

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

指にてなぞることにより入力する  
単一結線識別子の設計

杉山 慎一郎

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 志築 文太郎

2018年3月

## 概要

導電性のある物質を用いて作製した識別子により、複数の情報を入力する手法および識別子の設計手法を示す。本手法は、複数本の線の組み合わせによって構成される識別子を作製し、その識別子に静電容量計測回路を単一の結線にて接続する。本手法を用いるユーザは、識別子の線のなぞり方により、複数の情報を入力できる。本研究では、ユーザが識別子に触れた際に取得される静電容量値の大きさの違いから、現在入力しているデータを識別するアルゴリズムを開発した。2つの予備実験から、線を1本集めた集合と、線を2本集めた集合を配置した識別子を設計した。ユーザはこの識別子をなぞることにより、「0」、「1」および「触れていない状態」という3種類のデータを入力できる。本研究では予備実験により導かれた設計の識別子にて5人を実験協力者とし、2つのアルゴリズムによる精度評価実験を行った。その結果、精度の高かったアルゴリズムは、平均73.0%の認識精度を示した。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	背景	1
1.2	目的とアプローチ	2
1.3	貢献	2
1.4	本論文の構成	2
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>3</b>
2.1	バーコードとQRコード	3
2.2	導電性物質を用いてユーザの接触を認識する研究	3
2.3	導電性物質を用いずにユーザの接触を認識する研究	6
2.4	提案手法の位置付け	7
<b>第3章</b>	<b>提案手法</b>	<b>8</b>
3.1	提案手法の概要	8
3.2	識別子の製作に用いた導電性物質	8
3.3	本研究にて設計した識別子	9
3.4	提案手法の特長	10
3.5	識別子の利用先	10
<b>第4章</b>	<b>予備実験1：用紙による静電容量の変化の差異に関する調査</b>	<b>11</b>
4.1	実験目的	11
4.2	実験用の回路設計	11
4.3	実験用ソフトウェア	12
4.4	実験に用いた用紙	12
4.5	実験準備	14
4.6	実験参加者および実験環境	15
4.7	実験手順	15
4.8	結果と考察	20
<b>第5章</b>	<b>識別子の設計</b>	<b>24</b>
5.1	設計した識別子の前提条件	24
5.2	案1：線と線の幅をデータとする識別子	24
5.3	案2：同時に触れられる線の本数をデータとする識別子	26

<b>第 6 章</b>	<b>予備実験 2：識別子の形状および材料の調査</b>	<b>28</b>
6.1	実験目的	28
6.2	実験用の回路設計	28
6.3	実験用ソフトウェアの実装	29
6.4	アルミニウム箔を用いた識別子の作製	32
6.5	実験準備	33
6.6	実験参加者	33
6.7	実験手順	33
6.8	結果と考察	33
6.8.1	実験結果	33
6.8.2	2案に共通の考察と追加調査	34
6.8.3	案1の識別子に対する考察	34
6.8.4	案2の識別子に対する考察	34
6.8.5	以降の実験における方針	34
<b>第 7 章</b>	<b>識別子へのデータ入力認識アルゴリズム</b>	<b>40</b>
7.1	本アルゴリズムが前提とする識別子	40
7.2	アルゴリズム1：入力途中で認識結果が表示されていくもの	40
7.3	アルゴリズム2：入力が終了してから認識結果を表示するもの	42
7.4	両アルゴリズムに共通する利点	42
<b>第 8 章</b>	<b>評価実験：識別子の入力精度調査</b>	<b>44</b>
8.1	実験目的	44
8.2	使用した回路およびソフトウェア	44
8.3	実験準備	45
8.4	実験参加者	45
8.5	実験手順	45
8.6	結果と考察	49
8.6.1	実験結果	49
8.6.2	2つのアルゴリズムに共通の考察	49
8.6.3	アルゴリズム1に関する考察	50
8.6.4	アルゴリズム2に関する考察	51
8.7	追加実験：識別子を折り返してなぞる場合の認識精度調査	51
8.8	評価実験および追加実験からの考察	52
<b>第 9 章</b>	<b>アプリケーション</b>	<b>53</b>
9.1	ペイントアプリケーション	53
9.2	イラストの情報記録アプリケーション	53
<b>第 10 章</b>	<b>議論</b>	<b>56</b>

10.1 識別子の劣化および破損に関する問題と対処法 . . . . .	56
10.2 カメラなどの機械との組み合わせによる識別子の使用範囲の拡張 . . . . .	58
10.3 円状の識別子による作成可能なアプリケーションの拡張 . . . . .	58
10.4 回路の無線化による拡張 . . . . .	59
<b>第 11 章 結論</b>	<b>60</b>
謝辞	61
参考文献	62
<b>付 録 A 実験に使用した電極および識別子</b>	<b>70</b>

# 目次

1.1	導電性物質にて作製されるセンサの例. 触れているかどうかだけでなく, 2つの電極をなぞるように触れた方向という情報が得られる. . . . .	1
2.1	DiamondTouch の仕組み. (左) DiamondTouch の構成. (右) DiamondTouch の電極膜. ユーザが触れた点と電極との距離が白い矢印にて表されている. . .	4
3.1	本研究にて提案する手法. 導電性物質にて作製された識別子に, 回路が図中の赤丸にて示した部分にて単一の線により接続されている. . . . .	9
3.2	識別子をなぞり, データ群を入力している様子. . . . .	10
4.1	CapSense の回路. (a) 回路と識別子を接続した様子. (b) CapSense の回路図.	13
4.2	それぞれの用紙. (a) 用紙 A に電極を印刷した様子. (b) 用紙 B に電極を印刷した様子. (c) 用紙 C に電極を印刷した様子. . . . .	14
4.3	本実験にて用紙に印刷した電極. . . . .	14
4.4	電極のそばに 5.0 [mm] 間隔に書き込まれた赤い点. . . . .	15
4.5	着座して用紙に触れる実験参加者. . . . .	16
4.6	机 A の外見. (a) 机の表面. (b) 机の裏面. . . . .	17
4.7	机 B の外見. (a) 机の表面. (b) 机の裏面. . . . .	18
4.8	机 C の外見. (a) 机の表面. (b) 机の裏面. . . . .	19
4.9	実験に使用した静電容量用タッチペン. ペンの頭の部分がタッチペンとなっている. . . . .	20
4.10	机 A における指による用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値. . .	21
4.11	机 A における静電容量用タッチペンによる用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値. . . . .	21
4.12	机 B における指による用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値. . .	22
4.13	机 B における静電容量用タッチペンによる用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値. . . . .	22
4.14	机 C における指による用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値. . .	23
4.15	机 C における静電容量用タッチペンによる用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値. . . . .	23
5.1	案 1 の識別子. (a) 銀ナノ粒子インクにより印刷したもの. (b) アルミニウム箔により作製したもの. . . . .	25

5.2	案1の識別子の大きさ.	25
5.3	案2の識別子. (a) 銀ナノ粒子インクにより印刷したもの. (b) アルミニウム箔により作製したもの.	27
5.4	案2の識別子の大きさ.	27
6.1	真鍋らの回路図.	29
6.2	真鍋らの回路の仕組み (1).	30
6.3	真鍋らの回路の仕組み (2).	31
6.4	鶴田らのソフトウェアを参考に実装したソフトウェア.	32
6.5	銀ナノ粒子インクにて作製された案1に触れた際の静電容量値の推移. (a) 指にて触れた場合. (b) 静電容量用タッチペンにて触れた場合.	35
6.6	アルミニウム箔にて作製された案1に触れた際の静電容量値の推移. (a) 指にて触れた場合. (b) 静電容量用タッチペンにて触れた場合.	36
6.7	銀ナノ粒子インクにて作製された案2に触れた際の静電容量値の推移. (a) 指にて触れた場合. (b) 静電容量用タッチペンにて触れた場合.	37
6.8	アルミニウム箔にて作製された案2に触れた際の静電容量値の推移. (a) 指にて触れた場合. (b) 静電容量用タッチペンにて触れた場合.	38
7.1	アルゴリズム1. (a) 2つの閾値. (b) 静電容量値が $T_{max}$ と $T_{min}$ の間を示す様子 (データ「0」). (c) 静電容量値が $T_{max}$ 以上を示す様子 (データ「1」).	41
7.2	アルゴリズム2. (a) 平均値が決まった様子. (b) すべての平均値から, 最大の平均値と最低の平均値となる値が決まった様子.	43
8.1	本実験にて使用したソフトウェア. (a) 「Experiment」をクリックする前. 図中の赤い丸の部分に「none」と表示され, 実験回数が「0」となっている. (b) 静電容量認識アルゴリズム (図は「Algorithm 1」) が動作している最中. 図中の赤い丸の部分に「Algorithm 1」と表示され, 実験回数が「1」に変わっている.	46
8.2	評価実験にて作製した識別子. (a) 銀ナノ粒子インク製のもの. (b) アルミニウム箔製のもの.	47
8.3	実験中の実験参加者.	48
8.4	アルゴリズム1を採用した際の認識精度. エラーバーは標準誤差.	49
8.5	アルゴリズム2を採用した際の認識精度. エラーバーは標準誤差.	50
8.6	静電容量用ペンに加わる力の強弱により識別子との接触面積が異なる図. (左) 識別子に静電容量用ペンを軽く触れさせている場合. (右) 識別子に静電容量用ペンを強く押し付けている場合.	51
8.7	識別子を折り返してなぞる場合にユーザが辿る軌道.	52
9.1	ペイントアプリケーションのイメージ.	54
9.2	イラストの情報記録アプリケーションのイメージ.	55

10.1	(上) 通常の識別子. (下) 酸化して色が変わった識別子. 酸化により若干茶色 くなっている. また, 上の識別子と異なり, 光を反射しなくなっている. . .	57
10.2	折り曲げにより断線した識別子. 赤い円にて囲んだ部分が断線している. . .	57
10.3	円状に作製された識別子のイメージ. 矢印のようになぞる. . . . .	58



# 第1章 序論

本章において、まず導電性を持つインク（以下、導電性インクと称）にて設計されるセンサの利点と問題点を述べる。次に本研究の目的を述べ、問題解決のためのアプローチを示す。その後、本研究の貢献を示し、本論文の構成を述べる。

## 1.1 背景

導電性インクなどの導電性のある物質（以下、導電性物質と称）を用いて、タッチセンサを簡単に作製する研究が盛んに行われている。例えば、Kawahara ら [KHC<sup>+</sup>13] は、導電性インクを家庭用のプリンタにて用紙に印刷することにより、タッチセンサを簡単に作製する手法を提案している。Kawahara らの提案した手法は、静電容量値の変化を認識する回路（以下、静電容量計測回路と称）と、導電性インクにて作製した電極を接続する。これにより、この研究はユーザが電極に触れたことを認識している。この研究を応用することにより、例えば導電性物質にて作製された複数の電極に複数本の配線を接続し図 1.1 のセンサが作製できる。このセンサは、ユーザが各電極に触れていることだけでなく、なぞる方向という複数の情報を認識するセンサが作製できる。このような、ユーザにより入力される複数の情報を認識するセンサを作製する研究は、Kawahara らの手法を参考にしたり、あるいは配線の繋げ方を工夫したりと、様々なアプローチにて行われている。

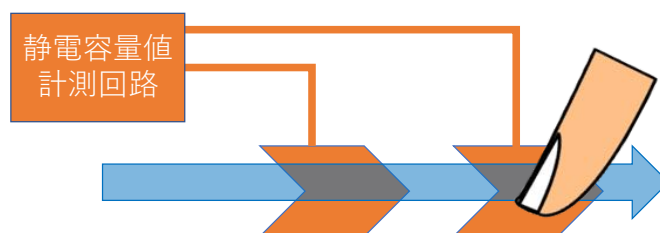


図 1.1: 導電性物質にて作製されるセンサの例。触れているかどうかだけでなく、2つの電極をなぞるように触れた方向という情報が得られる。

しかし、ユーザが触れることにより複数の情報の入力を認識するためには、基本的に複数の配線を必要とするという問題がある。センサと接続する配線が増えると、導電性物質を用いる根拠である、手軽にセンサを作製できるという利点が失われる。そのため、なるべく少ない配線にて、複数の情報の入力を認識できるセンサを設計する必要がある。

## 1.2 目的とアプローチ

本研究における目的は、静電容量計測回路と接続される線は単一であり、かつ複数の情報を入力できるセンサを実現することである。本研究は、そのためのアプローチとして、識別子<sup>1</sup>、特にバーコードの形状に着目した。本研究は、バーコードの形状を導電性センサの設計に応用し、複数の情報を入力できる識別子型のセンサ（以下、識別子と呼称）を設計する手法を提案する。提案手法は、導電性物質にて製作された識別子と静電容量計測回路を単一の結線にて接続する。本研究にて開発したアルゴリズムは、静電容量計測回路が取得した静電容量値の推移から、ユーザが現在入力している「0」や「1」といったビットデータ（以下、データと呼称）を認識する。提案手法は識別子をなぞることにより認識されたデータの集まり（以下、データ群と呼称）により、対応する情報を呼び出す。提案手法は、同じ1枚の識別子でも、ユーザの識別子のなぞり方により、例えば「1, 0, 1, 0」というデータ群や、「1, 0, 0, 1」というデータ群を入力できる。提案手法は識別子と単一の結線にて接続されているため、他の識別子に繋ぎ変えることも容易である。

## 1.3 貢献

本研究の貢献は、静電容量計測回路と接続される線は単一であるが、複数の情報の入力が可能で識別子の設計手法を提示したことである。また、本研究は設計した識別子に対応するアルゴリズムを開発した。また、本研究は複数の人物が識別子を使用するという評価実験および識別子を折り返してなぞる場合の評価実験にて、データ入力認識精度を評価した。また、本研究は複数の実験協力者に識別子を使用してもらい、この評価実験および追加実験から判明した問題への対処法を示した。さらに、本研究は複数のアプリケーションを示した。

## 1.4 本論文の構成

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。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、本研究において提案する手法の概要を述べる。第4章では、識別子を印刷する用紙の差異についての調査およびその結果を述べる。第5章では、本研究にて設計した2つの案の識別子について述べる。第6章では、識別子の最適な形状についての調査およびその結果を述べる。第7章では、本研究において入力されたデータを認識するアルゴリズムを述べる。第8章では、識別子をなぞった際の認識精度の評価実験およびその結果を述べる。第9章では、本研究にて示した識別子を用いたアプリケーション例を示す。第10章では、本研究にて示した識別子に残る問題点とその対処法および提案手法の拡張性について議論する。第11章では、結論および今後の課題を述べる。また付録では、本研究にて行った実験にて印刷した識別子を示す。

---

<sup>1</sup>別途に用意した読み取り装置により、情報を読み取ることのできる記号の総称。

## 第2章 関連研究

提案手法と関連する研究としては、まず形状を参考にしたバーコードと、バーコードと同じく有名な識別子であるQRコードが挙げられる。また、提案手法は、導電性物質にて作製された識別子にユーザが触れた際の静電容量値の変化を計測することにより、その入力を認識する。そのため、提案手法のように導電性物質を用いて、物体に対するユーザの接触を認識する研究も関連している。さらに、ユーザの接触を認識するのに導電性物質を用いない研究も関連している。本章では、それぞれの研究について述べ、提案手法の位置付けを示す。

### 2.1 バーコードとQRコード

バーコードは、縞状の線を複数本配置し、その太さによって数値や文字を表している。この手法はバーコードリーダにてバーコードを読み取ることにより、記載されたデータを認識している。またバーコードと並び有名な識別子として、QRコード [長屋 96] がある。QRコードは、バーコードを二次元に拡張した、縦横に情報を持つ識別子である。この手法はスマートフォンなどの情報端末に内蔵されているカメラによってQRコードの情報を読み取り、情報端末内に搭載されたQRコード認識アルゴリズムにてデータを認識している。

### 2.2 導電性物質を用いてユーザの接触を認識する研究

導電性物質を用いてユーザの接触を認識する研究は数多くなされている。例えば、第1章にて示した Kawahara ら [KHC<sup>+</sup>13] の研究は、導電性インクによって印刷された電極と、静電容量計測回路を接続することにより、指が電極に触れたことを認識する手法を提案している。また、DiamondTouch [DL01] は、静電容量を用いたタッチパネルを作製する手法を提案している。この研究にて提案するタッチパネルは、図 2.1 左に示す構成である。この研究の電極膜の部分には、図 2.1 右のように、複数の電極が配置されている。この研究は、ある点に触れた際の各電極間の静電容量値の違いを利用し、触れた点と電極との距離を推定することにより、触れた点を特定している。Olberding ら [OGT<sup>+</sup>13] は、用紙の中央に静電容量計測回路と繋がる線をまとめて配置し、そこから伸びるように導電性インクにて印刷された電極を複数配置する手法を提案している。この研究は、用紙の中央に配線がまとめられているため、使用目的に応じて用紙の端を切断することができる。Electrick [ZLH17] は、導電性物質にて作製された電極を二次元上に配置し、電極に電流を流した際に電極間に形成される磁場の変化を利用することにより、電極を貼り付けている物体のどの部分が触れられたのかを認識して

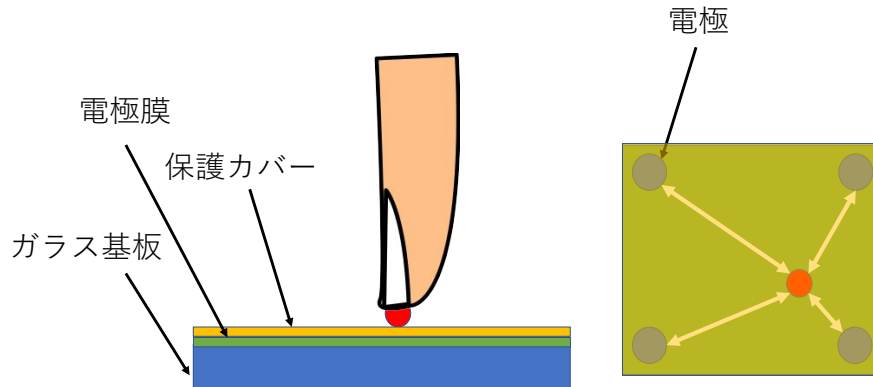


図 2.1: DiamondTouch の仕組み. (左) DiamondTouch の構成. (右) DiamondTouch の電極膜. ユーザが触れた点と電極との距離が白い矢印にて表されている.

いる. Touché [SPH12] や Botanicus Interacticus [PSLS12] は, 電極に手が触れた際に生じる静電容量により変化する周波数特性を, 掃引信号およびフーリエ変換にて解析することにより, 電極への触れ方を認識している. Holleis ら [HSP+08] は, 衣服上に縫い付けた導電繊維を電極とした静電容量方式のタッチセンサを提案している. Extension Sticker [KM14] は, 導電性インクを用いて製作された縞模様のシールを静電容量式タッチパネルに貼り付けることにより, 画面外に操作を拡張する手法である. この研究は 3D プリンタによって印刷する物体にも応用できる [KM16]. また, モバイル向けの VR ゴーグルに適用することにより, モバイル向け VR ゴーグルのタッチ範囲を拡張することもできる [KM15]. 加藤ら [加藤 14] は, 静電容量式タッチパネルに対し, 導電性インクを印刷した用紙を用いて, 複数の場所にタッチイベントを発生させる (以下, マルチタッチと呼称) 手法を提案している. この研究は, 用紙に複数の電極と, 電極同士を繋げる線を印刷する. この研究において, 電極同士を繋げる線は, 静電容量タッチパネル上に用紙を配置して通電させても, 触れていることを認識されない細さとなるよう設計されている. これにより, 静電容量タッチパネル上に配置された用紙のいずれかの電極にユーザが触れると, すべての電極が通電し, マルチタッチが発生する.

