機器	41
7.2.2	実験内容	41
7.2.3	実験結果	41
第 8 章	今後の課題	45
8.1	導電布の素材や形状, 取り付ける電極の数および位置の詳細な調査	45
8.2	環境ノイズによる影響の調査および対策	45
8.3	ハードウェアの小型化および無線化	46
8.4	多様なタッチセンシングの実現	46
第 9 章	結論	47
	謝辞	48
	参考文献	49
付録 A	ハードウェアの回路図	53

目次

1.1	導電糸の例	2
1.2	導電布の例	2
3.1	4端子 EIM によるセンシングのイメージ	9
3.2	2端子 EIM によるセンシングのイメージ	10
4.1	提案するシステムのイメージ図	12
4.2	布型タッチインタフェースを衣服の袖部分に取り付けた例	13
4.3	布型タッチインタフェースを衣服の大腿部分に取り付けた例	13
4.4	布型タッチインタフェースの利用例 1: 布型キーボード	14
4.5	布型タッチインタフェースの利用例 2: ニット帽に取り付けた音楽再生インタフェース	15
5.1	伸縮導電布 EeonTex Conductive Stretchable Fabric	17
5.2	感圧導電布 EeonTex Pressure Sensing Fabric	17
5.3	ナイロン導電布 Conductive Fabric - 12"x13" Ripstop	18
5.4	予備実験に使用した Analog Discovery 2 および BNC コネクタ拡張ボード	18
5.5	予備実験システムのブロック図	19
5.6	導電布に 5cm 間隔で電極を取り付けた様子	20
5.7	電極間の中心位置部分の導電布をタッチする様子	21
5.8	伸縮導電布における周波数ごとの電圧のグラフ	22
5.9	感圧導電布における周波数ごとの電圧のグラフ	23
5.10	ナイロン導電布における周波数ごとの電圧のグラフ	24
5.11	予備実験 2 の結果のグラフ	24
5.12	計測電極で計測された電極間の長さごとの電圧のグラフ	26
5.13	予備実験 3 における電極の取り付け位置および導電布上のタッチ点を示した図	28
5.14	計測電極 1 から 6 における各点をタッチしたときの電圧変化	30
5.15	計測電極 7 から 12 における各点をタッチしたときの電圧変化	31
5.16	計測電極 13 から 18 における各点をタッチしたときの電圧変化	32
6.1	EIM センシングハードウェアのブロック図	34
6.2	EIM センシングハードウェアのブレッドボード実装	34
6.3	非反転増幅回路	35

6.4	RC 積分回路によるローパスフィルタ	35
7.1	実験 1 における電極の取り付け位置, 導電布上のタッチ点を示した図	39
7.2	実験 1 の被験者ごとの混同行列	40
7.3	実験 2: 手をグーにしたとき	42
7.4	実験 2: 手をチョキにしたとき	42
7.5	実験 2: 手をパーにしたときの様子	42
7.6	実験 2 の被験者ごとの混同行列	44

表目次

5.1	伸縮導電布における周波数ごとの電圧変化	21
5.2	感圧導電布における周波数ごとの電圧変化	22
5.3	ナイロン導電布における周波数ごとの電圧変化	22
5.4	計測電極で計測された電極間の長さごとの電圧.	26

第1章 序論

本論文では、電気インピーダンス法（Electrical Impedance Method, 以下 EIM）と呼ばれる技術を用いた布型タッチインタフェースについて述べる。本章ではまず背景として繊維素材を用いたセンシング手法およびインタフェース研究の概要を示し、その問題点について述べる。次に本研究の目的として、その問題を解決するためのアプローチを示し、最後に本論文の構成を述べる。

1.1 背景

繊維素材は我々の生活にかかせないものとして遥か昔から活用されてきた。毎日着用する衣服を始め、カバンやソファ、寝具など日常生活のいたるところに繊維素材を使用した製品が存在する。

今日、導電糸（図 1.1）や導電布（図 1.2）と呼ばれるような導電性を持つ繊維素材が登場してきている。これらのような新しい機能を持った繊維素材の開発、およびそれらを使用したセンシングやインタフェースについて研究する分野をスマートテキスタイル、または e テキスタイルと呼び、ここ 20 年ほどで発展してきている [1]。例えば、ピエゾ素子 [2] や太陽光電池 [3] などを繊維素材上に実現することを可能としている。

スマートテキスタイル分野は繊維素材を扱うことから、ウェアラブルデバイスや環境に溶け込むセンサとしての応用が期待されている。スマートテキスタイルは、扱う素材が安価であることや、切る、織る、縫うなどの加工の自由度が高いといった利点がある。特に繊維素材上でタッチセンシングを行い、様々なデバイスへの入力インタフェースとするテキスタイルタッチインタフェース分野は盛んに研究されている。先行研究では、導電糸をメッシュ状に縫込んだり [4, 5]、導電性の布を複数枚重ねたり [6, 7, 8] することによって繊維素材におけるタッチセンシングを可能にしている。しかし、これらの手法は、多数の導電糸 1 本 1 本に電極を取り付けるなど、複雑な設計が必要であるため、容易に製造できるとは言い難い。

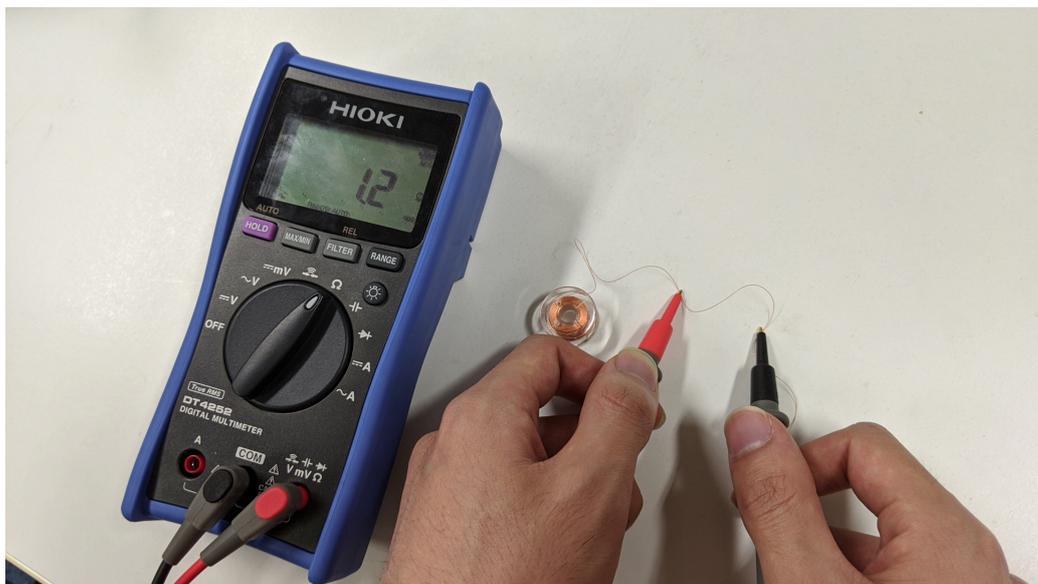


図 1.1 導電糸の例. テスターに表示されている抵抗値から, 導電性を持っていることがわかる

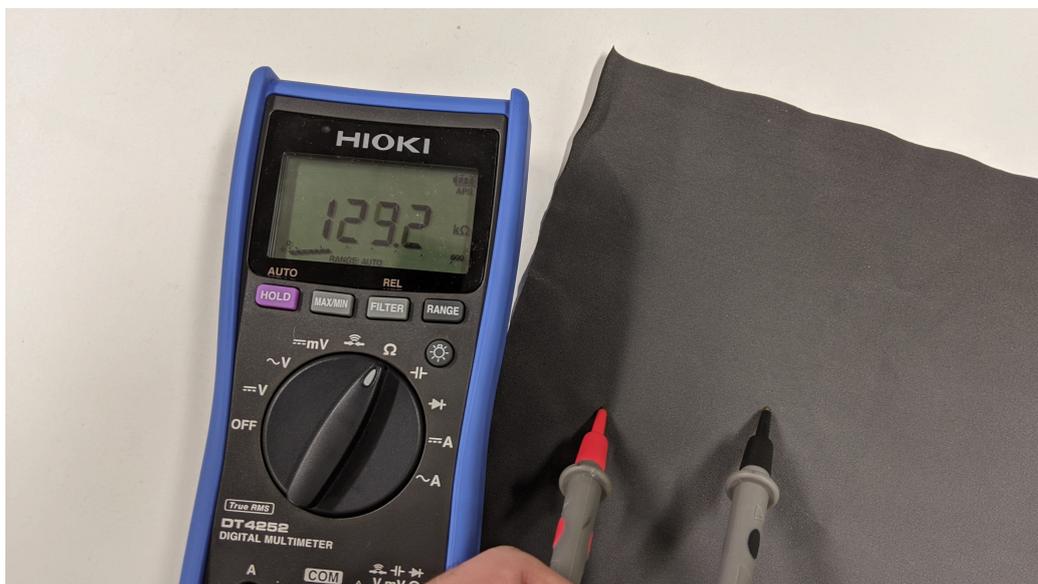


図 1.2 導電布の例. テスターに表示されている抵抗値から, 導電性を持っていることがわかる

1.2 本研究の目的とアプローチ

上記の問題を解決するため、本研究では繊維素材を用いたタッチインタフェースを容易に実装することを目的とする。そのためのアプローチとして、EIM および機械学習を利用する。

EIM は、対象物体周囲に複数個の電極を取り付け、微弱な電流を印加することにより、物体の内部構造を推定する技術である。EIM は医療分野において、人体表面に電極を取り付け、臓器や内臓脂肪の分布を可視化する電気インピーダンストモグラフィ (Electrical Impedance Tomography, 以下 EIT) と呼ばれる技術として使われることもある [9]。X 線 CT や MRI と比較すると、解像度は低いながらも小型であるため長時間の装着および装着状態での移動が可能であるという利点がある。近年、Human Computer Interaction (HCI) 分野では、タッチセンシングやジェスチャセンシングに EIM が用いられてきている [10, 11, 12, 13, 14, 15]。EIM を利用したタッチセンシングでは、対象物体にタッチした際に人体側に電流がシャントすることにより、計測する電圧が低下することを利用してタッチを認識可能としている。

本研究では EIM を導電布に適用することにより、導電布上へのユーザのタッチ認識を行う。導電布周囲に複数個電極を取り付け、EIM によるセンシングによって計測した電圧をデータとして機械学習を行うことにより、タッチ位置およびスライドなどのタッチジェスチャの認識を可能とする。本手法は先行研究と比較して、大きい布地に対して少ない電極数でタッチセンシングが可能という利点がある。また導電糸を縫い込んだり、導電布を複数枚重ねるといったような作業を必要としない。一般的に購入可能な導電性テキスタイルをそのまま使用したもの、もしくは切ったものの周囲に電極を取り付けるだけでタッチセンシングを可能とする。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を述べる。本章では本論文の背景、目的およびアプローチについて述べた。第 2 章では関連研究と本研究の位置付けを述べる。第 3 章では本研究にて利用する EIM について述べる。第 4 章では本研究で提案するシステムの概要、利用イメージについて述べる。第 5 章では提案システム実現のための導電布素材の選定、センシングに最適な信号を調査する予備実験について述べる。第 6 章では予備実験をもとに開発した提案システムの実装について述べる。第 7 章では提案システムのタッチ位置の認識および手形状の認識精度を評価する実験について述べる。第 8 章では今後の課題点を述べる。最後に第 9 章では結論を述べる。

第2章 関連研究

本研究は、EIM を導電布に適用することにより、ユーザが導電布上へタッチしたことの認識を可能とし、容易に実装可能なタッチインタフェースを開発する研究である。本研究と関連する研究として、「スマートテキスタイルに関する研究」、「EIM に関する研究」が挙げられる。本章ではそれぞれの研究の概要を述べた後、関連研究に対する本研究の位置付けを述べる。

2.1 スマートテキスタイルに関する研究

導電糸や導電布のような新しい機能を持った繊維素材の開発、およびそれらを使用したセンシングやインタフェースについての研究を行うスマートテキスタイルという分野がある。スマートテキスタイル分野では、繊維素材を利用した様々なセンシング、ディスプレイなど幅広い用途の研究が行われている [1]。また、スマートテキスタイルを用いた服飾デザインに関する研究 [16] や、実際に組み込んだアパレルの登場 [17, 18] などもあり、世間への広がりも近づいている。

2.1.1 導電糸を用いた研究

導電性繊維の中でも導電糸を用いた研究は最も多く行われている。Molla ら [19] は導電糸を用いることにより、繊維素材のみからなる回路を開発した。Buechley ら [20] は導電糸を用いたプリント基板 (PCB) の開発を行った。

導電糸を用いたセンシングに関する研究は数多く存在する。Olwal ら [21] は導電糸と光ファイバーを撚り線になるように織り込むことにより、タッチジェスチャ認識可能な I/O Braid を開発した。認識したジェスチャごとに光ファイバーを異なる色に発光させることにより視覚的フィードバックも得ることが可能である。Vogl ら [22] 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、それを伸縮させることにより入力を行う StretchEBand を開発した。Komor ら [23] は導電糸を用いたスティッチボタン型のタッチインタフェースを複数種類作成し、ユーザが歩きながら使用した場合の使用感の調査を行った。Gilliland ら [24] は静電容量センシングを導電糸刺繍上で行うことにより、様々なアプリケーションをグラフィカルユーザインタフェース (GUI) のように制御可能な Swatchbook を開発した。Foo ら [25] は素材の異なる複数の導電糸を用いて耐久性の高い濡れセンサを開発した。Poupyrev ら [4] の研究である Jacquard では、衣服に縫い込むことが可能かつ洗濯乾燥に耐性のある導電性繊維の開発を行った。さらにこの繊維素材を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センサと同じ形状になるよう衣服に縫い込むことにより、衣服上でのタッチインタラクションを実現した。ジャケットの袖部分 [17] やバックパックの肩紐部分 [18] に Jacquard の技術を実装したアパレルが既に市販されている。Pourjafarian ら [5] は、タッチセンサをラピッドプロトタイピングするために、投影型静電容量センシングを安価なマイコンボードである Arduino と簡単な回路のみで実現可能な Multi-Touch Kit を開発した。Multi-Touch Kit では、センサ部分を導電系にすることにより、繊維素材上でのタッチセンシングが可能であることを示した。堀場ら [26] は交差するように配置した導電系の上にフェルトを被せ、フェルトを押し込むことにより生じる静電結合を利用した布製のスイッチを開発した。Yoon ら [27] は導電系と導電性エラストマーを用いたタッチセンシング可能な指サックを開発し、アイズフリーな入力手法を提案した。上田ら [28, 29] は導電系による静電容量センシングと様々な手法によって生成した衣服上のシワを利用することにより、触覚フィードバックを伴うインタフェースを開発した。