Kawahara ら [KHC+13] と同様の手法を用いて, 指が触れたこと以外を入力を認識する研究は多く行われている. PrintSence [GSO+14] は, 導電性物質を印刷した用紙を円筒に貼り付けることにより, ユーザが円筒を持った際の手の握り方を認識している. Inkantatory Paper [TKN14] は, 導電性インクを用いて印刷されたセンサに, 触れることにより色が変わる機能を加えている. Hashizume ら [HSN+16] は, 2つの導電性インクにて作製された電極と誘電体によって得られる共振周波数から, センサに加えられる圧力を測定している. Konstantin ら [KBD17] は, 導電性インクを用いて作業のサポートをするツールを開発する手法を提案している. この研究は, 導電性インクにより印刷された電極層の上に, EL ディスプレイとして機

能する透明電極層と青色高輝度蛍光体を印刷している。応用例として、ユーザは用紙のある点に触れるとその点が赤く光ったり、用紙の隅に情報を表示しながら作業したりと、作業のサポートを行うツールとしてこの研究を使用できる。PyzoFlex [RGH<sup>+</sup>12] は、複数のタッチ電極を二次元に配置し、これを piezo 素子と組み合わせることにより、ユーザが触れた場所および触れた場所に加えた圧力を認識している。

3D プリンタにて印刷された物体にタッチ操作を組み込む研究がある。例えば、PrintPut [BFSV15] および 3D Folded PrintGami [DRKY16] は、3D プリンタにて印刷したオブジェクトに導電性物質にて作製した回路を組み込むことにより、タッチ認識可能な 3D オブジェクトを作製する手法を提案している。Liquido [SLD<sup>+</sup>16] は、3D プリンタなどにて印刷されたオブジェクトの傾きを検出する手法を提案している。この研究は、まず、オブジェクト中に導電性物質の回路を配置し、その回路に触れるように液体を注入する。そして、オブジェクトが傾いた際の液体の接面の変化を利用して、オブジェクトの傾きを検出している。

その他に、導電性物質を用いている研究として、Skintillates [LLW<sup>+</sup>16] がある。この研究は、触れることによってデータ入力を可能にするために、一時的に身体に貼り付けられるタイプのタトゥーの設計に導電性インクを混ぜる方法を提案している。PrintScreen [OWS14] は、石や木の葉に貼り付けられるほど小さく軽いタッチパネルを導電性インクにて作製する手法を提案している。CapSoles [MRKU17] は、導電性インクにて作製された静電容量計測回路を靴に仕込むことにより、誰がどのような床を歩いているのかを認識している。Printerface [VdZL17] は、導電性インク、蛍光体、誘電体、透明電極およびアクリル絶縁材を層状に積み重ね、再生ボタンなどのアイコンを表示できるタッチインタフェースの光り方を制御している。ShrinkyCircuits [LP14] は、ユーザが導電性インクを用いて紙に回路を描くことにより、自由な回路を設計することができる研究である。Sketch-a-TUI [WSR<sup>+</sup>12] は、紙に導電性インクを塗布することによって、静電容量式タッチパネルに載せるマーカを作製する手法を提案している。紙窓 [加藤 15] は、カードに複数の導電部を配置し、静電容量式タッチパネルに乗せることにより、各カードに対応したアプリケーションを表示している。Komoriya ら [KST15] は、特定のタスクに特化した紙上コントローラを作製する方法を提案している。この研究は、ユーザが紙に記述した図形や文字に合わせて導電性インクを塗布し、バイндаに用紙を挟むことにより使用するコントローラを提案している。

さらに、導電性インクを利用した入力装置の研究として、開発の支援に関する研究が行われている。Circuit Stickers [HVC<sup>+</sup>14] は、導電性インクを用いたプロトタイプの製作支援ツールである。この研究は、予め提示された複数の回路パーツを組み合わせることにより、知識のない人においても回路を構成することを可能にする。Foldio [OSOHS15] は、折りたたむことにより立体的な構造として自立可能な用紙に導電性インクを印刷する手法であり、その開発環境も提供している。Midas [SZH12] は、導電性物質の回路パーツの配置をサポートするツールである。本研究は、ソフトウェア上にてユーザが回路パーツを配置すると、パーツ同士の線を自動的に結ぶ。この研究を用いることにより、ユーザは配線の配置を自分自身により決定する必要がなくなる。山路ら [山路 17] は、導電性インクと紙にてタッチセンサを設計する上での設計指標を提示し、その操作認識プログラムを提供するシステムを提案した。

関連研究のうち、本研究と同様に、単一結線にて複数の入力を実装している研究がいくつか存在する。Karatasら [KG15] は、指が触れると抵抗値が変動することを利用し、単一結線にてマルチタッチを認識する手法を提案している。RootCap [TNS16] は、用紙の裏表に導電性インクにより回路を印刷する。この研究は、印刷する回路に含まれるコンデンサの大きさを変えることにより、単一結線にて複数の入力を認識している。MonoTouch [TST16] は、なぞった方向を認識できるタッチセンサを提案している。本研究において、タッチセンサの開発者は、ユーザがなぞった向きによって静電容量値の反応が非対称になるよう設計されたタッチセンサを3Dプリンタにて印刷する。これにより、本研究はユーザがどちらの方向からなぞったのかを認識している。Manabeら [MY17] は、電極をコンデンサを介して直列に接続し、各電極の静電容量値を異ならせることにより、どの電極が触れられたのかを認識する手法を提案している。

### 2.3 導電性物質を用いずにユーザの接触を認識する研究

導電性物質を用いずにユーザの接触を認識する研究は数多くなされている。その中でも特に、音響の変化を利用してユーザの接触を認識する研究が存在する。Skinput [HTM11] は、指により肌を叩いた際に生じる皮膚の振動を音響センサにより取得し、肌へ触れることを認識している。PseudoButton [HW12] は、スマートフォンのような携帯端末のマイク部分を塞いだ際に音声信号が減衰することを利用し、指によってマイクを塞ぐ動きを認識している。Touch&Activate [OST13] は、ユーザが物体に触れた際の音響周波数特性を計測することにより、物体への触れ方を認識している。TapSense [HSH11] は、ユーザがスマートフォンに搭載されたタッチパネルに触れた際に生じる音の波形を利用し、指の先端や第一関節といった触れた手の部位を認識している。Acoustic Barcodes [HXH12] は、複数の窪みがつけられた物理的な板が爪によってこすられた際に出る音を利用して、ユーザの爪が窪みを通過したことを認識している。この研究は、窪み間の幅によって複数の異なる入力を認識している。

また、光学式カメラを利用する研究も存在する。OmniTouch [HBW11] は、ユーザの肩に装着した深度カメラセンサにて手を撮影することにより、面状の物体に触れた際の手の位置を検出している。

それ以外の特徴を持つ研究も数多く存在する。例えば、TempTouch [PN13] は、ペルチェ素子に触れた際に、指の温度によってペルチェ素子の温度が上昇することを利用し、触れたことを検出している。Sugiuraら [SKW<sup>+</sup>11] は、ぬいぐるみやクッションといった柔軟な物体を入出力インタフェースとして用いるためのデバイスを開発している。SONYのMESH [SON] は、既存の物体に取り付けることにより入力インタフェース化できるツールとして開発されている。PreSenseII [RS06] は、ユーザが触れた位置を計測可能なタッチパッドに圧力センサを組み合わせることにより、タッチパッドに触れた際の圧力を認識する機能を追加している。Chanら [CG17] は、細長い磁気糸をセルに分割し、永久磁石によって各セルを分極化することにより、データを入力する手法を提案している。OpenCapSense [GPBB<sup>+</sup>13] は、電気が流れる導線へのタッチによって起こる電気の反射を観察する Time Domain Reflectometry を用い、

導線中のタッチ点を検出している。Your Noise is My Command [CMPT11] は、使用者の体をアンテナとして、コンセントや家電が発する微弱な電気を受信している。これにより、この研究はユーザが壁に触れているかどうか、また壁とユーザの距離はどの程度なのかを認識している。川畑ら [川畑 17] は、静電容量タッチパネル上にマーカを配置し、ユーザがマーカをなぞることによってデータ入力を行うことができる手法を提案している。

## 2.4 提案手法の位置付け

提案手法は、単一の結線にて、指あるいはペンによる複数のデータ入力を認識する。また、提案手法は、静電容量計測回路と識別子を 1 本の線のみにより繋げる手法である。そのため、提案手法は、ユーザが識別子を使用する場合に、作製した識別子を 1 本の線と繋げることにより、識別子を使用する環境を構築することを可能にする。提案手法は、ユーザのなぞり方により、同じ識別子でも複数の情報を認識できる。

既存の手法との差異として、バーコードや QR コードと提案手法は、想定している使用場面が異なる。提案手法はバーコードの線を複数本配置するという形状を参考にしている。しかし、提案手法はバーコードや QR コードのように、ユーザが読み取り装置を識別子に向けて情報を読み取るという使用法とは異なる。提案手法は、ユーザが物体に触れることにより得られる情報を認識するという使用法である。

複数の電極への入力を区別して認識する研究 (例: Olberding ら [OGT+13] の手法, Komoriya ら [KST15] の手法など) は、それぞれの電極に対しそれぞれ異なる線を繋げている。これに対し、提案手法は単一の線のみにて、静電容量値の違いから複数の入力を区別して認識している。DiamondTouch [DL01] は、触れた場所を特定することを目的とした研究である。一方、提案手法は触れた場所を特定せず、静電容量値から現在入力しているデータを認識している。

Karatas ら [KG15] の手法, Manabe ら [MY17] の手法, RootCap [TNS16] および MonoTouch [TST16] は、提案手法と同様に、単一結線にてユーザの接触を認識する。ただし、Karatas らおよび Manabe らの手法は電極へのマルチタッチを認識させることを目的としていたのに対し、提案手法はマルチタッチを認識せず、なぞることにより複数のデータを入力することを目的とする。また、RootCap は用紙の両面を用いていたのに対し、提案手法は用紙の表面のみを使用する。MonoTouch の形状およびなぞったことを認識する手法は、提案手法にて識別子を設計する際に参考にしている。また、Acoustic Barcodes [HXH12] が窪み間の幅によって複数の入力を認識していたのに対し、提案手法は線の本数によって複数の入力を認識する手法である。

## 第3章 提案手法

本章は、提案手法の概要、提案手法にて用いる識別子の製作に用いた導電性物質、識別子の形状および提案手法の特長について述べる。その後、識別子の利用先として期待される例を挙げる。

### 3.1 提案手法の概要

提案手法は、なぞり方により複数の種類のデータ群を入力できる識別子を設計する手法である。ユーザが識別子をなぞったことの認識は、図3.1のように、導電性物質にて作製された識別子に接続された静電容量計測回路が、識別子の静電容量値の変化を観察することによって行っている。静電容量値は、識別子に指や静電容量タッチパネル用のペン（以下、静電容量用タッチペン）を近づけた際に発生する微弱な電流によって変化する。また指や静電容量用タッチペンが識別子に触れた際の面積によっても、静電容量値は上下する。静電容量計測回路は、この変化を取得することにより、識別子に指や静電容量用タッチペンが触れているかどうかを認識している。提案手法は、この静電容量計測回路に、単一の配線にて識別子を接続している。ユーザはこの識別子のなぞり方により、「0, 1, 0, 1」や「1, 1, 1, 0」といったデータ群を入力することができる。提案手法は最終的に、ユーザへ入力されたデータ群に対応する情報を提供する。

### 3.2 識別子の製作に用いた導電性物質

本研究にて設計する識別子は、導電性物質を用いて作製されている。導電性物質はいくつも存在するが、本研究は、銀ナノ粒子インクとアルミニウム箔の2種類に絞って識別子の設計を行った。本研究にてこの2種類を用いた理由は2点ある。1点は取り扱いが簡易であるということ、もう1点は実際に識別子を作製する手法が簡易であるということである。銀ナノ粒子インクは、Kawaharaら [KHC<sup>+</sup>13] により、市販のインクジェットプリンタを用いることによって銀ナノ粒子インクを用いた回路を印刷する手法が提案されている。また、銀ナノ粒子インクを用いたいユーザは、銀ナノ粒子インクを含む基本的な印刷キットを購入することができる [エレ]。アルミニウム箔は、家庭にて調理の際に使用されるほど一般に普及している。かつアルミニウム箔は加工に特殊な技術を必要としない。そのため、本研究は、銀ナノ粒子インクとアルミニウム箔を、加工がしやすく取り扱いが簡単だと判断し、識別子の設計に用いた。



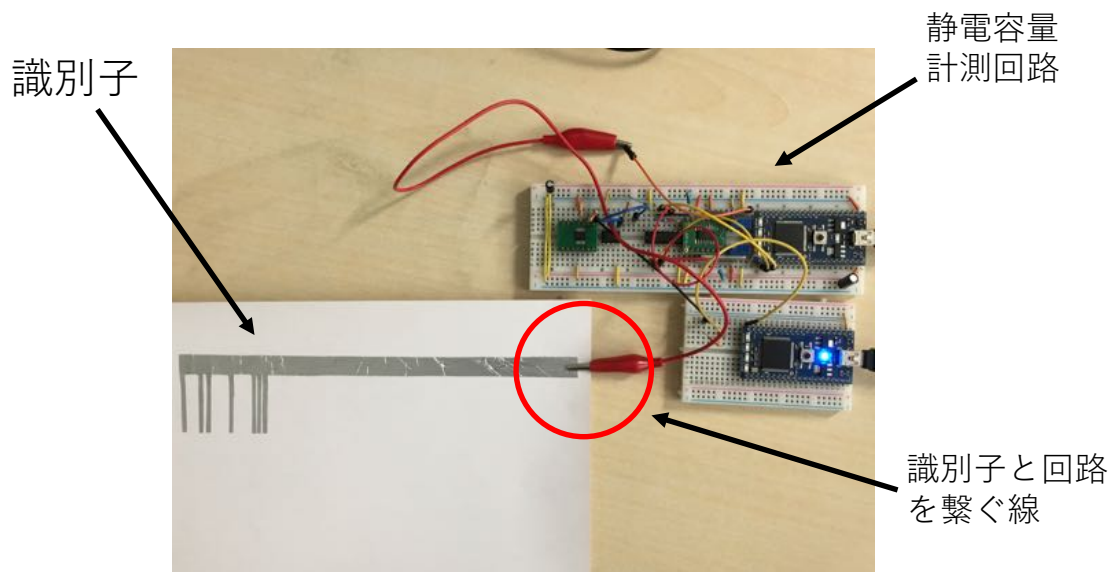


図 3.1: 本研究にて提案する手法. 導電性物質にて作製された識別子に, 回路が図中の赤丸にて示した部分にて単一の線により接続されている.

### 3.3 本研究にて設計した識別子

本研究にて設計した識別子は, バーコードの「複数の線が並ぶ」という形状を参考に設計している. 本研究にて設計した識別子は, 図 3.1 のように, 静電容量計測回路との接続部分から左方向に伸びている 1 本の線に, 複数本の線が下方に垂直に繋がった形状を前提としている. 本研究は, 単一結線にてデータ群を入力できる識別子を設計するため, 識別子全体を通電させる必要がある. そのため, この識別子は, 図 3.1 のように, 横に伸びている線を静電容量計測回路と繋げることにより通電させている. この識別子にてユーザがデータ入力を行う際は, 図 3.2 のように, 指または静電容量用タッチペンにて, 複数本の線を通過するように横へなぞる. 本研究は, 1 つ目の予備実験の結果を参考に, 2 つの形状の識別子を設計した. 本研究にて設計された識別子は, 2 つ目の予備実験より, 最終的に線の本数によって「識別子に触れていないこと」, 「識別子の小さい静電容量値を示す部分に触れていること」および「識別子の大きい静電容量値を示す部分に触れていること」という, 3 種類のデータを表現するように設計された. 本研究にて設計した識別子の形状および 2 つの予備実験については, 第 4 章, 第 5 章および第 6 章にて詳しく述べる.

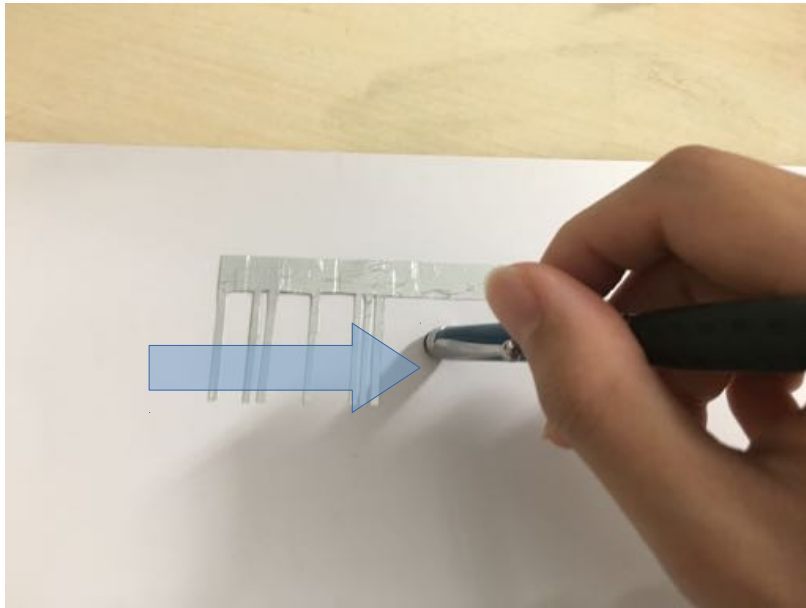


図 3.2: 識別子をなぞり，データ群を入力している様子。

### 3.4 提案手法の特長

提案手法は，図 3.1 に示すように，識別子と静電容量計測回路を繋げる線は単一であるという特長がある。第 2 章にて述べたように，従来の手法は，Olberding ら [OGT<sup>+</sup>13] の手法のように複数の線を繋げる，あるいは DiamondTouch [DL01] のように触れた場所を特定することにより，複数の入力を区別して認識している。一方提案手法は，静電容量値の変化から，現在識別子のどの部分をなぞっているのかを認識できるようなアルゴリズムを用いている。これにより提案手法は，識別子に接続されている配線が単一であり，触れた場所を特定しないにも関わらず，複数のデータの入力を区別して認識している。また，提案手法にて示すアルゴリズムは，識別子の端から端までなぞることを条件としていない。そのため，ユーザは，例えば左端から右端へなぞる，左端から中央までなぞり，折り返して左端までなぞるなど，なぞり方によって，1つの識別子にて複数の情報を入力できる。識別子へのデータ入力を認識するアルゴリズムおよびその認識精度については，第 7 章および第 8 章にて詳しく述べる。

### 3.5 識別子の利用先

提案手法の識別子は，バーコードのように用紙に印刷するあるいは貼り付けることができる。また，提案手法の識別子は，なぞる向きや長さにより，異なる情報を入力できる。そのため，提案手法は，複数の情報を入力できる識別子としての利用が期待される。アプリケーション例については，第 9 章にて詳しく述べる。

## 第4章 予備実験1：用紙による静電容量の変化の差異に関する調査

識別子の設計を行う前段階として、用紙による静電容量変化の差異を調べるための予備実験を行った。本章では、この予備実験の目的と、実験の詳細およびその結果と考察について述べる。

### 4.1 実験目的

予備実験1の実験目的は、識別子を印刷する用紙によって静電容量の変化量が異なるのかを調査することである。

第3章にて述べたように、提案手法は、静電容量値の変化を用いることによって「触れている状態」と「触れていない状態」を細かく識別することにより、識別子への入力を認識する。ここで、提案手法は、以下に示す3つの場合を考慮する必要がある。1つ目は、用紙によって静電容量値の変化に影響が及ぶ場合である。2つ目は、識別子を配置する机の材質によって静電容量値の変化に影響が及ぶ場合である。3つ目は、用紙の電極が印刷されていない部分に触れても静電容量値が大きく変化する場合である。もし、これら3つのいずれかの場合が静電容量値の変化に影響するならば、提案手法では、その変化を前提とした識別子を作製する必要がある。そのため、これらの場合による静電容量値の調査は、静電容量値の変化を細かく見る提案手法において必要なものである。

そこで、予備実験1は、用紙および実験環境の変化により静電容量値の変化に影響が及ぶかの調査、および電極を印刷していない部分に触れた場合に静電容量値の変化に影響が及ぶかの調査を目的とした。本実験にて得られた結果より、識別子を作製する方針を定める。

### 4.2 実験用の回路設計

本実験は、Arduinoの静電容量ライブラリである、CapSense [Ard] を用いた。本実験にて用いた回路を図4.1aおよび図4.1bに示す。この回路およびCapSenseの仕組みについて説明する。回路の電源がONになると、電流はまずコンデンサに流れる。しばらくしてコンデンサが完全に充電されると、コンデンサに電流が流れなくなり、Arduinoの入力ピンに電流が流れていく。CapSenseを利用したプログラムが組み込まれたArduinoは、回路の電源がONになってから、Arduinoの入力ピンに電流が流れる（コンデンサが完全に充電される）までの時

間  $\Delta t$  を指定した回数（今回は 30 回）取得する。さらに，Arduino はそれを足し合わせて積分することにより計測された静電容量値を，Arduino から PC にシリアル通信にて送信している。Arduino の入力ピンに電流が流れるまでの時間  $\Delta t$  は，回路全体のキャパシタンス  $C$  および回路全体の抵抗  $R$  により， $R \times C$  にて求まる時定数に依存している。なお，CapSense を用いた場合に出力される静電容量値は，ユーザが触れていない場合の時間を基準としてサンプリングしているため，無次元である。

### 4.3 実験用ソフトウェア

本実験では，Processing を用いて，Arduino からシリアル通信にて送信された静電容量値を PC にて受け取るソフトウェアを実装した。このソフトウェアは，PC のキーボードにてデータ記録指示を行ってから 1.0 秒後に記録を開始し，記録開始から 2.0 秒間のうちに静電容量計測回路が送信した静電容量値の平均値を出力する。本実験は，Arduino から PC へ 9600 [bps] にて静電容量値が送信されるよう設定した。使用した PC とその OS，および Processing の情報を以下に示す。

使用した PC MacBook Pro Early 2013（メモリ 8GB，2.7GHz Intel Core i5 搭載）

使用した OS Sierra 10.12.6

実装言語 Processing 3.0

### 4.4 実験に用いた用紙

本実験に用いた用紙は，三菱製紙株式会社製の NB-RC-3GR120（電極印刷後の用紙を図 4.2a に示す），三菱製紙株式会社製の NB-TP-3GU100（電極印刷後の用紙を図 4.2b に示す）およびコクヨ株式会社製の KJ-J23A4-30（電極印刷後の用紙を図 4.2c に示す）の 3 種類である。それぞれの用紙ごとの特徴およびそれらの本来の使用用途について，以下にまとめる。

**NB-RC-3GR120**（以下，用紙 A と呼称） ポリエチレン皮膜された紙の表面に銀ナノ粒子インク受容層を塗布している。銀ナノ粒子インクの印刷用として販売されている。

**NB-TP-3GU100**（以下，用紙 B と呼称） 透明プラスチックフィルムの表面に銀ナノ粒子インク受容層を塗布している。NB-RC-3GR120 と同様に，銀ナノ粒子インクの印刷用として販売されている。

**KJ-J23A4-30**（以下，用紙 C と呼称） 写真の印刷などに用いられる，ごく一般的な両面セミ光沢紙である。その他の用紙とは異なり，銀ナノ粒子インク用の印刷用として販売されているものではない。

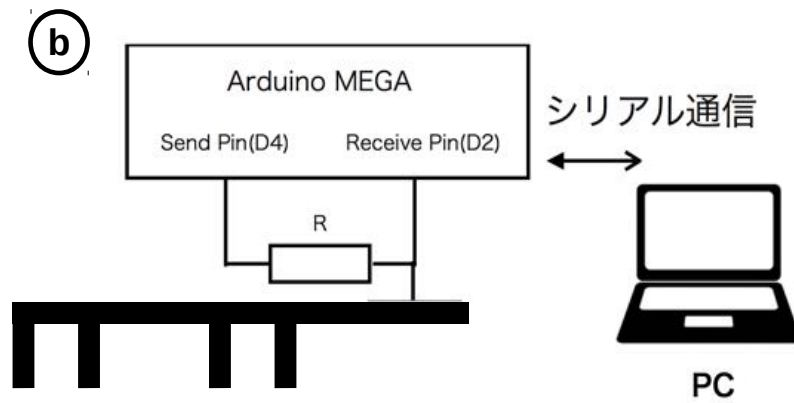
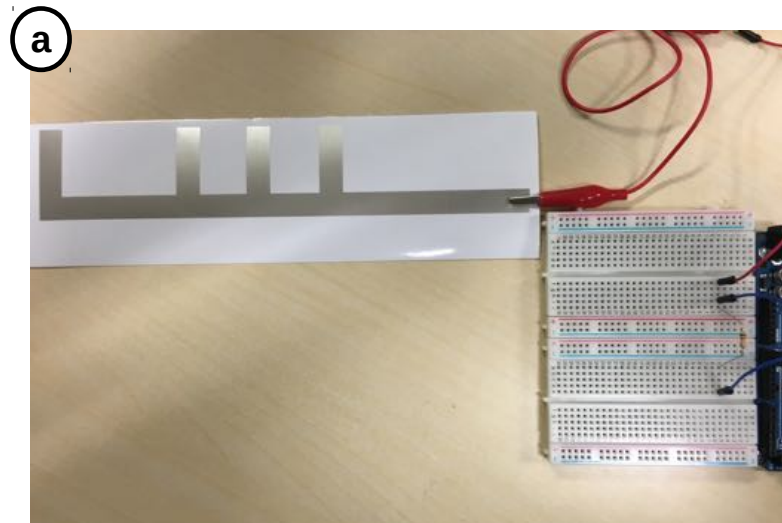


図 4.1: CapSense の回路. (a) 回路と識別子を接続した様子. (b) CapSense の回路図.

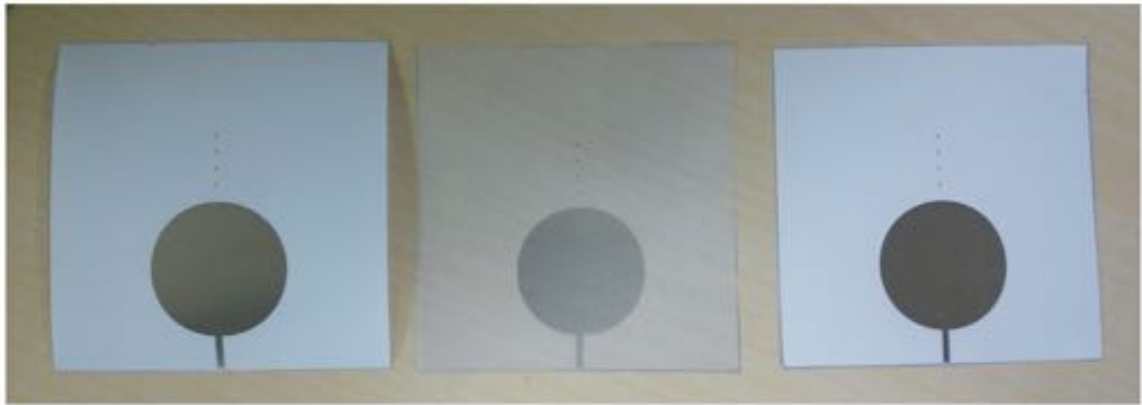


図 4.2: それぞれの用紙. (a) 用紙 A に電極を印刷した様子. (b) 用紙 B に電極を印刷した様子. (c) 用紙 C に電極を印刷した様子.

#### 4.5 実験準備

まず、実験者はそれぞれの用紙に、図 4.3 のような大きさの丸型電極を銀ナノ粒子インクにて印刷した。丸型電極とした理由は、触れる点と電極との距離を一意に定めるためである（例えば正方形の電極の場合、電極の端が一意に定まらないため、静電容量値に影響が出る可能性がある。丸型電極にすることにより、この可能性を排除した）。なお、アルミニウム箔を用いた識別子は、識別子の設計に用紙への印刷を行う過程が存在しないため、本実験においては調査を行わない。次に、実験者はそれぞれの用紙に、図 4.4 のように、ボールペンにて赤い点を電極の端から 5.0 [mm] 刻みに 20.0 [mm] まで書き込んだ。これは、実験協力者が電極の印刷されていない部分に触れる際に基準とする印である。次に実験者は、丸型電極の回路と接続される部分が用紙の端になるよう、かつ丸型電極が線対称になるように、用紙を  $100.0 \times 100.0$  [mm] の大きさに切断した。最後に、実験者は用紙および電極に触れても用紙が動かないように、用紙を両面テープにて机に固定した。

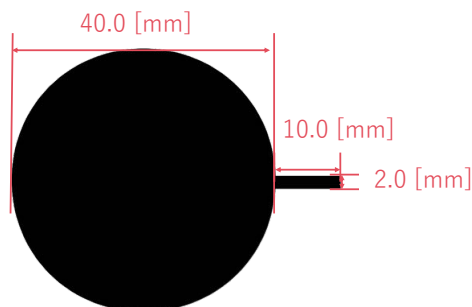


図 4.3: 本実験にて用紙に印刷した電極.

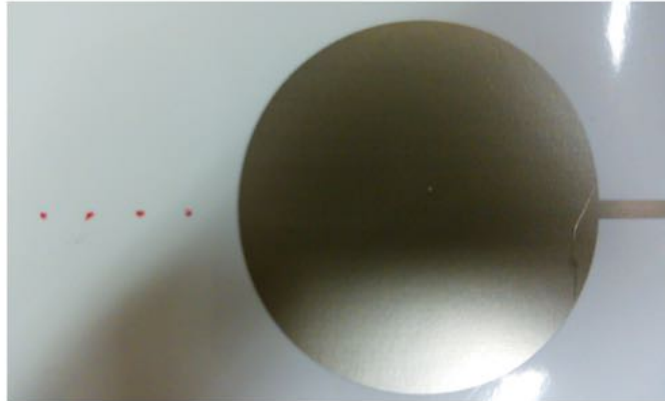


図 4.4: 電極のそばに 5.0 [mm] 間隔に書き込まれた赤い点.

## 4.6 実験参加者および実験環境

本実験の参加者は著者 1 名である。実験参加者は実験中図 4.5 のように着座した状態を保った。また、実験参加者は左手は膝上に固定し、右手にて用紙および印刷された回路に触れるようにした。

本実験は、識別子を配置する場所によって静電容量の変化に影響するののかも調査するため、(a) 背面全体に金属の支えが存在する、表面が木材にて構成された机 (図 4.6, 以下机 A と呼称)、(b) 木材と樹脂と金属のいずれも用いて構成された机 (図 4.7, 以下机 B と呼称) および (c) 背面に金属の支えが存在する、表面が樹脂にて構成された机 (図 4.8, 以下机 C と呼称) の 3 つの環境にて、同一の実験を行った。実験において、机以外の環境が変化することによる静電容量の変化が生じないように、実験参加者の服装及び姿勢はすべての環境で同一となるようにした。また、実験参加者が実験中着座する椅子も同じものを用意した。

## 4.7 実験手順

実験者は、まず、用紙に印刷された電極と CapSense 用の回路を接続し、電極を通電させた。次に、実験者は実験参加者に指にて電極に触れさせた。ここで、実験用ソフトウェアは CapSense が取得した静電容量値を記録した。次に、実験者は実験参加者に、電極に近い順から指にて赤い点に触れさせ、同様に CapSense が取得した静電容量値を記録させた。実験は、電極および赤い点に指にて触れてもらうことを 1 試行として、合計 3 枚の用紙を用い、3 つの実験環境にて 5 試行ずつ行った。次に、実験参加者は指ではなく図 4.9 のような静電容量用タッチペン (ナカトシ産業株式会社製、タッチペン付油性ボールペン黒) を用いて、同様に 5 試行を行った。

本実験により、実験参加者は合計、2 手段 (指および静電容量用タッチペン)  $\times$  3 地点  $\times$  3 枚  $\times$  5 点 (電極および赤い点 4 つ)  $\times$  5 試行 = 360 回触れた。



図 4.5: 着座して用紙に触れる実験参加者.





図 4.6: 机 A の外見. (a) 机の表面. (b) 机の裏面.



図 4.7: 机 B の外見. (a) 机の表面. (b) 机の裏面.



図 4.8: 机 C の外見. (a) 机の表面. (b) 机の裏面.



図 4.9: 実験に使用した静電容量用タッチペン。ペンの頭の部分がタッチペンとなっている。

## 4.8 結果と考察

実験結果のうち、机 A の場合を図 4.10 および図 4.11 に、机 B の場合を図 4.12 および図 4.13 に、背面の一部に金属の支えが存在する、机 C の場合を図 4.14 および図 4.15 に示す。図の縦軸は CapSense により計測された静電容量値、横軸は電極からの距離を示している。なお前述したように、縦軸はサンプリングのため無次元である。グラフより、すべての用紙における電極にて、印刷されている電極に直接触れた場合と、電極の印刷されていない部分に触れた場合は、静電容量値の変化に大きな差がある。また、用紙ごとの差、および環境ごとの静電容量値の差は特に見られない。さらに、指と静電容量用タッチペンの静電容量値を比較すると、指と静電容量用タッチペンでは、静電容量値に特に差が見られない。

この実験結果から、どの環境にていずれの用紙を用いたとしても、静電容量値は大きく変動しないとわかった。よって、以降の実験においては、3 枚の用紙のうち、銀ナノ粒子インク用に販売されており、かつ通常用の紙のように不透明である、用紙 A (NB-RC-3GR120) を用いることとした。また実験環境は、学校の机などに用いられていることが多い、背面に広く金属の支えが存在する、表面が木材にて構成された机にて実験を行うこととした。また、以降の実験は、指と静電容量用タッチペンの両方の手段を用いることとした。

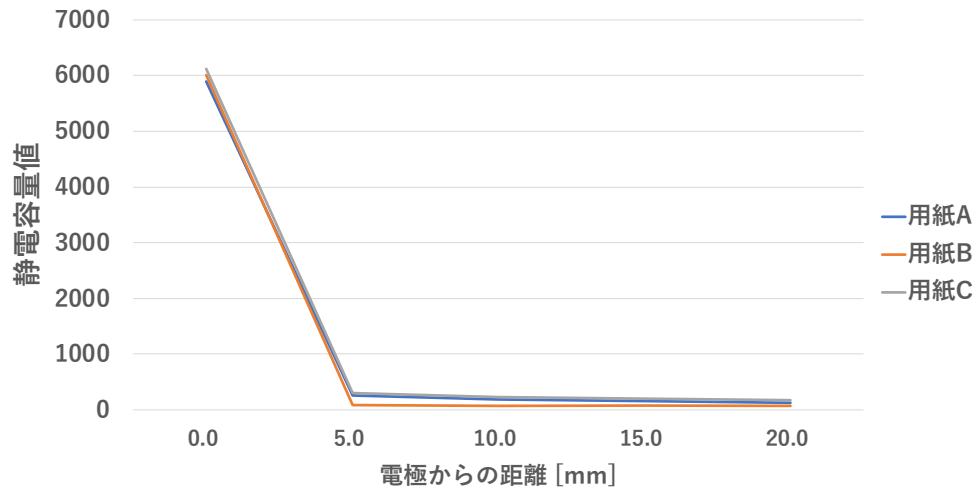


図 4.10: 机 A における指による用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値.

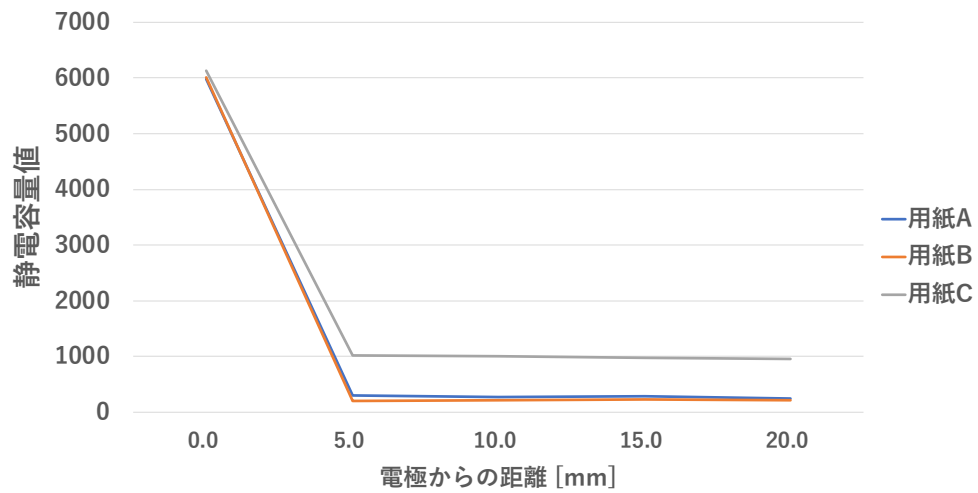


図 4.11: 机 A における静電容量用タッチペンによる用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値.

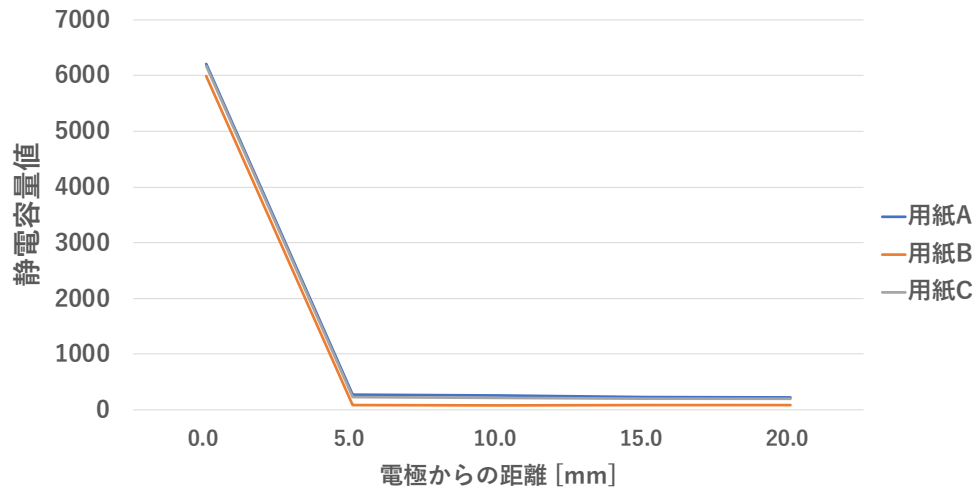


図 4.12: 机 B における指による用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値.

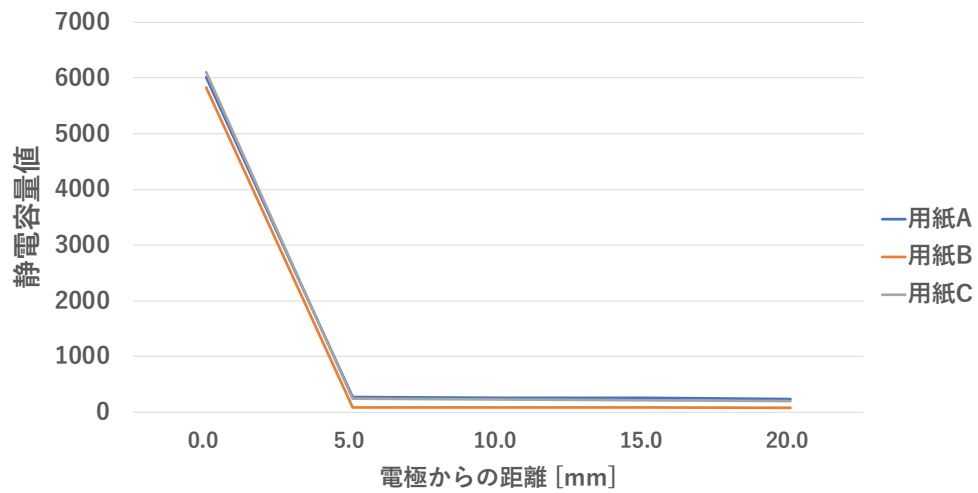


図 4.13: 机 B における静電容量用タッチペンによる用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値.

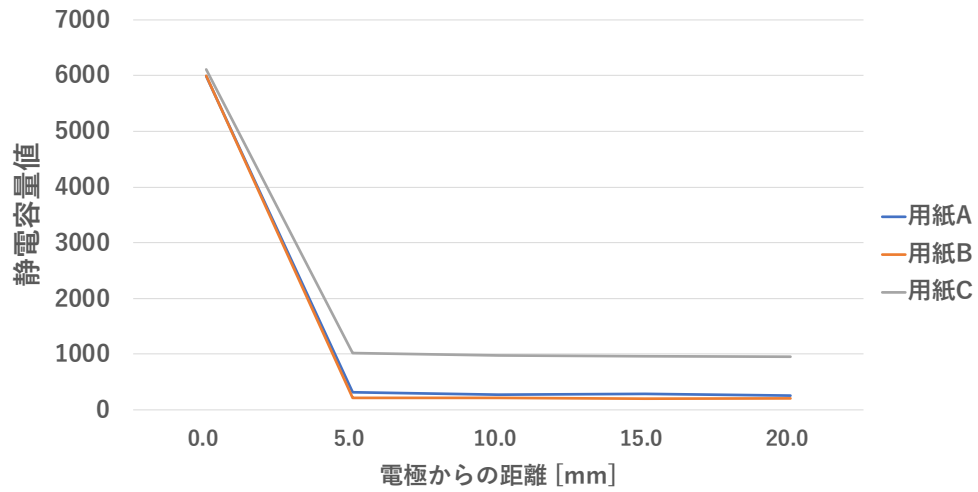


図 4.14: 机 C における指による用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値.