2.1.2 導電布を用いた研究

導電布を用いたセンシングに関する研究も数多く存在する。Ono ら [6] は、2枚の導電布を用いて抵抗膜方式のタッチパネルの仕組みを用いたテキスタイルインタフェースである Textile++ を開発した。Leong ら [7] は複数の導電布を用いて多層構造にすることにより、靴下型のインタフェースである proCover を開発した。Parzer ら [8] 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認識を可能とした。Mikkonen ら [30] は導電布に印加した交流電流と、導電布へのタッチの仕方により変化する電流の2つの信号から計算したリサージュ曲線を用いることにより、多様な種類のタッチジェスチャ認識が可能であることを示した。Parzer ら [31] は圧力によって抵抗が変化する導電系を衣服に縫い込むことにより、感圧センシングが可能な RESi を開発した。Ohsawa, Iwai ら [32, 33] は風呂敷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、折られ方を認識可能な Smart Furoshiki を開発した。

2.2 EIM に関する研究

EIM は、対象物体周囲に複数個の電極を取り付け、選択した電極に微弱な電流を印加し、他の電極において電圧を計測することにより、物体の内部構造を推定する技術である [34]。計測した電圧を利用することにより、対象内部の電気インピーダンスの分布がわかるため、内部構造の推定が可能となる。

2.2.1 電気インピーダンストモグラフィ

EIM の中でも、得られたデータから推定した内部構造を画像化する技術は、電気インピーダンストモグラフィ (Electrical Impedance Tomography, 以下 EIT) と呼ばれている [9]。対象

表面に貼り付けた電極対から微弱電流を印加し，表面上に生じた電位差から対象内の電気インピーダンスの変化率または抵抗率の分布を画像化する．X線CTやMRIと同様に，EITは臓器や内臓脂肪の分布の可視化に利用されてきた．EITの歴史は30年以上前にもさかのぼり[35]，現在でも精度向上のため，様々なアプローチが行われている[36]．

本研究では，抵抗率の分布の画像化は行わず，機械学習を用いてタッチの認識を行う．

2.2.2 HCI分野におけるEIMを用いたセンシングに関する研究

EIMは今まで医療用途で利用されることが多かったが，近年，HCI分野においてもEIMを用いたセンシングが利用されている．

Zhangら[12]は導電性素材により作られた物体や，既存物体を導電性素材によってコーティングしたのに対しEIMによるセンシングを行うことにより，タッチセンシング可能なElectrickを開発した．Yoonら[13]はカーボン製エラストマーにEIMを適用することにより，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．さらにiSoftの素材を多層構造にし，より高精度かつ多様なモダリティのタッチ認識が可能となったMultiSoft[14]が開発されている．Zhangら[10, 11]はスマートウォッチのバンドに電極を複数取り付け，EITを適用することにより様々な種類のハンドジェスチャ識別可能なTomoを開発した．Suzukiら[15]は前腕部に電極を複数取り付け，EITを適用することにより前腕部へのタッチ認識を可能とした．

2.3 本研究の位置付け

本研究は繊維素材を用いたタッチインタフェースを容易に実装することを目的としている．本研究では，Electrick[12]やiSoft[13]を参考に，EIMを用いたタッチセンシング技術を利用する．ただし，本研究はこれらの研究と異なり，導電布にEIMを適用することにより繊維素材上でのタッチセンシングを実現する．Textile++[6]やproCover[7]では複数の導電布を用いてセンシングを行っているが，本研究では導電性テキスタイル1枚のみを用いてセンシングを行うことが可能である．また，導電糸を用いた投影型静電容量方式のセンシング[4, 5]と比較して，本手法では導電糸を縫い込む必要性がない．本研究では，一般的に購入可能な導電性テキスタイルをそのまま，もしくは切るだけで利用可能である．

第3章 EIM

本論文では、布上でのタッチセンシングを可能にするために電気インピーダンス法 (EIM) を用いる。本章では、EIM を用いたセンシング手法について述べる。

3.1 EIM とは

EIM は、対象物体周囲に複数個の電極を取り付け、微弱な電流を印加し、他の電極において電圧を計測することにより、物体の内部構造を推定する技術である。計測した電圧を利用することにより、対象内部の電気インピーダンスの分布がわかるため、内部構造の推定が可能である。EIM は医療分野において、人体表面に電極を取り付け、臓器や内臓脂肪の分布を可視化する EIT と呼ばれる技術として使われてきた [9]。EIT では計測した電圧から対象内部の電気インピーダンス分布を画像化している。X 線 CT や MRI と比較すると解像度は低いが、安価である、小型であるなどの利点がある。小型であることから、長時間の装着および装着状態での移動が可能である、という利点がある。電流の印加は微弱なため、非侵襲的に体内をセンシング可能であり、X 線 CT における X 線被爆の恐れがない。

近年、HCI 分野においても EIM を用いたセンシングが利用されてきている。手首周囲に電極を取り付け手形状を変えることにより、手首内の電気インピーダンスが変化することを利用したハンドジェスチャセンシング [10, 11] が研究されている。さらに、EIM を利用した導体表面でのタッチセンシングについての研究 [12, 13, 14] が行われている。これらの研究では、EIM を適用した対象物体にタッチした際に人体側に電流がシャントすることにより、計測する電圧が降下することを利用してタッチ認識を可能とした。また、前腕に EIM を適用することにより、逆の手で前腕をタッチした位置を認識する研究 [15] も行われている。

本研究では、導電布に対して EIM を適用することにより、導電布上でのタッチセンシングを可能とする。

3.2 EIM を用いたセンシング手法

EIM には多数のセンシング手法がある。本節では代表的な 2 種類の EIM のセンシングについて述べる。

3.2.1 4-terminal EIM

1つ目は4-terminal EIM（本論文では4端子EIMと呼ぶ）である。まず対象となる導電体周囲を取り囲むように電極を取り付ける。1組の電極対に微弱な電流を印加し、他の電極対にて電位差を計測する（図3.1上）。以降それぞれを印加電極対、計測電極対と呼ぶ。予め定めておいたフレーム数の計測が終わり次第、計測電極対を切り替えて電位差を計測する（図3.1下）。これを繰り返し、全ての隣接する計測電極対にて電位差の計測が終わると、次に別の電極対に電流を印加し、印加電極対とする。再び他の電極対を計測電極対として、電位差を計測する。これを全ての印加電極対、計測電極対の組み合わせにて行い、得られた電圧データを利用して対象内部の電気インピーダンスの変化率を求める。

3.2.2 2-terminal EIM

2つ目は2-terminal EIM（本論文では2端子EIMと呼ぶ）である。4端子EIMと同様に電極を取り付けるが、印加および計測はそれぞれ電極対ではなく、1つの電極に電流の印加を行い、その間に他の電極で電圧の計測を行う（図3.2）。そのため、こちらは電極間の電位差ではなく、計測電極の電位を計測する。これを全ての印加電極、計測電極の組み合わせにて行い、得られた電圧データを利用して対象内部の電気インピーダンスの変化率を求める。

3.3 本手法におけるセンシング

本手法では、導電布周囲に複数個電極を取り付ける。EIMを適用した導電布へユーザがタッチした際に発生するシャント電流と、それに伴うインピーダンス分布の変化を利用する。計測した電圧データから推定した内部構造の画像化を行うEITと呼ばれる技術も存在するが、本手法ではタッチ認識を可能にするため、画像化は行わず、機械学習を用いる。計測電極から得た電圧データを用いた機械学習により、タッチ位置や触り方の識別を可能とする。

本手法では、2端子EIMを用いる。2端子EIMでは、一度に接続する電極数が少ないため、4端子EIMと比較して実装が容易である。

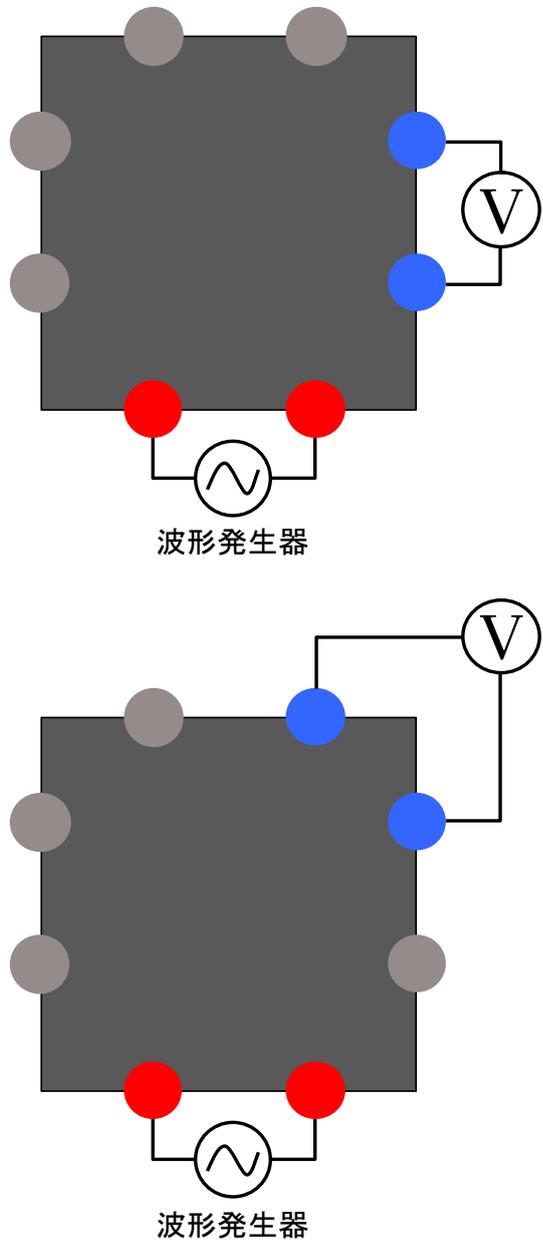


図 3.1 4 端子 EIM によるセンシングのイメージ. 上段: 赤色の円が電流の印加を行う印加電極対, 青色の円が電圧の計測を行う計測電極対. 下段: 上段での計測電極対における電圧計測が終了すると, 計測電極対を別の電極対に切り替えて電圧計測を行う.

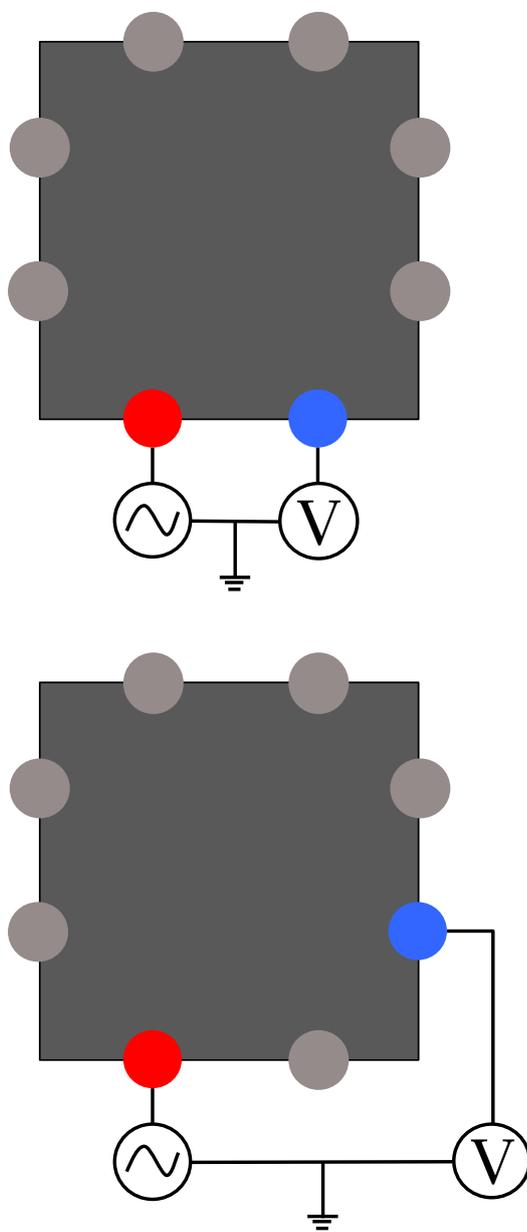


図 3.2 2 端子 EIM によるセンシングのイメージ. 上段: 赤色の円が電流の印加を行う印加電極. 青色の円が電圧の計測を行う計測電極. それぞれ同一のグラウンドを基準としている. 下段: 上段での計測電極における電圧計測が終了すると, 計測電極を別の電極に切り替えて電圧計測を行う.

第4章 EIMを用いた布型タッチインタフェース

本章では、EIMを用いた布型タッチインタフェースの概要とEIMを用いたセンシング手法について述べ、本手法を用いたアプリケーションの利用例を示す。

4.1 概要

本研究にて提案するシステムのイメージ図を図4.1に示す。本システムの流れを説明する。まず、ユーザは導電布をタッチする。導電布周囲に取り付けられた電極における電圧をセンシングハードウェアによって計測しPCに送信する。PCでは得られたデータを利用して機械学習によるタッチ認識を行う。認識結果に基づき、PC内部や他のデバイスにおけるアプリケーションを実行する。これにより、ユーザは導電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が可能となる。PCだけではなく、スマートフォン、スマートウォッチなどのデバイスへの入力インタフェースとして使用することも可能である。

布型タッチインタフェースを衣服の袖部分、大腿部分にそれぞれ取り付けた様子を図4.2、図4.3に示す。導電布を衣服や鞆などに取り付けることによりウェアラブルなインタフェースとして利用可能である。導電布自体は折りたたむことが可能であるため、センシングに使用するマイコンおよび回路を小型化することにより、持ち運びが容易なインタフェースとしての利用が考えられる。

本手法では第3章にて述べたEIMを用いたセンシングを利用するため、導電布周囲に複数個の電極を取り付ける。導電性テキスタイルに対して特別な加工をすることなく、センサとして電極を取り付けるのみで済むため、先行研究と比較して容易に実装可能である。導電糸を用いた静電容量センシングによる手法のように導電糸一本一本に電極を取り付ける必要がないため、電極の取り付け方の自由度が高い。また、布の形状、電極の数および取り付け位置を調整することにより、複数種類のタッチ入力モダリティを認識でき、様々なシチュエーションにおいて利用可能であると考えられる。例えば、図4.2のように細長い布を使用することにより、一次元的なタッチ位置の認識を、図4.3のように正方形の布を使用することにより、二次元的なタッチ位置や布上に置いた手形状の認識などを行うことが可能である。タッチの認識は、EIMによるセンシングを行って得られた電圧データを機械学習にかけることにより行う。

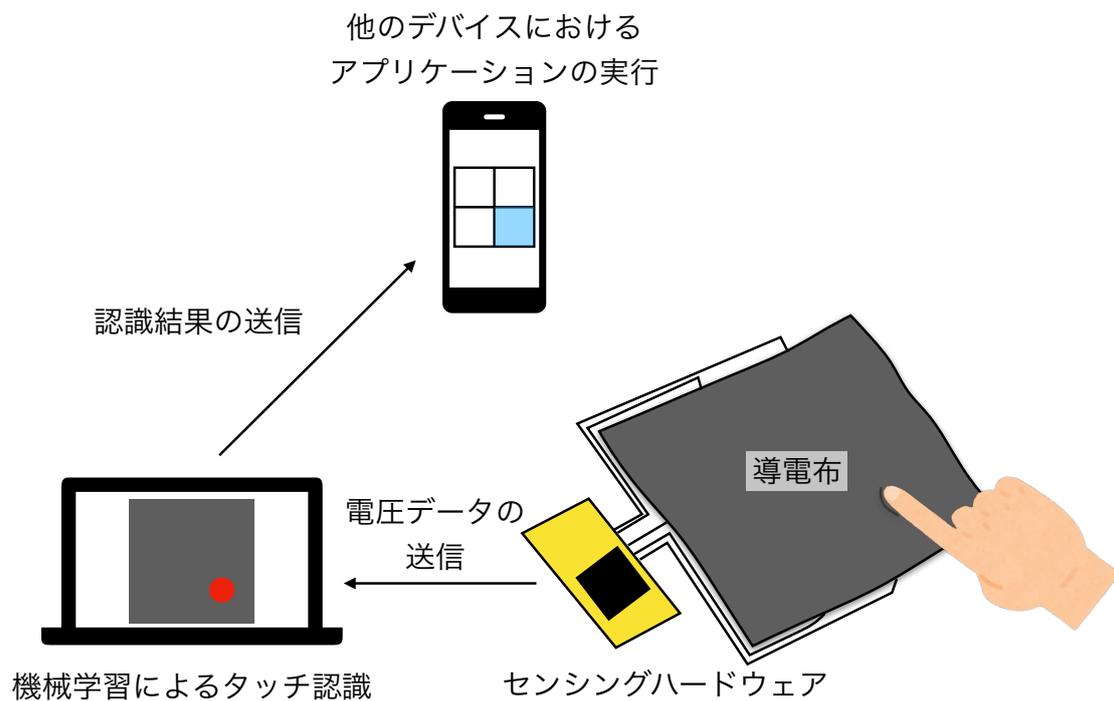


図 4.1 提案するシステムのイメージ図。導電布をタッチした際の電圧データをセンシングハードウェアによって計測し PC に送信する。PC では得られたデータを利用して機械学習によるタッチ認識を行う。認識結果に基づき、PC 内部や他のデバイスにおけるアプリケーションを実行する。



図 4.2 布型タッチインタフェースを衣服の袖部分に取り付けた例.