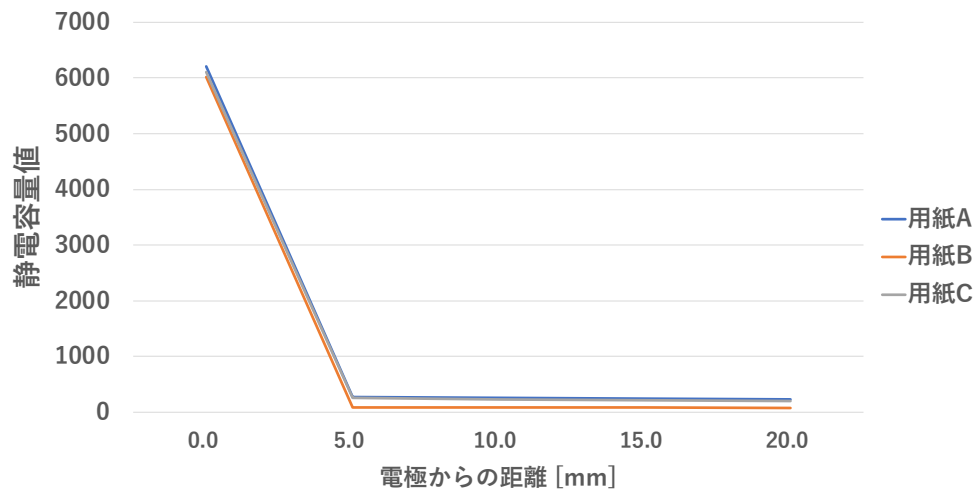


図 4.15: 机 C における静電容量用タッチペンによる用紙ごとの電極の静電容量値と用紙の静電容量値.

## 第5章 識別子の設計

本章では、本研究において設計した2種類の案に基づく識別子について述べる。

### 5.1 設計した識別子の前提条件

本研究にて設計した識別子は、第3章にて述べたように、静電容量計測回路との接続部分から左方向に伸びている1本の線に、複数本の線が下方方向に繋がった形状を前提としている。本研究は、この前提のもと、2種類の案に基づく識別子を設計した。以下、本研究にて設計した2種類の案に基づく識別子を示し、各識別子が設計時に想定している、データ入力を認識するアルゴリズムについて示す。なお、各案における識別子の大きさの設計は、静電容量用タッチペンにてなぞる場合を例に挙げて説明する。

### 5.2 案1：線と線の幅をデータとする識別子

本案は、識別子の線と線の幅をデータとして考える案である。本案は、「狭い幅をなぞった場合」、「広い幅をなぞった場合」および「識別子に触れていない場合」の3種類をそれぞれデータとする。本案は、図5.1a（銀ナノ粒子インクにて作製した場合）あるいは図5.1b（アルミニウム箔にて作製した場合）のような形状となる。

本案が想定する、データ入力を認識するアルゴリズムの流れについて述べる。本案が想定する識別子へのデータ入力を認識するアルゴリズムは、最初の線に触れ、静電容量計測回路が取得する静電容量値が大きくなった時にデータ入力開始と認識する。まず、データ入力開始後、狭い幅をなぞって通り過ぎる場合を考える。この場合、指あるいは静電容量用タッチペンが線と線の間狭い幅の部分を通過している間、静電容量値は小さくなる。次に、広い幅をなぞって通り過ぎる場合を考える。この場合、指あるいは静電容量用タッチペンが線と線の間広い空白の部分を通過している間、静電容量値は狭い幅の部分を通過する場合よりも長い時間小さくなる。このように、本案におけるデータ入力を認識するアルゴリズムは、静電容量値が小さくなる時間を計測し、静電容量値が「1」と比較して短時間小さくなった場合はデータ「0」を、「0」と比較して長時間小さくなった場合はデータ「1」を入力していると認識する。

本案の識別子の設計を図5.2に示す。本案の識別子における線の幅は、静電容量用タッチペンのペン先（6.0 [mm]）が完全に線の中に入るよう10.0 [mm]とした。また、線と線の幅のうち、狭い幅を20.0 [mm]、広い幅を50.0 [mm]とした。





図 5.1: 案 1 の識別子. (a) 銀ナノ粒子インクにより印刷したもの. (b) アルミニウム箔により作製したもの.

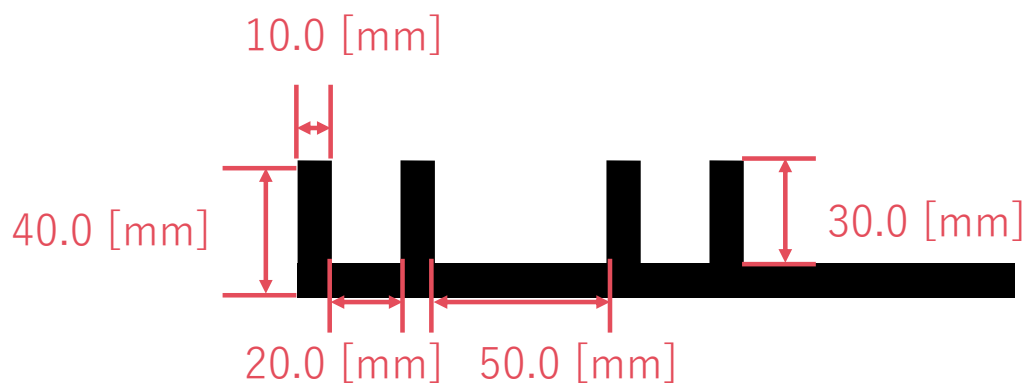


図 5.2: 案 1 の識別子の大きさ.

### 5.3 案2：同時に触れられる線の本数をデータとする識別子

本案は、識別子の線に同時に触れる本数をデータとして考える案である。本案は、ペン先の半分以下の細い線を配置し、「1本の線に触れる場合」、「2本の線に同時に触れる場合」、「3本の線に同時に触れる場合」および識別子に触れていない場合の4種類をそれぞれデータとする。本案は、図5.3a（銀ナノ粒子インクにて作製した場合）あるいは図5.3b（アルミニウム箔にて作製した場合）のような形状となる。

本案が想定する、データ入力を認識するアルゴリズムの流れについて述べる。本案が想定する識別子へのデータ入力を認識するアルゴリズムは、最初の線に触れ、静電容量計測回路が取得する静電容量値が大きくなった時にデータ入力開始と認識する。本案におけるデータ入力を認識するアルゴリズムは、静電容量値の上昇量を利用する。本案における各線はペン先よりも細いため、なぞっている場所が線上の場合、識別子とペン先が接触している幅は線の幅と同じである。静電容量値は接触する面積に影響して上下するため、データによってペン先が同時に触れる線の本数を変えることにより、識別子とペン先が接触している幅を変え、静電容量値に差をつけることができる。本案は、静電容量値が「1」と比較して小さい場合はデータ「0」を、「0」と「2」の中間を示す場合はデータ「1」を、「1」と比較して大きい場合はデータ「2」を入力していると認識する。

本案の識別子の設計を図5.4に示す。本案の識別子における細い線の幅は、ペン先の半分以下である2.0 [mm]とした。また、2本同時に触れるように構成した場合の線と線の間幅は2.0 [mm]と、3本同時に触れるように構成した場合の線と線の幅は1.0 [mm]としている。

先ほど述べたアルゴリズムについて、再度具体的な値を出して説明する。1本の線に触れる場合、ペン先の太さが6.0 [mm]なのに対し、識別子に触れている幅は2.0 [mm]となる。2本の線に同時に触れる場合、ペン先の太さが6.0 [mm]なのに対し、識別子に触れている幅は合計4.0 [mm]となる。3本の線に同時に触れる場合、ペン先の太さが6.0 [mm]なのに対し、識別子に触れている幅は合計4.0 [mm]となる。このため、静電容量用タッチペンが触れている幅は、1本の線の場合と、2本同時あるいは3本同時の場合には明確に異なる。

しかし、2本同時の場合と3本同時の場合にて、ペン先が識別子に触れている幅は同じである。ここで、2本同時の場合にはペン先の左端と右端が識別子と触れる構成なのに対し、3本同時の場合にはペン先の左端と右端に加え、中央が識別子と触れる構成になるよう識別子を設計した。本案は、この差によって2本の線に同時に触れる場合と3本の線に同時に触れる場合の静電容量値を差別化することを意図した形状である。また、線の集合から集合への幅は、ペン先よりも十分大きい、10.0 [mm]とした。



図 5.3: 案 2 の識別子. (a) 銀ナノ粒子インクにより印刷したもの. (b) アルミニウム箔により作製したもの.

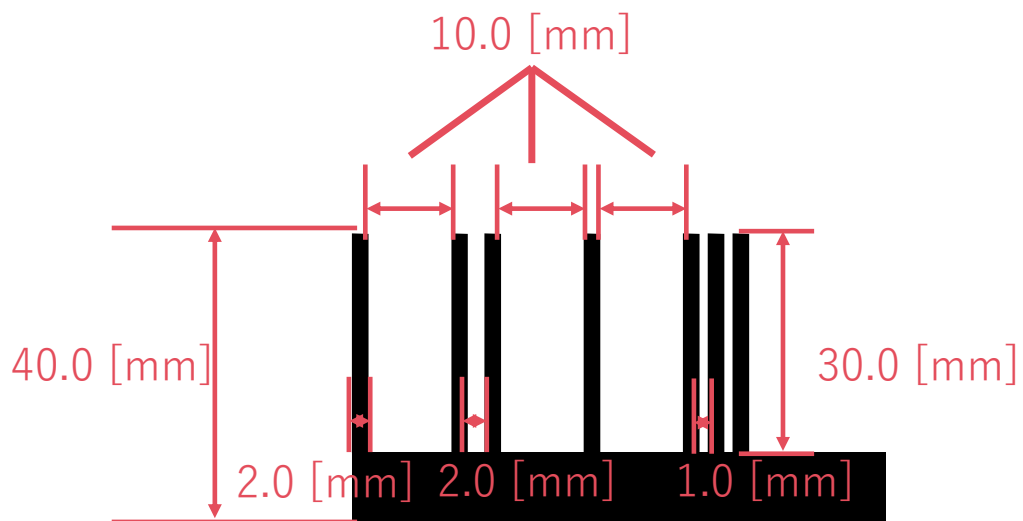


図 5.4: 案 2 の識別子の大きさ.

## 第6章 予備実験2：識別子の形状および材料の調査

本章では、2つの案の識別子を作製するのに最適な形状および材料を調査するために、2つ目の予備実験を行った。本章においては、実験の詳細およびその結果と考察について述べる。

### 6.1 実験目的

予備実験2の実験目的は、データを安定して入力できる識別子を調査することである。本実験において、データを安定して入力できる識別子とは、静電容量値の推移を観察した際に、それぞれのデータを示す静電容量値が明らかに異なる形状を示す識別子のことを指す。本実験は、まず、第5章にて設計した2つの案の識別子を、銀ナノ粒子インクとアルミニウム箔のそれぞれにて作製した。次に、作製したそれぞれの識別子をなぞり、得られた静電容量値の推移を観察することにより、設計時の構想通り、データを安定して入力できる識別子を調査した。

### 6.2 実験用の回路設計

第4章に示したCapSenseを用いた静電容量計測回路は、データの取得を指定回数繰り返し、それを積分することによって静電容量を計算する。そのため、CapSenseを用いた静電容量計測回路は触れてから静電容量値が計測されるまでの時間（反応速度）が遅いという問題がある。用紙ごとの静電容量の違いを調査した予備実験1は、反応速度の影響を受けないため、問題は生じなかった。しかし、予備実験2は、データを安定して入力できる識別子を調査するのに識別子をなぞる動作を要する。そのため、CapSenseを用いた静電容量計測回路は、反応速度が遅いため、静電容量値が「データ入力部分に触れていない状態」まで下がる前に指あるいは静電容量用タッチペンが次のデータに移ってしまうという問題が発生してしまう。

そこで、本実験は、真鍋ら[真鍋15]が提案した静電容量計測回路（以下、本静電容量計測回路と呼称）を用いる。本静電容量計測回路は、図6.1のような設計である。本静電容量計測回路の静電容量計測の仕組みについて述べる。本静電容量計測回路は、mbedを2つ用いる。また、本静電容量計測回路のoutputの部分は、mbedに接続されている。区別のため、outputと接続されたmbedをmbed A、そうでないmbedをmbed Bとする。本静電容量計測回路はPCにシリアル通信にて接続されており、PCに静電容量計測回路が取得した静電容量値を送

信している。本静電容量計測回路の説明のため、図 6.2 および図 6.3 にいくつかの波形を示す。ここで、図中の青い波形は、本静電容量計測回路に繋がれた電極に指が触れていない場合に描く波形、緑の波形は指が触れている場合に描く波形、赤い波形は本静電容量計測回路における Pulse A を表し、黒い波形は本静電容量計測回路における Pulse B を表している。本静電容量計測回路は、まず、mbed A が Pulse A を流す (図 6.2a) と、静電容量計測回路中のコンデンサが充放電を行う。ここで、電極に触れている場合と触れていない場合は、第 3 章にて述べたように静電容量が異なるため、充放電の長さに差が生じる (図 6.2b)。そこで、本静電容量計測回路は mbed B にて図 6.2b の波形に閾値を設け、この閾値を超えた場合にのみ立ち上がるような波形を用意する (図 6.2c)。次に、本静電容量計測回路は mbedB にて、Pulse A とまったく逆の反応を見せる、Pulse B を用意する (図 6.3a)。次に、mbed A は、図 6.2c の波形と図 6.3a の Pulse B とで論理積を取る。これにより、mbed A は図 6.3b のような、一瞬だけ立ち上がる波形を得る。最後に、mbed A は図 6.3b の波形にローパスフィルタをかける。これにより、mbed A は図 6.3c のような波形を得る。ここで、図 6.3c における  $V_d$  と  $V'_d$  は電圧値が異なる。mbed A はこの差を用いることにより静電容量値を計測する。計測された静電容量値は、mbed A によりシリアル通信にて PC に送信される。

本静電容量計測回路は、CapSense を用いた静電容量計測回路とは異なり、1 パルスのみを観測すれば良いため、高速 (約  $10 [\mu\text{s}]$  前後) に静電容量値を計測できる。そのため、これ以降の実験は、すべて本静電容量計測回路を用いる。なお、本静電容量計測回路もサンプリングによる静電容量値のため、CapSense と入れ替えたことにより、予備実験 1 の結果に変化が起きることはない。

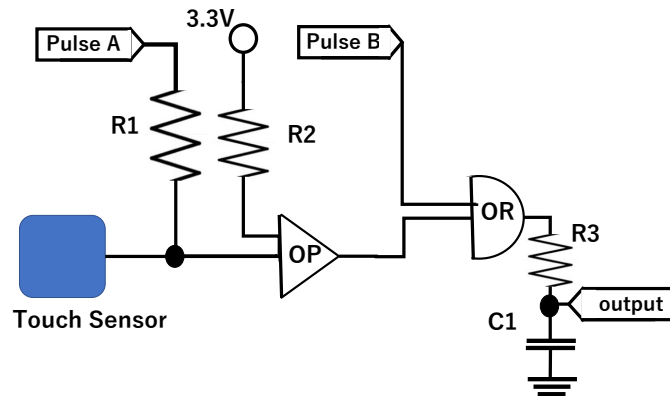


図 6.1: 真鍋らの回路図。

### 6.3 実験用ソフトウェアの実装

本実験は、識別子に触れる前の静電容量および識別子に触れた際の静電容量を常に観察し、データを安定して入力できる識別子を調査する。そのため、本実験はまず、RootCap [TNS16]

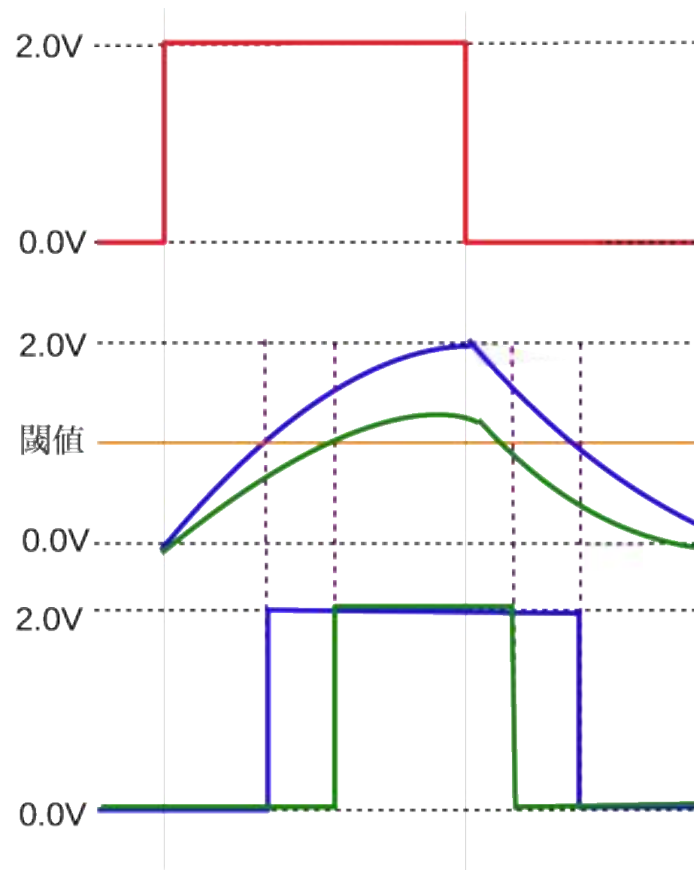


図 6.2: 真鍋らの回路の仕組み (1) .

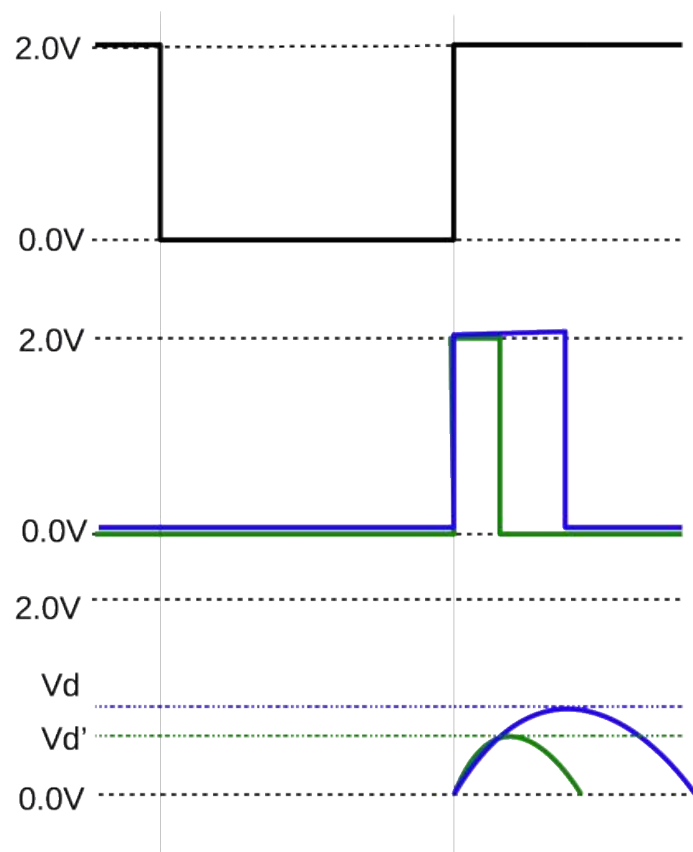


図 6.3: 真鍋らの回路の仕組み (2) .