図 4.3 布型タッチインタフェースを衣服の大腿部分に取り付けた例.

4.2 利用例

布型タッチインタフェースの利用例を示す。用途に合わせて布形状と電極の取り付け位置を変えることにより、多様な用途に用いることができる。

4.2.1 利用例1：布型キーボードおよびタッチパッド

ユーザは椅子に座った状態で、衣服の大腿部に取り付けた布型タッチインタフェースをキーボードやタッチパッドのように使用する（図4.4）。机上のキーボードを用いて入力をする際にやや前傾姿勢になってしまい、日常的にPC作業をしていると肩や腰に負担がかかってしまうが、布型キーボードを用いることにより、ユーザは楽な姿勢でキーボード入力を行うことが可能となる。近年、タブレットに取り付ける薄型キーボードが登場してきているが、布型キーボードにより代用できる可能性がある。導電布は折りたたむことが可能であり、また繊維素材であるため、タブレットのカバーとしてもそのまま利用可能である。

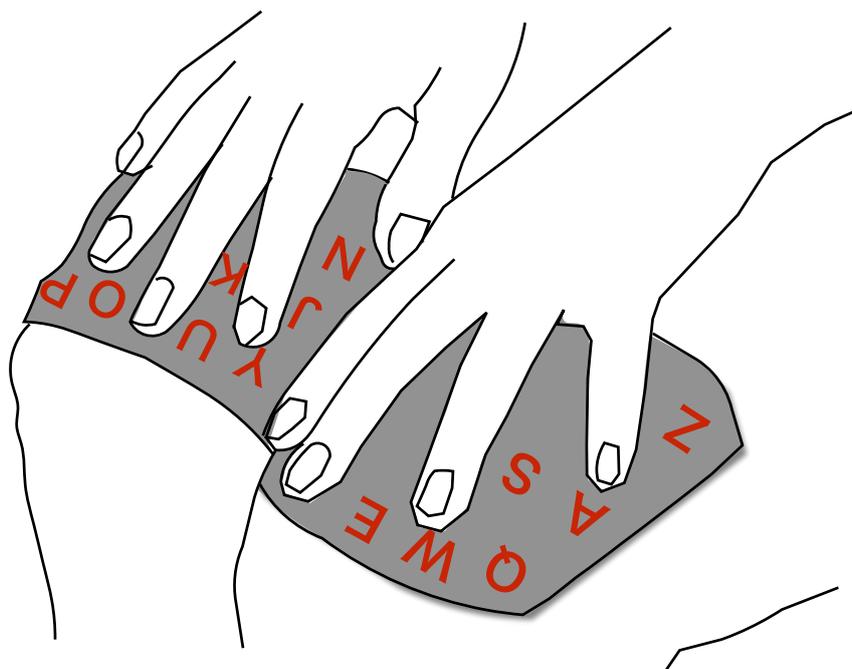


図 4.4 布型タッチインタフェースの利用例1：布型キーボードとしての利用。

4.2.2 利用例 2：ニット帽に取り付けた音楽再生インターフェース

布型タッチインターフェースをニット帽に取り付け、音楽再生インターフェースとして利用する。(図 4.5) 導電布をタッチすることにより、音楽の再生、停止、次のトラックへ移行などの操作を可能とする。本手法は布を用いることから、ニット帽のような曲面を持つ物体に取り付けることが可能であったり、取り付けていて不自然ではないという利点がある。

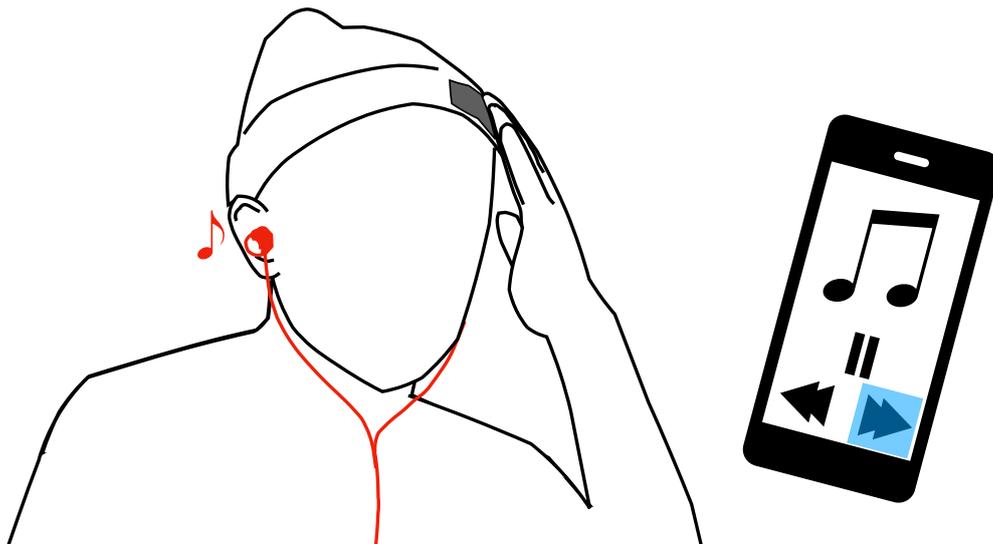


図 4.5 布型タッチインターフェースの利用例 2: ニット帽に取り付けた音楽再生インターフェースとしての利用.

第5章 予備実験

2端子 EIM では，複数個の電極を対象物体の周囲に取り付け，1つの電極に電流の印加を行い，その間に他の電極で電圧の計測を行うという手順をすべての電極の組み合わせにて行う．導電布上での2端子 EIM によるタッチセンシングを行うために，どのような設計が望ましいかを調査するための予備実験を行った．第6章でのプロトタイプ実装に向けて，以下の3つについての調査を行うために3種類の実験を行った．

- 使用する導電布の選定
- 印加する交流電流の最適な周波数
- 導電布に取り付ける電極の位置

5.1 予備実験 1: センシングに適した導電布および印加する電流周波数の調査

本手法の実装において最適な導電布，および導電布に印加する交流電流の最適な周波数を調査する．

5.1.1 実験機器

EeonTex Conductive Stretchable Fabric (本論文では伸縮導電布と呼ぶ) (図 5.1) [37], EeonTex Pressure Sensing Fabric (本論文では感圧導電布と呼ぶ) (図 5.2) [38], Conductive Fabric - 12"x13" Ripstop (本論文ではナイロン導電布と呼ぶ) (図 5.3) [39] の3種類の導電布を用意した．伸縮導電布は厚さ 0.38 mm，表面抵抗率 $10\text{ k}\Omega \sim 10\text{ M}\Omega/\text{sq}$. の範囲であり伸縮によって変化する．感圧導電布は厚さ 0.80 mm，表面抵抗率 $2\text{ k}\Omega/\text{sq}$. である．ナイロン導電布は厚さ 0.1 mm，表面抵抗率 $0.02\text{ }\Omega/\text{sq}$. 未満である．

信号の発生，計測を行うため，波形発生機能，オシロスコープ機能を持った Analog Discovery 2¹および BNC コネクタ拡張ボード²を使用した．Analog Discovery 2 は USB ケーブルによ

¹<https://store.digilentinc.com/analog-discovery-2-100msps-usb-oscilloscope-logic-analyzer-and-variable-power-supply>

²<https://reference.digilentinc.com/reference/instrumentation/bnc-adapter-board/start?redirect=1>

て MacBook Pro (13-inch, 2019) に接続されており, Analog Discovery 2 用の制御アプリケーションである WaveForms³ を使用して発生させた信号の制御および計測電極における信号の計測を行った。



図 5.1 伸縮導電布 EonTex Conductive Stretchable Fabric.



図 5.2 感圧導電布 EonTex Pressure Sensing Fabric.

5.1.2 実験内容

図 5.5 に本実験システムのブロック図を示す。導電布に電極を 5 cm 間隔で 2 つ取り付ける (図 5.6)。Analog Discovery 2 から発生させた交流信号を一方の電極に印加し, もう一方の電極の信号を Analog Discovery 2 で計測する。計測側では, ノイズ除去のため Analog Discovery 2 内のバンドパスフィルタを用いた。バターワース型バンドパスフィルタを採用し, 次数は 4, 中

³<https://reference.digilentinc.com/reference/software/waveforms/waveforms-3/start?redirect=1#newest>



図 5.3 ナイロン導電布 Conductive Fabric - 12"x13" Ripstop.

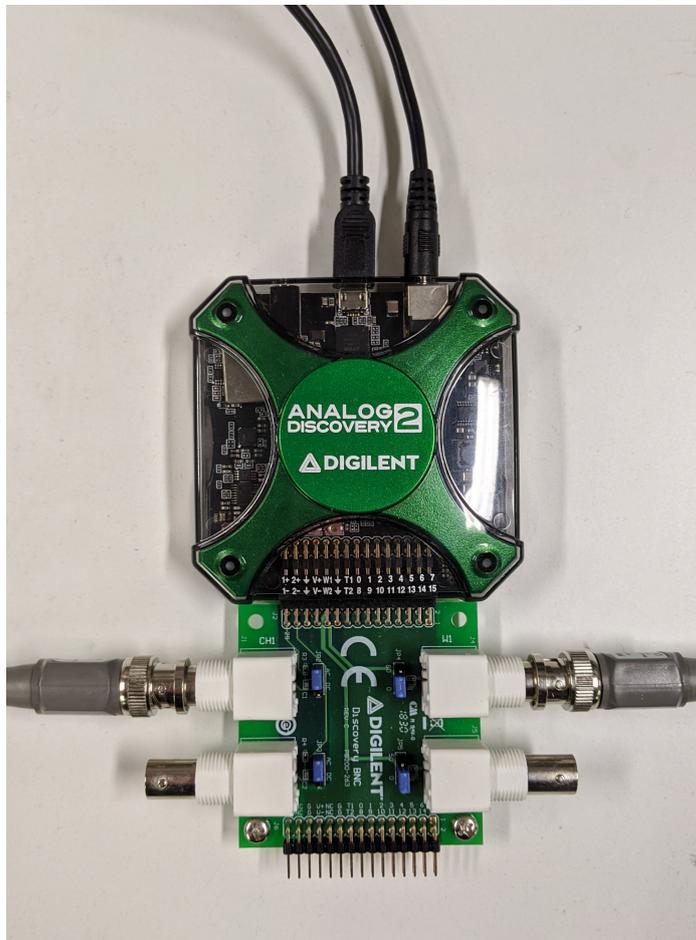


図 5.4 予備実験に使用した Analog Discovery 2 および BNC コネクタ拡張ボード

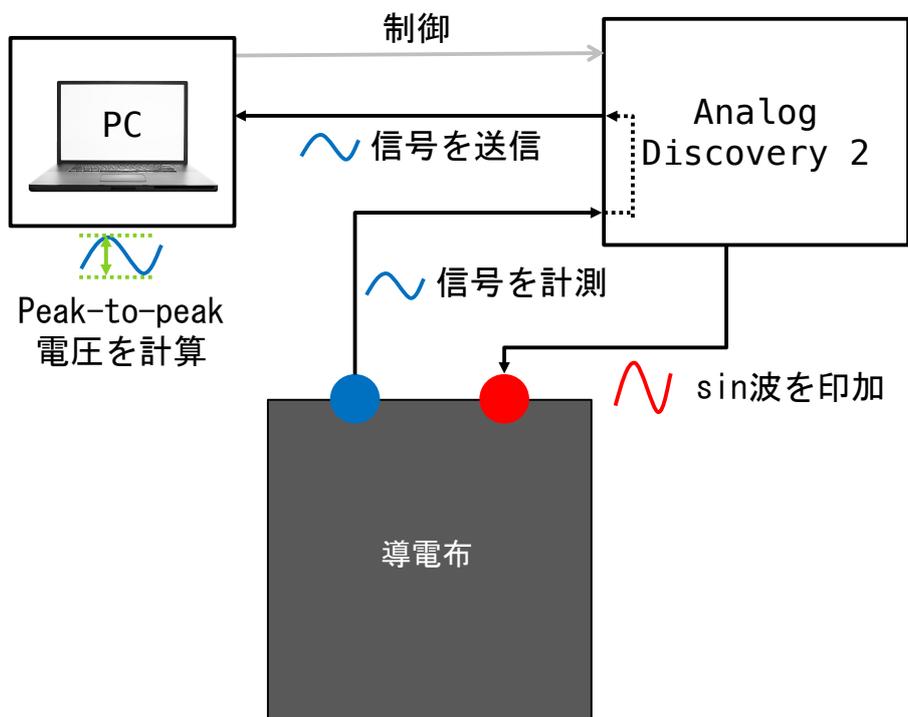


図 5.5 予備実験システムのブロック図.