にて使われたソフトウェアを参考に、本静電容量計測回路が PC に送信する静電容量値を可視化するソフトウェアを実装した。本ソフトウェアは、macOS を対象として開発されている。ソフトウェア動作中の画面を図 6.4 に示す。図 6.4 左部分には、本静電容量計測回路から PC に送られてきた現在の値およびシリアルポート、ノイズによる静電容量のブレを抑えるためのローパスフィルタ（本実験は 0.99 に設定）が表示されている。図 6.4 中央部分には、静電容量値の推移が表示されており、時間の経過とともに波形が左へと流れていく。この波形における縦軸は、本静電容量計測回路が得る最大の静電容量値を 65535 としており、それ以下の値をサンプリングしている。また図 6.4 右部分は、デバッグ用の値が表示される。実験にて使用した PC とその OS、実験用ソフトウェアの実装に使用したソフトウェアおよびプログラミング言語を以下に示す。

使用した PC MacBook Pro Early 2013（メモリ 8GB，2.7GHz Intel Core i5 搭載）

使用した OS macOS Sierra 10.12.6

実装に使用したソフトウェア Xcode 9.2

実装に使用したプログラミング言語 Swift 4.0

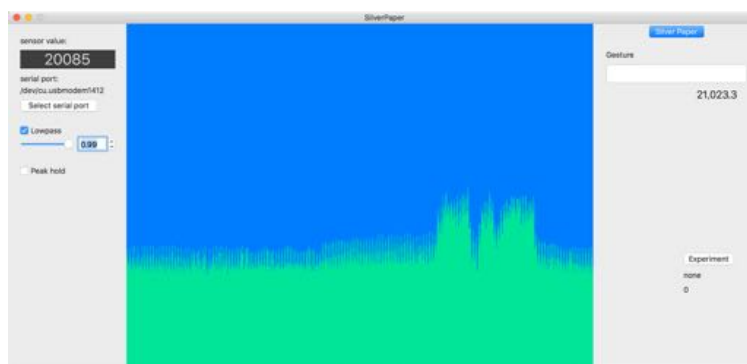


図 6.4: 鶴田らのソフトウェアを参考に実装したソフトウェア。

## 6.4 アルミニウム箔を用いた識別子の作製

予備実験 1 は、銀ナノ粒子インクを用いて作製した識別子のみを使用していた。しかし、本実験は、アルミニウム箔を用いて作製した識別子も使用する。本節は、本実験以降において用いるアルミニウム箔によって作製された識別子の作製手順を示す。

まず、実験者は、作製したい識別子の形状を通常用の紙およびプリンタにて印刷した。次に、実験者は市販のアルミニウム箔（東洋アルミエコープロダクツ株式会社製，サンホイール 10m+2m）を、両面テープを用いて用紙の裏に貼り付け、ハサミにより識別子の形状になるよ



うに切断した。最後に、実験者はこの識別子を固定するため、NB-RC-3GR120 にノリを用いて貼り付けた。

## 6.5 実験準備

実験のため、案1の場合は上端からなぞると「0, 1, 0」というデータ群を、案2の場合は上端からなぞると「0, 1, 0, 2」というデータ群を入力できるような識別子を、銀ナノ粒子インクおよびアルミニウム箔にて作製した。作製した識別子は、両面テープにより机上に固定した。

## 6.6 実験参加者

予備実験のため、実験参加者は著者1名である。実験参加者は実験中、予備実験1と同じように着座しており、右手を膝上に固定し、左手にて用紙に印刷された、あるいは貼り付けられた識別子に触れた。

## 6.7 実験手順

実験者はまず、用紙に印刷された、あるいは貼り付けられた識別子と回路を接続し、識別子を通電させた。次に、実験者は実験参加者に識別子を、上端から下端まで移動するようになぞらせ、本静電容量計測回路が取得した静電容量値の推移を観察した。実験者はこれを1試行として、実験参加者に5試行行わせた。この実験により、実験者は各試行にて得られた静電容量値の推移から、安定してデータ入力を行える識別子を選択した。識別子を作製する物質は2つ、製作した識別子の案は2つ、なぞる手段は指と静電容量用タッチペンの2つあるため、実験参加者は合計2物質×2案×2手段×5試行=40回なぞった。なお、実験はすべての場合にて1試行ずつ行う(8試行)ことを5日間かけて行った。

## 6.8 結果と考察

実験結果および考察について述べる。

### 6.8.1 実験結果

40回なぞったうち、案1を銀ナノ粒子インクにて作製し、指にてなぞった結果を図6.5aに、静電容量用タッチペンにてなぞった結果を図6.5bに示す。また、案1をアルミニウム箔にて作製し、指にてなぞった結果を図6.6aに、静電容量用タッチペンにてなぞった結果を図6.6bに示す。さらに、案2を銀ナノ粒子インクにて作製し、指にてなぞった結果を図6.7aに、静

電容量用タッチペンにてなぞった結果を図 6.7b に示す。また、案 1 をアルミニウム箔にて作製し、指にてなぞった結果を図 6.8a に、静電容量用タッチペンにてなぞった結果を図 6.8b に示す。なお、ここに示している波形は各条件における 5 試行のうちの 1 試行であるが、ここに示していない波形もほぼ同じ形状を示している。

### 6.8.2 2 案に共通の考察と追加調査

結果について考察を行う。まず、2 案に共通の事柄について考察する。予備実験 2 の結果から、銀ナノ粒子インク製の識別子とアルミニウム箔製の識別子に波形の推移の差はないとわかった。また、波形の推移の観察にて、指にて識別子を触れた場合、日によって静電容量値の示す値に差が生じていると感じた。そこで、追加調査として、別日に再度銀ナノ粒子インクにて作製された案 2 に触れ、静電容量値を観察した。その結果、同じデータ「0」を入力している場合でも、静電容量値に差が生じていることがわかった。この原因は、指にてなぞる場合、服装の違いや環境の違いが静電容量に影響しやすいためだと考えられる。

### 6.8.3 案 1 の識別子に対する考察

次に、案 1 の識別子に対して考察する。案 1 の識別子は、「0」と「1」の測定時間が明確に異なる場合もあったが、中には図 6.5b のように、「0」と「1」の測定時間が似通ったものとなる場合もあった（波形の目視だけでなく、数値としてもほぼ同じ値を示していた）。これは、案 1 の識別子は、識別子をなぞる速度が一定である必要があったことが原因だと考えられる。識別子をなぞる速度が一定である場合、単純な線と線の幅により、「0」と「1」を区別できる。しかし、なぞっている途中になぞる速度が変わった場合、例えば「1」を通り過ぎる際に意図しない加速が生じた場合、「0」と測定時間の差が現れなくなってしまう。これは設計中に想定していなかった現象である。そのため、案 1 の識別子は、なぞる速度が一定である保証がない今回の提案手法には適さないとわかった。

### 6.8.4 案 2 の識別子に対する考察

次に、案 2 の識別子に対して考察する。案 2 の識別子をなぞった結果、「1」を意図して作製した線が 2 本の部分は、「2」を意図して作製した線が 3 本の部分と、静電容量値に明確な差異が現れなかった。案 2 の識別子は、識別子に触れる面積を細い線により変化させ、その差により「0」と「1」と「2」を区別する案である。

### 6.8.5 以降の実験における方針

最後に、本実験の結果から以降の実験における方針を定めた。以降の実験は、両方の導電性物質にて作製された識別子を用いて調査を行うこととした。また、案 1 および案 2 のい

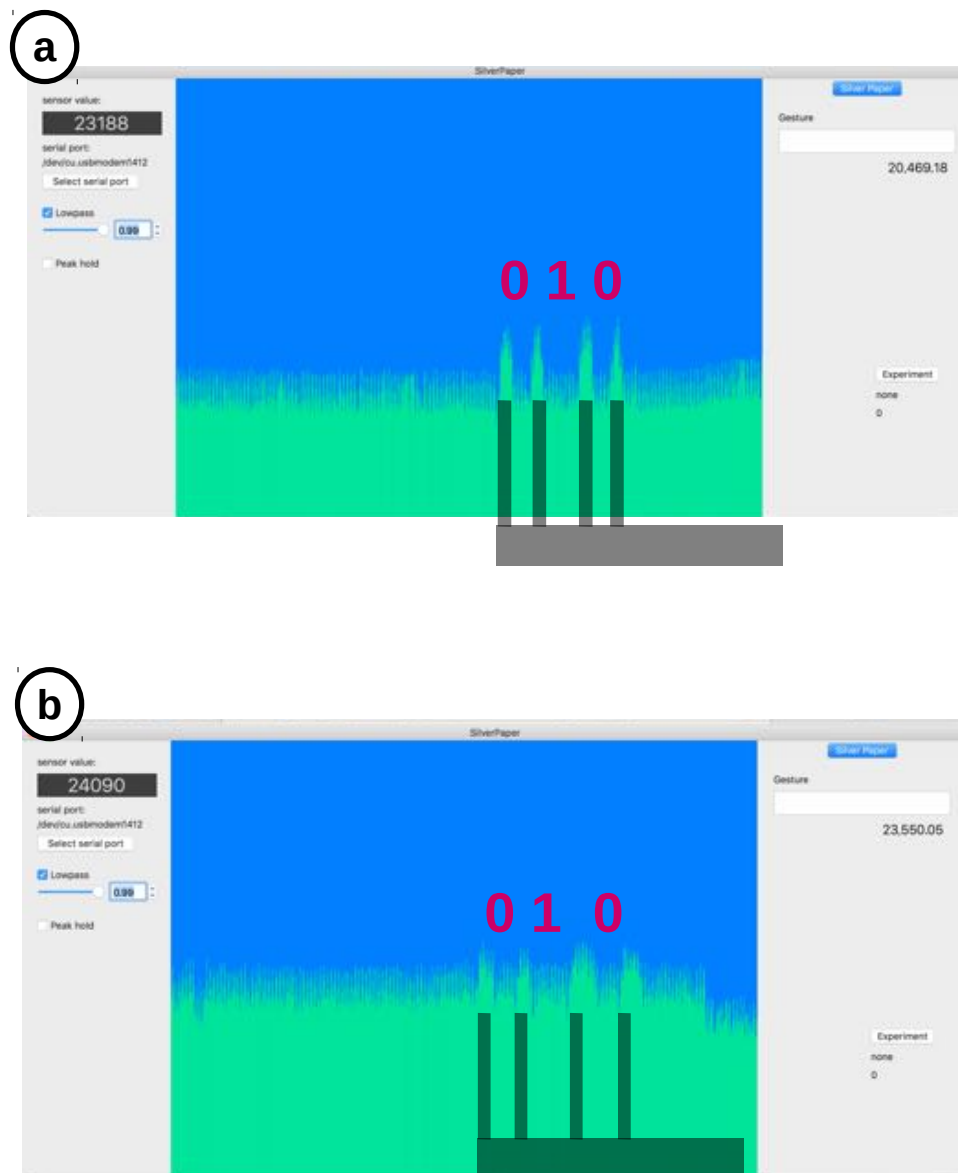


図 6.5: 銀ナノ粒子インクにて作製された案 1 に触れた際の静電容量値の推移. (a) 指にて触れた場合. (b) 静電容量用タッチペンにて触れた場合.

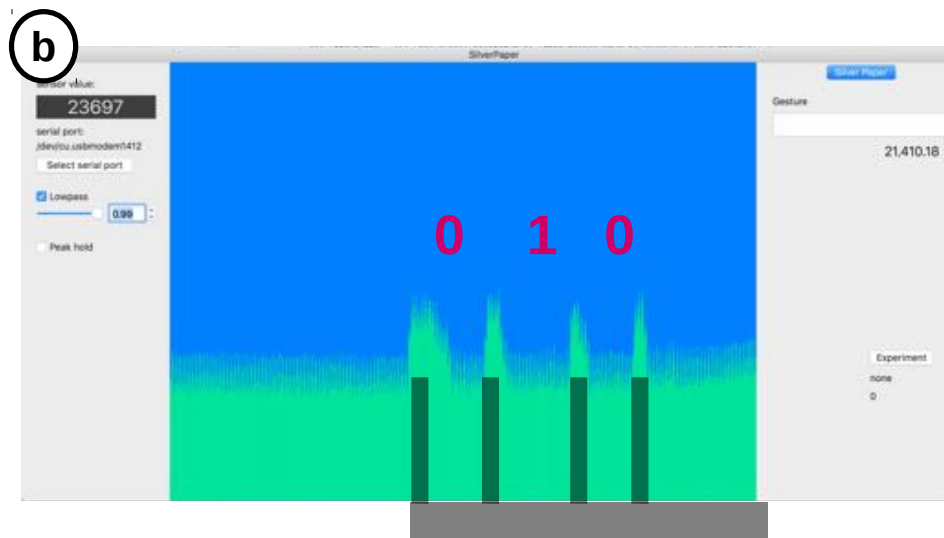
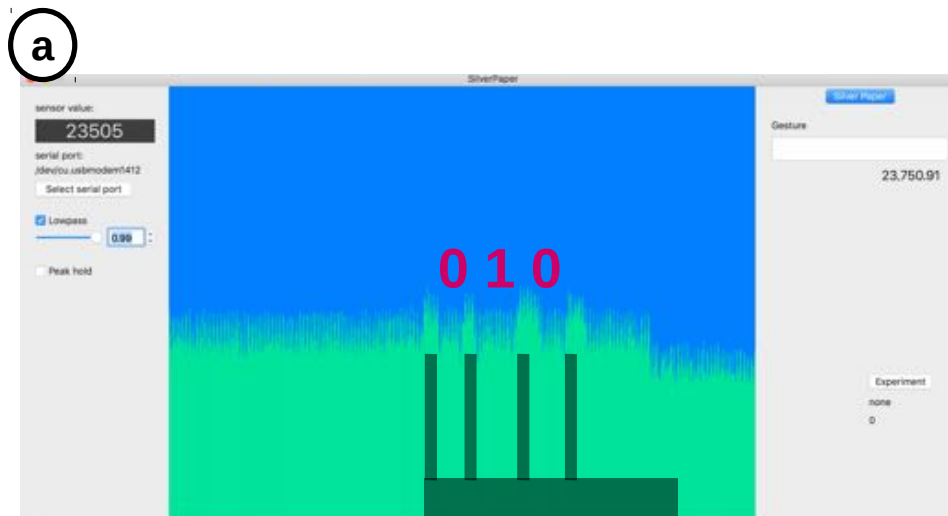


図 6.6: アルミニウム箱にて作製された案 1 に触れた際の静電容量値の推移. (a) 指にて触れた場合. (b) 静電容量用タッチペンにて触れた場合.

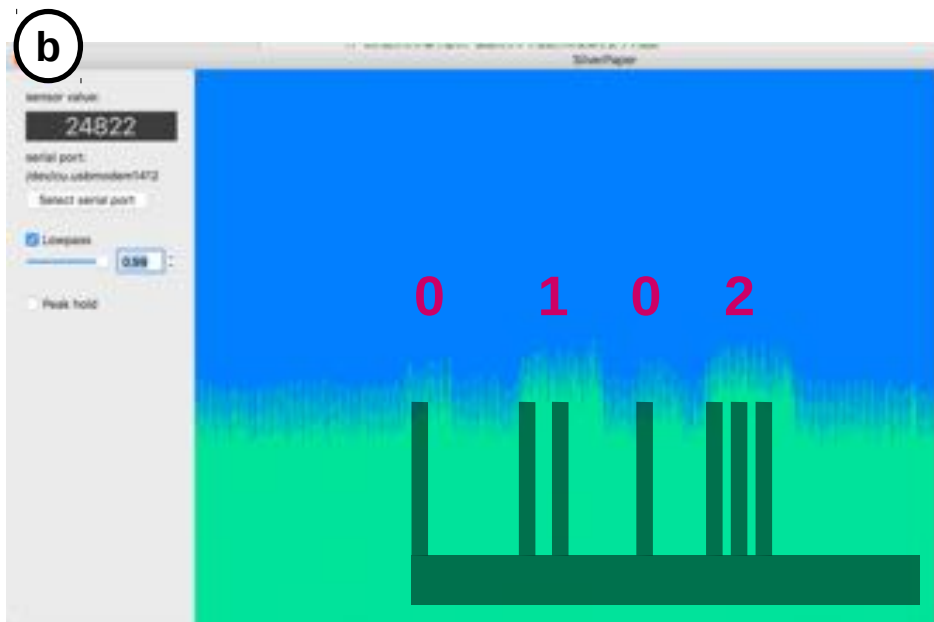
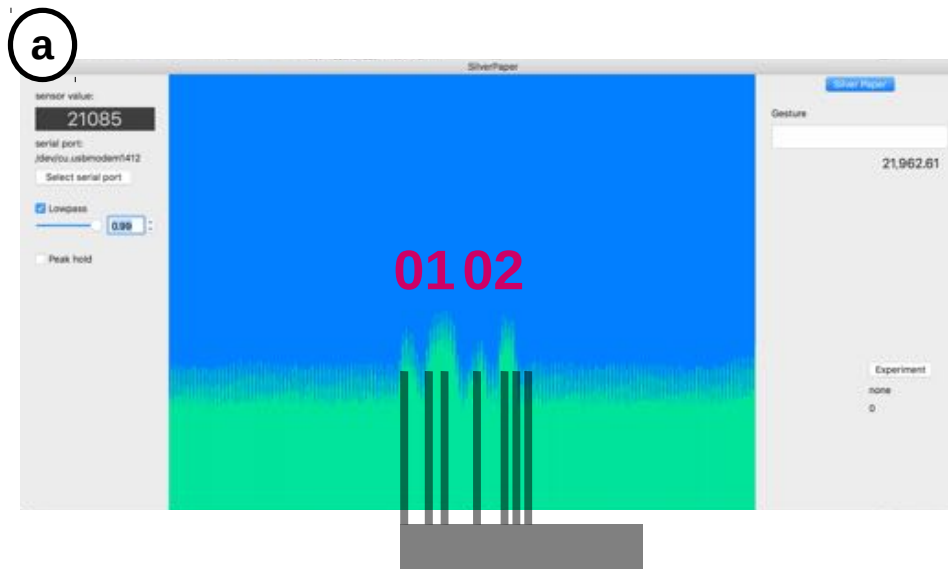


図 6.7: 銀ナノ粒子インクにて作製された案 2 に触れた際の静電容量値の推移. (a) 指にて触れた場合. (b) 静電容量用タッチペンにて触れた場合.

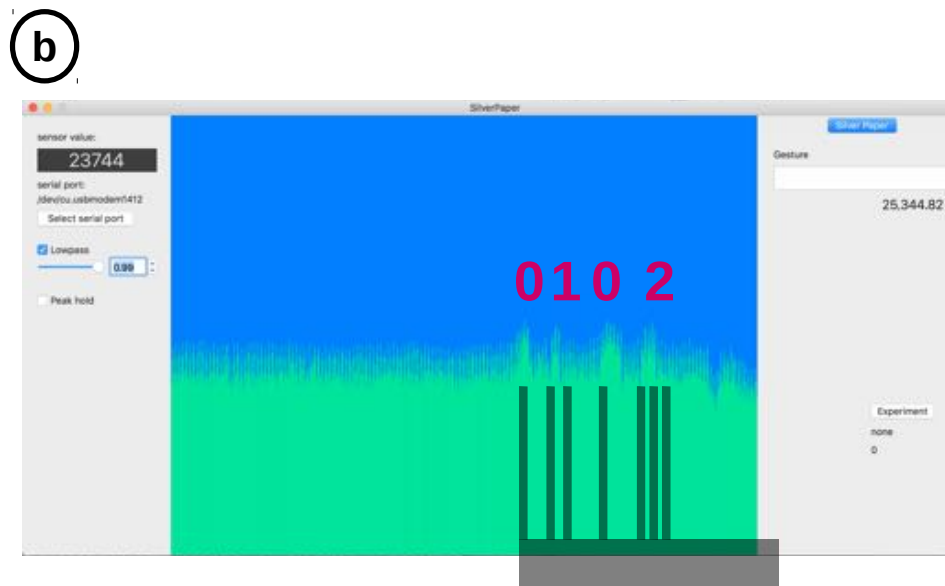
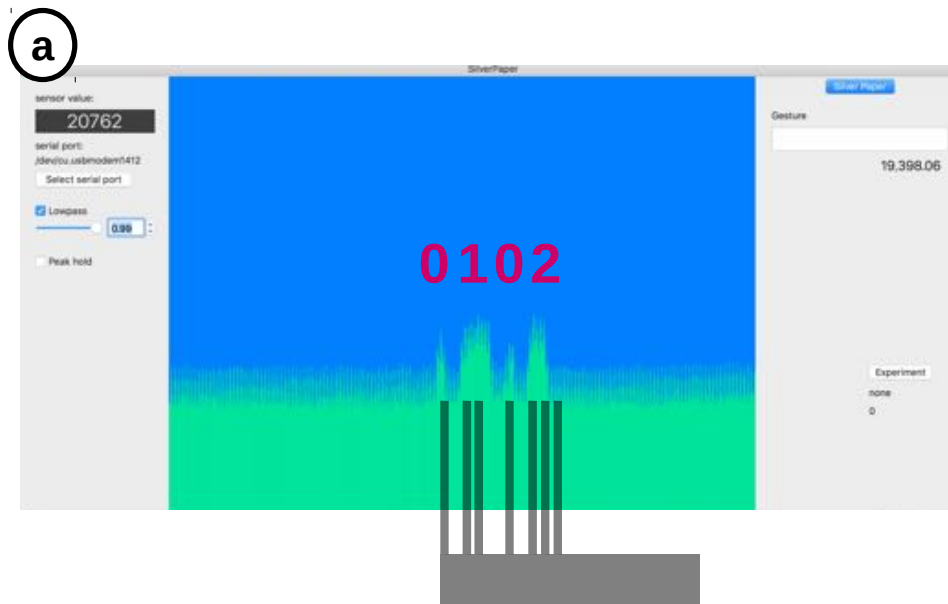


図 6.8: アルミニウム箱にて作製された案 2 に触れた際の静電容量値の推移. (a) 指にて触れた場合. (b) 静電容量用タッチペンにて触れた場合.