心周波数から前後 20% (1 kHz の場合, 800 Hz ~ 1.2 kHz) を通すフィルタとした。フィルタを通した後の信号の Peak-to-peak 電圧を計測する。

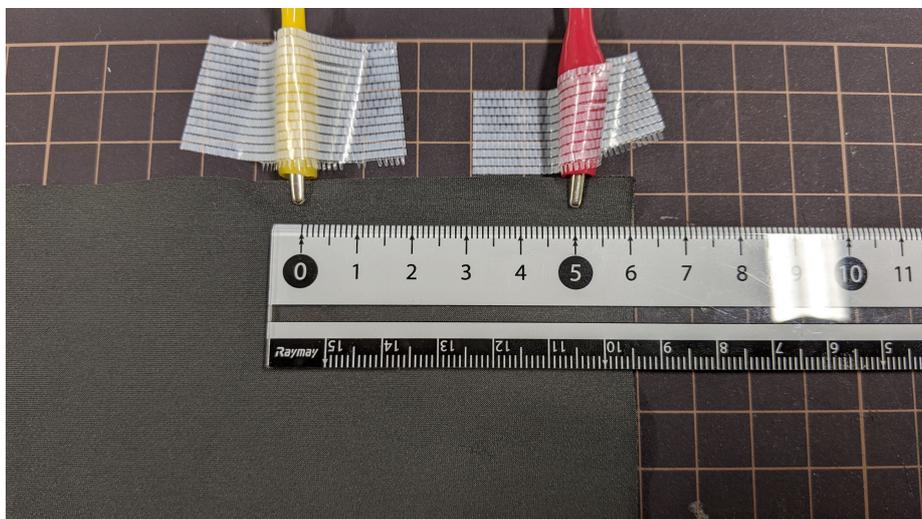


図 5.6 導電布に 5 cm 間隔で電極を取り付けた様子。

次に電極間の中心位置 (それぞれの電極から 2.5 cm の位置) 部分の導電布を右手人差し指でタッチする図 5.7. この状態で同様に Peak-to-peak 電圧を計測する。

以上の手順を 3 種類の導電布で, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz の計 8 種類の周波数の sin 波を用いて行う。すべての周波数において, 振幅は $4 V_{pp}$, オフセットは 0 とした。

導電布および周波数ごとに, タッチ/ノータッチ時のそれぞれの計測信号にどれだけ差が出るかを調査する。

5.1.3 実験結果

表 5.1, 図 5.8 に伸縮導電布, 表 5.2, 図 5.9 に感圧導電布, 表 5.3, 図 5.10 にナイロン導電布における予備実験の結果を示す。また, 図 5.11 に導電布ごとのノータッチ時における電圧の値のグラフおよびタッチした際のノータッチ時からの電圧降下の割合のグラフを示す。

実験を行った 3 種類すべての導電布において, 印加する sin 波の周波数を高くすると, 導電布を流れる交流電圧が低くなることがわかった。一方で周波数を低くすると, タッチ/ノータッチ時の電圧変化が小さくなることがわかった。すべての導電布, 周波数において, タッチした場合に計測される電圧が下がることがわかった。ナイロン導電布は高周波においても高い交流電圧を計測可能であったが, どの周波数においてもタッチ/ノータッチ時の電圧変化が非常に小さかった。感圧導電布は, どの周波数においても比較的高い電圧が計測され, 特に 200 kHz 以上においてタッチ/ノータッチ時の電圧降下が大きいことが確認できた。伸縮導

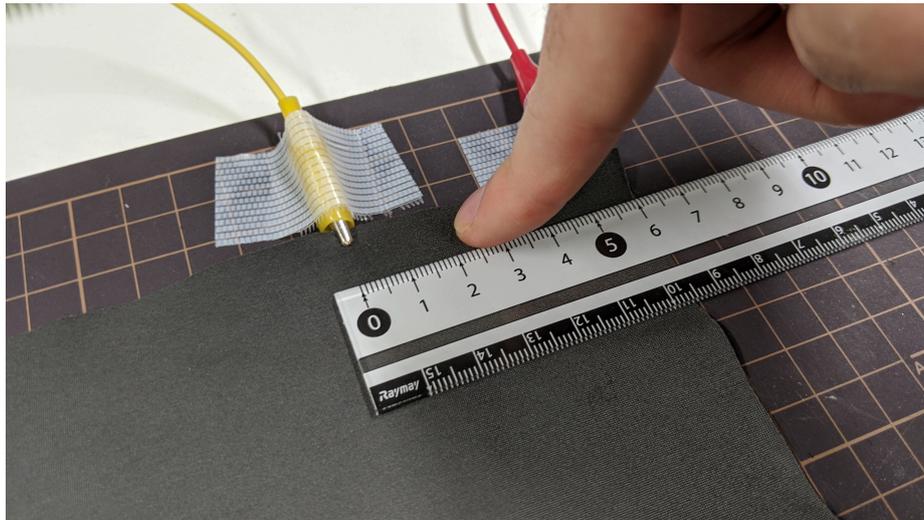


図 5.7 電極間の中心位置部分の導電布をタッチする様子.

電布は、2つの導電布と比較すると計測された電圧は低いが、100 kHz 以上においてタッチ/ノータッチ時の電圧降下が大きかった。

ナイロン導電布は本手法におけるタッチセンシングには不適であると考えられる。感圧導電布は計測される信号はタッチセンシングに適していると考えられるが、タッチにより導電布表面のカーボンが摩耗し、指先が黒く汚れてしまう、また摩耗によるインピーダンスの変化が生じてしまうという問題がある。以上より、以降の実験では伸縮導電布を採用する。EIM を利用したタッチセンシングに関する先行研究 [12] では、表面抵抗率が $500 \Omega \sim 50 \text{ M}\Omega/\text{sq.}$ の範囲の物体に適用することが望ましいと示していた。本実験の結果から、導電布に EIM を適用した場合にも同様にある程度の表面抵抗率が必要であることがわかった。感圧導電布での実験結果から、 $2 \text{ k}\Omega/\text{sq.}$ 以上の表面抵抗率があれば十分センシングが可能であるとわかった。

本手法ではアナログ信号を使用したセンシングを行っているため、環境ノイズの影響を強く受けてしまう。環境ノイズの例として、蛍光灯から生じる約 50 kHz の電磁ノイズ、電源から生じる 50 Hz のノイズなどが存在する。ノイズの影響を避けること、および電圧変化の値と比率を考慮し、印加する sin 波の周波数は 200 kHz を採用する。

表 5.1 伸縮導電布における周波数ごとの電圧変化 (単位 mV)。

周波数 (Hz)	1k	10k	100k	200k	500k	1M	2M	5M
ノータッチ	3697.1	2461.6	299.3	123.4	41.5	21.9	15.6	10.9
タッチ	3668.6	2069.1	177.7	53.0	14.4	8.9	9.0	8.1

表 5.2 感圧導電布における周波数ごとの電圧変化（単位 mV）.

周波数 (Hz)	1k	10k	100k	200k	500k	1M	2M	5M
ノータッチ	4142.9	4165	3812.3	2964.5	1597.3	801.51	381.54	125.4
タッチ	4109.6	4148.9	3532.9	2185.8	1007.6	614.36	265.35	83.288

表 5.3 ナイロン導電布における周波数ごとの電圧変化（単位 mV）.

周波数 (Hz)	1k	10k	100k	200k	500k	1M	2M	5M
ノータッチ	4188.4	4191.2	4228.4	4048.6	3962.0	3799.4	3346.5	1888.0
タッチ	4187.0	4190.3	4142.3	4021.1	3820.0	3557.7	3114.1	1758.3

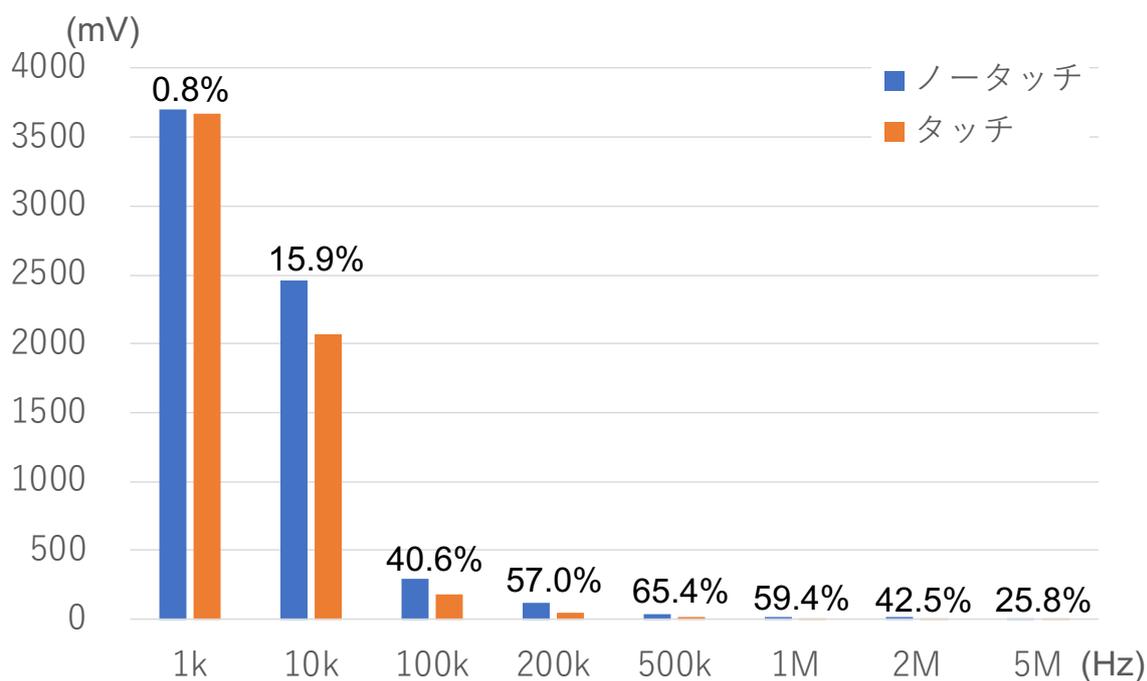


図 5.8 伸縮導電布における周波数ごとの電圧のグラフ.

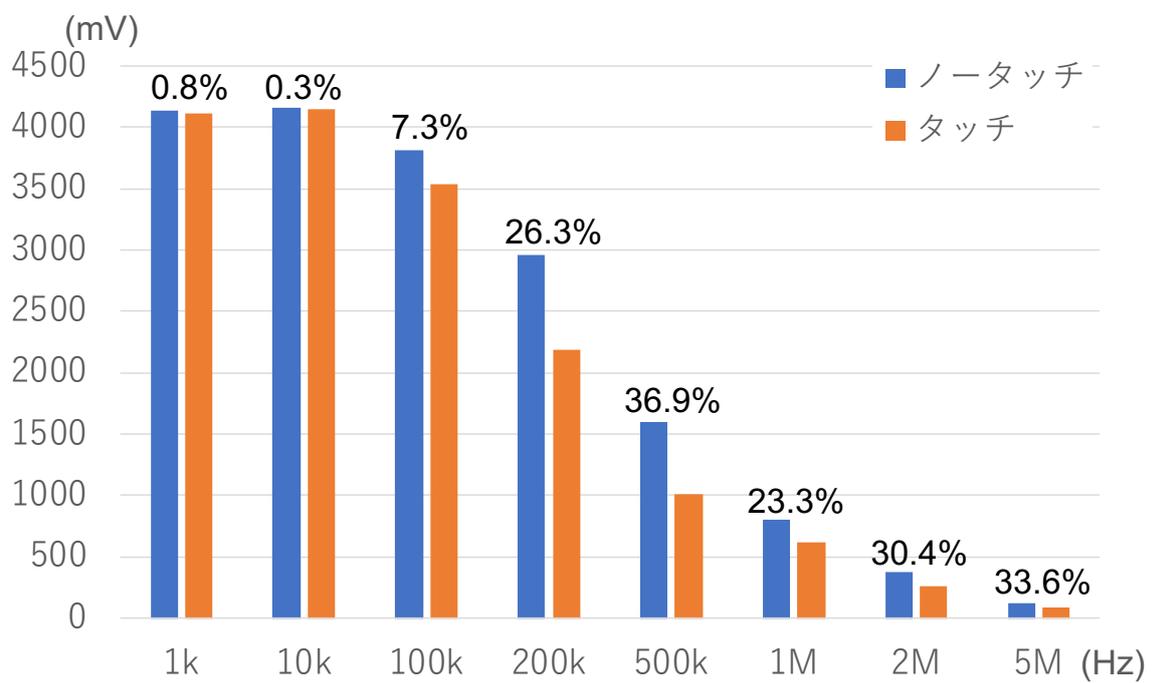


図 5.9 感圧導電布における周波数ごとの電圧のグラフ。

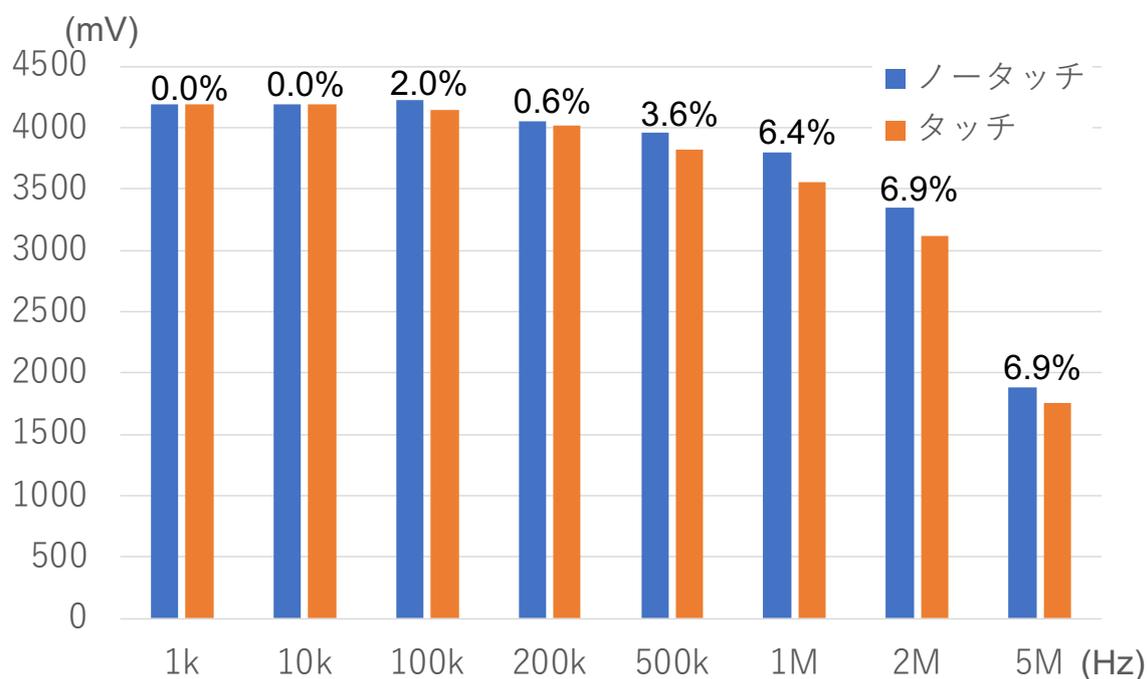


図 5.10 ナイロン導電布における周波数ごとの電圧のグラフ。

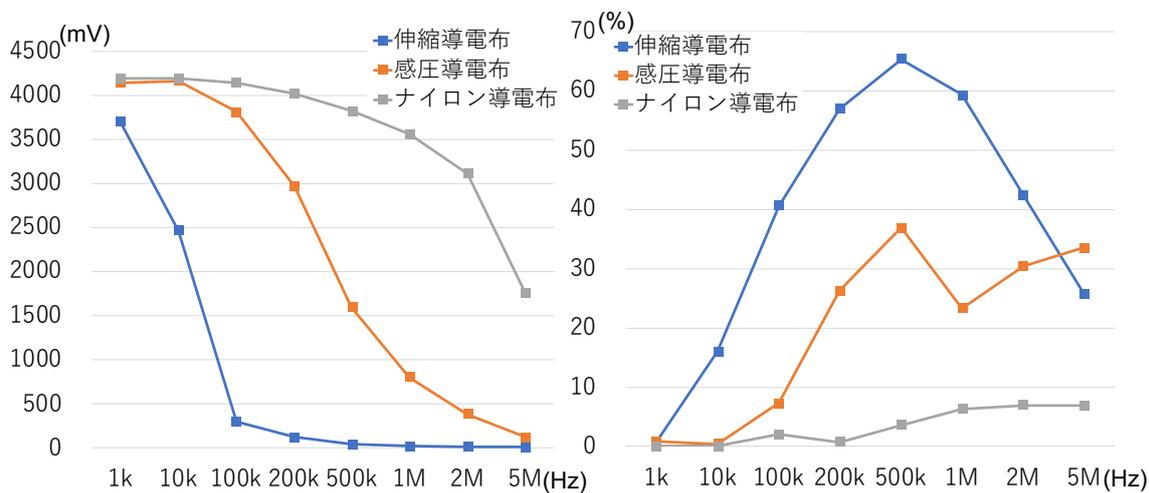


図 5.11 予備実験 2 の結果のグラフ。左: 導電布ごとのノータッチ時における電圧の値。右: 導電布ごとのタッチした際のノータッチ時からの電圧降下の割合。

5.2 予備実験 2: 一辺に取り付ける電極の最適な間隔の調査

前節の実験によって、 $2\text{ k}\Omega/\text{sq.}$ 以上の表面抵抗率を持つ導電布であれば、EIMによるセンシングが十分に行えるとわかった。本論文では、伸縮導電布に 200 kHz の \sin 波を印加した際に計測電極にて計測される信号がタッチセンシングに適當であるとした。