れも、波形から「0」と「1」を識別可能だとわかった。案1は識別子をなぞる速度に影響することがわかった。また、案2は「0」と「1」、「0」と「2」は区別できるが、「1」と「2」は区別できないとわかった。そのため、以降の実験は、案2の識別子から、データ「2」を削除したものを採用することとした。さらに、追加調査により、指にてなぞった場合は、日によって静電容量値に差が生じるとわかった。このため、以降の実験は、単純な認識精度を見るため、静電容量用タッチペンのみを用いてなぞった精度を調査することとした。

## 第7章 識別子へのデータ入力認識アルゴリズム

本章は、予備実験1および予備実験2の結果から開発したアルゴリズムについて述べる。本アルゴリズムは、回路および識別子に対して開発した識別子へのデータ入力「0」か「1」なのかを認識する。第3章にて述べたように、識別子へのデータ入力は、識別子をなぞることにより静電容量値が変動することを用いている。本研究は、静電容量値の変動から現在のデータ入力を認識することができる、2つの異なる要素を考慮したアルゴリズムを開発した。

### 7.1 本アルゴリズムが前提とする識別子

本アルゴリズムが前提とする識別子は、第5章にて提案し、第6章の実験にて採用された、案2の形状からデータ「2」を削除したものである。また識別子に接続する回路は、第6章にて用いた真鍋らの回路[真鍋15]を前提とする。以下に、「1本の線に触れた=0」と、「2本の線に同時に触れた=1」を異なるデータとして区別して認識するアルゴリズムを2つ示す。

### 7.2 アルゴリズム1：入力途中に認識結果が表示されていくもの

1つ目に提案するアルゴリズムは、入力されているデータをリアルタイムに表示することを目的としている。このアルゴリズムは、主に閾値を用いた識別を行っている。まず、本アルゴリズムは、最初に図7.1aのように、静電容量値に対して、値の小さい閾値  $T_{min}$  と、値の大きい閾値  $T_{max}$  を用意する。 $T_{min}$  は識別子に触れた場合に必ず超えるよう、予め調査により得られた1本の線に触れた際の静電容量値の平均値を0.5倍したものとした。また  $T_{max}$  は2本の線に同時に触れた際に超えるよう、2本の線に同時に触れた際の静電容量値の平均値を0.8倍したものとした。この倍率は、著者が何度か識別子をなぞることにより調整したものである。

入力されたデータの識別として、本アルゴリズムはまず、静電容量値が  $T_{min}$  を超えた場合、次に  $T_{min}$  を下回るまでに得られる値を観察する。観察中に得られた静電容量値の最大値が  $T_{min}$  以上  $T_{max}$  以下だった場合、本アルゴリズムは、そのデータ入力は1本の線に触れている場合だと認識する。本アルゴリズムは、これをデータ「0」を入力していると判断する(図7.1b)。一方、観察中に得られた静電容量値の最大が  $T_{max}$  以上だった場合、本アルゴリズムは、そのデータ入力は2本の線に同時に触れている場合だと認識する。本アルゴリズムは、これをデータ「1」を入力していると判断する(図7.1c)。最後に、本アルゴリズムは、一定時間データ入力が行われない場合、データ入力を終了する。



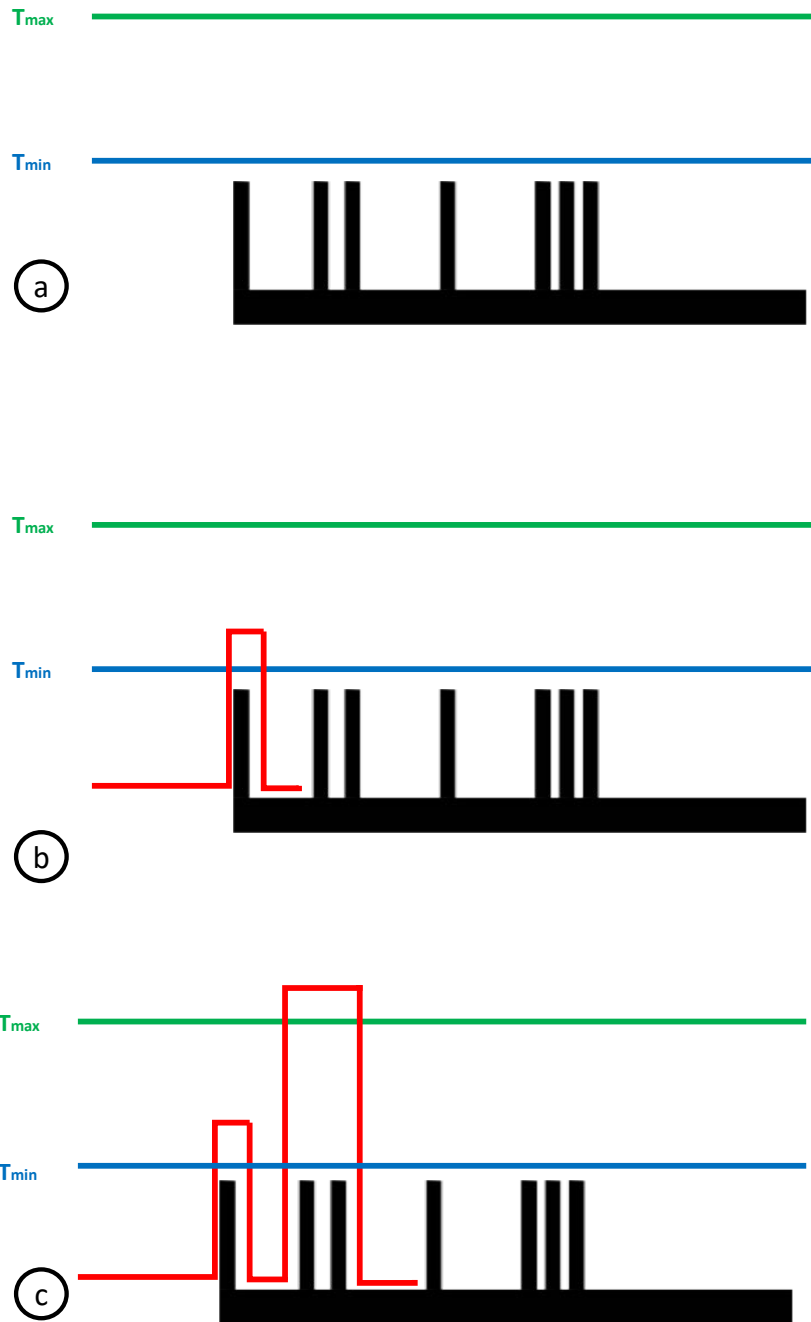


図 7.1: アルゴリズム 1. (a) 2つの閾値. (b) 静電容量値が  $T_{max}$  と  $T_{min}$  の間を示す様子 (データ「0」). (c) 静電容量値が  $T_{max}$  以上を示す様子 (データ「1」).

### 7.3 アルゴリズム 2：入力が終了してから認識結果を表示するもの

2つ目に提案するアルゴリズムは、データ入力が終了してから認識結果を表示することを目的としている。本アルゴリズムは、得られた静電容量値の平均をとり、それぞれを比較することにより認識を行っている。最初に、本アルゴリズムは、静電容量値に対して閾値を1つ用意する。この閾値は、識別子に触れた際に静電容量値が必ず閾値を超えるよう、1つ目のアルゴリズムにて設定した  $T_{min}$  と同じ値に設定する。入力されたデータの認識は、ユーザによるデータ入力と、回路によるデータ認識の2つの段階に分けられる。

次に、ユーザはデータ入力を行う。本アルゴリズムは、静電容量計測回路が取得する静電容量値が閾値を超えた場合、なんらかのデータ入力が行われていると判断し、次にこの閾値を下回るまでに得られる値をすべて保持しておく。静電容量値が閾値を下回った場合、本アルゴリズムは図7.2aのように、保持していた値の平均をとり、それを保持しておく。識別子を最後までなぞり、すべてのデータ入力が終了した場合、保持している平均値の個数は、入力したデータの個数と同等となる。本アルゴリズムは、一定時間何もデータ入力が行われない場合、データ入力を終了し、データ認識に移る。

最後に、本アルゴリズムはデータ認識を行う。本アルゴリズムは、まず、図7.2bのように、この平均値のうち最大の値は、2本の線を同時になぞっていた場合だと認識する。本アルゴリズムは、これをデータ「1」と判断する。次に、本アルゴリズムは、保持していた平均値のうち最小の値は、1本の線をなぞっていた場合だと認識する。本アルゴリズムは、これをデータ「0」と判断する。最後に、本アルゴリズムは「1」と判断されたデータと「0」と判断されたデータのどちらに近いのかによって、残りの平均値を割り振る。

### 7.4 両アルゴリズムに共通する利点

2つのアルゴリズムに共通する利点は2つある。1つ目は、静電容量計測回路が取得する静電容量値が閾値を超えた場合にデータ入力を開始することである。これにより、ユーザは識別子を用いてデータの入力を開始する際に、必ずしも識別子の端からなぞる必要がない。

2つ目は、「データ入力の終了」と認識されるのは、ある程度の時間何もデータ入力が行われない場合と設定されていることである。これにより、ユーザは識別子を用いてデータ入力を行っている際、なぞる向きを反転させ折り返すようになぞることも、途中までなぞってからなぞるのをやめることも可能である。

これら2つの利点は、いずれも1枚の識別子によって入力できるデータ群の種類が増えることに繋がる。1枚の識別子を用いることにより、例えば左端から右端までなぞる、左端から中央までなぞって指あるいは静電容量用ペンを離す、右端から中央までなぞった後に折り返すといった、様々な種類のなぞり方が可能となる。

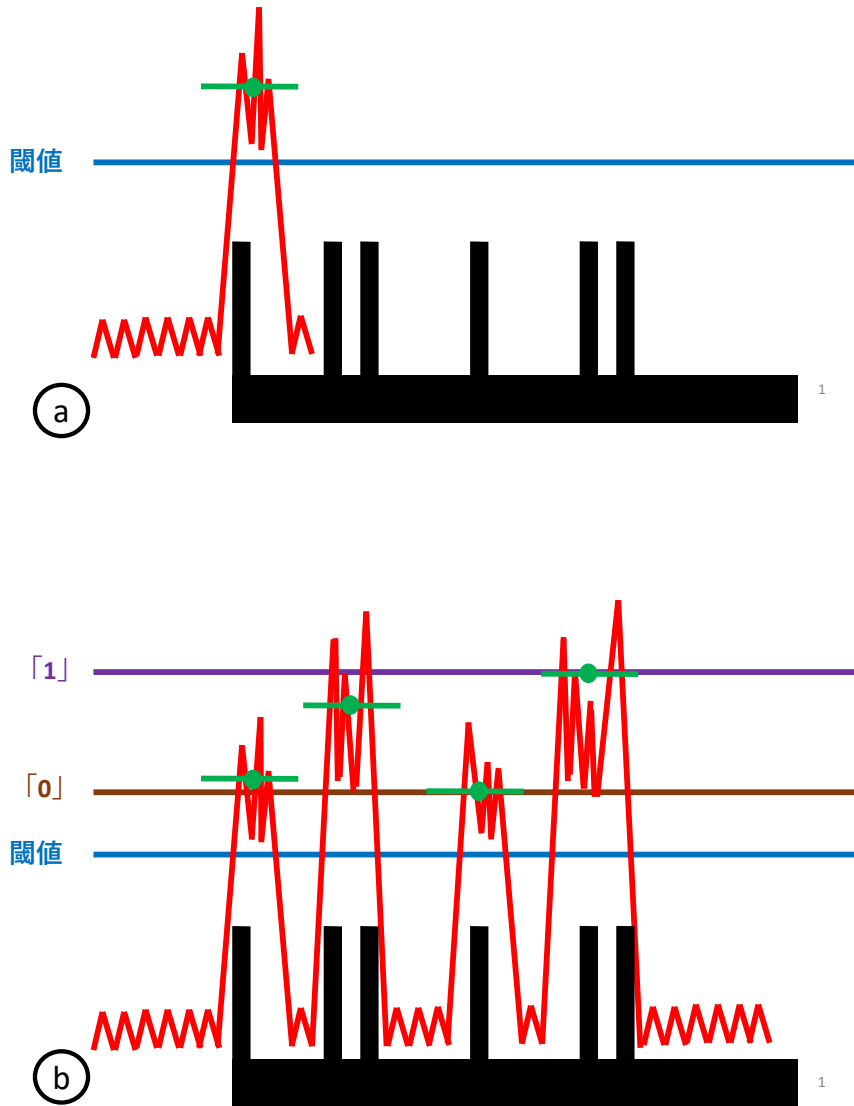


図 7.2: アルゴリズム 2. (a) 平均値が決まった様子. (b) すべての平均値から, 最大の平均値と最低の平均値となる値が決まった様子.

## 第8章 評価実験：識別子の入力精度調査

本章は、2つの予備実験を受けた最後の評価実験として行った、識別子の入力精度の調査の目的、実験の詳細およびその結果と考察を述べる。また、評価実験を受けた追加実験の詳細およびその結果と考察を述べる。

### 8.1 実験目的

評価実験の目的は、予備実験を基に設計した識別子を用いた入力精度の調査である。

第4章および第6章にて予備実験を行った結果、本研究においては、案2のような形状をした識別子に、真鍋らの静電容量計測回路 [真鍋 15] を接続することが最適であるとわかった。しかし、これまでの実験は、実際に識別子をなぞった際の認識精度を調査していない。また、これまでの実験は、著者1名のみが実験に参加している。識別子の設計やアルゴリズムの開発は、誰がなぞっても同様の認識精度が得られるように行っていた。しかし、これまでの実験は、実際に著者以外が使用しても認識精度は低下しないのかを調査していなかった。

そこで、評価実験は、複数の実験参加者に、銀ナノ粒子インクあるいはアルミニウム箔にて作製された同じパターン（案2）の識別子をなぞってもらい、第7章にて提案した2つのアルゴリズムのどちらが最適なのか、そして使用者が異なった場合に認識精度はどの程度なのかを調査することを目的とした。

### 8.2 使用した回路およびソフトウェア

本実験は、予備実験2にて述べた通り、真鍋らの静電容量計測回路 [真鍋 15] を用いた。また、実験用ソフトウェアとして、実験者は予備実験2にて用いたソフトウェアに手を加え、図8.1aのような実験用プログラムを開発した。本プログラムは以下のような動作を繰り返す。

1. 実験者が図8.1a右下に表示されている「Experiment」というボタンをクリックすると、本プログラムは図8.1bのように右下の実験回数の表記を「0」から「1」に進ませ、アルゴリズムの表示を「none」から「Algorithm 1」に変更する（Algorithm 1とは第7章にて示したアルゴリズム1のことである）。
2. アルゴリズム1に切り替わってから実験参加者が識別子をなぞると、本プログラムは入力したデータをリアルタイムに表示する。

3. 実験者が右下の「Experiment」を再びクリックすると、本プログラムはアルゴリズムの表示を「Algorithm 2」に変更する（Algorithm 2とは、第7章にて示したアルゴリズム2のことである）。
4. アルゴリズム2に切り替わってから実験参加者が識別子をなぞると、本プログラムは入力したデータを入力終了後に表示する。
5. 実験者が「Experiment」と表示されたボタンをクリックすると、本プログラムは回数の表記を「1」から「2」に進ませ、アルゴリズムの表示を「Algorithm 1」に変更する。

なお、実験者が各回の Experiment ボタンをクリックしてから、次にクリックするまでに静電容量計測回路が送信していた静電容量値は、すべて拡張子が「.txt」のファイルに出力した。

### 8.3 実験準備

まず、実験者は銀ナノ粒子インクおよびアルミニウム箔にて案2の識別子を作製した（図8.2）。ここで、本実験に用いた識別子は、図8.2の上からなぞると「1, 0, 1, 0」というデータ群として認識されるように設計されている。次に、実験者は、用紙および識別子に触れても用紙が動かないように、両面テープにて用紙を固定した。

### 8.4 実験参加者

実験には、5名（22歳–25歳，大学生–大学院生，全員男性，全員右利き）にボランティアとして参加してもらった。実験参加者には、実験中は図8.3に示すように着座し、左手は軽く用紙に触れ、右手に持った静電容量用タッチペンにて識別子に触れさせた。また、実験中および実験終了後、実験者は、実験参加者に、この識別子を使用していて感じたことを自由に話すように促した。

### 8.5 実験手順

まず、実験者は、調査する用紙に印刷された識別子と静電容量計測回路を接続し、識別子を通電させた。次に、実験者はソフトウェアを起動し、実験参加者に識別子を静電容量用タッチペンにてなぞらせた。ソフトウェアはこの最中、静電容量値および認識されたデータを記録した。実験は実験参加者が1回なぞることを1試行として、合計20試行行わせた。本実験においては、「1, 0, 1, 0」というデータ群がすべて正しく認識されたことを認識成功とし、1つでも誤りがあった場合は認識失敗とした。実験者は実験参加者に、識別子を合計2導電性物質×2アルゴリズム×20試行=80回なぞらせた。なお、実験中、実験者は、実験参加者のなぞる様子を観察していた。なお、本実験にて静電容量用タッチペンをを用い、指による調

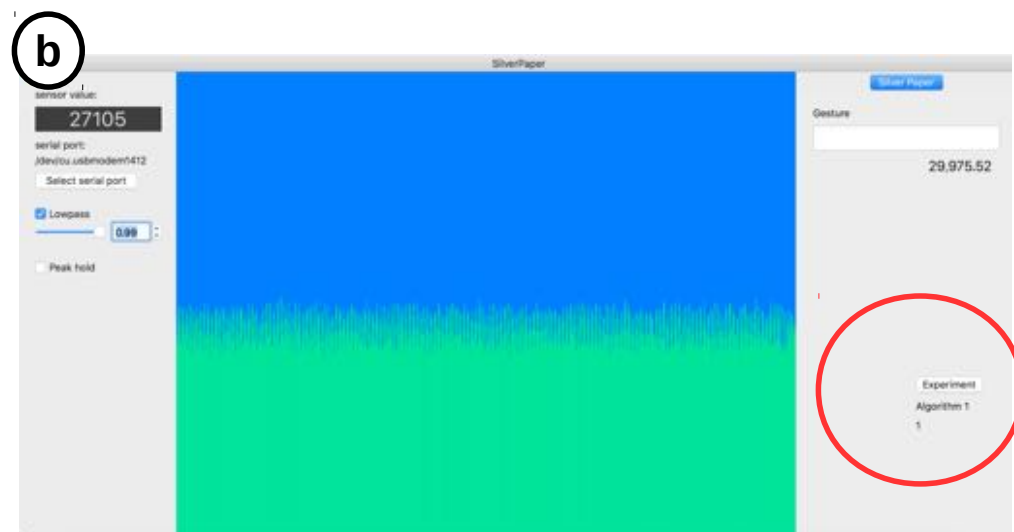
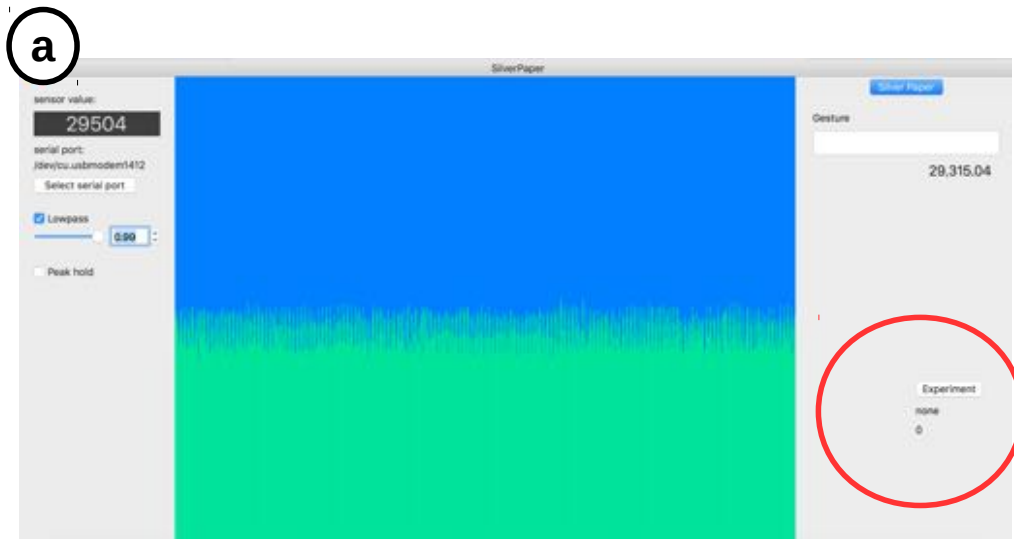


図 8.1: 本実験にて使用したソフトウェア. (a) 「Experiment」をクリックする前. 図中の赤い丸の部分に「none」と表示され, 実験回数が「0」となっている. (b) 静電容量認識アルゴリズム (図は「Algorithm 1」) が動作している最中. 図中の赤い丸の部分に「Algorithm 1」と表示され, 実験回数が「1」に変わっている.