次に、選定した導電布および印加周波数を用いて EIM によるセンシングを行う場合に、取り付ける電極の最適な間隔を調査する。電極の間隔が長すぎると、タッチによる計測電極での電圧変化が見られなくなり、短すぎると、センシングのために多数の電極を取り付ける必要が生じてしまう。本論文で提案する布型タッチインタフェースとして四角形の導電布を使用する場合に、EIM によるセンシングでは一辺に複数個の電極を取り付けることになる可能性がある。本実験では、一辺に 2 つの電極を取り付け、電極間の長さおよびタッチ位置を変えて信号の印加および計測をすることにより、電極の最適な間隔を調査する。

5.2.1 実験機器

5.1 節の実験結果を受け、導電布として伸縮導電布を用いた。伸縮導電布の大きさは $25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ とした。それ以外は 5.1.1 節と同じである。

5.2.2 実験内容

実験システムは 5.1 節のものと同様である (図 5.5)。導電布の一辺に 2 つ電極を取り付ける。一方の電極に交流信号を印加し、もう一方の電極で信号を計測する。計測側では、ノイズ除去のため Analog Discovery2 内のバンドパスフィルタを用いた。バタワース型バンドパスフィルタを通した後の信号の Peak-to-peak 電圧を計測する。

次に 2 つの電極間かつ印加電極付近の導電布を右手人差し指でタッチする。この状態で同様に Peak-to-peak 電圧を計測する。最後に 2 つの電極間かつ計測電極付近の導電布を右手人差し指でタッチした状態において、Peak-to-peak 電圧を計測する。

印加する交流信号は 200 kHz , 4 V_{pp} , オフセット 0 の \sin 波とした。取り付ける電極の間隔は、 7 cm , 9 cm , 11 cm , 13 cm , 15 cm , 17 cm , 19 cm , 21 cm の計 9 種類とした。

5.2.3 実験結果

実験結果を表 5.4, 図 5.12 に示す。どの電極間の長さにおいても、計測電極付近をタッチしたときよりも印加電極付近をタッチしたときの方が、ノータッチ時からの電圧変化が大きいことがわかった。電極間の長さを 11 cm 以上にすると、計測する交流電圧が 25 mV 程度で停滞することが確認できた。電極間の長さが 11 cm 以上の場合、ノータッチ時、印加電極、計測電極をタッチしたときの電圧変化も小さく、どの位置をタッチしているかの認識を行うには困難なデータであると考えられる。以上より、電極間の長さは 9 cm 以下にするべきであると考えられる。

表 5.4 計測電極で計測された電極間の長さごとの電圧.

電極間の長さ	7 cm	9 cm	11 cm	13 cm
ノータッチ	57.5 mV	32.8 mV	25.3 mV	22.6 mV
印加電極付近をタッチ	16.2 mV	11.0 mV	9.7 mV	8.2 mV
計測電極付近をタッチ	25.9 mV	19.6 mV	12.7 mV	14.2 mV
電極間の長さ	15 cm	17 cm	19 cm	21 cm
ノータッチ	22.3 mV	26.6 mV	26.1 mV	25.7 mV
印加電極付近をタッチ	10.1 mV	11.8 mV	12.4 mV	12.2 mV
計測電極付近をタッチ	14.1 mV	18.6 mV	21.7 mV	17.5 mV

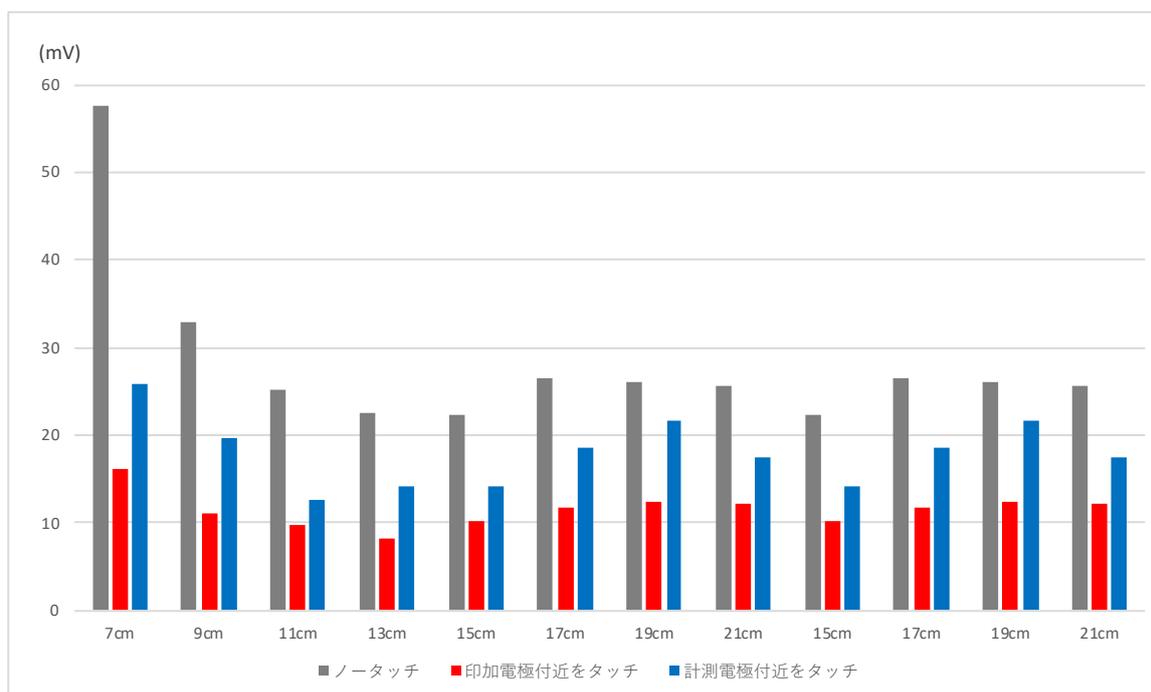


図 5.12 計測電極で計測された電極間の長さごとの電圧のグラフ.

5.3 予備実験3: タッチ点ごとの様々な電極間における電圧変化の調査

5.2 節により、四角形の一辺に複数個電極を取り付けた場合の電圧変化の調査を行った。しかし、EIM によるセンシングでは同一辺同士の電極間だけでなく、異なる辺に取り付けられた電極間において信号の印加および計測を行う場合もある。またタッチ位置の認識を可能とするためには、導電布上のタッチする位置によって計測される電圧が変化する必要がある。そこで本実験では、電極の取り付け位置を変えながら、導電布上の異なる位置をタッチし計測される電圧変化を調査する。

5.3.1 実験機器

5.2.1 節と同様の機器を使用し、15 cm × 15 cm の伸縮導電布を用いた。

5.3.2 実験内容

実験システムは5.1 節のものと同様である（図 5.5）。本実験における電極の取り付け位置および導電布上のタッチ点を図 5.13 に示す。導電布の上辺と左辺からそれぞれ 2.5 cm 離れた位置を 1 つのタッチ点とし、その点を基準に下、右に 5 cm ずつ離れた点をタッチ点とし、計 9 点をタッチ点とした。導電布右上の角から左に 3 cm の位置に印加電極を取り付けた。計測電極はまず、右上の角から下に 3 cm の位置に取り付けた（図 5.13 青円 1）。Analog Discovery 2 により、200 kHz、4 V_{pp}、オフセット 0 の sin 波を発生させ、印加電極に印加した。タッチしない状態のまま、計測電極にてバターース型バンドパスフィルタを通した後の信号の Peak-to-peak 電圧を計測する。

次に導電布左上のタッチ点を右手人差し指でタッチする。この状態で同様に Peak-to-peak 電圧を計測する。その後、すべてのタッチ点に対して同様にタッチし、Peak-to-peak 電圧を計測する。

すべてのタッチ点での計測が終わると、計測電極を一度取り外し次の位置（図 5.13 青円 2）に取り付け直して、同様の計測を行う。以上の手順を 18 種類の計測電極の取り付け位置で行う。

5.3.3 実験結果

実験結果を図 5.14、図 5.15、図 5.16 に示す。図は、各タッチ点をタッチした状態での Peak-to-peak 電圧が、ノータッチ状態での Peak-to-peak 電圧からどれだけ変化したかを計測電極ごとに表している。計測電極が同じ辺上にある 1~6、7~12、13~18 ごとに最も電圧変化が大きかった点を赤、最も小さかった点を白としてカラースケールしている。計測電極 1、2 における右上のタッチ点の結果から印加、計測電極のどちらからも近い点をタッチした場合に最も電圧降下が大きかったことがわかった。また計測電極 1、2 における下 1 列のタッチ点や計測電極 17、18 における右下のタッチ点の結果から、印加、計測電極を結んだ直線上から離れた

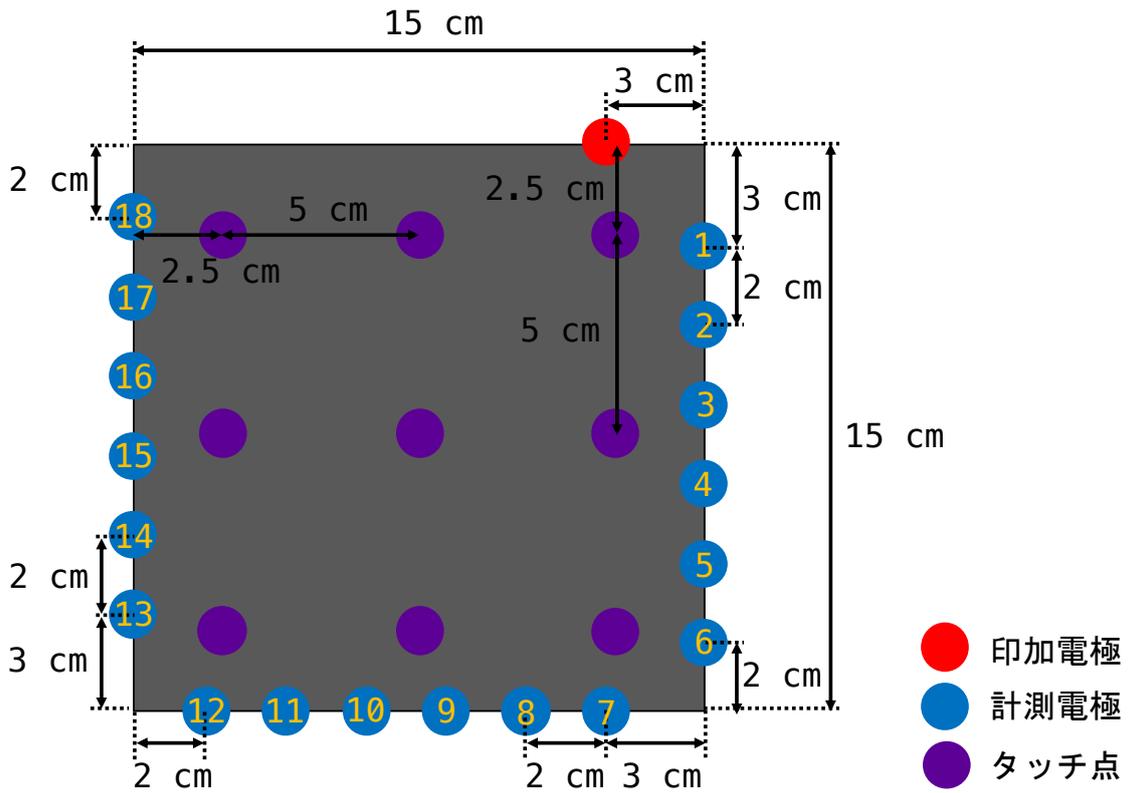


図 5.13 予備実験 3 における電極の取り付け位置および導電布上のタッチ点を示した図。赤円が印加電極，青円が計測電極，紫円がタッチする位置である。青円内に書いてある順に電極を取り付けて信号の計測を行った。

位置にある点をタッチした場合には電圧降下が非常に小さいことがわかった。これは、導電布がある程度の電気抵抗とインピーダンスを持っていることから、印加および計測電極から生成される電界の強さが電極からの距離によって異なるためであると考えられる。しかし、前節の実験結果と比較すると、計測電極を印加電極と同一辺上に取り付けた場合よりも電圧降下が大きかった。同一辺上に電極を取り付けた場合、電流の流れる導電布上の経路が小さく、発生する電場が比較的弱くなってしまわないかと推測される。計測電極7の右1列の結果から、電極間の直線上から近く、なおかつ計測電極に近い位置をタッチしたときは電圧降下が比較的小さいことがわかった。前節の実験では、電極を同一辺上に取り付ける場合は9 cm 以下にするべきだと判断したが、本実験の結果より同一辺以外での計測電極におけるタッチ点ごとの電圧変化が大きいため、同一辺上の電極間距離を必ずしも9 cm 以下にする必要はないと再考する。以上のことから、印加、計測電極を結んだ直線がタッチする範囲をカバーできるように電極を取り付けることが、EIM を用いて導電布上のタッチ位置を認識するために適していると考えられる。

-17.36	-41.35	-95.231
-20.03	-31.53	-38.95
-12.53	-17.28	-15.74

計測電極1

-22.93	-47.43	-97.356
-24.72	-34.79	-48.4
-17.58	-26.04	-19.14

計測電極2

-30.08	-57.598	-76.448
-33.14	-49.04	-62.132
-24.81	-33.44	-28.52

計測電極3

-32.13	-57.478	-73.052
-40.519	-56.404	-75.612
-31.82	-40.602	-41.459

計測電極4

-34.161	-59.077	-68.729
-43.231	-57.445	-70.852
-32.289	-43.568	-43.306

計測電極5

-31.884	-56.495	-57.499
-41.94	-56.915	-65.308
-35.106	-46.18	-55.804

計測電極6

図 5.14 計測電極 1 から 6 における, ノータッチ状態と各点をタッチしたときの電圧の差 (単位 mV). 電圧降下が大きい点は赤, 小さい点は白となるようカラースケールしている.

-33.982	-57.872	-61.817
-44.68	-60.951	-65.866
-34.533	-54.284	-53.056

計測電極7

-38.584	-62.781	-60.252
-48.581	-68.036	-64.071
-39.299	-62.853	-48.836

計測電極8

-29.751	-52.234	-50.085
-40.874	-58.478	-57.594
-33.196	-58.864	-39.498

計測電極9

-40.673	-63.532	-58.333
-55.27	-64.378	-61.587
-46.695	-63.587	-46.769

計測電極10

-42.008	-64.963	-60.137
-58.537	-69.366	-57.343
-52.256	-63.474	-45.202

計測電極11

-37.555	-57.32	-47.736
-57.989	-61.704	-51.203
-58.107	-57.389	-37.468

計測電極12

図 5.15 計測電極 7 から 12 における，ノータッチ状態と各点をタッチしたときの電圧の差（単位 mV）．電圧降下が大きい点は赤，小さい点は白となるようカラースケールしている．

-43.486	-64.254	-59.847
-65.581	-68.922	-57.542
-55.817	-56.163	-42.202

計測電極13

-42.881	-69.708	-56.762
-62.103	-68.09	-55.641
-45.728	-55.872	-41.189

計測電極14

-44.32	-65.239	-53.171
-63.875	-61.034	-52.169
-41.424	-47.469	-38.982

計測電極15

-49.336	-69.219	-57.631
-63.199	-62.109	-52.254
-39.709	-46.393	-35.904

計測電極16

-45.199	-63.459	-51.293
-52.901	-56.626	-46.699
-36.244	-42.526	-31.981

計測電極17

-47.401	-55.315	-42.689
-46.248	-47.955	-39.587
-31.79	-36.368	-27.369

計測電極18

図 5.16 計測電極 13 から 18 における，ノータッチ状態と各点をタッチしたときの電圧の差（単位 mV）．電圧降下が大きい点は赤，小さい点は白となるようカースケールしている．

第6章 プロトタイプ実装

第5章にて述べた予備実験の結果に基づいて、布型タッチインタフェースのプロトタイプを開発した。本章では開発したプロトタイプの実装について述べる。まずプロトタイプの概要を述べ、構成部である導電布、EIM センシングハードウェアおよびタッチ認識ソフトウェアについて述べる。

6.1 概要

導電布周囲に複数個電極を取り付けEIMを用いることにより、導電布上のタッチセンシングを可能とした布型タッチインタフェースのプロトタイプを開発した。本プロトタイプは、タッチインタフェースとなる導電布、EIMによるセンシングを行うマイコンおよび回路（EIM センシングハードウェア）、得られた電圧データを用いてタッチ認識を行うPC上のソフトウェア（タッチ認識ソフトウェア）から構成される。

6.2 プロトタイプに用いる導電布

第5章での予備実験を受けて、本手法のセンシングに適しているとして EonTex Conductive Stretchable Fabric（伸縮導電布）[37]を使用した。

6.3 EIM センシングハードウェア

EIMによるセンシングを行うためのハードウェアをブレッドボード上に実装した（図6.2）。図6.1にハードウェアのブロック図を示す。

6.3.1 ハードウェア構成

ハードウェアは、マイコンボード、波形発生器、信号増幅回路、マルチプレクサ、信号整流回路、電源から構成される。電圧の読み取り、波形発生器やマルチプレクサの制御、PCへのデータ送信を行うためのマイコンボードとして mbed LPC1768¹（以降 mbed と呼ぶ）を使用した。印加する sin 波を生成するための波形発生器として AD9851 Direct Digital Synthesizer

¹<https://os.mbed.com/platforms/mbed-LPC1768>

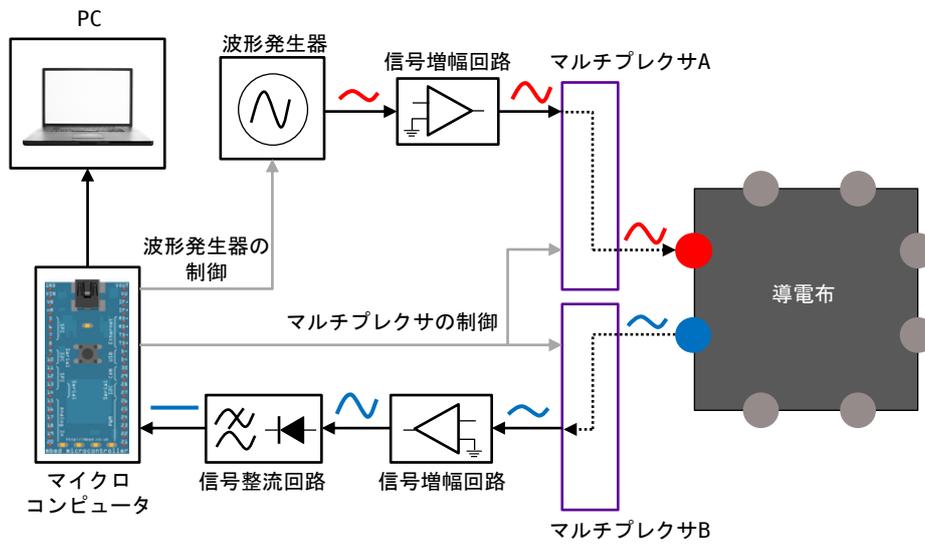


図 6.1 EIM センシングハードウェアのブロック図. それぞれのマルチプレクサはすべての電極と繋がっており, マイコンによって切り替え制御を行っている.

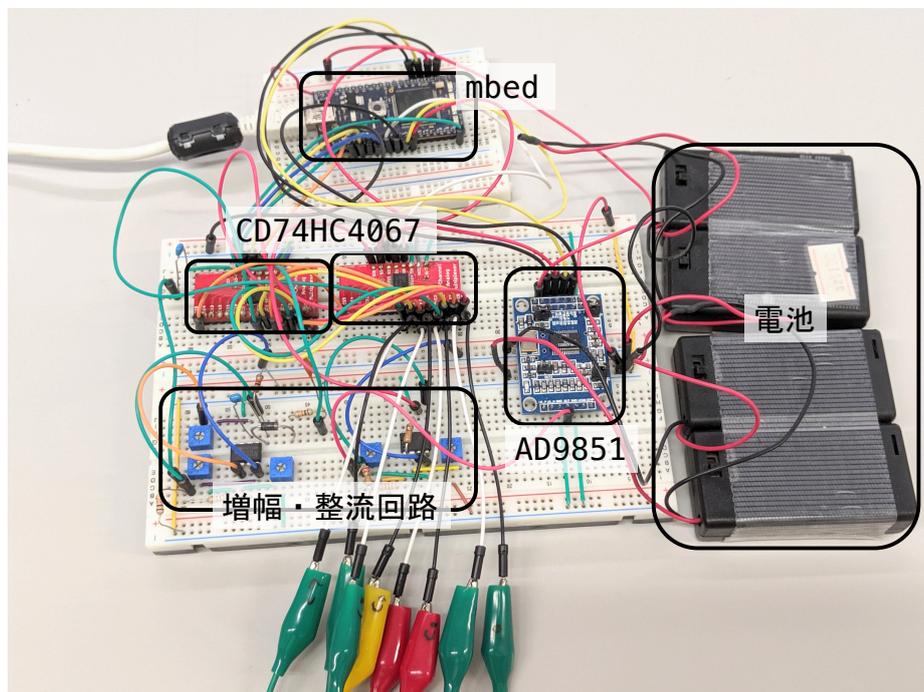


図 6.2 EIM センシングハードウェアのブレッドボード実装.

(DDS)²モジュールを使用した。信号増幅回路では、波形発生器から生成される信号および計測電極にて計測される信号を増幅させた。信号増幅回路としてオペアンプを用いた非反転増幅回路(図 6.3)を使用した。非反転増幅回路による信号の増幅は式 6.1 によって表される。

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times V_i \quad (6.1)$$

V_o は出力電圧, V_i は入力電圧を表している。AD9851 から生成される信号の電圧は約 800 mVpp であったため、これを 4 倍に増幅し約 3.2 Vpp の信号を導電布に印加した。計測電極にて計測される信号は 9 倍に増幅している。増幅に使用するオペアンプは AD817³を使用した。信号整流回路では、ノイズ除去、および AD 変換を行うためのアナログ信号の整流、平滑化を行った。整流にはダイオードを使用し、平滑化には RC 積分回路によるローパスフィルタ(図 6.4)を使用した。EIM では電流の印加および電圧の計測を行う電極を順次切り替える必要があるが、電極の数だけ波形発生器を用意するのは困難である。そこで印加電極および計測電極の切り替えのため、マルチプレクサ (CD74HC4067⁴) を使用した。印加電極の切り替えを行うマルチプレクサをマルチプレクサ A、計測電極の切り替えを行うマルチプレクサをマルチプレクサ B と呼ぶ。マルチプレクサ A は波形発生器 信号増幅回路に、マルチプレクサ B は 信号増幅回路に接続した。また、オペアンプを駆動させるための電源として、1.5 V 乾電池を 4 個直列に繋いだものを 2 つ用意し、それぞれ 6 V のプラス電源、マイナス電源とした。

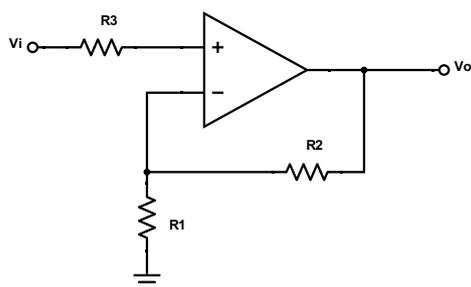


図 6.3 非反転増幅回路

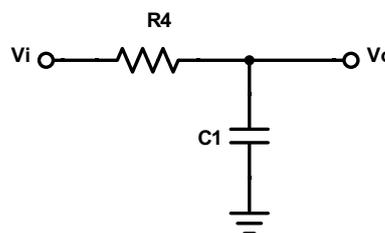


図 6.4 RC 積分回路によるローパスフィルタ

6.3.2 センシングの流れ

mbed によって波形発生器を制御し、200 kHz, 2.0 Vpp の sin 波を発生させる。波形発生器により発生させた sin 波は電圧が小さいため、信号増幅回路により 6 Vpp に増幅したのち、マルチプレクサ A を通して 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

²<https://www.analog.com/jp/products/ad9851.html>

³<https://www.analog.com/jp/products/ad817.html>

⁴<http://www.ti.com/jp/lit/ds/symlink/cd74hc4067.pdf>

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。計測した電圧の信号は微小であるため、信号増幅回路を用いて増幅させる。増幅された信号は、信号整流回路内のダイオードにより整流した後、ローパスフィルタを通し交流成分を除去する。整流後の信号は mbed のアナログピンに接続されており、mbed 内蔵の 12 ビット AD コンバータにて AD 変換した値を取得する。mbed が読み取り可能な電圧の範囲である 0~3.3V の値を AD コンバータにより 0~4095 の値に変換する。変換した値は USB シリアル通信により、PC に送信される。1 組の印加、計測電極の組合せにおいて 50 サンプルの電圧を計測する。

以上を全ての印加電極、計測電極の組合せにて行い、得られた電圧データを 1 フレーム分のデータとする。電極数を n とすると 1 フレームあたり $nP_2 \times 50$ サンプルの電圧データを用いてタッチ認識を行う。例えば、電極を 4 つ取り付けた場合には、 ${}_4P_2 = 12$ 通りの組合せになるため、1 フレームあたり $12 \times 50 = 600$ サンプルの電圧データが得られる。

6.4 タッチ認識ソフトウェア

得られた電圧データを用いて機械学習を行うことにより、タッチ位置認識を行う PC 上のソフトウェアを実装した。タッチ位置認識のために、タッチ位置をラベルとした教師あり学習を行う。PC は MacBook Pro (13-inch, 2019) を使用した。本ソフトウェアの実装には Python 3.7.4 を使用した。機械学習を行う Python ライブラリとして scikit-learn を使用した。

タッチ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る。1 フレーム分の電圧データを用いてタッチ位置の学習および認識を行う。学習フェーズでは、タッチ位置の認識に使用する学習データの収集および機械学習モデルの学習を行う。認識フェーズでは、学習フェーズにて学習済みのモデルにテストデータを与えることにより、タッチ位置の認識結果を得る。

学習フェーズではまず、タッチ位置の認識を行いたい布上の点をタッチしたときおよびノートタッチ状態のときの電圧データを学習データとして収集する。ハードウェアからシリアル通信により送られてきた電圧データを保存する。1 つのタッチ位置において 20 フレーム分の電圧データを収集する。電極数を n 、タッチ位置の種類を p とすると、 $nP_2 \times 50 \times 20 \times (p + 1)$ サンプルの電圧データが学習データとなる。

学習データの収集が完了すると、機械学習モデルの学習を行うためにデータの前処理を行う。得られた学習データにて、ノートタッチ状態における 20 フレーム分のデータの各次元ごとの平均値 m_l を求めた。学習データのすべての要素に対して各次元ごとの m_l を引いた値を特徴量とした。特徴量を各次元ごとに平均 0、分散 1 になるように標準化を行った。変換前のデータに外れ値が存在した場合、標準化が上手くいかない可能性があるため、各次元ごとのデータの四分位点を用いて標準化を行う scikit-learn の RobustScaler を用いた。RobustScaler では、標準化前のデータを x, x の第 1, 2, 3 四分位点をそれぞれ q_1, q_2, q_3 とすると、標準化後のデータ s は式 6.2 で表される。

$$s = \frac{x - q_2}{q_3 - q_1} \quad (6.2)$$

また認識フェーズにおいて再び標準化を行うため、各次元の四分位点の値を記憶しておく。

標準化した特徴量を用いて学習を行う。機械学習のモデルは SVM を用いた。タッチ位置の分類を行うために、C-SVC を用いた。SVM のハイパーパラメータを最適化するためにグリッドサーチを行う。事前に設定しておいたハイパーパラメータの候補から全ての組み合わせの学習器を構築し、最も認識性能が高いものを最適なパラメータとする。グリッドサーチを行うパラメータは、C-SVC のコスト (C)、カーネル関数に何を使用するかおよび各カーネル関数の引数である。C は (1, 10, 100, 1000) を候補として設定した。カーネル関数として、線形カーネル (linear)、放射基底関数 (rbf)、多項式関数 (poly)、シグモイド関数 (sigmoid) の 4 つを候補として選んだ。rbf カーネルの引数である γ は (0.001, 0.0001)、poly カーネルの引数である α は 0、 d は (2, 3, 4)、sigmoid カーネルの引数である θ は 0、 γ は (0.001, 0.0001) とした。グリッドサーチを行うために学習データを 5 分割した。このとき、各ラベルのデータ数が同じになるように分割を行った。このうち 4 個のデータを用いてモデルを学習させ、1 個のデータを検証データとして交差検証を行うことにより、ハイパーパラメータの最適化を行った。