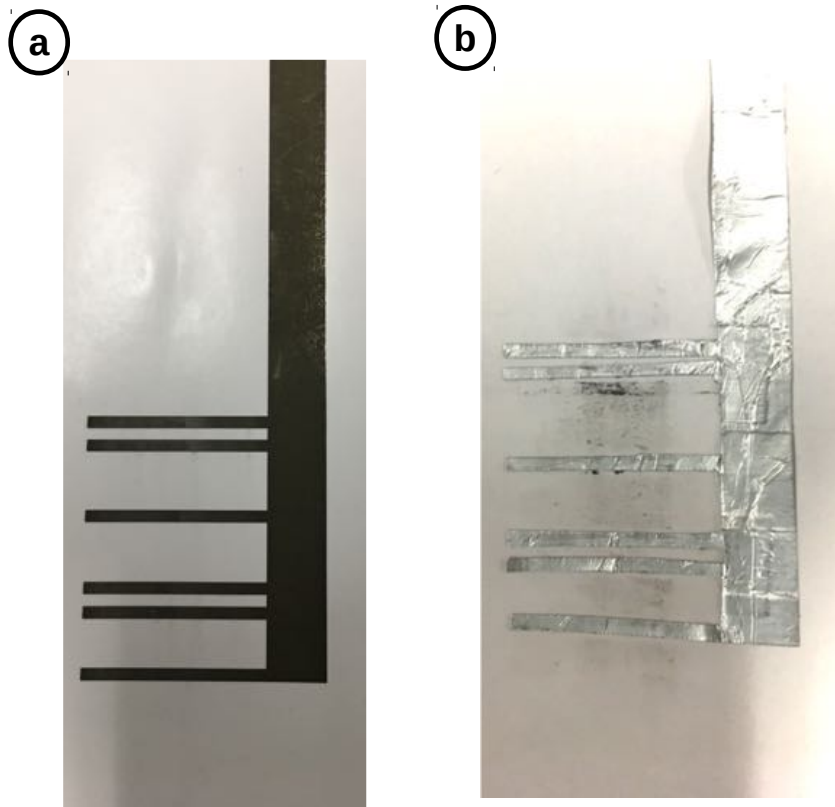


図 8.2: 評価実験にて作製した識別子. (a) 銀ナノ粒子インク製のもの. (b) アルミニウム箔製のもの.



図 8.3: 実験中の実験参加者.



査を行わなかった理由は、第6章にて得られた考察のように、静電容量値が衣服に影響して変化するためである。本実験は、アルゴリズムの純粋な認識精度を見るため、静電容量用タッチペンのみを用いた。

## 8.6 結果と考察

実験結果および考察について述べる。

### 8.6.1 実験結果

アルゴリズム1を採用した際の認識精度を図8.4に示す。また、アルゴリズム2を採用した際の認識精度を図8.5に示す。銀ナノ粒子インク製の場合の、アルゴリズム1の場合の平均認識精度は19.5%、アルゴリズム2の場合の平均認識精度は72.0%であり、アルミニウム箔製の場合の、アルゴリズム1の場合の平均認識精度は21.5%、アルゴリズム2の場合の平均認識精度は74.0%であった。結果から、銀ナノ粒子インク製のものと、アルミニウム箔製のものについて、認識精度に差はなかった。結果から、アルゴリズム1は平均20.5%、アルゴリズム2ならば平均73.0%にて認識できることがわかった。

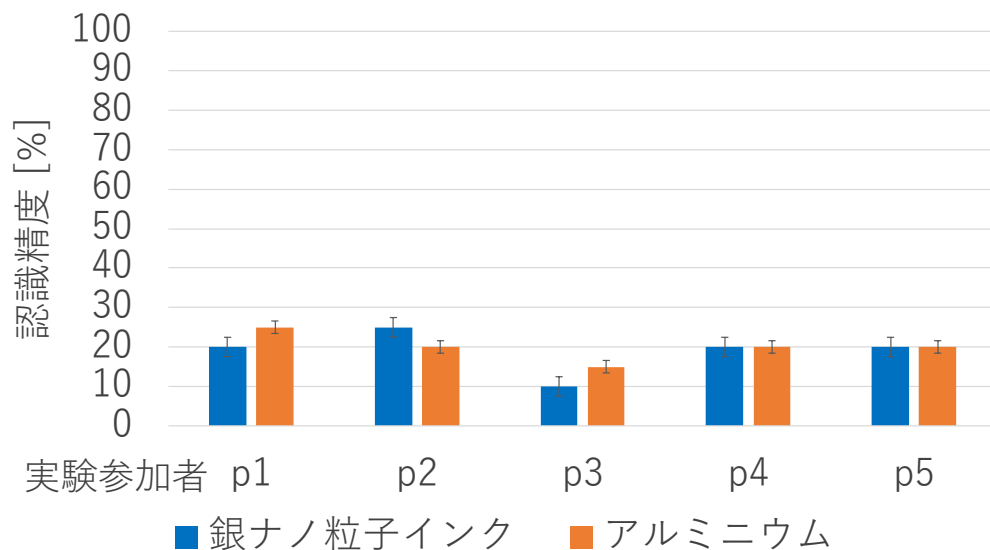


図8.4: アルゴリズム1を採用した際の認識精度。エラーバーは標準誤差。

### 8.6.2 2つのアルゴリズムに共通の考察

まず、2つのアルゴリズムに共通の考察を行う。実験参加者より、「この識別子をどの程度の強さにてなぞればいいのかわからない」という意見を得た。この意見より、誤認識の主な原

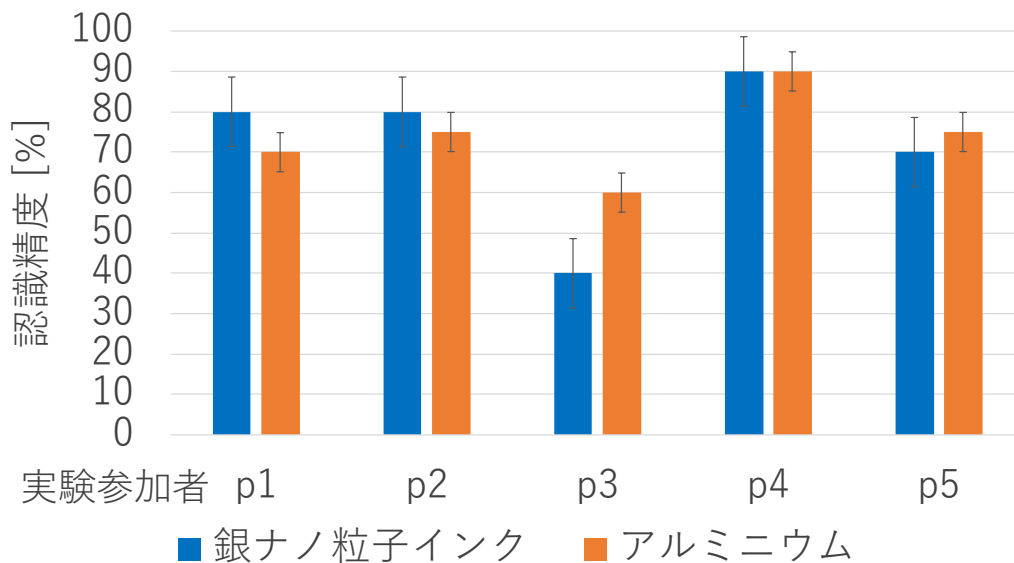


図 8.5: アルゴリズム 2 を採用した際の認識精度. エラーバーは標準誤差.

因は、実験参加者が識別子をなぞる際の力加減がわからず、場所によって異なる大きさの力が加わったことが原因ではないかと考えた。図 8.6 左のように軽く用紙に触れている場合の接触面積（赤い線にて表示）に比べ、図 8.6 右のように強く押し付けた場合の接触面積は大きくなっている。識別子と静電容量用ペンとの接触する面積が異なる場合、得られる静電容量値も変動する。そのため、識別子をなぞる際に力を緩めすぎたり、逆に力を加えすぎたりした場合に誤認識が発生すると考えられる。

### 8.6.3 アルゴリズム 1 に関する考察

次に、アルゴリズム 1 に関する考察を行う。実験結果として、アルゴリズム 1 の認識精度が非常に悪かった。この原因として、アルゴリズム 1 は静電容量の値に入るノイズについて考慮していなかったことが考えられる。アルゴリズム 1 は、 $T_{min}$  と  $T_{max}$  という 2 本の閾値を予め設定する手法である。しかし、静電容量値は回路周辺環境などにより発生するノイズにより、常に変動している。静電容量値を確認したところ、推定通り、本来「0」というデータだと認識されるべき場所を、ノイズにより「1」と誤認識したことが認識率低下の原因だと考えられる。実際に出力されていた txt ファイルを確認したところ、誤認識はほぼすべてが本来「0」と認識されるべき場所が「1」と誤認識されていた。アルゴリズム 2 が同様の問題を引き起こさなかった理由としては、閾値により「0」と「1」の認識を行っていないことや、静電容量値の平均値を取るためにノイズの影響が少なかったためだと考えられる。この問題は、アルゴリズム 1 にて設定した閾値  $T_{max}$  が適切ではないため発生したものと考えられる。そのため、アルゴリズム 1 の精度を改善する方法として、機械学習の導入を検討する。

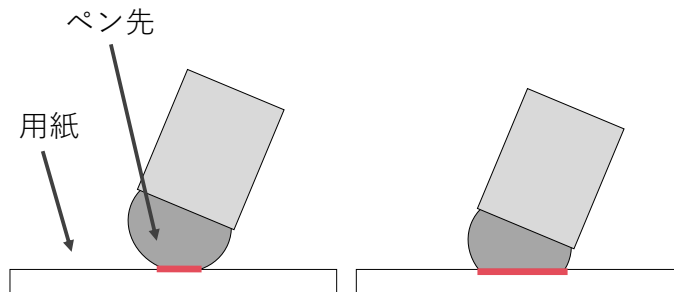


図 8.6: 静電容量用ペンに加わる力の強弱により識別子との接触面積が異なる図。(左) 識別子に静電容量用ペンを軽く触れさせている場合。(右) 識別子に静電容量用ペンを強く押し付けている場合。

#### 8.6.4 アルゴリズム 2 に関する考察

最後に、アルゴリズム 2 に関する考察を行う。参加者ごとの結果より、実験参加者 p3 は、銀ナノ粒子インクもアルミニウム箔も、どちらでなぞっても精度が低かった。この原因として、実験者が観測したところ、実験参加者 p3 は他の実験参加者と比べてなぞる速度が速かった。なぞる速度が早い場合、静電容量計測回路はノイズ混じりの静電容量値しか取得できなくなってしまう。これが原因となり、実験参加者 p3 の精度が下がったと考えられる。

### 8.7 追加実験：識別子を折り返してなぞる場合の認識精度調査

追加実験として、本研究では評価実験にて精度の良かったアルゴリズム 2 を用い、識別子の上端から途中までなぞり、折り返して上端までなぞった場合 (図 8.7) の認識精度を調査した。追加実験は著者 1 名にて行った。実験手順を示す。まず実験者は、上端から下端までなぞると「1, 0, 1, 0」というデータ群が入力されるような識別子を、銀ナノ粒子インクにて作製し、両面テープにて机に固定した。次に、実験参加者は静電容量用ペンを用いて、識別子を上端から下へと半分まで、すなわち「1, 0」というデータ群が入力されるまでなぞり、すぐに折り返して上端までなぞった。この一連のなぞり方により、正しく認識されれば「1, 0, 0, 1」というデータ群が入力される。追加実験はこの一連のなぞり方を行うことを 1 試行として 20 試行行い、折り返してなぞる場合の認識精度を調査した。

実験の結果、平均認識率は 65.0% を示した。考察として、追加実験における誤認識は、評価実験と同じく、識別子が印刷あるいは貼り付けられている用紙に加わる力が一定ではないことが原因ではないかと考えられる。追加実験は一方向になぞっている途中で反対向きへのなぞりに切り替える。この折り返しの際、ユーザが識別子に加える力が変化したと考えられる。

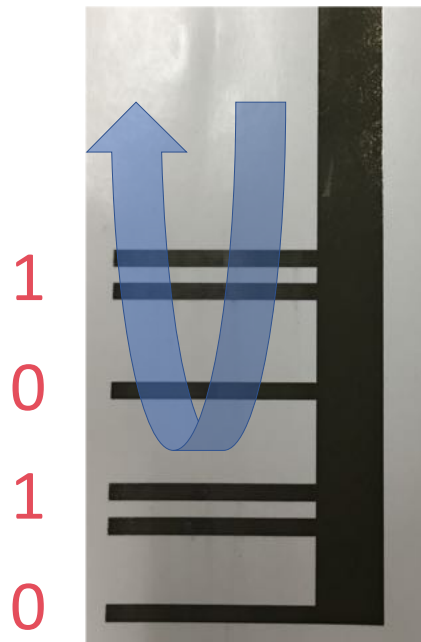


図 8.7: 識別子を折り返してなぞる場合にユーザが辿る軌道.

## 8.8 評価実験および追加実験からの考察

評価実験および追加実験から、提案手法における誤認識は、識別子が印刷あるいは貼り付けられている用紙に加わる力が一定ではないことが原因だと考えられる。この問題に対し、評価実験にて用いた静電容量用ペンよりもペン先が硬いものを用いることにより、ある程度は認識精度を改善できると考えられる。また、MonoTouch [TST16] のように、識別子に段差を作ることにより、静電容量用タッチペンが識別子に触れる面積を制限できるのではないかと考えられる。

## 第9章 アプリケーション

本章は、提案手法にて設計した識別子を用いて作成することができるアプリケーションのイメージを2例示す。

### 9.1 ペイントアプリケーション

ユーザが本アプリケーションを使用している様子を図9.1に示す。本アプリケーションは、ある操作のサポートとして識別子を用いる例を提示している。本アプリケーションを用いているユーザは、一般的なペイントアプリケーションのように絵を描く。ユーザは識別子を上からなぞるのか、それとも下からなぞるのかに動作を割り振ることにより、例えば鉛筆と毛筆を切り替える、鉛筆とスポイトを切り替えるといった操作ができる。本アプリケーションは頻繁に使う操作のショートカットとして有用であり、作業中にカーソルをボタンへ動かして選択する必要がない。

### 9.2 イラストの情報記録アプリケーション

ユーザが本アプリケーションを使用している様子を図9.2に示す。本アプリケーションは、識別子のある物体に貼り付け、バーコードのように使用する例を提示している。ユーザは印刷されたイラストの裏面に識別子を貼り付ける。このイラストの識別子に対し、ユーザは例えば左からなぞることによりイラストのタイトルと出版社の情報を閲覧でき、右からなぞることにより著者の情報を閲覧することができる。これにより、イラストの製作者は、識別子を1つ掲載することにより、複数の情報を掲載することができる。

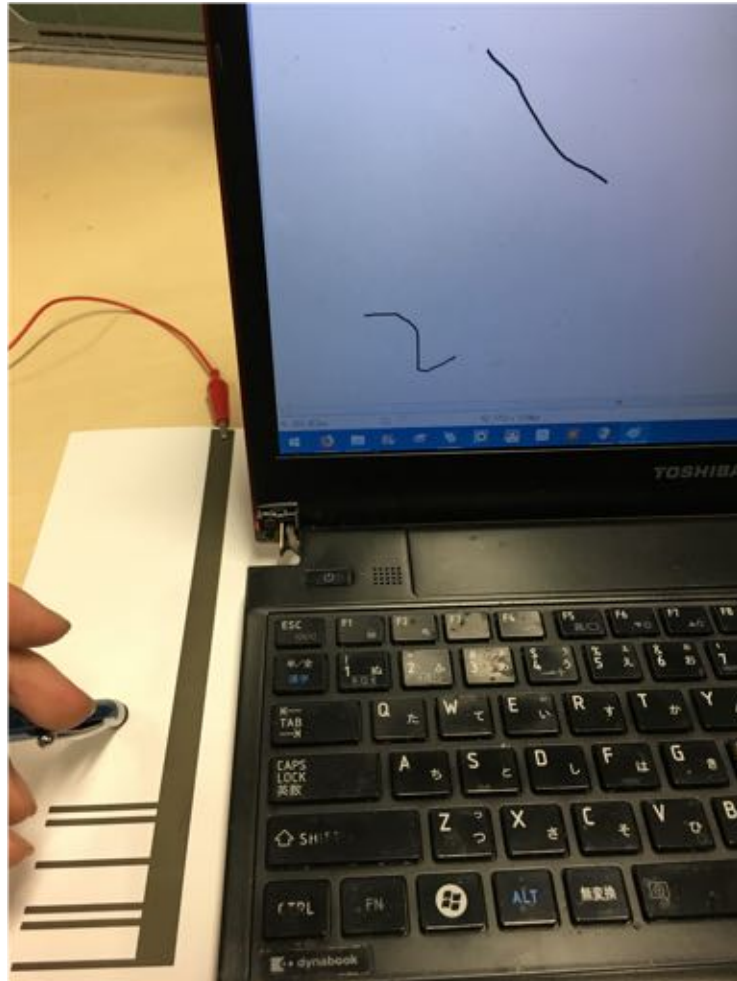


図 9.1: ペイントアプリケーションのイメージ.

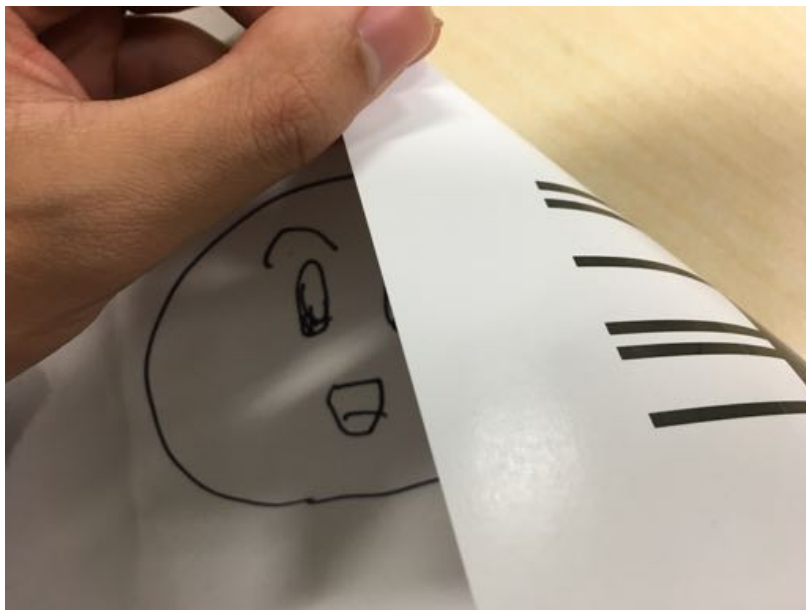


図 9.2: イラストの情報記録アプリケーションのイメージ.