認識フェーズではまず、キャリブレーションとしてノータッチ状態のデータを 20 フレーム分収集し、各次元ごとに平均値 m_t を求める。ノータッチ状態および各タッチ位置をタッチした状態での電圧データをテストデータとして収集し、1 フレームごとに要素から各次元ごとの m_t を引き、学習フェーズにて記憶した四分位点の値を使用して標準化を行う。標準化した特徴量を学習済みモデルに与えることにより、タッチ位置の認識を行う。

第7章 評価実験

第6章にて開発したプロトタイプを用いたタッチの認識精度を評価する実験を行った。指先一本でのタッチ位置の認識精度および導電布上に乗せた手の形状の認識精度を評価する2種類の実験を行った。本章ではそれぞれの実験について述べ、その結果を示す。

7.1 実験1: 布を平面に置いた状態にてタッチした場合のタッチ位置の認識精度を評価する実験

導電布を机平面に置いた状態にて、被験者が布上をタッチした位置の認識を行う。本実験での認識するタッチ点の数は9点とした。

実験には4人の被験者に協力してもらった。被験者は全員が男性であり、平均年齢は23.3歳であった。

7.1.1 実験機器

第6章にて述べた布型タッチインタフェースのプロトタイプを使用した。伸縮導電布の大きさは、15 cm × 15 cmとした。マルチプレクサのピンにジャンパワイヤを接続し、鱗口クリップを電極として導電布周囲に取り付けた。電極数は8個とした。

7.1.2 実験内容

本実験における電極の取り付け位置および導電布上のタッチ点を図7.1に示す。導電布の四隅から各辺に対して5 cmの位置に電極を取り付けた。すなわち、導電布の各辺ごとに2個、計8個の電極を取り付けた。タッチ点は5.2節における予備実験と同様に9点とした。9点のタッチ位置はすべて右手人差し指でタッチしてもらった。

以下に実験手順を示す。被験者は、布型タッチインタフェースのプロトタイプが置かれた机の手前にある椅子に座った状態で待ってもらった。実験者が実験用プログラムを実行すると学習フェーズが開始される。学習フェーズではまず、ノータッチ状態の電圧データを20フレーム収集し、学習データとした。その後、PCのモニタ上に順番に表示される番号のタッチ位置を被験者にタッチしてもらった。1点のタッチ位置ごとに電圧データを20フレーム収集し、学習データとした。9点すべての電圧データの収集が終わると、学習モデルの構築が行われ、その後認識フェーズが開始される。

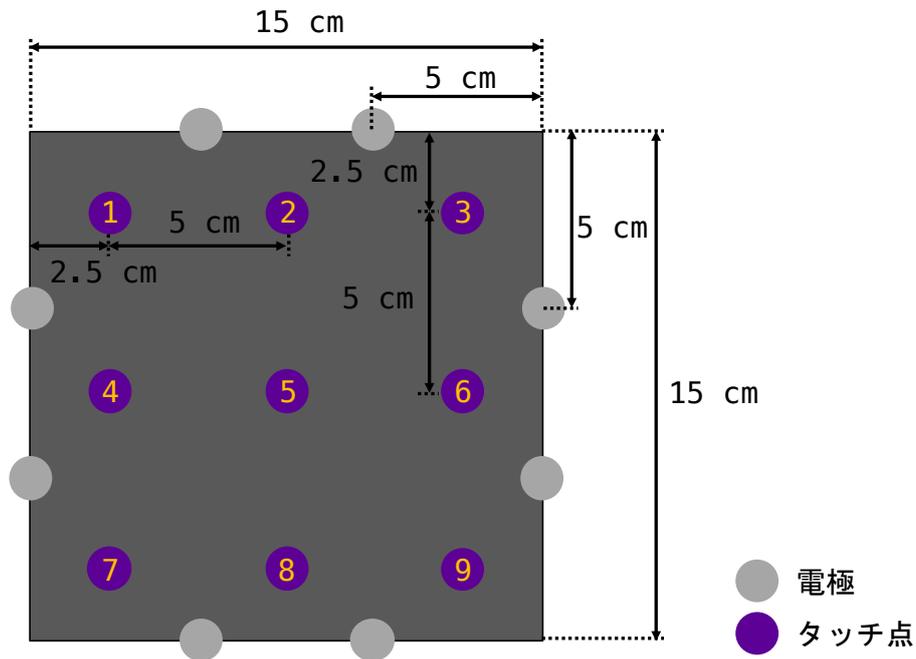
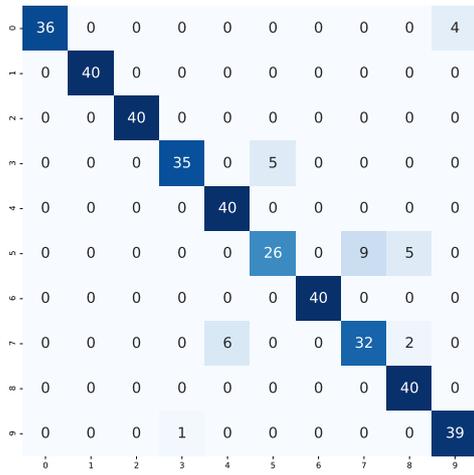


図 7.1 実験 1 における電極の取り付け位置，導電布上のタッチ点を示した図。

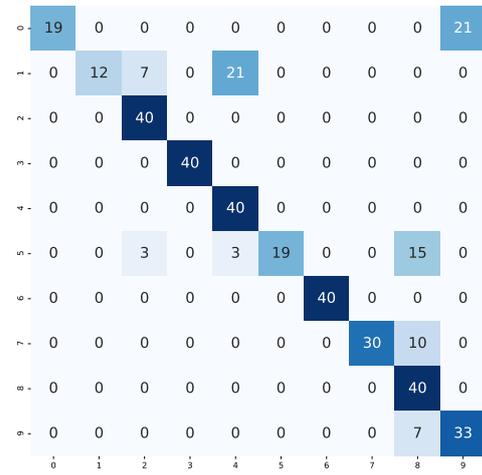
認識フェーズではまず，キャリブレーション用のデータとしてノータッチ状態のデータを 20 フレーム分収集した．その後，PC のモニター上にランダムな順序にて，ノータッチまたはタッチ位置の番号が表示される．被験者には，ノータッチと表示された場合には導電布から手を離してもらい，番号が表示された場合には対応する導電布上の位置をタッチしてもらった．1 回のタッチ/ノータッチにおいて電圧データを 20 フレーム収集した．ノータッチ状態およびすべてのタッチ位置での電圧データ収集を 1 セッションとし，連続して 2 セッション行ってもらった．つまり，9 点のタッチ位置およびノータッチ状態の電圧データをそれぞれ 40 フレーム分収集しテストデータとした．

7.1.3 実験結果

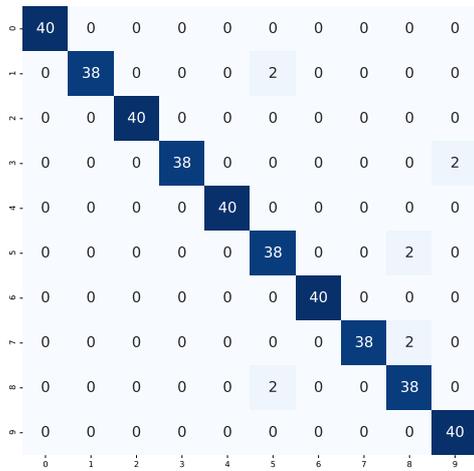
9 点のタッチ位置およびノータッチ状態の計 10 クラスの SVM による認識精度は平均 90.9% (SD=7.6) であった．被験者ごとの混同行列を図 7.2 に示す．各混同行列のラベルはタッチ点を表しており，ラベル 0 はノータッチ状態である．P1, P2 の混同行列を見ると，タッチ点 5 の認識精度が低いことがわかる．これは，導電布中央であるためそれぞれの電極からの位置が遠いことから，電圧データの差が小さかったのではないかと考えられる．その他のタッチ点についても誤認識している点はいくつかあるが，その多くが隣接している点との誤認識である．



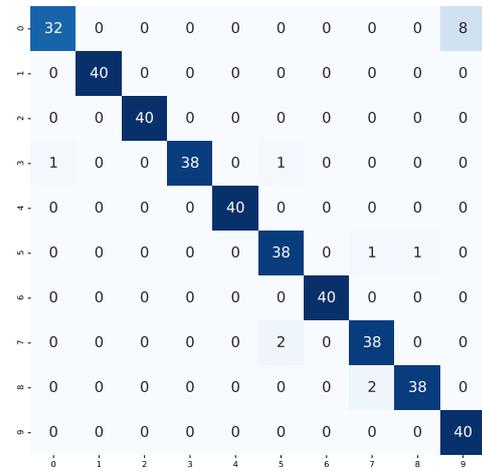
P1



P2



P3



P4

図 7.2 実験 1 の被験者ごとの混同行列。各ラベルはタッチ点を表しており、ラベル 0 はノータッチ状態である。

7.2 実験 2: 布上に置いた手形状の認識精度を評価する実験

本実験では、布上に置いた手形状の認識を行う。認識を行う手形状は、グー、チョキ、パーの3種類とした。グーは拳を握った状態で曲げた指が導電布表面に接触するようにしてもらった。チョキは曲げた指および伸ばした人差し指および中指の指先が導電布表面に接触するようにしてもらった。パーは手のひらおよび伸ばした指が導電布表面に接触するようにしてもらった。

実験1と同じ4人の被験者に協力してもらった。

7.2.1 実験機器

実験1と同様に布型タッチインタフェースのプロトタイプおよび伸縮導電布を使用した。伸縮導電布の大きさは、25 cm × 25 cm とした。マルチプレクサのピンにジャンパワイヤを接続し、鱗口クリップを電極として導電布周囲に取り付けた。電極数は8個とし、それぞれの辺に8.3 cm 間隔で取り付けた。

7.2.2 実験内容

本実験の様子を図7.3, 図7.4, 図7.5に示す。被験者は、布型タッチインタフェースのプロトタイプが置かれた机の手前にある椅子に座った状態で待ってもらった。実験者が実験用プログラムを実行すると学習フェーズが開始される。学習フェーズではまず、ノータッチ状態の電圧データを20フレーム収集し、学習データとした。その後、PCのモニタ上に順番に表示されるテキストに対応した手形状を導電布上で行ってもらった。1つの手形状ごとに電圧データを20フレーム収集し、学習データとした。3種類すべての電圧データの収集が終わると、学習モデルの構築が行われ、その後認識フェーズが開始される。

認識フェーズではまず、キャリブレーション用のデータとしてノータッチ状態のデータを20フレーム分収集した。その後、PCのモニタ上にランダムな順序にて、ノータッチまたは手形状を示すテキストが表示される。被験者には、ノータッチと表示された場合には導電布から手を離してもらい、手形状を示すテキストが表示された場合には対応する手形状を導電布上で行ってもらった。1回のノータッチ状態および手形状において電圧データを20フレーム収集した。ノータッチ状態およびすべての手形状での電圧データ収集を1セッションとし、連続して2セッション行ってもらった。つまり、3種類の手形状およびノータッチ状態の電圧データをそれぞれ40フレーム分収集しテストデータとした。

7.2.3 実験結果

3種類の手形状およびノータッチ状態の計4クラスのSVMによる識別精度は平均98.1% (SD=1.17)であった。被験者ごとの混同行列を図7.6に示す。各混同行列のラベル0はノータッチ状態、1はグー、2はチョキ、3はパーを表している。結果の混同行列から、グーとチョ

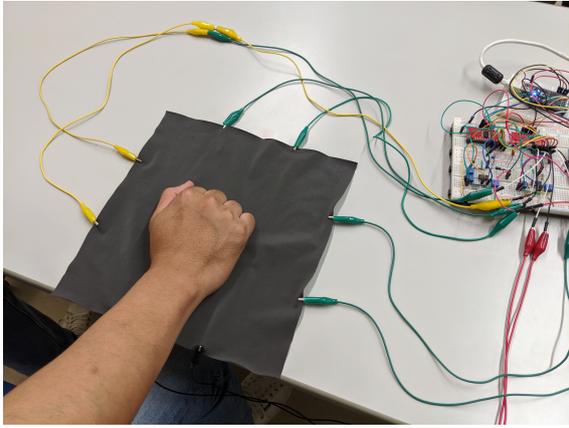


図 7.3 実験 2: 手をグーにしたとき

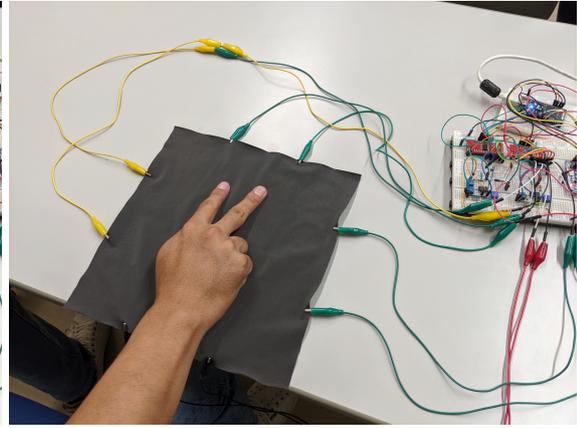


図 7.4 実験 2: 手をチョキにしたとき

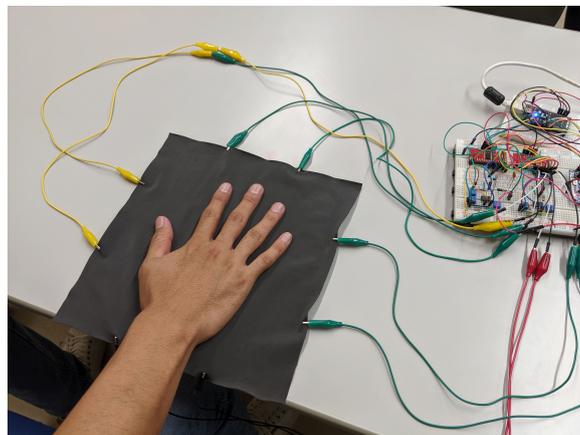
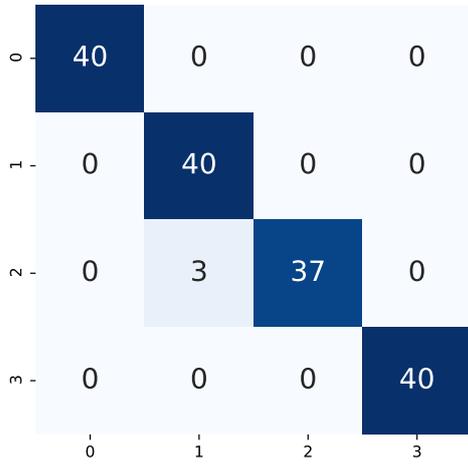
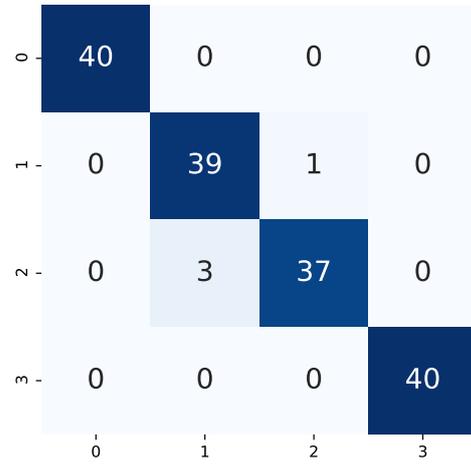