## 第10章 議論

本章は、本研究にて示した提案手法の問題と対処法、提案手法の拡張性について議論する。

### 10.1 識別子の劣化および破損に関する問題と対処法

本研究にて作製した識別子は、銀ナノ粒子インクを用いたものと、アルミニウム箔を用いたものの2種類がある。本研究は、実験により、どちらを用いた場合でも静電容量値および認識精度は変化しないという結果を得た。そのため評価実験における考察は、銀ナノ粒子インクとアルミニウム箔のどちらを用いても問題がないと述べた。しかし、1枚の識別子を長期間使用する場合、それぞれに利点と欠点が見られる。

銀ナノ粒子インクを用いて作製した識別子は、大気中に長く放置しておくことにより酸化し、図 10.1a から図 10.1b のように色が変わる。酸化後の識別子に触れた際に示す静電容量値は、酸化前の識別子よりも大きくなることがわかっている。そのため、例えば識別子の一部が酸化してしまうと、入力の際に誤認識が発生することが考えられる。

また、銀ナノ粒子インクを用いて作製した識別子は、折り曲げることにより銀ナノ粒子インクの繋がりが切れ、電気回路でいう「断線」と同じ現象を起こす。そのため、銀ナノ粒子インクによる識別子は、折り曲げてしまうと図 10.2 のように断線してしまい、触れても反応しなくなってしまうという問題がある。このように、銀ナノ粒子インクには欠点が多いが、一方では、用紙に識別子を直接印刷するため、力を入れてなぞっても識別子がちぎれにくいという利点がある。

一方、アルミニウム箔を用いて作製した識別子は、銀ナノ粒子インクのように酸化は発生しない。また、折り曲げても断線は発生しない。そのため、銀ナノ粒子インクを用いた識別子とは異なり、曲面にも貼り付けるという拡張例が考えられるという利点がある。一方、アルミニウム箔にて作製された識別子は、用紙に作製した識別子を貼り付けているため、使用中に力を加えすぎると識別子が用紙から剥がれたり、ちぎれたりしてしまうという欠点がある。

これらの問題に対する対処法として、使用する場面によって識別子に使用する導電性物質を使い分けるという方法が考えられる。本論文では、ユーザが力を入れても剥がれたりちぎれたりしないことを優先したい場合、銀ナノ粒子インクによる作製を推奨する。一方、ユーザが識別子を曲面に貼り付けたい場合は、アルミニウム箔による作製を推奨する。





図 10.1: (上) 通常の識別子. (下) 酸化して色が変わった識別子. 酸化により若干茶色くなっている. また, 上の識別子と異なり, 光を反射しなくなっている.

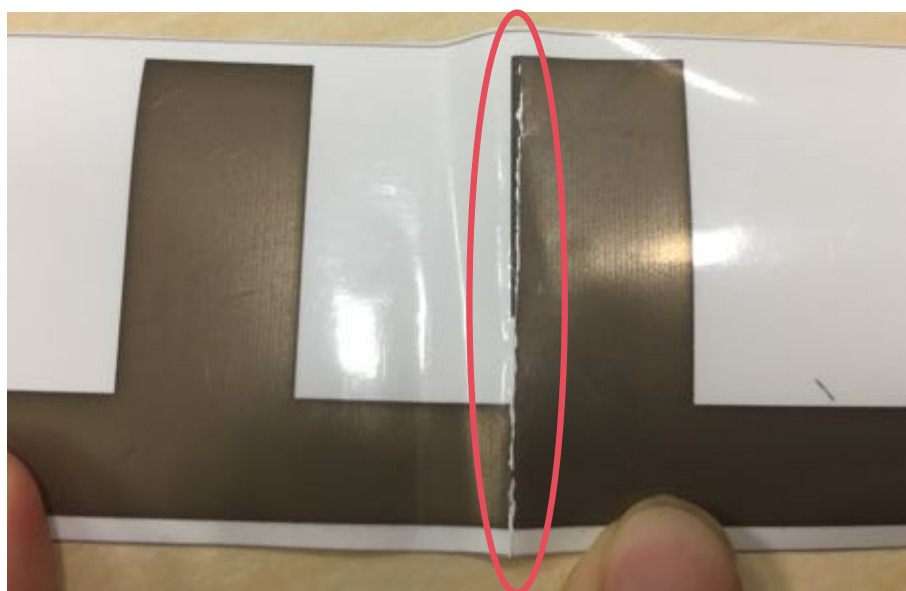


図 10.2: 折り曲げにより断線した識別子. 赤い円にて囲んだ部分が断線している.

## 10.2 カメラなどの機械との組み合わせによる識別子の使用範囲の拡張

本研究にて示した識別子の拡張として、カメラなどの機械と提案手法を組み合わせることが考えられる。本研究にて示したアプリケーションは、入力されたデータ群から情報を提供する際に、カメラなどの機械を用いないことを前提としていた。提案手法の拡張として、例えばペイントアプリケーションにて、カメラに映っている人物を特定することにより、同じアプリケーションを使っているにも関わらず、ユーザ毎に異なるショートカット配置とする、といった拡張が考えられる。

## 10.3 円状の識別子による作成可能なアプリケーションの拡張

本研究では、第3章にて識別子が前提する形状として示したような、直線状の識別子しか作製していない。しかし、提案手法にて示したアルゴリズムは、直線状の識別子でなければ対応できないような作りではない。そのため、同様のアルゴリズムを用いることにより、図10.3のような、円状に作製された識別子も同様のアルゴリズムにて認識することができる可能性がある。提案手法にて円状の識別子を用いる場合、マウスのホイールのような、回転入力を行うアプリケーションが作成可能になる。また、提案手法は、直線状の識別子と円状の識別子を組み合わせることにより、ペイントアプリケーションにて色を柔軟に変更するなど、より複雑なアプリケーションを作成できるようになる。

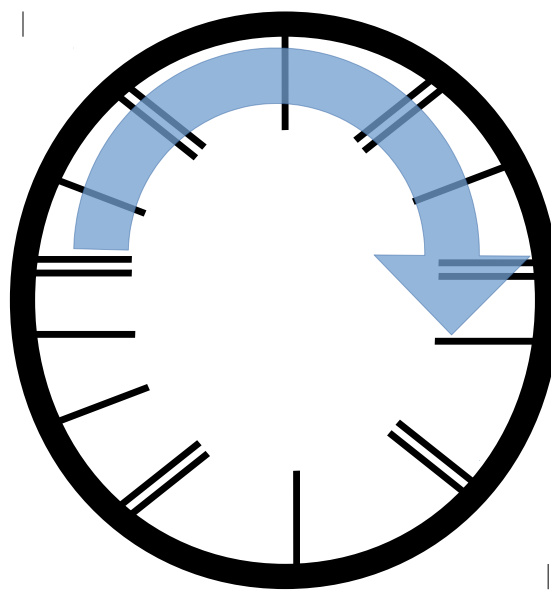


図 10.3: 円状に作製された識別子のイメージ。矢印のようになぞる。

## 10.4 回路の無線化による拡張

提案手法は、識別子と回路を接続する線として、単一ではあるが配線を必要とする。そのため、提案手法は、バーコードあるいはQRコードのような識別子ほど手軽に用いることができない。この問題への対処法として、著者はPaperID [LBC+16]という、導電性インクを用いて作製したセンサにRFIDタグを取り付ける研究に着目した。この研究は、センサと回路を結線にて結ばない、つまりセンサを無線化させる手法を提案している。この手法を本研究にも導入することにより、提案手法の識別子を無線化できる可能性がある。提案手法の識別子を無線化できた場合、第9章にて示したアプリケーションがより現実的かつ有用なものとなる。また、さらなる拡張として、識別子を単体にて机などに貼り付けておく。静電容量計測回路を持ったユーザが識別子に近づくと、その識別子と静電容量計測回路が接続され、識別子が使えるようになる、といった拡張も考えられる。

## 第11章 結論

本研究は、単一結線にて作製できる識別子の設計として、導電性物質にて作製された識別子に静電容量計測回路を単一の線にて接続し、触れた際の静電容量値の変化を用いてデータ入力を認識する手法を考案した。また、本研究は、用紙および環境による静電容量値の変化を調査した。さらに、本研究は macOS 用の実験アプリケーションを実装し、提案するシステムに最適な形状を調査した。最後に、本研究は提案するシステムの認識精度を調査する実験を行った。その結果、識別子を作製する際は、銀ナノ粒子インクとアルミニウム箔のどちらを使用するのか、状況によって選択することが必要であるとわかった。また、直線状の識別子を作製する場合は、細い線を複数配置する形状にすることにより、73.0%の認識精度にてデータ群を入力できるとわかった。さらに、入力途中で折り返してなぞった場合、65.0%の精度となることがわかった。認識精度の調査により、識別子と指や静電容量用ペンが接触する面積が認識率に影響を与えていることを発見し、その問題に対する対処法を提案した。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、志築文太郎先生、高橋伸先生には多くのご意見とご指導を頂きました。特に、志築文太郎先生には、他大学から先生の研究室に移り、ヒューマンインタフェースのことを1から学ぶ必要があった私に対して、日頃から研究の相談や実験設計について、また論文執筆に関すること等、数えきれないほど多くのご指導を頂きました。無事本論文を執筆することができたのは、志築文太郎先生のご助力があってのことです。深く感謝致します。

IPLABの皆様には、研究活動において様々なお助言を頂きました。特にWAVEチームの皆様には、チームゼミをはじめ、多様な場面で研究の進め方や論文の書き方など、様々なアドバイスを頂きました。研究について悩むことの多かった私に対し、親身に相談に乗ってくださり、論文執筆の際には、忙しい中、多くのお助言や添削をしていただきました。深く感謝致します。また、実験参加者としてご協力頂いた皆様に、感謝申し上げます。

最後に、筆者の生活面、精神面を支えてくださった家族と友人、大学院生活においてお世話になったすべての方々へ心より感謝致します。

## 参考文献

- [Ard] Arduino Team. Arduino 日本語リファレンス. <http://www.musashinodenpa.com/arduino/ref/index.php?f=1&pos=2174> 2017年12月20日に閲覧.
- [BFSV15] Jesse Burstyn, Nicholas Fellion, Paul Strohmeier, and Roel Vertegaal. PrintPut: Resistive and capacitive input widgets for interactive 3D prints. In *Human-Computer Interaction, INTERACT '15*, pp. 332–339, Cham, 2015. Springer International Publishing.
- [CG17] Justin Chan and Shyamnath Gollakota. Data storage and interaction using magnetized fabric. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '17*, pp. 655–663, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [CMPT11] Gabe Cohn, Daniel Morris, Shwetak N. Patel, and Desney S. Tan. Your Noise is My Command: Sensing gestures using the body as an antenna. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, pp. 791–800, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [DL01] Paul Dietz and Darren Leigh. DiamondTouch: A multi-user touch technology. In *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '01*, pp. 219–226, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [DRKY16] Claudia Daudén Roquet, Jeeun Kim, and Tom Yeh. 3D Folded PrintGami: Transform passive 3D printed objects to interactive by inserted paper origami circuits. In *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems, DIS '16*, pp. 187–191, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [GPBB<sup>+</sup>13] Tobias Grosse-Puppenthal, Yannick Berghoefer, Andreas Braun, Raphael Wimmer, and Arjan Kuijper. Opencapsense: A rapid prototyping toolkit for pervasive interaction using capacitive sensing. In *Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 152–159. IEEE, 2013.
- [GSO<sup>+</sup>14] Nan-Wei Gong, Jürgen Steimle, Simon Olberding, Steve Hodges, Nicholas Edward Gillian, Yoshihiro Kawahara, and Joseph A. Paradiso. PrintSense: A versatile sensing technique to support multimodal flexible surface interaction. In *Proceedings of the*

- 2014 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14, pp. 1407–1410, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [HBW11] Chris Harrison, Hrvoje Benko, and Andrew D. Wilson. OmniTouch: Wearable multitouch interaction everywhere. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 441–450, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [HSH11] Chris Harrison, Julia Schwarz, and Scott E. Hudson. TapSense: Enhancing finger interaction on touch surfaces. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 627–636, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [HSN<sup>+</sup>16] Takahiro Hashizume, Takuya Sasatani, Koya Narumi, Yoshiaki Narusue, Yoshihiro Kawahara, and Tohru Asami. Passive and contactless epidermal pressure sensor printed with silver nano-particle ink. In *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '16, pp. 190–195, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [HSP<sup>+</sup>08] Paul Holleis, Albrecht Schmidt, Susanna Paasovaara, Arto Puikkonen, and Jonna Häkkinen. Evaluating capacitive touch input on clothes. In *Proceedings of the 10th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '08, pp. 81–90, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [HTM11] Chris Harrison, Desney Tan, and Dan Morris. Skinput: Appropriating the skin as an interactive canvas. *Communications of the ACM*, Vol. 54, No. 8, pp. 111–118, 2011.
- [HVC<sup>+</sup>14] Steve Hodges, Nicolas Villar, Nicholas Chen, Tushar Chugh, Jie Qi, Diana Nowacka, and Yoshihiro Kawahara. Circuit Stickers: Peel-and-stick construction of interactive electronic prototypes. In *Proceedings of the 2014 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1743–1746, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [HW12] Sungjae Hwang and Kwang-yun Wohn. PseudoButton: Enabling pressure-sensitive interaction by repurposing microphone on mobile device. In *Proceedings of the 2012 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '12, pp. 1565–1570, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [HXH12] Chris Harrison, Robert Xiao, and Scott Hudson. Acoustic Barcodes: Passive, durable and inexpensive notched identification tags. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 563–568, New York, NY, USA, 2012. ACM.

- [KBD17] Konstantin Klamka, Wolfgang Büschel, and Raimund Dachselt. Illuminated interactive paper with multiple input modalities for form filling applications. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '17*, pp. 434–437, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [KG15] Çağdaş Karataş and Marco Gruteser. Printing multi-key touch interfaces. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '15*, pp. 169–179, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [KHC<sup>+</sup>13] Yoshihiro Kawahara, Steve Hodges, Benjamin S. Cook, Cheng Zhang, and Gregory D. Abowd. Instant Inkjet Circuits: Lab-based inkjet printing to support rapid prototyping of ubicomp devices. In *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '13*, pp. 363–372, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [KM14] Kunihiro Kato and Homei Miyashita. Extension Sticker: A method for transferring external touch input using a striped pattern sticker. In *Adjunct Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '14 Adjunct*, pp. 59–60, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [KM15] Kunihiro Kato and Homei Miyashita. Creating a mobile head-mounted display with proprietary controllers for interactive virtual reality content. In *Adjunct Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '15 Adjunct*, pp. 35–36, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [KM16] Kunihiro Kato and Homei Miyashita. 3D printed physical interfaces that can extend touch devices. In *Adjunct Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '16 Adjunct*, pp. 47–49, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [KST15] Daisuke Komoriya, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Task specific paper controller that can be created by users for a specific computer operation. In *17th International Conference on Human-Computer Interaction, HCI International '15*, pp. 418–428, Cham, 2015. Springer International Publishing.
- [LBC<sup>+</sup>16] Hanchuan Li, Eric Brockmeyer, Elizabeth J. Carter, Josh Fromm, Scott E. Hudson, Shwetak N. Patel, and Alanson Sample. PaperID: A technique for drawing functional battery-free wireless interfaces on paper. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, pp. 5885–5896, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [LLW<sup>+</sup>16] Joanne Lo, Doris Jung Lin Lee, Nathan Wong, David Bui, and Eric Paulos. Skintillates: Designing and creating epidermal interactions. In *Proceedings of the 2016 ACM*



*Conference on Designing Interactive Systems*, DIS '16, pp. 853–864, New York, NY, USA, 2016. ACM.

- [LP14] Joanne Lo and Eric Paulos. ShrinkyCircuits: Sketching, shrinking, and formgiving for electronic circuits. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 291–299, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [MRKU17] Denys J. C. Matthies, Thijs Roumen, Arjan Kuijper, and Bodo Urban. CapSoles: Who is walking on what kind of floor? In *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '17, pp. 9:1–9:14, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [MY17] Hiroyuki Manabe and Wataru Yamada. A capacitive touch sensing technique with series-connected sensing electrodes. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 645–654, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [OGT<sup>+</sup>13] Simon Olberding, Nan-Wei Gong, John Tiab, Joseph A. Paradiso, and Jürgen Steimle. A cuttable multi-touch sensor. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 245–254, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [OSOHS15] Simon Olberding, Sergio Soto Ortega, Klaus Hildebrandt, and Jürgen Steimle. Foldio: Digital fabrication of interactive and shape- changing objects with foldable printed electronics. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 223–232, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [OST13] 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.
- [OWS14] Simon Olberding, Michael Wessely, and Jürgen Steimle. PrintScreen: Fabricating highly customizable thin-film touch-displays. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 281–290, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [PN13] Roshan Lalintha Peiris and Ryohei Nakatsu. TempTouch: A novel touch sensor using temperature controllers for surface based textile displays. In *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '13, pp. 105–114, New York, NY, USA, 2013. ACM.

- [PSLS12] Ivan Poupyrev, Philipp Schoessler, Jonas Loh, and Munehiko Sato. *Botanicus Interacticus: Interactive plants technology*. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '12, pp. 4:1–4:1, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [RGH<sup>+</sup>12] Christian Rendl, Patrick Greindl, Michael Haller, Martin Zirkl, Barbara Stadlober, and Paul Hartmann. *PyzoFlex: Printed piezoelectric pressure sensing foil christian*. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 509–518, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [RS06] Jun Rekimoto and Carsten Schwesig. *PreSenseII: Bi-directional touch and pressure sensing interactions with tactile feedback*. In *Proceedings of the 2006 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '06, pp. 1253–1258, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [SKW<sup>+</sup>11] Yuta Sugiura, Gota Kakehi, Anusha Withana, Calista Lee, Daisuke Sakamoto, Maki Sugimoto, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. *Detecting shape deformation of soft objects using directional photorefectivity measurement*. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 509–516, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [SLD<sup>+</sup>16] Martin Schmitz, Andreas Leister, Niloofar Dezfuli, Jan Riemann, Florian Müller, and Max Mühlhäuser. *Liquido: Embedding liquids into 3D printed objects to sense tilting and motion*. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, pp. 2688–2696, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [SON] SONY. MESH. <http://meshprj.com/jp/> 2017年12月27日に閲覧.
- [SPH12] Munehiko Sato, Ivan Poupyrev, and Chris Harrison. *Touché: Enhancing touch interaction on humans, screens, liquids, and everyday objects*. In *Proceedings of the 2012 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 483–492, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [SZH12] Valkyrie Savage, Xiaohan Zhang, and Björn Hartmann. *Midas: Fabricating custom capacitive touch sensors to prototype interactive objects*. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 579–588, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [TKN14] Takahiro Tsujii, Naoya Koizumi, and Takeshi Naemura. *Inkantatory Paper: Dynamically color-changing prints with multiple functional inks*. In *Adjunct Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST'14 Adjunct, pp. 39–40, New York, NY, USA, 2014. ACM.

- [TNS16] Masaya Tsuruta, Shuta Nakamae, and Buntarou Shizuki. RootCap: Touch detection on multi-electrodes using single-line connected capacitive sensing. In *Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '16*, pp. 23–32, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [TST16] Ryosuke Takada, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. MonoTouch: Single capacitive touch sensor that differentiates touch gestures. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '16*, pp. 2736–2743, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [VdZL17] Ty Van de Zande and Dan Lockton. Printerface: Screen printed electroluminescent touch interface. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '17*, pp. 450–453, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [WSR<sup>+</sup>12] Alexander Wiethoff, Hanna Schneider, Michael Rohs, Andreas Butz, and Saul Greenberg. Sketch-a-TUI: Low cost prototyping of tangible interactions using cardboard and conductive ink. In *Proceedings of the 6th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI '12*, pp. 309–312, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [ZLH17] 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.
- [エレ] エレファンテック株式会社. AgIC. <https://agic.stores.jp> 2017年12月26日に閲覧.
- [加藤 14] 加藤邦拓, 宮下芳明. 導電性インク複合機を用いたマルチタッチパターン生成手法. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2014, No. 29, pp. 1–6, 2014. 情報処理学会.
- [加藤 15] 加藤邦拓, 宮下芳明. 紙窓: カード内領域を独立したタッチパネルディスプレイのように扱うインタフェース. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 17, No. 1, pp. 245–253, 2015. ヒューマンインタフェース学会.
- [山路 17] 山路大樹, 久保勇貴, 杉山慎一郎, 志築文太郎, 高橋伸. プロトタイピングのための紙製タッチセンサの設計及び操作認識プログラムの開発. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2017, No. 24, pp. 1–8, 2017. 情報処理学会.
- [真鍋 15] 真鍋宏幸, 稲村浩. 1つのタッチセンサを用いたマルチタッチジェスチャ認識手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 4, pp. 1193–1202, 2015. 情報処理学会.

- [川畑 17] 川畑裕也, 志築文太郎, 高橋伸. Swipemarker: 静電容量方式マルチタッチパネルにおけるスワイプ操作を用いたマーカ. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2017, No. 22, pp. 1–7, 2017. 情報処理学会.
- [長屋 96] 長屋隆之, 山崎知彦, 原昌宏, 野尻忠雄. 高速読取り対応 2 次元コード [QR コード] の開発. 情報処理学会第 52 回全国大会講演論文集, pp. 253–254. 情報処理学会, 1996.

## その他の論文

- 査読のない発表論文

- (1) 山路大樹, 久保勇貴, 杉山慎一郎, 志築文太郎, 高橋伸, 「プロトタイピングのための紙製タッチセンサの設計及び操作認識プログラムの開発」, 情報処理学会研究報告, Vol.2016-HCI-171, 情報処理学会, 2017年5月, 8 pages

## 付録A 実験に使用した電極および識別子

各実験に使用した電極および識別子（実物大）を示す。