図 7.5 実験 2: 手をパーにしたとき

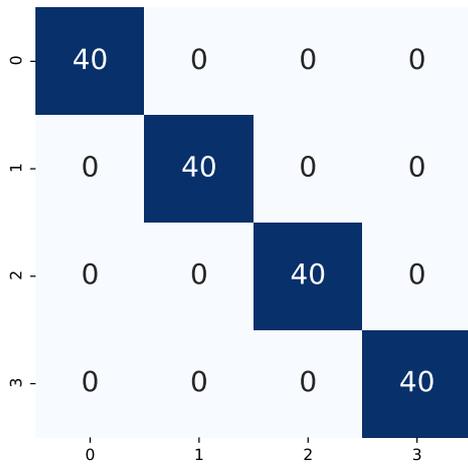
キを誤認識していることがあると見て取れる。これは、人差し指および中指以外の接触している部分が似ており、近い電圧データが得られたことによるものであると思われる。しかし、全被験者において識別精度は高く、本提案手法は指先一本でのタッチ以外のタッチ入力にも利用可能であることが示唆された。



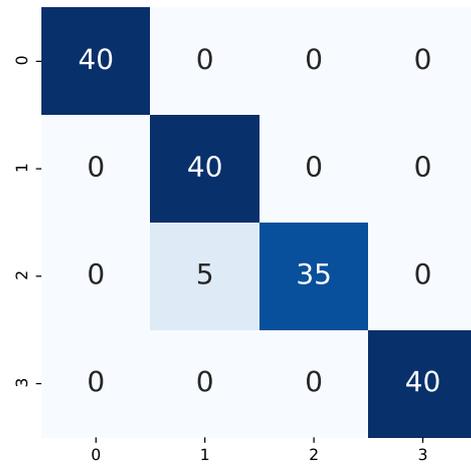
P1



P2



P3



P4

図 7.6 実験 2 の被験者ごとの混同行列. ラベル 0 はノータッチ状態, 1 はグー, 2 はチョキ, 3 はパーを表している.

第8章 今後の課題

本章では、予備実験、本手法のプロトタイプ実装および実験を通して明らかになった点について議論を行い、今後の課題を述べる。

8.1 導電布の素材や形状、取り付ける電極の数および位置の詳細な調査

本研究では、予備実験および評価実験を通して $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ の伸縮導電布を使用した場合のタッチによる電圧変化を調査し、9点のタッチ位置の認識精度の評価を行い、90.9%という精度を得た。しかし、電極から遠い位置にある導電布中央の認識率がやや低いという結果が得られた。この改善案として、今回のプロトタイプでは導電布の周囲だけに電極を取り付けたが、導電布中央やその他の位置に取り付けることも検討している。また、円、細長い形状など様々な形状に加工した導電布を用いた場合に最適な電極の取り付け方の調査も行いたいと考えている。導電糸や複数枚の導電布を使用した布型タッチインタフェースと比較して、本手法では導電布の大きさおよび形状、電極の取り付け位置を変えることにより、多様な種類のタッチ入力モダリティの認識が可能となるという利点がある。より詳細な電極取り付け位置の調査を行い、本手法を用いた布型タッチインタフェースのデザインスペースについて定義を行いたいと考えている。

8.2 環境ノイズによる影響の調査および対策

本手法ではEIMを用いたセンシングを行っているが、アナログ信号を用いたセンシングの一種であるため、PCのディスプレイやその他電子機器、蛍光灯の光などから生じるノイズの影響を受けてしまう。これにより、タッチ認識が不安定になってしまう。今回開発した布型タッチインタフェースのプロトタイプでは、ノイズ除去のため信号整流回路上にローパスフィルタを設けているが、ノイズの影響を完全に排除できていない。今後の課題として、回路を基板上に実装すること、および電極取り付けの配線をまとめることにより、ノイズの影響を受けにくくするように設計を行いたいと思っている。ノイズの低減が可能になれば、より高解像度なタッチセンシングが可能になるだけでなく、1フレームあたりのデータ数の削減に繋がり、高速なセンシングが可能になると考えられる。

8.3 ハードウェアの小型化および無線化

今回開発したプロトタイプハードウェアの実装は、ブレッドボード上の実装になっているため、ウェアラブルデバイスとしての利用は困難である。ハードウェア実装に使用した部品は簡素なものであるため、前節の環境ノイズ低減のための基板化を行うことにより、小型化可能である。また、PCとのUSBケーブルによる接続を行っているが、Bluetooth接続可能なマイコンを用いることにより、無線化を行いたいと考えている。タッチ認識をスマートフォンやその他のデバイスに反映させることにより、多様なシチュエーションにて利用可能になると考えられる。

一方で、電源の供給の問題がある。本プロトタイプでは、マイコンである mbed の駆動のために PC からの USB 給電を使用し、波形発生 IC およびオペアンプの駆動のために電池を電源として使用している。これらを駆動させるためにバッテリーを搭載したプロトタイプの設計を行いたいと考えている。しかし、これはハードウェアの小型化とトレードオフの関係にあり、Bluetooth 接続にした場合にもそのための電力が必要となる。そのため、低電圧で駆動可能なマイコンの使用、および低電圧信号を用いて EIM によるセンシングが可能であるかどうかの調査を検討する必要がある。

8.4 多様なタッチセンシングの実現

本論文では、布上の離散的なタッチ位置および手形状の認識のみを行った。マルチタッチ（複数本指でのタッチ）やスライドなどの連続的な動きのセンシングを可能にしたいと考えている。連続的な動きのセンシングに関しては、複数点において離散的なタッチを行ったときのデータを使用して、機械学習の回帰モデルを使用した学習をすることにより、布上の連続的なタッチトラッキングが可能になるのではないかと考えている。これにより、ラップトップ PC に備え付けられているタッチパッドを繊維素材を用いて実現することができると考えられる。

また、布をつまむ、引っ張るなどの繊維素材であることからできるジェスチャの認識を可能にすることにより、本提案手法の有用性を示したいと考えている。

第9章 結論

本論文では、EIM と呼ばれる技術を用いた布型タッチインタフェースを提案した。EIM は、対象物体周囲に複数個の電極を取り付け、微弱な電流を印加することにより物体の内部構造を推定する技術である。本研究では、導電布周囲に複数個の電極を取り付け、EIM によるセンシングを行い得られた電圧データを機械学習にかけることにより、タッチ位置の認識を可能とする。本手法を用いることにより、繊維素材を用いたタッチインタフェースを容易に実装可能である。

本論文では、提案手法を実現するために、異なる導電布、印加する交流信号の周波数、電極の取り付け位置ごとにタッチによる電圧変化を測定し、導電布における EIM によるセンシングが可能であるかどうかを調査した。この調査に基づき、提案手法のプロトタイプとなるハードウェアおよび PC 上のソフトウェアを実装した。さらにこのプロトタイプを用いて、タッチ位置および手形状の認識精度を評価する実験を行った。実験の結果、9 点のタッチ位置の認識精度は 90.9%、3 種類の手形状の認識精度は 98.1%であった。今後の課題として、環境ノイズに頑強な回路の実装を行うことが挙げられる。また、導電布上のなぞりのトラッキングや複数本の指によるマルチタッチなど、より多様なタッチモダリティの認識を可能とすることを目指す。

謝辞

本研究を進めるにあたり，高橋伸准教授，志築文太郎准教授には多くのご指導をいただきました。心から感謝いたします。特に高橋伸准教授には，実装に関するアドバイス，論文の書き方など研究活動において必要なことを一から教えていただきました。重ねて感謝いたします。

インタラクティブプログラミング研究室の皆様には，研究における様々なお支援をいただきました。特に UBIQUITOUS チームの皆様には，ゼミ，実装方針の相談，論文執筆における添削など多くのお支援をいただきました。UBIQUITOUS チームは居心地が良く，3年間非常に楽しい研究生生活を送れたと感じています。ここに感謝いたします。

また，私の生活を支えてくださった友人，学生生活にてお世話になった皆様にお礼申し上げます。

最後に，私の成長を見守り，学生生活を支えてくださった両親，家族に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Irene Posch, Liza Stark, and Geraldine Fitzpatrick. etextiles: Reviewing a practice through its tool/kits. In *Proceedings of the 23rd International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '19, pp. 195–205, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [2] R L Hadimani, D Vatansever Bayramol, N Sion, T Shah, Limin Qian, Shaoxin Shi, and E Siores. Continuous production of piezoelectric PVDF fibre for e-textile applications. *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 7, p. 075017, 2013.
- [3] Hiroaki Jinno, Kenjiro Fukuda, Xiaomin Xu, Sungjun Park, Yasuhito Suzuki, Mari Koizumi, Tomoyuki Yokota, Itaru Osaka, Kazuo Takimiya, and Takao Someya. Stretchable and waterproof elastomer-coated organic photovoltaics for washable electronic textile applications. *Nature Energy*, Vol. 2, No. 10, p. 780, 2017.
- [4] 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.
- [5] Narjes Pourjafarian, Anusha Withana, Joseph A. Paradiso, and Jürgen Steimle. Multi-touch kit: A do-it-yourself technique for capacitive multi-touch sensing using a commodity microcontroller. In *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 1071–1083, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 伊藤直史. 電気インピーダンストモグラフィの原理と応用. 計測と制御, Vol. 56, No. 11, pp. 827–832, 2017.
- [10] Yang Zhang and Chris Harrison. Tomo: Wearable, Low-Cost Electrical Impedance Tomography for Hand Gesture Recognition. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 167–173, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [11] Yang Zhang, Robert Xiao, and Chris Harrison. Advancing Hand Gesture Recognition with High Resolution Electrical Impedance Tomography. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 843–850, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Sang Ho Yoon, Luis Paredes, Ke Huo, and Karthik Ramani. Multisoft: Soft sensor enabling real-time multimodal sensing with contact localization and deformation classification. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 2, No. 3, September 2018.
- [15] Yutaro Suzuki, Kodai Sekimori, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Touch sensing on the forearm using the electrical impedance method. In *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 255–260. IEEE, 2019.
- [16] Anna Persson. Exploring textiles as materials for interaction design. *Ph.D. dissertation, University of Borås*, 2013.
- [17] Jacquard by google - levi's®. <https://atap.google.com/jacquard/collaborations/levi-trucker>. (Accessed on 12/29/2019).

- [18] Jacquard by google - saint laurent. <https://atap.google.com/jacquard/collaborations/ysl/>. (Accessed on 12/29/2019).
- [19] Md. Tahmidul Islam Molla, Steven Goodman, Nicholas Schleif, Mary Ellen Berglund, Cade Zacharias, Crystal Compton, and Lucy E. Dunne. Surface-mount manufacturing for e-textile circuits. In *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC '17*, pp. 18–25, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [20] Leah Buechley and Michael Eisenberg. Fabric pcbs, electronic sequins, and socket buttons: Techniques for e-textile craft. *Personal Ubiquitous Comput.*, Vol. 13, No. 2, pp. 133–150, February 2009.
- [21] Alex Olwal, Jon Moeller, Greg Priest-Dorman, Thad Starner, and Ben Carroll. I/o braid: Scalable touch-sensitive lighted cords using spiraling, repeating sensing textiles and fiber optics. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '18*, pp. 485–497, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [22] 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.
- [23] N. Komor, S. Gilliland, J. Clawson, M. Bhardwaj, M. Garg, C. Zeagler, and T. Starner. Is it gropable? – assessing the impact of mobility on textile interfaces. In *2009 International Symposium on Wearable Computers*, pp. 71–74, Sep. 2009.
- [24] S. Gilliland, N. Komor, T. Starner, and C. Zeagler. The textile interface swatchbook: Creating graphical user interface-like widgets with conductive embroidery. In *International Symposium on Wearable Computers (ISWC) 2010*, pp. 1–8, Oct 2010.
- [25] Esther W. Foo, Robert Mt Pettys-Baker, Shawn Sullivan, and Lucy E. Dunne. Bi-metallic stitched e-textile sensors for sensing salinized liquids. In *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC '17*, pp. 34–37, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [26] 堀場隆広, 島上祐樹, 松浦勇. 入力と収納を兼ね備えた柔らかい入力デバイスの開発. あいち産業科学技術総合センター研究報告, No. 5, pp. 134–137, 2016.
- [27] Sang Ho Yoon, Ke Huo, and Karthik Ramani. Wearable textile input device with multimodal sensing for eyes-free mobile interaction during daily activities. *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 33, pp. 17–31, 2016.

- [28] 上田健太郎, 寺田努, 塚本昌彦. 衣服のシワを用いた入力インタフェースの性能評価. Technical Report 14, 神戸大学大学院工学研究科, 神戸大学大学院工学研究科/科学技術振興機構さきがけ, 神戸大学大学院工学研究科, 2017.
- [29] 上田健太郎, 寺田努, 塚本昌彦. 衣服のシワを用いた入力インタフェースにおける装着位置や周辺環境の影響評価. Technical Report 16, 神戸大学大学院工学研究科, 神戸大学大学院工学研究科/科学技術振興機構さきがけ, 神戸大学大学院工学研究科, 2018.
- [30] Jussi Mikkonen and Riikka Townsend. Frequency-based design of smart textiles. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 294:1–294:12, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [31] Patrick Parzer, Florian Perteneder, Kathrin Probst, Christian Rendl, Joanne Leong, Sarah Schuetz, Anita Vogl, Reinhard Schwoediauer, Martin Kaltenbrunner, Siegfried Bauer, and Michael Haller. Resi: A highly flexible, pressure-sensitive, imperceptible textile interface based on resistive yarns. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 745–756, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Liliana Borcea. Electrical Impedance Tomography. *Inverse Problems*, Vol. 18, No. 6, pp. R99–R136, 2002.
- [35] Thomas J Yorkey, John G Webster, and Willis J Tompkins. Comparing reconstruction algorithms for electrical impedance tomography. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, No. 11, pp. 843–852, 1987.
- [36] 一二三奏, 根武谷吾, 熊谷寛. ウェアラブル電気インピーダンストモグラフィに有用な胸郭形状推定法. *医療機器学*, Vol. 86, No. 5, pp. 450–458, 2016.
- [37] Eeontex conductive stretchable fabric - com-14112 - sparkfun electronics. <https://www.sparkfun.com/products/retired/14112>. (Accessed on 01/04/2020).
- [38] Eeontex pressure sensing fabric - com-14111 - sparkfun electronics. <https://www.sparkfun.com/products/retired/14111>. (Accessed on 01/04/2020).
- [39] Conductive fabric - 12"x13" ripstop - dev-10056 - sparkfun electronics. <https://www.sparkfun.com/products/retired/10056>. (Accessed on 01/04/2020).

付録A ハードウェアの回路図

本プロトタイプにて作成したハードウェアの回路図を示す。

